



# ORIGEM DE DEFEITOS SUPERFICIAIS EM TARUGOS DE AÇOS AO CARBONO E BAIXA LIGA <sup>1</sup>

Jorge Madias <sup>2</sup>

## Resumo

O trabalho revisa o tema dos defeitos superficiais em tarugos de diversas qualidades de aços ao carbono e de baixa liga obtidos por lingotamento com jato aberto ou válvula submersa e lubrificação com azeite ou pó fluxante. Utiliza-se a observação visual e mediante microscópio stereo do defeito; o estudo metalográfico; o estudo das variáveis de processo e equipamento que influem na geração dos defeitos; a análise da bibliografia sobre o problema, a evolução do defeito durante a laminação e a influência no produto laminado. Entre os defeitos superficiais comuns na produção de tarugos, discute-se a porosidade superficial, as trincas transversais, as depressões e trincas longitudinais, a dupla pele, a escória etc. Recentemente, também se presta atenção à interação entre qualidade superficial, interna e de forma, visando obter uma casca ou camada *chill* de espessura importante e uniforme. A identificação precisa das características dos defeitos facilita a compreensão das causas que os originam, permite a aplicação de medidas corretivas certas, e senta as bases para evitar no futuro a recorrência do problema sob novas condições.

**Palavras-chave:** Lingotamento contínuo; Tarugos; Qualidade superficial; Trincas.

## ORIGIN OF SURFACE DEFECTS IN CARBON AND LOW ALLOY STEEL BILLETS

### Abstract

The work reviews the issue of surface defects in billets of different carbon and low alloy steel grades, cast with metering nozzle or submerged entry nozzle, and with oil or casting powder lubrication. Naked eye and stereo microscope observation; metallographic study; review of process and equipment variables with influence on the generation of defects, literature review, evolution of defects during rolling and influence on the final product are taken into account. The discussion includes most common defects in billets, like pinholes, transverse cracks, longitudinal cracks and depressions, double skin, slag entrapment, etc. Recently, attention is paid to interaction between surface, inner and shape quality, and evenness / thickness of the shell layer. The precise identification of the defect features makes easier the understanding of the root cause of their origin, helping in the application of corrective measures and giving place to sound bases to avoid the comeback of the problem under new conditions.

**Key words:** Continuous casting; Billet; Surface quality; Cracks.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2010, Resende, RJ, Brasil.*

<sup>2</sup> *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Diretor da metallon*



## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade superficial dos tarugos e blocos incide decisivamente sobre a qualidade dos produtos laminados. Para aumentar a produtividade e baixar os custos, permitindo o carregamento a quente e minimizando as etapas de inspeção, sem ter risco de reclamos externos, é preciso assegurar tarugos livres de defeitos. Isto é ainda mais complexo quando para satisfazer a demanda o lingotamento deve ser feito a alta velocidade, condição em que o relacionamento entre qualidade superficial, interna e de forma fica mais crítico.

A determinação da origem de defeitos na usina, visando sua minimização, inclui a observação dos aspectos gerais, tais como a frequência, localização, preferência por um veio ou uma face determinada no tarugo, maior frequência para certos graus de aço etc.

Também é importante o estudo detalhado do aspecto visual do defeito, a olho nu e com ajuda da lupa estereoscópica, assim como a observação de amostras polidas e atacadas com diversos reagentes.

A informação do processo de lingotamento contínuo e laminação é indispensável e pode aportar dados de importância.

Muitas vezes na própria usina defeitos que se apresentam hoje foram estudados ontem, e há disponibilidade de informação própria. A leitura da bibliografia pública, rastreada com bases de dados como a Metadex, proporciona um grande volume de informação: quase todos os defeitos já foram experimentados por alguém, e a experiência de outros sempre é interessante.

Também para definir a origem de defeitos algumas vezes é necessário desenhar acompanhamentos de corridas na aciaria e laminação. A modelação física ou matemática da formação de um defeito é necessária em alguns casos para estabelecer o mecanismo de formação dos defeitos.<sup>(1)</sup>

Os albuns de defeitos proporcionam informação limitada, mas de interesse. Geralmente contêm macro e micrografias dos defeitos, os nomes dados em diferentes línguas e algumas indicações sobre a origem e a forma de minimizar sua presença. Permitem classificar os defeitos pelo nome utilizado geralmente, ter uma idéia geral da origem e soluções, mas não permitem aprofundar muito no problema.

## 2 ESTUDO MACRO

O estudo da frequência, localização, espaçamento, etc., de um defeito, e a primeira tarefa necessária para estudar a origem.

Para a observação de defeitos superficiais em tarugos não há outra possibilidade que a de limpar previamente a superfície do tarugo com jato de areia, granalha de aço ou decapagem. A observação da superfície tal qual sai do lingotamento contínuo, com a carepa, só permite ver defeitos muito grosseiros e muitas vezes não permite ver trincas transversais, porosidade superficial e muitos detalhes da superfície que ajudam a ter uma idéia das causas dos defeitos.

Na Figura 1 apresenta-se um caso de tarugo observado sem limpeza e com limpeza. Na foto do topo, observa-se uma “gota fria” isolada no tarugo tal qual. Porém, após limpeza com jato de areia, a gota está associada a um conjunto de poros superficiais e outras gotas frias formando um cinto ao redor do tarugo, revelando um problema transitório ao nível do menisco, quando observado após limpeza com jato de areia.



**Figura 1.** Aspecto de defeitos do tipo gota fria e *pin holes* em tarugo. Esquerda: sem limpeza; direita: após limpeza com jato de areia.

### 3 ESTUDO METALGRÁFICO

A observação metalográfica de amostras polidas permite aportar informação de grande importância à hora de definir a origem de um defeito. Porém, muitas vezes não é possível somente pela observação de um corte transversal polido, sem ter uma idéia dos aspectos macro, definirem a origem. Na Tabela 1 são mencionados os diversos tipos de observação e a informação que cada um deles pode proporcionar.<sup>(2)</sup>

Um erro comum quando se tiram amostras para estudo de defeitos é escolher aquelas mais espetaculares, ainda que não sejam as mais típicas ou as mais representativas. Também são importantes os cuidados para a não contaminação das amostras. Muitas vezes além das amostras do produto final é interessante tirar amostras de cortes de tesoura, para determinar se o defeito está presente já nesse estado da deformação. Também porque às vezes as menores temperaturas da ponta e da cola aumentam os problemas de ductilidade, e porque a menor redução permite observar com mais facilidade a estrutura remanente da solidificação e estabelecer a posição do defeito no tarugo (cantos ou faces).

**Tabela 1.** Diferentes tipos de observação metalográfica, e informação que se pode extrair de cada um em relação com a origem dos defeitos

Tipo de observação	Informação obtida
Observação sem ataque	Localização, penetração, direção, oxidação interna, solda parcial, carepa, inclusões, incrustações de matérias estranhas.
Ataque com Nital 2%	Descarbonetação, bandeado, crescimento de grão, segregação, estruturas de transformação, localização dos cantos do tarugo, linhas de fluência do material.
Ataque com reagente de Oberhoffer	Segregação, estrutura de solidificação, localização dos cantos do tarugo, trincas de médio caminho, linhas de fluência do material
Ataque com cromato sódico alcalino	Penetração de oxigênio
Ataque com reagente de Béchet - Beaujard	Formação de gancho. Tamanho de grão austenítico. Estrutura de solidificação
Observação no microscópio eletrônico de varredura e análise EDS	Tirar dúvidas sobre carepa. Definir a origem das macroinclusões. Incrustações de materiais estranhos. Observação de fraturas no fio-máquina ou barras. Copos de hidrogênio



#### 4 POROSIDADE SUPERFICIAL (PIN HOLES)

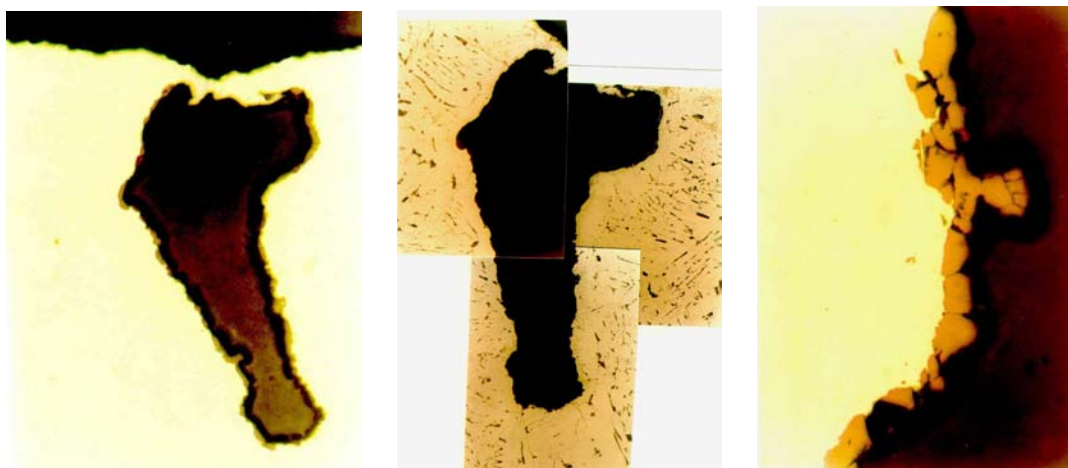
A presença de poros superficiais é comum para todos os aços lingotados com azeite. Os *pin-holes* podem dar lugar a defeitos superficiais de importância no produto laminado, se têm uma penetração importante ou se há muita quantidade em uma região localizada.

Na Figura 2 observa-se o aspecto dos *pin-holes* na superfície do tarugo previa limpeza com jato de areia. Neste caso, os *pin holes* estão distribuídos como nuvens transversais, que se repetem sobre a face ou faces envolvidas, seguindo um modelo cíclico, cada 10 cm.



**Figura 2.** Aspecto dos *pin-holes* na superfície de um tarugo lingotado com azeite, previa limpeza com jato de areia. Neste caso, os “pin holes” estão distribuídos como nuvens transversais, que se repetem sobre a face ou faces envolvidas, seguindo um modelo cíclico, cada 10 cm.

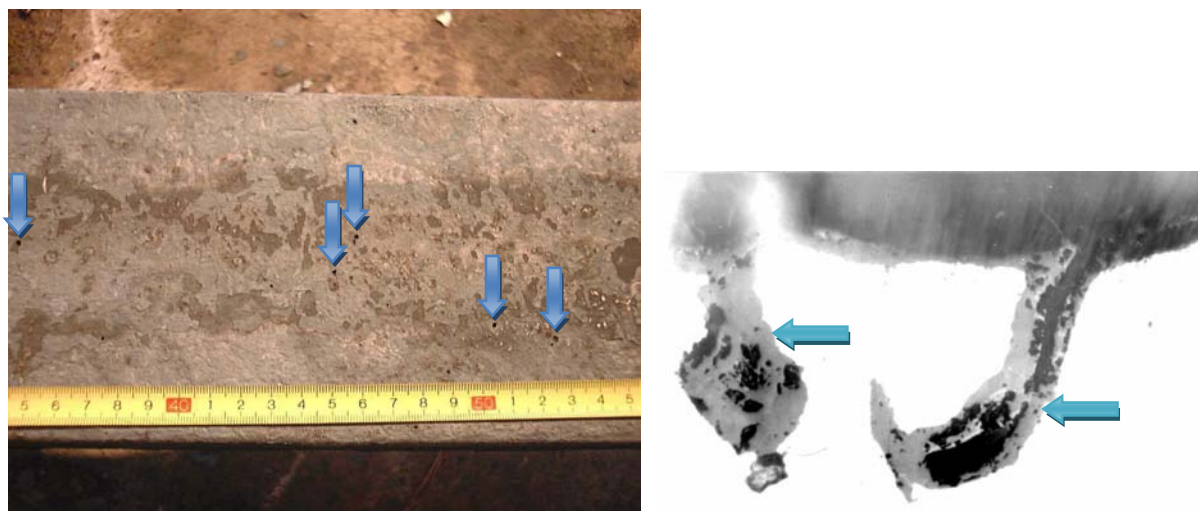
O aspecto dos *pin holes* no microscópio ótico é apresentado na Figura 3. Os poros superficiais apresentam formação de carepa na superfície e certa descarbonetação na matriz metálica ao redor do poro. Isto é uma diferencia importante com os poros subsuperficiais ou *blowholes*. A carepa impede a solda durante a laminação.



**Figura 3.** Aspecto de um “pin hole” em amostra polida tirada de um tarugo de aço de baixo carbono, no microscópio ótico. Esquerda: sem ataque. Centro: Ataque com Nital 1%. Observa-se certa descarbonetação na matriz metálica perto da superfície do poro. Direita: Detalhe da carepa na superfície do poro.



Uma grande parte dos *pin holes* desaparece durante o preaquecimento prévio à laminação, devido à formação de carepa. Mas os de maior profundidade não desaparecem,<sup>(3)</sup> e ficam totalmente oxidados interiormente (Figura 4).



**Figura 4.** *Pin holes* em tarugos reaquecidos. Esquerda: Tarugo de 150 x 150 mm de aço para vergalhão.<sup>(3)</sup> Direita: Amostra pegada de tarugo reaquecido, com *pin holes* recheios com óxido (comparar com Figura 3). Observação com microscópio ótico, sem ataque.

Durante a laminação, os *pin holes* remanescentes do reaquecimento são alongados na direção de laminação (Figura 5), até ficar como um defeito longitudinal leve na barra ou ainda desaparecer da observação a olho nu no fio-máquina.



**Figura 5.** Alongamento do *pin hole* ao longo da laminação. Amostra tirada de cobre.

Finalmente, nos cortes transversais polidos da barra ou do fio-máquina, os *pin holes*, a diferencia das trincas, têm a característica de ter maior espessura na parte interna que na superfície. Também de maneira geral estão cheios de carepa. É comum observar descarbonetação e até oxidação interna.

A orientação com respeito à superfície depende da deformação sofrida pela barra durante a laminação. A penetração depende da penetração original e da redução durante a laminação, mas pode chegar a 0,2 mm.

O defeito gerado pelo *pin holes* é normalmente pequeno. Porém, se há muitos *pin holes* ou se são particularmente profundos, podem dar lugar a defeitos inaceitáveis. Também o tempo de permanência e a temperatura no forno de preaquecimento, se o tarugo tem *pin holes*, pode agravar a situação.



Os valores normais de vazão de azeite estão entre 20 ml/min e 30 ml/min, dependendo das características do azeite, bitola lingotada e velocidade de lingotamento.<sup>(4)</sup> Para minimizar a formação de *pin holes* não só é importante assegurar que a adição de azeite esteja dentro de valores normais, mas também é importante verificar que a distribuição do azeite seja homogênea na seção transversal.

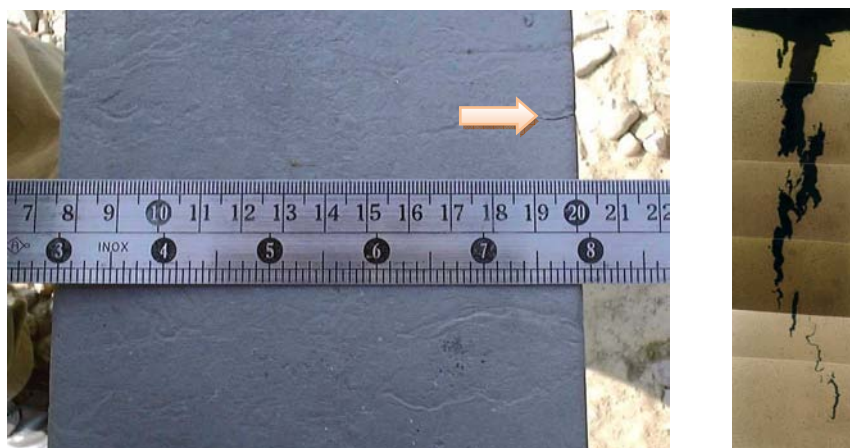
A distribuição homogênea do azeite é favorecida por ranhuras de lubrificação estreitas e utilização de uma vedação ou *gasket* que impede um excesso de azeite nos cantos.<sup>(5)</sup> O fenômeno inverso ao da porosidade superficial é o da dupla pele, gerado por falta de azeite. Às vezes, a heterogeneidade na distribuição de azeite pode ser tão grande como para que se observe em distintas faces de um mesmo tarugo, *pin holes* e dupla pele.

No lingotamento com válvula submersa e pó fluxante pode ocorrer porosidade superficial em condições de presença de umidade no pó, ou alta turbulência no molde, onde pó sem fundir, com carbono livre, pode ficar em contato com o aço.<sup>(6)</sup> A baixa tensão interfacial entre o aço líquido e a escória no molde, como ocorre quando o aço tem teores elevados de enxofre ou oxigênio, favorece as condições para o arraste do fluxante.

## 5 TRINCAS TRANSVERSAIS

As trincas transversais, ainda às vezes não sejam observadas na inspeção visual dos tarugos, dão sempre lugar a defeitos superficiais de importância no produto laminado.

Na Figura 6 (esquerda) observa-se o aspecto da trinca transversal em tarugos, após limpeza com jato de areia.<sup>(3)</sup> À direita vê-se um detalhe de uma trinca transversal no microscópio ótico. A parte mais superficial da trinca tem aspecto de ter-se produzida a quente, possivelmente no molde. Já a parte interna da trinca é intergranular, o que significa que foi produzida a frio, provavelmente no desempenho, por propagação da trinca formada no molde.



**Figura 6.** Trincas transversais. Esquerda: Aspecto em tarugo limpo com jato de areia.<sup>(3)</sup> Direita: Detalhe de uma trinca transversal no microscópio ótico, logo de ataque com reativo de Oberhoffer.

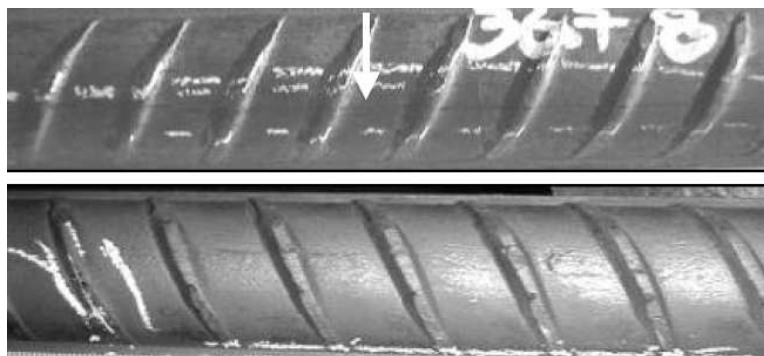
As trincas evoluem durante a laminação formando inicialmente defeitos em V (Figura 7, esquerda). No corte transversal, os defeitos têm mudança de direção (Figura 7, direita). Porém, se a bitola é menor ou a redução é maior, o defeito



prossegue deformando-se até ficar como um defeito longitudinal, às vezes com uma escama no extremo (Figura 8).



**Figura 7.** Evolução das trincas transversais durante a laminação, formando defeitos em V. Esquerda: aspecto de uma barra de aço de baixo carbono resulfurado a olho nu. Direita: corte transversal polido e macroatacadado da mesma barra.



**Figura 8.** Defeitos gerados por trincas transversais leves em vergalhão. Topo: trinca sem escama. Embaixo: trinca com escama no extremo.<sup>(3)</sup>

As trincas transversais podem originar-se no molde ou durante o desempenho. Quando as trincas estão em qualquer dos cantos do tarugo, o mecanismo de formação proposto é esforços de tração nos cantos, causados por colamento do veio ao molde, por exemplo, por falta de lubrificação, agravado se houver marcas de oscilação muito profundas.

Quando as trincas se encontram só nos cantos ou as faces correspondentes ao raio interno, é provável que tivessem sido geradas por esforços de tração no desempenho. O problema se agrava se a temperatura dos cantos no desempenho corresponde a uma zona de baixa ductilidade do aço, por exemplo, entre 700°C e 900°C.<sup>(9)</sup> Neste caso também marcas de oscilação profundas agem como concentradoras de tensões.

Uma aproximação fundamentada para resolver o problema é conhecer a curva de ductilidade do material às temperaturas de desempenho, e dispor da medição on-line de temperatura do tarugo ou de um modelo da transferência de calor e solidificação no lingotamento contínuo, para estimar essa temperatura.

Particular sensibilidade têm os aços com elementos microligantes que podem precipitar nitretos ou carbonitretos a temperaturas elevadas (B, Nb, Ti); é importante estimar a influência na fragilidade a quente. Por exemplo, na Figura 9 apresenta-se uma curva de ductilidade para um aço de baixo carbono ao boro, com queda de ductilidade a temperatura elevada. Medidas como aumentar a velocidade de lingotamento ou diminuir a vazão específica de água no resfriamento secundário, dentro de certos limites, podem contribuir à ter melhores propriedades a quente no desempenho.<sup>(10)</sup>

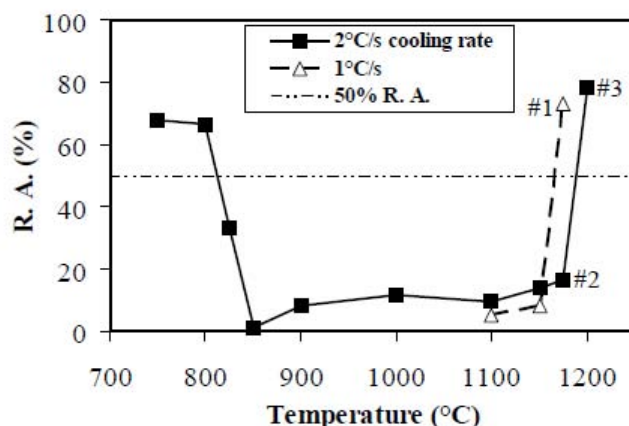


Figura 9. Dutilidade entre 750 e 1200 °C de aço baixo carbono ao boro.<sup>(7)</sup>

## 6 DUPLA PELE

Deve-se à falta de lubrificação localizada ou geral, que provoca o colamento da superfície solidificada do veio contra o molde, sem chegar a produzir uma perfuração.<sup>(8)</sup> Também é favorecida por altas velocidades de lingotamento e parâmetros de oscilação inadequados. Pode dar lugar à formação de escamas durante a laminação a quente. O aspecto da dupla pele no tarugo observa-se na Figura 10.<sup>(3)</sup>

Na Figura 11 tem-se um corte polido ao longo do defeito no tarugo. Resulta fácil imaginar a formação de escama durante a laminação, com a incorporação da carepa existente no degrau.

Como foi discutido no parágrafo sobre porosidade superficial, a lubrificação no molde pode ser muito irregular. No caso da lubrificação com azeite, ainda o valor global da vazão de azeite seja correto, se a distribuição transversal é ruim ou se não há ajuste da vazão com as mudanças de velocidade de lingotamento, pode haver falta de lubrificação. Portanto, as medidas para controlar este defeito são semelhantes às recomendadas para os *pin holes*. No caso da lubrificação com fluxante, incide também a velocidade de fusão e as mudanças na composição da escória por interação com o aço e o refratário.

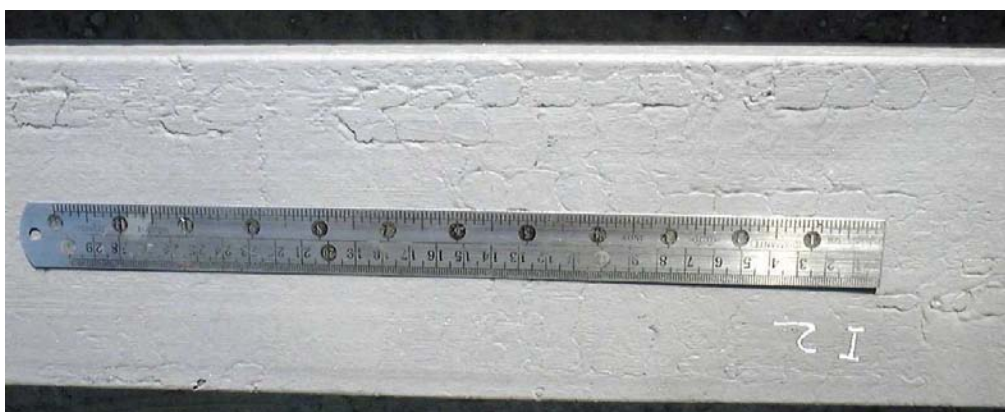
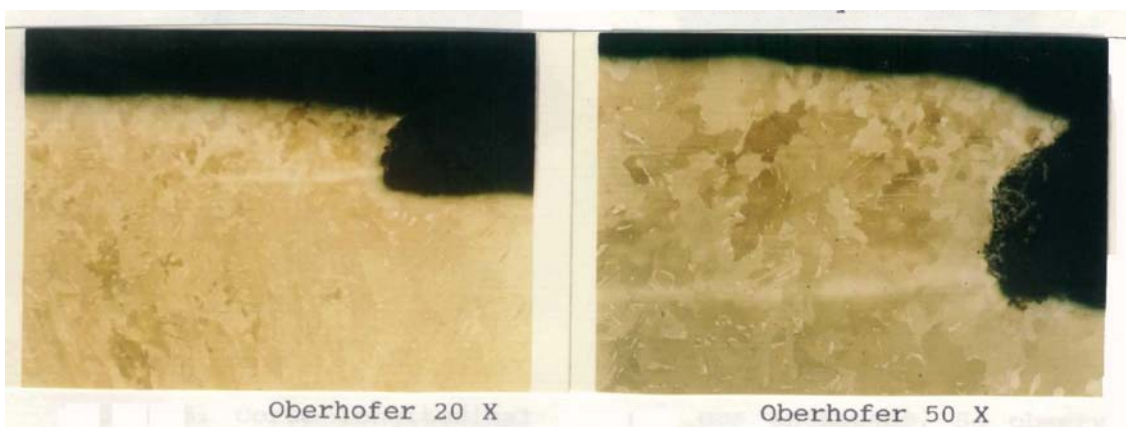


Figura 10. Aspecto da dupla pele na superfície do tarugo, logo de limpeza com jato de areia.<sup>(3)</sup>

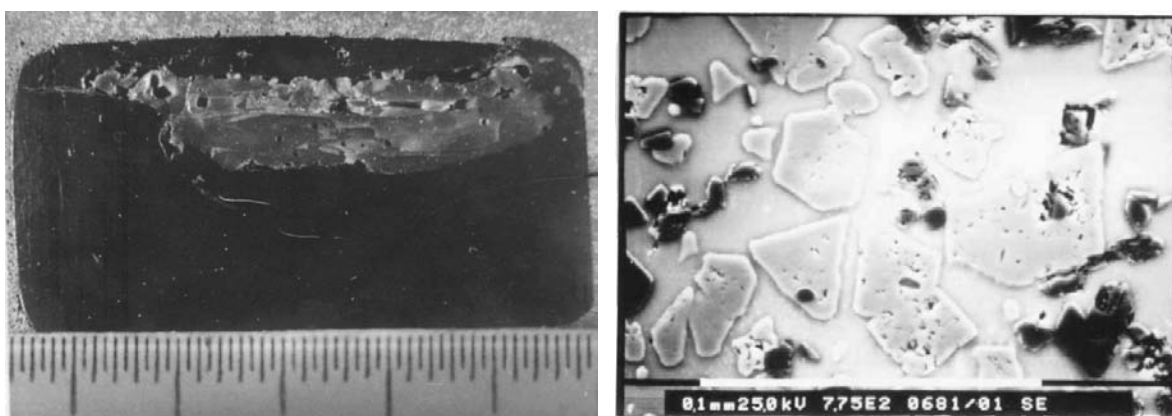




**Figura 11.** Corte polido ao longo do defeito de dupla pele no tarugo. Topo: sem ataque. Observa-se carepa no degrau. Embaixo: atacada com reativo de Oberhoffer. Observa-se linha de segregação.

## 7 INCRUSTAÇÕES DE ESCÓRIA / PÓ FLUXANTE

A incrustação de escória é um defeito superficial que implica o sucateado do tarugo envolvido ou defeitos importantes no fio-máquina, barra ou perfil. Pode aparecer superficial ou às vezes subsuperficialmente (Figura 12).



**Figura 12.** Incrustação de escória. Esquerda: aspecto num corte polido do tarugo. Direita: detalhe da estrutura da incrustação: cristais claros de galaxita ( $MnO \cdot Al_2O_3$ ) e escuros de alumina, em matriz de silicato de manganês.

No lingotamento com válvula aberta, se forma escória no molde por reoxidação do aço durante o lingotamento. Os óxidos formados vão se acumulando ao nível do menisco e são eventualmente arrastados sobre a superfície do veio dando lugar ao defeito de incrustação.<sup>(9)</sup>

Dada certa quantidade de óxido sobrenadante, a tendência ao arraste estará determinada pelo ponto de fusão, a fluidez ou a viscosidade e a tensão interfacial com o aço líquido. Escórias líquidas, fluídas e afins ao aço formarão uma película fina e contínua sobre o veio, entanto que compostos de alto ponto de fusão, sólidos ou muito viscosos, serão arrastados em forma de partículas discretas de tamanho variável.

A composição da escória no molde está determinada por uma parte pelo aço que a origina; existe certa relação entre a relação Mn/Si no aço e a relação MnO/SiO<sub>2</sub> na escória de molde.<sup>(11)</sup> Essa relação determina as características físicas da escória e tem-se observado que um aumento no conteúdo de MnO, que leva à escória mais perto da composição eutética, diminui a incrustação da escória. Por outra parte, as

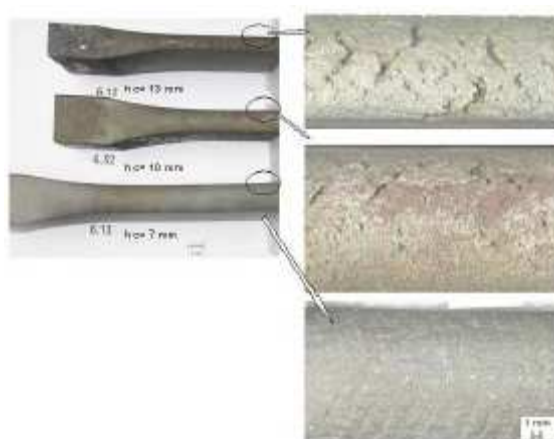


práticas de injeção de arame de alumínio no molde podem também dar resultar em alto teor de alumina e o decorrente.

## 8 CAMADA *CHILL* DO TARUGO

A casca do tarugo é uma região onde interage a qualidade interna, superficial e de forma, particularmente no lingotamento a alta velocidade. Por exemplo, as depressões longitudinais estão ligadas a trincas internas e baixa espessura da camada de primeira solidificação.

A espessura da capa formada durante a solidificação no molde, e sua uniformidade, tem grande influência sobre o comportamento do aço na laminação, particularmente nos aços de baixa ductilidade a quente (Figura 13). Pesquisas recentes na Comunidade Europeia aprofundam nesta direção, utilizando uma variedade de ferramentas.<sup>(12)</sup>



**Figura 13.** Laminagem piloto de aço 9MnS28 previa extração de diferentes espessuras da casca. 60% redução, 960°C.<sup>(12)</sup>

## 9 CONCLUSÕES

A boa qualidade superficial dos tarugos e blocos é importante para obter produtos laminados com baixo nível de refugo. As ferramentas da metalografia e o modelamento podem ser utilizados para definir a origem dos defeitos e definir as ações necessárias para diminuir sua ocorrência.

Nas condições de alta demanda, o lingotamento a alta velocidade propõe desafios importantes para o aciaria, porque a relação entre defeitos superficiais, internos e de forma e maior e os diversos fatores que dão origem aos defeitos estão exacerbados.

## REFERÊNCIAS

- 1 THOMAS, B.G.; JENKINS, M.S.; MAHAPATRA, R.B. Investigation of strand surface defects using mould instrumentation and modeling. IRONMAKING AND STEELMAKING 2004 Vol. 31 No. 6 485-494.
- 2 REDA L.; GENZANO C.; MADIAS J. Methodology for metallographic study of defects in carbon steel long products. 2001 ELECTRIC FURNACE PROCEEDINGS, 771-780.
- 3 BARRIENTOS, A.; OSORIO, L.; DIETER, N.; SILVA, P.; GENZANO, C.; DZIUBA, M. Minimizacion de defectos superficiales en barras para refuerzo de hormigón. 14ª



- CONFERENCIA DE ACERÍA DEL IAS, San Nicolás, Argentina, Noviembre 2002, 257-264.
- 4 BRENDZY, J.L.; BAKSHI, I.A.; SAMARASEKERA, I.V.; BRIMACOMBE, J.K. Mould-strand interaction in continuous casting of steel billets. Part 2 Lubrication and oscillation mark formation. *Ironmaking and Steelmaking* No. 1 1993 63-74.
  - 5 BAKSHI, I.A.; BRENDZY, J.L.; WALKER, N.; CHANDRA, S.; SAMARASEKERA, I.V.; BRIMACOMBE, J.K. Mold-strand interaction in continuous casting of steel billets. Part 1 Industrial Trials. *Ironmaking and Steelmaking* No. 1 1993 54-62.
  - 6 IANCU, A.; VASILESCU, Gh. Pin holes in continuously cast billets. *METALLURGY AND NEW MATERIALS RESEARCHES*, Vol. 9 No. 3 (2001) 15-27.
  - 7 CHOWN, L.H.; BENTELEY, A.P.; VERDOORN, F.A. The influence of sulphide precipitation on hot ductility in a boron steel. *PROCEEDINGS 40<sup>TH</sup> ANNUAL CONFERENCE OF THE MICROSCOPY SOCIETY OF SOUTHERN AFRICA*, p. 25.
  - 8 BONILLA, C.; SIDORENKO, D.; KAMAL, J. Factors influencing the formation of bleeds in the continuous casting of steel billets. *1999 STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS* 35-44.
  - 9 GENZANO, C.; REDA, L.; MADIAS, J. Minimization of surface defects in bar and wire rod originated in billet casting. *XXXIV SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DA ABM*, 19 a 21 de maio de 2003, Belo Horizonte, MG, Brasil, 386-395.
  - 10 CARVALHO FERNANDES, P.; CARNINO, V.; MAHL, R.L. 14<sup>a</sup> CONFERENCIA DE ACERIA DEL IAS, San Nicolás, Argentina, Noviembre 2003, 287-294.
  - 11 SANTILLANA, B.; MADIAS, J.; DZIUBA, M.; OROPEZA, M.; FERNANDEZ, E. Minimisation of slag entrapment and cold drops in Sidetur billets. *IRONMAKING AND STEELMAKING 2003* Vol. 30 No. 6 511-515.
  - 12 FARRUGIA, D.; HUSAIN, Z.; SANTISTEBAN, V.; LLANOS, J.; BIANCHI, J.; VESCOVO, P.; PERA, J.; RODRÍGUEZ-IBABE, J.; REVILLA, C.; FREDRIKSSON, J.; DEMURGER, J.; FORESTIER, R.; KIEBER, B. PACROLP: the prediction and avoidance of cracking in long product hot rolling. *Final Report EUR 23890 2009*.