

# PRODUÇÃO DE LINGOTE “OCO” VIA LINGOTAMENTO INDIRETO NA VILLARES METALS S.A.

Marco Antônio Rezende <sup>(1)</sup>

Almir Murari <sup>(2)</sup>

José Antônio Bueno Barbosa <sup>(3)</sup>

Sidinei Colodeti Cristo <sup>(4)</sup>

Luiz Reis Campo <sup>(5)</sup>

## Resumo

A busca constante pela manutenção da competitividade no seguimento de buchas e anéis forjados fez com que o corpo de engenharia da Villares Metals iniciasse o desenvolvimento de um processo de obtenção destes produtos através de uma rota mais econômica. Para tanto, foi desenvolvido um processo de obtenção de lingote já furado eliminando-se várias etapas do processo de forjamento e obtendo-se rendimento final muito superior. Neste sentido iniciou-se o estudo para o desenvolvimento de um processo para obtenção de um lingote “oco” cuja execução fosse viável tanto operacionalmente como economicamente e que atendessem, após forjamento e acabamento, a qualidade e dimensões que este exigente mercado demanda. No desenvolvimento de tal projeto foi utilizada simulação em computador da solidificação para auxiliar a tomada de decisões e evitar o custoso processo de “tentativa e erro”. Após a etapa de desenvolvimento o projeto foi executado e obteve resultados muito satisfatórios. Portanto, este artigo tem o objetivo de mostrar as simulações realizadas e os resultados obtidos após a produção do primeiro lingote “oco” na Villares Metals.

**Palavras-chave:** lingote oco, simulação, solidificação

## Hollow ingot production using indirect casting at Villares Metals S.A.

### Abstract

The constant search for keeping the competitiveness on the forged rings and sleeves market has led the engineering team of Villares Metals to start the development of a process to obtain these products through an economic route.

In order to reach this goal, it was developed a process to obtain a hollow ingot avoiding lots of steps during the forging process and obtaining much higher total yield. Therefore, it has begun the study for the development of a process to obtain the hollow ingot, which execution was feasible as operationally as economically and it should accomplish, after forging and finishing, the sizes and the quality that this exigent market demands. During that development a solidification simulation was performed to help taking decisions and avoid a lengthy costness process of “trial and error”. After the development step, the project was run and has shown good results. Thus, this report has the goal to show the simulations performed and the results reached after the first hollow ingot.

**Key-words:** simulation, ingot, solidification

## 1. INTRODUÇÃO

A Villares Metals na busca da manutenção da sua competitividade no seguimento de buchas e anéis forjados decidiu por utilizar uma rota de produção mais competitiva e para tanto começou o desenvolvimento de um novo tipo de lingote.

O processo convencional de forjamento consiste em um grande número de reaquecimentos e algumas operações complexas tais como o puncionamento do interior do lingote. Através da utilização de um lingote “oco” tal processo pôde ser modificado eliminando-se vários passos incluindo-se o puncionamento. Tais mudanças também reduziram reaquecimentos intermediários e perdas por oxidação o que também contribui para o aumento de rendimento e redução de “lead time”.

<sup>(1)</sup> Gerente de Aciaria de Villares Metals S.A.

<sup>(2)</sup> Supervisor Técnico de Processos de Aciaria de Villares Metals S.A.

<sup>(3)</sup> Supervisor Técnico da Aciaria de Villares Metals S.A.

<sup>(4)</sup> Engenheiro de Processos da Aciaria de Villares Metals S.A.

<sup>(5)</sup> Supervisor Operacional de Lingotamento de Villares Metals S.A.

A Figura 1 apresenta os processos utilizando-se o lingote convencional e o lingote “oco”.

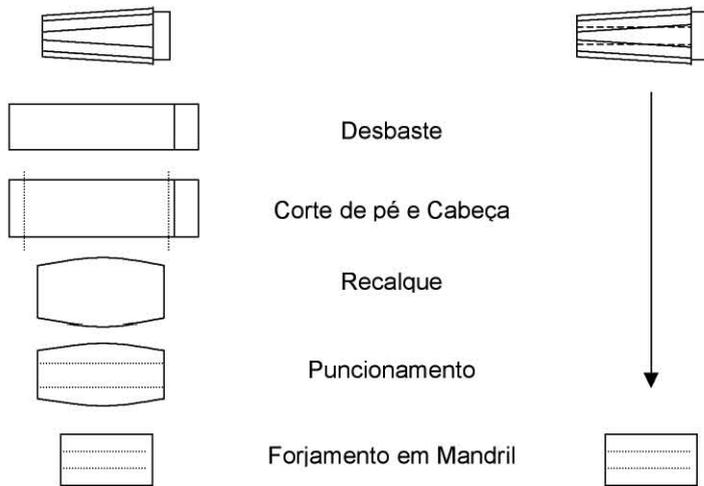


Figura 1. Esquema comparativo do processo de forjamento utilizando-se lingote convencional (esquerda) e lingote “oco” (direita).

A sanidade interna do lingote é uma das questões mais importantes no desenvolvimento de novos lingotes. Este aspecto da qualidade do material é ainda mais importante quando se leva em conta que para o lingote “oco” haverá duas frentes de solidificação: a primeira a partir da superfície em direção ao centro do lingote e a segunda no sentido oposto, ou seja, a partir do macho em direção a superfície da lingoteira. Assim sendo, caso o planejamento das dimensões e materiais utilizados não forem adequados, a possibilidade de uma realimentação ineficiente por parte do massalote será alta.

Por outro lado, para este tipo de lingote, a microestrutura será beneficiada uma vez que há extração de calor através de duas frentes, a velocidade de resfriamento aumenta, o que diminui o espaçamento interdendrítico.<sup>(1)</sup>

Outro aspecto importante na determinação do processo de aciaria para obtenção do lingote “oco” é o material utilizado para confecção do macho.

Algumas empresas já fizeram uso de várias técnicas para a obtenção do macho tais como: utilização de machos refratários maciços;<sup>(2)</sup> utilização de anéis refratários<sup>(3)</sup> e sistema de tubos concêntricos refrigerados pela passagem de ar comprimido<sup>(4)</sup> que apresentaram bons resultados do ponto de vista metalúrgico, entretanto, sob o ponto de vista do processo tais técnicas além de trazerem um aumento de consumo de refratários, também são muito complexas para operacionalização diminuindo a produtividade.

Portanto, sob estes três conceitos, (sanidade interna, estrutura de solidificação e simplificação da operação) uma série de simulações de solidificação foi executada objetivando-se a determinação de dimensões ideais para o desenvolvimento de um processo de obtenção de lingotes “ocos” com macho metálico reutilizável.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa do plano de desenvolvimento do processo de obtenção do lingote “oco” foi a determinação dos diâmetros interno e externos necessários para o atendimento das dimensões dos produtos que o mercado exige e da redução mínima de deformação para a obtenção das propriedades mecânicas especificadas para o produto.

Adicionando-se as exigências supracitadas às limitações de ferramental para forjamento, foi possível definir o diâmetro interno como 400mm e o diâmetro externo mínimo de 1200mm.

Para atender estas especificações a lingoteira adequada é aquela chamada 1210 (Figura 2).

Neste ponto do projeto, várias dúvidas surgiram quanto à capacidade de realimentação do lingote uma vez que a relação entre altura e diâmetro (H/D) é muito desfavorável pois para o lingote oco esta relação é 0,18 (considerando-se a espessura do lingote como diâmetro) enquanto que para o lingote convencional é 1,9.

Para ajudar a solucionar tais dúvidas, foram feitas várias simulações, em computador, da solidificação deste lingote utilizando-se um macho confeccionado em ferro fundido.

Além de dados geométricos do sistema (Figura 2), são necessários para a simulação dados de constantes físicas tais como: densidade, calor específico, calor latente de solidificação e condutividade térmica para toda a gama de temperatura além de coeficientes de transferência de calor nas interfaces do sistema.

As propriedades termofísicas dos corpos envolvidos no sistema (lingoteira, metal líquido, refratário do massalote e macho) foram obtidas na literatura.<sup>(5)</sup>

Uma das tarefas mais complexas para o sucesso de uma simulação é a determinação das condições de transferência de calor entre os corpos do sistema. Os seguintes coeficientes de transferência de calor por convecção foram utilizados para as seguintes interfaces:<sup>(6)</sup> superfície da lingoteira e atmosfera ( $4,7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ), metal e superfície da lingoteira ( $31,7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ), metal e superfície do macho ( $31,7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ), metal e refratário do massalote ( $22,7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) e finalmente refratário e superfície da lingoteira ( $3,7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ).

As simulações foram realizadas no módulo de transferência de calor do programa Deform versão 4.0 que tem como característica

a simulação bidimensional e tridimensional para casos de sistemas com simetria radial utilizando-se o método de elementos finitos (FEM).

Os dados utilizados na simulação, são de um aço ligado com 1% de Cromo cujas temperaturas liquidus e solidus são iguais a 1470 °C e 1420 °C<sup>(4)</sup> respectivamente.

Para as simulações executadas utilizaram-se as seguintes considerações: preenchimento instantâneo da lingoteira; vazamento com metal superaquecido em 50 °C; simetria em relação ao eixo da lingoteira; ausência de transformações de fase com exceção da solidificação; ausência de descontinuidades no metal e finalmente ausência de contração de solidificação e portanto não há formação de “gap” entre o metal e a lingoteira.

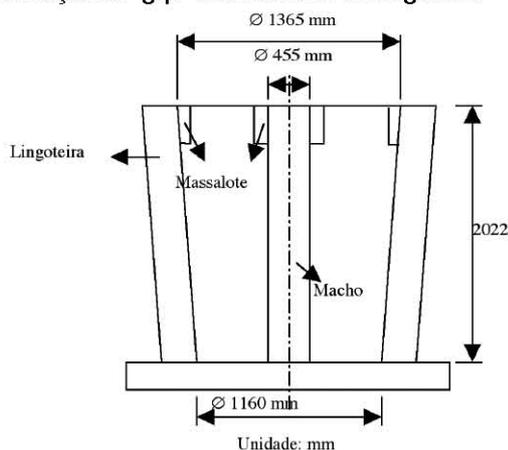


Figura 2. Esquema ilustrativo da geometria do sistema simulado utilizando-se

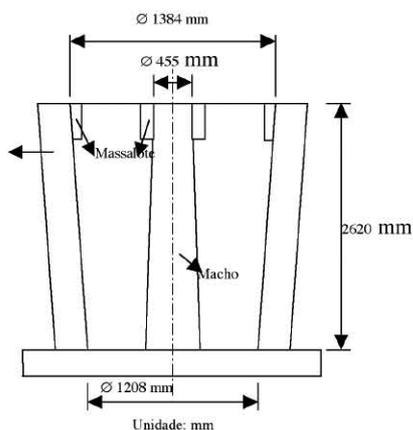
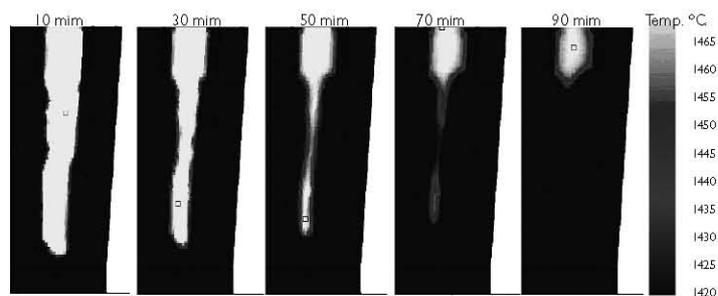


Figura 3. Esquema ilustrativo da geometria do sistema simulado utilizando-se a lingoteira 1210.

Após a conclusão da simulação obtém-se resultados como da Figura 4. Como pode ser observado, através de um gradiente de tonalidades pode-se verificar o avanço da frente de solidificação.

Figura 4. Resultados da simulação da solidificação ao longo do tempo para lingoteira 1210.



Cabe lembrar que a Figura 4 apresenta apenas um dos lados da lingoteira, pois o lado oposto é perfeitamente simétrico. O eixo de simetria coincide com a lateral esquerda de cada figura.

A análise da Figura 4 mostra que após 70 minutos do vazamento, devido ao encontro das duas frentes de solidificação na porção média do lingote, a capacidade de realimentação do mesmo por parte do massalote foi prejudicada e portanto pode haver, a formação de um grande vazio no interior do lingote. Neste sentido, nota-se que para este sistema, a relação H/D é desfavorável e uma adequação na geometria do sistema foi necessária.

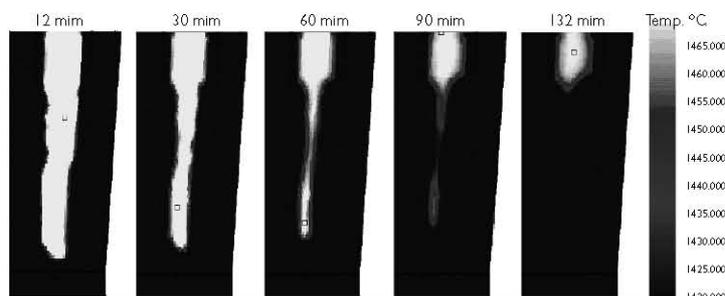
Neste ponto do desenvolvimento, a Villares Metals concluiu os investimentos na sua prensa de 3000 toneladas, o que aumentou significativamente a capacidade de penetração e deformação deste equipamento permitindo que lingotes com maiores dimensões fossem deformados. Decidiu-se por utilizar uma lingoteira maior (chamada 1260). O novo sistema é mostrado na Figura 3.

Para facilitar a realimentação por parte do massalote, uma das modificações projetadas foi a alteração da geometria do macho, que passou a ser cônico pois desta forma a evolução das duas frentes de solidificação (a partir do macho e a partir da superfície) se dá em forma de “V” o que evita o bloqueio da ligação entre as porções que necessitam ser realimentadas e o massalote.

Os resultados da simulação para lingoteira 1260 (Figura 5) demonstram que tanto o aumento do diâmetro externo quanto a nova configuração do macho alteraram a evolução das frentes de solidificação facilitando a realimentação por parte do massalote diminuindo a possibilidade de formação de vazios no interior do lingote. Entretanto, como pode-se notar, após 132 minutos do vazamento haverá na parte superior próximo à superfície interna uma região com alta probabilidade de aparecimento de vazios.

Após a análise dos dados da simulação para a lingoteira 1260, decidiu-se elaborar o ferramental, planejar e executar o procedimento para obtenção do lingote.

Figura 5. Resultados da simulação da solidificação ao longo do tempo para lingoteira 1260 utilizando-se um macho cônico de ferro fundido.



A Figura 6 mostra a montagem parcial do dispositivo para posterior lingotamento.

Diferentemente da simulação na qual foi utilizado material puramente refratário, durante a obtenção do lingote uma cerâmica exotérmica foi empregada na porção superior do conjunto.

### 3. RESULTADOS

A Figura 7 mostra o lingote produzido em aço SAE 8630. Tanto a superfície interna quanto a superfície externa foram consideradas satisfatórias.



Figura 6. Fotografia da montagem parcial do dispositivo. Lingoteira 1260.



Figura 7. Lingote "oco" logo após a desmoldagem.

Para fazer a avaliação do lingote foram retiradas duas amostras para análise macro-gráfica e em seguida o lingote foi submetido ao processo descrito na Figura 1.

### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos após a obtenção do lingote oco foram bastante aderentes com os resultados da simulação. A simulação da solidificação em computador auxiliou de forma contundente a tomada de decisões e evitou o uso do custoso método de tentativa e erro.

Sob o ponto de vista estrutural e de comportamento mecânico, o produto apresentou resultados que superaram as expectativas iniciais.



Figura 8. Reprodução da macroestrutura bruta de fusão.

Uma das amostras foi retirada junto ao pé do lingote e a outra retirada na porção logo abaixo do massalote (Figura 8). Observa-se a partir da macrografia que a região próxima ao furo tem uma estrutura bastante refinada, o que não ocorreria durante a solidificação de um lingote convencional. A presença de vazios também não foi verificada, o que mostra que o dispositivo montado foi capaz de realimentar o lingote. Tal divergência com a simulação pode ser atribuída à presença de material exotérmico na região do massalote utilizado durante a obtenção do lingote.

Observa-se também que as frentes de solidificação encontraram-se em aproximadamente 1/3 da espessura a partir da superfície interna o que está de acordo com os resultados mostrados na Figura 5.

As tenacidade é uma das propriedades mecânicas mais importantes para este produto e portanto foi avaliada utilizando-se ensaio charpy tipo V a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  e obteve-se resultado de 77Joules enquanto que o mínimo especificado é de 23 Joules.

Utilizando-se o novo lingote conseguiu-se um aumento de rendimento de 3,8% e produtividade do processo de 8% apenas na etapa de forjamento. Enquanto na aciaria a redução de metal líquido foi de 13%.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CAMPOS FILHO, M.P.; DAVIES,G.J. **Solidificação e fundição de metais e suas ligas**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1978. p 192
2. ELETROMETAL METAIS ESPECIAIS. Relatório Interno nº 12.1. Sumaré SP: 1992
3. IIDA,Y.; YAMAMOTO, T.; YAMAURA, S.;ASOH, K.; MATSUMO, J.; NISHIOKA, T. Development of hollow ingot for large forging. **Tetsu to Hagane**, Tokyo, v. 66. p.43-52, May 1980.
4. ASSUMPÇÃO, R.A.S.; MERLO, F.C. Produção de anel forjado a partir de um lingote “Oco” em Aços Villares S.A. São Paulo: Villares, 1984. [Relatório Interno].
5. PEHLKE,R.D. **Summary of thermal properties for casting alloys and mold materials**. Springfield: NTIS, 1982. 166 p.
6. GEIGER, G.H.; POIRIER,D.R. **Transport phenomena in metallurgy** . California:Addison Wesley, 1973. p.252-254.