

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

**(11) PI 0716660-5 B1**

**(22) Data do Depósito:** 14/08/2007

**(45) Data de Concessão:** 15/12/2015  
**(RPI 2345)**



---

**(54) Título:** PEÇA FUNDIDA DE METAL FORMADA EM UM MOLDE COMPREENDENDO UM AGREGADO POR MEIO DE UM PROCESSO DE RESFRIAMENTO RÁPIDO E EXIBINDO UMA MICROESTRUTURA FUNDIDA

**(51) Int.Cl.:** B22D 25/00; B22D 25/06

**(30) Prioridade Unionista:** 16/08/2006 US 11/505019

**(73) Titular(es):** ALOTECH LTD. LLC E ALCAN INTERNATIONAL LTD

**(72) Inventor(es):** JOHN R. GRASSI, JOHN CAMPBELL, J. FRED MAJOR

“PEÇA FUNDIDA DE METAL FORMADA EM UM MOLDE COMPREENDENDO UM AGREGADO POR MEIO DE UM PROCESSO DE RESFRIAMENTO RÁPIDO E EXIBINDO UMA MICROESTRUTURA FUNDIDA”

### **CAMPO DA INVENÇÃO**

[001] A presente invenção diz respeito a peças fundidas de metal. Mais particularmente, a presente invenção diz respeito a peças fundidas de metal conformadas agregadas com uma microestrutura de solidificação fina.

### **FUNDAMENTOS**

[002] No processo de fundição tradicional, metal fusão é vazado em um molde e se solidifica, ou congela, por meio de uma perda de calor para o molde. Quando calor bastante tiver sido perdido do metal a ponto de que ele congele, o produto resultante, isto é, uma peça fundida, pode suportar seu próprio peso. A peça fundida é então removida do molde.

[003] Diferentes tipos de moldes da tecnologia anterior oferecem certas vantagens. Por exemplo, moldes de areia verde são compostos de um agregado, areia, que é agrupado com um ligante tal como uma mistura de argila e água. Esses moldes podem ser fabricados rapidamente, por exemplo, em dez (10) segundos para moldes simples em uma usina de produção de molde automática. Além do mais, a areia pode ser reciclada para uso posterior de maneira relativamente fácil.

[004] Outros moldes de areia geralmente usam ligantes químicos a base de resina que possuem alta precisão dimensional e alta dureza. Tais moldes de areia ligados por resina levam um pouco mais de tempo para fabricar do que moldes de areia verde, em virtude de ter que ocorrer uma reação de cura para o ligante tornar-se efetivo e permitir a formação do molde. Como em moldes ligados por argila, a areia pode geralmente ser reciclada, embora com algum tratamento para remover a resina.

[005] Além da fabricação relativamente rápida e econômica, moldes

de areia também têm alta produtividade. Um molde de areia pode ser descartado depois que o metal fusão tiver sido vazado e deixar que ele esfrie e solidifique, deixando que outros moldes sejam vazados.\_

[006] A areia que é usada como um agregado na moldagem por areia é mais comumente sílica. Entretanto, outros minerais têm sido usados para evitar a transição indesejável de quartzo alfa para quartzo beta a cerca de 570 graus Celsius (°C), ou 1.058 graus Fahrenheit (°F), que incluem olivina, cromita e zircônio. Algumas dessas areias apresentam diferenças secundárias na condutividade térmica em relação à areia de sílica comum e são algumas vezes misturadas como seções do molde ou macho com areia de sílica, ou uma com a outra a fim de tentar e ajudar conseguir solidificação direcional. Esses minerais apresentam certas desvantagens, já que olivina é frequentemente variável na sua composição química, levando a problemas de controle uniforme com ligantes químicos. Cromita é tipicamente triturada, criando grãos angulares que leva a um acabamento superficial deficiente na peça fundida e ao rápido desgaste do ferramental. Zircônio é pesado, aumentando as demandas do equipamento que é usado para formar e lidar como um molde, e causando rápido desgaste da ferramenta. A mistura dessas areias como diferentes componentes de um único molde também complica os esforços na reciclagem da areia.\_

[007] Além do mais, as desvantagens criadas pelos aspectos exclusivos da sílica e minerais alternativos, moldes de areia com argila e ligantes químicos tipicamente não permitem o rápido resfriamento do metal fusão por causa de sua condutividade térmica relativamente baixa. O rápido resfriamento do metal fusão é geralmente desejável, já que é de conhecimento na tecnologia que tal rápido resfriamento melhora as propriedades mecânicas da peça fundida. Além do mais, o resfriamento rápido permite a retenção da maioria dos elementos de liga em solução, introduzindo assim a possibilidade de eliminar subsequente tratamento de solubilização, que economiza tempo e

dinheiro. A eliminação do tratamento de solubilização evita a necessidade da têmpera que tipicamente se segue, eliminando os problemas de distorção e tensão residual na peça fundida que são causados pela têmpera. Com relação às propriedades mecânicas, a fineza da microestrutura da peça fundida está relacionada com a taxa de resfriamento e solidificação. Em geral, à medida que a taxa de resfriamento e solidificação aumenta, a microestrutura da solidificação da peça fundida fica mais fina.

[008] Como uma alternativa a moldes de areia, moldes feitos de metal ou moldes semipermanentes ou moldes com resfriadores são algumas vezes usados. Esses moldes de metal são particularmente vantajosos em virtude de sua condutividade térmica relativamente alta permitir que o metal fusão lingotado resfrie e solidifique rapidamente, levando a propriedades mecânicas vantajosas na peça fundida. Por exemplo, um processo de fundição particular conhecido como fundição em matriz sob pressão utiliza moldes de metal e sabe-se que têm uma taxa de solidificação rápida. Uma taxa de solidificação rápida como esta é indicada pela presença de espaçamento interdendrítico fino (DAS) na peça fundida. Como é conhecido na tecnologia, quanto mais alta a taxa de solidificação, tanto menor o DAS. Entretanto, fundição em matriz sob pressão permite a formação de defeitos em uma parte fundida em virtude da extrema turbulência superficial ocorrer no metal fusão durante o enchimento do molde. A presença de espaçamento interdendrítico fino pode também ser conseguida pelo resfriamento da peça fundida por um resfriador ou aleta localizada. Tais técnicas incluem a aplicação localizada de materiais de resfriamento sólidos, tais como resfriadores de massa de metal ou agregados de resfriamento moldáveis, e similares, que são integrados no molde adjacentes à porção da peça fundida que deve ser resfriada. Entretanto, esses métodos somente fornecem um efeito localizado na região onde o resfriador é aplicado. Este efeito localizado contrasta com os benefícios da invenção discutidos neste pedido, no qual os benefícios da microestrutura fina

podem ser aplicados, se a invenção for implementada corretamente, extensivamente em toda a peça fundida. Isto é um aspecto importante do presente pedido, em virtude de o benefício final ser que a peça fundida apresenta propriedades que não são somente no geral superiores, mas que também são essencialmente uniformes por todo o produto, e assim de grande benefício para o projetista do produto. O produto agora goza essencialmente da uniformidade normalmente associada com peças forjadas.

[009] Uma variedade de processos com molde permanente conhecida na qual a fase líquida residual na estrutura pode ser submetida a rápido resfriamento inclui alguns tipos de fundição semissólida. Neste processo, a lama metálica é formada fora do molde, e consiste em fragmentos dendríticos em suspensão no líquido residual. A transferência desta mistura para uma matriz metálica faz com que o líquido remanescente se solidifique rapidamente, dando uma estrutura fina, mas envolta por dendritas relativamente grosseiras e separadas, geralmente na forma de dendritas degeneradas, rosetas ou nódulos.

[0010] Entretanto, todos os moldes feitos de metal apresentam uma desvantagem econômica significativa. Em virtude de a peça fundida ter que solidificar antes de ser removida do molde, múltiplos moldes de metal têm que ser usados para conseguir alta produtividade. A necessidade de múltiplos moldes em fundição de molde permanente aumenta o custo do ferramental e tipicamente resulta em custos do ferramental que são pelo menos cinco (5) vezes maiores que aqueles associados com moldes de areia.

[0011] Um outro recurso comum da estrutura interna de peças fundidas conformadas convencionais, bem conhecido em bem entendido na indústria de fundição, é que aquelas regiões de maior módulo geométrico (isto é, regiões com uma maior razão de volume para área de resfriamento) em geral têm uma estrutura mais grosseira. Tais regiões da peça fundida tipicamente têm propriedades mecânicas significativamente inferiores.

Adicionalmente, tais regiões normalmente apresentam cavidades de contração ou poros, em virtude de elas serem facilmente isoladas do metal de alimentação em um estágio posterior de solidificação. Tais regiões são geralmente vistas, por exemplo, em pontos quentes formados por uma saliência isolada na chapa relativamente fina, ou no ponto quente que é encontrado na junção T entre duas seções similares. Peças fundidas complicadas são geralmente cheias de tais recursos, resistindo à obtenção de qualquer grau de uniformidade de propriedades. Este problema complica bastante o trabalho do projetista do produto. Por exemplo, o aumento de espessura de uma seção destinado a aumentar sua resistência reduzirá as propriedades e, na pior das hipóteses, pode ainda levar a defeitos, e assim, geralmente até um certo grau indeterminado, é contraproducente.

[0012] Nos locais da peça fundida onde a solidificação é lenta, não somente (i) a estrutura é grosseira, tipificada por um DAS grosseiro, mas (ii) a porosidade está também presente, e (iii) para as ligas de Al que normalmente apresentam ferro como impureza, grandes cristais tipo chapa de fase ricas em ferro podem se formar. Todos esses fatores são bastante prejudiciais à ductilidade da liga.

[0013] Microestruturas fundidas extremamente finas foram produzidas como curiosidades de laboratório em vários estudos científicos (por exemplo, o trabalho de pesquisa da G. S. Reddy e J. A. Sekhar em *Acta Metallurgica*, 1989, vol. 37, número 5, pp 1509-1519 e o trabalho de pesquisa de L. Snugovsky, J. F. Major, D. D. Perovic e J. W. Rutter "Silicon segregation in aluminium casting alloy" *Materials Science and Technology* 200 16 125-128).

[0014] Entretanto, ao contrário a tais estudos de laboratório, a invenção descrita neste pedido fornece as condições exclusivas nas quais as microestruturas de solidificação aqui descritas são produzidas rotineiramente por um processo de produção que pode ser operado para produzir peças

fundidas limitadas a uma única vez ou produzidas no volume certo que são conformadas em três dimensões.

[0015] Em geral é menos sabido que o interior de peças fundidas pode sofrer solidificação acelerada em decorrência de um efeito geométrico nas peças fundidas conformadas. A solidificação inicial próxima da pele da peça fundida ocorre de forma substancialmente unidirecional, e tipicamente varia a uma taxa que diminui parabolicamente com o tempo; isto é, a taxa de solidificação reduz de velocidade à medida que a espessura da camada solidificada aumenta. Ao contrário, o volume do líquido remanescente no centro de uma peça fundida diminui com o tempo, e sofre crescente extração de calor de direções adicionais, de forma que a velocidade de solidificação pode ser bastante aumentada. Este efeito está bem descrito por um dos inventores. Ver Castings, John Campbell, pp 125-126 (2<sup>nd</sup> Edition, 2003), publicado por Butterworth Heinemann, Oxford, UK, cuja revelação na íntegra está aqui incorporada pela referência. O comportamento explica o assim chamado efeito de resfriador inverso em peças fundidas de ferro fundido, em que o centro da peça fundida, aparentemente inexplicavelmente, algumas vezes apresenta uma estrutura branca aparentemente coquilhada, ao contrário das regiões externas da peça fundida que permanece cinza, significando uma baixa velocidade de resfriamento.

[0016] Em decorrência disto, é desejável desenvolver um processo de fundição e aparelhos relacionados que têm a vantagem de rápida solidificação de moldes de metais, também tendo ainda os menores custos, alta produtividade e capacidade de reciclagem associada com moldes de areia.

[0017] É também desejável prover uma peça fundida conformada moldada agregada que apresenta uma região com microestrutura de solidificação fina em extensivas regiões da peça fundida, de maneira promover propriedades substancialmente uniformes similares às de peças forjadas. (Em virtude da insensibilidade relativa de propriedades às variações

na taxa de resfriamento a altas velocidades de resfriamento usadas neste pedido, as variações que são discutidas posteriormente, por exemplo, na figura 4, não afetam significativamente as propriedades, conferindo uniformidade substancial de propriedades ao produto fundido). Em particular, é desejável prover uma peça fundida conformada moldada agregada com uma microestrutura de solidificação fina que é mais fina que uma estrutura produzida por um método de fundição agregado convencional, e possivelmente ainda mais fina que a produzida por um molde permanente.

[0018] É adicionalmente desejável prover uma peça fundida conformada moldada agregada com uma região com microestrutura de solidificação fina que é substancialmente contínua de um ponto distal da peça fundida até o alimentador ou canal de alimentação.

### **SUMÁRIO**

[0019] A revelação fornece, em várias modalidades, uma peça fundida de metal conformada formada em um molde agregado por um processo de resfriamento rápido, a peça fundida compreendendo uma microestrutura de solidificação fina que é mais fina que a microestrutura de uma peça fundida de um metal similar com um peso ou espessura na seção similar que é produzida por um processo de fundição agregado convencional, em que a microestrutura fina compreende um ou mais de grãos, dendritas, fases eutéticas ou suas combinações.

[0020] A revelação também fornece, em várias modalidades, uma peça fundida de metal que apresenta uma microestrutura fundida, a microestrutura compreendendo uma primeira região localizada adjacente a uma superfície da peça fundida de metal, a primeira região compreendendo uma microestrutura de solidificação grosseira; e uma segunda região localizada interna à primeira região, a segunda região compreendendo uma microestrutura de solidificação fina.

[0021] Em um aspecto adicional, a revelação fornece, em várias

modalidades, uma peça fundida de metal formada de uma liga contendo eutéticos, a peça fundida compreendendo uma região com microestrutura de solidificação dupla, em que a região com microestrutura de solidificação dupla compreende (i) uma ou mais regiões contendo dendritas grosseiras; e (ii) uma ou mais regiões contendo eutético fino.

[0022] Adicionalmente, a revelação fornece uma peça fundida de metal conformada feita em um molde que é um molde pelo menos parcialmente agregado, a peça fundida compreendendo uma região com microestrutura dupla, em que a região da microestrutura de solidificação dupla compreende pelo menos uma porção com microestrutura de solidificação grosseira com um tamanho de grão e/ou espaçamento interdendrítico e/ou do eutético na faixa normalmente esperada em um molde agregado ou de metal convencional; e pelo menos uma microestrutura de solidificação fina com um tamanho de grão e/ou espaçamento interdendrítico e/ou do eutético de menos de um terço do espaçamento convencional para essa porção da peça fundida.

[0023] Ainda em um outro aspecto, a revelação fornece uma peça fundida de metal conformada feita em um molde agregado, a peça fundida compreendendo uma região com microestrutura de solidificação dupla, em que a região da microestrutura de solidificação dupla compreende: pelo menos uma porção com microestrutura de solidificação grosseira com um espaçamento interdendrítico na faixa de cerca de 50 a 200 micrometros; e pelo menos uma porção com microestrutura de solidificação fina com um espaçamento interdendrítico de pelo menos cerca de 15 micrometros.

[0024] Em um outro aspecto, a revelação fornece uma peça fundida de metal conformada formada em um molde agregado por um processo de resfriamento rápido, a peça fundida compreendendo uma microestrutura de solidificação fina com um espaçamento interdendrítico que é mais fino que o espaçamento interdendrítico de uma peça fundida com um metal similar de

um peso ou espessura na seção similar à produzida por um processo de fundição moldado agregado convencional ou moldado permanente.

[0025] Adicionalmente, a revelação fornece uma peça fundida de metal conformada com solidez substancial e com propriedades boas e substancialmente uniformes, parecendo até certo ponto com aquelas características normalmente associadas com peças forjadas.

[0026] Outras características e vantagens de peças fundidas de acordo com a revelação são entendidas com mais detalhes com vistas nos desenhos, descrição detalhada, exemplos e reivindicações.

### **BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS**

[0027] A figura 1 é uma curva de resfriamento para uma liga de solução sólida que passa por solidificação dendrítica;

[0028] A figura 1A é um gráfico mostrando o relacionamento entre o espaçamento interdendrítico e velocidade de congelamento ou solidificação;

[0029] A figura 2 é uma micrografia (a 200 X) mostrando a microestrutura de uma liga de solução sólida fundida por métodos de fundição convencionais;

[0030] A figura 3 é uma micrografia de uma liga de solução sólida compreendendo uma região com microestrutura de solidificação fina (estrutura DAS dupla) produzida por ablação;

[0031] As figuras 4A-4E são representações esquemáticas de peças fundidas de metal compreendendo regiões de microestrutura de solidificação fina;

[0032] A figura 5 é uma curva de resfriamento de uma liga de dendrita e eutético mista;

[0033] A figura 6 é uma micrografia (a 200 X) representando a microestrutura de uma liga 356 mostrando partículas de silício eutéticas grosseiras fundida por métodos convencionais;

[0034] A figura 7 é uma micrografia (a 200 X) representando uma

liga A356 solidificada por ablação com regiões de material dendrítico grosseiro mais fino (estrutura DAS dupla) e material eutético fino;

[0035] A figura 8 é uma micrografia (a 200 X) de uma porção de uma liga A356 solidificada por ablação mostrando DAS grosseiro uniforme e fase eutética fina uniforme;

[0036] A figura 9 é uma micrografia (a 200 X) de uma liga A356 solidificada por ablação com regiões eutéticas finas, mas que são ligeiramente grosseiras depois de um tratamento térmico de solubilização;

[0037] A figura 10 é uma micrografia (a 200 X) de uma liga A356 solidificada por ablação exibindo microestrutura dendrítica grosseira e microestrutura eutética basicamente fina, mas contendo traços de fase eutética grosseira;

[0038] A figura 11 é um detalhe da micrografia (a 1.000 X) da figura 10 com um maior aumento;

[0039] A figura 12 representa a taxa de solidificação de várias porções de uma liga dendrítica formada de acordo com uma modalidade exemplar;

[0040] A figura 13 é um gráfico que representa a velocidade de resfriamento de várias seções de uma peça fundida da modalidade exemplar;

[0041] A figura 14 é uma tabela mostrando as propriedades mecânicas de várias peças fundidas da modalidade exemplar;

[0042] A figura 15 é um gráfico de barras e tabela comparando as propriedades mecânicas de peças fundidas de metal formadas por vários métodos de fundição;

[0043] A figura 16 é um gráfico mostrando o relacionamento entre o tamanho de células dendríticas e a velocidade de solidificação para ligas de alumínio;

[0044] A figura 17a é uma micrografia (a 100 X) de uma microestrutura de molde permanente de fundição convencional de uma barra

de 69,9 mm (2,75") de diâmetro de uma liga de alumínio;

[0045] A figura 17b é uma micrografia (a 100 X) de uma microestrutura como esta feita com o processo de ablação para a mesma liga no início da parte que sofreu ablação (primeira parte); e

[0046] A figura 17c é uma micrografia (a 100 X) da última parte que sofreu ablação;

[0047] A figura 18 é uma fotografia de um braço de controle automotivo de liga B206 solidificada por ablação mostrando a localização (em caixa) de onde barras de teste de tração foram usinadas depois do tratamento térmico;

[0048] A figura 19 é uma tabela mostrando as propriedades mecânicas obtidas de uma seção muito espessa de uma peça fundida de liga de alumínio B206 da modalidade exemplar específica;

[0049] A figura 20 é uma tabela mostrando dados da literatura para barras de tração fundidas separadamente de A206 produzidas por vários métodos de fundição;

[0050] A figura 21 é uma micrografia feita de uma peça fundida B206 na forma fundida (F-revenida) obtida do centro da seção espessa mostrada na figura 18 e tendo material dendrítico tanto grosseiro quanto fino (estrutura DAS dupla).

[0051] As figuras são meramente com propósitos de ilustrar as várias modalidades de um desenvolvimento de acordo com a presente revelação e não se pretende que sejam modalidades limitantes do desenvolvimento.

### **DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO**

[0052] A revelação diz respeito a uma peça fundida conformada moldada agregada compreendendo pelo menos uma região com microestrutura de solidificação fina. Uma peça fundida de metal conformada moldada agregada de acordo com a revelação inclui uma região com microestrutura de solidificação que é mais fina que a microestrutura de

solidificação obtida por métodos de moldagem agregados convencionais. Em algumas modalidades, uma peça fundida de metal conformada moldada agregada de acordo com a revelação tem uma microestrutura de solidificação que é substancialmente isenta de porosidade de contração.

[0053] O tipo ou natureza da microestrutura de solidificação variará e dependerá do metal e/ou ligas metálicas que se solidificam. Várias microestruturas incluem dendritas, fase eutéticas, grãos e similares. Em uma modalidade, por exemplo, uma peça fundida conformada pode compreender somente um único tipo de microestrutura. Adicionalmente, uma liga pode apresentar uma microestrutura de solidificação compreendendo uma ou mais diferentes microestruturas. Por exemplo, em uma modalidade, uma peça fundida conformada pode apresentar uma microestrutura compreendendo uma combinação de dendritas e grãos. Em uma outra modalidade, uma peça fundida conformada pode apresentar uma combinação de dendritas e fases eutéticas. Ainda em uma outra modalidade, uma peça fundida conformada pode apresentar uma combinação de dendritas, fases eutéticas e grãos. Essas modalidades não são modalidades limitantes, já que outras combinações e/ou outras microestruturas podem ser possíveis.

[0054] Na forma aqui usada, ligas eutéticas incluem qualquer liga que forma fases eutéticas, incluindo ligas hipoeutéticas, quase eutéticas ou hipereutéticas.

[0055] Uma peça fundida de metal conformada moldada agregada de acordo com a presente revelação pode ser formada por um método tal como o descrito no pedido U.S. número de série 10/614.610, que foi depositado em 7 de julho de 2003, e cuja revelação na íntegra está aqui incorporada pela referência. Em geral, o pedido número de série 10/614.610 revela um processo para o rápido resfriamento e solidificação de peças fundidas conformadas moldadas agregadas. O método também permite a remoção do molde. O processo descrito no pedido número de série 10/614.601 é aqui

referido como "ablação".

[0056] Mediante solidificação durante um processo de ablação, uma peça fundida de metal apresenta uma microestrutura de solidificação fina que é mais fina que a microestrutura de um metal similar com um peso ou espessura da seção similar que é produzido por um processo de fundição agregado convencional. A fineza de uma microestrutura pode ser definida em termos do tamanho ou espaçamento exibido por um tipo particular de microestrutura. Por exemplo, grãos apresentam um tamanho de grão, dendritas exibem um espaçamento interdendrítico, e fases eutéticas exibem um espaçamento eutético.

[0057] Com referência à figura 1, está mostrada uma curva de resfriamento ou solidificação para uma liga de solução sólida. Ligas do tipo solução sólida formam somente grãos e/ou dendritas durante solidificação. A curva de resfriamento mostra o resfriamento de uma liga de solução sólida com o tempo, a partir da temperatura de vazamento ( $T_P$ ) através da temperatura do liquidus ( $T_L$ ) até a temperatura do solidus ( $T_S$ ), que é o ponto no qual a solidificação está completa.

[0058] O resfriamento de uma liga tipo solução sólida em um molde agregado convencional é representado pelo perfil tempo/temperatura "abcdef". O tempo total para o resfriamento usando métodos convencionais é na faixa de minutos a horas e, certamente, depende particularmente da espessura da peça fundida, e da taxa na qual calor pode ser transferido para o molde. A taxa de resfriamento diminui na temperatura liquidus ( $T_L$ ) em decorrência da evolução do calor latente durante a formação de dendritas. A solidificação é completa na temperatura solidus ( $T_S$ ) e a taxa de queda de temperatura aumenta uma vez que a evolução do calor latente cede.

[0059] No ponto "e" na figura 1, a aplicação de qualquer resfriamento rápido é muito tarde para ter qualquer efeito na microestrutura de solidificação. Assim, por exemplo, o perfil de resfriamento "el" não teria

nenhum efeito na microestrutura de solidificação e não é parte deste pedido de patente. Perfis de resfriamento tal como "el", entretanto, são normalmente utilizados na indústria de fundição onde peças fundidas são retiradas de uma matriz metálica e temperadas diretamente em água.

[0060] A estrutura solidificada de ligas de solução sólida tipicamente consiste praticamente em dendritas que são contornadas por uma espessura desprezível de material interdendrítico residual. O espaçamento interdendrítico secundários (geralmente referidos mais simplesmente neste pedido como espaçamento interdendrítico, ou DAS) depende do tempo de congelamento, isto é, o tempo de solidificação, que é o tempo que um local fixo na peça fundida existe a uma temperatura entre a temperatura liquidus  $T_L$  e a temperatura solidus  $T_S$  da liga. Em termos do período de tempo na figura 1a, vê-se que  $t_s = t_c - t_e$ .

[0061] A figura 1a mostra a relação logarítmica aproximada entre o DAS local e o  $t_s$  local em muitas ligas Al comuns. Esta figura ilustra que, para reduzir DAS em um fator de 10,  $t_s$  tem que ser reduzido em um fator de aproximadamente 1.000. (Infelizmente, um relacionamento como este não foi investigado com relação a grãos e espaçamento eutético, e assim uma descrição clara e quantitativa do refinamento desses outros recursos da estrutura de solidificação de algumas ligas não pode ser feita facilmente. Assim, previsões quantitativas de refino da estrutura por ablação descrita neste pedido concentram-se em DAS. Entretanto, deve-se entender que refinamentos similares, mas não quantificados, são confrontados em tamanho de grão e espaçamento eutético). Assim, são necessários aumentos muito grandes na velocidade de resfriamento para afetar substancialmente a fineza da microestrutura de solidificação.

[0062] Embora o relacionamento quantitativo exemplificado na figura 1 esteja descrito com relação a dendritas e espaçamento interdendrítico, refinamentos similares são esperados no tamanho de grão e/ou

espaçamento eutético em ligas compreendendo grãos e/ou fases eutéticas.

[0063] Para métodos de fundição agregados convencionais, para uma pequena peça fundida de liga de alumínio pesando algumas libras ou quilos, o tempo de solidificação local é tipicamente da ordem de cerca de 1.000 segundos. Esses métodos de fundição agregados convencionais produzem peças fundidas com um DAS de cerca de 100 micrometros, e algumas vezes na faixa de cerca de 50 micrometros a cerca de 200 micrometros. Na forma aqui usada, uma microestrutura de solidificação com um DAS maior que 50 micrometros é referida como microestrutura "grosseira". A figura 2 é uma micrografia representando a microestrutura grosseira de uma liga fundida de solução sólida A206 (uma liga Al – 4,5 % em peso Cu nominal) que foi fundida por métodos convencionais.

[0064] Uma peça fundida de acordo com a presente revelação compreende a presença de microestrutura de solidificação fina em pelo menos uma porção da peça fundida. Ou seja, uma peça fundida pode compreender de mais de 0 % até 100 % de microestrutura de solidificação fina. Em uma modalidade, a peça fundida é substancialmente sem nenhuma microestrutura de solidificação grosseira e compreende até 100 % de microestrutura de solidificação fina que é contínua por toda a peça fundida. Em uma outra modalidade, uma peça fundida compreende uma primeira região adjacente à superfície da peça fundida que compreende até 100 % de microestrutura de solidificação grosseira, e uma segunda região interna à primeira região, em que a segunda região compreende até 100 % de microestrutura de solidificação fina. Ainda em uma outra modalidade, uma peça fundida de acordo com a presente revelação compreende uma região contínua, ou pelo menos substancialmente contínua de microestrutura de solidificação fina que se estende de uma extremidade distal da peça fundida até uma extremidade proximal desta, isto é, a extremidade adjacente ao alimentador ou canal de alimentação.

[0065] Em outras modalidades, uma peça fundida compreende uma região com microestrutura de solidificação dupla intermediária à região com microestrutura de solidificação grosseira e uma região com microestrutura de solidificação fina. Na forma aqui usada, uma região com microestrutura dupla é uma região que inclui áreas de microestrutura grosseira com uma ou mais áreas de microestrutura fina dispersa nela. Ainda em uma outra modalidade, a microestrutura de solidificação dupla em uma peça fundida é substancialmente contínua de uma extremidade distal da peça fundida até o alimentador.

[0066] O espaçamento interdendrítico no geral depende do tempo no qual ocorre a solidificação. Conforme mostrado na figura 1A, o relacionamento log/log do espaçamento interdendrítico com o tempo de solidificação é linear e, para ligas de alumínio, por exemplo, tem uma inclinação de aproximadamente  $1/3$ . O gráfico mostra que existe aproximadamente um fator de 5 de redução do espaçamento para cada fator de 100 no tempo de solidificação. Assim, uma seção da peça fundida particular em um molde convencional pode se solidificar em 1.000 segundos, dando um DAS correspondente de 100 micrometros. Na técnica de resfriamento rápido descrita no pedido U.S. número de série 10/614.601, a mesma seção da peça fundida resultaria em um tempo de solidificação local de apenas aproximadamente 10 segundos, dando um espaçamento interdendrítico de cerca de 20 micrometros. O relacionamento entre o espaçamento e o tempo de solidificação permanece constante durante todo o tempo experimental. A figura 3 é uma micrografia mostrando regiões tanto de microestrutura fina quanto regiões de microestrutura grosseira.

[0067] Com referência às figuras 4A-4E, estão mostradas várias modalidades exemplares de peças fundidas de metal conformadas moldadas agregadas compreendendo uma região com microestrutura de solidificação fina.

[0068] Com referência à figura 4A, está mostrada uma modalidade na qual uma peça fundida compreende uma pequena porcentagem de microestrutura de solidificação fina. A peça fundida na figura 4A representa uma situação na qual o processo de resfriamento rápido, tal como ablação, é aplicado posteriormente no processo de fundição. Na peça fundida na figura 4a, ocorreu um pouco de solidificação antes do rápido resfriamento (por exemplo, ablação), e porções da peça fundida, tais como aquelas que têm um pequeno módulo geométrico (razão do volume para área de resfriamento) convencionalmente solidificam. Regiões de microestrutura de solidificação dupla ocorrem onde algumas porções se solidificaram antes da ablação, mas outras porções permanecem líquidas no momento em que começa a ablação. Mesmo em um exemplo tal como da figura 4A onde uma porção da peça fundida se solidificou antes de um processo de resfriamento rápido, e assim constituindo uma aplicação bem além da ideal desta invenção, a presença mesmo de uma pequena quantidade de microestrutura de solidificação fina é vantajosa. Especificamente, em processos convencionais, a pequena porcentagem de líquido residual em ligas metálicas que permanece é particularmente difícil de solidificar sem criar defeitos, tal como porosidade de contração. A aplicação de uma técnica de resfriamento rápido, tal como ablação, entretanto, converte essas regiões de zonas defeituosas em zonas de estrutura fina. A presença mesmo de pequenas zonas de estrutura fina fornece boas propriedades mecânicas, comparadas com aquelas zonas defeituosas de uma peça fundida convencionalmente solidificada. Embora seja de se esperar que a região aprisionada de líquido residual ilustrada na figura 4A demonstre alguma porosidade de contração, a solidificação por ablação desta região reduzirá a extensão da contração e a substituirá por uma região correspondente de material resistente e consistente. É de se esperar que o perfil da microestrutura de solidificação da figura 4A onde é aplicada a etapa de resfriamento rápido bem depois, próxima, mas antes, do ponto "e" no

gráfico da figura 1.

[0069] Em uma outra modalidade, uma peça fundida conformada moldada agregada compreende uma região com microestrutura de solidificação fina e uma região com microestrutura de solidificação dupla, em que a região com microestrutura de solidificação dupla é substancialmente contínua de uma extremidade distal da peça fundida até uma extremidade proximal da peça fundida. A modalidade da figura 4B é um exemplo de uma modalidade de uma peça fundida com uma região com microestrutura de solidificação dupla substancialmente contínua. É de se esperar que o perfil da microestrutura de solidificação da figura 4B seja um perfil que segue o perfil de resfriamento "abcdjk" na figura 1. Na figura 4B, o ponto de solidificação é atingido e passa o ponto no qual a solidificação natural da seção limitada atinge o centro da seção. A peça fundida é solidificada por um procedimento de resfriamento rápido, tal como ablação, das partes mais distantes da peça fundida até o ponto central. Se a zona de estrutura fina produzida pelo rápido resfriamento termina ao se atingir a restrição do módulo (tal como se dá na modalidade da figura 4B) a peça fundida solidificará consistentemente até este ponto. Mesmo que a microestrutura de solidificação dupla esteja ausente na região local da restrição nesta modalidade na figura 4B, o rápido tempo de solidificação local em todo o restante da peça fundida cria uma zona substancialmente contínua de uma liga fina e sólida, sem defeitos de contração, em todo o restante da peça fundida. Assim, provocando a solidificação direcionalmente a partir de regiões distais para as proximais do alimentador, as porções mais distantes da peça fundida exibirão microestrutura de solidificação fina e solidez mecânica que não foram conseguidas por métodos convencionais.

[0070] Na modalidade da figura 4C, a peça fundida inclui uma maior porcentagem de microestrutura de solidificação fina, e a região da microestrutura de solidificação dupla é contínua na região restrita da peça

fundida. Uma microestrutura de solidificação desejável como esta pode ser conseguida aplicando-se um procedimento de resfriamento rápido, tal como ablação, em um momento anterior ao da figura 4B.

[0071] Em uma outra modalidade, tal como a da figura 4D, uma peça fundida de metal compreende uma região com microestrutura de solidificação fina desejável que é substancialmente contínua das extremidades distais da peça fundida até o alimentador. Uma microestrutura de solidificação como esta pode ser conseguida aplicando-se um procedimento de resfriamento rápido cedo no perfil de resfriamento. Nesta modalidade, a peça fundida pode também incluir regiões de microestrutura de solidificação dupla e microestrutura de solidificação grosseira. É de se esperar o perfil da microestrutura de solidificação das figuras 4C e 4D pela aplicação de um resfriamento rápido em um tempo anterior, de maneira tal que a parte mais estreita da peça fundida siga um trajetória a começar em um ponto entre c e d no perfil de resfriamento na figura 1.

[0072] Ainda em uma outra modalidade, tal como a modalidade da figura 4E, toda a microestrutura de solidificação compreende uma microestrutura de solidificação fina. Uma estrutura desejável como esta pode ser conseguida aplicando-se um método de resfriamento rápido no ponto "b" na curva de resfriamento da figura 1 e seguindo o perfil "abghi". Isto ocorreria se não ocorrer nenhuma solidificação por causa da perda de calor para o molde e a solidificação ocorrer completamente de forma unidirecional e em uma alta velocidade. Entretanto, uma estrutura como esta não é facilmente atingida e tem ainda que ser experimentalmente conseguida pelos inventores. Dificuldades em se conseguir esta microestrutura de solidificação surgem da colisão do líquido refrigerante diretamente na superfície da peça fundida ainda líquida. Uma peça fundida compreendendo 100 % de microestrutura de solidificação fina pode ser conseguida sob certas condições tal como usando um molde altamente isolante e aplicando um processo de solidificação

altamente direcional.

[0073] Uma peça fundida de metal conformada moldada agregada pode compreender de cerca de 1 a cerca de 100 % de microestrutura de solidificação fina. Mesmo uma pequena quantidade de microestrutura de solidificação é desejável para melhorar as propriedades mecânicas de uma peça fundida. Isto é especialmente o caso em que a criação de pequenas quantidades de microestrutura de solidificação fina denotando como se dá nesta invenção a ação de solidificação direcional, e, assim, alimentação ideal, impede que defeitos, tal como porosidade de contração, ocorram na peça fundida.

[0074] Peças fundidas de acordo com a presente revelação que incluem uma região com microestrutura de solidificação fina podem ser formadas de qualquer liga de solução sólida que se solidifica dendriticamente. Essas incluem tanto materiais ferrosos quanto materiais não ferrosos. O espaçamento interdendrítico tanto de regiões de microestrutura de solidificação grosseira quanto fina irá variar dependendo do metal que é usado. Com relação a ligas de alumínio, regiões de microestrutura de solidificação grosseiras tipicamente têm um espaçamento interdendrítico maior que cerca de 50 micrometros. Em algumas modalidades, a microestrutura de solidificação grosseira tem um espaçamento interdendrítico de cerca de 50 a cerca de 200 micrometros. Também, em ligas de alumínio, a microestrutura de solidificação fina tem um espaçamento interdendrítico de menos de cerca de 15 micrometros e, em algumas modalidades, é de cerca de 5 a cerca de 15 micrometros.

[0075] Ligas nas quais a solidificação ocorre parcialmente pela solidificação dendrítica e parcialmente pela solidificação eutética, como é típico de muitas ligas Al-Si, exemplificadas pela liga Al-7Si-0,4 Mg (A356), podem também exibir microestrutura dendrítica fina e/ou eutética fina. A curva de resfriamento convencional para ligas dendríticas/eutéticas mistas

está ilustrada na figura 5 como a curva "a-h". A começar na temperatura de vazamento ( $T_P$ ) no ponto "a" a liga líquida resfria até a temperatura liquidus ( $T_L$ ), no ponto "c", que é o ponto no qual as dendritas começam se formar. O crescimento dendrítico é completado no ponto "e", que é a temperatura eutética ( $T_E$ ). A queda de temperatura é impedida, formando um patamar até o término da solidificação eutética no ponto "g". Neste ponto, a peça fundida está completamente solidificada, e resfriamento adicional até a temperatura ambiente segue "gh". Uma segunda liga de exemplo de uma liga Al-Si que se beneficia poderosamente da aplicação desta invenção é a liga A319 amplamente usada. Esta liga também contém um pouco de cobre. A liga difere um pouco da A356 por ter uma região de formação de eutético "eg" que não é isotérmica, o patamar horizontal "eg" da figura 5 sendo substituído por uma inclinação para baixo estacionária. Entretanto, os mesmos princípios se aplicam precisamente.

[0076] Este resfriamento convencional lento, por exemplo, em molde de areia de sílica, resulta em uma estrutura de dendritas com um DAS na região de 200 até 50 micrometros. As dendritas são envoltas pelo eutético, que é caracterizado por um espaçamento na região de 20 até 2 micrometros. Isto está denotado pela microestrutura eutética convencional ou "grosseira" com propósitos de nossa descrição (figura 6).

[0077] Se fosse possível submeter a liga a um resfriamento total por ablação, o perfil de resfriamento seguiria a trajetória "bijkl" de forma que toda a microestrutura de solidificação consistisse em dendritas finas e eutético muito fino. Entretanto, conforme discutido anteriormente, embora esta estrutura não seja facilmente obtida, e tem ainda que ser testada pelos inventores, ela pode ser concebível em condições especiais. Essas condições podem incluir circunstâncias nas quais o molde é altamente isolante, e a solidificação é altamente direcional. Peças fundidas com excelentes propriedades mecânicas, no entanto, são obtidas sem lançar mão dessas

condições especiais.

[0078] Em geral, um perfil de resfriamento mais prático está ilustrado pela curva de resfriamento "abcdrmno". Nesta situação, o resfriamento anterior de "cd" cria dendritas grosseiras para reforçar a peça fundida no seu estado quente parcialmente solidificado e, portanto, fraco, antes da aplicação do refrigerante. As dendritas subsequentes e o eutético são ambos então submetidos ao resfriamento rápido, de forma que a microestrutura de solidificação fina inclui tanto dendritas finas (DAS na região de 30 até 5 micrometros) e eutético fino (não resolvido com aumento de 1.000 X, uma vez que seu espaçamento é em torno de apenas 1 micrometro).

[0079] As duas regiões da microestrutura conseqüentemente dupla formam áreas visualmente altamente distintas quando vistas ao microscópio. A figura 7 mostra uma estrutura na qual a ablação foi aplicada a tempo de solidificar parte do material dendrítico, seguido pela solidificação rápida de todo o eutético. O eutético é tão fino que não pode ser resolvido nesta imagem, mas aparece como uma fase cinza clara uniforme (neste caso, a liga não teve ação de refino das adições de modificadores químicos tal como Na ou Sr). Adicionalmente, em virtude de todo o eutético se solidificar ao longo da trajetória "mn", toda a fase eutética, entre tanto as dendritas finas quanto grosseiras, é vista uniformemente fina na figura 7.

[0080] O eutético uniforme e extremamente fino é um recurso comum de microestruturas de solidificação com ablação e é exclusivo para ligas resfriadas por ablação que não receberam benefício da modificação química por Na ou Sr como uma ajuda para refinar a microestrutura. Vê-se na figura 8, na qual uma certa impureza finamente distribuída e porosa associada pode também ser vista na estrutura. As propriedades mecânicas das peças fundidas parecem ser notavelmente insensíveis à maioria dos defeitos desta variedade e tamanho. A figura 9 ilustra um eutético fino similar depois de um tratamento térmico de solubilização. Na figura 9, o eutético cresceu um pouco para

reduzir sua energia interfacial como é comum para estruturas bifásicas submetidas a tratamento de alta temperatura.

[0081] Em princípio, embora não normalmente desejável, seria possível permitir que todas as dendritas solidificassem com a estrutura grosseira, fazendo somente uma aplicação posterior do resfriamento de ablação, tal como, por exemplo, no ponto "f" na figura 5. Neste caso, parte do eutético teria solidificado com uma estrutura eutética grosseira. Uma estrutura como esta está mostrada na figura 10. As regiões finais do eutético que se solidificam com o benefício do resfriamento por ablação adotam a estrutura extremamente fina e são em geral isentas de porosidade e apresentam somente fases finas em ferro finas, que são em geral muito pequenas para ser vistas na figura 10. A um maior aumento, umas poucas fases ricas em ferro podem ser vistas, conforme mostrado na figura 11.

[0082] Para ligas dendríticas/eutéticas mistas, a maioria dos benefícios da ablação é desfrutada por aquelas estruturas vistas nas figuras 10 e 11, em virtude de a solidificação progressiva do líquido residual ainda ser efetiva para alimentar a peça fundida direcionalmente. A liga na figura 10, por exemplo, foi tratada termicamente, portanto, até certo ponto aumentando o tamanho de todas as partículas de silício na fase eutética.

[0083] Na prática, entretanto, é desejável, e facilmente obténível, que alguma estrutura dendrítica grosseira seja formada antes da aplicação da ablação (ponto de partida "d" na figura 5). A microestrutura dendrítica resultante usual é, portanto, dupla no sentido supradescrito e inclui eutético relativamente fino uniforme.

[0084] Como antes, se refrigerante for aplicado muito depois, por exemplo, seguindo a trajetória "gq" na figura 5, a ação da ablação não pode influenciar a microestrutura de solidificação da peça fundida, certamente, em virtude de a peça fundida ter sido completamente solidificada antes de qualquer aplicação de um refrigerante. Tal resfriamento de uma peça fundida

não forma parte deste pedido de patente, e se enquadra no regime de produção de peças fundidas bem conhecido pelos versados na técnica.

[0085] Para peças fundidas convencionalmente resfriadas (aquelas que adotam a trajetória de resfriamento que termina em "h" ou "q") as últimas regiões da peça fundida a solidificar geralmente têm porosidade. Além do mais, tais peças fundidas, quando feitas em uma liga de alumínio típica, tal como a liga A356, geralmente têm plaquetas finas de precipitados de ferro beta que prejudicam ainda mais as propriedades.

[0086] Peças fundidas resfriadas por ablação, incluindo tanto peças fundidas dendríticas quanto peças fundidas dendríticas/eutéticas, compreendendo uma microestrutura de solidificação fina são geralmente isentas de defeitos que são geralmente encontrados em peças fundidas formadas por métodos de fundição convencionais. Em uma modalidade, uma peça fundida compreendendo uma porção com microestrutura de solidificação fina é substancialmente isenta de porosidade. A rápida solidificação e alimentação direcional criada pela ablação reduz tanto porosidade por gás quanto pela contração. Em uma outra modalidade, uma peça fundida compreendendo uma porção com microestrutura de solidificação fina é substancialmente isenta das plaquetas ricas em ferro prejudiciais grandes. Em outras modalidades, uma peça fundida é substancialmente isenta tanto de porosidade quanto de plaquetas ricas em ferro. Sem querer ficar preso a nenhuma teoria particular, a redução no tamanho das plaquetas ricas em ferro pode ser o resultado da têmpera mais rápida da liga líquida. A redução da porosidade também se beneficia desta velocidade. Além do mais, ela é significativamente auxiliada pela ação naturalmente progressiva do processo de ablação, em que a ação de resfriamento da água (ou outro fluido) desloca-se estavelmente ao longo do comprimento da peça fundida para ativar a solidificação em um modo altamente direcional no sentido da fonte de metal de alimentação. Além disso, a manutenção de uma zona pastosa relativamente

estreita pela imposição de um alto gradiente de temperatura desta maneira é altamente efetiva para assistir na alimentação da peça fundida.

[0087] A redução substancial ou eliminação da porosidade da contração é significativa, e pode ser estabelecida da seguinte maneira. Porosidade pela contração é normalmente esperada em regiões da peça fundida tal como um ponto quente não alimentado. Em princípio, entretanto, essas regiões podem ser alimentadas se o processo de solidificação for realizado unidirecionalmente. A água ou outro fluido de resfriamento é aplicada para realizar a ablação do molde e resfriar e fazer com que a solidificação na peça fundida se dê sistematicamente, criando um gradiente de temperatura exclusivamente direcional forte. Assim, essas regiões que seriam isoladas do líquido de alimentação em uma fundição convencional são facilmente e automaticamente alimentadas até a solidez, ou solidez bastante melhorada, quando os benefícios da invenção são corretamente aplicados.

[0088] Por este motivo, ligas que não podem normalmente ser fundidas como peças fundidas conformadas em virtude de problemas de fragilidade a quente, tais como as ligas brutas 6061 e 7075, etc., ou com grande faixa de solidificação, tais como as ligas 7075 e 852, podem facilmente e proveitosamente ser fundidas em uma forma conformada por meio de técnicas de ablação. Além do mais, as peças fundidas submetidas a ablação são caracterizadas por uma microestrutura de solidificação que é imediatamente identificável como exclusiva em uma peça fundida conformada.

[0089] Uma peça fundida de metal conformada moldada agregada compreendendo uma região com microestrutura de solidificação fina está descrita com detalhes com referência aos exemplos seguintes. Os exemplos são meramente com propósitos de ilustrar modalidades potenciais de uma peça fundida de metal conformada com uma região com microestrutura de solidificação fina e não têm o objetivo de ser modalidades limitantes destas.

**EXEMPLOS**

[0090] Em um exemplo da aplicação da técnica descrita neste pedido, uma barra de teste simples foi moldada com diâmetro de 20 mm e comprimento de 200 mm fornecida com uma pequena bacia de vazamento cônica em uma extremidade que foi cheia para agir como um alimentador. O material do molde foi areia de sílica ligada com ligante inorgânico solúvel em água descrito no pedido copendente 10/614.601 das requerentes.

[0091] Termopares são inseridos na cavidade do molde na base do alimentador, e na base da cavidade. Dois termopares adicionais foram posicionados em intervalos iguais ao longo do eixo geométrico. Esses quatro termopares foram rotulados TC1 (canal de alimentação), TC2 (seção intermediária superior), TC3 (seção intermediária inferior) e TC4 (base).

[0092] Uma liga de alumínio 6061 a uma temperatura de 730°C (1.350°F) foi vazada na cavidade, arranjada com seu eixo geométrico vertical. Em aproximadamente 10 segundos, água a 20°C (68°F) foi então aplicada por bicos direcionados para a base do molde de maneira a começar a ablação do molde da base para cima. A taxa de progressão ascendente da frente de ablação foi aproximadamente 25 mm/s.

[0093] Os traços de resfriamento dos quatro termopares foram registrados tal como visto na figura 12. O termopar TC4 é visto resfriar rapidamente, sinalizando a solidificação e resfriamento abaixo do ponto de ebulição da água em apenas cerca de 2 segundos. Neste momento, o termopar imediatamente acima, TC3, atina registra que o metal está ainda fundido, e que o resfriamento apenas começou. Este padrão é repetido sucessivamente até o molde. (O salto de temperatura para TC2 registra a perda momentânea não intencional de água de resfriamento neste experimento). Os traços térmicos confirmam que o gradiente de temperatura causado pela aplicação de ablação foram suficientes para solidificar o material fundido e resfriá-lo até próximo da temperatura ambiente em uma distância menor que o

espaçamento entre termopares (50 mm). Além disso, o efeito foi facilmente e precisamente sustentado no comprimento de uma peça fundida automotiva média.

[0094] Em um segundo exemplo, uma peça fundida de articulação automotiva foi fabricada em liga A356. Muitas peças fundidas de junta têm uma reputação de ser difíceis de fundir em virtude de sua complexidade, tendo seções pesadas distantes dos pontos onde os alimentadores podem ser adicionados. Esta peça fundida não foi exceção. A peça fundida foi cheia com metal a 750°C (1.385°C) em uma estação de vazamento basculante, levando 8 segundos para encher, resultando em um excelente acabamento superficial. O alimentador (canal de alimentação) foi localizado na extremidade distante da peça fundida do copo de vazamento e abaixo no canal de descida. Termopares no canal de descida e no alimentador estão ilustrados na figura 13. Vê-se que a solidificação ocorre no canal de descida, sendo o primeiro a sofrer ablação, em aproximadamente 20 segundos. A solidificação continuou assim através da peça fundida, chegando ao alimentador em aproximadamente 90 segundos depois, em cujo ponto o alimentador se solidificou ao mesmo tempo em cerca de 20 segundos.

[0095] Para atingir ablação desta peça fundida, três bancos de bicos de aspersão de água foram empregados, com pressão de água de aproximadamente 0,7 bar (aproximadamente 10 psi) e temperatura aproximadamente 40°C (aproximadamente 100°F).

[0096] A peça fundida foi considerada completamente sólida, e com propriedades superiores à especificação.

[0097] Em um terceiro exemplo, a peça fundida do braço de controle, um componente da direção/suspensão de um automóvel, foi moldada no material de molde especificado para o exemplo 1. O molde foi vazado com liga A356 aproximadamente da composição Al-7Si-0,35Mg-0,2Fe a aproximadamente 700°C (aproximadamente 1.400°F). O resfriamento por

ablação deste molde produziu uma peça fundida que foi subsequentemente cortada e usinada para produzir barras de teste de tração que foram submetidas a um tratamento térmico T6. O tratamento de solubilização foi a 538°C (1.000°F) por 0,5 hora, têmpera em água a 26°C (78°F) e envelhecimento a 182°C (360°F) por 2,5 horas. Quatro barras de teste foram cortadas de cada uma das três peças fundidas enumeradas 45, 46 e 47. As barras foram submetidas a teste de tração e os resultados estão listados, juntamente com as médias, na figura 14. (O valor da baixa extensão de 9 % foi atribuído a uma grande inclusão de óxido, uma vez que o controle da qualidade da corrida foi reconhecido inferior ao ideal nesta ocasião). Os resultados são comparados com aqueles de processos de fundição concorrentes na figura 15. As propriedades são claramente atrativas, excedendo aquelas dos melhores processos concorrentes atuais.

[0098] Deve-se perceber que certas condições de processo potenciais resultariam em uma microestrutura convencional do molde submetido a ablação quando se usam o processo de resfriamento rápido. Como um exemplo, uma liga de alumínio 852 (liga Al-6Sn-2Cu-1Ni-0,75Mg) é conhecida como uma liga de solidificação de faixa ampla, em que o eutético se solidifica aproximadamente no ponto de fusão do estanho (232°C, 610°F). Esta liga sofreu ablação usando o processo de resfriamento rápido. O molde foi simétrico, permitindo que as metades do molde idêntica sejam produzidas a partir de um único padrão de lados e em seguida montadas. O metal foi vazado a 700°C (1.275°F), ou próximo a isto. A espessura da seção da peça fundida teve aproximadamente 75 mm (3 polegadas) de diâmetro. O vazamento do molde por gravidade foi atingido em 10 segundos. O molde foi então deixado descansar por 180 segundos, para atingir uma fase alfa praticamente solidificada. Depois deste período de taxa de solidificação normal sendo controlada pela moldagem do agregado (neste caso, areia de sílica), o molde sofreu ablação.

[0099] As condições de ablação foram as seguintes. Pressão de água usada para ablação foi aproximadamente 1 bar (15 psi). O volume de aspersão foi limitado pelos bicos de aspersão. Entretanto, o volume de água é praticamente insignificante, já que a pressão controla a colisão de água na superfície da peça fundida. Este procedimento capturou uma taxa de resfriamento convencional, mas uniforme, que produziu propriedades similares às produzidas por um molde de metal (isto é, um molde permanente, ver figura 16). Com relação a isto, a figura 16 mostra o espectro de vários processos de fundição e o relacionamento entre o tamanho da célula dendrítica e a taxa de solidificação para ligas de alumínio. Uma microestrutura de molde permanente convencional está ilustrada na figura 17a. As figuras 17b e c mostram a mesma liga, mas agora criadas usando o processo de ablação. Em todas as três figuras 17a-c, o mesmo aumento, 100 x, foi empregado. A estrutura eutética final foi bastante similar à produzida por um molde permanente. Embora uma microestrutura convencional como esta possa ser conseguida no processo de ablação, em algumas condições, essas microestruturas exclusivas da ablação, incluindo fases extremamente finas possivelmente dendritas,, mas mais frequentemente de eutético extremamente fino, podem também ser observadas.

[00100] Para usar o processo de ablação para capturar uma microestrutura convencional (tal como a resultante de um molde permanente), diversas variáveis têm potencial expressivo. Um parâmetro importante é o próprio agregado do molde. Além do mais, o volume, pressão e temperatura do meio de resfriamento usado na remoção do molde, causando simultaneamente solidificação do metal, certamente, são também importantes. Durante seu avanço ao longo do comprimento da peça fundida, o tempo de permanência dos jatos de água na peça fundida pode ser benéficamente ajustado para proporcionar a razão da superfície local para volume (módulo geométrico). A taxa de dissolução do ligante do molde pode ser reduzida para

diminuir a taxa de ablação do molde, e assim reduzir a taxa de extração de calor. Isto poderia limitar a taxa de maneira a produzir uma microestrutura convencional. Além disso, a pressão de água pode variar. Primeiramente, uma maior pressão pode ser usada para remover o agregado do molde. então, a pressão pode ser reduzida para criar uma velocidade de resfriamento que seria similar à de um processo em molde de metal convencional.

[00101] Embora a microestrutura convencional possa ser obtida desta maneira, existem benefícios adicionais significativos oferecidos pelo processo de ablação que tornam o processo de ablação exclusivamente desejável. Primeiramente, existe maior controle da tensão residual na peça fundida, uma vez que a solidificação final ocorre com líquido suficiente à frente da frente de solidificação final para permitir uma completa acomodação das deformações térmicas. Em segundo lugar, a porosidade na peça fundida é significativamente reduzida (praticamente a zero na maioria dos casos) em virtude da excelente solidificação direcional. Isto ocorre em decorrência do alto gradiente de temperatura aplicado que a ablação exclusivamente atinge.

[00102] Em um quarto exemplo, uma peça fundida de braço de controle de suspensão automotiva foi moldada no material especificado para o exemplo 1. Os moldes foram vazados com liga B206 de composição aproximada à Al-4,8Cu-0,4Mn-0,28Mg-0,07Fe a aproximadamente 1.265°F mais ou menos 15°F (8,3°C). O resfriamento por ablação desses moldes produziu peças fundidas que foram subsequentemente submetidas a tratamentos térmicos T4 e T7. Uma fotografia da parte em questão aparece na figura 18 com uma caixa mostrando a posição da qual amostras de tração foram subsequentemente usinadas. As propriedades de tração obtidas das partes estão mostradas na figura 19 e são comparadas com valores tabulados padrões obtidos de dados de barra de teste de peças fundidas separadamente da literatura aberta para este tipo de liga na figura 20. Uma micrografia foi feita do centro da seção da espessura de uma das partes antes do tratamento

térmico aparece na figura 2a. As propriedades são novamente: claramente atrativas, praticamente se igualando às produzidas de barras de teste de molde permanente fundidas separadamente e superiores às aquelas de todos outros meios de moldagem listados. Esses valores são particularmente atrativos, considerando que eles foram obtidos de uma área com uma espessura na seção superior a 2 polegadas (50,8 milímetros). Em processos de areia convencional e molde permanente, é de se esperar que versados na técnica atinjam valores bem inferiores de ductilidade a partir de barras usinadas de uma seção desta massiva do que as que estão listadas para os dados da barra de teste fundida separadamente na figura 20 na qual barras de diâmetro de bitola de 1/2 polegada de espessura com uma superfície tal como fundida são a norma. Deve-se notar que essas comparações também não levam em conta o fato de que a fabricação de uma parte do tamanho e geometria daquela mostrada na figura 18 seria um grande desafio da engenharia em qualquer liga da série AA 2XX usando um molde permanente por causa da maior tendência no sentido de trincamento a quente inerente nessa combinação de processo de fundição/liga. De fato, isso poderia ser fisicamente impossível sem medidas que tornariam a parte resultante proibitivamente cara.

[00103] A micrografia na figura 21 exibe a microestrutura dupla supramencionada vista em partes solidificadas ablativamente. Um CAS grosseiro com média de 43  $\mu\text{m}$  com espaçamentos grandes de até 85  $\mu\text{m}$  hospeda muitas partes mais finas com um DAS em média da ordem de 22  $\mu\text{m}$ . As propriedades mecânicas reportadas na figura 17 são mais típicas do que aquelas que seriam esperadas do DAS mais fino. Os componentes intermetálicos visíveis na figura 19 são, basicamente, alumineto de Cu que se dissolvem durante o tratamento térmico de solubilização aplicado como parte de ambos os revenimentos subsequentes T4 e T7. Versados na técnica de produção de peças fundidas de alumínio da série 200 percebem a vantagem de uma estrutura fina com relação à economia do tratamento térmico. A operação

de solubilização de três estágios necessária para dissolver os aluminetos de Cu supramencionados para peças fundidas em areia espessas pode ser antecedida em favor do tratamento de dois estágios mais normalmente aplicado no caso de uma peça fundida fina e/ou rapidamente solidificada.

[00104] Peças fundidas moldadas agregadas ou conformadas com microestrutura de solidificação fina foram descritas com referência à presente revelação e várias modalidades exemplares. Percebe-se que variações ou modificações podem estar de acordo com as capacidades de um versado na técnica e que o presente pedido e reivindicações devem englobar tais modificações. Pretende-se que o desenvolvimento seja interpretado incluindo todas tais modificações e alterações, desde que elas se enquadrem no escopo das reivindicações anexas e seus equivalentes

## REIVINDICAÇÕES

1. Peça fundida de metal formada em um molde compreendendo um agregado por meio de um processo de resfriamento rápido e exibindo uma microestrutura fundida, caracterizada pelo fato de que a microestrutura compreende: uma primeira região localizada adjacente a uma superfície da peça fundida de metal, a primeira região compreendendo uma microestrutura de solidificação grosseira tendo dendritas com um espaçamento de braço de dendrita de 50 a 200 micrometros; e uma segunda região localizada interna à primeira região, a segunda região compreendendo uma microestrutura de solidificação fina tendo dendritas com um espaçamento de braço de dendrita de 30 micrometros ou menos.

2. Peça fundida de metal de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a segunda região é contínua de uma extremidade distal da peça fundida até uma extremidade proximal da mesma.

3. Peça fundida de metal de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizada pelo fato de que a segunda região compreende dendritas com um espaçamento de braço de dendrita de 20 micrometros ou menos.

4. Peça fundida de metal de acordo com a reivindicação 3, caracterizada pelo fato de que a segunda região compreende dendritas com um espaçamento de braço de dendrita de 5 a 15 micrometros.

5. Peça fundida de metal de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizada pelo fato de que ela é isenta de pelo menos um de (i) porosidade de contração, e (ii) plaquetas ricas em ferro prejudiciais.

6. Peça fundida de metal de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 5, caracterizada pelo fato de que a primeira região compreende 100% de microestrutura de solidificação grosseira, e a segunda região compreende 100% de microestrutura de solidificação fina.

7. Peça fundida de metal de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, caracterizada pelo fato de que ela compreende

adicionalmente uma terceira região localizada entre a primeira e segunda regiões, em que a terceira região compreende uma microestrutura de solidificação dupla compreendendo (i) uma ou mais porções de microestrutura de solidificação grosseira, e (ii) uma ou mais porções de microestrutura de solidificação fina, em que a uma ou mais porções de microestrutura de solidificação grosseira da região de microestrutura de solidificação dupla compreendem dendritas com um espaçamento de braço de dendrita de 50 a 200 micrometros e a uma ou mais porções de microestrutura de solidificação fina da região de microestrutura de solidificação dupla compreende dendritas com um espaçamento de braço de dendrita de 15 micrometros ou menos.

8. Peça fundida de metal de acordo com a reivindicação 7, caracterizada pelo fato de que a terceira região é contínua por toda uma forma da peça fundida de metal.

9. Peça fundida de metal de acordo com a reivindicação 8, caracterizada pelo fato de que a segunda região é uma região de microestrutura de solidificação fina contínua interna e distinta da microestrutura de solidificação dupla da terceira região.

10. Peça fundida de metal de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 9, caracterizada pelo fato de que a segunda região é contínua de uma extremidade distal da peça fundida de metal até uma extremidade proximal da mesma.

11. Peça fundida de metal de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 10, caracterizada pelo fato de que a segunda região compreende uma primeira região de microestrutura de solidificação fina localizada em um primeiro local na peça fundida de metal.

12. Peça fundida de metal de acordo com a reivindicação 11, caracterizada pelo fato de que a segunda região compreende adicionalmente uma segunda região de microestrutura de solidificação fina localizada na peça

fundida de metal em um segundo local espaçado do primeiro local.

13. Peça fundida de metal de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 12, caracterizada pelo fato de ser formada de uma liga contendo eutético.

14. Peça fundida de metal de acordo com a reivindicação 13, caracterizada pelo fato de que a região ou regiões de microestrutura de solidificação fina possuem uma ou mais porções eutéticas finas tendo um espaçamento eutético de 1 micrometro ou menos.

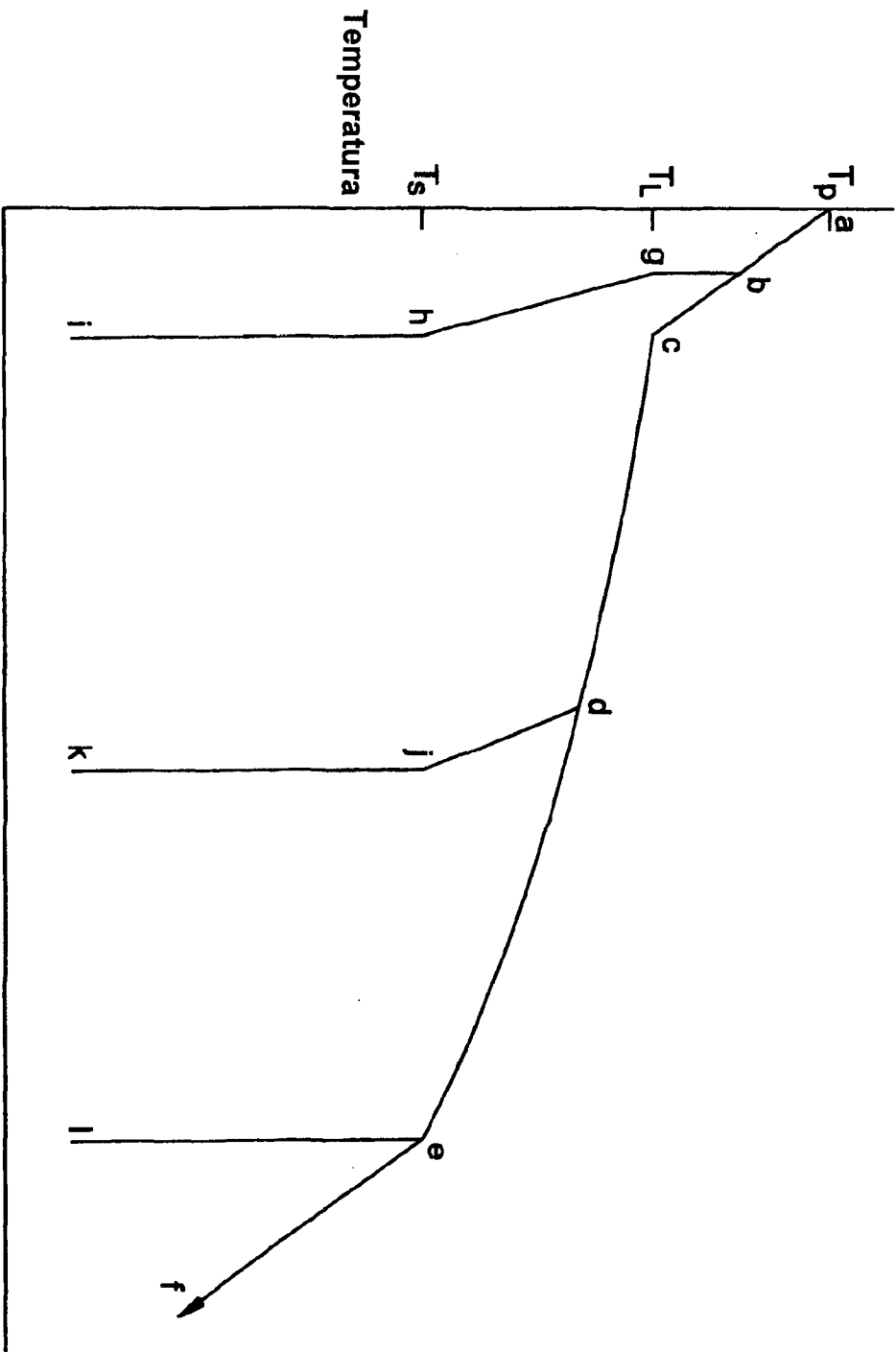


FIG. 1

SOLIDIFICAÇÃO DE UMA LIGA DE SOLUÇÃO SÓLIDA

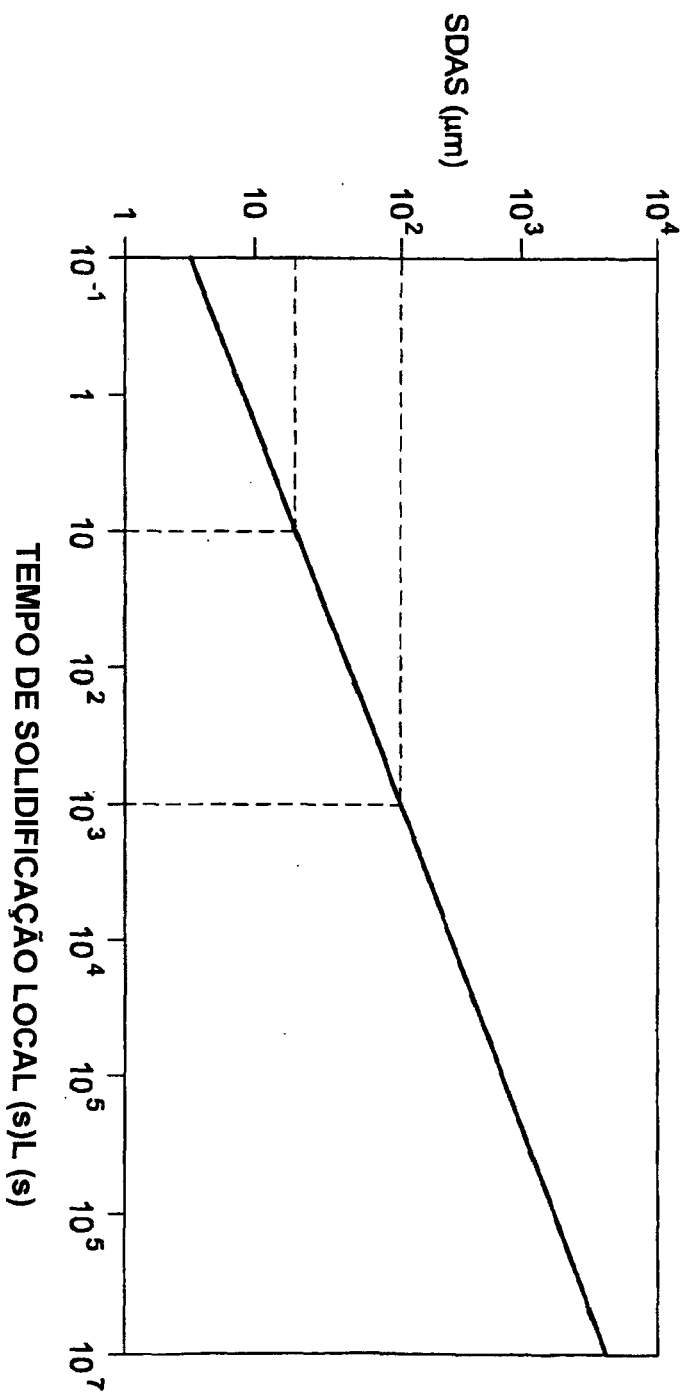
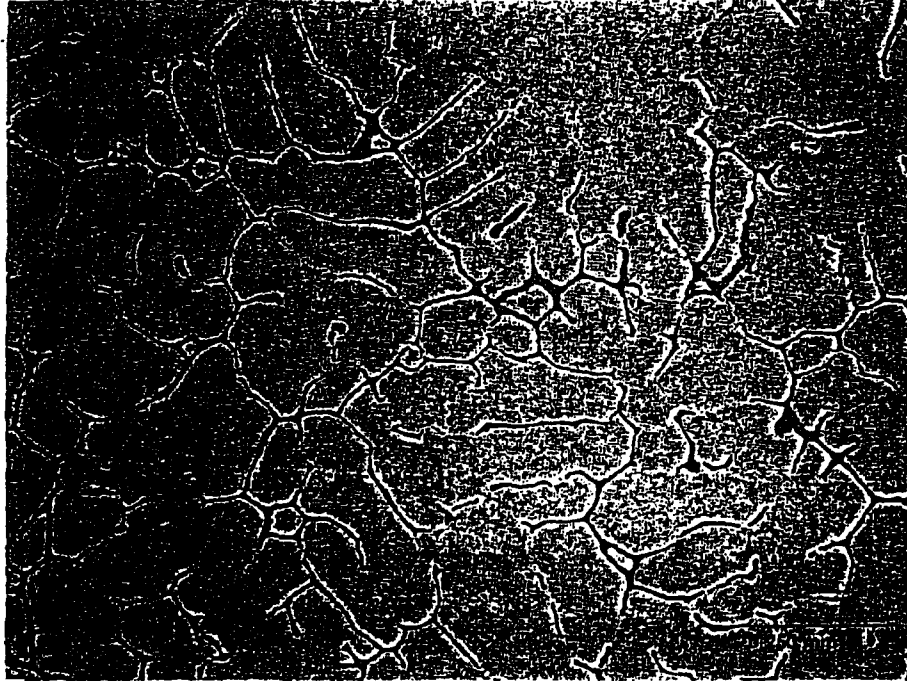
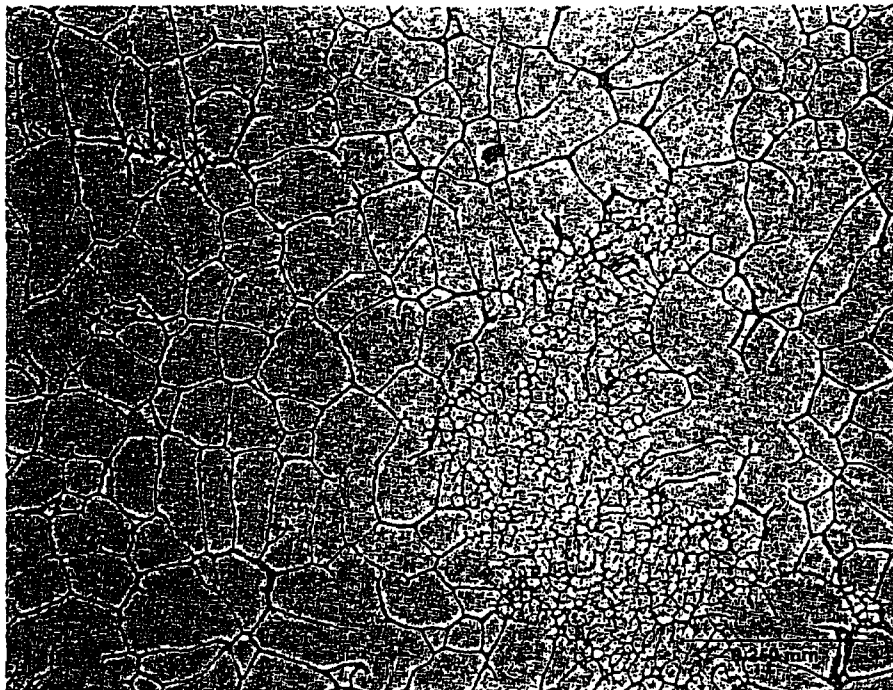


FIG. 1A



**FIG. 2**



**FIG. 3**

ALIMENTADOR

PEÇA FUNDIDA

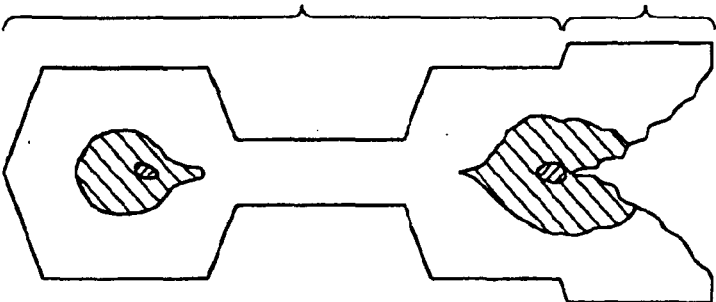


FIG. 4A

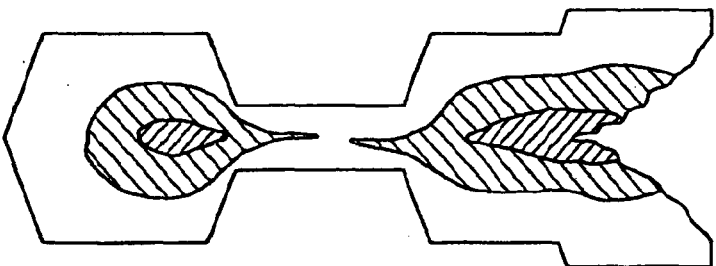


FIG. 4B

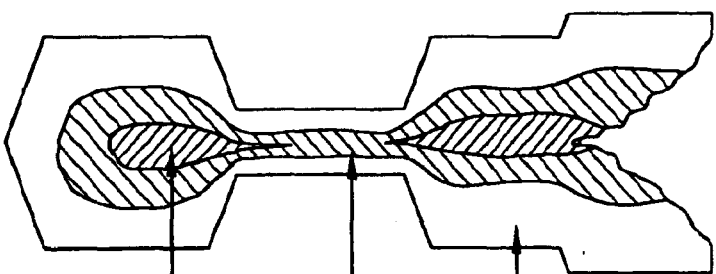


FIG. 4C

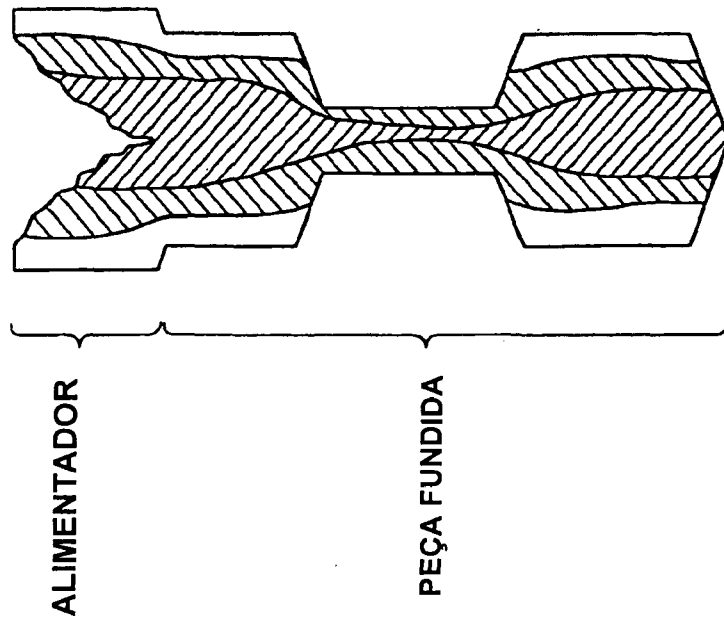


FIG. 4D

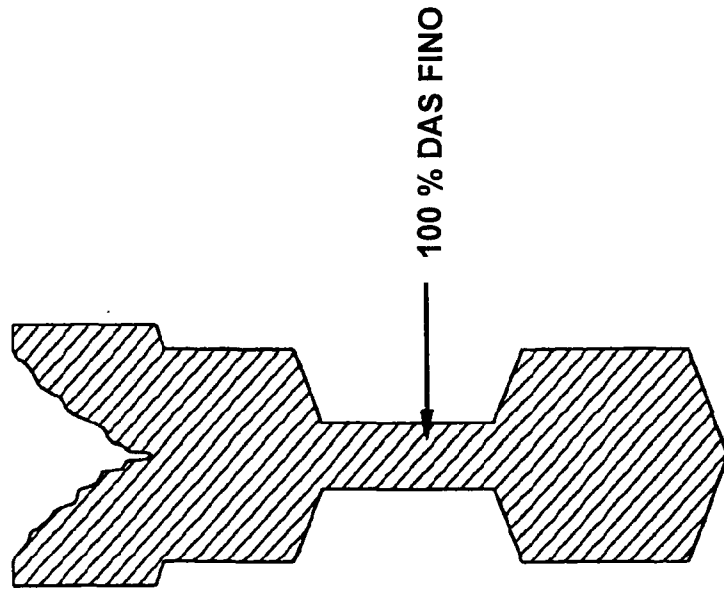


FIG. 4E

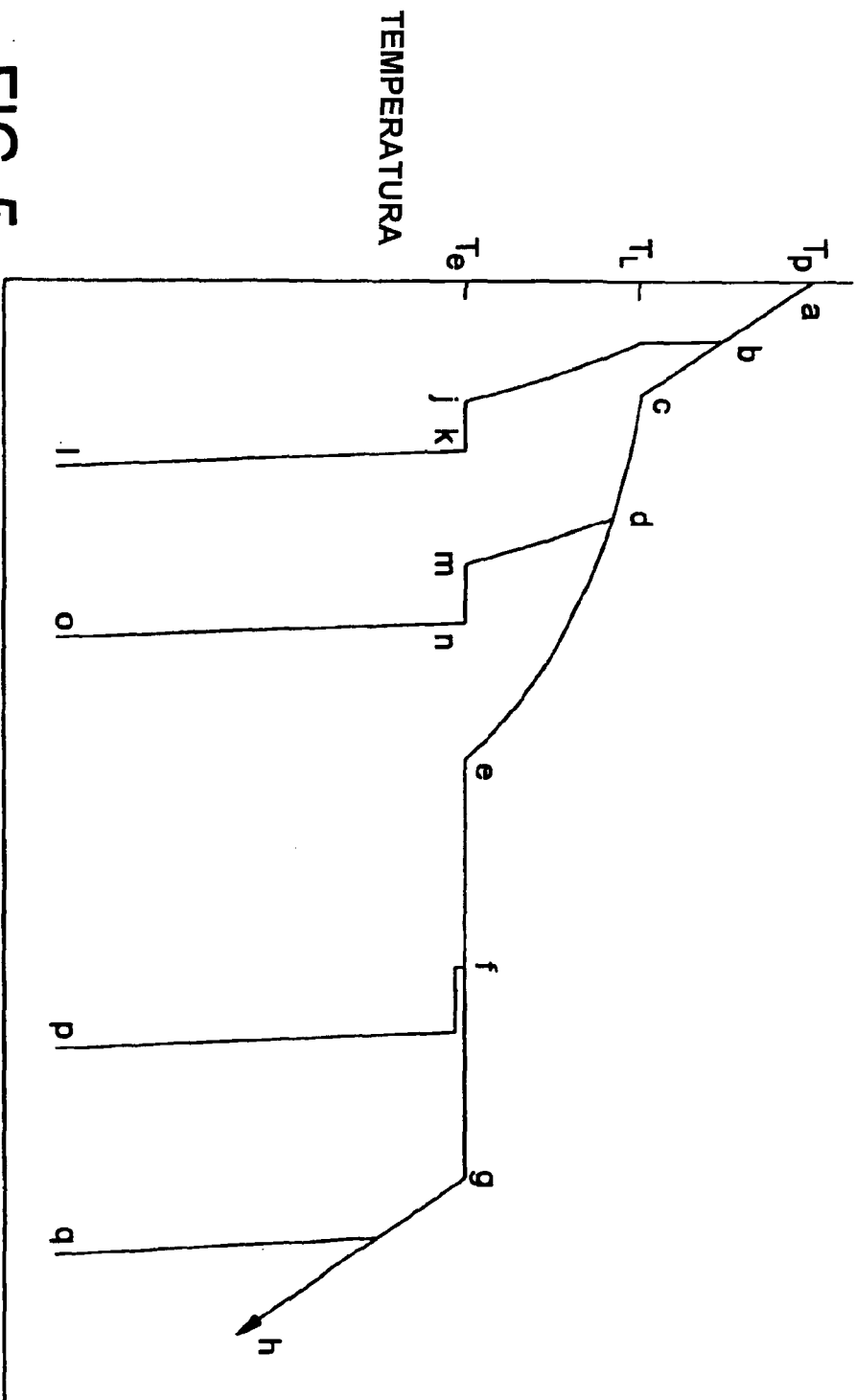


FIG. 5

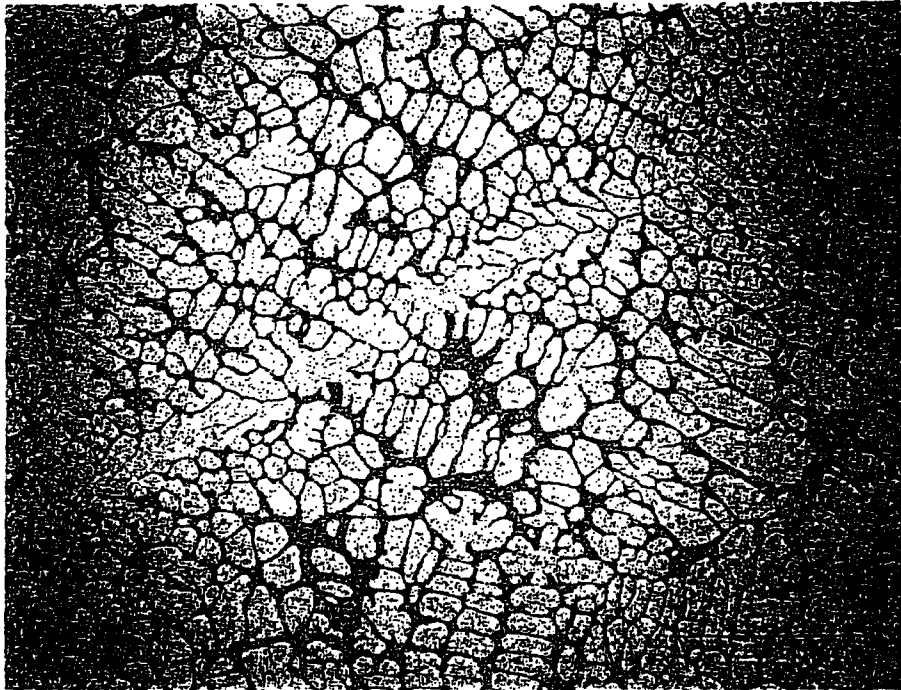
SOLIDIFICAÇÃO DE UMA LIGA DENDRÍTICA E EUTÉTICA MISTA

FIG. 6

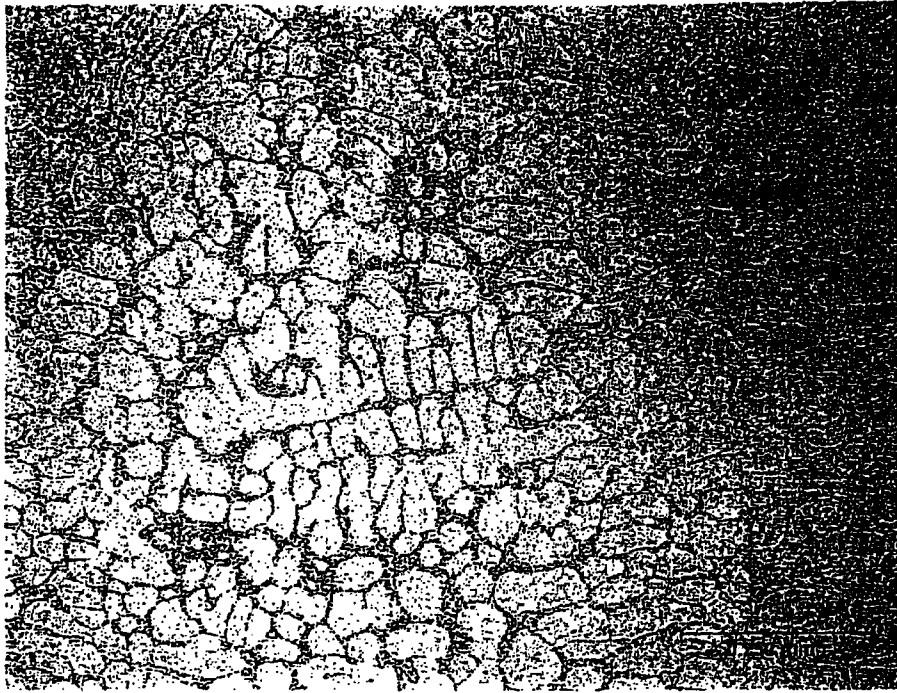


**FIG. 7**

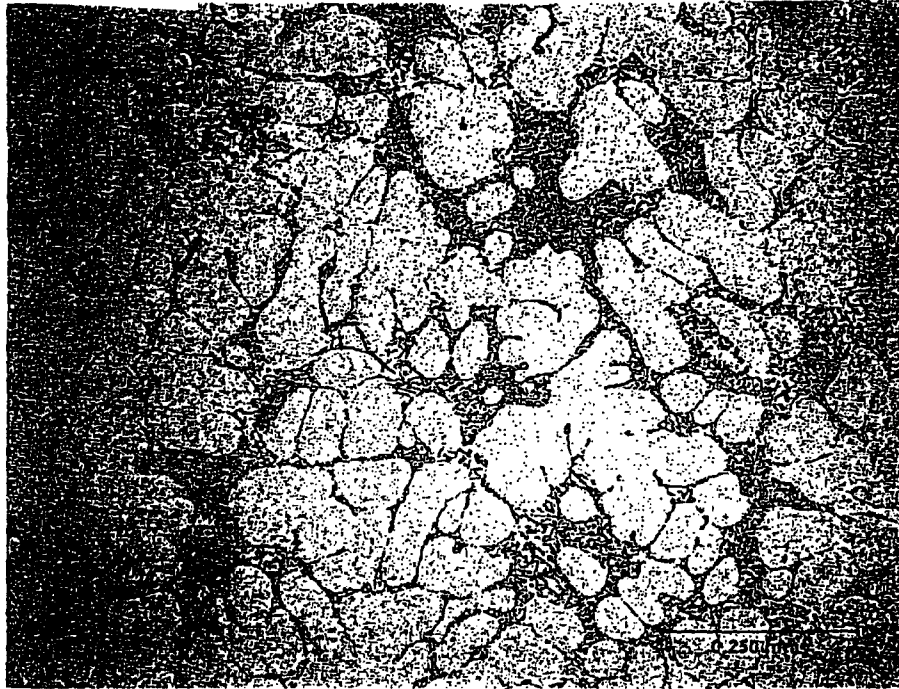




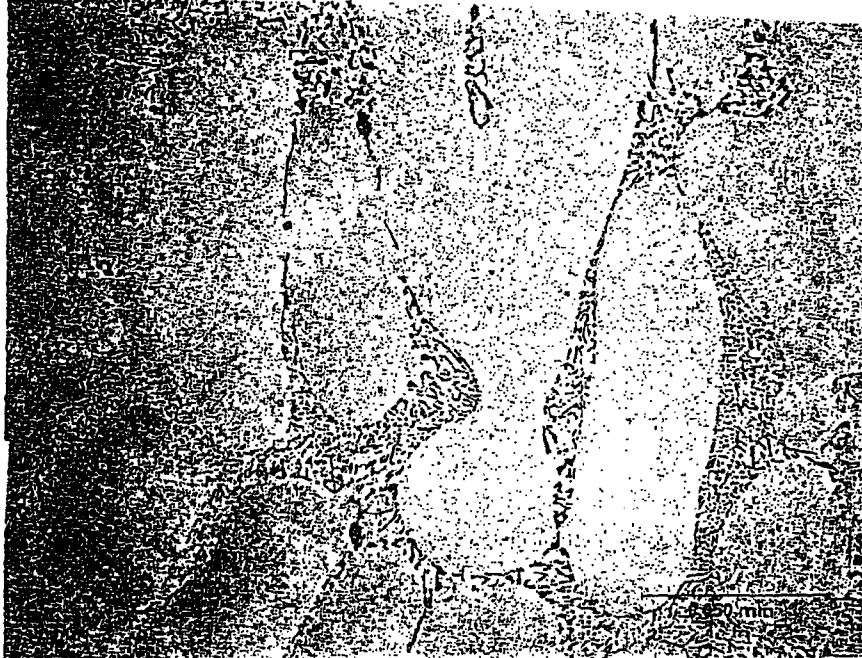
**FIG.8**



**FIG. 9**



**FIG. 10**



**FIG. 11**

## PROCESSO DE FUNDIÇÃO COM ABLAÇÃO

TEMPERATURA (F) =  $[^{\circ}\text{F} = 5/9(^{\circ}\text{C} - 32)]$

BARRAMENTO DE TESTE 6061

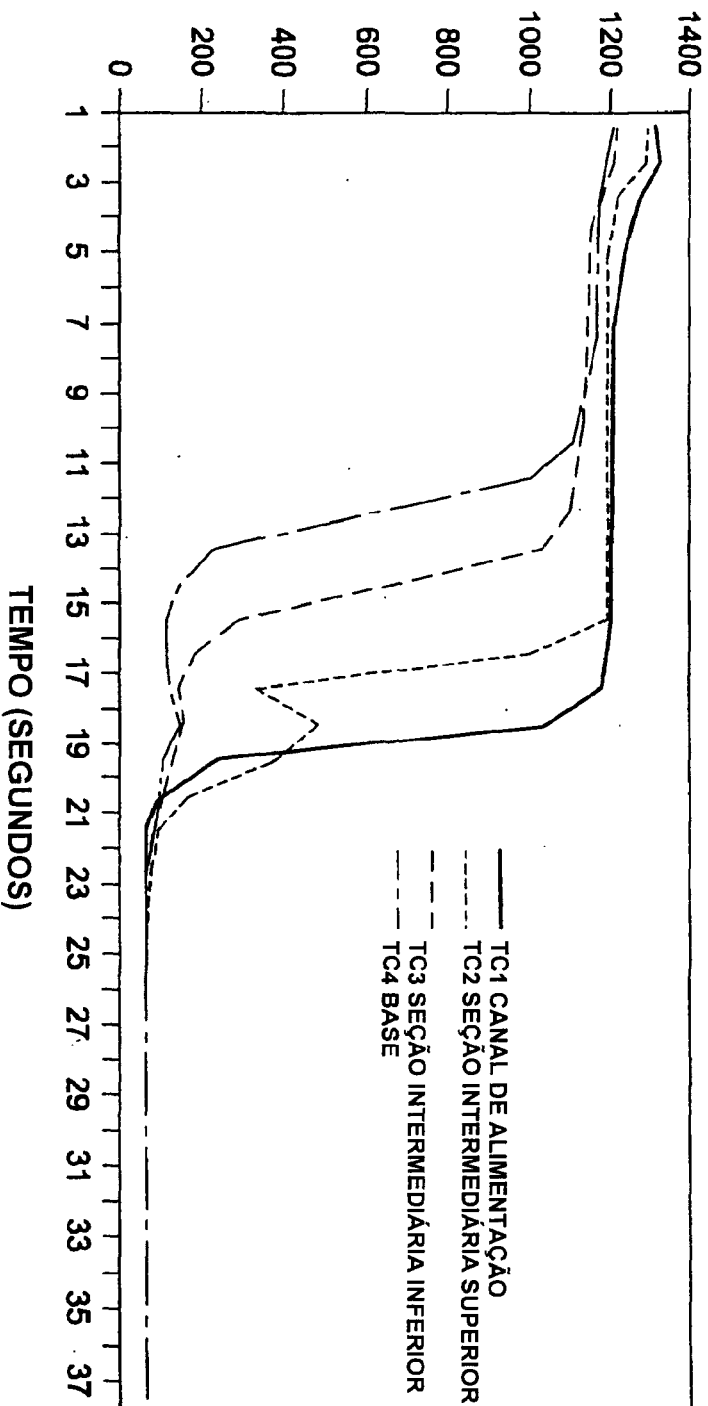


FIG. 12

VELOCIDADES DE RESFRIAMENTO POR ABLAÇÃO  
50C/S

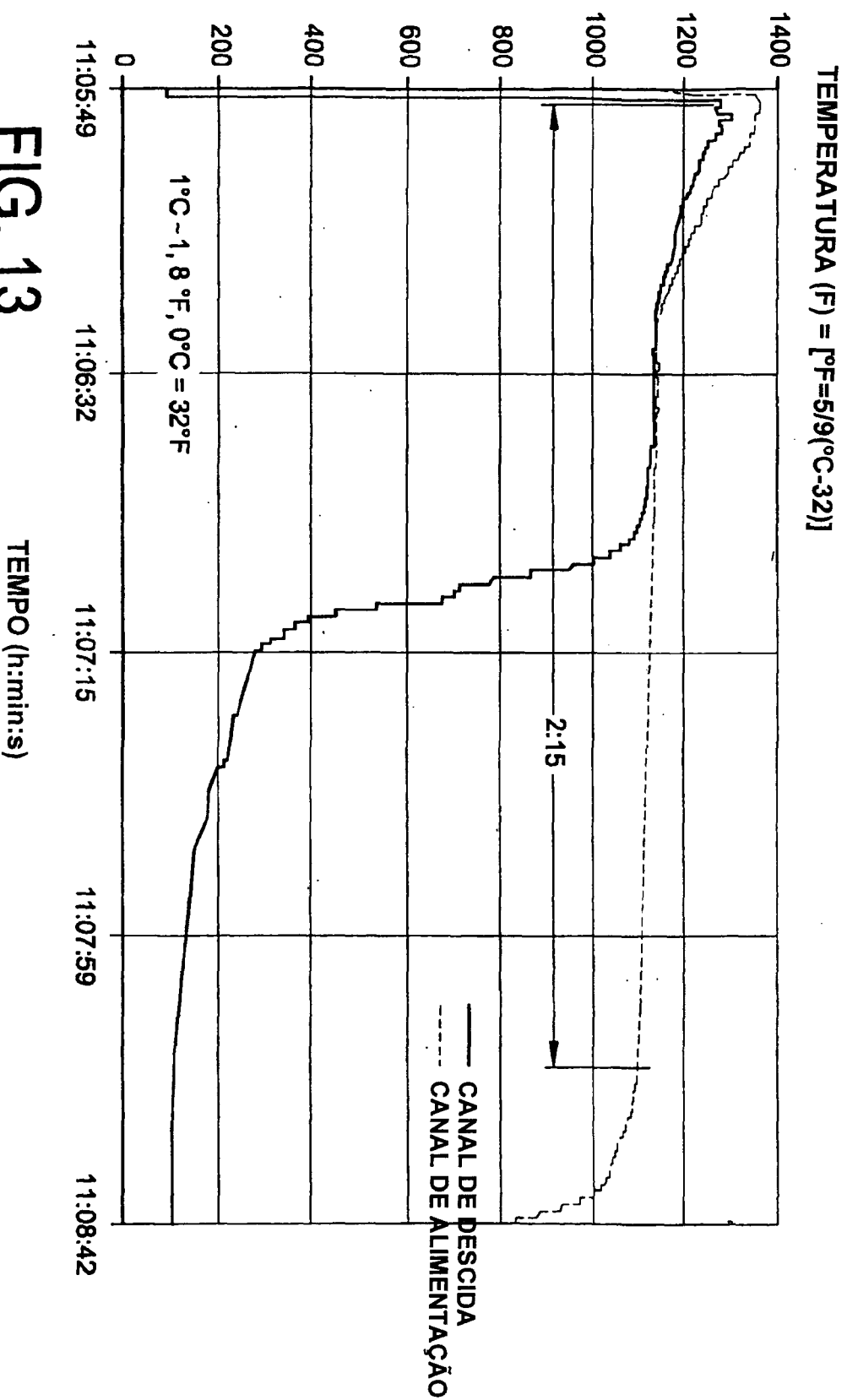


FIG. 13

# PROPRIEDADES MECÂNICAS – ABLAÇÃO

| IDENTIFICAÇÃO<br>DO CORPO DE<br>PROVA | LIMITE DE<br>RESISTÊNCIA<br>MÁXIMOPSI / MPa | MPa | LIMITE DE<br>ESCOAMENTOPSI /<br>MPa | MPa | ALONGAMENTO% |
|---------------------------------------|---------------------------------------------|-----|-------------------------------------|-----|--------------|
| 45A                                   | 46,986                                      | 324 | 37,500                              | 259 | 10           |
| 45B                                   | 46,545                                      | 321 | 36,752                              | 253 | 12           |
| 45C                                   | 45,902                                      | 316 | 36,180                              | 249 | 12           |
| 45D                                   | 45,785                                      | 316 | 36,334                              | 251 | 9            |
|                                       | 46,304                                      | 319 | 36,692                              | 253 | 10.75        |
| 46A                                   | 47,196                                      | 325 | 37,005                              | 255 | 13           |
| 46B                                   | 45,807                                      | 316 | 34,708                              | 239 | 15           |
| 46C                                   | 47,459                                      | 327 | 37,233                              | 257 | 13           |
| 46D                                   | 47,593                                      | 328 | 36,354                              | 251 | 13           |
|                                       | 47,914                                      | 324 | 36,325                              | 250 | 13.5         |
| 47A                                   | 46,130                                      | 318 | 37,632                              | 259 | 10           |
| 47B                                   | 45,704                                      | 315 | 37,355                              | 258 | 10           |
| 47C                                   | 45,378                                      | 313 | 37,495                              | 259 | 10           |
| 47D                                   | 45,616                                      | 315 | 37,292                              | 257 | 12           |
|                                       | 45,709                                      | 315 | 37,443                              | 258 | 10.5         |

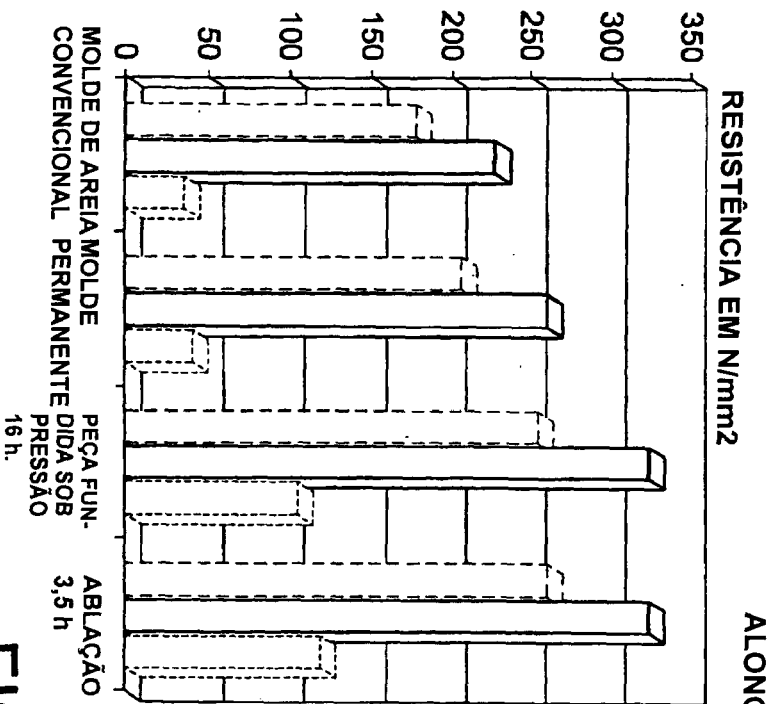
TENSÃO

LUCRO

PROLONGAMENTO

A SEÇÃO A EXTRAÍDA DE (ÁREA DO CANAL DE ALIMENTAÇÃO DA FUNDIÇÃO NA ÁREA DE VAZAMENTO HAL)  
B, C, D PERDEU A RASTREABILIDADE DAS PRÓXIMO DO CANAL DE ALIMENTAÇÃO 50 MICROMETROS  
LIGA A356 SEM NENHUMA ADIÇÃO DE Mg, ETC.  
TODAS AS PARTES POSTAS EM SOLUÇÃO E ENVELHECIDAS JUNTAS

FIG.14



|               | FUNDIÇÃO EM AREIA | MOLDE PERMANENTE | FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO * | FUNDIÇÃO COM ABLAÇÃO ** |
|---------------|-------------------|------------------|------------------------|-------------------------|
| LUCRO         | 179               | 207              | 255                    | 261                     |
| UTS           | 228               | 262              | 324                    | 325                     |
| PROLONGAMENTO | 3.5               | 4                | 10.5                   | 12.5**                  |

\*PRESSÃO C: TRATAMENTO TÉRMICO POR 16 HORAS  
 ABLAÇÃO: TRATAMENTO TÉRMICO POR 3,5 HORAS  
 \*\* PRELIMINAR

FIG. 15

VELOCIDADES DE RESFRIAMENTO NA ABLAÇÃO  
 RELACIONAMENTO ENTRE TAMANHO DE CÉLULA  
 DENDRÍTICA E VELOCIDADE DE SOLIDIFICAÇÃO  
 PARA LIGAS DE ALUMÍNIO  
 (DEPOIS DE SPEAR E GARDNER)

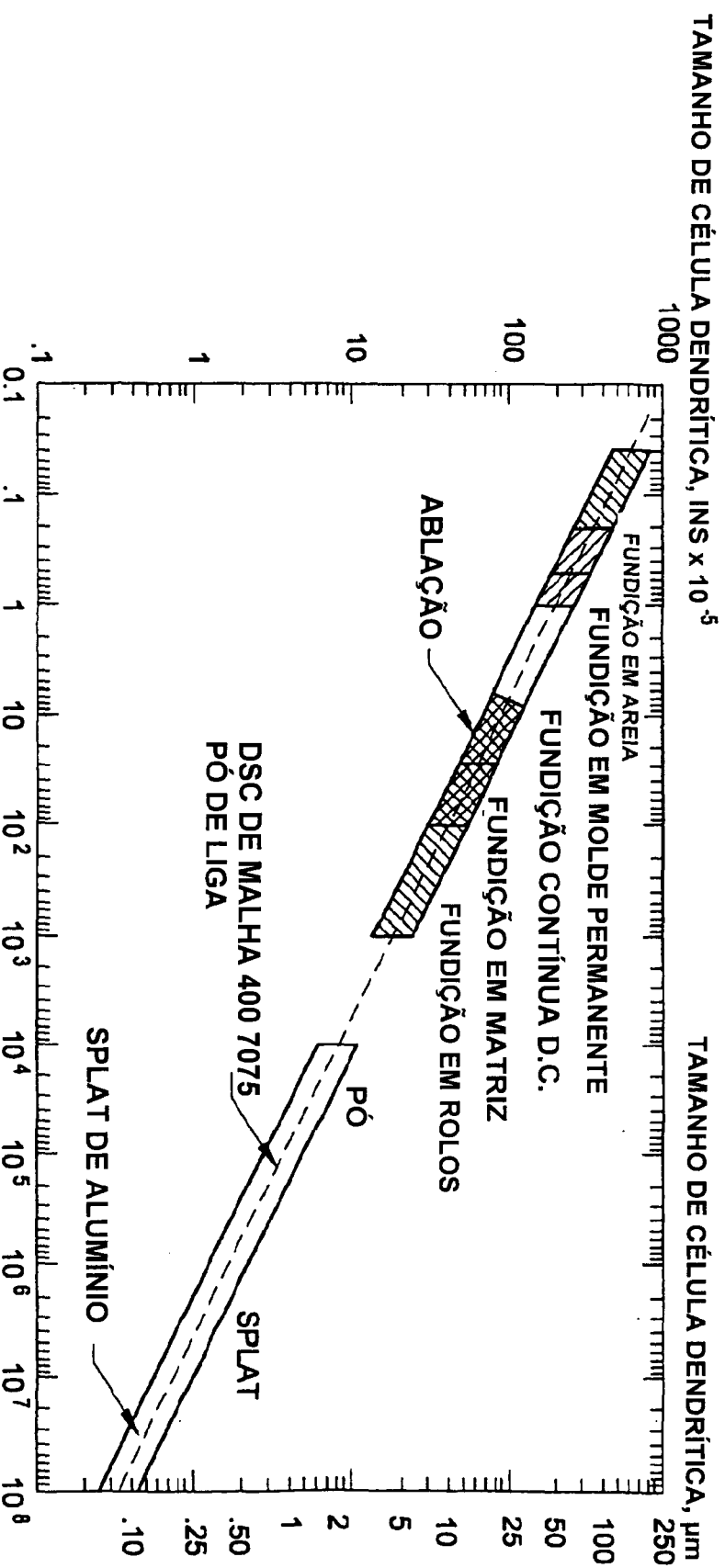
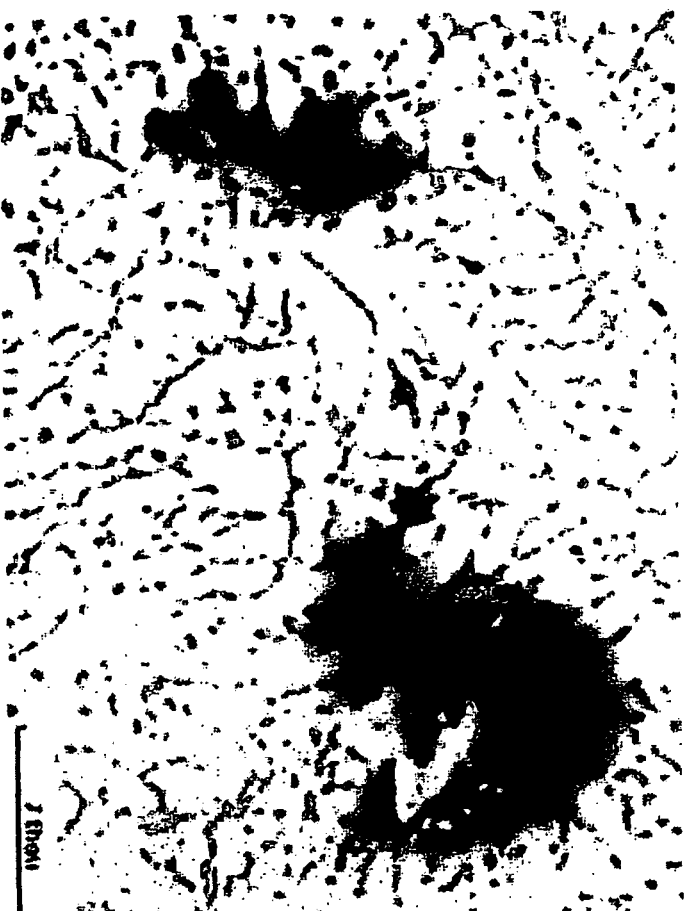


FIG. 16 VELOCIDADE DE SOLIDIFICAÇÃO MÉDIA, °F/s=[°F=5/9(°C-32)]

Fig 1/a

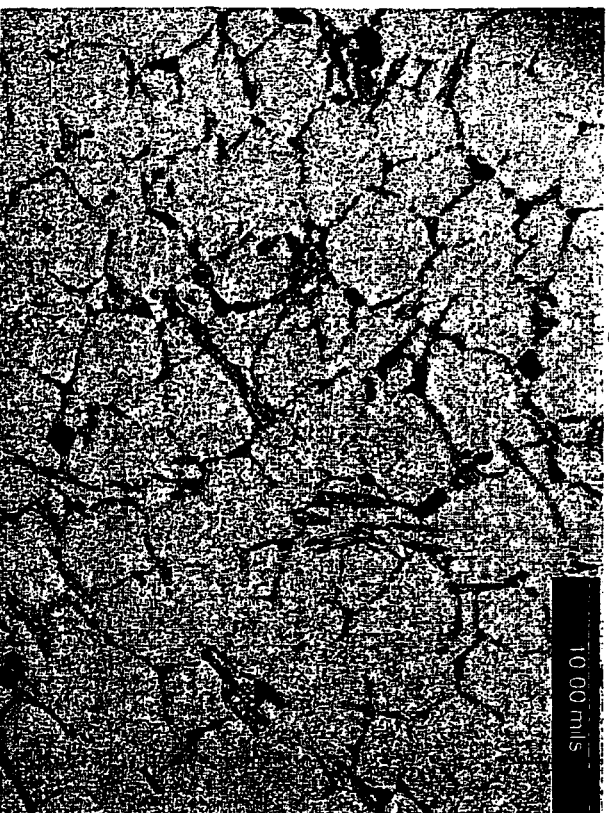
BARRA DE 6,9cm DE DIÂMETRO  
PRODUZIDA POR LINGOTAMENTO  
CONTÍNUO - A



SOLIDIFICAÇÃO CONVENCIONAL  
MOLDE PERMANENTE  
100 X

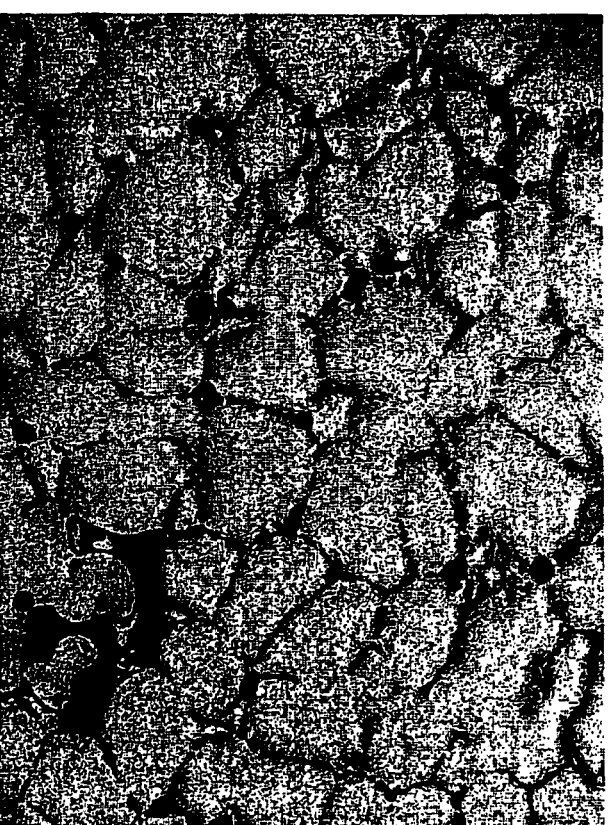
**ABLAÇÃO@Eck – Recebida em julho de 2006**

**Fig 17b (Início)**



**ABLAÇÃO CONVENCIONAL  
SOLIDIFICAÇÃO  
INÍCIO DA ABLAÇÃO – CENTRO  
100 X**

**Fig 17c (Fim)**



**ABLAÇÃO CONVENCIONAL  
SOLIDIFICAÇÃO  
FIM DA ABLAÇÃO – CENTRO  
100 X**

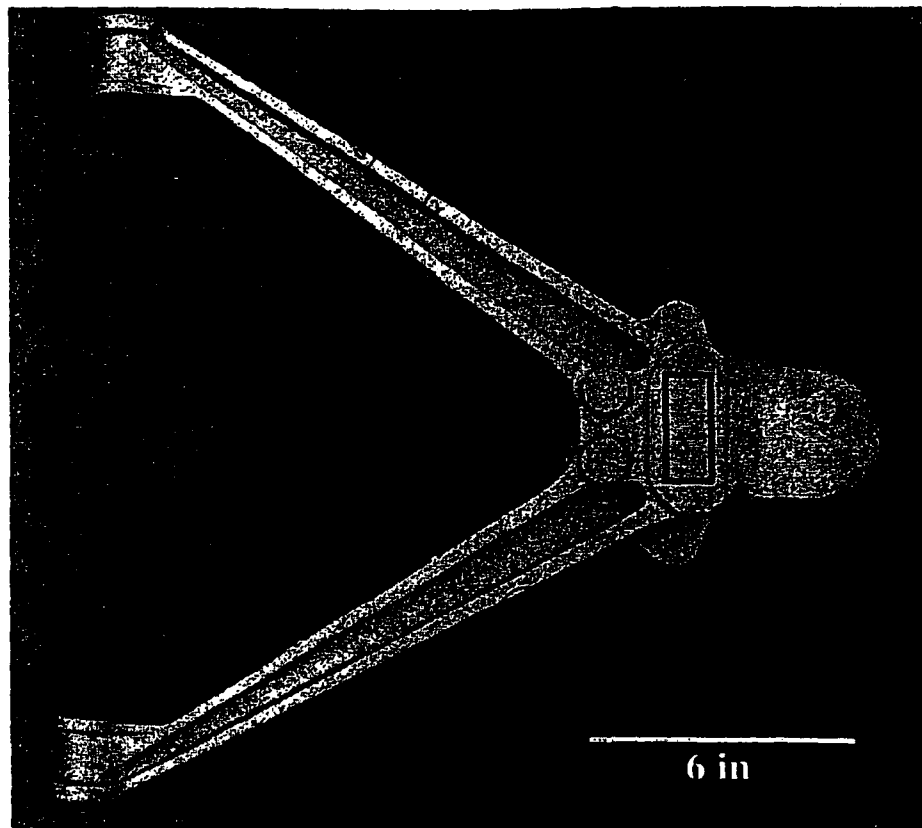


FIG. 18

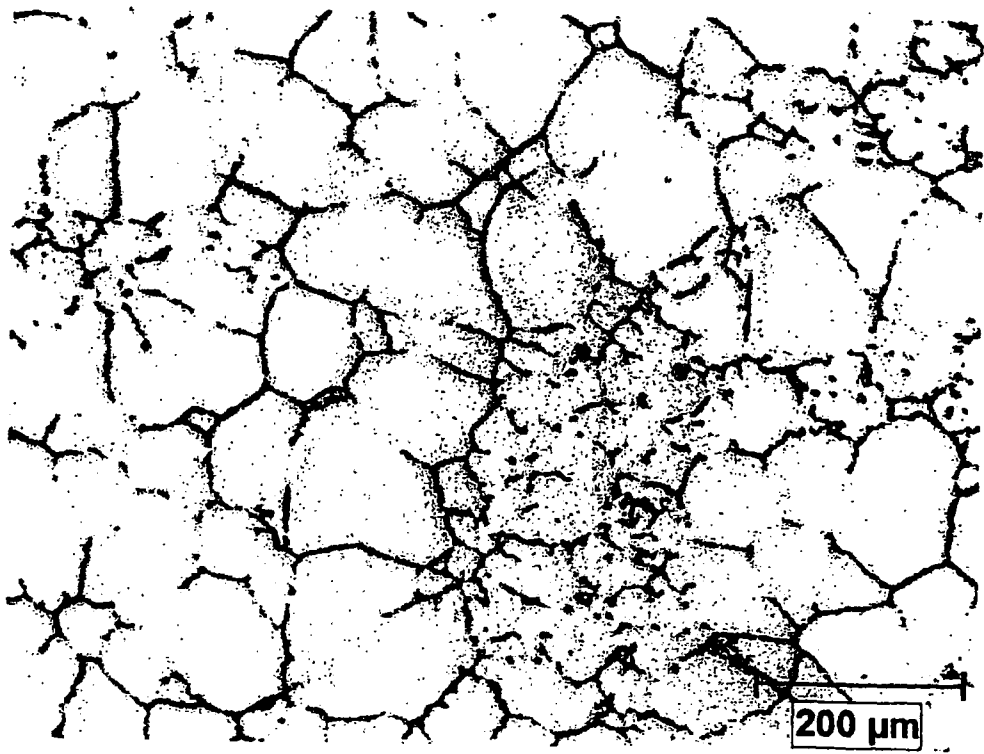


FIG. 21

| IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA B206-T4 | LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa/Ksi) | LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa/Ksi) | % ALONGAMENTO |
|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------|
| B206-T4_17                       | 264.7 / 38.4                   | 427.3 / 62.0                    | 22.5          |
| B206-T4_21                       | 251.1 / 36.4                   | 424.2 / 61.5                    | 24.2          |
| meio                             | 257.9 / 37.4                   | 425.8 / 61.8                    | 23.3          |
| IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA B206-T4 | LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa/Ksi) | LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa/Ksi) | % ALONGAMENTO |
| B206-T7_18                       | 332.8 / 48.3                   | 414.4 / 60.1                    | 9.6           |
| B206-T7_22                       | 335.7 / 48.7                   | 410.3 / 59.5                    | 9.7           |
| meio                             | 334.2 / 48.5                   | 412.4 / 59.8                    | 9.65          |

FIG. 19

| PROCESSO DE FUNDIÇÃO A206-T4       | LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa/Ksi) | LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa/Ksi) | % ALONGAMENTO |
|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------|
| molde permante<br>55°C/s / 100°F/s | 264 / 38                       | 431 / 62                        | 17            |
| molde enviado<br>11°C/s / 20°F/s   | 250 / 36                       | 354 / 51                        | 7             |
| molde separado<br>11°C/s / 3°F/s   | 229 / 33                       | 278 / 40                        | 3             |
| molde calculado A206-T7            | LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa/Ksi) | LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa/Ksi) | % ALONGAMENTO |
| molde permanente                   | 347 / 50                       | 436 / 63                        | 11.7          |

FIG. 20

RESUMO

“PEÇA FUNDIDA DE METAL FORMADA EM UM MOLDE COMPREENDENDO UM AGREGADO POR MEIO DE UM PROCESSO DE RESFRIAMENTO RÁPIDO E EXIBINDO UMA MICROESTRUTURA FUNDIDA”

É descrita uma peça fundida de metal conformada produzida em um molde agregado que compreende microestrutura de solidificação fina que é mais fina que a microestrutura de solidificação de uma peça fundida de metal análoga produzida por processos de moldagem convencionais. A microestrutura de solidificação pode ser até cinco vezes mais fina que a microestrutura de solidificação de uma peça fundida preparada convencionalmente. Em modalidades preferidas, em decorrência da solidificação direcional, a microestrutura de solidificação fina é substancialmente contínua de uma extremidade distal da peça fundida até uma extremidade proximal da peça fundida, e apresenta solidez bastante melhorada. Em virtude do controle da uniformidade de solidificação da peça fundida, suas propriedades são substancialmente uniformes.