

ESTUDO DO EFEITO DA REDUÇÃO COM NÚCLEO LÍQUIDO SOBRE A MICROESTRUTURA E A SEGREGAÇÃO EM PLACAS FINAS DE Pb-25%Sn

Fernando C. Gentile
Wagner Palmiere
M. Dorotéia C. Sobral
Francine S. de Moraes
Rezende G. dos Santos
Paulo R. Mei
Geraldo N. Telles
Ernandes M. S. Rizzo

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Materiais

Cx. P. 6122 - 13084-970 - Campinas, SP, Brasil

Resumo. No decorrer do desenvolvimento de processos para fabricação de produtos planos de aço, houve grande preocupação quanto a necessidade de máquinas e equipamentos com alto nível de flexibilidade e capazes de produzir com qualidade e a preços baixos. O surgimento da tecnologia de lingotamento contínuo de placas finas vem satisfazer essas necessidades. Em algumas tecnologias disponíveis, o uso da redução com núcleo ainda líquido, efetuada logo após a saída da placa do molde, traz benefícios para a qualidade final do produto, refinando a estrutura do fundido e reduzindo a ocorrência de segregação na linha central da placa. Neste trabalho serão estudados os efeitos da redução com núcleo líquido em placas de Pb-25%Sn usando um simulador especialmente desenvolvido para este fim. Placas solidificadas com espessuras finais fixas e com diferentes percentagens de redução serão estudadas e seus resultados comparados. Os resultados obtidos fazem parte dos primeiros testes com metais realizados no simulador. Este trabalho foi desenvolvido no Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, com apoio da FAPESP, FINEP (RECOPE) e Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST).

Palavras-chave: Near-net-shape, Lingotamento contínuo, Placas finas, Redução com núcleo líquido.

1. INTRODUÇÃO

O segmento siderúrgico tem passado nas últimas décadas por grandes e importantes transformações no sentido de melhorar a qualidade do produto final, diminuir custos tanto no que diz respeito aos custos de operação (mão-de-obra, energia, etc.), como com relação aos custos com investimentos (construção civil, equipamentos, instalações, etc.), além de adequar-se as exigências internacionais de proteção ao meio-ambiente e aumentar a produtividade e a flexibilidade de suas plantas. Essas mudanças visam adequar as usinas siderúrgicas ao novo quadro mundial, no qual o mercado exige produtos cada vez mais baratos, com alta qualidade e entrega dentro do menor prazo possível. Isso aliado a alta competitividade que se estabeleceu neste setor nos últimos anos devido ao aumento da produção e a retração da demanda (Döring *et al*, 1990).

Dentro do mercado de produtos planos, como placas e chapas, o processo de lingotamento contínuo de placas grossas a partir dos anos 50 e 60 trouxe uma elevada redução nos custos em relação ao lingotamento convencional (Chatterjee, 1995). Desde então, essa tecnologia vem mostrando crescimento na sua utilização principalmente em países desenvolvidos e também no Brasil.

Nas décadas de 80 e 90, a preocupação com problemas ambientais tornou-se importante fator na construção de novas usinas ou na ampliação de novas linhas nas usinas existentes. Neste contexto os processos chamados *net-shape* ou *near-net-shape*, mais especificamente para produtos planos, o lingotamento contínuo de placas finas, nos quais o produto obtido tem formas e dimensões próximas ou até mesmo iguais às do produto final, ganharam importância devido a maior redução nos custos de capital e operacionais e a maior flexibilidade em relação ao lingotamento contínuo de placas grossas, além da possibilidade da conexão deste equipamento à laminação (Greis, 1990).

A necessidade de dominar-se a tecnologia *near-net-shape*, obrigou a utilização de modelagem matemática poderosa, além da utilização de modelos físicos. O uso da simulação física, realizada em equipamentos e dispositivos especialmente construídos para esse fim, é de grande utilidade, uma vez que os custos com os equipamentos e materiais e o tempo gasto para uma simulação são consideravelmente menores em relação a se efetuar uma ou várias corridas teste para o desenvolvimento de processo para um produto específico.

Das etapas presentes no processo de lingotamento contínuo de placas finas, pode-se destacar a passagem do metal líquido pelo molde como uma das mais importantes para a qualidade final do produto. Os fenômenos de transferência de calor envolvidos nesta etapa têm relação direta com o material do molde e a velocidade do líquido refrigerante dentro do mesmo. A etapa posterior ao resfriamento primário é a redução de espessura com núcleo ainda líquido, que não está presente em todas as máquinas de lingotamento contínuo de placas finas. Nesta etapa, a porcentagem de redução, a carga necessária para a redução e a velocidade empregada são as principais variáveis envolvidas.

1.1. Redução Com Núcleo Líquido

A segregação de elementos de liga em metais fundidos pode ocorrer de várias formas e está associada às diferenças de solubilidade do soluto nas fases sólida e líquida e à reduzida capacidade de difusão do soluto na fase sólida em comparação com a fase líquida (Battle, 1992). No lingotamento contínuo de placas finas, seu surgimento é atribuído ao fluxo de metal líquido causado por fatores mecânicos e pela contração da solidificação (Ogibayashi *et al.*, 1991). Os fatores mecânicos estão relacionados com o abaulamento da placa entre dois rolos consecutivos e durante a passagem desta pelos rolos, após a placa deixar o molde. Para

amenizar seu efeito pode-se diminuir a distância entre os rolos, e controlar a flexão dos rolos durante a passagem da placa (Mizukami *et al.*, 1980)

Para minimizar a segregação central na placa devido a contração durante a solidificação é usado o sistema de redução com núcleo líquido. Vários trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de demonstrar o efeito da redução com núcleo líquido sobre a qualidade das placas (El Gammal *et al.*, 1994; *ibdem*, 1992, Essadiqi *et al.*, 1994).

Pode-se associar o refinamento da estrutura do fundido com a deformação que ocorre durante a redução com núcleo líquido enquanto a diminuição na ocorrência de segregação no centro das placas deve-se a movimentação do líquido confinado no interior da casca solidificada, acarretando uma redistribuição de soluto (El Gammal *et al.*, 1994).

Neste trabalho será apresentado um equipamento capaz de simular as etapas de resfriamento primário (molde) e redução com núcleo líquido do processo de lingotamento contínuo de placas finas (Gentile *et al.*, 1998). Será apresentado também, um estudo preliminar dos efeitos da redução com núcleo líquido sobre a microestrutura e a segregação utilizando a liga Pb-25%Sn. Estes resultados fazem parte dos primeiros testes efetuados no simulador utilizando metais.

2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

O projeto do simulador foi desenvolvido de forma a se obter um dispositivo versátil, capaz de simular vários fenômenos envolvidos nas etapas de solidificação e redução com núcleo líquido do processo de lingotamento contínuo de placas finas e, ao mesmo tempo, permitir a aquisição de informações sobre o processo. Com este equipamento obtém-se placas de ligas com diferentes pontos de fusão, com espessura variando entre 20mm e 100mm e com 160 mm de largura sob várias condições de extração de calor, diferentes percentagens de deformação com núcleo líquido a diferentes velocidades. As Fig. 1 e 2 mostram um esquema do simulador e foto da montagem, respectivamente.

Detalhes da construção e do funcionamento do simulador foram apresentados em trabalho anterior (Gentile *et al.*, 1998).

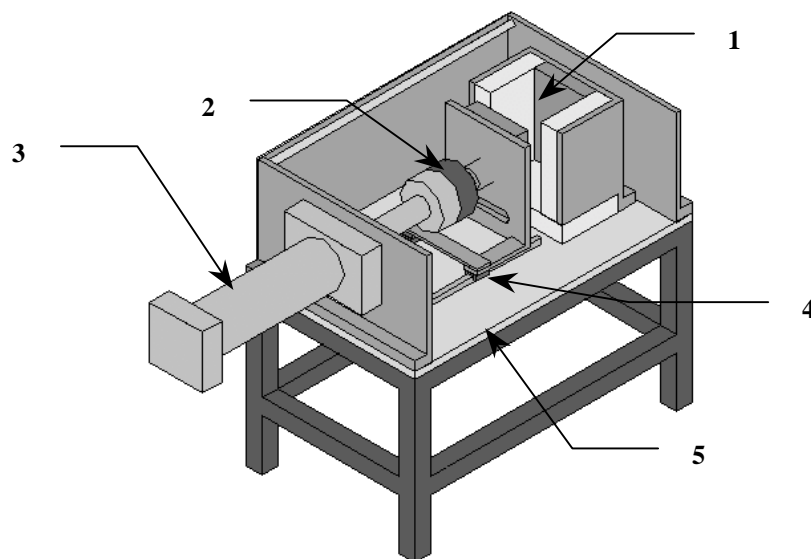


Figura 1 - Esquema do Simulador. 1) câmara de solidificação; 2) célula de carga; 3) cilindro com sensor de posição; 4) guias; 5) mesa.

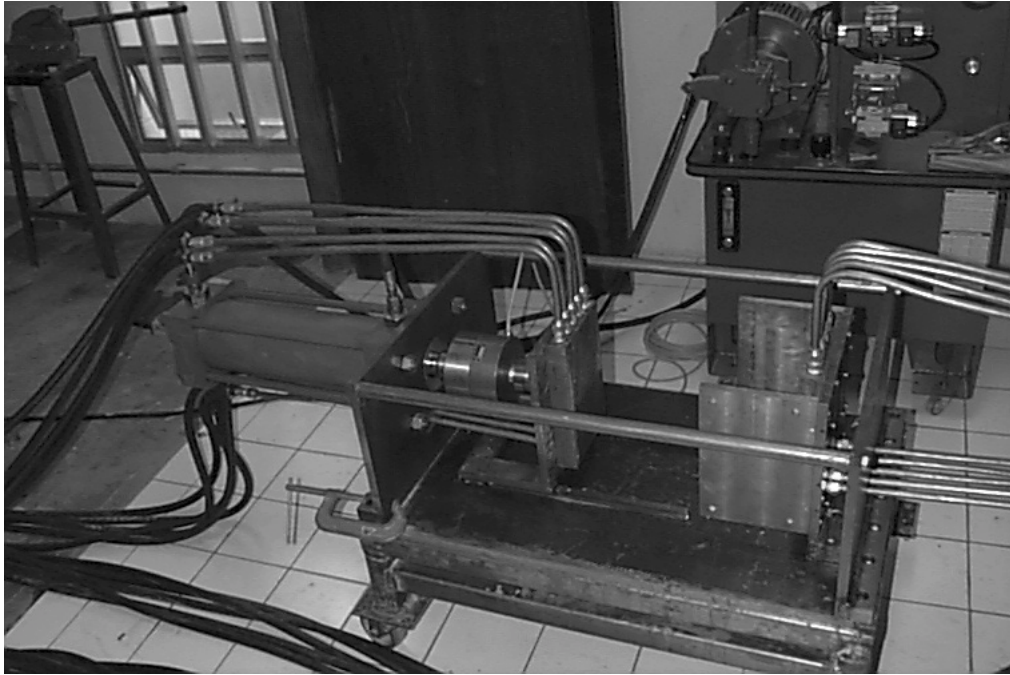


Figura 2 - Foto do Simulador.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o estudo do efeito da redução com núcleo líquido sobre a microestrutura e a segregação das placas solidificadas, foram feitos dois ensaios utilizando a liga Pb-25%Sn. Em cada ensaio foram utilizados 11 Kg da liga preparados em forno poço.

A espessura final das placas foi fixada em 42 mm, sendo que a espessura inicial era dependente da porcentagem de redução utilizada em cada ensaio. As condições dos ensaios podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1- Condições de ensaio

Ensaio	Espessura inicial (mm)	Espessura final (mm)	Redução (%)
1	42	42	0
2	50	42	16

As placas de cobre e as placas de material cerâmico foram recobertas com tinta à base de óxido de cromo para evitar a aderência do metal após a solidificação. Foi também colocada massa refratária à base de alumina nas junções entre as placas de cobre e as placas de material cerâmico para evitar vazamento de metal líquido. As condições de circulação de água nas placas de cobre foram mantidas as mesmas para os dois experimentos.

Para o monitoramento da temperatura da liga durante o ensaio foram usados três termopares tipo K (3 mm de diâmetro) a 10 mm (1), 20 mm (2) e 30 mm (3) da placa de cobre da parede móvel e a 100 mm do fundo do molde, como mostra a Fig. 3.

Um quarto termopar tipo K (diâmetro 1,5 mm) foi inserido na placa de cobre da parede móvel, a 3 mm da interface metal/molde, para o monitoramento da temperatura do molde.

O lingotamento foi realizado a 320°C e a redução de espessura foi iniciada no momento em que o termopar 1 (10mm) registrou a temperatura de 300°C.

Após a solidificação e resfriamento, as placas foram cortadas para retirada e preparação de amostras para ensaios metalográficos conforme mostra a Fig. 4. Após o polimento mecânico as amostras sofreram ataque químico com solução de ácido nítrico, ácido acético e glicerol para a observação da microestrutura e distribuição de soluto através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para a observação da distribuição de soluto, foram escolhidas cinco regiões diferentes em cada amostra.

Foi feita a observação da macroestrutura da região superior central da placa com deformação após a preparação e ataque com uma mistura de duas soluções em água destilada, molibdato de amônio e ácido nítrico.

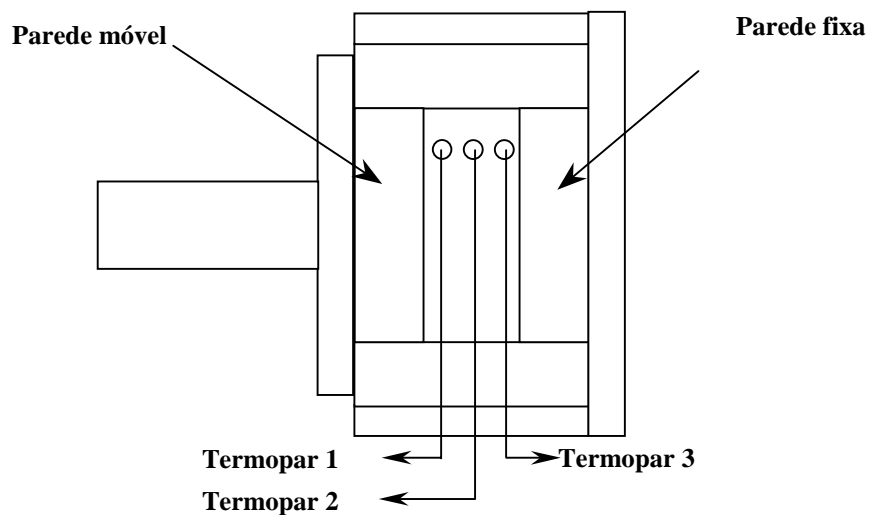


Figura 3 - Montagem dos termopares no metal líquido.

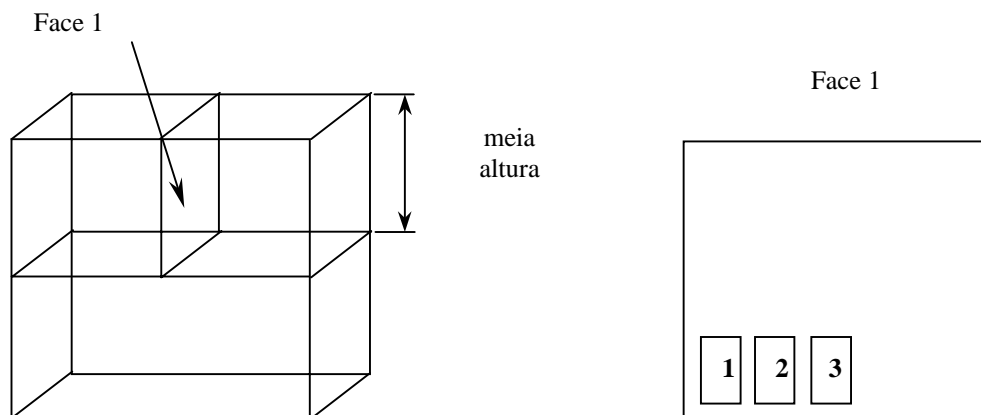


Figura 4 - Esquema da retirada de amostras das placas de Pb-Sn. Amostra 1 a 5mm da superfície, 2 a 10mm e 3 a 20mm.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A evolução das temperaturas no interior da liga em estudo e da placa de cobre da parede móvel são mostradas nas Fig. 5 e 6. Na figura 5 observa-se as curvas de temperatura tomadas nas posições reais que foram obtidas após o corte da placa, termopar 1 a 10mm, termopar 2 a 28mm e termopar 3 a 39mm em relação a placa de cobre da parede móvel, durante o experimento sem deformação. A figura 6 apresenta os perfis térmicos das posições medidas após o corte da placa, termopar 1 a 11mm, termopar 2 a 18mm e termopar 3 a 22mm, adquiridos durante o experimento com deformação do núcleo líquido.

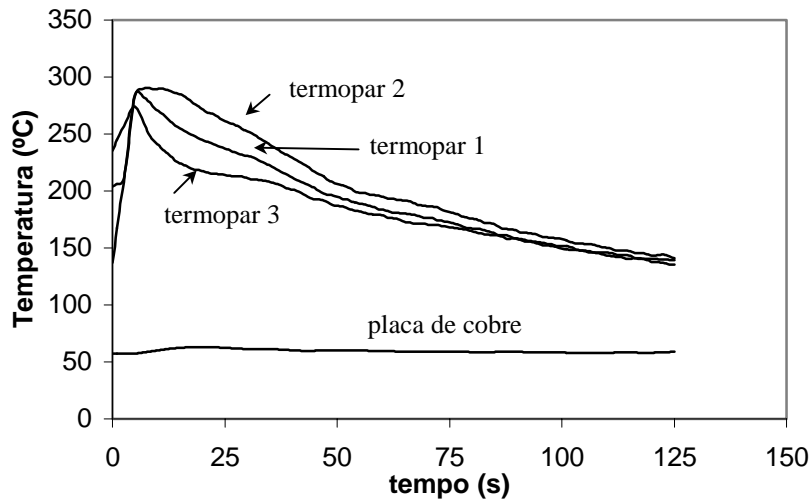


Figura 5 – Perfis de temperatura no interior do metal para o processo sem deformação.

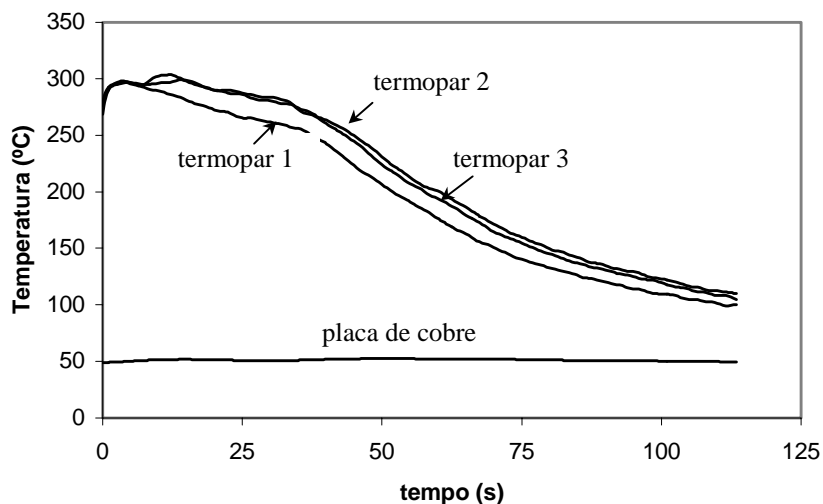


Figura 6 – Perfis de temperatura no interior do metal para o processo com deformação.

Pode-se verificar para os dois experimentos que a região mais central analisada pelo termopar 2 se solidifica mais lentamente. No experimento sem deformação o superaquecimento foi menor do que no experimento com deformação, o que pode ter provocado a solidificação mais rápida próximo às paredes móvel e fixa observada pelos termopares 1 e 3.

A temperatura na placa de cobre em ambos os experimentos não variou significativamente mesmo após o lingotamento, mostrando que o sistema de resfriamento do

molde atendeu às exigências dos experimentos com liga de baixo ponto de fusão e que poderá ser utilizado para ligas de ponto de fusão maiores.

A taxa de resfriamento durante a solidificação foi maior na placa que sofreu deformação influenciada pelo fluxo de material ainda líquido para a região superior da placa, além da ausência do *gap* que é gerado na contração do lingote. A ausência do *gap* se deve à redução de espessura que melhora o contato físico entre a placa de cobre e a liga em solidificação.

A figura 7 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.

Nas curvas dos termopares 2 e 3 no experimento com deformação, nota-se uma inflexão logo após o início da queda de temperatura. Acredita-se que estas variações de temperatura localizadas representem o momento em que se iniciou a redução de espessura.

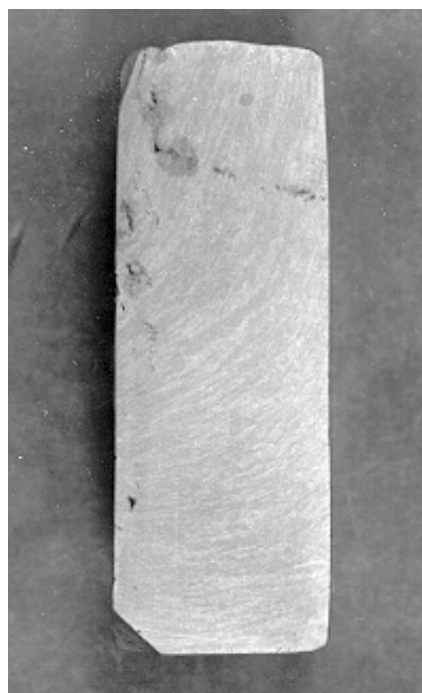
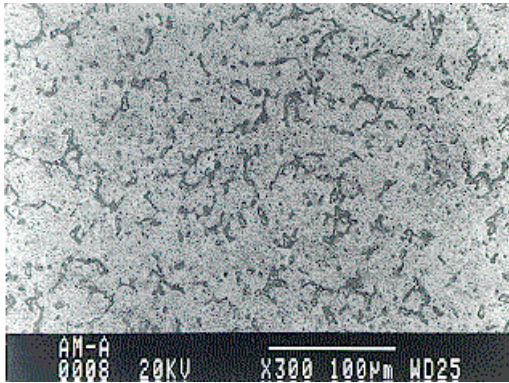


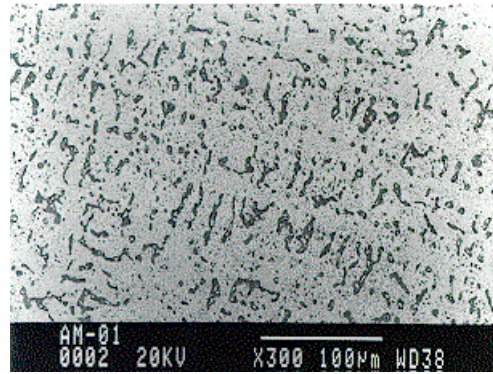
Figura 7 – Macrografia da estrutura do material com deformação.

A figura 8 refere-se às micrografias da estrutura do metal, obtidas a partir dos experimentos com e sem deformação durante a solidificação do metal.

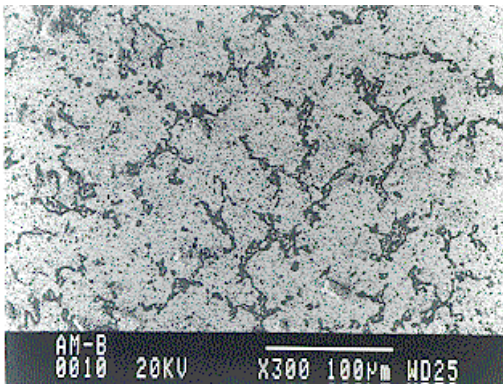
Pode-se observar para a região central da placa fina que a estrutura apresenta-se mais homogênea no caso do experimento com deformação do que no caso do processo sem deformação e parece apresentar microestrutura dendrítica, característica de taxas de resfriamento mais altas. Isto pode ser explicado devido à movimentação de material ainda líquido e ascensão de parte deste material para posições superiores do molde durante a redução de espessura. Assim confirma-se a melhoria esperada da qualidade interna da placa quando a ela é obtida pelos processos de lingotamento contínuo de placas finas que usam redução de núcleo líquido.



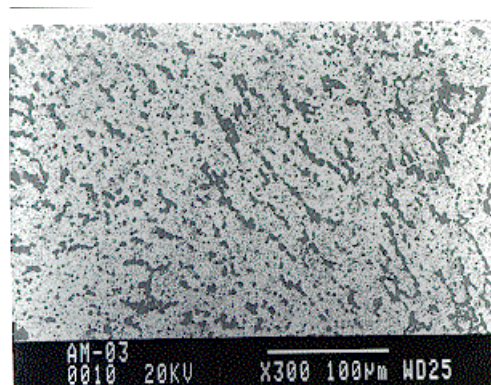
(a)



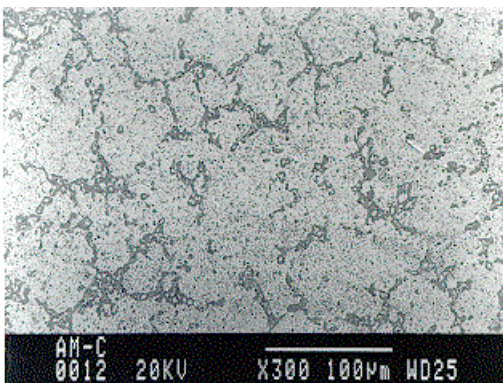
(d)



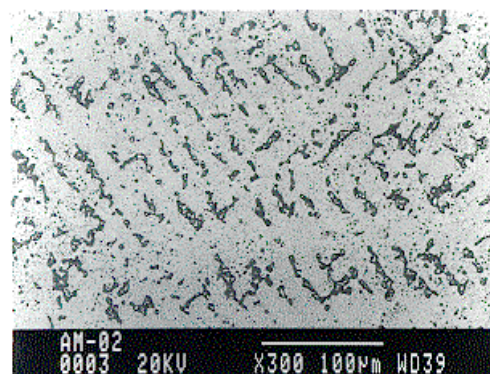
(b)



(e)



(c)



(f)

Figura 7 – Micrografias das amostras retiradas das placas de PbSn. (a), (b) e (c) amostras da placa sem deformação a 5mm, 10mm, 20mm, respectivamente. (d), (e) e (f) amostras da placa com deformação de 16% a 5mm, 10mm, 20mm, respectivamente.

Os resultados para o teor de Sn obtidos através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) são mostrados na Tabela 2

Tabela 2 – Teor de Sn (MEV)

	Sem Deformação	Com Deformação
5 mm	26,91 %	23,99 %
10 mm	25,88 %	25,34 %
20 mm	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.

5. CONCLUSÕES

Com relação ao equipamento utilizado para as simulações, pode-se afirmar que este apresentou bom desempenho e que poderá ser utilizado nas simulações com ligas de ponto de fusão mais alto. Deve-se, no entanto, acrescentar o monitoramento de algumas variáveis do processo, tais como vazão de água nas placas do molde e temperatura da placa de cobre da parede fixa.

Através das micrografias foi possível observar um efeito significativamente benéfico da deformação sobre a microestrutura tornando-a mais homogênea, porém seu efeito sobre a segregação não foi tão sensível, possivelmente devido a redução de espessura ter ocorrido com grande parte da liga ainda no estado líquido ao contrário do que se faz industrialmente onde a redução se inicia ao final da solidificação.

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 no interior do metal lingotado quando se aplica 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 Tubarão (CST), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP Projeto 1997/2036-9) e à FINEP (RECOPE) pelo apoio financeiro para a execução do projeto “Lingotamento Contínuo de Placas Finas” no Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

REFERÊNCIAS

Battle, T. P. Mathematical modelling of solute segregation in solidifying materials, *International Materials Reviews*, v. 37, n. 6, p. 249-270, 1992.

- Chatterjee, A. Recent developments in ironmaking and steelmaking. *Ironmaking and Steelmaking*, v.22, n.2, p.100-104, 1995.
- Döring, K.; Wiesinger, H.; Eberle, A.; Flick, A.; Hirschmanner, F.; Wallner, F.; Giedenbacher, G.; Gäbel, D.; Kahle, P.; Loose, J. Continuous casting and rolling of thin slabs. *Metallurgical Plant and Technology International*, n.5, p.16-29, 1990.
- El Gammal, T., Pleschiutchnigg, F. P., Yoo, S. J., Simomns, K. Simulation of thin slab casting of carbon and stainless steel grades with and without cast-rolling. *Proceedings of the Symposium on Continuous Casting Research - Cairo, Egypt*, p. 323-332, Apr. 13-15, 1992.
- El-Gammal, T.; Pleschiutchnigg, F. P.; Von Hagen, I.; Shash, Y.; Megahed, G. Simulation of thin slab casting (ISP) of low-carbon and stainless steel grades with and without direct cast rolling and the benefit for energy and plate quality. *21th Century Steel Industry of Russia and CIS*, p. 240-248, Jun. 1994.
- Essadiqi, E.; Collins, L. E.; Sherata, M. T. Thin slab casting simulation of 1020 C steel with liquid core reduction. *Second Canada-Japan Symposium on Modern Steelmaking & Casting Techniques*, p. 251-264, 1994.
- Gentile, F. C.; Palmiere, W.; Rizzo, E. M. S.; Telles, G. N.; Mei, P.R.; Santos, R. G. Projeto e construção de um simulador de lingotamento contínuo de placas finas. 53o. Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 1998.
- Greis, P. Radical changes in the steel industry-Some technical trends at Metec 94. *Metallurgical Plant and Technology Internantional*, n.5, p.25-42, 1994.
- Mizukami, H.; Kitagawa, T.; Kawawa, T.; Murakami, K. Analytical calculation of bulging of solidification shall formed at continuous slab casting. *Transactions ISIJ*, v.20, n. 1 : B24, 1980.
- Ogibayashi, S.; Kobayashi, M.; Yamada, M.; Mukai, T. Influence of soft reduction with one-piece rolls on centrer segregation in continuously cast slab. *ISIJ International*, n.12, v. 31, p.1400-1407, 1991.

STUDY OF LIQUID CORE REDUCTION EFFECT ON MICROSTRUCTURE AND SEGREGATION OF PbSn THIN SLABS.

Abstract. *With the development of flat products production processes there have been an worry about the flexibility of the facilities, their cost reduction and final quality of products. The thin slabs continuos casting processes have reached these goals. Some available technologies use the liquid core reduction which is applied in the final stage of solidification process with the aim of improving the product final quality, refining the microstructure and reducing the segregation in central line of the slabs. In this work it will be shown an analyse of the liquid core reduction on the PbSn slabs using a special designed simulator. Slabs with fixed final thickness and different reductions rates were studied and their results compared. These results are the first tests carried out with the simulator.*

Keywords: *Near-net-shape, Continuous casting, Thin slabs, Liquid core reduction.*