

## ESTUDO DO PROCESSO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE PLACAS FINAS <sup>(1)</sup>

Wagner Palmiere <sup>(2)</sup>  
Rezende Gomes dos Santos <sup>(3)</sup>  
Paulo Roberto Mei <sup>(4)</sup>  
Geraldo Nonato <sup>(5)</sup>  
Fernando Gentile <sup>(6)</sup>  
Ernandes Rizzo <sup>(7)</sup>  
Emílio Cardoso <sup>(8)</sup>  
Francine de Moraes <sup>(9)</sup>  
Maria Dorotéia Costa Sobral <sup>(10)</sup>

### RESUMO

O desenvolvimento do processo de Lingotamento contínuo de placas finas acoplado à laminação direta destas placas é de fundamental importância para a sobrevivência da siderurgia nacional. Contudo, para que este processo esteja completamente desenvolvido e aplicável industrialmente diversas dificuldades tecnológicas necessitam ser resolvidas e por isto faz-se necessário o estudo e conhecimento do mesmo. O objetivo principal deste trabalho é a apresentação do estudo do processo de Lingotamento contínuo de placas finas de ligas metálicas, através do desenvolvimento de um dispositivo experimental para a simulação da solidificação e resfriamento desta placa fina dentro do molde associada à implementação de tensões de compressão na placa durante sua solidificação. Serão estudados alguns dos efeitos da implementação da deformação do metal durante sua solidificação sobre variáveis como perfil de temperatura do metal durante a solidificação, microestrutura, microestrutura e microsegregações. Este estudo faz parte do projeto "Desenvolvimento do Processo de Lingotamento Contínuo de Placas Finas de Aços" que está sendo realizado no Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, com apoio financeiro da FAPESP, FINEP (Projeto RECOPE) e Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST).

Palavras - chave : Lingotamento contínuo; placas finas; near-net-shape.

1. (1) Trabalho apresentado no 54<sup>o</sup> Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM - São Paulo - São Paulo - 25/07/99 a 29/07/99.

2. (2) a (10) Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

## INTRODUÇÃO

A produção siderúrgica mundial tem passado por diversas mudanças tecnológicas visando a obtenção de produtos com maior nível de qualidade a um menor custo, envolvendo processos com um menor consumo de energia e com um mínimo de poluição ambiental <sup>[1]</sup>. Muitas destas mudanças têm se concentrado em processos de lingotamento contínuo dos aços, nos quais as dimensões dos produtos obtidos são as mais próximas possíveis às dos produtos acabados. Esses processos são conhecidos como "Near Net Shape Casting".

A competitividade e sobrevivência da indústria siderúrgica depende diretamente da redução dos custos de produção acompanhada da melhoria da qualidade de seus produtos. Os custos estão relacionados com o aumento da capacidade de produção e a eliminação de determinadas etapas do processo, visando uma maior eficiência global do mesmo. As indústrias siderúrgicas atuais devem ser não poluentes, energeticamente eficientes e, idealmente, recicladoras de materiais; exigir um baixo investimento de capital e ao mesmo tempo empregar as tecnologias e processos de controle eficientemente; permitir a flexibilidade no processo de produção; garantir uma alta produtividade dos funcionários; estarem localizadas próximas aos clientes e, por fim, possuírem a capacidade de fornecer rapidamente novas linhas de produtos quando for necessário <sup>[2]</sup>.

O desenvolvimento de máquinas de lingotamento contínuo de placas finas torna possível a implantação de linhas de produção de chapas em pequenas plantas industriais com reduzido investimento de capital. Estas miniusinas satisfazem bem mais tais exigências da indústria siderúrgica <sup>[3,4]</sup>. Os produtos obtidos com as máquinas de lingotamento contínuo de placas finas têm dimensões que permitem a sua laminação seqüencial em laminadores de tiras ou chapas a quente de tamanho reduzido, desde que a espessura da placa não requeira o emprego de cadeiras de desbaste, e sim apenas as cadeiras de acabamento. A tecnologia atual apresenta a possibilidade de algumas usinas integradas incorporarem uma máquina de lingotamento de placas finas junto ao conversor LD, sendo que algumas empresas estão estudando esta possibilidade. Entre essas podem ser citadas <sup>[5]</sup> Hoogovens, Iscor, Pohang, Geneva Steel, Acme Steel, Armco, e US Steel. Por isto, o processo de lingotamento contínuo de placas finas é a solução mais aceita dentre os processos "Near Net Shape Casting" <sup>[6]</sup>. Uma das vantagens da tecnologia do lingotamento contínuo de placas finas é a possibilidade de se acoplar o lingotamento contínuo à laminação, processos estes que até então eram separados. Com a integração destas unidades a uma aciaria elétrica, pode-se reduzir tanto o investimento de capital como o custo operacional, resultando em uma alta produtividade e em menores tempos de execução dos pedidos. Desta forma, é possível a economia de etapas do processo evitando a perda de energia devido ao resfriamento das placas <sup>[7]</sup>.

O desenvolvimento de tecnologias que gerem produtos com dimensões mais próximas às dos produtos finais (near-net-shape) não se limita somente ao caso de placas finas mas também está voltado para casos como o de tiras finas <sup>[8]</sup>.

Como foi comentado acima, o desenvolvimento do processo de lingotamento contínuo de placas finas acoplado à laminação direta destas placas é de fundamental importância para a sobrevivência da siderurgia nacional. Contudo, para que este processo esteja completamente desenvolvido e aplicável industrialmente diversas dificuldades tecnológicas necessitam ser resolvidas e por isto faz-se necessário o estudo e conhecimento do mesmo. O estudo do fenômeno de solidificação e resfriamento da placa fina lingotada pelo processo contínuo envolve o conhecimento da história térmica do fenômeno, a determinação da evolução das isotermas Solidus e Liquidus, a avaliação



das segregações de soluto que ocorrem durante o resfriamento da placa, bem como o conhecimento de todos os gradientes térmicos. O conhecimento das características do processo de solidificação citadas acima, bem como a capacidade de previsão das mesmas através de simulação matemática podem ser muito úteis na determinação da microestrutura gerada na solidificação, na previsão da formação de microporosidades e também na determinação das propriedades mecânicas da placa. O objetivo deste trabalho é a apresentação de um dispositivo experimental para a simulação da solidificação e resfriamento de placa fina de uma liga metálica, dentro do molde, associada à implementação de tensões de compressão na placa durante sua solidificação. Este aparato experimental foi construído para a realização de estudos futuros do processo de lingotamento contínuo de placas finas de aços. São apresentados resultados de perfis térmicos tomados durante a solidificação de uma liga Pb-Sn bem como macroestruturas e microestruturas das placas obtidas com este simulador. Este tipo de liga metálica foi utilizada visando o desenvolvimento experimental do equipamento de simulação física. São analisados os efeitos da deformação da placa fina durante sua solidificação sobre a distribuição de temperatura no interior do metal, a macroestrutura, microestrutura e microsegregação do produto obtido.

#### MODELO EXPERIMENTAL

O simulador foi projetado para ser o mais flexível possível em relação às dimensões da placa fundida, à liga a ser estudada, às condições de extração de calor, à quantidade de redução durante a solidificação e à velocidade com que esta redução é aplicada. Obviamente, fatores operacionais e de custos limitam essa flexibilidade. Sendo assim, pode-se comparar resultados de placas fundidas de espessuras reduzidas com placas de espessuras maiores, confrontar resultados de placas fundidas com diferentes reduções e em diferentes condições de solidificação. Com o equipamento será possível o estudo dos fenômenos de transferência de calor dentro do metal e entre metal e molde, dos efeitos da redução com núcleo líquido sobre a segregação no centro da placa fundida bem como das cargas necessárias para essa redução. Uma vista da montagem do simulador é apresentada na Figura 1. O simulador é constituído, basicamente, de uma câmara para solidificação da liga metálica (1), uma célula de carga para medição da força necessária para a deformação da liga durante a solidificação (2), de um cilindro hidráulico responsável pela aplicação da força de deformação (3) e de um sistema de guias para direcionamento do movimento (4). A Figura 2 mostra o equipamento de simulação do lingotamento contínuo de placas finas já construído. A câmara para solidificação da liga é constituída de três paredes fixas (5) e uma parede móvel (6), sendo que na parede móvel e na parede fixa oposta à mesma são fixadas placas de cobre refrigeradas a água (7). As paredes fixas e a parede móvel são construídas em aço 1020. A parede móvel é dotada de um rasgo para entrada dos tubos do sistema de refrigeração da placa de cobre, de um encaixe para fixação da célula de carga e de um assento na parte inferior para o acoplamento com o sistema de guias para a movimentação.

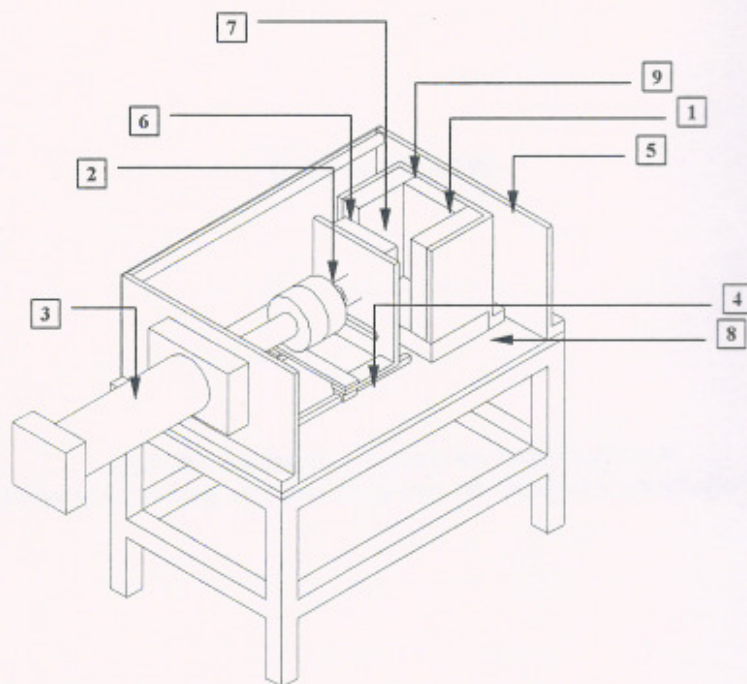


Figura 1 - Esquema do equipamento de simulação do lingotamento contínuo de placas finas.

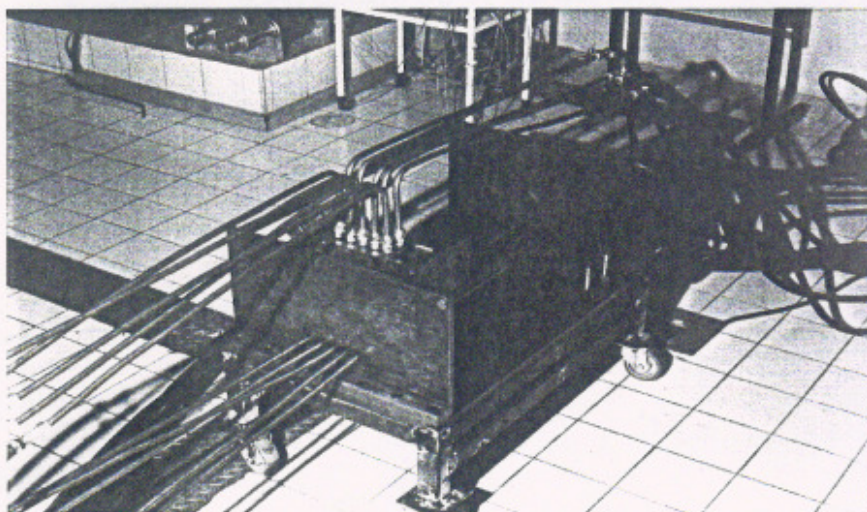


Figura 2 - Simulador de lingotamento contínuo de placas finas.



Na parede fixa, onde é fixada a placa de cobre, também existe um rasgo para entrada dos tubos do sistema de refrigeração. Esta parede é soldada em uma peça, também em aço 1020, para fixação na mesa de apoio. Uma das paredes laterais é também fixada através de uma peça na mesa de apoio e a outra tem uma altura menor para, depois de soldada, permitir o encaixe da placa de material cerâmico (8). Outras duas placas cerâmicas (9) são inseridas entre as paredes fixas laterais e as placas de cobre para que a extração de calor ocorra preferencialmente na direção da espessura da placa fundida.

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nos primeiros testes realizados com o simulador físico de lingotamento contínuo utilizou-se uma liga Pb – 25% Sn, que apresenta como vantagem um menor ponto de fusão. O aspecto testado mais importante, nestes primeiros experimentos, foi a eficiência da vedação efetuada entre as placas de cobre e os tijolos refratários, principalmente para o caso da placa de cobre que se movimenta e realiza assim a deformação do núcleo líquido do metal. Por isto decidiu-se utilizar esta liga com menor temperatura líquida, quando comparada ao aço, pois no caso da ocorrência de vazamento na região da interface refratário / placa de cobre os danos ao equipamento serão mínimos. E de fato, durante o primeiro experimento ocorreu vazamento nesta região, problema este que foi solucionado com o emprego de uma massa refratária umedecida, à base de alumina, aplicada na junção entre a placa de cobre e o refratário. Nos vazamentos utilizou-se superaquecimento de 20 °C.

Outra variável avaliada foi o efeito da deformação do núcleo líquido sobre propriedades como macrografia, micrografias, microsegregações e perfis de temperatura do metal durante sua solidificação e resfriamento. Para isto realizou-se um experimento sem aplicação de deformação e outro com aplicação de uma deformação de 16 %. Ou seja, no experimento sem deformação a espessura da placa lingotada foi de 42 mm e no experimento com redução de 16 % a espessura inicial foi de 50 mm com deformação durante a solidificação para 42 mm. A altura final da placa foi de 200 mm e largura de 160 mm.

Foram colocados termopares para a determinação dos perfis de temperatura no interior do metal lingotado e no interior da placa móvel de cobre. Os termopares no interior do metal foram posicionados a 10 mm, 20 mm e a 30 mm da placa de cobre móvel e a 150 mm do fundo do molde. O termopar colocado na placa móvel de cobre foi posicionado em sua região central, a 3 mm da superfície de contato com o metal líquido. Tanto para o metal quanto para o molde os termopares usados foram do tipo cromel-alumel sendo que, para o caso dos termopares colocados no interior do metal, seu diâmetro foi de 1 mm e para o termopar da placa de cobre, 0,5 mm. Os termopares foram ligados a um sistema de aquisição computacional de dados.

Para favorecer a extração unidimensional de calor inseriu-se, no interior das placas refratárias laterais, resistência elétrica visando o aquecimento das mesmas e portanto uma extração de calor preferencial pelas placas de cobre.

A evolução da temperatura da água de refrigeração das placas de cobre foram monitoradas a fim de se avaliar a eficiência deste sistema.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A evolução das temperaturas no interior do metal são mostradas nas figuras 3 e 4. Na figura 3 pode-se observar as curvas de temperatura tomadas nas posições a 10 mm (curva 1), a 20 mm (curva 2) e a 30 mm (curva 3) da placa de cobre móvel, durante o experimento sem deformação. A figura 4 apresenta os perfis térmicos para as mesmas posições, adquiridos durante o experimento com deformação do núcleo líquido.

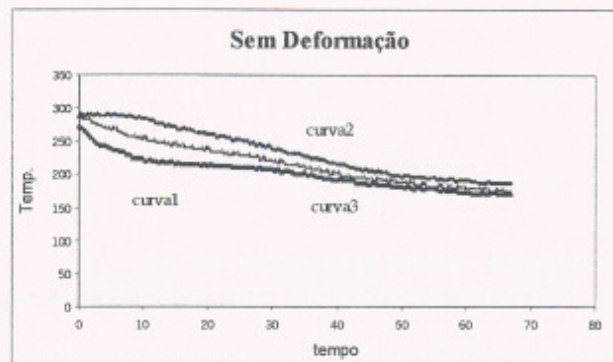


Figura 3 – Perfis de temperatura no interior do metal para o processo sem deformação.

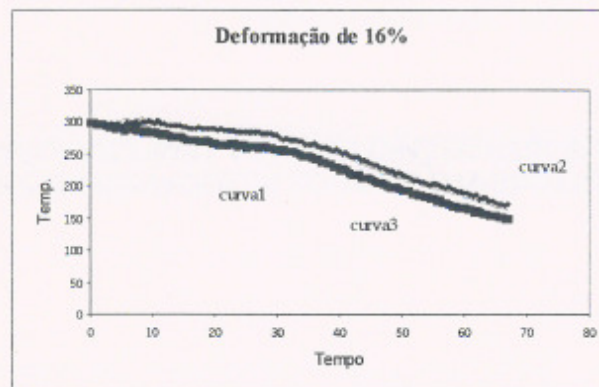


Figura 4 – Perfis de temperatura no interior do metal para o processo com deformação.

Pode-se verificar que para o caso no qual não há deformação a região mais central da placa fina (curva 2) se solidifica mais lentamente que nos casos onde os termopares estão mais próximos às placas de cobre. Quando insere-se a deformação do núcleo líquido, verifica-se uma grande aproximação entre os perfis de temperatura, que significa uma menor heterogeneidade térmica no interior da placa fina. O aumento do tempo de solidificação do metal na região da curva 3 pode ser explicado pela maior espessura inicial da placa, antes de sua deformação.

As figuras 5, 6, 7 e 8 referem-se às micrografias da estrutura do metal, obtidas a partir dos experimentos com e sem deformação durante a solidificação do metal. As amostras foram retiradas a meia altura e a 5 mm e 20 mm em relação à superfície da



placa fina, para ambos os experimentos. Ou seja, as regiões da superfície e do centro foram amostradas. As figuras 5 e 6 mostram as micrografias referentes a superfície e centro do metal respectivamente, no caso do experimento sem deformação. As figuras 7 e 8 referem-se à superfície e centro da placa fina obtida com deformação, respectivamente.

A figura (foto) original encontra-se anexada ao trabalho enviado pelo correio

Figura 5 – Micrografia da superfície, sem deformação (aumento de 300 x).

A figura (foto) original encontra-se anexada ao trabalho enviado pelo correio

Figura 6 – Micrografia do centro, sem deformação (aumento de 300 x).

Pode-se observar que para o caso da região do centro da placa fina, a estrutura apresenta-se mais refinada e homogênea no caso do experimento com deformação do que no caso do processo sem deformação. Isto pode ser explicado devido à homogeneidade térmica comentada acima bem como devido ao fluxo de material ainda líquido para posições superiores da placa durante a deformação do núcleo líquido. Esta constatação confirma a melhoria esperada da qualidade interna da placa quando a mesma é obtida pelo processo de lingotamento contínuo de placas finas.

A figura (foto) original encontra-se anexada ao trabalho enviado pelo correio

Figura 7 – Micrografia da superfície, com deformação (aumento de 300 x).

A figura (foto) original encontra-se anexada ao trabalho enviado pelo correio

Figura 8 – Micrografia do centro, com deformação (aumento de 300 x).

Quantificou-se também a incidência de microsegregações nas mesmas regiões, para ambos os experimentos. Os resultados para o teor de Sn são mostrados abaixo:

	Sem Deformação	Com Deformação
Superfície	26,91 %	23,99 %
Centro	27,28 %	26,57 %



Para esta liga em particular não foram notadas diferenças sensíveis nos níveis de microsegregação para os casos com e sem deformação do núcleo líquido.

A aplicação da deformação da placa durante a solidificação do metal causa o fluxo de material ainda líquido para a sua região superior. A figura 9 mostra a macrografia transversal da região central da placa obtida com deformação, tomada a partir da meia altura. Pode-se ver a deformação dos grãos colunares modificando sua orientação horizontal para a orientação vertical.

A figura (foto) original encontra-se anexada ao trabalho enviado pelo correio

Figura 9 – Macrografia da estrutura do material com deformação.

## CONCLUSÕES

Construiu-se um dispositivo de simulação dos efeitos da deformação do núcleo líquido a fim de se estudar o processo de lingotamento contínuo de placas finas. Nos primeiros testes realizados utilizou-se a liga Pb-Sn para a realização dos experimentos. Pôde-se avaliar a influência da deformação do núcleo líquido sobre as características das placas finas obtidas, tais como microsegregação e evolução dos perfis térmicos. Através das micrografias foi possível observar um efeito significativamente benéfico da deformação sobre a microestrutura, refinando-a e tornando-a mais homogênea. A macrografia da peça deformada apresentou uma visível deformação dos grãos colunares indicando um fluxo ascendente de metal líquido durante a deformação. Esse efeito, para o caso do lingotamento contínuo de placas finas de aços, pode ser de grande importância na minimização da ocorrência de macrosegregações. Verificou-se também uma maior homogeneidade térmica do no interior do metal lingotado quando aplica-se a

deformação. Os resultados obtidos são de extrema valia para o desenvolvimento experimental do lingotamento de placas finas de aço.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Companhia Siderúrgica de Tubarão ( CST ), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo ( FAPESP ) e à FINEP, através do Convênio RECOPE, pelo apoio financeiro concedido para a execução do "Projeto de Lingotamento Contínuo de Placas Finas" desenvolvido no Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da UNICAMP.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - O'CONNOR, T.G.; DANTZIG, J.A. Modeling the thin-slab continuous-casting mold. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v.25B, p.443-457, June 1994.
- 2 - CHATTERJEE, A. Recent developments in ironmaking and steelmaking. *Ironmaking and Steelmaking*, n.2, v.22, p.100-104, 1995.
- 3 - GOTTARDI L., NANNINI L. Net and near-net-shape continuous casting - new developments in mini-mills. *Metallurgical Plant and Technology International*. (3); 46-50. 1992
- 4 - SIMOMMS K. *et al.* Simulation of thin slab casting of carbon and stainless steel grades with and without cast-rolling. *Advances in Continuous Casting*. 323-332. Abril, 1992.
- 5 - KASPAR R., FLUSS P. Laboratory simulation of the direct rolling of steel. *Steel Research*. (11) 501-506. 1991.
- 6 - KASPAR R., ZENTARA N., HERMAN J. C. Direct charging of thin slabs of Ti-microalloyed low-carbon steel for cold forming. *Steel Research*. (7) 279-283. 1994.
- 7 - BRUNS H., KASPAR R. Direct charging of thin slabs of a cold formable HSLA steel. *Steel Research*. (5) 215-219. 1997.
- 8 - SASAKI *et al.* Effects of molten steel on growth of solidified shell in continuous casting machine. *Conference on Continuous Casting of Steel in Developing Countries*. 261-266. 1993.

#### ABSTRACT

The production of thin slabs and strips using continuous casting has been discussed by many authors. These processes have many advantages over conventional continuous casting and these advantages are shown in this paper. This work present some experimental results obtained with a thin slab continuous casting simulator. It was studied the effect of liquid core reduction over the macrostructure, microstructure and microsegregation.

Key words: continuous casting; thin slabs; near-net-shape.