



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

(21) **PI 0712026-5 A2**



\* B R P I O 7 1 2 0 2 6 A 2 \*

(22) Data de Depósito: 15/05/2007  
(43) Data da Publicação: 03/01/2012  
(RPI 2139)

(51) Int.Cl.:  
C04B 35/486

**(54) Título:** PÁ PARA UM MOTOR DE TURBINA A GÁS, E, PROCESSO PARA PRODUZIR UM REVESTIMENTO EM PELO MENOS UMA PORÇÃO DE UMA PONTA DE UMA PÁ PARA UM MOTOR DE TURBINA A GÁS

**(30) Prioridade Unionista:** 27/04/2007 US 11/796257, 27/04/2007 US 11/796261, 27/04/2007 US 11/796269, 27/04/2007 US 11/796270, 27/04/2007 US 11/796271, 26/05/2006 US 60/808530, 29/11/2006 US 60/861438, 29/11/2006 US 60/861445, 27/04/2007 US 11/796271, 26/05/2006 US 60/808530, 26/05/2006 US 60/808530, 29/11/2006 US 60/861438, 29/11/2006 US 60/861445, 26/05/2006 US 60/808530, 26/05/2006 US 60/808530

**(73) Titular(es):** Praxair Technology Inc

**(72) Inventor(es):** Albert Feuerstein, Ann Bolcavage, Danny Lee Appleby, Neil Hitchman, Thomas A. Taylor

**(74) Procurador(es):** Momsen, Leonardos & CIA.

**(86) Pedido Internacional:** PCT US2007011587 de 15/05/2007

**(87) Publicação Internacional:** WO 2007/139694de 06/12/2007

**(57) Resumo:** PÁ PARA UM MOTOR DE TURBINA A GÁS, E, PROCESSO PARA PRODUZIR UM REVESTIMENTO EM PELO MENOS UMA PORÇÃO DE UMA PONTA DE UMA PÁ PARA UM MOTOR DE TURBINA A GÁS Esta invenção diz respeito a pás para um motor de turbina a gás, as ditas pás tendo uma extremidade interna adaptada para montagem em um cubo e uma ponta da pá localizada do lado oposto da extremidade interna, e em que pelo menos uma porção da ponta da pá é revestida com um revestimento pulverizado termicamente de um pó de zircônia estabilizado com itria ou itérbia de alta pureza, o dito revestimento pulverizado termicamente tendo uma densidade maior que 88% da densidade teórica com uma pluralidade de macrotrincas verticais dispersa de forma substancialmente homogênea em todo o revestimento, em que uma área transversal do revestimento normal à ponta da pá expõe uma pluralidade de macrotrincas verticais que estende-se pelo menos da metade da espessura do revestimento em comprimento até a espessura completa do revestimento e tendo de cerca de 5 a cerca de 200 macrotrincas verticais por polegada linear (25,4 milímetros) medidas uma linha paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à ponta da pá, e o dito pó de zircônia estabilizado com itria ou itérbia de alta pureza compreendendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 25 por cento em peso de óxido de itrio (itria) ou de cerca de 10 a cerca de 36 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia). Esta invenção também diz respeito a um processo para produzir um revestimento em pelo menos uma porção de uma ponta de uma pá para um motor de turbina a gás.

“PÁ PARA UM MOTOR DE TURBINA A GÁS, E, PROCESSO PARA PRODUZIR UM REVESTIMENTO EM PELO MENOS UMA PORÇÃO DE UMA PONTA DE UMA PÁ PARA UM MOTOR DE TURBINA A GÁS”

### CAMPO DA INVENÇÃO

5                   A invenção diz respeito a pás, tais como pás de turbina e compressor para turbinas a gás, em que as pontas das pás são revestidas com um revestimento pulverizado termicamente feito de pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza, e processos para revestir as pás.

### 10                   FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO

                  Motores de turbina a gás modernos são compostos de três seções ou componentes principais que funcionam juntos para produzir empuxo para propulsão de aeronave. Na seção de compressor, ar ambiente de entrada é comprimido e assim aquecido por inúmeros estágios de pás rotatórias e palhetas estacionárias. Nos estágios iniciais do compressor, as pás são geralmente feitas de ligas de titânio, e nos estágios finais, onde as temperaturas são maiores, as pás são geralmente feitas de ligas a base de ferro ou níquel. O ar comprimido pode ser aquecido a 1.200 °F (649°C) a 1.400 °F (760°C) no último estágio de compressão, onde ele passa para o combustor onde combustível é injetado e queimado. Os gases quentes que saem do combustor podem ter cerca de 2.400 °F (1.316°C), e são direcionados na palheta e pá do primeiro estágio da seção da turbina. Na seção da turbina composta de inúmeros estágios de pás rotatórias e palhetas estacionárias, o trabalho real é extraído dos gases quentes comprimidos que voltam para a turbina que é conectada para acionar a seção do compressor anterior. Uma porção significativa do empuxo do motor vem da seção de ventilador grande na frente do motor, que coleta o ar ambiente e impulsiona-a de volta em uma velocidade alta. O ventilador também é acionado pela seção da turbina.

                  No compressor, os estágios iniciais ou a seção do compressor

inferior são compostos de pás de liga de titânio que giram em uma alta velocidade. As pás são projetadas de maneira tal que suas pontas sejam muito próximas a um anel de vedação estacionário. O propósito da abertura fechada é minimizar o vazamento de gás e permitir que a pressão do ar aumente de um estágio para o seguinte. Pontas estreitas para selar aberturas levam a maior eficiência do motor e maior produção de força. Se a abertura for muito estreita, existe a possibilidade de um atrito entre a ponta e a vedação. Isto pode ocorrer, por exemplo, quando é dada partida no motor ou se o piloto avança a válvula reguladora para mais potência. Nestes casos, a pá pode aquecer mais rápido que o revestimento em volta e, por meio de expansão térmica, se tornar maior e assim friccionar o anel de vedação. Existem provavelmente outros mecanismos que também causam atrito. Quando a pá de liga de titânio fricciona a vedação, o atrito pode ser muito alto e a ponta da pá pode aquecer rapidamente a temperaturas onde o titânio quente pode realmente queimar ou oxidar com uma maior liberação de calor. Estas situações são essencialmente queima de titânio, e se não checadas podem danificar o motor. Desta forma, um revestimento na ponta destas pás de titânio é aplicado para separar o titânio simples do material de vedação, caso ocorra um atrito.

Na turbina, os estágios iniciais da seção da turbina de alta pressão são geralmente compostos de pás de superliga a base de níquel que giram em alta velocidade. Estas pás também são projetadas de maneira que suas pontas sejam muito próximas a um anel de vedação estacionário. O propósito da abertura próxima é minimizar o vazamento de gás e permitir que a pressão do ar trabalhe contra as pás da turbina, fazendo com que elas girem. Ponta estreita para selar as folgas leva a maior eficiência do motor e maior saída de potência. Se a abertura for muito estreita, existe a possibilidade de um atrito entre a ponta e a vedação. Da forma estabelecida anteriormente, isto pode ocorrer, por exemplo, quando é dada partida no motor ou se o piloto

avança a válvula reguladora para mais potência. Nestes casos, a pá pode aquecer mais rápido que o revestimento em volta e, por meio de expansão térmica, se tornar maior e assim friccionar o anel de vedação. Existem outros prováveis mecanismos que também causam atrito. Tipicamente, quando uma

5 ponta da pá de superliga simples fricciona contra uma vedação de superliga fundida simples, então a ponta da pá é desgastada. Em um melhor projeto, a vedação é revestida com um material que é mais tolerante ao atrito que o material de vedação fundido, e a vedação absorve uma fração mais significativa do desgaste e a ponta da pá é menos desgastada. Entretanto, esta

10 situação ainda não é ideal, e são desejados revestimentos para a ponta da pá que reduzem ainda mais desgaste da ponta.

A medida que as temperaturas do motor aumentam na busca de maior eficiência de operação, os revestimentos de vedação metálica sofrem oxidação e alguns fabricantes estão procurando revestimentos de vedação

15 cerâmica. Neste caso, as demandas de um revestimento de ponta de pá resistente ao desgaste aumentam ainda mais. Em uma progressão adicional dos tratamentos de ponta, uma camada compósita de nitrito de boro cúbico (CBN) embutida em uma matriz de níquel ou de liga de níquel é colocada na ponta. Isto permite que o revestimento da ponta corte ou triture no material de

20 vedação em uma situação de atrito. Entretanto, este revestimento compósito é difícil e caro de aplicar nas pontas da pá, tais como pontas da pá de titânio.

A patente U.S. 5.073.433 descreve um revestimento de barreira térmica para substratos compreendendo zircônia parcialmente estabilizada por ítria e tendo uma densidade maior que 88% da densidade

25 teórica, com uma pluralidade de macrotrincas verticais homogeneamente dispersa em todo o revestimento para melhorar sua resistência a fadiga térmica. Esta patente também descreve um processo para produzir o revestimento de barreira térmica.

As patentes U.S. Nos. 5.520.516 e 5.743.013 descrevem uma

pá de compressor ou turbina tendo suas pontas revestidas com um óxido a base de zircônio tendo uma pluralidade de macrotrincas que se estendem pelo menos 4 mil (101,6  $\mu\text{m}$ ) através do revestimento e tendo entre 5 a 90 macrotrincas verticais por centímetro linear medidas em uma linha paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à superfície da ponta da pá.

Continua a existir uma necessidade na tecnologia de fornecer melhores revestimentos resistentes ao desgaste para pás da turbina a gás e superfícies de vedação expostas na seção quente dos motores de turbina a gás, particularmente melhores revestimentos resistentes ao desgaste para pontas das pás de turbina e compressor que fornecem boa tolerância ao atrito quando em contato com um material de vedação, tal como uma superliga fundida simples.

#### SUMÁRIO DA INVENÇÃO

Esta invenção diz respeito, em parte, a pás para um motor de turbina a gás, as ditas pás tendo uma extremidade interna adaptada para montar em um cubo, tal como um cubo rotatório, e uma ponta da pá localizada do lado oposto da extremidade interna, e em que pelo menos uma porção da ponta da pá é revestida com um revestimento pulverizado termicamente de um pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza, o dito revestimento pulverizado termicamente tendo uma densidade maior que 88% da densidade teórica, com uma pluralidade de macrotrincas verticais dispersas de forma substancialmente homogênea em todo o revestimento, em que uma área transversal do revestimento normal à ponta da pá expõe uma pluralidade de macrotrincas verticais que estende-se pelo menos da metade da espessura do revestimento de comprimento até toda a espessura do revestimento e tendo de cerca de 5 a cerca de 200 macrotrincas verticais por polegada (25,4 mm) linear medidas em uma linha paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à ponta da pá, e o dito

pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreendendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 25 por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 36 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia). Preferivelmente, o revestimento deve estender sobre toda a ponta da pá e em pelo menos uma porção do aerofólio. A área do aerofólio da pá é área que entra em contato com um fluido normal à área, tal como um gás, durante o modo operacional do motor.

10 Esta invenção também diz respeito, em parte, a um processo para produzir um revestimento em pelo menos uma porção de uma ponta de uma pá para um motor de turbina a gás, a dita pá tendo uma extremidade interna adaptada para montar em um cubo, tal como um cubo rotatório, e uma ponta da pá localizada no lado oposto da extremidade interna, em que o dito processo compreende:

15 a) depositar termicamente um pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza, o dito pó compreendendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 25 por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 36 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia), na ponta da pá para formar uma monocamada tendo pelo menos dois borrifos sobrepostos do pó depositados na ponta da pá, em que a temperatura de um borrifo depositado subsequente é maior que a temperatura de um borrifo previamente depositado;

25 b) resfriar e solidificar a dita monocamada da etapa a) mediante o que a dita monocamada tem uma densidade de pelo menos 88% da densidade teórica e em que uma pluralidade de trincas verticais é produzida na monocamada em virtude da contração dos borrifos depositados;

e

c) repetir as etapas a) e b) pelo menos uma vez para produzir uma camada revestida global, em que cada monocamada tenha induzido trincas verticais por meio dos borrifos e em que uma pluralidade das trincas verticais em cada monocamada seja alinhada com trincas verticais em uma monocamada adjacente para formar macrotrincas verticais tendo um comprimento de pelo menos a metade da espessura do revestimento de comprimento até toda a espessura do revestimento, e a dita camada revestida tendo pelo menos cerca de 5 macrotrincas verticais por polegada (25,4 mm) linear medidas em uma linha paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à ponta da pá.

#### DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS DESENHOS

Figura 1 representa graficamente a eficiência de deposição de um pó de zircônia estabilizado com ítria de alta pureza inédito (isto é, Pó C ou ZrO-300 é a linha contínua) e um pó de zircônia estabilizado com ítria convencional (isto é, Pó D ou ZrO-137 é a linha descontínua) para revestimentos em alças de aço quadradas de 3/8 polegada (9525  $\mu\text{m}$ ) (em ambos os casos).

Figura 2 representa graficamente a densidade medida dos revestimentos produzida na separação de 1 polegada (25,4 mm) do maçarico até substrato nas alças de aço quadradas de 3/8 polegada (9525  $\mu\text{m}$ ) para um pó de zircônia estabilizado com ítria de alta pureza inédito (isto é, Pó C ou ZrO-300 é a linha contínua) e para um pó de zircônia estabilizado com ítria convencional (isto é, Pó D ou ZrO-137 é a linha descontínua).

Figura 3 representa graficamente a dependência de densidade de trinca de segmentação vertical (trincas por polegada (25,4 mm) linear (CPI) de comprimento da seção transversal do revestimento polido) na altura da monocamada para um revestimento produzido de um pó de zircônia estabilizado com ítria de alta pureza inédito (isto é, Pó C ou ZrO-300) em

substratos de botão de 1,0 polegada (25,4 mm) de diâmetro (linha contínua) e para um revestimento produzido de um pó de zircônia estabilizado com ítria convencional (isto é, Pó D ou ZrO-137) em substratos de botão de 1,0 polegada (25,4 mm) de diâmetro (linha descontínua).

5                    Figura 4 descreve um diagrama de fases da região rica em zircônia do sistema  $ZrO_2 - Y_2O_3$ , ver Bratton e Lau *Science & Technology of Zirconia*, Amer. Ceram. Soc., 1981, p. 226-240.

10                    Figura 5 descreve uma varredura de difração de raios-X usando radiação de cobre k-alfa de um revestimento de pó de ZrO-137 convencional depois de 100 horas de exposição a 1.400°C em ar. A estrutura tetragonal inicialmente pura transformou para conter 19,4 por cento de estrutura monoclinica.

15                    Figura 6 descreve uma varredura de difração de raios-X usando radiação de cobre k-alfa de um revestimento de Zr-300 em pó de alta pureza inédito depois de 100 horas de exposição a 1.400°C em ar. A estrutura tetragonal inicialmente pura permaneceu inalterada depois de 100 horas de exposição a 1.400°C.

20                    Figura 7 representa graficamente a dependência da densidade de revestimento do revestimento de pó de ZrO-137 convencional como uma função do tempo a 1.200°C a 1.400°C em ar. A densidade na condição revestida (linha descontínua em segmentos menores) foi 91,5% da densidade teórica. Observou-se que a densidade teórica diminui a 1.300°C (linha contínua) a 1.400°C (linha descontínua em segmentos maiores).

25                    Figura 8 representa graficamente a dependência da densidade de revestimento do revestimento de Zr-300 em pó de alta pureza inédito como uma função do tempo a 1.200°C a 1.400°C em ar. A densidade na forma revestida (linha descontínua) foi 92,70% da densidade teórica. Observou-se que a densidade teórica permanece inalterada até pelo menos 100 horas a 1.400°C (linha contínua).

Figura 9 representa graficamente uma comparação entre o revestimento de Zr-300 em pó de alta pureza inédito (linha descontínua) e o revestimento de pó de ZrO-137 convencional (linha contínua) para correlações entre porcentagem de trincas em forma de blocos de tijolos (trincas horizontais) e densidade de trinca de segmentação vertical (CPI).

Figura 10 representa graficamente a dependência da porcentagem de trincamento na borda depois de um teste JETS de ciclo 2.000 na densidade de trinca de segmentação vertical (medida em CPI) usando o revestimento de Zr-300 em pó de alta pureza inédito na condição como revestida. Trincamento acima de 15 por cento é considerado um revestimento reprovado, que, para cerca de 10 CPI ou mais, é evitado.

Figura 11 representa graficamente a dependência da porcentagem de trincamento na borda depois de um teste JETS de ciclo 2.000 em densidade de trinca de segmentação vertical (CPI) usando o revestimento de Zr-300 em pó de alta pureza inédito na condição tratada a quente (4 horas/1.975 °F/vácuo). Trincamento acima de 15 por cento é considerado um revestimento reprovado, que, para cerca de 5 CPI ou mais, é evitado.

#### DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

Da forma aqui usada, um borrifo deve significar uma partícula em pó fundida única impactada na superfície do substrato, por exemplo, pá, em que ela se espalha para formar uma plaqueta fina. Geralmente estas plaquetas têm de 5 a 100 microns de diâmetro e 1 a 5 microns de espessura, mais geralmente cerca de 2 microns de espessura.

Da forma aqui usada, uma macrotrinca vertical é uma trinca no revestimento que, se estendida para entrar em contato com a superfície do substrato, por exemplo, pá, formará um ângulo de 30° a 0° com uma linha estendida do dito ponto de contato normal à superfície do substrato. Preferivelmente, as macrotrincas verticais formarão um ângulo de 10° a 0° com a linha normal. Além das macrotrincas verticais, uma ou mais

/ macrotrincas horizontais podem se desenvolver no revestimento. Preferivelmente, o revestimento não deve ter nenhuma macrotrinca horizontal. Uma macrotrinca horizontal é uma trinca que forma um ângulo de 10° a 0° com um plano que bissecciona a dita trinca e disposta paralela à superfície do substrato. Se presentes, as macrotrincas horizontais preferivelmente não devem se estender para entrar em contato com mais que uma macrotrinca vertical, uma vez que isto pode enfraquecer o revestimento e submeter o revestimento a divisão. A dimensão de comprimento da macrotrinca vertical e a dimensão de comprimento da macrotrinca horizontal é a distância em linha reta de uma extremidade da trinca até a extremidade oposta da trinca. O comprimento da macrotrinca horizontal, se presente, pode ser de cerca de 5 a 25 por cento da seção transversal revestida, contando somente as trincas horizontais que tocam duas ou mais trincas de segmentação verticais.

15 Uma nova morfologia de zircônia em pó estabilizada com ítria foi descoberta, que também pode ser aplicada a outros pós a base de zircônia com outros estabilizantes, separadamente ou além de ítria ou itérbia. Observou-se que os pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza inéditos, combinados com condições de pulverização térmica por plasma ou pistola de detonação, têm eficiência de deposição, densidade, tolerância de reserva muito maior para revestimento, e são capazes de formar padrão de trinca de segmentação desejada para tolerância à deformação. Observou-se que, em teste de choque térmico em alta temperatura, revestimentos de pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza 25 inéditos são superiores aos revestimentos de barreira térmica de pó de zircônia estabilizado com ítria segmentados anteriores.

Os revestimentos produzidos por pulverização térmica usados no revestimento da ponta das pás desta invenção são feitos de pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza compreendendo de cerca de 0

a cerca de 0,15, preferivelmente de cerca de 0 a cerca de 0,12, por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2, preferivelmente de cerca de 0 a cerca de 1,5, por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 25, preferivelmente de cerca de 6 a cerca de 10, mais  
5 preferivelmente de cerca de 6,5 a cerca de 8, por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 36, preferivelmente de cerca de 10 a cerca de 16, mais preferivelmente de cerca de 11 a cerca de 14, por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia). Os óxidos de impureza compreendem de cerca de 0 a cerca de 0,02,  
10 preferivelmente de cerca de 0 a cerca de 0,01, por cento em peso de dióxido de silício (sílica), de cerca de 0 a cerca de 0,005, preferivelmente de cerca de 0 a cerca de 0,002, por cento em peso de óxido de alumínio (alumina), de cerca de 0 a cerca de 0,01, preferivelmente de cerca de 0 a cerca de 0,005 por cento em peso de óxido de cálcio, de cerca de 0 a cerca de 0,01,  
15 preferivelmente de cerca de 0 a cerca de 0,005 por cento em peso de óxido férrico, de cerca de 0 a cerca de 0,005, preferivelmente de cerca de 0 a cerca de 0,002, por cento em peso de óxido de magnésio, e de cerca de 0 a cerca de 0,01, preferivelmente de cerca de 0 a cerca de 0,005 por cento em peso de dióxido de titânio.

20 O pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza da forma aqui usada pode compreender misturas de dois ou mais pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza. Por exemplo, o pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza usado aqui pode compreender de cerca de 55 a cerca de 95 por cento em volume de um  
25 primeiro pó de zircônia parcialmente estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza tendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 10, preferivelmente de cerca de 6 a cerca de 8, por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 14,

preferivelmente de cerca de 10 a cerca de 12 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia), e de cerca de 5 a cerca de 45 por cento em volume de um segundo pó de zircônia completamente estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza tendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 16 a cerca de 22 por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 25 a cerca de 33 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia).

10 As misturas de pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza podem compreender uma mistura de dois ou mais pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza que reduzem a condutividade térmica de um revestimento compósito feito dele e mantêm a resistência ao choque térmico de um 6 a 10, preferivelmente 6 a 8, por cento em peso de revestimento de zircônia estabilizado parcialmente com ítria. Em 15 uma modalidade, as misturadas compreendem de cerca de 20 a cerca de 45 por cento em volume de um segundo pó de zircônia completamente estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza, e de cerca de 55 a cerca de 80 por cento em volume de um primeiro pó de zircônia parcialmente estabilizado 20 com ítria ou itérbia de alta pureza.

Revestimentos com 6,5 a 8 por cento em peso de ítria adicionados a zircônia fornecem resistência ao choque térmico desejada em virtude dos mecanismos de endurecimento especulados na borda principal de uma trinca em crescimento, tendo que fazer com transformação de fase 25 tetragonal a monoclínica mediante tensão. Ainda, zircônia estabilizada com ítria 20 por cento em peso, denominada completamente estabilizada, em virtude de ela estar na estrutura cúbica e não sofrer transformação de fases, tem menor condutividade térmica. Normalmente, a propriedade da resistência ao choque térmico é mais importante que menor condutividade térmica, então

a indústria favorece 7 por cento em peso de zircônia estabilizada com ítria.

De acordo com esta invenção, se o material estabilizado com ítria inferior for preparado na fase contínua no revestimento, com o material estabilizado com ítria superior sendo isolado na matriz, pode ser possível beneficiar da baixa condutividade do material estabilizado com ítria superior, uma vez que o fluxo de calor produz em média todo o material e interfaces e poros no revestimento à medida que ele se move. Se as partículas de ítria superior desenvolvem trincas durante a exposição ao choque térmico, elas devem apenas afetar a fase e parar na matriz circundante de ítria inferior.

Isto é realizado misturando os dois pós separados na razão desejada e termicamente aspergir para formar o revestimento compósito. Os pós de ítria inferior deve ser o principal componente, de maneira que ela seja a fase contínua ou a matriz do revestimento. O valor de condutividade térmica diminuída aumentaria com mais de zircônia de ítria superior, então o equilíbrio deve ser encontrado para a aplicação envolvida. Se as condições de choque térmico não forem tão severas, mais componente de ítria superior pode ser adicionado.

Pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza compósitos para melhorar propriedades abrasivas são também são usados nesta invenção. Na inclusão de um segundo componente mais abrasivo que a zircônia, então preferivelmente o segundo componente deve ser selecionado pelo menos 2 mil (50,8  $\mu\text{m}$ ) de qualquer dimensão 95% da espessura do revestimento. Nesta modalidade em que pelo menos dois pós são usados, prefere-se ter as partículas de zircônia finas aderidas à superfície das partículas abrasivas maiores. Partículas abrasivas adequadas seriam alumina, cromo ou ligas destes adicionadas à composição de pó total em uma quantidade de 10 a 40 por cento em peso de do pó total, preferivelmente 20 a 30 por cento em peso da composição de pó total.

Pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza

compósitos para diminuição da condutividade térmica também são usados nesta invenção. Pós compósitos ilustrativos incluem pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compósito compreendendo um pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza tendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 25 por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 36 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia), o dito pó tendo um tamanho médio nominal de 20-60 microns com partículas de gadolína aderidas à superfície tendo um tamanho médio nominal de 0,5 a 2 microns.

Pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza compósitos para diminuir a condutividade térmica se submetem a uma maneira simples e barata de adicionar componentes que modificam a condutividade térmica adicionais ao pó. Tipicamente, o pó pode ser preparado por um método aqui descrito, tal como o método de fundição e moagem. O componente adicional, por exemplo, gadolína, pode ser adicionado na quantidade desejada para fundir a mistura. Esta operação é tipicamente feita em grandes lotes, por exemplo, 1.000 libras (454 quilos) ou mais. Se a adição for ligeiramente fora da quantidade desejada todo o lote pode ser terminado como sobra inútil, um grande gasto.

Adicionalmente, a massa fundida pode ser moída em pó fino e então classificada. Normalmente, grandes perdas ocorrem nesta operação, com as partículas acima e abaixo do tamanho sendo descartadas. Nas modalidades desta invenção, o material simples básico poderia ser feito da forma usual, tal como 7 por cento em peso de zircônia estabilizada com ítria, e classificado para o tamanho desejado. Tamanhos acima e abaixo deste material podem ser usados novamente na seguinte fusão do lote. Então, o tamanho correto do pó básico, que é tipicamente cerca de 20 a 60 microns de

tamanho médio, é fundido com partículas de gadolína ultrafinas com um aglutinante adicionado, tal como cola branca diluída. O pó é seco e ligeiramente rodado para separar quaisquer partículas que grudem. A gadolína fina adere à superfície das partículas grandes básicas aproximadamente na quantidade desejada.

Pode-se calcular quanta gadolína fina, ou qualquer tal aditivo, deve ser adicionado à mistura para obter um compósito desejado. Isto é feito medindo o volume de partícula médio da partícula básica grande usando o analisador de tamanho Microtrac. O mesmo é feito para a partícula aditiva ultrafina. O tamanho fino do adicionado é importante de maneira que ela possa ser uniformemente aderida à partícula grande na porcentagem desejada. Tamanhos de cerca de 0,5 a 2 microns para a fina e cerca de 60 microns para a partícula básica grande aproximadamente corretos. Cada caso deve ser então calculado para encontrar a quantidade correta para o nível de aditivo desejado. A partícula compósita pode então ser pulverizada com qualquer dispositivo de pulverização térmica, que à medida que funde as partículas, liga toda a composição junta. Este método permite que pequenos lotes sejam preparados, bem como grandes, e qualquer composição compósita pode ser obtida adicionando mais ou menos do componente ultrafino para uma dada massa de partículas de composição básicas grandes.

O tamanho de partícula médio dos pós de pulverização térmica usados nesta invenção é preferivelmente estabelecido de acordo com o tipo de dispositivo de pulverização térmica e condições de pulverização térmica usados durante a pulverização térmica. O tamanho de partícula médio pode variar de cerca de 1 a cerca de 150 microns, preferivelmente de cerca de 5 a cerca de 50 microns, e mais preferivelmente de cerca de 10 a cerca de 45 microns.

Pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza são fornecidos que são capazes de alcançar revestimentos produzidos por

/ pulverização térmica tendo uma densidade maior que 88% da densidade teórica, com uma pluralidade de macrotrincas verticais dispersas de forma substancialmente homogênea em todo o revestimento, em que uma área transversal do revestimento normal ao substrato, por exemplo, pá, expõe uma  
5 pluralidade de macrotrincas verticais que estende-se pelo menos da metade da espessura do revestimento de comprimento até toda a espessura do revestimento e tendo de cerca de 5 a cerca de 200, preferivelmente de cerca de 20 a cerca de 200, e mais preferivelmente de cerca de 40 a cerca de 100, macrotrincas verticais por polegada (25,4 mm) linear medidas em uma linha  
10 paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à ponta da pá.

Os pós de pulverização térmica usados nesta invenção podem ser produzidos por métodos convencionais, tais como aglomeração (métodos de secagem por pulverização e sinterização, ou sinterização e moagem) ou  
15 fundição ou moagem. Em um método de secagem por pulverização e sinterização, uma lama é primeiramente preparada misturando uma pluralidade de pós de matéria-prima e um meio de dispersão adequado. Esta lama é então granulada por secagem por pulverização, e uma partícula de pó coerente é então formada sinterizando o pó granulado. O pó de pulverização  
20 térmica é então obtido peneirando e classificando (se os aglomerados forem muito grandes, eles podem ser reduzidos no tamanho por moagem). A temperatura de sinterização durante a sinterização do pó granulado é preferivelmente 1.000 a 1.300°C.

Os pós de pulverização térmica usados nesta invenção podem ser produzidos por uma outra técnica de aglomeração, método de sinterização e moagem, um compactado é primeiramente formado misturando uma  
25 pluralidade de pós de matéria-prima seguido por compressão e então sinterizados a uma temperatura entre 1.200 a 1.400°C. O pó de pulverização térmica é então obtido moendo e classificando o compactado sinterizado

resultante na distribuição de tamanho de partícula apropriada.

Os pós de pulverização térmica de acordo com esta invenção também podem ser produzidos por um método de fundição (fundir) e moagem em vez de aglomeração. No método de fusão e moagem, um lingote é  
5 primeiramente formado misturando uma pluralidade de pós de matéria-prima seguido por rápido aquecimento, fundição e então resfriamento. O pó de pulverização térmica é então obtido moendo e classificando o lingote resultante.

No geral, os pós de pulverização térmica podem ser  
10 produzidos por processos convencionais, tal como o seguinte:

Método de secagem por pulverização e sinterização - os pós de matéria-prima são misturados em uma lama e então granulados a jato. O pó aglomerado é então sinterizado em uma alta temperatura (pelo menos 1.000°C) e peneirado em uma distribuição de tamanho de partícula adequada  
15 por pulverização;

Método de sinterização e moagem - os pós de matéria-prima são sinterizados em uma alta temperatura em um gás hidrogênio ou atmosfera inerte (tendo uma baixa pressão parcial de oxigênio) e então mecanicamente triturado e peneirado em uma distribuição de tamanho de partícula adequada  
20 para pulverização;

Método de fundição ou moagem - os pós de matéria-prima são fundidos em um cadinho e então a peça fundida resultante é mecanicamente triturada e peneirada; e

Método de densificação - o pó produzido em qualquer um dos  
25 processos anteriores (i)-(iii) é aquecido por chama de plasma ou laser e peneirado (processo de densificação por plasma ou densificação por laser).

O tamanho de partícula médio para o método de secagem por pulverização de cada pó de matéria-prima é preferivelmente não menos que 0,1 microns e mais preferivelmente não menos que 0,2 microns, mas

preferivelmente não mais que 10 microns. Se o tamanho de partícula médio de um pó de matéria-prima for muito pequeno, os custos podem aumentar. Se o tamanho de partícula médio de um pó de matéria-prima for muito grande, pode ser difícil dispersar uniformemente o pó de matéria-prima.

5                   As partículas individuais que compõem o pó de pulverização térmica preferivelmente têm resistência mecânica suficiente para ficar coerentes durante o processo de pulverização térmica. Se a resistência mecânica for muito pequena, a partícula em pó pode desunir, entupindo o bico ou acumulando nas paredes internas do dispositivo de pulverização térmica.

10                   O processo de revestimento envolve fluir pó por meio de um dispositivo de pulverização térmica que aquece e acelera o pó em um substrato, por exemplo, pá. Mediante impacto, a partícula aquecida deforma resultando em uma lamela ou borrifo pulverizada termicamente. A sobreposição dos borrifos constitui a estrutura do revestimento. Um processo  
15 de detonação usado nesta invenção é descrito na patente U.S. No. 2.714.563, cuja descrição está aqui incorporada pela referência. O processo de detonação é adicionalmente descrito nas patentes U.S. Nos. 4.519.840 e 4.626.476, cujas descrições estão aqui incorporadas pela referência. Patente U.S. No. 6.503.290, cuja descrição está aqui incorporada pela referência, descreve um  
20 processo de combustível oxigênio de alta velocidade usado nesta invenção.

Da forma indicada anteriormente, esta invenção diz respeito a pás para um motor de turbina a gás, as ditas pás tendo uma extremidade interna adaptada para montar em um cubo, tal como um cubo rotatório, e uma ponta da pá localizada no lado oposto da extremidade interna, e em que pelo  
25 menos uma porção da ponta da pá é revestida com um revestimento pulverizado termicamente de um pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza, o dito revestimento pulverizado termicamente tendo uma densidade maior que 88% da densidade teórica, com uma pluralidade de macrotrincas verticais dispersas de forma substancialmente homogênea em

todo o revestimento, em que uma área transversal do revestimento normal à ponta da pá expõe uma pluralidade de macrotrincas verticais que estende-se pelo menos da metade da espessura do revestimento de comprimento até toda a espessura do revestimento e tendo de cerca de 5 a cerca de 200, preferivelmente de cerca de 20 a cerca de 200, e mais preferivelmente de cerca de 40 a cerca de 100, macrotrincas verticais por polegada (25,4 mm) linear medidas em uma linha paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à ponta da pá, e o dito pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreendendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 25 por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 36 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia). Preferivelmente, o revestimento deve estender sobre toda a ponta da pá e em pelo menos uma porção do aerofólio. A área do aerofólio da pá é a área que é coloca em contato um fluido normal com a área, tal como um gás, durante o modo de operação normal do motor. Os pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza usados nos revestimentos produzidos por pulverização térmica são descritos anteriormente.

Os revestimentos usados nesta invenção são revestimentos produzidos por pulverização térmica tendo baixa condutividade térmica em virtude da natureza inerente do material de zircônia. Porosidade e interfaces no revestimento também podem adicionar interrupções para aquecer o fluxo e assim reduzir a condutividade térmica efetiva. Ainda, de acordo com esta invenção, o revestimento é intencionalmente de alta densidade (baixa porosidade) para ter alta resistência à erosão e para facilitar a formação de trinca de segmentação pelo processo aqui descrito. Também significa tipicamente ter baixa densidade de trinca horizontal, uma vez que isto pode ser um fator na vida com choque térmico. Entretanto, de acordo com esta

invenção, a densidade de trincas horizontais pode ser minimizada ou maximizada, e ambas as estruturas podem ser usadas. No caso onde a exposição ao choque térmico não é muito severa, pode ser possível aumentar intencionalmente a densidade de trinca horizontal e assim reduzir a condutividade térmica. Isto é feito durante o processo de revestimento, onde o maçarico de plasma é usado para causar interrupções na interface normalmente bem ligada entre as passagens do maçarico.

Os revestimentos produzidos por pulverização térmica, por exemplo, revestimentos de barreira térmica, tipicamente têm uma densidade maior que 88% da densidade teórica, com uma pluralidade de macrotrincas verticais dispersas de forma substancialmente homogênea em todo o revestimento, em que uma área transversal do revestimento normal ao substrato expõe uma pluralidade de macrotrincas verticais que estende-se pelo menos da metade da espessura do revestimento de comprimento até toda a espessura do revestimento, preferivelmente uma densidade de 90% a 98% da densidade teórica e em que uma pluralidade das ditas macrotrincas verticais estende-se pelo menos metade a espessura do revestimento em comprimento até toda a espessura do revestimento e tendo de cerca de 5 a cerca de 200, preferivelmente de cerca de 20 a cerca de 200, e mais preferivelmente de cerca de 40 a cerca de 100, macrotrincas verticais por polegada (25,4 mm) linear, medida em uma linha paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à ponta da pá. A largura das macrotrincas verticais é tipicamente menor que cerca de 1 mil (25,4  $\mu\text{m}$ ). Em uma modalidade, os revestimentos produzidos por pulverização térmica podem ter trincas de segmentação verticais que são dispostas como células em uma perspectiva de revestimento tridimensional, tendo um largura de célula média de 0,02 polegadas (508  $\mu\text{m}$ ), e uma faixa de cerca de 0,005 a cerca de 0,2 polegada (127- 5080  $\mu\text{m}$ ).

Os revestimentos produzidos por pulverização térmica, por

exemplo, revestimentos de barreira térmica, podem conter uma ou mais macrotrincas horizontais que estendem no revestimento paralelo à superfície do substrato. Preferivelmente, as macrotrincas horizontais não entram em contato com mais que uma macrotrinca vertical. Os revestimentos produzidos por pulverização térmica podem conter segmentos de trinca horizontal, que conectam qualquer uma de duas trincas de segmentação verticais, medido na seção transversal polida, tendo um comprimento somado total menor que 10% da largura do revestimento.

Em uma modalidade, um revestimento ligado pode ser depositado entre o substrato e o revestimento pulverizado termicamente, por exemplo, revestimento de barreira térmica. O revestimento ligado tipicamente compreende uma liga contendo cromo, alumínio, ítria com um metal selecionado do grupo que consiste em níquel, cobalto e ferro. Preferivelmente, o revestimento ligado compreende um revestimento MCrAlY+X aplicado por métodos de pulverização por plasma ou por métodos de pulverização por detonação ou por métodos de eletrodeposição, onde M é Ni, Co ou Fe ou qualquer combinação dos três elementos, e X inclui a adição de Pt, Ta, Hf, Re ou outros metais terra rara, ou partículas dispersantes finas de alumina, singularmente ou em combinação.

Os revestimentos produzidos por pulverização térmica, por exemplo, revestimentos de barreira térmica, desta invenção apresentam várias propriedades desejadas incluindo o seguinte: uma melhor resistência de sinterização, tal como a 1.200°C, densidade aumenta em menos que 0,5% em 4 horas; um módulo no lugar do revestimento menor que 0,6 MPa, e uma resistência coesiva de revestimento na direção da espessura do revestimento maior que 40 MPa; depois de exposição a 1.200°C por 4 horas, um módulo no lugar do revestimento menor que 0,9 MPa, e uma resistência coesiva de revestimento na direção da espessura do revestimento maior que 45 MPa; uma condutividade térmica em uma direção através da espessura do

revestimento que é menor que 0,014 watt/cm a 25°C e menor que 0,0135 watt/cm a 500°C; depois de exposição a 1.200°C por 4 horas, uma condutividade térmica em uma direção através da espessura do revestimento que é menor que 0,015 watt/cm a 25°C e menor que 0,014 watt/cm a 500°C; 5 uma taxa de erosão de partícula de alumina angular a 50 microns a 20 graus de violação e velocidade de 200 ft./s (60,96 m/s) menor que 1 mg por grama de erosivo a 25°C; depois de exposição a 1.200°C por 4 horas, uma taxa de erosão de partícula para alumina angular de 50 microns a 20 graus de violação e velocidade de 200 ft./s (60,96 m/s) menor que 0,5 mg por grama de erosivo 10 a 25°C; menos que 3 por cento de fase monoclínica por métodos de difração de raios-X; e, depois de exposição a 1.200°C por 4 horas, menos que 3 por cento de fase monoclínica por métodos de difração de raios-X.

Os revestimentos produzidos por pulverização térmica desta invenção podem ser adicionalmente estabilizados por tratamento térmico em 15 vácuo ou ar a uma temperatura de 1.000°C ou mais. Da forma detalhada no exemplo 7 a seguir, o limiar de CPI para ter excelente duração de choque térmico foi abaixado de 20 CPI para revestimentos de pó de ZrO-137 convencionais a cerca de 5 CPI para revestimentos do pó de Zr-300 de alta pureza inédito. Uma modalidade desta invenção é revestir o pó de 20 revestimento ZrO-300 de alta pureza a uma estrutura de CPI segura e então tratar termicamente o artigo revestido.

Para a maioria das aplicações, a densidade do revestimento preferivelmente deve ser entre 90% e 98% da densidade teórica e acima de tudo preferivelmente cerca de 92 por cento da densidade teórica. As 25 macrotrincas verticais são formadas no revestimento por deposição de plasma de pó do revestimento na superfície do substrato em monocamadas discretas em que a espessura de cada monocamada contém pelo menos dois borrifos sobrepostos do pó depositado (cerca de 0,16 mil (4,1  $\mu\text{m}$ ) e preferivelmente de cerca de três a cinco borrifos do pó depositado (de cerca de 0,24 mil (3,15

$\mu\text{m}$ ) e 0,40 mil (10,2  $\mu\text{m}$ ), respectivamente).

Embora não ligado à teoria, acredita-se que o depósito de dois ou mais borrifos sobrepostos do pó fará com que o segundo borribo e borrifos subseqüentes sejam depositados em temperaturas maiores que os borrifos anteriores. Isto se deve ao fato de que o primeiro borribo do pó é depositado em um substrato relativamente mais frio, enquanto que o segundo borribo e borrifos subseqüentes são depositados nos borrifos anteriores que são progressivamente mais quentes. Assim o depósito global de dois ou mais borrifos resulta em um gradiente de temperatura, com a maior temperatura no topo da superfície. Mediante o resfriamento e solidificação do depósito da monocamada, o segundo borribo e borrifos subseqüentes contraem-se mais que os borrifos anteriores e formam microtrincas verticais através da camada depositada.

Monocamadas adicionais são sobrepostas no substrato com cada monocamada formando macrotrincas verticais que têm uma tendência de alinhar com as macrotrincas previamente formadas nas monocamadas anteriores. Isto efetivamente produz algumas macrotrincas que estendem substancialmente através da espessura do revestimento. A largura das macrotrincas verticais, isto é, a distância entre faces opostas que definem como macrotrincas verticais, é geralmente menor que cerca de 1 mil (25,4  $\mu\text{m}$ ), preferivelmente menor que 1/2 mil (12,7  $\mu\text{m}$ ).

Se a densidade de revestimento for menor que 88% da densidade teórica, a tensão causada pela contração dos borrifos na monocamada pode ser absorvida ou compensada pela porosidade do revestimento. Isto efetivamente prevenirá a formação de macrotrincas em todo o revestimento, conforme é requerido de acordo com esta invenção, e prevenirá a produção de um revestimento com boa resistência a fadiga térmica. A distribuição homogênea substancial de macrotrincas verticais em todo o revestimento da forma requerida por esta invenção reduzirá o módulo

de elasticidade da estrutura do revestimento, reduzindo assim as tensões locais. Isto resulta em excelente resistência a fadiga térmica para o revestimento que possibilita que ele funcione sem falha nos ambientes térmicos cíclicos.

5                   A densidade das macrotrincas verticais deve ser 5 ou mais, preferivelmente 20 ou mais, e mais preferivelmente 40 ou mais macrotrincas verticais por polegada (25,4 mm) linear tomadas em um plano transversal do revestimento ao longo de uma linha paralela à superfície do substrato. Isto garantirá que macrotrincas verticais suficientes estejam presentes no

10                   revestimento para fornecer boa resistência a fadiga térmica. Para obter as macrotrincas verticais necessárias neste revestimento, o aparelho de plasma deve ser de alta eficiência e estável durante o período de depósito do revestimento. O maçarico por pulverização deve ser posicionada em uma

15                   distância fixa do substrato e a velocidade relativa entre o maçarico e do substrato deve ser controlada para garantir que a monocamada depositada instantaneamente por uma varredura do maçarico seja suficiente para produzir sobreposição dos borrifos depositados de pó, em que o segundo borribo depositado e borrifos depositados subseqüentemente sejam mais quentes que os borrifos depositados anteriormente pelo motivo supradiscutido.

20                   A espessura global do revestimento pode variar dependendo da aplicação de uso final. Para componentes de motores de turbina a gás, a espessura do revestimento pode variar de 0,0025 a 0,10 polegada (0,0635 – 2,54  $\mu\text{m}$ ). A zircônia parcialmente estabilizada por ítria preferida seria 6 a 8 por cento em peso de ítria, com o equilíbrio zircônia e acima de tudo

25                   preferivelmente cerca de 7 por cento em peso de ítria, com a zircônia substancialmente em equilíbrio. Os revestimentos desta invenção são idealmente ajustados como um revestimento de topo para um substrato ligado de revestimento metálico, tais como pontas das pás de motores de turbina a gás. O revestimento ligado metálico preferido compreende uma liga contendo

cromo, alumínio, ítria com um metal selecionado do grupo que consiste em níquel, cobalto e ferro ou uma liga contendo alumínio e níquel. Este revestimento ligado pode ser depositado usando técnicas de pulverização por plasma convencionais ou qualquer outra técnica convencional. O substrato  
5 pode ser qualquer material adequado, tais como uma liga a base de níquel, a base de cobalto ou a base de ferro.

Os revestimentos usados nesta invenção podem ser adicionalmente estabilizados por tratamento térmico em vácuo ou ar a uma temperatura de 1.000°C ou mais. Da forma detalhada no exemplo 7 a seguir,  
10 o limiar de CPI para ter excelente duração de choque térmico foi abaixado de 20 CPI para revestimentos de pó de ZrO-137 convencionais a cerca de 5 CPI para revestimentos do pó de Zr-300 de alta pureza inédito. Uma modalidade desta invenção é revestir os pós de revestimento ZrO-300 de alta pureza para uma estrutura de CPI segura e então tratar termicamente o artigo revestido.

Os revestimentos desta invenção são altamente resistentes ao choque térmico e têm vida longa em alta temperatura, aplicações de temperatura cíclica, tais como componentes de motor de aeronave, componentes de turbina a gás industrial, e rolos de suporte de linha de recozimento de aço e vidro, entre outros. Tipicamente, os revestimentos são  
15 de alta densidade quando revestidos (por exemplo, cerca de 88 por cento ou mais da densidade teórica) na forma cristalográfica tetragonal sem nenhuma fase monoclinica, e têm de cerca de 5 a cerca de 200, preferivelmente de cerca de 20 a cerca de 200, e mais preferivelmente de cerca de 40 a cerca de 100, trincas de segmentação verticais dispostas através da espessura do  
20 revestimento. Os revestimentos apresentam resistência ao choque térmico mesmo quando revestidos a espessuras de 2 mil (50,8  $\mu\text{m}$ ) ou mais.

Da forma indicada anteriormente, esta invenção diz respeito a um processo para produzir um revestimento em pelo menos uma porção de uma ponta de uma pá para um motor de turbina a gás, a dita pá tendo uma

extremidade interna adaptada para montar em um cubo, tal como um cubo rotatório, e uma ponta da pá localizada no lado oposto da extremidade interna, em que o dito processo compreende:

5 a) depositar termicamente um pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza, o dito pó compreendendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 25 por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 36 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia), na ponta da pá para formar uma monocamada tendo pelo menos  
10 dois borrifos sobrepostos do pó depositado na ponta da pá, em que a temperatura de um borrifo depositado subsequente é maior que a temperatura de um borrifo previamente depositado;

b) resfriar e solidificar a dita monocamada da etapa a) mediante o que a dita monocamada tem uma densidade de pelo menos 88% da densidade teórica e em que uma pluralidade de trincas verticais é produzida na monocamada em virtude da contração dos borrifos depositados;  
15 e

c) repetir as etapas a) e b) pelo menos uma vez para produzir  
20 uma camada revestida global, em que cada monocamada induziu trincas verticais através dos borrifos e em que uma pluralidade das trincas verticais em cada monocamada é alinhada com trincas verticais em uma monocamada adjacente para formar macrotrincas verticais tendo um comprimento de pelo menos a metade da espessura do revestimento de comprimento até toda a  
25 espessura do revestimento, e a dita camada revestida tendo pelo menos 5, preferivelmente pelo menos 20, e mais preferivelmente pelo menos 40, macrotrincas verticais por polegada (25,4 mm) linear medidas em uma linha paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à ponta da pá.

Nos processos de pulverização térmica desta invenção, as trincas horizontais podem ser controladas e usadas para reduzir a condutividade térmica através da camada revestida. A estrutura da trinca horizontal dos revestimentos de pulverização térmica é uniformemente dispersa através da espessura do revestimento, e quantidades para pelo menos 25% da largura do revestimento, medidas pela soma dos segmentos de trinca horizontal ao longo de qualquer linha paralela ao plano do revestimento na seção transversal polida, e tal estrutura é estabilizada opcionalmente por tratamento térmico em vácuo ou ar a uma temperatura de 1.000°C ou mais.

Os processos desta invenção podem ser conduzidos com um maçarico de plasma usando gases de processo argônio-hidrogênio ou nitrogênio-hidrogênio, ou com uma pistola ou aparelho de detonação usando gases de processo oxigênio-acetileno ou oxigênio-acetileno-propileno.

A ponta da pá pode ser áspera logo antes do revestimento para a melhor resistência de ligação. Preferivelmente, um mínimo de aspereza de 150 micropolegadas (3,81  $\mu\text{m}$ ) Ra, mais preferivelmente um mínimo de 200 micropolegadas (5,08  $\mu\text{m}$ ) Ra, fornecerá a resistência de ligação. O método para tornar áspero pode ser jateamento abrasivo com areia, tal como com alumina angular de malha 60 ou 46 em uma corrente de ar pressurizado ou usando um jato de água pura de alta pressão. O jato de água de alta pressão abrasivo, que tipicamente usa partículas abrasivas de granada finas em uma operação com jato de água em pressão de 50.000 psi (344,7 MPa), pode ser usado para cortar ou em máquinas de superfícies metálicas. Observou-se que o abrasivo de granada pode ser removido e o jato pode operar com água pura para tornar áspera a superfície de substratos metálicos antes do revestimento. Ao contrário das expectativas normais, este jato de água de alta pressão puro erodirá uma superfície metálica, produzindo uma nova superfície que é idealmente adaptada para subsequente revestimento, em virtude de ela ser áspera em uma escala muito fina e ser totalmente livre de contaminação na

superfície, tais como inclusões de granalha abrasiva de procedimentos de aspereza de superfície normal tipo jateamento de granalha. A pressão do jato de granalha e a taxa de deslocamento do bico devem ser cuidadosamente controladas para evitar erosão muito profunda.

5                    Macrotrincas verticais suficientes devem estar presentes no revestimento para fornecer boas propriedades térmicas e mecânicas. Para obter as macrotrincas verticais necessárias neste revestimento, o aparelho de plasma deve ser de alta eficiência e estável durante o período de depósito do revestimento. O maçarico de jato deve ser posicionado em uma distância fixa  
10 do substrato e a velocidade relativa entre o maçarico e o substrato deve ser controlada para garantir que a monocamada depositada instantaneamente por uma varredura do maçarico seja suficiente para produzir a sobreposição do borrifos depositados do pó, em que o segundo borrifos depositado e borrifos depositados subseqüentes são mais quentes que os borrifos depositados  
15 anteriores pela razão discutida anteriormente. A espessura global do revestimento pode variar dependendo da aplicação de uso final. A espessura do revestimento da ponta das pás pode variar de 50 a 1.000 microns. A composição de pó preferida é zircônia parcialmente estabilizada por ítria em uma quantidade de 6,5 a 9 por cento em peso de ítria, com o equilíbrio  
20 zircônia e acima de tudo preferivelmente cerca de 7 a 8 por cento em peso de ítria, com a zircônia substancialmente em equilíbrio.

Os revestimentos produzidos por pulverização térmica usados nesta invenção também são idealmente ajustados como um revestimento de topo para uma pá de superliga revestida com revestimento ligado de um motor  
25 de turbina a gás. O revestimento ligado metálico preferido deve compreender uma liga contendo pelo menos um elemento selecionado do grupo que consiste em cromo, alumínio e ítria com pelo menos um metal selecionado do grupo que consiste em níquel, cobalto e ferro. Este revestimento ligado pode ser depositado usando técnicas de pulverização por plasma convencionais ou

qualquer outra técnica convencional. O substrato pode ser qualquer material adequado, tais como titânio, liga de titânio, uma liga a base de níquel, liga a base de cobalto ou liga a base de ferro.

Os revestimentos produzidos por pulverização térmica usados  
5 nesta invenção também são idealmente ajustados como um revestimento de  
topo para uma pá de liga de titânio de revestimento ligado de um motor de  
turbina a gás. O revestimento ligado metálico preferido pode compreender  
titânio ou ligas de titânio, escolhidas para combinar com a liga da pá. Este  
10 revestimento pode ser depositado usando técnicas de pulverização por plasma  
blindado ou técnicas HVOF. O revestimento ligado não metálico preferido  
pode compreender óxido de alumínio ou ligas de alumina e titânia ou crômia.  
Este revestimento pode ser depositado usando pistola de detonação, técnicas  
de pulverização por plasma convencionais ou qualquer outra técnica  
convencional. O substrato pode ser qualquer material adequado, tais como  
15 titânio ou uma liga de titânio. O revestimento desta invenção também pode  
ser depositado em substratos de liga de titânio, em particular uma ponta da pá  
de compressor de liga de titânio, sem um revestimento de ligação.

Preferivelmente, os parâmetros de deposição de jato devem de  
maneira tal que os pós de zircônia sejam pelo menos parcialmente fundidos,  
20 preferivelmente completamente fundidos e então depositados em uma taxa, de  
maneira tal que pelo menos dois borrifos sobrepostos ocorram em uma área,  
enquanto que a pá faz uma única passagem sobre o dispositivo de  
pulverização térmica. Preferivelmente, as partículas abrasivas, se presentes,  
não são fundidas, enquanto que as partículas de zircônia são fundidas pelo  
25 menos parcialmente. Em algumas aplicações, algumas das menores faixas de  
tamanho das partículas abrasivas podem ser fundidas durante a etapa de  
deposição sem afetar o revestimento desta invenção.

Embora a invenção tenha sido descrita com relação às  
modalidades específicas desta, muitas variações e modificações se tornarão

evidentes para os versados na tecnologia. Desta forma, pretende-se que as reivindicações em anexo sejam interpretadas o mais amplamente possível em vista da tecnologia anterior de forma a incluir todas as variações e modificações.

## 5 Exemplo 1

A tabela A a seguir mostra a composição de um pó de zircônia estabilizado com ítria convencional (isto é, Pó B) e um pó de zircônia estabilizado com ítria de alta pureza (isto é, Pó A). A faixa da composição para o pó fundido e triturado convencional foi tomada de suas especificações para os valores permitidos máximos, com análises de lote reais tipicamente cerca de 10 - 50 por cento do máximo. As composições de pó de alta pureza inéditas foram tomadas de cindo lotes reais, dando somente o valor máximo analisado para qualquer lote. Dos componentes de zircônia estabilizada com ítria, significa que ítria está na faixa de 6,5 a 8 por cento em peso, de maneira a estabilizar a estrutura na fase tetragonal. O propósito da háfnia é desconhecido, mas tipicamente ele está sempre presente em cerca de 1,5 por cento em peso. A tabela A mostra que o pó A é significativamente mais puro que o pó B nas impurezas indesejadas de alumina, sílica, óxido de ferro, titânia e magnésia.

20

### **Tabela A**

Composições de pó  
(Porcentagem em peso)

<b>Zircônia</b>	<b>Pó B</b>	<b>Pó A</b>
	<b>Equilíbrio</b>	<b>Equilíbrio</b>
Ítria	6,5 - 8	6,5 - 8
Háfnia	2,5	2,0
Alumina	0,7	0,001
Sílica	1,5	0,011
Óxido de ferro	0,5	0,004
Titânia	0,5	0,009
Magnésia	0,3	0,002

A morfologia/estrutura do pó é uma importante característica dos pós de zircônia estabilizados com ítria de alta pureza desta invenção. A

densidade real do pó foi determinada por estereopícnometria. Neste método, o volume de um recipiente foi determinado medindo exatamente o volume de gás que o preenche, uma massa conhecida de pó foi adicionada e o volume do recipiente com pó foi determinado. A partir disto, o volume do pó foi conhecido, e dividindo a massa da amostra do pó pelo volume dá sua densidade real.

Tabela B dá resultados de densidade real para um pó B e pó A.

**Tabela B**

Densidade real dos pós		
	<b>Pó B</b>	<b>Pó A</b>
5,92	6,00	Gramas/centímetro cúbico
98	99	Porcentagem de densidade teórica

Na tabela B, a densidade teórica foi calculada para a composição de ítria específica do pó. A densidade teórica foi 6,05 gramas por centímetro cúbico. Tanto o pó A quanto o pó B são muito próximos à densidade teórica que indica pequena porosidade interna. Pó A é tão denso quanto o pó B, mas seções polidas revelam um pequeno poro no centro de muitas partículas, e com paredes densas espessas das partículas.

Também, Pó A tem uma nova faixa de tamanho e mais estreita comparada ao pó B. Um método de medição definitiva para o tamanho do pó é o método Microtrac, que usa um laser para detectar o diâmetro médio das partículas individuais em um fluido que escoar pelo detector. Esta tabulação de laser que resulta em muitas centenas ou milhões de partículas dá uma melhor medida da distribuição de tamanho que telas, e em um nível muito mais fino de separação entre os tamanhos. Usando este método, o pó B foi medido para determinar se ele está na faixa de 34 a 38 microns para a partícula média. Usando este método, Pó A foi medido e observou-se que ele está na faixa de 26 a 34 microns para o tamanho de partícula médio. Esta faixa de tamanho de partícula pode possibilitar melhor fusão do pó no dispositivo de pulverização térmica.

Acredita-se que a alta pureza, morfologia/estrutura e tamanho

mais fino do pó A são responsáveis por suas melhores propriedades obtidas na pulverização térmica, da forma descrita a seguir.

### Exemplo 2

Este exemplo foi conduzido com um maçarico de plasma Praxair modelo 1108, embora tenha-se observado que os parâmetros fazem o revestimento desejado com outros maçaricos, tais como com a pistola de detonação Praxair ou pistola de superdetonação Praxair, a última sendo de velocidade e temperatura de partícula ainda maiores. No modelo de maçarico de plasma Praxair 1108, o plasma é desenvolvido em um fluxo de argônio mais gás hidrogênio por um arco elétrico descarregado entre um eletrodo e um anodo. O pó é carregado em uma outra corrente de argônio e injetado à montante do arco, beneficiando de um trânsito completo através da zona do arco. Estes fluxos e correntes elétricas podem variar para determinar seus efeitos nas taxas de deposição de revestimento.

Tabela C mostra os pós usados nesta deposição de revestimento. Pó C é significativamente mais puro que o pó D nas impurezas indesejadas de alumina, sílica, óxido de ferro, titânia, cálcia, magnésia e outros óxidos.

**Tabela C**

Composições de pó  
(Porcentagem em peso)

	<b>Zircônia</b>	<b>Pó D Equilíbrio</b>	<b>Pó C Equilíbrio</b>
Ítria		6,93	7,41
Háfnia		1,5	1,6
Alumina		0,2	0,001
Sílica		0,1	0,008
Óxido de ferro		0,1	0,003
Titânia		0,2	0,005
Magnésia		0,2	0,002
Cálcia		0,1	0,003
Todos os outros óxidos		0,3	0,1

Para as deposições do revestimento do pó C e pó D, uma vazão total de 220 pés cúbicos (6,23 m<sup>3</sup>) por hora (que consiste em 90 pés cúbicos

(2,55 m<sup>3</sup>) por hora de gás de maçarico de argônio, 90 pés cúbicos (2,55 m<sup>3</sup>) por hora do gás carreador de pó (argônio), e 40 pés cúbicos (1,13 m<sup>3</sup>) por hora de gás hidrogênio auxiliar), 500 pés cúbicos (14,16 m<sup>3</sup>) por hora de um gás de blindagem coaxial (argônio), e uma corrente de arco de 170 amps (que obtém  
5 cerca de 80 volts para cerca de 13,6 KW) foi usados. Pó D e pó C foram comparados usando estas mesmas condições originais. A figura 1 mostra a eficiência de deposição dos dois pó para revestimento da separação de 1 polegada (25.400 µm) em alças de aço quadradas de 3/8 polegada (9525 µm) em ambos os casos. Pó C (linha contínua na figura 1) é acentuadamente mais  
10 eficiente que Pó D (linha descontínua na figura 1). Parte desta melhoria vem do tamanho ligeiramente mais fino do pó C, mas parte é provavelmente em virtude da morfologia/estrutura do pó C.

A figura 2 mostra a densidade medida dos revestimentos produzidos na separação de 1 polegada (25.400 µm) nas alças de aço quadradas de 3/8 polegada (9525 µm) do maçarico ao substrato nos fluxos e  
15 corrente de maçarico originais tanto para pó C (linha contínua) quanto para pó D (linha descontínua). O pó C obteve densidade pelo menos 1 a 2 pontos percentuais maior que para as mesmas condições de taxa de alimentação de pó. Ele adicionalmente não declina tão rapidamente com aumento da taxa de  
20 alimentação quanto o pó D. Acredita-se que esta conduta seja em virtude da melhor fusão e possivelmente da maior permanência fundida para C em virtude de seu tamanho mais fino e maior pureza, respectivamente.

Observou-se que a um equilíbrio maior que 1 polegada (25.400 µm), o pó C reteve melhor eficiência de deposição que o pó D, possivelmente suportando o fundido em fundição. A densidade de equilíbrio  
25 também permanece maior que com Pó D.

### Exemplo 3

Diferentes Condições de vazão e potência do maçarico foram avaliadas. Em um experimento projetado, vazões totais de 176 a 264 pés

cúbicos (4,98 - 7,48 m<sup>3</sup>) por hora e correntes de maçarico de 160 a 190 ampères (o KW de energia variada de 11,7 a 14,8) foram testadas. Observou-se que a redução da vazão de gás total para 176 pés cúbicos (4,98 m<sup>3</sup>) por hora a 14,3 KW deu a maior eficiência de deposição, e isto foi 10 pontos de eficiência maior que mostrado na figura 1 para o pó C. Acredita-se que estas condições obtêm maiores frações de fusão do pó pela desaceleração das partículas um pouco à medida que elas transitam na zona do arco e aumentando a entalpia disponível para fusão. Pode não ser muito simples, uma vez que a condição de maior KW ou entalpia não deu a maior eficiência de deposição. Análise de correlação múltipla dos resultados da eficiência de deposição mostrou um aumento esperado com corrente de maçarico e uma diminuição com o aumento do fluxo de gás total, mas também uma possível interação entre as duas variáveis.

As variáveis da taxa de deposição, separação do maçarico até o substrato e velocidade da superfície do substrato depois do maçarico foram avaliados para encontrar o efeito da obtenção de segmentação de trinca vertical no revestimento. Estas variáveis foram racionalizadas em um termo compósito denominado altura da monocamada. A altura da monocamada é a espessura instantânea do revestimento rebaixada à medida que o substrato se move no cone de pulverização do maçarico. Isto combina o volume de material distribuído no substrato (taxa de deposição) e a área sobre a qual o material é depositado da forma definida pela separação e a velocidade superficial. Também dependerá do ângulo do cone de pulverização do efluente, que depende do modelo do maçarico e do fluxo de gás total empregado. As unidades de altura da monocamada são espessura, tal como mil ou microns.

Acredita-se que a tensão residual no revestimento seja a tensão no plano do revestimento, e esta tensão aumenta com a altura da monocamada. A figura 3 mostra a dependência de densidade de trinca de

segmentação vertical (trincas por polegada (25,4 mm) linear (CPI) de comprimento da seção transversal do revestimento polido) na altura da monocamada. Para o pó D, revestimentos produzidos em substratos de botão de 1 polegada (25.400  $\mu\text{m}$ ) de diâmetro (linha descontínua na figura 3), uma dependência linear da trinca na altura da monocamada foi observada, mas somente depois de ir além de um limiar de altura da monocamada de cerca de 0,12 mil (3,1  $\mu\text{m}$ ). Além deste ponto de espessura de deposição instantânea, a densidade da trinca aumentou proporcionalmente com altura da monocamada.

Entretanto, para o revestimento do pó C produzido em substratos de botão de 1 polegada (25.400  $\mu\text{m}$ ) de diâmetro (linha contínua na figura 3), um limiar totalmente diferente de altura da monocamada foi necessário para iniciar a trinca, agora cerca de 0,22 mil (5,6  $\mu\text{m}$ ). Então a dependência linear da altura da monocamada tem aproximadamente a mesma inclinação anterior. Este limiar de altura da monocamada muito maior pode ser relacionado ao pó C. Acredita-se que a pureza muito maior possa levar a maior resistência a fratura inerente do revestimento. Isto pode ser em virtude da maior densidade obtida para o revestimento dos pós C, mas deve haver resistência à fratura maior, mesmo nas mesmas densidades, comparada aos revestimentos de pó D.

Espera-se que a maior densidade do revestimento do pó C tenha maior resistência à erosão da partícula. Quando revestimentos de barreira térmica deste material são usados em aplicações, tais como em motores de turbina a gás de aeronave, onde sujeira de pista e em suspensão no ar são comuns, é importante ter alta resistência à erosão.

#### 25 Exemplo 4

O efeito do tratamento térmico de vários revestimentos foi avaliado. Um efeito considerado foi a transformação da estrutura cristalina tetragonal em monoclinica de um revestimento. Para um revestimento de zircônia estabilizada com ítria (YSZ) de 7 por cento em peso, a estrutura de

equilíbrio seria monoclínica mais cúbica da forma ilustrada no diagrama de fases do equilíbrio na figura 4. Entretanto, o tetragonal fora de equilíbrio é obtido em pulverização por plasma pela rápida solidificação de borrifos de zircônia estabilizada com ítria completamente ligadas e fundidas. Para  
5 permitir que uma transformação volte ao equilíbrio, deve-se dividir por difusão química em alta temperatura em fases de equilíbrio de ítria inferior e ítria superior da forma ilustrada na figura 4. Ver Bratton e Lau, *Science & Technology of Zirconia.*, Amer. Ceram. Soc., 1981, p. 226-240. A fase de ítria inferior pode então transformar de tetragonal em alta temperatura para  
10 monocíclica em baixa temperatura em cerca de 1.000- - 1.200°C. Esta transformação é realmente indesejável, uma vez que a mudança de fase tetragonal em monoclínica pode produzir expansão de cerca de 4 por cento em volume à medida que a cerâmica é resfriada, e isto cria grande tensão interna, levando à formação de trincas.

15 A difusão é muito lenta em tais cerâmicas de altas temperaturas de fusão como a zircônia, então a tetragonal fora de equilíbrio, é retida a despeito do diagrama de fases no equilíbrio. Uma vez que motores impulsionam para temperaturas de operação cada vez maiores, parece que revestimentos YSZ convencionais podem começar a transformar a fase  
20 parcialmente monoclínica.

Este efeito do tratamento térmico foi examinado com uma matriz de temperatura e exposições de tempo em ar da forma apresentada na tabela E. As amostras foram corpos de prova separados tanto do revestimento de pó de zircônia estabilizado com ítria de alta pureza {isto é, ZrO-300)  
25 quanto de revestimento de pó de zircônia estabilizado com ítria convencional (isto é, ZrO-137). Tabela D mostra composições de pó representativas usadas nos revestimentos. Três a quatro corpos de prova de cada revestimento foram tratados termicamente na mesma carga, também permitindo a medição da densidade dos efeitos de sinterização, da forma detalhada no exemplo 5 a

seguir. Os corpos de prova planos tiveram cerca de 0,38 polegada quadrada ( $2,45 \text{ cm}^2$ ) por 25 mil ( $635 \text{ }\mu\text{m}$ ) de espessura. Os revestimentos foram depositados nos corpos de prova de uma maneira similar à descrita no exemplo 3 anterior.

5

**Tabela D**

Composições de pó  
(porcentagem em peso)

Zircônia	ZrO-137 Equilíbrio	ZrO-300 Equilíbrio
Ítria	7,39	7,58
Háfnia	1,5	1,6
Alumina	0,2	0,001
Sílica	0,1	0,008
Óxido de ferro	0,1	0,003
Titânia	0,2	0,005
Magnésia	0,2	0,002
Cálcia	0,1	0,003
Todos os outros óxidos	0,3	0,1

A fase monoclinica foi encontrada na difração de raios-X, com picos em 28 e 31,3 graus “2-Teta” para radiação de cobre, enquanto que o pico tetragonal foi em cerca de 30 graus. A figura 5 descreve uma varredura de difração de raios-X usando radiação de cobre k-alfa, do revestimento de pó de ZrO-137 convencional depois de 100 horas de exposição a  $1.400^\circ\text{C}$  em ar. A estrutura tetragonal inicialmente pura transformou para conter 19,4 por cento de estrutura monoclinica. A figura 6 descreve uma varredura de difração de raios-X usando radiação de cobre k-alfa, do revestimento do pó de Zr-300 de alta pureza inédito depois de 100 horas de exposição a  $1.400^\circ\text{C}$  em ar. A estrutura tetragonal inicialmente pura permaneceu inalterada depois de 100 horas de exposição a  $1.400^\circ\text{C}$ .

A razão da altura do pico em 28 graus para a soma das alturas do pico 28 mais 30 graus foi usada para estimar a fração de fase monocíclica. Este “primeiro método de pico M” foi desenvolvido pela calibração de misturas conhecidas de pós de zircônia monoclinico e tetragonal puros. Tabela E mostra os resultados de exposição para o revestimento convencional usando pó ZrO-137 e os revestimentos do pó de Zr-300 de alta pureza inédito.

20

O revestimento de pó de ZrO-137 convencional começa a transformar a monoclinico a baixas temperaturas de 1.200°C. A 1.400°C a transformação é muito mais rápida e com uma taxa de aceleração com tempo. Nos mesmos tempos e temperaturas, o revestimento do pó de Zr-300 de alta pureza inédito não transforma de modo algum. Assim, parece que as impurezas na cerâmica agem como sítios de nucleação para a transformação, ou que elas melhoram as taxas de difusão de ítria para ajudar a alcançar o equilíbrio.

**Tabela E**

Porcentagem de fase monoclinica nos revestimentos

Exposição	(Método do primeiro pico M)	
	Revestimento de Pó ZrO-137	Revestimento de Pó ZrO-300
Da forma revestida	0	0
100 horas@ 1.200°C	0,72	0
100 horas@ 1.300°C	1,01	0
24 horas @ 1.400°C	1,04	0
75 horas@ 1.400°C	11,34	0
100 horas @ 1.400°C	19,42	0

### Exemplo 5

A sinterização dos revestimentos do pó de Zr-300 de alta pureza inédito do exemplo 4 a 1.200°C foi examinada. Os resultados mostraram aumento na densidade de menos que 0,4 por cento depois de 24 horas a 1.200°C de temperatura.

Um outro conjunto de revestimento foi preparado de um pó de zircônia estabilizado com ítria de alta pureza (isto é, ZrO-300) e exposto em ar até 100 horas a 1.200 a 1.400°C. Os revestimentos foram depositados nos corpos de prova de uma maneira similar à descrita no exemplo 3 anterior. Para permitir comparação com este revestimento, um conjunto de amostras de revestimento foi feito de pó de zircônia estabilizado com ítria convencional (isto é, ZrO-137). A tabela F mostra composições de pó representativas usadas nos revestimentos.

**Tabela F**

Composições de pó  
(porcentagem em peso)

	<b>ZrO-137</b> <b>Equilíbrio</b>	<b>ZrO-300</b> <b>Equilíbrio</b>
Zircônia		
Ítria	7,39	7,58
Háfnia	1,5	1,6
Alumina	0,2	0,001
Sílica	0,1	0,008
Óxido de ferro	0,1	0,003
Titânia	0,2	0,005
Magnésia	0,2	0,002
Cálcia	0,1	0,003
Todos os outros óxidos	0,3	0,1

Os corpos de prova foram medidos pelo método de densidade de imersão de ASTM B-328, e os resultados são expressos como uma porcentagem de densidade teórica (isto é, completamente densa, nenhuma porosidade) na tabela G. Todos os revestimentos foram preparados no mesmo suporte de revestimento ID de 11 polegadas (279.400  $\mu\text{m}$ ) e cuidadosamente removidos para dar corpos de prova separados.

10

**Tabela G**

Densidade do revestimento depois de sinterização ao ar  
(Densidade como uma porcentagem de Densidade teórica)

<b>Exposição</b>	<b>Revestimento de</b> <b>Pó ZrO-137</b>	<b>Revestimento de</b> <b>Pó ZrO-300</b>
Da forma revestida	91,49	92,69
24 horas @ 1.200°C	91,68	93,12
100 horas @ 1.200°C	91,70	93,07
1 hora @ 1.300°C	92,02	93,23
24 horas @ 1.300°C	89,50	93,28
100 horas @ 1.300°C	85,73	93,51
1 hora @ 1.400°C	89,52	93,03
24 horas @ 1.400°C	82,12	93,43
100 horas @ 1.400°C	80,33	93,34

A partir das observações anteriores, a sinterização de um revestimento de pó de ZrO-137 convencional foi limitada a cerca de 1.200°C, e não foi notada muita mudança de densidade. Agora, em maiores temperaturas, o revestimento de pó de ZrO-137 convencional é realmente de densidade decrescente com o tempo a 1.300 e 1.400°C. Recordando que a fase monoclinica foi observada nos revestimentos de pó de ZrO-137 sinterizados somente, e a monoclinica tem uma densidade cristalina inferior, foi feita uma estimativa da baixa densidade em virtude deste fator. Observou-se que não é um efeito importante. Tomando o pior caso, 100 horas a 1.400°C, onde observou-se que a monoclinica foi 19,42 por cento, o valor de 80,33 por cento na tabela G mudaria somente para 80,97 por cento por esta compensação monoclinica.

As amostras de síter a 1.400 °C foram montadas e polidas para ver o que estava acontecendo. No revestimento de pó de ZrO-137 convencional, observou-se que a diminuição da densidade foi real, com os poros finos na estrutura como revestida tornando-se áspera com tempo a 1.400°C, e se tornando mais redondos. De forma muito importante, depois de 100 horas as trincas de segmentação verticais sumiram.

O revestimento do pó de Zr-300 de alta pureza inédito essencialmente não tem a densidade afetada por estas exposições de sinterização. Estes dados de densidade estão apresentados graficamente nas figuras 7 e 8 comparando o comportamento do revestimento de pó de ZrO-137 convencional e o revestimento do pó de Zr-300 de alta pureza inédito. A figura 7 representa graficamente a dependência da densidade de revestimento do revestimento de pó de ZrO-137 convencional em função do tempo a 1.200 a 1.400°C em ar. A densidade na forma revestida (segmentos menores da linha descontínua) foi 91,5% da densidade teórica. Observou-se que a densidade teórica diminui a 1.300°C (linha contínua) a 1.400°C (segmentos maiores da linha descontínua). A figura 8 representa graficamente a

dependência da densidade de revestimento do revestimento do pó de Zr-300 de alta pureza inédito em função do tempo a 1.200 a 1.400°C em ar. A densidade na forma revestida (linha descontínua) foi 92,7% da densidade teórica. Observou-se que a densidade teórica permanece inalterada até pelo menos 100 horas a 1.400°C (linha contínua). As amostras de sinter a 1.400 °C foram igualmente montadas e polidas para revestimento de pó ZrO-300. Com estas amostras, a porosidade fina diminuiu apenas ligeiramente com o tempo. Mais importante, as trincas de segmentação verticais permaneceram até 100 horas essencialmente inalteradas.

#### 10 Exemplo 6

A patente U.S. No. 5.073.433 descreve revestimentos produzidos por pulverização térmica em que trincas de segmentação verticais podem ser controlavelmente introduzidas no revestimento. Estas podem ser prontamente vistas se o revestimento for polido na seção transversal. As trincas de segmentação ficam dispostas geralmente de maneira vertical por toda a espessura do revestimento, embora algumas sejam menores que a toda a espessura. Da forma descrita na patente U.S. No. 5.073.433, somente as trincas verticais que têm comprimento maior que metade da espessura do revestimento foram contadas. Quando a densidade das trincas de segmentação foi controlada para ser maior que 20 trincas por polegada (25,4 mm) linear (CPI) ao longo de uma linha paralela ao substrato, observou-se que o revestimento YSZ tinha resistência importante ao choque térmico. As mesmas trincas de segmentação verticais podem ser controlavelmente introduzidas nos revestimentos desta invenção usando o pó de ZrO-300 de alta pureza.

25 Existe uma outra característica na microestrutura polida de interesse, a saber, as trincas horizontais. Estas são paralelas ao plano do revestimento e às camadas do revestimento, já que elas são constituídas por passes de pulverização térmica. Estas trincas horizontais são tipicamente curtas, e podem ser isoladas no revestimento, ou agem como ramificações

conectadas às trincas de segmentação verticais. Acredita-se que tais trincas horizontais possam ser as trincas de iniciação para longas trincas de separação que devem crescer em ciclos térmicos, levando à fragmentação da camada do revestimento YSZ na pior das hipóteses.

5 Um conjunto de revestimentos foi feito de um pó de zircônia estabilizado com ítria de alta pureza (isto é, ZrO-300) e de pó de zircônia estabilizado com ítria convencional (isto é, ZrO-137). Os revestimentos foram depositados de uma maneira similar à descrita no exemplo 4 anterior. Tabela H mostra composições de pó representativas usadas nos revestimentos.

10 **Tabela H.**

Composições de pó  
(porcentagem em peso)

	<b>ZrO-137</b>	<b>ZrO-300</b>
	<b>Equilíbrio</b>	<b>Equilíbrio</b>
Zircônia		
Ítria	7,39	7,58
Háfnia	1,5	1,6
Alumina	0,2	0,001
Sílica	0,1	0,008
Óxido de ferro	0,1	0,003
Titânia	0,2	0,005
Magnésia	0,2	0,002
Cálcia	0,1	0,003
Todos os outros óxidos	0,3	0,1

A extensão da trincas horizontais foi medida nos revestimentos. O comprimento de qualquer trinca horizontal que toca duas trincas contáveis de segmentação verticais foi medido. Para os propósitos desta invenção, estas trincas horizontais podem ser chamadas “trincas em forma de blocos de tijolos”. A soma de todos os comprimentos de trinca horizontal do “trincas em forma de blocos de tijolos” qualificantes dividida pela largura total do revestimento avaliado é assim “% de trincas em forma de blocos de tijolos”, sendo uma porcentagem da largura do revestimento. Para revestimentos feitos do novo pó de ZrO-300 de alta pureza, a% de trincas em forma de blocos de tijolos =  $0,086 \times \text{CPI} + 0,54$ . Para revestimentos feitos do pó de ZrO-137 convencional, Trincas em forma de blocos de tijolos =  $0,17 \times$

CPI + 0,067. Observou-se que, à medida que a densidade de trincas de segmentação verticais aumentou (CPI maior), a% de trincas em forma de blocos de tijolos (% Bk) também aumenta. A figura 9 mostra um gráfico das medições de trinca de trincas em forma de blocos de tijolos vertical e horizontal em inúmeros revestimentos que foram controlavelmente induzidos a ter diferentes CPI verticais. A relação entre trincas horizontais e verticais parece linear, e pode ser ajustada pelos mínimos quadrados para fornecer uma equação de relacionamento.

No trabalho com o novo pó de ZrO-300 de alta pureza para preparar revestimentos YSZ segmentados verticalmente, um resultado surpreendente para as trincas de trincas em forma de blocos de tijolos horizontais foi encontrado. O revestimento do pó de Zr-300 de alta pureza inédito (linha descontínua na figura 9) tem cerca da metade do número de trincas de trincas em forma de blocos de tijolos para o mesmo CPI vertical que o revestimento de pó de ZrO-137 convencional (linha contínua na figura 9). Acredita-se que o revestimento do pó de Zr-300 de alta pureza inédito tenha maior resistência coesiva interna.

#### Exemplo 7

Os revestimentos verticalmente segmentados por trincas da patente U.S. No. 5.073.433 encontraram utilidade como revestimentos de barreira térmica em uma ampla variedade de aplicações, que variam de componentes de motor de turbina a gás a cilindros de laminação de aço. Na maioria dos casos, o revestimento YSZ de barreira térmica é do lado de fora de um substrato metálico, voltado para o ambiente de alta temperatura, e reduzindo a temperatura do substrato por sua natureza isolante. Então, existe um gradiente térmico através do revestimento de barreira térmica, alta temperatura na superfície de revestimento YSZ exposta e menor temperatura no lado do substrato do revestimento. Além do mais, a exposição térmica pode ser cíclica, onde o todo o componente é exposto alternadamente ao alto

aquecimento e então resfriamento, tal como quando um motor de turbina a gás é iniciado ou interrompido.

Um teste de laboratório foi desenvolvido para simular tanto o gradiente térmico quanto a natureza cíclica de tais aplicações. Para os propósitos aqui, ele é denominado teste JETS, para “Jet Motor Thermal Simulation”. O teste é usado para desenvolvimento de revestimentos para determinar se eles são capazes do uso previsto. O teste de laboratório usa uma amostra que tem um botão chato de 1 polegada (25.400  $\mu\text{m}$ ) de diâmetro, cerca de 1/8 polegada (3175  $\mu\text{m}$ ) de espessura, tipicamente de alguma superliga. Este substrato é termicamente pulverizado com um revestimento metálico (por exemplo, Revestimento CoNiCrAlY), e então a camada da barreira térmica YSZ é aplicada. Diferentes espessuras de camada YSZ podem ser testadas, juntamente com estruturas de CPI de segmentação diferentes. Os botões revestidos revestem um bico queimador de oxigênio-propileno, que aquecem o revestimento YSZ a 1.400°C (2.550 °F) em 20 segundos, para uma amostra referência padrão em cada carga.

Quinze botões experimentais adicionais são mantidos no mesmo suporte de roda, que então gira para uma posição de resfriamento com sopro de ar depois de um período de aquecimento por mais 20 segundos. Então existem mais duas rotações para as posições de resfriamento de ar ambiente, antes de iniciar o ciclo de aquecimento-resfriamento novamente. Tipicamente, cada amostra é submetida a 2.000 tais ciclos, e então a borda da circunferência polida do botão é inspecionada para ver se existe qualquer sinal de trinca. Isto é medido com ampliação de 30x, e quaisquer segmentos de trinca de separação são medidos e somados, então expressos como uma porcentagem da circunferência do botão. Um pouco arbitrariamente, 15 por cento de trincamento na borda foi escolhido como “reprovação” no teste JETS. Um revestimento aprovado no teste JETS tem uma alta probabilidade de funcionar bem nas aplicações de serviço atuais.

Um conjunto de revestimentos foi feito de um pó de zircônia estabilizado com ítria de alta pureza (isto é, ZrO-300) e um controle de um pó de zircônia estabilizado com ítria convencional (isto é, ZrO-137). Os revestimentos foram depositados nos botões de uma maneira similar à descrita no exemplo 4 anterior. Os revestimentos do pó de Zr-300 de alta pureza inédito têm 25 mil (635  $\mu\text{m}$ ) (+/- 2 mil (50,8  $\mu\text{m}$ )) de espessura em um revestimento metálico. O revestimento metálico foi CoNiCrAlY tendo uma espessura de cerca de 8 mil (203,2  $\mu\text{m}$ ). A altura da monocamada variou para efeitos de segmentação. O revestimento de pó de ZrO-137 convencional usado como um controle teve 45 mil (1143  $\mu\text{m}$ ) de espessura. Tabela I mostra composições de pó representativas usadas nos revestimentos.

**Tabela I**

Composições de pó  
(porcentagem em peso)

	<b>ZrO-137</b> <b>Equilíbrio</b>	<b>ZrO-300</b> <b>Equilíbrio</b>
Zircônia		
Ítria	7,39	7,58
Háfnia	1,5	1,6
Alumina	0,2	0,001
Sílica	0,1	-0,008
Óxido de ferro	0,1	-0,003
Titânia	0,2	0,005
Magnésia	0,2	0,002
Cálcia	0,1	0,003
Todos os outros óxidos	0,3	0,1

Usando o teste JETS com os revestimentos do pó de Zr-300 de alta pureza inédito e revestimento de pó de ZrO-137 convencional como um controle, observou-se que os revestimentos do pó de Zr-300 de alta pureza inédito desempenharam melhor que o revestimentos de pó de ZrO-137 convencionais. A figura 10 mostra a dependência de trincamento na borda depois de 2.000 ciclos de teste na densidade de segmentação de trinca vertical (medida em CPI) nos revestimentos. Revestimentos sem nenhuma trinca de segmentação facilmente foram reprovados. Entretanto, para mais que cerca de 10 CPI nos pós de revestimento ZrO-300 de alta pureza, eles todos foram

facilmente aprovados no teste JETS. Com o revestimentos de pó de ZrO-137 convencionais, este limiar é cerca de 20 CPI.

Uma outra descoberta importante desta invenção foi feita quando os pós de revestimento ZrO-300 foram aquecidos antes do teste de JETS. O tratamento térmico envolveu aquecimento em vácuo a 25°C por 5 minuto a 1.080°C (1.975 °F), mantendo por 4 horas, e então resfriamento em vácuo a 25°C por minuto. A figura 11 mostra os resultados do teste JETS para estas amostras tratadas a quente. O CPI foi medido em revestimentos tratados a quente antes do teste, usando um botão casado e o método da seção transversal discutido anteriormente. Os revestimentos de alta pureza tratados termicamente foram ainda melhores que as amostras como revestidas. O limiar de CPI para ter excelente vida com choque térmico foi ainda menor que 10 CPI. Então uma outra descoberta desta invenção é revestir os pós de 10 revestimento ZrO-300 de alta pureza em uma estrutura de CPI segura e então tratar termicamente o artigo revestido. Este tratamento térmico é um de 15 muitas variações que podem alcançar este melhor resultado.

Embora as modalidades preferidas desta invenção tenham sido descritas, percebe-se que várias modificações podem ser feitas nos pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza, revestimentos 20 preparados dos pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza, e processos para produzir os revestimentos para substratos destinados a operar em ambientes térmicos cíclicos, sem fugir do espírito e escopo da invenção.

## REIVINDICAÇÕES

1. Pá para um motor de turbina a gás, caracterizada pelo fato de que a dita pá tem uma extremidade interna adaptada para montar em um cubo e uma ponta da pá localizada oposta à extremidade interna e em que  
5 pelo menos uma porção da ponta da pá é revestida com um revestimento pulverizado termicamente de um pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza, o dito revestimento pulverizado termicamente tendo uma densidade maior que 88% da densidade teórica com uma pluralidade de macrotrincas verticais dispersa de forma substancialmente homogênea  
10 em todo o revestimento, em que uma área transversal do revestimento normal à ponta da pá expõe uma pluralidade de macrotrincas verticais que estende-se pelo menos da metade da espessura do revestimento em comprimento até a espessura completa do revestimento e tendo de cerca de cerca de 200 macrotrincas verticais por polegada linear (25,4 milímetros)  
15 medidas em uma linha paralela à superfície da pá em um plano perpendicular à ponta da pá, e o dito pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreendendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 25 por cento  
20 em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 36 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia).

2. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que os óxidos de impureza compreendem de cerca de 0 a cerca de  
25 0,02 por cento em peso de dióxido de silício (sílica), de cerca de 0 a cerca de 0,005 por cento em peso de óxido de alumínio (alumina), de cerca de 0 a cerca de 0,01 por cento em peso de óxido de cálcio, de cerca de 0 a cerca de 0,01 por cento em peso de óxido férrico, de cerca de 0 a cerca de 0,005 por cento em peso de óxido de magnésio, e de cerca de 0 a cerca de 0,01

por cento em peso de dióxido de titânio.

3. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que os óxidos de impureza compreendem de cerca de 0 a cerca de 0,01 por cento em peso de dióxido de silício (sílica), de cerca de 0 a cerca de 0,002 por cento em peso de óxido de alumínio (alumina), de cerca de 0 a cerca de 0,005 por cento em peso de óxido de cálcio, de cerca de 0 a cerca de 0,005 por cento em peso de óxido férrico, de cerca de 0 a cerca de 0,002 por cento em peso de óxido de magnésio, e de cerca de 0 a cerca de 0,005 por cento em peso de dióxido de titânio.

10 4. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreende de cerca de cerca de 0 a cerca de 0,12 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 1,5 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 10 por cento em peso de 15 óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 16 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia).

5. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza tem um tamanho de partícula de cerca de 10 a cerca de 80 microns.

20 6. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreende uma mistura de dois ou mais pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza.

25 7. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreende de cerca de 55 a cerca de 95 por cento em volume de um primeiro pó de zircônia parcialmente estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza tendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de

háfquio (háfquia), de cerca de 6 a cerca de 8 por cento em peso de óxido de ítrio (íttria) ou de cerca de 10 a cerca de 14 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia), e de cerca de 5 a  
5  
cerca de 45 por cento em volume de um segundo pó de zircônia completamente estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza tendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfquio (háfquia), de cerca de 18 a cerca de 22 por cento em peso de óxido de ítrio (íttria) ou de cerca de 25 a cerca de 33 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o  
10 equilíbrio óxido de zircônio (zircônia)

8. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreende uma mistura de dois ou mais pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza que reduzem a condutividade térmica de um  
15 revestimento compósito feita dela, e mantêm a resistência ao choque térmico de um 6 a 8 por cento em peso de revestimento de zircônia estabilizado parcialmente com ítria.

9. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza  
20 compreende uma mistura tendo de cerca de 20 a cerca de 45 por cento em volume do segundo pó de zircônia completamente estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza, e de cerca de 55 a cerca de 80 por cento em volume do primeiro pó de zircônia parcialmente estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza.

25 10. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreende um pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compósito, o dito pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compósito compreendendo um pó de zircônia estabilizado com

5 ítria ou itérbia de alta pureza tendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 25 por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 36 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia), o dito pó tendo um tamanho médio nominal de 20-60 microns com partículas de gadolína aderidas à superfície tendo um tamanho médio nominal de 0,5 a 2 microns.

10 11. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a densidade do dito revestimento pulverizado termicamente é de 90% a 98% da densidade teórica e em que uma pluralidade das ditas macrotrincas verticais estende-se pelo menos dois terços da espessura do revestimento em comprimento até a espessura completa do revestimento.

15 12. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o dito revestimento pulverizado termicamente tem pelo menos cerca de 20 macrotrincas verticais por polegada linear (25,4 milímetros) medidas em uma linha paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à ponta da pá.

20 13. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o dito revestimento pulverizado termicamente tem pelo menos cerca de 40 macrotrincas verticais por polegada linear (25,4 milímetros) medidas em uma linha paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à ponta da pá.

25 14. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o dito revestimento pulverizado termicamente contém uma ou mais macrotrincas horizontais que estendem-se no revestimento paralelas à superfície da ponta da pá.

15. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que as macrotrincas horizontais não entram em contato com mais

que uma macrotrinca vertical.

16. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a largura das macrotrincas verticais é menor que 1 milímetro.

5 17. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a densidade do revestimento pulverizado termicamente é maior que 90% da densidade teórica e o revestimento pulverizado termicamente tem pelo menos cerca de 20 macrotrincas verticais por polegada linear (25,4 milímetros) medidas em uma linha paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à ponta da pá.

10 18. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o revestimento pulverizado termicamente compreende de cerca de cerca de 0 a cerca de 0,12 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 1,5 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 10 por cento em peso de óxido de ítrio (íttria) ou de  
15 cerca de 10 a cerca de 16 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia).

19. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que um revestimento ligado é depositado entre a ponta da pá e o revestimento pulverizado termicamente, o dito revestimento ligado  
20 compreendendo (i) uma liga contendo cromo, alumínio, ítrio com um metal selecionado do grupo que consiste em níquel, cobalto e ferro ou (ii) uma liga contendo alumínio e níquel.

20. Pá de acordo com a reivindicação 19, caracterizada pelo fato de que o revestimento ligado compreende um revestimento  
25  $MCrAlY+X$  aplicado por métodos de pulverização por plasma, onde M é Ni, Co ou Fe ou qualquer combinação dos três elementos, e X inclui a adição de Pt, Ta, Hf, Re ou outros metais terra rara, ou partículas dispersantes finas de alumina, singularmente ou em combinação.

21. Pá de acordo com a reivindicação 19, caracterizada pelo

fato de que o revestimento ligado compreende um revestimento MCrAlY+X aplicado por métodos de pulverização por detonação, onde M é Ni, Co ou Fe ou qualquer combinação dos três elementos, e X inclui a adição de Pt, Ta, Hf, Re ou outros metais terra rara, ou partículas dispersantes finas de alumina, singularmente ou em combinação.

22. Pá de acordo com a reivindicação 19, caracterizada pelo fato de que o revestimento ligado compreende um revestimento MCrAlY+X aplicado por um método de eletrodeposição, onde M é Ni, Co ou Fe ou qualquer combinação dos três elementos, e X inclui a adição de Pt, Ta, Hf, Re ou outros metais terra rara, singularmente ou em combinação.

23. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a densidade do revestimento pulverizado termicamente é pelo menos 90% da densidade teórica e o revestimento pulverizado termicamente tem pelo menos cerca de 40 macrotrincas verticais por polegada linear (25,4 milímetros) medidas em uma linha paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à ponta da pá.

24. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a dita espessura do revestimento pulverizado termicamente é de cerca de 0,0025 a cerca de 0,10 polegadas (63,5 – 2.540  $\mu\text{m}$ ).

25. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o dito revestimento pulverizado termicamente tem segmentos de trinca horizontal, que conectam qualquer uma de duas trincas de segmentação verticais, medidas na seção transversal polida, tendo um comprimento de soma total menor que 10% da largura do revestimento.

26. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o revestimento pulverizado termicamente tem melhor resistência a sinterização de maneira tal que, a 1.200°C, a densidade aumenta menos que 0,5% em 4 horas.

27. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o revestimento pulverizado termicamente tem trincas de segmentação verticais que são dispostas como células em uma perspectiva de revestimento tridimensional, tendo uma largura de célula média de 0,02 polegadas (508  $\mu\text{m}$ ), e uma faixa de cerca de 0,005 a cerca de 0,2 polegada (127 a 5080  $\mu\text{m}$ ).

28. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o revestimento pulverizado termicamente tem um módulo no plano do revestimento menor que 0,6 MPa, e uma resistência coesiva do revestimento na direção da espessura do revestimento maior que 40 MPa.

29. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o revestimento pulverizado termicamente tem, depois de exposição a 1.200°C por 4 horas, um módulo no plano do revestimento menor que 0,9 MPa, e uma resistência coesiva do revestimento na direção da espessura do revestimento maior que 45 MPa.

30. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o revestimento pulverizado termicamente tem uma condutividade térmica em uma direção através da espessura do revestimento que é menor que 0,014 watt/cm a 25°C e menor que 0,0135 watt/cm a 500°C.

31. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o revestimento pulverizado termicamente tem, depois de exposição a 1.200°C por 4 horas, uma condutividade térmica em uma direção através da espessura do revestimento que é menor que 0,015 watt/cm a 25°C e menor que 0,014 watt/cm a 500°C.

32. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o revestimento pulverizado termicamente tem uma taxa de erosão de partícula para alumina angular de 50 microns a colisão de 20 graus e velocidade de 200 pé/s (60,96 m/s) menor que 1 mg por grama de

erosivo a 25°C.

5 33. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o revestimento pulverizado termicamente tem, depois de exposição a 1.200°C por 4 horas, uma taxa de erosão de partícula para alumina angular de 50 microns a colisão de 20 graus e velocidade de 200 pé/s (60,96 m/s) menor que 0,5 mg por grama de erosivo a 25°C.

34. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o revestimento pulverizado termicamente tem menos que 3 por cento de fase monoclinica por métodos de difração de raios-X.

10 35. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o revestimento pulverizado termicamente tem, depois de exposição a 1.200°C por 4 horas, menos que 3 por cento de fase monoclinica por métodos de difração de raios-X.

15 36. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o revestimento pulverizado termicamente é estabilizado por tratamento térmico em vácuo ou ar em uma temperatura de 1.000°C ou mais.

37. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a pá é uma pá de turbina.

20 38. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a pá é uma pá de compressor.

39. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o revestimento pulverizado termicamente contém partículas abrasivas selecionadas de alumina, cromia e ligas dos mesmos.

25 40. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a ponta da pá tem um raio de borda de pelo menos metade da espessura do revestimento.

41. Pá de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a pá tem um área do aerofólio entre a extremidade interna da pá

e a ponta da pá e a espessura do revestimento pulverizado termicamente é de 50 a 1.000 microns de espessura e estende-se em pelo menos uma porção do aerofólio.

42. Processo para produzir um revestimento em pelo menos uma porção de uma ponta de uma pá para um motor de turbina a gás, a dita pá tendo uma extremidade interna adaptada para montar em um cubo e uma ponta da pá localizada oposta à extremidade interna, caracterizado pelo fato de que compreende:

a) depositar termicamente um pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza, o dito pó compreendendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 25 por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 36 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia), na ponta da pá para formar uma monocamada tendo pelo menos dois borrifos sobrepostos do pó depositado na ponta da pá em que a temperatura de um borrifo depositado subsequente é maior que a temperatura de um borrifo previamente depositado;

b) resfriar e solidificar a dita monocamada da etapa a) mediante o que a dita monocamada tem uma densidade de pelo menos 88% da densidade teórica e em que uma pluralidade de trincas verticais é produzida na monocamada em virtude do encolhimento dos borrifos depositados; e

c) repetir as etapas a) e b) pelo menos uma vez para produzir uma camada revestida global em que cada monocamada induziu trincas verticais através dos borrifos e em que uma pluralidade das trincas verticais em cada monocamada é alinhada com trincas verticais em uma monocamada adjacente para formar macrotrincas verticais tendo um comprimento de pelo menos metade da espessura do revestimento em

comprimento até a espessura completa do revestimento e a dita camada revestida tendo pelo menos cerca de 5 macrotrincas verticais por polegada linear (25,4 milímetros) medidas em uma linha paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à ponta da pá.

5                    43. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que os óxidos de impureza compreendem de cerca de 0 a cerca de 0,02 por cento em peso de dióxido de silício (sílica), de cerca de 0 a cerca de 0,005 por cento em peso de óxido de alumínio (alumina), de cerca de 0 a cerca de 0,01 por cento em peso de óxido de cálcio, de cerca de 0 a cerca de 0,01 por cento em peso de óxido férrico, de 10                    de cerca de 0 a cerca de 0,005 por cento em peso de óxido de magnésio, e de cerca de 0 a cerca de 0,01 por cento em peso de dióxido de titânio.

                    44. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que os óxidos de impureza compreendem de 15                    cerca de 0 a cerca de 0,01 por cento em peso de dióxido de silício (sílica), de cerca de 0 a cerca de 0,002 por cento em peso de óxido de alumínio (alumina), de cerca de 0 a cerca de 0,005 por cento em peso de óxido de cálcio, de cerca de 0 a cerca de 0,005 por cento em peso de óxido férrico, de cerca de 0 a cerca de 0,002 por cento em peso de óxido de magnésio, e 20                    de cerca de 0 a cerca de 0,005 por cento em peso de dióxido de titânio.

                    45. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o dito pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreende de cerca de cerca de 0 a cerca de 0,12 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 1,5 por 25                    cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 10 por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 16 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia).

                    46. Processo de acordo com a reivindicação 42,

caracterizado pelo fato de que o dito pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza tem um tamanho de partícula de cerca de 10 a cerca de 80 microns.

47. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreende uma mistura de dois ou mais pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza.

48. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreende de cerca de 55 a cerca de 95 por cento em volume de um primeiro pó de zircônia parcialmente estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza tendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 8 por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 14 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia), e de cerca de 5 a cerca de 45 por cento em volume de um segundo pó de zircônia completamente estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza tendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 16 a cerca de 22 por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 25 a cerca de 33 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia).

49. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreende uma mistura de dois ou mais pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza que reduzem a condutividade térmica de um revestimento composto feita dela, e mantêm a resistência ao choque térmico de um 6 a 8 por cento em peso de

revestimento de zircônia estabilizado parcialmente com ítria.

50. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreende uma mistura tendo de cerca de 20 a cerca de 45 por cento em volume do segundo pó de zircônia completamente estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza, e de cerca de 55 a cerca de 80 por cento em volume do primeiro pó de zircônia parcialmente estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza.

51. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreende um pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compósito, o dito pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compósito compreendendo um pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza tendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 25 por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 36 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia), o dito pó tendo um tamanho médio nominal de 20-60 microns com partículas de gadolína aderidas à superfície tendo um tamanho médio nominal de 0,5 a 2 microns.

52. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que na etapa a) o dito pó compreende 6 a 8 por cento em peso de ítria substancialmente em equilíbrio com zircônia.

53. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que na etapa a) a monocamada compreende pelo menos 3 borrifos sobrepostos.

54. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que na etapa b) a densidade é pelo menos 90% da

densidade teórica.

55. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o revestimento na etapa c) tem de cerca de 20 a cerca de 200 macrotrincas verticais por polegada linear (25,4 milímetros) medidas em uma linha paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à ponta da pá.

56. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que a ponta da pá na etapa a) compreende uma ponta de pá revestida ligada em que o revestimento ligado compreende (i) uma liga contendo cromo, alumínio, ítrio com um metal selecionado do grupo que consiste em níquel, cobalto e ferro, ou (ii) uma liga contendo alumínio e níquel.

57. Processo de acordo com a reivindicação 56, caracterizado pelo fato de que o revestimento ligado compreende um revestimento  $M\text{CrAlY}+X$  aplicado por métodos de pulverização por plasma, onde M é Ni, Co ou Fe ou qualquer combinação dos três elementos, e X inclui a adição de Pt, Ta, Hf, Re ou outros metais terra rara, ou partículas dispersantes finas de alumina, singularmente ou em combinação.

58. Processo de acordo com a reivindicação 56, caracterizado pelo fato de que o revestimento ligado compreende um revestimento  $M\text{CrAlY}+X$  aplicado por métodos de pulverização por detonação, onde M é Ni, Co ou Fe ou qualquer combinação dos três elementos, e X inclui a adição de Pt, Ta, Hf, Re ou outros metais terra rara, ou partículas dispersantes finas de alumina, singularmente ou em combinação.

59. Processo de acordo com a reivindicação 56, caracterizado pelo fato de que o revestimento ligado compreende um revestimento  $M\text{CrAlY}+X$  aplicado por um método de eletrodeposição,

onde M é Ni, Co ou Fe ou qualquer combinação dos três elementos, e X inclui a adição de Pt, Ta, Hf, Re ou outros metais terra rara, singularmente ou em combinação.

5 60. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que na etapa c) o comprimento das macrotrincas verticais é pelo menos dois terços a espessura do revestimento em comprimento até a espessura completa do revestimento.

61. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que na etapa c) a espessura do revestimento é de 10 cerca de 0,0025 a cerca de 0,10 polegadas (63,5 – 2.540  $\mu\text{m}$ ).

62. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o revestimento tem segmentos de trinca horizontal, que conectam qualquer uma de duas trincas de segmentação verticais, medida na seção transversal polida, tendo um comprimento de 15 soma total menor que 10% da largura do revestimento.

63. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o revestimento tem melhor resistência a sinterização de maneira tal que, a 1.200°C, a densidade aumenta em menos que 0,5% em 4 horas.

20 64. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o revestimento tem trincas de segmentação verticais que são dispostas como células em uma perspectiva de revestimento tridimensional, tendo uma largura de célula média de 0,02 polegadas (508  $\mu\text{m}$ ), e uma faixa de cerca de 0,005 a cerca de 0,2 25 polegadas (127 – 5080  $\mu\text{m}$ ).

65. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o revestimento tem um módulo no plano do revestimento menor que 0,6 MPa, e uma resistência coesiva do revestimento na direção da espessura do revestimento maior que 40 MPa.

66. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o revestimento tem, depois de exposição a 1.200°C por 4 horas, um módulo no plano do revestimento menor que 0,9 MPa; e uma resistência coesiva do revestimento na direção da espessura do revestimento maior que 45 MPa.

67. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o revestimento tem uma condutividade térmica em uma direção através da espessura do revestimento que é menor que 0,014 watt/cm a 25°C e menor que 0,0135 watt/cm a 500°C.

68. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o revestimento tem, depois de exposição a 1.200°C por 4 horas, uma condutividade térmica em uma direção através da espessura do revestimento que é menor que 0,015 watt/cm a 25°C e menor que 0,014 watt/cm a 500°C.

69. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o revestimento tem uma taxa de erosão de partícula para alumina angular de 50 microns a colisão de 20 graus e velocidade de 200 pés/s (60,96 m/s) menor que 1 mg por grama de erosivo a 25°C.

70. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o revestimento tem, depois de exposição a 1.200°C por 4 horas, uma taxa de erosão de partícula para alumina angular de 50 microns a colisão de 20 graus e velocidade de 200 pés/s (60,96 m/s) menor que 0,5 mg por grama de erosivo a 25°C.

71. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o revestimento tem menos que 3 por cento de fase monoclinica por métodos de difração de raios-X.

72. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o revestimento tem, depois de exposição a

1.200°C por 4 horas, menos que 3 por cento de fase monoclinica por métodos de difração de raios-X.

5 73. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que um dispositivo de revestimento por pulverização térmica é usado para depositar o dito pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza, em que um efluente térmico do dispositivo de revestimento por pulverização térmica é usado para pré-aquecer ou aquecer a ponta da pá que está sendo revestida durante o dito processo a uma temperatura de pelo menos 200°C.

10 74. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o dito pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreende uma mistura de dois ou mais pós de zircônia estabilizados com ítria ou itérbia de alta pureza, e o dito revestimento térmico tendo uma densidade de pelo menos 90 por cento de densidade teórica com trincas de segmentação verticais, essencialmente  
15 através da espessura completa do revestimento, e tendo de cerca de 20 a cerca de 100 trincas por polegada linear (25,4 milímetros) medidas em uma linha paralela ao plano do revestimento.

20 75. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que a etapa a) é conduzida com um maçarico de plasma usando gases de processo argônio-hidrogênio ou nitrogênio-hidrogênio.

25 76. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que a etapa a) é conduzida com uma arma ou aparato de detonação usando gases de processo oxigênio-acetileno ou oxigênio-acetileno-propileno.

77. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que adicionalmente compreende tratar termicamente o dito revestimento em vácuo ou ar em uma temperatura de

1.000°C ou mais.

78. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que na etapa (a) a monocamada compreende pelo menos 3 borrifos sobrepostos.

5 79. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que antes da etapa (a), a pá é aquecida a uma temperatura de cerca de 2.000 °F (1.093°C) a cerca de 600°F (316°C).

80. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que depois da etapa (c), a pá revestida é aquecida em vácuo entre cerca de 1.800°F (982°C) a cerca de 2.200°F (1.204°C) por um período de tempo de 1 a 10 horas.

81. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que, depois do aquecimento em vácuo, a pá revestida é aquecida em ar entre cerca de 6.000 °F a 1.200°F (3.316°C – 649°C) por um período de tempo de 0,1 a 4 horas.

82. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que antes da etapa (a), a pá se torna áspera com um jato de água de alta pressão de água pura.

83. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que a pá é uma pá de turbina.

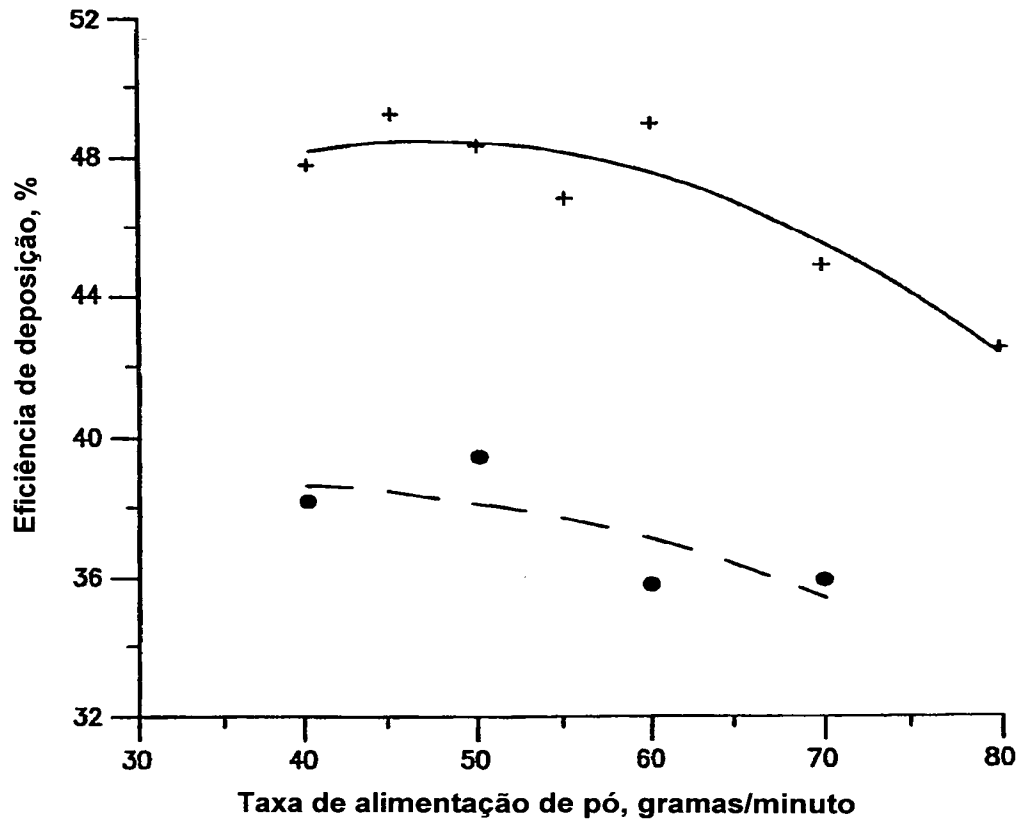
84. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que a pá é uma pá de compressor.

85. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que o revestimento contém partículas abrasivas selecionadas de alumina, cromia e ligas dos mesmos.

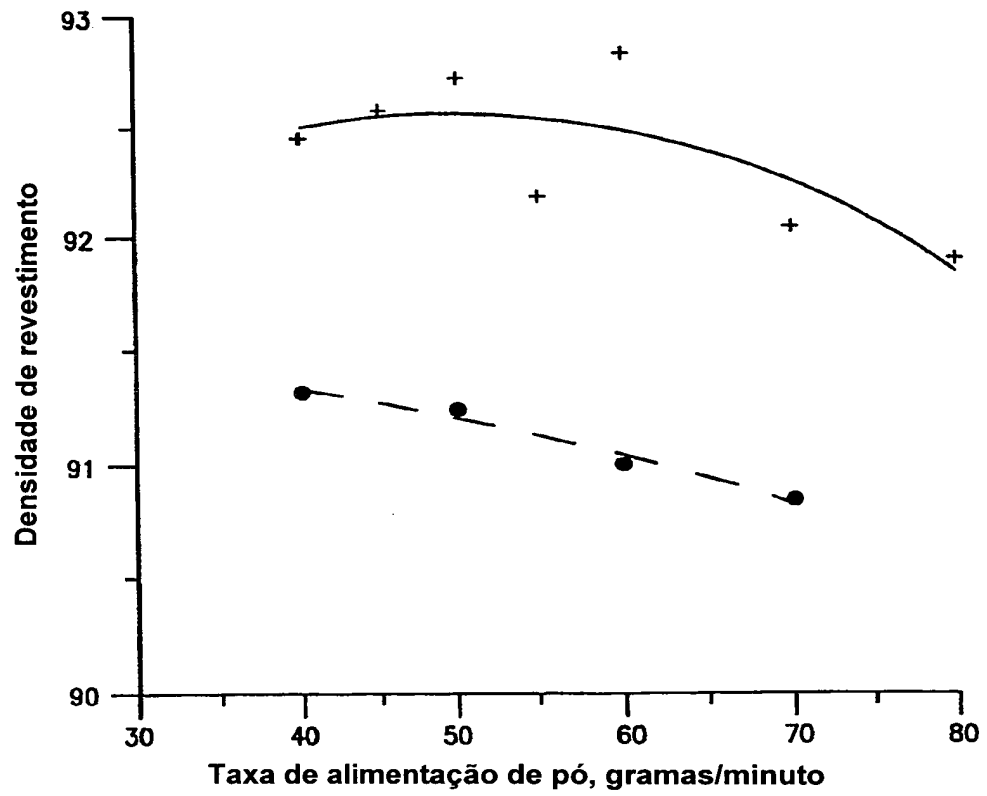
86. Processo de acordo com a reivindicação 42, caracterizado pelo fato de que a ponta da pá tem um raio de borda de pelo menos metade da espessura do revestimento.

87. Processo de acordo com a reivindicação 42,

caracterizado pelo fato de que a pá tem uma área do aerofólio entre a extremidade interna da pá e a ponta da pá e a espessura do revestimento pulverizado termicamente é de 50 a 1.000 microns e estende-se em pelo menos uma porção do aerofólio.



**FIG. 1**

**FIG. 2**

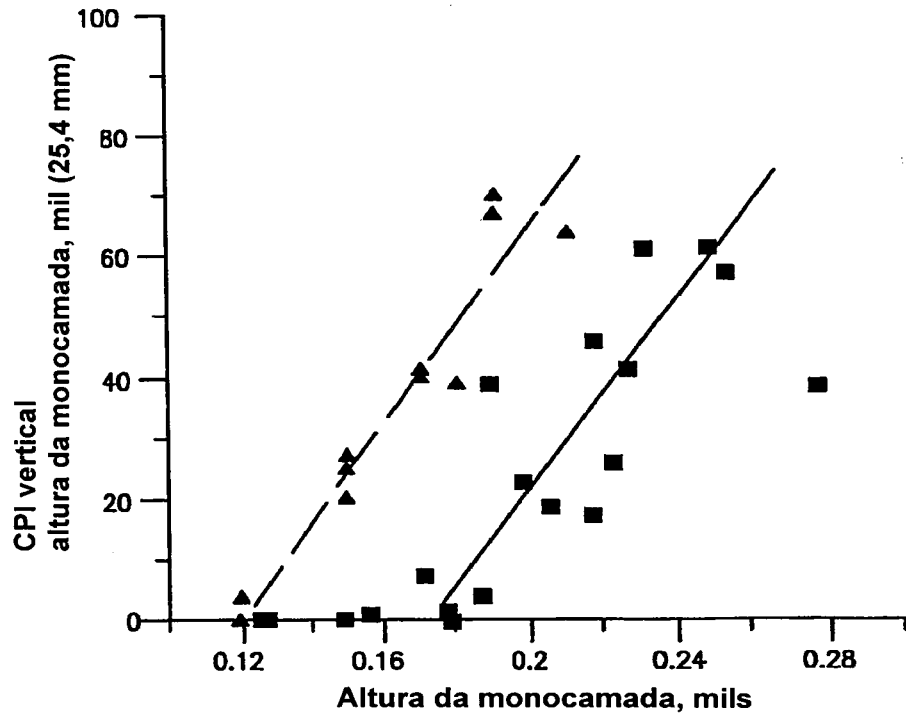


FIG. 3

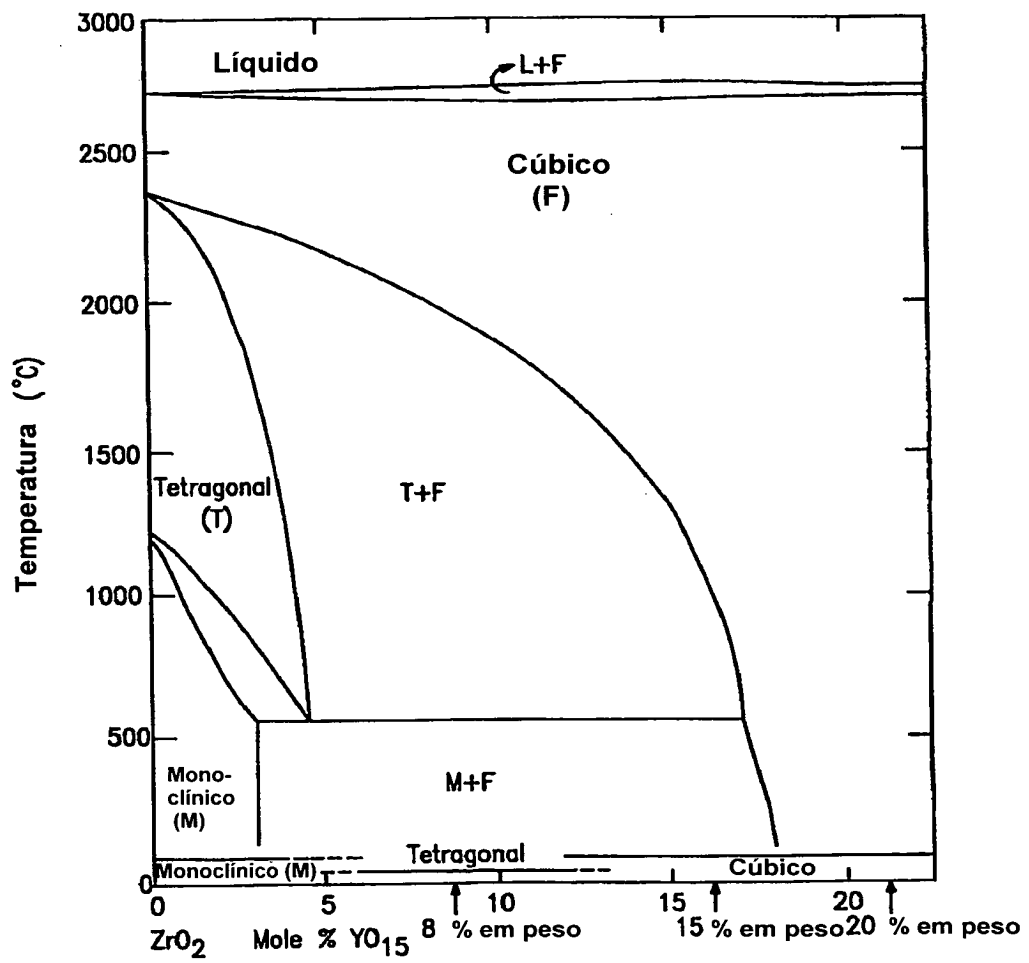


FIG. 4

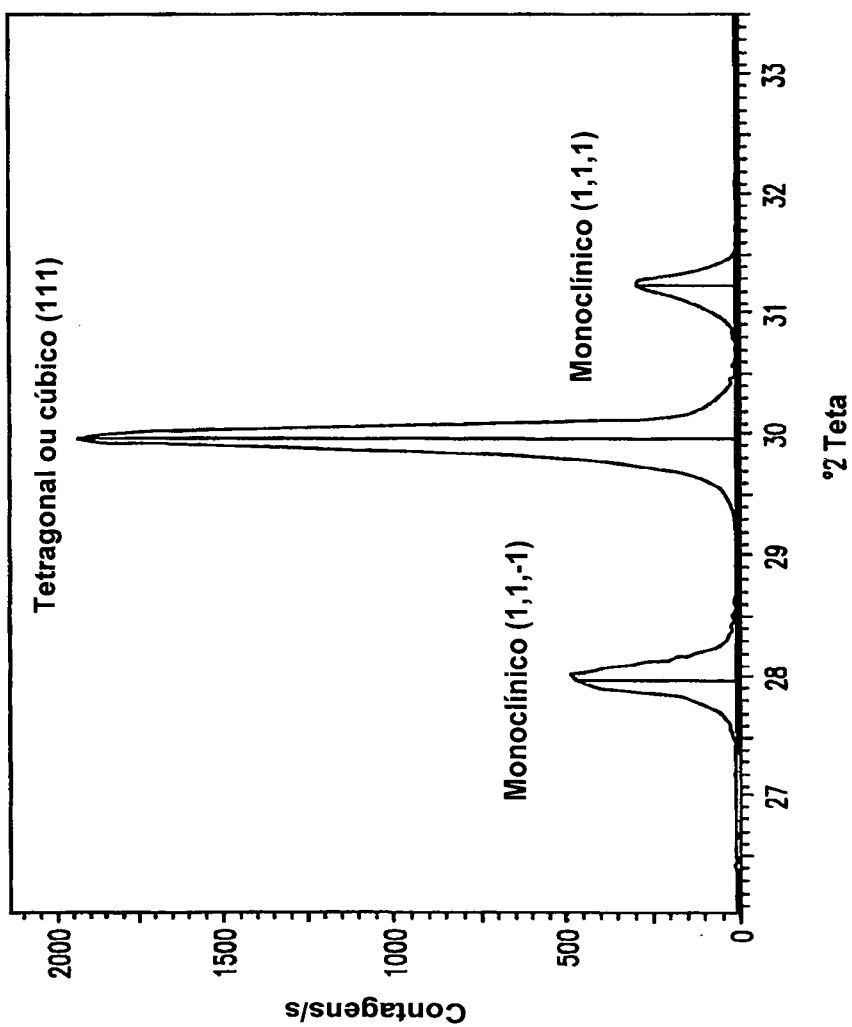
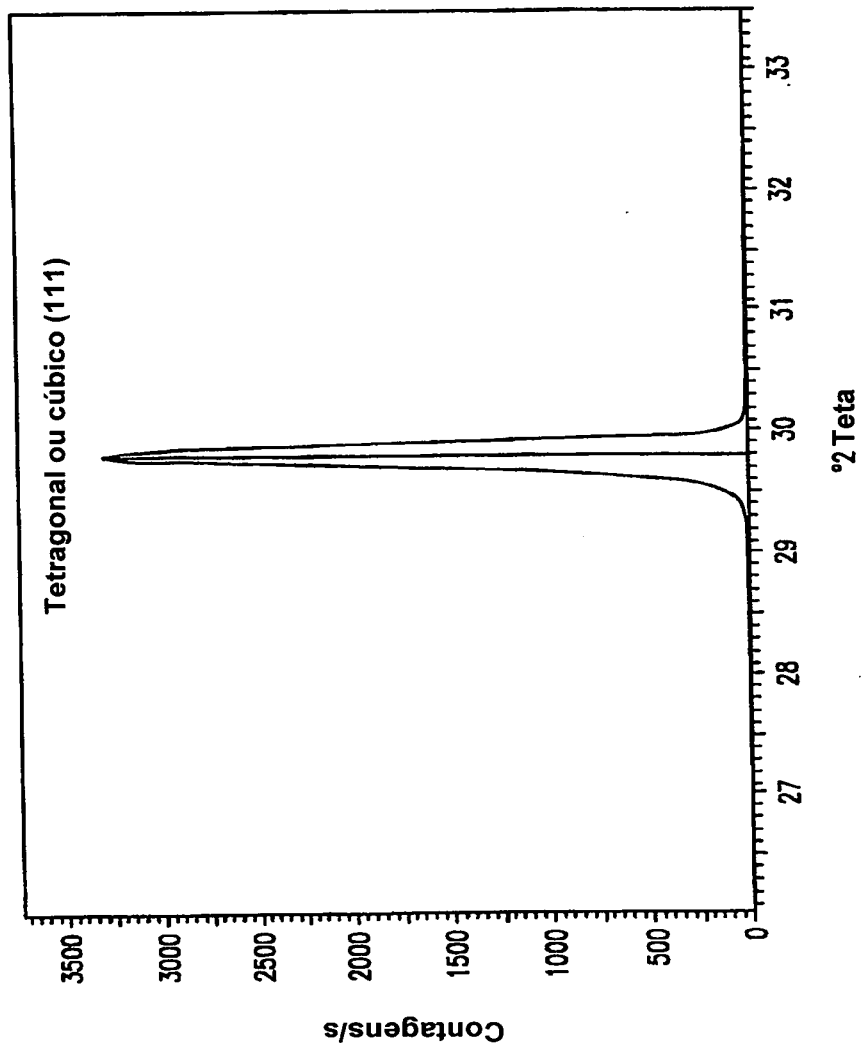
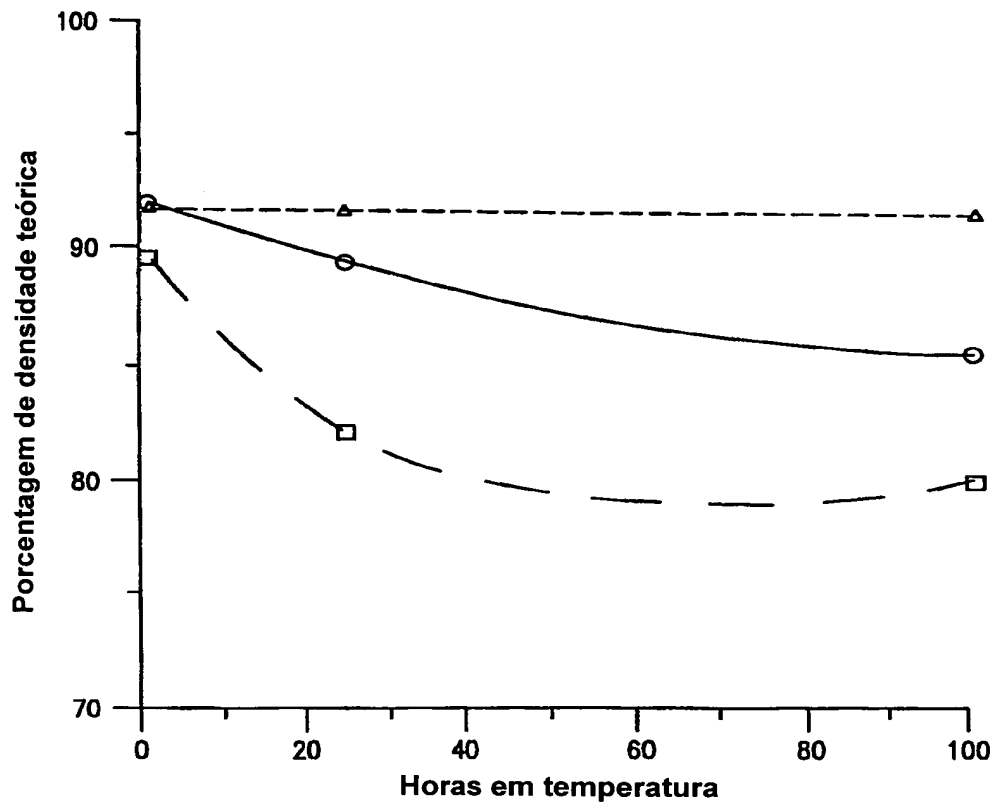
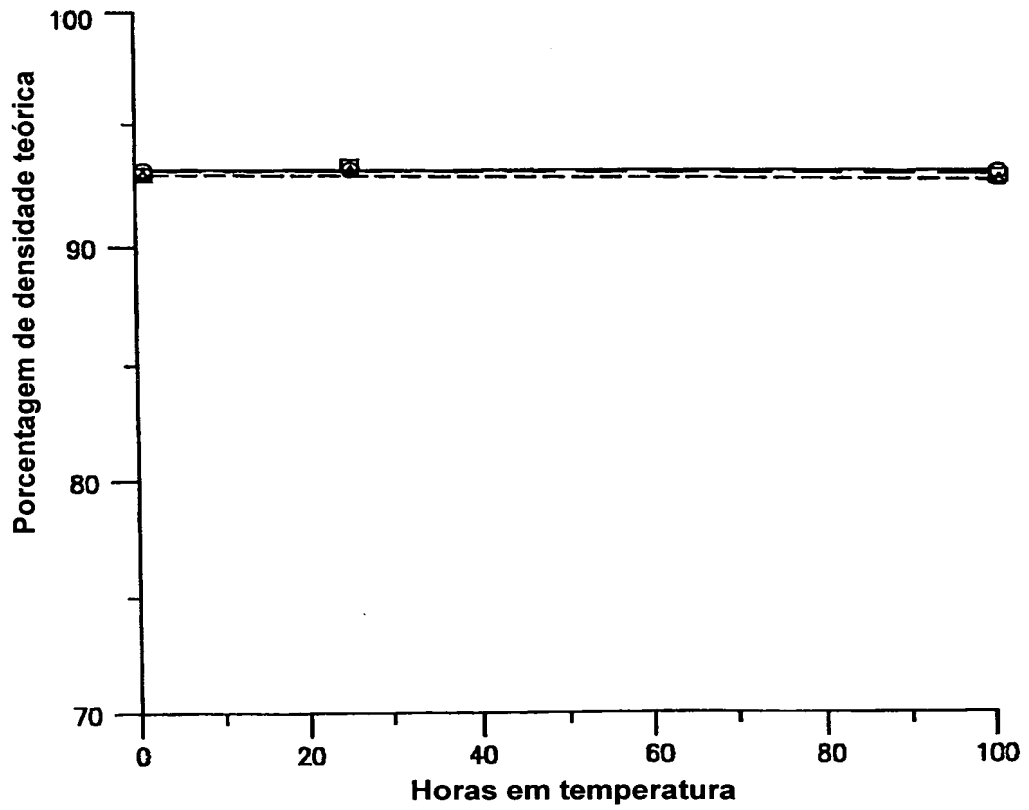


FIG. 5

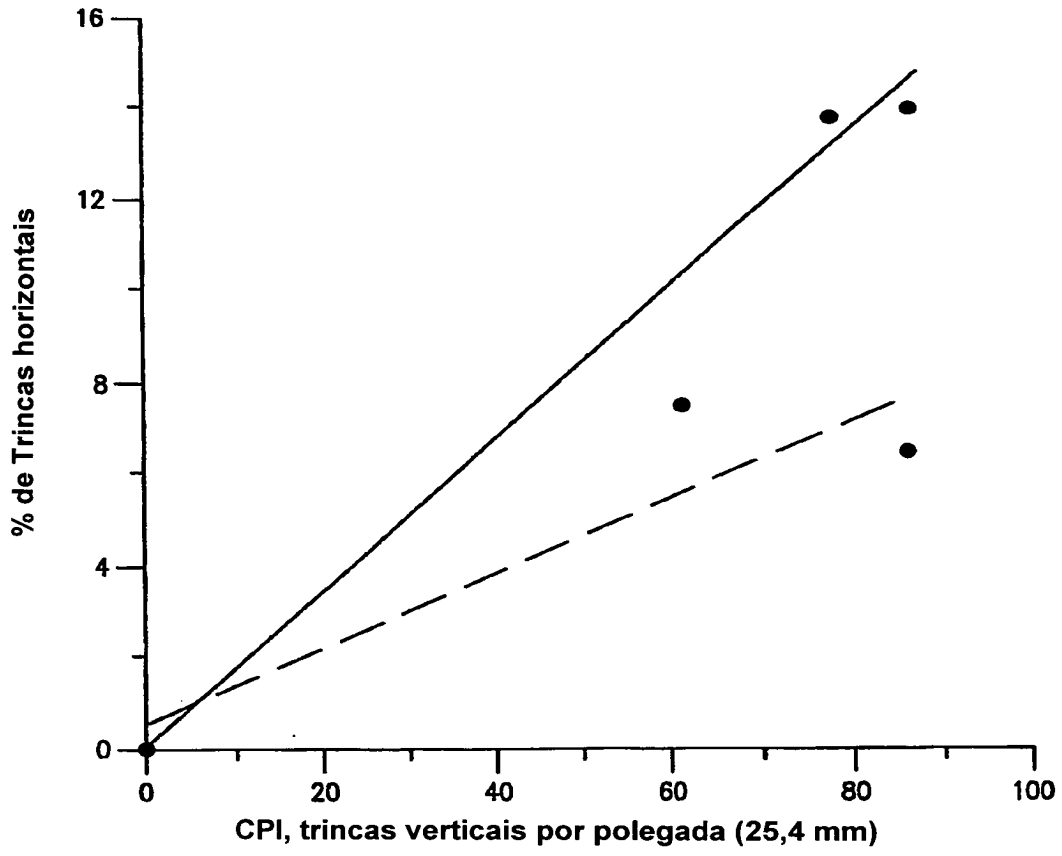


**FIG. 6**

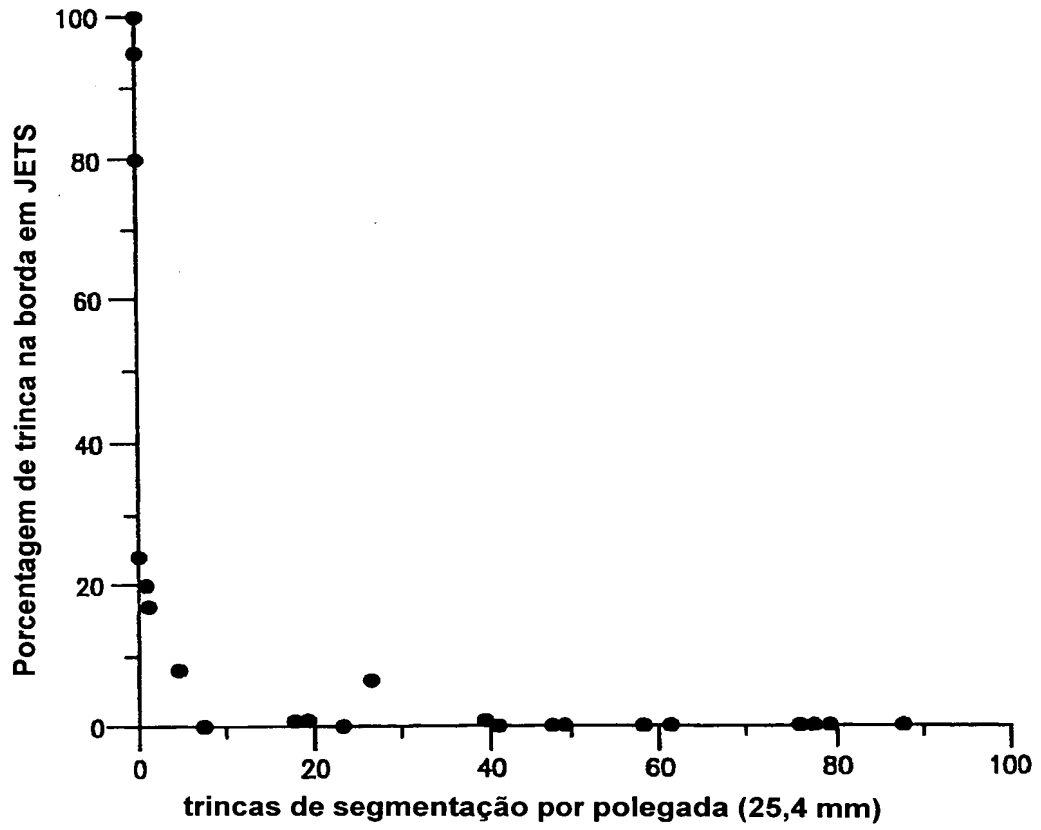
**FIG. 7**



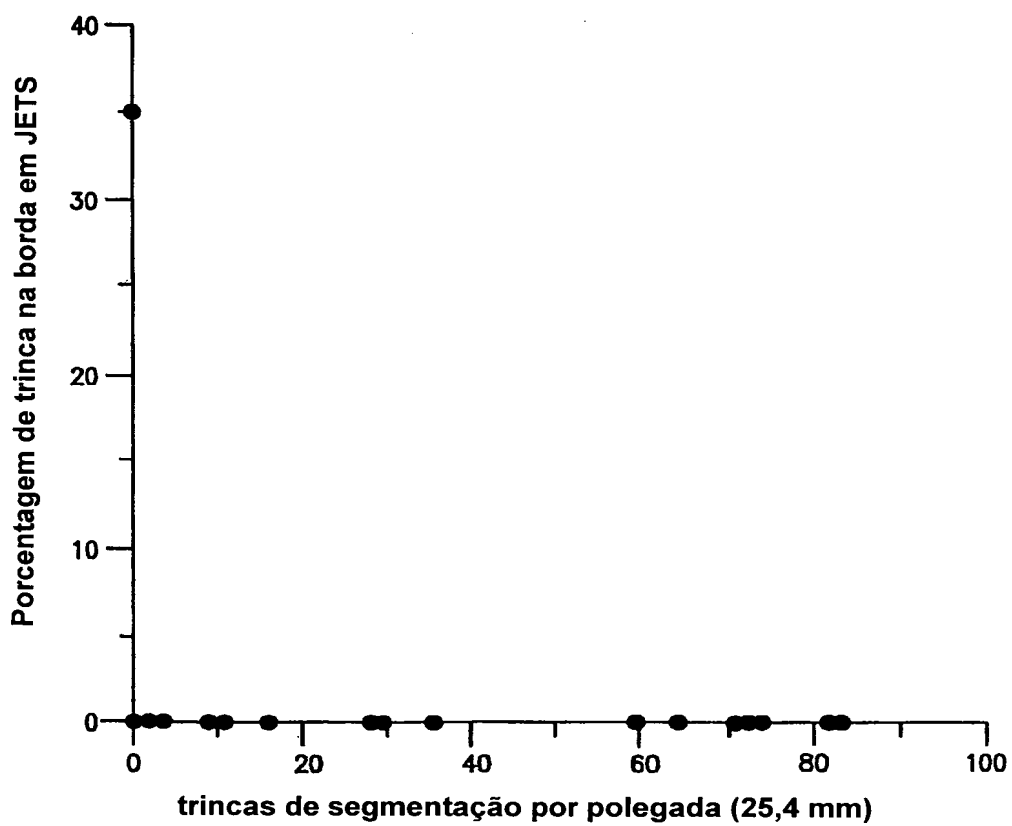
**FIG. 8**



**FIG. 9**



**FIG. 10**

**FIG. 11**

RESUMO

“PÁ PARA UM MOTOR DE TURBINA A GÁS, E, PROCESSO PARA PRODUZIR UM REVESTIMENTO EM PELO MENOS UMA PORÇÃO DE UMA PONTA DE UMA PÁ PARA UM MOTOR DE TURBINA A GÁS”

5. Esta invenção diz respeito a pás para um motor de turbina a gás, as ditas pás tendo uma extremidade interna adaptada para montagem em um cubo e uma ponta da pá localizada do lado oposto da extremidade interna, e em que pelo menos uma porção da ponta da pá é revestida com um revestimento pulverizado termicamente de um pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza, o dito revestimento pulverizado termicamente tendo uma densidade maior que 88% da densidade teórica com uma pluralidade de macrotrincas verticais dispersa de forma substancialmente homogênea em todo o revestimento, em que uma área transversal do revestimento normal à ponta da pá expõe uma pluralidade de macrotrincas verticais que estende-se pelo menos da metade da espessura do revestimento em comprimento até a espessura completa do revestimento e tendo de cerca de 5 a cerca de 200 macrotrincas verticais por polegada linear (25,4 milímetros) medidas uma linha paralela à superfície da ponta da pá e em um plano perpendicular à ponta da pá, e o dito pó de zircônia estabilizado com ítria ou itérbia de alta pureza compreendendo de cerca de 0 a cerca de 0,15 por cento em peso de óxidos de impureza, de cerca de 0 a cerca de 2 por cento em peso de óxido de háfnio (háfnia), de cerca de 6 a cerca de 25 por cento em peso de óxido de ítrio (ítria) ou de cerca de 10 a cerca de 36 por cento em peso de óxido de itérbio (itérbia) e o equilíbrio óxido de zircônio (zircônia).
- 15
- 20
- 25
- Esta invenção também diz respeito a um processo para produzir um revestimento em pelo menos uma porção de uma ponta de uma pá para um motor de turbina a gás.