

OTIMIZAÇÃO DE DESCARTE DE INÍCIO DE LINGOTAMENTO PARA AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA*

Fernando Paulucio Quinelato¹
Daniel Abbott Albertacci²
Celso Luiz Moraes Alves³

Resumo

No cenário econômico atual do mercado siderúrgico, otimizações de processo que aumentem o rendimento metálico estão no alvo das empresas competitivas. Além disso, cada vez mais os clientes exigem níveis mais elevados de qualidade e menor índice de recusa. Neste contexto, desenvolver trabalhos que conciliem otimização e garantia de qualidade são prioritários para o negócio. O objetivo deste trabalho é definir o menor descarte de início de lingotamento para aços com aplicações severas com total garantia de qualidade. Foi elaborada uma metodologia específica para avaliação da qualidade dos produtos: placa e bobina laminada a quente. Primeiramente, avaliou-se a quantidade de inclusões não metálicas em placas, o que permitiu determinar o comprimento de descarte mínimo necessário para garantia de qualidade das placas. Posteriormente, análises de inclusões também foram realizadas em bobinas para confirmar os resultados da ação de alteração de tonelagem de descarte. Os resultados mostraram que as placas produzidas após o descarte determinado pelo estudo resultaram em bobinas aptas para atendimento das aplicações, sem nenhuma perda de qualidade.

Palavras-chave: Qualidade; Lingotamento Contínuo; Inclusões não Metálicas.

OPTIMIZATION OF DISCARD IN STARTING CASTING OF HIGH STRENGTH STEEL SLABS

Abstract

In the current steel economic scenario, process optimizations that increase metallic yield are the target of competitive companies. Additionally, the customers' demand is increasingly for higher quality levels and lower rejection index. In this context, developing works that combines optimization and quality assurance is priority for the business. The focus of this work is on defining the lowest discard from continuous casting start of several application steels with total quality assurance. A specific methodology for the evaluation of the quality of the products slab and hot coil was utilized. Firstly, a quantitative evaluation of nonmetallic inclusion in slabs was conducted and this evaluation allows establishing the minimum length of slab discard necessary to guarantee the slab quality. After that, qualitative analyses of nonmetallic inclusions were conducted also in hot coils to confirm the results from the action of changing the discard tons. The results shown that the produced slabs after the discard defined based on the investigation generated suitable coils for the applications, without any loss of quality.

Keywords: Quality; Continuous Casting; Nonmetallic Inclusions.

¹ *Bacharel em Engenharia Metalúrgica, Especialista em Engenharia, Processo de Solidificação e Produto, CSN, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.*

² *Bacharel em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda - RJ, Brasil.*

³ *Professor, Dr.-Ing., Depto de Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda - RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

As inclusões não metálicas no aço podem resultar de três origens distintas, sendo produto de desoxidação, reoxidação ou exógenas ao processo. O primeiro caso advém da utilização de um agente desoxidante, o segundo é oriundo de reação entre o aço e a escória ou o aço e o ar atmosférico, e o terceiro é proveniente, principalmente, do aprisionamento de partículas: de escória da panela, de material refratário do distribuidor ou do pó fluxante [1].

Para aplicações de aço com alto requisito de qualidade, no que diz respeito ao teor de inclusões não metálicas e qualidade superficial, é uma prática industrial comum não utilizar placas de início de lingotamento ou descartar um comprimento inicial de placa a fim de garantir a qualidade do aço para a aplicação.

Esse descarte inicial de aço é advindo das condições severas de processo nas quais as placas desse início de lingotamento estão submetidas, destacando-se o contato do aço líquido com o ar atmosférico no instante em que a panela é aberta e o aço é transferido para o distribuidor vazio. Neste momento inicial do lingotamento ocorre a formação de inclusões não metálicas por reoxidação do aço [1].

A reoxidação aumenta o teor de inclusões no aço e, conseqüentemente, o oxigênio total, que é um indicador de limpeza interna do aço, pois este mede todo oxigênio presente ao aço seja dissolvido ou na forma de óxidos. Para aços tratados com cálcio, no qual objetiva-se alterações de morfologia de inclusões e liquefação das mesmas durante o lingotamento, o aumento do oxigênio total aumenta a fração sólida de inclusões no aço [2]. Além disso, com o contato do aço líquido com o ar, elementos desoxidantes como Al, Ca e Si são preferencialmente oxidados [3], conseqüentemente, a redução do teor de cálcio no aço também favorece a formação de inclusões sólidas durante o lingotamento. Logo, a alteração da morfologia de inclusões pode ficar comprometida, uma vez que inclusões com morfologia esférica são provenientes de inclusões líquidas durante o lingotamento [4].

Ainda na partida do lingotamento, o início de transferência de aço líquido do distribuidor para o molde ocorre sob exposição ao ar atmosférico o que influencia na geração de inclusões por reoxidação. Além disso, esta transferência causa turbulência de aço líquido dentro do molde, o que pode provocar o aprisionamento de partículas de escória ao aço [3].

Após o enchimento do molde, o início de lingotamento ocorre com controle manual de nível de aço líquido no molde, no qual são observadas flutuações de nível da ordem de 30mm. Tais flutuações favorecem o aprisionamento de partículas de pó fluxante à pele solidificada, sendo recomendado trabalhar, em condições normais de lingotamento, com controle automático de nível de aço líquido no molde objetivando flutuações de 3mm [5].

As flutuações de nível de aço líquido no molde também podem gerar na placa defeitos superficiais, tais como trincas transversais, longitudinais, depressões, sangrias (vazamento de metal para a superfície do molde) e dobras (sobreposição de camadas sólidas na superfície) [6].

O objetivo deste trabalho é determinar, através de análise quantitativa de inclusões em placas de início de lingotamento, a extensão na qual ocorre a maior fração de inclusões e o ponto onde há a estabilização da fração volumétrica dessas inclusões não metálicas. Verificações da qualidade superficial das placas também foram foco do trabalho, uma vez que as condições de processo iniciais do lingotamento podem favorecer a ocorrência de defeitos superficiais. Por fim, foi realizada a validação do trabalho através de análise qualitativa de inclusões em bobinas laminadas a quente.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Os aços aplicados ao trabalho são da família *Dual Phase* e Alta Resistência Baixa Liga (ARBL) microligados ao nióbio e titânio com adições de manganês entre 1,0 e 1,5% em peso.

Para avaliação do teor de inclusões ao longo da placa de início de lingotamento, foram retiradas 4 sequencias de amostras, sendo três de somente uma placa e uma de outra placa. No primeiro caso foram retiradas amostras nas laterais e no centro, a cada 500mm ao longo de 5500mm de comprimento da placa, totalizando 3 sequencias de 12 amostras. Na segunda placa as amostras foram retiradas de uma lateral, a cada 500mm ao longo de 5.500mm de comprimento, totalizando 1 sequência de 12 amostras. A Figura 1 apresenta a placa submetida a amostragem nas duas laterais e centro. Para referência, a posição zero será definida a 500mm da região inicial do lingotamento, devido ser este o comprimento descartado para a retirada do excesso de material refrigerante utilizado no molde durante a partida do lingotamento. O marco zero de referência pode ser visto pelo corte da placa à esquerda da Figura 1.



Figura 1 – Placa marcada para retirada de amostras ao longo do comprimento.

Após o corte a chama das amostras das placas, as mesmas foram aparadas a frio, de forma a atingir uma dimensão de 20mm x 20mm x 20mm. Posteriormente, as amostras foram embutidas em baquelite e preparadas para análise metalográfica. A preparação metalográfica seguiu a ordem definida na Tabela 1.

Tabela 1 – Procedimento de preparação de amostra

Tipo de análise	Lixamento	Polimento
Inclusões não metálicas	Lixas: 220, 400, 600, 800, 1000 e 1200 mesh.	Pasta diamante: 6, 3 e 1 μm .

Cada amostra embutida, lixada e polida foi levada a um microscópio ótico e particionada em 4 para obtenção de 8 imagens. A Figura 2, a seguir, ilustra o

particionamento de cada amostra e a posição das micrografias. Sendo assim, foram feitas no total 384 micrografias (4 sequencias de amostras x 12 posições na placa ao longo do comprimento x 8 imagens).

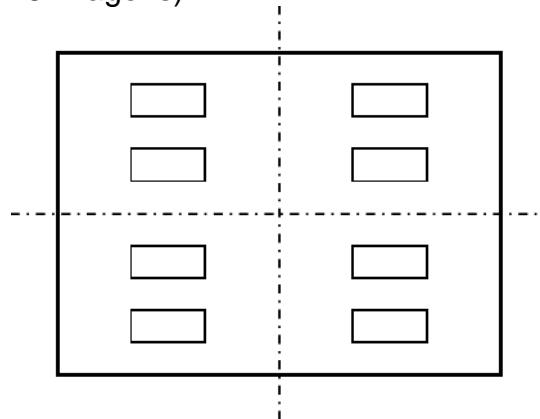


Figura 2 – Esquema de partição das amostras para obtenção das imagens.

As imagens foram capturadas com aumento de 100x e encaminhadas ao software ImageJ® para utilização do recurso de diferenciação de fases através das diferenças de coloração entre aço e inclusões não metálicas. Como as inclusões são escuras nas micrografias, é possível determinar a fração de regiões escuras da imagem e relacionar esse valor à fração volumétrica de inclusões, conforme apresentado na Figura 3. Foi admitido na presente análise como premissa, que todo ponto escuro seja uma inclusão não metálica.

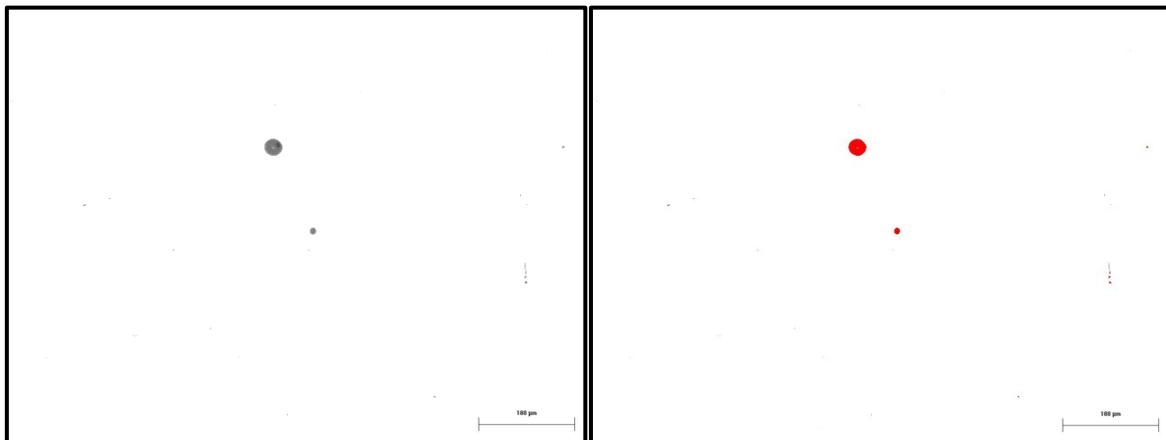


Figura 3 – Micrografia obtida com microscópio ótico (esquerda). Micrografia tratada com recurso de diferenciação de fases (direita). Aumento de 100x.

Para a determinação do teor de inclusões ao longo do comprimento da placa foi calculada uma média da fração de inclusões das 8 imagens de cada amostra, que posteriormente foram plotados num gráfico “Fração de Inclusões versus Comprimento da Placa”. Tal gráfico serviu como base para a determinação da região de transição entre maior e menor fração volumétrica de inclusões e, conseqüentemente, a determinação do descarte necessário.

Além do estudo de inclusões, inspeções visuais foram realizadas na superfície das placas de início de sequência antes e após o processo de escaafagem (que consiste na remoção de uma camada de aço de aproximadamente 2mm de espessura da superfície da placa). O objetivo é verificar a região de transição de controle de nível

do molde de manual para automático e ocorrências de trincas, depressões, porosidades ou qualquer outro defeito superficial na placa.

Após o estudo descrito acima em placas, fez-se também uma validação do trabalho em produto final através de verificações do teor de inclusões em amostras de bobinas laminadas a quente. Essa verificação foi realizada seguindo o quadro comparativo de classificação de inclusões conforme norma ASTM E-45 [7]. Para tal finalidade, foi determinada, estatisticamente, a quantidade de bobinas a serem amostradas em função da produção total histórica das placas de início de sequência dos aços estudados. O número de amostras de bobinas determinado para validação do projeto foi de 26.

Definida a quantidade de bobinas a serem analisadas, a amostragem ocorreu no início e final de cada uma delas, conforme Figura 4.

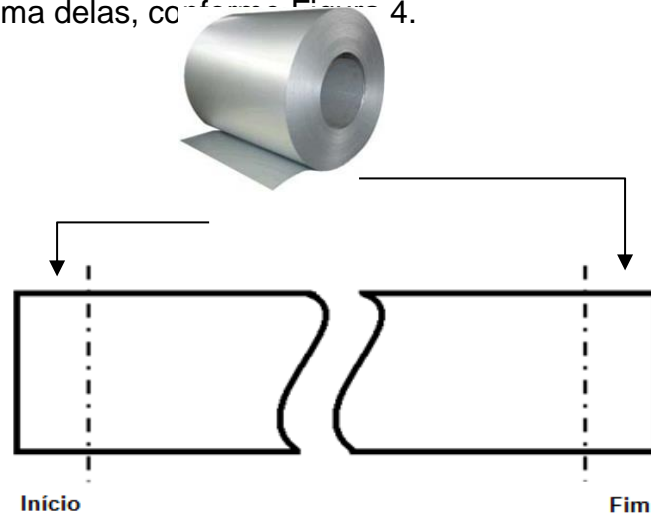


Figura 4 – Local de amostragem das bobinas a quente.

Cada amostra de cada bobina foi dividida em 3 ao longo da largura, sendo designadas por lado 1, meio e lado 2. Desta forma garante-se que toda extensão de largura estará sendo avaliada. Com esta metodologia descrita para análise em bobinas, foram realizadas 156 avaliações de inclusões não metálicas (26 bobinas x 2 extremidades x 3 posições em cada extremidade).

2.2 Resultados e Discussão

A Figura 5 apresenta a fração volumétrica de inclusões, expressa em percentual, ao longo do comprimento da placa. Nessa figura, o marco “zero” se relaciona com o corte transversal observado na Figura 1. Observa-se pelo resultado da Figura 5 que há uma estabilização da fração de inclusões a partir do comprimento de 2000mm, pois não há significativa variação nas frações volumétricas de inclusões não metálicas para os comprimentos entre 2000 e 5250 mm.

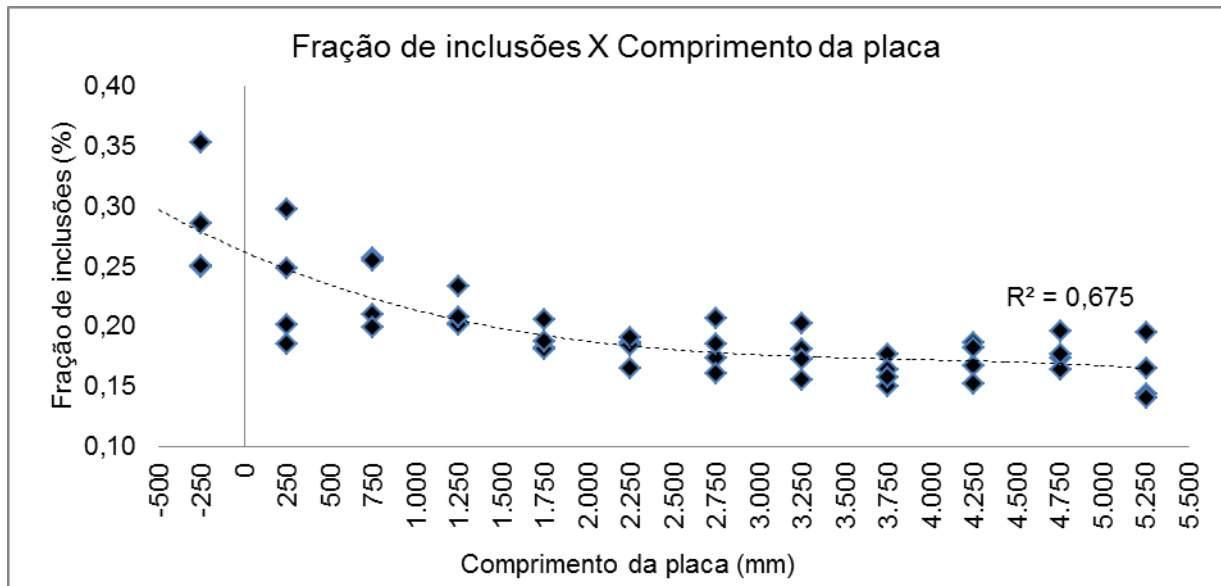


Figura 5 – Gráfico Fração de inclusões versus Comprimento da placa.

A Figura 6 apresenta micrografias de inclusões observadas na região de início de lingotamento, indicada no gráfico da Figura 5 como sendo a região de -250mm. Observa-se que as inclusões não metálicas encontradas nessa região mostram-se grosseiras, com dimensão chegando a aproximadamente 200 μm . A Figura 7, por sua vez, apresenta micrografias de inclusões não metálicas na posição de 2.250mm. Nesta última figura, nota-se que a dimensão das inclusões é inferior às observadas na Figura 6. Baseando-se nos resultados observados nas Figuras 5, 6 e 7, evidencia-se que a região mais crítica em relação a fração volumétrica e dimensão das inclusões não metálicas está no início de lingotamento. Essa evidência corrobora com resultados observados em [1], [2], [3], [4] e [5], onde tal diferença é resultante das condições de lingotamento nas quais a primeira porção do lingotamento está submetida, como por exemplo: reoxidação por jato aberto, arraste de partículas exógenas e turbulência no molde. Tais condições favorecem a formação de inclusões grosseiras e em maior volume nos aços.

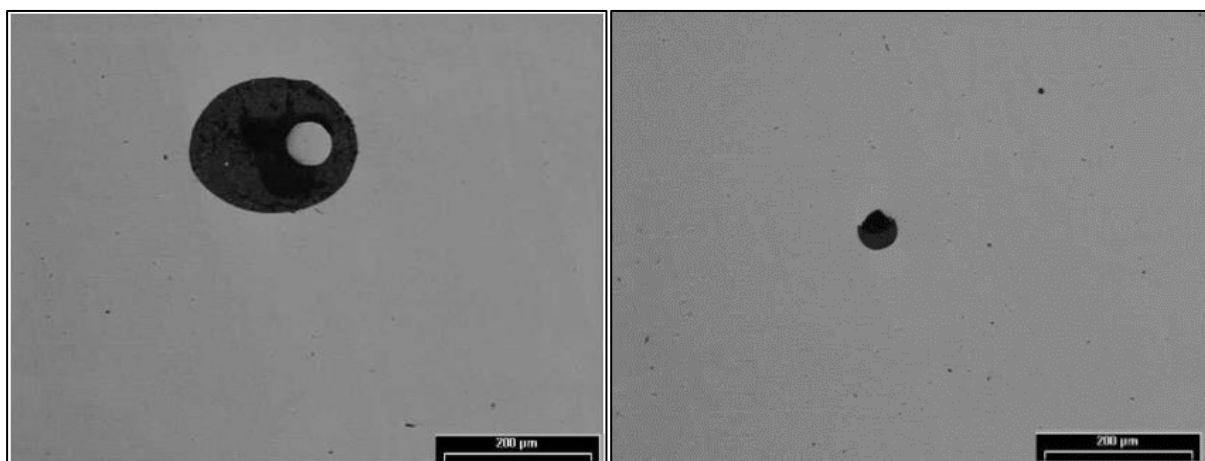


Figura 6 – Micrografias referentes a posição -250mm da placa.

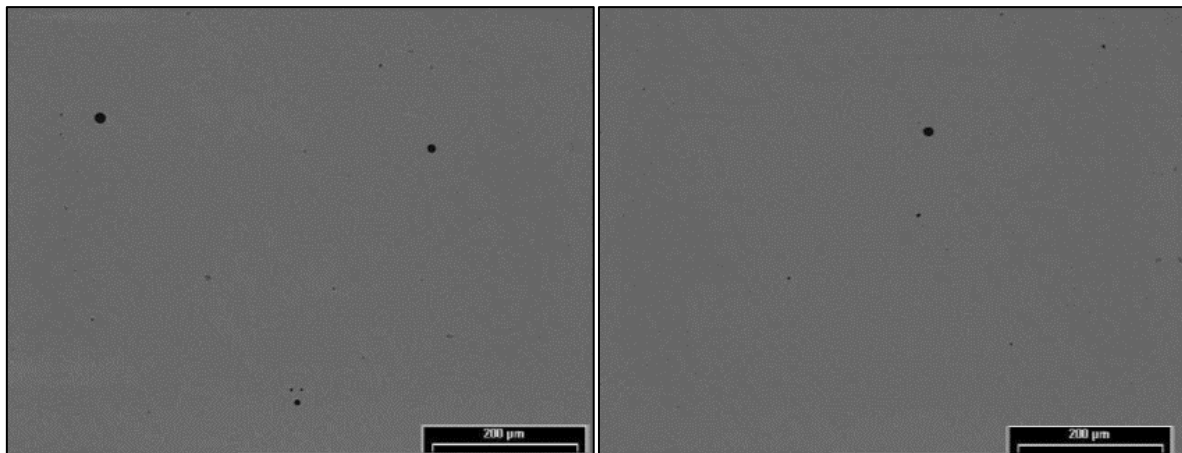


Figura 7 – Micrografias referentes a posição 2.250mm da placa.

Com a inspeção visual nas placas após o lingotamento, sem nenhum retrabalho aplicado, foi possível determinar a região de transição entre o controle manual de nível de molde, decorrente da partida da máquina de lingotamento, e o controle automático. Observou-se que a região de transição ocorre sempre na faixa de 1500mm a 2200mm de placa produzida (já desconsiderando o descarte inicial de 500mm). O valor obtido com a inspeção está de acordo com o valor verificado com o acompanhando das partidas de máquina de lingotamento, onde foi examinado, na prática, o exato momento operacional no qual o controle de nível do molde é alterado para automático. As inspeções revelaram, ainda, defeitos superficiais tais como depressões e dobras na região de controle manual, conforme indicado por [6], que são decorrentes das grandes flutuações de nível. A Figura 8 apresenta o defeito depressão encontrado e a transição de controle de nível de aço no molde de manual para automático. Essa transição foi diferenciada através das análises visuais das marcas de oscilação, que para o caso automático, apresentam-se paralelas e numa periodicidade constante.



Figura 8 – Região de transição de controle de nível de aço no molde de manual para automático com defeito na região de controle manual (esquerda). Diferenciação da região de transição (direita).

Também foram realizadas inspeções nas placas após o processo de escarfaagem. O resultado mostrou que até a posição 2.200mm é observada porosidades, conforme apresentado na Figura 9. Tais porosidades são resultados do regime turbulento dentro do molde no início de lingotamento.



Figura 9 – Porosidade na superfície da placa revelada após a escarrafagem.

Não foram observados outros defeitos nas placas e, com base no estudo apresentado, foi determinado um descarte mínimo de 3.000mm (posição -500 a 2.500mm) de forma a remover qualquer fator que prejudique a qualidade do material ou possa causar defeitos nas bobinas. A Figura 10, a seguir, mostra uma placa escarfada isenta de defeitos superficiais produzida após o descarte estabelecido.

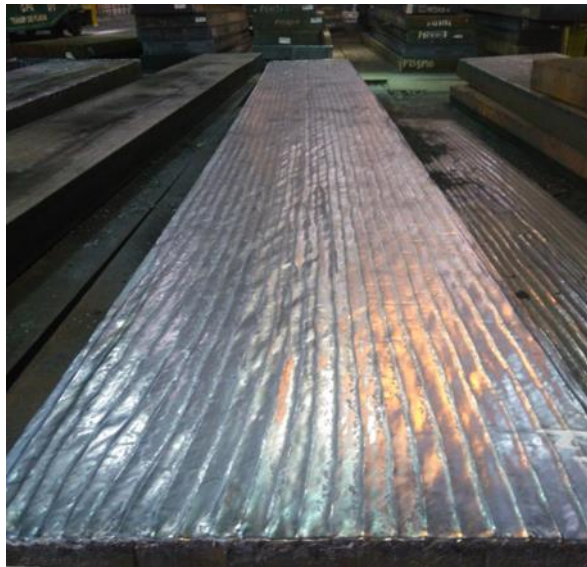


Figura 10 – Placa isenta de defeitos produzida após descarte de 3.000mm.

Realizada a determinação do descarte mínimo para a garantia de qualidade da primeira placa do lingotamento, o trabalho foi continuado com avaliações em bobinas de laminados a quente. A Figura 11 traz de forma gráfica os resultados médios obtidos para as inclusões do tipo A, B e D (sulfeto, aluminato e óxido globular, respectivamente) das amostras medidas em bobinas e o valor de “Referência Máxima” (relacionado à máxima severidade tolerada para aprovação do trabalho). Nessa figura, nota-se que não há variações de severidades de incidência de inclusões ao longo da largura da bobina nem em relação às extremidades (início e final). Portanto, pode-se assumir que a distribuição de inclusões está homogênea ao longo de toda a bobina, atestando que o descarte proposto de 3000mm na placa foi o suficiente para garantia da qualidade em relação ao teor de inclusões no produto final. Também evidencia-se que tal ação não prejudicou a morfologia das mesmas, conforme indicado por [2], [3] e [4], mostrando que os efeitos da reoxidação do aço ficaram, de fato, restritas na extensão do descarte proposto.

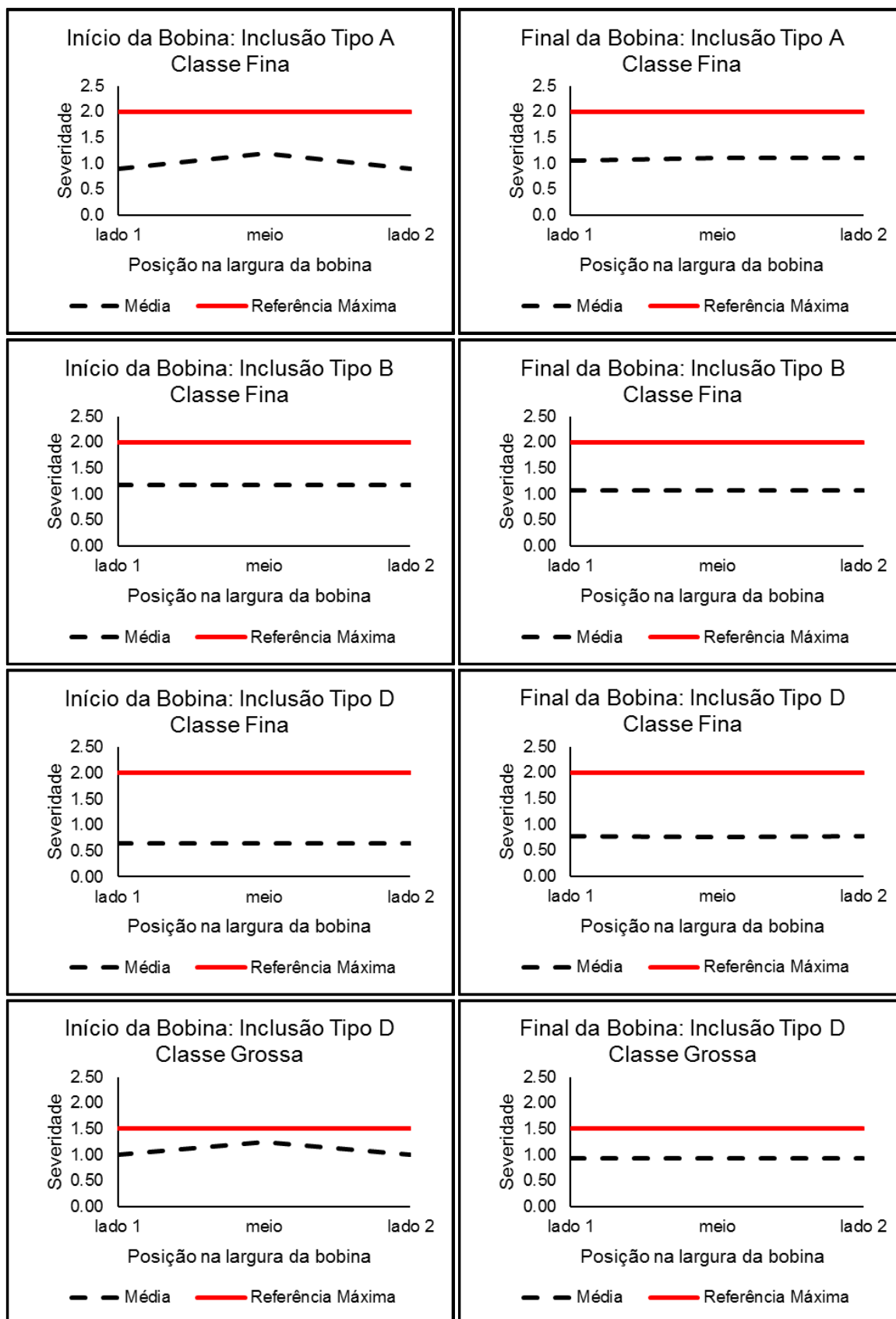


Figura 11 – Resultados médios da avaliação de inclusões não metálicas nas bobinas.

A metodologia de avaliação de início e final de bobinas foi proposta para assegurar que a região imediatamente após o descarte da placa fosse analisada, independente

de movimentações que acontecessem com a placa ou bobina que pudessem causar alguma inversão. Para a validação do trabalho era necessário que as severidades do início e final fossem equivalentes, o que ocorreu.

As micrografias apresentadas nas Figuras 12 e 13 são exemplos ilustrativos para os resultados médios obtidos e apresentados na Figura 11. Essas micrografias também são utilizadas para evidenciar as classificações realizadas segundo o quadro comparativo da norma ASTM-E45.

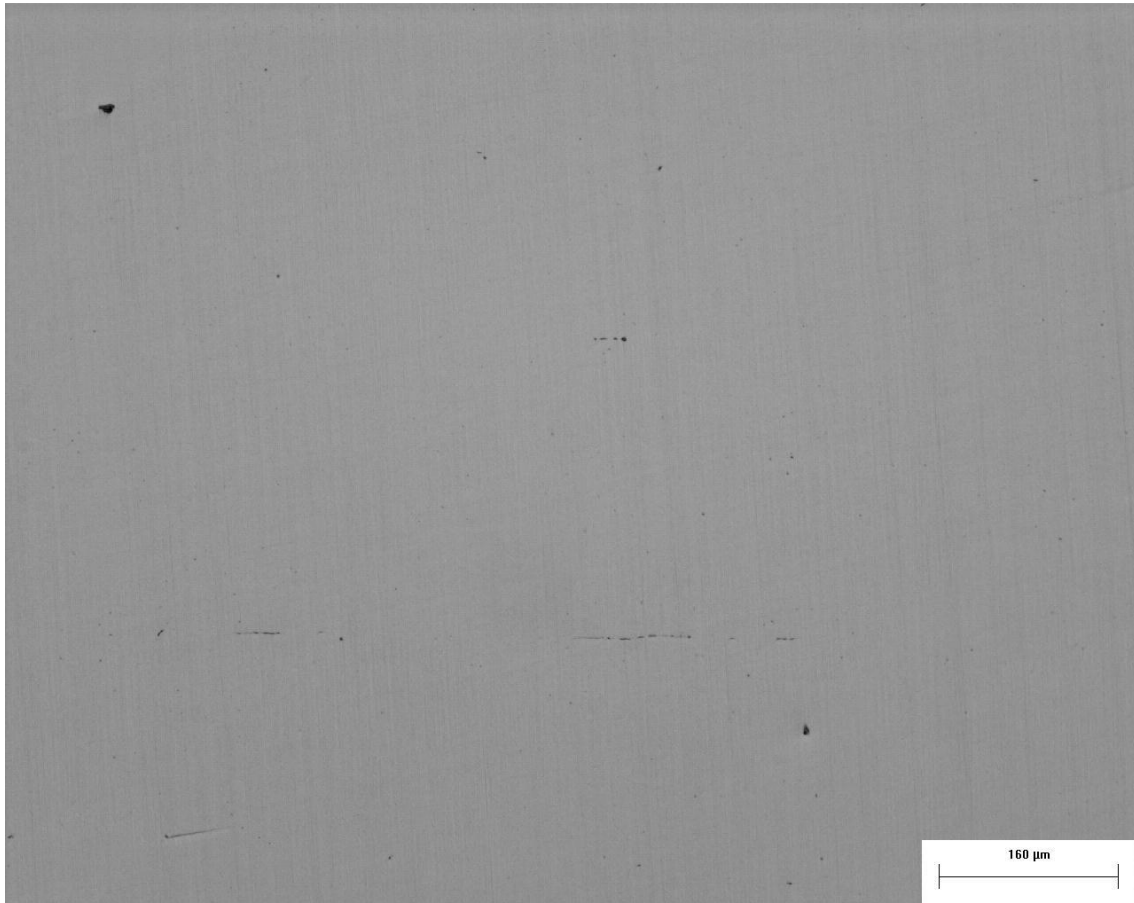


Figura 12 – Micrografia de amostra de bobina com a presença de sulfeto fino severidade 1, aluminato fino severidade 1 e óxido globular fino severidade 0,5. Ampliação de 100x.

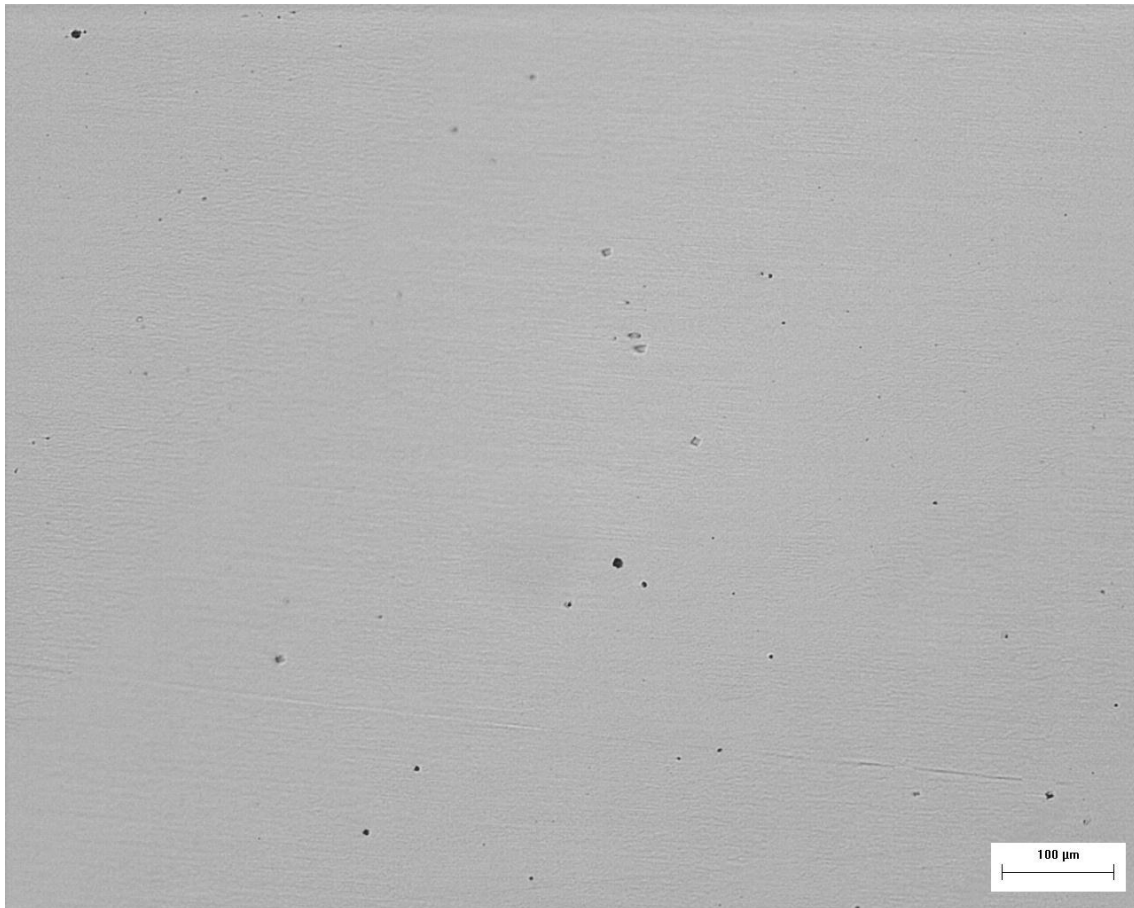


Figura 13 - Micrografia de amostra de bobina com a presença de óxido globular fino severidade 0,5 e óxido globular grosso severidade 1. Ampliação de 100x.

Após a verificação de toda metodologia aplicada ao trabalho, o descarte de 3.000mm foi incorporado às rotinas operacionais. Desde a implantação, foram laminadas mais de 5.000t de placas imediatamente produzidas após o descarte de 3.000mm e não houve nenhuma incidência de reclamação por parte dos clientes, nem desvios internos por defeitos oriundos do processo de Lingotamento Contínuo.

3 CONCLUSÃO

A metodologia proposta ao trabalho mostrou-se eficiente, pois foi possível determinar o descarte mínimo necessário de início de lingotamento para a garantia de qualidade das placas. Essa determinação permitiu alteração no padrão de descarte fazendo com que uma maior fração de aço fosse destinada à aplicação para a qual o mesmo foi programado e produzido.

O trabalho corroborou para a redução do estoque e do sucateamento de placas de aços de alta resistência, uma vez que as placas de início de lingotamento passaram a não serem mais desviadas para estoque ou sucateadas.

Com a análise de inclusões realizadas no início e final, e ao longo da largura das bobinas, foi possível assegurar a distribuição homogênea das inclusões e em níveis e morfologia compatíveis com as aplicações as quais os aços serão submetidos, o que permitiu a validação de todo o trabalho, bem como a implementação como rotina operacional.

REFERÊNCIAS

- 1 Nakashima J, Toh T. Improvement of Continuously Cast Slabs by Decreasing Nonmetallic Inclusions. Nippon Steel Technical Report. 2013; No. 104: 42-47.
- 2 Gaye HR. Inclusion Formation in Steels. The AISE Steel Foundation, Pittsburg. 2003. 1-20.
- 3 Zhang L, Thomas BG. Inclusions in Continuous Casting of Steel. XXIV National Steelmaking Symposium, Morelia, Mich, Mexico. 2003. 138-183.
- 4 Moraes LAB. Caracterização de macro e micro inclusões em aços acalmados ao alumínio produzidos por lingotamento contínuo. 2009. 180p.
- 5 Zhang L, Thomas BG. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness. ISIJ International. 2003. Vol. 43, No. 3: 271–291
- 6 Garcia A, Spim JA, Santos CA, Cheung N. Lingotamento Contínuo de Aços. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais; 2006,
- 7 ASTM E45. Standard Test Methods for Determination the Inclusion Content of Steel.