



República Federativa do Brasil

Ministério do Desenvolvimento, Indústria,
Comércio e Serviços

Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) BR 112023009528-0 B1

(22) Data do Depósito: 19/11/2021

(45) Data de Concessão: 05/11/2024

(54) Título: MÉTODO E SISTEMA PARA PRODUZIR UM LINGOTE DE AÇO GRANDE

(51) Int.Cl.: B22D 18/02; B22D 27/04; B22D 7/10; C03B 37/00; C03B 37/02; (...).

(30) Prioridade Unionista: 20/11/2020 US 63/116,455.

(73) Titular(es): INDUCTOTHERM CORP..

(72) Inventor(es): SATYEN N. PRABHU; MIKE MAOCHANG CAO; NIER WU.

(86) Pedido PCT: PCT US2021060097 de 19/11/2021

(87) Publicação PCT: WO 2022/109273 de 27/05/2022

(85) Data do Início da Fase Nacional: 17/05/2023

(57) Resumo: SISTEMA E MÉTODO PARA PRODUZIR UM LINGOTE DE AÇO GRANDE. O lingotamento de aço grande é realizado com um dispositivo de aquecimento por indução suspenso superior fornecido com potência variável e frequência variável de uma fonte de energia. Pelo aquecimento por indução e agitação providos pelo dispositivo de aquecimento por indução suspenso superior, a solidificação do metal avança progressivamente para cima de baixo para cima, e o metal fundido superior em uma parte do alimentador compensa a contração do metal solidificado inferior na parte principal. As inclusões são removidas seletivamente do metal fundido por uma força de agitação eletromagnética variável e a formação de defeitos de fundição é suprimida.

MÉTODO E SISTEMA PARA PRODUZIR UM LINGOTE DE AÇO GRANDE

Referência Cruzada a Pedidos Relacionados

[001] Esse pedido reivindica o benefício de Pedido Provisório dos Estados Unidos da América Nº 63/116.455, depositado em 20 de novembro de 2020, aqui incorporado por referência em sua totalidade.

Campo da Invenção

[002] Esta invenção é sobre lingotamento de metal de grande volume em geral e particularmente sobre lingotamento de aço de grande volume, para a qual uma bobina em formato de panqueca ou dispositivo de aquecimento por indução semelhante é suspenso sobre a superfície superior do metal fundido para fornecer potência de aquecimento induzida e força de agitação eletromagnética no material fundido no molde. O processo do aquecimento por indução e da agitação eletromagnética retardará a solidificação do material na parte do molde superior à linha de solidificação para garantir que o metal fundido na parte superior resfrie e solidifique mais lentamente que na parte inferior. Os objetivos gerais são garantir que a solidificação do metal avance progressivamente para cima de baixo para cima, de modo que o metal fundido superior compense a contração do metal solidificado inferior e os defeitos seletivos sejam removidos pela força de agitação com potência variável e frequência variável fornecidas ao dispositivo de aquecimento por indução. Os benefícios desta técnica são reduzir os defeitos de fundição e melhorar a qualidade dos lingotes finais.

Fundamentos da Invenção

[003] A fundição de lingotes de aço de grande volume demanda um tempo considerável devido ao grande volume substancial de material fundido no molde. Correspondentemente, pode ocorrer contração significativa no lingote durante o processo de solidificação, que trará grandes defeitos estruturais e por fim deteriorará a qualidade dos produtos fundidos.

Consequentemente, abordagens de fundição apropriadamente projetadas para otimizar principalmente o processo de solidificação são desejadas.

[004] O processo típico de fundição para lingotes de aço de grande volume inclui despejar o material fundido no molde e resfriar o metal fundido até que esteja completamente solidificado. Esse processo requer regularmente um espaço de um alimentador, um vazio extra no molde que é preenchido com material fundido para compensar a contração durante a solidificação. Quando o aço é despejado no molde de lingote, a solidificação progressiva começa nas paredes e na base do molde, movendo-se para dentro em direção ao centro térmico ou eixo geométrico. O aço líquido diminui em volume durante e após a solidificação e haverá metal sólido insuficiente para preencher a primeira casca formada se o material fundido no alimentador for solidificado antes ou no mesmo ritmo que o material na parte principal do molde. O resultado é um corpo de aço com cavitação especialmente na região do último metal a solidificar. Tal cavitação também está associada a impurezas, que se concentram, por segregação formando uma distribuição indesejável de elementos indesejáveis no produto final.

[005] Convencionalmente, há uma variedade de abordagens que foram adaptadas para manter o material no alimentador no estado fundido até que o metal na parte principal do molde de lingote tenha solidificado completamente. Baseia-se na percepção de que manter o metal fundido solidificando progressivamente para cima de baixo para cima é crucial para a qualidade dos produtos finais.

[006] A patente coreana nº KR10 2123914B1 (doravante denominada Patente KR '914) descreve uma técnica de lingotamento de aço empregando um dispositivo de aquecimento por indução elétrica em formato de panqueca com bobina interna disposta em formato de espiral e rejuntada por refratário, que é montado e suspenso sobre o topo do molde. O procedimento de lingotamento por esta técnica compreende quatro etapas: a

primeira etapa é despejar o aço fundido no molde, por exemplo, através de uma entrada de fundo; a segunda etapa é adicionar material gerador de calor e material isolante térmico na superfície superior do aço fundido no molde; a terceira etapa é abaixar o dispositivo de aquecimento por indução para o local necessário adjacente à superfície superior do metal fundido; e a quarta etapa é aplicar uma corrente alternada de frequência especificada à bobina para aquecer o metal até que esteja totalmente solidificado. O benefício dessa técnica é manter a parte superior do metal fundido para garantir que a solidificação avance para cima de baixo para cima progressivamente. Portanto, o metal fundido superior compensará a contração do metal solidificado inferior e reduzirá os defeitos estruturais.

[007] Na patente KR '914, o dispositivo de aquecimento por indução suspenso junto com o agente de aquecimento (material) provido e o agente de isolamento térmico (material) destinam-se a manter o metal na parte superior do molde fundido, o que é crucial para eliminar os defeitos internos dos produtos finais. Os defeitos estruturais dos produtos finais incluem macrossegregação, porosidade de contração e inclusão. Em termos de eliminação da inclusão, os benefícios do aquecimento por indução são o gerenciamento da direção da solidificação e o controle de todo o tempo de solidificação.

[008] Se a aplicação for fundição de aço, as inclusões não metálicas serão classificadas como inclusões nativas e inclusões exógenas por suas fontes. As inclusões nativas são produtos de desoxidação ou precipitados formados durante os processos de resfriamento e solidificação. Por exemplo, matérias não metálicas aprisionadas por dendritos em crescimento. As inclusões exógenas surgem de reações químicas e mecânicas não intencionais entre o aço fundido e seus ambientes, o que levará a defeitos no lingote, como porosidade e orifícios. Algumas inclusões não metálicas tendem a fluir para a parte superior do metal fundido e ficam presas na escória e podem ser

descartadas cortando o produto final na extremidade. O corte descartado é inutilizável e geralmente ocupa 13 a 15% do produto final.

[0009] Há uma demanda constante por aços limpos, que são os materiais isentos de defeitos e utilizados em aplicações desafiadoras, como peças automotivas e componentes utilizados em ambientes corrosivos.

[0010] Um objetivo da presente invenção é reduzir ainda mais os defeitos em produtos de lingote de fundição variando de forma coordenada a potência induzida e a frequência fornecida ao dispositivo de aquecimento por indução suspenso.

Breve Sumário da Invenção

[0011] Em um aspecto, a presente invenção compreende um sistema e um método dedicados a grandes aplicações de fundição em moldes de lingotes, em que um dispositivo de aquecimento por indução elétrica é empregado para manter a porção superior do metal fundido e o processo de solidificação avança para cima de baixo para cima progressivamente por induzir energia térmica e força de agitação eletromagnética no metal de fundição através de uma bobina de aquecimento por indução fornecida com corrente alternada de uma fonte de energia tendo uma potência variável e uma saída de frequência variável. A vantagem de manter a parte superior do metal de fundição fundido e empregar a força de agitação eletromagnética é reduzir substancialmente os defeitos estruturais e melhorar a qualidade dos produtos de lingotes finais.

[0012] Em outro aspecto, a presente invenção compreende um dispositivo de aquecimento por indução montado e suspenso sobre o topo do molde de fundição e uma fonte de energia com uma potência variável e uma saída de frequência variável provendo energia elétrica ao dispositivo de aquecimento por indução para aquecer o aço fundido no molde de fundição para produção de lingotes. O dispositivo de aquecimento por indução compreende: uma bobina de indução; um refratário para embutir a bobina de

indução dentro do mesmo para prender a bobina e reduzir a dissipação de calor do metal fundido; e um dispositivo de içamento para elevar ou abaixar a bobina de indução. A fonte de energia é configurada para prover corrente alternada com uma gama de diferentes taxas de frequências e potência, que melhor corresponde aos requisitos de energia de aquecimento e força de agitação do processo de solidificação para reduzir os defeitos de fundição.

[0013] Em outro aspecto, a presente invenção é um método de produto de lingote que emprega um dispositivo de aquecimento por indução suspenso sobre um molde de fundição em que uma fonte de energia de potência variável e frequência variável fornece energia ao dispositivo de aquecimento por indução. O processo de lingotamento por esta técnica compreende quatro etapas: a primeira etapa é despejar o aço fundido no molde por uma entrada de fundo; a segunda etapa é adicionar material gerador de calor e isolante térmico na superfície superior do aço fundido no molde; a terceira etapa é abaixar o dispositivo de aquecimento por indução até o local para pré-aquecer o refratário do dispositivo de aquecimento por indução a uma temperatura de pré-aquecimento do refratário; e a quarta etapa é aplicar uma corrente alternada com uma frequência de aquecimento de metal fundido da fonte de energia de potência variável e de frequência variável à bobina para aquecer o metal de fundição, mantendo a parte superior do metal fundido quando a solidificação começa de baixo para cima progressivamente e acelerando a remoção de inclusões aumentando a velocidade de agitação eletromagnética pelo controle da saída de frequência variável da fonte de energia de potência variável e de frequência variável.

[0014] Para certas aplicações deste método, a cavidade do molde de lingote pode ser dividida em uma parte principal e uma parte do alimentador. Durante a quarta etapa apresentada acima, o processo de aquecimento pode ser iniciado no momento em que a solidificação na parte principal estiver completamente concluída e o metal no alimentador ainda estiver fundido.

[0015] Em outro aspecto, a presente invenção compreende um aquecedor de indução superior que é montado e suspenso sobre o topo do molde de fundição e uma fonte de energia tendo uma potência variável e uma saída de frequência variável que provê energia elétrica ao aquecedor de indução. O aquecedor de indução superior e a fonte de energia são configurados para produção de lingotes de metal. O aquecedor de indução superior é configurado como um refratário em formato de panqueca que incorpora uma bobina de indução disposta em um formato de espiral. Dentro do refratário em formato de panqueca, a bobina de indução é rejuntada e lâ cerâmica (cerakwool), potência isolante e cimento refratário são usados para cobrir a bobina rejuntada de dentro para fora camada por camada. Essas estruturas formam o corpo sólido do aquecedor por indução que pode ser levantado ou abaixado pelo equipamento de içamento.

[0016] As modalidades acima da presente invenção são particularmente aplicáveis à adaptação de lingotes existentes, uma vez que o dispositivo de aquecimento por indução elétrica é posicionado sobre o topo da superfície do metal líquido. No entanto, a invenção não está limitada a aplicações de adaptação.

[0017] Esses e outros aspectos da presente invenção são apresentados nesse relatório descritivo e nas reivindicações anexas.

Breve Descrição dos Desenhos

[0018] Os desenhos, conforme brevemente resumidos abaixo, são providos para entendimento exemplificativo da invenção, e não limitam a invenção como adicionalmente apresentado nesse relatório descritivo e nas reivindicações anexas.

[0019] A figura 1 é uma representação esquemática simplificada de uma modalidade de um sistema de lingotamento de aço fundido da presente invenção.

[0020] A figura 2(a) é uma representação esquemática de um grande molde de fundição preenchido com aço fundido no início da solidificação direcional.

[0021] A figura 2(b) é uma representação esquemática de quando metade do corpo principal de aço fundido solidificou.

[0022] A figura 2(c) é uma representação esquemática de quando todo o aço fundido solidificou.

[0023] A figura 3(a) e a figura 3(b) são modelos paramétricos de uma faixa selecionável coordenada de valores de tensão e corrente (potência) e valores de frequência como saídas de uma fonte de energia de potência variável e de frequência variável para uma bobina de aquecimento por indução elétrica em um exemplo da presente invenção na produção de um grande lingote de aço de 100 toneladas métricas com uma potência induzida nominal de 250 kW da fonte de energia.

[0024] A figura 4(a) e a figura 4(b) são modelos paramétricos de uma faixa selecionável coordenada de valores de tensão e corrente (potência) e valores de frequência como saídas de uma fonte de energia de potência variável e de frequência variável para uma bobina de aquecimento por indução elétrica em um exemplo da presente invenção na produção de um grande lingote de aço de 100 toneladas métricas com uma potência induzida nominal de 325 kW da fonte de energia.

[0025] A figura 5(a) e a figura 5(b) são modelos paramétricos de uma faixa selecionável coordenada de valores de tensão e corrente (potência) e valores de frequência como saídas de uma fonte de energia de potência variável e de frequência variável para uma bobina de aquecimento por indução elétrica em um exemplo da presente invenção na produção de um grande lingote de aço de 150 toneladas métricas com uma potência induzida nominal de 250 kW da fonte de energia.

[0026] A figura 6(a) e a figura 6(b) são modelos paramétricos de uma faixa selecionável coordenada de valores de tensão e corrente (potência) e valores de frequência como saídas de uma fonte de energia de potência variável e de frequência variável para uma bobina de aquecimento por indução elétrica em um exemplo da presente invenção na produção de um grande lingote de aço de 150 toneladas métricas com uma potência induzida nominal de 350 kW da fonte de energia.

Descrição Detalhada da Invenção

[0027] Um lingote fundido de aço “grande” é aqui definido como um lingote tendo uma seção transversal com pelo menos 0,10 metros quadrados de área e de formato redondo, quadrado, retangular ou outros.

[0028] A figura 1 ilustra uma modalidade do sistema 10 da presente invenção para produzir um grande lingote de aço por solidificação de um aço fundido em um molde de fundição. Na figura 1 molde de fundição 80 é preenchido com aço fundido através da entrada de molde de fundo 80' e um dispositivo de aquecimento por indução elétrica 14 é posicionado sobre o topo do molde de fundição 80. O aço fundido (também conhecido como “metal líquido”) é despejado através da entrada de molde de fundo para altura de preenchimento do metal líquido 78. Em outras modalidades da invenção, é usado um molde de fundição de despejo superior. Quando o molde de fundição 80 é preenchido para altura de preenchimento do metal líquido 78 com aço fundido, a solidificação direcional do aço fundido começa a formar o produto de lingote de aço final. O aço fundido 70 no molde de fundição (do fundo de molde 80a até a altura de preenchimento do metal líquido 78 é designado como parte principal 70a e parte do alimentador 70b. Nesta representação esquemática, a parte do alimentador começa na altura do molde de fundição 74 e termina na altura de preenchimento do metal líquido 78. O tamanho da parte do alimentador 70b pode ser determinado por um versado

na técnica dado o tamanho do lingote de aço grande e os parâmetros do processo de solidificação para uma aplicação particular.

[0029] Um primeiro passo no processo é determinar a magnitude da potência induzida para o aço fundido no molde. Em uma modalidade da presente invenção, um valor inicial de potência induzida é selecionado como 10 kW por metros quadrados da área da superfície superior do aço fundido no molde de fundição.

[0030] Em modalidades alternativas da invenção, o dispositivo de aquecimento por indução elétrica 14 compreende uma bobina de aquecimento por indução elétrica; uma bobina de aquecimento por indução enrolada em espiral plana; ou uma bobina de aquecimento por indução elétrica, pelo menos parcialmente envolta em um refratário. A Patente KR '914 descreve uma bobina de aquecimento em formato de panqueca envolta em um refratário como um exemplo de um dispositivo de aquecimento por indução elétrica adequado para a presente invenção. Preferivelmente, a bobina ou bobinas são configuradas para serem inicialmente colocadas adjacentes à área de superfície superior do aço fundido no molde de fundição na altura de preenchimento do metal líquido 78.

[0031] A distância de deslocamento indicada como d_{os} na figura 1 é a distância entre a área de superfície superior do aço fundido até o fundo do dispositivo de aquecimento por indução 14. O dispositivo de aquecimento por indução elétrica 14 pode ser montado de forma móvel acima da área de superfície superior do aço fundido por meio de um aparelho de elevação e abaixamento adequado, conforme conhecido na técnica. A Patente KR '914 descreve um dispositivo de elevação e abaixamento para elevar ou abaixar um dispositivo de aquecimento em formato de panqueca como um exemplo de um aparelho de elevação e abaixamento adequado para a presente invenção. Em algumas modalidades da invenção, a distância d_{os} é alterada durante a solidificação direcional do metal fundido que forma o lingote de aço grande,

elevando ou diminuindo o dispositivo de aquecimento por indução. Quando o fundo do dispositivo de aquecimento por indução é movido para mais perto da superfície do metal líquido, a eficiência elétrica é aumentada para uma determinada potência para o metal líquido, o que resulta na redução da potência, tensão e corrente totais da saída de uma fonte de energia PS de potência variável e frequência variável (VP/VF), enquanto a força de repulsão eletromagnética permanece a mesma, pois a força de Lorentz é proporcional à potência para metal líquido.

[0032] Em algumas modalidades da invenção, o molde de fundição tem uma seção de molde superior, que cobre a seção de molde de fundo contendo o aço fundido para formar um volume de molde interior totalmente fechado e o dispositivo de aquecimento por indução é posicionado em relação à seção de molde superior para fornecer calor induzido durante a solidificação direcional do grande lingote de aço.

[0033] O aço fundido 70 no molde de fundição 80 é mostrado em diagrama na altura de preenchimento do metal líquido 78 na figura 1 no início do processo de solidificação direcional. Após a solidificação direcional de todo o metal fundido ter sido concluída, um grande lingote de aço solidificado final 90, conforme mostrado na figura 2(c).

[0034] A magnitude de potência variável e a frequência variável são fornecidas a partir da fonte de energia PS VP/VF mostrada na figura 1. Em algumas modalidades da invenção, a potência variável é provida variando a saída de magnitude de tensão da fonte de energia PS VP/VF, por exemplo, de um controlador de saída de tensão variável associado à fonte de energia PS VP/VF. Em outras modalidades da invenção, a potência variável é provida variando uma combinação de saídas de magnitude de tensão e de magnitude de corrente da fonte de energia PS VP/VF, por exemplo, de um controlador de saída de tensão e corrente variável associado à fonte de energia PS VP/VF.

[0035] Os valores de frequência, tensão e corrente variáveis de corrente elétrica alternada que são fornecidos da fonte de energia PS VP/VF para o dispositivo de aquecimento por indução 14 são determinados por uma duração particular do processo de solidificação direcional e a duração particular do processo de solidificação direcional é ainda determinada pelo tamanho e formato do lingote, e composição química do material de fundição. Os parâmetros de controle do processo são selecionados para garantir que o metal fundido na parte do alimentador 70b não começarão a solidificar até que o processo de solidificação direcional na parte principal 70a esteja completamente concluído na formação da parte principal do lingote.

[0036] Em algumas modalidades da invenção, a frequência variável é selecionada para controlar a profundidade de referência da corrente penetrada no aço fundido de modo que a profundidade de referência da corrente penetrada permaneça dentro da parte do alimentador 70b. Com a profundidade de referência de corrente limitada à parte do alimentador, o aço fundido é mantido no estado fundido na parte do alimentador com o calor gerado na parte do alimentador sendo transferido para a parte principal por condução e convecção para garantir a solidificação direcional na parte principal.

[0037] Em algumas modalidades da invenção, a saída de frequência variável da fonte de energia PS é selecionada para inibir que defeitos de fundição surjam na parte principal 70a solidificação direcional com a frequência selecionada para formar um tipo particular de padrão de agitação eletromagnética e velocidade dependendo do tipo de defeitos de fundição.

[0038] Em algumas modalidades da invenção, uma Interface Homem-Máquina pode ser utilizada para armazenar os valores de saída de potência variável e os valores de saída de frequência variável da fonte de energia elétrica para um futuro processo de lingotamento grande. Em algumas modalidades da invenção, o controle direcional do processo de solidificação

do lingote em tempo real com a fonte de energia PS VP/VF para a bobina de indução no dispositivo de aquecimento por indução 14 para um determinado molde de fundição e fórmula de fundição de liga de aço usados para construir modelos paramétricos de controle de potência e frequência do processo para lingotamento futuro no mesmo molde de fundição com a mesma fórmula de fundição de liga pode ser armazenado em uma unidade de memória de uma Interface Homem-Máquina (HMI) para lingotamentos futuros.

[0039] Em algumas modalidades da invenção, os parâmetros de controle do processo da solidificação direcional para um determinado molde de fundição e tipo de liga de aço podem ser armazenados em um dispositivo eletrônico adequado, como um componente de memória de estado sólido em uma Interface Homem-Máquina (HMI) mostrada na figura 1 para uso futuro. A taxa de potência e a frequência e os parâmetros de controle estabelecidos podem ser fixados como uma formulação por um software de processo de fundição executado em um processador de sistema na HMI e armazenado no componente de memória de estado sólido da HMI para uso posterior da formulação.

[0040] A figura 3(a) a figura 6(b) ilustra modelos paramétricos para quatro exemplos da presente invenção para fundição controlada com lingotamento de aço grande no molde com potência variável induzida e frequência variável aplicada à área de superfície superior do metal fundido no modelo.

[0041] A metade superior de cada figura 3(a) a figura 6(a) plota relações paramétricas típicas entre a magnitude da tensão de saída variável da fonte de energia (valores do eixo geométrico vertical à direita) e a magnitude da corrente variável (valores do eixo geométrico vertical à esquerda) com valores de frequência variável sendo referenciados no eixo geométrico horizontal.

[0042] A metade inferior de cada figura traça relações paramétricas típicas entre força de repulsão eletromagnética (valores do eixo geométrico vertical à direita) e velocidade do metal líquido (valores do eixo geométrico vertical à esquerda) com valores de frequência variável sendo o eixo geométrico horizontal.

[0043] O termo “Antes da Solidificação” em um gráfico refere-se a parâmetros que se aplicam quando um molde foi preenchido com metal fundido e todo o aço em um molde está no estado fundido, conforme representado em diagrama na figura 2(a) até metade do metal fundido ter solidificado (90’) conforme representado na figura 2(b). O termo “Meia Solidificação” em um gráfico refere-se a parâmetros que se aplicam após a formação da parte principal do lingote meio solidificada 90’ até que a parte principal do lingote completo e a parte do lingote do alimentador tenham se formado.

Exemplo 1

[0044] O exemplo 1 é ilustrado graficamente na figura 3(a) e na figura 3(b) para um lingotamento de aço de 100 toneladas métricas (mt), em que a magnitude da potência induzida sobre a superfície superior da parte do metal líquido do alimentador 70b da bobina de indução energizada do dispositivo de aquecimento por indução elétrica 14 é mantida em um valor nominal de 250 kW desde o início da solidificação direcional da parte principal 70a após o aço fundido ter preenchido o molde até que a parte principal 70a e a parte do alimentador 70b tenham sido solidificadas direcionalmente para formar o lingote de produto final.

[0045] Gráfico G1.1 (parâmetros de potência) e Gráfico G1.2 (parâmetros de agitação eletromagnética) na figura 3(a) aplicam-se a um processo de solidificação de lingote do Exemplo 1 desde o início da solidificação direcional da parte principal 70a após o aço fundido ter

preenchido o molde até a metade inferior 90' da parte principal 70a ter solidificado conforme ilustrado na figura 2(b).

[0046] Gráfico G1.3 (parâmetros de potência) e Gráfico G1.4 (parâmetros de agitação eletromagnética) na figura 3(b) (Curvas de processo de Meia Solidificação) aplicam-se a um processo de solidificação de lingote do Exemplo 1 após metade da parte principal 70a ter solidificado até que todo o lingote tenha solidificado.

[0047] Para o Exemplo 1, na figura 3(a) a linha de processo de solidificação tracejada A1 foi selecionada para potência variável e parâmetros de agitação desde o início da solidificação direcional da parte principal 70a até que metade da parte principal tenha solidificado. A partir da linha tracejada de processo A1 na figura 3(a), a fonte de energia PS VP/VF produz 7.001 ampères a 976 volts a uma frequência de 1 kHz, resultando em características de agitação eletromagnéticas da velocidade típica do aço fundido de 0,192 metros por segundo (m/s) e uma força de repulsão de Lorentz de 59,3 quilogramas (kg).

[0048] Para o Exemplo 1, na figura 3(b) (Curvas de processo de Meia Solidificação) a linha de processo de solidificação tracejada A2 foi selecionada para potência variável e parâmetros de agitação após a metade da parte principal 70a ter solidificado até o restante da parte principal 70a e a parte do alimentador 70b ter solidificado. A partir da linha tracejada de processo A2 na figura 3(b), saídas da fonte de energia PS VP/VF são ajustadas para 6164,1 amperes a 1,2792 quilovolts (kV) e a uma frequência elevada de 1,5 kHz, resultando em características de agitação eletromagnética da velocidade típica do aço fundido de 0,142 metros por segundo (m/s) e uma força de repulsão de Lorentz de 46 quilogramas (kg) .

Exemplo 2

[0049] O exemplo 2 é ilustrado graficamente na figura 4(a) e na figura 4(b) para um lingotamento de aço de 100 mt, em que a magnitude da potência

induzida sobre a superfície superior da parte do alimentador 70b da bobina de indução energizada do dispositivo de aquecimento por indução elétrica 14 é mantida em um valor nominal de 325 kW desde o início da solidificação direcional da parte principal 70a após o aço fundido ter preenchido o molde até que a parte do corpo principal 70a e a parte do alimentador 70b tenham sido solidificadas direcionalmente para formar o lingote de produto final.

[0050] Gráfico G2.1 (parâmetros de potência) e Gráfico G2.2 (parâmetros de agitação eletromagnética) na figura 4(a) aplicam-se a um processo de solidificação de lingote do Exemplo 2 desde o início da solidificação direcional da parte principal 70a após o aço fundido ter preenchido o molde até que a metade inferior 90' da parte do corpo principal 70a tenha solidificado conforme ilustrado na figura 2(b).

[0051] Gráfico G2.3 (parâmetros de potência) e Gráfico G2.4 (parâmetros de agitação eletromagnética) na figura 4(b) (Curvas de processo de Meia Solidificação) aplicam-se a um processo de solidificação de lingote do Exemplo 2 após metade do corpo principal 70a ter solidificado até que todo o lingote tenha solidificado.

[0052] Para o Exemplo 2, na figura 4(a) a linha de processo de solidificação tracejada B1 foi selecionada para potência variável e parâmetros de agitação desde o início da solidificação direcional da parte principal 70a até metade da parte principal ter solidificado. A partir da linha tracejada B1 do processo na figura 4(a), as saídas da fonte de energia PS VP/VF são ajustadas para 6.460 amperes a 1,779 kV e uma frequência de 2 kHz, resultando em características de agitação eletromagnética da velocidade típica do aço fundido de 0,16 metros por segundo (m/s) e uma força de repulsão de Lorentz de 50,44 quilogramas (kg).

[0053] Para o Exemplo 2, na figura 4(b) (Curvas de processo de Meia Solidificação) a linha de processo de solidificação tracejada B2 foi selecionada até que o restante da parte principal 70a e a parte do alimentador

70b tenham solidificado. A partir da linha tracejada de processo B2 na figura 4(b), as saídas PS da fonte de energia VP/VF são ajustadas para 6.093 amperes a 2,091 kV e uma frequência de 2,5 kHz, resultando em características de agitação eletromagnética da velocidade típica do aço fundido de 0,131 m/s e uma força de repulsão de Lorentz de 44,88 kg (kg).

Exemplo 3

[0054] O exemplo 3 é ilustrado graficamente na figura 5(a) e na figura 5(b) para um lingotamento de aço de 150 mt, em que a magnitude da potência induzida sobre a superfície superior da parte do alimentador 70b da bobina de indução energizada do dispositivo de aquecimento por indução elétrica 14 é mantida em um valor nominal de 250 kW desde o início da solidificação direcional da parte principal 70a após o aço fundido ter preenchido o molde até que as partes principal 70a e do alimentador 70b tenham sido solidificadas direcionalmente para formar o lingote de produto final.

[0055] Gráfico G3.1 (parâmetros de potência) e Gráfico G3.2 (parâmetros de agitação eletromagnética) na figura 5(a) aplicam-se a um processo de solidificação de lingote do Exemplo 3 desde o início da solidificação direcional da parte principal 70a após o aço fundido ter preenchido o molde até a metade inferior 90' da parte principal 70a ter solidificado conforme ilustrado na figura 2(b).

[0056] Gráfico G3.3 (parâmetros de potência) e Gráfico G3.4 (parâmetros de agitação eletromagnética) na figura 5(b) (Curvas de processo de Meia Solidificação) aplicam-se a um processo de solidificação de lingote do Exemplo 3 após metade da parte principal 70a ter solidificado até que todo o lingote tenha solidificado.

[0057] Para o Exemplo 3, na figura 5(a) a linha de processo de solidificação tracejada C1 foi selecionada para potência variável e parâmetros de agitação desde o início da solidificação direcional da parte principal 70a até que a parte principal 70a tenha solidificado. A partir da linha tracejada de

processo C1 na figura 5(a), fonte de energia PS VP/VF produz 7.834,7 amperes a 1,1296 kV e uma frequência de 1 kHz, resultando em características de agitação eletromagnética da velocidade típica do aço fundido de 0,216 metros por segundo (m/s) e uma força de repulsão de Lorentz de 86,2 quilogramas (kg).

[0058] Para o Exemplo 3, na figura 5(b) (Curvas de processo de Meia Solidificação) a linha de processo de solidificação tracejada C2 foi selecionada para potência variável e parâmetros de agitação após a metade da parte principal 70a ter solidificado até o restante da parte principal 70a e a parte do alimentador 70b terem solidificado. A partir da linha tracejada de processo C2 na figura 5(b), as saídas da fonte de energia PS VP/VF são ajustadas para 7.022,1 ampères a 1,5135 kV e uma frequência de 1,5 kHz, resultando em características de agitação eletromagnética da velocidade típica do aço fundido de 0,16 m/s e uma força de repulsão de Lorentz de 70 kg (kg).

Exemplo 4

[0059] O exemplo 4 é ilustrado graficamente na figura 6(a) e na figura 6(b) para um lingotamento de aço de 150 mt, em que a magnitude da potência induzida sobre a superfície superior da parte do alimentador 70b da bobina de indução energizada do dispositivo de aquecimento por indução elétrica 14 é mantida em um valor nominal de 325 kW desde o início do solidificação direcional da parte principal 70a após o aço fundido ter preenchido o molde até que a parte principal 70a e a parte do alimentador 70b tenham sido solidificadas direcionalmente para formar o lingote de produto final.

[0060] Gráfico G4.1 (parâmetros de potência) e Gráfico G4.2 (parâmetros de agitação eletromagnética) na figura 6(a) aplicam-se a um processo de solidificação de lingote do Exemplo 4 desde o início da solidificação direcional da parte principal 70a após o aço fundido ter preenchido o molde até metade da metade inferior 90' da parte principal 70a ter solidificado conforme ilustrado na figura 2(c).

[0061] Gráfico G4.3 (parâmetros de potência) e Gráfico G4.4 (parâmetros de agitação eletromagnética) na figura 6(b) (Curvas de processo de Meia Solidificação) aplicam-se a um processo de solidificação de lingote do Exemplo 4 após metade da parte principal 70a ter solidificado até que todo o lingote tenha solidificado.

[0062] Para o Exemplo 4, na figura 6(a) a linha de processo de solidificação tracejada D1 foi selecionada para potência variável e parâmetros de agitação desde o início da solidificação direcional da parte principal 70a até metade da parte principal ter solidificado. A partir da linha tracejada de processo D1 na figura 6(a), fonte de energia PS VP/VF produz 7.428,2 amperes a 2,1229 kV e uma frequência de 2 kHz, resultando em características de agitação eletromagnética da velocidade típica do aço fundido de 0,185 metros por segundo (m/s) e uma força de repulsão de Lorentz de 78,3 quilogramas (kg).

[0063] Para o Exemplo 4, na figura 6(b) (Curvas de processo de Meia Solidificação) a linha de processo de solidificação tracejada D2 foi selecionada para potência variável e parâmetros de agitação após a metade da parte do corpo principal 70a ter solidificado até o restante da parte principal 70a e a parte do alimentador 70b terem solidificado. A partir da linha tracejada de processo D2 na figura 6(b), as saídas da fonte de energia PS VP/VF são ajustadas para 7.010,0 amperes a 2,5041 kV e uma frequência de 2,5 kHz, resultando em características de agitação eletromagnética da velocidade típica do aço fundido de 0,15 m/s e uma força de repulsão de Lorentz de 70,3 kg (kg).

[0064] Conforme exibido nos exemplos acima, o lingote de 150 mt tem uma área de superfície superior maior de metal líquido e utiliza uma bobina de indução maior no dispositivo de aquecimento por indução elétrica que o lingote de 100 mt. No entanto, o requisito de energia total do lingotamento maior de 150 mt é menos que o do lingotamento de 100 mt, uma

vez que a eficiência da energia elétrica aumenta mais que a área da superfície superior.

[0065] Em algumas modalidades da invenção, se menos agitação for preferida, por exemplo, devido à preocupação de inclusões não metálicas migrarem para a parte principal, uma frequência mais alta é selecionada com alterações coordenadas nas saídas de tensão e corrente da fonte de energia PS VP/VF. Para uma determinada potência de metal líquido, a velocidade do fluxo de metal líquido é inversamente proporcional à raiz quadrada da frequência. Se a frequência for aumentada de 1000 Hz para 3000 Hz, a velocidade diminuirá 1,732 vezes.

[0066] Conforme exibido nos exemplos acima, em algumas modalidades da invenção, a frequência variável fornecida pela fonte de energia PS VP/VF é aumentada coordenadamente com o aumento da tensão e a diminuição da corrente.

[0067] A energia induzida e a força de agitação eletromagnética concentram-se perto da superfície. Eles não são afetados pela profundidade do metal líquido. No entanto, a velocidade do fluxo e o tamanho de cada redemoinho são afetados pela profundidade do metal líquido.

[0068] A maior parte da potência térmica induzida e da força de agitação eletromagnética é produzida dentro de duas vezes a profundidade de referência, o valor determinado pela frequência da corrente elétrica alternada. Eles não são afetados pela profundidade do metal líquido até que a linha de solidificação se mova para o nível de duas vezes a profundidade de referência. No entanto, a velocidade do fluxo do metal líquido e o tamanho de cada redemoinho são afetados pela profundidade do metal líquido visivelmente.

[0069] Através da aplicação da presente invenção, a extremidade inferior do molde é resfriada mais rapidamente e o resfriamento da extremidade superior do molde é retardado e, como resultado, é possível fabricar um lingote de aço de alta qualidade com menos defeitos de

solidificação no produto fundido. Além disso, é possível fabricar produtos de lingotes de alta qualidade por meio de controle preciso de temperatura sem introduzir impurezas nos lingotes por meio do controle coordenado de potência variável e frequência variável aplicadas.

[0070] Embora as modalidades preferidas da presente invenção tenham sido descritas para fins ilustrativos, a presente invenção não está limitada à construção e operação dessas modalidades. Além disso, os versados na técnica podem entender que várias mudanças e modificações podem ser feitas sem se afastar da matéria da descrição. Desse modo, tais alterações e modificações se enquadram no espírito e escopo da descrição.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para produzir um lingote de aço grande mediante solidificação de um aço fundido (70) fornecido a um molde de fundição (80), o aço fundido (70) formando uma parte do alimentador (70b) do aço fundido (70) sobre uma parte principal (70a) do aço fundido (70), o método caracterizado pelo fato de que compreende:

posicionar uma bobina de aquecimento por indução elétrica (14) dentro do molde de fundição (80) sobre uma área de superfície superior do aço fundido (70);

fornecer continuamente uma magnitude de potência variável e uma frequência variável para a bobina de aquecimento por indução elétrica (14);

selecionar um processo de solidificação direcional relativo a cada um de um tamanho do lingote de aço grande, um formato do lingote de aço grande, e uma composição química do aço fundido, o processo de solidificação direcional compreendendo uma faixa de magnitude de potência de solidificação e parâmetros de frequência de solidificação ao longo de uma duração do processo;

ajustar, simultaneamente, a magnitude de potência variável e a frequência variável fornecida à bobina de aquecimento por indução elétrica (14) coordenadamente ao longo da duração do processo para equiparar a magnitude de potência de solidificação e os parâmetros de frequência de solidificação do processo de solidificação direcional selecionado; e,

em que a magnitude de potência de solidificação e os parâmetros de frequência de solidificação são configurados para manter uma potência induzida a partir da bobina de aquecimento por indução elétrica (14) a um nível de potência induzida nominal quando o aço fundido (70) na parte principal (70a) está em um estado fundido até que pelo menos a parte principal (70a) tenha se solidificado e de modo que o aço fundido (70) na

parte do alimentador (70b) seja mantido no estado fundido até depois que uma parte inferior do corpo principal tenha solidificado.

2. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente ajustar a frequência variável fornecida à bobina de aquecimento por indução elétrica (14) para migração de uma ou mais inclusões da parte principal (70a) para a parte do alimentador (70b).

3. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a frequência variável é ajustada para limitar uma profundidade definida de penetração de corrente na parte do alimentador (70b).

4. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a magnitude de potência variável é controlada ajustando-se uma altura da bobina de aquecimento por indução elétrica (14) sobre a área de superfície superior do aço fundido (70).

5. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que ajustar a magnitude de potência variável compreende ajustar uma tensão fornecida e uma corrente fornecida à bobina de aquecimento por indução elétrica (14) por uma escala de um múltiplo de 10 quilowatts por metro quadrado da área de superfície superior do aço fundido (70).

6. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que ajustar a frequência variável compreende controlar uma força de agitação eletromagnética para um padrão de agitação de fluxo de metal líquido e velocidade no aço fundido (70).

7. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente a adição de um material gerador de calor e um material isolante térmico à área de superfície superior antes de posicionar a bobina de aquecimento por indução elétrica (14) sobre a área de superfície superior.

8. Método para produzir um lingote de aço grande mediante

solidificação de um aço fundido (70) fornecido a um molde de fundição (80), o aço fundido (70) formando uma parte do alimentador superior (70b) do aço fundido (70) sobre uma parte principal inferior (70a) do aço fundido (70), o método caracterizado pelo fato de que compreende:

posicionar uma bobina de aquecimento por indução elétrica (14) sobre uma área de superfície superior do aço fundido (70);

fornecer continuamente uma magnitude de potência variável e uma frequência variável para a bobina de aquecimento por indução elétrica (14);

ajustar inicialmente uma tensão fornecida e uma corrente fornecida à bobina de aquecimento por indução elétrica (14) por uma escala de um múltiplo de 10 quilowatts por metro quadrado da área de superfície superior do aço fundido (70); e

ajustar, simultaneamente, a magnitude de potência variável e a frequência variável fornecida à bobina de aquecimento por indução elétrica (14) coordenadamente para manter uma potência induzida a partir da bobina de aquecimento por indução elétrica (14) a um nível de potência induzida nominal quando o aço fundido (70) na parte principal (70a) está em um estado fundido até que pelo menos a parte principal (70a) tenha se solidificado e de modo que o aço fundido (70) na parte do alimentador (70b) seja mantido no estado fundido até que uma parte inferior do corpo principal tenha solidificado.

9. Método de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente controlar a magnitude de potência variável ajustando-se uma altura da bobina de aquecimento por indução elétrica (14) sobre a área de superfície superior do aço fundido (70).

10. Método de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente construir e armazenar um modelo paramétrico da magnitude de potência variável e da frequência

variável desde um início de solidificação até um fim de solidificação, em que o modelo paramétrico é associado com o molde de fundição (80) e uma liga particular do aço fundido (70).

11. Sistema (10) para produzir um lingote de aço grande por uma solidificação de um aço fundido (70) em um molde de fundição (80), sistema esse destinado a realizar o método como definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 7 ou 8 a 10, o sistema (10) caracterizado pelo fato de que compreende:

um lingote de fundição para conter o aço fundido (70), o aço fundido (70) formando uma parte do alimentador (70b) do aço fundido (70) e uma parte principal (70a) do aço fundido (70) disposta abaixo da parte do alimentador (70b) no molde de fundição (80);

uma bobina de aquecimento por indução elétrica (14) posicionada dentro do molde de fundição (80) paralela e próxima a uma área de superfície superior do aço fundido (70) no molde de fundição (80);

em que a bobina de aquecimento por indução elétrica (14) é integralmente suspensa a uma distância de deslocamento (d_{os}) sobre a área de superfície superior do aço fundido (70);

uma fonte de energia elétrica (PS) configurada para fornecimento contínuo de uma saída de potência variável e uma saída de frequência variável para a bobina de aquecimento por indução elétrica (14), a saída de potência variável e a saída de frequência variável, simultaneamente, ajustáveis em uma faixa de potência e uma faixa de frequência para fornecer uma energia de aquecimento induzida e uma força de agitação para manter o aço fundido (70) em um estado fundido na parte do alimentador (70b) até que o aço fundido (70) na parte principal (70a) tenha solidificado;

em que a energia de aquecimento induzida fornecida pela fonte de energia elétrica (PS) para a bobina de aquecimento por indução elétrica (14) é mantida consistentemente a uma potência induzida nominal.

12. Sistema (10) de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato de que a bobina de aquecimento por indução elétrica (14) compreende uma bobina de indução enrolada em espiral plana, em que cada volta da bobina de indução enrolada em espiral plana é coplanar definindo uma bobina de aquecimento em formato de panela.

13. Sistema (10) de acordo com a reivindicação 12, caracterizado pelo fato de que a bobina de indução enrolada em espiral plana é pelo menos parcialmente envolta em um refratário.

14. Sistema (10) de acordo com a reivindicação 12, caracterizado pelo fato de que a bobina de indução enrolada em espiral plana é completamente envolta em um refratário.

15. Sistema (10) de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato de que a saída de potência variável é provida por um controlador de tensão variável.

16. Sistema (10) de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato de que a saída de potência variável é provida por uma tensão variável e um controlador de corrente variável.

17. Sistema (10) de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente um aparelho de elevação e abaixamento configurado para elevar ou abaixar a bobina de aquecimento por indução elétrica (14) sobre a área de superfície superior do aço fundido (70) para seletivamente aumentar e diminuir a distância de deslocamento (d_{os}), respectivamente.

18. Sistema (10) de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente uma Interface Homem-Máquina (HMI) para armazenar os valores de saída de potência variável e os valores de saída de frequência variável da fonte de energia elétrica (PS) para um futuro processo de fundição de lingote grande.

19. Sistema (10) de acordo com a reivindicação 11,

caracterizado pelo fato de que a saída de frequência variável é aumentada coordenadamente com o aumento da tensão e a diminuição da corrente.

20. Sistema (10) de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato de que o molde de fundição (80) compreende uma seção de molde superior e uma seção de molde inferior, a seção de molde superior cobrindo a seção de molde inferior contendo o aço fundido (70) para formar um volume interior de molde completamente envolvido.

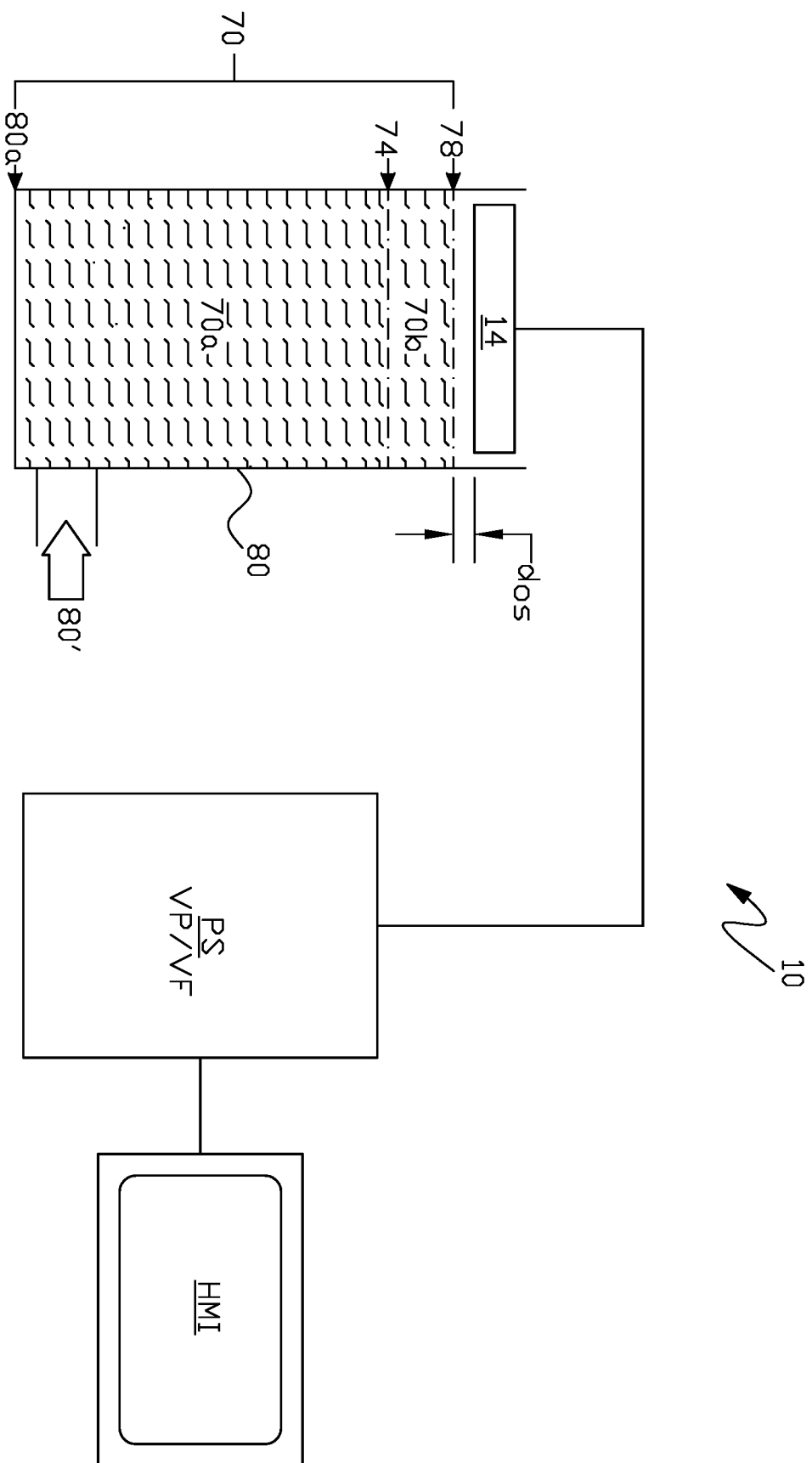


FIG. 1

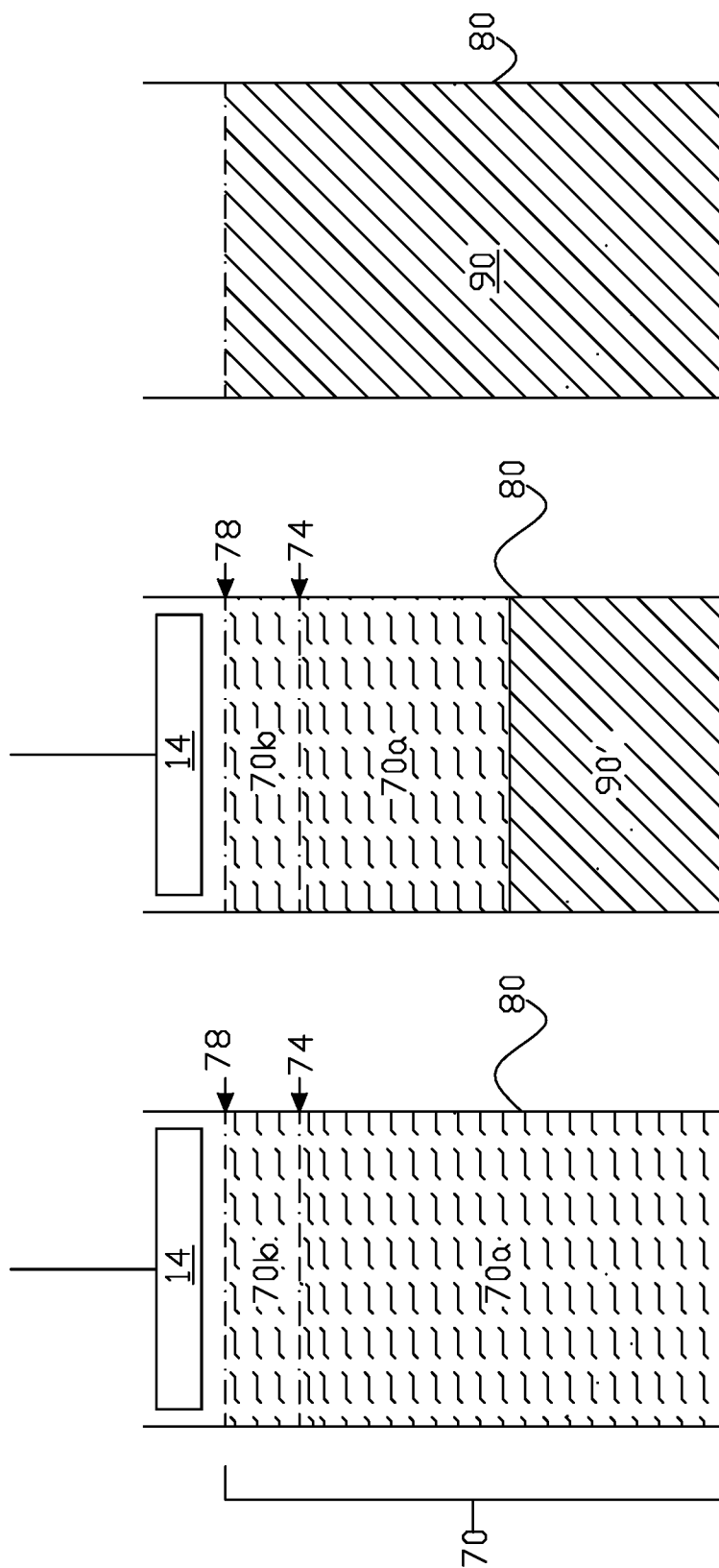


FIG. 2(c)

FIG. 2(b)

FIG. 2(a)

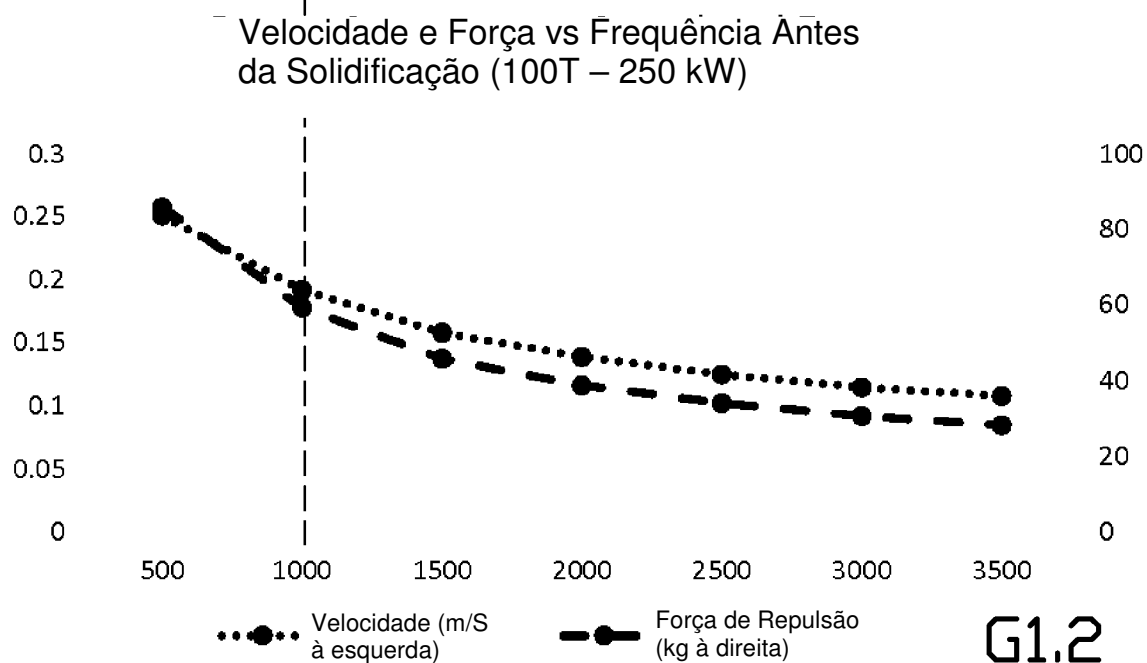
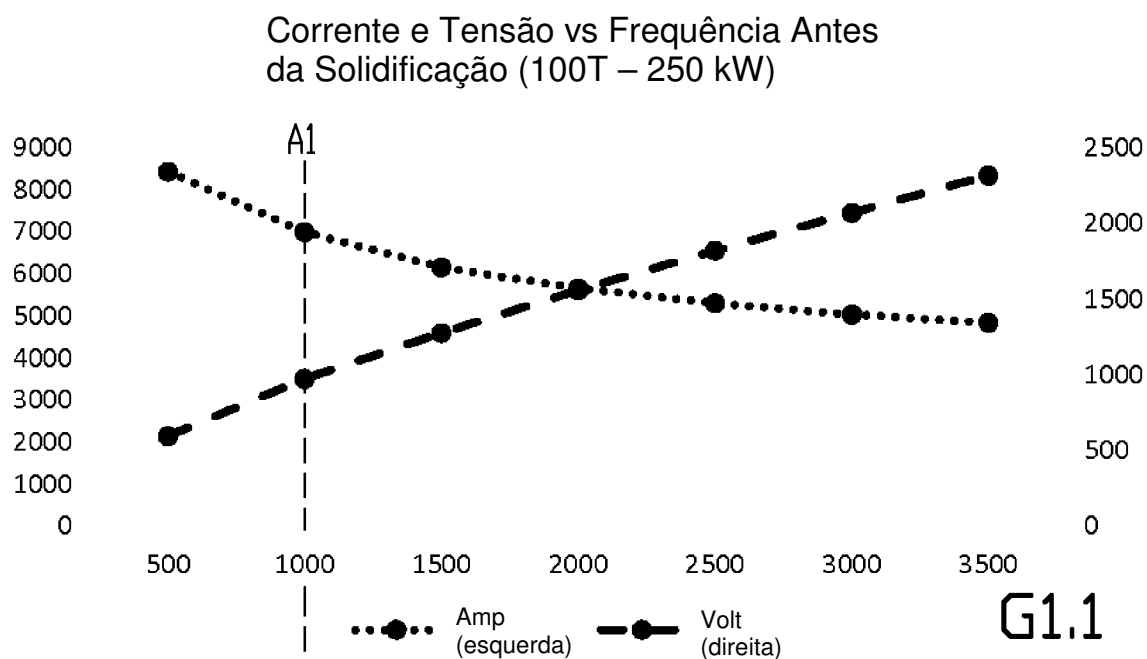


FIG. 3(a)

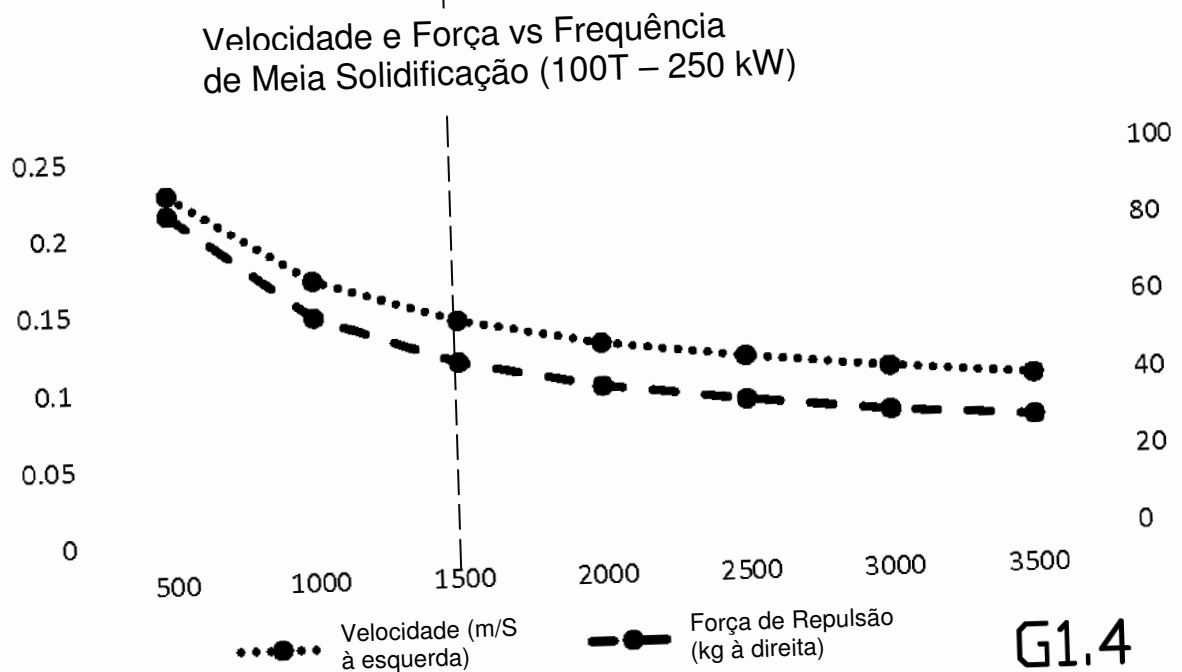
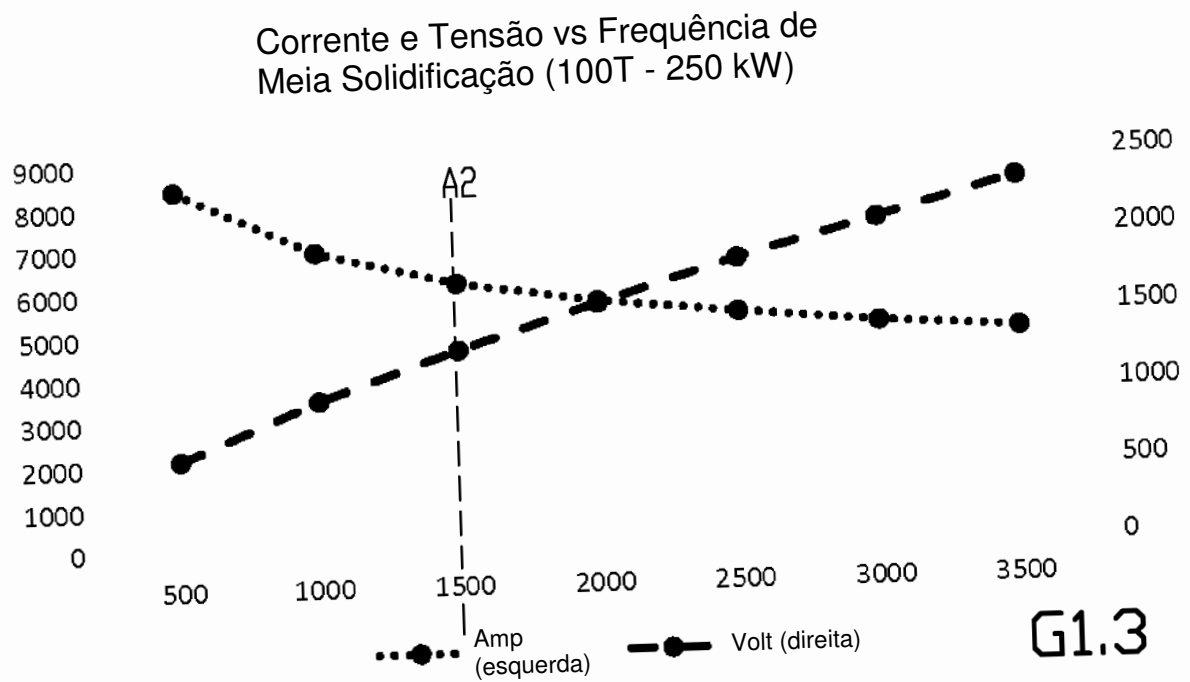
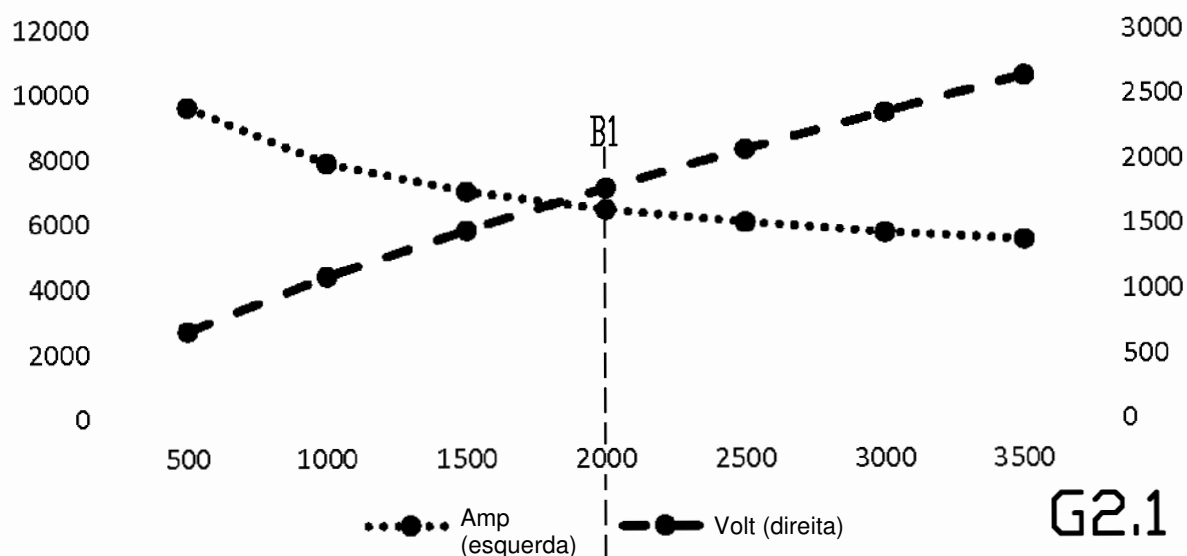


FIG. 3(b)

Corrente e Tensão vs Frequência Antes
da Solidificação (100T – 325 kW)



Velocidade e Força vs Frequência Antes
da Solidificação (100T – 325 kW)

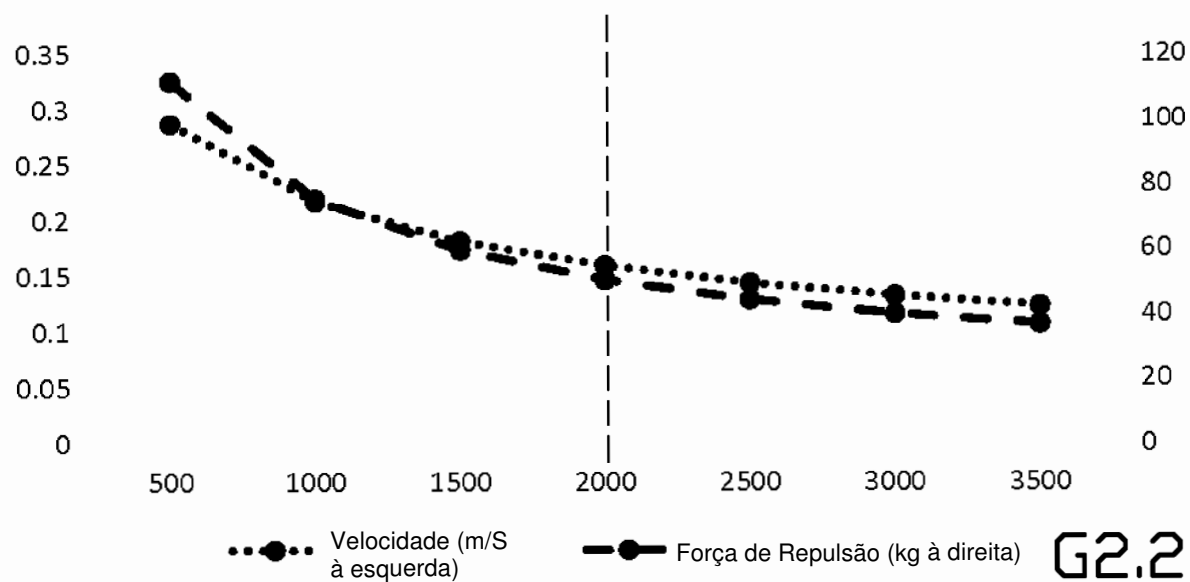
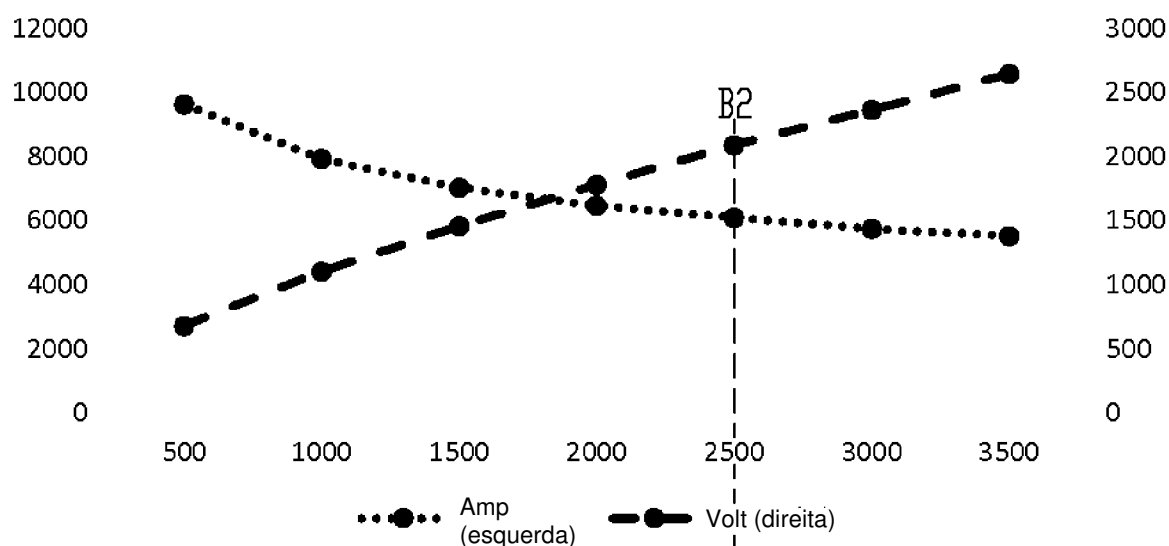


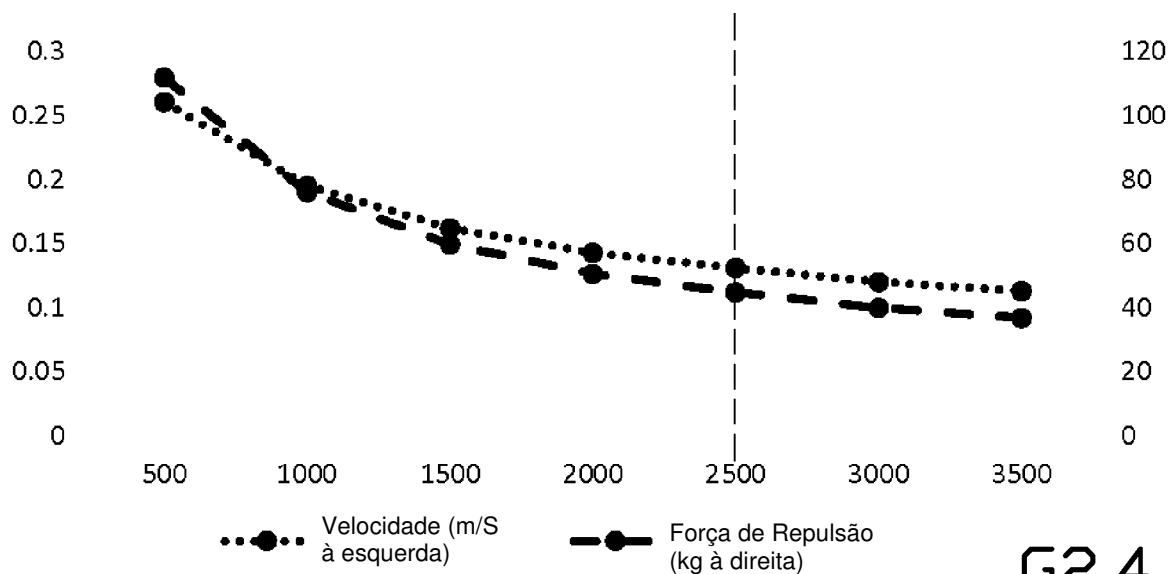
FIG. 4(a)

Corrente e Tensão vs Frequência
de Meia Solidificação (100T - 325 kW)



G2.3

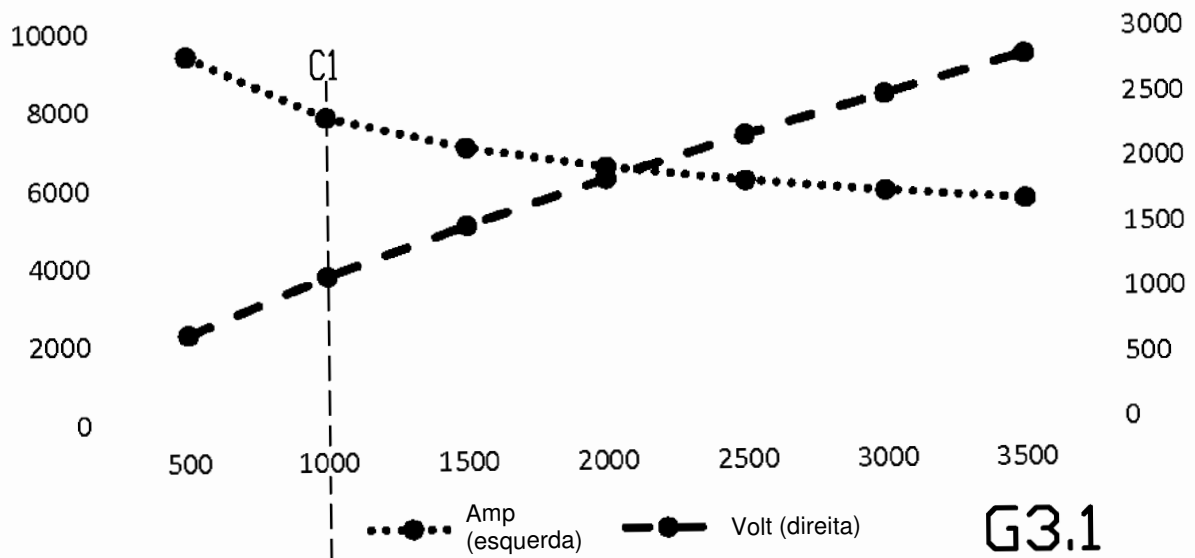
Velocidade e Força vs Frequência de
Meia Solidificação (100T - 325 kW)



G2.4

FIG. 4(b)

Corrente e Tensão vs Frequência Antes
da Solidificação (150T – 250 kW)



Velocidade e Força vs Frequência Antes
da Solidificação (150T – 250 kW)

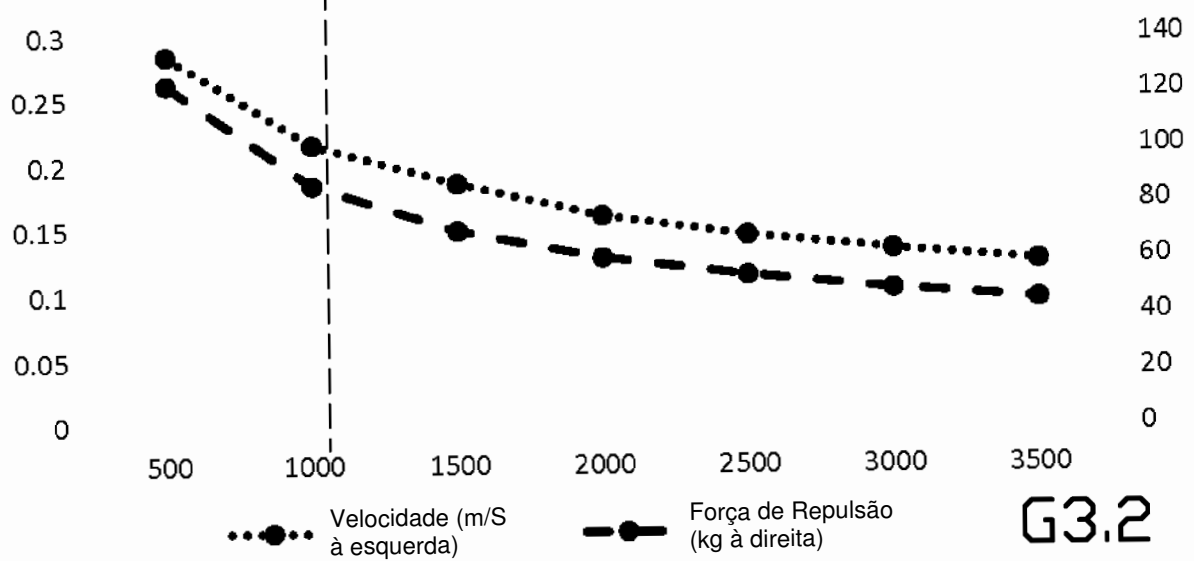
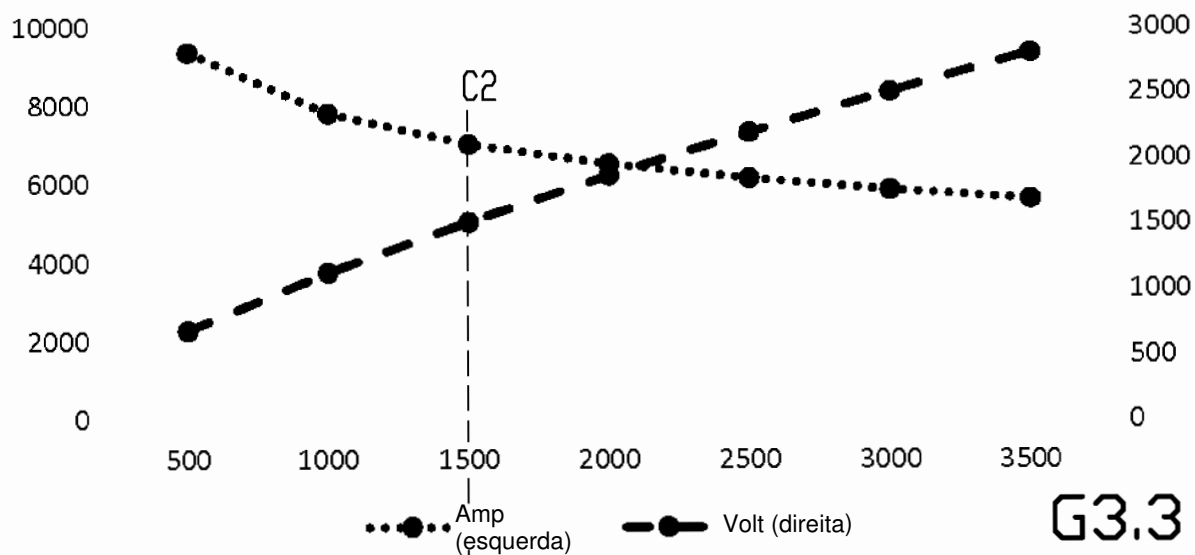


FIG. 5(a)

Corrente e Tensão vs Frequência de
Meia Solidificação (150T - 250 kW)



Velocidade e Força vs Frequência de
Meia Solidificação (150T - 250 kW)

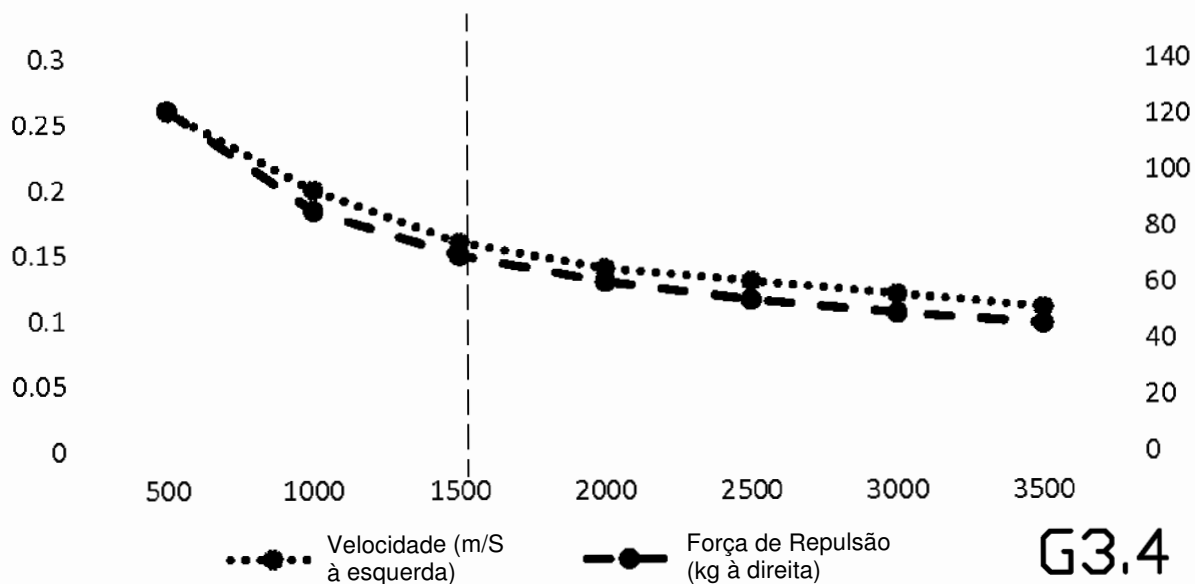


FIG. 5(b)

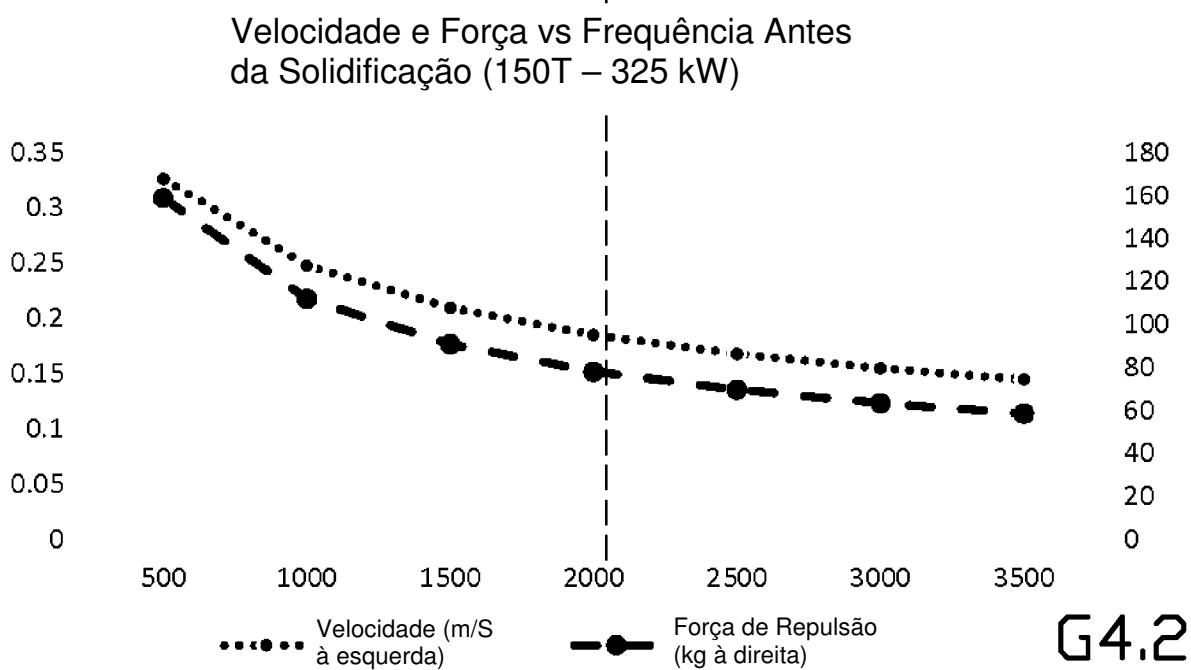
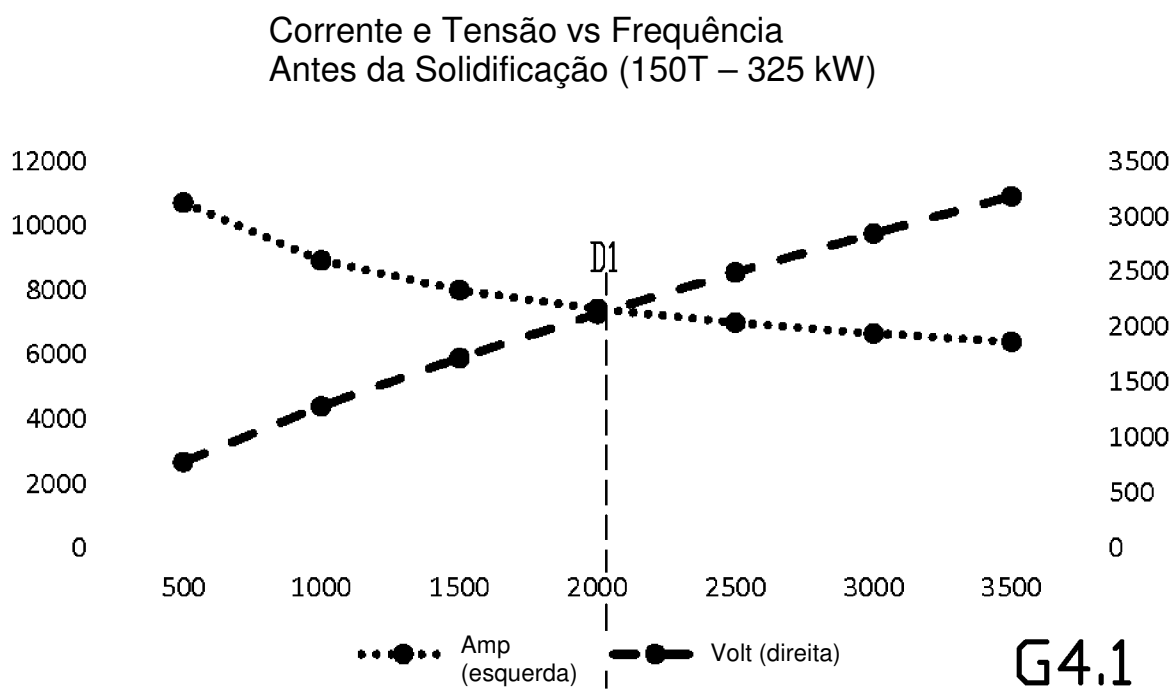
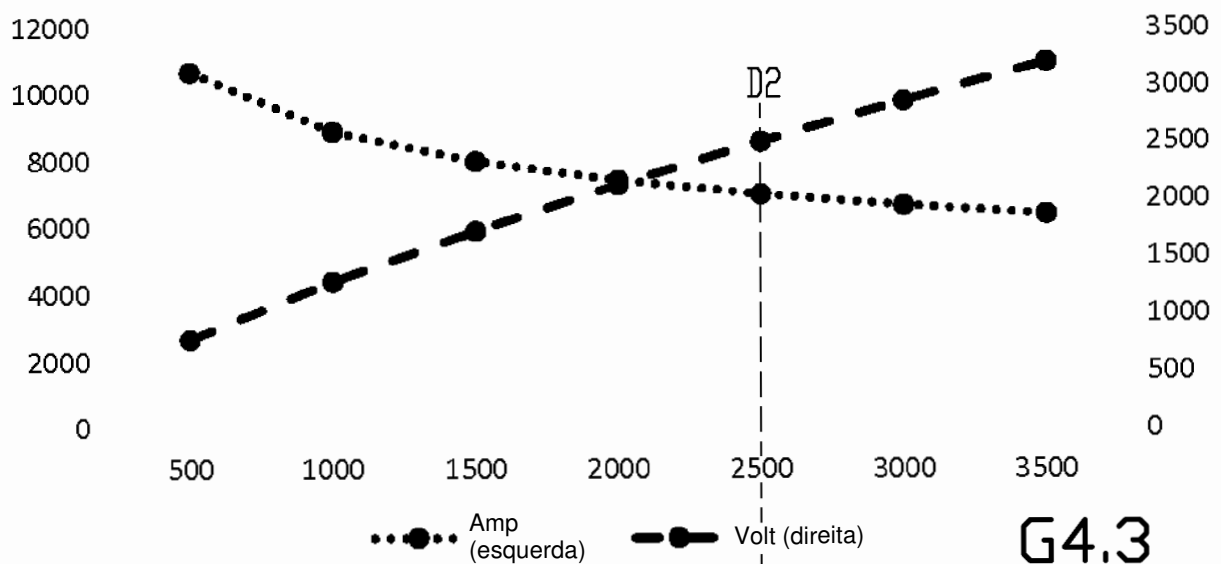


FIG. 6(a)

Corrente e Tensão vs Frequência
de Meia Solidificação (150T - 325 kW)



Velocidade e Força vs Frequência
de Meia Solidificação (150T - 325 kW)

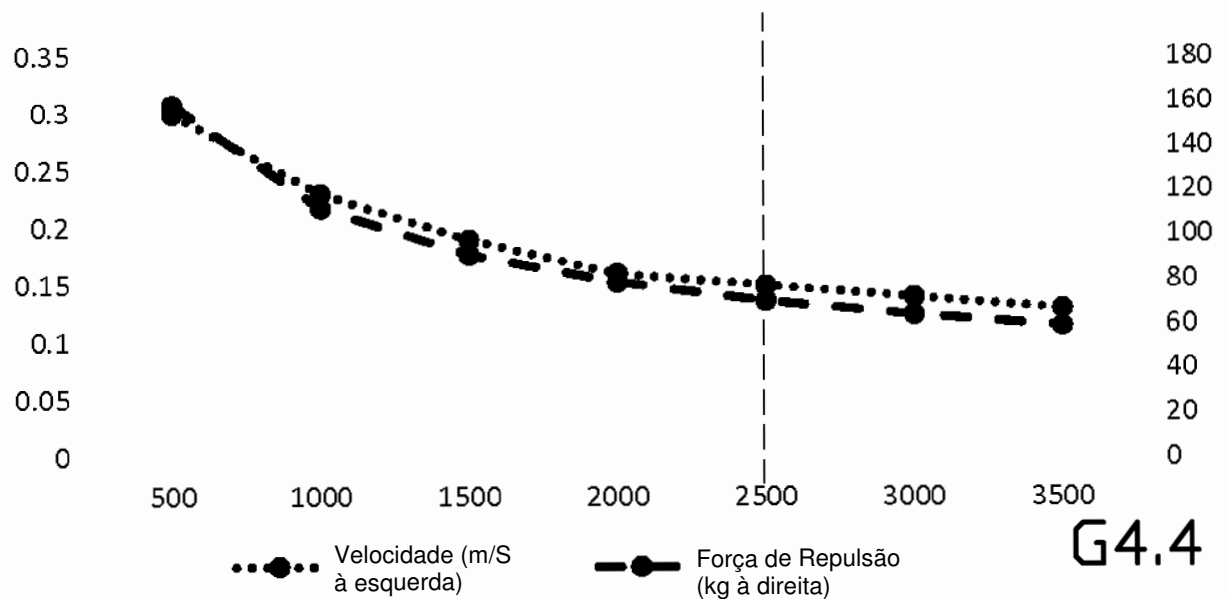


FIG. 6(b)