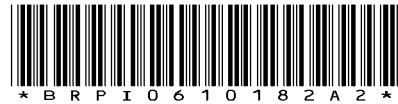


República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

(21) **PI0610182-8 A2**



* B R P I O 6 1 0 1 8 2 A 2 *

(22) Data de Depósito: 19/06/2006
(43) Data da Publicação: 01/06/2010
(RPI 2056)

(51) *Int.Cl.:*
G05B 21/00

(54) Título: **MÉTODOS E SISTEMAS PARA REPROJETAR PROJETOS DE MISTURA DE CONCRETO E INSTALAÇÕES DE FABRICAÇÃO PREEXISTENTES E OTIMIZAÇÃO DE PROJETO E PRODUÇÃO DE CONCRETO**

(30) Prioridade Unionista: 17/06/2005 US 60/691,916

(73) Titular(es): Icrete, LLC.

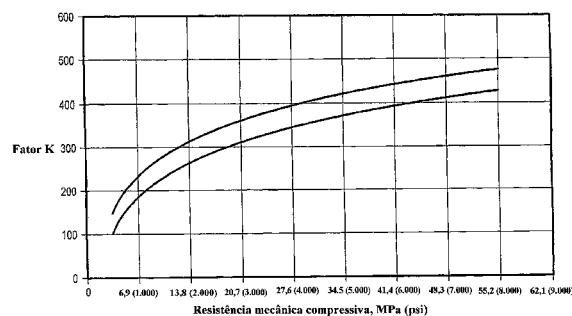
(72) Inventor(es): Per Just Andersen, Simon K. Hodson

(74) Procurador(es): Alexandre Ferreira

(86) Pedido Internacional: PCT US2006023863 de 19/06/2006

(87) Publicação Internacional: WO 2006/138732 de 28/12/2006

(57) **Resumo:** Processos de otimização de projetos podem ser usados para projetar misturas de concreto tendo propriedades otimizadas, incluindo resistência mecânica e assentamento desejados a um custo mínimo. Os processos de otimização de projetos usam um processo implementado por computador, que é capaz de projetar e, virtualmente, testar milhões de composições de concreto hipotéticas, usando algoritmos matemáticos, que inter-relacionam várias variáveis que afetam a resistência mecânica, o assentamento e outros aspectos desejados. O procedimento de otimização de projeto utiliza uma constante (ou fator) K, dentro da equação de Feret de resistência mecânica, que varia (por exemplo, logaritmicamente) com a resistência mecânica do concreto, para qualquer determinado conjunto de entradas de matérias-primas e equipamento de processamento. Isso significa que a eficiência ou efetividade de aglutinação do cimento hidráulico aumenta com o aumento da concentração, desde que o concreto se mantenha otimizado. O conhecimento de como o fator K varia com a eficiência de aglutinação e a resistência mecânica é uma ferramenta potencial para várias circunstâncias. Um processo de produção de concreto pode incluir a medida precisa das matérias-primas, para minimizar a variação entre as resistências mecânicas prevista e efetiva, bem como o controle cuidadoso do teor de água durante todo o processo de produção e distribuição.



"MÉTODOS E SISTEMAS PARA REPROJETAR PROJETOS DE MISTURA DE CONCRETO E PLANTAS PREEXISTENTES E OTIMIZAÇÃO DE PROJETO E PRODUÇÃO DE CONCRETO"

Antecedentes da invenção

5 1. Campo da invenção

A invenção é no campo de composições de concreto, mais particularmente, na otimização de projeto de composições de concreto com base em fatores, tais como desempenho e custo. A invenção se refere, mais particularmente, ao projeto e à produção de concreto usando processos aperfeiçoados, que utilizam mais eficientemente todos os componentes de um ponto de vista de desempenho e custo, e minimizar a variabilidade da resistência mecânica, bem como processos únicos para reprojeto de um projeto de mistura de concreto existente e atualização da mistura em batelada e/ou sistema de transferência de uma planta de produção de concreto existente.

2. A tecnologia relevante

20 O concreto é um material de construção ubíquo. O concreto acabado resulta do endurecimento de uma mistura cimenteira, que compreende, tipicamente, cimento hidráulico, agregado, água, e misturas opcionais. Os termos "concreto", "composição de concreto" e "mistura de concreto" significam o produto endurecido, acabado ou a mistura cimenteira não
25 endurecida, dependendo do contexto. Pode referir-se também ao "projeto de mistura", que é a fórmula ou receita usada para produzir uma composição de concreto. Em um processo típico para produção de concreto misto de trânsito, os compo-

5 nentes do concreto são adicionados e misturados no tambor de um caminhão de distribuição de concreto usual, tipicamente enquanto o caminhão está em trânsito para o local de distribuição. O cimento hidráulico reage com a água para formar um aglutinante, que endurece com o tempo para manter os outros componentes unidos.

10 O concreto pode ser projetado para ter resistência, assentamento e outras características materiais variáveis, que conferem a ele uma ampla aplicação para uma vasta variedade de diferentes usos. As matérias-primas usadas na produção de cimento hidráulico e concreto são relativamente baratas e podem ser encontradas virtualmente em qualquer lugar, embora as características dos materiais possam variar significativamente. Isso permite que o concreto seja produzido em todo o mundo próximo do local no qual é necessário. Os mesmos atributos que tornam o concreto ubíquo (isto é, baixo custo, facilidade de uso e ampla disponibilidade de matérias-primas) também se mantêm pelo fato de serem inteiramente controlados e todo o potencial deles desenvolvido e explorado.

25 As plantas de concreto oferecem e vendem, tipicamente, várias diferentes composições de concreto usuais, que variam em termos dos seus assentamento e resistência mecânica. Cada composição de concreto é produzida tipicamente seguindo um projeto de mistura, ou receita, padrão, para gerar uma composição que tem o assentamento desejado e que vai endurecer em concreto tendo a resistência mecânica desejada. Infelizmente, há, freqüentemente, uma alta variabilidade en-

tre a resistência (ou projeto) prevista de um determinado projeto de mistura e a resistência mecânica efetiva entre as diferentes bateladas, mesmo na ausência de variabilidade substancial na qualidade ou características das entradas de 5 matérias-primas. Parte desse problema resulta de uma desconexão fundamental entre os requisitos, controles e limitações de operações "no campo" na planta em batelada de concreto, e o especialista de pesquisa em condições laboratoriais. Ainda que os especialistas sejam capazes de projetar 10 uma mistura de concreto tendo uma resistência mecânica prevista, que reflete, estreitamente, a resistência mecânica efetiva quando misturado, curado e testado, os especialistas não preparar, tipicamente, composições de concreto em plantas de concreto para transferência para clientes. O pessoal 15 de concreto que produz, mistura e transporta concreto para os locais de uso perdem, inerentemente, a capacidade de controlar a variação tipicamente grande nas entradas de matérias-primas, que estão disponíveis quando da condução de pesquisa em laboratório. O conhecimento superior de concreto 20 por especialistas de laboratório é portanto não facilmente aplicável ou transferível à indústria de concreto, em geral.

Em geral, as misturas de concreto são projetadas com base nesses fatores, como, (1) tipo e qualidade do cimento hidráulico, (2) tipo e qualidade dos agregados, (3) 25 qualidade da água, e (4) clima (por exemplo, temperatura, umidade, vento e intensidade solar, todos podendo provocar variabilidade no assentamento, trabalhabilidade e resistência mecânica do concreto). Para garantir uma resistência me-

cânica e assentamento mínimos específicos, como requeridos pelos clientes (e evitar risco no caso de falha), os produtores de concreto seguem tipicamente um processo referido como "superprojeto" do concreto que vendem. Por exemplo, se
5 uma resistência mecânica no campo de 28 dias de um projeto de mistura de concreto particular é conhecido variar entre 17,24 MPa e 27,6 MPa (2.500 psi e 4.000 psi), quando produzido e transferido, um produtor deve proporcionar tipicamente ao cliente uma composição de concreto baseada em um projeto de mistura que obtém uma resistência mecânica de 27,60
10 MPa (4.000 psi), sob condições laboratoriais controladas, para garantir ao cliente uma resistência mecânica mínima de 17,24 MPa (2.500 psi) por processo comercial. A falha em transferir concreto tendo a resistência mecânica requerida
15 mínima pode provocar problemas estruturais, mesmo falha, que pode, por sua vez, deixar uma planta de concreto legalmente responsável por tais problemas ou falha. Desse modo, o superdimensionamento é uma própria segurança contra transferir concreto que esteja muito fraco, com um custo para o produtor igual ao custo aumentado de concreto superdimensionado.
20 Esse custo deve ser absorvido pelo proprietário, não beneficia o cliente e, em um mercado de suprimento competitivo, não pode ser facilmente passado para o cliente.

O superdimensionamento envolve, tipicamente, a adição de excesso de cimento hidráulico em uma tentativa para
25 garantir uma resistência mecânica aceitável mínima do produto concreto final no assentamento desejado. Em virtude do cimento hidráulico ser tipicamente o componente mais caro do

concreto (além das misturas especiais usadas em proporções relativamente baixas), a prática do superdimensionamento de concreto pode aumentar significativamente o custo. No entanto, a adição de mais cimento não garante um melhor concreto, pois o aglutinante da pasta de cimento é freqüentemente um componente estrutural de resistência mecânica compressiva mais baixa, comparado com os agregados e o componente objeto para a maior variabilidade dinâmica. A sobrecimentação pode resultar em microrretração de prazo curto e escoamento de longo prazo. Não obstante o custo e os efeitos potencialmente nocivos, é prática atual para os produtores de concreto superprojetar simplesmente por adição de excesso de cimento para cada composição de concreto que vende, do que tentar e reprojetar cada projeto de mistura padrão. Isso é porque não há atualmente nenhum modo confiável ou sistemático para otimizar os projetos de mistura preexistentes do produtor diferentes do teste de tentativa e erro intenso em tempo e caro, para tornar mais eficiente o uso do aglutinante de cimento hidráulico e/ou considerar as variações nas entradas de matérias-primas.

A causa da variabilidade de resistência mecânica observada não é sempre bem entendida, nem pode ser controlada com segurança usando o equipamento existente e seguindo os protocolos usuais em plantas de mistura pronta típicas. O entendimento da inter-relação e dos efeitos dinâmicos dos diferentes componentes dentro do concreto está tipicamente fora da capacidade dos empregados das plantas de concreto e dos motoristas dos caminhões de concreto, usando equipamento

e procedimentos existentes. Além do mais, o que os especialistas no campo de concreto devem saber, ou acreditar que sabem, sobre a produção de concreto, não podem ser facilmente transferidos para as mentes e hábitos daqueles que trabalham efetivamente no campo (isto é, aqueles que colocam misturas de concreto em caminhões de transferência de concreto, aqueles transferem o concreto a um local de uso, e aqueles que colocam e acabam o concreto em locais de uso), por causa da tremenda diferença nos controles e no âmbito da variação de materiais. A desconexão entre o que ocorre em um laboratório e o que realmente acontece durante a produção de concreto pode produzir projetos de mistura falhos, enquanto aparentemente otimizados, quando observados no laboratório, pode não ser otimizada na realidade, quando o projeto de mistura é aumentado em escala para a produção em massa de concreto com o tempo.

Além da variabilidade resultante dos projetos de mistura inicial inferiores, outra razão porque o concreto superdimensionado deliberadamente de plantas de concreto é, inicialmente, manter a consistência da fabricação. Essas são quatro grandes causas ou práticas sistêmicas, que têm, historicamente levado a uma variabilidade de resistência mecânica de concreto substancial: (1) o uso de materiais que variam em qualidade e/ou características; (2) o uso de procedimentos de formação de bateladas inconsistentes; (3) a sobrecimentação; e (4) a adição de água de batelada insuficiente inicialmente e depois fazer os ajustes de assentamento no local de uso, tipicamente pelo motorista do caminhão de

concreto, por adição de uma quantidade descontrolada de água ao tambor de mistura. A variação total nos materiais e nas práticas pode ser medida por estatística de desvio padrão.

A primeira causa de variabilidade entre as resistências mecânicas do concreto teórica e efetiva, para um determinado projeto de mistura, é a variabilidade no suprimento de matérias-primas . Por exemplo, o tamanho de partícula, a distribuição de tamanhos, a morfologia e a densidade de compactação das partículas do cimento hidráulico e dos agregados (por exemplo, grosseira, média e fina) pode variar de batelada em batelada. Mesmos as ligeiras diferenças podem afetar bastante quanto de água deve ser adicionada para produzir uma composição tendo o assentamento necessário. Em virtude da resistência mecânica do concreto ser altamente dependente da razão de água para cimento, a variação do teor de água para considerar as variações nas características das partículas sólidas, para manter o assentamento necessário, provoca uma variabilidade substancial na resistência mecânica do concreto. A menos que uma produção pode eliminar as variações na qualidade da matéria-prima, o superdimensionamento é geralmente o único modo possível de garantir que uma composição de concreto, tendo o assentamento necessário, também satisfaz os requisitos mínimos de resistência mecânica.

Mesmo se um produtor de concreto considera as variações na qualidade das matérias-primas , o superdimensionamento é ainda necessário para o uso de tabelas de projeto de mistura usuais. As tabelas padronizadas são baseadas nos

projetos de mistura efetivos, usando um tipo e a morfologia dos agregados que foram preparados e testados. Proporcionam valores de assentamento e resistência mecânica baseados em uma ampla variedade de variáveis, tal como a concentração de cimento, agregados, água e quaisquer misturas, bem como o tamanho dos agregados. O uso de tabelas padronizadas é rápido e simples, mas pode apenas aproximar o assentamento e a resistência mecânica efetivos, mesmo quando as variações nas matérias-primas são medidas. Isso é porque os vários projetos de mistura padronizados é finito, apesar da variabilidade no tipo, qualidade e concentração (isto é, razão) de matérias-primas serem virtualmente infinitas. Em razão das tabelas padronizadas poderem apenas se aproximar das entradas de matérias-primas reais, pode haver uma variabilidade significativa entre a resistência mecânica prevista e a real, quando do uso de projetos de mistura de tabelas padronizadas. Em virtude dessa variabilidade, as únicas duas opções são: (1) teste de tentativa e erro intenso em tempo e caro para encontrar projetos de misturas ótimos, para cada nova batelada de matérias-primas, ou (2) superdimensionamento. Os produtores optam, tipicamente, por superdimensionamento, especialmente à luz de outros fatores do que o projeto de mistura, o que provoca variações entre a resistência mecânica de projeto e a real.

25 A segunda causa da variabilidade de resistência mecânica é a incapacidade para distribuir precisamente os componentes necessários para preparar adequadamente cada batelada de concreto. Ainda que balanças modernas possam pro-

porcionar teoricamente leituras muito precisas, algumas vezes dentro de 0,05% do peso verdadeiro ou real, os alimentadores e outros equipamento de dispensação típicos, usados para dispensar os componentes no recipiente de mistura (por exemplo, o tambor de um caminhão misturador de concreto), são freqüentemente inadequados para abrir e fechar, consistentemente, no momento preciso, para garantir que a quantidade desejada de um dado componente seja verdadeiramente dispensada no recipiente de mistura. Para muitos produtores de concreto, o custo acarretado pela atualização ou uma calibração adequada dos seus equipamentos de dosagem e dispensação é mais alto do que o simples superdimensionamento do concreto, particularmente, uma vez que a maior parte dos produtos não tem qualquer idéia de quanto na prática custa de fato o superdimensionamento do concreto e porque é considerado como uma variável de custo e não um custo de investimento.

O superdimensionamento freqüentemente acarreta a terceira causa de variabilidade de resistência mecânica, que é a de supercimentação. A supercimentação envolve o aumento da proporção de cimento hidráulico, em uma tentativa de obter ou garantir uma resistência mecânica mínima, ao superar o efeito na resistência mecânica por adição aleatória de água, após a formação da batelada, para ajustar o assentamento. Isso, no entanto, pode acarretar aumentos na variabilidade da resistência mecânica, como pasta de cimento endurecida, que é, tipicamente, mais fraca como um elemento estrutural, comparada com os componentes de agregados. Ainda que

a adição de mais concreto possa aumentar a resistência mecânica de aglutinação, proporcionada pela pasta de cimento, que une os agregados, mais cimento pode também enfraquecer o concreto, por deslocamento dos materiais agregados mais fortes com a pasta de cimento mais fraca, como um componente estrutural do concreto endurecido. A variabilidade da resistência mecânica ocorre em consequência dos efeitos mencionados acima trabalhando em direções opostas, mas em diferentes proporções entre as bateladas diferentes de concreto (por exemplo, devido às diferenças na razão de água para cimento, qualidade e características do cimento hidráulico, agregados e água, e como o concreto é tratado quando transferido para um local de uso).

A supercimentação também pode provocar microrretração, particularmente na ou próximo da superfície, devido à evaporação de água, o que reduz a resistência mecânica e a durabilidade da superfície de concreto. A microrretração, provocada por supercimentação e distribuição inferior dos componentes, pode provocar fissuras e rachaduras em um período de 1 a 2 anos de produção. A supercimentação pode provocar escoamento, que é o crescimento dinâmico (e usualmente indesejável) de massas de concreto, devido à hidratação e ao crescimento de longo prazo continuado de produtos de hidratação dos grãos de cimento.

A quarta causa da variabilidade da resistência mecânica de concreto é a prática pelos motoristas de caminhões de concreto de adicionar água ao concreto, após a formação da batelada, em uma tentativa para aperfeiçoar ou modificar

o concreto, para torná-lo mais fácil de despejar, bombear, trabalhar e/ou acabar. Em muitos casos, o concreto é projetado e produzido uniformemente para que tenha um assentamento padrão (por exemplo, 3 in), quando o caminhão de concreto 5 deixa o lote, com a expectativa de que o assentamento final necessário seja alcançado no local por adição de água. Esse procedimento é impreciso, porque os motoristas de caminhões de concreto seguem o "ver e sentir". Uma vez que a adição de água diminui significativamente a resistência mecânica final 10 do concreto, a planta de concreto deve acumular um grau correspondente de maior resistência mecânica inicial, para superar as possíveis ou esperadas diminuições na resistência mecânica, resultantes da adição de água subsequente. Em virtude da resistência mecânica poder ser diminuída por proporções variáveis, dependentes da proporção efetiva de água adicionada pelo motorista, o produtor deve assumir um cenário de pior caso de perda máxima de resistência mecânica, quando do projeto do concreto, para garantir que o concreto satisfaz ou excede a resistência mecânica necessária. 15

20 Em vista das variáveis apresentadas acima, que podem diferir em grau e âmbito dia a dia, um produtor de concreto pode crer ser mais prático superdimensionar as suas composições de concreto em vez de considerar e controlar as variáveis que podem afetar a resistência mecânica, assentamento e outras propriedades do concreto. O superdimensionamento não é, no entanto, apenas inútil como uso ineficiente 25 de matérias-primas, algumas proporcionando concreto que é substancialmente mais resistente mecanicamente do que é ne-

cessário, o que pode ser perigoso. Por exemplo, em virtude do concreto mais resistente mecanicamente ser freqüentemente mais quebradiço do que o concreto mais fraco, pode falhar antes do concreto mais fraco, quando submetido às forças de um terremoto.

Em uma tentativa para projetar mais eficientemente composições de concreto e considerar as variações no tamanho de partícula, a distribuição de tamanhos de partícula, a morfologia e as densidades de compactação dos vários componentes sólidos entre as diferentes bateladas de cimentos e agregados, os inventores desenvolveram previamente um processo de otimização de projeto, que aperfeiçoou bastante os processos tradicionais para o projeto de misturas de concreto. Esse processo é descrito na patente U.S. 5.527.387 de Anderson et al, intitulada "Design Optimized Compositions and Computer Implemented Processes for Microstructurally Engineering Cementitious Mixtures" (a seguir "patente Anderson"). Sucintamente, o processo de otimização de projeto descrito na patente de Andersen vai ser referido como o "programa DOC" (o termo "DOC" sendo um acrônimo para "concreto de projeto otimizado").

O programa DOC se refere matematicamente às propriedades de resistência mecânica, assentamento e outros aspectos, tais como custo, coesão e durabilidade, com base nas concentrações e qualidades das várias entradas de matérias-primas. O programa DOC é capaz de projetar e virtualmente "testar" milhões de diferentes projetos de misturas hipotéticas em segundos, usando um computador. Isso reduz bastante

a quantidade de tempo necessária para conduzir o teste de tentativa e erro, que seria de outro modo necessário para identificar uma mistura de concreto, que é otimizada para resistência mecânica, assentamento, custo e/ou outros aspectos desejados. O objeto do programa DOC é identificar um projeto de mistura ótimo, de entre um grande número de projetos de misturas hipotéticas, com base nesses aspectos desejados, como assentamento, resistência mecânica e custo. O programa DOC preenche os requisitos inerentes nas tabelas padronizadas, que incluem um número relativamente pequeno de projetos de misturas, em vista da variabilidade das entradas de matérias-primas . O programa DOC pode projetar e virtualmente "testar" milhões de diferentes projetos de mistura, incluindo aqueles se encaixando nos vãos das tabelas padronizadas, em muito menos tempo do que leva para projetar e testar um projeto de mistura usando os métodos convencionais de tentativa e erro.

Primeiro, as matérias-primas são cuidadosamente testadas, para determinar as características que afetam o assentamento, a resistência mecânica, o custo e/ou outros aspectos desejados de composições cimenteiras produzidas delas. Esses incluem, por exemplo, o tamanho de partícula e a densidade de compactação dos vários componentes dos agregados (por exemplo, agregados grandes, médios e pequenos) e partículas de cimento hidráulico, e o efeito de uma ou mais misturas ótimas (por exemplo, poeira de cinza, redutores de água, etc.). Uma vez que as matérias-primas tenham sido caracterizadas com o grau necessário de precisão, as suas ca-

racterísticas são introduzidas em um computador, usado para conduzir o processo de otimização do programa DOC.

Depois, o programa DOC projeta um grande número de misturas de concreto hipotéticas, todas tendo assentamento e
5 resistência mecânica teóricos, por variação das concentrações de cimento, assentamento, água e misturas opcionais. Os assentamento e resistência mecânica previstos de todas as misturas de concreto hipotéticas são determinados por introdução das variáveis (por exemplo, a concentração e as características das matérias-primas) em um sistema de equações
10 matemáticas inter-relacionadas. Uma das equações utilizadas no programa DOC é uma variação da equação de resistência mecânica de Feret, que indica que a resistência mecânica compressiva da composição de concreto endurecida final é proporcional ao quadrado da razão volumétrica de cimento hidráulico para pasta de cimento, que consiste de cimento, água e ar:
15

$$\sigma = K \cdot \left(\frac{V_c}{V_c + V_w + V_a} \right)^2$$

A constante "K" dentro da equação proporciona as unidades e a grandeza da resistência mecânica adequadas. A
20 equação de resistência mecânica pode ser modificada, como se segue, para prever a resistência mecânica do concreto, que inclui, adicionalmente, outros aglutinantes, tais como poeira de cinzas da classe f, como parte da pasta de cimento:

$$\sigma = K \cdot \left(\frac{V_c + 0.3V_{FA}}{V_c + 0.3V_{FA} + V_w + V_A} \right)^2$$

O programa DOC pode ser conduzido de uma maneira iterativa, na qual cada iteração produz uma mistura de concreto hipotética, tendo assentamento e resistência mecânica previstos, que ficam mais próximos dos assentamento e resistência mecânica do que cada iteração anterior. Além dos assentamento e resistência mecânica, o programa DOC pode otimizar o concreto para outros aspectos desejados, tais como custo, trabalhabilidade ou coesão. Desse modo, no caso no qual várias misturas de concreto diferentes podem ter os assentamento e resistência mecânica desejados, o programa DOC pode identificar quais das misturas é a "ótima", de acordo com um ou mais critérios (por exemplo, custo, trabalhabilidade e/ou coesão).

Não obstante o que foi mencionado acima, o programa DOC, quando inventado inicialmente, era baseado na consideração, bem aceita na técnica, que a constante K (ou "fator K") dentro da equação de resistência mecânica de Feret, é uma constante real e não varia, desde que sejam usados os mesmos tipos de aparelho de mistura e fonte de matérias-primas a cada vez. Foi bem aceito na técnica que se essas variáveis são mantidas constantes, o fator K se mantém constante, independentemente das variações na concentração de cimento hidráulico e na resistência mecânica do concreto. Em consequência dessa consideração bem aceita, o programa DOC precisou de correções pós-projeto significativas, mesmo tes-

te e reprojeto significativos de composições de concreto, usando um ou mais dos projetos de mistura "ótimos" gerados pelo programa. Desse modo, a incapacidade do programa DOC de considerar a variabilidade dinâmica do fator K limitou a aplicação prática de uma ferramenta de otimização de projeto de outro modo poderosa.

Sumário da invenção

Descobriu-se então que a constante K (ou o "fator K") dentro da equação de resistência mecânica de Feret, não é uma constante, mas varia na dependência da eficiência com a qual o cimento hidráulico é capaz de aglutinar ou ligar as partículas dos agregados entre si. Isto é verdade mesmo se o aparelho de mistura, a resistência mecânica do agregado e outros fatores que afetam a resistência mecânica sejam mantidos constantes. O fator K, que varia dinamicamente com a eficiência de aglutinação do aglutinante de cimento hidráulico, pode ser determinado empiricamente, com base na resistência mecânica do concreto. Conhecendo-se a variabilidade dinâmica do fator K, é possível que previsões mais precisas de resistência mecânica do concreto, quando da condução de um procedimento de otimização de projeto, comparadas com um procedimento de otimização que considera que o fator K se mantém constante, desde que o aparelho de mistura e as matérias-primas também se mantenham constantes. O procedimento de otimização inventivo (a seguir "processo DOC aperfeiçoado") identifica eficientemente um ou mais projetos de mistura otimizados, com menos teste de tentativa e erro, desde que o fator K, no primeiro caso, reduza naturalmente a ne-

cessidade para a correção de erros, o que surgiria de outro modo por uso de um fator K incorreto para a previsão de resistência mecânica de concreto.

Embora a eficiência de aglutinação de cimento hidráulico e, portanto, o fator K, não possa ser medida diretamente, o fator K para uma dada composição de concreto pode ser determinado indiretamente. Por rearranjo da equação de Feret, pode-se resolver para K por conhecimento da resistência mecânica compressiva, volume do cimento hidráulico e volume da pasta de cimento. Por teste de uma gama de composições de concreto usuais, vendidas por vários fabricantes, e depois resolvendo para K, os inventores verificaram surpreendentemente que o fator K variou com a resistência mecânica do concreto efetiva, que o fator K de concreto preparado adequadamente aumentou com o aumento da resistência mecânica compressiva e segue uma curva logarítmica. A curva logarítmica tem um limite teórico correspondente à composição de concreto, tendo uma perfeita distribuição dos componentes e uma eficiência de aglutinação do sistema da pasta, o que apenas ocorre a uma resistência mecânica muito alta (por exemplo, contendo a razão de pasta para agregado especialmente ótima e uma razão de água para cimento de cerca de 0,17 e tendo uma distribuição perfeita de pasta e agregados por toda a composição de concreto). Em resistências mecânicas mais baixas representativas das necessidades e das especificações típicas da produção, o fator K se situa abaixo do limite teórico. Isso indica que o cimento hidráulico não é capaz de atingir a sua eficiência de aglutinação teórica mais alta em

resistências mecânicas mais baixas, mas apenas se aproxima dela em resistências mecânicas mais altas.

Sabendo-se como o fator K e, portanto, a eficiência de aglutinação do cimento hidráulico, varia com a resistência mecânica, aumenta-se bastante a precisão pela qual um
5 procedimento de otimização, que utiliza uma equação de resistência mecânica adequada, pode prever resistência mecânica de cimento hidráulico para um grande número de projetos de misturas hipotéticas. Por outro lado, o fator K é inde-
10 pendente das variações em assentamento, provocadas por variação da concentração de água e/ou das variações no tamanho e/ou morfologia dos agregados. Usando-se os princípios descritos acima relativos ao fator K, o processo DOC aperfeiçoado pode identificar com mais precisão um ou mais projetos
15 de misturas otimizados de entre muitos projetos de misturas hipotéticas. O processo DOC aperfeiçoado produz, eficientemente, composições de concreto otimizadas, que garantem um assentamento e uma resistência mecânica mínimos específicos, ao menor custo e com um mínimo de variabilidade devido a
20 projeto inferior. O processo DOC aperfeiçoado é mais eficiente do que o programa DOC original, porque o conhecimento de antemão de como o fator K varia com a resistência mecânica minimiza a quantidade de correções pós-projeto (por exemplo, por teste de tentativa e erro), que pode ser de outro
25 modo necessária.

Um objeto do processo DOC aperfeiçoado é produzir projetos de misturas otimizados, que reduzem, substancialmente, o superdimensionamento de concreto, comparados com os

projetos de mistura convencionais usados pelos produtores de concreto. Em um aspecto da invenção, o processo DOC aperfeiçoado pode ser usado para criar um ou mais projetos de misturas otimizados, que garantem um concreto tendo assentamento e resistência mecânica mínimos específicos, enquanto também reduzindo o custo perdido provocado por superdimensionamento. Outro aspecto envolve a otimização dinâmica de projetos de mistura de concreto, com base em realimentação relativa às variações em diferentes bateladas de matérias-primas. Em mais um outro aspecto, o processo DOC aperfeiçoado pode ser usado para reprojeter um ou mais projetos de mistura existentes de um produtor de concreto. A identificação das variações entre o fator K de projeto efetivo (ou aparente) de um projeto de mistura existente e o fator K ótimo ou teórico, correspondente à resistência mecânica de projeto, pode ser usada para determinar a existência e o grau de superdimensionamento de concreto. O aperfeiçoamento do projeto de mistura utiliza melhor o cimento hidráulico e otimiza a eficiência de aglutinação da pasta de cimento por redução da variabilidade da própria resistência mecânica e da necessidade de superdimensionamento, para compensar essa variabilidade.

Além de proporcionar projetos de mistura otimizados, o aperfeiçoamento da correlação entre a resistência mecânica prevista e a resistência mecânica efetiva pode ser ainda melhorado por melhoramento e/ou recalibração do equipamento da planta, para garantir melhor que um produtor seja capaz de medir e dispensar com precisão as matérias-primas

necessárias para produzir concreto. Esses melhoramentos podem não ser economicamente práticos, no caso no qual uma planta usa uma projetos de mistura inferiores. Um equipamento perfeitamente calibrado não pode produzir concreto, que
5 seja um pouco melhor do que um projeto de mistura inferior vai produzir. O uso de projetos de mistura otimizados permite, portanto, que o produtor obtenha o benefício integral de quaisquer melhoramentos de equipamentos capitais. Em virtude do aperfeiçoamento apenas do equipamento da planta não poder
10 produzir muito benefício, e porque os próprios projetos de mistura otimizados superam a variabilidade conferida por equipamento falho, aperfeiçoamento o equipamento da planta e otimizando os projetos de mistura, propiciando que ambos os aperfeiçoamentos atinjam os seus potenciais totais, indicando,
15 dessem modo, uma relação sinérgica.

Em uma modalidade, a presente invenção proporciona métodos aperfeiçoados para projetar e otimizar projetos de mistura de concreto otimizados, utilizando uma equação de resistência mecânica que emprega um valor de fator K único,
20 que varia e é selecionado dependendo da eficiência inerente do uso dos componentes da composição de concreto resultante (por exemplo, como previsto empiricamente pelo mínimo desejado, ou "resistência mecânica de projeto"), todo o resto sendo igual. Conhecendo-se então como o fator K varia com a
25 resistência mecânica do cimento hidráulico, aperfeiçoa-se bastante a capacidade de projetar precisa e eficientemente uma composição de concreto otimizada, porque se reduz ou minimiza a variabilidade entre a resistência mecânica de pro-

jeto e a efetiva. Minimizando-se a variabilidade entre a resistência mecânica de projeto e a resistência mecânica efetiva, reduz-se a intensidade de teste de tentativa e erro, o que pode ser de outro modo necessário para identificar um
5 projeto de mistura de concreto, que é verdadeiramente otimizado para assentamento e resistência mecânica, a um custo mínimo.

Comparado com os métodos convencionais para o projeto de concretos usando tabelas padronizadas, o processo
10 DOC aperfeiçoado considera mais precisamente as características efetivas das matérias-primas utilizadas por um produtor de concreto. As tabelas padronizadas apenas se aproximam grosseiramente dos assentamento e resistência mecânica efetivos, por causa das características das matérias-primas
15 postas pelas tabelas raramente, se jamais, refletirem as características reais das matérias-primas efetivamente usadas por um produtor de concreto. Todas as plantas de concreto utilizam matérias-primas que são únicas para aquela planta, e é irracional esperar que tabelas padronizadas considerem
20 precisamente a variabilidade dos materiais entre as diferentes plantas. O processo DOC aperfeiçoado é capaz de "testar" virtualmente os projetos de mistura que reflitam mais vantajosamente as matérias-primas efetivamente utilizadas por uma planta em um dado momento. Considerando-se as variações na
25 qualidade das matérias-primas, o processo DOC aperfeiçoado é capaz de reduzir, substancialmente, o grau de superdimensionamento de composições de concreto, o que pode ocorrer de outro modo por uso de tabelas e métodos de projeto de mistu-

ras padronizados.

Outro aspecto da invenção envolve o reprojetado de um ou mais projetos de mistura preexistentes, usados por uma planta produtora para a produção das suas composições de concreto comerciais. Em uma modalidade, o método envolve primeiro, como um tema inicial, a determinação se e por quanto uma composição de concreto existente está superdimensionada. Cada composição de concreto tem uma resistência mecânica de projeto, que é, tipicamente, determinada pela resistência mecânica mínima, que deve ser garantida por aquela composição, e uma resistência mecânica efetiva, que pode ser medida por preparação adequada de concreto, sob controles absolutos, com base no projeto de mistura e teste da resistência mecânica. Em virtude da tendência dos produtores de superdimensionarem, para considerar as variabilidades da resistência mecânica esperada de batelada em batelada, pode haver uma diferença substancial entre o fator K de projeto aparente, com base na resistência mecânica mínima garantida de um projeto de mistura de concreto, e o fator K efetivo ou "real", com base na resistência mecânica efetiva do concreto, quando produzido adequadamente de acordo com o projeto de mistura.

O grau no qual um projeto de mistura de concreto existente é superdimensionado pode ser determinado por: (1) preparação adequada de uma amostra de teste de concreto de acordo com o projeto de mistura existente; (2) deixar a composição de concreto endurecer; (3) medir a resistência mecânica efetiva da composição de concreto endurecida; e (4)

comparar a resistência mecânica efetiva da composição de concreto com a resistência mecânica de projeto do projeto de mistura existente. O grau no qual a resistência mecânica efetiva se desvia da resistência mecânica de projeto corresponde ao grau pelo qual o projeto de mistura existente está superdimensionado. O processo mencionado acima requer um período de tempo, que é necessário para que a composição de concreto cure o suficiente, para medir precisamente a resistência mecânica efetiva.

10 O grau de superdimensionamento pode ser determinado alternativamente de um modo mais expedito, por: (1) determinação de um fator K de projeto do projeto de mistura de concreto existente, com base na resistência mecânica de projeto e na razão dos componentes dentro de uma composição de
15 concreto, produzida de acordo com o projeto de mistura existente; (2) identificação de um fator K teórico ótimo, correspondente à resistência mecânica de projeto; e (3) comparação do fator K aparente do projeto de mistura de concreto existente com o fator K ótimo, que corresponde à resistência
20 mecânica desejada. O grau no qual o fator K aparente se desvia do fator K ótimo corresponde ao grau pelo qual o projeto de mistura existente é superdimensionado. O conhecimento de como o fator K ótimo varia com a resistência mecânica do concreto pode ser, portanto, usado como uma ferramenta de
25 diagnóstico para determinar se e por quanto um projeto de mistura preexistente está superdimensionado, sem esperar que uma amostra de teste de concreto endureça.

Após determinar que um projeto de mistura preexis-

tente está superdimensionado, um projeto de mistura de concreto otimizado pode ser projetado usando o processo DOC aperfeiçoado. Após seleção de uma resistência mecânica de projeto, representando a resistência mecânica mínima específica garantida, um fator K revisto ou corrigido, correspondendo à resistência mecânica de projeto (ou desejada), é selecionado e usado no processo DOC aperfeiçoado. Um processo de otimização iterativo, utilizando um ou mais algoritmos, incluindo a equação de Feret empregando o fator K revisto, projeta e virtualmente testa várias composições de concreto hipotéticas, para identificar um ou mais projetos de mistura otimizados para uma resistência mecânica e um assentamento mínimos específicos, tendo o custo mais baixo ou outros fatores desejados. Um projeto de mistura otimizado reduz a variabilidade entre a resistência mecânica de projeto e a resistência mecânica efetiva, comparado com um projeto de mistura de concreto preexistente, reduzindo, desse modo, o superdimensionamento e o custo da composição de concreto resultante. Por reajuste correto das concentrações relativas dos vários componentes, o processo DOC aperfeiçoado aperfeiçoa a eficiência de aglutinação do aglutinante de cimento hidráulico e reduz quanto de cimento é necessário para garantir o requisito de resistência mecânica específica. O superdimensionamento pode ser bastante reduzido ou eliminado.

Em suma, por utilização dos fatores K corretos selecionados, com base na resistência mecânica de projeto, o programa DOC aperfeiçoado pode reprojeter precisamente cada projeto de mistura de concreto preexistente,

utilizado pela planta de produção, para aperfeiçoar a eficiência de aglutinação do aglutinante de cimento. Isso reduz ou elimina o superdimensionamento e reduz o custo. Uma planta de produção de concreto existente pode ser melhorada, simplesmente por proporcionar projetos de mistura de concreto otimizada, mesmo sem melhorar e/ou recalibrar o equipamento da planta de produção.

As variações entre a resistência mecânica efetiva e a resistência mecânica de projeto podem ser ainda minimizadas por controle adequado da preparação e manuseio das composições de concreto. Alguma renovação do ferramental pode ser necessária para garantir que o equipamento de formação de batelada e pesagem satisfaça os requisitos da norma ASTM-94 padronizados. Desse modo, de acordo com outro aspecto da invenção, etapas positivas podem ser tomadas para melhor controlar a medida e a dispensação dos componentes usados para a produção de concreto. De acordo com uma modalidade, os componentes são preferivelmente pesados ou medidos com uma precisão em torno de $\pm 2,0\%$, particularmente, com uma precisão em torno de $1,0\%$, e, especialmente, com uma precisão em torno de $\pm 0,5\%$. A proporção de água, incluída na composição de concreto, é controlada cuidadosamente de modo que não varie significativamente do tempo no qual a composição é primeiro produzida, dentro do caminhão de concreto, e quando é usada no local de uso. Para impedir diminuições na resistência mecânica efetiva devido a erro humano, ajustes de assentamento no local podem ser feitos nas composições de concreto úmidas, por uso de misturas especi-

ais em vez de por aumento do teor de água.

Para considerar todas as entradas de água, o teor de umidade dos componentes sólidos (por exemplo, cimento hidráulico e agregados) pode ser monitorado continuamente usando sensores de umidade (por exemplo, sensores de microondas, que medem a absorção de energia de microondas por qualquer umidade presente). Por meio de um mecanismo de realimentação de informações, que pode ser controlado vantajosamente por um computador, a proporção de água da batelada, que é adicionada ao recipiente de mistura, pode ser variada para considerar as variações no teor de umidade dos componentes sólidos. Desse modo, o teor de água total dentro de uma batelada de concreto pode ser controlado mais precisamente, reduzindo, desse modo, as variações em resistência mecânica e/ou assentamento, que podem ocorrer de outro modo.

Em alguns casos, pode ser desejável reprojetar rapidamente um projeto de mistura já otimizado, para ajustar o assentamento sem alterar significativamente a resistência mecânica. Isso pode ser feito sem criar um outro projeto de mistura integral do nada. Para manter a mesma resistência mecânica, enquanto variando o assentamento, a mesma razão de água para cimento da pasta é mantida, e apenas o volume da pasta é alterado para ajustar o assentamento. A adição de mais pasta a uma composição de concreto otimizada por projeto melhora o assentamento, enquanto que a adição de menos pasta piora o assentamento. Desse modo, a razão global de pasta para agregado é ajustada para variar o assentamento. Em virtude da razão de água para cimento da pasta permanecer

igual, a resistência mecânica se mantém essencialmente a mesma de acordo com a equação de Feret. Em alguns casos, a razão de agregados finos para grosseiros pode se manter igual. Em outros casos, essa razão pode ser alterada um pouco, dependendo do efeito desejado nas outras propriedades de alteração da razão de pasta para agregado (por exemplo, coesão, durabilidade, etc.). Uma vez que as concentrações dos vários componentes foram ajustadas para proporcionar o assentamento correto, o rendimento global pode ser corrigido por ajuste das quantidades dos agregados, para proporcionar um volume de concreto desejado.

Cada uma das modalidades acima, individual e coletivamente, contribui para uma redução na variabilidade da resistência mecânica do concreto, incluindo as diferenças entre as resistências mecânicas de projeto e efetiva e também as diferenças em resistência mecânica entre as diferentes bateladas feitas usando o mesmo projeto de mistura. Por redução ou eliminação de grandes diferenças entre as resistências mecânicas de projeto e efetiva, e/ou da variabilidade da resistência mecânica entre as diferentes bateladas de concretos, os métodos e sistemas inventivos reduzem bastante o superdimensionamento do concreto.

Como o programa DOC, descrito na patente de Andersen, o processo DOC aperfeiçoado pode ser implementado, pelo menos em parte, usando um sistema de computação (isto é, um computador), para projetar e virtualmente testar um grande número (por exemplo, milhares ou milhões) de projetos de mistura hipotéticos, em um período de tempo relativamente

curto, para identificar um ou mais projetos de mistura, que são otimizados com base em critérios desejados (por exemplo, resistência mecânica, assentamento e custo). De forma sucinta, o processo DOC aperfeiçoado é capaz de projetar e virtualmente "testar" diferentes projetos de mistura, por alteração das concentrações relativas de todas as matérias-primas e depois calcular, usando um ou mais algoritmos (por exemplo, aqueles mostrados na patente de Andersen), o assentamento e a resistência mecânica de cada composição de concreto virtual, produzida de acordo com cada projeto de mistura hipotético. Esse processo DOC aperfeiçoado então identifica um ou mais projetos de mistura otimizados, tendo os desejados assentamento e resistência mecânica. Depois, amostras de teste são produzidas para determinar os assentamento e resistência mecânica efetivos. Se o assentamento difere, variações no assentamento podem ser feitas, por aumento ou diminuição da concentração de pasta de cimento. A resistência mecânica pode ser mantida a mesma por manutenção da mesma razão de água para cimento na pasta de cimento. A resistência mecânica pode ser alterada por variação da razão de água para cimento.

Como com o programa DOC original, o processo DOC aperfeiçoado pode ser representado por um produto programa de computador, compreendendo um meio legível por computador (por exemplo, um dispositivo de armazenamento físico, tal como uma unidade de disco rígido, um dispositivo de memória, uma fita ou disco magnético, um meio de armazenamento óptico, ou outro dispositivo de armazenamento digital conheci-

do), que contém instruções executáveis para condução dos aspectos implementados por computador do método inventivo.

Em virtude de que cada planta produtora ter o seu conjunto único de matérias-primas e/ou entradas de processamento e/ou eficiências de mistura (isto é, nunca duas plantas usam exatamente a mesma combinação de matérias-primas e possuem os mesmos equipamentos exatos calibrados e/ou operados exatamente da mesma maneira), vai-se considerar que cada planta produtora produz composições de concreto tendo aspectos únicos, que são específicos para uma determinada planta produtora. Em outras palavras, mesmo se duas plantas usarem os mesmos projetos de mistura padronizados (isto é, receitas), o concreto transferido por cada planta vai, do mesmo modo, ser único para cada planta. Isso significa que projetos de mistura de concreto preexistentes, que tenham sido modificados e otimizados utilizando o programa DOC aperfeiçoado, vão produzir outras composições de concreto que são elas próprias únicas, pelo fato de que não vão ter sido nunca produzidas a qualquer tempo no mundo. Desse modo, as composições de concreto produzidas usando projetos de mistura otimizados, resultantes da implementação do processo DOC aperfeiçoado, são elas próprias únicas e, portanto, diferentes, como entre todo o concreto produzido previamente.

Nota-se que cada composição de concreto, que é produzida, tem o seu próprio fator K de projeto de assinatura e também um fator K efetivo, que pode ser determinado por teste da resistência mecânica efetiva da composição. Isto é verdade tanto antes quanto depois da implementação do pro-

cesso DOC aperfeiçoado. No entanto, após implementação do processo DOC aperfeiçoado, os fatores K de assinatura, ambos os de projeto e efetivo, para uma composição de concreto otimizada de uma planta produtora, vão exceder os fatores K de assinatura, ambos de projeto e efetivo, de uma composição de concreto não otimizada preexistente, que foi reprojeta-
5 de assinatura, ambos de projeto e efetivo, de uma composição de concreto não otimizada preexistente, que foi reprojeta-
ou substituída usando o processo DOC aperfeiçoado. Por conhecimento e comparação dos fatores K de projeto e/ou assinatura de ambas as composições de concreto preexistente e
10 não otimizada de uma determinada planta produtora, pode-se determinar facilmente se uma composição de concreto particular, produzida pela planta produtora, foi produzida usando o projetos de mistura preexistente ou um projetos de mistura otimizado, projetado usando o processo DOC aperfeiçoado.
15 Desse modo, o fator K de assinatura pode ser usado como uma ferramenta diagnóstica para distinguir se uma composição de concreto não otimizada ou superdimensionada ou uma composição de concreto otimizada foi usada em um projeto de construção (isto é, para determinar se ou não o processo DOC a-
20 perfeiçoado foi implementado por um produtor de concreto no projeto das suas composições de concreto).

Essas e outras vantagens e aspectos da presente invenção vão ficar mais inteiramente evidentes das descrição apresentada a seguir e das reivindicações em anexo, ou podem
25 ser aprendidas pela prática da invenção, como apresentado a seguir.

Breve descrição dos desenhos

Para esclarecer ainda mais as vantagens e aspectos

mencionados acima e outros da presente invenção, uma descrição mais particular da invenção vai ser propiciada, por referência às suas modalidades específicas, que são ilustradas nos desenhos em anexo. Considera-se que esses desenhos ilustram apenas as modalidades típicas da invenção e não devem ser, portanto, considerados como limitantes do seu âmbito. A invenção vai ser descrita e explicada com especificidade e detalhes adicionais por uso dos desenhos em anexo, em que:

a Figura 1 é um diagrama que inclui curvas do fator K, que ilustram como o fator K varia em função da resistência mecânica compressiva do concreto;

a Figura 2 é um diagrama que demonstra como os fatores K efetivos de composições de concreto conhecidas se desviam dos fatores K, ao longo de uma curva do fator K ótima, que ilustra o grau pelo qual essas composições são superdimensionadas;

a Figura 3 é um outro diagrama mostrando como os fatores K efetivos de composições de concreto conhecidas se desviam dos fatores K ao longo de uma curva do fator K ótima, que ilustra o grau pelo qual essas composições são superdimensionadas;

a Figura 4 é um diagrama esquemático que ilustra um sistema de computação, por meio do qual a otimização do projeto, o reprojeto e outros aspectos da invenção podem ser conduzidos;

a Figura 5 é um fluxograma, que ilustra um processo de otimização exemplificativo de acordo com a invenção, para projetar uma mistura de concreto otimizada;

a Figura 6A é um diagrama de densidade de compactação para a mistura ternária de cimento, areia de quartzo (0 - 2 mm) e granito britado (8 - 16 mm);

5 a Figura 6B é um diagrama de densidade de compactação da Figura 6A, com as linhas indicando como ler uma composição correspondente a uma densidade dentro do diagrama;

a Figura 6C é um gráfico de um diagrama de densidade de compactação linhas de linhas de partículas falsas;

10 a Figura 7 ilustra um diagrama de correção de assentamento exemplificativo, usado para corrigir o assentamento, quando da aproximação das densidades de compactação de partículas dos componentes sólidos;

15 as Figuras 8A - 8B compreendem um fluxograma lógico do sistema de otimização;

a Figura 8C é uma árvore do fluxograma lógico mostrado na Figura 8B;

20 a Figura 9 é um fluxograma que ilustra um processo de otimização implementado por computador exemplificativo de acordo com a invenção;

a Figura 10 é fluxograma que ilustra um processo de otimização exemplificativo de acordo com a invenção, para projetar uma mistura de concreto otimizada que considera as variações no fator K, na medida em que a resistência mecânica compressiva varia;

a Figura 11 é um fluxograma que ilustra um processo exemplificativo para a produção de uma composição de concreto, a partir de um projeto de mistura de concreto otimi-

zado, para garantir que a resistência mecânica efetiva se relaciona estreitamente com a resistência mecânica desejada ou prevista;

a Figura 12 é um fluxograma que ilustra um processo de reprojeto abreviado exemplificativo, para alterar o assentamento de um projeto de mistura de concreto otimizado, sem alteração substancial da resistência mecânica;

a Figura 13 é um fluxograma que ilustra um processo exemplificativo para reprojeto de um projeto de mistura de concreto preexistente, por emprego de um entendimento correto do fator K e como varia em função da resistência mecânica compressiva do concreto; e

a Figura 14 é um fluxograma que ilustra um processo exemplificativo para melhoria de uma planta de produção de concreto existente, por emprego de um entendimento correto do fator K e como varia em função da resistência mecânica compressiva do concreto.

Descrição detalhada das modalidades preferidas

I. Introdução

A presente invenção utiliza um processo de otimização de projeto, que é, pelo menos em parte, implementado por computador, que identifica um ou mais projetos de mistura de concreto otimizados, que são otimizados relativos a, por exemplo, resistência mecânica, assentamento e custo. O processo de otimização de projeto é capaz de considerar a variabilidade nas entradas de matérias-primas e no projeto de uma composição de concreto otimizada, com base nas variações nas qualidades das matérias-primas . Faz isso por pro-

jeto e teste efetivos de um grande número (por exemplo, milhares ou milhões) de misturas de concreto hipotéticas pelo menos em parte por meio de um processo implementado por computador, para identificar um ou mais projetos de mistura tendo propriedades ótimas. Esse processo reduz ou elimina bastante a necessidade para um teste de tentativa e erro longo, que é tanto caro quanto intenso em tempo. Além do mais, diferentemente da otimização de Shilstone, o programa DOC aperfeiçoado é capaz de considerar as variações do tamanho de partícula entre as diferentes bateladas de matérias-primas e também otimizar o custo.

Os termos "jarda" e "jarda cúbica" são usados intercambiavelmente por todo o pedido e referem-se à unidade volumétrica típica de concreto vendido nos Estados Unidos. Essa quantidade pode ser facilmente convertida em unidades métricas por fatores de conversão conhecidos, que convertem jardas em metros, centímetros ou em outras unidades métricas desejadas. Por meio de exemplo, uma jarda cúbica é igual a 0,76455486 metro cúbico.

20 II. Relação do fator k com a resistência mecânica do concreto

Um aspecto importante da invenção é o entendimento de que a constante K de Feret (ou fator "K") não é de fato uma constante, mas é relacionada logarithmicamente à resistência mecânica do concreto. Isso significa que o aumento da proporção de cimento hidráulico dentro de uma composição otimizada não apenas aumenta a resistência mecânica do cimento hidráulico, em virtude da maior proporção de aglutinante,

o que seria esperado, mas também aperfeiçoa a eficiência de aglutinação ou eficiência da pasta. Desse modo, o aumento em resistência mecânica do concreto, na medida em que mais cimento hidráulico é adicionado a uma composição de concreto
 5 otimizada, excede a resistência mecânica que seria prevista pela equação de Feret, se o fator K fosse de fato uma constante para todas as resistências mecânicas. Ainda que seja conhecido que o fator K mudou, dependendo do aparelho de mistura e do tipo de agregado e da resistência mecânica, a-
 10 creditou-se até agora que o fator K se mantinha constante para todas as resistências mecânicas, desde que as mesmas matérias-primas e aparelho de mistura fossem usados.

O termo "equação de Feret" se refere à seguinte equação, que prevê a resistência mecânica do concreto, com
 15 base apenas no volume de cimento hidráulico, água e ar na mistura de concreto:

$$\sigma = K \cdot \left(\frac{V_c}{V_c + V_w + V_a} \right)^2$$

Para fins da descrição e das reivindicações em anexo, o termo "equação de Feret" refere-se também à equação de Feret modificada apresentada a seguir, que prevê a resistência mecânica do cimento hidráulico com base no volume de
 20 cimento hidráulico, poeira de cinzas da classe F, água e ar na mistura de concreto:

$$\sigma = K \cdot \left(\frac{V_c + 0.3V_{FA}}{V_c + 0.3V_{FA} + V_w + V_a} \right)^2$$

Como pode-se notar dessa versão da equação de Feret, certos tipos de poeira de cinzas contribuem para a resistência mecânica do concreto, mas não no mesmo grau que o cimento hidráulico. Além do mais, embora o volume de poeira de cinzas seja mostrado multiplicado por uma constante de poeira de cinzas de 0,3, pode ser algumas vezes adequado usar uma constante de poeira de cinzas diferente (por exemplo, variando de 0,3 - 0,6), dependendo do tipo de poeira de cinzas usado. Essa substituição pode ser conduzida por pessoas versadas na técnica, quando adequado, e essa substituição deve também contribuir para a "equação de Feret".

Em geral, o termo "equação de Feret" refere-se a outras variações similares, que podem ser construídas desde que se refiram pelo menos à resistência mecânica compressiva prevista da composição de concreto para a razão de volume de cimento hidráulico para o volume de pasta de concreto (isto é, cimento hidráulico, outros aglutinantes, água e ar) na mistura de concreto (por exemplo, o uso de fumo de sílica, que pode contribuir para a resistência mecânica).

O termo "fator K" inclui modificações dos fatores K exemplificativos descritos aqui, necessários para converter a resistência mecânica calculada de unidades inglesas (isto é, libras por polegada quadrada ou "psi") para unidades métricas (por exemplo, MPa). Como é bem conhecido daqueles versados na técnica, 1 MPa = 145 psi. O termo "fator K" inclui outras modificações necessárias quando da alteração da equação de Feret, como discutido acima.

Deve-se considerar que o fator K não é um número

absoluto não é sempre igual para todos diferentes tipos de composições de concreto e/ou aparelhos usados pelas plantas de concreto. De fato, cada planta produtiva vai ter o seu próprio fator K único, dependendo do tipo e da qualidade dos agregados, do tipo e da qualidade do cimento hidráulico usado, e do tipo e da qualidade do aparelho de mistura. A curva do fator K vai, tipicamente, movimentar-se ou aumentar com o aumento da eficiência de mistura, resistência mecânica do agregado, resistência mecânica do cimento hidráulico e outros fatores que contribuem sistematicamente para a resistência mecânica do concreto.

Desde que as entradas do sistema se mantenham essencialmente iguais, a curva do fator K para uma planta produtiva particular pode, pelo menos em teoria, ser determinada por identificação de um ponto de fator K único ao longo da curva de fator K, e depois construção de uma curva logarítmica que passa por esse ponto. Uma vez que uma curva de fator K inadequada tenha sido construída para uma planta de produção particular, a curva pode ser usada para projetar e prever resistências mecânicas de concreto para uma ampla gama de diferentes concretos produzidos por essa planta de produção.

Deve-se também entender que há diferentes fatores K, dependendo do contexto no qual o termo é usado. O termo "fator K de projeto" se refere ao fator K que é utilizado dentro do processo DOC aperfeiçoado da presente invenção, para projetar e virtualmente "testar" um grande número (por exemplo, milhões) de diferentes projetos de mistura hipoté-

5 ticos, para identificar um ou mais desses projetos de mistura que são "ótimos" com relação a resistência mecânica, assentamento, custo e outros fatores desejados. O fator K de projeto vai, naturalmente, variar dependendo da resistência mecânica de projeto, ou da resistência mecânica mínima garantida, de uma composição de concreto particular. Para um determinado conjunto de entradas de matérias-primas e de equipamento de processamento, vai haver, tipicamente, uma curva de fator K de projeto única.

10 Os termos "fator K ótimo" e "fator K real" se referem aos fatores K encontrados ao longo de uma curva de fator K ótima, que representa concreto perfeitamente projetado e misturado, por uma planta de produção utilizando um determinado conjunto de matérias-primas disponíveis. Desse modo,
15 o fator K "ótimo" ou "real" pode variar entre diferentes plantas e não é, portanto, um número absoluto. Não obstante, para um determinado conjunto de entradas de matérias-primas, existe um concreto perfeitamente projetado e produzido, para o qual o fator K ótimo ou real pode ser teoricamente usado
20 para prever a resistência mecânica. Em virtude das plantas e do seu pessoal não poderem produzir um concreto perfeito a cada vez, vai haver, tipicamente, algum grau de superdimensionamento, embora ligeiro, para considerar essa variabilidade. Desse modo, o fator K de projeto vai tipicamente diferir do (por exemplo, ser inferior ao) fator K real ótimo para
25 aquele determinado conjunto de matérias-primas. Não obstante essa variação, o fator K de projeto, usado para produzir uma composição de concreto otimizada, vai correlacionar-

se muito mais estreitamente ao fator K ótimo ou real do que comparado com os fatores K de projeto correspondentes às composições de concreto menos otimizadas ou não otimizadas.

O termo "fator K de projeto aparente" se refere ao
5 fator K que pode ser determinado para uma composição de concreto preexistente, que pode não ter ela própria sido projetada usando um fator K. Mesmo se um fator K não for usado para projetar uma composição de concreto, pode, não obstante, ser atribuído um fator K de projeto aparente, com base
10 em que o fator K teria sido usado para projetar esse concreto usando o procedimento de otimização descrito. No caso de uma composição de concreto otimizada ou superdimensionada de modo inferior, o fator K de projeto aparente vai se desviar significativamente do fator K ótimo ou real. Os fatores K de
15 projeto aparentes dessas composições vão se desviar muito mais do que os fatores K de projeto de concreto bem otimizado produzido usando as mesmas entradas. O fator K de projeto aparente é determinado com base na resistência mecânica de projeto (isto é, a resistência mecânica mínima garantida) e
20 no projeto de mistura da composição de concreto preexistente.

O termo "fator K efetivo" se refere ao fator K que é determinado por mistura de uma composição de concreto de acordo com um determinado projeto de mistura, deixar o concreto curar, medir a resistência mecânica compressiva do
25 concreto, e depois calcular o fator K efetivo, com base na resistência mecânica efetiva e na proporção dos componentes dentro da composição de concreto. Para uma composição de

concreto preparada adequadamente, o fator K efetivo vai exceder o fator K de projeto, desde que o fator K de projeto considere tipicamente as variações na resistência mecânica do concreto.

5 Uma representação gráfica de como o fator K varia com a resistência mecânica compressiva é ilustrada na Figura 1. A Figura 1 inclui efetivamente duas linhas curvas, seguindo uma curva logarítmica correspondente a dois diferentes fatores K, que foram determinados na presente invenção.

10 A curva do fator K inferior corresponde às composições de concreto produzidas utilizando cimento hidráulico, água, agregado e outras misturas usuais utilizadas na técnica. A linha do fator K superior corresponde a composições de cimento hidráulico, que incluem, adicionalmente, um agente de

15 reforço de amina. Os fatores K usados para gerar as linhas mostradas na Figura 1 foram determinados por análise de uma ampla gama de projetos de mistura usuais, utilizados em plantas em várias partes dos Estados Unidos ou suas variações (por exemplo, que usam uma amina de reforço). Em geral,

20 o fator K pode ser calculado de acordo com a redistribuição apresentada a seguir da equação de Feret, para composições que incluem cimento hidráulico, água e agregado:

$$K = \frac{\sigma}{\left(\frac{V_c}{V_c + V_w + V_a} \right)^2}$$

A variável resistência mecânica σ corresponde à resistência mecânica efetiva, que foi determinada para as

várias composições de cimento hidráulico, variando em resistência mecânica de 3,45 a 55,17 MPa (500 a 8.000 psi). Para as composições de concreto que também incluem poeira de cinzas, o fator K pode ser determinado de acordo com a redistribuição apresentada a seguir da equação de Feret modificada:

$$K = \frac{\sigma}{\left(\frac{V_C + 0.3V_{FA}}{V_C + 0.3V_{FA} + V_W + V_A} \right)^2}$$

O fator K aumentado correspondendo à maior resistência mecânica, de acordo com a linha superior mostrada na Figura 1, pode ser obtida por utilização de uma amina conhecida como "THEED" (isto é, tetraidroxidietilenodiamina, também conhecida como etanol,2,2',2''-(1,2-etanodiildinitrolo) tetracis-). Para obter a maior resistência mecânica e, portanto, um fator K mais alto, é preferível utilizar até cerca de 0,5% de THEED, particularmente, até cerca de 0,25%, e, especialmente, até cerca de 0,1%. Uma que se tenha entendido que o fator K varia logaritmicamente com a resistência mecânica compressiva do concreto, uma pessoa versada na técnica, usando as técnicas descritas ou facilmente determinadas da presente descrição, pode modificar o fator K exemplificativo mostrado na Figura 1, para considerar as variações com base nas diferentes concentrações de THEED.

A Figura 1 demonstra ainda que os fatores K "ótimos" ou "teóricos" não são absolutos ou se mantêm ao longo de uma curva fixa absoluta, que é igual, independente das

entradas e do aparelho de mistura da composição de concreto. A adição de um agente de reforço de amina aumenta o fator K (e a curva do fator K representando todos os fatores K para esse sistema), com base na maior resistência mecânica do concreto resultante, ainda que a razão de cimento hidráulico para pasta se mantenha igual. O mesmo é verdade para outras misturas ou alterações na composição, de modo que possa haver uma curva de fator K única ou representativa para cada conjunto único de entradas de matérias-primas. O mesmo vai ser verdade para os diferentes tipos de aparelho de mistura, que podem fazer com que a pasta de cimento se comporte de um modo único, específico para aquele aparelho ou metodologia de mistura. Em geral, o efeito da eficiência de mistura no fator K é mais intenso, com maiores teores de cimento e resistência mecânica (isto é, a mistura fica mais crucial quando a eficiência de aglutinação potencial do cimento hidráulico é maximizada). O que o gráfico na Figura 1 mostra é que para qualquer conjunto fixo de composições e/ou variáveis de processamento, o fator K segue uma curva logarítmica relativa à resistência mecânica compressiva. Isso significa que a eficiência do cimento hidráulico, mais precisamente da pasta de cimento, como um aglutinante que retém ou cola os agregados entre si, diminui com a diminuição das resistências mecânicas. Também aumenta com o aumento da resistência mecânica na direção de um limite teórico, além do qual nenhum outro aumento em eficiência de aglutinação é possível (isto é, quando a eficiência de aglutinação é a mais alta teoricamente possível, com o limite da resistência mecânica

da pasta de cimento sendo nos níveis estequiométricos de água e cimento, e em que os componentes são misturados perfeitamente. Isso não significa, embora, que o fator K necessariamente aumente com o aumento da concentração de cimento hidráulico. Muitos produtores aderem à prática de superdimensionamento, em uma tentativa de aumentar ou maximizar a resistência mecânica, algumas vezes com resultados desastrosos como a composição de concreto, se não adequadamente otimizada para acomodar um aumento enorme do cimento (por exemplo, o dobro), pode sofrer uma fissuração de microrretração e rachadura em prazo curto e também uma fluência ou expansão excessiva em longo prazo.

O que as curvas de fator K ilustradas na Figura 1 ilustram essencialmente são os fatores K ótimos para um determinado conjunto de entradas de matérias-primas. O fator K de projeto usado em um procedimento de otimização pode ser igual ou pode desviar-se do fator K ótimo, para garantir resistência mecânica e assentamento mínimos específicos. Em virtude de ser possível alguma variabilidade entre a resistência mecânica de projeto e a resistência mecânica efetiva, no caso de composições de concreto altamente otimizadas, algum grau de desvio entre o fator K de projeto usado e o fator K ótimo pode ser tolerado, para considerar algumas variações esperadas. O que se deve entender é que há menos variação entre a resistência mecânica de projeto e a resistência mecânica efetiva de um projeto de mistura bem otimizado, comparado a um projeto de mistura inferior. Em outras palavras, a resistência mecânica efetiva de composições de con-

creto, produzidas usando projetos de mistura otimizados, vão corresponder uma correspondência mais estreita com a resistência mecânica de projeto do que as composições de concreto produzidas de projetos de mistura inferiores. Em consequência disso, um projeto de mistura otimizado, produzido de acordo com o processo de otimização de projeto inventivo, vai ter um fator K de assinatura que excede o fator K de projeto de um projeto de mistura inferior. De modo similar, em virtude da eficiência de aglutinação da pasta de concreto, em uma composição de concreto bem projetada, exceder tipicamente a eficiência de aglutinação da pasta de concreto em uma composição de concreto projetada de forma inferior, o fator K efetivo de uma composição de concreto bem projetada vai ser também esperado exceder o fator K efetivo de uma composição de concreto projetada de forma inferior. Esse conceito fica mais entendível com referência às Figuras 2 e 3.

O fator K de projeto aparente, para cada mistura específica mostrada nas Figuras 2 e 3, pode ser determinado por introdução de valores para o concreto, ar e resistência mecânica de projeto na equação de Feret e depois resolução para K. Os fatores K efetivos, que se dispõem ao longo da curva do fator K, podem ser derivados por preparação adequada de várias composições de concreto, usando projetos de mistura otimizados usuais, utilizados por vários produtores de acordo com a norma ASTM C-94 ou outros padrões rigorosos conhecidos na técnica, medição da resistência mecânica efetiva da amostra de teste de concreto, e depois resolução para K. Uma curva do fator K ótimo pode ser preparada por re-

apresentação dos fatores K medidos, com base em composições de concreto preparadas otimamente contra as resistências mecânicas compressivas correspondentes.

Em muitos casos, a resistência mecânica efetiva de
5 uma amostra de teste de concreto, produzida de um projeto de
mistura de concreto preexistente, pode exceder substancial-
mente a resistência mecânica de projeto, indicando, desse
modo, que o projeto de mistura de concreto preexistente está
superdimensionada. No entanto, isso apenas não proporciona
10 um modo preciso de reprojeto o projeto de mistura de con-
creto preexistente, para reduzir ou eliminar esse superdi-
mensionamento. Usando-se um fator K de projeto revisto, que
corresponde mais estreitamente ao fator K ótimo dentro de um
procedimento de otimização, que utiliza a equação de Feret,
15 facilita-se o reprojeto do projeto de mistura preexistente
para a resistência mecânica efetiva corresponder mais es-
treitamente à resistência mecânica de projeto ou prevista.

Para demonstrar o grau por meio do qual os proje-
tos de mistura de concreto usuais, utilizados na indústria,
20 são superdimensionados em várias plantas de concreto exis-
tentes (e, portanto, têm um fator K de projeto excessivamen-
te baixo), faz-se agora referência às Figuras 2 e 3. A Figu-
ra 2 mostra vários pontos de dados correspondentes aos fato-
res K de projeto aparentes, que foram determinados para toda
25 a pluralidade de projetos de mistura usuais, utilizados por
TXI, Tarmac, TIM, VM, Elmhurst e Kaneville. O grau pelo qual
os pontos de dados se desviam da linha de fator K ótimo,
mostrada na Figura 2, indica o grau pelo qual esses projetos

de mistura usuais são ou foram superdimensionados relativos às suas resistências mecânicas de projeto.

Os fatores K de projeto, nos pontos de dados abaixo da linha de fator K ótimo na Figura 2, foram determinados utilizando uma equação de Feret rearranjada e resolução para K, em que a resistência mecânica σ corresponde à resistência mecânica de projeto ou prevista do que a resistência mecânica efetiva das composições de concreto produzidas de acordo com esses projetos de mistura. Em todos os casos, a resistência mecânica de projeto ou prevista foi menor do que a resistência mecânica efetiva, quando as composições foram produzidas adequadamente. O grau pelo qual as composições testadas foram verificadas como estando superdimensionadas representa uma economia de custo substancial, se esses projetos de mistura puderem ser reprojitados de acordo com os métodos inventivos descritos aqui. Por exemplo, estima-se atualmente que o reprojeto, de modo a melhor otimizar os projetos de mistura de concreto existentes, pode economizar entre US\$5,35 e 13,40 por m^3 (US\$4 e 10 por jarda) de concreto produzido. Considerando-se que os produtores de concreto propiciam tipicamente um lucro de apenas US\$1,33 - 2,66 por m^3 (US\$1 ou 2 por jarda), a economia de custo estimada é tremenda e representa um aperfeiçoamento substancial na técnica de produção de concreto.

A Figura 3 compara os fatores K de projeto aparentes para vários projetos de mistura de concreto preexistentes de várias plantas, utilizando composições de concreto de produção, que incluem ar entranhado substancial ou que são

substancialmente isentas de ar entranhado. De novo, o desvio entre os pontos de dados, representando os fatores K aparentes e a curva de fator K ótima, mostrada na Figura 3, ilustra graficamente a economia de custo substancial, se os projetos de mistura preexistentes forem reprojitados e otimizados de acordo com os métodos inventivos aqui descritos.

Como vai-se considerar facilmente, por comparação do fator K de projeto aparente de um projeto de mistura de concreto existente com o fator K ótimo, para uma determinada resistência mecânica compressiva disposta na curva mostrada nas Figuras 1 - 3, pode-se determinar facilmente o grau pelo qual um projeto de mistura de concreto existente e a composição de concreto correspondente são superdimensionados. Desse modo, conhecendo-se o fator K ótimo e como varia com a resistência mecânica compressiva, pode-se empregar como uma ferramenta diagnóstica para testar se os projetos de mistura e as composições de concreto de uma planta de concreto estão otimizados ou se estão significativamente superdimensionados. Uma vez que se tenha determinado que um projeto de mistura existente esteja superdimensionado, o projeto de mistura pode ser reprojitado usando o processo DOC aperfeiçoado, para identificar um ou mais projetos de mistura otimizados, tendo assentamento e resistência mecânica desejados a um custo mais baixo. Em virtude do processo DOC aperfeiçoado considerar as entradas de matérias-primas efetivas disponíveis para o produtor, é mais capaz de otimizar as misturas de concreto, em comparação com as tabelas padronizadas, que não podem, tipicamente, considerar as variações nas entradas

de matérias-primas entre as diferentes plantas ou entre as bateladas. O processo DOC aperfeiçoado entende a relação dinâmica entre o fator K ótimo e a resistência mecânica do concreto, o que permite que se identifique mais eficientemente um ou mais projetos de mistura, em comparação com o programa DOC original descrito na patente de Andersen.

III. Meio físico operacional baseado em computador

O meio físico operacional para execução das modalidades do programa DOC aperfeiçoado pode compreender um computador de fim especial ou multipropósito, incluindo vários tipos de hardwares de computador, como discutido em mais detalhes abaixo. A Figura 4 é um diagrama esquemático, ilustrando um sistema de computação exemplificativo 100, que pode ser usado para implementar os aspectos da presente invenção. O sistema de computação descrito é apenas um exemplo desse sistema de computação adequado, e não é intencionado para sugerir qualquer limitação para o âmbito de uso ou funcionalidade da invenção. Tampouco a invenção deve ser interpretada como tendo qualquer dependência ou requisito relativo a qualquer um ou a uma combinação de componentes ilustrados na Figura 4.

Os sistemas de computação estão agora crescentemente assumindo uma ampla gama de formas. Os sistemas de computação podem ser, por exemplo, dispositivos portáteis, aparelhos domésticos, computadores de colo, computadores de mesa, computadores de grande porte, sistemas de computação distribuídos, ou mesmo dispositivos que tenham sido considerados convencionalmente um sistema de computação. Nessa des-

crição e nas reivindicações, o termo "sistema de computação" é definido de forma genérica como incluindo qualquer dispositivo ou sistema (ou suas combinações), que inclui pelo menos um processador, e uma memória capaz ter nela instruções executáveis por computador, que podem ser executadas pelo processador. A memória pode assumir qualquer forma e pode depender da natureza e da forma do sistema de computação. Um sistema de computação pode ser distribuído por um meio físico de rede e pode incluir múltiplos sistemas de computação constituintes.

Com referência à Figura 4, na sua configuração mais básica, um sistema de computação 100 inclui tipicamente pelo menos uma unidade de processamento 102 e uma memória 104. A memória 104 pode ser um sistema de memória, que pode ser volátil, não volátil ou alguma combinação das duas. Um exemplo de memória volátil inclui Memória de Acesso Aleatório (RAM). Os exemplos de memórias não voláteis incluem Memória Exclusiva de Leitura (ROM), memória instantânea ou assemelhados. O termo "memória" pode ser também aqui usado para referir-se a armazenamento em massa não volátil, tais como meios de armazenamento físicos. Esse armazenamento pode ser removível ou não removível e pode incluir, mas não é limitado a, cartões PCMCIA, discos magnéticos e ópticos, fita magnética e assemelhados.

Como aqui usado, o termo "módulo" ou "componente" pode referir-se a objetos ou rotinas de software, que são executados no sistema de computação. Os diferentes componentes, módulos, máquinas e serviços aqui descritos podem ser

implementados como objetos ou processos, que são executados no sistema de computação (por exemplo, como cadeias separadas). Ainda que o sistema e os métodos aqui descritos possam ser implementados em software, as implementações em hardware e em combinações de software e hardware são também possíveis e consideradas.

Na descrição que se segue, as modalidades da invenção são descritas com referência a atos que são conduzidos por um ou mais sistemas de computação. Se esses atos são implementados em software, um ou mais processadores do sistema de computação associado, que executa a técnica, dirigem a operação do sistema de computação, em resposta a ter instruções executáveis em computador executadas. Um exemplo dessa operação envolve a manipulação de dados. As instruções executáveis por computador (e os dados manipulados) podem ser armazenadas ou recebem um valor específico na memória 104 do sistema de computação 100.

O sistema de computação 100 também pode conter canais de comunicação 103, que permitem que o sistema de computação 100 se comunique com outros sistemas de computação, pela, por exemplo, rede 110. Os canais de comunicação 108 são exemplos de meios de comunicação. Os meios de comunicação representam tipicamente instruções legíveis por computador, estruturas de dados, módulos de programas ou outros dados em um sinal de dados modulado, tal como uma onda portadora ou outro mecanismo de transporte, e incluem quaisquer meios de transferência de informações. Por meio de exemplo, e não limitação, os meios de comunicação incluem meios liga-

dos por fio, tais como redes ligadas por fio e conexões ligadas diretamente, e meios sem fio, tais como meios acústicos, de rádio, infravermelhos e outros sem fio. O termo meios legíveis por computador, como aqui usados, inclui ambos os meios de armazenamento, e meios de comunicação tangíveis (isto é, enviando e recebendo dispositivos que podem armazenar temporariamente instruções executáveis, mas não os próprios sinais eletrônicos).

As modalidades dentro do âmbito da presente invenção também incluem meios legíveis por computador, para conduzir ou ter instruções executáveis por computador ou estruturas de dados armazenadas nele. Esses meios legíveis por computador podem ser quaisquer meios disponíveis, que podem ser acessados por um computador de fim especial ou multipropósito. Por meio de exemplo, e não limitação, esses meios legíveis por computador podem compreender meios de armazenamento e/ou de memória físicos, tais como RAM, ROM, EEPROM, CD-ROM ou outro armazenamento de disco óptico, armazenamento de disco magnético ou outros dispositivos de armazenamento magnéticos, ou quaisquer outros meios que possam ser usados para conduzir ou armazenar os meios de códigos de programas desejados, na forma de instruções ou estruturas de dados executáveis por computador, e que podem ser acessadas por um computador de fim especial ou multipropósito. Quando as informações são transferidas ou proporcionadas em uma rede ou outra conexão de comunicação (ou conectadas, sem fio ou uma combinação de conectada ou sem fio) a um computador, o computador nota adequadamente a conexão como um meio legível

por computador. Desse modo, quaisquer conexões dessas são denominadas adequadamente um meio legível por computador. Combinações do que é exposto acima também podem ser incluídas dentro do âmbito de meios legíveis por computador.

5 As instruções executáveis por computador compreendem, por exemplo, instruções e dados que fazem com que um computador multipropósito, um computador de fim especial, ou um dispositivo de processamento de fim especial execute uma determinada função ou grupo de funções. Embora a matéria te-
10 nha sido descrita em linguagem específica para os aspectos estruturais e/ou atos metodológicos, deve-se entender que a matéria defina nas reivindicações em anexo não é necessariamente limitada aos aspectos ou atos específicos descritos aqui. Em vez disso, os aspectos e atos específicos aqui são
15 descritos como formas exemplificativas de implantação das reivindicações.

IV. Visão geral de processo de otimização de projeto exemplificativo

De acordo com uma modalidade atualmente preferida,
20 os processos otimizados de projetos implementados por computador, de acordo com a invenção, podem utilizar pelo menos parte dos aspectos descritos na patente U.S. 5.527.387 de Andersen et al. ("patente de Andersen"). Uma diferença importante é que a presente invenção considera o fato de que o
25 fator K , utilizado na equação de Feret, não é uma constante real, mas varia logaritmicamente com a resistência mecânica compressiva de concreto. Em outras palavras, descobriu-se então que o aumento da concentração de cimento hidráulico em

uma mistura otimizada (oposto ao superdimensionamento) aumenta a sua efetividade ou eficiência de aglutinação. O conceito de que o fator K varia com a resistência mecânica do concreto não era conhecido previamente e não foi, portanto, considerado na patente de Andersen ou incorporado no programa DOC original (pelo programa DOC original trabalhado como projetado e intencionado).

Quando da implementação do processo DOC aperfeiçoado, o fator K de projeto utilizado na equação de Feret, para determinar a resistência mecânica de projeto, é selecionado com base no tubos evaporadores e na resistência mecânica específicos do concreto, que devem ser garantidos pelo fabricante. Em muitos outros aspectos, o processo DOC aperfeiçoado pode ser implementado de uma maneira similar àquela do programa DOC original descrito na patente de Andersen. Deve-se entender, no entanto, que está dentro do âmbito da invenção utilizar qualquer conjunto ou série de algoritmos conhecidos para projetar um ou mais projetos de mistura de concreto, desde que o fator K de projeto, que é usado quando do cálculo da resistência mecânica de acordo com a equação de Feret, varie com as mudanças na resistência mecânica desejada ou alvo (por exemplo, aumenta logaritmicamente com a resistência mecânica do concreto).

A Figura 5 é um fluxograma que ilustra ou descreve esquematicamente as várias etapas que podem ser conduzidas de acordo com uma modalidade da invenção. Essas etapas são similares àquelas descritas na patente de Andersen, exceto que o procedimento ilustrado na Figura 5 seleciona e depois

utiliza um fator K de projeto, com base nos requisitos de resistência mecânica e assentamento mínimos específicos, quando do cálculo da resistência mecânica de projeto de cada projeto de mistura de concreto hipotético gerado pelo processo DOC aperfeiçoado. Desse modo, não obstante a similaridade que pode existir entre as etapas de processo ilustradas na Figura 5 e aquelas descritas na patente de Andersen, o processo da Figura 5 não era conhecido na técnica anterior, como aqui representado. As doze etapas são resumidas como se segue:

Etapa 1: Determinação da densidade de compactação máxima e composição correspondente de uma mistura de concreto seca, tendo cimento e um ou mais tipos de agregados;

Etapa 2: Utilização de um fator K correspondente à resistência mecânica desejada ou de projeto, determinação da mistura de concreto ótima inicial que está mais próxima da densidade de compactação máxima e tem uma resistência mecânica, um assentamento e coesão desejados em uma relação de agregado fino para grosseiro específico;

Etapa 3: Utilização de um fator K correspondendo à resistência mecânica de projeto, projeto de várias misturas ótimas e comparação do custo unitário para cada mistura ótima nas relações de agregados finos para grosseiros definidas, de modo a determinar a mistura ótima global com relação ao custo;

Etapas 4 - 7: Cálculo dos efeitos da combinação individual das diferentes misturas incluindo poeira de cinzas, fumo de sílica, agentes redutores de água, ou cargas,

respectivamente, para identificar uma ou mais misturas de concreto ótimas;

Etapa 8: Determinação da melhor mistura ótima tendo as propriedades desejadas e custo mínimo para misturas
5 que incluem agregado fino, cimento, agregado grosseiro, água de mistura e duas ou mais misturas selecionadas de poeira de cinzas, fumo de sílica e agentes redutores de água;

Etapa 9: Modificação da mistura resultante para garantir que reflète a concentração adequada de agente de
10 entranhamento de ar, de modo a ter o teor de ar adequado;

Etapa 10: Utilização de um fator de correção para otimizar ainda mais os resultados das etapas anteriores e garantir assentamento adequado;

Etapa 11: Ajuste da porosidade, se necessário, para garantir que a mistura selecionada tem durabilidade suficiente para seu uso intencionado; e
15

Etapa 12: Determinação precisa do volume de peso dos vários componentes de uma mistura necessária, para produzir um rendimento de concreto desejado.
20

As etapas precedentes descritas acima e ilustradas na Figura 5 vão ser descritas a seguir, com mais particularidade.

A. Etapa 1: Determinação da densidade de compactação máxima

25 A etapa 1 inclui a determinação da densidade de compactação máxima de uma mistura de concreto seca, para um determinado conjunto de matérias-primas (isto é, cimento e um ou mais tipos de agregado). Uma descrição detalhada de

uma modalidade exemplificativa para a determinação de uma razão de cimento hidráulico e um ou mais tipos de agregados, que maximiza a densidade de compactação de partículas, é apresentada na patente de Andersen na col. 18, linha 1 - co-
5 luna 25, linha 5. Vários métodos, incluindo as técnicas de medida e os algoritmos matemáticos, para determinação do tamanho de partícula e da densidade de compactação para cada uma das entradas de matérias-primas, são descritos nessa seção da patente de Andersen. A discussão na coluna 18, linha
10 1 - coluna 25, linha 5 da patente de Andersen descreve atos exemplificativos, que podem ser usados para conduzir a etapa 1.

Inicialmente, cada um dos componentes agregado e cimento é definido pelos seus respectivos tamanhos de diâmetro médios (d') e densidade de compactação natural (ϕ). Es-
15 ses valores podem ser determinados experimentalmente e podem ser usados para calcular a densidade de compactação teórica de uma composição de concreto teórica. O tamanho do diâmetro médio é determinado por uso de métodos conhecidos, tais como
20 por representação gráfica da distribuição de tamanhos de partícula de cada material de acordo com a distribuição de Rosin - Rammler - Sperling - Bennet, descrita pela equação:

$$R(D) = \exp \left\{ -\left(\frac{d}{d'}\right)^n \right\}$$

Nela, d é o diâmetro de partícula, $R(D)$ é a probabilidade cumulativa que o diâmetro seja menor de d , d_1 é o
25 diâmetro para o qual $R(d_1) = 0,368$ correspondendo a 36,8% de

resíduo nesse tamanho de peneira, e n é a inclinação da linha definida por representação gráfica do percentual de partículas retido em uma peneira versus o tamanho da peneira.

A densidade de compactação de cada tipo de material, (ϕ) , é determinada por colocação dele em um cilindro, tendo um diâmetro de pelo menos 10 vezes o maior diâmetro de partícula do material. O cilindro é depois tampado contra uma superfície dura, até que o material fique inteiramente compactado. Por meio de leitura do material compactado no cilindro e do peso de material, a densidade de compactação é calculada de acordo com a fórmula:

$$\phi = \frac{W_M}{SG_M \cdot V_M}$$

na qual:

W_M = peso do material;

SG_M = peso específico do material; e

V_M = volume do material.

Desse modo, não apenas é o volume de partículas quantificado, mas isso é feito em função da morfologia da partícula, área superficial específica e outras características superficiais específicas.

A densidade de compactação máxima de uma mistura de três componentes, convencional, incluindo cimento, um tipo de agregado fino e um tipo de agregado grosseiro é determinada por variação incremental do volume de cada componente

na mistura e cálculo da densidade de compactação correspondente. As várias densidades de compactação são então representadas graficamente em um diagrama de densidade de compactação de forma triangular, de modo a determinar que composição tem a densidade de compactação máxima. Por meio de exemplo, a Figura 6A é um diagrama de densidade de compactação para uma mistura ternária de cimento, areia de quartzo (0 - 2 mm) e granito britado (8 - 16 mm). O lado (A) do diagrama define o percentual de volume de agregado fino (areia); o lado (B) define o percentual de volume do cimento; e a parte de fundo ou lateral (C) define o percentual de volume de agregado grosseiro (granito britado). Os valores dentro do triângulo representam a densidade de compactação em vários percentuais de volume das misturas dos componentes. O diagrama pode ser lido da seguinte maneira:

Subetapa 1(a): Selecionar uma densidade de compactação desejada de dentro do triângulo. Por meio de exemplo, o ponto "Z" é selecionado na Figura 6B, que representa a densidade de compactação máxima para a mistura definida.

Subetapa 1(b): Determinar o percentual de volume de cimento usado na mistura de concreto, necessário para obter a densidade de compactação no ponto "Z", por extensão de uma linha horizontal do ponto "Z" para o lado (B) do triângulo. O valor definido por onde a linha e o lado (B) do triângulo se interceptam é o percentual de volume de cimento necessário para obter a densidade de compactação desejada. No exemplo da Figura 6B, o percentual de volume é aproximadamente 10%.

Subetapa 1(c): Determinar o percentual de volume de agregado fino na mistura por extensão de uma linha 22, paralela ao lado (B) do triângulo, a linha partindo do ponto "Z" e interceptando o lado (A) do triângulo. O valor definido onde a linha 22 e o lado (A) se interceptam é o percentual de volume de agregado fino necessário para obter a densidade de compactação desejada. No exemplo, o percentual de volume de agregado fino é aproximadamente 30%.

Subetapa 1(d): Uma vez que percentual de volume da mistura deve somar 100%, segue logicamente se a mistura é 10% de cimento e 30% de agregado fino, que o percentual de volume de agregado grosseiro deve ser 60%. Esse valor, no entanto, pode ser também determinado do diagrama de densidade de compactação por extensão de uma linha 24 paralela ao lado (A), a linha partindo no ponto "Z" e interceptando o lado (C). O valor na interceptação da linha 24 e do lado (C) corresponde ao percentual de volume de agregado grosseiro. Como mostrado na Figura 6B, o valor passa a ser aproximadamente 60%. Usando esse método, a composição pode ser determinada para qualquer densidade de compactação no diagrama ou, usando a operação inversa, a densidade de compactação pode ser determinada para qualquer composição desejada.

Os valores de densidade de compactação dentro do diagrama são avaliados do modelo de Toufar, Klose e Born (a seguir "modelo Toufar"), usado em conjunto com um fator de correção. O modelo Toufar é uma fórmula para cálculo das densidades de compactação de misturas binárias:

$$\phi = \frac{1}{\frac{r_1}{\phi_1} + \frac{r_2}{\phi_2} - r_2 \cdot \left(\frac{1}{\phi_2} - 1 \right) \cdot \frac{d_2 - d_1}{d_1 + d_2} \cdot \left\{ 1 - \frac{1 + 4 \cdot \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{\phi_2}{\phi_1 \cdot (1 - \phi_2)}}{\left[1 + \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{\phi_2}{\phi_1 \cdot (1 - \phi_2)} \right]} \right\}}$$

na qual:

r_1 = volume de partículas menores;

d_1 = diâmetro de partículas menores;

d_2 = diâmetro de partículas maiores;

5 ϕ_1 = densidade de compactação das partículas menores; e

ϕ_2 = densidade de compactação das partículas maiores;

Outros modelos também podem ser usados para calcular as densidades de compactação de misturas binárias. Os exemplos de modelos aplicáveis são o modelo Aim e o modelo Larrard discutidos no artigo de Johansen, V. e Andersen, P. J., "Particle Packing and Concrete Properties", 118 - 122, Materials Science of Concrete II (The American Ceramic Society, Inc., 1991). Uma discussão adicional relativa à densidade de compactação, incluindo o uso de pseudopartículas para determinar as densidades de compactação, usando o modelo Toufar para misturas binárias, é apresentada na patente de Andersen.

20 Em uma modalidade alternativa, o tamanho de partícula médio d' é determinado para cada componente, usando métodos conhecidos, mas em vez da medição efetiva da densidade de compactação ϕ , a densidade de compactação para cada com-

ponente ϕ é considerada como sendo 0,5, 0,55 ou 0,6, uma vez que as partículas sólidas têm, tipicamente, uma densidade de compactação de partícula variando de 0,5 a 0,6. O programa de otimização pode ser então conduzido usando as etapas exemplificativas discutidas abaixo, com a condição que o assentamento efetivo vai igualmente variar do assentamento teórico ou previsto, devido às variações entre a densidade de compactação e a densidade de compactação considerada. Por conseguinte, uma etapa de correção final é conduzida ao ou próximo do final do processo (por exemplo, como parte da etapa 10 discutida abaixo). Em virtude do assentamento poder ser medido no momento em que uma mistura de concreto é preparada, diferentemente da resistência mecânica, as correções do assentamento não são intensas em tempo. Uma curva de correção de assentamento, como exemplificado pela figura 7, pode ser preparada por composição de duas misturas de concreto tendo assentamentos mais altos e mais baixos, representação gráfica dos assentamentos alto e baixo (por exemplo, 5 cm e 15 cm) contra a concentração correspondente de água em % de volume para as duas misturas de concreto, e depois estendendo uma linha reta entre os dois pontos. O volume de água correlacionado a qualquer assentamento desejado é mostrado na curva (por exemplo, a correlação indicada pela linha pontilhada). Um projeto de mistura final, tendo um assentamento desejado, pode ser preparado por utilização de uma proporção de água, mostrada na curva de assentamento correspondente ao assentamento desejado.

Como parte do programa DOC aperfeiçoado, o tamanho

de partícula médio d' , medido para cada componente sólido, e a densidade de compactação das partículas para cada componente sólido, se medida ou estimada, são introduzidos em um sistema de computação. Esses valores afetam as propriedades que são depois determinadas para cada um da pluralidade de projetos de mistura, que são criados. O tamanho de partícula e as densidades de compactação das partículas permitem que o sistema de computação, em virtude de um ou mais algoritmos inter-relacionados, "teste" hipoteticamente as propriedades resultantes de cada composição de concreto virtual, com base nos projetos de mistura que são criados como parte do processo de otimização de projeto.

B. Etapa 2: Otimização das propriedades

A etapa 2 envolve determinar uma mistura de concreto inicial, que é mais próxima da densidade de compactação máxima determinada na etapa 1 e que tem as resistências mecânicas, assentamento e opcionalmente desejados, a uma razão de agregados fino para grosseiro específica. Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa de um processo para identificar uma mistura de concreto, que é otimizada com relação à resistência mecânica, ao assentamento e, opcionalmente, à coesão, é apresentada na patente de Andersen na coluna 25, linha 8 - coluna 29, linha 10. O termo "coesão" se refere à tendência da composição de concreto de resistir à segregação e purga. Vários métodos, incluindo algoritmos matemáticos para otimizar uma mistura de concreto, com relação à resistência mecânica, ao assentamento e, opcionalmente, à coesão, são descritos nessa seção da patente

de Andersen. A discussão na coluna 25, linha 8 - coluna 29, linha 10 da patente de Andersen descreve atos exemplificativos, que podem ser usados para conduzir a etapa 2.

Na subetapa 2(a), uma mistura inicial, que é suficientemente próxima da densidade de compactação máxima, para otimizar as propriedades do concreto sem segregação ou purga, é selecionada por primeiro, como discutido na etapa 1, localizar a densidade de compactação máxima no diagrama de densidade de compactação e na composição de volume correspondente. O volume do cimento correspondente, agregado fino e agregado grosseiro, no ponto de compactação máxima, são respectivamente definidos pelas variáveis $V_{C(MF)}$, $V_{F(MP)}$ e $V_{CA(MF)}$, que somam até 1,0. A seguir, o volume de cimento é mantido constante, enquanto que o volume de agregado fino é aumentado por uma quantidade definida como o fator de segurança de coesão, e o volume de agregado grosseiro é diminuído pela mesma quantidade. A mistura é desse modo movimentada horizontalmente à esquerda no diagrama de densidade de compactação. A mistura correspondente é definida como a mistura inicial.

O volume (V) dos componentes na mistura inicial são definidos pelas equações:

$$V_C = V_{C(MF)}$$

$$V_F = V_{F(MP)} + CF$$

$$V_{CA} = V_{CA(MF)} - CF$$

Nas equações, a variável CF representa o fator de segurança de coesão e é tipicamente cerca de 0,05. O fator de segurança de coesão garante que a mistura tem agregado

fino suficiente, para produzir uma mistura coesiva, que não vai segregar ou ser purgada. As misturas para a direita da mistura inicial do diagrama de densidade de compactação vão tipicamente segregar ou serem purgadas. O fator de segurança de coesão pode variar em uma faixa entre cerca de 0 a cerca de 0,15, dependendo do tipo de concreto. Um concreto de resistência mecânica mais baixa requer, tipicamente, um fator de coesão mais alto de até 0,15, enquanto que um concreto de resistência mecânica mais alta requer um fator de coesão mais baixo inferior a cerca de 0,5.

A razão de agregados fino para grosseiro da mistura inicial é definida por uma linha de pseudopartículas, estendendo-se do ápice do diagrama de densidade de compactação, pela posição da mistura inicial, e para a linha de agregado grosseiro (Figura 6C, comparar as Figuras 6A - 6B). As subetapas a seguir são apresentadas como um exemplo de como determinar a mistura de concreto ótima ao longo dessa linha de pseudopartículas definida.

Na subetapa 2(b), a densidade de compactação da composição da mistura de concreto inicial é determinada como descrito na etapa 1.

Na subetapa 2(c), a proporção de água de mistura, necessária para dotar a mistura de concreto inicial com um assentamento desejado predeterminado, é determinada. A determinação dessa proporção de água é um processo de duas etapas. Primeiro, a proporção de água necessária para dotar a mistura com um assentamento de 1 cm é determinada usando a seguinte fórmula:

$$W_1 = (1/\varphi) - 1$$

na qual:

φ = a densidade de compactação da mistura, como definida na subetapa 2(b); e

5 W_1 = o volume de água necessário para dotar a mistura com um assentamento de 1 cm; o valor para W_1 é a fração do volume dos sólidos na mistura.

Uma vez que W_1 é calculado para uma assentamento de 1 cm, a proporção de água necessária para o assentamento
10 desejado é calculada usando a seguinte fórmula de Popovic:

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{0.1}}$$

na qual:

W_1 = o volume de água necessário para um assentamento de 1 cm, como definido previamente;

15 W_2 = o volume de água necessário para dotar a mistura com uma assentamento desejado;

S_1 = 1,0 representando um assentamento de 1,0 cm (corrigir o expoente de fato encontrado para ser 0,085 pelos inventores); e

S_2 = o assentamento desejado em centímetros.

20 Na subetapa 2(d), usando os resultados das subetapas 2(a) - 2(c), calcular a resistência mecânica compressiva em 28 dias da mistura resultante usando a equação de Feret:

$$\sigma = K \cdot \left(\frac{V_c}{V_c + V_w + V_A} \right)^2$$

na qual:

σ = resistência mecânica compressiva de 28 dias da mistura de concreto, em MPa;

V_c = volume de cimento na mistura;

5 W_2 = volume de água, definido na etapa 2(c), necessário para dotar a mistura com o assentamento desejado;

K = constante de Feret, que é foi então descoberta para variar com a resistência mecânica compressiva σ , como ilustrado nas Figuras 1 - 3; e

10 V_A = o volume de ar na mistura e é definido pela seguinte equação:

$$V_A = \left(\frac{1 + W_2}{1 - \frac{\% \text{ AIR}}{100}} \right) - 1 - W_2$$

Nela, AR é o volume percentual estimado de ar na mistura. O volume de ar em uma mistura varia com base no tipo de misturador usado, volume de agregado fino na mistura e tipos de misturas combinados com a mistura. O percentual de volume de ar pode ser estimado por aqueles versados na técnica, e é geralmente entre cerca de 1% a 2%, para um assentamento superior a 10 cm, e entre 2% e 4%, para assentamento inferior a 10 cm.

20 Na subetapa 2(e), a resistência mecânica teórica

compressiva resultante, σ , é comparada com a resistência mecânica desejada. Se a resistência mecânica teórica da mistura for menor do que a resistência mecânica desejada, as sub-
 etapas 2(b) - 2(e) são repetidas por substituição da mistura
 5 inicial com uma outra mistura e uma outra densidade de compactação correspondente. A composição da outra mistura é obtida por aumento ou diminuição do volume de cimento, para obter a resistência mecânica desejada. Uma estimativa do volume de cimento necessário, para obter a resistência mecânica
 10 desejada, é determinada por introdução da resistência mecânica desejada na equação de Feret, e resolução para o volume correspondente de cimento de acordo com a seguinte equação:

$$V_{C(H)} = \left(\frac{1 + W_2}{1 - \frac{\% \text{ AIR}}{100}} - 1 \right) \cdot \frac{\left(\frac{\sigma_D}{K} \right)^{0.5}}{\left(1 - \frac{\sigma_D}{K} \right)^{0.5}} \quad (16)$$

na qual:

15 $V_{C(H)}$ = volume de cimento na outra estrutura;

W_2 = volume de água necessário para obter o assentamento desejado na mistura inicial ou prévia;

% AR = percentual de volume estimado de ar na mistura;

20 K = constante de Feret, que varia com a resistência mecânica do concreto; e

σ_D = a resistência mecânica desejada em MPa.

Na medida em que o volume de cimento varia para a outra mistura, os volumes de agregado fino e agregado grosseiro devem ser normalizados, de modo que os volumes de agregado fino, agregado grosseiro e cimento somem até 1,0. No entanto, a razão de agregados fino para grosseiro se mantém constante. Conseqüentemente, os volumes de agregado fino e agregado grosseiro nessa mistura são definidos pelas equações:

$$V_{F(N)} = \tau_F \cdot (1 - V_{C(N)})$$

$$V_{CA(N)} = \tau_{CA} \cdot (1 - V_{C(N)})$$

em que:

τ_F e τ_{CA} são as razões de agregado fino e agregado grosseiro, respectivamente, e são constantes para cada linha de pseudopartículas. As razões são definidas pela equação:

$$\tau_F = V_F / (V_F + V_{CA})$$

$$\tau_{CA} = V_{CA} / (V_F + V_{CA})$$

Essa outra mistura corresponde à posição no diagrama de densidades de compactação, definida pela intercepção da linha de pseudopartículas descrita na subetapa 2(a) e uma linha horizontal estendendo-se do outro volume de cimento, determinado pela equação (16) acima. Na medida em que o volume de cimento varia, movimenta-se para cima e para baixo na linha de pseudopartículas. As subetapas 2(b) - 2(d) são continuamente repetidas, até que a resistência mecânica teórica da mistura fica igual à resistência mecânica desejada, e a mistura resultante para a razão de agregados fino para grosseiro tem os assentamento e resistência mecânica desejados, usando uma proporção mínima de cimento e água.

Tipicamente, a mistura desejada é encontrada dentro de dez iterações.

C. Etapa 3: Otimização de custo

A etapa 3 envolve a comparação do custo unitário de várias misturas ótimas, em razões de agregados fino para grosseiro definidas, de modo a determinar uma ou mais misturas otimizadas globais, que são também otimizadas em termos de baixo custo. Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa para identificar uma mistura de concreto, que é otimizada com relação ao custo, enquanto também tendo os assentamento e resistência mecânica desejados, é apresentada na patente de Andersen na coluna 29, linha 13 - coluna 30, linha 42, constitui atos exemplificativos para conduzir a etapa 3.

De acordo com uma modalidade, isso pode ser feito calculando primeiro o custo unitário da mistura ótima inicial determinada na etapa 2. Uma composição ótima e o custo unitário resultante são então determinados para uma segunda mistura ótima, definida por uma outra razão de agregados fino para grosseiro. A outra razão de agregados fino para grosseiro é obtida por diminuição do percentual de volume de agregado grosseiro por 1% e aumento do percentual de volume do agregado fino, respectivamente. O custo unitário da segunda mistura ótima é então comparado com o custo unitário da mistura inicial. Se o custo da mistura inicial for menor do que o custo da segunda mistura, a composição da mistura inicial é a mais econômica e o processo é superior. Se a segunda mistura for inferior em custo à mistura inicial, a ra-

ção de agregados fino para grosseiro é de novo variada, de modo a obter uma terceira mistura ótima. A comparação de custo é então repetida até que seja obtida a mistura mais barata.

5 A combinação das etapas 1 - 3 proporciona métodos exemplificativos para projetar uma mistura de cimento, água e agregado, tendo resistência mecânica e assentamento desejados. A proporção de água incorporada na mistura pode ser minimizada para maximizar a resistência mecânica. As propor-

10 ções de agregado fino, agregado grosseiro e cimento podem ser otimizadas para minimizar o custo da mistura. Além do mais, usando-se o processo mencionado acima, as misturas tendo propriedades desejadas podem ser, consistente e precisamente, produzidas, independentemente das variações na carga de alimentação. As etapas 1 - 3 também podem ser usadas

15 para determinar a mistura de mais alta durabilidade. Como vai ser discutido abaixo na etapa 11, a mistura com mais alta durabilidade é definida como a mistura com a porosidade total mais baixa possível. Isso é porque, em geral, na medida em que a porosidade aumenta, a durabilidade da mistura diminui. Os estudos determinaram que a porosidade de uma

20 mistura diminui na medida em que a densidade de compactação aumenta. Desse modo, as misturas mais próximas da densidade de compactação máxima vão ser previstas como tendo genericamente a mais alta durabilidade.

25

As etapas 4 a 7 proporcionam outras possibilidades de otimização, por cálculo opcional dos efeitos individuais da combinação de diferentes misturas, tais como poeira de

cinzas, fumo de sílica, agentes redutores de água, ou cargas, dentro de uma mistura de concreto.

D. Etapa 4: Determinação do efeito de poeira de cinzas

5 Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa para identificar uma mistura de concreto ótima, que inclui poeira de cinzas, é apresentada na patente de Andersen na coluna 30, linha 44 - coluna 33, linha 63. Essa seção da patente de Andersen inclui algoritmos matemáticos exemplificativos relativos ao uso de poeira de cinzas, e dos atos exemplificativos correspondentes à etapa 4.

15 Em geral, o processo inclui, primeiro, as etapas repetitivas 1 e 2, de modo a determinar a mistura ótima (sem uma mistura) tendo propriedades de resistência mecânica e assentamento desejadas, para uma razão de agregados fino para grosseiro definida. Com base na composição da mistura ótima resultante, um percentual de volume é incrementalmente substituído com poeira de cinzas. Na medida em que o volume de poeira de cinzas é aumentado, o custo unitário de cada

20 mistura é calculado e comparado com a mistura prévia, para determinar a mistura mais barata para a razão de agregados fino para grosseiro definida.

25 A razão de agregados fino para grosseiro é então variada por movimentação de 1% à esquerda no diagrama de densidade de compactação. O processo mencionado acima é então repetido para determinar a mistura mais barata, usando poeira de cinzas com a outra razão de agregados fino para grosseiro. O custo unitário para as misturas ótimas, nas di-

ferentes razões de agregados fino para grosseiro, é então comparado, para determinar a mistura mais barata. O processo continua a movimentar-se para a esquerda no diagrama de densidade de compactação, até que a mistura ótima global, tendo 5 poeira de cinzas e as propriedades desejadas, seja obtido. Um algoritmo exemplificativo que considera o efeito da poeira de cinzas no assentamento envolve a seguinte equação de Popovic modificada:

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{0.1}} - W_{FA}$$

na qual:

10 W_{FA} é uma redução, em consequência da poeira de cinzas, no volume de água necessário para produzir uma mistura com um assentamento desejado, e é determinada pela equação:

$$W_{FA} = \frac{W_1 \cdot \% FA \cdot 6}{100 \cdot 37}$$

na qual:

15 W_1 = o volume de água de mistura necessário para um assentamento de 1,0 cm em uma mistura padrão, como definido acima; e

$\%FA$ = o percentual de volume de poeira de cinzas na combinação de poeira de cinzas e cimento.

O valor de W_2 pode ser depois usado para calcular a resistência mecânica em 28 dias, usando uma versão modificada da equação de Feret, que considera a poeira de cinzas, tal como:

$$\sigma = K \left(\frac{V_C + K_2 V_{FA}}{V_C + K_2 V_{FA} + W_2 + V_A} \right)^2$$

5 Quando K_2 é uma constante para poeira de cinzas, e varia, tipicamente, entre 0,3 e 0,6.

E. Etapa 5: Determinação do efeito de fumo de sílica

Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa, para identificar uma mistura de concreto ótima, que inclui fumo de sílica (aka, fumo de sílica), é apresentada na patente de Andersen et al. na coluna 33, linha 65 -
 10 coluna 35, linha 40. Essa seção da patente de Andersen inclui algoritmos matemáticos exemplificativos relativos ao
 15 uso de fumo de sílica e atos exemplificativos correspondentes à etapa 5.

A mistura ótima usando fumo de sílica pode ser determinada da mesma maneira usada na determinação da proporção adequada de poeira de cinzas na etapa 4. No entanto, as
 20 fórmulas para a proporção necessária de água e resistência mecânica resultante são diferentes. Em contraste com a poeira de cinzas, o fumo de sílica requer mais água para um determinado assentamento, mas o fumo de sílica confere uma

maior resistência mecânica à mistura de concreto. Com relação ao diagrama de densidade de compactação, o volume de fumo de sílica é também considerado como parte do volume de cimento na mistura. Se desejado, uma pseudopartícula pode ser usada para representar a combinação de cimento e fumo de sílica. Um algoritmo exemplificativo, que considera o efeito de fumo de sílica no assentamento, envolve a seguinte equação de Popovic modificada:

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{0.1}} + W_{SF}$$

Nela, W_{SF} é um aumento, em conseqüência do fumo de sílica, no volume de água necessário para produzir uma mistura com um assentamento desejado, e é determinado pela equação:

$$W_{SF} = \frac{W_1 \cdot \% SF \cdot 20}{100 \cdot 20}$$

Na qual, % SF = o percentual de volume de fumo de sílica na combinação de fumo de sílica e cimento.

O valor para W_2 pode ser então usado para calcular a resistência mecânica de 28 dias, usando uma versão modificada da equação de Feret, que considera o fumo de sílica, tal como:

$$\sigma = K \left(\frac{V_C + K_3 V_{SF}}{V_C + K_3 V_{SF} + W_2 + V_A} \right)^2$$

Nela, K_3 = uma constante de reatividade descrevendo o desenvolvimento de resistência mecânica por volume de fumo de sílica, comparável ao mesmo volume de cimento. Tipicamente, esse valor é entre 1,5 e 4, com 2 sendo o valor preferido. O valor efetivo pode ser determinado empiricamente para um determinado fumo de sílica.

F. Etapa 6: Determinação do efeito dos agentes redutores de água

Uma descrição detalhada em uma modalidade exemplificativa para identificar uma mistura de concreto ótima, que inclui agentes redutores de água, é apresentada na patente de Andersen et al. na coluna 35, linha 45 - coluna 37, linha 55. Essa seção da patente de Andersen inclui algoritmos matemáticos exemplificativos relativos ao uso de agentes redutores de água e atos exemplificativos correspondentes à etapa 6.

Considerando que apenas agentes redutores de água são adicionados a uma mistura de concreto padrão, o processo para obtenção da mistura ótima é o mesmo que aquele usado para a etapa 4, para obter uma mistura ótima usando poeira de cinzas. A única diferença é que as fórmulas para determinação da proporção necessária de água de mistura e a resistência mecânica resultante são modificadas. O processo inclui a determinação da mistura ótima para a primeira razão

de agregados fino para grosseiro. Proporções incrementais de agentes redutores de água são depois adicionadas à mistura. O custo unitário dessas misturas é calculado e comparado, de modo a determinar a mistura ótima tendo agentes redutores de água, na razão de agregados fino para grosseiro inicial. A razão de agregados fino para grosseiro é então variada e o processo é repetido. Por comparação do custo unitário para as misturas ótimas em cada estrutura polimérica absorvente de água não tratada (Pu), a mistura ótima global usando agentes redutores de água pode ser determinada.

Com base nos parâmetros do agente redutor de água padrão, o percentual de volume de água necessário para produzir uma mistura, incluindo um agente redutor de água, com um assentamento desejado, é determinado pela seguinte equação:

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{0.1}} - W_{WR}$$

No qual, W_{WR} é uma redução, como resultado do agente redutor de água, no volume de água necessário para produzir uma mistura com um assentamento desejado e é determinado pela equação:

$$W_{WR} = \frac{W_1 \cdot \% WR \cdot 30}{100(2)}$$

Na qual, W_1 = o volume de água de mistura necessário para um assentamento de 1,0 cm, como definido previamente, e % WR = a quantidade percentual de agente redutor de água na mistura por peso de cimento.

5 O valor para W_2 pode ser então usado para calcular a resistência mecânica de 28 dias usando a equação de Feret. Como os agentes redutores de água não contribuem independentemente para a resistência mecânica do concreto, as mesmas fórmulas usadas na etapa 2 podem ser usadas para calcular a

10 resistência mecânica de 28 dias e para estimar o volume de cimento necessário para obter a resistência mecânica desejada. Uma vez que a proporção de água necessária para o assentamento desejado é diminuída, por uso de um agente redutor de água, a razão água - cimento na mistura é diminuída, des-

15 se modo, aumentando a resistência mecânica da mistura resultante. Conseqüentemente, a proporção de cimento pode ser reduzida até que uma mistura seja definida, possuindo a resistência mecânica e o assentamento desejados e tendo o agente redutor de água inicial a 0,1%. Uma comparação de custo é

20 depois feita e, se a mistura com o agente redutor de água for mais barata, um agente redutor de água a 0,1% adicional é incorporado à mistura. O processo acima é depois novamente repetido, de acordo com o formato descrito na etapa 4 para poeira de cinzas, até que a mistura ótima, incluindo um a-

25 gente redutor de água, seja determinada.

G. Etapa 7: Determinação do efeito de cargas

Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa para identificar uma mistura de concreto ótima, que

inclui cargas (por exemplo, pedra finamente moída), é apresentada na patente de Andersen et al. na coluna 37, linha 57 - coluna 38, linha 59. Essa seção da patente de Andersen inclui algoritmos matemáticos exemplificativos relativos ao uso de cargas e atos exemplificativos correspondentes à etapa 7.

As cargas geralmente não possuem propriedades cimenteiras e, desse modo, não contribuem diretamente para a resistência mecânica do concreto resultante. Similares à poeira de cinzas, no entanto, as cargas não diminuem a proporção de água de mistura necessária para obter um assentamento desejado, comparado ao cimento e, conseqüentemente, podem afetar indiretamente o assentamento e a resistência mecânica do concreto resultante. Por meio de exemplo e não limitação, as cargas podem incluir carbonato de cálcio, dolomita, granito, basalto e minério, que são britados para ter um tamanho de partícula similar aos diâmetros da poeira de cinzas inferiores a 100 μm . A redução na proporção de água, necessária para obter um assentamento desejado, é uma conseqüência da forma aproximadamente esférica de determinadas cargas e da falta de atividade hidráulica. Um algoritmo exemplificativo, que considera o efeito de cargas no assentamento, envolve a seguinte equação de Popovic modificada:

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{0.1}} - W_F$$

Na qual, W_F é uma redução, em consequência da carga, no volume de água necessário para produzir uma mistura com um assentamento desejado, e é determinada pela equação:

$$W_F = \frac{W_1 \cdot \% \text{ FIL} \cdot 6}{100 (37)}$$

Na qual, % FIL = o percentual de volume de carga na combinação de carga e cimento.

O valor para W_2 pode ser então usado para calcular a resistência mecânica de 28 dias. Como as cargas não contribuem independentemente para a resistência mecânica do concreto, as mesmas fórmulas usadas na etapa 2 podem ser usadas para calcular a resistência mecânica de 28 dias e para estimar o volume de cimento necessário para obter a resistência mecânica desejada.

H. Etapa 8: Sistema de otimização de projeto combinado

Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa, para determinar o efeito combinado de adição de duas ou mais misturas a um projeto de mistura de concreto (por exemplo, dois ou mais de poeira de cinzas, fumo de sílica e agente redutor de água), é apresentada na patente de Andersen et al. na coluna 38, linha 61 - coluna 43, linha 13. Essa seção da patente de Andersen inclui algoritmos matemáticos exemplificativos relativos para identificar uma mistura de concreto ótima, que utiliza misturas múltiplas, bem como os atos correspondentes à etapa 8.

Uma vez que o processo seja entendido para como otimizar uma mistura de concreto usando uma mistura única em conjunto com cimento, agregado fino, agregado grosseiro e água, os vários processos podem ser combinados em um sistema usando um "comando de circuito fechado" embutido, que permite que se determine a mistura ótima tendo combinações seletivas de misturas, as misturas incluindo poeira de cinzas, fumo de sílica e agentes redutores de água. Esse processo considera essencialmente os efeitos no assentamento, custo e outros fatores desejados, quando da utilização de duas ou mais misturas. Em um aspecto, a seguinte equação de Feret modificada exemplificativa pode ser utilizada, que considera duas ou mais misturas (por exemplo, poeira de cinzas e fumo de sílica) dentro da pasta de cimento e do efeito delas na resistência mecânica:

$$\sigma = K \left(\frac{V_C + K_2 V_{FA} + K_3 V_{SF}}{V_C + K_2 V_{FA} + K_3 V_{SF} + W_2 + V_A} \right)^2$$

na qual:

$$V_{SF} = \% SF \cdot (V_T/100)$$

$$V_{FA} = \% \cdot (V_T/100)$$

$$V_C = V_T - V_{SF} - V_{FA}$$

Na qual, V_T = volume total de cimento, fumo de sílica e poeira de cinzas na mistura. As outras variáveis são como previamente definidas nas etapas 4 e 5.

A equação a seguir define a proporção de água necessária para propiciar uma mistura incluindo poeira de cin-

zas e fumo de sílica de um assentamento desejado:

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{0.1}} - W_{FA} + W_{SF}$$

Na qual, W_{SF} e W_{FA} são como definidos nas etapas 4 e 5.

A lógica do procedimento de otimização pode ser empregada na etapa 8, como ilustrado no fluxograma de lógica, mostrado nas Figuras 8A e 8B, e na árvore da lógica, mostrada na Figura 8C. As Figuras 8A - 8C ilustram esquematicamente os atos exemplificativos correspondentes à etapa 8. Em muitos modos, o processo é similar àquele das etapas anteriores, exceto que a poeira de cinzas e o fumo de sílica apenas deslocam uma parte do cimento hidráulico. Por consequência, a razão de agregados fino para grosseiro não precisa ser variada nessa etapa. O que é variado são as várias razões de cimento, agregados, poeira de cinzas e fumo de sílica, para determinar um projeto de mistura, que é otimizado para custo e que inclui dois ou mais de poeira de cinzas, fumo de sílica e um agente redutor de água.

No caso da resistência mecânica desejada não ser igual à resistência mecânica calculada, os valores estimados para outros volumes de cimento, poeira de cinzas e fumo de sílica podem ser calculados das seguintes equações, respectivamente:

$$V_{C(N)} = \frac{\left(\frac{\sigma_D}{K}\right)^{0.5} \frac{W_2 + V_A}{1 - \left(\frac{\sigma_D}{K}\right)^{0.5}}}{1 + \frac{K_2 \cdot \% FA}{100 - \% FA} + \frac{K_3 \cdot \% SF}{100 - \% SF}}$$

$$V_{FA(N)} = \frac{\% FA \cdot V_{C(N)}}{100 - \% FA}$$

$$V_{SF(N)} = \frac{\% SF \cdot V_{C(N)}}{100 - \% SF}$$

na qual todas as variáveis são como definidas previamente nas etapas 4 e 5.

Finalmente, como discutido em relação à etapa 6, a adição de agentes redutores de água é apenas considerada na determinação da proporção de água necessária para propiciar uma mistura de assentamento desejado. Conseqüentemente, independentemente se o agente redutor de água vai ser adicionado à combinação de cimento e poeira de cinzas, cimento e fumo de sílica, ou à composição de cimento, poeira de cinzas e fumo de sílica, as equações definidas acima são apenas variadas por subtração da redução na proporção de água necessária para um assentamento desejado, em conseqüência da adição do agente redutor de água.

Por exemplo, a proporção necessária de água para um assentamento desejado em uma mistura contendo cimento, poeira de cinzas, fumo de sílica, agente redutor de água, agregado fino e agregado grosseiro é determinada pela seguinte equação:

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{0.1}} - W_{FA} + W_{SF} - W_{WR}$$

Na qual, os valores para W_{RA} , W_{SF} e W_{WR} são como os definidos nas etapas 4, 5 e 6, respectivamente.

Deve-se notar que os efeitos de pozolanas ou misturas também podem ser incorporados ao processo de otimização, por simples adição de outro comando de circuito fechado ao processo iterativo. De modo similar, as cargas podem ter sido adicionadas ao sistema acima, mas uma vez que as cargas são raramente (se jamais) adicionadas a uma mistura incluindo outras combinações, o resultado seria o mesmo.

10 I. Etapa patente de Andersen: Modificações usando agente de entranhamento de ar

A etapa 9 envolve, opcionalmente, a modificação na mistura de concreto usando um agente de entranhamento de ar, se necessário, para garantir que a composição de concreto tem um teor de ar adequado. Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa, para empregar agentes de entranhamento de ar, se necessários ou desejados, é apresentada na patente de Andersen et al. na coluna 43, linha 15 - coluna 44, linha 13. Essa seção da patente de Andersen inclui atos exemplificativos correspondentes à etapa patente de Andersen.

Diferentemente das misturas discutidas acima, os agentes de entranhamento de ar não são modelados no processo de otimização e, desse modo, devem ser corrigidos após o fa-

to. Os agentes de entranhamento de ar são misturas que estabilizam as bolhas formadas durante o processo de mistura, por abaixamento da tensão superficial da água. O agente de entranhamento de ar forma um filme repelente a água, que é

5 suficientemente forte para conter e estabilizar bolhas de ar. Diferentemente das bolhas de ar naturais, as bolhas de ar formadas pelo uso de um agente de entranhamento de ar são extremamente pequenas e têm um tamanho de diâmetro variando de cerca de 10 a cerca de 1.000 μm . Os benefícios para au-

10 mentar o percentual de volume de vazios de ar entranhados no concreto são a resistência mecânica aperfeiçoada, para congelar e descongelar o concreto endurecido em condições úmidas, e a maior trabalhabilidade da mistura de concreto não endurecida.

15 Uma vez que a mistura ótima é produzida de fato, o teor de ar efetivo na mistura pode ser determinado. Se o teor de água para um determinado assentamento, após completamento do processo de otimização, for muito baixo ou muito alto, comparado com o teor de ar considerado usado na sub-

20 tapa 2(c), o processo de otimização pode ser recalculado usando o valor corrigido para o teor de ar, ou a mistura pode ser restaurada com a proporção adequada de agente de entranhamento de ar. O teor de ar pode ser também modelado de acordo com a discussão na etapa 10 abaixo. Da mesma forma que

25 com os agentes redutores de água, o percentual de volume de um agente de entranhamento de ar em uma mistura é tipicamente tão pequeno, que o próprio agente não é considerado como afetando o volume da mistura. No entanto, a proporção resul-

tante de ar incorporada na mistura é considerada na determinação da resistência mecânica da mistura.

J. Etapa 10: Fator de correção do sistema

A etapa 10 identifica e implementa um fator de correção do sistema, para garantir que a composição de concreto final tenha o assentamento desejado. Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa para corrigir o assentamento, se necessário, é apresentada na patente de Andersen na coluna 44, linha 17 - coluna 45, linha 32. Essa seção da patente de Andersen et al. inclui algoritmos matemáticos exemplificativos relativos à correção de assentamento e os atos exemplificativos correspondentes à etapa 10.

Uma vez que o processo iterativo da etapa 8 esteja completo, uma análise de regressão linear pode ser usada para aperfeiçoar a precisão dos resultados do sistema. Isso pode ser feito por representação gráfica da proporção determinada teoricamente de água de mistura, necessária para obter um assentamento desejado versus a proporção efetiva de água de mistura, necessária para obter um assentamento desejado. A relação entre os valores representados graficamente é então definida e incorporada na fórmula de Popovic, de modo a aumentar a precisão da proporção teórica de água necessária para obter um assentamento desejado. Na prática, o processo acima inclui as seguintes subetapas:

Subetapa 10(a): Determinação da proporção teórica de água necessária para obter um assentamento desejado na mistura ótima definida na etapa 8. Essa proporção corresponde ao valor para W_2 , resolvido da fórmula de Popovic e é a

proporção usada na determinação da resistência mecânica de 28 dias resultante da mistura ótima.

Subetapa 10(b): Combinar fisicamente a proporção teórica de água com a mistura de concreto ótima da etapa 8.

5 A seguir, determinar experimentalmente o assentamento e o teor de ar efetivos da mistura. Em consequência das aproximações incorporadas no processo de otimização, vai haver, freqüentemente, uma discrepância entre os valores efetivos para assentamento e ar e os valores teóricos para assenta-
10 mento e ar.

Subetapa 10(c): Usando a fórmula de Popovic, resolver para a proporção de água, W_2 , necessária para propiciar a mistura definida de assentamento efetivo determinado na subetapa 10(b). As subetapas 10(b) e 10(c) propiciam en-
15 tão as proporções efetiva e teórica de água, respectivamente, necessárias para propiciar uma mistura específica de assentamento específico.

Subetapa 10(d): Repetir as etapas 10(a) - 10(c) para diferentes assentamentos desejados. As etapas devem ser
20 repetidas pelo menos três vezes, com a precisão dos resultados finais se aperfeiçoando quanto mais etapas são repetidas. Isso proporciona dois conjuntos de valores correspondentes às proporções efetiva e teórica de água, necessárias para obter um assentamento definido.

25 Subetapa 10(e): Representar graficamente os valores da etapa 10(d) com a proporção efetiva de água necessária para um assentamento específico, no eixo y, e a proporção teórica de água necessária para um assentamento especí-

fico, no eixo x. Os estudos mostraram que essa representação gráfica vai revelar uma relação linear.

Subetapa 10(f): Definir a relação linear da etapa 10(e) na seguinte forma:

$$W_{2c} = (W_2 \cdot m) + b$$

5 Nela, W_{2c} = proporção efetiva de água para um assentamento definido (em uso, o valor representa a proporção teórica corrigida de água para um assentamento definido), W_2 = proporção teórica de água para um assentamento definido, m = inclinação da representação gráfica na etapa 10(e), e b =
10 a interceptação em y.

Subetapa 10(g): Representar graficamente os valores do teor de ar determinados experimentalmente para todas as misturas versus os valores de assentamento determinados experimentalmente para as misturas correspondentes. Definir
15 a correlação na seguinte forma:

$$AIR_{ACT} = (SLUMP \cdot m) + b$$

Nela, AR_{ACT} = o volume de ar em uma mistura com base no assentamento correspondente; $ASSENTAMENTO$ = o assentamento para uma determinada mistura; m = inclinação da representação gráfica de assentamento efetivo versus teor de ar
20 correspondente, e, b = a interceptação em y da inclinação.

Subetapa 10(h): A fórmula da subetapa 10(f) é então incorporada no processo de otimização de projeto, de mo-

do que, após a proporção teórica de água de mistura, necessária para um assentamento desejado, é resolvida para a fórmula de Popovic, o valor resultante para W_2 é introduzido na equação descrita para a subetapa 10(f) acima. W_{2c} é então
5 resolvido para proporcionar um valor aperfeiçoado ou corrigido para a proporção de água necessária para obter um assentamento desejado. O assentamento desejado é então incorporado na equação descrita na subetapa 10(g), para obter o volume de ar na mistura. O volume de ar e o valor de corrigido resultantes são depois usados na equação de Feret, para
10 resolver para a resistência mecânica da mistura. O processo de otimização continua depois, como discutido previamente. Desse modo, o assentamento pode ser estimado para ficar dentro de ± 2 cm.

15 K. Etapa 11: Garantia de durabilidade suficiente

A etapa 11 garante que a composição de concreto tem uma durabilidade suficiente para o seu uso intencionado. Uma descrição detalhada de uma modalidade atualmente preferida, para garantir durabilidade suficiente, se necessária
20 ou desejada, é apresentada na patente de Andersen na coluna 45, linhas 34 - 60. Essa seção de Andersen et al. inclui um algoritmo matemático exemplificativo relativo à porosidade, que afeta a durabilidade e descreve os atos correspondentes à etapa 11.

25 O processo de otimização apresentado acima também pode usado para garantir que a composição de concreto selecionada tem durabilidade suficiente para o seu uso intencionado. A durabilidade é a capacidade de uma estrutura de con-

creto de manter a sua integridade por um longo período de tempo e é medida nessa patente em termos de porosidade. As misturas com uma alta porosidade têm, tipicamente, uma concentração excessivamente alta de água ou de agregado fino, e, como tal, têm uma baixa durabilidade. A porosidade total de uma mistura pode ser determinada pela equação apresentada a seguir, na qual se considera que já tenha ocorrido 80% da hidratação do cimento:

$$\text{Porosidade Total} = \left(\frac{W_w - 0.208 (W_c)}{10} \right) + \% \text{ Ar}$$

na qual:

10 W_w = peso de água por metro cúbico de concreto;

W_c = peso de cimento por metro cúbico de concreto;

e

% ar = volume percentual de ar na mistura, com base no volume de sólidos na mistura.

15 A equação acima pode ser assim usada com os assentamento e resistência mecânica, para garantir que uma mistura tenha propriedades desejadas. Isto é, uma vez que a mistura tenha sido verificada como tendo resistência mecânica e assentamento suficientes, a porosidade total pode ser calculada para determinar se satisfaz o nível de porosidade dese-

20 jado. Se a porosidade for muito alta, o volume percentual de cimento pode ser aumentado, diminuindo a porosidade da estrutura e garantindo que tenha uma durabilidade suficiente.

L. Etapa 12: Rendimento otimizado

Finalmente, a etapa 12 envolve a determinação das quantidades dos vários componentes da mistura de concreto ótima, que são necessárias para produzir um rendimento desejado de uma composição de concreto. Uma descrição detalhada de uma modalidade atualmente preferida para a produção segura de uma quantidade desejada de concreto, a partir da mistura de concreto ótima, é apresentada na patente de Andersen na coluna 45, linha 63 - coluna 46, linha 52. Essa seção de Andersen et al. inclui um algoritmo matemático exemplificativo relativo à determinação das quantidades de matérias-primas para garantir um rendimento desejado e também os atos correspondentes à etapa 12.

O volume de uma mistura proposta é tipicamente calculado por divisão do peso de cada componente pela sua respectiva densidade, para obter o volume de cada componente. Os volumes de todos os componentes são também adicionados conjuntamente, para obter a soma dos volumes da mistura resultante. Esse processo, no entanto, não considera que a densidade de compactação das partículas é inferior a 1,0 e, desse modo, não considera os espaços intersticiais remanescentes entre as partículas mistas. Por conseguinte, o volume efetivo da mistura é maior do que o volume calculado.

O processo para otimização do rendimento considera a divisão do volume de cada componente (como determinado pelo processo de otimização discutido acima) pelo volume total da mistura e depois multiplicação das frações correspondentes pelo volume desejado da mistura. Esses cálculos determinam o volume efetivo de cada componente, que deve ser adi-

cionado para produzir uma mistura de um volume desejado. Por sua vez, o volume dos componentes pode ser multiplicado pelos seus respectivos pesos específicos, para determinar o peso de cada componente que deve ser adicionado a uma mistura para obter um rendimento desejado de concreto.

Por meio de exemplo, o volume de cimento necessário para produzir 100 metros cúbicos de uma mistura de concreto definida pode ser determinado pela seguinte equação:

$$\text{vol de cimento} = (V_c/V_T) \cdot 100$$

em que:

V_c = o volume de cimento na mistura determinado na etapa 10 do processo de otimização e é representado como uma fração dos sólidos na mistura, os sólidos (isto é, cimento, agregado fino, agregado grosseiro e, quando relevante, poeira de cinzas e fumo de sílica) somando 1,0;

V_T = o volume total da mistura otimizada definida na etapa 8, e é obtido por adição do volume de água, W , na mistura para o volume de sólidos (que soma a 1,0) e divisão da soma pelo volume de ar na mistura.

Por conseguinte, o volume total é representado pela seguinte equação:

$$V_T = \frac{W+1}{1 - \frac{\% \text{ AR}}{100}}$$

na qual o percentual de ar, % AR, na mistura pode ser determinado empiricamente por uma mistura tentativa. Usando a equação acima para todos os componentes na mistura,

o volume de cada um dos componentes necessários para produzir uma mistura com um rendimento desejado pode ser determinado com precisão.

V. Sub-rotina ou processo de otimização de projeto iterativo implementado por computador

De acordo com outro aspecto ou modalidade da presente invenção, proporciona-se um processo de otimização iterativo implementado por computador, de acordo com o fluxograma ilustrado na Figura patente de Andersen, que pode ser utilizado sozinho ou em combinação com qualquer parte do processo genérico exemplificado pelas etapas 1 - 12, descritas na seção IV. Esse processo inclui as seguintes etapas:

1. proporcionar bateladas de cimento hidráulico e agregado tendo características específicas;
2. selecionar um assentamento e resistência mecânica alvos para a composição de concreto final;
3. medir o tamanho de partícula médio e medir ou estimar a densidade de compactação para os componentes sólidos, compreendendo cimento hidráulico e cada tipo de agregado (por exemplo, agregados fino, médio e grosseiro);
4. projetar uma mistura de concreto seca tendo uma razão de concentrações de componentes sólidos;
5. calcular a densidade de compactação das partículas da mistura de concreto seca projetada;
6. calcular uma proporção de água que produza uma mistura cimenteira projetada tendo o assentamento alvo;
7. calcular a resistência mecânica da mistura cimenteira projetada usando a equação de Feret, ou uma varian-

te dela, utilizando um fator K de projeto específico, de entre os diferentes fatores K que estão localizados ao longo de uma curva do fator K representativa de entradas do sistema, que é selecionado com base na resistência mecânica alvo (por exemplo, uma resistência mecânica mínima específica desejada ou uma compressiva de projeto da mistura de concreto projetada final);

8. calcular a diferença entre a resistência mecânica calculada da mistura de cimento projetada e da resistência mecânica alvo; e

9. alterar a razão de concentrações dos componentes sólidos para produzir uma ou mais misturas de concreto secas projetadas adicionais e depois repetição das etapas 5 a 8, até que a resistência mecânica calculada de uma ou mais misturas hidratadas projetadas seja igual ou esteja dentro de uma faixa aceitável de desvio da resistência mecânica alvo.

O fator K projetado nesse processo é idealmente o mesmo do fator K teórico ou "verdadeiro", que corresponde a uma resistência mecânica alvo ideal. Não obstante, o fator K de projeto pode desviar-se do fator K teórico, para garantir uma resistência mecânica do concreto mínima específica. O grau de desvio proporciona uma margem de segurança para considerar as variações entre a resistência mecânica de projeto e a resistência mecânica efetiva, que pode ocorrer em consequência das variações nas características das matérias-primas e/ou nas variações no processamento. Proporcionando-se um melhor projeto de mistura otimizado de acordo com a

invenção, reduz-se, significativamente, o desvio padrão entre a resistência mecânica de projeto e a resistência mecânica efetiva, comparado a um projeto de mistura não otimizado, inferior. Os aperfeiçoamentos e/ou ajustes no equipamento de processamento, como discutidos ao longo dessa descrição, podem reduzir ainda mais o desvio entre as resistências mecânicas de projeto e efetiva. A minimização e/ou monitoramento e a consideração para as variações nas matérias-primas podem reduzir ainda mais o desvio entre as resistências mecânicas de projeto e efetiva.

VI. Identificação do melhor projeto de mistura otimizado de entre os vários projetos de mistura hipotéticos otimizados de projeto

A Figura 10 é um fluxograma que ilustra um processo exemplificativo de acordo com a invenção, para projetar vários projetos de mistura otimizados hipotéticos e depois identificar o melhor projeto de mistura otimizado. O processo ilustrado na Figura 10 demonstra o uso de um fator K correto, selecionado com base na resistência mecânica desejada ou alvo. Esse processo pode ser utilizado usando qualquer procedimento de otimização de projeto implementado por computador desejado, que utiliza a equação de Feret ou uma variante dela, incluindo quaisquer processos aqui descritos. A otimização de projeto, ilustrada pela Figura 10, inclui as seguintes etapas:

1. selecionar a resistência mecânica desejada ou alvo mínima específica para uma composição de concreto;
2. selecionar um fator K de projeto, com base na

resistência mecânica desejada ou alvo, que pode ser igual ou desviar-se do fator K teórico, que corresponde a essa resistência mecânica;

3. projetar, usando o fator K de projeto, uma pluralidade de projetos de mistura concreto otimizados teoricamente, tendo uma resistência mecânica de projeto que é teoricamente igual à resistência mecânica desejada ou alvo;

4. preparar amostras de teste de concreto com base nos projetos de mistura de concreto otimizados;

5. medir as resistências mecânicas efetivas das amostras de teste de concreto;

6. comparar a diferença entre a resistência mecânica efetiva para cada projeto de mistura teoricamente otimizado e a resistência mecânica desejada ou alvo; e

7. se a resistência mecânica efetiva não estiver dentro de uma faixa de desvio aceitável relativa à resistência mecânica desejada, projetando um ou mais projetos de mistura de concreto adicionais, até que a resistência mecânica desejada de um ou mais projetos de mistura de concreto adicionais esteja dentro de uma faixa de desvio aceitável da resistência mecânica desejada.

A faixa de desvio aceitável entre a resistência mecânica efetiva e a resistência mecânica desejada pode ser selecionada, dependendo do nível de certeza desejada pelo produtor de concreto. Uma resistência mecânica efetiva, que esteja fora da faixa de desvio aceitável, inclui, tipicamente, uma mistura de concreto que é superdimensionada. Ao contrário, uma resistência mecânica efetiva, que esteja dentro

da faixa de desvio aceitável, é indicativa de um melhor projeto de mistura otimizado.

VII. Produção de uma composição de concreto otimizada

5 A Figura 11 é um fluxograma que ilustra um processo exemplificativo para a produção de um projeto de composição de concreto ótima, usando um procedimento de otimização de projeto inventivo, aqui mostrado. O processo de produção inclui as seguintes etapas:

10 1. proporcionar um projeto de mistura de concreto ótimo, que foi determinado usando um fator K de projeto, que corresponde a uma resistência mecânica desejada mínima específica do concreto a ser produzido;

15 2. determinar uma quantidade adequada para cada componente sólido da composição de concreto, para proporcionar um rendimento otimizado que garanta uma quantidade necessária mínima, enquanto minimizando a superprodução e o desperdício;

20 3. medir o teor de umidade dos componentes sólidos usados para produzir a composição de concreto;

25 4. considerar qualquer umidade dentro dos componentes sólidos, pesar cada componente sólido adicionado à composição de concreto a uma precisão de cerca de $\pm 2,0\%$, particularmente, a uma precisão de cerca de $\pm 1,0\%$, e, especialmente, a uma precisão de cerca de $\pm 0,5\%$;

 5. considerar qualquer umidade dentro dos componentes sólidos, determinar uma quantidade de batelada que, quando misturada com os componentes sólidos, produza uma

composição de concreto tendo um assentamento desejado (por exemplo, de acordo com o projeto de mistura); e

6. misturar os componentes para produzir uma composição de concreto, na qual a resistência mecânica e o assentamento efetivos se correlacionam estreitamente com as resistências mecânica e assentamento desejados.

De acordo com uma modalidade, pode ser vantajoso controlar a concentração de água quando a composição de concreto é produzida, até quando é transferida e usada no local de uso, para impedir degradação da resistência mecânica do concreto. Informações adicionais para otimizar o processo de mistura e a concentração da água de controle vão ser apresentadas a seguir.

15 A. Controle das quantidades de componentes adicionados ao concreto

Para obter uma composição de concreto, na qual a resistência mecânica efetiva corresponde estreitamente à resistência mecânica desejada ou teórica do projeto de mistura de concreto otimizado, é preferível pesar ou medir cuidadosamente a quantidade de cada componente adicionado à composição de concreto. De acordo com uma modalidade, cada componente é preferivelmente pesado a uma precisão de cerca de $\pm 2,0$, particularmente, a uma precisão de cerca de $\pm 1,0\%$, e, especialmente, a uma precisão de cerca de $\pm 0,5\%$. Um exemplo de aparelho que pode ser usado para pesar com precisão os vários componentes adicionados a um caminhão misturador / distribuidor de concreto dentro dos parâmetros mencionados acima é um sistema de pesagem e de formação de batelada Al-

kon Command. Vai-se considerar, no entanto, que está dentro do âmbito da invenção utilizar qualquer outro aparelho conhecido na técnica, ou que pode ser desenvolvido, que seja capaz de pesar ou medir com precisão as quantidades dos componentes adicionados ao caminhão misturador de concreto, dentro do nível desejado de precisão.

B. Consideração das variações no teor de umidade dos componentes sólidos

De acordo com uma modalidade, é vantajoso considerar as variações no teor de umidade dos componentes sólidos (isto é, agregados), que podem afetar significativamente a resistência mecânica e assentamento da composição de concreto resultante. Em virtude da umidade incorporar peso aos agregados, a falha em considerar e corrigir essa umidade pode resultar no uso de uma menor quantidade de um ou mais agregados do que poderia ser necessário de acordo com um projeto de mistura otimizado. Proporcionando-se uma menor quantidade de um ou mais agregados do que foi determinada pelo fator K de projeto para ser opcional, pode-se afetar indiretamente a resistência mecânica da composição de concreto resultante (por exemplo, por aumento da quantidade água, que aumenta a razão água para teor). Além disso, reduzindo-se a quantidade de agregados, pode-se aumentar a quantidade relativa de cimento hidráulico para além do que foi determinado como sendo ótimo. Além da redução da resistência mecânica, o fato de não considerar o excesso de água vai também aumentar o teor de água na batelada como um todo, o que pode aumentar o assentamento para além do que foi determinado como sendo óti-

mo.

Para considerar a umidade, sensores podem ser usados para monitorar o teor de umidade dos componentes sólidos. Quaisquer sensores de umidade conhecidos na técnica, ou
5 que possam ser desenvolvidos, podem ser usados para monitorar o teor. Um exemplo de um sensor de umidade é um sensor de microondas, que emite radiação de microondas para um determinado volume de material (por exemplo, agregado fino, médio ou grosseiro) e depois mede a absorção de energia de
10 microondas por qualquer água que possa estar presente. Em virtude da água absorver fortemente a energia de microondas, a quantidade de energia de microondas absorvida por um determinado volume de agregados se correlaciona com uma quantidade de umidade dentro dos agregados. As informações rela-
15 tivas ao teor da mistura podem ser utilizadas para determinar (por exemplo, por um computador) quanto adicional deve ser pesado para proporcionar a quantidade correta de agregado e;ou quando de água adicionada deve ser incorporada à mistura, para manter o assentamento e/ou a razão de água para
20 cimento corretos. Em geral, os agregados menores são mais sensíveis a variações em umidade, devido às suas geralmente mais altas áreas superficiais e capacidades de absorver umidade nos poros.

C. Uso de misturas em vez de água para aumentar o
25 assentamento

Igualmente ou mais importante do que o controle das quantidades iniciais dos componentes adicionados ao caminhão misturador / distribuidor de concreto, é o controle

cuidadoso da concentração de água da batelada na composição de concreto, entre o tempo no qual os componentes são adicionados ao tambor misturador de cimento e quando a composição é distribuída e utilizada no local de uso. Para manter
5 uma resistência mecânica, que satisfaça ou exceda a resistência mecânica mínima específica, pouca ou nenhuma água adicional deve ser adicionada à composição de concreto, uma vez que os componentes foram adequadamente mensurados e misturados.

10 No caso no qual pode-se desejar alterar o assentamento da composição de concreto em um local de uso, apenas misturas químicas adequadas, para aumentar ou diminuir o assentamento, devem ser utilizadas. Por exemplo, quando se deseja aumentar o assentamento, um dos vários plastificantes,
15 superplastificantes ou agentes redutores de água de ampla gama, conhecidos na técnica, podem ser utilizados. Quando se deseja diminuir o assentamento, quaisquer dos agentes modificadores de reologia ou agentes aglutinantes de água conhecidos na técnica podem ser utilizados. A quantidade dessas
20 misturas adicionadas à composição de concreto deve ser cuidadosamente controlada, para distribuir uma composição de concreto tendo as propriedades desejadas de assentamento e resistência mecânica.

25 D. Caminhões de mistura de concreto especialmente projetados

Na prática atual, as modificações de assentamento no concreto são tipicamente feitas no local de uso pelo motorista do caminhão de concreto, por adição de mais água.

Esse é o pior modo para garantir uma resistência mecânica desejada, uma vez que os motoristas de caminhões de concreto são, tipicamente, os de menor conhecimento em relação ao efeito nocivo da adição de água a concreto. Na maior parte dos casos, os motoristas vão usar os seus sentidos de visão e percepção do que usar um cone de assentamento. Essa prática é tão comum que os produtores de concreto são forçados por necessidade a superdimensionar os seus projetos de mistura de concreto por uma margem significativa.

10 Para impedir que um motorista de caminhão de concreto adicione, deliberada ou inadvertidamente, água à composição de concreto, assim que deixa o local de produção de concreto, está dentro do âmbito da invenção utilizar caminhões de mistura de concreto especialmente projetados, que
15 incluam um tanque ou recipiente contendo uma ou mais misturas usadas para fazer ajustes de assentamento, quando necessário, no local de uso. Por exemplo, plastificantes, superplastificantes ou agentes redutores de água de ampla gama, conhecidos na técnica, podem estar contidos dentro de um ou
20 mais recipientes. Além disso, o caminhão de mistura de concreto pode incluir um dispositivo que mede, precisamente, o assentamento da mistura de concreto dentro do tambor. Se for necessário ou desejado aumentar o assentamento da mistura de concreto, uma quantidade predeterminada da mistura para aumento de assentamento pode ser injetada do tanque ou recipiente especial no tambor, para aumentar o assentamento ao valor desejado.
25

Um recipiente ou tanque separado pode também in-

cluir misturas que são capazes de alterar a composição de concreto de outros modos (por exemplo, aumento da coesão, diminuição do assentamento, aumento do tempo de cura ou retardo do tempo de cura). Em virtude dessas misturas não afetam tipicamente a resistência mecânica, a resistência mecânica mínima desejada pode ser mantida mais facilmente, desse modo, diminuindo mais ainda o desvio entre as resistências mecânicas efetiva e de projeto (e fatores K efetivo e de projeto).

10 Os caminhões de distribuição de concreto são tipicamente equipados com tanques de água, para adicionar água no local. Alguns são também equipados com tanques de mistura para medir as misturas. Uma pessoa versada na técnica, conhecendo como as misturas afetam o assentamento, pode-se facilmente projetar um caminhão de concreto que seja capaz de 15 alterar o assentamento da maneira adequada. Desse modo, apenas pequenas modificações de caminhões de concreto existentes podem ser necessárias. Esse aparelho compreende meios para medir uma quantidade desejada de mistura a uma composição de concreto no local. 20

E. Processo de reprojeção sucinto para ajustar o assentamento de um projeto de mistura otimizado, sem alterar substancialmente a resistência mecânica compressiva

Em alguns casos, pode ser desejável rapidamente reprojetar um projeto de mistura, que já está otimizado, para ajustar o assentamento sem variar, significativamente, a resistência mecânica compressiva. Isso pode ser feito sem criar um projetos de mistura otimizado inteiramente diferen-

te, usando, por exemplo, aos procedimentos de otimização de projeto de 12 etapas detalhados descritos acima. Para manter a mesma resistência mecânica essencial, enquanto variando-se o assentamento, a mesma razão de água para cimento da pasta é mantida. Apenas o volume da pasta é alterado para ajustar o assentamento da mistura cimenteira úmida. Em geral, a adição de mais pasta vai aumentar o assentamento, enquanto que se adicionando menos pasta vai-se diminuir o assentamento. Desse modo, a razão global de pasta de cimento para agregado é ajustada para alterar o assentamento. Em virtude da razão de água para cimento manter-se igual, a resistência mecânica vai teoricamente manter-se essencialmente igual. Em alguns casos, a razão de agregados fino para grosseiro pode ficar igual. Em outros casos, a razão pode ser alterada um pouco, dependendo do efeito nas outras propriedades provocado pela variação da razão global de pasta de cimento para agregado (por exemplo, coesão, durabilidade e assemelhados).

Um fluxograma ilustrando um método exemplificativo para o reprojeto sucinto de um projeto de mistura otimizado atual, para ajustar o assentamento, é mostrado na Figura 12. O efeito da variação da concentração global de pasta de cimento no assentamento pode ser determinado por uso de quaisquer das equações de assentamento apresentadas acima, e considerando o aumento ou diminuição do teor de água, dependendo se a quantidade de pasta de cimento é aumentada ou diminuída comparado com o projeto de mistura inicial. A adição de mais pasta aumenta o assentamento, porque aumenta a concentração global de componentes água para sólido. Contraria-

mente, a diminuição da quantidade de pasta de cimento diminui o assentamento, porque diminui a razão global de componentes água para sólido.

De acordo com uma modalidade, o processo é controlado por um computador e envolve o monitoramento das variações em assentamento entre as bateladas, que devem ser provocadas por variações na tamanho e/ou umidade do agregado. Quando uma variação em assentamento é detectada, um processo de projeto implementando por computador envolve o ajuste da quantidade de água, para revisar o assentamento, variar a quantidade de cimento para manter a mesma razão de água para cimento (e, portanto, resistência mecânica), e alterar a concentração relativa de agregados, se necessário, para manter um grau adequado de coesão. Em geral, o aumento da razão de agregados fino para grosseiro aumenta a coesão, mas pode diminuir o assentamento. Uma diminuição na pasta de cimento pode requerer um aumento em agregado fino, para manter a coesão. Contrariamente, um aumento na pasta de cimento pode requerer uma diminuição em agregado fino, para aumentar o assentamento, enquanto evitando o efeito nocivo de supercimentação e para melhor otimizar o custo.

Em alguns casos, pode ser possível selecionar uma razão de agregados fino para grosseiro, que não seja necessariamente perfeitamente otimizada, mas que seja adequada (por exemplo, tipicamente dentro de uma faixa de 40:60 a 60:490 partes de agregados fino para grosseiro). Dentro dessa razão, não há, freqüentemente, muita variabilidade em coesão e segregação, que possa afetar bastante o desempenho

dos concretos, quando colocados em um local de uso. Para garantir uma resistência mecânica garantida mínima, uma pasta de cimento é projetada tendo uma razão de água para cimento, que produz uma resistência mecânica desejada (por exemplo, no caso em que a pasta de cimento é o componente mais fraco). A razão de pasta de cimento para agregado é ajustada para produzir o assentamento desejado. Ainda que essa abordagem não otimize o concreto no mesmo grau de precisão, pode ser empregada em muitos casos (por exemplo, em trabalhos menores nos quais o custo relativamente baixo de superdimensionamento não justifica um procedimento de otimização desenvolvido, como aqui descrito).

VIII. Reprojeto de um projeto de mistura de concreto preexistente

A Figura 13 é um fluxograma que ilustra um método exemplificativo para reprojeter um projeto de mistura de concreto preexistente, utilizando o conhecimento recém-adquirido que e como o fator K , usado na equação de Feret, varia com as variações na resistência mecânica do concreto (isto é, logaritmicamente com o aumento da resistência mecânica). O projeto de reprojeto exemplificativo, apresentado na Figura 13, inclui as seguintes etapas:

1. Identificar um projeto de mistura de concreto preexistente tendo uma resistência mecânica prevista (ou de projeto);
2. preparar uma amostra de teste de concreto do projeto de mistura de concreto preexistente;
3. medir a resistência mecânica efetiva da amostra

de teste de concreto e determinar quanto da resistência mecânica efetiva se desvia da resistência mecânica de projeto (opcional);

4. determinar um fator K de projeto aparente para o projeto de mistura de concreto preexistente, com base na resistência mecânica de projeto e na razão dos componentes dentro da amostra de teste de concreto, produzida do projeto de mistura de concreto preexistente;

5. comparar o fator K de projeto aparente do projeto de mistura de concreto preexistente com o fator K "verdadeiro" ou ótimo, correspondente à resistência mecânica de projeto ou prevista do projeto de mistura de concreto preexistente;

6. identificar um fator K de projeto revisto, com base na resistência mecânica prevista (ou de projeto) (por exemplo, selecionada com base em uma das linhas de fatores K mostradas nas Figuras 1 - 3, ou que é adequada para o determinado conjunto de entradas de matérias-primas), que está mais próxima do fator K ótimo para a resistência mecânica de projeto do que o fator K de projeto aparente do projeto de mistura de concreto preexistente; uma curva de fator K para a planta de concreto pode ser construída opcionalmente por teste da resistência mecânica efetiva de uma ou mais composições de concreto preparadas adequadamente do produtor e representando graficamente o ou os fatores K versus a resistência mecânica efetiva; e

7. projetar, usando o fator K revisto, um outro projeto de mistura de concreto que produza uma composição de

concreto tendo uma resistência mecânica efetiva, que corresponde mais consistentemente à resistência mecânica prevista (ou de projeto), comparado com o projeto de mistura de concreto preexistente.

5 No caso de um projeto de mistura preexistente mal ou não otimizado, a diferença entre o fator K de projeto aparente, com base na resistência mecânica de projeto ou prevista do projeto de mistura preexistente, e o fator K ótimo ou teórico, com base na resistência mecânica de projeto, vai
10 ser significativamente maior do que em um projeto de mistura otimizado. Por reequilíbrio das concentrações relativas dos vários componentes, para produzir um projeto de mistura mais otimizado (isto é, de modo a utilizar mais eficientemente o cimento hidráulico e outros componentes), o desvio entre a
15 resistência mecânica efetiva e a resistência mecânica de projeto vai ser diminuído significativamente. Por conseguinte, o fator K de projeto revisto, que é necessário para garantir uma resistência mecânica mínima específica vai correspondente mais estreitamente ao fator K ótimo ou teórico,
20 comparado com o projeto de mistura de concreto não otimizado preexistente. Além do mais, a comparação da diferença entre o fator K de projeto aparente e o fator K ótimo é uma ferramenta diagnóstica que possibilita o desejo de implementar o procedimento de otimização de projeto da presente invenção,
25 para diagnosticar se, e em qualquer grau, um projeto de mistura de concreto preexistente pode ser superdimensionado. Como aqui discutido em outro lugar, o desvio entre os fatores K de projeto e ótimo pode ser obtido por consideração

cuidadosa das variações no tamanho e no teor de umidade dos componentes sólidos e/ou melhoria e/ou ajuste do processo e do equipamento de produção.

IX. Melhoria de uma planta de concreto existente

5 A Figura 14 é um fluxograma que ilustra uma modalidade exemplificativa de acordo com a invenção, para melhoria de uma planta de concreto existente. O processo ilustrado na Figura 14 utiliza a descoberta que e como o fator K varia logaritmicamente com as variações na resistência mecânica do concreto. O processo para melhoria de uma planta de
10 concreto existente inclui as seguintes etapas:

1. produzir uma ou mais composições de concreto usando um ou mais projetos de mistura preexistentes tendo resistências mecânicas previstas;

15 2. determinar um fator K aparente para cada da uma ou mais composições de concreto, com base na resistência mecânica e na razão de componentes de cada composição de concreto desejadas;

20 3. identificar um fator K de projeto revisto, com base na resistência mecânica prevista ou desejada de cada projeto de mistura preexistente, que se corresponde mais estreitamente ao fator K ótimo ou verdadeiro para a resistência mecânica de projeto, comparado com o projeto de mistura preexistente; e

25 4. projetar, usando o fator K de projeto revisto para cada projeto de mistura preexistente, um ou mais projetos de mistura de concreto revistos, que produzem composições de concreto tendo resistências mecânicas efetivas, que

correspondem mais estreitamente às resistências mecânicas de projeto, comparados com o um ou mais projetos de mistura preexistentes, respectivamente.

Em virtude de cada planta ter o seu único conjunto de matérias-primas e/ou entradas de processamento (isto é, nunca duas plantas usam exatamente a mesma combinação de matérias-primas e possuem os mesmos equipamentos exatos calibrados e/ou operados exatamente da mesma maneira), vai-se considerar que cada planta produtora produz composições de concreto tendo aspectos únicos, que são específicos para uma determinada planta produtora. Em outras palavras, mesmo se duas plantas usarem os mesmos projetos de mistura padronizados (isto é, receitas), o concreto transferido por cada planta vai, do mesmo modo, ser único para cada planta. Isso significa que projetos de mistura de concreto preexistentes, que tenham sido modificados e otimizados utilizando o programa DOC aperfeiçoado, vão produzir outras composições de concreto que são elas próprias únicas, pelo fato de que não vão ter sido nunca produzidas a qualquer tempo no mundo. Desse modo, as composições de concreto produzidas usando projetos de mistura otimizados, resultantes da implementação do processo DOC aperfeiçoado, são elas próprias únicas e, portanto, diferentes, como entre todo o concreto produzido previamente.

Nota-se que cada composição de concreto, que é produzida, tem o seu próprio fator K de projeto de assinatura e também um fator K efetivo, que pode ser determinado por teste da resistência mecânica efetiva da composição. Isto é

verdade tanto antes quanto depois da implementação do processo DOC aperfeiçoado. No entanto, após implementação do processo DOC aperfeiçoado, os fatores K de assinatura, ambos os de projeto e efetivo, para uma composição de concreto otimizada de uma planta produtora, vão exceder os fatores K de assinatura, ambos de projeto e efetivo, de uma composição de concreto preexistente, que foi reprojetaada ou substituída usando o processo DOC aperfeiçoado. Por conhecimento e comparação dos fatores K de projeto e/ou assinatura de ambas as composições de concreto preexistente e não otimizada de uma determinada planta produtora, pode-se determinar facilmente se uma composição de concreto particular, produzida pela planta produtora, foi produzida usando o projetos de mistura preexistente ou um projetos de mistura otimizado, projetado usando o processo DOC aperfeiçoado. Desse modo, o fator K de assinatura pode ser usado como uma ferramenta diagnóstica para distinguir se uma composição de concreto não otimizada ou superdimensionada ou uma composição de concreto otimizada foi usada em um projeto de construção (isto é, para determinar se ou não o processo DOC aperfeiçoado foi implementado por um produtor de concreto no projeto das suas composições de concreto).

Um dos efeitos práticos de melhorar uma planta de concreto existente é proporcionar projetos de mistura que são especificamente otimizados com base nas matérias-primas, que são efetivamente usadas pelo planta de concreto. É, frequentemente, o caso que as plantas usam projetos de mistura padronizados, que foram produzidos usando matérias-primas

indisponíveis para uma planta particular. De fato, as plantas são freqüentemente de propriedade de uma única entidade, que proporciona projetos de mistura padronizados para uso com cada planta, independentemente das variações nas entradas de matérias-primas. Por conseguinte, há um grande erro sistemático embutido nos projetos de mistura padronizados, que não podem ser considerados ou corrigidos proporcionando-se simplesmente um equipamento de formação de batelada aperfeiçoado. Em outras palavras, mesmo se os componentes puderem ser medidos e fazer parte de bateladas perfeitamente a todo momento, os projetos de mistura vão ter que considerar variações nas entradas de matérias-primas e entre as várias plantas. O único modo de eliminar esse erro sistemático é proporcionar um projeto de mistura otimizado, que é especificamente ajustado para considerar as matérias-primas específicas, que são usadas por uma planta particular para produzir concreto a um determinado momento.

O conhecimento de como o fator K varia com a resistência mecânica do concreto pode ser usado como uma ferramenta diagnóstica, para identificar esses aspectos de um processo de formação de batelada do produtor, que pode precisar ser modificado. Como aqui discutido, o processo DOC aperfeiçoado pode ser usado para identificar quanta pasta é necessária para obter um assentamento desejado, com o fator K especificando a razão de água para cimento para obtenção de uma resistência mecânica específica. Se a compactação das partículas for otimizada para uma planta particular, há pouco benefício em gastar recursos de capital para otimizar o

equipamento de dosagem. O aumento da capacidade de pesar e formar uma batelada dos componentes sólidos não vai gerar muito benefício, se a compactação das partículas já estiver otimizada ou quase que otimizada. Se variações na pesagem dos agregados não afetarem consideravelmente o assentamento, então não vão também afetar consideravelmente a resistência mecânica, mesmo se os agregados não forem pesados a um alto grau de precisão.

Por outro lado, quando muita pasta de cimento é necessária para obter um assentamento desejado, comparado com um sistema de compactação de partículas otimizado, isso indica que uma pesagem muito mais precisa dos agregados, para obter uma compactação das partículas otimizada, vai produzir benefícios significativos. Em outras palavras, se uma medida mais precisa dos agregados finos e grosseiros minimizar ou eliminar as variações em assentamento e também reduzir ou eliminar a supercimentação necessária para obter o assentamento desejado, o investimento em um aparelho de pesagem mais preciso vai ser altamente benéfico e compensar o custo.

Além da pesagem precisa dos vários componentes adicionados a uma batelada de concreto, a consideração das variações no teor de umidade dos agregados também vai produzir grandes benefícios no caso em que a variação da umidade é um problema. As variações na umidade não apenas afetam quanto de agregado se precisa, mas também afeta bastante quanto de água está contida na composição de concreto, afetando, desse modo, em um alto grau, a razão de água para ci-

mento e o assentamento. A consideração de todas as entradas de água aumenta bastante a capacidade de proporcionar consistentemente concreto tendo os assentamento e resistência mecânica desejados, de modo que um investimento de capital em aparelho de detecção de umidade pode ser justificado.

X. Exemplos de processos de otimização de projetos para reprojetar ou substituir projetos de mistura preexistentes

Os exemplos apresentados a seguir demonstram a capacidade do processo DOC aperfeiçoado, aqui descrito, em modificar, reprojetar e/ou substituir os projetos de mistura preexistentes utilizados atualmente na indústria, para produzir misturas de concreto aperfeiçoadas, que são melhor otimizadas com relação a custo, enquanto também mantendo as propriedades desejadas (por exemplo, assentamento e resistência mecânica). Os mesmos procedimentos podem ser também conduzidos em relação a virtualmente qualquer projeto de mistura atualmente conhecido e usado na indústria de concreto, para otimizar essas composições com relação a resistência mecânica e custo, enquanto também mantendo outras propriedades desejadas.

Os métodos de otimização de projeto inventivos foram usados para aperfeiçoar projetos de mistura em várias plantas de concreto em todo os Estados Unidos, demonstrando a aplicabilidade universal dos métodos inventivos. Os Exemplos 1 - 4 se referem a quatro projetos de mistura de concreto otimizados, que foram produzidos de acordo com o processo DOC aperfeiçoado, para aperfeiçoar e substituir 12

projetos de mistura padronizados atualmente em uso ou que foram usados previamente por uma primeira planta usando projetos de mistura padronizados. Os projetos de mistura padronizados nos exemplos comparativos remanescentes são iguais 5 àqueles dos Exemplos 1 - 4, mas foram usados por outras plantas de propriedade do mesmo produtor. Por essa razão, o custo de produção de concreto, em diferentes plantas, difere devido às diferenças no custo das matérias-primas, devido à localização e fonte. Em virtude de que a qualidade dos agregados difere de planta para planta, o procedimento de otimização de projeto produz diferentes projetos de mistura otimizados para cada planta, para considerar essas diferenças em entradas de matérias-primas. Desse modo, os projetos de mistura otimizados são melhor particularizados para as matérias-primas específicas utilizadas em cada planta. 10 15

Os projetos de mistura preexistentes padronizados são "exemplos comparativos" e devem ser numerados de acordo com o projeto de mistura otimizado correspondente, criados para substituí-lo (por exemplo, o projeto de mistura otimizado do Exemplo 1 corresponde aos, e é projetado para substituir os), projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 1a - 1c). 20

Exemplos 1 - 4

Os Exemplos 1 - 4 ilustram quatro projetos de mistura de concreto otimizados, que foram preparados usando o processo DOC aperfeiçoado aqui descrito. Os quatro projetos de mistura dos Exemplos 1 - 4 podem substituir doze projetos de mistura de concreto padronizados, utilizados por uma 25

planta de concreto existente. Cada projeto de mistura dos Exemplos 1 - 4 corresponde a um grupo de três projetos de mistura preexistentes de tipo similar, que garantem uma resistência mecânica mínima, a um assentamento específico, e um percentual de ar entranhado, quando transferido para o cliente. Os projetos de mistura preexistentes da planta de concreto, os seus componentes, o custo (revisto em 7 de abril de 2006) e os fatores K de projeto aparentes, vão ser apresentados em quatro grupos de três projetos de mistura de concreto, cada grupo tendo propriedades ou características similares.

Exemplos Comparativos 1a - 1c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 1a - 1c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	1a	1b	1c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	128,3 (370)	163,0 (470)	146,7 (473)	101,08/t

poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	1,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	544,4 (1.570)	509,7 (1.470)	575,6 (1.600)	9,10/t
pedra natural, kg/m ³ (lb/yd ³)	589,5 (1.700)	589,5 (1.700)	594,4 (1.714)	11,65/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	97,1 (280)	91,9 (265)	despre- zível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/ga lão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/ga lão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto aparente	234	191	207	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	50,45 (38,59)	53,13 (40,62)	54,92 (41,99)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	19,57	80,43	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		52,62 (40,23)		-
vendas totais (%) da planta de concreto		1,08		-

Exemplos Comparativos 2a - 2c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 2a - 2c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	2a	2b	2c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	121,4 (350)	163,0 (470)	146,7 (423)	101,08/ t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	1,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	523,7 (1.510)	492,4 (1.420)	541,0 (1.560)	9,10/t
pedra natural, kg/m ³ (lb/yd ³)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	603,4 (1.740)	11,65/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	86,7 (250)	90,2 (260)	83,2 (240)	despre- zível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/g alão)

Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/g alão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
ⁱ fator K de projeto aparente	237	189	199	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	49,70 (38,00)	54,11 (41,37)	55,42 (42,37)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	74,23	25,77	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	50,84 (38,87)			-
vendas totais (%) da planta de concreto	17,53			-

Exemplos Comparativos 3a - 3c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 3a - 3c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	3a	Bis- Tris	3c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-

assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	101,08/ t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	1,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	530,6 (1.530)	499,4 (1.440)	530,6 (1.530)	9,10/t
pedra natural, kg/m ³ (lb/yd ³)	605,5 (1.746)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	11,65/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	98,8 (285)	97,1 (280)	despre- zível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/g alão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/g alão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto aparente	232	206	226	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	57,20 (43,73)	59,55 (45,53)	63,88 (48,84)	-
distribuição de ven- das dentro do grupo, %	6,81	44,35	48,84	-

custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	60,78 (46,47)	-
vendas totais (%) da planta de concreto	12,81	-

Exemplos Comparativos 4a - 4c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 4a - 4c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	4a	4b	4c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	101,08/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	1,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	482,0 (1.390)	464,7 (1.340)	495,9 (1.430)	9,10/t
pedra natural, kg/m ³ (lb/yd ³)	593,0 (1.710)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	11,65/t

água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	88,4 (255)	95,4 (275)	88,4 (255)	desprezível
Daravair 1400 (ar entranchado), (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/galão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/galão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto aparente	224	212	218	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	56,78 (43,41)	60,01 (45,88)	62,77 (47,99)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	74,23	25,77	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	57,51 (43,97)			-
vendas totais (%) da planta de concreto	68,58			-

Os projetos de mistura de concreto otimizados apresentados a seguir, de acordo com os Exemplos 1 - 4, foram produzidos de acordo com o processo DOC aperfeiçoado e são

intencionados para substituir os 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 1a - 4c. Cada projeto de mistura otimizado substitui três projetos de mistura de atributos similares (por exemplo, o projeto de mistura otimizado do Exemplo 1 substitui os projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 1a - 1c). O procedimento de otimização assumiu uma absorção percentual para areia e pedra de 1,5% e 2,5%, respectivamente, e um percentual de umidade de 4,57 e 3,18%, respectivamente.

Exemplo	1	2	3	4	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	117,9 (340)	103,7 (299)	130,0 (375)	126,9 (366)	101,08/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	35,3 (102)	31,2 (90)	39,2 (113)	38,1 (110)	1,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	609,3 (1.757)	588,5 (1.697)	601,7 (1.735)	573,6 (1.654)	9,10/t
pedra natural, kg/m ³ (lb/yd ³)	503,5 (1.452)	486,6 (1.403)	497,3 (1.434)	474,00 (1.367)	11,65/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	101,9 (294)	93,3 (269)	101,9 (294)	93,3 (269)	desprezível

Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	41,41 (1,4)	0	41,41 (1,4)	0,99/L (3,75/ga lão)
% de ar	2,0	5,5	2,0	5,5	1,49/L (5,65/ga lão)
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	47,81 (36,55)	44,10 (33,72)	50,22 (38,39)	48,70 (37,23)	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	48,08 (36,76)				-
Economia de cus- to, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	4,81 (3,68)	6,74 (5,15)	10,57 (8,08)	8,82 (6,74)	-
Economia de cus- to médio ponde- ral da planta, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	8,63 (6,60)				-

Muitas plantas de concreto têm um número excessivo de projetos de mistura de tipos similares, em uma tentativa de satisfazer as necessidades dos clientes. Cada projeto de mistura aperfeiçoado dos Exemplos 1 - 4 é capaz de substituir os projetos de mistura padronizados preexistentes de tipos similares, porque satisfaz os critérios de todos os três projetos de mistura, enquanto tendo também um custo reduzido. A redução do número de projetos de mistura necessários

para satisfazer os requisitos dos clientes represente economias em custo adicionais par uma planta de concreto, porque simplifica o processo de produção global.

As economias em custo absolutas variaram de um nível baixo de US\$8,84 por m³ (US\$2,04 por jarda) (Exemplo 1 relativo ao Exemplo Comparativo 1a) a um nível alto de US\$14,41 por m³ (US\$10,76 por jarda) (Exemplo 4 relativo ao Exemplo Comparativo 4c). O custo médio ponderado dos projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 1a - 4c, com base no percentual de cada projeto de mistura, vendido pela planta, é de US\$58,08 por m³ (US\$43,36 por jarda) (como de 7 de abril de 2006). O custo médio ponderado para a planta de concreto, usando os quatro projetos de mistura otimizados, com base nos percentuais de vendas existentes para os 12 projetos de mistura preexistentes do produtor vão ser de US\$49,24 por m³ (US\$36,76 por jarda), ao mesmo custo dos materiais por componente. As economias no custo global médio para a planta seriam portanto de US\$8,84 por m³ (US\$6,60 por jarda), considerando que o produtor fosse substituir os 12 projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 1a - 4c com os projetos de mistura otimizados dos Exemplos 1 - 4 e continuar a produzir a mesma distribuição de concreto, como antes.

A quantia de US\$8,84 por m³ (US\$6,60 por jarda) é muitas vezes maior do que o lucro típico de US\$1,33 - 2,66 por m³ (US\$1 - 2 por jarda) ganho pelos produtores de concreto típicos, após todos os custos fixos e variáveis de operação da planta sejam fatorados e considerados. Os proce-

dimentos de otimização de projeto aperfeiçoados são, portanto, capazes de aperfeiçoar bastante os projetos de mistura preexistentes usados pelos produtores, que eram imaginados como sendo ótimos, com base em décadas de teste e uso, e aumentam por várias vezes os lucros. Esse é um resultado surpreendente e inesperado, que atesta a contribuição para a técnica de produção de concreto, proporcionado pelo processo DOC aperfeiçoado da presente invenção. Visto que o programa DOC original da patente de Andersen tinha muito que confiar nele mesmo, pode não ser facilmente implementado no mundo real para diagnosticar e aperfeiçoar os projetos de mistura de concreto preexistentes, de uma maneira concreta e verificável para produzir demonstravelmente resultados aperfeiçoados a um custo reduzido. Os aperfeiçoamentos descritos na presente invenção foram necessários para proporcionar um procedimento de otimização, que pode ser facilmente implementado, como ilustrado nos Exemplos 1 - 4.

Exemplos 5 - 8

Os Exemplos 5 - 8 ilustram quatro cimento de concreto otimizados, que foram preparados usando o processo DOC aperfeiçoado descrito na presente invenção. Os quatro projetos de mistura dos Exemplos 5 - 8 podem substituir doze projetos de mistura de concreto padronizados preexistentes de uma planta de concreto existente, que usou os mesmos 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 1a - 4c, mas produziram concreto usando um conjunto diferente de matérias-primas. Cada projeto de mistura dos Exemplos 5 - 8 corresponde a um grupo de três projetos de mistura preexistentes

de tipo similar, que garantem uma resistência mecânica compressiva mínima, a um assentamento específico, e a um percentual de ar entranhado, quando transferido para o cliente. Os projetos de mistura preexistentes da planta de concreto, os seus componentes, o custo (revisto em 27 de outubro de 2005), e os fatores K de projeto vão ser apresentados em quatro grupos de três projetos de mistura, cada grupo tendo propriedades ou características similares.

Exemplos Comparativos 5a - 5c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 5a - 5c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), a um assentamento de 10,2 cm (4 in) e a um ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	5a	5b	5c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	128,3 (370)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	544,4 (1.570)	509,7 (1.470)	575,6 (1.660)	4,46/t

pedra 1,9 cm (3/4 in) kg/m ³ (lb/yd ³)	589,5 (1.700)	589,5 (1.700)	594,4 (1.714)	4,46/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	97,1 (280)	91,9 (265)	despre- zível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/ga lão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/ga lão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de proje- to aparente	234	191	207	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	37,94 (29,01)	41,37 (31,63)	42,41 (32,42)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	19,57	80,43	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		40,71 (31,12)		-
vendas totais (%) da planta de con- creto		1,08		-

Exemplos Comparativos 6a - 6c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Compara-

tivos 6a - 6c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	6a	6b	6c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	121,4 (350)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	523,7 (1.510)	492,4 (1.420)	541,0 (1.560)	4,46/t
pedra 1,9 cm (3/4 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	603,4 (1.740)	4,46/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	86,7 (250)	90,2 (260)	83,2 (240)	desprezível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/ga lão)

Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/galão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto aparente	237	189	199	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	37,10 (28,36)	42,27 (32,32)	42,82 (32,74)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	74,23	25,77	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	38,43 (29,38)			-
vendas totais (%) da planta de concreto	17,53			-

Exemplos Comparativos 7a - 7c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 7a - 7c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 cm (4 in) e ar 5 entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	7a	7b	7c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-

assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	101,08/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	530,6 (1.530)	499,4 (1.440)	530,6 (1.530)	4,46/t
pedra 1,9 cm (3/4 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	605,5 (1.746)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	4,46/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	98,8 (285)	97,1 (280)	desprezível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/gal ão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/gal ão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto aparente	232	206	226	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	44,76 (34,22)	47,82 (36,56)	50,31 (38,46)	-
distribuição de ven- das dentro do grupo, %	6,81	44,35	48,84	-

custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	48,83 (37,33)	-
vendas totais (%) da planta de concreto	12,81	-

Exemplos Comparativos 8a - 8c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 8a - 8c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	8a	8b	8c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	482,0 (1.390)	464,7 (1.340)	495,9 (1.430)	4,46/t
pedra 1,9 cm (3/4 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	593,0 (1.710)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	4,46/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	88,4 (255)	95,4 (275)	88,4 (255)	desprezível

Daravair 1400 (ar en- tranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/ga lão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/ga lão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto aparente	224	212	218	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	44,96 (34,37)	48,61 (37,16)	51,00 (38,99)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	77,31	22,69	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	45,79 (35,01)			-
vendas totais (%) da planta de concreto	68,58			-

Os projetos de mistura de concreto otimizados a-
presentados a seguir, de acordo com os Exemplos 5 - 8, foram
produzidos de acordo com um processo DOC aperfeiçoado e são
intencionados para substituir os 12 projetos de mistura dos
5 Exemplos Comparativos 5a - 8c. Cada projeto de mistura oti-
mizado substitui três projetos de mistura de atributos simi-
lares (por exemplo, o projeto de mistura otimizado do Exem-
plo 5 substitui os projetos de mistura preexistentes dos E-
xemplos Comparativos 5a - 5c). O procedimento de otimização
10 assumiu uma absorção percentual para areia e pedra de 1,9% e

2,3%, respectivamente, e um percentual de umidade de 4,57 e 3,18%, respectivamente.

Exemplo	5	6	7	8	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	115,1 (332)	104,7 (302)	130,0 (375)	126,9 (366)	104,00/ t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	31,6 (91)	38,8 (112)	38,1 (110)	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	613,5 (1.769)	587,1 (1.693)	602,4 (1.737)	574,6 (1.657)	4,46/t
pedra 1,9 cm (3/4 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	509,7 (1.470)	488,0 (1.407)	502,8 (1.450)	477,5 (1.377)	4,46/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	101,9 (294)	93,3 (274)	102,3 (295)	93,6 (270)	desprezível
Daravair, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	41,41 (1,4)	0	41,41 (1,4)	0,99/L (3,75/g alão)
% de ar	1,8	5,5	1,9	5,4	1,49/L (5,65/g alão)

custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	35,28 (26,97)	32,71 (25,01)	38,42 (29,37)	37,49 (28,66)	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	36,75 (28,09)				-
Economia de custo, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	5,43 (4,15)	5,72 (4,37)	10,41 (7,96)	8,29 (6,34)	-
Economia de custo médio ponderal da planta, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	8,21 (6,28)				-

Cada projeto de mistura aperfeiçoado dos Exemplos 5 - 8 é capaz de substituir os projetos de mistura padronizados preexistentes de tipos similares, porque satisfaz os critérios de todas as projetos de mistura, enquanto tendo também um custo reduzido. O número reduzido de projetos de mistura é uma economia de custo adicional, pois simplifica o processo de produção global.

A economia de custo absoluta variou de um nível baixo de US\$2,73 por m³ (US\$2,04 por jarda) (Exemplo 5 relativo ao Exemplo Comparativo 5a) a um nível alto de US\$13,82 por m³ (US\$10,32 por jarda) (Exemplo 8 relativo ao Exemplo Comparativo 8c). O custo médio ponderado dos projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 5a - 8c, com base no percentual de cada concreto vendida pela planta, é US\$45,90 por m³ (US\$34,27 por jarda) (considerando 27 de

outubro de 2005). O custo médio ponderado para a produção de concreto, usando quatro projetos de mistura baseados nos percentuais de vendas existentes para os 12 projetos de mistura preexistentes do produtor vai ser US\$37,63 por m³ (US\$28,09 por jarda), ao mesmo custo dos materiais por componente. A economia de custo global média para a planta vai ser, portanto, de US\$8,28 por m³ (US\$6,18 por jarda), considerando que o produtor substituísse os 12 projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 5a - 8c com os projetos de mistura otimizados dos Exemplos 5 - 8 e continuasse a produzir para a mesma distribuição de concreto como antes.

Exemplos 9 - 12

Os Exemplos 9 - 12 ilustram quatro projetos de mistura de concreto otimizados, que foram preparados usando o processo DOC aperfeiçoado aqui descrito. Os quatro projetos de mistura dos Exemplos 9 - 12 podem substituir doze projetos de mistura de concreto padronizados de uma planta de concreto existente, que usam os mesmos 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 1a - 4c, mas que produzem concreto usando um diferente conjunto de matérias-primas. Cada projeto de mistura dos Exemplos 9 - 12 corresponde a um grupo de três projetos de mistura preexistentes de tipo similar, que garantem uma resistência mecânica mínima, a um assentamento específico, e um percentual de ar entranhado, quando transferido para o cliente. Os projetos de mistura preexistentes da planta de concreto, os seus componentes, o custo (revisto em 27 de outubro de 2005) e os fatores K de

projeto aparentes, vão ser apresentados em quatro grupos de três projetos de mistura de concreto, cada grupo tendo propriedades ou características similares.

Exemplos Comparativos 9a - 9c

- 5 Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 9a - 9c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), a um assentamento de 10,2 cm (4 in) e a um ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	9a	9b	9c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	128,3 (370)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00/ t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	544,4 (1.570)	509,7 (1.470)	575,6 (1.660)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	589,5 (1.700)	589,5 (1.700)	594,4 (1.714)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	97,1 (280)	91,9 (265)	despre- zível
Daravair 1400 (ar en- tranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/g alão)

Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/g alão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto aparente	234	191	207	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	47,36 (36,21)	50,54 (38,64)	52,07 (39,82)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	19,57	80,43	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	49,91 (38,16)			-
vendas totais (%) da planta de concreto	1,08			-

Exemplos Comparativos 10a - 10c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 10a - 10c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	10a	10b	10c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-

cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	121,4 (350)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00 /t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/ t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	523,7 (1.510)	492,4 (1.420)	541,0 (1.560)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	603,4 (1.740)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	86,7 (250)	90,2 (260)	83,2 (240)	des- prezi- vel
Daravair 1400 (ar en- tranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/ galão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/ galão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto a- parente	237	189	199	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	46,51 (35,56)	51,48 (39,36)	52,35 (40,02)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	74,23	25,77	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		47,80 (36,54)		-
vendas totais (%) da planta de concreto		17,53		-

Exemplos Comparativos 11a - 11c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 11a - 11c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 cm (4 in) e ar 5 entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	11a	11b	11c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	104,00 /t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/ t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	530,6 (1.530)	499,4 (1.440)	530,6 (1.530)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	605,5 (1.746)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	98,8 (285)	97,1 (280)	desprezível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/ galão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/ galão)

% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto a- parente	232	206	226	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	54,23 (41,46)	57,08 (43,64)	59,78 (45,70)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	6,81	44,35	48,84	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		58,21 (44,50)		-
vendas totais (%) da planta de concreto		12,81		-

Exemplos Comparativos 12a - 12c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 12a - 12c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	12a	12b	12c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	104,00 /t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/ t

areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	482,0 (1.390)	464,7 (1.340)	495,9 (1.430)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	593,0 (1.710)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	88,4 (255)	95,4 (275)	88,4 (255)	des- prezi- vel
Daravair 1400 (ar entra- nhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/ galão)
Daracem 65 (red. de á- gua), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/ galão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto apa- rente	224	212	218	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	53,96 (41,25)	57,62 (44,05)	60,22 (46,04)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	77,31	22,69	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		54,79 (41,89)		-
vendas totais (%) da planta de concreto		68,58		-

Os projetos de mistura de concreto otimizados apresentados a seguir, de acordo com os Exemplos 9 - 12, foram produzidos de acordo com um processo DOC aperfeiçoado e

são intencionados para substituir os 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 9a - 12c. Cada projeto de mistura otimizado substitui três projetos de mistura de atributos similares (por exemplo, o projeto de mistura otimizado do Exemplo 9 substitui os projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 9a - 9c). O procedimento de otimização assumiu uma absorção percentual para areia e pedra de 1,9% e 1,8%, respectivamente, e um percentual de umidade de 4,57 e 3,18%, respectivamente.

10

Exemplo	9	10	11	12	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	116,5 (336)	101,6 (293)	130,4 (376)	125,5 (362)	104,00 /t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	35,0 (101)	30,5 (88)	39,2 (113)	37,8 (109)	47,00/ t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	613,1 (1.768)	596,8 (1.721)	604,1 (1.742)	579,5 (1.671)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), g/m ³ (lb/yd ³)	508,4 (1.466)	495,6 (1.429)	501,5 (1.446)	481,0 (1.387)	9,36/t

água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	99,9 (288)	91,2 (263)	99,9 (288)	92,2 (266)	des- prezi- vel
Daravair, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	41,41 (1,4)	0	41,41 (1,4)	0,99/L (3,75/ galão)
% de ar	2,5	5,6	2,5	5,2	1,49/L (5,65/ galão)
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	44,71 (34,18)	41,05 (31,38)	47,53 (36,34)	45,90 (35,09)	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	45,24 (34,59)				-
Economia de custo, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	5,22 (3,99)	6,75 (5,16)	10,67 (8,16)	8,89 (6,80)	-
Economia de custo médio ponderal da planta, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	8,71 (6,66)				-

Cada projeto de mistura aperfeiçoado dos Exemplos 9 - 12 é capaz de substituir os projetos de mistura padronizados preexistentes de tipos similares, porque satisfaz os critérios de todas as projetos de mistura, enquanto tendo também um custo reduzido. O número reduzido de projetos de

mistura é uma economia de custo adicional, pois simplifica o processo de produção global.

A economia de custo absoluta variou de um nível baixo de US\$2,73 por m³ (US\$2,04 por jarda) (Exemplo 9 relativo ao Exemplo Comparativo 9a) a um nível alto de US\$14,68 por m³ (US\$10,96 por jarda) (Exemplo 12 relativo ao Exemplo Comparativo 12c). O custo médio ponderado dos projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 5a - 8c, com base no percentual de cada concreto vendida pela planta, é US\$55,24 por m³ (US\$41,24 por jarda) (considerando 27 de outubro de 2005). O custo médio ponderado para a produção de concreto, usando quatro projetos de mistura baseados nos percentuais de vendas existentes para os 12 projetos de mistura preexistentes do produtor vai ser US\$46,34 por m³ (US\$34,59 por jarda), ao mesmo custo dos materiais por componente. A economia de custo global média para a planta vai ser, portanto, de US\$8,92 por m³ (US\$6,66 por jarda), considerando que o produtor substituísse os 12 projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 9a - 12c com os projetos de mistura otimizados dos Exemplos 9 - 12 e continuasse a produzir para a mesma distribuição de concreto como antes.

Exemplos 13 - 16

Os Exemplos 13 - 16 ilustram quatro projetos de mistura de concreto otimizados, que foram preparados usando o processo DOC aperfeiçoado aqui descrito. Os quatro projetos de mistura dos Exemplos 13 - 16 podem substituir doze projetos de mistura de concreto padronizados de uma planta

de concreto existente, que usam os mesmos 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 1a - 4c, mas que produzem concreto usando um diferente conjunto de matérias-primas. Cada projeto de mistura dos Exemplos 13 - 16 corresponde a um grupo de três projetos de mistura preexistentes de tipo similar, que garantem uma resistência mecânica mínima, a um assentamento específico, e um percentual de ar entranhado, quando transferido para o cliente. Os projetos de mistura preexistentes da planta de concreto, os seus componentes, o custo (revisto em 27 de outubro de 2005) e os fatores K de projeto aparentes, vão ser apresentados em quatro grupos de três projetos de mistura de concreto, cada grupo tendo propriedades ou características similares.

Exemplos Comparativos 13a - 13c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 13a - 13c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), a um assentamento de 10,2 cm (4 in) e a um ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	13a	13b	13c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	128,3 (370)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00/t

poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	544,4 (1.570)	509,7 (1.470)	575,6 (1.660)	8,12/t
cascalho miúdo, kg/m ³ (lb/yd ³)	589,5 (1.700)	589,5 (1.700)	594,4 (1.714)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	97,1 (280)	91,9 (265)	despre- zível
Daravair 1400 (ar entra- nhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/ga lão)
Daracem 65 (red. de á- gua), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/ga lão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto apa- rente	234	191	207	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	47,27 (36,14)	50,45 (38,57)	51,99 (39,75)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	19,57	80,43	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		49,84 (38,10)		-
vendas totais (%) da planta de concreto		1,08		-

Exemplos Comparativos 14a - 14c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Compara-

tivos 14a - 14c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	14a	14b	14c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	121,4 (350)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	523,7 (1.510)	492,4 (1.420)	541,0 (1.560)	8,12/t
cascalho miúdo, kg/m ³ (lb/yd ³)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	603,4 (1.740)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	86,7 (250)	90,2 (260)	83,2 (240)	desprezi- vel
Daravair 1400 (ar en- tranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/gal ão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/gal ão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-

fator K de projeto aparente	237	189	199	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	46,43 (35,50)	51,39 (39,29)	52,25 (39,95)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	74,23	25,77	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	47,70 (36,47)			-
vendas totais (%) da planta de concreto	17,53			-

Exemplos Comparativos 15a - 15c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 15a - 15c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 cm (4 in) e ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	15a	15b	15c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	104,00 /t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/ t

areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	530,6 (1.530)	499,4 (1.440)	530,6 (1.530)	8,12/t
cascalho miúdo, kg/m ³ (lb/yd ³)	605,5 (1.746)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	98,8 (285)	97,1 (280)	des- prezi- vel
Daravair 1400 (ar en- tranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/ galão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/ galão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto apa- rente	232	206	226	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	54,14 (41,39)	56,99 (43,57)	59,69 (45,63)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	6,81	44,35	48,84	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	58,12 (44,43)			-
vendas totais (%) da planta de concreto	12,81			-

Exemplos Comparativos 16a - 16c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 16a - 16c têm uma resistência mecânica de projeto de

27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	16a	16b	16c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	104,00/ t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	482,0 (1.390)	464,7 (1.340)	495,9 (1.430)	8,12/t
cascalho miúdo, kg/m ³ (lb/yd ³)	593,0 (1.710)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	88,4 (255)	95,4 (275)	88,4 (255)	desprezível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/g alão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/g alão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto aparente	224	212	218	-

custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	53,88 (41,19)	57,53 (43,98)	60,13 (45,97)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	77,31	22,69	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	54,70 (41,82)			-
vendas totais (%) da planta de concreto	68,58			-

Os projetos de mistura de concreto otimizados apresentados a seguir, de acordo com os Exemplos 13 - 16, foram produzidos de acordo com um processo DOC aperfeiçoado e são intencionados para substituir os 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 13a - 16c. Cada projeto de mistura otimizado substitui três projetos de mistura de atributos similares (por exemplo, o projeto de mistura otimizado do Exemplo 9 substitui os projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 9a - 9c). O procedimento de otimização assumiu uma absorção percentual para areia e pedra de 1,9% e 1,8%, respectivamente, e um percentual de umidade de 4,57 e 3,18%, respectivamente.

Exemplo	13	14	15	16	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-

assentamento, cm (in)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	116,5 (336)	101,6 (293)	130,4 (376)	125,5 (362)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	35,0 (101)	30,5 (88)	39,2 (113)	37,8 (109)	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	613,1 (1.768)	596,8 (1.721)	604,1 (1.742)	579,5 (1.671)	8,12/t
cascalho miúdo, g/m ³ (lb/yd ³)	508,4 (1.466)	495,6 (1.429)	501,5 (1.446)	481,0 (1.387)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	99,9 (288)	91,2 (263)	99,9 (288)	92,2 (266)	despre- zível
Daravair, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	41,41 (1,4)	0	41,41 (1,4)	0,99/L (3,75/ga lão)
% de ar	2,5	5,8	2,6	5,8	1,49/L (5,65/ga lão)
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	45,45 (34,75)	41,51 (31,74)	48,92 (37,40)	46,37 (35,45)	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	45,83 (35,04)				-
Economia de cus- to, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	4,37 (3,34)	6,19 (4,73)	9,19 (7,03)	8,33 (6,37)	-

Economia de custo médio ponderal da planta, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	8,03 (6,14)	-
---	----------------	---

Cada projeto de mistura aperfeiçoado dos Exemplos 13 - 16 é capaz de substituir os projetos de mistura padronizados preexistentes de tipos similares, porque satisfaz os critérios de todas as projetos de mistura, enquanto tendo também um custo reduzido. O número reduzido de projetos de mistura é uma economia de custo adicional, pois simplifica o processo de produção global.

A economia de custo absoluta variou de um nível baixo de US\$2,14 por m³ (US\$1,60 por jarda) (Exemplo 17 relativo ao Exemplo Comparativo 17a) a um nível alto de US\$13,43 por m³ (US\$10,03 por jarda) (Exemplo 20 relativo ao Exemplo Comparativo 20c). O custo médio ponderado dos projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 17a - 20c, com base no percentual de cada concreto vendida pela planta, é US\$54,10 por m³ (US\$40,39 por jarda) (considerando 27 de outubro de 2005). O custo médio ponderado para a produção de concreto, usando quatro projetos de mistura baseados nos percentuais de vendas existentes para os 12 projetos de mistura preexistentes do produtor vai ser US\$46,40 por m³ (US\$34,64 por jarda), ao mesmo custo dos materiais por componente. A economia de custo global média para a planta vai ser, portanto, de US\$7,70 por m³ (US\$5,75 por jarda), considerando que o produtor substituísse os 12

projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 17a - 20c com os projetos de mistura otimizados dos Exemplos 17 - 20 e continuasse a produzir para a mesma distribuição de concreto como antes.

5 Exemplos 17 - 20

Os Exemplos 17 - 20 ilustram quatro projetos de mistura de concreto otimizados, que foram preparados usando o processo DOC aperfeiçoado aqui descrito. Os quatro projetos de mistura dos Exemplos 17 - 20 podem substituir doze
10 projetos de mistura de concreto padronizados de uma planta de concreto existente, que usam os mesmos 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 1a - 4c, mas que produzem concreto usando um diferente conjunto de matérias-primas. Cada projeto de mistura dos Exemplos 17 - 20 corresponde a
15 um grupo de três projetos de mistura preexistentes de tipo similar, que garantem uma resistência mecânica mínima, a um assentamento específico, e um percentual de ar entranhado, quando transferido para o cliente. Os projetos de mistura preexistentes da planta de concreto, os seus componentes, o
20 custo (revisto em 27 de outubro de 2005) e os fatores K de projeto aparentes, vão ser apresentados em quatro grupos de três projetos de mistura de concreto, cada grupo tendo propriedades ou características similares.

Exemplos Comparativos 17a - 17c

25 Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 17a - 17c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), a um assentamento de 10,2 cm (4 in) e a um ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	17a	17b	17c	Custo (US\$)
resistência mecânica com- pressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	128,3 (370)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	544,4 (1.570)	509,7 (1.470)	575,6 (1.660)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	589,5 (1.700)	589,5 (1.700)	594,4 (1.714)	6,25/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	97,1 (280)	91,9 (265)	desprezi- vel
Daravair 1400 (ar entra- nhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/gal ão)
Daracem 65 (red. de á- gua), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/gal ão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto apa- rente	234	191	207	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	46,58 (35,61)	49,59 (37,91)	51,47 (39,35)	-

distribuição de vendas dentro do grupo, %	19,57	80,43	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	49,00 (37,46)			-
vendas totais (%) da planta de concreto	1,08			-

Exemplos Comparativos 18a - 18c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 18a - 18c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	18a	18b	18c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	121,4 (350)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	523,7 (1.510)	492,4 (1.420)	541,0 (1.560)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	603,4 (1.740)	6,25/t

água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	86,7 (250)	90,2 (260)	83,2 (240)	despre- zível
Daravair 1400 (ar entra- nhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/ga lão)
Daracem 65 (red. de á- gua), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/ga lão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto apa- rente	237	189	199	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	45,53 (34,81)	50,32 (38,47)	39,37 (39,35)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	74,23	25,77	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	46,76 (35,75)			-
vendas totais (%) da planta de concreto	17,53			-

Exemplos Comparativos 19a - 19c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 19a - 19c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 cm (4 in) e ar 5 entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	19a	19b	19c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	530,6 (1.530)	499,4 (1.440)	530,6 (1.530)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	605,5 (1.746)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	6,25/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	98,8 (285)	97,1 (280)	despre- zível
Daravair 1400 (ar en- tranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/ga lão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/ga lão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto a- parente	232	206	226	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	53,28 (40,73)	55,96 (42,78)	58,82 (44,97)	-

distribuição de vendas dentro do grupo, %	6,81	44,35	48,84	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	57,17 (43,71)			-
vendas totais (%) da planta de concreto	12,81			-

Exemplos Comparativos 20a - 20c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 20a - 20c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	20a	20b	20c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	482,0 (1.390)	464,7 (1.340)	495,9 (1.430)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	593,0 (1.710)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	6,25/t

água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	88,4 (255)	95,4 (275)	88,4 (255)	desprezível
Daravair 1400 (ar entrado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/galão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/galão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto aparente	224	212	218	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	52,84 (40,40)	56,32 (43,06)	59,08 (45,17)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	77,31	22,69	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		53,63 (41,00)		-
vendas totais (%) da planta de concreto		68,58		-

Os projetos de mistura de concreto otimizados apresentados a seguir, de acordo com os Exemplos 17 - 20, foram produzidos de acordo com um processo DOC aperfeiçoado e são intencionados para substituir os 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 17a - 20c. Cada projeto de mistura otimizado substitui três projetos de mistura de atributos similares (por exemplo, o projeto de mistura otimizado do Exemplo 17 substitui os projetos de mistura preexistentes

dos Exemplos Comparativos 17a - 17c). O procedimento de otimização assumiu uma absorção percentual para areia e pedra de 1,9% e 3,2%, respectivamente, e um percentual de umidade de 4,57 e 3,18%, respectivamente.

Exemplo	17	18	19	20	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	116,5 (335)	101,6 (302)	130,4 (374)	125,5 (366)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	35,0 (101)	31,6 (91)	38,8 (112)	38,1 (110)	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	611,1 (1.762)	587,1 (1.693)	603,4 (1.740)	575,0 (1.658)	10,80/t
pedra 2,5 cm (1 in), g/m ³ (lb/yd ³)	493,1 (1.422)	473,7 (1.366)	486,9 (1.404)	463,7 (1.337)	6,25/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	102,3 (295)	95,0 (274)	102,3 (295)	93,6 (270)	desprezível
Daravair, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	41,41 (1,4)	0	41,41 (1,4)	3,75/gal ão

% de ar	2,4	558	2,2	5,5	1,49/L (5,65/ga lão)
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	44,49 (34,01)	41,37 (31,63)	47,25 (36,12)	45,96 (35,14)	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	45,31 (34,64)				-
Economia de custo, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	4,51 (3,45)	5,39 (4,12)	9,93 (7,59)	7,43 (5,68)	-
Economia de custo médio ponderal da planta, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	4,40 (5,75)				-

Cada projeto de mistura aperfeiçoado dos Exemplos 13 - 16 é capaz de substituir os projetos de mistura padronizados preexistentes de tipos similares, porque satisfaz os critérios de todas as projetos de mistura, enquanto tendo também um custo reduzido. O número reduzido de projetos de mistura é uma economia de custo adicional, pois simplifica o processo de produção global.

A economia de custo absoluta variou de um nível baixo de US\$1,86 por m³ (US\$1,39 por jarda) (Exemplo 13 relativo ao Exemplo Comparativo 13a) a um nível alto de US\$14,11 por m³ (US\$10,53 por jarda) (Exemplo 16 relativo ao Exemplo

Comparativo 16c). O custo médio ponderado dos projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 13a - 16c, com base no percentual de cada concreto vendida pela planta, é US\$55,16 por m³ (US\$41,18 por jarda) (considerando 27 de 5 outubro de 2005). O custo médio ponderado para a produção de concreto, usando quatro projetos de mistura baseados nos percentuais de vendas existentes para os 12 projetos de mistura preexistentes do produtor vai ser US\$46,94 por m³ (US\$35,04 por jarda), ao mesmo custo dos materiais por com- 10 ponente. A economia de custo global média para a planta vai ser, portanto, de US\$8,22 por m³ (US\$6,14 por jarda), considerando que o produtor substituisse os 12 projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 13a - 16c com os projetos de mistura otimizados dos Exemplos 13 - 16 e conti- 15 nuasse a produzir para a mesma distribuição de concreto como antes.

Os dois exemplos a seguir são projetos de mistura recém-otimizados para concreto de autonivelamento. O concreto de autonivelamento produzido de acordo com os projetos de 20 mistura dos Exemplos 21 e 22 é caracterizado como tendo um assentamento suficientemente alto, de modo que pode provocar nivelamento, devido à gravidade apenas, sem precisar ser trabalhado, e tendo também uma coesão suficiente, de modo que não se segrega significativamente (isto é, não se separa 25 em componentes mais pesados e mais leves devido à gravidade).

Exemplo 21

O projeto de mistura apresentado a seguir, para

uma composição de concreto de autonivelamento, foi projetado usando o processo DOC aperfeiçoado aqui descrito. Essas composições são caracterizadas como tendo ar entranhado e tendo um assentamento superior a 20,3 cm (8 in), quando em uma condição úmida antes de cura, e uma resistência mecânica compressiva de 27,6 MPa (4.000 psi), após 7 dias de cura. Todos os pesos são SSD.

Componente	Quantidade
cimento, kg/m ³ (lb/yd ³)	180,0 (519)
poeira de cinzas, kg/m ³ (lb/yd ³)	45,1 (130)
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	644,0 (1.857)
pedra, kg/m ³ (lb/yd ³)	431,8 (1.245)
água, kg/m ³ (lb/yd ³)	90,5 (261)
Daravair, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	38,44 (1,3)
P.NC534, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	343,05 (11,6)
Glenium 3030, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)*	147,87 (5,0)

Nota: Glenium adicionado na planta para o 4° assentamento; Daravair ajustado na planta para um mín. de 5% de ar; acelerador adicionado no local, seguido imediatamente por ajuste do assentamento no local com Glenium 3030 adicional, se necessário.

Exemplo 22

O projeto de mistura apresentado a seguir, para uma composição de concreto de autonivelamento, foi projetado usando o processo DOC aperfeiçoado aqui descrito. Essas com-

posições são caracterizadas como tendo ar entranhado e tendo um assentamento superior a 20,3 cm (8 in), quando em uma condição úmida antes de cura, e uma resistência mecânica compressiva de 27,6 MPa (4.000 psi), após 7 dias de cura.

5 Todos os pesos são SSD.

Componente	Quantidade
cimento, kg/m ³ (lb/yd ³)	127,0 (366)
poeira de cinzas, kg/m ³ (lb/yd ³)	38,1 (110)
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	624,6 (1.801)
pedra, kg/m ³ (lb/yd ³)	422,7 (1.219)
água, kg/m ³ (lb/yd ³)	90,5 (261)
Daravair, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	38,44 (1,3)
P.NC534, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4,0)
Glenium 3030, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)*	59,15 (2,0)

Nota: Glenium adicionado na planta com a água da batelada; Daravair ajustado na planta para um mín. de 5% de ar; ajuste do assentamento no local com Glenium 3030.

10 A presente invenção pode ser representada em outras formas específicas, sem afastar-se do seu espírito ou características essenciais. As modalidades descritas devem ser consideradas em todos os aspectos apenas como ilustrativas e não restritivas. O âmbito da invenção é, portanto, indicado pelas modalidades em anexo, em vez de pela descrição
15 precedente. Todas as modificações que estejam dentro do significado e da faixa de equivalência das reivindicações vão estar aqui abrangidas dentro do âmbito delas.

REIVINDICAÇÕES

1. Processo implementado por computador para projetar, para um determinado conjunto de matérias-primas, um projeto de mistura de concreto otimizado tendo resistência mecânica e assentamento desejados, a um custo mais baixo do que um projeto de mistura não otimizado, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

introdução no sistema de computação de dados relativos ao tamanho de partícula e à densidade de compactação de partículas para vários componentes sólidos;

introdução no sistema de computação de uma resistência mecânica e um assentamento alvo;

introdução no sistema de computação de um fator K selecionado, para uso na determinação de uma resistência mecânica prevista, para cada uma de uma pluralidade de projetos de mistura de concreto, gerados pelo sistema de computação, o fator K sendo selecionado com base na resistência mecânica alvo de entre uma pluralidade de diferentes fatores K, que variam com a resistência mecânica do concreto;

determinação pelo sistema de computação de uma pluralidade de cimento de concreto, tendo proporções variáveis de matérias-primas;

determinação pelo sistema de computação de, com base no fator K de projeto selecionado, uma resistência mecânica prevista para cada projeto de mistura de concreto;

determinação pelo sistema de computação de um assentamento previsto para cada concreto de concreto; e

comparação pelo sistema de computação da resistên-

cia mecânica e do assentamento previstos para cada concreto de concreto com as resistências mecânica e assentamento, para identificar um ou mais projetos de mistura de concreto que são melhor otimizados com relação às resistências mecânica e assentamento, comparados aos outros da pluralidade de projetos de mistura.

2. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

introdução no sistema de computação de dados relativos ao custo das matérias-primas; e

identificação pelo sistema de computação de um ou mais projetos de mistura tendo um custo mais baixo, comparado ao outro de uma pluralidade de projetos de mistura de concreto.

15 3. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto selecionado considera um efeito na resistência mecânica do concreto da inclusão de um agente reforçador de amina.

20 4. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto selecionado considera um efeito na resistência mecânica de incluir pelo menos um de poeira de cinzas ou fumo de sílica.

25 5. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto selecionado considera um efeito na resistência mecânica de usar um aparelho de mistura específico.

6. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

preparar uma amostra de teste de concreto com base em um projeto de mistura de concreto selecionado;

determinar uma resistência mecânica para a amostra de teste de concreto; e

5 gerar pelo sistema de computação um outro projeto de mistura de concreto, que produza uma composição de concreto tendo uma resistência mecânica, que se correlaciona mais estreitamente com a resistência mecânica alvo, comparada com o projeto de mistura de concreto selecionado.

10 7. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

preparar uma amostra de teste de concreto com base em um projeto de mistura de concreto selecionado;

15 determinar um assentamento para a amostra de teste de concreto; e

gerar pelo sistema de computação um outro projeto de mistura de concreto, que produza uma composição de concreto tendo um assentamento, que se correlaciona mais estreitamente com o assentamento alvo, comparado ao projeto de
20 mistura de concreto selecionado.

8. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

25 identificar um projeto de mistura preexistente usado por uma planta para a produção de uma composição de concreto;

determinar, com base em uma resistência mecânica de projeto e uma razão de componentes dentro de uma composição de concreto, usando o projeto de mistura preexistente,

um fator K de projeto aparente para o projeto de mistura preexistente; e

projetar pelo sistema de computação, de acordo com a reivindicação 1, um ou mais outros projetos de mistura tendo um fator K de projeto que é superior ao fator K de projeto aparente para o projeto de mistura preexistente.

9. Processo, de acordo com a reivindicação 8, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

melhorar e/ou recalibrar o equipamento usado pela planta na produção de concreto, de modo que o concreto produzido pela planta, usando o equipamento melhorado e/ou recalibrado, tenha uma resistência mecânica efetiva que se correlaciona mais estreitamente com a resistência mecânica de projeto, comparado com um equipamento anterior antes da melhoria e/ou recalibração.

10. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda que, para um determinado projeto de mistura, que produz uma composição de concreto tendo assentamento, resistência mecânica e razão de pasta para agregado, o sistema de computação projeta um projeto de mistura modificado tendo um assentamento modificado, mas uma resistência mecânica substancialmente similar, por alteração da razão de pasta de cimento para agregado.

11. Processo de produção de uma composição de concreto, **CARACTERIZADO** pelo fato de que usa um projeto de mistura de concreto que é otimizado de acordo com o processo de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 10, a composição de concreto tendo uma razão de matérias-primas subs-

tancialmente otimizada.

12. Composição de concreto tendo uma razão de matérias-primas otimizada, produzida de acordo com o processo de acordo com a reivindicação 11, **CARACTERIZADA** pelo fato de
5 que tem um fator K de assinatura, que é único comparado com um fator K de projeto aparente, para uma composição de concreto menos otimizada, produzida usando o determinado conjunto de matérias-primas.

13. Composição de concreto tendo uma razão de ma-
10 térias-primas otimizada, produzida de acordo com o processo de acordo com a reivindicação 11, **CARACTERIZADA** pelo fato de que tem um fator K de assinatura, que é único para o determinado conjunto de matérias-primas, comparado com um fator K para concreto tendo resistência mecânica similar, mas produ-
15 zido de um diferente conjunto de matérias-primas.

14. Processo para projetar, em um sistema de com-
putação para a otimização de projeto de uma composição de concreto, para um determinado conjunto de matérias-primas, um projeto de mistura de concreto otimizado tendo resistên-
20 cia mecânica e assentamento desejados, a um custo mais baixo do que um projeto de mistura não otimizado, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

receber, pelo sistema de computação, dados relativos ao tamanho de partícula e à densidade de compactação de
25 partículas para uma pluralidade de componentes sólidos;

receber, pelo sistema de computação, uma resistência mecânica e um assentamento alvo;

receber, pelo sistema de computação, um fator K de

projeto selecionado, para uso na determinação de uma resistência mecânica prevista para todos de uma pluralidade de projetos de mistura de concreto, gerados pelo sistema de computação, o fator K de projeto sendo selecionado, com base
5 na resistência mecânica alvo, de entre uma pluralidade de diferentes fatores K, que variam com a resistência mecânica do concreto;

projetar, pelo sistema de computação, uma pluralidade de projetos de mistura de concreto tendo proporções variáveis de matérias-primas;
10

determinar, pelo sistema de computação, com base no fator K de projeto selecionado, uma resistência mecânica prevista para cada projeto de mistura de concreto;

determinar, pelo sistema de computação, um assentamento previsto para cada projeto de mistura de concreto; e
15

comparar, pelo sistema de computação, as resistências mecânicas e assentamento previstos para cada projeto de mistura de concreto com as resistências mecânicas e assentamento alvo, para identificar um ou mais projetos de mistura
20 de concreto, que são melhor otimizados com relação à resistência mecânica e ao assentamento, comparados a outro da pluralidade de projetos de mistura.

15. Processo, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

25 receber, pelo sistema de computação, dados relativos ao custo das matérias-primas; e

identificar, pelo sistema de computação, um ou mais projetos de mistura tendo um custo mais baixo, compara-

dos a outro da pluralidade de projetos de mistura hipotéticos.

16. Processo, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto selecionado considera um efeito na resistência mecânica do concreto da inclusão de um agente reforçador de amina, poeira de cinzas ou fumo de sílica, e/ou uso de um aparelho de mistura específico.

17. Produto programa de computador **CARACTERIZADO** pelo fato de que contém instruções executáveis para implementar o processo de acordo com qualquer uma das reivindicações de 14 a 16.

18. Processo implementado por computador para re-projetar um projeto de mistura de concreto preexistente, de modo a produzir um melhor projeto de mistura de concreto otimizado, que garante uma resistência mecânica e um assentamento específicos mínimos, a um custo mais baixo, comparado com o projeto de mistura de concreto preexistente, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

identificar um projeto de mistura de concreto preexistente, tendo uma razão inicial de componentes, uma resistência mecânica de projeto, e um fator K de projeto aparente, que varia com base na resistência mecânica; e

projetar, pelo sistema de computação, um projeto de mistura de concreto revisto, tendo uma razão revista de componentes, usando um fator K de projeto revisto que é superior ao fator K aparente do projeto de mistura de concreto preexistente e que corresponde mais estreitamente a um fator

K ótimo, correspondente à, e selecionado com base na, resistência mecânica de projeto.

19. Processo, de acordo com a reivindicação 18, **CARACTERIZADO** pelo fato de que as composições de concreto, produzidas usando o concreto de concreto revisto, têm resistências mecânicas efetivas que correspondem mais consistentemente à resistência mecânica de projeto, comparadas com as composições de concreto produzidas usando o projeto de mistura de concreto preexistente.

20. Processo de produção de uma composição de concreto, **CARACTERIZADO** pelo fato de que usa um projeto de mistura de concreto, que é reprojeto de acordo com o processo de acordo com a reivindicação 18, a composição de concreto tendo uma melhor razão otimizada de matérias-primas, comparada com as composições de concreto produzidas por uso do projeto de mistura de concreto preexistente, de modo a ter as resistências mecânicas e assentamento mínimos específicos, a um custo mais baixo, comparada com as composições de concreto produzidas por uso do projeto de mistura de concreto preexistente.

21. Composição de concreto **CARACTERIZADA** pelo fato de que é produzida de acordo com o processo de acordo com a reivindicação 20.

22. Composição de concreto, de acordo com a reivindicação 21, **CARACTERIZADA** pelo fato de que tem um fator K de projeto de assinatura, que é mais alto do que o fator K de projeto aparente de uma composição de concreto produzida usando o projeto de mistura de concreto preexistente e que

se correlaciona mais estreitamente com um fator K ótimo, correspondente à resistência mecânica de projeto.

23. Composição de matéria, em uma planta de concreto que produz concreto de um determinado conjunto de matérias-primas e/ou variáveis de processamento, **CARACTERIZADA** pelo fato de que compreende uma composição de concreto otimizada produzida pela planta, a composição de concreto otimizada tendo resistência mecânica e assentamento mínimos, que são obtidos por mistura de uma combinação otimizada de cimento hidráulico, agregados, água e um ou mais componentes opcionais, cuja combinação otimizada é determinada por uso de um processo de otimização, no qual um projeto de mistura preexistente, usado previamente pela planta e otimizado utilizando um fator K de projeto, para uso na equação de Feret de resistência mecânica, que corresponde a uma resistência mecânica de projeto da composição de concreto otimizada, e que é selecionado de uma pluralidade de fatores K, que variam com base na resistência mecânica para um determinado conjunto de matérias-primas e/ou variáveis de processamento, o fator K da composição de concreto otimizada sendo uma assinatura, que diferencia a composição de concreto otimizada de uma composição de concreto menos otimizada, usando o projeto de mistura preexistente.

24. Composição de matéria, de acordo com a reivindicação 23, **CARACTERIZADA** pelo fato de que a composição de concreto otimizada é única, comparada com as composições produzidas por qualquer outra planta, tendo o seu próprio conjunto único de matérias-primas e/ou variáveis de proces-

samento.

25. Composição de matéria, em uma planta de concreto que produz concreto de um determinado conjunto de matérias-primas e/ou variáveis de processamento, **CARACTERIZADA**

5 pelo fato de que compreende uma composição de concreto otimizada produzida pela planta, a composição de concreto otimizada tendo resistência mecânica e assentamento mínimos, que são obtidos por mistura de uma combinação otimizada de

10 cimento hidráulico, agregados, água e um ou mais componentes opcionais, cuja combinação otimizada é determinada por uso de um processo de otimização, no qual um projeto de mistura otimizado é projetado utilizando um fator K de projeto, para uso na equação de Feret de resistência mecânica, que corresponde a uma resistência mecânica de projeto da composição de

15 concreto otimizada, e que é selecionado de uma pluralidade de fatores K, que variam com base na resistência mecânica e correspondem ao conjunto único de matérias-primas e/ou variáveis de processamento, o fator K da composição de concreto otimizada sendo uma assinatura, que diferencia a composição

20 de concreto otimizada de qualquer outra composição de concreto produzida usando as matérias-primas e/ou variáveis de processamento, que diferem do conjunto único de matérias-primas e/ou variáveis de processamento empregado pela planta.

25 26. Processo de produção de composições de concreto aperfeiçoadas, em uma planta de concreto que produz uma pluralidade de diferentes composições de concreto, tendo diferentes resistências mecânicas, as composições de concreto

aperfeiçoadas tendo resistências mecânicas efetivas que se correlacionam mais estreitamente com as suas respectivas resistências mecânicas de projeto, o processo **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

5 identificar uma pluralidade de projetos de mistura de concreto preexistentes da planta de concreto precisando de melhor otimização, em que pelo menos dois dos projetos de mistura têm diferentes resistências mecânica de projeto;

10 selecionar uma pluralidade de diferentes fatores K de projeto, para uso no projeto de melhores projetos de mistura de concreto otimizados, em que os diferentes fatores K se correlacionam com as, e variam com base nas diferentes resistências mecânicas de projeto selecionadas;

15 projetar, usando a pluralidade de diferentes fatores K de projeto, uma pluralidade de projetos de mistura de concreto diferentes ou revistos, tendo razões de componentes diferentes ou revistas, comparados com os projetos de mistura preexistentes; e

20 produzir, com base nos projetos de mistura de concreto diferentes ou revistos, composições de concreto revistas tendo resistências mecânicas efetivas, que se correlacionam mais estreitamente com as suas respectivas resistências mecânicas de projeto, comparadas com as composições de concreto preexistentes, produzidas por uso dos projetos de
25 mistura preexistentes,

 em que as composições de concreto revistas garantem uma resistência mecânica e um assentamento específicos, a um custo mais baixo, comparadas com as composições de con-

creto preexistentes.

27. Processo de produção de composições de concreto otimizadas, de acordo com a reivindicação 26, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda fazer ajustes de assentamento em uma ou mais composições de concreto revistas, por
5 adição de uma, ou alteração da, proporção de uma mistura dentro da uma ou mais composições de concreto.

28. Processo de produção de composições de concreto otimizadas, de acordo com a reivindicação 26, **CARACTERIZADO**
10 pelo fato de que compreende ainda melhorar e/ou ajustar o equipamento produtivo utilizado pela planta, de modo que cada componente seja pesado ou medido de outro modo com uma precisão de cerca de $\pm 2,0\%$.

29. Processo de produção de composições de concreto otimizadas, de acordo com a reivindicação 26, **CARACTERIZADO**
15 pelo fato de que compreende ainda monitorar o teor de umidade dos componentes sólidos e alterar as quantidades medidas dos componentes sólidos, e adicionar água de batelada, usada para produzir uma composição de concreto, com base nas variações detectadas no teor de umidade dos componentes sólidos.
20

30. Processo de produção de composições de concreto aperfeiçoadas, de acordo com a reivindicação 26, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda transferir uma composição de concreto, usando um caminhão de mistura de concreto que
25 inclui um recipiente contendo uma mistura, que altera o assentamento, e dosar uma quantidade selecionada da mistura em um tambor de mistura conduzindo a composição de concreto, para alterar o assentamento de uma maneira desejada.

31. Composição de concreto **CARACTERIZADA** pelo fato de que é produzida de acordo com o processo de acordo com qualquer uma das reivindicações de 26 a 30.

32. Processo de produção, em uma planta de concreto tendo um determinado conjunto de componentes de matérias-primas, de composições de concreto otimizadas, tendo resistências mecânicas efetivas que refletem mais estreitamente as suas resistências mecânicas previstas ou de projeto, comparadas com as composições de concreto menos otimizadas, produzidas do determinado conjunto de componentes de matérias-primas, o processo **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

proporcionar uma pluralidade de projetos de mistura de concreto otimizadas tendo diferentes resistências mecânicas de projeto, que foram projetados usando diferentes fatores K de projeto, em que cada um dos diferentes fatores K de projeto foi selecionado, pelo menos em parte, com base na respectiva resistência mecânica de projeto; e

produzir uma pluralidade de composições de concreto otimizadas, com base nos projetos de mistura de concreto otimizadas, cada composição de concreto otimizada tendo uma razão otimizada de componentes, de modo a ter uma resistência mecânica efetiva, que reflete mais estreitamente a sua resistência mecânica prevista ou de projeto, comparada com uma composição de concreto menos otimizada, produzida do determinado conjunto de componentes de matérias-primas.

33. Processo de produção de composições de concreto otimizadas, de acordo com a reivindicação 32, **CARACTERIZADO**

pelo fato de que compreende ainda fazer ajustes de assentamento em uma ou mais composições de concreto revistas, por adição de uma, ou alteração da, proporção de uma mistura dentro da uma ou mais composições de concreto.

5 34. Processo de produção de composições de concreto otimizadas, de acordo com a reivindicação 32, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda pesar ou medir de outro modo os componentes de cada composição de concreto, com uma precisão de cerca de $\pm 2,0\%$.

10 35. Processo de produção de composições de concreto otimizadas, de acordo com a reivindicação 32, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda monitorar o teor de umidade dos componentes sólidos e alterar as quantidades medidas dos componentes sólidos, e adicionar água de batelada, usada
15 para produzir uma composição de concreto, com base nas variações detectadas no teor de umidade dos componentes sólidos.

 36. Processo de produção de composições de concreto aperfeiçoadas, de acordo com a reivindicação 32, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda misturar uma ou mais das
20 composições de concreto otimizadas, usando um caminhão de mistura de concreto que inclui um recipiente contendo uma mistura, que altera o assentamento, e dosar uma quantidade selecionada da mistura em um tambor de mistura conduzindo a composição de concreto, para alterar o assentamento de uma
25 maneira desejada.

 37. Composição de concreto **CARACTERIZADA** pelo fato de que é produzida de acordo com o processo de acordo com qualquer uma das reivindicações de 32 a 36.

38. Sistema de construção de concreto, em uma planta de concreto que produz concreto de um determinado conjunto de matérias-primas, o sistema compreendendo uma pluralidade de composições de concreto otimizadas produzidas pela planta, pelo menos duas das composições de concreto otimizadas tendo diferentes resistências mecânicas de projeto, cada uma da pluralidade de composições de concreto otimizadas tendo assentamento e resistência mecânica mínimos garantidos, que são obtidos por mistura de uma combinação otimizada de cimento hidráulico, agregados, água e um ou mais componentes opcionais, cuja composição otimizada é determinada por uso de um processo de otimização para projetar projetos de mistura otimizados, usados pela planta de produção das composições de concreto otimizadas, cada projeto de mistura otimizado sendo projetado por uso de um fator K de projeto, para uso em uma equação de Feret de resistência mecânica, que corresponde a uma resistência mecânica de projeto do projeto de mistura otimizado, e que é selecionado de uma pluralidade de fatores K que variam com base na resistência mecânica, cada composição de concreto otimizada tendo um fator K de assinatura, que se diferencia de pelo menos um outro das composições de concreto otimizadas tendo uma diferente resistência mecânica de projeto.

39. Sistema de construção de concreto, de acordo com a reivindicação 38, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto de assinatura de cada composição de concreto otimizada diferencia a composição de concreto otimizada das composições de concreto menos otimizadas produzidas do

determinado conjunto de matérias-primas.

40. Sistema de construção de concreto, de acordo com a reivindicação 38, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto de assinatura de cada composição de concreto otimizada diferencia a composição de concreto otimizada das composições de concreto produzidas de matérias-primas, que diferem do determinado conjunto de matérias-primas usado pela planta.

41. Processo para determinar se uma composição de concreto existente, tendo uma determinada resistência mecânica de projeto e uma determinada razão de componentes, está superdimensionada, sem ter que: (i) preparar uma amostra de teste de concreto; (ii) deixar que endureça; (iii) testar a sua resistência mecânica efetiva; e (iv) comparar a resistência mecânica efetiva da amostra de teste da amostra de teste com a determinada resistência mecânica de projeto, o processo **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

determinar um fator K de projeto aparente para a composição de concreto existente, com base na determinada resistência mecânica de projeto da composição de concreto e da determinada razão de componentes dentro da composição de concreto; e

comparar o fator K de projeto aparente com um fator K mais otimizado, que corresponde à determinada resistência mecânica de projeto, e que é selecionado de entre uma pluralidade de diferentes fatores K, que variam com a variação da resistência mecânica do concreto.

42. Processo, de acordo com a reivindicação 41,

CARACTERIZADO pelo fato de que compreende ainda determinar quanto da composição de concreto existente está superdimensionada, por determinação de um desvio entre o fator K de projeto aparente da composição de concreto existente e o fator K selecionado.

43. Processo, de acordo com a reivindicação 41, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda reprojeter a composição de concreto existente por meio de um procedimento de otimização, que utiliza um fator K de projeto revisto, que se correlaciona mais estreitamente com um fator K ótimo para a determinada resistência mecânica de projeto, em que o procedimento de otimização produz uma composição de concreto revista, tendo uma resistência mecânica efetiva, que se correlaciona mais estreitamente com a resistência mecânica de projeto, comparada com a composição de concreto existente.

44. Processo, de acordo com a reivindicação 41, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda a produção da composição de concreto revista.

45. Composição de concreto revista **CARACTERIZADA** pelo fato de que é produzida de acordo com o processo de acordo com a reivindicação 44.

46. Composição de concreto revista, de acordo com a reivindicação 45, **CARACTERIZADA** pelo fato de que tem um fator K de assinatura, que a diferencia da composição de concreto existente.

47. Processo implementado por computador de modificação de uma composição de concreto, produzida de um determinado conjunto de componentes, para ajustar o assenta-

mento sem alterar significativamente a resistência mecânica, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

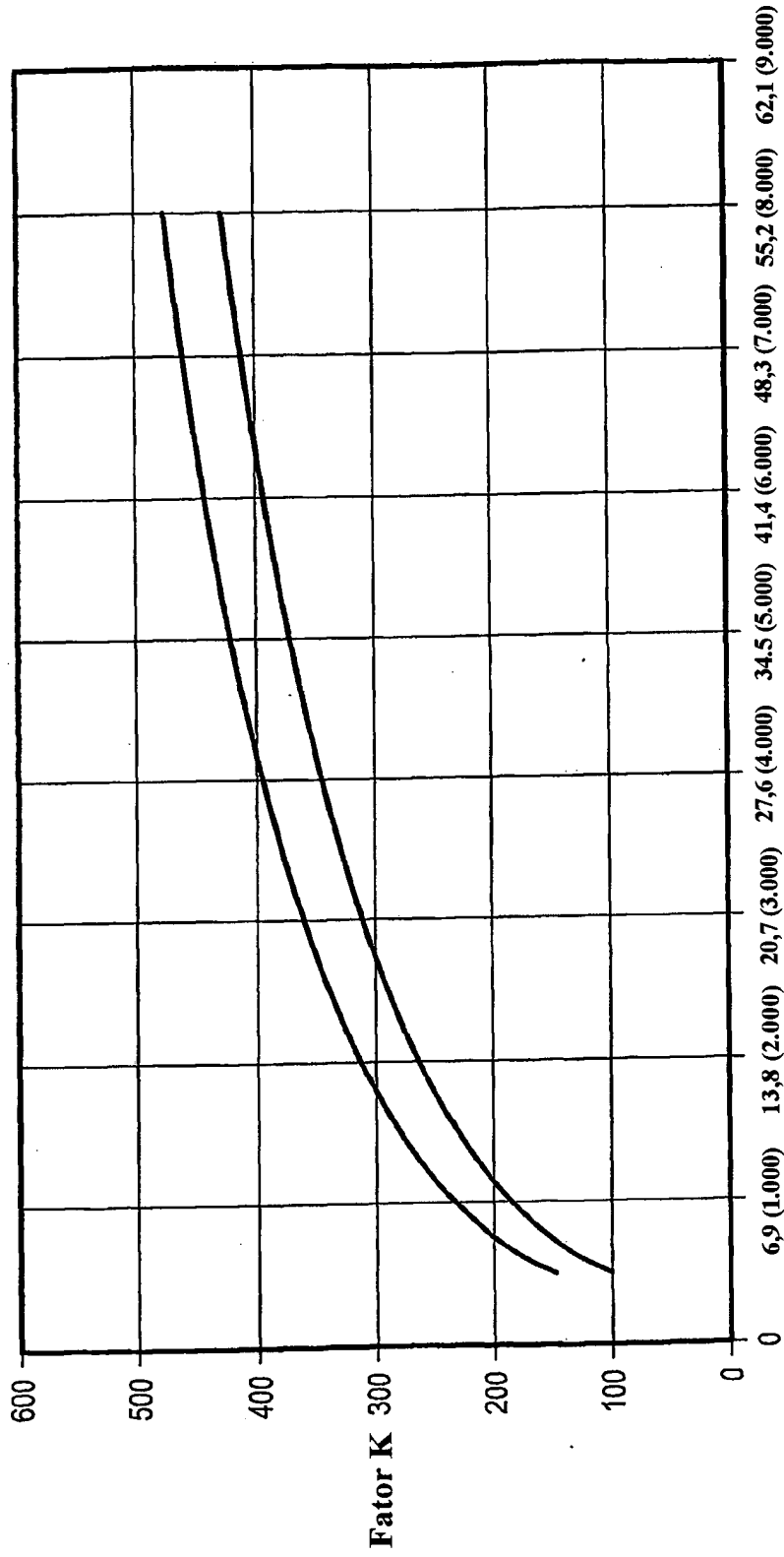
identificar uma composição de concreto existente, que é produzida de acordo com um projeto de mistura otimiza-
5 do, que especifica uma razão específica de componentes, incluindo uma razão de pasta de cimento para agregado, de modo a obter uma resistência mecânica e um assentamento desejados;

introduzir, em um sistema de computação, dados re-
10 lativos ao tamanho de partícula e à densidade de compactação de partículas de um ou mais tipos de agregados; e

projetar pelo sistema de computação um projeto de
mistura de projeto de mistura de concreto revisto, tendo uma
razão revista de pasta de cimento para agregados, que produz
15 uma composição de concreto revisto, tendo um assentamento desejado, sem alterar substancialmente a resistência mecânica da composição de concreto revisto, comparada com a composição de concreto existente.

48. Processo implementado por computado, de acordo
20 com a reivindicação 47, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o sistema de computação ajusta ainda uma quantidade de cada um dos componentes, usados para a produção da composição de concreto revisto, para produzir uma quantidade desejada da composição de concreto revisto.

25 49. Composição de concreto **CARACTERIZADA** pelo fato de que é produzida de acordo com o processo de acordo com a reivindicação 47 ou 48.



Resistência mecânica compressiva, MPa (psi)

Fig. 1

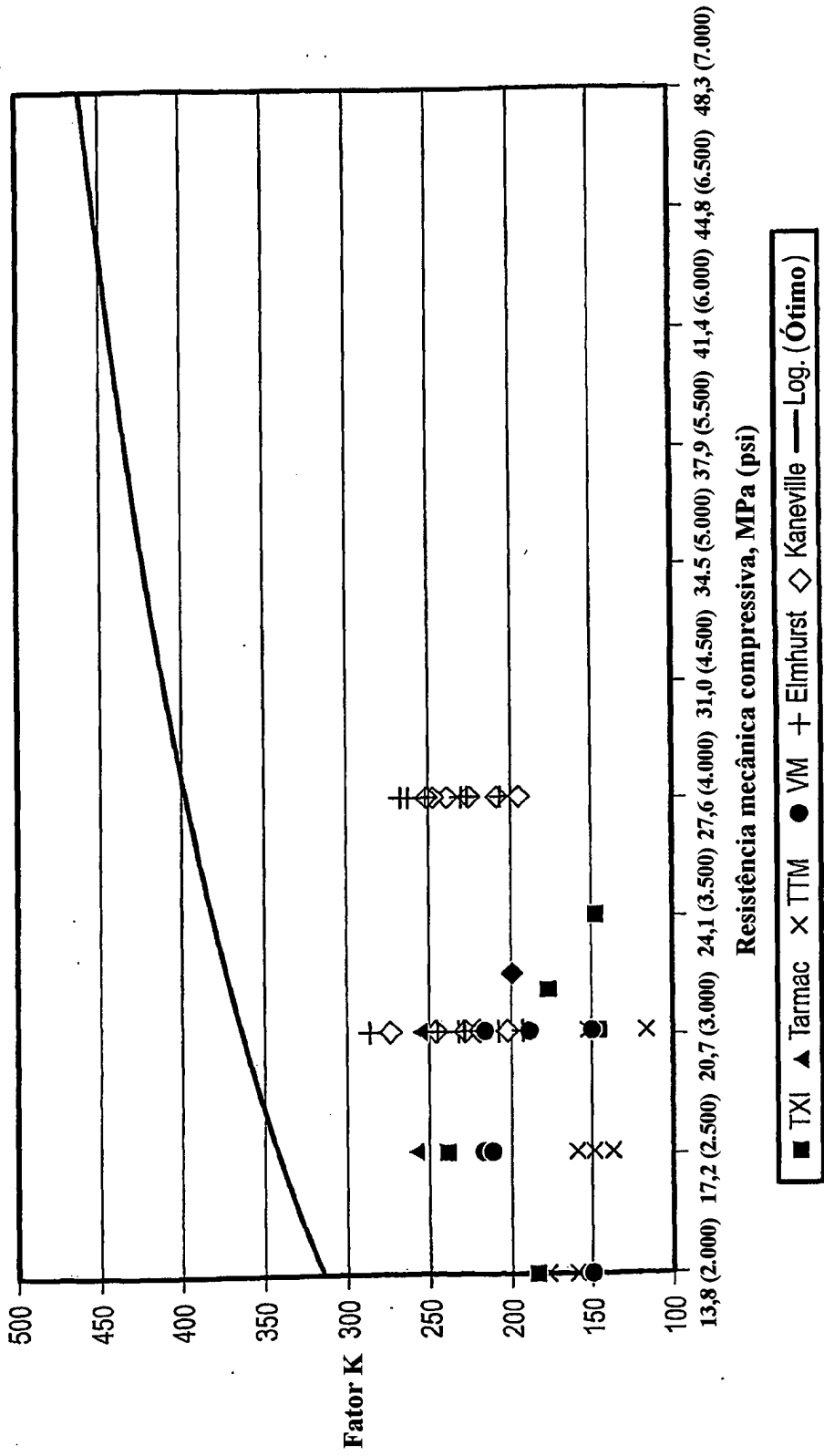


Fig. 2

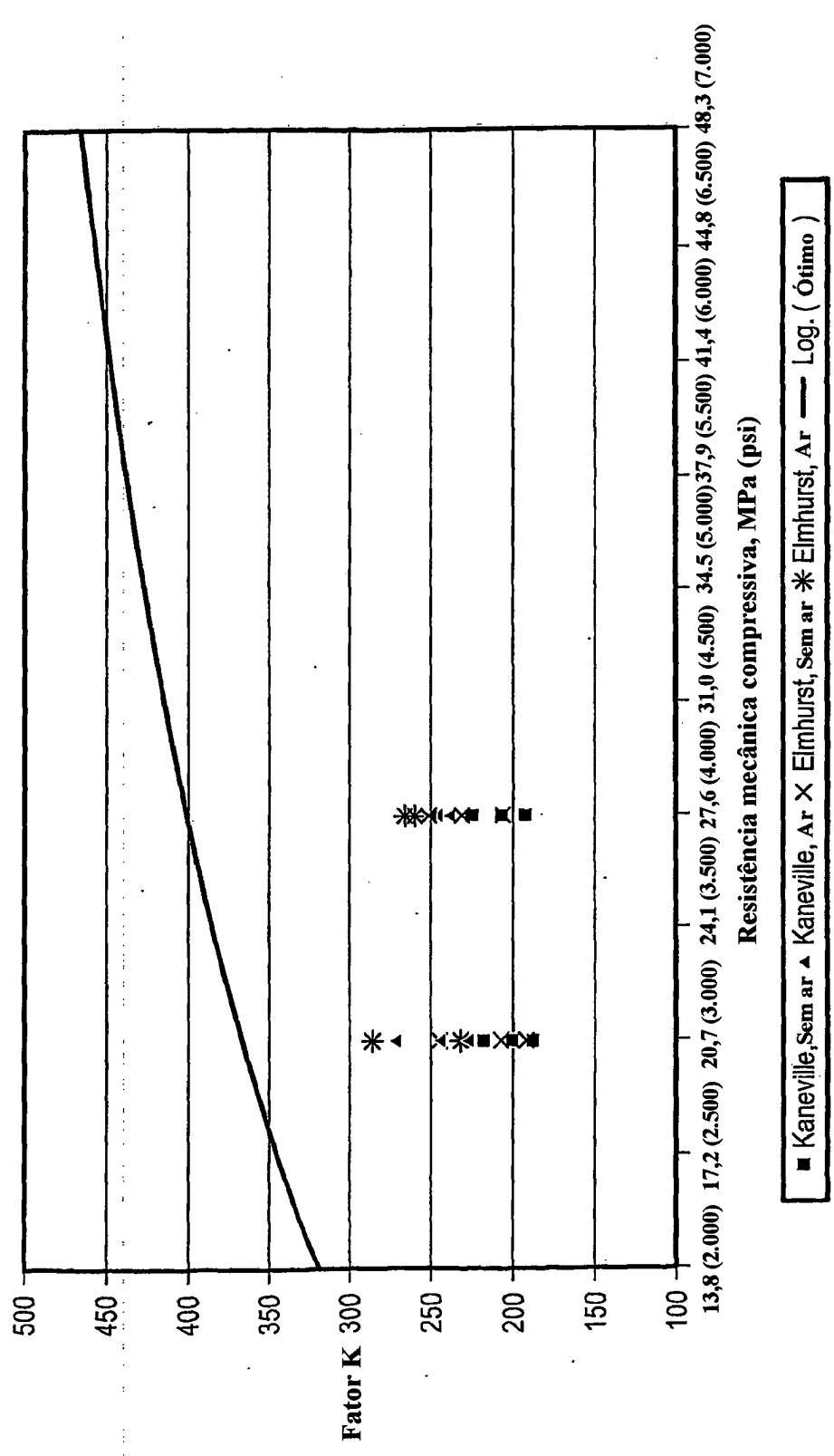


Fig. 3

Sistema de computação
100

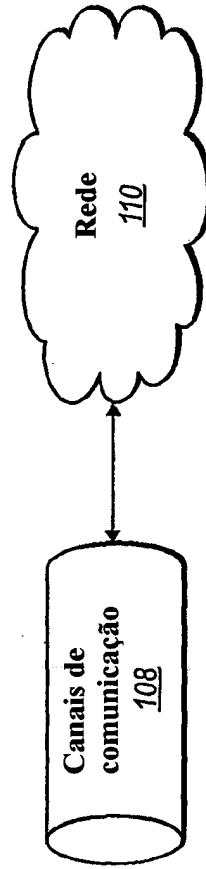
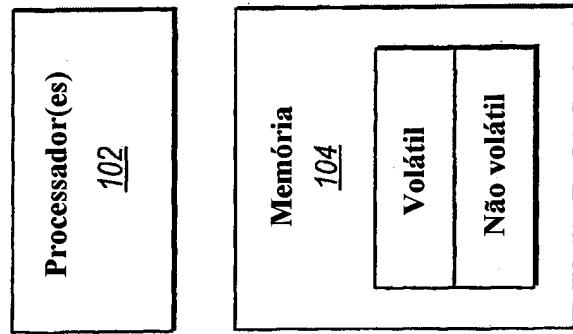


FIG. 4

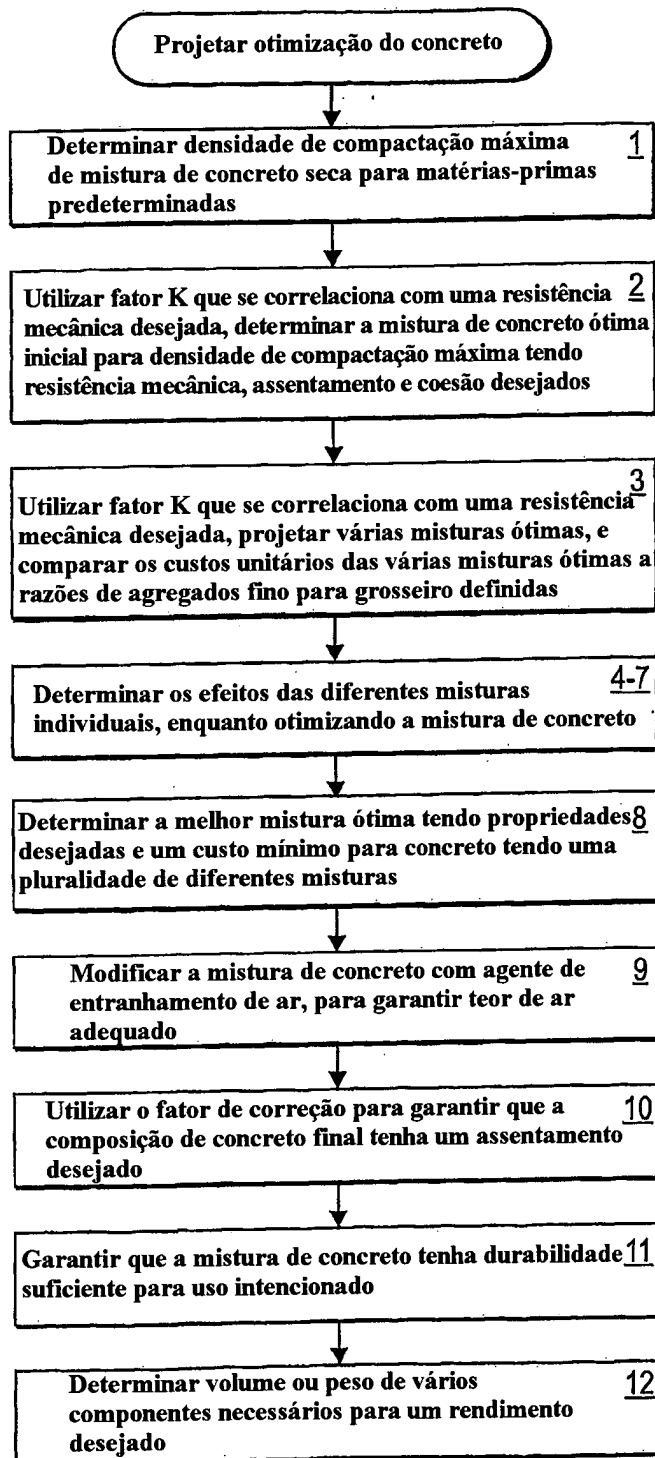


Fig. 5

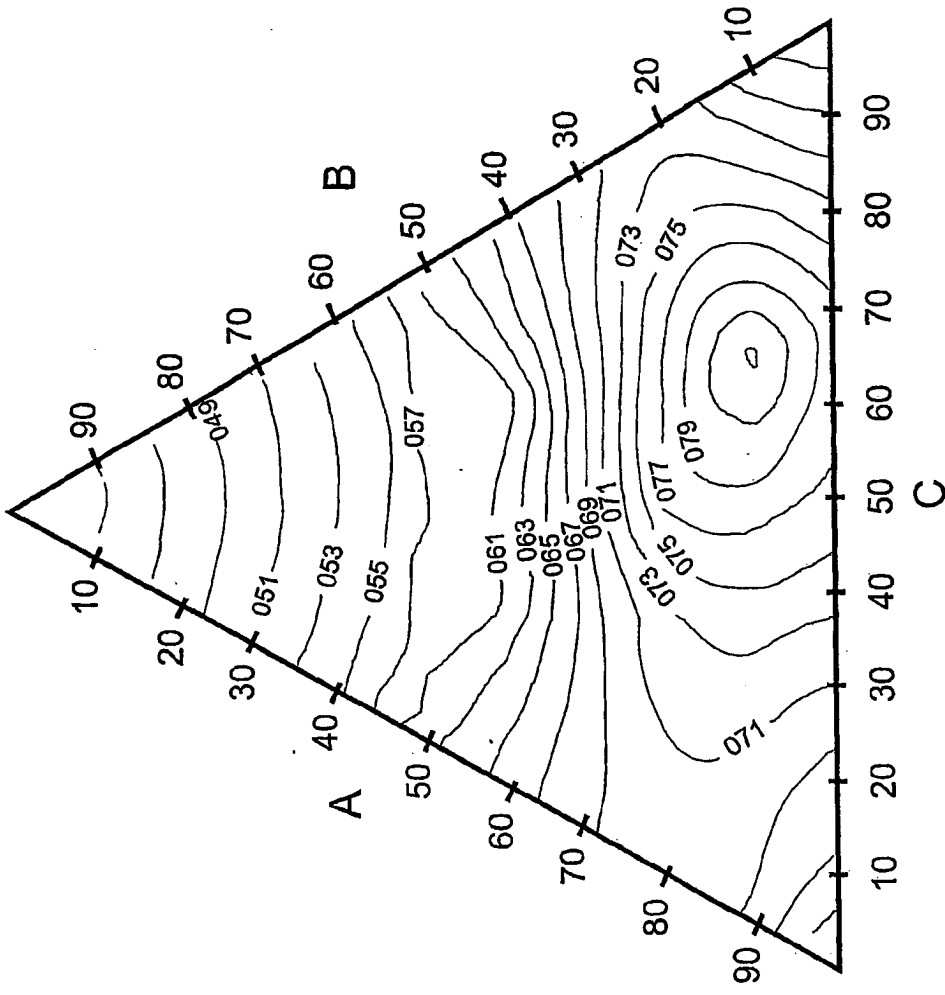


Fig. 6A

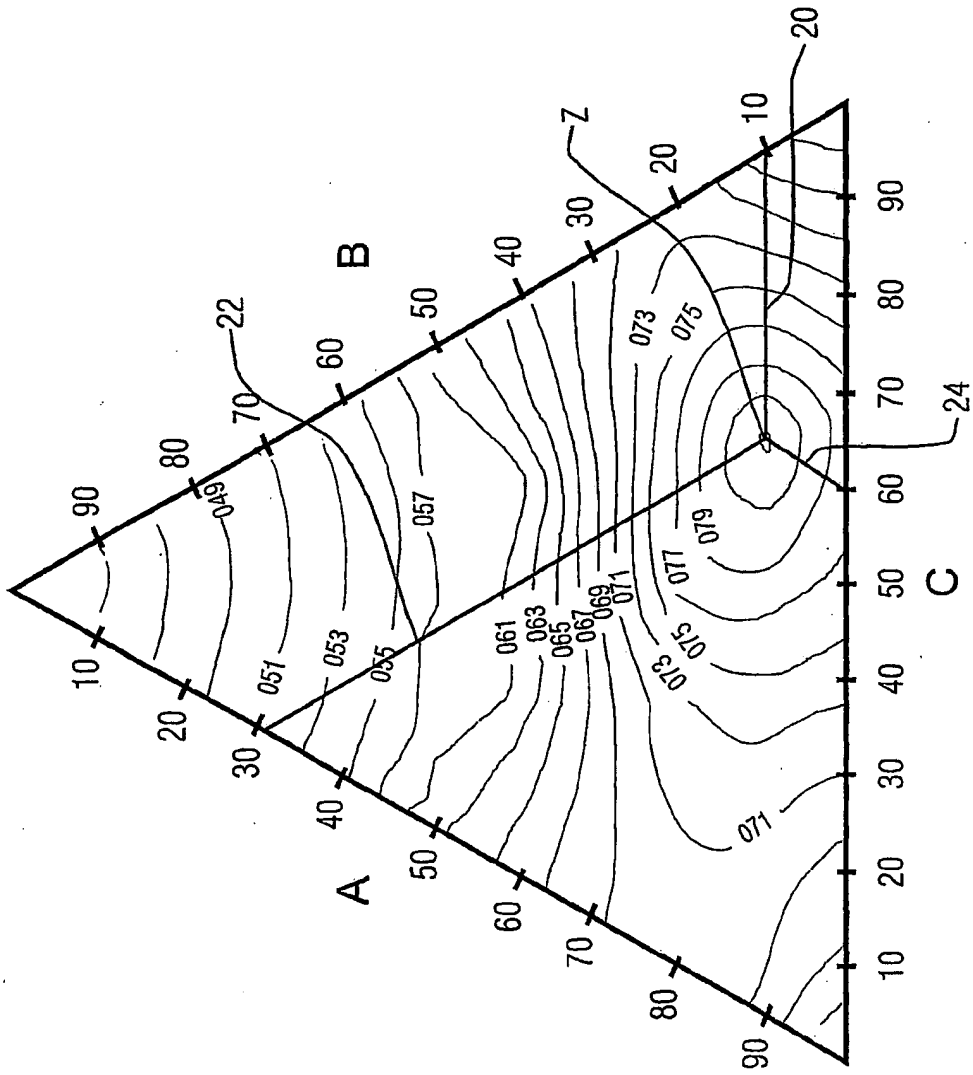


Fig. 6B

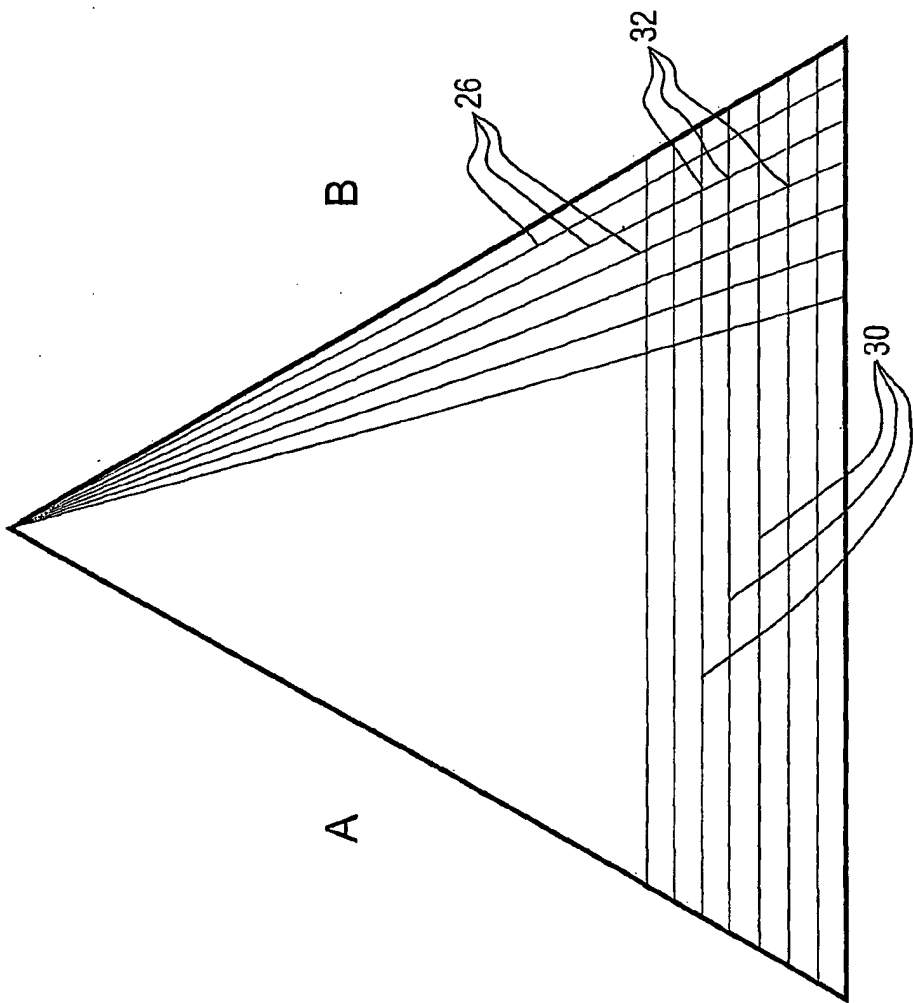


Fig. 6C

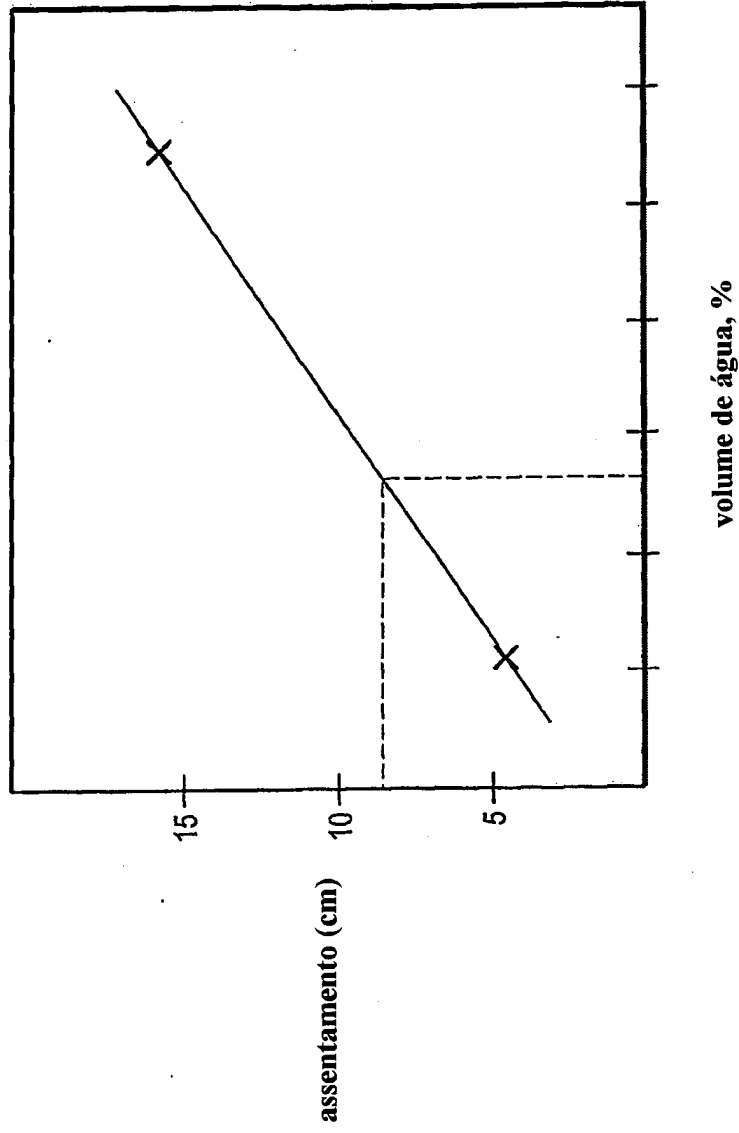


Fig. 7

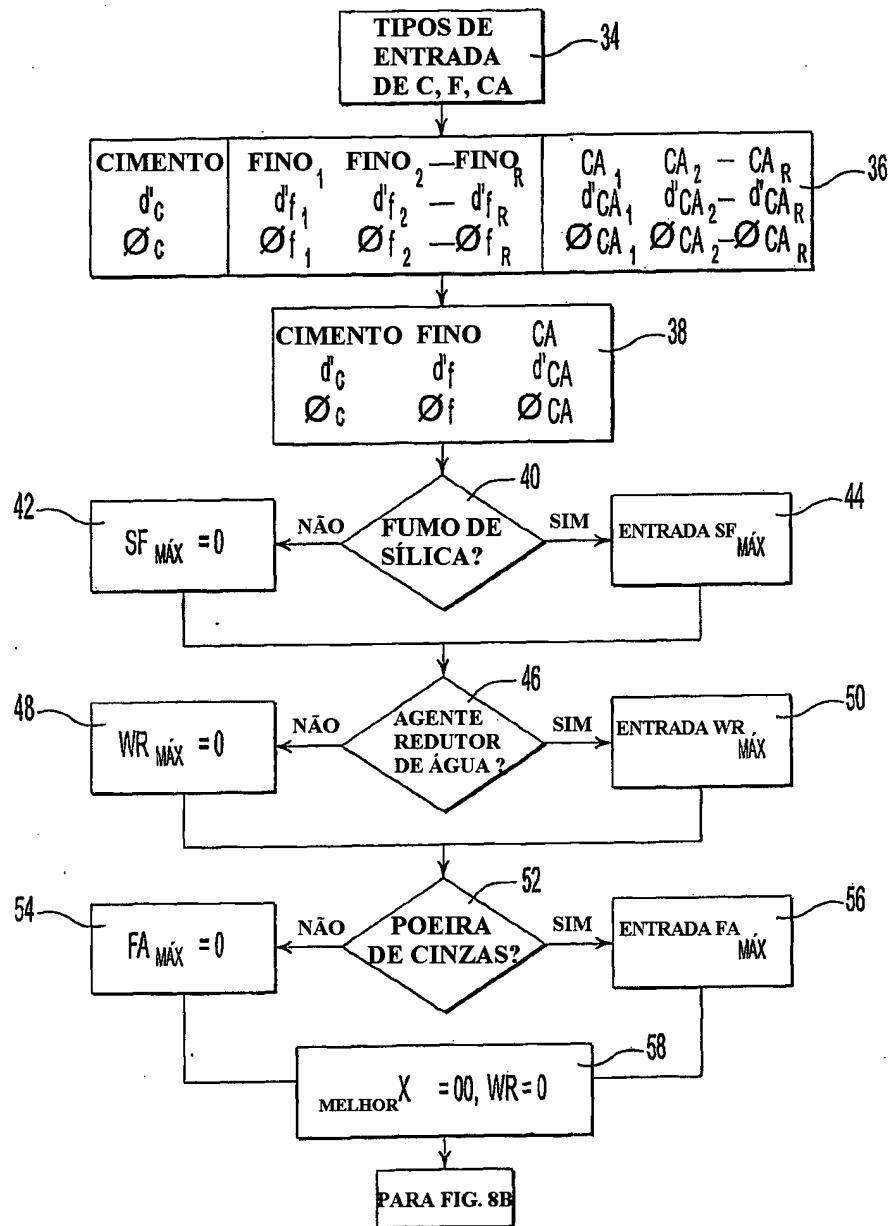


Fig. 8A

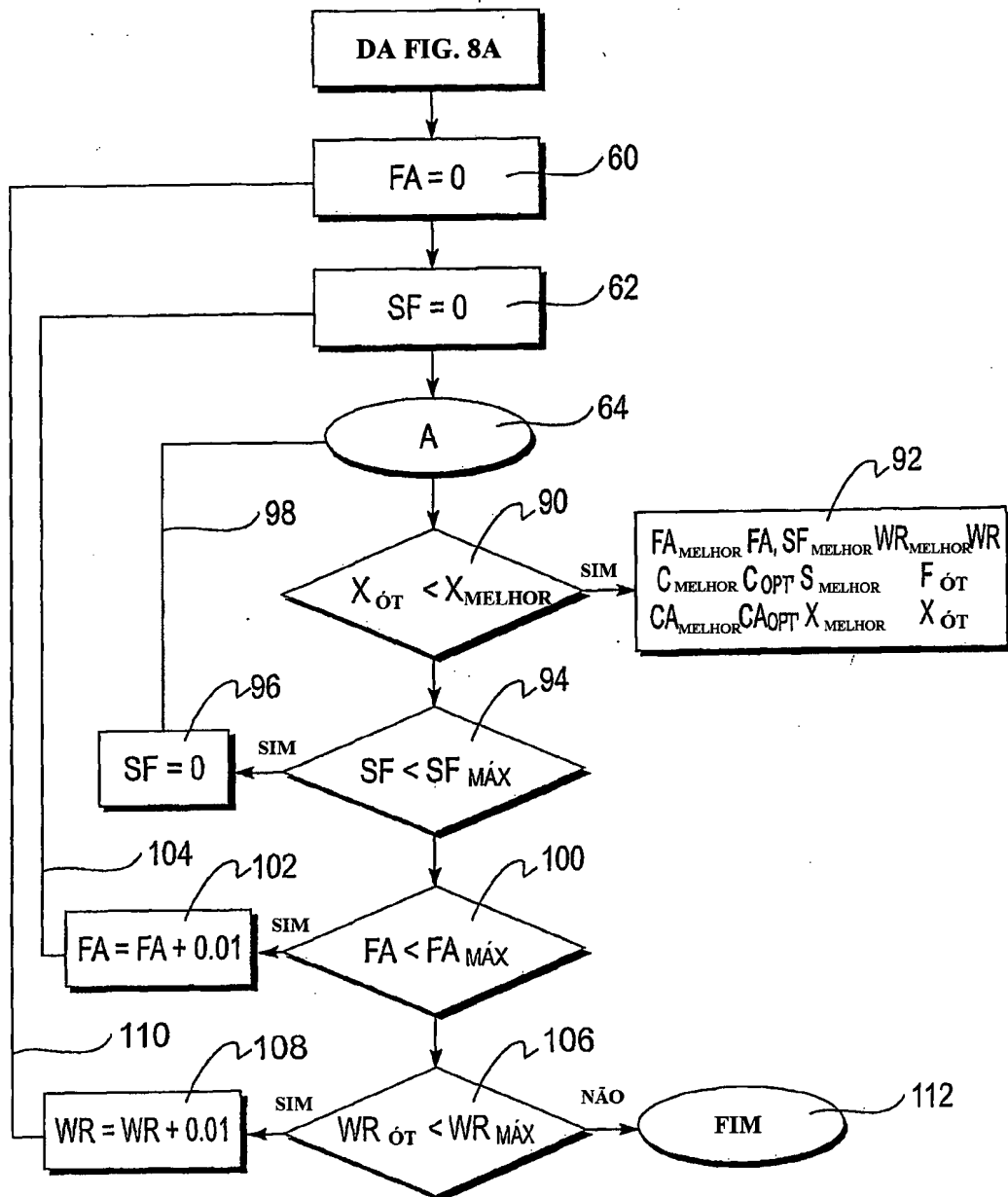


Fig. 8B

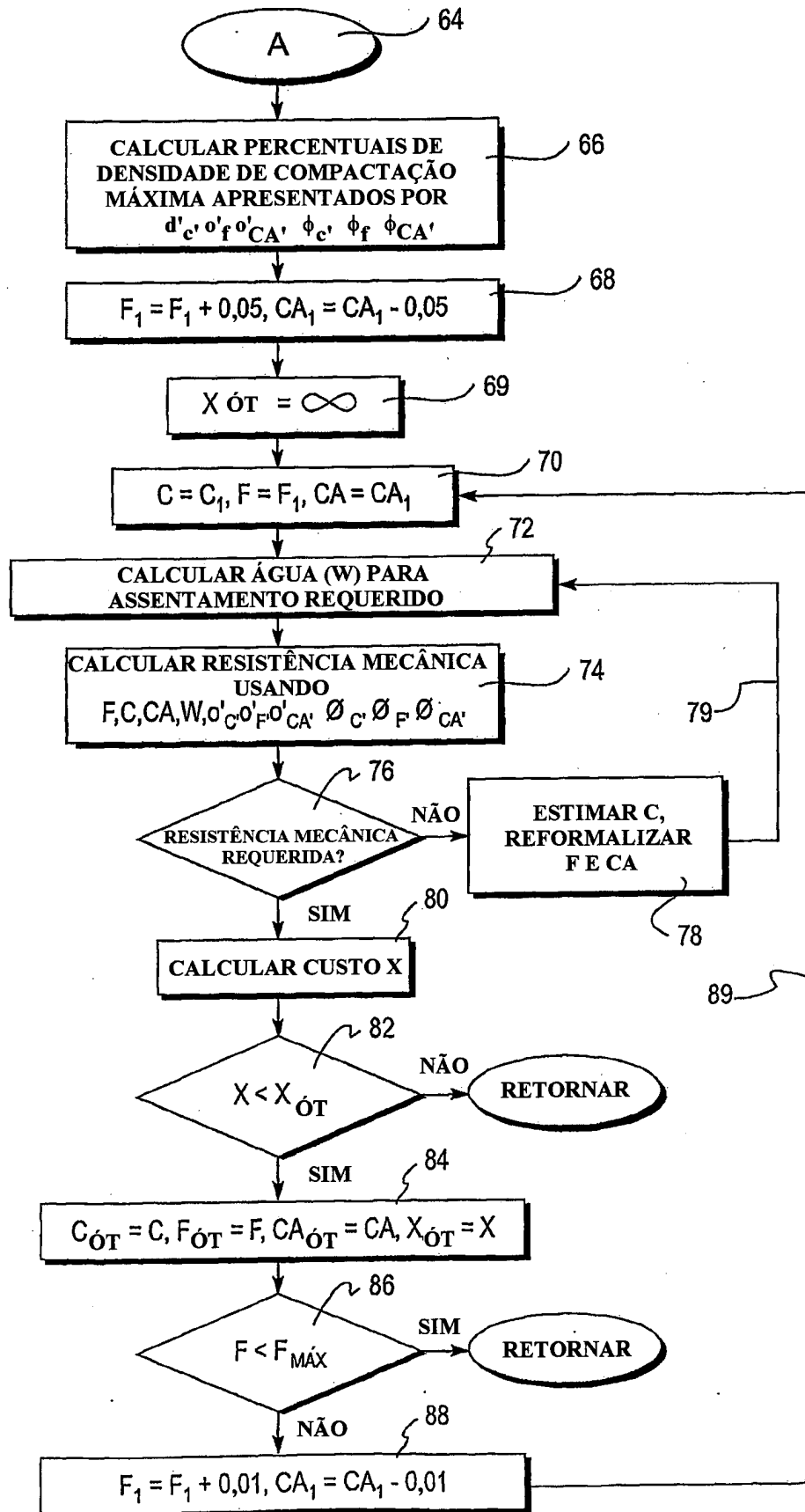


Fig. 8C

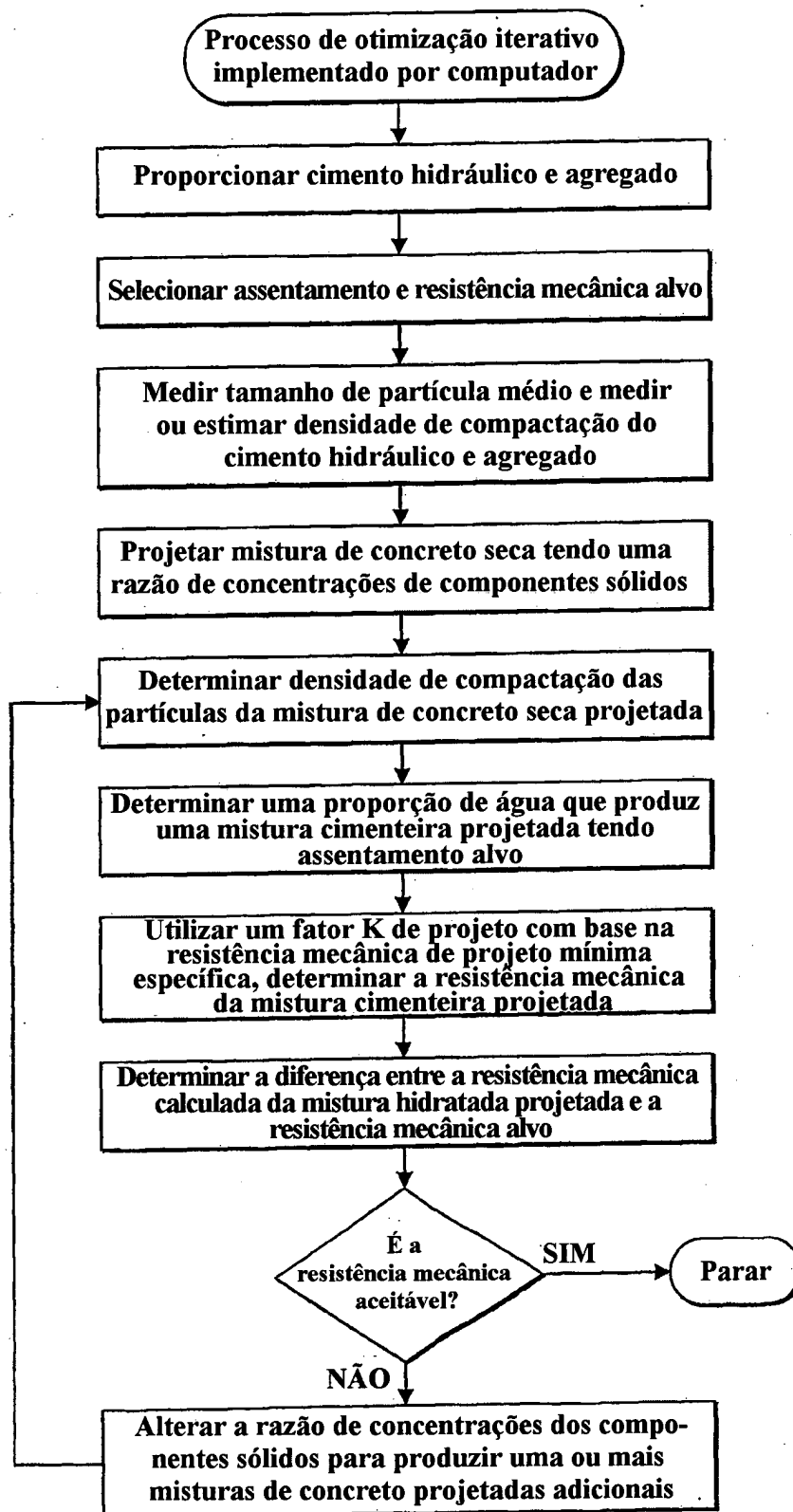


Fig. 9

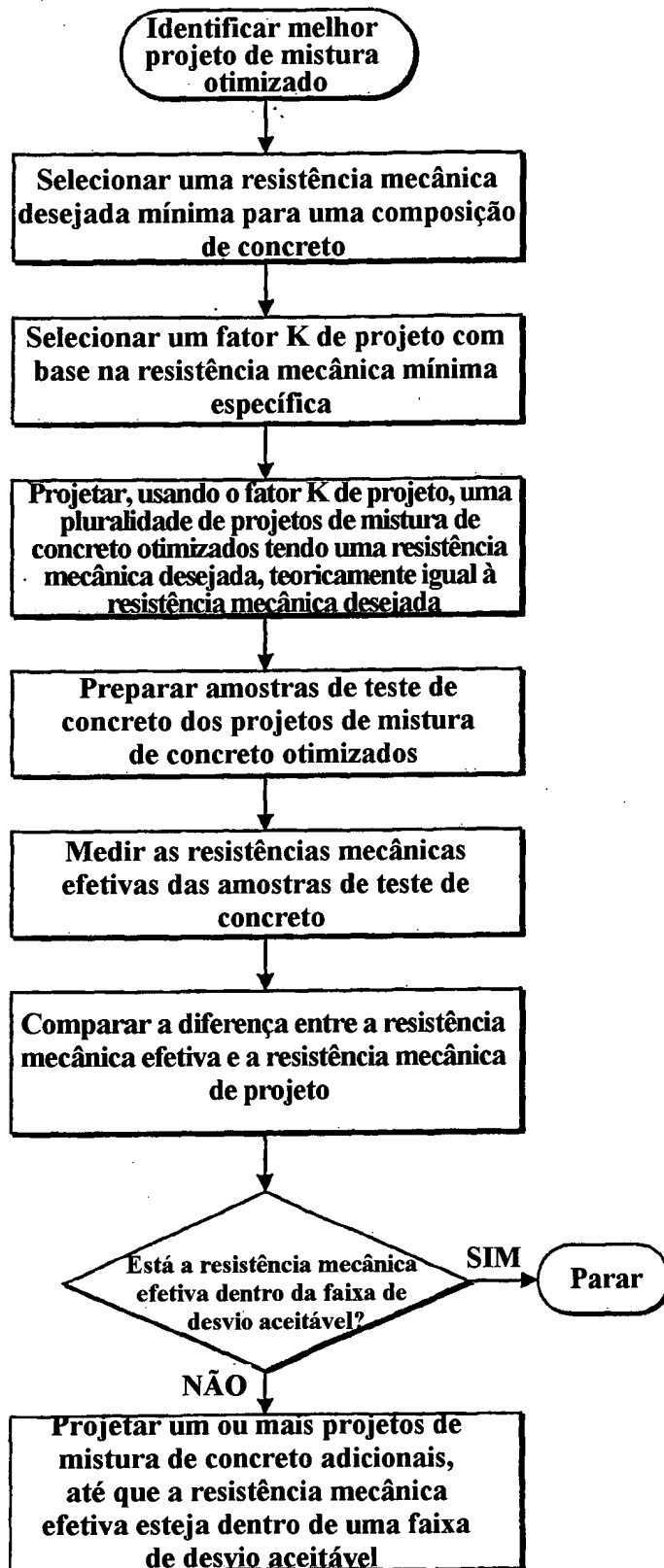
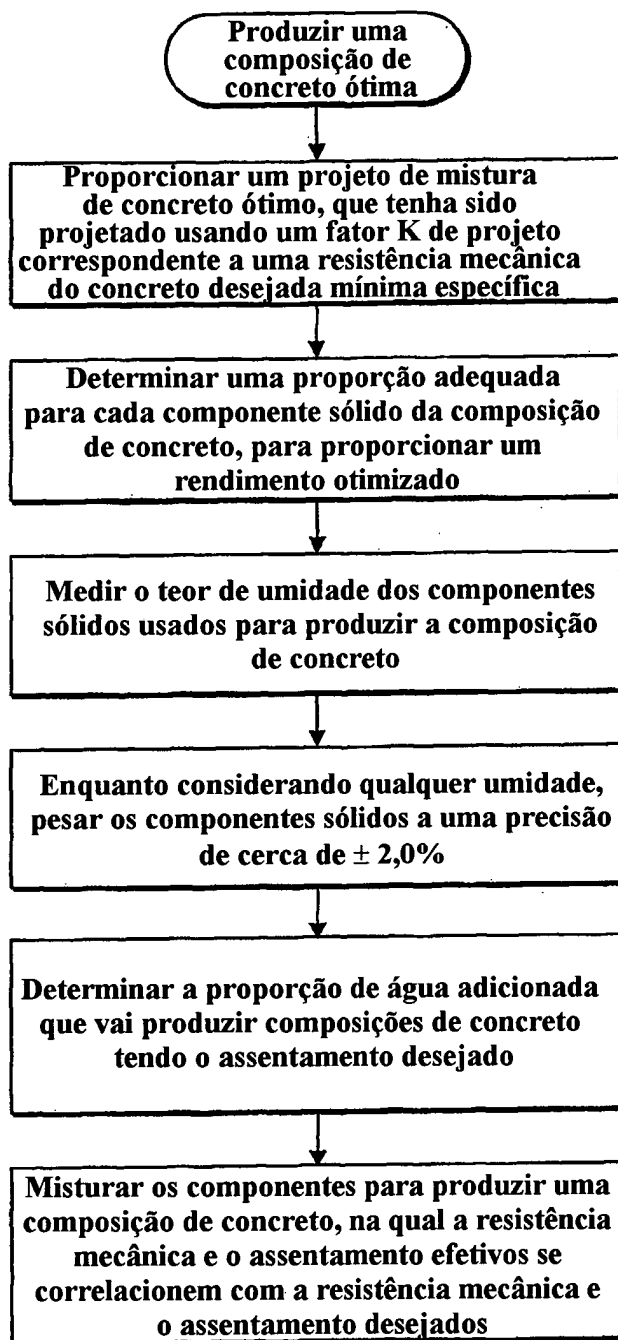


Fig. 10

*Fig. 11*

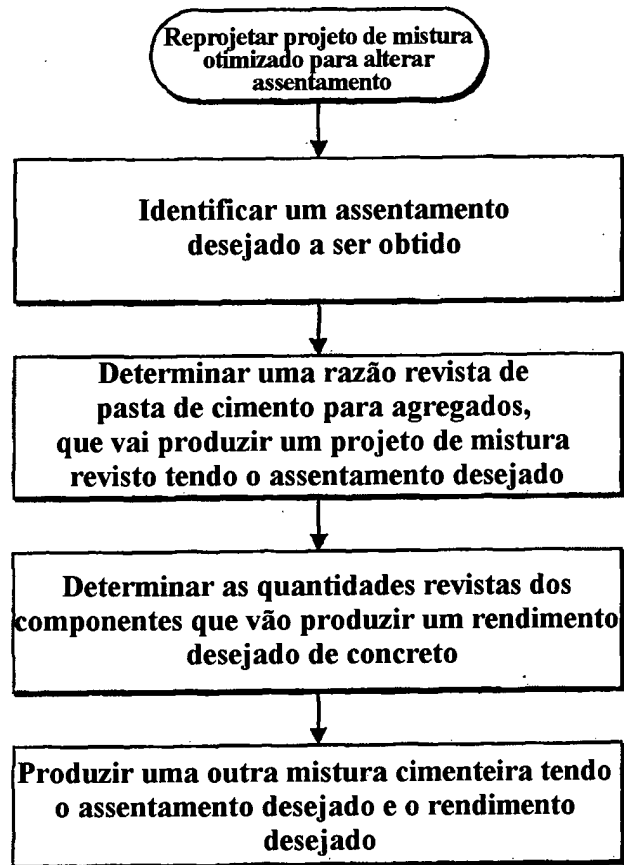
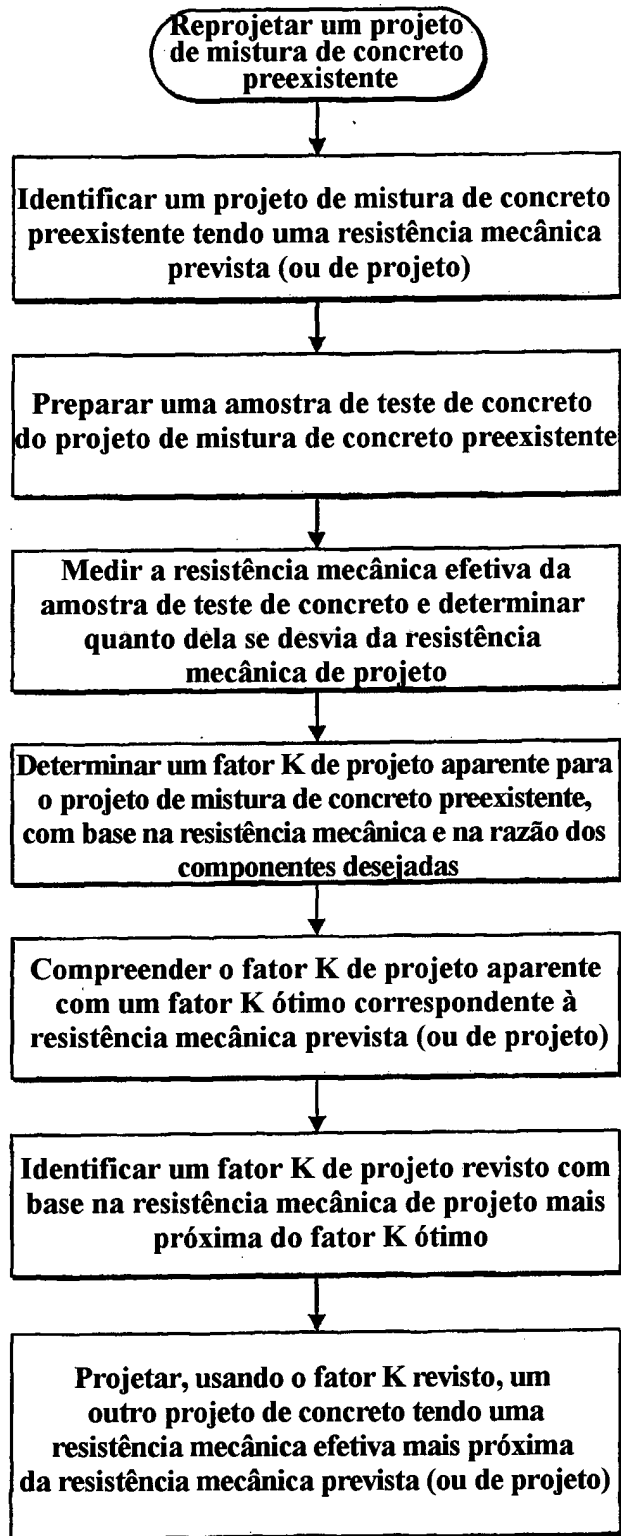
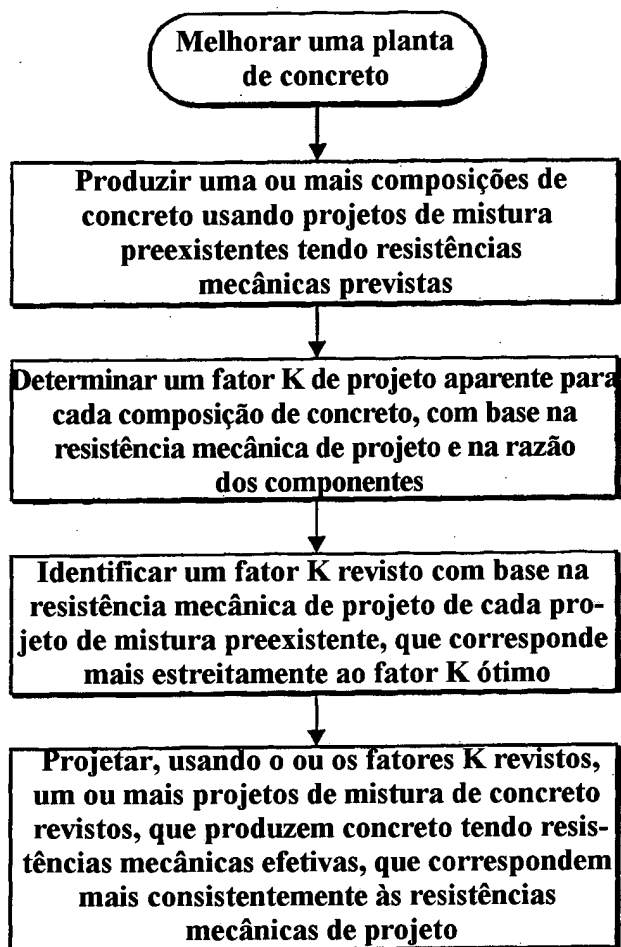


Fig. 12

*Fig. 13*

*Fig. 14*

RESUMO

"MÉTODOS E SISTEMAS PARA REPROJETAR PROJETOS DE MISTURA DE CONCRETO E PLANTAS PREEXISTENTES E OTIMIZAÇÃO DE PROJETO E PRODUÇÃO DE CONCRETO".

5 Processos de otimização de projetos podem ser usados para projetar misturas de concreto tendo propriedades otimizadas, incluindo resistência mecânica e assentamento desejados a um custo mínimo. Os processos de otimização de projetos usam um processo implementado por computador, que é

10 capaz de projetar e, virtualmente, testar milhões de composições de concreto hipotéticas, usando algoritmos matemáticos, que inter-relacionam várias variáveis que afetam a resistência mecânica, o assentamento e outros aspectos desejados. O procedimento de otimização de projeto utiliza uma

15 constante (ou fator) K , dentro da equação de Feret de resistência mecânica, que varia (por exemplo, logaritmicamente) com a resistência mecânica do concreto, para qualquer determinado conjunto de entradas de matérias-primas e equipamento de processamento. Isso significa que a eficiência ou efeti-

20 vidade de aglutinação do cimento hidráulico aumenta com o aumento da concentração, desde que o concreto se mantenha otimizado. O conhecimento de como o fator K varia com a eficiência de aglutinação e a resistência mecânica é uma ferramenta potencial para várias circunstâncias. Um processo de produ-

25 ção de concreto pode incluir a medida precisa das matérias-primas, para minimizar a variação entre as resistências mecânicas prevista e efetiva, bem como o controle cuidadoso do teor de água durante todo o processo de produção e distribuição.

PÁGINAS MODIFICADAS
(SUGERIDAS PELA REQUERENTE)

REIVINDICAÇÕES

1. Processo implementado por computador para projetar, para um determinado conjunto de matérias-primas, um projeto de mistura de concreto otimizado tendo resistência mecânica e assentamento desejados, a um custo mais baixo do que um projeto de mistura não otimizado, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

introdução no sistema de computação de dados relativos ao tamanho de partícula e à densidade de compactação de partículas para vários componentes sólidos;

introdução no sistema de computação de uma resistência mecânica e um assentamento alvo;

introdução no sistema de computação de um fator K selecionado, para uso na determinação de uma resistência mecânica prevista, para cada uma de uma pluralidade de projetos de mistura de concreto, gerados pelo sistema de computação, o fator K sendo selecionado com base na resistência mecânica alvo de entre uma pluralidade de diferentes fatores K, que variam com a resistência mecânica do concreto, para o determinado conjunto de matérias-primas;

determinação pelo sistema de computação de uma pluralidade de cimento de concreto, tendo proporções variáveis de matérias-primas;

determinar pelo sistema de computação de uma proporção de água que vai produzir ou se aproximar de um assentamento predeterminado para cada um dos projetos de mistura de concreto;

determinação pelo sistema de computação de, com

base no fator K de projeto selecionado e na proporção de água determinada para produzir ou se aproximar do assentamento predeterminado, uma resistência mecânica prevista para cada um dos projetos de mistura de concreto;

5 determinação pelo sistema de computação de um assentamento previsto para cada concreto de concreto; e

 comparação pelo sistema de computação da resistência mecânica e do assentamento previstos para cada concreto de concreto com as resistência mecânica e assentamento, para
10 identificar um ou mais projetos de mistura de concreto que são melhor otimizados com relação às resistência mecânica e assentamento, comparados aos outros da pluralidade de projetos de mistura de concreto.

 2. Processo, de acordo com a reivindicação 1,
15 **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

 introdução no sistema de computação de dados relativos ao custo das matérias-primas; e

 identificação pelo sistema de computação de um ou mais projetos de mistura tendo um custo mais baixo, comparado ao outro de uma pluralidade de projetos de mistura de
20 concreto.

 3. Processo, de acordo com a reivindicação 1,
CARACTERIZADO pelo fato de que o fator K de projeto selecionado considera um efeito na resistência mecânica do
25 concreto da inclusão de um agente reforçador de amina.

 4. Processo, de acordo com a reivindicação 1,
CARACTERIZADO pelo fato de que o fator K de projeto selecionado considera um efeito na resistência mecânica de incluir pelo menos um de poeira de cinzas ou fumo de sílica.

pelo menos um de poeira de cinzas ou fumo de sílica.

5. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto selecionado considera um efeito na resistência mecânica de usar um aparelho de mistura específico.

6. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

preparar uma amostra de teste de concreto com base em um projeto de mistura de concreto selecionado;

10 determinar uma resistência mecânica para a amostra de teste de concreto; e

gerar pelo sistema de computação um outro projeto de mistura de concreto, que produza uma composição de concreto tendo uma resistência mecânica, que se correlaciona mais estreitamente com a resistência mecânica alvo, comparada com o projeto de mistura de concreto selecionado.

7. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

20 preparar uma amostra de teste de concreto com base em um projeto de mistura de concreto selecionado;

determinar um assentamento para a amostra de teste de concreto; e

25 gerar pelo sistema de computação um outro projeto de mistura de concreto, que produza uma composição de concreto tendo um assentamento, que se correlaciona mais estreitamente com o assentamento alvo, comparado ao projeto de mistura de concreto selecionado.

8. Processo, de acordo com a reivindicação 1,

CARACTERIZADO pelo fato de que compreende ainda:

identificar um projeto de mistura preexistente usado por uma planta para a produção de uma composição de concreto;

5 determinar, com base em uma resistência mecânica de projeto e uma razão de componentes dentro de uma composição de concreto, usando o projeto de mistura preexistente, um fator K de projeto aparente para o projeto de mistura preexistente; e

10 projetar pelo sistema de computação, de acordo com a reivindicação 1, um ou mais outros projetos de mistura tendo um fator K de projeto que é superior ao fator K de projeto aparente para o projeto de mistura preexistente.

9. Processo, de acordo com a reivindicação 8,

15 **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

melhorar e/ou recalibrar o equipamento usado pela planta na produção de concreto, de modo que o concreto produzido pela planta, usando o equipamento melhorado e/ou recalibrado, tenha uma resistência mecânica efetiva que se correlaciona mais estreitamente com a resistência mecânica de projeto, comparado com um equipamento anterior antes da melhoria e/ou recalibração.

20 10. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda que, para um determinado projeto de mistura, que produz uma composição de concreto tendo assentamento, resistência mecânica e razão de pasta para agregado, o sistema de computação projeta um projeto de mistura modificado tendo um assentamento modificado,

mas uma resistência mecânica substancialmente similar, por alteração da razão de pasta de cimento para agregado.

11. Processo de produção de uma composição de concreto, **CARACTERIZADO** pelo fato de que usa um projeto de mistura de concreto que é otimizado de acordo com o processo de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 10, a composição de concreto tendo uma razão de matérias-primas substancialmente otimizada.

12. Composição de concreto tendo uma razão de matérias-primas otimizada, produzida de acordo com o processo de acordo com a reivindicação 11, **CARACTERIZADA** pelo fato de que tem um fator K de assinatura, que é único comparado com um fator K de projeto aparente, para uma composição de concreto menos otimizada, produzida usando o determinado conjunto de matérias-primas.

13. Composição de concreto tendo uma razão de matérias-primas otimizada, produzida de acordo com o processo de acordo com a reivindicação 11, **CARACTERIZADA** pelo fato de que tem um fator K de assinatura, que é único para o determinado conjunto de matérias-primas, comparado com um fator K para concreto tendo resistência mecânica similar, mas produzido de um diferente conjunto de matérias-primas.

14. Processo para projetar, em um sistema de computação para a otimização de projeto de uma composição de concreto, para um determinado conjunto de matérias-primas, um projeto de mistura de concreto otimizado tendo resistência mecânica e assentamento desejados, a um custo mais baixo do que um projeto de mistura não otimizado, **CARACTERIZADO**

pelo fato de que compreende:

receber, pelo sistema de computação, dados relativos ao tamanho de partícula e à densidade de compactação de partículas para uma pluralidade de componentes sólidos;

5 receber, pelo sistema de computação, uma resistência mecânica e um assentamento alvo;

receber, pelo sistema de computação, um fator K de projeto selecionado, para uso na determinação de uma resistência mecânica prevista para todos de uma pluralidade de projetos de mistura de concreto, gerados pelo sistema de computação, o fator K de projeto sendo selecionado, com base na resistência mecânica alvo, de entre uma pluralidade de diferentes fatores K, que variam com a resistência mecânica do concreto, para o determinado conjunto de matérias-primas;

15 projetar, pelo sistema de computação, uma pluralidade de projetos de mistura de concreto tendo proporções variáveis de matérias-primas;

determinar pelo sistema de computação de uma proporção de água que vai produzir ou se aproximar de um assentamento predeterminado para cada um dos projetos de mistura de concreto;

determinar pelo sistema de computação, com base no fator K de projeto selecionado e na proporção de água determinada para produzir ou se aproximar do assentamento predeterminado, uma resistência mecânica prevista para cada um dos projetos de mistura de concreto;

25 comparar, pelo sistema de computação, as resistências mecânicas e assentamento previstos para cada projeto de

mistura de concreto com as resistências mecânica e assentamento alvo, para identificar um ou mais projetos de mistura de concreto, que são melhor otimizados com relação à resistência mecânica e ao assentamento, comparados a outro da pluralidade de projetos de mistura de concreto; e

identificar pelo sistema de computação um ou mais projetos de mistura de concreto, tendo um custo mais baixo, comparados com outro da pluralidade de projetos de mistura de concreto.

10 15. Processo, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

receber, pelo sistema de computação, dados relativos ao custo das matérias-primas; e

15 determinar, pelo sistema de computação, com base no custo das matérias-primas, um custo para identificar cada um dos um ou mais projetos de mistura identificados como sendo melhor otimizados.

20 16. Processo, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto selecionado considera um efeito na resistência mecânica do concreto da inclusão de um agente reforçador de amina, poeira de cinzas ou fumo de sílica, e/ou uso de um aparelho de mistura específico.

25 17. Produto programa de computador **CARACTERIZADO** pelo fato de que contém instruções executáveis para implementar o processo de acordo com qualquer uma das reivindicações de 14 a 16.

18. Processo implementado por computador para re-

projetar um projeto de mistura de concreto preexistente, de modo a produzir um melhor projeto de mistura de concreto otimizado, que garante uma resistência mecânica mínima específica e a um assentamento predeterminado, a um custo mais baixo, comparado com o projeto de mistura de concreto preexistente, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

identificar um projeto de mistura de concreto preexistente, tendo uma razão inicial de componentes, uma resistência mecânica de projeto, e um fator K na resistência mecânica desejada e na razão inicial dos componentes; e

projetar, pelo sistema de computação, um projeto de mistura de concreto revisto, tendo uma razão revista de componentes, usando um fator K de projeto revisto que é selecionado com base na resistência mecânica de projeto, e que corresponde mais estreitamente a um fator K ótimo, correspondente à resistência mecânica de projeto, comparado com o fator K aparente da mistura de concreto ótima de concreto preexistente.

19. Processo, de acordo com a reivindicação 18, **CARACTERIZADO** pelo fato de que as composições de concreto, produzidas usando o concreto de concreto revisto, têm resistências mecânicas efetivas que correspondem mais consistentemente à resistência mecânica de projeto, comparadas com as composições de concreto produzidas usando o projeto de mistura de concreto preexistente.

20. Processo de produção de uma composição de concreto, **CARACTERIZADO** pelo fato de que usa um projeto de mistura de concreto, que é reprojetoado de acordo com o processo

de acordo com a reivindicação 18, a composição de concreto tendo uma melhor razão otimizada de matérias-primas, comparada com as composições de concreto produzidas por uso do projeto de mistura de concreto preexistente, de modo a ter a
5 resistência mecânica mínima específica e a um assentamento predeterminado, a um custo mais baixo, comparada com as composições de concreto produzidas por uso do projeto de mistura de concreto preexistente.

21. Composição de concreto **CARACTERIZADA** pelo fato
10 de que é produzida de acordo com o processo de acordo com a reivindicação 20.

22. Composição de concreto, de acordo com a reivindicação 21, **CARACTERIZADA** pelo fato de que tem um fator K de projeto de assinatura, que é mais alto do que o fator K
15 de projeto aparente de uma composição de concreto produzida usando o projeto de mistura de concreto preexistente e que se correlaciona mais estreitamente com um fator K ótimo, correspondente à resistência mecânica de projeto.

23. Composição de matéria, em uma planta de concreto que produz concreto de um determinado conjunto de matérias-primas e/ou variáveis de processamento, **CARACTERIZADA**
20 pelo fato de que compreende uma composição de concreto otimizada produzida pela planta, a composição de concreto otimizada tendo resistência mecânica e assentamento mínimos,
25 que são obtidos por mistura de uma combinação otimizada de cimento hidráulico, agregados, água e um ou mais componentes opcionais, cuja combinação otimizada é determinada por uso de um processo de otimização, no qual um projeto de mistura

preexistente, usado previamente pela planta e otimizado utilizando um fator K de projeto, para uso na equação de Feret de resistência mecânica, que corresponde a uma resistência mecânica de projeto da composição de concreto otimizada, e
5 que é selecionado de uma pluralidade de fatores K, que variam com base na resistência mecânica para um determinado conjunto de matérias-primas e/ou variáveis de processamento, o fator K da composição de concreto otimizada sendo uma assinatura, que diferencia a composição de concreto otimizada de
10 uma composição de concreto menos otimizada, usando o projeto de mistura preexistente.

24. Composição de matéria, de acordo com a reivindicação 23, **CARACTERIZADA** pelo fato de que a composição de concreto otimizada é única, comparada com as composições
15 produzidas por qualquer outra planta, tendo o seu próprio conjunto único de matérias-primas e/ou variáveis de processamento.

25. Composição de matéria, em uma planta de concreto que produz concreto de um determinado conjunto de ma-
20 térias-primas e/ou variáveis de processamento, **CARACTERIZADA** pelo fato de que compreende uma composição de concreto otimizada produzida pela planta, a composição de concreto otimizada tendo resistência mecânica e assentamento mínimos, que são obtidos por mistura de uma combinação otimizada de
25 cimento hidráulico, agregados, água e um ou mais componentes opcionais, cuja combinação otimizada é determinada por uso de um processo de otimização, no qual um projeto de mistura otimizado é projetado utilizando um fator K de projeto, para

uso na equação de Feret de resistência mecânica, que corresponde a uma resistência mecânica de projeto da composição de concreto otimizada, e que é selecionado de uma pluralidade de fatores K, que variam com base na resistência mecânica e correspondem ao conjunto único de matérias-primas e/ou variáveis de processamento, o fator K da composição de concreto otimizada sendo uma assinatura, que diferencia a composição de concreto otimizada de qualquer outra composição de concreto produzida usando as matérias-primas e/ou variáveis de processamento, que diferem do conjunto único de matérias-primas e/ou variáveis de processamento empregado pela planta.

26. Processo de produção de composições de concreto aperfeiçoadas, em uma planta de concreto que produz uma pluralidade de diferentes composições de concreto, tendo diferentes resistências mecânicas, as composições de concreto aperfeiçoadas tendo resistências mecânicas efetivas que se correlacionam mais estreitamente com as suas respectivas resistências mecânicas de projeto, o processo **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

identificar uma pluralidade de projetos de mistura de concreto preexistentes da planta de concreto precisando de melhor otimização, em que pelo menos dois dos projetos de mistura têm diferentes resistências mecânica de projeto;

selecionar uma pluralidade de diferentes fatores K de projeto, para uso no projeto de melhores projetos de mistura de concreto otimizados, em que os diferentes fatores K se correlacionam com as, e variam com base nas diferentes

resistências mecânicas de projeto selecionadas;

projetar, usando a pluralidade de diferentes fatores K de projeto, uma pluralidade de projetos de mistura de concreto diferentes ou revistos, tendo razões de componentes diferentes ou revistas, comparados com os projetos de mistura preexistentes; e

produzir, com base nos projetos de mistura de concreto diferentes ou revistos, composições de concreto revistas tendo resistências mecânicas efetivas, que se correlacionam mais estreitamente com as suas respectivas resistências mecânicas de projeto, comparadas com as composições de concreto preexistentes, produzidas por uso dos projetos de mistura preexistentes,

em que as composições de concreto revistas garantem uma resistência mecânica e um assentamento específicos, a um custo mais baixo, comparadas com as composições de concreto preexistentes.

27. Processo de produção de composições de concreto otimizadas, de acordo com a reivindicação 26, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda fazer ajustes de assentamento em uma ou mais composições de concreto revistas, por adição de uma, ou alteração da, proporção de uma mistura dentro da uma ou mais composições de concreto.

28. Processo de produção de composições de concreto otimizadas, de acordo com a reivindicação 26, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda melhorar e/ou ajustar o equipamento produtivo utilizado pela planta, de modo que cada componente seja pesado ou medido de outro modo com uma

precisão de cerca de $\pm 2,0\%$.

29. Processo de produção de composições de concreto otimizadas, de acordo com a reivindicação 26, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda monitorar o teor de umidade dos componentes sólidos e alterar as quantidades medidas dos componentes sólidos, e adicionar água de batelada, usada para produzir uma composição de concreto, com base nas variações detectadas no teor de umidade dos componentes sólidos.

30. Processo de produção de composições de concreto aperfeiçoadas, de acordo com a reivindicação 26, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda transferir uma composição de concreto, usando um caminhão de mistura de concreto que inclui um recipiente contendo uma mistura, que altera o assentamento, e dosar uma quantidade selecionada da mistura em um tambor de mistura conduzindo a composição de concreto, para alterar o assentamento de uma maneira desejada.

31. Composição de concreto **CARACTERIZADA** pelo fato de que é produzida de acordo com o processo de acordo com qualquer uma das reivindicações de 26 a 30.

32. Processo de produção, em uma planta de concreto tendo um determinado conjunto de componentes de matérias-primas, de composições de concreto otimizadas, tendo resistências mecânicas efetivas que refletem mais estreitamente as suas resistências mecânicas previstas ou de projeto, comparadas com as composições de concreto menos otimizadas, produzidas do determinado conjunto de componentes de matérias-primas, o processo **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

proporcionar uma pluralidade de projetos de mistura de concreto otimizados tendo diferentes resistências mecânicas de projeto, que foram projetados usando diferentes fatores K de projeto, em que cada um dos diferentes fatores K de projeto foi selecionado, pelo menos em parte, com base na respectiva resistência mecânica de projeto; e

produzir uma pluralidade de composições de concreto otimizadas, com base nos projetos de mistura de concreto otimizados, cada composição de concreto otimizada tendo uma razão otimizada de componentes, de modo a ter uma resistência mecânica efetiva, que reflete mais estreitamente a sua resistência mecânica prevista ou de projeto, comparada com uma composição de concreto menos otimizada, produzida do determinado conjunto de componentes de matérias-primas.

15 33. Processo de produção de composições de concreto otimizadas, de acordo com a reivindicação 32, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda fazer ajustes de assentamento em uma ou mais composições de concreto revistas, por adição de uma, ou alteração da, proporção de uma mistura dentro da uma ou mais composições de concreto.

20 34. Processo de produção de composições de concreto otimizadas, de acordo com a reivindicação 32, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda pesar ou medir de outro modo os componentes de cada composição de concreto, com uma
25 precisão de cerca de $\pm 2,0\%$.

35. Processo de produção de composições de concreto otimizadas, de acordo com a reivindicação 32, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda monitorar o teor de umida-

de dos componentes sólidos e alterar as quantidades medidas dos componentes sólidos, e adicionar água de batelada, usada para produzir uma composição de concreto, com base nas variações detectadas no teor de umidade dos componentes sólidos.

5 36. Processo de produção de composições de concreto aperfeiçoadas, de acordo com a reivindicação 32, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda misturar uma ou mais das composições de concreto otimizadas, usando um caminhão de mistura de concreto que inclui um recipiente contendo uma
10 mistura, que altera o assentamento, e dosar uma quantidade selecionada da mistura em um tambor de mistura conduzindo a composição de concreto, para alterar o assentamento de uma maneira desejada.

15 37. Composição de concreto **CARACTERIZADA** pelo fato de que é produzida de acordo com o processo de acordo com qualquer uma das reivindicações de 32 a 36.

20 38. Sistema de construção de concreto, em uma planta de concreto que produz concreto de um determinado conjunto de matérias-primas, o sistema compreendendo uma
25 pluralidade de composições de concreto otimizadas produzidas pela planta, pelo menos duas das composições de concreto otimizadas tendo diferentes resistências mecânicas de projeto, cada uma da pluralidade de composições de concreto otimizadas tendo assentamento e resistência mecânica mínimos garantidos, que são obtidos por mistura de uma combinação otimizada de cimento hidráulico, agregados, água e um ou mais componentes opcionais, cuja composição otimizada é determinada por uso de um processo de otimização para projetar

projetos de mistura otimizados, usados pela planta de produção das composições de concreto otimizadas, cada projeto de mistura otimizado sendo projetado por uso de um fator K de projeto, para uso em uma equação de Feret de resistência mecânica, que corresponde a uma resistência mecânica de projeto do projeto de mistura otimizado, e que é selecionado de uma pluralidade de fatores K que variam com base na resistência mecânica, cada composição de concreto otimizada tendo um fator K de assinatura, que se diferencia de pelo menos um outro das composições de concreto otimizadas tendo uma diferente resistência mecânica de projeto.

39. Sistema de construção de concreto, de acordo com a reivindicação 38, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto de assinatura de cada composição de concreto otimizada diferencia a composição de concreto otimizada das composições de concreto menos otimizadas produzidas do determinado conjunto de matérias-primas.

40. Sistema de construção de concreto, de acordo com a reivindicação 38, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto de assinatura de cada composição de concreto otimizada diferencia a composição de concreto otimizada das composições de concreto produzidas de matérias-primas, que diferem do determinado conjunto de matérias-primas usado pela planta.

41. Processo para determinar se uma composição de concreto existente, tendo uma determinada resistência mecânica de projeto e uma determinada razão de componentes, está superdimensionada, sem ter que: (i) preparar uma amostra de

teste de concreto; (ii) deixar que endureça; (iii) testar a sua resistência mecânica efetiva; e (iv) comparar a resistência mecânica efetiva da amostra de teste da amostra de teste com a determinada resistência mecânica de projeto, o
5 processo **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

determinar um fator K de projeto aparente para a composição de concreto existente, com base na determinada resistência mecânica de projeto da composição de concreto e da determinada razão de componentes dentro da composição de
10 concreto; e

comparar o fator K de projeto aparente com um fator K mais otimizado, que corresponde à determinada resistência mecânica de projeto, e que é selecionado de entre uma pluralidade de diferentes fatores K, que variam com a varia-
15 ção da resistência mecânica do concreto.

42. Processo, de acordo com a reivindicação 41, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda determinar quanto da composição de concreto existente está superdimensionada, por determinação de um desvio entre o fator K de projeto aparente da composição de concreto existente e o fator K selecionado mais otimizado.
20

43. Processo, de acordo com a reivindicação 41, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda reprojeter a composição de concreto existente por meio de um procedimento de otimização, que utiliza um fator K de projeto revisto, que se correlaciona mais estreitamente com um fator K ótimo para a determinada resistência mecânica de projeto, em que o procedimento de otimização produz uma composição de concreto
25

revista, tendo uma resistência mecânica efetiva, que se correlaciona mais estreitamente com a resistência mecânica de projeto, comparada com a composição de concreto existente.

44. Processo, de acordo com a reivindicação 43,
5 **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda a produção da composição de concreto revista.

45. Composição de concreto revista **CARACTERIZADA** pelo fato de que é produzida de acordo com o processo de acordo com a reivindicação 44.

10 46. Composição de concreto revista, de acordo com a reivindicação 45, **CARACTERIZADA** pelo fato de que tem um fator K de assinatura, que a diferencia da composição de concreto existente.

15 47. Processo implementado por computador de modificação de uma composição de concreto, produzida de um determinado conjunto de componentes, para ajustar o assentamento sem alterar significativamente a resistência mecânica, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

20 identificar uma composição de concreto existente, que é produzida de acordo com um projeto de mistura otimizado, que especifica uma razão específica de componentes, incluindo uma razão de pasta de cimento para agregado, de modo a obter uma resistência mecânica e um assentamento desejados;

25 introduzir, em um sistema de computação, dados relativos ao tamanho de partícula e à densidade de compactação de partículas de um ou mais tipos de agregados; e

projetar pelo sistema de computação um projeto de

mistura de projeto de mistura de concreto revisto, tendo uma razão revista de pasta de cimento para agregados, que produz uma composição de concreto revisto, tendo um assentamento desejado, sem alterar substancialmente a resistência mecânica da composição de concreto revisto, comparada com a composição de concreto existente.

48. Processo implementado por computado, de acordo com a reivindicação 47, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o sistema de computação determina ainda uma quantidade revista de cada um dos componentes, usados para a produção da composição de concreto revisto, para produzir uma quantidade desejada da composição de concreto revisto.

49. Composição de concreto **CARACTERIZADA** pelo fato de que é produzida de acordo com o processo de acordo com a reivindicação 47 ou 48.

"MÉTODOS E SISTEMAS PARA REPROJETAR PROJETOS DE MISTURA DE CONCRETO E INSTALAÇÕES DE FABRICAÇÃO PREEXISTENTES E OTIMIZAÇÃO DE PROJETO E PRODUÇÃO DE CONCRETO"

Antecedentes da invenção

5 1. Campo da invenção

A invenção é no campo de composições de concreto, mais particularmente, na otimização de projeto de composições de concreto com base em fatores, tais como desempenho e custo. A invenção se refere, mais particularmente, ao projeto e à produção de concreto usando processos aperfeiçoados, que utilizam mais eficientemente todos os componentes de um ponto de vista de desempenho e custo, e minimizar a variabilidade da resistência mecânica, bem como processos únicos para reprojetar de um projeto de mistura de concreto existente e atualização da mistura em batelada e/ou sistema de transferência de uma instalação de fabricação de produção de concreto existente.

2. A tecnologia relevante

20 O concreto é um material de construção ubíquo. O concreto acabado resulta do endurecimento de uma mistura cimenteira, que compreende, tipicamente, cimento hidráulico, agregado, água, e misturas opcionais. Os termos "concreto", "composição de concreto" e "mistura de concreto" significam o produto endurecido, acabado ou a mistura cimenteira não
25 endurecida, dependendo do contexto. Pode referir-se também ao "projeto de mistura", que é a fórmula ou receita usada para produzir uma composição de concreto. Em um processo típico para produção de concreto misto de trânsito, os compo-

5 nentes do concreto são adicionados e misturados no tambor de um caminhão de distribuição de concreto usual, tipicamente enquanto o caminhão está em trânsito para o local de distribuição. O cimento hidráulico reage com a água para formar um aglutinante, que endurece com o tempo para manter os outros componentes unidos.

10 O concreto pode ser projetado para ter resistência, assentamento e outras características materiais variáveis, que conferem a ele uma ampla aplicação para uma vasta variedade de diferentes usos. As matérias-primas usadas na produção de cimento hidráulico e concreto são relativamente baratas e podem ser encontradas virtualmente em qualquer lugar, embora as características dos materiais possam variar significativamente. Isso permite que o concreto seja produ-
15 zido em todo o mundo próximo do local no qual é necessário. Os mesmos atributos que tornam o concreto ubíquo (isto é, baixo custo, facilidade de uso e ampla disponibilidade de matérias-primas) também se mantêm pelo fato de serem inteiramente controlados e todo o potencial deles desenvolvido e
20 explorado.

As instalações de fabricação de concreto oferecem e vendem, tipicamente, várias diferentes composições de concreto usuais, que variam em termos dos seus assentamento e resistência mecânica. Cada composição de concreto é produzi-
25 da tipicamente seguindo um projeto de mistura, ou receita, padrão, para gerar uma composição que tem o assentamento desejado e que vai endurecer em concreto tendo a resistência mecânica desejada. Infelizmente, há, freqüentemente, uma al-

ta variabilidade entre a resistência (ou projeto) prevista de um determinado projeto de mistura e a resistência mecânica efetiva entre as diferentes bateladas, mesmo na ausência de variabilidade substancial na qualidade ou características das entradas de matérias-primas. Parte desse problema resulta de uma desconexão fundamental entre os requisitos, controles e limitações de operações "no campo" na instalação de fabricação em batelada de concreto, e o especialista de pesquisa em condições laboratoriais. Ainda que os especialistas sejam capazes de projetar uma mistura de concreto tendo uma resistência mecânica prevista, que reflete, estreitamente, a resistência mecânica efetiva quando misturado, curado e testado, os especialistas não preparar, tipicamente, composições de concreto em instalações de fabricação de concreto para transferência para clientes. O pessoal de concreto que produz, mistura e transporta concreto para os locais de uso perdem, inerentemente, a capacidade de controlar a variação tipicamente grande nas entradas de matérias-primas, que estão disponíveis quando da condução de pesquisa em laboratório. O conhecimento superior de concreto por especialistas de laboratório é portanto não facilmente aplicável ou transferível à indústria de concreto, em geral.

Em geral, as misturas de concreto são projetadas com base nesses fatores, como, (1) tipo e qualidade do cimento hidráulico, (2) tipo e qualidade dos agregados, (3) qualidade da água, e (4) clima (por exemplo, temperatura, umidade, vento e intensidade solar, todos podendo provocar variabilidade no assentamento, trabalhabilidade e resistên-

cia mecânica do concreto). Para garantir uma resistência mecânica e assentamento mínimos específicos, como requeridos pelos clientes (e evitar risco no caso de falha), os produtores de concreto seguem tipicamente um processo referido
5 como "superprojeto" do concreto que vendem. Por exemplo, se uma resistência mecânica no campo de 28 dias de um projeto de mistura de concreto particular é conhecido variar entre 17,24 MPa e 27,6 MPa (2.500 psi e 4.000 psi), quando produzido e transferido, um produtor deve proporcionar tipicamente
10 te ao cliente uma composição de concreto baseada em um projeto de mistura que obtém uma resistência mecânica de 27,60 MPa (4.000 psi), sob condições laboratoriais controladas, para garantir ao cliente uma resistência mecânica mínima de 17,24 MPa (2.500 psi) por processo comercial. A falha em
15 transferir concreto tendo a resistência mecânica requerida mínima pode provocar problemas estruturais, mesmo falha, que pode, por sua vez, deixar uma instalação de fabricação de concreto legalmente responsável por tais problemas ou falha. Desse modo, o superdimensionamento é uma própria segurança
20 contra transferir concreto que esteja muito fraco, com um custo para o produtor igual ao custo aumentado de concreto superdimensionado. Esse custo deve ser absorvido pelo proprietário, não beneficia o cliente e, em um mercado de suprimento competitivo, não pode ser facilmente passado para o
25 cliente.

O superdimensionamento envolve, tipicamente, a adição de excesso de cimento hidráulico em uma tentativa para garantir uma resistência mecânica aceitável mínima do produ-

to concreto final no assentamento desejado. Em virtude do cimento hidráulico ser tipicamente o componente mais caro do concreto (além das misturas especiais usadas em proporções relativamente baixas), a prática do superdimensionamento de concreto pode aumentar significativamente o custo. No entanto, a adição de mais cimento não garante um melhor concreto, pois o aglutinante da pasta de cimento é freqüentemente um componente estrutural de resistência mecânica compressiva mais baixa, comparado com os agregados e o componente objeto para a maior variabilidade dinâmica. A sobrecimentação pode resultar em microrretração de prazo curto e escoamento de longo prazo. Não obstante o custo e os efeitos potencialmente nocivos, é prática atual para os produtores de concreto superprojetar simplesmente por adição de excesso de cimento para cada composição de concreto que vende, do que tentar e reprojetar cada projeto de mistura padrão. Isso é porque não há atualmente nenhum modo confiável ou sistemático para otimizar os projetos de mistura preexistentes do produtor diferentes do teste de tentativa e erro intenso em tempo e caro, para tornar mais eficiente o uso do aglutinante de cimento hidráulico e/ou considerar as variações nas entradas de matérias-primas.

A causa da variabilidade de resistência mecânica observada não é sempre bem entendida, nem pode ser controlada com segurança usando o equipamento existente e seguindo os protocolos usuais em instalações de fabricação de mistura pronta típicas. O entendimento da inter-relação e dos efeitos dinâmicos dos diferentes componentes dentro do concreto

está tipicamente fora da capacidade dos empregados das instalações de fabricação de concreto e dos motoristas dos caminhões de concreto, usando equipamento e procedimentos existentes. Além do mais, o que os especialistas no campo de concreto devem saber, ou acreditar que sabem, sobre a produção de concreto, não podem ser facilmente transferidos para as mentes e hábitos daqueles que trabalham efetivamente no campo (isto é, aqueles que colocam misturas de concreto em caminhões de transferência de concreto, aqueles transferem o concreto a um local de uso, e aqueles que colocam e acabam o concreto em locais de uso), por causa da tremenda diferença nos controles e no âmbito da variação de materiais. A desconexão entre o que ocorre em um laboratório e o que realmente acontece durante a produção de concreto pode produzir projetos de mistura falhos, enquanto aparentemente otimizados, quando observados no laboratório, pode não ser otimizada na realidade, quando o projeto de mistura é aumentado em escala para a produção em massa de concreto com o tempo.

Além da variabilidade resultante dos projetos de mistura inicial inferiores, outra razão porque o concreto superdimensionado deliberadamente de instalações de fabricação de concreto é, inicialmente, manter a consistência da fabricação. Essas são quatro grandes causas ou práticas sistêmicas, que têm, historicamente levado a uma variabilidade de resistência mecânica de concreto substancial: (1) o uso de materiais que variam em qualidade e/ou características; (2) o uso de procedimentos de formação de bateladas inconsistentes; (3) a sobrecimentação; e (4) a adição de água de

batelada insuficiente inicialmente e depois fazer os ajustes de assentamento no local de uso, tipicamente pelo motorista do caminhão de concreto, por adição de uma quantidade descontrolada de água ao tambor de mistura. A variação total nos materiais e nas práticas pode ser medida por estatística de desvio padrão.

A primeira causa de variabilidade entre as resistências mecânicas do concreto teórica e efetiva, para um determinado projeto de mistura, é a variabilidade no suprimento de matérias-primas . Por exemplo, o tamanho de partícula, a distribuição de tamanhos, a morfologia e a densidade de compactação das partículas do cimento hidráulico e dos agregados (por exemplo, grosseira, média e fina) pode variar de batelada em batelada. Mesmos as ligeiras diferenças podem afetar bastante quanto de água deve ser adicionada para produzir uma composição tendo o assentamento necessário. Em virtude da resistência mecânica do concreto ser altamente dependente da razão de água para cimento, a variação do teor de água para considerar as variações nas características das partículas sólidas, para manter o assentamento necessário, provoca uma variabilidade substancial na resistência mecânica do concreto. A menos que uma produção pode eliminar as variações na qualidade da matéria-prima, o superdimensionamento é geralmente o único modo possível de garantir que uma composição de concreto, tendo o assentamento necessário, também satisfaz os requisitos mínimos de resistência mecânica.

Mesmo se um produtor de concreto considera as va-

riações na qualidade das matérias-primas , o superdimensionamento é ainda necessário para o uso de tabelas de projeto de mistura usuais. As tabelas padronizadas são baseadas nos projetos de mistura efetivos, usando um tipo e a morfologia dos agregados que foram preparados e testados. Proporcionam valores de assentamento e resistência mecânica baseados em uma ampla variedade de variáveis, tal como a concentração de cimento, agregados, água e quaisquer misturas, bem como o tamanho dos agregados. O uso de tabelas padronizadas é rápido e simples, mas pode apenas aproximar o assentamento e a resistência mecânica efetivos, mesmo quando as variações nas matérias-primas são medidas. Isso é porque os vários projetos de mistura padronizados é finito, apesar da variabilidade no tipo, qualidade e concentração (isto é, razão) de matérias-primas serem virtualmente infinitas. Em razão das tabelas padronizadas poderem apenas se aproximar das entradas de matérias-primas reais, pode haver uma variabilidade significativa entre a resistência mecânica prevista e a real, quando do uso de projetos de mistura de tabelas padronizadas. Em virtude dessa variabilidade, as únicas duas opções são: (1) teste de tentativa e erro intenso em tempo e caro para encontrar projetos de misturas ótimos, para cada nova batelada de matérias-primas, ou (2) superdimensionamento. Os produtores optam, tipicamente, por superdimensionamento, especialmente à luz de outros fatores do que o projeto de mistura, o que provoca variações entre a resistência mecânica de projeto e a real.

A segunda causa da variabilidade de resistência

mecânica é a incapacidade para distribuir precisamente os componentes necessários para preparar adequadamente cada batelada de concreto. Ainda que balanças modernas possam proporcionar teoricamente leituras muito precisas, algumas vezes dentro de 0,05% do peso verdadeiro ou real, os alimentadores e outros equipamento de dispensação típicos, usados para dispensar os componentes no recipiente de mistura (por exemplo, o tambor de um caminhão misturador de concreto), são freqüentemente inadequados para abrir e fechar, consistentemente, no momento preciso, para garantir que a quantidade desejada de um dado componente seja verdadeiramente dispensada no recipiente de mistura. Para muitos produtores de concreto, o custo acarretado pela atualização ou uma calibração adequada dos seus equipamentos de dosagem e dispensação é mais alto do que o simples superdimensionamento do concreto, particularmente, uma vez que a maior parte dos produtos não tem qualquer idéia de quanto na prática custa de fato o superdimensionamento do concreto e porque é considerado como uma variável de custo e não um custo de investimento.

O superdimensionamento freqüentemente acarreta a terceira causa de variabilidade de resistência mecânica, que é a de supercimentação. A supercimentação envolve o aumento da proporção de cimento hidráulico, em uma tentativa de obter ou garantir uma resistência mecânica mínima, ao superar o efeito na resistência mecânica por adição aleatória de água, após a formação da batelada, para ajustar o assentamento. Isso, no entanto, pode acarretar aumentos na variabili-

dade da resistência mecânica, como pasta de cimento endurecida, que é, tipicamente, mais fraca como um elemento estrutural, comparada com os componentes de agregados. Ainda que a adição de mais concreto possa aumentar a resistência mecânica de aglutinação, proporcionada pela pasta de cimento, que une os agregados, mais cimento pode também enfraquecer o concreto, por deslocamento dos materiais agregados mais fortes com a pasta de cimento mais fraca, como um componente estrutural do concreto endurecido. A variabilidade da resistência mecânica ocorre em consequência dos efeitos mencionados acima trabalhando em direções opostas, mas em diferentes proporções entre as bateladas diferentes de concreto (por exemplo, devido às diferenças na razão de água para cimento, qualidade e características do cimento hidráulico, agregados e água, e como o concreto é tratado quando transferido para um local de uso).

A supercimentação também pode provocar microrretração, particularmente na ou próximo da superfície, devido à evaporação de água, o que reduz a resistência mecânica e a durabilidade da superfície de concreto. A microrretração, provocada por supercimentação e distribuição inferior dos componentes, pode provocar fissuras e rachaduras em um período de 1 a 2 anos de produção. A supercimentação pode provocar escoamento, que é o crescimento dinâmico (e usualmente indesejável) de massas de concreto, devido à hidratação e ao crescimento de longo prazo continuado de produtos de hidratação dos grãos de cimento.

A quarta causa da variabilidade da resistência me-

cânica de concreto é a prática pelos motoristas de caminhões de concreto de adicionar água ao concreto, após a formação da batelada, em uma tentativa para aperfeiçoar ou modificar o concreto, para torná-lo mais fácil de despejar, bombear, 5 trabalhar e/ou acabar. Em muitos casos, o concreto é projetado e produzido uniformemente para que tenha um assentamento padrão (por exemplo, 3 in), quando o caminhão de concreto deixa o lote, com a expectativa de que o assentamento final necessário seja alcançado no local por adição de água. Esse 10 procedimento é impreciso, porque os motoristas de caminhões de concreto seguem o "ver e sentir". Uma vez que a adição de água diminui significativamente a resistência mecânica final do concreto, a instalação de fabricação de concreto deve acumular um grau correspondente de maior resistência mecânica 15 inicial, para superar as possíveis ou esperadas diminuições na resistência mecânica, resultantes da adição de água subsequente. Em virtude da resistência mecânica poder ser diminuída por proporções variáveis, dependentes da proporção efetiva de água adicionada pelo motorista, o produtor deve 20 assumir um cenário de pior caso de perda máxima de resistência mecânica, quando do projeto do concreto, para garantir que o concreto satisfaz ou excede a resistência mecânica necessária.

Em vista das variáveis apresentadas acima, que podem 25 diferir em grau e âmbito dia a dia, um produtor de concreto pode crer ser mais prático superdimensionar as suas composições de concreto em vez de considerar e controlar as variáveis que podem afetar a resistência mecânica, assenta-

mento e outras propriedades do concreto. O superdimensionamento não é, no entanto, apenas inútil como uso ineficiente de matérias-primas, algumas proporcionando concreto que é substancialmente mais resistente mecanicamente do que é necessário, o que pode ser perigoso. Por exemplo, em virtude do concreto mais resistente mecanicamente ser freqüentemente mais quebradiço do que o concreto mais fraco, pode falhar antes do concreto mais fraco, quando submetido às forças de um terremoto.

10 Em uma tentativa para projetar mais eficientemente composições de concreto e considerar as variações no tamanho de partícula, a distribuição de tamanhos de partícula, a morfologia e as densidades de compactação dos vários componentes sólidos entre as diferentes bateladas de cimentos e
15 agregados, os inventores desenvolveram previamente um processo de otimização de projeto, que aperfeiçoou bastante os processos tradicionais para o projeto de misturas de concreto. Esse processo é descrito na patente U.S. 5.527.387 de Anderson et al, intitulada "Design Optimized Compositions
20 and Computer Implemented Processes for Microstructurally Engineering Cementitious Mixtures" (a seguir "patente Anderson"). Sucintamente, o processo de otimização de projeto descrito na patente de Andersen vai ser referido como o "programa DOC" (o termo "DOC" sendo um acrônimo para "concreto de projeto otimizado").
25

O programa DOC se refere matematicamente às propriedades de resistência mecânica, assentamento e outros aspectos, tais como custo, coesão e durabilidade, com base nas

concentrações e qualidades das várias entradas de matérias-primas. O programa DOC é capaz de projetar e virtualmente "testar" milhões de diferentes projetos de misturas hipotéticas em segundos, usando um computador. Isso reduz bastante a quantidade de tempo necessária para conduzir o teste de tentativa e erro, que seria de outro modo necessário para identificar uma mistura de concreto, que é otimizada para resistência mecânica, assentamento, custo e/ou outros aspectos desejados. O objeto do programa DOC é identificar um projeto de mistura ótimo, de entre um grande número de projetos de misturas hipotéticas, com base nesses aspectos desejados, como assentamento, resistência mecânica e custo. O programa DOC preenche os requisitos inerentes nas tabelas padronizadas, que incluem um número relativamente pequeno de projetos de misturas, em vista da variabilidade das entradas de matérias-primas . O programa DOC pode projetar e virtualmente "testar" milhões de diferentes projetos de mistura, incluindo aqueles se encaixando nos vãos das tabelas padronizadas, em muito menos tempo do que leva para projetar e testar um projeto de mistura usando os métodos convencionais de tentativa e erro.

Primeiro, as matérias-primas são cuidadosamente testadas, para determinar as características que afetam o assentamento, a resistência mecânica, o custo e/ou outros aspectos desejados de composições cimenteiras produzidas delas. Esses incluem, por exemplo, o tamanho de partícula e a densidade de compactação dos vários componentes dos agregados (por exemplo, agregados grandes, médios e pequenos) e

partículas de cimento hidráulico, e o efeito de uma ou mais misturas ótimas (por exemplo, poeira de cinza, redutores de água, etc.). Uma vez que as matérias-primas tenham sido caracterizadas com o grau necessário de precisão, as suas características são introduzidas em um computador, usado para conduzir o processo de otimização do programa DOC.

Depois, o programa DOC projeta um grande número de misturas de concreto hipotéticas, todas tendo assentamento e resistência mecânica teóricos, por variação das concentrações de cimento, assentamento, água e misturas opcionais. Os assentamento e resistência mecânica previstos de todas as misturas de concreto hipotéticas são determinados por introdução das variáveis (por exemplo, a concentração e as características das matérias-primas) em um sistema de equações matemáticas inter-relacionadas. Uma das equações utilizadas no programa DOC é uma variação da equação de resistência mecânica de Feret, que indica que a resistência mecânica compressiva da composição de concreto endurecida final é proporcional ao quadrado da razão volumétrica de cimento hidráulico para pasta de cimento, que consiste de cimento, água e ar:

$$\sigma = K \cdot \left(\frac{V_c}{V_c + V_w + V_a} \right)^2$$

A constante "K" dentro da equação proporciona as unidades e a grandeza da resistência mecânica adequadas. A equação de resistência mecânica pode ser modificada, como se

segue, para prever a resistência mecânica do concreto, que inclui, adicionalmente, outros aglutinantes, tais como poeira de cinzas da classe f, como parte da pasta de cimento:

$$\sigma = K \cdot \left(\frac{V_C + 0.3V_{FA}}{V_C + 0.3V_{FA} + V_W + V_A} \right)^2$$

O programa DOC pode ser conduzido de uma maneira iterativa, na qual cada iteração produz uma mistura de concreto hipotética, tendo assentamento e resistência mecânica previstos, que ficam mais próximos dos assentamento e resistência mecânica do que cada iteração anterior. Além dos assentamento e resistência mecânica, o programa DOC pode otimizar o concreto para outros aspectos desejados, tais como custo, trabalhabilidade ou coesão. Desse modo, no caso no qual várias misturas de concreto diferentes podem ter os assentamento e resistência mecânica desejados, o programa DOC pode identificar quais das misturas é a "ótima", de acordo com um ou mais critérios (por exemplo, custo, trabalhabilidade e/ou coesão).

Não obstante o que foi mencionado acima, o programa DOC, quando inventado inicialmente, era baseado na consideração, bem aceita na técnica, que a constante K (ou "fator K") dentro da equação de resistência mecânica de Feret, é uma constante real e não varia, desde que sejam usados os mesmos tipos de aparelho de mistura e fonte de matérias-primas a cada vez. Foi bem aceito na técnica que se essas variáveis são mantidas constantes, o fator K se mantém constante, independentemente das variações na concentração de

cimento hidráulico e na resistência mecânica do concreto. Em consequência dessa consideração bem aceita, o programa DOC precisou de correções pós-projeto significativas, mesmo teste e reprojeto significativos de composições de concreto, usando um ou mais dos projetos de mistura "ótimos" gerados pelo programa. Desse modo, a incapacidade do programa DOC de considerar a variabilidade dinâmica do fator K limitou a aplicação prática de uma ferramenta de otimização de projeto de outro modo poderosa.

10 Sumário da invenção

Descobriu-se então que a constante K (ou o "fator K") dentro da equação de resistência mecânica de Feret, não é uma constante, mas varia na dependência da eficiência com a qual o cimento hidráulico é capaz de aglutinar ou ligar as partículas dos agregados entre si. Isto é verdade mesmo se o aparelho de mistura, a resistência mecânica do agregado e outros fatores que afetam a resistência mecânica sejam mantidos constantes. O fator K, que varia dinamicamente com a eficiência de aglutinação do aglutinante de cimento hidráulico, pode ser determinado empiricamente, com base na resistência mecânica do concreto. Conhecendo-se a variabilidade dinâmica do fator K, é possível que previsões mais precisas de resistência mecânica do concreto, quando da condução de um procedimento de otimização de projeto, comparadas com um procedimento de otimização que considera que o fator K se mantém constante, desde que o aparelho de mistura e as matérias-primas também se mantenham constantes. O procedimento de otimização inventivo (a seguir "processo DOC aperfeiçoa-

do") identifica eficientemente um ou mais projetos de mistura otimizados, com menos teste de tentativa e erro, desde que o fator K, no primeiro caso, reduza naturalmente a necessidade para a correção de erros, o que surgiria de outro modo por uso de um fator K incorreto para a previsão de resistência mecânica de concreto.

Embora a eficiência de aglutinação de cimento hidráulico e, portanto, o fator K, não possa ser medida diretamente, o fator K para uma dada composição de concreto pode ser determinado indiretamente. Por rearranjo da equação de Feret, pode-se resolver para K por conhecimento da resistência mecânica compressiva, volume do cimento hidráulico e volume da pasta de cimento. Por teste de uma gama de composições de concreto usuais, vendidas por vários fabricantes, e depois resolvendo para K, os inventores verificaram surpreendentemente que o fator K variou com a resistência mecânica do concreto efetiva, que o fator K de concreto preparado adequadamente aumentou com o aumento da resistência mecânica compressiva e segue uma curva logarítmica. A curva logarítmica tem um limite teórico correspondente à composição de concreto, tendo uma perfeita distribuição dos componentes e uma eficiência de aglutinação do sistema da pasta, o que apenas ocorre a uma resistência mecânica muito alta (por exemplo, contendo a razão de pasta para agregado especialmente ótima e uma razão de água para cimento de cerca de 0,17 e tendo uma distribuição perfeita de pasta e agregados por toda a composição de concreto). Em resistências mecânicas mais baixas representativas das necessidades e das especificações

típicas da produção, o fator K se situa abaixo do limite teórico. Isso indica que o cimento hidráulico não é capaz de atingir a sua eficiência de aglutinação teórica mais alta em resistências mecânicas mais baixas, mas apenas se aproxima dela em resistências mecânicas mais altas.

Sabendo-se como o fator K e, portanto, a eficiência de aglutinação do cimento hidráulico, varia com a resistência mecânica, aumenta-se bastante a precisão pela qual um procedimento de otimização, que utiliza uma equação de resistência mecânica adequada, pode prever resistência mecânica de cimento hidráulico para um grande número de projetos de misturas hipotéticas. Por outro lado, o fator K é independente das variações em assentamento, provocadas por variação da concentração de água e/ou das variações no tamanho e/ou morfologia dos agregados. Usando-se os princípios descritos acima relativos ao fator K, o processo DOC aperfeiçoado pode identificar com mais precisão um ou mais projetos de misturas otimizados de entre muitos projetos de misturas hipotéticas. O processo DOC aperfeiçoado produz, eficientemente, composições de concreto otimizadas, que garantem um assentamento e uma resistência mecânica mínimos específicos, ao menor custo e com um mínimo de variabilidade devido a projeto inferior. O processo DOC aperfeiçoado é mais eficiente do que o programa DOC original, porque o conhecimento de antemão de como o fator K varia com a resistência mecânica minimiza a quantidade de correções pós-projeto (por exemplo, por teste de tentativa e erro), que pode ser de outro modo necessária.

Um objeto do processo DOC aperfeiçoado é produzir projetos de misturas otimizados, que reduzem, substancialmente, o superdimensionamento de concreto, comparados com os projetos de mistura convencionais usados pelos produtores de concreto. Em um aspecto da invenção, o processo DOC aperfeiçoado pode ser usado para criar um ou mais projetos de misturas otimizados, que garantem um concreto tendo assentamento e resistência mecânica mínimos específicos, enquanto também reduzindo o custo perdido provocado por superdimensionamento. Outro aspecto envolve a otimização dinâmica de projetos de mistura de concreto, com base em realimentação relativa às variações em diferentes bateladas de matérias-primas. Em mais um outro aspecto, o processo DOC aperfeiçoado pode ser usado para reprojeter um ou mais projetos de mistura existentes de um produtor de concreto. A identificação das variações entre o fator K de projeto efetivo (ou aparente) de um projeto de mistura existente e o fator K ótimo ou teórico, correspondente à resistência mecânica de projeto, pode ser usada para determinar a existência e o grau de superdimensionamento de concreto. O aperfeiçoamento do projeto de mistura utiliza melhor o cimento hidráulico e otimiza a eficiência de aglutinação da pasta de cimento por redução da variabilidade da própria resistência mecânica e da necessidade de superdimensionamento, para compensar essa variabilidade.

Além de proporcionar projetos de mistura otimizados, o aperfeiçoamento da correlação entre a resistência mecânica prevista e a resistência mecânica efetiva pode ser

ainda melhorado por melhoramento e/ou recalibração do equipamento da instalação de fabricação, para garantir melhor que um produtor seja capaz de medir e dispensar com precisão as matérias-primas necessárias para produzir concreto. Esses
5 melhoramentos podem não ser economicamente práticos, no caso no qual uma instalação de fabricação usa uma projetos de mistura inferiores. Um equipamento perfeitamente calibrado não pode produzir concreto, que seja um pouco melhor do que um projeto de mistura inferior vai produzir. O uso de proje-
10 tos de mistura otimizados permite, portanto, que o produtor obtenha o benefício integral de quaisquer melhoramentos de equipamentos capitais. Em virtude do aperfeiçoamento apenas do equipamento da instalação de fabricação não poder produ-
zir muito benefício, e porque os próprios projetos de mistu-
15 ra otimizados superam a variabilidade conferida por equipa-
mento falho, aperfeiçoamento o equipamento da instalação de fabricação e otimizando os projetos de mistura, propiciando que ambos os aperfeiçoamentos atinjam os seus potenciais to-
tais, indicando, dessem modo, uma relação sinérgica.

20 Em uma modalidade, a presente invenção proporciona métodos aperfeiçoados para projetar e otimizar projetos de mistura de concreto otimizados, utilizando uma equação de resistência mecânica que emprega um valor de fator K único, que varia e é selecionado dependendo da eficiência inerente
25 do uso dos componentes da composição de concreto resultante (por exemplo, como previsto empiricamente pelo mínimo dese-
jado, ou "resistência mecânica de projeto"), todo o resto sendo igual. Conhecendo-se então como o fator K varia com a

resistência mecânica do cimento hidráulico, aperfeiçoa-se bastante a capacidade de projetar precisa e eficientemente uma composição de concreto otimizada, porque se reduz ou minimiza a variabilidade entre a resistência mecânica de projeto e a efetiva. Minimizando-se a variabilidade entre a resistência mecânica de projeto e a resistência mecânica efetiva, reduz-se a intensidade de teste de tentativa e erro, o que pode ser de outro modo necessário para identificar um projeto de mistura de concreto, que é verdadeiramente otimizado para assentamento e resistência mecânica, a um custo mínimo.

Comparado com os métodos convencionais para o projeto de concretos usando tabelas padronizadas, o processo DOC aperfeiçoado considera mais precisamente as características efetivas das matérias-primas utilizadas por um produtor de concreto. As tabelas padronizadas apenas se aproximam grosseiramente dos assentamento e resistência mecânica efetivos, por causa das características das matérias-primas supostas pelas tabelas raramente, se jamais, refletirem as características reais das matérias-primas efetivamente usadas por um produtor de concreto. Todas as instalações de fabricação de concreto utilizam matérias-primas que são únicas para aquela instalação de fabricação, e é irracional esperar que tabelas padronizadas considerem precisamente a variabilidade dos materiais entre as diferentes instalações de fabricação. O processo DOC aperfeiçoado é capaz de "testar" virtualmente os projetos de mistura que reflitam mais vantajosamente as matérias-primas efetivamente utilizadas por uma

instalação de fabricação em um dado momento. Considerando-se as variações na qualidade das matérias-primas, o processo DOC aperfeiçoado é capaz de reduzir, substancialmente, o grau de superdimensionamento de composições de concreto, o que pode ocorrer de outro modo por uso de tabelas e métodos de projeto de misturas padronizados.

Outro aspecto da invenção envolve o reprojeto de um ou mais projetos de mistura preexistentes, usados por uma instalação de fabricação produtora para a produção das suas composições de concreto comerciais. Em uma modalidade, o método envolve primeiro, como um tema inicial, a determinação se e por quanto uma composição de concreto existente está superdimensionada. Cada composição de concreto tem uma resistência mecânica de projeto, que é, tipicamente, determinada pela resistência mecânica mínima, que deve ser garantida por aquela composição, e uma resistência mecânica efetiva, que pode ser medida por preparação adequada de concreto, sob controles absolutos, com base no projeto de mistura e teste da resistência mecânica. Em virtude da tendência dos produtores de superdimensionarem, para considerar as variabilidades da resistência mecânica esperada de batelada em batelada, pode haver uma diferença substancial entre o fator K de projeto aparente, com base na resistência mecânica mínima garantida de um projeto de mistura de concreto, e o fator K efetivo ou "real", com base na resistência mecânica efetiva do concreto, quando produzido adequadamente de acordo com o projeto de mistura.

O grau no qual um projeto de mistura de concreto

existente é superdimensionado pode ser determinado por: (1) preparação adequada de uma amostra de teste de concreto de acordo com o projeto de mistura existente; (2) deixar a composição de concreto endurecer; (3) medir a resistência mecânica efetiva da composição de concreto endurecida; e (4) comparar a resistência mecânica efetiva da composição de concreto com a resistência mecânica de projeto do projeto de mistura existente. O grau no qual a resistência mecânica efetiva se desvia da resistência mecânica de projeto corresponde ao grau pelo qual o projeto de mistura existente está superdimensionado. O processo mencionado acima requer um período de tempo, que é necessário para que a composição de concreto cure o suficiente, para medir precisamente a resistência mecânica efetiva.

O grau de superdimensionamento pode ser determinado alternativamente de um modo mais expedito, por: (1) determinação de um fator K de projeto do projeto de mistura de concreto existente, com base na resistência mecânica de projeto e na razão dos componentes dentro de uma composição de concreto, produzida de acordo com o projeto de mistura existente; (2) identificação de um fator K teórico ótimo, correspondente à resistência mecânica de projeto; e (3) comparação do fator K aparente do projeto de mistura de concreto existente com o fator K ótimo, que corresponde à resistência mecânica desejada. O grau no qual o fator K aparente se desvia do fator K ótimo corresponde ao grau pelo qual o projeto de mistura existente é superdimensionado. O conhecimento de como o fator K ótimo varia com a resistência mecânica do

concreto pode ser, portanto, usado como uma ferramenta de diagnóstico para determinar se e por quanto um projeto de mistura preexistente está superdimensionado, sem esperar que uma amostra de teste de concreto endureça.

5 Após determinar que um projeto de mistura preexistente está superdimensionado, um projeto de mistura de concreto otimizado pode ser projetado usando o processo DOC aperfeiçoado. Após seleção de uma resistência mecânica de projeto, representando a resistência mecânica mínima específica garantida, um fator K revisto ou corrigido, correspondendo à resistência mecânica de projeto (ou desejada), é selecionado e usado no processo DOC aperfeiçoado. Um processo de otimização iterativo, utilizando um ou mais algoritmos, incluindo a equação de Feret empregando o fator K revisto, projeta e virtualmente testa várias composições de concreto hipotéticas, para identificar um ou mais projetos de mistura otimizados para uma resistência mecânica e um assentamento mínimos específicos, tendo o custo mais baixo ou outros fatores desejados. Um projeto de mistura otimizado reduz a variabilidade entre a resistência mecânica de projeto e a resistência mecânica efetiva, comparado com um projeto de mistura de concreto preexistente, reduzindo, desse modo, o superdimensionamento e o custo da composição de concreto resultante. Por reajuste correto das concentrações relativas dos vários componentes, o processo DOC aperfeiçoado aperfeiçoa a eficiência de aglutinação do aglutinante de cimento hidráulico e reduz quanto de cimento é necessário para garantir o requisito de resistência mecânica específica. O su-

10

15

20

25

perdimensionamento pode ser bastante reduzido ou eliminado.

Em suma, por utilização dos fatores K corretos selecionados, com base na resistência mecânica de projeto, o programa DOC aperfeiçoado pode reprojetar precisa e eficientemente cada projeto de mistura de concreto preexistente, utilizado pela instalação de fabricação de produção, para aperfeiçoar a eficiência de aglutinação do aglutinante de cimento. Isso reduz ou elimina o superdimensionamento e reduz o custo. Uma instalação de fabricação de produção de concreto existente pode ser melhorada simplesmente por proporcionar projetos de mistura de concreto otimizada, mesmo sem melhorar e/ou recalibrar o equipamento da instalação de fabricação de produção.

As variações entre a resistência mecânica efetiva e a resistência mecânica de projeto podem ser ainda minimizadas por controle adequado da preparação e manuseio das composições de concreto. Alguma renovação do ferramental pode ser necessária para garantir que o equipamento de formação de batelada e pesagem satisfaça os requisitos da norma ASTM-94 padronizados. Desse modo, de acordo com outro aspecto da invenção, etapas positivas podem ser tomadas para melhor controlar a medida e a dispensação dos componentes usados para a produção de concreto. De acordo com uma modalidade, os componentes são preferivelmente pesados ou medidos com uma precisão em torno de $\pm 2,0\%$, particularmente, com uma precisão em torno de $1,0\%$, e, especialmente, com uma precisão em torno de $\pm 0,5\%$. A proporção de água, incluída na composição de concreto, é controlada cuidadosamente de

modo que não varie significativamente do tempo no qual a composição é primeiro produzida, dentro do caminhão de concreto, e quando é usada no local de uso. Para impedir diminuições na resistência mecânica efetiva devido a erro humano, ajustes de assentamento no local podem ser feitos nas composições de concreto úmidas, por uso de misturas especiais em vez de por aumento do teor de água.

Para considerar todas as entradas de água, o teor de umidade dos componentes sólidos (por exemplo, cimento hidráulico e agregados) pode ser monitorado continuamente usando sensores de umidade (por exemplo, sensores de microondas, que medem a absorção de energia de microondas por qualquer umidade presente). Por meio de um mecanismo de realimentação de informações, que pode ser controlado vantajosamente por um computador, a proporção de água da batelada, que é adicionada ao recipiente de mistura, pode ser variada para considerar as variações no teor de umidade dos componentes sólidos. Desse modo, o teor de água total dentro de uma batelada de concreto pode ser controlado mais precisamente, reduzindo, desse modo, as variações em resistência mecânica e/ou assentamento, que podem ocorrer de outro modo.

Em alguns casos, pode ser desejável reprojeter rapidamente um projeto de mistura já otimizado, para ajustar o assentamento sem alterar significativamente a resistência mecânica. Isso pode ser feito sem criar um outro projeto de mistura integral do nada. Para manter a mesma resistência mecânica, enquanto variando o assentamento, a mesma razão de água para cimento da pasta é mantida, e apenas o volume da

pasta é alterado para ajustar o assentamento. A adição de mais pasta a uma composição de concreto otimizada por projeto melhora o assentamento, enquanto que a adição de menos pasta piora o assentamento. Desse modo, a razão global de pasta para agregado é ajustada para variar o assentamento. Em virtude da razão de água para cimento da pasta permanecer igual, a resistência mecânica se mantém essencialmente a mesma de acordo com a equação de Feret. Em alguns casos, a razão de agregados finos para grosseiros pode se manter igual. Em outros casos, essa razão pode ser alterada um pouco, dependendo do efeito desejado nas outras propriedades de alteração da razão de pasta para agregado (por exemplo, coesão, durabilidade, etc.). Uma vez que as concentrações dos vários componentes foram ajustadas para proporcionar o assentamento correto, o rendimento global pode ser corrigido por ajuste das quantidades dos agregados, para proporcionar um volume de concreto desejado.

Cada uma das modalidades acima, individual e coletivamente, contribui para uma redução na variabilidade da resistência mecânica do concreto, incluindo as diferenças entre as resistências mecânicas de projeto e efetiva e também as diferenças em resistência mecânica entre as diferentes bateladas feitas usando o mesmo projeto de mistura. Por redução ou eliminação de grandes diferenças entre as resistências mecânicas de projeto e efetiva, e/ou da variabilidade da resistência mecânica entre as diferentes bateladas de concretos, os métodos e sistemas inventivos reduzem bastante o superdimensionamento do concreto.

Como o programa DOC, descrito na patente de Andersen, o processo DOC aperfeiçoado pode ser implementado, pelo menos em parte, usando um sistema de computação (isto é, um computador), para projetar e virtualmente testar um grande número (por exemplo, milhares ou milhões) de projetos de mistura hipotéticos, em um período de tempo relativamente curto, para identificar um ou mais projetos de mistura, que são otimizados com base em critérios desejados (por exemplo, resistência mecânica, assentamento e custo). De forma sucinta, o processo DOC aperfeiçoado é capaz de projetar e virtualmente "testar" diferentes projetos de mistura, por alteração das concentrações relativas de todas as matérias-primas e depois calcular, usando um ou mais algoritmos (por exemplo, aqueles mostrados na patente de Andersen), o assentamento e a resistência mecânica de cada composição de concreto virtual, produzida de acordo com cada projeto de mistura hipotético. Esse processo DOC aperfeiçoado então identifica um ou mais projetos de mistura otimizados, tendo os desejados assentamento e resistência mecânica. Depois, amostras de teste são produzidas para determinar os assentamento e resistência mecânica efetivos. Se o assentamento difere, variações no assentamento podem ser feitas, por aumento ou diminuição da concentração de pasta de cimento. A resistência mecânica pode ser mantida a mesma por manutenção da mesma razão de água para cimento na pasta de cimento. A resistência mecânica pode ser alterada por variação da razão de água para cimento.

Como com o programa DOC original, o processo DOC

aperfeiçoado pode ser representado por um produto programa de computador, compreendendo um meio legível por computador (por exemplo, um dispositivo de armazenamento físico, tal como uma unidade de disco rígido, um dispositivo de memória, uma fita ou disco magnético, um meio de armazenamento óptico, ou outro dispositivo de armazenamento digital conhecido), que contém instruções executáveis para condução dos aspectos implementados por computador do método inventivo.

Em virtude de que cada instalação de fabricação produtora ter o seu conjunto único de matérias-primas e/ou entradas de processamento e/ou eficiências de mistura (isto é, nunca duas instalações de fabricação usam exatamente a mesma combinação de matérias-primas e possuem os mesmos equipamentos exatos calibrados e/ou operados exatamente da mesma maneira), vai-se considerar que cada instalação de fabricação produtora produz composições de concreto tendo aspectos únicos, que são específicos para uma determinada instalação de fabricação produtora. Em outras palavras, mesmo se duas instalações de fabricação usarem os mesmos projetos de mistura padronizados (isto é, receitas), o concreto transferido por cada instalação de fabricação vai, do mesmo modo, ser único para cada instalação de fabricação. Isso significa que projetos de mistura de concreto preexistentes, que tenham sido modificados e otimizados utilizando o programa DOC aperfeiçoado, vão produzir outras composições de concreto que são elas próprias únicas, pelo fato de que não vão ter sido nunca produzidas a qualquer tempo no mundo. Desse modo, as composições de concreto produzidas usando

(isto é, para determinar se ou não o processo DOC aperfeiçoado foi implementado por um produtor de concreto no projeto das suas composições de concreto).

Essas e outras vantagens e aspectos da presente invenção vão ficar mais inteiramente evidentes das descrição apresentada a seguir e das reivindicações em anexo, ou podem ser aprendidas pela prática da invenção, como apresentado a seguir.

Breve descrição dos desenhos

Para esclarecer ainda mais as vantagens e aspectos mencionados acima e outros da presente invenção, uma descrição mais particular da invenção vai ser propiciada, por referência às suas modalidades específicas, que são ilustradas nos desenhos em anexo. Considera-se que esses desenhos ilustram apenas as modalidades típicas da invenção e não devem ser, portanto, considerados como limitantes do seu âmbito. A invenção vai ser descrita e explicada com especificidade e detalhes adicionais por uso dos desenhos em anexo, em que:

a Figura 1 é um diagrama que inclui curvas do fator K, que ilustram como o fator K varia em função da resistência mecânica compressiva do concreto;

a Figura 2 é um diagrama que demonstra como os fatores K efetivos de composições de concreto conhecidas se desviam dos fatores K, ao longo de uma curva do fator K ótima, que ilustra o grau pelo qual essas composições são superdimensionadas;

a Figura 3 é um outro diagrama mostrando como os fatores K efetivos de composições de concreto conhecidas se

desviam dos fatores K ao longo de uma curva do fator K óti-
ma, que ilustra o grau pelo qual essas composições são su-
perdimensionadas;

a Figura 4 é um diagrama esquemático que ilustra
5 um sistema de computação, por meio do qual a otimização do
projeto, o reprojeto e outros aspectos da invenção podem ser
conduzidos;

a Figura 5 é um fluxograma, que ilustra um proces-
so de otimização exemplificativo de acordo com a invenção,
10 para projetar uma mistura de concreto otimizada;

a Figura 6A é um diagrama de densidade de compac-
tação para a mistura ternária de cimento, areia de quartzo
(0 - 2 mm) e granito britado (8 - 16 mm);

a Figura 6B é um diagrama de densidade de compac-
15 tação da Figura 6A, com as linhas indicando como ler uma
composição correspondente a uma densidade dentro do diagra-
ma;

a Figura 6C é um gráfico de um diagrama de densi-
dade de compactação linhas de linhas de partículas falsas;

20 a Figura 7 ilustra um diagrama de correção de as-
sentamento exemplificativo, usado para corrigir o assenta-
mento, quando da aproximação das densidades de compactação
de partículas dos componentes sólidos;

as Figuras 8A - 8B compreendem um fluxograma lógi-
25 co do sistema de otimização;

a Figura 8C é uma árvore do fluxograma lógico mos-
trado na Figura 8B;

a Figura 9 é um fluxograma que ilustra um processo

de otimização implementado por computador exemplificativo de acordo com a invenção;

a Figura 10 é fluxograma que ilustra um processo de otimização exemplificativo de acordo com a invenção, para projetar uma mistura de concreto otimizada que considera as variações no fator K, na medida em que a resistência mecânica compressiva varia;

a Figura 11 é um fluxograma que ilustra um processo exemplificativo para a produção de uma composição de concreto, a partir de um projeto de mistura de concreto otimizado, para garantir que a resistência mecânica efetiva se relaciona estreitamente com a resistência mecânica desejada ou prevista;

a Figura 12 é um fluxograma que ilustra um processo de reprojeção abreviado exemplificativo, para alterar o assentamento de um projeto de mistura de concreto otimizado, sem alteração substancial da resistência mecânica;

a Figura 13 é um fluxograma que ilustra um processo exemplificativo para reprojeção de um projeto de mistura de concreto preexistente, por emprego de um entendimento correto do fator K e como varia em função da resistência mecânica compressiva do concreto; e

a Figura 14 é um fluxograma que ilustra um processo exemplificativo para melhoria de uma instalação de fabricação de produção de concreto existente, por emprego de um entendimento correto do fator K e como varia em função da resistência mecânica compressiva do concreto.

Descrição detalhada das modalidades preferidas

I. Introdução

A presente invenção utiliza um processo de otimização de projeto, que é, pelo menos em parte, implementado por computador, que identifica um ou mais projetos de mistura de concreto otimizados, que são otimizados relativos a, por exemplo, resistência mecânica, assentamento e custo. O processo de otimização de projeto é capaz de considerar a variabilidade nas entradas de matérias-primas e no projeto de uma composição de concreto otimizada, com base nas variações nas qualidades das matérias-primas . Faz isso por projeto e teste efetivos de um grande número (por exemplo, milhares ou milhões) de misturas de concreto hipotéticas pelo menos em parte por meio de um processo implementado por computador, para identificar um ou mais projetos de mistura tendo propriedades ótimas. Esse processo reduz ou elimina bastante a necessidade para um teste de tentativa e erro longo, que é tanto caro quanto intenso em tempo. Além do mais, diferentemente da otimização de Shilstone, o programa DOC aperfeiçoado é capaz de considerar as variações do tamanho de partícula entre as diferentes bateladas de matérias-primas e também otimizar o custo.

Os termos "jarda" e "jarda cúbica" são usados intercambiavelmente por todo o pedido e referem-se à unidade volumétrica típica de concreto vendido nos Estados Unidos. Essa quantidade pode ser facilmente convertida em unidades métricas por fatores de conversão conhecidos, que convertem jardas em metros, centímetros ou em outras unidades métricas desejadas. Por meio de exemplo, uma jarda cúbica é igual a

0,76455486 metro cúbico.

II. Relação do fator k com a resistência mecânica do concreto

Um aspecto importante da invenção é o entendimento de que a constante K de Feret (ou fator "K") não é de fato uma constante, mas é relacionada logaritmicamente à resistência mecânica do concreto. Isso significa que o aumento da proporção de cimento hidráulico dentro de uma composição otimizada não apenas aumenta a resistência mecânica do cimento hidráulico, em virtude da maior proporção de aglutinante, o que seria esperado, mas também aperfeiçoa a eficiência de aglutinação ou eficiência da pasta. Desse modo, o aumento em resistência mecânica do concreto, na medida em que mais cimento hidráulico é adicionado a uma composição de concreto otimizada, excede a resistência mecânica que seria prevista pela equação de Feret, se o fator K fosse de fato uma constante para todas as resistências mecânicas. Ainda que seja conhecido que o fator K mudou, dependendo do aparelho de mistura e do tipo de agregado e da resistência mecânica, acreditou-se até agora que o fator K se mantinha constante para todas as resistências mecânicas, desde que as mesmas matérias-primas e aparelho de mistura fossem usados.

O termo "equação de Feret" se refere à seguinte equação, que prevê a resistência mecânica do concreto, com base apenas no volume de cimento hidráulico, água e ar na mistura de concreto:

$$\sigma = K \cdot \left(\frac{V_c}{V_c + V_w + V_a} \right)^2$$

Para fins da descrição e das reivindicações em anexo, o termo "equação de Feret" refere-se também à equação de Feret modificada apresentada a seguir, que prevê a resistência mecânica do cimento hidráulico com base no volume de cimento hidráulico, poeira de cinzas da classe F, água e ar na mistura de concreto:

$$\sigma = K \cdot \left(\frac{V_c + 0.3V_{FA}}{V_c + 0.3V_{FA} + V_w + V_a} \right)^2$$

Como pode-se notar dessa versão da equação de Feret, certos tipos de poeira de cinzas contribuem para a resistência mecânica do concreto, mas não no mesmo grau que o cimento hidráulico. Além do mais, embora o volume de poeira de cinzas seja mostrado multiplicado por uma constante de poeira de cinzas de 0,3, pode ser algumas vezes adequado usar uma constante de poeira de cinzas diferente (por exemplo, variando de 0,3 - 0,6), dependendo do tipo de poeira de cinzas usado. Essa substituição pode ser conduzida por pessoas versadas na técnica, quando adequado, e essa substituição deve também contribuir para a "equação de Feret".

Em geral, o termo "equação de Feret" refere-se a outras variações similares, que podem ser construídas desde que se refiram pelo menos à resistência mecânica compressiva prevista da composição de concreto para a razão de volume de cimento hidráulico para o volume de pasta de concreto (isto é, cimento hidráulico, outros aglutinantes, água e ar) na

mistura de concreto (por exemplo, o uso de fumo de sílica, que pode contribuir para a resistência mecânica).

O termo "fator K" inclui modificações dos fatores K exemplificativos descritos aqui, necessários para converter a resistência mecânica calculada de unidades inglesas (isto é, libras por polegada quadrada ou "psi") para unidades métricas (por exemplo, MPa). Como é bem conhecido daqueles versados na técnica, 1 MPa = 145 psi. O termo "fator K" inclui outras modificações necessárias quando da alteração da equação de Feret, como discutido acima.

Deve-se considerar que o fator K não é um número absoluto não é sempre igual para todos diferentes tipos de composições de concreto e/ou aparelhos usados pelas instalações de fabricação de concreto. De fato, cada instalação de fabricação produtiva vai ter o seu próprio fator K único, dependendo do tipo e da qualidade dos agregados, do tipo e da qualidade do cimento hidráulico usado, e do tipo e da qualidade do aparelho de mistura. A curva do fator K vai, tipicamente, movimentar-se ou aumentar com o aumento da eficiência de mistura, resistência mecânica do agregado, resistência mecânica do cimento hidráulico e outros fatores que contribuem sistematicamente para a resistência mecânica do concreto.

Desde que as entradas do sistema se mantenham essencialmente iguais, a curva do fator K para uma instalação de fabricação produtiva particular pode, pelo menos em teoria, ser determinada por identificação de um ponto de fator K único ao longo da curva de fator K, e depois construção de

uma curva logarítmica que passa por esse ponto. Uma vez que uma curva de fator K inadequada tenha sido construída para uma instalação de fabricação de produção particular, a curva pode ser usada para projetar e prever resistências mecânicas de concreto para uma ampla gama de diferentes concretos produzidos por essa instalação de fabricação de produção.

Deve-se também entender que há diferentes fatores K, dependendo do contexto no qual o termo é usado. O termo "fator K de projeto" se refere ao fator K que é utilizado dentro do processo DOC aperfeiçoado da presente invenção, para projetar e virtualmente "testar" um grande número (por exemplo, milhões) de diferentes projetos de mistura hipotéticos, para identificar um ou mais desses projetos de mistura que são "ótimos" com relação a resistência mecânica, assentamento, custo e outros fatores desejados. O fator K de projeto vai, naturalmente, variar dependendo da resistência mecânica de projeto, ou da resistência mecânica mínima garantida, de uma composição de concreto particular. Para um determinado conjunto de entradas de matérias-primas e de equipamento de processamento, vai haver, tipicamente, uma curva de fator K de projeto única.

Os termos "fator K ótimo" e "fator K real" se referem aos fatores K encontrados ao longo de uma curva de fator K ótima, que representa concreto perfeitamente projetado e misturado, por uma instalação de fabricação de produção utilizando um determinado conjunto de matérias-primas disponíveis. Desse modo, o fator K "ótimo" ou "real" pode variar entre diferentes instalações de fabricação e não é, portan-

to, um número absoluto. Não obstante, para um determinado conjunto de entradas de matérias-primas, existe um concreto perfeitamente projetado e produzido, para o qual o fator K ótimo ou real pode ser teoricamente usado para prever a resistência mecânica. Em virtude das instalações de fabricação e do seu pessoal não poderem produzir um concreto perfeito a cada vez, vai haver, tipicamente, algum grau de superdimensionamento, embora ligeiro, para considerar essa variabilidade. Desse modo, o fator K de projeto vai tipicamente diferir do (por exemplo, ser inferior ao) fator K real ótimo para aquele determinado conjunto de matérias-primas. Não obstante essa variação, o fator K de projeto, usado para produzir uma composição de concreto otimizada, vai correlacionar-se muito mais estreitamente ao fator K ótimo ou real do que comparado com os fatores K de projeto correspondentes às composições de concreto menos otimizadas ou não otimizadas.

O termo "fator K de projeto aparente" se refere ao fator K que pode ser determinado para uma composição de concreto preexistente, que pode não ter ela própria sido projetada usando um fator K. Mesmo se um fator K não for usado para projetar uma composição de concreto, pode, não obstante, ser atribuído um fator K de projeto aparente, com base em que o fator K teria sido usado para projetar esse concreto usando o procedimento de otimização descrito. No caso de uma composição de concreto otimizada ou superdimensionada de modo inferior, o fator K de projeto aparente vai se desviar significativamente do fator K ótimo ou real. Os fatores K de projeto aparentes dessas composições vão se desviar muito

mais do que os fatores K de projeto de concreto bem otimiza-
do produzido usando as mesmas entradas. O fator K de projeto
aparente é determinado com base na resistência mecânica de
projeto (isto é, a resistência mecânica mínima garantida) e
5 no projeto de mistura da composição de concreto preexisten-
te.

O termo "fator K efetivo" se refere ao fator K que
é determinado por mistura de uma composição de concreto de
acordo com um determinado projeto de mistura, deixar o con-
10 creto curar, medir a resistência mecânica compressiva do
concreto, e depois calcular o fator K efetivo, com base na
resistência mecânica efetiva e na proporção dos componentes
dentro da composição de concreto. Para uma composição de
concreto preparada adequadamente, o fator K efetivo vai ex-
15 ceder o fator K de projeto, desde que o fator K de projeto
considere tipicamente as variações na resistência mecânica
do concreto.

Uma representação gráfica de como o fator K varia
com a resistência mecânica compressiva é ilustrada na Figura
20 1. A Figura 1 inclui efetivamente duas linhas curvas, se-
guindo uma curva logarítmica correspondente a dois diferen-
tes fatores K, que foram determinados na presente invenção.
A curva do fator K inferior corresponde às composições de
concreto produzidas utilizando cimento hidráulico, água, a-
25 gregado e outras misturas usuais utilizadas na técnica. A
linha do fator K superior corresponde a composições de ci-
mento hidráulico, que incluem, adicionalmente, um agente de
reforço de amina. Os fatores K usados para gerar as linhas

mostradas na Figura 1 foram determinados por análise de uma ampla gama de projetos de mistura usuais, utilizados em instalações de fabricação em várias partes dos Estados Unidos ou suas variações (por exemplo, que usam uma amina de reforço). Em geral, o fator K pode ser calculado de acordo com a 5
 10 rediseção apresentada a seguir da equação de Feret, para composições que incluem cimento hidráulico, água e agregado:

$$K = \frac{\sigma}{\left(\frac{V_c}{V_c + V_w + V_A} \right)^2}$$

A variável resistência mecânica σ corresponde à resistência mecânica efetiva, que foi determinada para as 10
 várias composições de cimento hidráulico, variando em resistência mecânica de 3,45 a 55,17 MPa (500 a 8.000 psi). Para as composições de concreto que também incluem poeira de cinzas, o fator K pode ser determinado de acordo com a rediseção apresentada a seguir da equação de Feret modificada:

$$K = \frac{\sigma}{\left(\frac{V_c + 0.3V_{FA}}{V_c + 0.3V_{FA} + V_w + V_A} \right)^2}$$

15 O fator K aumentado correspondendo à maior resistência mecânica, de acordo com a linha superior mostrada na Figura 1, pode ser obtida por utilização de uma amina conhecida como "THEED" (isto é, tetraidroxidietilenodiamina, também conhecida como etanol,2,2',2''-(1,2-etanodiidinitrolo)

tetracis-). Para obter a maior resistência mecânica e, portanto, um fator K mais alto, é preferível utilizar até cerca de 0,5% de THEED, particularmente, até cerca de 0,25%, e, especialmente, até cerca de 0,1%. Uma vez que se tenha entendido
5 que o fator K varia logaritmicamente com a resistência mecânica compressiva do concreto, uma pessoa versada na técnica, usando as técnicas descritas ou facilmente determinadas da presente descrição, pode modificar o fator K exemplificativo
mostrado na Figura 1, para considerar as variações com base
10 nas diferentes concentrações de THEED.

A Figura 1 demonstra ainda que os fatores K "ótimos" ou "teóricos" não são absolutos ou se mantêm ao longo de uma curva fixa absoluta, que é igual, independente das entradas e do aparelho de mistura da composição de concreto.
15 A adição de um agente de reforço de amina aumenta o fator K (e a curva do fator K representando todos os fatores K para esse sistema), com base na maior resistência mecânica do concreto resultante, ainda que a razão de cimento hidráulico para pasta se mantenha igual. O mesmo é verdade para outras
20 misturas ou alterações na composição, de modo que possa haver uma curva de fator K única ou representativa para cada conjunto único de entradas de matérias-primas. O mesmo vai ser verdade para os diferentes tipos de aparelho de mistura, que podem fazer com que a pasta de cimento se comporte de um
25 modo único, específico para aquele aparelho ou metodologia de mistura. Em geral, o efeito da eficiência de mistura no fator K é mais intenso, com maiores teores de cimento e resistência mecânica (isto é, a mistura fica mais crucial

quando a eficiência de aglutinação potencial do cimento hidráulico é maximizada). O que o gráfico na Figura 1 mostra é que para qualquer conjunto fixo de composições e/ou variáveis de processamento, o fator K segue uma curva logarítmica
5 relativa à resistência mecânica compressiva. Isso significa que a eficiência do cimento hidráulico, mais precisamente da pasta de cimento, como um aglutinante que retém ou cola os agregados entre si, diminui com a diminuição das resistências mecânicas. Também aumenta com o aumento da resistência
10 mecânica na direção de um limite teórico, além do qual nenhum outro aumento em eficiência de aglutinação é possível (isto é, quando a eficiência de aglutinação é a mais alta teoricamente possível, com o limite da resistência mecânica da pasta de cimento sendo nos níveis estequiométricos de água e cimento, e em que os componentes são misturados perfeitamente. Isso não significa, embora, que o fator K necessariamente aumente com o aumento da concentração de cimento hidráulico. Muitos produtores aderem à prática de superdimensionamento, em uma tentativa de aumentar ou maximizar a
20 resistência mecânica, algumas vezes com resultados desastrosos como a composição de concreto, se não adequadamente otimizada para acomodar um aumento enorme do cimento (por exemplo, o dobro), pode sofrer uma fissuração de microrretração e rachadura em prazo curto e também uma fluência ou expansão
25 excessiva em longo prazo.

O que as curvas de fator K ilustradas na Figura 1 ilustram essencialmente são os fatores K ótimos para um determinado conjunto de entradas de matérias-primas. O fator K

de projeto usado em um procedimento de otimização pode ser igual ou pode desviar-se do fator K ótimo, para garantir resistência mecânica e assentamento mínimos específicos. Em virtude de ser possível alguma variabilidade entre a resistência mecânica de projeto e a resistência mecânica efetiva, no caso de composições de concreto altamente otimizadas, algum grau de desvio entre o fator K de projeto usado e o fator K ótimo pode ser tolerado, para considerar algumas variações esperadas. O que se deve entender é que há menos variação entre a resistência mecânica de projeto e a resistência mecânica efetiva de um projeto de mistura bem otimizado, comparado a um projeto de mistura inferior. Em outras palavras, a resistência mecânica efetiva de composições de concreto, produzidas usando projetos de mistura otimizados, vão corresponder uma correspondência mais estreita com a resistência mecânica de projeto do que as composições de concreto produzidas de projetos de mistura inferiores. Em consequência disso, um projeto de mistura otimizado, produzido de acordo com o processo de otimização de projeto inventivo, vai ter um fator K de assinatura que excede o fator K de projeto de um projeto de mistura inferior. De modo similar, em virtude da eficiência de aglutinação da pasta de concreto, em uma composição de concreto bem projetada, exceder tipicamente a eficiência de aglutinação da pasta de concreto em uma composição de concreto projetada de forma inferior, o fator K efetivo de uma composição de concreto bem projetada vai ser também esperado exceder o fator K efetivo de uma composição de concreto projetada de forma inferior. Esse conceito

fica mais entendível com referência às Figuras 2 e 3.

O fator K de projeto aparente, para cada mistura específica mostrada nas Figuras 2 e 3, pode ser determinado por introdução de valores para o concreto, ar e resistência mecânica de projeto na equação de Feret e depois resolução para K. Os fatores K efetivos, que se dispõem ao longo da curva do fator K, podem ser derivados por preparação adequada de várias composições de concreto, usando projetos de mistura otimizados usuais, utilizados por vários produtores de acordo com a norma ASTM C-94 ou outros padrões rigorosos conhecidos na técnica, medição da resistência mecânica efetiva da amostra de teste de concreto, e depois resolução para K. Uma curva do fator K ótimo pode ser preparada por representação dos fatores K medidos, com base em composições de concreto preparadas otimamente contra as resistências mecânicas compressivas correspondentes.

Em muitos casos, a resistência mecânica efetiva de uma amostra de teste de concreto, produzida de um projeto de mistura de concreto preexistente, pode exceder substancialmente a resistência mecânica de projeto, indicando, desse modo, que o projeto de mistura de concreto preexistente está superdimensionada. No entanto, isso apenas não proporciona um modo preciso de reprojeter o projeto de mistura de concreto preexistente, para reduzir ou eliminar esse superdimensionamento. Usando-se um fator K de projeto revisto, que corresponde mais estreitamente ao fator K ótimo dentro de um procedimento de otimização, que utiliza a equação de Feret, facilita-se o reprojeto do projeto de mistura preexistente

para a resistência mecânica efetiva corresponder mais estreitamente à resistência mecânica de projeto ou prevista.

Para demonstrar o grau por meio do qual os projetos de mistura de concreto usuais, utilizados na indústria, são superdimensionados em várias instalações de fabricação de concreto existentes (e, portanto, têm um fator K de projeto excessivamente baixo), faz-se agora referência às Figuras 2 e 3. A Figura 2 mostra vários pontos de dados correspondentes aos fatores K de projeto aparentes, que foram determinados para toda a pluralidade de projetos de mistura usuais, utilizados por TXI, Tarmac, TIM, VM, Elmhurst e Kanerville. O grau pelo qual os pontos de dados se desviam da linha de fator K ótimo, mostrada na Figura 2, indica o grau pelo qual esses projetos de mistura usuais são ou foram superdimensionados relativos às suas resistências mecânicas de projeto.

Os fatores K de projeto, nos pontos de dados abaixo da linha de fator K ótimo na Figura 2, foram determinados utilizando uma equação de Feret rearranjada e resolução para K, em que a resistência mecânica σ corresponde à resistência mecânica de projeto ou prevista do que a resistência mecânica efetiva das composições de concreto produzidas de acordo com esses projetos de mistura. Em todos os casos, a resistência mecânica de projeto ou prevista foi menor do que a resistência mecânica efetiva, quando as composições foram produzidas adequadamente. O grau pelo qual as composições testadas foram verificadas como estando superdimensionadas representa uma economia de custo substancial, se esses pro-

jetos de mistura puderem ser reprojitados de acordo com os métodos inventivos descritos aqui. Por exemplo, estima-se atualmente que o reprojeto, de modo a melhor otimizar os projetos de mistura de concreto existentes, pode economizar 5 entre US\$5,35 e 13,40 por m^3 (US\$4 e 10 por jarda) de concreto produzido. Considerando-se que os produtores de concreto propiciam tipicamente um lucro de apenas US\$1,33 - 2,66 por m^3 (US\$1 ou 2 por jarda), a economia de custo estimada é tremenda e representa um aperfeiçoamento substancial 10 na técnica de produção de concreto.

A Figura 3 compara os fatores K de projeto aparentes para vários projetos de mistura de concreto preexistentes de várias instalações de fabricação, utilizando composições de concreto de produção, que incluem ar entranhado 15 substancial ou que são substancialmente isentas de ar entranhado. De novo, o desvio entre os pontos de dados, representando os fatores K aparentes e a curva de fator K ótima, mostrada na Figura 3, ilustra graficamente a economia de custo substancial, se os projetos de mistura preexistentes 20 forem reprojitados e otimizados de acordo com os métodos inventivos aqui descritos.

Como vai-se considerar facilmente, por comparação do fator K de projeto aparente de um projeto de mistura de concreto existente com o fator K ótimo, para uma determinada 25 resistência mecânica compressiva disposta na curva mostrada nas Figuras 1 - 3, pode-se determinar facilmente o grau pelo qual um projeto de mistura de concreto existente e a composição de concreto correspondente são superdimensionados.

Desse modo, conhecendo-se o fator K ótimo e como varia com a resistência mecânica compressiva, pode-se empregar como uma ferramenta diagnóstica para testar se os projetos de mistura e as composições de concreto de uma instalação de fabricação de concreto estão otimizados ou se estão significativamente superdimensionados. Uma vez que se tenha determinado que um projeto de mistura existente esteja superdimensionado, o projeto de mistura pode ser reprojetoado usando o processo DOC aperfeiçoado, para identificar um ou mais projetos de mistura otimizados, tendo assentamento e resistência mecânica desejados a um custo mais baixo. Em virtude do processo DOC aperfeiçoado considerar as entradas de matérias-primas efetivas disponíveis para o produtor, é mais capaz de otimizar as misturas de concreto, em comparação com as tabelas padronizadas, que não podem, tipicamente, considerar as variações nas entradas de matérias-primas entre as diferentes instalações de fabricação ou entre as bateladas. O processo DOC aperfeiçoado entende a relação dinâmica entre o fator K ótimo e a resistência mecânica do concreto, o que permite que se identifique mais eficientemente um ou mais projetos de mistura, em comparação com o programa DOC original descrito na patente de Andersen.

III. Meio físico operacional baseado em computador

O meio físico operacional para execução das modalidades do programa DOC aperfeiçoado pode compreender um computador de fim especial ou multipropósito, incluindo vários tipos de hardwares de computador, como discutido em mais detalhes abaixo. A Figura 4 é um diagrama esquemático,

ilustrando um sistema de computação exemplificativo 100, que pode ser usado para implementar os aspectos da presente invenção. O sistema de computação descrito é apenas um exemplo desse sistema de computação adequado, e não é intencionado para sugerir qualquer limitação para o âmbito de uso ou funcionalidade da invenção. Tampouco a invenção deve ser interpretada como tendo qualquer dependência ou requisito relativo a qualquer um ou a uma combinação de componentes ilustrados na Figura 4.

Os sistemas de computação estão agora crescentemente assumindo uma ampla gama de formas. Os sistemas de computação podem ser, por exemplo, dispositivos portáteis, aparelhos domésticos, computadores de colo, computadores de mesa, computadores de grande porte, sistemas de computação distribuídos, ou mesmo dispositivos que tenham sido considerados convencionalmente um sistema de computação. Nessa descrição e nas reivindicações, o termo "sistema de computação" é definido de forma genérica como incluindo qualquer dispositivo ou sistema (ou suas combinações), que inclui pelo menos um processador, e uma memória capaz ter nela instruções executáveis por computador, que podem ser executadas pelo processador. A memória pode assumir qualquer forma e pode depender da natureza e da forma do sistema de computação. Um sistema de computação pode ser distribuído por um meio físico de rede e pode incluir múltiplos sistemas de computação constituintes.

Com referência à Figura 4, na sua configuração mais básica, um sistema de computação 100 inclui tipicamente

pelo menos uma unidade de processamento 102 e uma memória 104. A memória 104 pode ser um sistema de memória, que pode ser volátil, não volátil ou alguma combinação das duas. Um exemplo de memória volátil inclui Memória de Acesso Aleatório (RAM). Os exemplos de memórias não voláteis incluem Memória Exclusiva de Leitura (ROM), memória instantânea ou assemelhados. O termo "memória" pode ser também aqui usado para referir-se a armazenamento em massa não volátil, tais como meios de armazenamento físicos. Esse armazenamento pode ser removível ou não removível e pode incluir, mas não é limitado a, cartões PCMCIA, discos magnéticos e ópticos, fita magnética e assemelhados.

Como aqui usado, o termo "módulo" ou "componente" pode referir-se a objetos ou rotinas de software, que são executados no sistema de computação. Os diferentes componentes, módulos, máquinas e serviços aqui descritos podem ser implementados como objetos ou processos, que são executados no sistema de computação (por exemplo, como cadeias separadas). Ainda que o sistema e os métodos aqui descritos possam ser implementados em software, as implementações em hardware e em combinações de software e hardware são também possíveis e consideradas.

Na descrição que se segue, as modalidades da invenção são descritas com referência a atos que são conduzidos por um ou mais sistemas de computação. Se esses atos são implementados em software, um ou mais processadores do sistema de computação associado, que executa a técnica, dirigem a operação do sistema de computação, em resposta a ter ins-

truções executáveis em computador executadas. Um exemplo dessa operação envolve a manipulação de dados. As instruções executáveis por computador (e os dados manipulados) podem ser armazenadas ou recebem um valor específico na memória
5 104 do sistema de computação 100.

O sistema de computação 100 também pode conter canais de comunicação 103, que permitem que o sistema de computação 100 se comunique com outros sistemas de computação, pela, por exemplo, rede 110. Os canais de comunicação 108
10 são exemplos de meios de comunicação. Os meios de comunicação representam tipicamente instruções legíveis por computador, estruturas de dados, módulos de programas ou outros dados em um sinal de dados modulado, tal como uma onda portadora ou outro mecanismo de transporte, e incluem quaisquer
15 meios de transferência de informações. Por meio de exemplo, e não limitação, os meios de comunicação incluem meios ligados por fio, tais como redes ligadas por fio e conexões ligadas diretamente, e meios sem fio, tais como meios acústicos, de rádio, infravermelhos e outros sem fio. O termo
20 meios legíveis por computador, como aqui usados, inclui ambos os meios de armazenamento, e meios de comunicação tangíveis (isto é, enviando e recebendo dispositivos que podem armazenar temporariamente instruções executáveis, mas não os próprios sinais eletrônicos).

25 As modalidades dentro do âmbito da presente invenção também incluem meios legíveis por computador, para conduzir ou ter instruções executáveis por computador ou estruturas de dados armazenadas nele. Esses meios legíveis por

computador podem ser quaisquer meios disponíveis, que podem ser acessados por um computador de fim especial ou multipropósito. Por meio de exemplo, e não limitação, esses meios legíveis por computador podem compreender meios de armazenamento e/ou de memória físicos, tais como RAM, ROM, EEPROM, CD-ROM ou outro armazenamento de disco óptico, armazenamento de disco magnético ou outros dispositivos de armazenamento magnéticos, ou quaisquer outros meios que possam ser usados para conduzir ou armazenar os meios de códigos de programas desejados, na forma de instruções ou estruturas de dados executáveis por computador, e que podem ser acessadas por um computador de fim especial ou multipropósito. Quando as informações são transferidas ou proporcionadas em uma rede ou outra conexão de comunicação (ou conectadas, sem fio ou uma combinação de conectada ou sem fio) a um computador, o computador nota adequadamente a conexão como um meio legível por computador. Desse modo, quaisquer conexões dessas são denominadas adequadamente um meio legível por computador. Combinações do que é exposto acima também podem ser incluídas dentro do âmbito de meios legíveis por computador.

As instruções executáveis por computador compreendem, por exemplo, instruções e dados que fazem com que um computador multipropósito, um computador de fim especial, ou um dispositivo de processamento de fim especial execute uma determinada função ou grupo de funções. Embora a matéria tenha sido descrita em linguagem específica para os aspectos estruturais e/ou atos metodológicos, deve-se entender que a matéria defina nas reivindicações em anexo não é necessaria-

mente limitada aos aspectos ou atos específicos descritos aqui. Em vez disso, os aspectos e atos específicos aqui são descritos como formas exemplificativas de iminstalação de fabricação das reivindicações.

5 IV. Visão geral de processo de otimização de projeto exemplificativo

De acordo com uma modalidade atualmente preferida, os processos otimizados de projetos implementados por computador, de acordo com a invenção, podem utilizar pelo menos parte dos aspectos descritos na patente U.S. 5.527.387 de Andersen et al. ("patente de Andersen"). Uma diferença importante é que a presente invenção considera o fato de que o fator K, utilizado na equação de Feret, não é uma constante real, mas varia logaritmicamente com a resistência mecânica compressiva de concreto. Em outras palavras, descobriu-se então que o aumento da concentração de cimento hidráulico em uma mistura otimizada (oposto ao superdimensionamento) aumenta a sua efetividade ou eficiência de aglutinação. O conceito de que o fator K varia com a resistência mecânica do concreto não era conhecido previamente e não foi, portanto, considerado na patente de Andersen ou incorporado no programa DOC original (pelo programa DOC original trabalhado como projetado e intencionado).

Quando da implementação do processo DOC aperfeiçoado, o fator K de projeto utilizado na equação de Feret, para determinar a resistência mecânica de projeto, é selecionado com base no tubos evaporadores e na resistência mecânica específicos do concreto, que devem ser garantidos pelo

fabricante. Em muitos outros aspectos, o processo DOC aperfeiçoado pode ser implementado de uma maneira similar àquela do programa DOC original descrito na patente de Andersen. Deve-se entender, no entanto, que está dentro do âmbito da invenção utilizar qualquer conjunto ou série de algoritmos conhecidos para projetar um ou mais projetos de mistura de concreto, desde que o fator K de projeto, que é usado quando do cálculo da resistência mecânica de acordo com a equação de Feret, varie com as mudanças na resistência mecânica desejada ou alvo (por exemplo, aumenta logaritmicamente com a resistência mecânica do concreto).

A Figura 5 é um fluxograma que ilustra ou descreve esquematicamente as várias etapas que podem ser conduzidas de acordo com uma modalidade da invenção. Essas etapas são similares àquelas descritas na patente de Andersen, exceto que o procedimento ilustrado na Figura 5 seleciona e depois utiliza um fator K de projeto, com base nos requisitos de resistência mecânica e assentamento mínimos específicos, quando do cálculo da resistência mecânica de projeto de cada projeto de mistura de concreto hipotético gerado pelo processo DOC aperfeiçoado. Desse modo, não obstante a similaridade que pode existir entre as etapas de processo ilustradas na Figura 5 e aquelas descritas na patente de Andersen, o processo da Figura 5 não era conhecido na técnica anterior, como aqui representado. As doze etapas são resumidas como se segue:

Etapa 1: Determinação da densidade de compactação máxima e composição correspondente de uma mistura de concre-

projetos de mistura otimizados, resultantes da implementação do processo DOC aperfeiçoado, são elas próprias únicas e, portanto, diferentes, como entre todo o concreto produzido previamente.

5 Nota-se que cada composição de concreto, que é produzida, tem o seu próprio fator K de projeto de assinatura e também um fator K efetivo, que pode ser determinado por teste da resistência mecânica efetiva da composição. Isto é verdade tanto antes quanto depois da implementação do processo DOC aperfeiçoado. No entanto, após implementação do processo DOC aperfeiçoado, os fatores K de assinatura, ambos os de projeto e efetivo, para uma composição de concreto otimizada de uma instalação de fabricação produtora, vão exceder os fatores K de assinatura, ambos de projeto e efetivo, de uma composição de concreto não otimizada preexistente, que foi reprojetaada ou substituída usando o processo DOC aperfeiçoado. Por conhecimento e comparação dos fatores K de projeto e/ou assinatura de ambas as composições de concreto preexistente e não otimizada de uma determinada instalação de fabricação produtora, pode-se determinar facilmente se uma composição de concreto particular, produzida pela instalação de fabricação produtora, foi produzida usando o projeto de mistura preexistente ou um projeto de mistura otimizado, projetado usando o processo DOC aperfeiçoado. Desse modo, o fator K de assinatura pode ser usado como uma ferramenta diagnóstica para distinguir se uma composição de concreto não otimizada ou superdimensionada ou uma composição de concreto otimizada foi usada em um projeto de construção

10

15

20

25

to seca, tendo cimento e um ou mais tipos de agregados;

Etapa 2: Utilização de um fator K correspondente à resistência mecânica desejada ou de projeto, determinação da mistura de concreto ótima inicial que está mais próxima da
5 densidade de compactação máxima e tem uma resistência mecânica, um assentamento e coesão desejados em uma relação de agregado fino para grosseiro específico;

Etapa 3: Utilização de um fator K correspondendo à resistência mecânica de projeto, projeto de várias misturas
10 ótimas e comparação do custo unitário para cada mistura ótima nas relações de agregados finos para grosseiros definidas, de modo a determinar a mistura ótima global com relação ao custo;

Etapas 4 - 7: Cálculo dos efeitos da combinação
15 individual das diferentes misturas incluindo poeira de cinzas, fumo de sílica, agentes redutores de água, ou cargas, respectivamente, para identificar uma ou mais misturas de concreto ótimas;

Etapa 8: Determinação da melhor mistura ótima tendo
20 do as propriedades desejadas e custo mínimo para misturas que incluem agregado fino, cimento, agregado grosseiro, água de mistura e duas ou mais misturas selecionadas de poeira de cinzas, fumo de sílica e agentes redutores de água;

Etapa 9: Modificação da mistura resultante para
25 garantir que reflète a concentração adequada de agente de entranhamento de ar, de modo a ter o teor de ar adequado;

Etapa 10: Utilização de um fator de correção para otimizar ainda mais os resultados das etapas anteriores e

garantir assentamento adequado;

Etapa 11: Ajuste da porosidade, se necessário, para garantir que a mistura selecionada tem durabilidade suficiente para seu uso intencionado; e

5 Etapa 12: Determinação precisa do volume de pesos vários componentes de uma mistura necessária, para produzir um rendimento de concreto desejado.

10 As etapas precedentes descritas acima e ilustradas na Figura 5 vão ser descritas a seguir, com mais particularidade.

A. Etapa 1: Determinação da densidade de compactação máxima

15 A etapa 1 inclui a determinação da densidade de compactação máxima de uma mistura de concreto seca, para um determinado conjunto de matérias-primas (isto é, cimento e um ou mais tipos de agregado). Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa para a determinação de uma razão de cimento hidráulico e um ou mais tipos de agregados, que maximiza a densidade de compactação de partículas, é apresentada na patente de Andersen na col. 18, linha 1 - colu-
20 luna 25, linha 5. Vários métodos, incluindo as técnicas de medida e os algoritmos matemáticos, para determinação do tamanho de partícula e da densidade de compactação para cada uma das entradas de matérias-primas, são descritos nessa se-
25 ção da patente de Andersen. A discussão na coluna 18, linha 1 - coluna 25, linha 5 da patente de Andersen descreve atos exemplificativos, que podem ser usados para conduzir a etapa 1.

Inicialmente, cada um dos componentes agregado e cimento é definido pelos seus respectivos tamanhos de diâmetro médios (d') e densidade de compactação natural (ϕ). Esses valores podem ser determinados experimentalmente e podem ser usados para calcular a densidade de compactação teórica de uma composição de concreto teórica. O tamanho do diâmetro médio é determinado por uso de métodos conhecidos, tais como por representação gráfica da distribuição de tamanhos de partícula de cada material de acordo com a distribuição de Rosin - Rammler - Sperling - Bennet, descrita pela equação:

$$R(D) = \exp \{-(d/d')^n\}$$

Nela, d é o diâmetro de partícula, $R(D)$ é a probabilidade cumulativa que o diâmetro seja menor de d , d_1 é o diâmetro para o qual $R(d_1) = 0,368$ correspondendo a 36,8% de resíduo nesse tamanho de peneira, e n é a inclinação da linha definida por representação gráfica do percentual de partículas retido em uma peneira versus o tamanho da peneira.

A densidade de compactação de cada tipo de material, (ϕ), é determinada por colocação dele em um cilindro, tendo um diâmetro de pelo menos 10 vezes o maior diâmetro de partícula do material. O cilindro é depois tampado contra uma superfície dura, até que o material fique inteiramente compactado. Por meio de leitura do material compactado no cilindro e do peso de material, a densidade de compactação é calculada de acordo com a fórmula:

$$\varphi = \frac{W_M}{SG_M \cdot V_M}$$

na qual:

W_M = peso do material;

SG_M = peso específico do material; e

V_M = volume do material.

5 Desse modo, não apenas é o volume de partículas quantificado, mas isso é feito em função da morfologia da partícula, área superficial específica e outras características superficiais específicas.

10 A densidade de compactação máxima de uma mistura de três componentes, convencional, incluindo cimento, um tipo de agregado fino e um tipo de agregado grosseiro é determinada por variação incremental do volume de cada componente na mistura e cálculo da densidade de compactação correspondente. As várias densidades de compactação são então representadas graficamente em um diagrama de densidade de compactação de forma triangular, de modo a determinar que composição tem a densidade de compactação máxima. Por meio de exemplo, a Figura 6A é um diagrama de densidade de compactação para uma mistura ternária de cimento, areia de quartzo (0 -
15 2 mm) e granito britado (8 - 16 mm). O lado (A) do diagrama define o percentual de volume de agregado fino (areia); o lado (B) define o percentual de volume do cimento; e a parte de fundo ou lateral (C) define o percentual de volume de agregado grosseiro (granito britado). Os valores dentro do
20

triângulo representam a densidade de compactação em vários percentuais de volume das misturas dos componentes. O diagrama pode ser lido da seguinte maneira:

Subetapa 1(a): Selecionar uma densidade de compactação desejada de dentro do triângulo. Por meio de exemplo, o ponto "Z" é selecionado na Figura 6B, que representa a densidade de compactação máxima para a mistura definida.

Subetapa 1(b): Determinar o percentual de volume de cimento usado na mistura de concreto, necessário para obter a densidade de compactação no ponto "Z", por extensão de uma linha horizontal 20 do ponto "Z" para o lado (B) do triângulo. O valor definido por onde a linha 20 e o lado (B) do triângulo se interceptam é o percentual de volume de cimento necessário para obter a densidade de compactação desejada. No exemplo da Figura 6B, o percentual de volume é aproximadamente 10%.

Subetapa 1(c): Determinar o percentual de volume de agregado fino na mistura por extensão de uma linha 22, paralela ao lado (B) do triângulo, a linha partindo do ponto "Z" e interceptando o lado (A) do triângulo. O valor definido onde a linha 22 e o lado (A) se interceptam é o percentual de volume de agregado fino necessário para obter a densidade de compactação desejada. No exemplo, o percentual de volume de agregado fino é aproximadamente 30%.

Subetapa 1(d): Uma vez que percentual de volume da mistura deve somar 100%, segue logicamente se a mistura é 10% de cimento e 30% de agregado fino, que o percentual de volume de agregado grosseiro deve ser 60%. Esse valor, no

entanto, pode ser também determinado do diagrama de densidade de compactação por extensão de uma linha 24 paralela ao lado (A), a linha partindo no ponto "Z" e interceptando o lado (C). O valor na interceptação da linha 24 e do lado (C) corresponde ao percentual de volume de agregado grosseiro. Como mostrado na Figura 6B, o valor passa a ser aproximadamente 60%. Usando esse método, a composição pode ser determinada para qualquer densidade de compactação no diagrama ou, usando a operação inversa, a densidade de compactação pode ser determinada para qualquer composição desejada.

Os valores de densidade de compactação dentro do diagrama são avaliados do modelo de Toufar, Klose e Born (a seguir "modelo Toufar"), usado em conjunto com um fator de correção. O modelo Toufar é uma fórmula para cálculo das densidades de compactação de misturas binárias:

$$\phi = \frac{1}{\frac{r_1}{\phi_1} + \frac{r_2}{\phi_2} - r_2 \cdot \left(\frac{1}{\phi_2} - 1 \right) \cdot \frac{d_2 - d_1}{d_1 + d_2} \cdot \left\{ 1 - \frac{1 + 4 \cdot \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{\phi_2}{\phi_1 \cdot (1 - \phi_2)}}{\left[1 + \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{\phi_2}{\phi_1 \cdot (1 - \phi_2)} \right]} \right\}}$$

na qual:

r_1 = volume de partículas menores;

d_1 = diâmetro de partículas menores;

d_2 = diâmetro de partículas maiores;

ϕ_1 = densidade de compactação das partículas menores; e

ϕ_2 = densidade de compactação das partículas maiores;

Outros modelos também podem ser usados para calcular as densidades de compactação de misturas binárias. Os exemplos de modelos aplicáveis são o modelo Aim e o modelo Larrard discutidos no artigo de Johansen, V. e Andersen, P. J., "Particle Packing and Concrete Properties", 118 - 122, Materials Science of Concrete II (The American Ceramic Society, Inc., 1991). Uma discussão adicional relativa à densidade de compactação, incluindo o uso de pseudopartículas para determinar as densidades de compactação, usando o modelo Toufar para misturas binárias, é apresentada na patente de Andersen.

Em uma modalidade alternativa, o tamanho de partícula médio d' é determinado para cada componente, usando métodos conhecidos, mas em vez da medição efetiva da densidade de compactação ϕ , a densidade de compactação para cada componente ϕ é considerada como sendo 0,5, 0,55 ou 0,6, uma vez que as partículas sólidas têm, tipicamente, uma densidade de compactação de partícula variando de 0,5 a 0,6. O programa de otimização pode ser então conduzido usando as etapas exemplificativas discutidas abaixo, com a condição que o assentamento efetivo vai igualmente variar do assentamento teórico ou previsto, devido às variações entre a densidade de compactação e a densidade de compactação considerada. Por conseguinte, uma etapa de correção final é conduzida ao ou próximo do final do processo (por exemplo, como parte da etapa 10 discutida abaixo). Em virtude do assentamento poder ser medido no momento em que uma mistura de concreto é preparada, diferentemente da resistência mecânica, as correções

do assentamento não são intensas em tempo. Uma curva de correção de assentamento, como exemplificado pela figura 7, pode ser preparada por composição de duas misturas de concreto tendo assentamentos mais altos e mais baixos, representação gráfica dos assentamentos alto e baixo (por exemplo, 5 cm e 15 cm) contra a concentração correspondente de água em % de volume para as duas misturas de concreto, e depois estendendo uma linha reta entre os dois pontos. O volume de água correlacionado a qualquer assentamento desejado é mostrado na curva (por exemplo, a correlação indicada pela linha pontilhada). Um projeto de mistura final, tendo um assentamento desejado, pode ser preparado por utilização de uma proporção de água, mostrada na curva de assentamento correspondente ao assentamento desejado.

15 Como parte do programa DOC aperfeiçoado, o tamanho de partícula médio d' , medido para cada componente sólido, e a densidade de compactação das partículas para cada componente sólido, se medida ou estimada, são introduzidos em um sistema de computação. Esses valores afetam as propriedades que são depois determinadas para cada um da pluralidade de projetos de mistura, que são criados. O tamanho de partícula e as densidades de compactação das partículas permitem que o sistema de computação, em virtude de um ou mais algoritmos inter-relacionados, "teste" hipoteticamente as propriedades resultantes de cada composição de concreto virtual, com base nos projetos de mistura que são criados como parte do processo de otimização de projeto.

B. Etapa 2: Otimização das propriedades

A etapa 2 envolve determinar uma mistura de concreto inicial, que é mais próxima da densidade de compactação máxima determinada na etapa 1 e que tem as resistências mecânica, assentamento e opcionalmente desejados, a uma razão de agregados fino para grosseiro específica. Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa de um processo para identificar uma mistura de concreto, que é otimizada com relação à resistência mecânica, ao assentamento e, opcionalmente, à coesão, é apresentada na patente de Andersen na coluna 25, linha 8 - coluna 29, linha 10. O termo "coesão" se refere à tendência da composição de concreto de resistir à segregação e purga. Vários métodos, incluindo algoritmos matemáticos para otimizar uma mistura de concreto, com relação à resistência mecânica, ao assentamento e, opcionalmente, à coesão, são descritos nessa seção da patente de Andersen. A discussão na coluna 25, linha 8 - coluna 29, linha 10 da patente de Andersen descreve atos exemplificativos, que podem ser usados para conduzir a etapa 2.

Na subetapa 2(a), uma mistura inicial, que é suficientemente próxima da densidade de compactação máxima, para otimizar as propriedades do concreto sem segregação ou purga, é selecionada por primeiro, como discutido na etapa 1, localizar a densidade de compactação máxima no diagrama de densidade de compactação e na composição de volume correspondente. O volume do cimento correspondente, agregado fino e agregado grosseiro, no ponto de compactação máxima, são respectivamente definidos pelas variáveis $V_{C(MF)}$, $V_{F(MP)}$ e $V_{CA(MF)}$, que somam até 1,0. A seguir, o volume de cimento é

mantido constante, enquanto que o volume de agregado fino é aumentado por uma quantidade definida como o fator de segurança de coesão, e o volume de agregado grosseiro é diminuído pela mesma quantidade. A mistura é desse modo movimentada horizontalmente à esquerda no diagrama de densidade de compactação. A mistura correspondente é definida como a mistura inicial.

O volume (V) dos componentes na mistura inicial são definidos pelas equações:

$$V_C = V_{C(MF)}$$

$$V_F = V_{F(MP)} + CF$$

$$V_{CA} = V_{CA(MF)} - CF$$

Nas equações, a variável CF representa o fator de segurança de coesão e é tipicamente cerca de 0,05. O fator de segurança de coesão garante que a mistura tem agregado fino suficiente, para produzir uma mistura coesiva, que não vai segregar ou ser purgada. As misturas para a direita da mistura inicial do diagrama de densidade de compactação vão tipicamente segregar ou serem purgadas. O fator de segurança de coesão pode variar em uma faixa entre cerca de 0 a cerca de 0,15, dependendo do tipo de concreto. Um concreto de resistência mecânica mais baixa requer, tipicamente, um fator de coesão mais alto de até 0,15, enquanto que um concreto de resistência mecânica mais alta requer um fator de coesão mais baixo inferior a cerca de 0,5.

A razão de agregados fino para grosseiro da mistura inicial é definida por uma linha de pseudopartículas, estendendo-se do ápice do diagrama de densidade de compacta-

ção, pela posição da mistura inicial, e para a linha de agregado grosseiro (Figura 6C, comparar as Figuras 6A - 6B). As subetapas a seguir são apresentadas como um exemplo de como determinar a mistura de concreto ótima ao longo dessa
5 linha de pseudopartículas definida.

Na subetapa 2(b), a densidade de compactação da composição da mistura de concreto inicial é determinada como descrito na etapa 1.

Na subetapa 2(c), a proporção de água de mistura,
10 necessária para dotar a mistura de concreto inicial com um assentamento desejado predeterminado, é determinada. A determinação dessa proporção de água é um processo de duas etapas. Primeiro, a proporção de água necessária para dotar a mistura com um assentamento de 1 cm é determinada usando a
15 seguinte fórmula:

$$W_1 = (1/\phi) - 1$$

na qual:

ϕ = a densidade de compactação da mistura, como definida na subetapa 2(b); e

20 W_1 = o volume de água necessário para dotar a mistura com um assentamento de 1 cm; o valor para W_1 é a fração do volume dos sólidos na mistura.

Uma vez que W_1 é calculado para uma assentamento de 1 cm, a proporção de água necessária para o assentamento
25 desejado é calculada usando a seguinte fórmula de Popovic:

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{0.1}}$$

na qual:

W_1 = o volume de água necessário para um assentamento de 1 cm, como definido previamente;

W_2 = o volume de água necessário para dotar a mistura com uma assentamento desejado;

S_1 = 1,0 representando um assentamento de 1,0 cm (corrigir o expoente de fato encontrado para ser 0,085 pelos inventores); e

S_2 = o assentamento desejado em centímetros.

10 Na subetapa 2(d), usando os resultados das subetapas 2(a) - 2(c), calcular a resistência mecânica compressiva em 28 dias da mistura resultante usando a equação de Feret:

$$\sigma = K \cdot \left(\frac{V_c}{V_c + V_w + V_a}\right)^2$$

na qual:

σ = resistência mecânica compressiva de 28 dias da mistura de concreto, em MPa;

V_c = volume de cimento na mistura;

W_2 = volume de água, definido na etapa 2(c), necessário para dotar a mistura com o assentamento desejado;

20 K = constante de Feret, que é foi então descoberta para variar com a resistência mecânica compressiva σ , como ilustrado nas Figuras 1 - 3; e

V_A = o volume de ar na mistura e é definido pela seguinte equação:

$$V_A = \left(\frac{1 + W_2}{1 - \frac{\% \text{ AIR}}{100}} \right) - 1 - W_2$$

Nela, AR é o volume percentual estimado de ar na mistura. O volume de ar em uma mistura varia com base no tipo de misturador usado, volume de agregado fino na mistura e tipos de misturas combinados com a mistura. O percentual de volume de ar pode ser estimado por aqueles versados na técnica, e é geralmente entre cerca de 1% a 2%, para um assentamento superior a 10 cm, e entre 2% e 4%, para assentamento inferior a 10 cm.

Na subetapa 2(e), a resistência mecânica teórica compressiva resultante, σ , é comparada com a resistência mecânica desejada. Se a resistência mecânica teórica da mistura for menor do que a resistência mecânica desejada, as subetapas 2(b) - 2(e) são repetidas por substituição da mistura inicial com uma outra mistura e uma outra densidade de compactação correspondente. A composição da outra mistura é obtida por aumento ou diminuição do volume de cimento, para obter a resistência mecânica desejada. Uma estimativa do volume de cimento necessário, para obter a resistência mecânica desejada, é determinada por introdução da resistência mecânica desejada na equação de Feret, e resolução para o volume correspondente de cimento de acordo com a seguinte e-

quação:

$$V_{C(N)} = \left(\frac{1 + W_2}{1 - \frac{\% \text{ AIR}}{100}} - 1 \right) \cdot \frac{\left(\frac{\sigma_D}{K} \right)^{0.5}}{\left(1 - \frac{\sigma_D}{K} \right)^{0.5}} \quad (16)$$

na qual:

$V_{C(H)}$ = volume de cimento na outra estrutura;

W_2 = volume de água necessário para obter o assentamento desejado na mistura inicial ou prévia;

$\% \text{ AR}$ = percentual de volume estimado de ar na mistura;

K = constante de Feret, que varia com a resistência mecânica do concreto; e

σ_D = a resistência mecânica desejada em MPa.

Na medida em que o volume de cimento varia para a outra mistura, os volumes de agregado fino e agregado grosseiro devem ser normalizados, de modo que os volumes de agregado fino, agregado grosseiro e cimento somem até 1,0. No entanto, a razão de agregados fino para grosseiro se mantém constante. Conseqüentemente, os volumes de agregado fino e agregado grosseiro nessa mistura são definidos pelas equações:

$$V_{F(N)} = \tau_F \cdot (1 - V_{C(N)})$$

$$V_{CA(N)} = \tau_{CA} \cdot (1 - V_{C(N)})$$

em que:

τ_F e τ_{CA} são as razões de agregado fino e agregado

grosseiro, respectivamente, e são constantes para cada linha de pseudopartículas. As razões são definidas pela equação:

$$\tau_F = V_F / (V_F + V_{CA})$$

$$\tau_{CA} = V_{CA} / (V_F + V_{CA})$$

5 Essa outra mistura corresponde à posição no diagrama de densidades de compactação, definida pela interceptação da linha de pseudopartículas descrita na subetapa 2(a) e uma linha horizontal estendendo-se do outro volume de cimento, determinado pela equação (16) acima. Na medida em que
10 o volume de cimento varia, movimenta-se para cima e para baixo na linha de pseudopartículas. As subetapas 2(b) - 2(d) são continuamente repetidas, até que a resistência mecânica teórica da mistura fica igual à resistência mecânica desejada, e a mistura resultante para a razão de agregados fino
15 para grosseiro tem os assentamento e resistência mecânica desejados, usando uma proporção mínima de cimento e água. Tipicamente, a mistura desejada é encontrada dentro de dez iterações.

C. Etapa 3: Otimização de custo

20 A etapa 3 envolve a comparação do custo unitário de várias misturas ótimas, em razões de agregados fino para grosseiro definidas, de modo a determinar uma ou mais misturas otimizadas globais, que são também otimizadas em termos de baixo custo. Uma descrição detalhada de uma modalidade
25 exemplificativa para identificar uma mistura de concreto, que é otimizada com relação ao custo, enquanto também tendo os assentamento e resistência mecânica desejados, é apresentada na patente de Andersen na coluna 29, linha 13 - coluna

30, linha 42, constitui atos exemplificativos para conduzir a etapa 3.

De acordo com uma modalidade, isso pode ser feito calculando primeiro o custo unitário da mistura ótima inicial determinada na etapa 2. Uma composição ótima e o custo unitário resultante são então determinados para uma segunda mistura ótima, definida por uma outra razão de agregados fino para grosseiro. A outra razão de agregados fino para grosseiro é obtida por diminuição do percentual de volume de agregado grosseiro por 1% e aumento do percentual de volume do agregado fino, respectivamente. O custo unitário da segunda mistura ótima é então comparado com o custo unitário da mistura inicial. Se o custo da mistura inicial for menor do que o custo da segunda mistura, a composição da mistura inicial é a mais econômica e o processo é superior. Se a segunda mistura for inferior em custo à mistura inicial, a razão de agregados fino para grosseiro é de novo variada, de modo a obter uma terceira mistura ótima. A comparação de custo é então repetida até que seja obtida a mistura mais barata.

A combinação das etapas 1 - 3 proporciona métodos exemplificativos para projetar uma mistura de cimento, água e agregado, tendo resistência mecânica e assentamento desejados. A proporção de água incorporada na mistura pode ser minimizada para maximizar a resistência mecânica. As proporções de agregado fino, agregado grosseiro e cimento podem ser otimizadas para minimizar o custo da mistura. Além do mais, usando-se o processo mencionado acima, as misturas

tendo propriedades desejadas podem ser, consistente e precisamente, produzidas, independentemente das variações na carga de alimentação. As etapas 1 - 3 também podem ser usadas para determinar a mistura de mais alta durabilidade. Como
5 vai ser discutido abaixo na etapa 11, a mistura com mais alta durabilidade é definida como a mistura com a porosidade total mais baixa possível. Isso é porque, em geral, na medida em que a porosidade aumenta, a durabilidade da mistura diminui. Os estudos determinaram que a porosidade de uma
10 mistura diminui na medida em que a densidade de compactação aumenta. Desse modo, as misturas mais próximas da densidade de compactação máxima vão ser previstas como tendo genericamente a mais alta durabilidade.

As etapas 4 a 7 proporcionam outras possibilidades
15 de otimização, por cálculo opcional dos efeitos individuais da combinação de diferentes misturas, tais como poeira de cinzas, fumo de sílica, agentes redutores de água, ou cargas, dentro de uma mistura de concreto.

D. Etapa 4: Determinação do efeito de poeira de
20 cinzas

Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa para identificar uma mistura de concreto ótima, que inclui poeira de cinzas, é apresentada na patente de Andersen na coluna 30, linha 44 - coluna 33, linha 63. Essa seção
25 da patente de Andersen inclui algoritmos matemáticos exemplificativos relativos ao uso de poeira de cinzas, e dos atos exemplificativos correspondentes à etapa 4.

Em geral, o processo inclui, primeiro, as etapas

repetitivas 1 e 2, de modo a determinar a mistura ótima (sem uma mistura) tendo propriedades de resistência mecânica e assentamento desejadas, para uma razão de agregados fino para grosseiro definida. Com base na composição da mistura ótima resultante, um percentual de volume é incrementalmente substituído com poeira de cinzas. Na medida em que o volume de poeira de cinzas é aumentado, o custo unitário de cada mistura é calculado e comparado com a mistura prévia, para determinar a mistura mais barata para a razão de agregados fino para grosseiro definida.

A razão de agregados fino para grosseiro é então variada por movimentação de 1% à esquerda no diagrama de densidade de compactação. O processo mencionado acima é então repetido para determinar a mistura mais barata, usando poeira de cinzas com a outra razão de agregados fino para grosseiro. O custo unitário para as misturas ótimas, nas diferentes razões de agregados fino para grosseiro, é então comparado, para determinar a mistura mais barata. O processo continua a movimentar-se para a esquerda no diagrama de densidade de compactação, até que a mistura ótima global, tendo poeira de cinzas e as propriedades desejadas, seja obtido. Um algoritmo exemplificativo que considera o efeito da poeira de cinzas no assentamento envolve a seguinte equação de Popovic modificada:

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{0.1}} - W_{FA}$$

na qual:

W_{FA} é uma redução, em conseqüência da poeira de cinzas, no volume de água necessário para produzir uma mistura com um assentamento desejado, e é determinada pela equação:

$$W_{FA} = \frac{W_1 \cdot \% FA \cdot 6}{100 \cdot 37}$$

na qual:

W_1 = o volume de água de mistura necessário para um assentamento de 1,0 cm em uma mistura padrão, como definido acima; e

$\%FA$ = o percentual de volume de poeira de cinzas na combinação de poeira de cinzas e cimento.

O valor de W_2 pode ser depois usado para calcular a resistência mecânica em 28 dias, usando uma versão modificada da equação de Feret, que considera a poeira de cinzas, tal como:

$$\sigma = K \left(\frac{V_C + K_2 V_{FA}}{V_C + K_2 V_{FA} + W_2 + V_A} \right)^2$$

Quando K_2 é uma constante para poeira de cinzas, e varia, tipicamente, entre 0,3 e 0,6.

E. Etapa 5: Determinação do efeito de fumo de sí-

lica

Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa, para identificar uma mistura de concreto ótima, que inclui fumo de sílica (aka, fumo de sílica), é apresentada na patente de Andersen et al. na coluna 33, linha 65 -
 5 coluna 35, linha 40. Essa seção da patente de Andersen inclui algoritmos matemáticos exemplificativos relativos ao uso de fumo de sílica e atos exemplificativos correspondentes à etapa 5.

10 A mistura ótima usando fumo de sílica pode ser determinada da mesma maneira usada na determinação da proporção adequada de poeira de cinzas na etapa 4. No entanto, as fórmulas para a proporção necessária de água e resistência mecânica resultante são diferentes. Em contraste com a poeira de cinzas,
 15 o fumo de sílica requer mais água para um determinado assentamento, mas o fumo de sílica confere uma maior resistência mecânica à mistura de concreto. Com relação ao diagrama de densidade de compactação, o volume de fumo de sílica é também considerado como parte do volume de
 20 cimento na mistura. Se desejado, uma pseudopartícula pode ser usada para representar a combinação de cimento e fumo de sílica. Um algoritmo exemplificativo, que considera o efeito de fumo de sílica no assentamento, envolve a seguinte equação de Popovic modificada:

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{0.1}} + W_{SF}$$

Nela, W_{SF} é um aumento, em consequência do fumo de sílica, no volume de água necessário para produzir uma mistura com um assentamento desejado, e é determinado pela equação:

$$W_{SF} = \frac{W_1 \cdot \% SF \cdot 20}{100 \cdot 20}$$

5 Na qual, % SF = o percentual de volume de fumo de sílica na combinação de fumo de sílica e cimento.

O valor para W_2 pode ser então usado para calcular a resistência mecânica de 28 dias, usando uma versão modificada da equação de Feret, que considera o fumo de sílica,
10 tal como:

$$\sigma = K \left(\frac{V_C + K_3 V_{SF}}{V_C + K_3 V_{SF} + W_2 + V_A} \right)^2$$

Nela, K_3 = uma constante de reatividade descrevendo o desenvolvimento de resistência mecânica por volume de fumo de sílica, comparável ao mesmo volume de cimento. Tipicamente, esse valor é entre 1,5 e 4, com 2 sendo o valor
15 preferido. O valor efetivo pode ser determinado empiricamente para um determinado fumo de sílica.

F. Etapa 6: Determinação do efeito dos agentes re-
dutores de água

Uma descrição detalhada em uma modalidade exempli-

ficativa para identificar uma mistura de concreto ótima, que inclui agentes redutores de água, é apresentada na patente de Andersen et al. na coluna 35, linha 45 - coluna 37, linha 55. Essa seção da patente de Andersen inclui algoritmos matemáticos exemplificativos relativos ao uso de agentes redutores de água e atos exemplificativos correspondentes à etapa 6.

Considerando que apenas agentes redutores de água são adicionados a uma mistura de concreto padrão, o processo para obtenção da mistura ótima é o mesmo que aquele usado para a etapa 4, para obter uma mistura ótima usando poeira de cinzas. A única diferença é que as fórmulas para determinação da proporção necessária de água de mistura e a resistência mecânica resultante são modificadas. O processo inclui a determinação da mistura ótima para a primeira razão de agregados fino para grosseiro. Proporções incrementais de agentes redutores de água são depois adicionadas à mistura. O custo unitário dessas misturas é calculado e comparado, de modo a determinar a mistura ótima tendo agentes redutores de água, na razão de agregados fino para grosseiro inicial. A razão de agregados fino para grosseiro é então variada e o processo é repetido. Por comparação do custo unitário para as misturas ótimas em cada estrutura polimérica absorvente de água não tratada (Pu), a mistura ótima global usando agentes redutores de água pode ser determinada.

Com base nos parâmetros do agente redutor de água padrão, o percentual de volume de água necessário para produzir uma mistura, incluindo um agente redutor de água, com

um assentamento desejado, é determinado pela seguinte equação:

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{0.1}} - W_{WR}$$

No qual, W_{WR} é uma redução, como resultado do agente redutor de água, no volume de água necessário para produzir uma mistura com um assentamento desejado e é determinado pela equação:

$$W_{WR} = \frac{W_1 \cdot \% WR \cdot 30}{100 (2)}$$

Na qual, W_1 = o volume de água de mistura necessário para um assentamento de 1,0 cm, como definido previamente, e % WR = a quantidade percentual de agente redutor de água na mistura por peso de cimento.

O valor para W_2 pode ser então usado para calcular a resistência mecânica de 28 dias usando a equação de Feret. Como os agentes redutores de água não contribuem independentemente para a resistência mecânica do concreto, as mesmas fórmulas usadas na etapa 2 podem ser usadas para calcular a resistência mecânica de 28 dias e para estimar o volume de cimento necessário para obter a resistência mecânica desejada. Uma vez que a proporção de água necessária para o assentamento desejado é diminuída, por uso de um agente redutor

de água, a razão água - cimento na mistura é diminuída, desse modo, aumentando a resistência mecânica da mistura resultante. Conseqüentemente, a proporção de cimento pode ser reduzida até que uma mistura seja definida, possuindo a resistência mecânica e o assentamento desejados e tendo o agente redutor de água inicial a 0,1%. Uma comparação de custo é depois feita e, se a mistura com o agente redutor de água for mais barata, um agente redutor de água a 0,1% adicional é incorporado à mistura. O processo acima é depois novamente repetido, de acordo com o formato descrito na etapa 4 para poeira de cinzas, até que a mistura ótima, incluindo um agente redutor de água, seja determinada.

G. Etapa 7: Determinação do efeito de cargas

Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa para identificar uma mistura de concreto ótima, que inclui cargas (por exemplo, pedra finamente moída), é apresentada na patente de Andersen et al. na coluna 37, linha 57 - coluna 38, linha 59. Essa seção da patente de Andersen inclui algoritmos matemáticos exemplificativos relativos ao uso de cargas e atos exemplificativos correspondentes à etapa 7.

As cargas geralmente não possuem propriedades cimenteiras e, desse modo, não contribuem diretamente para a resistência mecânica do concreto resultante. Similares à poeira de cinzas, no entanto, as cargas não diminuem a proporção de água de mistura necessária para obter um assentamento desejado, comparado ao cimento e, conseqüentemente, podem afetar indiretamente o assentamento e a resistência mecânica

do concreto resultante. Por meio de exemplo e não limitação, as cargas podem incluir carbonato de cálcio, dolomita, granito, basalto e minério, que são britados para ter um tamanho de partícula similar aos diâmetros da poeira de cinzas inferiores a 100 μm . A redução na proporção de água, necessária para obter um assentamento desejado, é uma consequência da forma aproximadamente esférica de determinadas cargas e da falta de atividade hidráulica. Um algoritmo exemplificativo, que considera o efeito de cargas no assentamento, envolve a seguinte equação de Popovic modificada:

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{0.1}} - W_F$$

Na qual, W_F é uma redução, em consequência da carga, no volume de água necessário para produzir uma mistura com um assentamento desejado, e é determinada pela equação:

$$W_F = \frac{W_1 \cdot \% \text{ FIL} \cdot 6}{100 (37)}$$

Na qual, % FIL = o percentual de volume de carga na combinação de carga e cimento.

O valor para W_2 pode ser então usado para calcular a resistência mecânica de 28 dias. Como as cargas não contribuem independentemente para a resistência mecânica do concreto, as mesmas fórmulas usadas na etapa 2 podem ser u-

sadas para calcular a resistência mecânica de 28 dias e para estimar o volume de cimento necessário para obter a resistência mecânica desejada.

H. Etapa 8: Sistema de otimização de projeto com-
5 binado

Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa, para determinar o efeito combinado de adição de duas ou mais misturas a um projeto de mistura de concreto (por exemplo, dois ou mais de poeira de cinzas, fumo de sílica e agente redutor de água), é apresentada na patente de Andersen et al. na coluna 38, linha 61 - coluna 43, linha 10 13. Essa seção da patente de Andersen inclui algoritmos matemáticos exemplificativos relativos para identificar uma mistura de concreto ótima, que utiliza misturas múltiplas, 15 bem como os atos correspondentes à etapa 8.

Uma vez que o processo seja entendido para como otimizar uma mistura de concreto usando uma mistura única em conjunto com cimento, agregado fino, agregado grosseiro e água, os vários processos podem ser combinados em um sistema usando um "comando de circuito fechado" embutido, que permite que se determine a mistura ótima tendo combinações seletivas de misturas, as misturas incluindo poeira de cinzas, fumo de sílica e agentes redutores de água. Esse processo considera essencialmente os efeitos no assentamento, custo e 20 outros fatores desejados, quando da utilização de duas ou mais misturas. Em um aspecto, a seguinte equação de Feret modificada exemplificativa pode ser utilizada, que considera 25 duas ou mais misturas (por exemplo, poeira de cinzas e fumo

de sílica) dentro da pasta de cimento e do efeito delas na resistência mecânica:

$$\sigma = K \left(\frac{V_C + K_2 V_{FA} + K_3 V_{SF}}{V_C + K_2 V_{FA} + K_3 V_{SF} + W_2 + V_A} \right)^2$$

na qual:

$$V_{SF} = \% SF \cdot (V_T/100)$$

$$5 \quad V_{FA} = \% \cdot (V_T/100)$$

$$V_C = V_T - V_{SF} \text{ E } V_{FA}$$

Na qual, V_T = volume total de cimento, fumo de sílica e poeira de cinzas na mistura. As outras variáveis são como previamente definidas nas etapas 4 e 5.

10 A equação a seguir define a proporção de água necessária para propiciar uma mistura incluindo poeira de cinzas e fumo de sílica de um assentamento desejado:

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{0.1}} - W_{FA} + W_{SF}$$

Na qual, W_{SF} e W_{FA} são como definidos nas etapas 4 e 5.

15 A lógica do procedimento de otimização pode ser empregada na etapa 8, como ilustrado no fluxograma de lógica, mostrado nas Figuras 8A e 8B, e na árvore da lógica, mostrada na Figura 8C. As Figuras 8A - 8C ilustram esquema-

ticamente os atos exemplificativos correspondentes à etapa 8. Em muitos modos, o processo é similar àquele das etapas anteriores, exceto que a poeira de cinzas e o fumo de sílica apenas deslocam uma parte do cimento hidráulico. Por consequência, a razão de agregados fino para grosseiro não precisa ser variada nessa etapa. O que é variado são as várias razões de cimento, agregados, poeira de cinzas e fumo de sílica, para determinar um projeto de mistura, que é otimizado para custo e que inclui dois ou mais de poeira de cinzas, fumo de sílica e um agente redutor de água.

No caso da resistência mecânica desejada não ser igual à resistência mecânica calculada, os valores estimados para outros volumes de cimento, poeira de cinzas e fumo de sílica podem ser calculados das seguintes equações, respectivamente:

$$V_{C(N)} = \frac{\left(\frac{\sigma_D}{K}\right)^{0.5} \frac{W_2 + V_A}{1 - \left(\frac{\sigma_D}{K}\right)^{0.5}}}{1 + \frac{K_2 \cdot \% FA}{100 - \% FA} + \frac{K_3 \cdot \% SF}{100 - \% SF}}$$

$$V_{FA(N)} = \frac{\% FA \cdot V_{C(N)}}{100 - \% FA}$$

$$V_{SF(N)} = \frac{\% SF \cdot V_{C(N)}}{100 - \% SF}$$

na qual todas as variáveis são como definidas previamente nas etapas 4 e 5.

Finalmente, como discutido em relação à etapa 6, a adição de agentes redutores de água é apenas considerada na determinação da proporção de água necessária para propiciar

uma mistura de assentamento desejado. Conseqüentemente, independentemente se o agente redutor de água vai ser adicionado à combinação de cimento e poeira de cinzas, cimento e fumo de sílica, ou à composição de cimento, poeira de cinzas e fumo de sílica, as equações definidas acima são apenas variadas por subtração da redução na proporção de água necessária para um assentamento desejado, em conseqüência da adição do agente redutor de água.

Por exemplo, a proporção necessária de água para um assentamento desejado em uma mistura contendo cimento, poeira de cinzas, fumo de sílica, agente redutor de água, agregado fino e agregado grosseiro é determinada pela seguinte equação:

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{0.1}} - W_{FA} + W_{SF} - W_{WR}$$

Na qual, os valores para W_{RA} , W_{SF} e W_{WR} são como os definidos nas etapas 4, 5 e 6, respectivamente.

Deve-se notar que os efeitos de pozolanas ou misturas também podem ser incorporados ao processo de otimização, por simples adição de outro comando de circuito fechado ao processo iterativo. De modo similar, as cargas podem ter sido adicionadas ao sistema acima, mas uma vez que as cargas são raramente (se jamais) adicionadas a uma mistura incluindo outras combinações, o resultado seria o mesmo.

I. Etapa patente de Andersen: Modificações usando agente de entranhamento de ar

A etapa 9 envolve, opcionalmente, a modificação na mistura de concreto usando um agente de entranhamento de ar, se necessário, para garantir que a composição de concreto tem um teor de ar adequado. Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa, para empregar agentes de entranhamento de ar, se necessários ou desejados, é apresentada na patente de Andersen et al. na coluna 43, linha 15 - coluna 44, linha 13. Essa seção da patente de Andersen inclui atos exemplificativos correspondentes à etapa patente de Andersen.

Diferentemente das misturas discutidas acima, os agentes de entranhamento de ar não são modelados no processo de otimização e, desse modo, devem ser corrigidos após o fato. Os agentes de entranhamento de ar são misturas que estabilizam as bolhas formadas durante o processo de mistura, por abaixamento da tensão superficial da água. O agente de entranhamento de ar forma um filme repelente a água, que é suficientemente forte para conter e estabilizar bolhas de ar. Diferentemente das bolhas de ar naturais, as bolhas de ar formadas pelo uso de um agente de entranhamento de ar são extremamente pequenas e têm um tamanho de diâmetro variando de cerca de 10 a cerca de 1.000 μm . Os benefícios para aumentar o percentual de volume de vazios de ar entranhados no concreto são a resistência mecânica aperfeiçoada, para congelar e descongelar o concreto endurecido em condições úmidas, e a maior trabalhabilidade da mistura de concreto não endurecida.

Uma vez que a mistura ótima é produzida de fato, o

teor de ar efetivo na mistura pode ser determinado. Se o teor de água para um determinado assentamento, após completamento do processo de otimização, for muito baixo ou muito alto, comparado com o teor de ar considerado usado na subtapa 2(c), o processo de otimização pode ser recalculado usando o valor corrigido para o teor de ar, ou a mistura pode ser restaurada com a proporção adequada de agente de entranhamento de ar. O teor de ar pode ser também modelado de acordo com a discussão na etapa 10 abaixo. Da mesma forma que com os agentes redutores de água, o percentual de volume de um agente de entranhamento de ar em uma mistura é tipicamente tão pequeno, que o próprio agente não é considerado como afetando o volume da mistura. No entanto, a proporção resultante de ar incorporada na mistura é considerada na determinação da resistência mecânica da mistura.

J. Etapa 10: Fator de correção do sistema

A etapa 10 identifica e implementa um fator de correção do sistema, para garantir que a composição de concreto final tenha o assentamento desejado. Uma descrição detalhada de uma modalidade exemplificativa para corrigir o assentamento, se necessário, é apresentada na patente de Andersen na coluna 44, linha 17 - coluna 45, linha 32. Essa seção da patente de Andersen et al. inclui algoritmos matemáticos exemplificativos relativos à correção de assentamento e os atos exemplificativos correspondentes à etapa 10.

Uma vez que o processo iterativo da etapa 8 esteja completo, uma análise de regressão linear pode ser usada para aperfeiçoar a precisão dos resultados do sistema. Isso

pode ser feito por representação gráfica da proporção determinada teoricamente de água de mistura, necessária para obter um assentamento desejado versus a proporção efetiva de água de mistura, necessária para obter um assentamento desejado. A relação entre os valores representados graficamente é então definida e incorporada na fórmula de Popovic, de modo a aumentar a precisão da proporção teórica de água necessária para obter um assentamento desejado. Na prática, o processo acima inclui as seguintes subetapas:

10 Subetapa 10(a): Determinação da proporção teórica de água necessária para obter um assentamento desejado na mistura ótima definida na etapa 8. Essa proporção corresponde ao valor para W_2 , resolvido da fórmula de Popovic e é a proporção usada na determinação da resistência mecânica de
15 28 dias resultante da mistura ótima.

 Subetapa 10(b): Combinar fisicamente a proporção teórica de água com a mistura de concreto ótima da etapa 8. A seguir, determinar experimentalmente o assentamento e o teor de ar efetivos da mistura. Em consequência das aproximações incorporadas no processo de otimização, vai haver, freqüentemente, uma discrepância entre os valores efetivos para assentamento e ar e os valores teóricos para assentamento e ar.
20

 Subetapa 10(c): Usando a fórmula de Popovic, resolver para a proporção de água, W_2 , necessária para propiciar a mistura definida de assentamento efetivo determinado na subetapa 10(b). As subetapas 10(b) e 10(c) propiciam então as proporções efetiva e teórica de água, respectivamente
25

te, necessárias para propiciar uma mistura específica de assentamento específico.

Subetapa 10(d): Repetir as etapas 10(a) - 10(c) para diferentes assentamentos desejados. As etapas devem ser repetidas pelo menos três vezes, com a precisão dos resultados finais se aperfeiçoando quanto mais etapas são repetidas. Isso proporciona dois conjuntos de valores correspondentes às proporções efetiva e teórica de água, necessárias para obter um assentamento definido.

10 Subetapa 10(e): Representar graficamente os valores da etapa 10(d) com a proporção efetiva de água necessária para um assentamento específico, no eixo y, e a proporção teórica de água necessária para um assentamento específico, no eixo x. Os estudos mostraram que essa representação
15 gráfica vai revelar uma relação linear.

Subetapa 10(f): Definir a relação linear da etapa 10(e) na seguinte forma:

$$W_{2c} = (W_2 \cdot m) + b$$

Nela, W_{2c} = proporção efetiva de água para um assentamento definido (em uso, o valor representa a proporção teórica corrigida de água para um assentamento definido), W_2
20 = proporção teórica de água para um assentamento definido, m = inclinação da representação gráfica na etapa 10(e), e b = a interceptação em y.

Subetapa 10(g): Representar graficamente os valores do teor de ar determinados experimentalmente para todas
25

as misturas versus os valores de assentamento determinados experimentalmente para as misturas correspondentes. Definir a correlação na seguinte forma:

$$AIR_{ACT} = (SLUMP \cdot m) + b$$

Nela, AR_{ACT} = o volume de ar em uma mistura com base no assentamento correspondente; ASSENTAMENTO= o assentamento para uma determinada mistura; m = inclinação da representação gráfica de assentamento efetivo versus teor de ar correspondente, e, b = a interceptação em y da inclinação.

Subetapa 10(h): A fórmula da subetapa 10(f) é então incorporada no processo de otimização de projeto, de modo que, após a proporção teórica de água de mistura, necessária para um assentamento desejado, é resolvida para a fórmula de Popovic, o valor resultante para W_2 é introduzido na equação descrita para a subetapa 10(f) acima. W_{2c} é então resolvido para proporcionar um valor aperfeiçoado ou corrigido para a proporção de água necessária para obter um assentamento desejado. O assentamento desejado é então incorporado na equação descrita na subetapa 10(g), para obter o volume de ar na mistura. O volume de ar e o valor de corrigido resultantes são depois usados na equação de Feret, para resolver para a resistência mecânica da mistura. O processo de otimização continua depois, como discutido previamente. Desse modo, o assentamento pode ser estimado para ficar dentro de ± 2 cm.

25 K. Etapa 11: Garantia de durabilidade suficiente

A etapa 11 garante que a composição de concreto tem uma durabilidade suficiente para o seu uso intencionado. Uma descrição detalhada de uma modalidade atualmente preferida, para garantir durabilidade suficiente, se necessária ou desejada, é apresentada na patente de Andersen na coluna 5 45, linhas 34 - 60. Essa seção de Andersen et al. inclui um algoritmo matemático exemplificativo relativo à porosidade, que afeta a durabilidade e descreve os atos correspondentes à etapa 11.

10 O processo de otimização apresentado acima também pode usado para garantir que a composição de concreto selecionada tem durabilidade suficiente para o seu uso intencionado. A durabilidade é a capacidade de uma estrutura de concreto de manter a sua integridade por um longo período de 15 tempo e é medida nessa patente em termos de porosidade. As misturas com uma alta porosidade têm, tipicamente, uma concentração excessivamente alta de água ou de agregado fino, e, como tal, têm uma baixa durabilidade. A porosidade total de uma mistura pode ser determinada pela equação apresentada 20 a seguir, na qual se considera que já tenha ocorrido 80% da hidratação do cimento:

$$\text{Porosidade Total} = \left(\frac{W_w - 0.208 (W_c)}{10} \right) + \% \text{ Ar}$$

na qual:

W_w = peso de água por metro cúbico de concreto;

W_c = peso de cimento por metro cúbico de concreto;

e

% ar = volume percentual de ar na mistura, com base no volume de sólidos na mistura.

A equação acima pode ser assim usada com os assentamento e resistência mecânica, para garantir que uma mistura tenha propriedades desejadas. Isto é, uma vez que a mistura tenha sido verificada como tendo resistência mecânica e assentamento suficientes, a porosidade total pode ser calculada para determinar se satisfaz o nível de porosidade desejado. Se a porosidade for muito alta, o volume percentual de cimento pode ser aumentado, diminuindo a porosidade da estrutura e garantindo que tenha uma durabilidade suficiente.

L. Etapa 12: Rendimento otimizado

Finalmente, a etapa 12 envolve a determinação das quantidades dos vários componentes da mistura de concreto ótima, que são necessárias para produzir um rendimento desejado de uma composição de concreto. Uma descrição detalhada de uma modalidade atualmente preferida para a produção segura de uma quantidade desejada de concreto, a partir da mistura de concreto ótima, é apresentada na patente de Andersen na coluna 45, linha 63 - coluna 46, linha 52. Essa seção de Andersen et al. inclui um algoritmo matemático exemplificativo relativo à determinação das quantidades de matérias-primas para garantir um rendimento desejado e também os atos correspondentes à etapa 12.

O volume de uma mistura proposta é tipicamente calculado por divisão do peso de cada componente pela sua respectiva densidade, para obter o volume de cada componen-

te. Os volumes de todos os componentes são também adicionados conjuntamente, para obter a soma dos volumes da mistura resultante. Esse processo, no entanto, não considera que a densidade de compactação das partículas é inferior a 1,0 e, desse modo, não considera os espaços intersticiais remanescentes entre as partículas mistas. Por conseguinte, o volume efetivo da mistura é maior do que o volume calculado.

O processo para otimização do rendimento considera a divisão do volume de cada componente (como determinado pelo processo de otimização discutido acima) pelo volume total da mistura e depois multiplicação das frações correspondentes pelo volume desejado da mistura. Esses cálculos determinam o volume efetivo de cada componente, que deve ser adicionado para produzir uma mistura de um volume desejado. Por sua vez, o volume dos componentes pode ser multiplicado pelos seus respectivos pesos específicos, para determinar o peso de cada componente que deve ser adicionado a uma mistura para obter um rendimento desejado de concreto.

Por meio de exemplo, o volume de cimento necessário para produzir 100 metros cúbicos de uma mistura de concreto definida pode ser determinado pela seguinte equação:

$$\text{vol de cimento} = (V_C/V_T) \cdot 100$$

em que:

V_C = o volume de cimento na mistura determinado na etapa 10 do processo de otimização e é representado como uma fração dos sólidos na mistura, os sólidos (isto é, cimento, agregado fino, agregado grosseiro e, quando relevante, poeira de cinzas e fumo de sílica) somando 1,0;

V_T = o volume total da mistura otimizada definida na etapa 8, e é obtido por adição do volume de água, W, na mistura para o volume de sólidos (que soma à 1,0) e divisão da soma pelo volume de ar na mistura.

5 Por conseguinte, o volume total é representado pela seguinte equação:

$$V_T = \frac{W + 1}{1 - \frac{\% \text{ AR}}{100}}$$

na qual o percentual de ar, % AR, na mistura pode ser determinado empiricamente por uma mistura tentativa. Usando a equação acima para todos os componentes na mistura, 10 o volume de cada um dos componentes necessários para produzir uma mistura com um rendimento desejado pode ser determinado com precisão.

V. Sub-rotina ou processo de otimização de projeto iterativo implementado por computador

15 De acordo com outro aspecto ou modalidade da presente invenção, proporciona-se um processo de otimização iterativo implementado por computador, de acordo com o fluxograma ilustrado na Figura patente de Andersen, que pode ser utilizado sozinho ou em combinação com qualquer parte do 20 processo genérico exemplificado pelas etapas 1 - 12, descritas na seção IV. Esse processo inclui as seguintes etapas:

1. proporcionar bateladas de cimento hidráulico e agregado tendo características específicas;
2. selecionar um assentamento e resistência mecâ-

nica alvos para a composição de concreto final;

3. medir o tamanho de partícula médio e medir ou estimar a densidade de compactação para os componentes sólidos, compreendendo cimento hidráulico e cada tipo de agregado (por exemplo, agregados fino, médio e grosseiro);

4. projetar uma mistura de concreto seca tendo uma razão de concentrações de componentes sólidos;

5. calcular a densidade de compactação das partículas da mistura de concreto seca projetada;

10 6. calcular uma proporção de água que produza uma mistura cimenteira projetada tendo o assentamento alvo;

7. calcular a resistência mecânica da mistura cimenteira projetada usando a equação de Feret, ou uma variante dela, utilizando um fator K de projeto específico, de entre os diferentes fatores K que estão localizados ao longo de uma curva do fator K representativa de entradas do sistema, que é selecionado com base na resistência mecânica alvo (por exemplo, uma resistência mecânica mínima específica desejada ou uma compressiva de projeto da mistura de concreto projetada final);

20 8. calcular a diferença entre a resistência mecânica calculada da mistura de concreto projetada e da resistência mecânica alvo; e

25 9. alterar a razão de concentrações dos componentes sólidos para produzir uma ou mais misturas de concreto secas projetadas adicionais e depois repetição das etapas 5 a 8, até que a resistência mecânica calculada de uma ou mais misturas hidratadas projetadas seja igual ou esteja dentro

de uma faixa aceitável de desvio da resistência mecânica alvo.

O fator K projetado nesse processo é idealmente o mesmo do fator K teórico ou "verdadeiro", que corresponde a uma resistência mecânica alvo ideal. Não obstante, o fator K de projeto pode desviar-se do fator K teórico, para garantir uma resistência mecânica do concreto mínima específica. O grau de desvio proporciona uma margem de segurança para considerar as variações entre a resistência mecânica de projeto e a resistência mecânica efetiva, que pode ocorrer em consequência das variações nas características das matérias-primas e/ou nas variações no processamento. Proporcionando-se um melhor projeto de mistura otimizado de acordo com a invenção, reduz-se, significativamente, o desvio padrão entre a resistência mecânica de projeto e a resistência mecânica efetiva, comparado a um projeto de mistura não otimizado, inferior. Os aperfeiçoamentos e/ou ajustes no equipamento de processamento, como discutidos ao longo dessa descrição, podem reduzir ainda mais o desvio entre as resistências mecânicas de projeto e efetiva.

VI. Identificação do melhor projeto de mistura otimizado de entre os vários projetos de mistura hipotéticos otimizados de projeto

A Figura 10 é um fluxograma que ilustra um processo exemplificativo de acordo com a invenção, para projetar

vários projetos de mistura otimizados hipotéticos e depois identificar o melhor projeto de mistura otimizado. O processo ilustrado na Figura 10 demonstra o uso de um fator K correto, selecionado com base na resistência mecânica desejada ou alvo. Esse processo pode ser utilizado usando qualquer procedimento de otimização de projeto implementado por computador desejado, que utiliza a equação de Feret ou uma variante dela, incluindo quaisquer processos aqui descritos. A otimização de projeto, ilustrada pela Figura 10, inclui as seguintes etapas:

1. selecionar a resistência mecânica desejada ou alvo mínima específica para uma composição de concreto;
2. selecionar um fator K de projeto, com base na resistência mecânica desejada ou alvo, que pode ser igual ou desviar-se do fator K teórico, que corresponde a essa resistência mecânica;
3. projetar, usando o fator K de projeto, uma pluralidade de projetos de mistura concreto otimizados teoricamente, tendo uma resistência mecânica de projeto que é teoricamente igual à resistência mecânica desejada ou alvo;
4. preparar amostras de teste de concreto com base nos projetos de mistura de concreto otimizados;
5. medir as resistências mecânicas efetivas das amostras de teste de concreto;
6. comparar a diferença entre a resistência mecânica efetiva para cada projeto de mistura teoricamente otimizado e a resistência mecânica desejada ou alvo; e
7. se a resistência mecânica efetiva não estiver

dentro de uma faixa de desvio aceitável relativa à resistência mecânica desejada, projetando um ou mais projetos de mistura de concreto adicionais, até que a resistência mecânica desejada de um ou mais projetos de mistura de concreto
5 adicionais esteja dentro de uma faixa de desvio aceitável da resistência mecânica desejada.

A faixa de desvio aceitável entre a resistência mecânica efetiva e a resistência mecânica desejada pode ser selecionada, dependendo do nível de certeza desejada pelo
10 produtor de concreto. Uma resistência mecânica efetiva, que esteja fora da faixa de desvio aceitável, inclui, tipicamente, uma mistura de concreto que é superdimensionada. Ao contrário, uma resistência mecânica efetiva, que esteja dentro da faixa de desvio aceitável, é indicativa de um melhor pro-
15 jeto de mistura otimizado.

VII. Produção de uma composição de concreto otimizada

A Figura 11 é um fluxograma que ilustra um processo exemplificativo para a produção de um projeto de composição de concreto ótima, usando um procedimento de otimização de projeto inventivo, aqui mostrado. O processo de produção inclui as seguintes etapas:

1. proporcionar um projeto de mistura de concreto ótimo, que foi determinado usando um fator K de projeto, que
25 corresponde a uma resistência mecânica desejada mínima específica do concreto a ser produzido;

2. determinar uma quantidade adequada para cada componente sólido da composição de concreto, para proporcio-

nar um rendimento otimizado que garanta uma quantidade necessária mínima, enquanto minimizando a superprodução e o desperdício;

3. medir o teor de umidade dos componentes sólidos
5 usados para produzir a composição de concreto;

4. considerar qualquer umidade dentro dos componentes sólidos, pesar cada componente sólido adicionado à composição de concreto a uma precisão de cerca de $\pm 2,0\%$, particularmente, a uma precisão de cerca de $\pm 1,0\%$, e, especialmente, a uma precisão de cerca de $\pm 0,5\%$;
10

5. considerar qualquer umidade dentro dos componentes sólidos, determinar uma quantidade de batelada que, quando misturada com os componentes sólidos, produza uma composição de concreto tendo um assentamento desejado (por exemplo, de acordo com o projeto de mistura); e
15

6. misturar os componentes para produzir uma composição de concreto, na qual a resistência mecânica e o assentamento efetivos se correlacionam estreitamente com as resistência mecânica e assentamento desejados.

20 De acordo com uma modalidade, pode ser vantajoso controlar a concentração de água quando a composição de concreto é produzida, até quando é transferida e usada no local de uso, para impedir degradação da resistência mecânica do concreto. Informações adicionais para otimizar o processo de
25 mistura e a concentração da água de controle vão ser apresentadas a seguir.

A. Controle das quantidades de componentes adicionados ao concreto

Para obter uma composição de concreto, na qual a resistência mecânica efetiva corresponde estreitamente à resistência mecânica desejada ou teórica do projeto de mistura de concreto otimizado, é preferível pesar ou medir cuidadosamente a quantidade de cada componente adicionado à composição de concreto. De acordo com uma modalidade, cada componente é preferivelmente pesado a uma precisão de cerca de $\pm 2,0$, particularmente, a uma precisão de cerca de $\pm 1,0\%$, e, especialmente, a uma precisão de cerca de $\pm 0,5\%$. Um exemplo de aparelho que pode ser usado para pesar com precisão os vários componentes adicionados a um caminhão misturador / distribuidor de concreto dentro dos parâmetros mencionados acima é um sistema de pesagem e de formação de batelada Alkon Command. Vai-se considerar, no entanto, que está dentro do âmbito da invenção utilizar qualquer outro aparelho conhecido na técnica, ou que pode ser desenvolvido, que seja capaz de pesar ou medir com precisão as quantidades dos componentes adicionados ao caminhão misturador de concreto, dentro do nível desejado de precisão.

20 B. Consideração das variações no teor de umidade dos componentes sólidos

De acordo com uma modalidade, é vantajoso considerar as variações no teor de umidade dos componentes sólidos (isto é, agregados), que podem afetar significativamente a resistência mecânica e assentamento da composição de concreto resultante. Em virtude da umidade incorporar peso aos agregados, a falha em considerar e corrigir essa umidade pode resultar no uso de uma menor quantidade de um ou mais agre-

gados do que poderia ser necessário de acordo com um projeto de mistura otimizado. Proporcionando-se uma menor quantidade de um ou mais agregados do que foi determinada pelo fator K de projeto para ser opcional, pode-se afetar indiretamente a resistências mecânica da composição de concreto resultante (por exemplo, por aumento da quantidade água, que aumenta a razão água para teor). Além disso, reduzindo-se a quantidade de agregados, pode-se aumentar a quantidade relativa de cimento hidráulico para além do que foi determinado como sendo ótimo. Além da redução da resistências mecânica, o fato de não considerar o excesso de água vai também aumentar o teor de água na batelada como um todo, o que pode aumentar o assentamento para além do que foi determinado como sendo ótimo.

Para considerar a umidade, sensores podem ser usados para monitorar o teor de umidade dos componentes sólidos. Quaisquer sensores de umidade conhecidos na técnica, ou que possam ser desenvolvidos, podem ser usados para monitorar o teor. Um exemplo de um sensor de umidade é um sensor de microondas, que emite radiação de microondas para um determinado volume de material (por exemplo, agregado fino, médio ou grosseiro) e depois mede a absorção de energia de microondas por qualquer água que possa estar presente. Em virtude da água absorver fortemente a energia de microondas, a quantidade de energia de microondas absorvida por um determinado volume de agregados se correlaciona com uma quantidade de umidade dentro dos agregados. As informações relativas ao teor da mistura podem ser utilizadas para determi-

nar (por exemplo, por um computador) quanto adicional deve ser pesado para proporcionar a quantidade correta de agregado e;ou quando de água adicionada deve ser incorporada à mistura, para manter o assentamento e/ou a razão de água para cimento corretos. Em geral, os agregados menores são mais sensíveis a variações em umidade, devido às suas geralmente mais altas áreas superficiais e capacidades de absorver umidade nos poros.

10 C. Uso de misturas em vez de água para aumentar o assentamento

Igualmente ou mais importante do que o controle das quantidades iniciais dos componentes adicionados ao caminhão misturador / distribuidor de concreto, é o controle cuidadoso da concentração de água da batelada na composição de concreto, entre o tempo no qual os componentes são adicionados ao tambor misturador de cimento e quando a composição é distribuída e utilizada no local de uso. Para manter uma resistência mecânica, que satisfaça ou exceda a resistência mecânica mínima específica, pouca ou nenhuma água adicional deve ser adicionada à composição de concreto, uma vez que os componentes foram adequadamente mensurados e misturados.

No caso no qual pode-se desejar alterar o assentamento da composição de concreto em um local de uso, apenas misturas químicas adequadas, para aumentar ou diminuir o assentamento, devem ser utilizadas. Por exemplo, quando se deseja aumentar o assentamento, um dos vários plastificantes, superplastificantes ou agentes redutores de água de ampla

gama, conhecidos na técnica, podem ser utilizados. Quando se deseja diminuir o assentamento, quaisquer dos agentes modificadores de reologia ou agentes aglutinantes de água conhecidos na técnica podem ser utilizados. A quantidade dessas misturas adicionadas à composição de concreto deve ser cuidadosamente controlada, para distribuir uma composição de concreto tendo as propriedades desejadas de assentamento e resistência mecânica.

10 D. Caminhões de mistura de concreto especialmente projetados

Na prática atual, as modificações de assentamento no concreto são tipicamente feitas no local de uso pelo motorista do caminhão de concreto, por adição de mais água. Esse é o pior modo para garantir uma resistência mecânica desejada, uma vez que os motoristas de caminhões de concreto são, tipicamente, os de menor conhecimento em relação ao efeito nocivo da adição de água a concreto. Na maior parte dos casos, os motoristas vão usar os seus sentidos de visão e percepção do que usar um cone de assentamento. Essa prática é tão comum que os produtores de concreto são forçados por necessidade a superdimensionar os seus projetos de mistura de concreto por uma margem significativa.

25 Para impedir que um motorista de caminhão de concreto adicione, deliberada ou inadvertidamente, água à composição de concreto, assim que deixa o local de produção de concreto, está dentro do âmbito da invenção utilizar caminhões de mistura de concreto especialmente projetados, que incluam um tanque ou recipiente contendo uma ou mais mistu-

ras usadas para fazer ajustes de assentamento, quando necessário, no local de uso. Por exemplo, plastificantes, superplastificantes ou agentes redutores de água de ampla gama, conhecidos na técnica, podem estar contidos dentro de um ou
5 mais recipientes. Além disso, o caminhão de mistura de concreto pode incluir um dispositivo que mede, precisamente, o assentamento da mistura de concreto dentro do tambor. Se for necessário ou desejado aumentar o assentamento da mistura de concreto, uma quantidade predeterminada da mistura para aumento de assentamento pode ser injetada do tanque ou recipiente
10 especial no tambor, para aumentar o assentamento ao valor desejado.

Um recipiente ou tanque separado pode também incluir misturas que são capazes de alterar a composição de
15 concreto de outros modos (por exemplo, aumento da coesão, diminuição do assentamento, aumento do tempo de cura ou retardo do tempo de cura). Em virtude dessas misturas não afetarem tipicamente a resistência mecânica, a resistência mecânica mínima desejada pode ser mantida mais facilmente,
20 desse modo, diminuindo mais ainda o desvio entre as resistências mecânicas efetiva e de projeto (e fatores K efetivo e de projeto).

Os caminhões de distribuição de concreto são tipicamente equipados com tanques de água, para adicionar água
25 no local. Alguns são também equipados com tanques de mistura para medir as misturas. Uma pessoa versada na técnica, conhecendo como as misturas afetam o assentamento, pode-se facilmente projetar um caminhão de concreto que seja capaz de

alterar o assentamento da maneira adequada. Desse modo, apenas pequenas modificações de caminhões de concreto existentes podem ser necessárias. Esse aparelho compreende meios para medir uma quantidade desejada de mistura a uma composição de concreto no local.

E. Processo de reprojeção sucinto para ajustar o assentamento de um projeto de mistura otimizado, sem alterar substancialmente a resistência mecânica compressiva

Em alguns casos, pode ser desejável rapidamente reprojetar um projeto de mistura, que já está otimizado, para ajustar o assentamento sem variar, significativamente, a resistência mecânica compressiva. Isso pode ser feito sem criar um projeto de mistura otimizado inteiramente diferente, usando, por exemplo, os procedimentos de otimização de projeto de 12 etapas detalhados descritos acima. Para manter a mesma resistência mecânica essencial, enquanto variando-se o assentamento, a mesma razão de água para cimento da pasta é mantida. Apenas o volume da pasta é alterado para ajustar o assentamento da mistura cimenteira úmida. Em geral, a adição de mais pasta vai aumentar o assentamento, enquanto que se adicionando menos pasta vai-se diminuir o assentamento. Desse modo, a razão global de pasta de cimento para agregado é ajustada para alterar o assentamento. Em virtude da razão de água para cimento manter-se igual, a resistência mecânica vai teoricamente manter-se essencialmente igual. Em alguns casos, a razão de agregados fino para grosseiro pode ficar igual. Em outros casos, a razão pode ser alterada um pouco, dependendo do efeito nas outras propriedades provocado pela

variação da razão global de pasta de cimento para agregado (por exemplo, coesão, durabilidade e assemelhados).

Um fluxograma ilustrando um método exemplificativo para o reprojeto sucinto de um projeto de mistura otimizado atual, para ajustar o assentamento, é mostrado na Figura 12. O efeito da variação da concentração global de pasta de cimento no assentamento pode ser determinado por uso de quaisquer das equações de assentamento apresentadas acima, e considerando o aumento ou diminuição do teor de água, dependendo se a quantidade de pasta de cimento é aumentada ou diminuída comparado com o projeto de mistura inicial. A adição de mais pasta aumenta o assentamento, porque aumenta a concentração global de componentes água para sólido. Contrariamente, a diminuição da quantidade de pasta de cimento diminui o assentamento, porque diminui a razão global de componentes água para sólido.

De acordo com uma modalidade, o processo é controlado por um computador e envolve o monitoramento das variações em assentamento entre as bateladas, que devem ser provocadas por variações na tamanho e/ou umidade do agregado. Quando uma variação em assentamento é detectada, um processo de projeto implementando por computador envolve o ajuste da quantidade de água, para revisar o assentamento, variar a quantidade de cimento para manter a mesma razão de água para cimento (e, portanto, resistência mecânica), e alterar a concentração relativa de agregados, se necessário, para manter um grau adequado de coesão. Em geral, o aumento da razão de agregados fino para grosseiro aumenta a coesão, mas pode

diminuir o assentamento. Uma diminuição na pasta de cimento pode requerer um aumento em agregado fino, para manter a coesão. Contrariamente, um aumento na pasta de cimento pode requerer uma diminuição em agregado fino, para aumentar o assentamento, enquanto evitando o efeito nocivo de supercimentação e para melhor otimizar o custo.

Em alguns casos, pode ser possível selecionar uma razão de agregados fino para grosseiro, que não seja necessariamente perfeitamente otimizada, mas que seja adequada (por exemplo, tipicamente dentro de uma faixa de 40:60 a 60:490 partes de agregados fino para grosseiro). Dentro dessa razão, não há, freqüentemente, muita variabilidade em coesão e segregação, que possa afetar bastante o desempenho dos concretos, quando colocados em um local de uso. Para garantir uma resistência mecânica garantida mínima, uma pasta de cimento é projetada tendo uma razão de água para cimento, que produz uma resistência mecânica desejada (por exemplo, no caso em que a pasta de cimento é o componente mais fraco). A razão de pasta de cimento para agregado é ajustada para produzir o assentamento desejado. Ainda que essa abordagem não otimize o concreto no mesmo grau de precisão, pode ser empregada em muitos casos (por exemplo, em trabalhos menores nos quais o custo relativamente baixo de superdimensionamento não justifica um procedimento de otimização desenvolvido, como aqui descrito).

VIII. Reprojeto de um projeto de mistura de concreto preexistente

A Figura 13 é um fluxograma que ilustra um método

exemplificativo para reprojeter um projeto de mistura de concreto preexistente, utilizando o conhecimento recém-adquirido que e como o fator K , usado na equação de Feret, varia com as variações na resistência mecânica do concreto (isto é, logaritmicamente com o aumento da resistência mecânica). O projeto de reprojeto exemplificativo, apresentado na Figura 13, inclui as seguintes etapas:

1. Identificar um projeto de mistura de concreto preexistente tendo uma resistência mecânica prevista (ou de projeto);

2. preparar uma amostra de teste de concreto do projeto de mistura de concreto preexistente;

3. medir a resistência mecânica efetiva da amostra de teste de concreto e determinar quanto da resistência mecânica efetiva se desvia da resistência mecânica de projeto (opcional);

4. determinar um fator K de projeto aparente para o projeto de mistura de concreto preexistente, com base na resistência mecânica de projeto e na razão dos componentes dentro da amostra de teste de concreto, produzida do projeto de mistura de concreto preexistente;

5. comparar o fator K de projeto aparente do projeto de mistura de concreto preexistente com o fator K "verdadeiro" ou ótimo, correspondente à resistência mecânica de projeto ou prevista do projeto de mistura de concreto preexistente;

6. identificar um fator K de projeto revisto, com base na resistência mecânica prevista (ou de projeto) (por

exemplo, selecionada com base em uma das linhas de fatores K mostradas nas Figuras 1 - 3, ou que é adequada para o determinado conjunto de entradas de matérias-primas), que está mais próxima do fator K ótimo para a resistência mecânica de projeto do que o fator K de projeto aparente do projeto de mistura de concreto preexistente; uma curva de fator K para a instalação de fabricação de concreto pode ser construída opcionalmente por teste da resistência mecânica efetiva de uma ou mais composições de concreto preparadas adequadamente do produtor e representando graficamente o ou os fatores K versus a resistência mecânica efetiva; e

7. projetar, usando o fator K revisto, um outro projeto de mistura de concreto que produza uma composição de concreto tendo uma resistência mecânica efetiva, que corresponde mais consistentemente à resistência mecânica prevista (ou de projeto), comparado com o projeto de mistura de concreto preexistente.

No caso de um projeto de mistura preexistente mal ou não otimizado, a diferença entre o fator K de projeto aparente, com base na resistência mecânica de projeto ou prevista do projeto de mistura preexistente, e o fator K ótimo ou teórico, com base na resistência mecânica de projeto, vai ser significativamente maior do que em um projeto de mistura otimizado. Por reequilíbrio das concentrações relativas dos vários componentes, para produzir um projeto de mistura mais otimizado (isto é, de modo a utilizar mais eficientemente o cimento hidráulico e outros componentes), o desvio entre a resistência mecânica efetiva e a resistência mecânica de

projeto vai ser diminuído significativamente. Por conseguinte, o fator K de projeto revisto, que é necessário para garantir uma resistência mecânica mínima específica vai correspondente mais estreitamente ao fator K ótimo ou teórico, comparado com o projeto de mistura de concreto não otimizado preexistente. Além do mais, a comparação da diferença entre o fator K de projeto aparente e o fator K ótimo é uma ferramenta diagnóstica que possibilita o desejo de implementar o procedimento de otimização de projeto da presente invenção, para diagnosticar se, e em qualquer grau, um projeto de mistura de concreto preexistente pode ser superdimensionado. Como aqui discutido em outro lugar, o desvio entre os fatores K de projeto e ótimo pode ser obtido por consideração cuidadosa das variações no tamanho e no teor de umidade dos componentes sólidos e/ou melhoria e/ou ajuste do processo e do equipamento de produção.

IX. Melhoria de uma instalação de fabricação de concreto existente

A Figura 14 é um fluxograma que ilustra uma modalidade exemplificativa de acordo com a invenção, para melhoria de uma instalação de fabricação de concreto existente. O processo ilustrado na Figura 14 utiliza a descoberta que e como o fator K varia logaritmicamente com as variações na resistência mecânica do concreto. O processo para melhoria de uma instalação de fabricação de concreto existente inclui as seguintes etapas:

1. produzir uma ou mais composições de concreto usando um ou mais projetos de mistura preexistentes tendo

resistências mecânicas previstas;

2. determinar um fator K aparente para cada da uma ou mais composições de concreto, com base na resistência mecânica e na razão de componentes de cada composição de concreto desejadas;

3. identificar um fator K de projeto revisto, com base na resistência mecânica prevista ou desejada de cada projeto de mistura preexistente, que se corresponde mais estreitamente ao fator K ótimo ou verdadeiro para a resistência mecânica de projeto, comparado com o projeto de mistura preexistente; e

4. projetar, usando o fator K de projeto revisto para cada projeto de mistura preexistente, um ou mais projetos de mistura de concreto revistos, que produzem composições de concreto tendo resistências mecânicas efetivas, que correspondem mais estreitamente às resistências mecânicas de projeto, comparados com o um ou mais projetos de mistura preexistentes, respectivamente.

Em virtude de cada instalação de fabricação ter o seu único conjunto de matérias-primas e/ou entradas de processamento (isto é, nunca duas instalações de fabricação usam exatamente a mesma combinação de matérias-primas e possuem os mesmos equipamentos exatos calibrados e/ou operados exatamente da mesma maneira), vai-se considerar que cada instalação de fabricação produtora produz composições de concreto tendo aspectos únicos, que são específicos para uma determinada instalação de fabricação produtora. Em outras palavras, mesmo se duas instalações de fabricação usarem os

mesmos projetos de mistura padronizados (isto é, receitas), o concreto transferido por cada instalação de fabricação vai, do mesmo modo, ser único para cada instalação de fabricação. Isso significa que projetos de mistura de concreto preexistentes, que tenham sido modificados e otimizados utilizando o programa DOC aperfeiçoado, vão produzir outras composições de concreto que são elas próprias únicas, pelo fato de que não vão ter sido nunca produzidas a qualquer tempo no mundo. Desse modo, as composições de concreto produzidas usando projetos de mistura otimizados, resultantes da implementação do processo DOC aperfeiçoado, são elas próprias únicas e, portanto, diferentes, como entre todo o concreto produzido previamente.

Nota-se que cada composição de concreto, que é produzida, tem o seu próprio fator K de projeto de assinatura e também um fator K efetivo, que pode ser determinado por teste da resistência mecânica efetiva da composição. Isto é verdade tanto antes quanto depois da implementação do processo DOC aperfeiçoado. No entanto, após implementação do processo DOC aperfeiçoado, os fatores K de assinatura, ambos os de projeto e efetivo, para uma composição de concreto otimizada de uma instalação de fabricação produtora, vão exceder os fatores K de assinatura, ambos de projeto e efetivo, de uma composição de concreto preexistente, que foi re-projetada ou substituída usando o processo DOC aperfeiçoado. Por conhecimento e comparação dos fatores K de projeto e/ou assinatura de ambas as composições de concreto preexistente e não otimizada de uma determinada instalação de fabricação

produtora, pode-se determinar facilmente se uma composição de concreto particular, produzida pela instalação de fabricação produtora, foi produzida usando o projetos de mistura preexistente ou um projetos de mistura otimizado, projetado usando o processo DOC aperfeiçoado. Desse modo, o fator K de assinatura pode ser usado como uma ferramenta diagnóstica para distinguir se uma composição de concreto não otimizada ou superdimensionada ou uma composição de concreto otimizada foi usada em um projeto de construção (isto é, para determinar se ou não o processo DOC aperfeiçoado foi implementado por um produtor de concreto no projeto das suas composições de concreto).

Um dos efeitos práticos de melhorar uma instalação de fabricação de concreto existente é proporcionar projetos de mistura que são especificamente otimizados com base nas matérias-primas, que são efetivamente usadas pelo instalação de fabricação de concreto. É, freqüentemente, o caso que as instalações de fabricação usam projetos de mistura padronizados, que foram produzidos usando matérias-primas indisponíveis para uma instalação de fabricação particular. De fato, as instalações de fabricação são freqüentemente de propriedade de uma única entidade, que proporciona projetos de mistura padronizados para uso com cada instalação de fabricação, independentemente das variações nas entradas de matérias-primas. Por conseguinte, há um grande erro sistemático embutido nos projetos de mistura padronizados, que não podem ser considerados ou corrigidos proporcionando-se simplesmente um equipamento de formação de batelada aperfeiçoado. Em

outras palavras, mesmo se os componentes puderem ser medidos e fazer parte de bateladas perfeitamente a todo momento, os projetos de mistura vão ter que considerar variações nas entradas de matérias-primas e entre as várias instalações de fabricação. O único modo de eliminar esse erro sistemático é proporcionar um projeto de mistura otimizado, que é especificamente ajustado para considerar as matérias-primas específicas, que são usadas por uma instalação de fabricação particular para produzir concreto a um determinado momento.

10 O conhecimento de como o fator K varia com a resistência mecânica do concreto pode ser usado como uma ferramenta diagnóstica, para identificar esses aspectos de um processo de formação de batelada do produtor, que pode precisar ser modificado. Como aqui discutido, o processo DOC

15 aperfeiçoado pode ser usado para identificar quanta pasta é necessária para obter um assentamento desejado, com o fator K especificando a razão de água para cimento para obtenção de uma resistência mecânica específica. Se a compactação das partículas for otimizada para uma instalação de fabricação

20 particular, há pouco benefício em gastar recursos de capital para otimizar o equipamento de dosagem. O aumento da capacidade de pesar e formar uma batelada dos componentes sólidos não vai gerar muito benefício, se a compactação das partículas já estiver otimizada ou quase que otimizada. Se varia-

25 ções na pesagem dos agregados não afetarem consideravelmente o assentamento, então não vão também afetar consideravelmente a resistência mecânica, mesmo se os agregados não forem pesados a um alto grau de precisão.

Por outro lado, quando muita pasta de cimento é necessária para obter um assentamento desejado, comparado com um sistema de compactação de partículas otimizado, isso indica que uma pesagem muito mais precisa dos agregados, para obter uma compactação das partículas otimizada, vai produzir benefícios significativos. Em outras palavras, se uma medida mais precisa dos agregados finos e grosseiros minimizar ou eliminar as variações em assentamento e também reduzir ou eliminar a supercimentação necessária para obter o assentamento desejado, o investimento em um aparelho de pesagem mais preciso vai ser altamente benéfico e compensar o custo.

Além da pesagem precisa dos vários componentes adicionados a uma batelada de concreto, a consideração das variações no teor de umidade dos agregados também vai produzir grandes benefícios no caso em que a variação da umidade é um problema. As variações na umidade não apenas afetam quanto de agregado se precisa, mas também afeta bastante quanto de água está contida na composição de concreto, afetando, desse modo, em um alto grau, a razão de água para cimento e o assentamento. A consideração de todas as entradas de água aumenta bastante a capacidade de proporcionar consistentemente concreto tendo os assentamento e resistência mecânica desejados, de modo que um investimento de capital em aparelho de detecção de umidade pode ser justificado.

X. Exemplos de processos de otimização de projetos para reprojeter ou substituir projetos de mistura preexistentes

Os exemplos apresentados a seguir demonstram a capacidade do processo DOC aperfeiçoado, aqui descrito, em modificar, reprojeter e/ou substituir os projetos de mistura preexistentes utilizados atualmente na indústria, para produzir misturas de concreto aperfeiçoadas, que são melhor otimizadas com relação a custo, enquanto também mantendo as propriedades desejadas (por exemplo, assentamento e resistência mecânica). Os mesmos procedimentos podem ser também conduzidos em relação a virtualmente qualquer projeto de mistura atualmente conhecido e usado na indústria de concreto, para otimizar essas composições com relação a resistência mecânica e custo, enquanto também mantendo outras propriedades desejadas.

Os métodos de otimização de projeto inventivos foram usados para aperfeiçoar projetos de mistura em várias instalações de fabricação de concreto em todo os Estados Unidos, demonstrando a aplicabilidade universal dos métodos inventivos. Os Exemplos 1 - 4 se referem a quatro projetos de mistura de concreto otimizados, que foram produzidos de acordo com o processo DOC aperfeiçoado, para aperfeiçoar e substituir 12 projetos de mistura padronizados atualmente em uso ou que foram usados previamente por uma primeira instalação de fabricação usando projetos de mistura padronizados. Os projetos de mistura padronizados nos exemplos comparativos remanescentes são iguais àqueles dos Exemplos 1 - 4, mas foram usados por outras instalações de fabricação de propriedade do mesmo produtor. Por essa razão, o custo de produção de concreto, em diferentes instalações de fabricação, difere

devido às diferenças no custo das matérias-primas, devido às localização e fonte. Em virtude de que a qualidade dos agregados difere de instalação de fabricação para instalação de fabricação, o procedimento de otimização de projeto produz diferentes projetos de mistura otimizados para cada instalação de fabricação, para considerar essas diferenças em entradas de matérias-primas. Desse modo, os projetos de mistura otimizados são melhor particularizados para as matérias-primas específicas utilizadas em cada instalação de fabricação.

Os projetos de mistura preexistentes padronizados são "exemplos comparativos" e devem ser numerados de acordo com o projeto de mistura otimizado correspondente, criados para substituí-lo (por exemplo, o projeto de mistura otimizado do Exemplo 1 corresponde aos, e é projetado para substituir os), projetos de mistura dos Exemplos Comparativos la - 1c).

Exemplos 1 - 4

Os Exemplos 1 - 4 ilustram quatro projetos de mistura de concreto otimizados, que foram preparados usando o processo DOC aperfeiçoado aqui descrito. Os quatro projetos de mistura dos Exemplos 1 - 4 podem substituir doze projetos de mistura de concreto padronizados, utilizados por uma instalação de fabricação de concreto existente. Cada projeto de mistura dos Exemplos 1 - 4 corresponde a um grupo de três projetos de mistura preexistentes de tipo similar, que garantem uma resistência mecânica mínima, a um assentamento específico, e um percentual de ar entranhado, quando trans-

ferido para o cliente. Os projetos de mistura preexistentes da instalação de fabricação de concreto, os seus componentes, o custo (revisto em 7 de abril de 2006) e os fatores K de projeto aparentes, vão ser apresentados em quatro grupos de três projetos de mistura de concreto, cada grupo tendo propriedades ou características similares.

Exemplos Comparativos 1a - 1c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 1a - 1c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	1a	1b	1c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	128,3 (370)	163,0 (470)	146,7 (473)	101,08/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	1,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	544,4 (1.570)	509,7 (1.470)	575,6 (1.600)	9,10/t
pedra natural, kg/m ³ (lb/yd ³)	589,5 (1.700)	589,5 (1.700)	594,4 (1.714)	11,65/t

água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	97,1 (280)	91,9 (265)	despre- zível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/ga lão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/ga lão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto aparente	234	191	207	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	50,45 (38,59)	53,13 (40,62)	54,92 (41,99)	-
distribuição de ven- das dentro do grupo, %	19,57	80,43	0	-
custo ponderal mé- dio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		52,62 (40,23)		-
vendas totais (%) da instalação de fabri- cação de concreto		1,08		-

Exemplos Comparativos 2a - 2c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 2a - 2c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	2a	2b	2c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	121,4 (350)	163,0 (470)	146,7 (423)	101,08/ t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	1,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	523,7 (1.510)	492,4 (1.420)	541,0 (1.560)	9,10/t
pedra natural, kg/m ³ (lb/yd ³)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	603,4 (1.740)	11,65/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	86,7 (250)	90,2 (260)	83,2 (240)	despre- zível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/g alão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/g alão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto aparente	237	189	199	-
custo, US\$/m ³ ,	49,70	54,11	55,42	-

(US\$/yd ³)	(38,00)	(41,37)	(42,37)	
distribuição de vendas dentro do grupo, %	74,23	25,77	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		50,84 (38,87)		-
vendas totais (%) da instalação de fabricação de concreto		17,53		-

Exemplos Comparativos 3a - 3c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 3a - 3c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	3a	Bis- Tris	3c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	101,08/ t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³	34,7 (100)	0	0	1,00/t

(lb/yd ³)				
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	530,6 (1.530)	499,4 (1.440)	530,6 (1.530)	9,10/t
pedra natural, kg/m ³ (lb/yd ³)	605,5 (1.746)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	11,65/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	98,8 (285)	97,1 (280)	despre- zível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/g alão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/g alão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto aparente	232	206	226	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	57,20 (43,73)	59,55 (45,53)	63,88 (48,84)	-
distribuição de ven- das dentro do grupo, %	6,81	44,35	48,84	-
custo ponderal mé- dio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		60,78 (46,47)		-
vendas totais (%) da instalação de fabri- cação de concreto		12,81		-

Exemplos Comparativos 4a - 4c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 4a - 4c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	4a	4b	4c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	101,08/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	1,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	482,0 (1.390)	464,7 (1.340)	495,9 (1.430)	9,10/t
pedra natural, kg/m ³ (lb/yd ³)	593,0 (1.710)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	11,65/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	88,4 (255)	95,4 (275)	88,4 (255)	desprezível
Daravair 1400 (ar entranhado), (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/galão)

Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/galão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de pro- jeto aparente	224	212	218	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	56,78 (43,41)	60,01 (45,88)	62,77 (47,99)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	74,23	25,77	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	57,51 (43,97)			-
vendas totais (%) da instala- ção de fabrica- ção de concreto	68,58			-

Os projetos de mistura de concreto otimizados apresentados a seguir, de acordo com os Exemplos 1 - 4, foram produzidos de acordo com o processo DOC aperfeiçoado e são intencionados para substituir os 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 1a - 4c. Cada projeto de mistura otimizado substitui três projetos de mistura de atributos similares (por exemplo, o projeto de mistura otimizado do Exemplo 1 substitui os projetos de mistura preexistentes dos E-

xemplos Comparativos 1a - 1c). O procedimento de otimização assumiu uma absorção percentual para areia e pedra de 1,5% e 2,5%, respectivamente, e um percentual de umidade de 4,57 e 3,18%, respectivamente.

Exemplo	1	2	3	4	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	117,9 (340)	103,7 (299)	130,0 (375)	126,9 (366)	101,08/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	35,3 (102)	31,2 (90)	39,2 (113)	38,1 (110)	1,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	609,3 (1.757)	588,5 (1.697)	601,7 (1.735)	573,6 (1.654)	9,10/t
pedra natural, kg/m ³ (lb/yd ³)	503,5 (1.452)	486,6 (1.403)	497,3 (1.434)	474,00 (1.367)	11,65/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	101,9 (294)	93,3 (269)	101,9 (294)	93,3 (269)	desprezível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	41,41 (1,4)	0	41,41 (1,4)	0,99/L (3,75/galão)
% de ar	2,0	5,5	2,0	5,5	1,49/L

					(5,65/ga lão)
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	47,81 (36,55)	44,10 (33,72)	50,22 (38,39)	48,70 (37,23)	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	48,08 (36,76)				-
Economia de cus- to, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	4,81 (3,68)	6,74 (5,15)	10,57 (8,08)	8,82 (6,74)	-
Economia de cus- to médio ponde- ral da instala- ção de fabrica- ção, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	8,63 (6,60)				-

Muitas instalações de fabricação de concreto têm um número excessivo de projetos de mistura de tipos similares, em uma tentativa de satisfazer as necessidades dos clientes. Cada projeto de mistura aperfeiçoado dos Exemplos 1 - 5 4 é capaz de substituir os projetos de mistura padronizados preexistentes de tipos similares, porque satisfaz os critérios de todos os três projetos de mistura, enquanto tendo também um custo reduzido. A redução do número de projetos de mistura necessários para satisfazer os requisitos dos clientes 10 tes represente economias em custo adicionais par uma instalação de fabricação de concreto, porque simplifica o proces-

so de produção global.

As economias em custo absolutas variaram de um nível baixo de US\$8,84 por m³ (US\$2,04 por jarda) (Exemplo 1 relativo ao Exemplo Comparativo 1a) a um nível alto de US\$14,41 por m³ (US\$10,76 por jarda) (Exemplo 4 relativo ao Exemplo Comparativo 4c). O custo médio ponderado dos projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 1a - 4c, com base no percentual de cada projeto de mistura, vendido pela instalação de fabricação, é de US\$58,08 por m³ (US\$43,36 por jarda) (como de 7 de abril de 2006). O custo médio ponderado para a instalação de fabricação de concreto, usando os quatro projetos de mistura otimizados, com base nos percentuais de vendas existentes para os 12 projetos de mistura preexistentes do produtor vão ser de US\$49,24 por m³ (US\$36,76 por jarda), ao mesmo custo dos materiais por componente. As economias no custo global médio para a instalação de fabricação seriam portanto de US\$8,84 por m³ (US\$6,60 por jarda), considerando que o produtor fosse substituir os 12 projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 1a - 4c com os projetos de mistura otimizados dos Exemplos 1 - 4 e continuar a produzir a mesma distribuição de concreto, como antes.

A quantia de US\$8,84 por m³ (US\$6,60 por jarda) é muitas vezes maior do que o lucro típico de US\$1,33 - 2,66 por m³ (US\$1 - 2 por jarda) ganho pelos produtores de concreto típicos, após todos os custos fixos e variáveis de operação da instalação de fabricação sejam fatorados e considerados. Os procedimentos de otimização de projeto aperfei-

çoados são, portanto, capazes de aperfeiçoar bastante os projetos de mistura preexistentes usados pelos produtores, que eram imaginados como sendo ótimos, com base em décadas de teste e uso, e aumentam por várias vezes os lucros. Esse
5 é um resultado surpreendente e inesperado, que atesta a contribuição para a técnica de produção de concreto, proporcionado pelo processo DOC aperfeiçoado da presente invenção. Visto que o programa DOC original da patente de Andersen tinha muito que confiar nele mesmo, pode não ser facilmente
10 implementado no mundo real para diagnosticar e aperfeiçoar os projetos de mistura de concreto preexistentes, de uma maneira concreta e verificável para produzir demonstravelmente resultados aperfeiçoados a um custo reduzido. Os aperfeiçoa-
15 mentos descritos na presente invenção foram necessários para proporcionar um procedimento de otimização, que pode ser facilmente implementado, como ilustrado nos Exemplos 1 - 4.

Exemplos 5 - 8

Os Exemplos 5 - 8 ilustram quatro cimento de concreto otimizados, que foram preparados usando o processo DOC
20 aperfeiçoado descrito na presente invenção. Os quatro projetos de mistura dos Exemplos 5 - 8 podem substituir doze projetos de mistura de concreto padronizados preexistentes de uma instalação de fabricação de concreto existente, que usou os mesmos 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos
25 1a - 4c, mas produziram concreto usando um conjunto diferente de matérias-primas. Cada projeto de mistura dos Exemplos 5 - 8 corresponde a um grupo de três projetos de mistura preexistentes de tipo similar, que garantem uma resistência

5 mecânica compressiva mínima, a um assentamento específico, e a um percentual de ar entranhado, quando transferido para o cliente. Os projetos de mistura preexistentes da instalação de fabricação de concreto, os seus componentes, o custo (re-

visto em 27 de outubro de 2005), e os fatores K de projeto vão ser apresentados em quatro grupos de três projetos de mistura, cada grupo tendo propriedades ou características similares.

Exemplos Comparativos 5a - 5c

10 Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 5a - 5c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), a um assentamento de 10,2 cm (4 in) e a um ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	5a	5b	5c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	128,3 (370)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	544,4 (1.570)	509,7 (1.470)	575,6 (1.660)	4,46/t

pedra 1,9 cm (3/4 in) kg/m ³ (lb/yd ³)	589,5 (1.700)	589,5 (1.700)	594,4 (1.714)	4,46/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	97,1 (280)	91,9 (265)	desprezível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/ga lão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/ga lão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto aparente	234	191	207	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	37,94 (29,01)	41,37 (31,63)	42,41 (32,42)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	19,57	80,43	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		40,71 (31,12)		-
vendas totais (%) da instalação de fabricação de concreto		1,08		-

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 6a - 6c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	6a	6b	6c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	121,4 (350)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	523,7 (1.510)	492,4 (1.420)	541,0 (1.560)	4,46/t
pedra 1,9 cm (3/4 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	603,4 (1.740)	4,46/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	86,7 (250)	90,2 (260)	83,2 (240)	desprezível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/ga lão)

Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/galão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto aparente	237	189	199	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	37,10 (28,36)	42,27 (32,32)	42,82 (32,74)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	74,23	25,77	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	38,43 (29,38)			-
vendas totais (%) da instalação de fabricação de concreto	17,53			-

Exemplos Comparativos 7a - 7c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 7a - 7c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 cm (4 in) e ar 5 entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	7a	7b	7c	Custo (US\$)
resistência mecânica	27,6	27,6	27,6	-

compressiva, MPa (psi)	(4.000)	(4.000)	(4.000)	
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	101,08/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	530,6 (1.530)	499,4 (1.440)	530,6 (1.530)	4,46/t
pedra 1,9 cm (3/4 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	605,5 (1.746)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	4,46/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	98,8 (285)	97,1 (280)	desprezi- vel
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/gal ão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/gal ão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto aparente	232	206	226	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	44,76 (34,22)	47,82 (36,56)	50,31 (38,46)	-
distribuição de ven- das dentro do grupo, %	6,81	44,35	48,84	-

custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	48,83 (37,33)	-
vendas totais (%) da instalação de fabricação de concreto	12,81	-

Exemplos Comparativos 8a - 8c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 8a - 8c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	8a	8b	8c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	482,0 (1.390)	464,7 (1.340)	495,9 (1.430)	4,46/t
pedra 1,9 cm (3/4 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	593,0 (1.710)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	4,46/t
água potável, kg/m ³	88,4	95,4	88,4	despre-

(lb/yd ³)	(255)	(275)	(255)	zível
Daravair 1400 (ar en- tranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/ga lão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/ga lão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto aparente	224	212	218	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	44,96 (34,37)	48,61 (37,16)	51,00 (38,99)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	77,31	22,69	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		45,79 (35,01)		-
vendas totais (%) da instalação de fabrica- ção de concreto		68,58		-

Os projetos de mistura de concreto otimizados apresentados a seguir, de acordo com os Exemplos 5 - 8, foram produzidos de acordo com um processo DOC aperfeiçoado e são intencionados para substituir os 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 5a - 8c. Cada projeto de mistura otimizado substitui três projetos de mistura de atributos similares (por exemplo, o projeto de mistura otimizado do Exemplo 5 substitui os projetos de mistura preexistentes dos E-

xemplos Comparativos 5a - 5c). O procedimento de otimização assumiu uma absorção percentual para areia e pedra de 1,9% e 2,3%, respectivamente, e um percentual de umidade de 4,57 e 3,18%, respectivamente.

Exemplo	5	6	7	8	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	115,1 (332)	104,7 (302)	130,0 (375)	126,9 (366)	104,00/ t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	31,6 (91)	38,8 (112)	38,1 (110)	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	613,5 (1.769)	587,1 (1.693)	602,4 (1.737)	574,6 (1.657)	4,46/t
pedra 1,9 cm (3/4 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	509,7 (1.470)	488,0 (1.407)	502,8 (1.450)	477,5 (1.377)	4,46/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	101,9 (294)	93,3 (274)	102,3 (295)	93,6 (270)	desprezível
Daravair, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	41,41 (1,4)	0	41,41 (1,4)	0,99/L (3,75/galão)
% de ar	1,8	5,5	1,9	5,4	1,49/L

					(5,65/g alão)
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	35,28 (26,97)	32,71 (25,01)	38,42 (29,37)	37,49 (28,66)	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	36,75 (28,09)				-
Economia de custo, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	5,43 (4,15)	5,72 (4,37)	10,41 (7,96)	8,29 (6,34)	-
Economia de custo médio ponderal da instalação de fabricação, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	8,21 (6,28)				-

Cada projeto de mistura aperfeiçoado dos Exemplos 5 - 8 é capaz de substituir os projetos de mistura padronizados preexistentes de tipos similares, porque satisfaz os critérios de todas as projetos de mistura, enquanto tendo também um custo reduzido. O número reduzido de projetos de mistura é uma economia de custo adicional, pois simplifica o processo de produção global.

A economia de custo absoluta variou de um nível baixo de US\$2,73 por m³ (US\$2,04 por jarda) (Exemplo 5 relativo ao Exemplo Comparativo 5a) a um nível alto de US\$13,82 por m³ (US\$10,32 por jarda) (Exemplo 8 relativo ao Exemplo Comparativo 8c). O custo médio ponderado dos projetos de

mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 5a - 8c, com base no percentual de cada concreto vendida pela instalação de fabricação, é US\$45,90 por m³ (US\$34,27 por jarda) (considerando 27 de outubro de 2005). O custo médio ponderado para a produção de concreto, usando quatro projetos de mistura baseados nos percentuais de vendas existentes para os 12 projetos de mistura preexistentes do produtor vai ser US\$37,63 por m³ (US\$28,09 por jarda), ao mesmo custo dos materiais por componente. A economia de custo global média para a instalação de fabricação vai ser, portanto, de US\$8,28 por m³ (US\$6,18 por jarda), considerando que o produtor substituísse os 12 projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 5a - 8c com os projetos de mistura otimizados dos Exemplos 5 - 8 e continuasse a produzir para a mesma distribuição de concreto como antes.

Exemplos 9 - 12

Os Exemplos 9 - 12 ilustram quatro projetos de mistura de concreto otimizados, que foram preparados usando o processo DOC aperfeiçoado aqui descrito. Os quatro projetos de mistura dos Exemplos 9 - 12 podem substituir doze projetos de mistura de concreto padronizados de uma instalação de fabricação de concreto existente, que usam os mesmos 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 1a - 4c, mas que produzem concreto usando um diferente conjunto de matérias-primas. Cada projeto de mistura dos Exemplos 9 - 12 corresponde a um grupo de três projetos de mistura preexistentes de tipo similar, que garantem uma resistência mecânica mínima, a um assentamento específico, e um percentual de

ar entranhado, quando transferido para o cliente. Os projetos de mistura preexistentes da instalação de fabricação de concreto, os seus componentes, o custo (revisto em 27 de outubro de 2005) e os fatores K de projeto aparentes, vão ser apresentados em quatro grupos de três projetos de mistura de concreto, cada grupo tendo propriedades ou características similares.

Exemplos Comparativos 9a - 9c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 9a - 9c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), a um assentamento de 10,2 cm (4 in) e a um ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	9a	9b	9c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	128,3 (370)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00/ t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	544,4 (1.570)	509,7 (1.470)	575,6 (1.660)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	589,5 (1.700)	589,5 (1.700)	594,4 (1.714)	9,36/t
água potável, kg/m ³	97,1	97,1	91,9	despre-

(lb/yd ³)	(280)	(280)	(265)	zível
Daravair 1400 (ar en- tranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/g alão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/g alão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto a- parente	234	191	207	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	47,36 (36,21)	50,54 (38,64)	52,07 (39,82)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	19,57	80,43	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		49,91 (38,16)		-
vendas totais (%) da instalação de fabrica- ção de concreto		1,08		-

Exemplos Comparativos 10a - 10c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 10a - 10c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	10a	10b	10c	Custo (US\$)
---------------------	-----	-----	-----	-----------------

resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	121,4 (350)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00 /t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/ t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	523,7 (1.510)	492,4 (1.420)	541,0 (1.560)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	603,4 (1.740)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	86,7 (250)	90,2 (260)	83,2 (240)	des- prezi- vel
Daravair 1400 (ar en- tranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/ galão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/ galão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto a- parente	237	189	199	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	46,51 (35,56)	51,48 (39,36)	52,35 (40,02)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	74,23	25,77	0	-

custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	47,80 (36,54)	-
vendas totais (%) da instalação de fabrica- ção de concreto	17,53	-

Exemplos Comparativos 11a - 11c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 11a - 11c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 cm (4 in) e ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	11a	11b	11c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	104,00 /t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/ t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	530,6 (1.530)	499,4 (1.440)	530,6 (1.530)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	605,5 (1.746)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	98,8 (285)	97,1 (280)	des- prezi- vel
Daravair 1400 (ar en-	0	0	0	0,99/L

tranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)				(3,75/ galão)
Daracem 65 (red. de á- gua), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/ galão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto a- parente	232	206	226	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	54,23 (41,46)	57,08 (43,64)	59,78 (45,70)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	6,81	44,35	48,84	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		58,21 (44,50)		-
vendas totais (%) da instalação de fabrica- ção de concreto		12,81		-

Exemplos Comparativos 12a - 12c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 12a - 12c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	12a	12b	12c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-

assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	104,00 /t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/ t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	482,0 (1.390)	464,7 (1.340)	495,9 (1.430)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	593,0 (1.710)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	88,4 (255)	95,4 (275)	88,4 (255)	des- prezi- vel
Daravair 1400 (ar entra- nhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/ galão)
Daracem 65 (red. de á- gua), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/ galão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto apa- rente	224	212	218	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	53,96 (41,25)	57,62 (44,05)	60,22 (46,04)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	77,31	22,69	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		54,79 (41,89)		-

vendas totais (%) da instalação de fabricação de concreto	68,58	-
---	-------	---

Os projetos de mistura de concreto otimizados apresentados a seguir, de acordo com os Exemplos 9 - 12, foram produzidos de acordo com um processo DOC aperfeiçoado e são intencionados para substituir os 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 9a - 12c. Cada projeto de mistura otimizado substitui três projetos de mistura de atributos similares (por exemplo, o projeto de mistura otimizado do Exemplo 9 substitui os projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 9a - 9c). O procedimento de otimização assumiu uma absorção percentual para areia e pedra de 1,9% e 1,8%, respectivamente, e um percentual de umidade de 4,57 e 3,18%, respectivamente.

Exemplo	9	10	11	12	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	116,5 (336)	101,6 (293)	130,4 (376)	125,5 (362)	104,00 /t
poeira de cinzas do tipo C,	35,0 (101)	30,5 (88)	39,2 (113)	37,8 (109)	47,00/ t

kg/m ³ (lb/yd ³)					
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	613,1 (1.768)	596,8 (1.721)	604,1 (1.742)	579,5 (1.671)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), g/m ³ (lb/yd ³)	508,4 (1.466)	495,6 (1.429)	501,5 (1.446)	481,0 (1.387)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	99,9 (288)	91,2 (263)	99,9 (288)	92,2 (266)	des- prezi- vel
Daravair, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	41,41 (1,4)	0	41,41 (1,4)	0,99/L (3,75/ galão)
% de ar	2,5	5,6	2,5	5,2	1,49/L (5,65/ galão)
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	44,71 (34,18)	41,05 (31,38)	47,53 (36,34)	45,90 (35,09)	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	45,24 (34,59)				-
Economia de custo, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	5,22 (3,99)	6,75 (5,16)	10,67 (8,16)	8,89 (6,80)	-
Economia de custo médio ponderal da instalação de fabricação,	8,71 (6,66)				-

US\$/m ³ (US\$/yd ³)		
---	--	--

Cada projeto de mistura aperfeiçoado dos Exemplos 9 - 12 é capaz de substituir os projetos de mistura padronizados preexistentes de tipos similares, porque satisfaz os critérios de todas as projetos de mistura, enquanto tendo também um custo reduzido. O número reduzido de projetos de mistura é uma economia de custo adicional, pois simplifica o processo de produção global.

A economia de custo absoluta variou de um nível baixo de US\$2,73 por m³ (US\$2,04 por jarda) (Exemplo 9 relativo ao Exemplo Comparativo 9a) a um nível alto de US\$14,68 por m³ (US\$10,96 por jarda) (Exemplo 12 relativo ao Exemplo Comparativo 12c). O custo médio ponderado dos projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 5a - 8c, com base no percentual de cada concreto vendida pela instalação de fabricação, é US\$55,24 por m³ (US\$41,24 por jarda) (considerando 27 de outubro de 2005). O custo médio ponderado para a produção de concreto, usando quatro projetos de mistura baseados nos percentuais de vendas existentes para os 12 projetos de mistura preexistentes do produtor vai ser US\$46,34 por m³ (US\$34,59 por jarda), ao mesmo custo dos materiais por componente. A economia de custo global média para a instalação de fabricação vai ser, portanto, de US\$8,92 por m³ (US\$6,66 por jarda), considerando que o produtor substituísse os 12 projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 9a - 12c com os projetos de mistura otimizados dos Exemplos 9 - 12 e continuasse a produzir para

a mesma distribuição de concreto como antes.

Exemplos 13 - 16

Os Exemplos 13 - 16 ilustram quatro projetos de mistura de concreto otimizados, que foram preparados usando o processo DOC aperfeiçoado aqui descrito. Os quatro projetos de mistura dos Exemplos 13 - 16 podem substituir doze projetos de mistura de concreto padronizados de uma instalação de fabricação de concreto existente, que usam os mesmos 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 1a - 4c, mas que produzem concreto usando um diferente conjunto de matérias-primas. Cada projeto de mistura dos Exemplos 13 - 16 corresponde a um grupo de três projetos de mistura preexistentes de tipo similar, que garantem uma resistência mecânica mínima, a um assentamento específico, e um percentual de ar entranhado, quando transferido para o cliente. Os projetos de mistura preexistentes da instalação de fabricação de concreto, os seus componentes, o custo (revisto em 27 de outubro de 2005) e os fatores K de projeto aparentes, vão ser apresentados em quatro grupos de três projetos de mistura de concreto, cada grupo tendo propriedades ou características similares.

Exemplos Comparativos 13a - 13c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 13a - 13c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), a um assentamento de 10,2 cm (4 in) e a um ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	13a	13b	13c	Custo
---------------------	-----	-----	-----	-------

				(US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	128,3 (370)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	544,4 (1.570)	509,7 (1.470)	575,6 (1.660)	8,12/t
cascalho miúdo, kg/m ³ (lb/yd ³)	589,5 (1.700)	589,5 (1.700)	594,4 (1.714)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	97,1 (280)	91,9 (265)	despre- zível
Daravair 1400 (ar entra- nhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/ga lão)
Daracem 65 (red. de á- gua), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/ga lão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto apa- rente	234	191	207	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	47,27 (36,14)	50,45 (38,57)	51,99 (39,75)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	19,57	80,43	0	-

custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	49,84 (38,10)	-
vendas totais (%) da instalação de fabricação de concreto	1,08	-

Exemplos Comparativos 14a - 14c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 14a - 14c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	14a	14b	14c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	121,4 (350)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	523,7 (1.510)	492,4 (1.420)	541,0 (1.560)	8,12/t
cascalho miúdo, kg/m ³ (lb/yd ³)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	603,4 (1.740)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	86,7 (250)	90,2 (260)	83,2 (240)	desprezível

Daravair 1400 (ar en- tranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/gal ão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/gal ão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto apa- rente	237	189	199	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	46,43 (35,50)	51,39 (39,29)	52,25 (39,95)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	74,23	25,77	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		47,70 (36,47)		-
vendas totais (%) da instalação de fabrica- ção de concreto		17,53		-

Exemplos Comparativos 15a - 15c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 15a - 15c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 cm (4 in) e ar 5 entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	15a	15b	15c	Custo (US\$)
resistência mecânica	27,6	27,6	27,6	-

compressiva, MPa (psi)	(4.000)	(4.000)	(4.000)	
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	104,00 /t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/ t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	530,6 (1.530)	499,4 (1.440)	530,6 (1.530)	8,12/t
cascalho miúdo, kg/m ³ (lb/yd ³)	605,5 (1.746)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	98,8 (285)	97,1 (280)	des- prezi- vel
Daravair 1400 (ar en- tranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/ galão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/ galão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto apa- rente	232	206	226	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	54,14 (41,39)	56,99 (43,57)	59,69 (45,63)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	6,81	44,35	48,84	-
custo ponderal médio,	58,12			-

US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	(44,43)	
vendas totais (%) da instalação de fabricação de concreto	12,81	-

Exemplos Comparativos 16a - 16c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 16a - 16c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 5 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	16a	16b	16c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	104,00/ t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	482,0 (1.390)	464,7 (1.340)	495,9 (1.430)	8,12/t
cascalho miúdo, kg/m ³ (lb/yd ³)	593,0 (1.710)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	88,4 (255)	95,4 (275)	88,4 (255)	desprezível
Daravair 1400 (ar entra-	118,29	147,87	118,29	0,99/L

nhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	(4)	(5)	(4)	(3,75/g alão)
Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/g alão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto aparente	224	212	218	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	53,88 (41,19)	57,53 (43,98)	60,13 (45,97)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	77,31	22,69	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	54,70 (41,82)			-
vendas totais (%) da instalação de fabricação de concreto	68,58			-

Os projetos de mistura de concreto otimizados apresentados a seguir, de acordo com os Exemplos 13 - 16, foram produzidos de acordo com um processo DOC aperfeiçoado e são intencionados para substituir os 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 13a - 16c. Cada projeto de mistura otimizado substitui três projetos de mistura de atributos similares (por exemplo, o projeto de mistura otimizado do Exemplo 9 substitui os projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 9a - 9c). O procedimento de otimização assumiu uma absorção percentual para areia e pedra de 1,9% e

1,8%, respectivamente, e um percentual de umidade de 4,57 e 3,18%, respectivamente.

Exemplo	13	14	15	16	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	116,5 (336)	101,6 (293)	130,4 (376)	125,5 (362)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	35,0 (101)	30,5 (88)	39,2 (113)	37,8 (109)	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	613,1 (1.768)	596,8 (1.721)	604,1 (1.742)	579,5 (1.671)	8,12/t
cascalho miúdo, g/m ³ (lb/yd ³)	508,4 (1.466)	495,6 (1.429)	501,5 (1.446)	481,0 (1.387)	9,36/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	99,9 (288)	91,2 (263)	99,9 (288)	92,2 (266)	desprezível
Daravair, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	41,41 (1,4)	0	41,41 (1,4)	0,99/L (3,75/galão)
% de ar	2,5	5,8	2,6	5,8	1,49/L (5,65/galão)
custo, US\$/m ³ ,	45,45	41,51	48,92	46,37	-

(US\$/yd ³)	(34,75)	(31,74)	(37,40)	(35,45)	
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	45,83 (35,04)				-
Economia de cus- to, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	4,37 (3,34)	6,19 (4,73)	9,19 (7,03)	8,33 (6,37)	-
Economia de custo médio ponderal da instalação de fabricação, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	8,03 (6,14)				-

Cada projeto de mistura aperfeiçoado dos Exemplos 13 - 16 é capaz de substituir os projetos de mistura padronizados preexistentes de tipos similares, porque satisfaz os critérios de todas as projetos de mistura, enquanto tendo também um custo reduzido. O número reduzido de projetos de mistura é uma economia de custo adicional, pois simplifica o processo de produção global.

A economia de custo absoluta variou de um nível baixo de US\$2,14 por m³ (US\$1,60 por jarda) (Exemplo 17 relativo ao Exemplo Comparativo 17a) a um nível alto de US\$13,43 por m³ (US\$10,03 por jarda) (Exemplo 20 relativo ao Exemplo Comparativo 20c). O custo médio ponderado dos projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 17a - 20c, com base no percentual de cada concreto vendida pela instalação de fabricação, é US\$54,10 por m³ (US\$40,39

por jarda) (considerando 27 de outubro de 2005). O custo médio ponderado para a produção de concreto, usando quatro projetos de mistura baseados nos percentuais de vendas existentes para os 12 projetos de mistura preexistentes do produtor vai ser US\$46,40 por m³ (US\$34,64 por jarda), ao mesmo custo dos materiais por componente. A economia de custo global média para a instalação de fabricação vai ser, portanto, de US\$7,70 por m³ (US\$5,75 por jarda), considerando que o produtor substituísse os 12 projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 17a - 20c com os projetos de mistura otimizados dos Exemplos 17 - 20 e continuasse a produzir para a mesma distribuição de concreto como antes.

Exemplos 17 - 20

Os Exemplos 17 - 20 ilustram quatro projetos de mistura de concreto otimizados, que foram preparados usando o processo DOC aperfeiçoado aqui descrito. Os quatro projetos de mistura dos Exemplos 17 - 20 podem substituir doze projetos de mistura de concreto padronizados de uma instalação de fabricação de concreto existente, que usam os mesmos 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 1a - 4c, mas que produzem concreto usando um diferente conjunto de matérias-primas. Cada projeto de mistura dos Exemplos 17 - 20 corresponde a um grupo de três projetos de mistura preexistentes de tipo similar, que garantem uma resistência mecânica mínima, a um assentamento específico, e um percentual de ar entranhado, quando transferido para o cliente. Os projetos de mistura preexistentes da instalação de fabricação de concreto, os seus componentes, o custo (revisto em 27 de

outubro de 2005) e os fatores K de projeto aparentes, vão ser apresentados em quatro grupos de três projetos de mistura de concreto, cada grupo tendo propriedades ou características similares.

5 Exemplos Comparativos 17a - 17c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 17a - 17c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), a um assentamento de 10,2 cm (4 in) e a um ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	17a	17b	17c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	128,3 (370)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	544,4 (1.570)	509,7 (1.470)	575,6 (1.660)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	589,5 (1.700)	589,5 (1.700)	594,4 (1.714)	6,25/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	97,1 (280)	91,9 (265)	desprezível
Daravair 1400 (ar entranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/galão)

Daracem 65 (red. de água), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/galão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto aparente	234	191	207	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	46,58 (35,61)	49,59 (37,91)	51,47 (39,35)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	19,57	80,43	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	49,00 (37,46)			-
vendas totais (%) da instalação de fabricação de concreto	1,08			-

Exemplos Comparativos 18a - 18c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 18a - 18c têm uma resistência mecânica de projeto de 20,7 MPa (3.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	18a	18b	18c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-

cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	121,4 (350)	163,0 (470)	146,7 (423)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	523,7 (1.510)	492,4 (1.420)	541,0 (1.560)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	603,4 (1.740)	6,25/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	86,7 (250)	90,2 (260)	83,2 (240)	despre- zível
Daravair 1400 (ar entra- nhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/ga lão)
Daracem 65 (red. de á- gua), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	437,69 (14,8)	1,49/L (5,65/ga lão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto apa- rente	237	189	199	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	45,53 (34,81)	50,32 (38,47)	39,37 (39,35)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	74,23	25,77	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		46,76 (35,75)		-

vendas totais (%) da instalação de fabricação de concreto	17,53	-
---	-------	---

Exemplos Comparativos 19a - 19c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 19a - 19c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 cm (4 in) e ar entranhado mínimo (1,5%).

Exemplo Comparativo	19a	19b	19c	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	530,6 (1.530)	499,4 (1.440)	530,6 (1.530)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	605,5 (1.746)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	6,25/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	97,1 (280)	98,8 (285)	97,1 (280)	despre- zível
Daravair 1400 (ar en- tranhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	0	0,99/L (3,75/ga lão)

Daracem 65 (red. de água), (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/ga lão)
% de ar	1,5	1,5	1,5	-
fator K de projeto a- parente	232	206	226	-
custo, (US\$/yd ³)	53,28 (40,73)	55,96 (42,78)	58,82 (44,97)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	6,81	44,35	48,84	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	57,17 (43,71)			-
vendas totais (%) da instalação de fabrica- ção de concreto	12,81			-

Exemplos Comparativos 20a - 20c

Os três projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 20a - 20c têm uma resistência mecânica de projeto de 27,6 MPa (4.000 psi), um assentamento de 10,2 centímetros (4 polegadas) e ar entranhado substancial (5%).

Exemplo Comparativo	20a	20b	20c	Custo (US\$)
resistência mecânica com- pressiva, MPa (psi)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	10,2 (4)	10,2 (4)	10,2 (4)	-

cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	163,0 (470)	195,6 (564)	179,3 (517)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	34,7 (100)	0	0	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	482,0 (1.390)	464,7 (1.340)	495,9 (1.430)	8,12/t
pedra 2,5 cm (1 in), kg/m ³ (lb/yd ³)	593,0 (1.710)	606,9 (1.750)	606,9 (1.750)	6,25/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	88,4 (255)	95,4 (275)	88,4 (255)	desprezi- vel
Daravair 1400 (ar entra- nhado), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4)	147,87 (5)	118,29 (4)	0,99/L (3,75/gal ão)
Daracem 65 (red. de á- gua), cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	0	535,28 (18,1)	1,49/L (5,65/gal ão)
% de ar	5,0	5,0	5,0	-
fator K de projeto apa- rente	224	212	218	-
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	52,84 (40,40)	56,32 (43,06)	59,08 (45,17)	-
distribuição de vendas dentro do grupo, %	77,31	22,69	0	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)		53,63 (41,00)		-
vendas totais (%) da ins- talação de fabricação de concreto		68,58		-

Os projetos de mistura de concreto otimizados apresentados a seguir, de acordo com os Exemplos 17 - 20, foram produzidos de acordo com um processo DOC aperfeiçoado e são intencionados para substituir os 12 projetos de mistura dos Exemplos Comparativos 17a - 20c. Cada projeto de mistura otimizado substitui três projetos de mistura de atributos similares (por exemplo, o projeto de mistura otimizado do Exemplo 17 substitui os projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 17a - 17c). O procedimento de otimização assumiu uma absorção percentual para areia e pedra de 1,9% e 3,2%, respectivamente, e um percentual de umidade de 4,57 e 3,18%, respectivamente.

Exemplo	17	18	19	20	Custo (US\$)
resistência mecânica compressiva, MPa (psi)	20,7 (3.000)	20,7 (3.000)	27,6 (4.000)	27,6 (4.000)	-
assentamento, cm (in)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	12,7 (5)	-
cimento tipo 1, kg/m ³ (lb/yd ³)	116,5 (335)	101,6 (302)	130,4 (374)	125,5 (366)	104,00/t
poeira de cinzas do tipo C, kg/m ³ (lb/yd ³)	35,0 (101)	31,6 (91)	38,8 (112)	38,1 (110)	47,00/t
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	611,1 (1.762)	587,1 (1.693)	603,4 (1.740)	575,0 (1.658)	10,80/t

pedra 2,5 cm (1 in), g/m ³ (lb/yd ³)	493,1 (1.422)	473,7 (1.366)	486,9 (1.404)	463,7 (1.337)	6,25/t
água potável, kg/m ³ (lb/yd ³)	102,3 (295)	95,0 (274)	102,3 (295)	93,6 (270)	desprezível
Daravair, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	0	41,41 (1,4)	0	41,41 (1,4)	3,75/galão
% de ar	2,4	558	2,2	5,5	1,49/L (5,65/galão)
custo, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	44,49 (34,01)	41,37 (31,63)	47,25 (36,12)	45,96 (35,14)	-
custo ponderal médio, US\$/m ³ , (US\$/yd ³)	45,31 (34,64)				-
Economia de custo, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	4,51 (3,45)	5,39 (4,12)	9,93 (7,59)	7,43 (5,68)	-
Economia de custo médio ponderal da instalação de fabricação, US\$/m ³ (US\$/yd ³)	4,40 (5,75)				-

Cada projeto de mistura aperfeiçoado dos Exemplos 13 - 16 é capaz de substituir os projetos de mistura padro-

nizados preexistentes de tipos similares, porque satisfaz os critérios de todas as projetos de mistura, enquanto tendo também um custo reduzido. O número reduzido de projetos de mistura é uma economia de custo adicional, pois simplifica o processo de produção global.

A economia de custo absoluta variou de um nível baixo de US\$1,86 por m³ (US\$1,39 por jarda) (Exemplo 13 relativo ao Exemplo Comparativo 13a) a um nível alto de US\$14,11 por m³ (US\$10,53 por jarda) (Exemplo 16 relativo ao Exemplo Comparativo 16c). O custo médio ponderado dos projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 13a - 16c, com base no percentual de cada concreto vendida pela instalação de fabricação, é US\$55,16 por m³ (US\$41,18 por jarda) (considerando 27 de outubro de 2005). O custo médio ponderado para a produção de concreto, usando quatro projetos de mistura baseados nos percentuais de vendas existentes para os 12 projetos de mistura preexistentes do produtor vai ser US\$46,94 por m³ (US\$35,04 por jarda), ao mesmo custo dos materiais por componente. A economia de custo global média para a instalação de fabricação vai ser, portanto, de US\$8,22 por m³ (US\$6,14 por jarda), considerando que o produtor substituísse os 12 projetos de mistura preexistentes dos Exemplos Comparativos 13a - 16c com os projetos de mistura otimizados dos Exemplos 13 - 16 e continuasse a produzir para a mesma distribuição de concreto como antes.

Os dois exemplos a seguir são projetos de mistura recém-otimizados para concreto de autonivelamento. O concreto de autonivelamento produzido de acordo com os projetos de

mistura dos Exemplos 21 e 22 é caracterizado como tendo um assentamento suficientemente alto, de modo que pode provocar nivelamento, devido à gravidade apenas, sem precisar ser trabalhado, e tendo também uma coesão suficiente, de modo que não se segrega significativamente (isto é, não se separa em componentes mais pesados e mais leves devido à gravidade).

Exemplo 21

O projeto de mistura apresentado a seguir, para uma composição de concreto de autonivelamento, foi projetado usando o processo DOC aperfeiçoado aqui descrito. Essas composições são caracterizadas como tendo ar entranhado e tendo um assentamento superior a 20,3 cm (8 in), quando em uma condição úmida antes de cura, e uma resistência mecânica compressiva de 27,6 MPa (4.000 psi), após 7 dias de cura. Todos os pesos são SSD.

Componente	Quantidade
cimento, kg/m ³ (lb/yd ³)	180,0 (519)
poeira de cinzas, kg/m ³ (lb/yd ³)	45,1 (130)
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	644,0 (1.857)
pedra, kg/m ³ (lb/yd ³)	431,8 (1.245)
água, kg/m ³ (lb/yd ³)	90,5 (261)
Daravair, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	38,44 (1,3)
P.NC534, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	343,05 (11,6)
Glenium 3030, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)*	147,87 (5,0)

Nota: Glenium adicionado na instalação de fabricação para o 4° assentamento; Daravair ajustado na instalação de fabricação para um mín. de 5% de ar; acelerador adicionado no local, seguido imediatamente por ajuste do assentamento no local com Glenium 3030 adicional, se necessário.

Exemplo 22

O projeto de mistura apresentado a seguir, para uma composição de concreto de autonivelamento, foi projetado usando o processo DOC aperfeiçoado aqui descrito. Essas composições são caracterizadas como tendo ar entranhado e tendo um assentamento superior a 20,3 cm (8 in), quando em uma condição úmida antes de cura, e uma resistência mecânica compressiva de 27,6 MPa (4.000 psi), após 7 dias de cura. Todos os pesos são SSD.

Componente	Quantidade
cimento, kg/m ³ (lb/yd ³)	127,0 (366)
poeira de cinzas, kg/m ³ (lb/yd ³)	38,1 (110)
areia, kg/m ³ (lb/yd ³)	624,6 (1.801)
pedra, kg/m ³ (lb/yd ³)	422,7 (1.219)
água, kg/m ³ (lb/yd ³)	90,5 (261)
Daravair, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	38,44 (1,3)
P.NC534, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)	118,29 (4,0)
Glenium 3030, cm ³ /cwt (fl.oz/cwt)*	59,15 (2,0)

15 Nota: Glenium adicionado na instalação de fabricação com a água da batelada; Daravair ajustado na instalação de fabricação para um mín. de 5% de ar; ajuste do assenta-

mento no local com Glenium 3030.

A presente invenção pode ser representada em outras formas específicas, sem afastar-se do seu espírito ou características essenciais. As modalidades descritas devem ser consideradas em todos os aspectos apenas como ilustrativas e não restritivas. O âmbito da invenção é, portanto, indicado pelas modalidades em anexo, em vez de pela descrição precedente. Todas as modificações que estejam dentro do significado e da faixa de equivalência das reivindicações vão estar aqui abrangidas dentro do âmbito delas.

REIVINDICAÇÕES

1. Processo implementado por computador para projetar, para um determinado conjunto de matérias-primas, um projeto de mistura de concreto otimizado tendo resistência mecânica e assentamento desejados, a um custo mais baixo do que um projeto de mistura não otimizado, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

introdução no sistema de computação de dados relativos ao tamanho de partícula e à densidade de compactação de partículas para vários componentes sólidos;

introdução no sistema de computação de uma resistência mecânica alvo;

introdução no sistema de computação de um fator K de projeto selecionado, para uso na determinação de uma resistência mecânica prevista, para cada uma dentre uma pluralidade de projetos de mistura de concreto, gerados pelo sistema de computação, o fator K de projeto sendo selecionado com base na resistência mecânica alvo de entre uma pluralidade de diferentes fatores K que variam com a resistência mecânica do concreto, para o determinado conjunto de matérias-primas;

determinação pelo sistema de computação de uma pluralidade de projeto de mistura de concreto, tendo proporções variáveis de matérias-primas;

determinar pelo sistema de computação de uma proporção de água que vai produzir ou se aproximar de um assentamento predeterminado para cada um dos projetos de mistura de concreto;

determinação pelo sistema de computação de, com base no fator K de projeto selecionado e na proporção de água determinada para produzir ou se aproximar do assentamento predeterminado, uma resistência mecânica prevista para cada um dos projetos de mistura de concreto;

comparação pelo sistema de computação da resistência mecânica previsto para cada projeto de mistura de concreto com as resistência mecânica, para identificar um ou mais projetos de mistura de concreto que são melhor otimizados com relação à resistência mecânica, comparada aos outros da pluralidade de projetos de mistura de concreto.

2. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

introdução no sistema de computação de dados relativos ao custo das matérias-primas; e

identificação pelo sistema de computação de um ou mais projetos de mistura tendo um custo mais baixo, comparado aos outros de uma pluralidade de projetos de mistura de concreto.

3. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto selecionado considera um efeito na resistência mecânica do concreto da inclusão de um agente reforçador de amina.

4. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto selecionado considera um efeito na resistência mecânica do concreto de inclusão de pelo menos um de poeira de cinzas ou fumo de sílica.

5. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto selecionado considera um efeito na resistência mecânica do concreto de usar um aparelho de mistura específico.

5 6. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

preparar uma amostra de teste de concreto com base em um projeto de mistura de concreto selecionado;

10 determinar uma resistência mecânica para a amostra de teste de concreto; e

gerar pelo sistema de computação um outro projeto de mistura de concreto, que produza uma composição de concreto tendo uma resistência mecânica, que se correlaciona mais estreitamente com a resistência mecânica alvo, comparada com o projeto de mistura de concreto selecionado.

15 7. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

preparar uma amostra de teste de concreto com base em um projeto de mistura de concreto selecionado;

20 determinar um assentamento para a amostra de teste de concreto; e

gerar pelo sistema de computação um outro projeto de mistura de concreto, que produza uma composição de concreto tendo um assentamento, que se correlaciona mais estreitamente com o assentamento alvo, comparado ao projeto de mistura de concreto selecionado.

25 8. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

identificar um projeto de mistura preexistente usado por uma instalação de fabricação para a produção de uma composição de concreto;

determinar, com base em uma resistência mecânica de projeto e uma razão de componentes dentro de uma composição de concreto, usando o projeto de mistura preexistente, um fator K de projeto aparente para o projeto de mistura preexistente; e

projetar pelo sistema de computação, de acordo com a reivindicação 1, um ou mais novos projetos de mistura tendo um fator K de projeto que é superior ao fator K de projeto aparente para o projeto de mistura preexistente.

9. Processo, de acordo com a reivindicação 8, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

melhorar e/ou recalibrar o equipamento usado pela instalação de fabricação na produção de concreto, de modo que o concreto produzido pela instalação de fabricação, usando o equipamento melhorado e/ou recalibrado, tenha uma resistência mecânica efetiva que se correlaciona mais estreitamente com a resistência mecânica de projeto, comparado com um equipamento anterior antes da melhoria e/ou recalibração.

10. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

para um determinado projeto de mistura que produz uma composição de concreto tendo assentamento, resistência mecânica e razão de pasta de cimento para agregado, o sistema de computação projeta um projeto de mistura modificado

tendo um assentamento modificado, mas uma resistência mecânica substancialmente similar, por alteração da razão de pasta de cimento para agregado.

5 11. Processo de produção de uma composição de concreto, **CARACTERIZADO** pelo fato de que usa um projeto de mistura de concreto que é otimizado de acordo com o processo do tipo referido em qualquer uma das reivindicações de 1 a 10, a composição de concreto tendo uma razão de matérias-primas substancialmente otimizada.

10 12. Composição de concreto tendo uma razão de matérias-primas otimizada, produzida de acordo com o processo do tipo referido na reivindicação 11, **CARACTERIZADA** pelo fato de que tem um fator K de projeto de assinatura, que é único comparado com um fator K de projeto aparente, para uma
15 composição de concreto menos otimizada, produzida usando o determinado conjunto de matérias-primas.

20 13. Composição de concreto tendo uma razão de matérias-primas substancialmente otimizada, produzida de acordo com o processo do tipo referido na reivindicação 11, **CARACTERIZADA** pelo fato de que tem um fator K de assinatura, que é único para o determinado conjunto de matérias-primas, comparado com um fator K para concreto tendo resistência mecânica similar, mas produzido de um diferente conjunto de matérias-primas.

25 14. Processo para projetar, em um sistema de computação para a otimização de projeto de uma composição de concreto, para um determinado conjunto de matérias-primas, um projeto de mistura de concreto otimizado tendo resistência mecânica e assentamento desejados, a um custo mais baixo

do que um projeto de mistura não otimizado, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

receber, pelo sistema de computação, dados relativos ao tamanho de partícula e à densidade de compactação de 5 partículas para uma pluralidade de componentes sólidos;

receber, pelo sistema de computação, uma resistência mecânica alvo;

receber, pelo sistema de computação, um fator K de projeto selecionado, para uso na determinação de uma resistência mecânica prevista para todos de uma pluralidade de 10 projetos de mistura de concreto, gerados pelo sistema de computação, o fator K de projeto sendo selecionado, com base na resistência mecânica alvo, dentre uma pluralidade de diferentes fatores K que variam com a resistência mecânica do 15 concreto, para o determinado conjunto de matérias-primas;

projetar, pelo sistema de computação, uma pluralidade de projetos de mistura de concreto tendo proporções variáveis de matérias-primas;

determinar pelo sistema de computação uma proporção de água que vai produzir ou se aproximar de um assentamento predeterminado para cada um dos projetos de mistura de 20 concreto;

determinar pelo sistema de computação, com base no fator K de projeto selecionado e na proporção de água determinada para produzir ou se aproximar do assentamento predeterminado, uma resistência mecânica prevista para cada um 25 dos projetos de mistura de concreto;

comparar, pelo sistema de computação, a resistên-

cia mecânica prevista para cada projeto de mistura de concreto com as resistências mecânicas alvo, para identificar um ou mais projetos de mistura de concreto que são melhor otimizados com relação à resistência mecânica, comparada a outro da pluralidade de projetos de mistura de concreto; e

identificar pelo sistema de computação um ou mais projetos de mistura de concreto, tendo um custo mais baixo, comparados com outro da pluralidade de projetos de mistura de concreto.

10 15. Processo, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda:

receber, pelo sistema de computação, dados relativos ao custo das matérias-primas; e

15 determinar, pelo sistema de computação, com base no custo das matérias-primas, um custo para cada um dentre um ou mais projetos de mistura identificados como sendo melhor otimizados.

20 16. Processo, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto selecionado considera um efeito na resistência mecânica do concreto da inclusão de um agente reforçador de amina, poeira de cinzas ou fumo de sílica, e/ou uso de um aparelho de mistura específico.

25 17. Produto programa de computador **CARACTERIZADO** pelo fato de que contém instruções executáveis para implementar o processo de acordo com qualquer uma das reivindicações de 14 a 16.

18. Processo implementado por computador para re-

projetar um projeto de mistura de concreto preexistente, de modo a produzir um melhor projeto de mistura de concreto otimizado que garante uma resistência mecânica mínima específica a um determinado assentamento, e a um custo mais baixo comparado com o projeto de mistura de concreto preexistente, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

identificar um projeto de mistura de concreto preexistente tendo uma razão inicial de componentes, uma resistência mecânica de projeto, e um fator K de projeto aparente baseado na resistência mecânica de projeto e na razão inicial dos componentes; e

projetar, pelo sistema de computação, um projeto de mistura de concreto revisto, tendo uma razão revista de componentes, usando um fator K de projeto revisto que é selecionado com base na resistência mecânica de projeto, e que corresponde mais estreitamente a um fator K ótimo, correspondente à resistência mecânica de projeto, comparado com o fator K aparente da mistura de concreto ótima de concreto preexistente.

19. Processo, de acordo com a reivindicação 18, **CARACTERIZADO** pelo fato de que as composições de concreto, produzidas usando o projeto de mistura de concreto revisto, têm resistências mecânicas efetivas que correspondem mais consistentemente à resistência mecânica de projeto, comparadas com as composições de concreto produzidas usando o projeto de mistura de concreto preexistente.

20. Processo de produção de uma composição de concreto, **CARACTERIZADO** pelo fato de que usa um projeto de mis-

tura de concreto, que é reprojeto de acordo com o processo de acordo com a reivindicação 18, a composição de concreto tendo uma melhor razão otimizada de matérias-primas, comparada com as composições de concreto produzidas por uso do projeto de mistura de concreto preexistente, de modo a ter a resistênci
5 a resistência mecânica mínima específica a um assentamento predeterminado, e a um custo mais baixo, comparada com as composições de concreto produzidas por uso do projeto de mistura de concreto preexistente.

10 21. Composição de concreto **CARACTERIZADA** pelo fato de que é produzida de acordo com o processo do tipo referido na reivindicação 20.

22. Composição de concreto, de acordo com a reivindicação 21, **CARACTERIZADA** pelo fato de que tem um fator K de projeto de assinatura que é mais alto do que o fator K de projeto aparente de uma composição de concreto produzida, usando o projeto de mistura de concreto preexistente e que se correlaciona mais estreitamente com um fator K ótimo correspondente à resistência mecânica de projeto.

20 23. Composição de matéria, em uma instalação de fabricação de concreto que produz concreto de um determinado conjunto de matérias-primas e/ou variáveis de processamento, **CARACTERIZADA** pelo fato de que compreende uma composição de concreto otimizada produzida pela instalação de fabricação,
25 a composição de concreto otimizada tendo resistência mecânica e assentamento mínimos, que são obtidos por mistura de uma combinação otimizada de cimento hidráulico, agregados, água, e um ou mais componentes opcionais, cuja combinação

otimizada é determinada por uso de um processo de otimização, no qual um projeto de mistura preexistente, usado previamente pela instalação de fabricação é reprojeto e otimizado utilizando um fator K de projeto para uso na equação de Feret de resistência mecânica, que corresponde a uma resistência mecânica de projeto da composição de concreto otimizada, e que é selecionado de uma pluralidade de fatores K, que variam com base na resistência mecânica para um determinado conjunto de matérias-primas e/ou variáveis de processamento, o fator K de projeto da composição de concreto otimizada sendo uma assinatura que diferencia a composição de concreto otimizada de uma composição de concreto menos otimizada, usando o projeto de mistura preexistente.

24. Composição de matéria, de acordo com a reivindicação 23, **CARACTERIZADA** pelo fato de que a composição de concreto otimizada é única, comparada com as composições produzidas por qualquer outra instalação de fabricação, tendo o seu próprio conjunto único de matérias-primas e/ou variáveis de processamento.

25. Composição de matéria, em uma instalação de fabricação de concreto que produz concreto de um determinado conjunto de matérias-primas e/ou variáveis de processamento, **CARACTERIZADA** pelo fato de que compreende uma composição de concreto otimizada produzida pela instalação de fabricação, a composição de concreto otimizada tendo resistência mecânica e assentamento mínimos, que são obtidos por mistura de uma combinação otimizada de cimento hidráulico, agregados, água e, um ou mais componentes opcionais, cuja combinação

otimizada é determinada por uso de um processo de otimização, no qual um projeto de mistura otimizado é projetado utilizando um fator K de projeto, para uso na equação de Ferret de resistência mecânica, que corresponde a uma resistência mecânica de projeto da composição de concreto otimizada, e que é selecionado de uma pluralidade de fatores K que variam com base na resistência mecânica e correspondem ao conjunto único de matérias-primas e/ou variáveis de processamento, o fator K da composição de concreto otimizada sendo uma assinatura, que diferencia a composição de concreto otimizada de qualquer outra composição de concreto produzida usando as matérias-primas e/ou variáveis de processamento, que diferem do conjunto único de matérias-primas e/ou variáveis de processamento empregado pela instalação de fabricação.

26. Processo de produção de composições de concreto aperfeiçoadas, em uma instalação de fabricação de concreto que produz uma pluralidade de diferentes composições de concreto, tendo diferentes resistências mecânicas, as composições de concreto aperfeiçoadas tendo resistências mecânicas efetivas que se correlacionam mais estreitamente com as suas respectivas resistências mecânicas de projeto, o processo **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

identificar uma pluralidade de projetos de mistura de concreto preexistentes da instalação de fabricação de concreto precisando de melhor otimização, em que pelo menos dois dos projetos de mistura têm diferentes resistências mecânicas de projeto;

selecionar uma pluralidade de diferentes fatores K de projeto, para uso no projeto de melhores projetos de mistura de concreto otimizados, em que os diferentes fatores K se correlacionam com as, e variam com base nas diferentes resistências mecânicas de projeto selecionadas;

projetar, usando a pluralidade de diferentes fatores K de projeto, uma pluralidade de projetos de mistura de concreto novos ou revistos, tendo razões de componentes novas ou revistas, comparados com os projetos de mistura preexistentes; e

produzir, com base nos projetos de mistura de concreto novos ou revistos, composições de concreto revistas tendo resistências mecânicas efetivas que se correlacionam mais estreitamente com as suas respectivas resistências mecânicas de projeto previamente comparadas com as composições de concreto preexistentes, produzidas por uso dos projetos de mistura preexistentes,

em que as composições de concreto revistas garantem uma resistência mecânica e um assentamento específicos, a um custo mais baixo, comparadas com as composições de concreto preexistentes.

27. Processo de produção de composições de concreto otimizadas, de acordo com a reivindicação 26, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda fazer ajustes de assentamento em uma ou mais composições de concreto revistas, por adição, ou alteração da proporção de uma mistura dentro de uma ou mais composições de concreto.

28. Processo de produção de composições de concre-

to otimizadas, de acordo com a reivindicação 26, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda melhorar e/ou ajustar o equipamento produtivo utilizado pela instalação de fabricação, de modo que cada componente seja pesado ou medido de
5 outro modo com uma precisão de cerca de $\pm 2,0\%$.

29. Processo de produção de composições de concreto otimizadas, de acordo com a reivindicação 26, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda monitorar o teor de umidade dos componentes sólidos e alterar as quantidades medidas
10 dos componentes sólidos, e adicionar água de batelada, usada para produzir uma composição de concreto, com base nas variações detectadas no teor de umidade dos componentes sólidos.

30. Processo de produção de composições de concreto aperfeiçoadas, de acordo com a reivindicação 26, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda transferir uma composição
15 de concreto, usando um caminhão de mistura de concreto que inclui um recipiente contendo uma mistura que altera o assentamento, e dosar uma quantidade selecionada da mistura em um tambor de mistura conduzindo a composição de concreto, de
20 modo a alterar o assentamento de uma maneira desejada.

31. Composição de concreto **CARACTERIZADA** pelo fato de que é produzida de acordo com o processo de acordo com qualquer uma das reivindicações de 26 a 30.

32. Processo de produção, em uma instalação de fabricação de concreto tendo um determinado conjunto de componentes de matérias-primas, de composições de concreto otimizadas, tendo resistências mecânicas efetivas que refletem
25 mais estreitamente as suas resistências mecânicas previstas

ou de projeto, comparadas com as composições de concreto menos otimizadas, produzidas do determinado conjunto de componentes de matérias-primas, o processo **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

5 proporcionar uma pluralidade de projetos de mistura de concreto otimizados tendo diferentes resistências mecânicas de projeto que foram projetados usando diferentes fatores K de projeto, em que cada um dos diferentes fatores K de projeto foi selecionado, pelo menos em parte, com base
10 na respectiva resistência mecânica de projeto; e

 produzir uma pluralidade de composições de concreto otimizadas, com base nos projetos de mistura de concreto otimizados, cada composição de concreto otimizada tendo uma razão otimizada de componentes, de modo a ter uma resistên-
15 cia mecânica efetiva que reflete mais estreitamente a sua resistência mecânica prevista ou de projeto, comparada com uma composição de concreto menos otimizada, produzida do determinado conjunto de componentes de matérias-primas.

 33. Processo de produção de composições de concreto
20 to otimizadas, de acordo com a reivindicação 32, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda fazer ajustes de assentamento em uma ou mais composições de concreto revistas, por adição alteração da proporção de uma mistura dentro da uma ou mais composições de concreto.

25 34. Processo de produção de composições de concreto aperfeiçoadas, de acordo com a reivindicação 32, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda pesar ou medir de outro modo os componentes de cada composição de concreto, com

uma precisão de cerca de $\pm 2,0\%$.

35. Processo de produção de composições de concreto aperfeiçoadas, de acordo com a reivindicação 32, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda monitorar o teor de
5 umidade dos componentes sólidos e alterar as quantidades medidas dos componentes sólidos, e adicionar água de batelada, usada para produzir uma composição de concreto, com base nas variações detectadas no teor de umidade dos componentes sólidos.

10 36. Processo de produção de composições de concreto aperfeiçoadas, de acordo com a reivindicação 32, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda misturar uma ou mais das composições de concreto otimizadas, usando um caminhão de mistura de concreto que inclui um recipiente contendo uma
15 mistura que altera o assentamento, e dosar uma quantidade selecionada da mistura em um tambor de mistura conduzindo a composição de concreto, para alterar o assentamento de uma maneira desejada.

20 37. Composição de concreto **CARACTERIZADA** pelo fato de que é produzida de acordo com o processo de acordo com qualquer uma das reivindicações de 32 a 36.

25 38. Sistema de construção de concreto, em uma instalação de fabricação de concreto que produz concreto de um determinado conjunto de matérias-primas, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende uma pluralidade de composições de concreto otimizadas produzidas pela instalação de fabricação, pelo menos duas das composições de concreto otimizadas tendo diferentes resistências mecânicas de projeto, cada uma da pluralidade de composições de concreto otimizadas tendo

assentamento e resistência mecânica mínimos garantidos, que são obtidos por mistura de uma combinação otimizada de cimento hidráulico, agregados, água, e um ou mais componentes opcionais, cuja composição otimizada é determinada por uso de um processo de otimização para projetar projetos de mistura otimizados usados pela instalação de fabricação para produzir composições de concreto otimizadas, cada projeto de mistura otimizado sendo projetado por uso de um fator K de projeto, para uso em uma equação de Feret de resistência mecânica que corresponde a uma resistência mecânica de projeto do projeto de mistura otimizado, e que é selecionado de uma pluralidade de fatores K que variam com base na resistência mecânica, cada composição de concreto otimizada tendo um fator K de assinatura, que se diferencia de pelo menos um outro das composições de concreto otimizadas tendo uma diferente resistência mecânica de projeto.

39. Sistema de construção de concreto, de acordo com a reivindicação 38, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto de assinatura de cada composição de concreto otimizada diferencia a composição de concreto otimizada das composições de concreto menos otimizadas produzidas do determinado conjunto de matérias-primas.

40. Sistema de construção de concreto, de acordo com a reivindicação 38, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o fator K de projeto de assinatura de cada composição de concreto otimizada diferencia a composição de concreto otimizada das composições de concreto produzidas de matérias-primas, que diferem do determinado conjunto de matérias-primas usado

pela instalação de fabricação.

41. Processo para determinar se uma composição de concreto existente, tendo uma determinada resistência mecânica de projeto e uma determinada razão de componentes, está superdimensionada, sem ter que (i) preparar uma amostra de teste de concreto; (ii) deixar que endureça; (iii) testar a sua resistência mecânica efetiva; e (iv) comparar a resistência mecânica efetiva da amostra de teste da amostra de teste com a determinada resistência mecânica de projeto, o processo **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

determinar um fator K de projeto aparente para a composição de concreto existente, com base na determinada resistência mecânica de projeto da composição de concreto e da determinada razão de componentes dentro da composição de concreto; e

comparar o fator K de projeto aparente com um fator K mais otimizado que corresponde à determinada resistência mecânica de projeto, e que é selecionado dentre uma pluralidade de diferentes fatores K, que variam com a variação da resistência mecânica do concreto.

42. Processo, de acordo com a reivindicação 41, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda determinar quanto a composição de concreto existente está superdimensionada, por determinação de um desvio entre o fator K de projeto aparente da composição de concreto existente e o fator K mais otimizado.

43. Processo, de acordo com a reivindicação 41, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda reprojeter a

composição de concreto existente por meio de um procedimento de otimização, que utiliza um fator K de projeto revisto, que se correlaciona mais estreitamente com um fator K ótimo para a determinada resistência mecânica de projeto, em que o
5 procedimento de otimização produz uma composição de concreto revista, tendo uma resistência mecânica efetiva, que se correlaciona mais estreitamente com a resistência mecânica de projeto, comparada com a composição de concreto existente.

44. Processo, de acordo com a reivindicação 43,
10 **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda a produção da composição de concreto revista.

45. Composição de concreto revista **CARACTERIZADA** pelo fato de que é produzida de acordo com o processo de acordo com a reivindicação 44.

15 46. Composição de concreto revista, de acordo com a reivindicação 45, **CARACTERIZADA** pelo fato de que tem um fator K de assinatura que a diferencia da composição de concreto existente.

20 47. Processo implementado por computador de modificação de uma composição de concreto produzida de um determinado conjunto de componentes, de modo a ajustar o assentamento sem alterar significativamente a resistência mecânica, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

25 identificar uma composição de concreto existente, que é produzida de acordo com um projeto de mistura otimizado que especifica uma razão específica de componentes, incluindo uma razão de pasta de cimento para agregado, de modo a obter uma resistência mecânica e um assentamento deseja-

dos;

introduzir, em um sistema de computação, dados relativos ao tamanho de partícula e à densidade de compactação de partículas de um ou mais tipos de agregados; e

5 projetar pelo sistema de computação um projeto de mistura de projeto de mistura de concreto revisto, tendo uma razão revista de pasta de cimento para agregados, que produz uma composição de concreto revisto, tendo um assentamento desejado, sem alterar substancialmente a resistência mecânica da composição de concreto revisto, comparada com a composição de concreto existente.

10 48. Processo implementado por computador, de acordo com a reivindicação 47, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o sistema de computação determina ainda uma quantidade revista de cada um dos componentes, usados para a produção da composição de concreto revisto, para produzir uma quantidade desejada da composição de concreto revisto.

15 49. Composição de concreto **CARACTERIZADA** pelo fato de que é produzida de acordo com o processo de acordo com a reivindicação 47 ou 48.

20

RESUMO

"MÉTODOS E SISTEMAS PARA REPROJETAR PROJETOS DE MISTURA DE CONCRETO E INSTALAÇÕES DE FABRICAÇÃO PREEXISTENTES E OTIMIZAÇÃO DE PROJETO E PRODUÇÃO DE CONCRETO".

5 Processos de otimização de projetos podem ser usados para projetar misturas de concreto tendo propriedades otimizadas, incluindo resistência mecânica e assentamento desejados a um custo mínimo. Os processos de otimização de projetos usam um processo implementado por computador, que é
10 capaz de projetar e, virtualmente, testar milhões de composições de concreto hipotéticas, usando algoritmos matemáticos, que inter-relacionam várias variáveis que afetam a resistência mecânica, o assentamento e outros aspectos desejados. O procedimento de otimização de projeto utiliza uma
15 constante (ou fator) K , dentro da equação de Feret de resistência mecânica, que varia (por exemplo, logaritmicamente) com a resistência mecânica do concreto, para qualquer determinado conjunto de entradas de matérias-primas e equipamento de processamento. Isso significa que a eficiência ou efetividade de aglutinação do cimento hidráulico aumenta com o
20 aumento da concentração, desde que o concreto se mantenha otimizado. O conhecimento de como o fator K varia com a eficiência de aglutinação e a resistência mecânica é uma ferramenta potencial para várias circunstâncias. Um processo de produção de concreto pode incluir a medida precisa das matérias-
25 primas, para minimizar a variação entre as resistências mecânicas prevista e efetiva, bem como o controle cuidadoso do teor de água durante todo o processo de produção e distribuição.