



(22) Data de Depósito: 27/10/2006
(43) Data da Publicação: 08/01/2013
(RPI 2192)



B22D 7/00
B22D 15/04
B22D 21/04
B22D 30/00
B22D 7/12
B22D 9/00
B29C 33/04
B29C 39/38

(87) Publicação Internacional: WO 2007/048250de
03/05/2007

“MÉTODOS DE LINGOTAR UM METAL, DE PRODUZIR UM ARTIGO DE CHAPA FINA METÁLICA E UM LINGOTE E DE AQUECER E DE LAMINAR A QUENTE UM LINGOTE DE METAL, LINGOTE DE METAL E MÁQUINA PARA LINGOTAR UM METAL”

5 CAMPO TÉCNICO

Esta invenção diz respeito ao lingotamento de metais, particularmente ligas metálicas, e ao seu tratamento para torná-las adequadas para formar produtos metálicos tais como artigos de chapa fina e chapa grossa.

10 FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO

Ligas metálicas, e particularmente ligas de alumínio, são geralmente lingotadas da forma líquida para produzir lingotes ou tarugos que são subsequenteemente submetidos a laminação, trabalho a quente, ou similares, para produzir artigos de chapa fina ou chapa grossa usados para a
15 fabricação de inúmeros produtos. Lingotes são freqüentemente produzidos por lingotamento com resfriamento direto (RD), mas existem métodos de lingotamento equivalentes, tal como lingotamento eletromagnético (por exemplo, caracterizados pelas patentes U.S. 3.985.179 e 4.004.631, ambas de Goodrich et al.), que são também empregados. A discussão seguinte diz
20 respeito basicamente a lingotamento RD, mas os mesmos princípios aplicam-se a todos procedimentos de lingotamento que criam propriedades microestruturais iguais ou equivalentes no metal lingotado.

Lingotamento RD de metais (por exemplo, alumínio e ligas de alumínio - referidas coletivamente a seguir como alumínio) para produzir
25 lingotes é tipicamente realizada em um molde axialmente vertical raso de extremidade aberta que é inicialmente fechado na sua extremidade inferior por uma plataforma móvel para baixo (geralmente referida como um bloco inferior). O molde é envolto por uma camisa de resfriamento através da qual um fluido de resfriamento tal como água é continuamente circulado para

prover resfriamento externo da parede do molde. O alumínio fundido (ou outro metal) é introduzido na extremidade superior do molde frio e, à medida que o metal líquido solidifica em uma região adjacente à periferia interna do molde, a plataforma move-se para baixo. Com um movimento efetivamente contínuo da plataforma e suprimento correspondentemente contínuo de alumínio fundido ao molde, pode-se produzir um lingote de comprimento desejado, limitado somente pelo espaço disponível abaixo do molde. Detalhes adicionais de lingotamento RD podem ser obtidos pela patente U.S. 2.301.027 de Ennor (cuja revelação está aqui incorporada pela referência), e outras patentes.

Lingotamento RD pode também ser realizado horizontalmente, isto é, com o molde orientado não verticalmente, com alguma modificação de equipamento e, em tais casos, a operação de lingotamento pode ser essencialmente contínua. Na discussão seguinte, é feita referência ao lingotamento com resfriamento direto vertical, mas os mesmos princípios aplicam-se ao lingotamento RD horizontal.

O lingote que emerge da extremidade inferior (saída) do molde em lingotamento RD vertical é externamente sólido, mas está ainda fundido no seu núcleo central. Em outras palavras, a poça de metal líquido dentro do molde estende-se para baixo até a porção central do lingote em movimento para baixo uma certa distância abaixo do molde como um dissipador de metal líquido. Este dissipador tem uma seção transversal progressivamente decrescente na direção descendente à medida que o lingote se solidifica para dentro da superfície externa até que sua porção do núcleo fique completamente sólida. A porção do produto metal lingotado com uma pele sólida externa e um núcleo líquido é aqui referida como um lingote embriônico que se torna um lingote fundido quando completamente solidificado.

Como um recurso importante do processo de lingotamento

com resfriamento direto, um fluido refrigerante continuamente suprido, tal como água, entra em contato direto com a superfície externa do lingote embriônico que avança diretamente abaixo do molde, causando assim resfriamento direto do metal na superfície. Este resfriamento direto da superfície do lingote serve tanto para manter a porção periférica do lingote no estado sólido quanto para promover resfriamento interno e solidificação do lingote.

Convencionalmente, uma única zona de resfriamento é provida abaixo do molde. Tipicamente, a ação de resfriamento nesta zona é realizada direcionando-se um fluxo de água substancialmente contínuo uniformemente ao longo da periferia do lingote imediatamente abaixo do molde, a água sendo descarregada, por exemplo, pela extremidade inferior da camisa de resfriamento do molde. Neste procedimento, a água colide com força ou momento considerável na superfície do lingote a um ângulo substancial com ela e escoia para baixo sobre a superfície do lingote com efeito de resfriamento continuado, mas diminuído, até que a temperatura da superfície do lingote aproxime-se à da água.

Tipicamente, a água refrigerante, mediante contato com o metal quente, primeiramente passa por dois eventos de fervura. Um filme predominantemente de água vapor é formado diretamente sob o líquido na região de estagnação do jato e, imediatamente adjacente deste, nas regiões acima, em qualquer lado e abaixo do jato, ocorre fervura do filme de nucleação clássica. À medida que o lingote esfria, e o efeito de nucleação e mistura das bolhas cede, o fluxo de fluido e condições de camada de contorno térmico mudam para convecção forçada da massa do lingote até que, eventualmente, as condições hidrodinâmicas mudam para um filme de queda livre simples em toda a superfície do lingote nas extremidades mais inferiores do lingote.

Lingotes obtidos por lingotamento com resfriamento direto

produzidos desta maneira são em geral submetidos a etapas de laminação a quente e a frio, ou outros procedimentos de trabalho a quente, a fim de produzir artigos tais como chapa fina ou chapa grossa de várias espessuras e larguras. Entretanto, na maioria dos casos, um procedimento de

5 homogeneização é normalmente exigido antes da laminação ou outro procedimento de trabalho a quente a fim de converter o metal a uma forma mais utilizável e/ou melhorar as propriedades finais do produto laminado. Homogeneização é realizada para equilibrar gradientes de concentração microscópicos. A etapa de homogeneização envolve aquecer o lingote

10 fundido a uma temperatura elevada (em geral, uma temperatura acima da temperatura de transição, por exemplo, uma temperatura solvus da liga, geralmente acima de 450°C e tipicamente (para muitas ligas) na faixa de 500 a 630 °C) por um período de tempo considerável, por exemplo, algumas horas e em geral até 30 horas.

15 A necessidade desta etapa de homogeneização é um resultado das deficiências na microestrutura encontradas no produto lingotado decorrentes dos estágios iniciais ou estágios finais de solidificação. No campo microscópico, a solidificação de ligas fundidas RC é caracterizada por cinco eventos: (1) a nucleação da fase primária (cuja frequência pode ou não estar

20 associada com presença de um refinador de grão); (2) a formação de uma estrutura celular, dendrítica ou combinação de estruturas celular e dendrítica que definem um grão; (3) a rejeição de soluto pela estrutura celular/dendrítica por causa das condições de solidificação fora do equilíbrio prevalecentes; (4) o movimento do soluto rejeitado que é intensificado pela mudança de volume

25 da fase primária em solidificação; e (5) a concentração de soluto rejeitado e sua solidificação a uma temperatura de reação terminal (por exemplo, eutética).

A estrutura resultante do metal é portanto bastante complexa e é caracterizada por variações de composição através não apenas do grão, mas

também nas regiões adjacentes às fases intermetálicas onde regiões relativamente macias e duras coexistem na estrutura e, se não modificadas ou transformadas, criarão variações de propriedades na espessura final inaceitáveis para o produto final.

5 Homogeneização é um termo genérico usado por via de regra para descrever um tratamento térmico projetado para corrigir deficiências microscópicas na distribuição de elementos solutos e (concomitantemente) modificar as estruturas intermetálicas presentes nas interfaces. Resultados aceitáveis de um processo de homogeneização incluem o seguinte:

10 1. a distribuição elementar dentro de um grão torna-se mais uniforme.

2. Quaisquer partículas constituintes de baixo ponto de fusão (por exemplo, eutéticos) que se formaram nos contornos de grão e pontos triplícies durante o lingotamento são redissolvidas nos grãos.

15 3. Certas partículas intermetálicas (por exemplo, peritéticos) passam por transformações químicas e estruturais.

4. Partículas intermetálicas grandes (por exemplo, peritéticos) que se formam durante o lingotamento podem ser fraturadas e arredondadas durante o aquecimento.

20 5. Precipitados (tais como os que podem ser usados subsequente para aumentar a resistência do material) que são formados durante o aquecimento são dissolvidos e posteriormente precipitados uniformemente através do grão depois da dissolução e redistribuição à medida que o lingote é novamente resfriado abaixo do solvus, e tanto mantidos a uma
25 temperatura constante quanto deixados nuclear e crescer, ou resfriados à temperatura ambiente e pré-aquecidos até temperaturas de trabalho a quente.

Em alguns casos, é necessário aplicar tratamentos térmicos aos lingotes durante o real processo de lingotamento RD para corrigir campos de tensão diferencial induzidos durante o processo de lingotamento. Versados na

técnica caracterizam ligas em aquelas que tanto trincam pós-solidificação quanto na pré-solidificação em resposta a essas tensões.

Trincas pós-solidificação são causadas por tensões macroscópicas que se desenvolvem durante o lingotamento, que fazem com trincas se formem de uma maneira transgranular depois que a solidificação está completa. Isto é tipicamente corrigido mantendo-se a temperatura superficial do lingote (diminuindo assim o gradiente de temperatura – conseqüentemente de deformação - no lingote) a um nível elevado durante o processo de lingotamento e transferindo lingotes lingotados convencionalmente para um forno de alívio de tensão imediatamente depois do lingotamento.

Trincas da pré-solidificação são também causadas por tensões macroscópicas que se desenvolvem durante o lingotamento. Entretanto, neste caso, as tensões macroscópicas formadas durante a solidificação são aliviadas rasgando ou cisalhando a estrutura, intergranularmente, ao longo de redes eutéticas de baixo ponto de fusão (associadas com rejeição de soluto durante a solidificação). Observou-se que equalizando, do centro para a superfície, o diferencial do gradiente de temperatura linear (isto é, a derivada da temperatura da superfície para o centro do lingote emergente) pode atenuar com sucesso tal trincamento.

Esses defeitos tornam o lingote inaceitável para muitos propósitos. Várias tentativas têm sido feitas para superar este problema controlando-se a velocidade de resfriamento superficial de um lingote durante o lingotamento. Por exemplo, em ligas propensas a trincamento pós-solidificação, Zeigler, na patente U.S. 2.705.353, usou um removedor mecânico para remover refrigerante da superfície do lingote a uma distância abaixo do molde para que o calor interno do lingote aqueça a superfície resfriada. A intenção era manter a temperatura da superfície em um nível acima de cerca de 300 °F (149 °C) e, preferivelmente, dentro de uma faixa de

recozimento típica de cerca de 400 a 650 °F (204 a 344 °C).

Zinniger, na patente U.S. 4.237.961, mostrou um outro sistema de lingotamento com resfriamento direto com um dispositivo de remoção de refrigerante na forma de um colar de limpeza inflável elastomérico. Este
5 serviu ao mesmo propósito básico do descrito anteriormente na patente de Zeigler, com a temperatura superficial do lingote sendo mantida a um nível suficiente para aliviar tensões internas. No exemplo da patente de Zinniger, a superfície do lingote é mantida a uma temperatura de aproximadamente 500 °F (260 °C), que está novamente na faixa de recozimento. O propósito deste
10 procedimento foi permitir o lingotamento de lingotes de seção transversal muito grande, impedindo o desenvolvimento de tensões térmicas excessivas no lingote.

Em ligas propensas a trinca pré-solidificação, Bryson, na patente U.S. 3.713.479, usou dois níveis de resfriamento com jato d'água de
15 menor intensidade para diminuir a velocidade de resfriamento e estendê-la a uma maior distância abaixo no lingote à medida que o lingote desce e, em decorrência de seu trabalho, demonstrou a capacidade de aumentar as velocidades de lingotamento gerais realizadas no processo.

Um outro projeto de lingotamento com dispositivo de
20 resfriamento direto usando um removedor mecânico para remover água de resfriamento está mostrado em Ohatake et al. na patente canadense 2.095.085. Com este projeto, jatos de resfriamento de água primários e secundários são usados, seguidos por um removedor mecânico para remover água, com o removedor mecânico sendo seguido por um terceiro jato d'água de
25 resfriamento.

REVELAÇÃO DA INVENÇÃO

Uma forma ou aspecto exemplar é baseado em uma observação de que propriedades metalúrgicas equivalentes ou idênticas às produzidas durante homogeneização convencional de um lingote de metal

lingotado (um procedimento que exige diversas horas de aquecimento a uma temperatura elevada) podem ser conferidas a um lingote deixando que as temperaturas da pele resfriada e o interior ainda fundido de um lingote fundido embriônico converjam para uma temperatura igual ou superior à temperatura de transformação do metal na qual ocorre a homogeneização *in situ* do metal, que é em geral uma temperatura de pelo menos 425°C para muitas ligas de alumínio, e preferivelmente que permaneçam nessa temperatura, ou próximo a ela, por um período de tempo adequado para que ocorram (pelo menos em parte) as transformações desejadas.

Surpreendentemente, mudanças metalúrgicas desejáveis podem geralmente ser conferidas desta maneira em um tempo relativamente curto (por exemplo, 10 a 30 minutos) e o procedimento para conseguir um resultado como esse pode ser incorporado na própria operação de lingotamento, evitando-se assim a necessidade de uma etapa de homogeneização adicional cara e inconveniente. Sem querer ficar preso a nenhuma teoria particular, é possível que isto seja porque mudanças metalúrgicas desejáveis são criadas ou mantidas à medida que a liga é lingotada por um efeito de difusão reversa significativa (tanto no estado sólido quanto líquido, ou ambos, e sua forma "pastosa" combinada) por um curto período de tempo, em vez de ter propriedades metalúrgicas indesejáveis que se formam durante resfriamento convencional, que então exigem considerável tempo para correção em uma etapa de homogeneização convencional.

Mesmo nesses casos em que a homogeneização não é normalmente realizada com um lingote convencionalmente fundido, pode haver ganhos nas propriedades que tornam o lingote mais fácil de processar, ou prover um produto com melhores propriedades.

O método de lingotar envolvendo homogeneização *in situ* da maneira apresentada anteriormente pode opcionalmente ser seguido por uma

operação de têmpera antes de o lingote ser removido da máquina de lingotamento, por exemplo, mergulhando a parte de avanço do lingote fundido em uma poça de líquido refrigerante. Isto é realizado após a remoção do líquido refrigerante suprido à superfície do lingote embriônico e depois de
5 ter tempo suficiente para transformações metalúrgicas adequadas.

O termo "homogeneização *in situ*" foi cunhado pelos inventores para descrever este fenômeno por meio do qual mudanças microestruturais são obtidas durante o processo de lingotamento que são equivalente às obtidas por homogeneização convencional realizada após o
10 lingotamento e resfriamento. Similarmente, o termo "têmpera *in situ*" foi cunhado para descrever uma etapa de têmpera realizada depois da homogeneização *in situ* durante o processo de lingotamento.

Deve-se notar que modalidades podem ser aplicadas ao lingotamento de lingotes compósitos de dois ou mais metais (ou o mesmo
15 metal proveniente de fontes diferentes) por exemplo, como descrito na publicação da patente U.S. 2005-0011630 publicada em 20 de janeiro de 2005, ou patente U.S. 6.705.384 que foi concedida em 16 de março de 2004. Lingotes compósitos deste tipo são fundidos praticamente da mesma maneira que lingotes monolíticos feitos de um metal, mas o molde de lingotamento ou
20 similares tem duas ou mais entradas separadas por uma parede interna do molde ou por uma tira de metal sólido alimentada continuamente que é incorporada no lingote fundido. Ao deixar o molde, através de uma ou mais saídas, o lingote compósito é submetido ao resfriamento com líquido e o líquido refrigerante pode ser removido da mesma maneira que para um
25 lingote monolítico com o efeito igual ou equivalente.

Assim, certas modalidades exemplares podem prover um método de lingotar um metal líquido: (a) suprir metal líquido de pelo menos uma fonte a uma região onde o metal líquido é perifericamente confinado, provendo assim o metal líquido com uma porção periférica; (b) resfriar a

porção periférica do metal, formando assim um lingote embriônico que tem uma pele sólida externa e um núcleo líquido interno; (c) avançar o lingote embriônico em uma direção de avanço para fora da região onde o metal líquido é perifericamente confinado suprindo ao mesmo tempo metal líquido adicional à região, estendendo assim o núcleo líquido contido dentro da pele sólida além da região; (d) resfriar a superfície externa do lingote embriônico que emerge da região onde o metal é perifericamente confinado, direcionando-se um suprimento de líquido refrigerante para a superfície externa; e (e) remover uma quantidade efetiva (e, mais preferivelmente, todo) de o líquido refrigerante da superfície externa do lingote embriônico em um local na superfície externa do lingote onde uma seção transversal do lingote perpendicular à direção de avanço intercepta uma porção do núcleo líquido de maneira tal que calor interno do núcleo líquido reaqueça a pele sólida adjacente ao núcleo líquido depois da remoção da quantidade efetiva de refrigerante, fazendo assim com que as temperaturas do núcleo e pele se aproximem cada qual de uma temperatura de convergência de 425°C ou mais.

Esta convergência pode, em casos preferidos, ser rastreada medindo-se a superfície externa do lingote que mostra uma temperatura recuperada depois que o líquido refrigerante é removido. Esta temperatura recuperada deve ter um pico acima da temperatura de transformação da liga ou fase, e preferivelmente acima de 426 °C.

No método apresentado, o metal líquido na etapa (a) é preferivelmente suprido a pelo menos uma entrada de um molde de lingotamento de resfriamento direto, o molde de lingotamento de resfriamento direto formando assim a região onde o metal líquido é perifericamente confinado, e o lingote embriônico avança na etapa (c) de pelo menos uma saída do molde de lingotamento de resfriamento direto, com o local na superfície externa do lingote onde a porção substancial de líquido refrigerante é removida na etapa (e) sendo espaçada por uma distância da pelo menos uma

saída do molde. O método de lingotamento (isto é, suprimento de metal líquido) pode ser contínuo ou semicontínuo, da forma desejada.

O líquido refrigerante pode ser removido da superfície externa pela limpeza de água ou outro meio. Preferivelmente, um removedor mecânico que circunda o lingote é provido e a posição do removedor mecânico pode variar, se desejado, durante diferentes fases da operação de lingotamento, por exemplo, para minimizar diferenças da temperatura de convergência que podem de outra forma ocorrer durante tais diferentes fases.

De acordo com uma outra modalidade exemplar, é provida uma máquina para lingotar com resfriamento direto contínua ou semicontinuamente um lingote de metal, compreendendo: um molde de lingotamento que tem pelo menos uma entrada, pelo menos uma saída e pelo menos uma cavidade do molde; pelo menos uma camisa de resfriamento para a pelo menos uma cavidade do molde; um suprimento de líquido refrigerante arranjado para fazer com que o líquido refrigerante escoe ao longo de uma superfície exterior de um lingote embriônico que emerge na pelo menos uma saída; dispositivos espaçados a uma distância da pelo menos uma saída para remover o líquido refrigerante da superfície exterior do lingote embriônico; e aparelho para mover o dispositivo de remoção de refrigerante a favor e contra a pelo menos uma saída, permitindo assim que a distância seja modificada durante o lingotamento do lingote.

Uma outra modalidade exemplar fornece um método de produzir um artigo de chapa fina metálica, que inclui produzir um lingote de metal solidificado por um método tal como o supradescrito; e trabalhar a quente o lingote para produzir um artigo trabalhado; caracterizado em que o trabalho a quente é realizado sem homogeneização do lingote de metal solidificado entre a etapa de produção do lingote (a) e a etapa de trabalho a quente (b). O trabalho a quente pode ser, por exemplo, laminação a quente, e esta pode ser seguida por laminação a frio convencional, se desejado. O termo

"trabalho a quente" pode incluir, por exemplo, processos tais como laminação a quente, extrusão e forjamento.

Uma outra modalidade exemplar fornece um método de produzir um lingote de metal que pode ser trabalhado a quente sem
5 homogeneização prévia, método este que compreende lingotar um metal para formar um lingote sob condições de temperatura e tempo efetivas para produzir um metal solidificado com uma microestrutura cujo núcleo difere de seu exterior, ou, alternativamente, uma microestrutura fraturada (partículas intermetálicas presentes são fraturadas na estrutura fundida).

10 Pelo menos em algumas das modalidades exemplares, elementos solutos que são segregados durante a solidificação em direção à borda da célula, que existem na borda do lingote, perto da superfície temperada abaixo de uma temperatura de transformação, por exemplo, uma temperatura solvus, durante resfriamento de fluido inicial, podem ser
15 redistribuídas naturalmente por meio de difusão de estado sólido através da dendrita/célula e aqueles elementos solutos que normalmente segregam na borda da dendrita/célula na região central do lingote têm tempo e temperatura durante solidificação para difundir soluto do líquido homogêneo de volta para a dendrita/célula antes do crescimento e coalescimento. O resultado desta
20 difusão reversa remove elementos solutos da mistura homogênea, gerando uma menor concentração de soluto na mistura homogênea que, por sua vez, minimiza a fração volumétrica dos compostos intermetálicos fundidos no contorno da dendrita/célula da unidade, reduzindo-se assim o efeito da macro-segregação geral através do lingote. Qualquer constituinte e composto
25 intermetálico fundido de alto ponto de fusão nesse ponto é, uma vez solidificado, facilmente modificado pela difusão massiva de silício (Si) ou outros elementos presentes no metal, nas temperaturas elevadas, produzindo uma região exposta no limite dendrita/célula equivalente ou próxima da concentração correspondente ao limite de solubilidade máxima nessa

temperatura particular de convergência. Similarmente, eutéticos de alto ponto de fusão (ou constituintes metaestáveis e compostos intermetálicos) podem ser adicionalmente modificados ou podem ser adicionalmente modificados/transformados na estrutura, se a temperatura de convergência for atingida e mantida em uma região de fase mista comum a duas regiões de fase binária vizinhas. Além disto, os constituintes e compostos intermetálicos fundidos nominalmente de maior ponto de fusão podem ser fraturados e/ou arredondados, e constituintes e compostos intermetálicos fundidos de baixo ponto de fusão são mais propensos a fundir ou difundir no material massivo durante o processo de lingotamento.

Uma outra modalidade exemplar fornece um método de aquecer um lingote de metal lingotado para preparar o lingote para trabalho a quente a uma temperatura de trabalho a quente predeterminada. O método envolve (a) pré-aquecer o lingote a uma temperatura de nucleação, abaixo da temperatura de trabalho a quente predeterminada, na qual ocorre nucleação de precipitados no metal para fazer com que ocorra nucleação; (b) aquecer o lingote ainda mais até uma temperatura de crescimento de precipitado na qual ocorre crescimento de precipitado para fazer com que o precipitado cresça no metal; e (c) se o lingote ainda não estiver na temperatura de trabalho a quente predeterminada depois da etapa (b), aquecer o lingote ainda mais até a dita temperatura de trabalho a quente predeterminada pronto para trabalho a quente. A etapa de trabalho a quente preferivelmente compreende laminação a quente, e o lingote é preferivelmente lingotado por lingotamento RD.

De acordo com este método, dispersóides, normalmente formados durante homogeneização e laminação a quente, são produzidos de uma maneira tal que, no pré-aquecimento do lingote em dois estágios até uma temperatura de laminação a quente e encharque por um período de tempo, o tamanho e distribuição da população de dispersóides no lingote torna-se similar ou melhor que a normalmente encontrada após um processo de

homogeneização completo, mas em um período de tempo substancialmente menor.

Preferivelmente, este método fornece um processo para processar termicamente um lingote de metal compreendendo as etapas de:

5 (a) pré-aquecer um lingote a uma temperatura correspondente a uma composição no solvus, onde,

(b) a porção de material supersaturado que precipita da solução durante aquecimento contribui para a nucleação de um precipitado,

(c) encharcar o lingote nessa temperatura por um período de
10 tempo e, em seguida,

(d) aumentar a temperatura do lingote a uma temperatura que corresponde a uma composição no solvus, e

(e) deixar que a porção do material supersaturado que precipita da solução no aquecimento do segundo estágio contribua para o crescimento
15 de um precipitado, em seguida

(f) manter o lingote nessa temperatura por um período de tempo suficiente para permitir a continuidade da difusão de soluto dos precipitados menores (termicamente instáveis) que favorece o crescimento de precipitados maiores mais estáveis ou, alternativamente, aumentar
20 gradualmente a temperatura, aumentando assim a concentração de soluto que contribui para o crescimento sem exigir encharque a uma temperatura.

DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS DESENHOS

A figura 1 é uma seção transversal vertical de um molde de lingotamento de resfriamento direto mostrando uma forma preferida de um
25 processo de acordo com uma modalidade exemplar, e particularmente ilustrando um caso em que o lingote permanece quente durante todo o lingotamento.

A figura 2 é uma seção transversal similar à da figura 1, ilustrando uma modificação preferida na qual a posição do removedor

mecânico é móvel durante o lingotamento.

A figura 3 é uma seção transversal similar à da figura 1, ilustrando um caso em que o lingote é adicionalmente resfriado (temperado) na extremidade inferior durante o lingotamento.

5 A figura 4 é uma vista plana de topo de um molde de lingotamento em forma de J ilustrando uma forma preferida de uma modalidade exemplar.

A figura 5 é um gráfico mostrando distâncias X da figura 1 para um molde do tipo mostrado na figura 4, os valores de X correspondendo
10 aos pontos em torno da periferia do molde medidos no sentido horário a partir do ponto S na figura 4.

A figura 6 é uma vista em perspectiva de um removedor mecânico projetado para o molde de lingotamento da figura 4.

A figura 7 é um gráfico ilustrando um procedimento de
15 lingotamento de acordo com uma forma de uma modalidade exemplar, mostrando a temperatura superficial e temperatura do núcleo com o tempo de uma liga Al - 1,5% Mn - 0,6% Cu à medida que ela é produzida por lingotamento RC e em seguida submetida a resfriamento com água e remoção do refrigerante. O histórico térmico na região onde ocorrem solidificação e ré-
20 aquecimento de uma liga Al - 1,5% Mn - 0,6% Cu similar à da patente U.S. 6.019.939 no caso onde a massa do lingote não é resfriada forçadamente (traço de temperatura inferior é a superfície, e a linha superior (tracejada) é o centro).

A figura 8 é um gráfico ilustrando a mesma operação de
25 lingotamento da figura 7, mas estendendo-se por um período de tempo maior e mostrando em particular o período de resfriamento após convergência ou temperatura recuperada.

A figura 9 é um gráfico similar ao da figura 7, mas mostrando medições de temperatura do mesmo lingotamento realizadas em três tempos

ligeiramente diferentes (diferentes comprimentos de lingotes mostrados na figura). As linhas cheias mostram as temperaturas superficiais dos três gráficos, e as linhas pontilhadas mostram as temperaturas do núcleo. Os tempos para que as temperaturas superficiais permaneçam acima de 400°C e 500°C podem ser determinados a partir de cada gráfico e são maiores que 15 minutos em cada caso. As temperaturas de recuperação de 563, 581 e 604°C estão mostradas para cada caso.

A figura 10a mostra micrografias eletrônicas de transmissão da liga Al - 1,5% Mn - 0,6% Cu similares às da patente U.S. 6.019.939 com um histórico de solidificação e resfriamento de acordo com o Processo de Resfriamento Direto comercial, e histórico de processamento térmico e mecânico de acordo com a amostra A no exemplo seguinte, mostrando a população de precipitados típica a uma espessura de 6 mm, encontrada 25 mm da superfície e do centro do lingote.

A figura 10b é uma fotomicrografia da mesma área na chapa fina da figura 10a, mas mostrada em luz polarizada para revelar o tamanho de célula recristalizada.

A figura 11a mostra micrografias eletrônicas de transmissão de uma liga Al - 1,5% Mn - 0,6% Cu similar à da patente U.S. 6.019.939 com um histórico de solidificação e resfriamento de acordo com o Processo de Resfriamento Direto comercial, e histórico de processamento térmico e mecânico de acordo com a amostra B do seguinte Exemplo, mostrando a população de precipitados típica a uma espessura de 6 mm, encontrada 25 mm da superfície e do centro do lingote.

A figura 11b é uma fotomicrografia da mesma área na chapa fina da figura 11a, mas mostrada em luz polarizada para revelar o tamanho de célula recristalizada.

A figura 12a mostra micrografias eletrônicas de transmissão de uma liga Al - 1,5% Mn - 0,6% Cu similar à da patente U.S. 6.019.939 com

um histórico de solidificação e resfriamento de acordo com a figura 7 e a figura 8, e histórico de processamento térmico e mecânico de acordo com a amostra C no exemplo seguinte, mostrando a população de precipitados típica a uma espessura de 6 mm, encontrada 25 mm da superfície e do centro do lingote.

A figura 12b é uma fotomicrografia da mesma área na chapa fina da figura 12a, mas mostrada em luz polarizada ótica para revelar o tamanho de célula recristalizada.

A figura 13a mostra micrografias eletrônicas de transmissão de uma liga Al - 1,5% Mn - 0,6% Cu similar à da patente U.S. 6.019.939 com histórico de solidificação e resfriamento de acordo com a figura 9, e um histórico de processamento térmico e mecânico de acordo com a amostra D do exemplo seguinte, mostrando a população de precipitados típica a uma espessura de 6 mm, encontrada 25 mm da superfície e do centro do lingote.

A figura 13b é uma fotomicrografia da mesma área na chapa fina da figura 13a, mas mostrada em luz polarizada para revelar o tamanho de célula recristalizada.

A figura 14a mostra micrografias eletrônicas de transmissão da liga Al - 1,5% Mn - 0,6% Cu similar à da patente U.S. 6.019.939 com um histórico de solidificação e resfriamento de acordo com o Processo de Resfriamento Direto comercial, e histórico de processamento térmico e mecânico de acordo com a amostra E no exemplo seguinte, mostrando a população de precipitados típica a uma espessura de 6 mm, encontrada 25 mm da superfície e do centro do lingote.

A figura 14b é uma fotomicrografia da mesma área na chapa fina da figura 14a, mas mostrada em luz polarizada para revelar o tamanho de célula recristalizada.

A figura 15a mostra micrografias eletrônicas de transmissão da liga Al - 1,5% Mn - 0,6% Cu similar à da patente U.S. 6.019.939 com um

histórico de solidificação e resfriamento de acordo com o Processo de Resfriamento Direto comercial, e histórico de processamento térmico e mecânico de acordo com a amostra F no exemplo seguinte, mostrando a população de precipitados típica a uma espessura de 6 mm, encontrada 25 mm da superfície e do centro do lingote.

A figura 15b é uma fotomicrografia da mesma área na chapa fina da figura 15a, mas mostrada em luz polarizada para revelar o tamanho de célula recristalizada.

A figura 16 é uma micrografia eletrônica de varredura com Varredura de Linha de Cobre (Cu) de Al - 4,5% Cu pelo centro de uma estrutura de grãos solidificados mostrando a micro-segregação típica comum ao Processo de Lingotamento com Resfriamento Direto convencional.

A figura 17 é uma imagem MEV com Varredura de Linha de Cobre (Cu) de Al - 4,5% Cu com um removedor mecânico e uma temperatura recuperada/de convergência (300 °C) na faixa preceituada por Ziegler, 2.705.353, ou Zinniger, 4.237.961.

A figura 18 é uma imagem MEV com Varredura de Linha de Cobre (Cu) de Al - 4,5% Cu de acordo com uma modalidade exemplar no caso onde a massa do lingote não é resfriada forçadamente (Ver figura 19).

A figura 19 é um gráfico ilustrando o histórico térmico de uma liga Al - 4,5% Cu na região onde ocorrem solidificação e ré-aquecimento no caso onde a massa do lingote não é resfriada forçadamente (Ver figura 18) .

A figura 20 é uma imagem MEV com Varredura Linear de Cobre (Cu) de Al - 4,5% Cu de acordo com uma modalidade exemplar no caso onde a massa do lingote é resfriada forçadamente depois de um atraso intencional (Ver figura 21).

A figura 21 é um gráfico mostrando o histórico térmico na região onde ocorrem solidificação e ré-aquecimento de uma liga Al - 4,5% Cu no caso onde a massa do lingote é resfriada forçadamente depois de um

atraso intencional (Ver figura 20).

A figura 22 é um gráfico mostrando frações de área representativas de fases intermetálicas fundidas comparadas em vários caminhos de processamento.

5 A figura 23 é um gráfico ilustrando o histórico térmico na região onde ocorrem solidificação e ré-aquecimento de uma liga Al - 0,5% Mg - 0,45% Si (6063) no caso onde a massa do lingote não é resfriada forçadamente.

10 A figura 24 é um gráfico ilustrando o histórico térmico na região onde ocorrem solidificação e ré-aquecimento de uma liga Al - 0,5 Mg - 0,45% S (AA6063) no caso onde a massa do lingote é resfriada forçadamente depois de um atraso intencional.

15 As figuras 25a, 25b e 25c são cada qual padrões de difração da liga tratada de acordo com a figura 23 e a figura 24 é uma identificação de fase XRD.

As figuras 26a, 26b e 26c são cada qual representações gráficas de técnicas FDC realizadas nos lingotes convencionalmente fundidos, e também tratados de acordo com o procedimentos das figuras 23 e 24.

20 As figuras 27a e 27b são fotomicrografias óticas de uma liga intermetálica na condição fundida de Al - 1,3% Mn (AA3003) processada de acordo com uma modalidade exemplar, fraturada;

A figura 28 é uma fotomicrografia ótica de uma liga intermetálica na condição fundida de Al - 1,3% Mn processada de acordo com uma modalidade exemplar, modificada;

25 A figura 29 é uma micrografia eletrônica de transmissão de fase intermetálica fundida, fundida de acordo com esta modalidade exemplar, modificada por difusão de Si na partícula, mostrando uma zona descoberta;

A figura 30 é um gráfico ilustrando o histórico térmico de uma liga Al - 7% Mg convencionalmente processada;

A figura 31 é um gráfico ilustrando o histórico térmico de uma liga Al – 7% Mg na região onde ocorrem solidificação e ré-aquecimento no caso onde a massa do lingote não é resfriada forçadamente com uma temperatura recuperada que é abaixo da temperatura de dissolução para a fase beta (β);

A figura 32 é um gráfico ilustrando o histórico térmico de uma liga Al - 7% Mg na região onde ocorrem solidificação e ré-aquecimento no caso onde a massa do lingote não é resfriada forçadamente com uma temperatura recuperada que é acima da temperatura de dissolução para a fase beta (β);

A figura 33 é o traço de saída de um Calorímetro de Varredura Diferencial (DSC) mostrando a presença de fase beta (β) na faixa de 451-453°C (Material Lingotado Resfriado Direto Convencional) (ver figura 30);

A figura 34 é o traço de saída de um Calorímetro de Varredura Diferencial (DSC) mostrando fase beta (β) ausente (ver figura 31); e

A figura 35 é o traço de saída de um Calorímetro de Varredura Diferencial (DSC) mostrando fase beta (β) ausente (ver figura 32).

MELHOR MANEIRA DE REALIZAR A INVENÇÃO

A descrição seguinte refere-se ao lingotamento com resfriamento direto de ligas de alumínio, mas somente como um exemplo. A presente modalidade exemplar é aplicável a vários métodos de lingotamento de metais, ao lingotamento da maioria das ligas, particularmente ligas de metais leves, e especialmente aquelas que têm uma temperatura de transformação acima de 450°C e que exigem homogeneização depois do lingotamento e antes do trabalho a quente, por exemplo, laminação. Além das ligas a base de alumínio, exemplos de outros metais que podem ser lingotados incluem ligas a base de magnésio, cobre, zinco, chumbo-estanho e ferro. A modalidade exemplar pode também ser aplicável ao lingotamento de alumínio puro ou outros metais nos quais os efeitos de um dos cinco resultados do

processo de homogeneização pode ser concretizado (ver a descrição dessas etapas citadas).

A figura 1 dos desenhos anexos mostra uma seção transversal vertical simplificada de um exemplo de uma máquina de lingotamento RD vertical 10 que pode ser usada para realizar pelo menos parte de um processo de acordo com uma forma exemplar da presente modalidade exemplar. Certamente, versados na técnica percebem que uma máquina de lingotamento como essa pode formar parte de um grupo maior de máquinas de lingotamento, todas operando da mesma maneira ao mesmo tempo, por exemplo, formando parte de uma mesa de lingotamento múltipla.

Metal líquido 12 é introduzido em um molde resfriado a água verticalmente 14 através de uma entrada do molde 15 e emerge como um lingote embriônico 16 em uma saída do molde 17. O lingote embriônico tem um núcleo de metal líquido 24 dentro de uma pele sólida externa 26 que fica mais espessa à medida que o lingote embriônico resfria (mostrado pela linha 19) até que seja produzido um lingote fundido completamente sólido. Entende-se que o molde 14 perifericamente confina e resfria o metal líquido para começar a formação da pele sólida 26, e o metal em resfriamento movimenta-se e afasta-se do molde em uma direção de avanço indicada pela seta A. Na figura 1, jatos 18 de líquido refrigerante são direcionados para a superfície externa do lingote à medida que ele emerge do molde a fim de intensificar o resfriamento e sustentar o processo de solidificação. O líquido refrigerante é normalmente água, mas possivelmente um outro líquido pode ser empregado, por exemplo, etileno glicol, para ligas especiais tais como ligas de alumínio-lítio. O fluxo de refrigerante empregado pode ser bastante normal para lingotamento RD, por exemplo, 1,04 litros por minuto por centímetro de periferia a 1,78 litros por minuto por centímetro de periferia (0,7 galões por minuto (gpm)/polegada de periferia a 1,2 gpm/polegada).

Um removedor mecânico anular 20 é provido em contato com

a superfície externa do lingote espaçado a uma distância X abaixo da saída 17 do molde e isto tem o efeito de remover líquido refrigerante (representado pelas correntes 22) da superfície do lingote para que a superfície da parte do lingote abaixo do removedor mecânico fique livre de líquido refrigerante à medida que o lingote desce ainda mais. As correntes 22 de refrigerante estão mostradas a partir do removedor mecânico 20, mas elas são espaçadas a uma distância da superfície do lingote 16 para que elas não proporcionem um efeito de resfriamento.

A distância X é feita de maneira tal que a remoção de líquido refrigerante do lingote ocorra enquanto o lingote está ainda embriônico (isto é, ele ainda tem o centro líquido 24 contido dentro da pele sólida 26). Posto de uma outra maneira, o removedor mecânico 20 é posicionado em um local onde uma seção transversal do lingote tomada perpendicular à direção de avanço A intercepta uma porção do núcleo de metal líquido 24 do lingote embriônico. Em posições abaixo da superfície superior do removedor mecânico 20, a continuidade do resfriamento e solidificação do metal líquido no núcleo do lingote libera calor latente de solidificação e calor sensível para a pele sólida 26. Esta transferência de calor latente e sensível, com falta de continuidade do resfriamento forçado (líquido), faz com que a temperatura da pele sólida 26 (abaixo da posição onde o removedor mecânico 20 remove o refrigerante) suba (comparada com sua temperatura imediatamente acima do removedor mecânico) e convirja com a do núcleo líquido a uma temperatura que é arranjada para ficar acima de uma temperatura de transformação na qual o metal passa por homogeneização *in situ*. Pelo menos para ligas de alumínio, a temperatura de convergência é em geral arranjada para ser igual ou superior a 425 °C, e mais preferivelmente igual ou superior a 450 °C. Por questões práticas em termos de medição de temperatura, a "temperatura de convergência" (a temperatura comum primeiramente atingida pelo núcleo líquido e pele sólida) é considerada a mesma da "temperatura recuperada" que

é a temperatura máxima na qual a pele sólida aumenta neste processo após a remoção de líquido refrigerante.

A temperatura recuperada pode ser levada ao máximo possível acima de 425 °C, e em geral quanto mais alta a temperatura tanto melhor o resultado desejado de homogeneização *in situ*, mas a temperatura recuperada, certamente, não elevará o ponto de fusão incipiente do metal em virtude da pele externa resfriada e solidificada 26 absorver calor do núcleo e impor um teto na temperatura recuperada. Deve-se mencionar que ultrapassar a temperatura recuperada, que é em geral pelo menos 425 °C, normalmente será
10 acima da temperatura de recozimento do metal (temperaturas de recozimento para ligas de alumínio são tipicamente na faixa de 343 e 415 °C).

A temperatura de 425°C é uma temperatura crítica para a maioria das ligas em virtude de, a temperaturas mais baixas, as taxas de difusão de elementos metálicos na estrutura solidificada são muito baixas para
15 normalizar ou equalizar a composição química da liga através do grão. Nesta temperatura, ou em temperaturas superiores, e particularmente a 450°C ou mais, as taxas de difusão são adequadas para produzir uma equalização desejada para causar um efeito de homogeneização *in situ* desejável do metal.

De fato, em geral é desejável garantir que a temperatura de convergência atinja uma certa temperatura mínima acima de 425 °C. Para
20 qualquer liga particular, normalmente existe uma temperatura de transição entre 425°C e o ponto de fusão da liga, por exemplo, uma temperatura solvus ou uma temperatura de transformação, acima da qual ocorrem mudanças microestruturais da liga, por exemplo, conversão de um constituinte ou
25 estruturas intermetálicas de fase β a fase α . Se a temperatura de convergência for arranjada de forma a exceder tais temperaturas de transformação, mudanças transformacionais desejadas podem ser introduzidas na estrutura da liga.

A temperatura recuperada ou convergência é determinada

pelos parâmetros de lingotamento e, em particular, pelo posicionamento do removedor mecânico 20 abaixo do molde (isto é, a dimensão da distância X na figura 1). Distância X preferivelmente deve ser escolhida de maneira tal que: (a) haja metal líquido suficiente remanescente no núcleo depois da
5 remoção de refrigerante, e temperatura em excesso suficiente (superaquecimento) e calor latente do metal líquido para permitir que as temperaturas do núcleo e pele do lingote atinjam a temperatura de convergência desejada supraindicada; (b) o metal fique exposto a uma temperatura acima de 425°C por um tempo suficiente depois da remoção de
10 refrigerante para permitir que as mudanças microestruturais desejadas ocorram a taxas normais de resfriamento nas velocidades normais de lingotamento; e (c) o lingote fique exposto ao líquido refrigerante (isto é, antes da remoção de líquido refrigerante) por um tempo suficiente para solidificar a pele até um ponto tal que estabilize o lingote e impeça vazamento
15 ou ruptura do metal líquido do interior.

Normalmente é difícil posicionar o removedor mecânico 20 mais perto do que 50 mm da saída do molde 17, permitindo ainda espaço suficiente para resfriamento com líquido e solidificação da pele, e assim é em geral o limite inferior prático (dimensão mínima) para a distância X. O limite
20 superior (dimensão máxima) é considerado por questão de prática cerca de 150 mm, independente do tamanho do lingote, a fim de atingir uma temperatura recuperada desejada, e a faixa preferida para a distância X é normalmente 50 mm a 100 mm. A posição ideal do removedor mecânico pode variar de liga para liga e de equipamento de lingotamento para
25 equipamento de lingotamento (já que lingotes de diferentes dimensões podem ser lingotados a diferentes velocidades de lingotamento), mas é sempre acima da posição na qual o núcleo do lingote torna-se completamente sólido. A posição adequada (ou faixa de posições) pode ser determinada para cada caso por cálculo (usando equações de geração de calor e de perda de calor), ou por

medições de temperatura superficial (por exemplo, usando termopares padrões embutidos na superfície ou nas superfícies ou como sondas de contato ou sem contato), ou por teste e experimentação. Para moldes de lingotamento Rd de capacidade normal que formam um lingote de 10 a 60 cm de diâmetro, velocidades de lingotamento de pelo menos 40 mm/minuto, mais preferivelmente 50 a 75 mm/min (ou $9,0 \times 10^{-4}$ a $4,0 \times 10^{-3}$ metros/segundo), são normalmente empregadas.

Em alguns casos, é desejável fazer a distância X variar em diferentes tempos durante um procedimento de lingotamento, isto é, tornando o removedor mecânico 20 móvel tanto para perto do molde 14 quanto para longe do molde. Isto é para acomodar as diferentes condições térmicas encontradas durante as fases transientes no início e final do procedimento de lingotamento.

No início do lingotamento, um bloco inferior tampa a saída do molde e é gradualmente abaixado para iniciar a formação do lingote fundido. Calor é perdido pelo lingote para o bloco inferior (que é normalmente feito de um metal termicamente condutor) bem como da superfície externa do lingote emergente. Entretanto, à medida que o lingotamento continua e a parte do lingote emergente torna-se separada do bloco inferior por uma distância crescente, calor é perdido somente pela superfície externa do lingote. No final do lingotamento, pode ser desejável tornar a pele externa mais fria do que o normal imediatamente antes de o lingotamento terminar. Isto se dá porque a última parte do lingote a emergir do molde é normalmente presa por um dispositivo de elevação para que todo o lingote possa ser levantado. Se a pele for mais fria e mais espessa, o dispositivo de elevação terá menos probabilidade de causar deformação ou ruptura que pode por em perigo para a operação de elevação. A fim de se conseguir isto, a taxa de escoamento de líquido de resfriamento pode ser aumentada na fase final de lingotamento.

Na fase inicial, mais calor é removido do lingote do que

durante a fase de lingotamento normal por causa do calor perdido para o bloco inferior. Em um caso como este, o removedor mecânico pode mover-se temporariamente para mais perto do molde para reduzir o tempo que a superfície do lingote fica exposta à água de resfriamento, reduzindo assim a extração de calor. Depois de um certo tempo, o removedor mecânico pode ser novamente localizado na sua posição normal para a fase de lingotamento normal. Na fase final, considera-se na prática que nenhum movimento do removedor mecânico pode ser exigido mas, se necessário, o removedor mecânico pode ser levantado para compensar o calor adicional removido pela maior taxa de escoamento do líquido refrigerante.

A distância na qual o removedor mecânico move-se (variação em X , isto é, ΔX) e os tempos nos quais os movimentos são feitos podem ser calculados a partir de equações de perda de calor teóricas, avaliadas a partir de teste e experimentação, ou (mais preferivelmente) com base na temperatura da superfície do lingote acima (ou possivelmente abaixo) do removedor mecânico determinada por um sensor apropriado. Neste caso, uma temperatura superficial anormalmente baixa pode indicar a necessidade de uma redução da distância X (menos resfriamento) e uma temperatura superficial anormalmente alta pode indicar a necessidade de um aumento na distância X (mais resfriamento). Um sensor adequado a este propósito está descrito na patente U.S. 6.012.507 que foi concedida em 11 de janeiro de 2000 a Marc Auger et al. (cuja revelação está aqui incorporada pela referência).

No início do lingotamento, o ajuste da posição do removedor mecânico é normalmente exigido logo para os 50 cm a 60 cm do procedimento de lingotamento. Diversas pequenas mudanças incrementais podem ser feitas, por exemplo, por uma distância de 25 mm em cada caso. Para um lingote de 68,5 cm de espessura, o primeiro ajuste pode ser dentro de 150-300 mm do início do lingote, e em seguida variações similares podem ser

feitas a 30 cm e 50-60 cm. Para um lingote de 50 cm de espessura, os ajustes podem ser feitos a 15 cm, 30 cm, 50 cm e 80 cm. A posição final do removedor mecânico é a que é exigida para o procedimento de lingotamento normal, e assim o removedor mecânico começa no seu ponto mais próximo do molde e em seguida move-se para baixo à medida que o lingotamento continua. Isto aproxima a redução de perda de calor à medida que a parte emergente do lingote torna-se mais amplamente separada do bloco inferior à medida que o lingotamento continua. A distância X assim começa menor que na fase de lingotamento normal, e aumenta gradualmente até a distância exigida para lingotamento normal.

No final do lingotamento, se for exigido algum ajuste, ele pode ser feito dentro dos últimos 25 cm do lingotamento, e normalmente existe uma necessidade de somente um ajuste por um a dois centímetros.

O ajuste da posição do removedor mecânico pode ser feito manualmente (por exemplo, se o removedor mecânico for suportado por correntes que têm elos ou olhais através dos quais projeções (por exemplo, ganchos) no removedor mecânico são inseridas, o removedor mecânico pode ser suportado e levantado para que as projeções possam ser inseridos através dos diferentes elos ou olhais). Alternativamente, e mais preferivelmente, o removedor mecânico pode ser suportado e movimentado por macacos elétricos, pneumáticos ou hidráulicos, opcionalmente ligados por computador (ou equivalente) a uma máquina de detecção de temperatura do tipo supramencionado para que o removedor mecânico possa mover-se de acordo com um circuito de realimentação com lógica embutida. Um arranjo deste tipo está mostrado de forma simplificada na figura 2.

A máquina mostrada na figura 2 é similar à da figura 1, exceto que o removedor mecânico 20 é ajustável na altura, por exemplo, de uma posição superior mostrada em linhas cheias para uma posição inferior mostrada em linhas tracejadas. Assim, a distância X da saída do molde 14

pode ser modificada por ΔX (tanto para cima quanto para baixo). Esta ajustabilidade é possível em virtude de o removedor mecânico 20 ser suportado em suportes ajustáveis 21 que são arranjos de pistão e cilindro hidráulicos operados por um motor hidráulico 23. O motor hidráulico é por si controlado por um computador 25 com base na informação de temperatura distribuída por um sensor de temperatura 27 que monitora a temperatura superficial do lingote 16 imediatamente abaixo da saída 17 do molde 14. Conforme notado anteriormente, se a temperatura registrada pelo sensor 27 for menor que um valor predeterminado, o removedor mecânico 20 pode ser levantado e, se a temperatura for acima de um valor predeterminado, o removedor mecânico pode ser abaixado.

Desejavelmente, em todas as formas das modalidades exemplares, a temperatura de convergência do lingote abaixo do removedor mecânico 20 deve permanecer acima da temperatura de transformação para homogeneização *in situ* (em geral acima de 425 °C) por um período de tempo suficiente para permitir que ocorram as transformações microestruturais desejadas. O tempo exato dependerá da liga, mas é preferivelmente na faixa de 10 minutos a 4 horas, dependendo das taxas de difusão elementares e da quantidade na qual esta temperatura recuperada vai acima de 425 °C. Normalmente, mudanças desejáveis ocorrem depois de não mais que 30 minutos, e geralmente na faixa de 10 a 15 minutos. Isto é um contraste marcante com o tempo exigido para homogeneização convencional de uma liga, que é normalmente na faixa de 46 a 48 horas a temperaturas acima de uma temperatura de transformação (por exemplo, solvus) do metal (geralmente 550 a 625 °C). Apesar do tempo de processo bastante reduzido das modalidades exemplares, comparado com homogeneização convencional, a microestrutura resultante do metal é essencialmente a mesma em ambos os casos, isto é, o produto lingotado das modalidades exemplares tem a microestrutura de um metal homogeneizado que não passou por

homogeneização convencional, e pode ser laminado ou trabalhado a quente sem homogeneização adicional. A presente modalidade exemplar da invenção é portanto referida como "homogeneização *in situ*", isto é, homogeneização realizada durante o lingotamento, e não depois.

5 Em decorrência da aplicação do líquido refrigerante e subsequente remoção, a superfície do lingote emergente é primeiramente submetida ao rápido resfriamento, característico de regimes de ebulição de película e de película nucleada, garantindo-se assim que a temperatura superficial é reduzida rapidamente até um nível baixo (por exemplo, 150°C a
10 300 °C), mas é em seguida submetida à remoção de líquido refrigerante, permitindo assim que a temperatura em excesso e o calor latente do centro do lingote fundido (bem como o calor sensível do metal sólido) reaqueçam a superfície da pele sólida. Isto garante que as temperaturas necessárias para transições microestruturais desejáveis sejam atingidas.

15 Deve-se notar que, se o refrigerante puder entrar em contato com o lingote por um tempo maior que o desejável antes de ser removido da superfície do lingote (ou se o refrigerante não for absolutamente removido), não é mais possível fazer uso do efeito substancial do superaquecimento e do calor latente de solidificação do núcleo líquido para reaquecer a pele sólida do
20 lingote suficientemente para atingir as mudanças metalúrgicas desejadas. Embora possa haver um certo equilíbrio de temperatura através do lingote com um procedimento como esse, e embora isto possivelmente possa resultar em redução de tensão e redução de trincas benéficas, as mudanças metalúrgicas desejadas não são obtidas, e um procedimento de
25 homogeneização adicional convencional seria então exigido antes da laminação dos lingotes na bitola ou espessura desejada. O mesmo problema pode ocorrer se o refrigerante for removido da superfície do lingote de uma maneira desejada, e em seguida mais refrigerante for posto em contato com o lingote antes do equilíbrio de temperatura por todo o lingote, e mudanças

microestruturais desejadas terem ocorrido no metal.

Em alguns casos, refrigerante (particularmente refrigerante a base de água) pode ser temporariamente e pelo menos parcialmente removido da superfície do lingote por ebulição pelicular nucleada natural, de maneira tal que vapor gerado na superfície do metal force o líquido refrigerante para fora do lingote. Em geral, entretanto, o líquido retorna para a superfície à medida que ocorre o resfriamento. Se esta remoção temporária de refrigerante ocorre antes de o removedor mecânico ser usado nesta modalidade exemplar, a superfície do lingote pode apresentar um declive duplo no seu perfil de temperatura. O refrigerante resfria a superfície até que ele seja temporariamente removido pela ebulição pelicular nucleada, e assim temperatura então aumenta até um certo ponto, e em seguida superfície do lingote passa através de uma poça de refrigerante mantida na superfície superior do removedor mecânico (o removedor mecânico pode ser feito em forma de prato para dentro em direção ao lingote para promover a formação de uma poça de refrigerante) e a temperatura cai novamente, para aumentar novamente só quando o removedor mecânico remover todo o refrigerante da superfície do lingote. Isto produz uma forma de "W" característica na curva de resfriamento da pele sólida do lingote (conforme pode-se ver pelas figuras 23 e 24).

O removedor mecânico 20 da figura 1 pode ser na forma de uma coroa anular de material elastomérico macio resistente a temperatura 30 (por exemplo, uma borracha de silício resistente a alta temperatura) mantida dentro de um alojamento de suporte rígido circundante 32 (feito, por exemplo, de metal).

Embora a figura 1 ilustre um removedor mecânico físico 20, outro dispositivo de remoção de refrigerante pode ser empregado, se desejado. De fato, é geralmente vantajoso prover métodos de remoção de refrigerante sem contato. Por exemplo, jatos de gás ou de um líquido diferente podem ser

providos no local desejado para remover o refrigerante que escoar ao longo do lingote. Alternativamente, pode-se fazer uso de ebulição pelicular nucleada da maneira supraindicada, isto é, o refrigerante pode ser impedido de retornar à superfície do lingote depois da remoção temporária por causa da ebulição pelicular nucleada. Exemplos de tais métodos de remoção de refrigerante sem contato estão mostrados, por exemplo, na patente U.S. 2.705.353 de Zeigler, patente alemã DE 1.289.957 de Moritz, patente U.S. 2.871.529 de Kilpatrick e patente U.S. 3.763.921 de Beke et al. (as revelações de tais patentes estão aqui especificamente incorporadas pela referência). Ebulição pelicular nucleada pode ser assistida pela adição de um gás dissolvido ou comprimido, tais como dióxido de carbono ou ar, no líquido refrigerante, por exemplo, tal como descrito na patente U.S. no. 4.474.225 de Yu, ou patentes U.S. 4.693.298 e 5.040.595 de Wagstaff (cuja revelações estão aqui incorporadas pela referência).

Alternativamente, a taxa de distribuição do refrigerante nas correntes 18 pode ser controlada no ponto em que todo o refrigerante evapora da superfície do lingote antes de o lingote atingir seu ponto crítico (Distância X) abaixo do molde ou antes de a superfície do lingote ser resfriada abaixo de uma temperatura superficial crítica. Isto pode ser feito usando um suprimento de refrigerante mostrado na patente U.S. 5.582.230 de Wagstaff et al. concedida em 10 de dezembro de 1996 (cuja revelação está aqui incorporada pela referência). Neste arranjo, o líquido refrigerante é suprido através de duas fileiras de bicos conectadas em diferentes suprimentos de refrigerante e é uma simples questão de variar a quantidade de refrigerante aplicada a uma superfície do lingote para garantir que o refrigerante evapora onde se deseja (Distância X). Alternativamente, ou adicionalmente, cálculos térmicos podem ser feitos de uma maneira similar aos da patente U.S. 6.546.995 com base em porções anulares das partes sucessivamente anulares do molde para garantir que um volume de água seja aplicado, que irá evaporar da maneira exigida.

Ligas de alumínio que pode ser lingotadas de acordo com as modalidades exemplares incluem tanto ligas não termicamente tratáveis (por exemplo, série AA1000, 3000, 4000 e 5000) quanto ligas termicamente tratáveis (por exemplo, série AA 2000, 6000 e 7000). No caso de ligas termicamente tratáveis lingotadas de uma maneira conhecida, Uchida et al. preceituam na PCT/JP02/02900 que uma etapa de homogeneização seguida por uma têmpera a uma temperatura abaixo de 300 °C, preferivelmente até a temperatura ambiente, antes do aquecimento e laminação a quente, e subsequente tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, apresenta propriedades superiores (resistência ao risco, melhores valores da peça em bruto formada e propriedades de dureza) comparados com materiais processados convencionalmente. Inesperadamente, esta característica pode ser duplicada nas modalidades exemplares durante o procedimento de lingotamento, se desejado, submetendo o lingote (isto é, a parte do lingote que acabou de sofrer homogeneização *in situ*) a uma etapa de têmpera depois de ter transcorrido um período de tempo suficiente (por exemplo, pelo menos 10 a 15 minutos) após remoção de líquido refrigerante para permitir homogeneização da liga, mas antes do resfriamento do lingote substancial adicional.

Esta têmpera final (têmpera *in situ*) está ilustrada na figura 3 dos desenhos anexos onde é realizada uma operação de lingotamento RD (essencialmente a mesma da figura 1), mas o lingote é mergulhado em uma poça 34 de água (referida como uma poça de imersão ou água de imersão) a uma distância Y adequada abaixo do ponto no qual o refrigerante é removido do lingote. A distância Y, conforme declarado, tem que ser suficiente para permitir que se dê a homogeneização *in situ* desejada por um período de tempo efetivo, mas insuficiente para permitir resfriamento substancial adicional. Por exemplo, a temperatura da superfície externa do lingote logo antes da imersão na poça 34 deve ser preferivelmente acima de 425 °C, e

desejavelmente na faixa de 450 a 500 °C. A imersão então causa uma têmpera rápida em água, da temperatura do lingote a uma temperatura (por exemplo, 350 °C) abaixo da qual transformações da estrutura sólida não ocorrem a uma taxa apreciável. Depois disto, o lingote pode ser cortado para formar um

5 comprimento padrão usado para laminação ou processamento posterior.

Incidentalmente, para permitir que um lingote seja temperado em água por todo seu comprimento, o poço de lingotamento (o poço no qual o lingote desce à medida que ele emerge do molde) deve ser mais profundo que o comprimento do lingote, para que, quando não for adicionado mais metal

10 líquido no molde, o lingote possa continuar descer no poço, e na poça 34 até que ele seja completamente submerso.

Alternativamente, o lingote pode ser parcialmente submerso até uma profundidade máxima da poça 34, e em seguida mais água pode ser introduzida no poço de lingotamento para elevar o nível da superfície da poça

15 até que o lingote fique completamente submerso.

Deve-se notar que as modalidades exemplares não estão limitadas ao lingotamento de lingotes cilíndricos, e ela pode ser aplicada a lingotes de outras formas, por exemplo, lingotes retangulares ou aqueles formados por um molde de lingotamento RC revelado na figura 9 ou figura 10

20 da patente U.S. No. 6.546.995, concedida em 15 de abril de 2003 a Wagstaff (a revelação desta patente está aqui incorporada pela referência). A figura 10 da patente é duplicada no presente pedido da figura 4, que é uma vista plana de topo olhando para dentro do molde de lingotamento. Percebe-se que o molde é aproximadamente em forma de "J" e ele é destinado a produzir um

25 lingote com uma forma na seção transversal correspondente. Um lingote embriônico produzido a partir de um molde como esse teria um núcleo líquido que é espaçado da superfície externa por diferentes distâncias em pontos em torno da circunferência do lingote, e assim, dado igual terminação de resfriamento em torno da circunferência do lingote (distância X), diferentes

quantidades de superaquecimento e de calor latente de solidificação seriam distribuídas a diferentes partes da pele sólida do lingote.

De fato, é desejável submeter todas as partes da pele sólida em torno da periferia à mesma temperatura de convergência. Na patente U.S. 6.546.995, características de lingotamento iguais em torno do molde são garantidas ajustando-se a geometria das superfícies de lingotamento do molde de maneira a adequar-se à forma do lingote fundido. Nas modalidades exemplares, é possível garantir que cada parte da pele sólida do lingote embriônico (após o término do resfriamento) é submetida à mesma entrada de calor no núcleo líquido e a mesma temperatura de convergência dividindo a circunferência do lingote em segmentos nocionais de acordo com a forma do lingote, e a remoção de fluido refrigerante em diferentes distâncias da saída do molde em diferentes segmentos. Alguns segmentos (os que serão submetidos a maiores entradas de calor a partir do núcleo) serão expostos ao fluido de resfriamento por um maior período de tempo do que outros segmentos (aqueles que terão menos exposição ao calor). Alguns segmentos da pele sólida portanto terão uma menor temperatura que outros depois que o fluido de resfriamento é removido, e esta menor temperatura compensará uma maior entrada de calor nesses segmentos a partir do núcleo para que as temperaturas de convergências equalizem em torno da circunferência do lingote.

Um procedimento como esse pode ser conseguido, por exemplo, projetando-se um removedor mecânico (a) de forma a se encaixar confortavelmente em torno do lingote modelado, e (b) tendo diferentes planos ou um contorno modelado na extremidade do removedor mecânico voltada para o molde, os diferentes planos ou seções do contorno tendo um espaçamento diferente da saída do molde. A figura 5 é um gráfico mostrando variações na distância X em torno da periferia do molde da figura 4 projetado para produzir temperaturas de convergências uniformes em torno do lingote

(o gráfico começa no ponto S na figura 4 e continua no sentido horário). Um removedor mecânico com uma forma periférica correspondente é então usado para causar uma equalização desejada de temperatura de convergência em torno da periferia do lingote.

5 A figura 6 ilustra um removedor mecânico 20' que seria efetivo para lingotamento de um lingote com uma forma similar à da figura 4. Percebe-se que o removedor mecânico 20' tem uma forma complexa com partes que são elevadas em relação a outras partes, garantindo-se assim que o líquido de resfriamento é removido da superfície externa do lingote emergente
10 em posições projetadas para equalizar a temperatura de convergência em torno do lingote em posições abaixo do removedor mecânico 20'.

Os pontos nos quais o refrigerante é removido dos vários segmentos, e a largura dos segmentos propriamente ditos, podem ser decididos por modelagem por computador do fluxo térmico no interior do
15 lingote fundido, ou por simples teste e experimentação para cada lingote de forma diferente. Novamente, a meta é atingir temperaturas de convergência iguais ou bastante similares em torno da periferia da pele sólida do lingote.

Conforme já discutido detalhadamente, as modalidades exemplares, pelo menos nas suas formas preferidas, fornecem um lingote com
20 uma estrutura microcristalina que parece ou é idêntica à do mesmo metal lingotado de uma maneira convencional (sem remoção de líquido refrigerante) e posteriormente submetido a homogeneização convencional. Portanto, os lingotes das modalidades exemplares podem ser laminados ou trabalhados a quente sem lançar mão de um tratamento de homogeneização
25 adicional. Normalmente, os lingotes são primeiramente laminados a quente, e isto exige que eles sejam pré-aquecidos a uma temperatura adequada, por exemplo, normalmente pelo menos 500 °C, e mais preferivelmente pelo menos 520 °C. Depois da laminação a quente, as chapas finas resultantes de bitola intermediária são então normalmente laminadas a frio na bitola final.

Como um aspecto adicional das modalidades exemplares, observou-se que pelo menos alguns metais e ligas se beneficiam de um procedimento de pré-aquecimento de dois estágios opcional particular depois da formação do lingote e antes da laminação a quente. Tais lingotes podem

5 idealmente ser produzidos pelo processo de "homogeneização *in situ*" supradescrito, mas podem alternativamente ser produzidos por procedimentos de lingotamento convencionais, caso este em que melhorias vantajosas são ainda obtidas. Este procedimento de pré-aquecimento de dois estágios é particularmente adequado para ligas que devem ter características de

10 "estampagem profunda", por exemplo, ligas de alumínio contendo Mn e Cu (por exemplo, liga de alumínio AA3003 com 1,5% em peso Mn e 0,6% em peso Cu). Essas ligas baseiam-se no endurecimento por precipitação ou dispersão. No procedimento de pré-aquecimento de dois estágios, lingotes RC lingotados são normalmente escafados e em seguida colocados em um forno

15 de pré-aquecimento para um processo de aquecimento de dois estágios envolvendo: (1) aquecer lentamente a uma temperatura de nucleação intermediária abaixo de uma temperatura de laminação a quente convencional para a liga em questão, e (2) continuar aquecer o lingote lentamente a uma temperatura de pré-aquecimento normal de laminação a quente, ou uma

20 temperatura inferior, e manter a liga nessa temperatura por várias horas. A temperatura intermediária permite a nucleação do metal e a ré-absorção ou destruição de núcleos instáveis e sua substituição por núcleos estáveis que formam centros para um crescimento de precipitados mais robustos. O tempo de encharque na temperatura mais alta dá tempo para o crescimento de

25 precipitados a partir dos núcleos estáveis antes de iniciar a laminação.

O estágio (1) do processo de aquecimento pode envolver manter a temperatura na temperatura de nucleação (a temperatura mais baixa na qual inicia-se a nucleação) ou, mais desejavelmente, envolve aumentar gradualmente a temperatura para a temperatura mais alta do estágio (2). A

temperatura durante este estágio pode ser de 380-450 °C, mais preferivelmente 400-420 °C, e a temperatura pode ser mantida ou elevada lentamente nesta faixa. A velocidade de aumento de temperatura preferivelmente deve ser abaixo de 25 °C/hora, e mais preferivelmente abaixo de 20 °C/hora, e em geral estende-se por um período de 2 a 4 horas. A velocidade de aquecimento até a temperatura de nucleação pode ser mais alta, por exemplo, uma média de cerca de 50 °C/hora (embora a velocidade na primeira meia hora, ou em torno disso, possa ser maior, por exemplo, 100-120 °C/hora, e em seguida reduzir à medida que se aproxima da temperatura de nucleação).

Depois do estágio (1), a temperatura do lingote é aumentada ainda mais (se necessário) tanto até a temperatura de laminação a quente quanto a uma temperatura mais baixa na qual pode ocorrer crescimento do precipitado, normalmente na faixa de 480-550 °C, ou mais preferivelmente 500-520 °C. A temperatura é então mantida constante ou lentamente elevada ainda mais (por exemplo, até a temperatura de laminação a quente) for um período de tempo que preferivelmente não é menor que 10 horas e não mais que 24 horas no total para todo o processo de aquecimento de dois estágios.

Embora o aquecimento do lingote diretamente até a temperatura de pré-aquecimento de laminação (por exemplo, 520 °C) torne a população de cristais secundários ou precipitados alta, os precipitados resultantes são em geral de pequeno tamanho. O pré-aquecimento na temperatura intermediária leva à nucleação e, então, o aquecimento continuado até a temperatura de pré-aquecimento de laminação (por exemplo, 520 °C) leva ao crescimento do tamanho dos precipitados secundários, por exemplo, à medida que mais Mn e Cu entram em solução e os precipitados continuam crescer.

Depois do aquecimento até a temperatura de laminação a quente, laminação a quente convencional é normalmente realizada sem atraso.

O processo aqui descrito envolvendo homogeneização *in situ* pode também ser usado para fundir lingotes compósitos descritos no pedido de patente U.S. número de série 10/875.978 depositado em 23 de junho de 2004, e publicado em 20 de janeiro de 2005 como U.S. 2005-0011630, e
5 também descrito na patente U.S. 6.705.384 concedida em 16 de março de 2004, cujas revelações completas estão aqui incorporadas por meio desta referência.

A invenção está descrita com mais detalhes nos exemplos seguintes e Exemplos comparativos, que são providos apenas com propósitos
10 ilustrativos, e que não devem ser considerados limitantes.

EXEMPLO 1

Três lingotes obtidos por lingotamento com resfriamento direto foram produzidos por lingotamento em uma Placa para Laminação com resfriamento Direto de 530 mm e 1.500 mm com um comprimento final maior
15 que 3 metros. Os lingotes tiveram composições idênticas de Al 1,5% Mn; 6% Cu de acordo com patente U.S. No. 6.019.939 (cuja revelação está aqui incorporada pela referência). Um primeiro lingote foi produzido por lingotamento RC de acordo com um convencional procedimento, um segundo foi produzido por lingotamento RC com homogeneização *in situ* de acordo
20 com o procedimento mostrado nas figuras 7 e 8, onde o refrigerante é removido e o lingote é resfriado naturalmente até a temperatura ambiente depois de ser removido do poço de lingotamento, e o terceiro foi lingotado RC com homogeneização de têmpera *in situ* de acordo com o procedimento da figura 9, onde o refrigerante é removido da superfície do lingote e o lingote
25 é ré-aquecido naturalmente e em seguida temperado em um poço de água aproximadamente um metro abaixo do molde.

Com mais detalhes, a figura 7 mostra a temperatura superficial e a temperatura do centro (núcleo) com o tempo de uma liga Al-Mn-Cu à medida que ela é produzida por lingotamento RC e em seguida submetida a

resfriamento com água e remoção do refrigerante. O gráfico da temperatura superficial mostra um declive profundo na temperatura imediatamente depois do lingotamento à medida que o lingote entra em contato com o refrigerante, mas a temperatura no centro continua pouco alterada. A temperatura superficial cai até cerca de 255°C logo antes da remoção de refrigerante. A temperatura superficial em seguida sobe e converge com a temperatura central em uma temperatura de convergência ou temperatura recuperada de 576 °C. Depois da convergência (quando o lingote está completamente sólido) a temperatura cai lentamente e é consistente com resfriamento ao ar.

10 A figura 8 mostra a mesma operação de lingotamento que a figura 7, mas estendendo-se por um período de tempo maior e mostrando em particular o período de resfriamento após convergência ou recuperação da temperatura. Pode-se observar daí que a temperatura do lingote solidificado permanece acima de 425°C por mais de 1,5 horas, que é ampla para atingir um a homogeneização *in situ* desejada do lingote.

A figura 9 é similar à figura 7, mas mostrando medições de temperatura do mesmo lingotamento realizadas em três tempos ligeiramente diferentes (diferentes comprimentos de lingotes mostrados na figura). As linhas cheias mostram as temperaturas superficiais dos três gráficos, e as linhas pontilhadas mostram as temperaturas no centro da espessura do lingote. Os tempos para que as temperaturas superficiais permaneçam acima de 400°C e 500°C podem ser determinados a partir de cada gráfico e são maiores que 15 minutos em cada caso. As temperaturas recuperadas de 563, 581 e 604°C estão mostradas para cada caso.

25 Amostras desses lingotes foram então laminadas tanto com um pré-aquecimento convencional até uma temperatura de laminação a quente, ou com vários pré-aquecimentos, para demonstrar a natureza das modalidades exemplares.

Os procedimentos de lingotamento foram realizados sob

condições de resfriamento típicos da indústria, por exemplo, 60 mm/min, 1,5 litros/min/ cm, temperatura do metal 705 °C.

Cada lingote foi seccionado ao longo do centro (seção média) produzindo duas porções de cada lingote de largura 250 mm, em seguida, mantendo ainda o histórico térmico no centro e na superfície, cada placa de 250 mm foi seccionada em múltiplos lingotes de laminação, 75 mm de espessura, 250 mm de largura (na metade da espessura original) e 150 mm de comprimento (na direção de lingotamento).

Os lingotes de laminação foram então tratados das seguintes maneiras.

Amostra A (Lingotada com Resfriamento Direto com histórico térmico convencional e homogeneização convencional modificada) foi colocada em um forno a 615 °C, onde depois de aproximadamente duas horas e meia (2,5) a temperatura do metal estabilizou e foi mantida por mais 8 horas a 615 °C. A amostra foi recebida em um forno de têmpera por três horas a 480°C e foi em seguida encharcada a 480°C por 15 horas, em seguida removida e laminada a quente em uma espessura de 6 mm. Uma porção desta bitola de 6 mm foi em seguida laminada a frio em uma espessura de 1 mm, aquecida até uma temperatura de recozimento de 400°C a uma velocidade de 50 °C/hora, e mantida por duas horas, e em seguida resfriada no forno.

Micrografias eletrônicas de transmissão mostrando a distribuição de precipitados secundários foram caracterizadas em seções longitudinais retiradas até cerca de uma polegada (25,4 milímetros) de qualquer borda (superfície e centro) do material de 6 mm (figura 10a). Estruturas de grãos recristalizados foram caracterizadas em seções longitudinais retiradas até cerca de uma polegada (25,4 milímetros) de qualquer borda (superfícies e centro) do material de 1 mm de espessura (figura 10b). esta amostra representa lingotamento e homogeneização convencionais, exceto que a etapa de homogeneização foi abreviada para um

total de 26 horas, ao passo que homogeneização convencional normal é realizada por 48 horas.

Amostra B (Lingotada com Resfriamento Direto com um histórico térmico de lingotamento convencional e com pré-aquecimento de dois estágios modificado) foi colocada em um forno a 440 °C, onde depois de aproximadamente duas (2) horas a temperatura do metal estabilizou e foi mantida por mais 2 horas a 440 °C. As temperaturas do forno foram aumentadas para permitir que o metal aquecesse a 520°C por duas (2) horas e a amostra foi mantida por 20 horas, em seguida removida e laminada a quente em uma espessura de 6 mm. Uma porção desta bitola de 6 mm foi em seguida laminada a frio em uma espessura de 1 mm, aquecida até uma temperatura de recozimento de 400°C a uma velocidade de 50 °C/hora, e mantida por duas horas, e em seguida resfriada no forno.

Micrografias eletrônicas de transmissão mostrando a distribuição de precipitados secundários foram caracterizadas em seções longitudinais retiradas até cerca de uma polegada (25,4 milímetros) de qualquer borda (superfície e centro) do material de 6 mm de espessura (figura 11a). Estruturas de grãos recristalizados foram caracterizadas em seções longitudinais retiradas até cerca de uma polegada (25,4 milímetros) de qualquer borda (superfícies e centro) do material de 1 mm de espessura (figura 11b).

Amostra C (Lingotada com Resfriamento Direto com histórico térmico de lingotamento e homogeneização *in situ* (de acordo com as figuras 7 e 8) e com pré-aquecimento de dois estágios modificado) foi colocada em um forno a 440 °C, onde depois de aproximadamente duas (2) horas a temperatura do metal estabilizou e foi mantida por mais 2 horas a 440 °C. As temperaturas do forno foram aumentadas para permitir que o metal aquecesse a 520°C por duas (2) horas e a amostra foi mantida por 20 horas, em seguida removida e laminada a quente em uma espessura de 6 mm. Uma

porção desta bitola de 6 mm foi em seguida laminada a frio em uma espessura de 1 mm, aquecida até uma temperatura de recozimento de 400°C a uma velocidade de 50 °C/hora, e mantida por duas horas, e em seguida resfriada no forno.

5 Micrografias eletrônicas de transmissão mostrando a distribuição de precipitados secundários foram caracterizadas em seções longitudinais retiradas até cerca de uma polegada (25,4 milímetros) de qualquer borda (superfície e centro) do material de 6 mm de espessura (figura 12a). Estruturas de grãos recristalizados foram caracterizadas em seções
10 longitudinais retiradas até cerca de uma polegada (25,4 milímetros) de qualquer borda (superfícies e centro) do material de 1 mm de espessura (figura 12b).

Amostra D (Lingotamento com Resfriamento Direto com homogeneização *in situ* e têmpera rápida (Figura 9) com um pré-aquecimento
15 de dois estágios) foi colocada em um forno 440 °C, onde depois de duas (2) horas a temperatura do metal estabilizou e foi mantida por mais 2 horas a 440 °C. As temperaturas do forno foram aumentadas para permitir que o metal aquecesse a 520°C por duas (2) horas e foi mantida 20 horas, em seguida removida e laminada a quente em uma espessura de 6 mm. Uma porção desta
20 bitola de 6 mm foi em seguida laminada a frio a uma espessura de 1 mm, aquecida até uma temperatura de recozimento de 400°C a uma velocidade de 50 °C/hora, e mantida por duas horas, e em seguida resfriada no forno.

 Micrografias eletrônicas de transmissão mostrando a distribuição de precipitados secundários foram caracterizadas em seções
25 longitudinais tomadas até cerca de 25 mm de qualquer borda (superfície e centro) do material de 6 mm de espessura (figura 13a). Estruturas de grãos recristalizados foram caracterizadas em seções longitudinais tomadas até cerca de 25 mm de qualquer borda (superfícies e centro) do material de 1 mm de espessura (figura 13b).

Amostra F (Lingotada com Resfriamento Direto com histórico térmico convencional e homogeneização convencional modificada) foi colocada em um forno a 615 °C, onde aproximadamente depois duas horas e meia (2,5) a temperatura do metal estabilizou e foi mantida por mais 8 horas a 615 °C. A amostra foi recebida em um forno de têmpera por três horas a 480°C e foi em seguida encharcada a 480°C por 38 horas, em seguida removida e laminada a quente em uma espessura de 6 mm. Uma porção desta bitola de 6 mm foi em seguida laminada a frio em uma espessura de 1 mm, aquecida até uma temperatura de recozimento de 400°C a uma velocidade de 50 °C/hora, e mantida por duas horas, e em seguida resfriada no forno.

Micrografias eletrônicas de transmissão mostrando a distribuição de precipitados secundários foram caracterizadas em seções longitudinais retiradas até cerca de uma polegada (25,4 milímetros) de qualquer borda (superfície e centro) do material de 6 mm (figura 14a). Estruturas de grãos recristalizados foram caracterizadas em seções longitudinais tomadas até cerca de 25 mm de qualquer borda (superfícies e centro) do material de 1 mm de espessura (figura 14b). Esta amostra representa lingotamento e homogeneização convencionais, ao passo que homogeneização convencional normal é realizada por 48 horas.

Amostra G (Lingotada com Resfriamento Direto com um pré-aquecimento de um único estágio modificado) foi colocada em um forno a 520 °C, onde depois de aproximadamente duas (2) horas a temperatura do metal estabilizou e foi mantida por 20 horas a 520 °C, em seguida removida e laminada a quente em uma espessura de 6 mm. Uma porção desta bitola de 6 mm foi em seguida laminada a frio em uma espessura de 1 mm, aquecida até uma temperatura de recozimento de 400°C a uma velocidade de 50 °C/hora, e mantida por duas horas, e em seguida resfriada no forno.

Micrografias eletrônicas de transmissão mostrando a distribuição de precipitados secundários foram caracterizadas em seções

longitudinais retiradas até cerca de uma polegada (25,4 milímetros) de qualquer borda (superfície e centro) do material de 6 mm de espessura (figura 15a). Estruturas de grãos recristalizados foram caracterizadas em seções longitudinais tomadas até cerca de 25 mm de qualquer borda (superfícies e

5 centro) do material de 1 mm de espessura (figura 15b).

EXEMPLO COMPARATIVO 1

A fim de ilustrar a diferença das modalidades exemplares de procedimentos de lingotamento conhecidos, lingotes de uma liga Al-4,5% em peso de Cu foram produzidos de acordo com lingotamento RD convencional,

10 de acordo com o procedimento de patente U.S. 2.705.353 de Ziegler ou patente U.S. 4.237.961 de Zinniger, e de acordo com as modalidades exemplares. O lingotamento de Ziegler/Zinniger empregou um removedor mecânico posicionado para gerar uma temperatura recuperada/de convergência de apenas 300 °C. O processo de lingotamento das modalidades

15 exemplares empregou um removedor mecânico posicionado para gerar uma temperatura recuperada de 453 °C. Micrografias eletrônicas de varredura dos três produtos resultantes foram produzidas e estão mostradas nas figuras 16, 17 e 18, respectivamente. A figura 19 mostra as temperaturas do núcleo e superfície do procedimento de lingotamento realizado de acordo com as

20 modalidades exemplares sem uma têmpera (ver figura 18).

As MEVs mostram como a concentração de cobre varia através da célula no produto dos procedimentos de lingotamento realizados não de acordo com as modalidades exemplares (figuras 16 e 17 – note a curva para cima dos gráficos entre os picos). No caso do produto das modalidades

25 exemplares, entretanto, a MEV mostra muito menos variação do teor de Cu na célula (figura 18). Isto é típico de uma microestrutura de um metal que foi submetido a homogeneização convencional.

EXEMPLO 2

Um lingote Al – 4,5% Cu foi fundido de acordo com a

invenção e o lingote foi resfriado (temperado) no final do lingotamento. A figura 20 é uma MEV com Varredura Linear de Cobre (Cu) do lingote resultante. A ausência de qualquer diferença estrutural no núcleo de Cobre na célula unitária é de se notar. Embora as células sejam ligeiramente maiores do que aquelas da figura 16, existe uma quantidade reduzida de partículas intermetálicas fundidas, e a interseção das células unitárias e as partículas são arredondadas.

A figura 21 mostra o histórico térmico do lingotamento do lingote ilustrando a têmpera final no final do lingotamento. A temperatura de convergência (452 °C) neste caso é abaixo da solvus para a composição escolhida, mas propriedades desejáveis são obtidas.

EXEMPLO COMPARATIVO 2

A figura 22 mostra frações de áreas representativas de fases intermetálicas fundidas comparando os três diferentes caminhos de processamento supraindicados (lingotamento RD convencional e resfriamento (rotulado RC), lingotamento RD e resfriamento sem têmpera final de acordo com modalidades exemplares (rotulado amostra ID *in situ*), e lingotamento RD com têmpera final de acordo com modalidades exemplares (rotulado Têmpera *in situ*). Uma menor área é considerada melhor para propriedades mecânicas da liga resultante. Esta comparação mostra uma menor fração de fase intermetálica fundida de acordo com os diferentes métodos na dada ordem. A mais alta área de fase é produzida por um caminho RC convencional e o menor pela invenção com têmpera final.

EXEMPLO 3

Um lingote de uma liga Al - 0,5% Mg - 0,45% Si (6063) foi fundida de acordo com um processo ilustrado no gráfico da figura 23. Isto mostra o histórico térmico na região onde ocorrem solidificação e ré-aquecimento em um caso onde a massa do lingote não é resfriada forçadamente.

A mesma liga foi lingotada nas condições mostradas na figura 24 (incluindo uma têmpera). Isto mostra a evolução de temperatura de um lingote onde as temperaturas da superfície e do núcleo convergiram para uma temperatura de 570 °C, e que é em seguida resfriada forçadamente até a temperatura ambiente. Isto pode ser comparado com o procedimento mostrado na figura 8 que envolveu uma alta temperatura recuperada e resfriamento lento, que é desejável quando uma correção mais rápida da segregação celular é necessária, ou quando a liga contém elementos que difundem a baixa velocidade. O uso de uma alta temperatura recuperada (consideravelmente acima da solvus da liga), mantido por um período de tempo prolongado, permite que elementos perto dos contornos grão difundam bastante rapidamente para as fases intermetálicas fundidas, permitindo assim modificação ou uma transformação mais completa para fase intermetálicas mais usadas ou benéficas, e a formação de uma zona sem precipitados em torno das fases intermetálicas fundidas. Nota-se que a figura 24 mostra curva de resfriamento em forma de "W" para as características de pele sólida de ebulição pelicular nucleada antes do removedor mecânico.

EXEMPLO COMPARATIVO 3

As figuras 25a, 25b e 25c são padrões de difração de raios-X feitos da liga 6063 diferenciando a quantidade das fases β que contrastam com lingotamento RD convencional e os dois procedimentos *in situ* das figuras 18 e 19. O traço superior de cada figura representa uma liga produzida por lingotamento RC convencional, o traço intermediário representa uma temperatura recuperada abaixo da temperatura de transformação da liga, e o traço inferior representa uma temperatura recuperada acima da temperatura de transformação da liga.

EXEMPLO COMPARATIVO 4

As figuras 26a, 26b e 26c são representações gráficas de técnicas FDC nas quais a figura 26a representa lingote fundido RC

convencional, a figura 26b representa a liga da figura 23 e a figura 26c representa a liga da figura 24. As figuras mostram um aumento na presença de fase α desejável à medida que a temperatura recuperada ultrapassa a temperatura de transformação.

- 5 Incidentalmente, mais informação a respeito tanto de técnica FDC quanto SiBut/XRD, bem como sua aplicação ao estudo de transformações de fase, pode ser obtida de: "Intermetallic Phase Selection and Transformation in Aluminium 3xxx Alloys", por H.Cama, J.Worth, P.V. Evans, A. Bosland e J.M.Brown, Solidification Processing, Proceedings of the
10 4th Decennial International Conference on Solidification Processing, University de Sheffield, July 1997, eds J. Beech e H.Jones, p.555 (cuja revelação está aqui incorporada pela referência).

EXEMPLO 4

- As figuras 27a e 27b mostram duas fotomicrografias óticas de
15 uma liga Al - 1,3% Mn (AA3003) intermetálica fundida processada de acordo com a invenção. Pode-se perceber que os compostos intermetálicos (formas escuras na figura) estão trincados ou fraturados.

- A figura 28 é uma fotomicrografia ótica similar às das figuras 27a e 27b novamente mostrando que o composto intermetálico está trincado
20 ou fraturado. A região grande da partícula é de $MnAl_6$. As características com nervuras mostram difusão de Si para o composto intermetálico, formando $AlMnSi$.

EXEMPLO 5

- A figura 29 é uma imagem de Microscópio Eletrônico de
25 Transmissão TEM de uma fase intermetálica fundida de uma liga AA3104 lingotada sem uma têmpera final, mostrada na figura 31. A fase intermetálica é modificada por difusão de Si na partícula, mostrando uma zona descoberta. A amostra foi retirada da superfície onde a aplicação inicial de refrigerante nucleia partículas. Entretanto, a temperatura recuperada modifica a partícula e

modifica a estrutura.

EXEMPLO COMPARATIVO 5

A figura 30 mostra o histórico térmico da liga Al - 7% Mg processada convencionalmente. Pode-se ver que não há recuperação da temperatura por causa da presença continuada de refrigerante.

As figuras 31 e 32 mostram o histórico térmico de uma liga Al - 7% Mg onde o lingote não é resfriado durante o lingotamento. Esta liga forma a base da figura 30.

EXEMPLO COMPARATIVO 6

A figura 33 é um traço de um Calorímetro de Varredura Diferencial (DSC) mostrando a presença de fase Beta (β) na faixa de 450°C das ligas convencionalmente lingotadas com Resfriamento Direto que forma a base da figura 30. A fase β causa problemas durante a laminação. A presença da fase beta pode ser vista pelo pequeno declive no traço logo acima de 450°C à medida que calor é absorvido para converter a fase β em fase α . O grande declive para 620°C representa a fusão da liga.

A figura 34 é um traço similar ao da figura 33 mostrando a ausência de fase Beta (β) no material fundido de acordo com esta invenção onde o lingote permanece quente (sem têmpera final) durante o lingotamento (ver a figura 31).

A figura 35 é novamente um traço similar ao da figura 33 para o material fundido de acordo com esta invenção, onde o lingote permanece quente (sem têmpera final) durante o lingotamento (ver figura 32). Novamente, o traço mostra a ausência de fase Beta (β).

REIVINDICAÇÕES

1. Método de lingotar um metal, compreendendo as etapas de:

- (a) suprir metal líquido de pelo menos uma fonte a uma região onde o metal líquido é perifericamente confinado, provendo assim o metal líquido com uma porção periférica; (b) resfriar a porção periférica do metal, formando assim um lingote embriônico com uma pele sólida externa e um núcleo líquido interno; (c) avançar o lingote embriônico em uma direção de avanço para fora da região onde o metal líquido é perifericamente confinado suprindo ao mesmo tempo metal líquido adicional na dita região, estendendo assim o núcleo líquido contido dentro da pele sólida além da dita região; e (d) resfriar a superfície externa do lingote embriônico que emerge da região onde o metal é perifericamente confinado, direcionando-se um suprimento de líquido refrigerante sobre a dita superfície externa; caracterizado pelo fato de que uma quantidade efetiva do líquido refrigerante é removida da superfície externa do lingote embriônico em um local na superfície externa do lingote onde uma seção transversal do lingote perpendicular à direção de avanço intercepta uma porção do dito núcleo líquido de maneira tal que calor interno do núcleo líquido reaqueça a pele sólida adjacente ao núcleo líquido depois da remoção da dita quantidade efetiva de refrigerante, fazendo assim com que as temperaturas dos ditos núcleo e pele sólida se aproximem cada qual de uma temperatura de convergência de 425°C ou mais.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o dito metal líquido na etapa (a) é suprido a pelo menos uma entrada de um molde de lingotamento de resfriamento direto, o dito molde de lingotamento de resfriamento direto definindo assim a dita região onde o metal líquido é perifericamente confinado, e o dito lingote embriônico avança na etapa (c) de pelo menos uma saída do dito molde de lingotamento de resfriamento direto, com o dito local na dita superfície externa do dito lingote onde a dita quantidade efetiva de líquido refrigerante é removida na etapa (e)

sendo espaçada por uma distância da dita pelo menos uma saída do molde.

3. Método, de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que o dito metal líquido é suprido de duas ou mais fontes, metal líquido de cada fonte sendo suprido a uma entrada diferente do dito molde.

5 4. Método, de acordo com a reivindicação 2 ou reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que a dita distância é feita de maneira tal que a dita temperatura de convergência atinja 450°C ou mais.

5. Método, de acordo com a reivindicação 2 ou reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que a dita distância é na faixa de 2 a 6 polegadas
10 (50,8 a 152,4 milímetros).

6. Método, de acordo com a reivindicação 2 ou reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que a dita distância é na faixa de 2 a 4 polegadas (50,8 a 101,6 milímetros).

7. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a
15 6, caracterizado pelo fato de que a dita temperatura da superfície externa do lingote embriônico é reduzida a menos de 350°C antes de a dita quantidade efetiva do dito líquido refrigerante ser removida.

8. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a
20 7, caracterizado pelo fato de que o dito local na dita superfície externa do dito lingote é escolhido para fazer com que as temperaturas do núcleo e da pele permaneçam na dita temperatura de convergência acima de 425°C por um período de tempo efetivo para fazer com que ocorra homogeneização pelo menos parcial do metal.

9. Método, de acordo com a reivindicação 8, caracterizado
25 pelo fato de que o dito período de tempo é efetivo para ocorrer a completa homogeneização do metal.

10. Método, de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que o dito período de tempo é pelo menos 10 minutos.

11. Método, de acordo com a reivindicação 8, caracterizado

pelo fato de que o dito período de tempo é pelo menos 15 minutos.

12. Método, de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que o dito período de tempo é pelo menos 20 minutos.

13. Método, de acordo com a reivindicação 8, caracterizado
5 pelo fato de que o dito período de tempo é pelo menos 30 minutos.

14. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 8 a 13, caracterizado pelo fato de que, após o dito período de tempo ou mais, o dito lingote é temperado pelo contato com líquido refrigerante adicional.

15. Método, de acordo com a reivindicação 14, caracterizado
10 pelo fato de que o dito lingote fica a uma temperatura de 425°C ou mais quando em contato com o dito líquido refrigerante adicional.

16. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 15, caracterizado pelo fato de que o líquido refrigerante compreende água.

17. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1
15 a 16, caracterizado pelo fato de que o líquido refrigerante é removido da superfície do lingote embriônico pela limpeza mecânica da água do dito líquido refrigerante do dito lingote embriônico no dito local.

18. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 16, caracterizado pelo fato de que o líquido refrigerante é removido da
20 superfície do lingote embriônico no dito local controlando-se a taxa de suprimento do líquido refrigerante à superfície externa do lingote, fazendo assim com que o líquido refrigerante evapore completamente do lingote embriônico no dito local.

19. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1
25 a 16, caracterizado pelo fato de que o líquido refrigerante é removido da superfície do lingote embriônico no dito local por ebulição pelicular nucleada.

20. Método, de acordo com a reivindicação 19, caracterizado pelo fato de que um gás é adicionado ao dito líquido refrigerante intensificar a dita ebulição pelicular nucleada.

21. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 16, caracterizado pelo fato de que o líquido refrigerante é removido da superfície do lingote embriônico direcionando-se um jato de um gás contra o líquido refrigerante no dito local.

5 22. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 21, caracterizado pelo fato de que o metal suprido à dita região é pelo menos uma alumínio de liga.

23. Método, de acordo com a reivindicação 22, caracterizado pelo fato de que a dita pelo menos uma liga de alumínio é uma liga de
10 alumínio não tratável termicamente.

24. Método, de acordo com a reivindicação 22, caracterizado pelo fato de que a dita pelo menos uma alumínio liga é uma liga de alumínio termicamente tratável.

25. Método, de acordo com a reivindicação 23, caracterizado pelo fato de que a liga de alumínio é uma liga selecionada do grupo que
15 consiste em ligas da série AA1000, ligas da série AA3000, ligas da série AA4000, ligas da série AA5000.

26. Método, de acordo com a reivindicação 24, caracterizado pelo fato de que a liga de alumínio é uma liga selecionada do grupo que
20 consiste em ligas da série AA2000, ligas da série AA6000 e ligas da série AA7000.

27. Método, de acordo com a reivindicação 22, caracterizado pelo fato de que a liga de alumínio é uma liga da série AA8000.

28. Método, de acordo com a reivindicação 22, caracterizado pelo fato de que a liga de alumínio é selecionada do grupo que consiste em
25 AA3003, AA3104 e AA3004.

29. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 28, caracterizado pelo fato de que, após da dita remoção de líquido refrigerante, o lingote embriônico é resfriado ou deixado resfriar naturalmente

para formar um lingote fundido completamente solidificado.

30. Método, de acordo com a reivindicação 29 caracterizado pelo fato de que o lingote fundido completamente solidificado é produzido em uma forma adaptada para laminação subsequente.

5 31. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 2 a 31, caracterizado pelo fato de que a superfície externa do lingote embriônico é feita não circular em seção transversal pelo dito molde de lingotamento, e a dita distância da dita pelo menos uma saída é feita de forma a variar em diferentes pontos em torno da dita superfície externa para criar temperaturas
10 de convergência iguais em torno da dita superfície externa do dito lingote.

32. Método, de acordo com a reivindicação 31, caracterizado pelo fato de que variações da dita distância em torno da dita superfície externa são feitas proporcionais ao calor latente disponível no núcleo líquido adjacente aos ditos pontos.

15 33. Método de lingotar um metal, caracterizado pelo fato de que compreende as etapas de:

(a) suprir metal líquido de pelo menos uma fonte a uma região onde o metal líquido é perifericamente confinado, provendo assim o metal líquido com uma porção periférica;

20 (b) resfriar a porção periférica do metal, formando assim um lingote embriônico com uma pele sólida externa e um núcleo líquido interno;

(c) avançar o lingote embriônico em uma direção de avanço para fora da região onde o metal líquido é perifericamente confinado suprimindo ao mesmo tempo metal líquido adicional à dita região, estendendo assim o
25 núcleo líquido contido dentro da pele sólida além da dita região;

(d) resfriar a superfície externa do lingote embriônico que emerge da região onde o metal é perifericamente confinado, direcionando-se um suprimento de líquido refrigerante para a dita superfície externa; e

(e) remover uma quantidade efetiva do líquido refrigerante da

superfície externa do lingote embriônico em um local na superfície externa do lingote onde uma seção transversal do lingote perpendicular à direção de avanço intercepta uma porção do dito núcleo líquido de maneira tal que calor interno do núcleo líquido reaqueça a pele sólida adjacente ao núcleo líquido depois da remoção da dita quantidade efetiva de refrigerante, fazendo assim com que temperatura da dita superfície externa da dita pele sólida aumente até um máximo esta temperatura recuperada antes de declinar, a dita temperatura recuperada sendo 425°C ou mais.

34. Lingote de metal, caracterizado pelo fato de que é produzido por um método de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 33.

35. Lingote de metal, de acordo com a reivindicação 34, caracterizado pelo fato de que tem uma microestrutura cristalina substancialmente idêntica à de um lingote do mesmo metal formado pelo mesmo método, mas sem remoção de líquido refrigerante no dito local, seguido por homogeneização completa como uma etapa separada subsequente.

36. Método de produzir um artigo de chapa fina metálica, que compreende as seguintes etapas: (a) produzir um lingote de metal lingotado por um método de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 33; e (b) trabalhar a quente o lingote para produzir um artigo trabalhado; caracterizado pelo fato de que o trabalho a quente é realizado sem homogeneização do lingote de metal solidificado entre a dita etapa de produção do lingote (a) e a dita etapa de trabalho a quente (b).

37. Método, de acordo com a reivindicação 36, caracterizado pelo fato de que o dito lingote é submetido a laminação a quente na etapa (b), e a dita laminação a quente é realizada a uma temperatura abaixo de uma temperatura de homogeneização do dito metal do dito lingote.

38. Método de aquecer um lingote de metal fundido para

preparar o dito lingote para trabalho a quente a uma temperatura predeterminada, caracterizado pelo fato de que o método compreende:

5 (a) pré-aquecer o dito lingote a uma temperatura de nucleação abaixo da dita temperatura de trabalho a quente predeterminada na qual ocorre nucleação de precipitados no metal para fazer com que ocorra nucleação;

(b) aquecer o dito lingote ainda mais até uma temperatura de crescimento de precipitado na qual ocorre crescimento de precipitado para fazer com que o precipitado cresça no metal; e

10 (c) se o dito lingote ainda não estiver na dita temperatura de trabalho a quente predeterminada depois da etapa (b), aquecer o dito lingote ainda mais até a dita temperatura de trabalho a quente predeterminada pronto para o trabalho a quente.

39. Método, de acordo com a reivindicação 38, caracterizado
15 pelo fato de que a temperatura do lingote na etapa (a) é gradualmente aumentada dentro de uma faixa de temperaturas de nucleação.

40. Método, de acordo com a reivindicação 38 ou reivindicação 39, caracterizado pelo fato de que a dita temperatura do lingote é aumentada a uma taxa de menos de 25 °C.

20 41. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 38 a 41, caracterizado pelo fato de que o metal é uma liga de alumínio.

42. Método, de acordo com a reivindicações 41, caracterizado pelo fato de que a dita liga de alumínio tem características de estampagem profunda.

25 43. Método, de acordo com a reivindicação 41, caracterizado pelo fato de que a dita liga é selecionada do grupo que consiste em AA3003 e AA3104.

44. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 41 a 43, caracterizado pelo fato de que a dita temperatura na qual começa a

nucleação é em uma faixa de 380 a 450°C e o lingote é mantido na dita temperatura por um período de 2 a 4 horas.

45. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 41 a 44, caracterizado pelo fato de que a dita temperatura na qual começa o crescimento de precipitado é em uma faixa de 480 a 550°C e o lingote é mantido na dita temperatura por pelo menos 10 horas.

46. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações 38 a 45, caracterizado pelo fato de que o dito lingote é um lingote produzido por um método de acordo com a reivindicação 1.

47. Método de lingotar um metal, caracterizado pelo fato de que compreende as etapas de:

(a) suprir metal líquido a pelo menos uma região onde o metal líquido é perifericamente confinado, provendo assim o metal líquido com uma porção periférica;

(b) resfriar a porção periférica do metal, formando assim um lingote embriônico que tem uma pele sólida externa e um núcleo líquido interno;

(c) avançar o lingote embriônico em uma direção de avanço para fora da região onde o metal líquido é perifericamente confinado suprimindo ao mesmo tempo metal líquido adicional à dita região, estendendo assim o núcleo líquido contido dentro da pele sólida além da dita região onde o metal líquido é perifericamente confinado;

(d) resfriar a superfície externa do lingote embriônico que emerge da região onde o metal líquido é perifericamente confinado, direcionando-se um suprimento de líquido refrigerante sobre a dita superfície externa;

(e) remover uma porção efetiva do líquido refrigerante da superfície externa do lingote embriônico em um local na superfície externa do lingote onde uma seção transversal do lingote perpendicular à direção de

avanço intercepta uma porção do dito núcleo líquido, produzindo assim uma parte do dito lingote substancialmente sem líquido refrigerante, de maneira tal que calor interno proveniente do dito núcleo líquido reaqueça a pele sólida adjacente ao núcleo líquido da dita parte, fazendo assim com que as

5 temperaturas do dito núcleo e da dita pele sólida se aproximem cada qual de uma temperatura de convergência acima de uma temperatura de transformação do metal na qual ocorre homogeneização *in situ* do metal; e

(f) temperar a dita parte do dito lingote depois que a dita parte tiver permanecido na dita temperatura de convergência for um período de

10 tempo efetivo para causar homogeneização da dita parte.

48. Método, de acordo com a reivindicação 47, caracterizado pelo fato de que o dito metal líquido na etapa (a) é suprido a pelo menos uma entrada de um molde de lingotamento de resfriamento direto, o dito molde de lingotamento de resfriamento direto formando assim a dita região onde o

15 metal líquido é perifericamente confinado, e o dito lingote embriônico avança na etapa (c) de pelo menos uma saída do dito molde de lingotamento de resfriamento direto, com o dito local na dita superfície externa do dito lingote onde a dita porção substancial de líquido refrigerante é removida na etapa (e) sendo espaçada por uma distância da dita pelo menos uma saída do molde.

20 49. Método, de acordo com a reivindicação 47 ou reivindicação 48, caracterizado pelo fato de que a dita temperatura de convergência é 425°C ou mais.

50. Método de lingotar um metal, contínua ou semicontinuamente, com resfriamento direto de um lingote feito de um metal

25 que pode ser lingotado, compreendendo as etapas de:

(a) prover um molde de lingotamento de resfriamento direto que tem uma ou mais entradas do molde e uma ou mais saídas do molde;

(b) suprir metal líquido a pelo menos uma entrada do molde de lingotamento;

(c) resfriar o molde para solidificar uma porção periférica do metal, formando assim um lingote embriônico que tem uma pele sólida externa e um núcleo líquido interno;

5 (d) avançar continuamente o lingote embriônico além da pelo menos uma saída do molde, estendendo assim o núcleo líquido contido dentro da pele sólida além da dita pelo menos uma saída do molde;

(e) resfriar o lingote embriônico que emerge do molde para continuar a sua solidificação, direcionando-se um suprimento de líquido refrigerante sobre a superfície externa do lingote embriônico;

10 (f) fazer com que o dito líquido refrigerante seja removido da superfície do lingote embriônico antes de o lingote ser transformado em um lingote completamente sólido, de maneira tal que calor interno do núcleo líquido reaqueça a pele sólida adjacente ao núcleo, fazendo assim com que as temperaturas do dito núcleo e da dita pele sólida equilibrem a uma
15 temperatura de convergência, o dito refrigerante líquido sendo removido da dita superfície a uma distância da dita pelo menos uma saída do molde que faz com que a dita temperatura de convergência fique acima de uma temperatura de transformação na qual o dito metal é submetido a homogeneização *in situ*;

20 (g) resfriar o dito lingote ou deixar que o dito lingote esfrie naturalmente;

(h) sem homogeneização interveniente, pré-aquecer o dito lingote a uma temperatura efetiva para laminação a quente; e

(i) laminar a quente o dito lingote;

caracterizado pelo fato de que a dita etapa de pré-aquecimento

25 (h) é realizada em duas etapas, uma primeira das quais compreende aquecer o dito lingote a uma temperatura de nucleação abaixo da dita temperatura efetiva para laminação a quente e manter na dita temperatura de nucleação por um tempo efetivo para causar nucleação dentro do dito lingote, e uma segunda das quais compreende aquecer o dito lingote da dita temperatura de

nucleação até a dita temperatura efetiva para laminação a quente, e manter o dito lingote na dita temperatura efetiva para laminação a quente por um período de tempo para permitir o crescimento cristalino antes da dita etapa de laminação a quente (i).

5 51. Método, de acordo com a reivindicação 50, caracterizado pelo fato de que a dita temperatura de transformação é 425°C ou mais.

52. Método de laminar a quente um lingote produzido por lingotamento RD, compreendendo as etapas de:

10 (a) temperar um lingote produzido por lingotamento com resfriamento direto a partir de uma temperatura de lingotamento elevada;

 (b) pré-aquecer o dito lingote a uma temperatura efetiva para laminação a quente; e

 (c) laminar a quente o dito lingote na dita temperatura efetiva para laminação a quente;

15 caracterizado pelo fato de que o dito pré-aquecimento da etapa

(b) é realizado em duas etapas, uma primeira etapa compreendendo aquecer o dito lingote a uma temperatura de nucleação abaixo da dita temperatura efetiva para laminação a quente e manter na dita temperatura de nucleação por um tempo efetivo para causar nucleação dentro do dito lingote, e uma
20 segunda etapa compreendendo aquecer o dito lingote a partir da dita temperatura de nucleação até a dita temperatura efetiva para laminação a quente, e manter o dito lingote na dita temperatura efetiva para laminação a quente por um período de tempo para permitir o crescimento cristalino antes da dita laminação a quente da etapa (c).

25 53. Método, de acordo com a reivindicação 52, caracterizado pelo fato de que a dita primeira etapa compreende aquecer o dito lingote a uma temperatura na faixa de 380 a 450 °C.

54. Método, de acordo com a reivindicação 52 ou reivindicação 53, caracterizado pelo fato de que a dita temperatura na dita

primeira etapa é mantida por um período de 2 a 4 horas.

55. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 52 a 54, caracterizado pelo fato de que o dito lingote é aquecido até a dita temperatura de nucleação a uma velocidade média de cerca de 50°C por hora.

5 56. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 52 a 55, caracterizado pelo fato de que a dita segunda etapa compreende aquecer o dito lingote a uma temperatura na faixa de 480 a 550 °C.

57. Método, de acordo com a reivindicação 56, caracterizado pelo fato de que a dita temperatura na dita segunda etapa é mantida por um
10 período de tempo que vai desde a etapa de pré-aquecimento completo até uma faixa de 10 a 24 horas.

58. Método, de acordo com a reivindicação 56 ou reivindicação 57, caracterizado pelo fato de que o dito lingote é aquecido da dita temperatura de nucleação até a dita temperatura efetiva para laminação a
15 quente a uma velocidade de cerca de 50°C por hora.

59. Método de produzir um lingote de metal que pode ser laminado a quente sem homogeneização prévia, caracterizado pelo fato de que o método compreende:

lingotar um metal para formar um lingote sob condições de
20 temperatura e tempo efetivas para produzir um metal solidificado com uma microestrutura cujo núcleo não difere de seu exterior.

60. Método, de acordo com a reivindicação 59, caracterizado pelo fato de que as ditas condições incluem manter o dito lingote a uma temperatura acima de uma temperatura de transformação efetivas para causar
25 homogeneização *in situ* por um período de 10 a 30 minutos durante o dito lingotamento do dito metal.

61. Método, de acordo com a reivindicação 60, caracterizado pelo fato de que as ditas condições incluem manter o dito lingote a uma temperatura acima de uma temperatura de transformação efetiva para causar

homogeneização *in situ* por um período de 15 a 20 minutos.

62. Método de produzir um lingote de metal que pode ser laminado a quente sem homogeneização prévia, caracterizado pelo fato de que o método compreende: lingotar um metal para formar um lingote sob condições de temperatura e tempo efetivas para produzir um metal solidificado com uma microestrutura fraturada.

63. Método de produzir um lingote de metal que pode ser laminado a quente sem homogeneização prévia, caracterizado pelo fato de que o método compreende: lingotar um metal para formar um lingote sob condições de temperatura e tempo efetivas para produzir um metal solidificado com uma microestrutura convertida produzida por uma etapa de homogeneização separada após resfriamento do lingote.

64. Método, de acordo com a reivindicação 63, caracterizado pelo fato de que as ditas condições incluem manter o dito lingote a uma temperatura acima de uma temperatura de transformação efetiva para causar homogeneização *in situ* por um período de tempo de 10 a 30 minutos durante o dito lingotamento do dito metal.

65. Método, de acordo com a reivindicação 63, caracterizado pelo fato de que as ditas condições incluem manter o dito lingote a uma temperatura acima de uma temperatura de transformação efetiva para causar homogeneização *in situ* por um período de 15 a 20 minutos.

66. Método de lingotar um metal, contínua ou semicontinuamente, com resfriamento direto de um lingote feito de um metal fundível, caracterizado pelo fato de que compreende as etapas de:

(a) prover um molde de lingotamento de resfriamento direto que tem uma ou mais entradas do molde e uma ou mais saídas do molde;

(b) suprir metal líquido a pelo menos uma entrada do molde de lingotamento;

(c) resfriar o molde para solidificar uma porção periférica do

metal, formando assim um lingote embriônico com uma pele sólida externa e um núcleo líquido interno;

(d) avançar continuamente o lingote embriônico além de pelo menos uma saída do molde, estendendo assim o núcleo líquido contido dentro da pele sólida além da dita pelo menos uma saída do molde;

(e) resfriar o lingote embriônico que emerge do molde para continuar sua solidificação, direcionando-se um suprimento de líquido refrigerante sobre a superfície externa do lingote embriônico;

(f) fazer com que o dito refrigerante líquido seja removido da superfície do lingote embriônico em uma posição onde o lingote ainda não foi transformado em um lingote completamente sólido de maneira tal que calor interno do núcleo líquido reaqueça a pele sólida adjacente ao núcleo, fazendo assim com que as temperaturas do dito núcleo e da dita pele sólida equilibrem a uma temperatura de convergência, o dito refrigerante líquido sendo removido da dita superfície a uma distância da dita pelo menos uma saída do molde que faz com que a dita temperatura de convergência fique 425°C ou mais; e

(g) variar a dita posição na etapa (f) em diferentes fases do dito lingotamento do dito lingote para minimizar diferenças da dita temperatura de convergência abaixo do dito removedor mecânico durante as ditas diferentes fases de lingotamento.

67. Método, de acordo com a reivindicação 66, caracterizado pelo fato de que a dita posição move-se mais para perto do dito molde durante uma fase inicial de lingotamento do que em uma fase subsequente.

68. Método, de acordo com a reivindicação 66, caracterizado pelo fato de que a dita posição move-se em relação ao dito molde durante uma fase final de lingotamento.

69. Máquina para lingotar um metal, contínua ou semicontinuamente com resfriamento direto, de um lingote feito de metal,

caracterizado pelo fato de que compreende:

um molde de lingotamento que tem pelo menos uma entrada,
pelo menos uma saída e pelo menos uma cavidade do molde;

5 pelo menos uma camisa de resfriamento para a dita pelo
menos uma cavidade do molde;

um suprimento de líquido refrigerante arranjado para fazer
com que o refrigerante líquido escoe ao longo de uma superfície exterior de
um lingote embriônico que emerge da dita pelo menos uma saída;

10 dispositivos espaçados a uma distância da dita pelo menos uma
saída para remover o dito líquido refrigerante da dita superfície exterior do
dito lingote embriônico; e

aparelho para mover o dito dispositivo de remoção de
refrigerante a favor e contra a dita pelo menos uma saída, habilitando assim a
dita distância ser modificada durante o lingotamento do dito lingote.

15 70. Máquina, de acordo com a reivindicação 69, caracterizado
pelo fato de que o dito molde de lingotamento é um molde de lingotamento de
resfriamento direto.

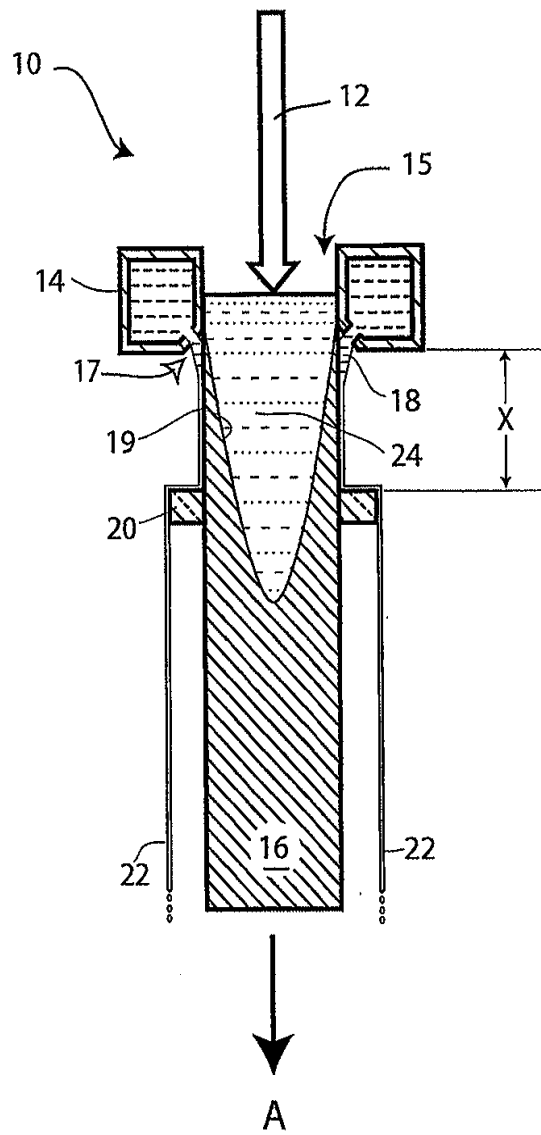


Fig. 1

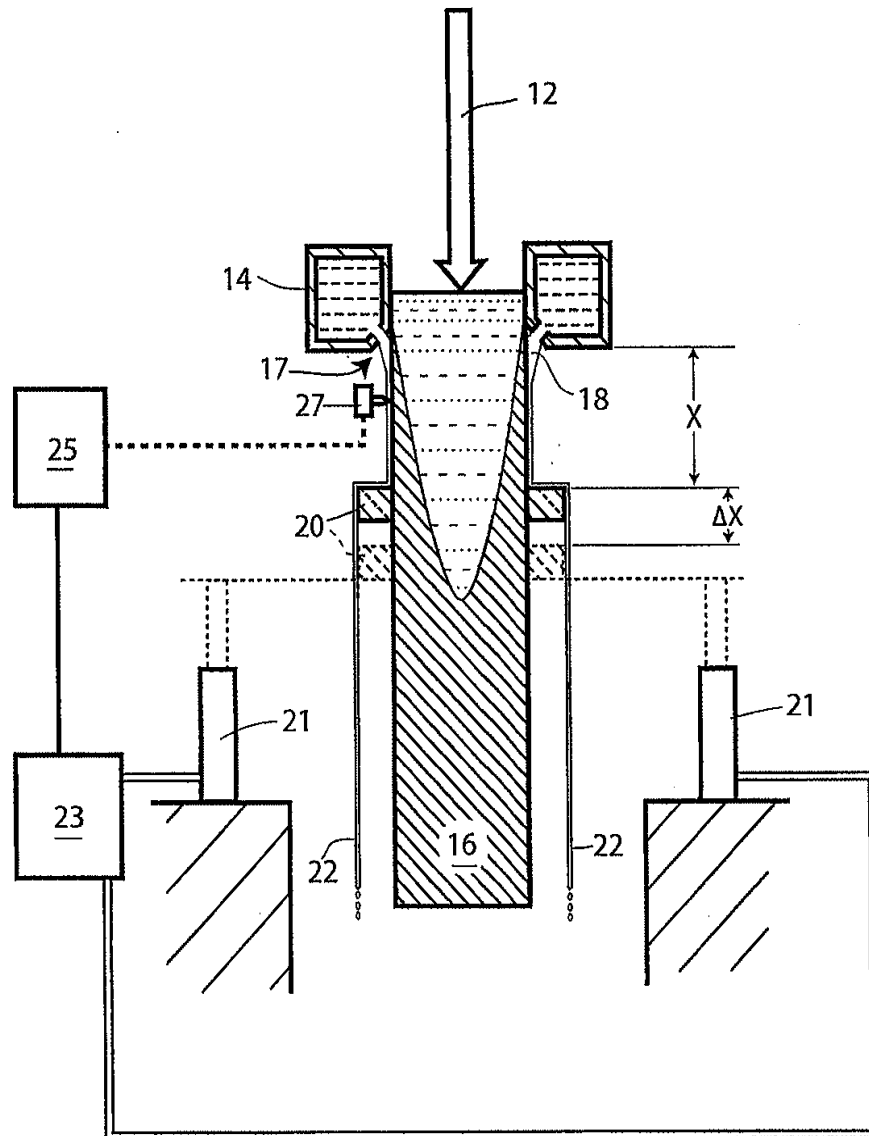


Fig. 2

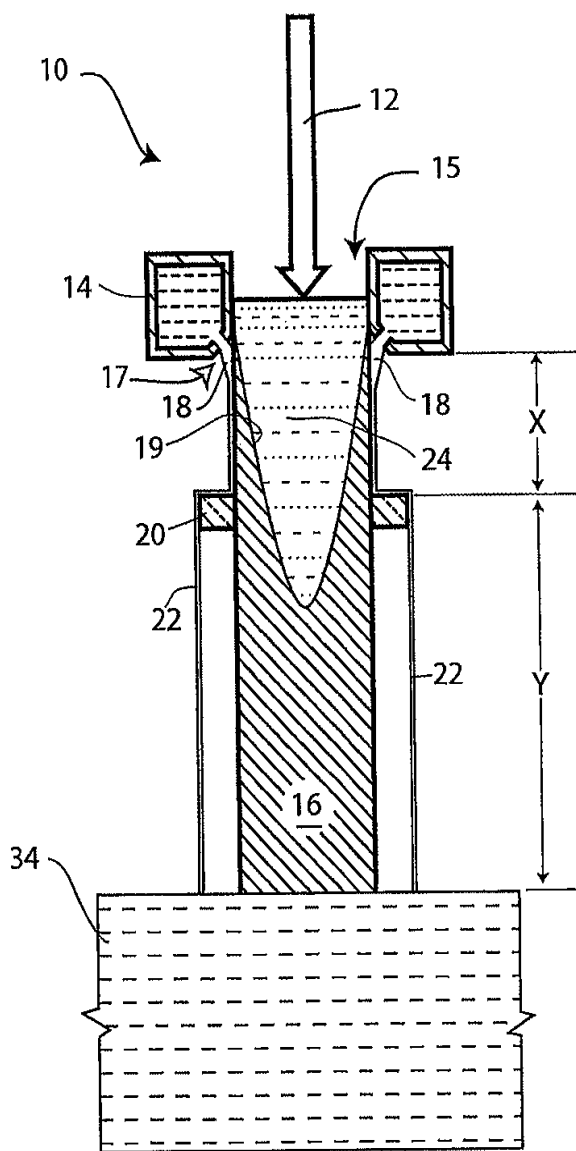


Fig. 3

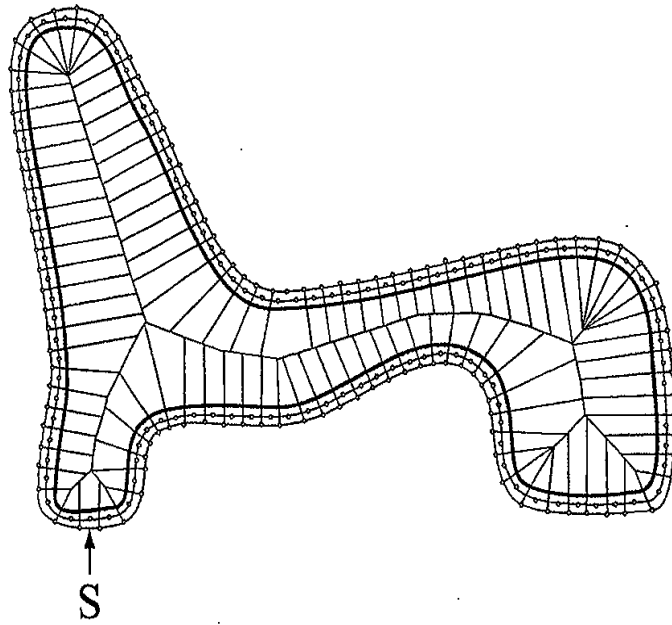


Fig. 4

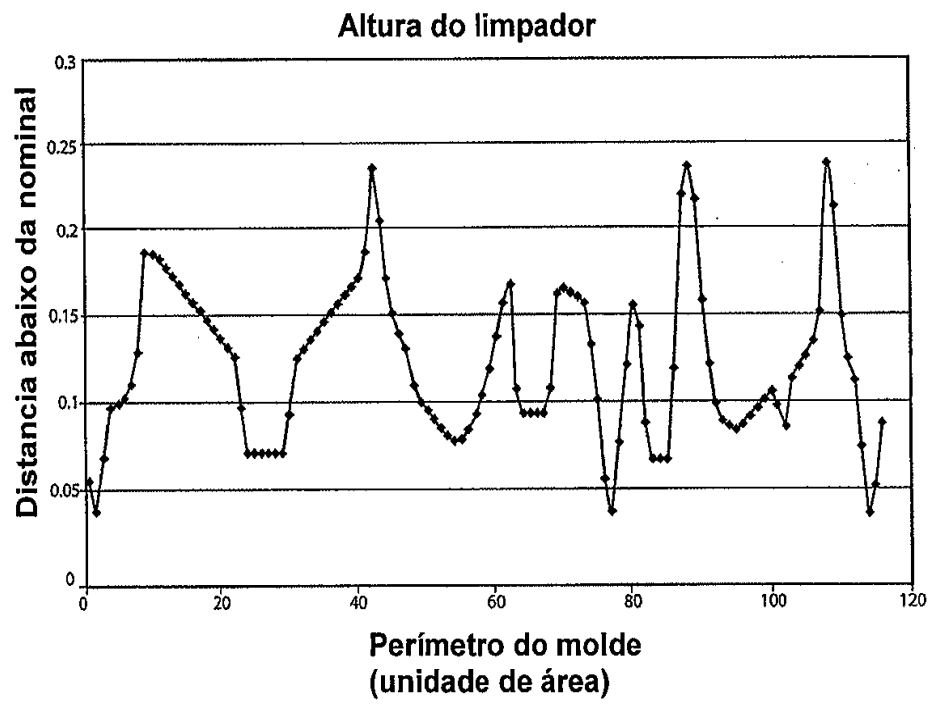


Fig.5

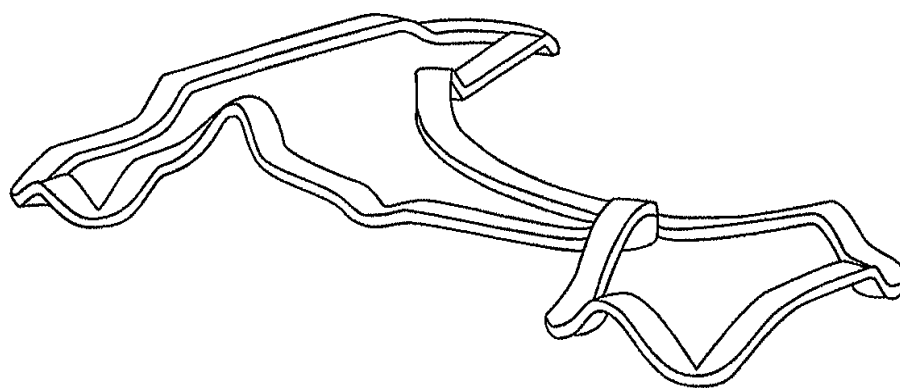


Fig. 6

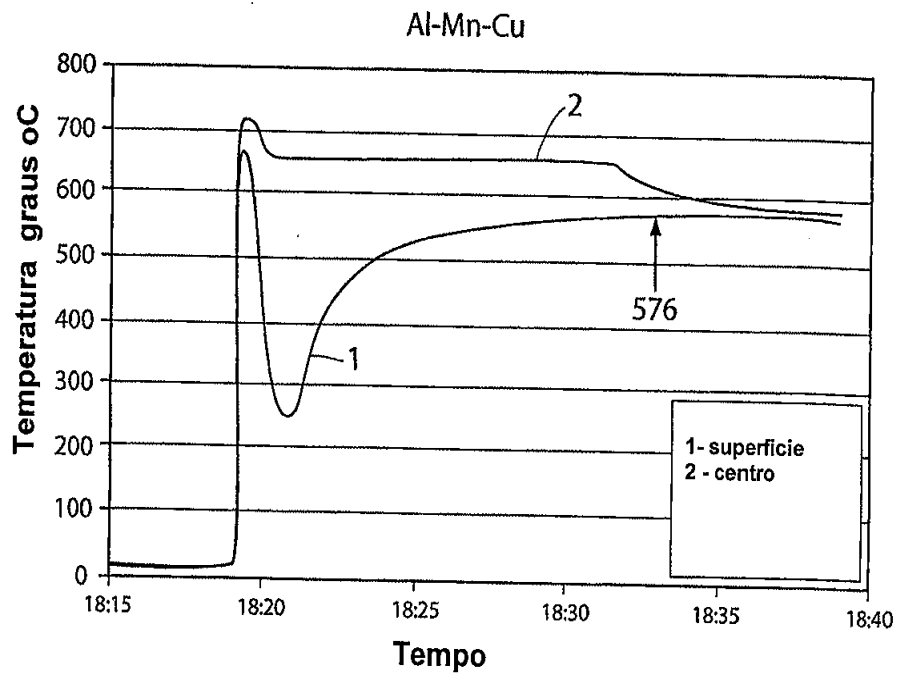


Fig.7

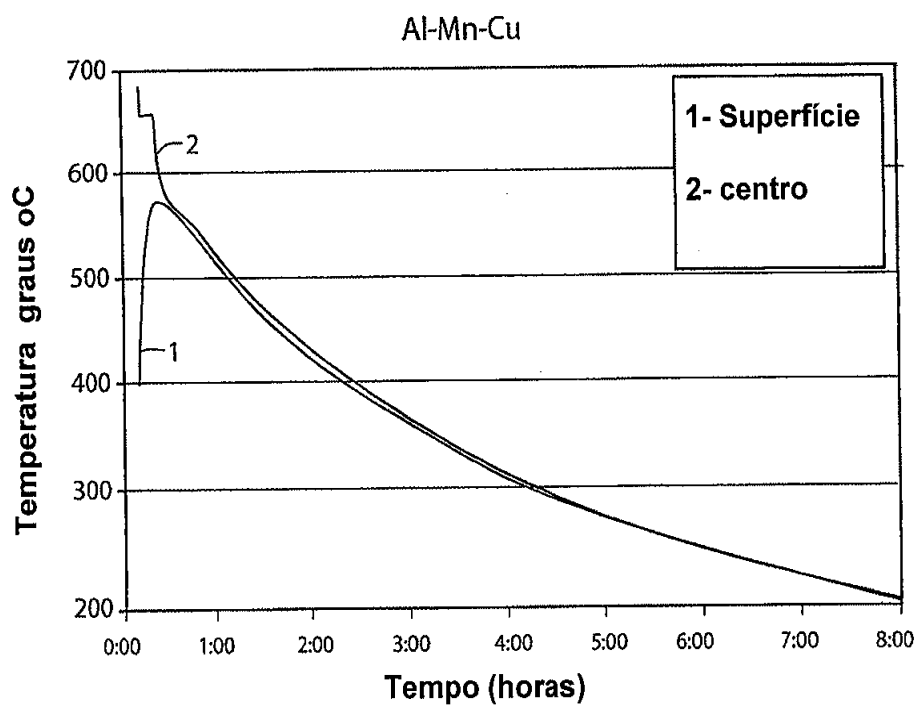


Fig. 8

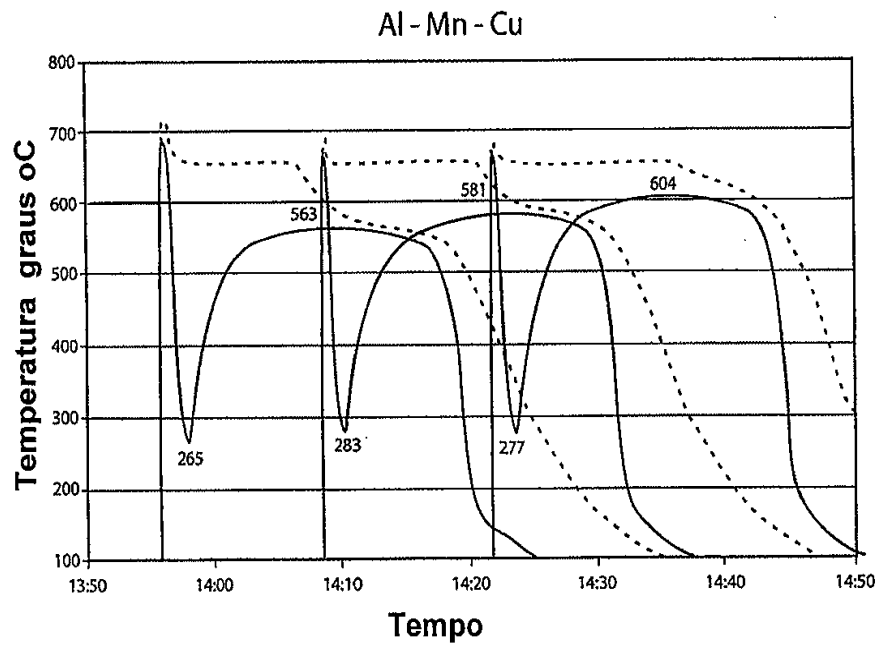


Fig. 9

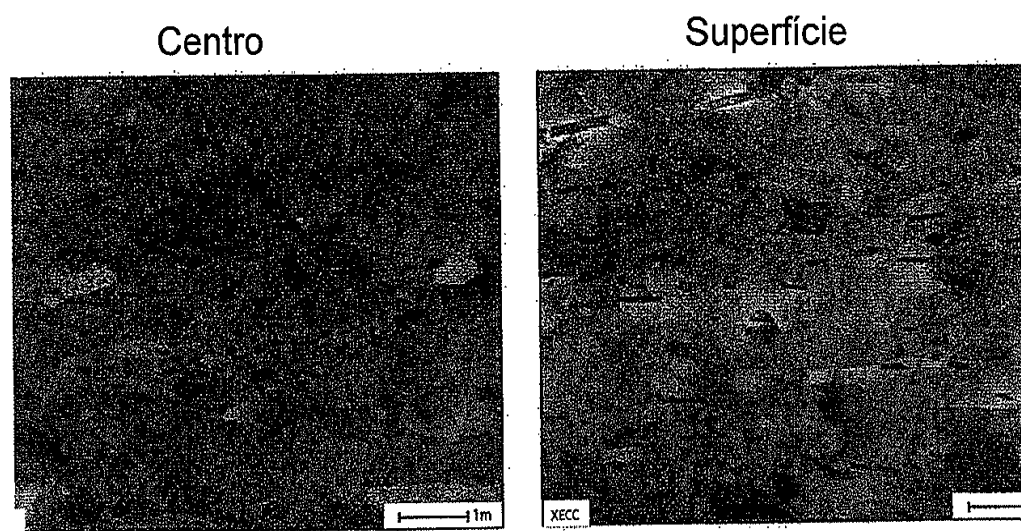


Fig. 10a

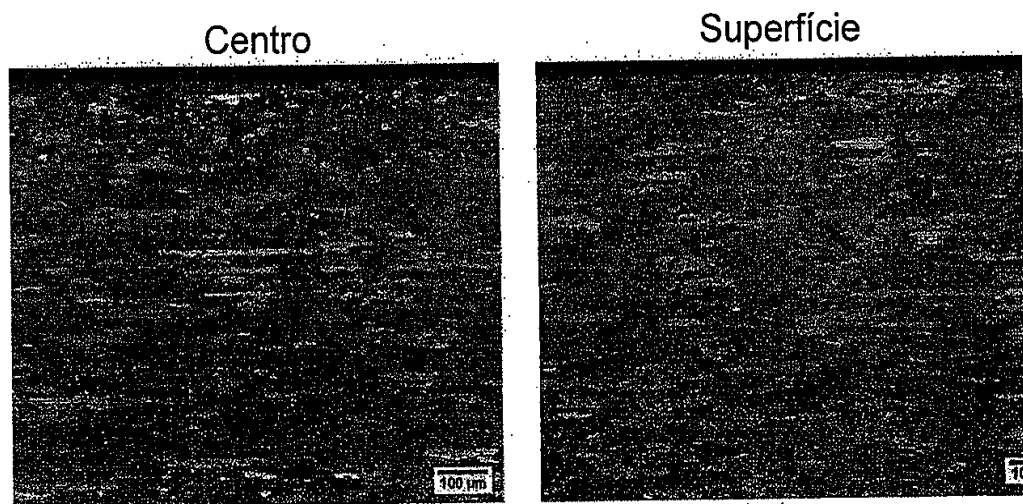


Fig. 10b

Centro

Superfície

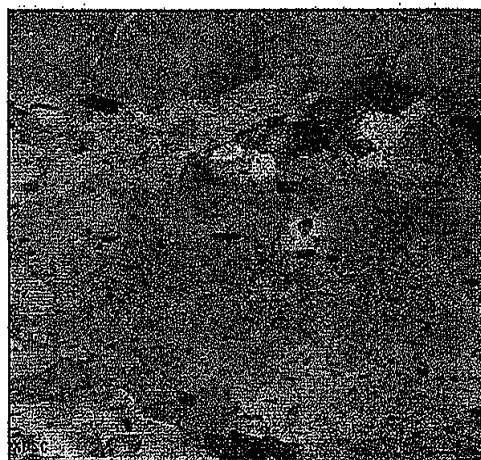


Fig. 11a

Centro

Superfície

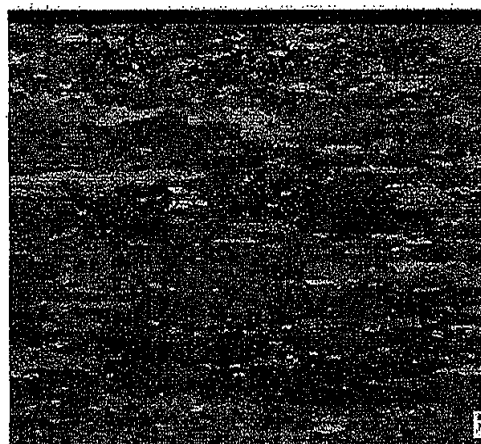
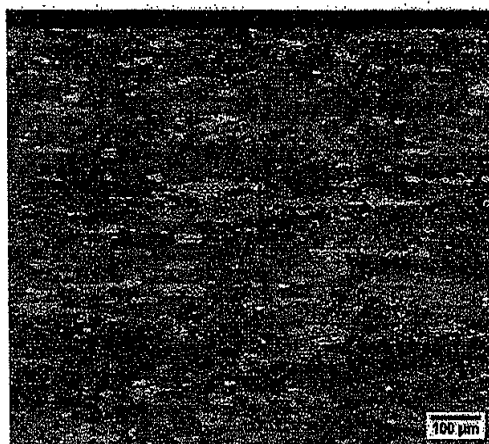
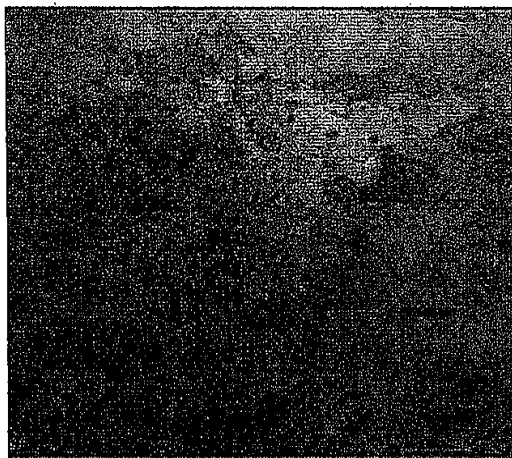


Fig. 11b

Centro

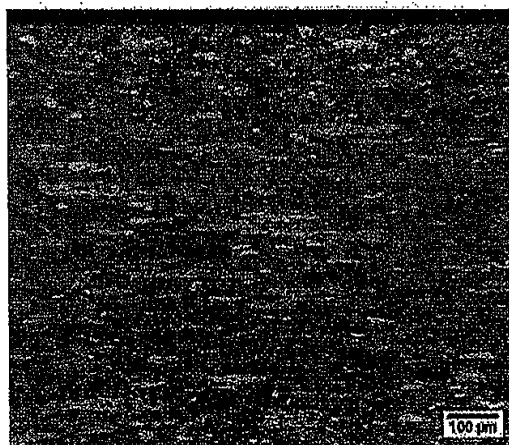


Superfície



Fig. 12a

Centro



Superfície

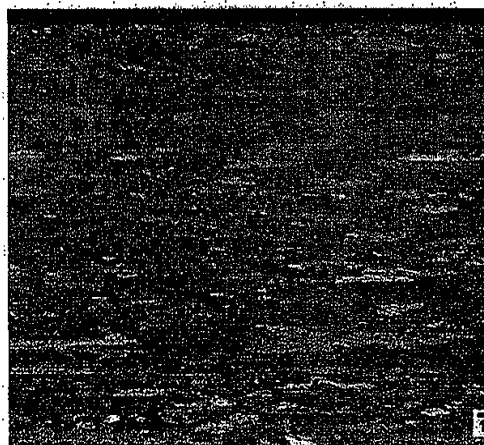
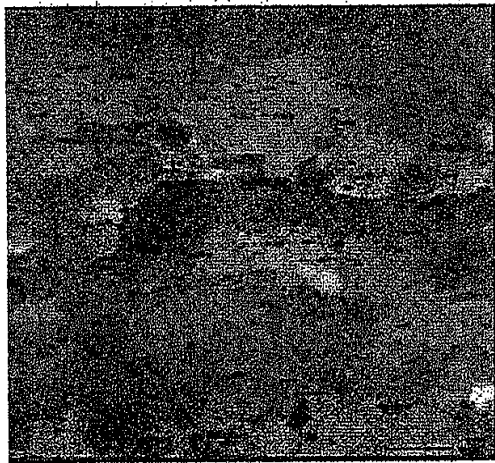


Fig. 12b

Centro

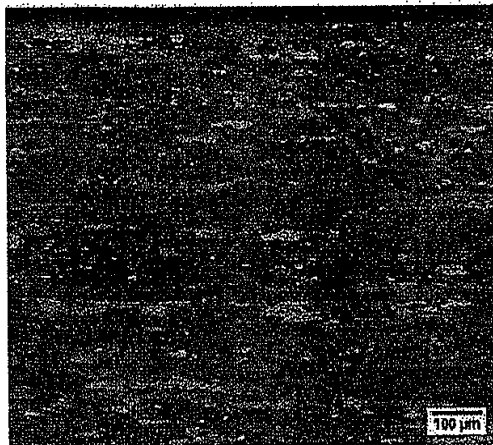


Superfície



Fig. 13a

Centro



Superfície

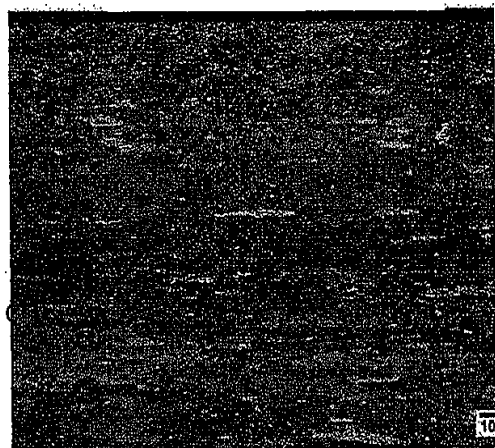


Fig. 13b

Centro

Superfície

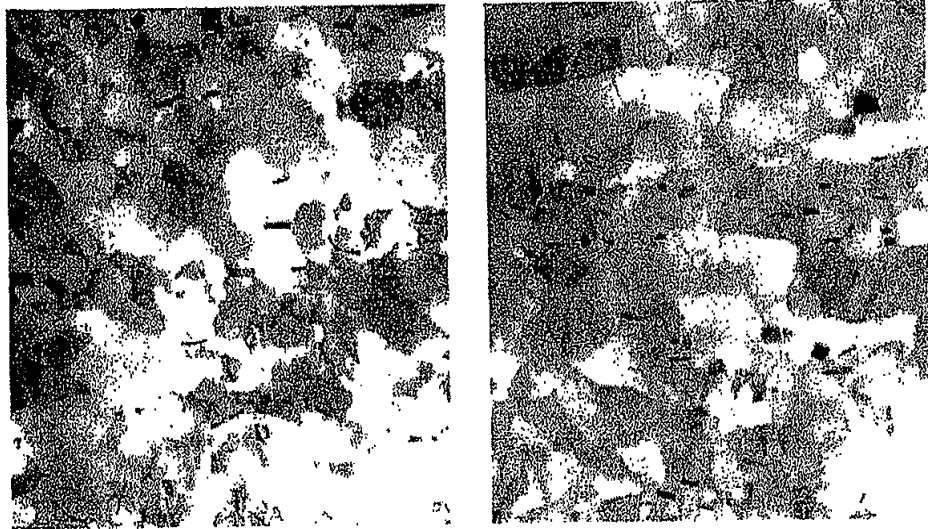


Fig. 14a

Centro

Superfície

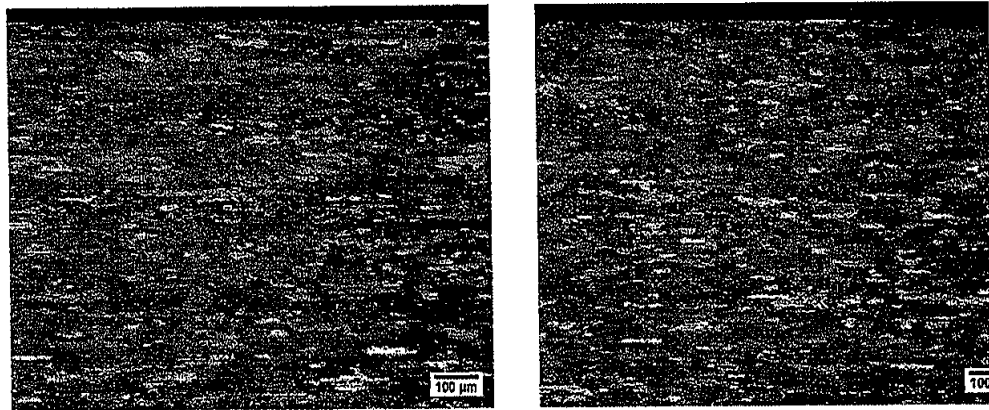


Fig. 14b

Centro

Superfície

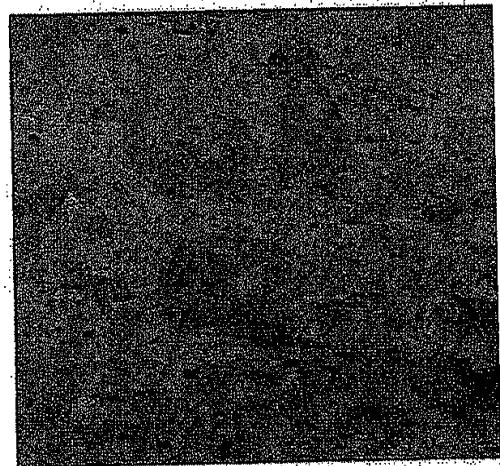
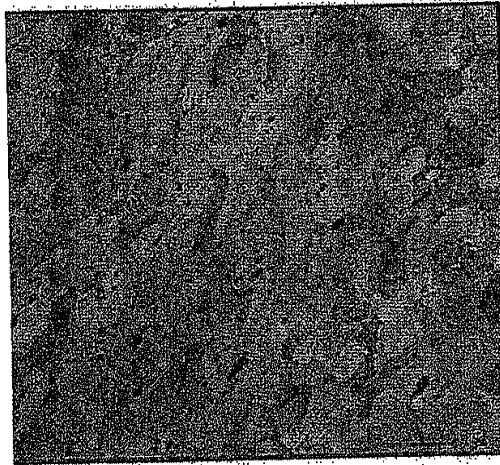


Fig. 15a

Centro

Superfície

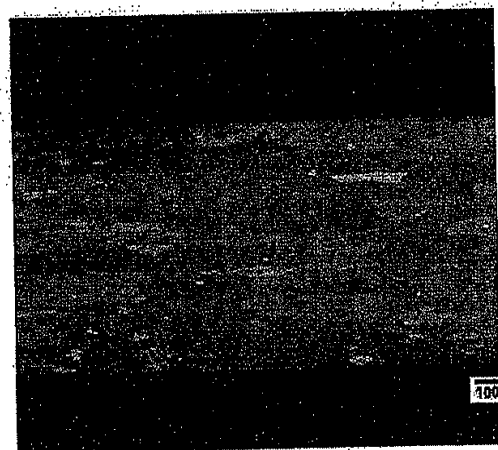
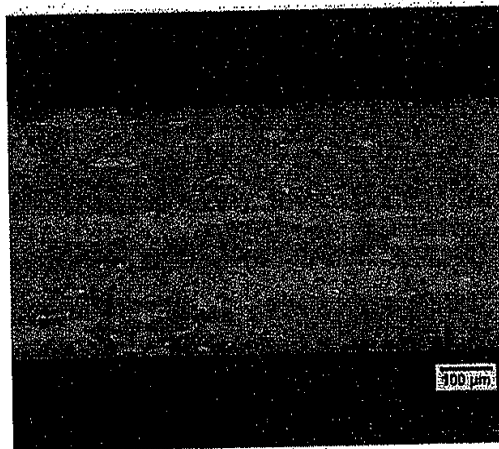


Fig. 15b

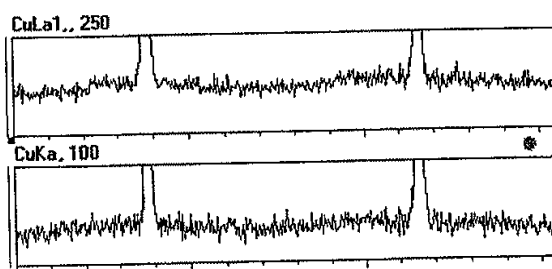
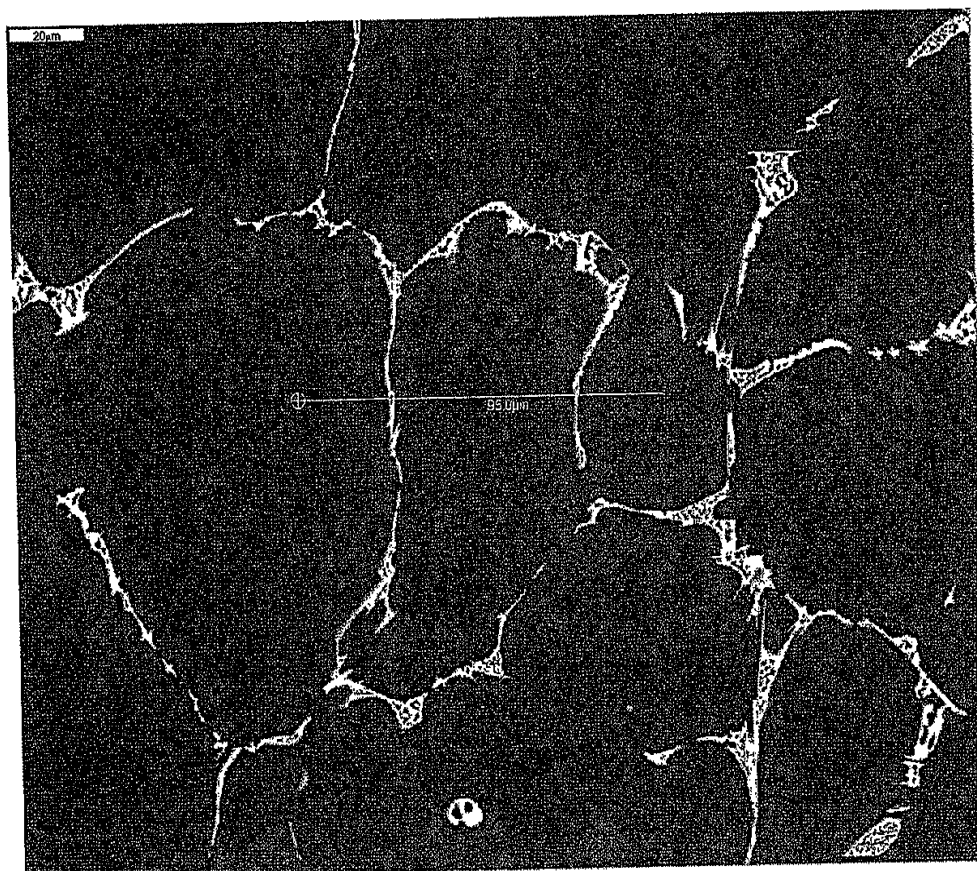
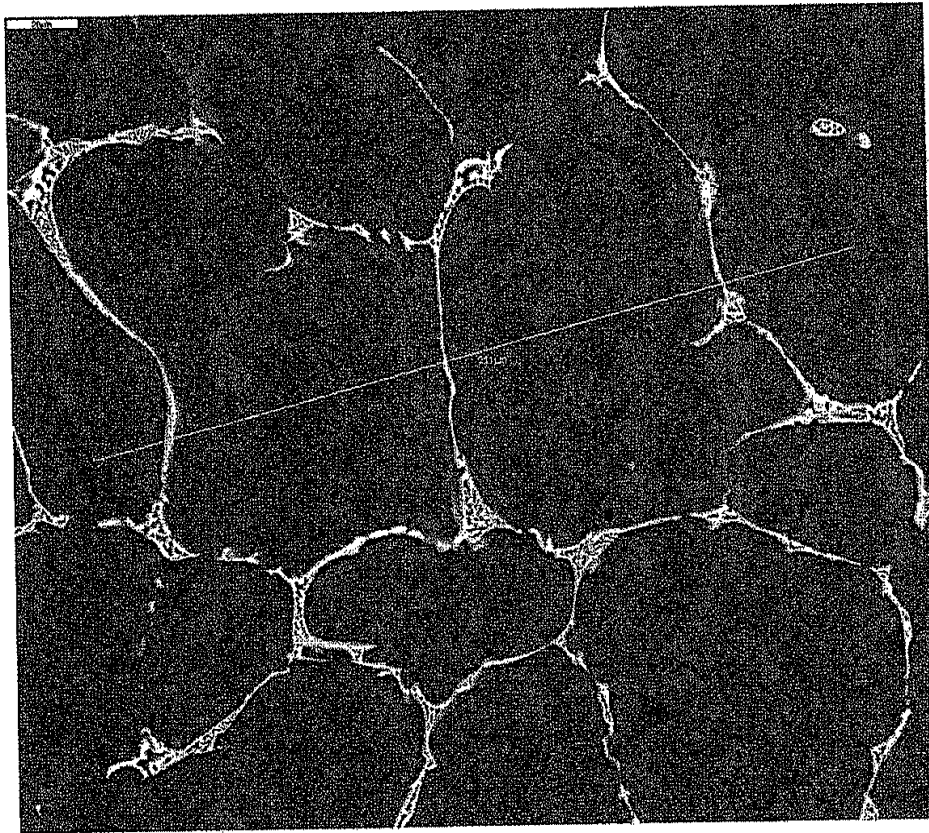


Fig. 16



Al-4,5% Cu in situ com temperatura de rechaço de 300 °C posição de quarto

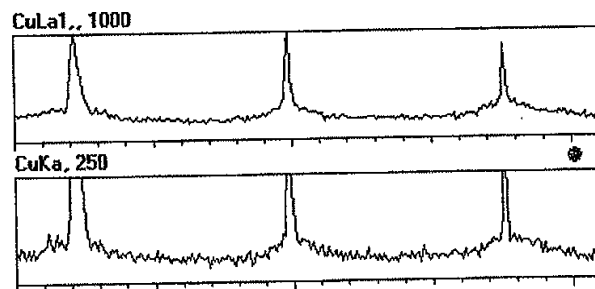


Fig. 17

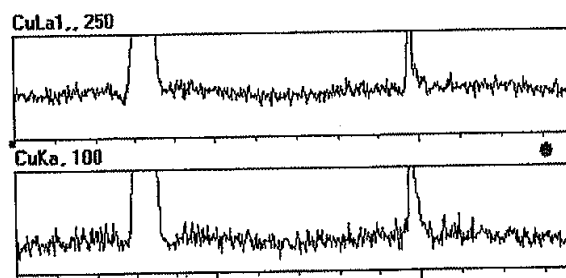
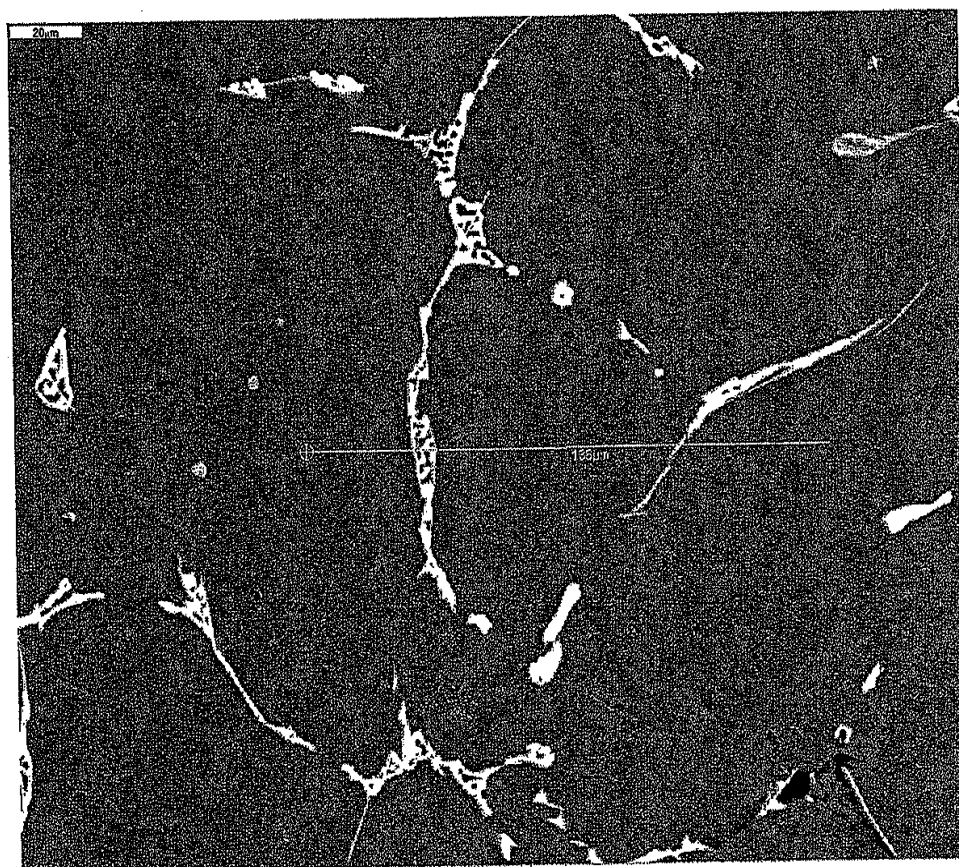


Fig. 18

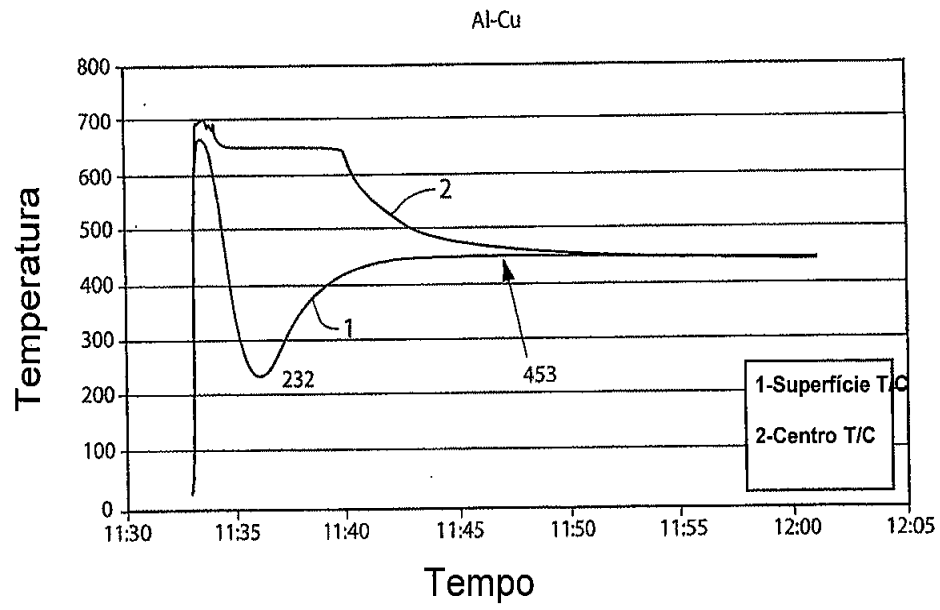


Fig. 19

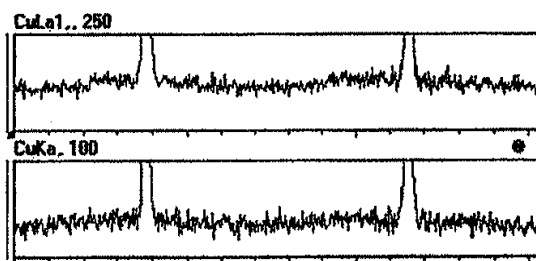
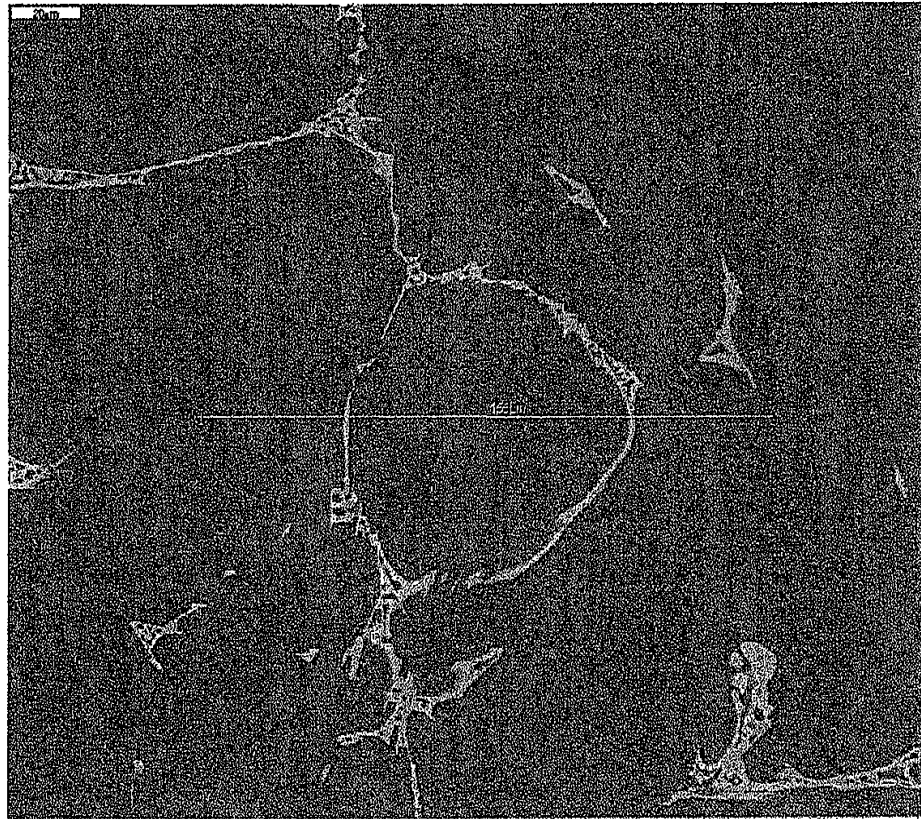


Fig. 20

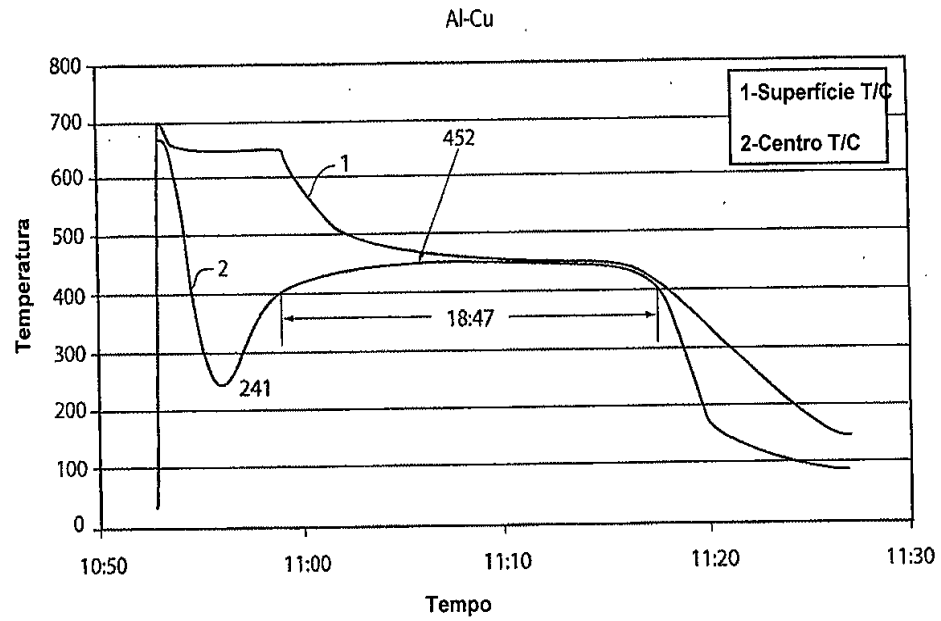


Fig. 21

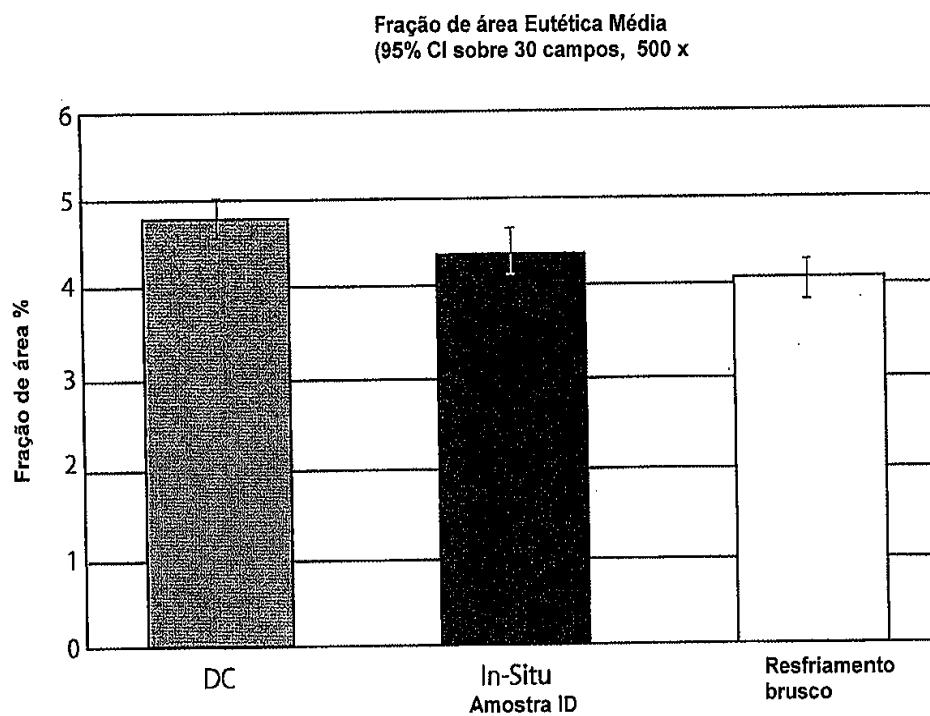


Fig. 22

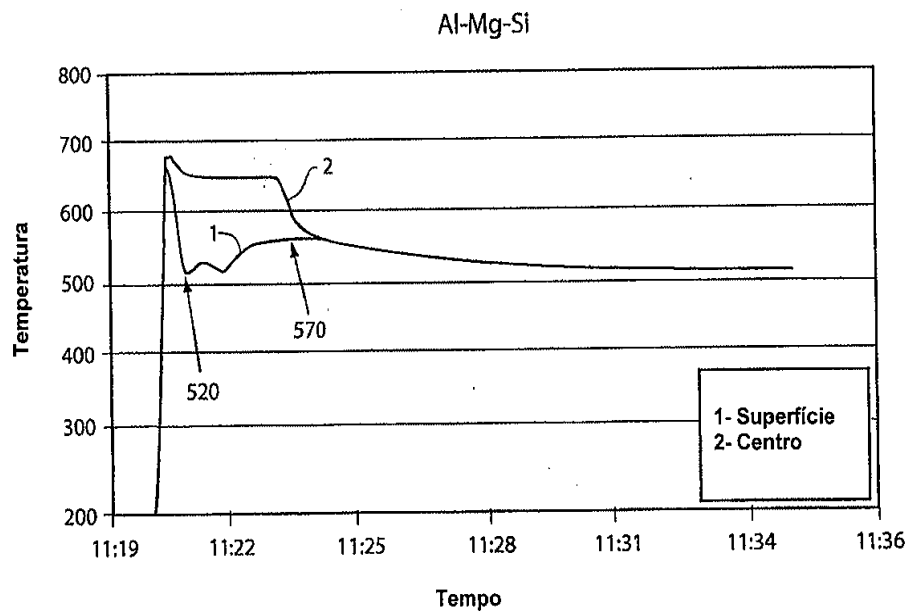


Fig. 23

Al-Mg-Si

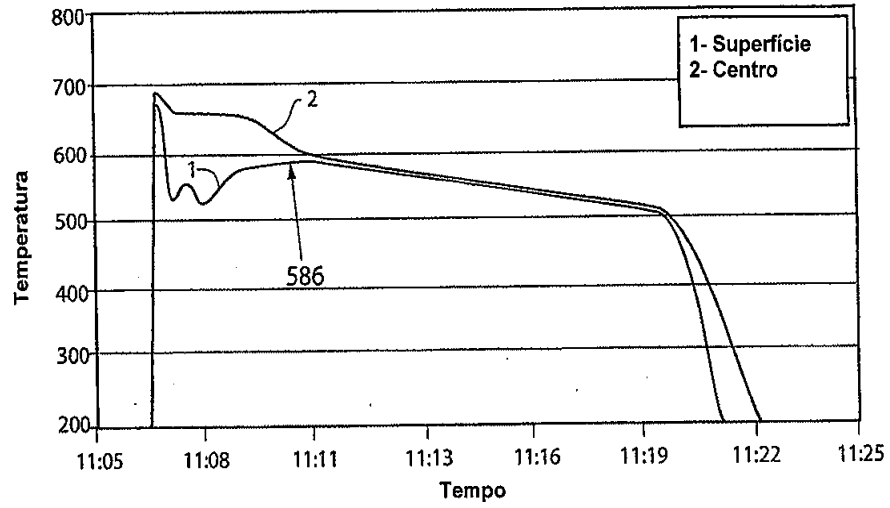


Fig. 24

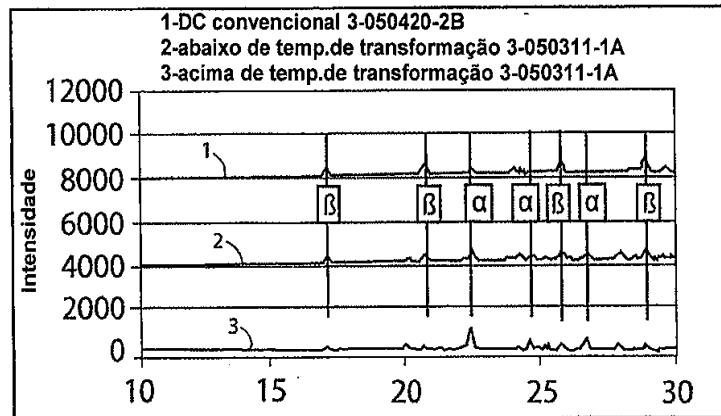


Fig. 25a

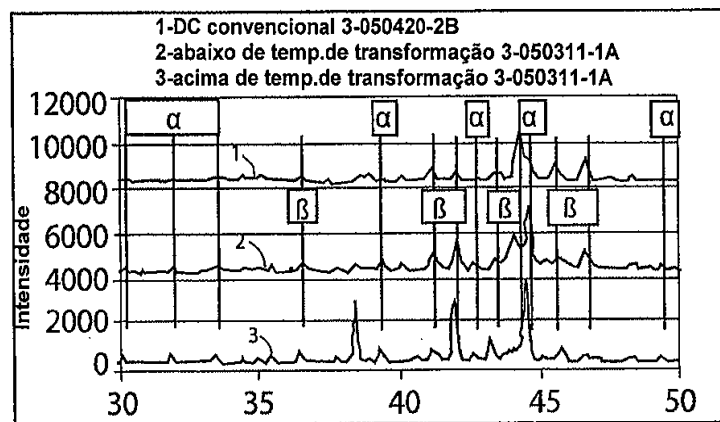


Fig. 25b

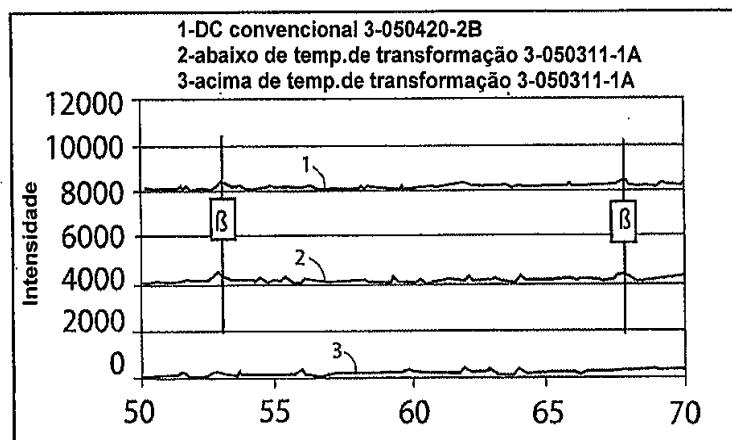


Fig. 25c

Dividida: Alfa / Beta

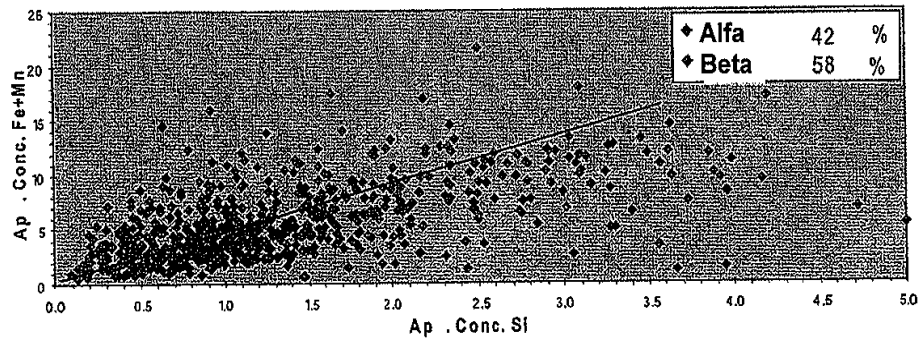


Fig. 26a

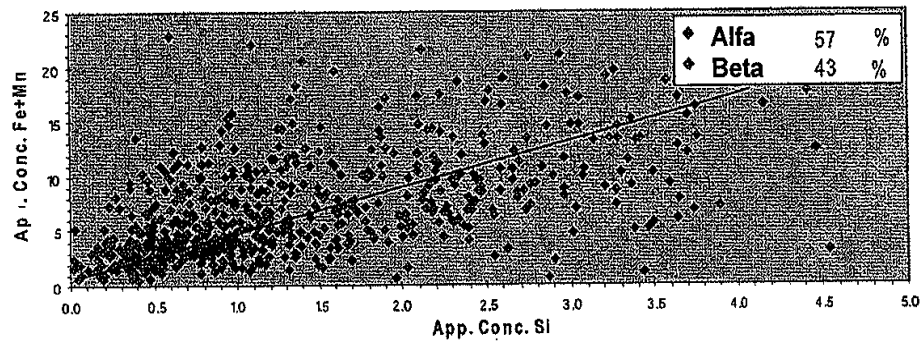


Fig. 26b

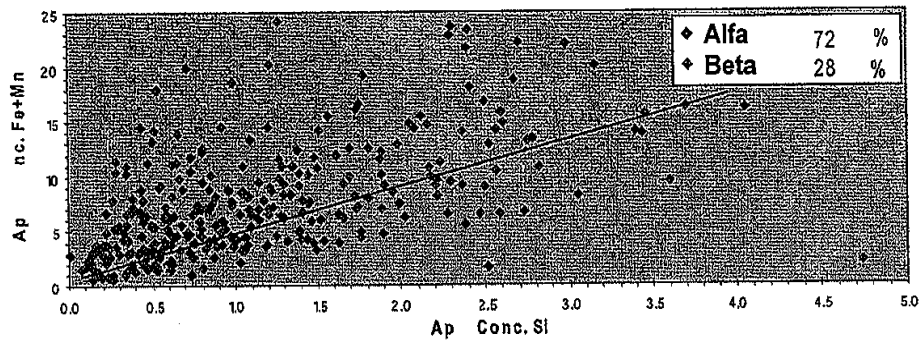


Fig. 26c



Fig 27a



Fig 27b

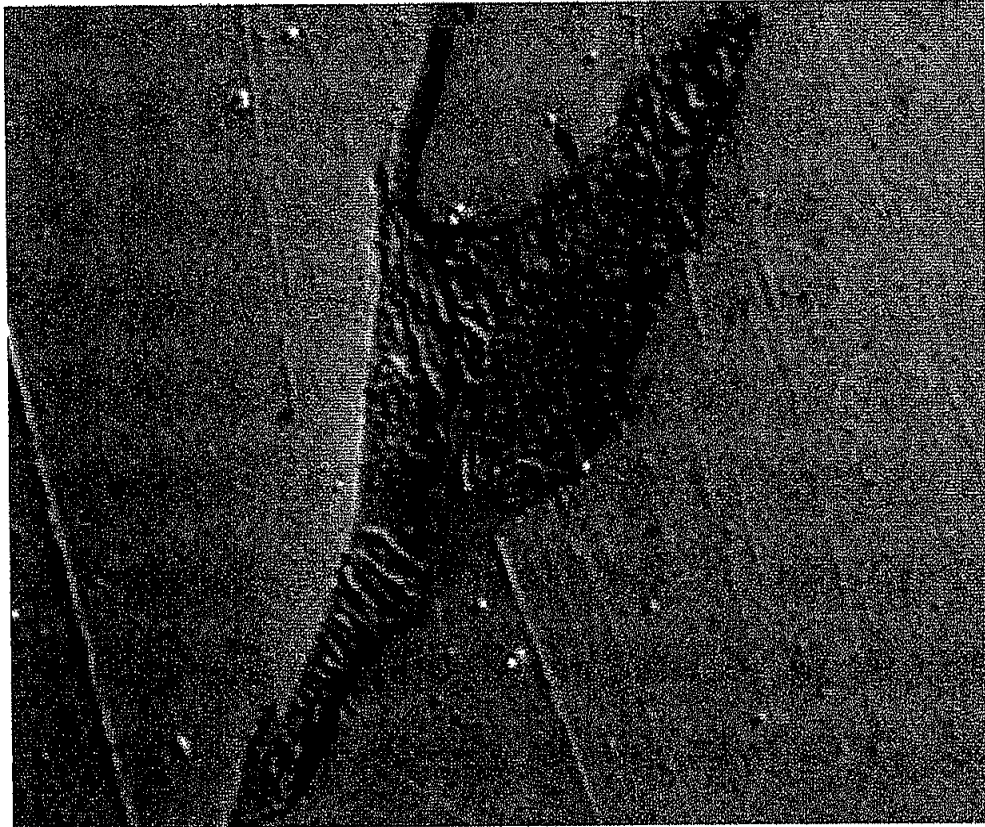


Fig. 28

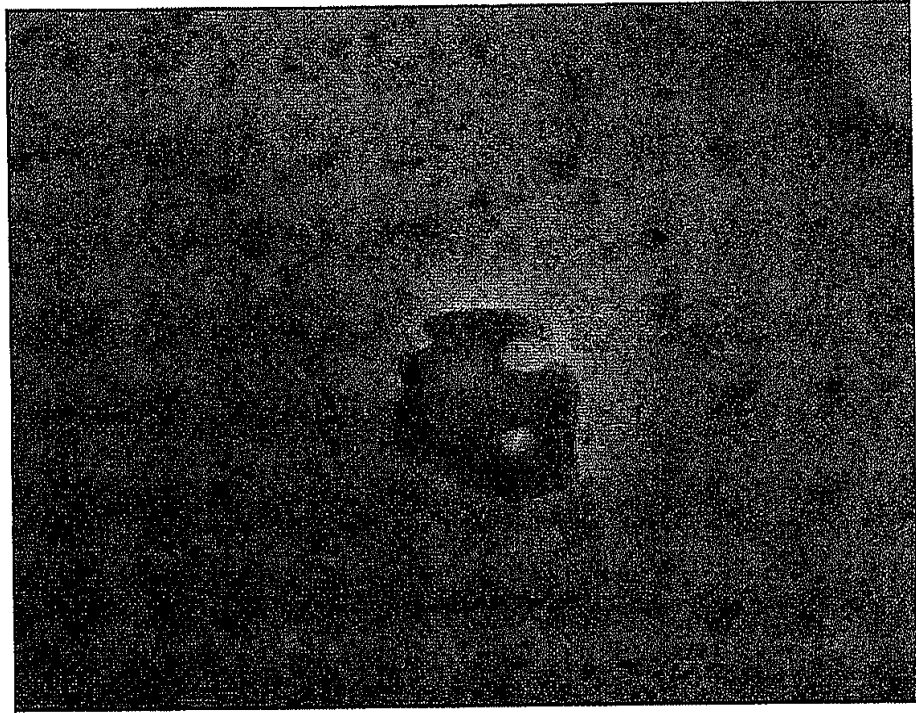


Fig. 29

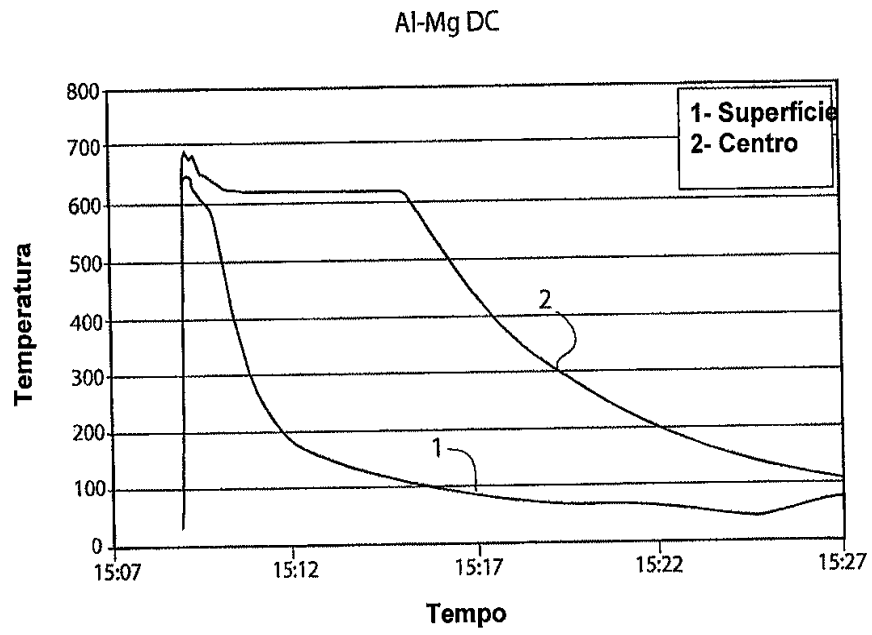


Fig. 30

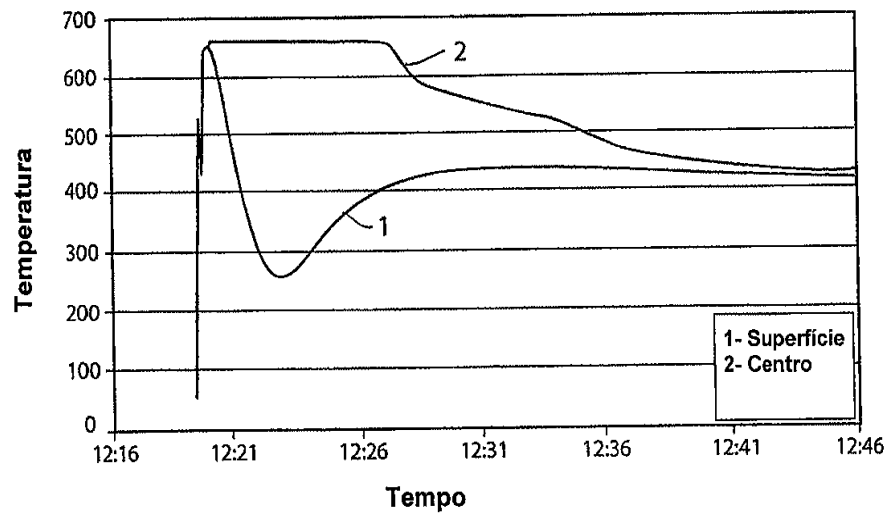


Fig. 31

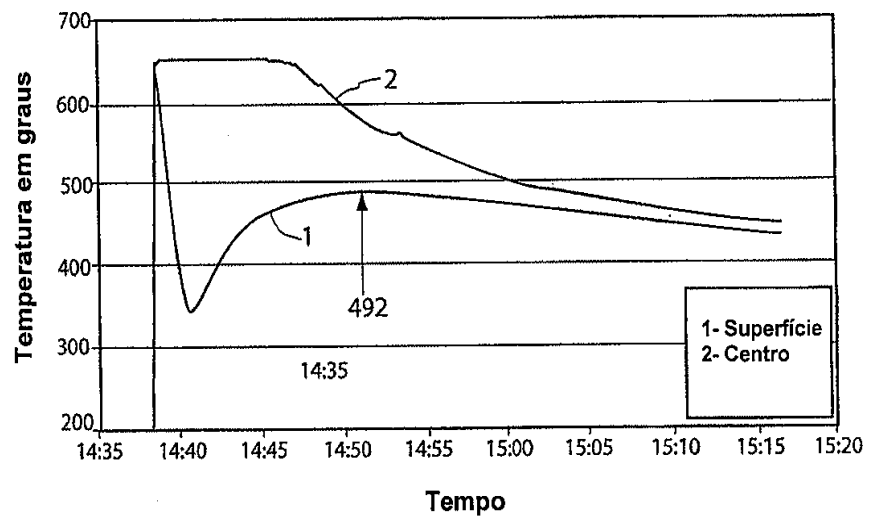


Fig. 32

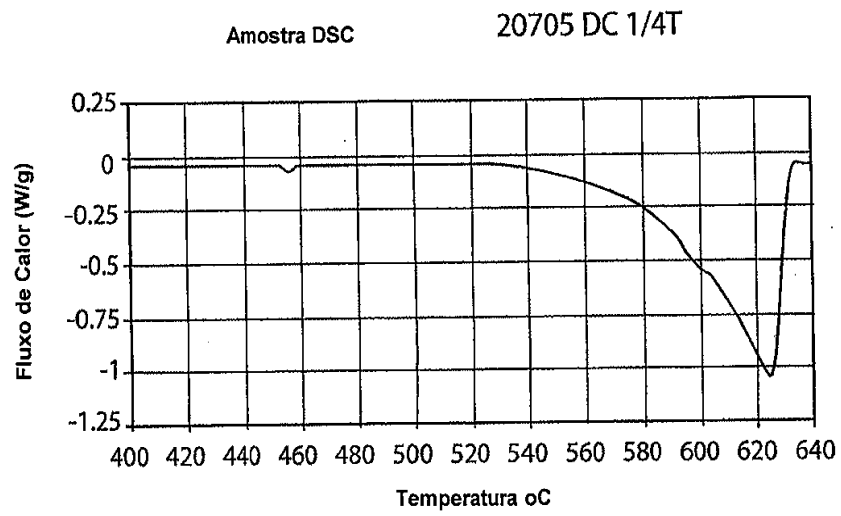


Fig.33

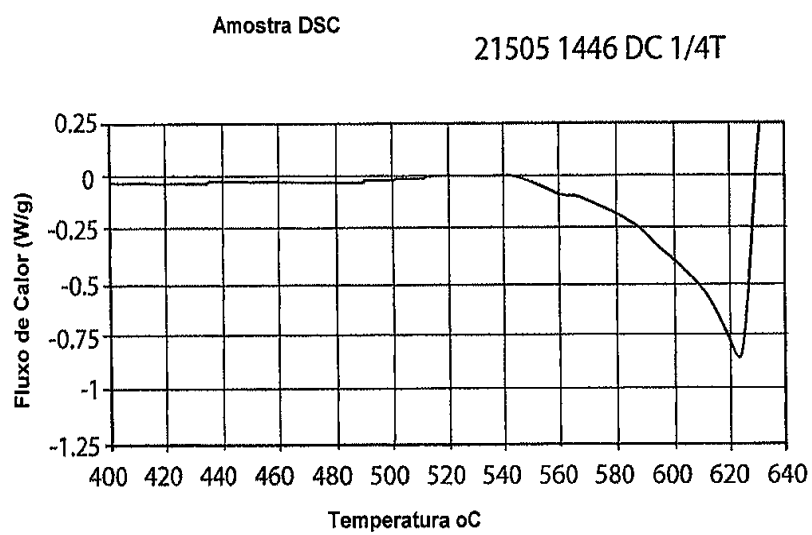


Fig. 34

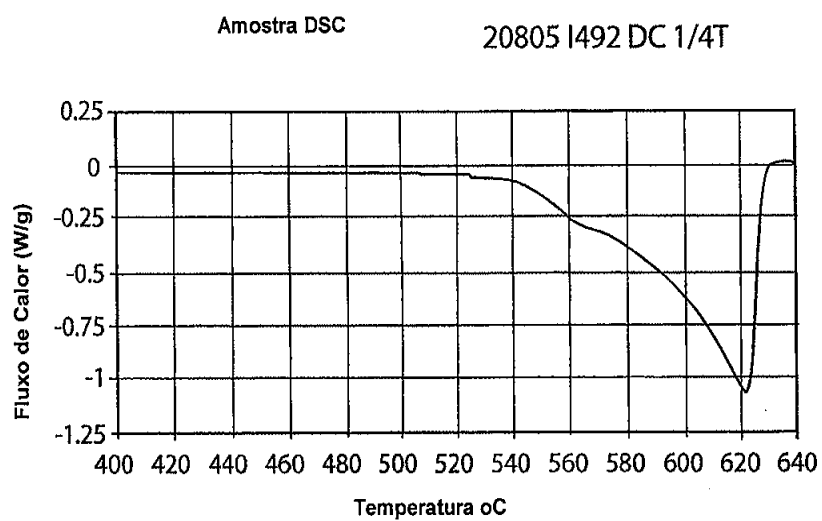


Fig. 35

RESUMO

“MÉTODOS DE LINGOTAR UM METAL, DE PRODUZIR UM ARTIGO
DE CHAPA FINA METÁLICA E UM LINGOTE E DE AQUECER E DE
LAMINAR A QUENTE UM LINGOTE DE METAL, LINGOTE DE
5 METAL E MÁQUINA PARA LINGOTAR UM METAL”

É descrito um método de lingotar um metal com uma
microestrutura que facilita trabalho posterior, tais como laminação a quente e
a frio. O metal é lingotado em um molde de lingotamento de resfriamento
direto, ou similares, que direciona um jato de líquido refrigerante para a
10 superfície externa do lingote para obter um resfriamento rápido. O refrigerante
é removido da superfície em um local onde o lingote embriônico emergente
não está ainda completamente sólido, de maneira tal que o calor latente de
solidificação e o calor sensível do núcleo líquido aumentem a temperatura da
pele sólida adjacente para uma temperatura de convergência que fica acima da
15 temperatura de transição para homogeneização *in situ* do metal. Uma etapa de
homogeneização convencional adicional não é então necessária. A invenção
também diz respeito ao tratamento térmico de tais lingotes antes do trabalho a
quente.