

ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA DE INCLUSÕES EM UM AÇO MICROLIGADO*

Camila Simon Christ¹
Anna Paula Littig Berger²
Igor Teixeira da Costa³
Cássio Santos de Carvalho⁴
Cleybson Soledade Ferro⁵
Anderson Pereira Martins⁶
Estéfano Aparecido Vieira⁷

Resumo

A crescente demanda de aços com composições e propriedades controladas aumenta as exigências do controle de qualidade dos produtos acabados e dos constituintes deletérios, como as inclusões, que são agregados durante os processos de fabricação e acabamento. No presente trabalho foi realizada uma análise qualitativa e quantitativa das inclusões presentes em um aço microligado de partida de máquina, através da observação de imagens obtidas por microscópio ótico. A observação das imagens permitiu verificar uma falta de homogeneidade ou padrão na ocorrência das inclusões nas amostras e que as inclusões presentes eram do tipo óxidos globulares e alumina.

Palavras-chave: Inclusões não metálicas; Refino secundário; Metalografia.

QUALITATIVE AND QUANTITATIVE ANALYSIS OF INCLUSIONS IN A MICROALLOYED STEEL

Abstract

The increasing demand for steels with controlled properties and composition increases the quality control requirements of deleterious constituents such as inclusions, which are aggregated during the manufacturing and finishing processes. In the present project a qualitative and quantitative analysis of the inclusions present in a microalloyed steel from a start of the machine, was conducted through the observation of images obtained by optical microscope. The analysis of the images allowed the inspection of the lack of homogeneity or pattern in the occurrence of the inclusions in the samples. The present inclusions were of the type globulares oxides and alumina.

Keywords: Nonmetallic inclusions; Secondary refining; metallography

¹ Engenheira Metalurgista, Mestranda em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – PROPEMM, Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Vitória, ES, Brasil.

² Engenheira Metalurgista, Mestranda em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – PROPEMM, Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Vitória, ES, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – PROPEMM, Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Vitória, ES, Brasil.

⁴ Bolsista de Pós-Doutorado do Programa de mestrado em metalurgia e materiais do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Vitória – ES, Brasil.

⁵ Técnico Metalúrgico, Estudante de Graduação em Engenharia Metalúrgica, Instituto Federal de Espírito Santo (IFES), Vitória, ES, Brasil.

⁶ Técnico Metalúrgico, Técnico de laboratório/ metalurgia, Instituto Federal de Espírito Santo (IFES), Vitória, ES, Brasil.

⁷ Engenheiro Metalúrgico, Prof. Dr. Professor do Programa de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e Materiais do Instituto Federal de Espírito Santo (IFES), Vitória, ES, Brasil

1 INTRODUÇÃO

Aços com baixos percentuais de elementos intersticiais são utilizados em aplicações de alta conformabilidade em estampagem profunda. Os primeiros aços usados para atender tais exigências de conformabilidade eram aços baixo carbono e de baixo teor de impurezas. No entanto, com o desafio de produzir formas cada vez mais complexas por conformação, teve início nos anos 70 a pesquisa e o desenvolvimento de aços mais maleáveis e macios que os aços convencionais, sendo assim de maior conformabilidade e estampabilidade.[1]

O início do processo de lingotamento contínuo (partida da máquina de lingotamento contínuo), é um período crítico para a incorporação de inclusões no aço. Trata-se de um período de regime transiente, onde o aço saindo da panela vai para o distribuidor. Nesse processo sofre grande agitação, podendo ocorrer reoxidação do metal pelo contato direto com o ar. Quando o aço atinge certo volume (altura) no distribuidor é adicionado o pó de cobertura, protegendo assim a superfície da ar atmosférico e conseqüentemente da reoxidação. Entretanto, essa adição deve ser feita em um momento escolhido com cautela, pois pode ocorrer entrada de pó de cobertura no aço e formações de inclusões, se a adição for feita antes que a superfície do aço se estabilize.[2]

Neste início de processo o aço pode ser contaminado através das seguintes formas[3]:

- O pó usado na abertura da panela se mistura ao aço e pode reagir com o mesmo, por exemplo, pós de alta sílica reoxidam aços acalmados alumínio gerando inclusões não-metálicas;
- Enquanto o material de cobertura não cobre completamente o aço, o aço pode ser contaminado pelo ar;
- O aço pode ainda ser contaminado por particulado ou umidade presente no refratário antes de sua utilização.

A crescente demanda de aços com composições e propriedades controladas para as mais diversas aplicações, aumenta as exigências de controle de qualidade dos produtos acabados e assim, conseqüentemente, dos constituintes deletérios que são agregados durante os processos de fabricação e acabamento.[4]

Um destes constituintes é denominado inclusão. As inclusões nada mais são do que partículas não metálicas de dimensões que variam de alguns milímetros até menores que um micron. Estas partículas são inerentes ao processo de produção do aço, podendo ser advindas de diferentes etapas do ciclo produtivo ou formadas pelos próprios constituintes do aço.[4]

Nos últimos 25 anos, observou-se um notável avanço na tecnologia de fabricação dos aços, o que resultou numa expressiva redução do nível de impurezas no produto final. Ao mesmo tempo, a definição de aço limpo é a função da aplicação do produto final. Inclusões não metálicas, tornam-se importantes quando elas são responsáveis por produzir defeitos durante o processamento dos produtos em sua aplicação final. Problemas tendem a ocorrer nos produtos quando significantes quantidades de inclusões (entre 20 e 150 μm) surgem no produto fundido. [5]

A composição, a quantidade e o tamanho das inclusões não metálicas são importantes, pois influenciam as propriedades mecânicas do aço, algumas como fadiga, usinabilidade e resistência à corrosão. [6]

Na produção de aços limpos, são estabelecidos limites de quantidade e tamanho de inclusões que variam com o produto, por exemplo, de $<5\mu\text{m}$ de diâmetro em aços ultra-limpos para $<100\mu\text{m}$ de diâmetro na fabricação de chapas. Um objetivo comum, entretanto, é minimizar a quantidade e tamanho das inclusões e controlar sua distribuição no produto final.[7]

As Inclusões, quando presentes, causam um efeito geralmente nocivo às propriedades mecânicas dos aços e, por isso, são motivo de constante estudo. Assim, torna-se importante o conhecimento dos tipos de inclusões que podem ser formadas ao longo do processo, para que se possa: reduzir ou evitar determinados tipos de inclusões; minimizar a quantidade de inclusões formadas; e facilitar a remoção das mesmas do aço líquido. Deste modo é possível obter um maior controle das propriedades desejadas para os aços produzidos.[4]

Durante a etapa de refino do aço é possível controlar a formação de inclusões não metálicas através do controle da composição química do aço líquido e da escória, da temperatura e principalmente do teor de oxigênio remanescente na etapa final de elaboração do aço no convertedor. Controlando estas variáveis pode-se obter, no aço, as características adequadas à conformação mecânica, evitar o entupimento de válvulas no lingotamento contínuo e otimizar a ação dos desoxidantes.[8,9]

As inclusões são classicamente divididas quanto à origem, conforme segue:

Inclusões Endógenas: são aquelas que foram precipitados como resultado de reação química que ocorre no aço. Elas são compostas principalmente de óxidos e sulfetos e as reações que lhes dão origem podem ser induzidas através de adições feitas ao aço durante as operações de refino, ou simplesmente por mudança de solubilidade durante o resfriamento, na etapa de solidificação.[10]

Inclusões Exógenas: Ocorrem como resultado de incorporações mecânicas de escória, refratário ou outros materiais que têm contato com o aço. Aspectos característicos de uma inclusão exógena são geralmente, grande tamanho, ocorrência esporádica, preferência de localização numa placa ou lingote. Não se pode discutir sistematicamente o tamanho e quantidade deste tipo de inclusão, por isso dependerá da prática individual de cada aciaria.[10]

As inclusões também podem ser classificadas de acordo com as suas composições químicas. Existem diversas maneiras de agrupá-las segundo este quesito, mas basicamente podemos dividi-las em: óxidos, sulfetos, nitretos e fosfetos.[11]

Os óxidos são inclusões de alumina, sílica, aluminatos de cálcio, espinélio, silicatos de manganês e alumínio, óxidos de ferro, óxidos de manganês, e óxidos mistos. Os sulfetos incluem principalmente sulfetos de manganês e o sulfeto de cálcio. Os nitretos podem incluir, em função dos elementos de liga do aço, nitretos de carbono, de alumínio, de titânio ou de outros elementos. E por fim os fosfetos incluem fosfetos de ferro e de outros elementos.[4]

Algumas alternativas para redução da quantidade ou modificação de inclusões nos produtos finais têm sido estudadas e sugeridas por alguns autores. Mendonça *et. al.* (2014) analisou a injeção de gás no distribuidor para melhoria na remoção das inclusões, já Wiener, Brombauer e Pissenberger (2016) propõem um novo método para a modificação das inclusões através da utilização de carbeto de cálcio (CaC_2). Entretanto, esses procedimentos podem se tornar custosos e interferirem diretamente no processo de produção, gerando custos que só são justificados na produção de aços especiais (que possuem um maior valor agregado), como é o caso da utilização do desgaseificador a vácuo, utilizado em grande parte das siderúrgicas. [13,14,15]

Levando em consideração o exposto acima, este trabalho tem por objetivo principal identificar, quantificar e classificar as inclusões presentes nas amostras analisadas, bem como observar se há um padrão de ocorrência das mesmas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Seleção e extração da amostra da placa lingotada

Uma amostra do aço foi seccionada do lingote bruto de fusão no sentido do lingotamento com o objetivo de analisar quali e quantitativamente as inclusões. Para fins analíticos, a amostra principal foi coletada da superfície do lingote nas dimensões de 85mm x 65mm x 15 mm conforme mostra a figura 1.

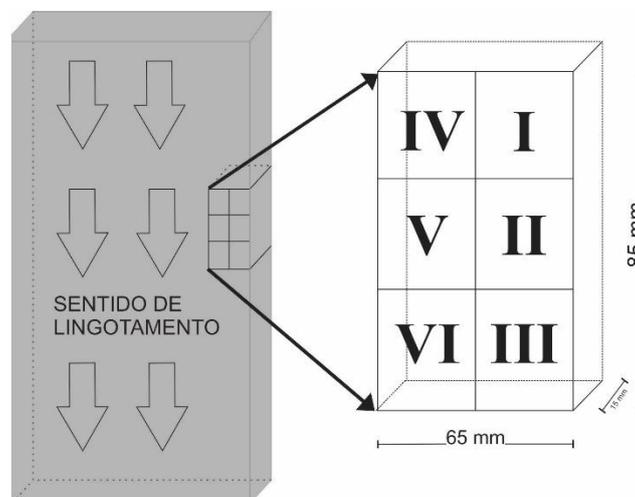


Figura 1. Esquema representativo da retirada da amostra do lingote.

A composição química desse aço é apresentada na tabela 1.

Tabela 1. Composição do aço analisado.

ELEMENTO	Fe	C	Si	Mn	P	S	Al	ELEMENTOS DE LIGA
%	98,6	0,03	0,006	0,2	0,007	0,006	0,05	1,1

O aço em questão trata-se de um aço microligado de partida de máquina.

Com a amostra principal em laboratório, a mesma foi dividida em seis partes e cortada em máquina de corte com disco de carbono refrigerado para ser encaminhada para a preparação.

2.1 Preparação metalográfica das amostras

Cada uma das seis partes da amostra principal foi preparada metalograficamente através de lixamento e polimento.

No lixamento foram utilizadas lixas de SiC de granulação 80, 180, 220, 320, 400 e 600 sucessivamente em lixadeiras manuais a úmido. Quando da troca de granulação da lixa, a amostra era rotacionada em 90°, de modo que os riscos deixados na superfície da amostra pela lixa anterior fossem removidos na lixa subsequente.

Após o lixamento as amostras foram polidas em politrizes rotativas com panos de polimento de feltro, e pasta de polimento de suspensão de partículas de óxido de alumínio (alumina) como abrasivo na granulometria de 1,0 μm e 0,3 μm sucessivamente.

Para a observação das inclusões no microscópio ótico, não se fez necessário o ataque metalográfico da superfície das amostras.

A figura 2 apresenta as amostras após o processo de polimento.

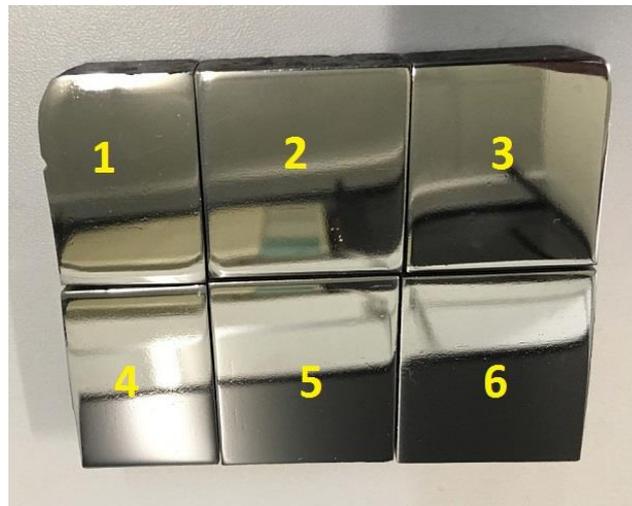


Figura 2. Fotografia da amostra após o processo de polimento.

Nesta etapa as amostras foram nomeadas de 1 a 6 conforme pôde-se observar na figura 2 e levadas para análise em microscópio ótico.

2.3 Microscopia ótica

As superfícies das amostras foram analisadas em um microscópio da marca Leica, modelo DM750M e foram feitas fotografias de pontos específicos de cada amostra, de acordo com o esquema apresentado na figura 3.

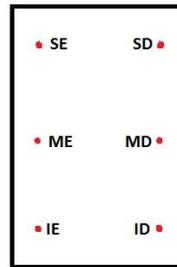


Figura 3. Esquema dos pontos fotografados das amostras.

Em cada ponto vermelho do esquema da figura 3 foi feita uma fotografia, na qual foi feita a contagem das inclusões. As siglas de cada ponto foram inseridas para identificação da área a que pertence a fotografia e significam: Superior Esquerda (SE), Superior Direita (SD), Meio Esquerda (ME), Meio Direita (MD), Inferior Esquerda (IE) e Inferior Direita (ID).

A contagem das inclusões foi feita de forma visual. As fotografias foram impressas em um programa e com um marcador, atribuiu-se um ponto vermelho a cada inclusão contada. Como pode-se observar na figura 4.



Figura 4. amostra com as inclusões contadas.

Na imagem da figura 4, foram encontradas 52 inclusões.

Após a contagem, o número de inclusões de cada fotografia foi inserido numa tabela, onde posteriormente calculou-se a quantidade de inclusões por unidade de área.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Distribuição e classificação das inclusões nas amostras

A observação de uma área polida com aproximadamente 1,07mm² das regiões fotografadas permitiu identificar e caracterizar a dispersão de inclusões com

morfologia globular de acordo com a norma ASTM E-45 [12], como mostra a Figuras 5, 6 e 7 com aumento de 100X.



Figura 5. Fotografia da amostra 2 na secção IE.



Figura 6. Fotografia da amostra 1 na secção SD.

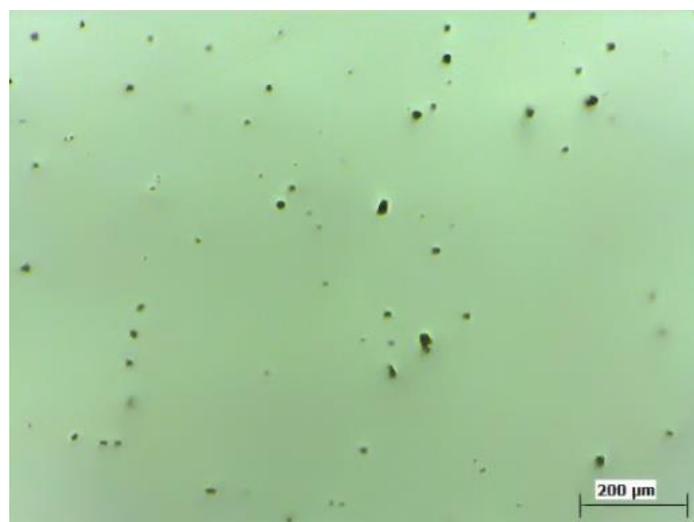


Figura 7. Fotografia da amostra 6 na secção IE.

As figuras 5, 6 e 7 também nos permitem observar uma grande variação da concentração de inclusões em diferentes áreas das amostras. Essa variação da concentração era esperada, uma vez que não há um mecanismo para controle da formação das inclusões e elas se formam aleatoriamente no interior do metal fundido.

A figura 8 apresenta uma fotografia da região superior direita da amostra 4 com aumento de 100X.



Figura 8. Fotografia da amostra 4 na secção SD evidenciando uma inclusão do tipo alumina.

Conforme figura 8 é possível observar uma inclusão do tipo alumina de acordo com a norma ASTM E-45.

Portanto foram observados na amostra principal apenas as inclusões do tipo óxidos globulares e alumina.

3.2 Contagem das inclusões

Após a contagem das inclusões de cada imagem, inseriu-se os valores na tabela 2.:

Tabela 2. Número de inclusões por amostra e secção.

AMOSTRA	NÚMERO DE INCLUSÕES						TOTAL	inc/mm ²
	SE	SD	ME	MD	IE	ID		
1	388	106	320	154	94	218	1280	211,96
2	165	114	151	152	111	138	831	137,61
3	71	74	117	138	72	91	563	93,23
4	45	55	60	52	95	57	364	60,27
5	33	47	40	36	71	58	285	47,19
6	125	103	102	61	111	88	590	97,70

Ao analisar a tabela 2, comprova-se o resultado observado nas figuras 5, 6 e 7, onde há uma falta de homogeneidade na distribuição de inclusões.

As amostras 1 e 2 apresentaram maior densidade de inclusões por milímetro quadrado, enquanto as amostras 4 e 5 apresentaram menor densidade de inclusões por milímetro quadrado.

A figura 9 compara as amostras da linha superior da amostra principal, apresentando a quantidade de inclusões nas amostras 1, 2 e 3 por região fotografada.

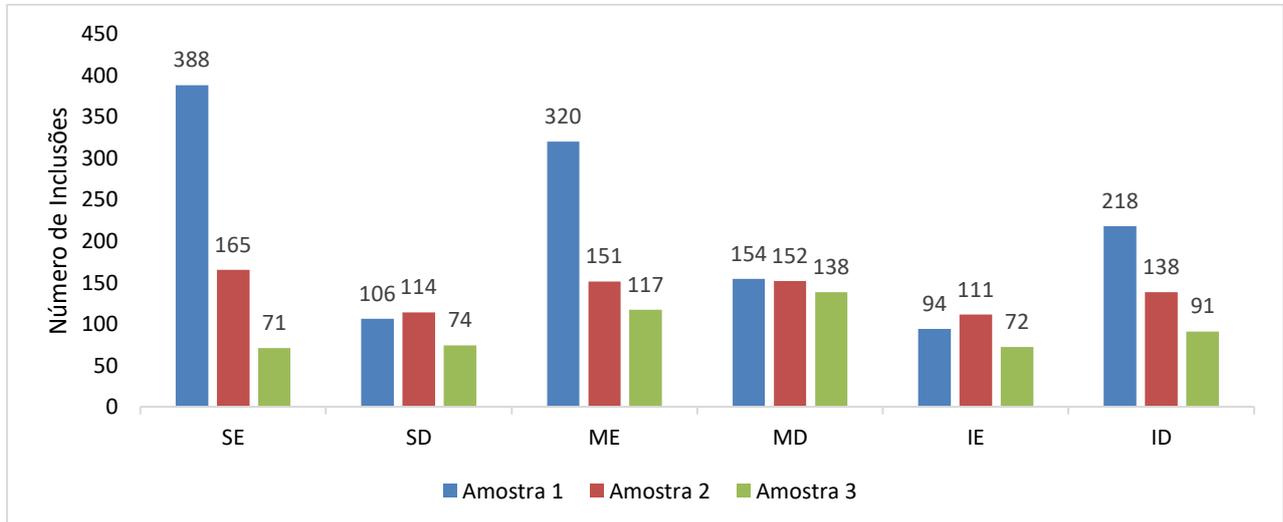


Figura 9. Gráfico da quantidade de inclusões por amostra e seção da parte superior da amostra principal.

Conforme observado na figura 9 a amostra 1 apresentou maior número de inclusões nas seções, exceto nas seções SD e IE. A amostra 3 apresentou o menor número de inclusões em todas as regiões fotografadas. Assim, observou-se uma diminuição do número de inclusões no sentido da direita da amostra principal para a esquerda.

A figura 10 compara as amostras da linha inferior da amostra principal, apresentando a quantidade de inclusões nas amostras 4, 5 e 6 por região fotografada.

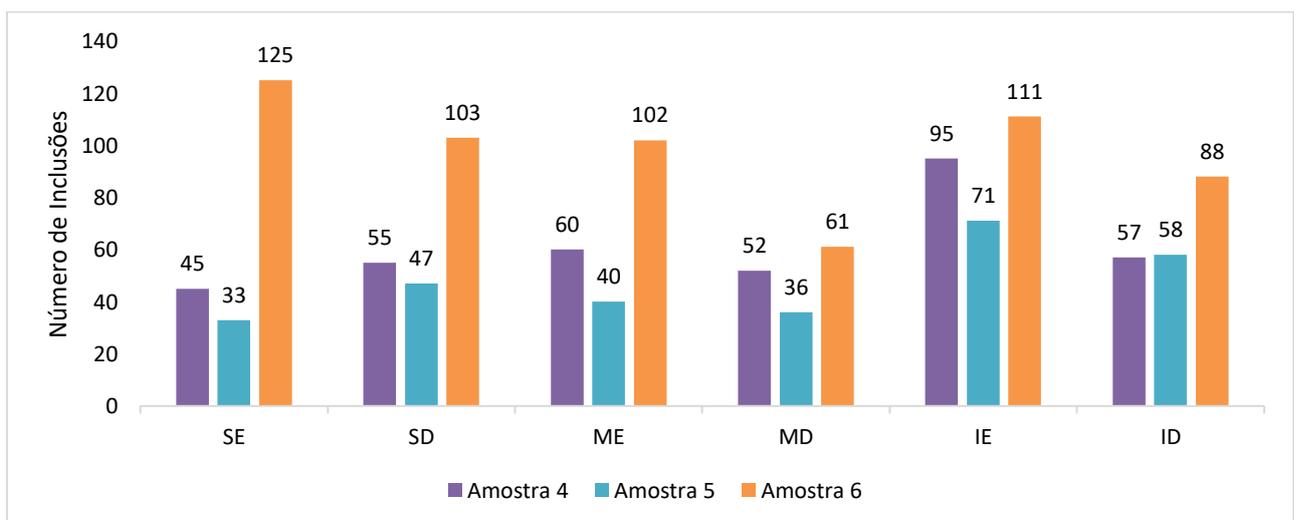


Figura 10. Gráfico da quantidade de inclusões por amostra e seção da parte inferior da amostra principal.

Conforme observado na figura 10 a amostra 6 apresentou maior número de inclusões em todas as secções. A amostra 5 apresentou o menor número de inclusões nas regiões fotografadas, exceto na secção ID. Assim, não observou-se um padrão de crescimento/decaimento do número de inclusões.

4 CONCLUSÃO

A partir deste artigo é possível concluir que:

- As inclusões observadas na amostra principal são do tipo óxidos globulares e alumina conforme a norma ASTM E-45. Estas inclusões provavelmente são formadas durante a etapa de desoxidação do aço com alumínio e/ou reoxidação do aço durante o processamento.
- Foi observada uma grande variação da concentração de inclusões em diferentes áreas das amostras.
- As amostras 1 e 2 apresentaram maior densidade de inclusões por milímetro quadrado, enquanto as amostras 4 e 5 apresentaram menor densidade de inclusões por milímetro quadrado.
- Ao analisar a secção superior da amostra principal observou-se uma tendência à diminuição do número de inclusões no sentido da direita para a esquerda. O mesmo não pode ser observado na secção inferior da amostra.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES pelo apoio, em especial ao Laboratório de Metalografia. Agradecem também pelo apoio financeiro a CAPES, FINEP, CNPq e FAPES.

REFERÊNCIAS

- 1 MATOS, F.B. Evolução da microestrutura e das propriedades mecânicas de aços IF tratados termomecanicamente. Trabalho de conclusão de curso, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2013.
- 2 FERREIRA, F.B. Análise e verificação de variáveis do processo como causas para o sucateamento por macroinclusões em uma aciaria de aços especiais. Trabalho de conclusão de curso, Escola de engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.
- 3 BRAGA, B.M. Modelamento matemático da inertização de distribuidores para lingotamento contínuo de aço. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. 2015
- 4 MORAES, L.A.B.D. Caracterização de macro e microinclusões em aços acalmados ao alumínio produzidos por lingotamento contínuo. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2009.
- 5 BIELEFELDT, V.; MORAES, C. A. M.; VILELA, A. C. F.; KLUJSZO, L. A. C.; FERNANDES, P. C. Caracterização e estudo termodinâmico de inclusões do aço SAE 8620 produzido via Aciaria Elétrica. Estudos tecnológicos - Vol. 2, nº 2:78-90 (jul/dez. 2006).
- 6 FACO, R. J. Levantamento das inclusões nos principais grupos de aços produzidos em aciaria do tipo LD. Dissertação de mestrado, Escola politécnica da Universidade de São Paulo. 2005.
- 7 BESKOW, K. et al. 2002. Chemical Characteristics of Inclusions Formed at Various Stages During the Ladle Treatment of Steel. Ironmaking and Steelmaking, vol. 29, no 6, p. 427-435

- 8 L.C. Oertel, A.L.V. Costa e Silva, Anais do XXVIII Seminário sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Aços (ABM), Campinas, SP, Brasil, Maio de 1997.
- 9 M. Fernandes Neto; N. Cheung, A. Garcia, Anais do XXXI Seminário sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Metais (ABM), Vitória, ES, Brasil, Maio de 2000.
- 10 ARAÚJO, M. R. V. D.; ASSELLI, A. A. C.; YAMAKAMI, W. J.; TOKIMATSU, R. C.; VENTRELLA, V. A.; GALLEGD, J. Estudo das inclusões não-metálicas formadas no metal de Solda depositado por arco submerso. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2016
- 11 GHOSH, A. Secondary Steelmaking: Principles and applications. Boca Ranton, Florida, USA: CRC Press LCC, 2001
- 12 ASTM E 45 - 05. Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. 2005
- 13 BARTOSIAKI, B. G.; PEREIRA, J. A. M.; BIELEFELDT, W. V.; VILELA, A. C. F. Estudo de inclusões não metálicas em aços durante tratamento em desgaseificador a vácuo e início do lingotamento contínuo. 45º Seminário de Aciaria Internacional. Porto Alegre, RS. 2014
- 14 WIENER, J.; BOMBAUER, M.; PISSENBERGER, E. A New Method for Inclusion Modification Using calcium Carbide. Association for Iron & Steel Technology – USA. 2016.
- 15 MENDONÇA, A. F. G.; ARAÚJO, F. A.; LAMAS, L. O.; LUCRÉCIO, L. C. M.; TAVARES, R. P. Análise da injeção de gás no distribuidor para melhoria na remoção de inclusões. 45º Seminário de Aciaria Internacional. Porto Alegre, RS. 2014.