

SÔBRE AS INCLUSÕES NÃO-METÁLICAS NOS AÇOS PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA COM ESPECIAL CONSIDERAÇÃO DOS PROBLEMAS DE PRODUÇÃO E RECEBIMENTO ⁽¹⁾

IVICA MADUNIC ⁽²⁾

JOSÉ LUIZ REZENDE PIMENTA ⁽³⁾

RESUMO

São mencionados neste trabalho os mais importantes fatores que na produção de aço podem influir no grau de pureza. Foi indicado o grau de pureza que se pode obter com certos tipos de aço, usando os processos atuais de fabricação. Lembra-se a influência das inclusões não-metálicas em certas propriedades físicas de aço.

1. INTRODUÇÃO

Os métodos mais importantes para classificação das inclusões não-metálicas, micro e macro, são normalizadas. Entretanto, com exceção dos aços para rolamentos, praticamente, nenhuma norma indica limites para grau de pureza em aços para construção mecânica. Esta situação fica clara, considerando as dificuldades encontradas nas tentativas de fazer uma correlação entre o grau de pureza e certas propriedades mecânicas de elementos de máquinas no estado final de acabamento. Por outro lado várias pesquisas têm sido feitas no sentido de determinar a influência do grau de pureza nas propriedades mecânicas, especialmente fadiga, em amostras polidas. Os resultados dos testes de fadiga com amostras polidas têm valor básico, mas não podem ser aplicados, na maioria dos casos, sem reserva, nas peças de construção. Acontece, freqüentemente, que

(1) Contribuição Técnica n.º 507. Apresentada ao XVIII Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais; Belo Horizonte, julho de 1963.

(2) Membro da ABM e Engenheiro Metalurgista; da Aços Especiais Itabira; Acesita, MG.

(3) Membro da ABM e Engenheiro Metalurgista; da Aços Especiais Itabira; Acesita, MG.

as influências das inclusões nas propriedades físicas, verificadas nas condições idealizadas para testes, são consideradas como válidas, incondicionalmente, também para as peças de construção.

Além disso, as inclusões não-metálicas são muitas vezes consideradas como constituintes absolutamente estranhos em estruturas dos aços. Como conseqüência, uma grande parte das exigências técnicas para aços de construção mecânica impõem limitações para inclusões sem levar em conta as condições de produção destes aços, usando os processos atuais de fabricação.

Na maioria dos casos as exigências limitam o tamanho das micro-inclusões. Ocasionalmente, supõe-se que o aço deve estar isento das macro-inclusões. Por outro lado, existem exigências que limitam, simultaneamente, macro e micro-inclusões. Ocorre também que, sem indicar expressamente, uma grande parte de consumidores subentende que o grau de pureza deve apresentar valores garantidos para todo o volume de aço de uma corrida.

Muitas vezes supõe-se que inclusões micro, de tamanho maior que o exigido, podem servir como causa de reclamação, mesmo no caso de relativamente pequena frequência e sem comprovantes da influência das mesmas na usinabilidade e desgaste das ferramentas, bem como nas propriedades das peças mecânicas em questão. Do mesmo modo são consideradas prejudiciais inclusões macro esporádicas que, dependendo do tipo, tamanho, frequência e distribuição, nem sempre são de influência considerável para a finalidade em questão.

A aplicação muito formal das exigências técnicas pode ser atribuída a várias razões. Na nossa opinião, os dois fatores seguintes são os mais importantes:

- 1) Insuficiente consideração dos fatores que limitam, na prática atual de produção dos aços, as possibilidades de se obter com certeza, de um modo reprodutível, o grau de pureza desejado.
- 2) A suposição de que exigências rigorosas influem sobre os produtores de aços, no sentido de melhorar, cada vez mais, o grau de pureza.

Não podemos negar que existem certos efeitos positivos nas exigências técnicas rigorosas, especialmente em fase inicial de produção de aços especiais. Entretanto, no caso das exigências muito rigorosas, há, não só o risco de sucata excessivo, como também de reclamações posteriores. Por outro lado, o consumidor não pode ter uma segurança maior sobre qualidade do aço em todo o volume do material fornecido, pois o grau de pureza garantido depende mais do modo de controle nas várias

fases de transformação do aço, do que no caso da aplicação rígida de certos testes no recebimento do material.

Por razões econômicas e técnicas, achamos os problemas aqui abordados, tanto de interesse dos consumidores, como dos produtores de aços especiais. Tentaremos mostrar que grau de pureza pode ser obtido com aços de construção mecânica, por processos atualmente em uso, isto é, fusão e vazamento do aço no ar. Também vamos indicar qual o grau de pureza possível de se obter aplicando vazamento ou fusão em vácuo.

É claro que se trata de um tema muito delicado, devido à falta de dados quantitativos. Não podemos, portanto, dar respostas exatas às perguntas em questão. Entretanto, esperamos que nossa tentativa possa servir de base para discussão.

2. FORMAÇÃO DAS INCLUSÕES E POSSIBILIDADES DE ELIMINAÇÃO DAS MESMAS

Quanto aos processos físico-químicos de formação das inclusões no aço, existem numerosas publicações^{1, 2, 3, 4, 5}, sendo desnecessário tratar das mesmas aqui. Achamos bastante mencionar que a maioria das inclusões encontradas no aço sólido são produtos das reações, que ocorrem no aço durante a sua elaboração, vazamento e solidificação. A formação dessas inclusões, chamadas *endógenas*, não pode ser eliminada, como se sabe, nos processos atualmente em uso na produção dos aços.

No aço produzido em escala industrial encontram-se também, regularmente, quantidades variáveis de *inclusões exógenas*, cuja formação é provocada por ações químicas e físicas do aço líquido sobre os refratários com que mantém contacto nos processos de fabricação e vazamento. Além disto, existe contaminação do aço pela oxidação provocada no vazamento ao ar, assim como pela escória.

As inclusões não-metálicas nos aços de construção mecânica, não ligados e de baixa liga, são principalmente óxidos e sulfuretos. A quantidade de sulfuretos depende do teor de enxofre do aço, o qual, para aços produzidos em forno elétrico básico, que é o nosso caso, pode ser controlado. Trataremos, pois, em primeiro lugar, das inclusões do tipo óxidos.

Os fatores importantes para formação e eliminação das inclusões no aço, são, segundo E. Plockinger⁶, mostrados na figura 1. De acordo com a figura 1, como também segundo outras fontes⁷, numerosos fatores contribuem na formação das inclusões. Por outro lado, a quantidade das inclusões só pode ser diminuída pelas reações de redução no forno ou separando-se do aço, devido a diferença do peso específico entre aço e

inclusões. Aplicando determinada prática na produção do aço, o grau de pureza só pode ser influenciado pelo processo de separação das inclusões na caçamba e nas lingoteiras.

A velocidade de separação das inclusões que existem no aço em forma de gotas, podem ser calculadas segundo a lei de Stokes, considerando as condições de movimento laminar. Em caso ideal, a maioria das inclusões pode-se separar do aço com relativa rapidez. No entanto, a experiência prática mostra que uma separação ampla das inclusões não é sempre obtida. Aparentemente as mesmas práticas resultam em grau de pureza muito diferente. Conseqüentemente, deve-se supor que o processo de eliminação das inclusões depende de muitos fatores, parte dos quais não conhecemos; dos próprios fatores conhecidos não podemos estimar a influência quantitativa.

Como causas prováveis para o desvio, na prática, com relação à lei de Stokes, podem ser mencionadas as influências das propriedades físico-químicas da superfície das inclusões e das correntes de convecção no aço, dentro da lingoteira^{8, 9, 10}. Conseqüentemente, a composição química das inclusões pode influir, consideravelmente, na separação das mesmas.

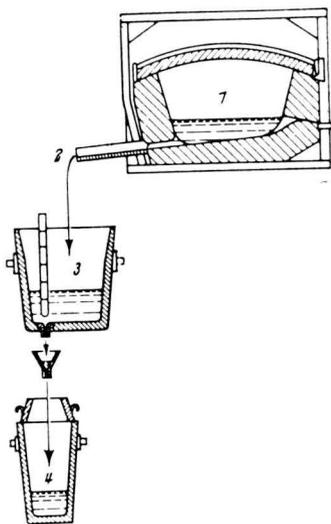
Fig. 1 — Possibilidades de formação e de eliminação das inclusões não metálicas com os processos atualmente em uso para produção de aço (segundo E. Plockiger):

Diminuição das inclusões:

- 1 — Separação das inclusões do banho; redução dos óxidos em suspensão.
- 3 — Separação das inclusões do aço na caçamba.
- 4 — Separação das inclusões do aço na lingoteira.

Formação e incremento das inclusões:

- 1 (forno) — Pela carga e pelas adições; dos refratários do revestimento; dos produtos de reações de oxidação; das ferro-ligas; dos produtos de desoxidação por precipitação.
- 2 (bico) — Oxidação do aço líquido pelo oxigênio do ar; por partículas dos refratários.
- 3 (caçamba) — Produtos de desoxidação por precipitação; contaminação pela escória do forno; reações com a escória da caçamba; partículas dos refratários.
- 4 (lingotamento) — Oxidação do aço líquido; refratários do sistema de lingotamento; contaminação pelos produtos de desoxidação que se precipitam até o fim da solidificação do aço.



Finalmente, deve ser mencionado o fato de que os fatores decisivos para produção de aço de boa pureza (condição de processo no forno, inclusive modo de desoxidação, qualidade dos refratários, da caçamba e da fossa de vazamento, temperatura de vazamento, etc.), não podem ser sempre mantidos em limites necessários. Por isso não é possível, em cada caso particular, isto é, com cada corrida, produzir aço de grau de pureza previsto ⁶.

Valiosas conclusões sobre a origem das inclusões não-metálicas podem ser obtidas com uso dos traçadores radioativos. Mas é necessário observar que, mesmo essa técnica não pode fornecer dados quantitativos, generalizáveis, a respeito dos fatores que influem na pureza. Isto é causado, em parte, pelas dificuldades associadas na execução do método de pesquisa em questão ¹¹, e, parcialmente, devido à influência variável de certos fatores na produção do aço. Considerando estas limitações, apresentamos, em tabela, alguns resultados de literatura obtidos usando o isótopo de cálcio C^{45} na produção de aço para rolamentos, de composição semelhante ao SAE 52100, em forno elétrico básico:

Origens da inclusão	Porção no teor total das inclusões	N.º de Bibliografia
Escória de Refino } Média	2,6%	12
Escória de Refino } Máxima	11,3%	
Escória de Refino	0%	13
Escória de Refino	1,2-5,1%	14
Revestimento do forno	0,5%	15
Revestimento da caçamba	17,8%	16
Revestimento da caçamba	4,6%	17
Refratários de fossa (canais)	5,0-9,0%	16

Segundo estes dados, o teor total das inclusões exógenas, procedentes do revestimento do forno, da escória de refino, de refratários da caçamba e dos canais da fossa, varia de 10% a 15% sobre o teor total das inclusões. A parcela das inclusões exógenas, referente às mencionadas fontes, não é muito grande, mas, em condições desfavoráveis, como no caso de baixa tem-

peratura de vazamento ou de qualidade inadequada dos refratários utilizados no vazamento, a contaminação do aço pelas inclusões exógenas pode ser crítica para a qualidade do aço. As dificuldades deste tipo não podem ser sempre evitadas, o que já foi referido na literatura¹⁸. Além disso, devemos considerar que, devido à influência da composição química do aço no grau de pureza¹⁹, a situação com diversos tipos de aços de construção mecânica, pode ser sensivelmente menos favorável, como no caso do aço SAE 52100.

A classificação das inclusões em exógenas é conveniente, em primeiro lugar, para os estudos sobre a influência dos fatores metalúrgicos (modo de desoxidação, método de vazamento, qualidade dos refratários, etc.) no grau de pureza.

As propriedades mecânicas do aço são influenciadas, não só pela composição química das inclusões, como também pelo tamanho, frequência e distribuição das mesmas. Portanto, sob o ponto de vista do consumidor, a classificação das inclusões em *micro* e *macro* é mais conveniente.

Supõe-se, geralmente, que as inclusões micro são de origem endógena e as inclusões macro de origem exógena.

Considerando a possibilidade de que, tanto partículas finas, como também partículas grossas dos refratários e de escória podem ser arrastadas pelo aço líquido e que estas partículas podem reagir quimicamente com produtos de desoxidação, fica claro que aqui se trata de processos muito complexos. Nesta situação é pouco provável que possa ser determinado que parte das inclusões macro é de origem endógenas e que parte das inclusões micro é de origem exógena. Isto é difícil, especialmente no caso das inclusões macro muito finas, encontradas nas provas de escada após o teste de Magna-flux.

3. DISTRIBUIÇÃO DAS INCLUSÕES NOS LINGOTES — DADOS SOBRE O GRAU DE PUREZA DE ALGUNS AÇOS PRODUZIDOS EM ACESITA

E. Maurer e R. Schustek²⁰ examinaram a distribuição das micro e macro inclusões nos lingotes de aços ligados para cementação.

Em lingotes laminados em quadrado de 60 mm foram cortadas amostras de 300 mm de comprimento, obtendo-se 70 provas por lingotes. Destas amostras foram determinados graus de pureza micro e macro. A pureza macro foi verificada com prova de escada.

A classificação de micro e macro pureza foi feita conforme o método apresentado na tabela 1.

TABELA 1

Classificação de grau de pureza

A. MICRO PUREZA		
Comprimento das inclusões, mm		Fator X
Descontínuas	Contínuas	
0,4 — 1,0	0,1 — 0,2	1
1,0	0,2 — 0,5	2
	0,5	4
Soma dos valores — índice		Classificação
Até — 2		1
2 — 4		2
4 — 7		3
7 — 10		4
Maior que 10		5
B. MACRO PUREZA		
Comprimento das inclusões, mm		Fator X
Até — 2		2
2 — 4		4
5 — 10		8
11 — 20		16
Maior que 20		32
Soma dos valores — índice		Classificação
Até — 10		1
11 — 40		2
41 — 80		3
81 — 140		4
— 141		5

O grau de pureza micro para um lingote vazado direto e um lingote vazado indireto é apresentado na figura 2. O grau de pureza depende muito da posição da amostra no lingote, para os dois tipos de vazamento. Entretanto, com ambos os casos existe a tendência de deposição das inclusões micro na parte inferior dos lingotes.

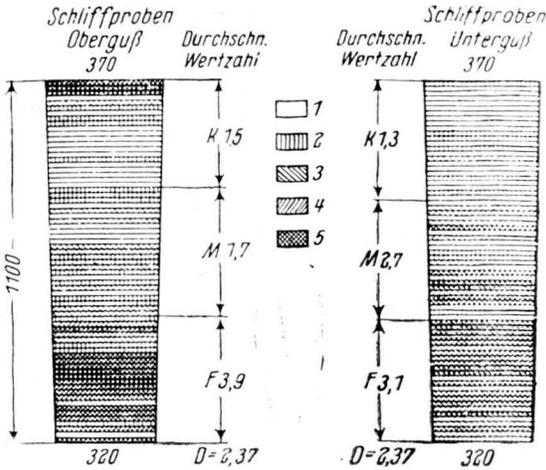


Fig. 2 — Grau de pureza micro ao longo do lingote, segundo E. Mauer e R. Schustek. À direita da figura: lingotamento indireto; à esquerda, lingotamento direto.

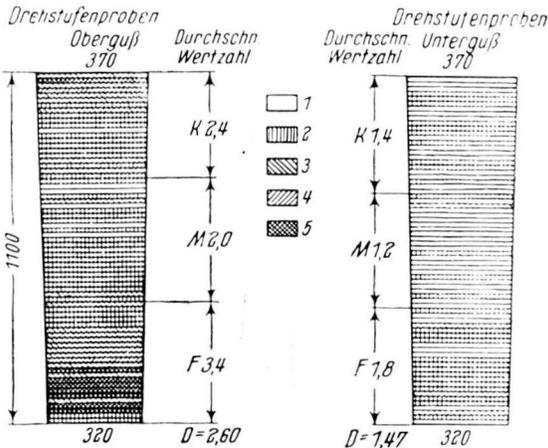


Fig. 3 — Grau de pureza macro ao longo do lingote, segundo E. Maurer e R. Schustek.

Os resultados de grau de pureza macro, determinados nas provas de escada sem Magnaflux, são mostrados na figura 3.

O lingote vazado indireto tem grau de pureza médio melhor do que o lingote de vazamento direto. A pureza macro depende sensivelmente da posição da amostra no lingote. Como no caso das inclusões micro, existe também a tendência de concentração das inclusões macro na parte inferior dos lingotes testados.

O fato de que a parte inferior dos lingotes é mais contaminada, é geralmente conhecido. J. H. S. Dickenson²¹ indicou as correntes de convecção em aço nas lingoteiras como a causa provável de acúmulo das inclusões nas zonas inferiores dos lingotes. Os resultados dos trabalhos mais novos de V. A. Efimov²² e A. A. Zborovskij e seus colaboradores²³, feitos aplicando traçadores radioativos, parecem confirmar as indicações de J. H. S. Dickenson.

A respeito da distribuição das inclusões na direção centro-periferia dos lingotes de aços acalmados, as opiniões divergem. H. Hoff²⁴ constatou que em aços Siemens-Martin acalmados, de baixo carbono, a concentração de inclusões de alumina, relativamente grossas, aparece mais na zona periférica dos lingotes.

Por razões teóricas não parece provável uma concentração dos produtos de desoxidação na zona periférica dos lingotes. R. C. Taylor²⁵ mostrou que as inclusões em lingotes não transformados são mais finas na zona próxima à superfície que no centro dos lingotes. Foi também constatado por E. Maurer e R. Schustek²⁰ a mesma tendência, encontrando-se 2/3 das inclusões micro em zona central e 1/3 em zona periférica. A variação da contaminação da zona periférica ao longo do lingote foi constatada como insignificante. Contudo, sabe-se que as

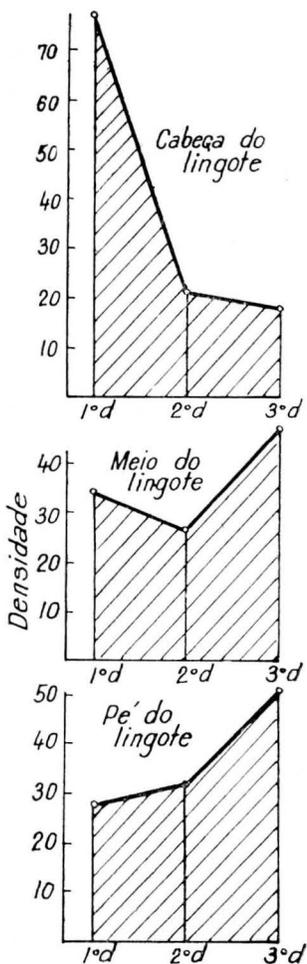


Fig. 4 — Densidade das inclusões macro (escada Magnaflux) num aço SAE 5.120. Refratários de baixa qualidade (X 1); resultados médios de 10 corridas.

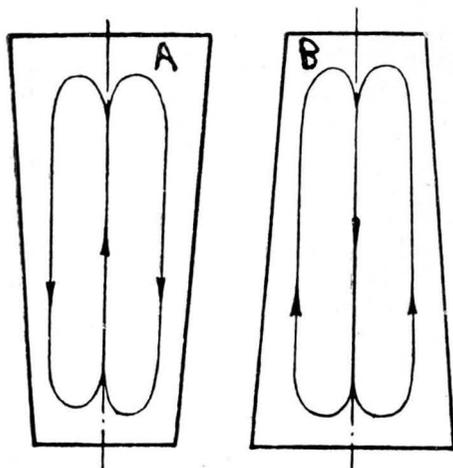


Fig. 5 — As corrente de convecção, segundo A. A. Zborovsk. "A", aço acalmado; "B", aço efervescente.

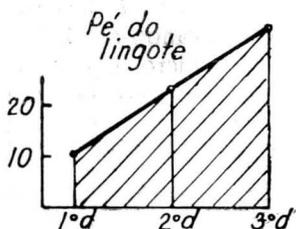
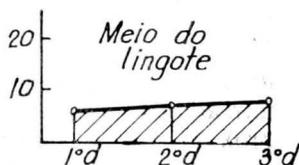
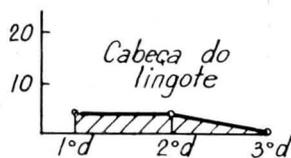
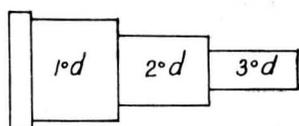


Fig. 6 — Densidade das inclusões macro; escada Magnaflux; aço SAE 5.120. Refratários de alta qualidade (X 2); resultados médios de 12 corridas. Cotejar com a figura 4.

barras laminadas de aço acalmado podem ter inclusões macro em zona periférica. Segundo nossos testes com aço SAE 5120, foi constatado enriquecimento de inclusões macro na zona periférica, especialmente em material correspondente à cabeça dos lingotes, conforme figura 4. Supõe-se que essa concentração de inclusões em zona periférica pode ter sido influenciada por correntes de convecção, de acordo com a figura 5, tomada de um trabalho de A. A. Zborovskij e seus colaboradores²³.

Os resultados de nossos testes, mostrados na figura 4, dizem respeito às corridas de aço SAE 5120, em cujos vazamentos foram usados refratários de canais de baixa qualidade (X_1).

A figura 6 representa resultados de macro pureza do aço SAE 5120 vazado, usando refratários de canais de alta qualidade (X_2). Em lingotes destas corridas não foi constatada concentração de inclusões na zona periférica, provavelmente devido ao baixo teor total das inclusões macro. Podemos, pois, concluir que a contaminação da zona periférica depende do grau de macro pureza, isto é, as inclusões fortes encontradas nesta região são, principalmente, de origem exógena.

A própria intenção dos nossos testes com aço SAE 5120 era, primeiramente, mostrar a influência de um único fator, no caso, a qualidade do refratário dos canais, sobre o grau de pureza; em segundo lugar, desejamos possibilitar uma comparação do grau de pureza de nossos aços com os aços produzidos por outros fabricantes de aços especiais.

A figura 7 apresenta, simultaneamente, resultados médios e extremos de provas de escada testados com Magna-flux. Êstes resultados mostram a grande influência da qualidade dos refratários dos canais na macro pureza. O índice máximo permitido para provas de escada, testadas com Magna-flux, aplicado como padrão interno para liberação de aços de cementação, corresponde a 140 da tabela 1. Grande número das corridas vazadas usando canais de refratários de baixa qualidade, não foram liberadas, devido a macro pureza inadequada.

O aço SAE 5120, vazado com uso de refratários de alta qualidade (X_2), figura 7, tem os seguintes índices de macro pureza: cabeça do lingote = 20; meio do lingote = 10 e pé do lingote = 90. As indicações de Magna-flux das amostras em questão eram muito finas e cerca de 35% visíveis a olho nu. Para poder comparar nossos resultados com valores de E. Maurer e R. Schustek²⁰, é necessário reduzir os índices de nossos testes aos valores que obteremos examinando as provas de escada sem uso de Magna-flux. O fator de transformação é 0,35. O grau de pureza médio de nosso aço SAE 5120 corresponde, pois, ao valor 1,33, em comparação com o valor 1,47 de E. Maurer e R. Schustek. Lembramos a natureza aproximativa da transformação feita.

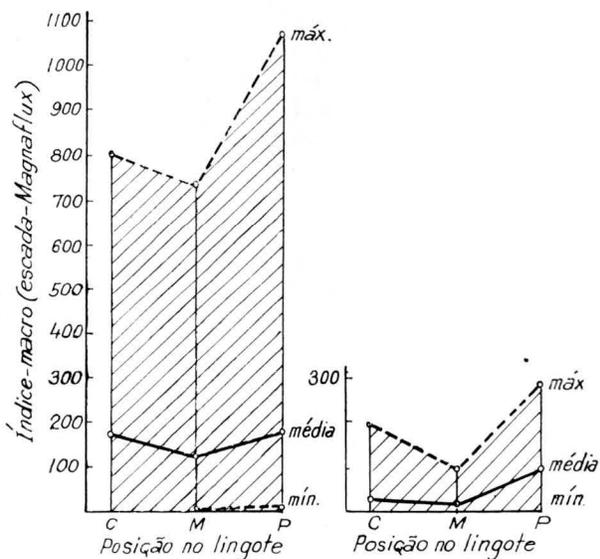


Fig. 7 — Índice das inclusões macro; escada Magnaflux; aço SAE 5.120. A esquerda: refratários de baixa qualidade (X 1); resultados médios de 10 corridas. A direita: refratários de alta qualidade (X 2); resultados médios de 12 corridas.

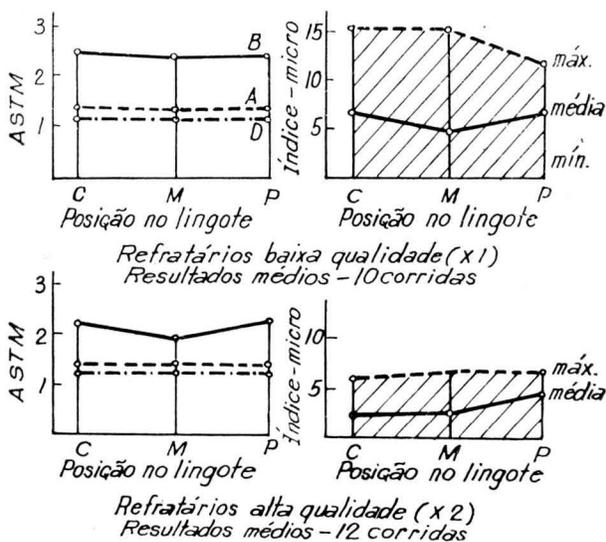


Fig. 8 — Grau de micro-pureza; aço SAE 5.120. Em cima, refratários de baixa qualidade (X 1); resultados médios de 10 corridas. Em baixo: refratários de alta qualidade (X 2); resultados médios de 12 corridas.

Os valores extremos da figura 7, obtidos com corridas em que foram usados refratários de alta qualidade, mostram a impossibilidade de se obter sempre, com segurança, o grau de pureza exigido.

Na figura 8 estão representados os dados de grau de micro pureza para o aço SAE 5120. Os valores médios da classificação segundo ASTM, praticamente não mostram a influência da qualidade dos refratários da fossa de vazamento. A densidade das micro inclusões, entretanto, é sensivelmente mais alta em corridas vazadas, usando refratários de baixa qualidade (X_1). Com um controle rigoroso do processo de produção e da temperatura de vazamento do aço, podemos concluir que no caso das corridas em questão, provavelmente existe influência da qualidade dos refratários sobre a micro pureza.

A classificação de micro pureza, segundo a tabela 1, indica para o aço SAE 5120, o valor médio 3 (fig. 8). O valor correspondente do de E. Maurer e R. Schustek é igual a 2,37 (fig. 2).

O grau de micro pureza cresce, segundo E. Maurer e R. Schustek, com o peso dos lingotes. Os lingotes por nós testados têm o peso de 2300 kg, enquanto E. Maurer e R. Schustek trabalharam com lingotes de 850 kg.

A fim de mostrar a influência do tipo de aço sobre o grau de pureza, apresentamos, na figura 9, os resultados de testes em aço 52100.

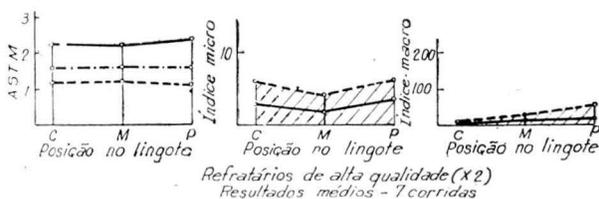


Fig. 9 — Grau pureza-micro e macro de um aço SAE 52100. Refratários de alta qualidade (X 2); resultados médios de 7 corridas.

A densidade de inclusões micro do aço SAE 52100 é cerca de 30% menor que do SAE 5120. O valor máximo, segundo ASTM, constatado com as corridas em questão, corresponde ao número 3 B. A parcela das inclusões do tipo B e número 3 corresponde a 4,8% do teor total de inclusões deste tipo. A título de comparação, citamos dados da literatura²⁶, indicando que a parcela do material com valor maior de 3 B, para o aço tipo SAE 52100, corresponde a 10%.

A macro pureza do aço SAE 52100 é, como é de se esperar, bem melhor que a do aço SAE 5120. A influência da posição do lingote na macro pureza em aço SAE 52100 é muito pequena.

Podemos constatar que, aplicando mesmo rigor na produção e vazamento do aço e usando refratários da mesma qualidade, o grau de pureza depende, consideravelmente, do tipo de aço produzido.

4. CLASSIFICAÇÃO DAS INCLUSÕES

Os mais importantes métodos químicos, físicos e metalográficos, para determinação qualitativa e quantitativa das inclusões nos aços, são mencionados em trabalho de J. A. Cintra²⁷. Alguns desses métodos, como por exemplo, extração das inclusões e posterior análise das mesmas, como também a determinação do oxigênio por extração a quente, representam testes indispensáveis para o estudo dos processos de desoxidação do aço. Os métodos metalográficos, no entanto, não podem ser usados para este fim com sucesso, devido à distribuição irregular das inclusões e ao caráter subjetivo destes métodos.

Por outro lado, nem a análise das inclusões extraídas, nem o teor do oxigênio das amostras tomadas do lingote ou do aço laminado, podem nos dizer a respeito do tamanho e, especialmente, da distribuição das inclusões. Por isto, é conveniente para a libertação das corridas na usina produtora de aço e, também, no recebimento do aço pelos consumidores usar testes metalográficos e certos testes físicos, como Magna-flux e ultra-som.

Os testes metalográficos são usados para determinação de micro e macro pureza. Com teste de Ultra-som podemos, convenientemente, detectar macro inclusões em aços laminados. O teste de Magna-flux indica inclusões macro. A aplicação deste teste é especialmente útil para casos em que também as peças de construção mecânica são testadas com Magna-flux, após acabamento final.

A classificação das inclusões micro é feita segundo norma ASTM, E 45-60T. É importante frisar que esta norma não contém dados sobre o grau de pureza necessária por tipo de aço ou aplicação do mesmo. Lembramos que a norma ASTM geralmente não fornece dados deste tipo, com exceção da ASTM-A 295-61, que define o grau de pureza micro e macro para aços de Rolamentos.

Em todos os outros casos é necessário fazer um acordo especial entre consumidor e fornecedor do aço sobre a micro pureza.

A determinação da macro pureza é feita, segundo ASTM, E 45-60T, com prova macro, fratura de amostra temperada e prova de escada com ou sem Magna-flux. As recomendações relativas à aplicação destes testes em aços SAE podem ser tomadas no AISI-STEEL PRODUCTS MANUAL. Em cada caso

é necessário fazer um acôrdo prégio entre consumidor e produtor para orientar a liberaçáo e o recebimento do material produzido, com relaçaó à macro pureza.

Em nenhum caso podem os resultados de grau de pureza ser considerados valores garantidos, como é o caso das análises químicas dos aços. Êste fato é bem considerado no AISI-STEEL PRODUCTS MANUAL, em parágrafo intitulado "Limitações de Inspeção, Testes e Certificação".

Em caso de determinação da micro pureza, a reprodutibilidade do valor médio da corrida é geralmente boa. Os valores apresentados por amostras, recolhidas ao acaso, em uma corrida podem oscilar sensivelmente. A distribuição das inclusões micro é, às vêzes, um tanto irregular, uma vez que camadas sucessivas de uma mesma amostra podem apresentar resultados bem diversos²⁸. Em conexáo com êste fato é necessário considerar também as dificuldades ligadas ao método metalográfico em si. Os trabalhos de W. H. Hatfield e G. W. Giles²⁹, T. R. Allmand³⁰, J. W. Hardy e R. T. Allsop³¹, como também de G. W. Giles, J. F. Sewel e R. Wilcook, F. B. Pickering e J. A. Belk³², contém dados importantes sôbre os principais fatôres que influem na determinação do grau de pureza.

Relativamente ao uso de Ultra-som no recebimento de aços laminados, é necessário deixar bem claro que praticamente sempre existe possibilidade de serem localizadas inclusões macro. Aplicando o teste de Ultra-som formalmente, há sempre o perigo de se rejeitar o aço em questáo. Por isso não é prático aceitar o teste de Ultra-som em si, como método de recebimento. É necessário, além do acôrdo especial de uso do Ultra-som no recebimento, definir também os métodos dos testes adicionais que devem ser aplicados para verificaçáo das indicações do aparelho.

5. A INFLUÊNCIA DAS INCLUSÕES NAS PROPRIEDADES FÍSICAS — AS POSSIBILIDADES PARA O MELHORAMENTO DO GRAU DE PUREZA

A influência do grau de pureza nas propriedades físicas do aço não pode, aqui, ser tratada em pormenores. Tentaremos, pois, sômente indicar os pontos essenciais, respectivos.

Com a finalidade de mostrar a influência das inclusões nas propriedades físicas do aço, é conveniente ensaiar grupos de amostras da mesma composiçáo química, estrutura e dureza, mas, com grau de pureza bem diferente. Êste é o caso, por exemplo, se testamos o aço fabricado ao ar antes e após refusaó em vácuo. Os testes dêste tipo, feitos por H. G. Brandt e B. Reichmann³³, mostram que uma refusaó no vácuo não tem influência significativa nas propriedades obtidas com teste de traçáo

estática, nas amostras longitudinais. Nas amostras transversais, a influência da refusão no vácuo, conseqüentemente, de melhor grau de pureza nas propriedades físicas do teste de tração, é bem pronunciada. A mesma tendência, ainda mais forte, existe com respeito à influência do grau de pureza, na resistência à fadiga. Não pode ser desprezada a influência de estrutura alinhada primária, nas propriedades físicas das amostras transversais. Mas, independente disto, é bem provável que a influência do grau de pureza seja fator mais importante em relação às propriedades físicas das amostras transversais.

Testando amostras de mesma composição química, estrutura e dureza, e com grau de pureza relativamente uniforme, pode ser difícil mostrar uma dependência direta entre a resistência à fadiga e às inclusões, especialmente com amostras longitudinais e no caso da baixa dureza das mesmas. Em relação a este problema, referimos um trabalho respectivo de M. Atkinson³⁴.

As oscilações de resistência à fadiga nas amostras tomadas em várias posições dos lingotes de uma corrida, foram determinadas em uma pesquisa de Ineson, E.; Clayton-Cave, J. e Taylor, R. J.³⁵. Segundo estes resultados, a resistência à fadiga das amostras longitudinais é relativamente uniforme em todos os lingotes da corrida em questão. Uma influência direta das inclusões na resistência à fadiga não foi constatada. Entretanto, parece que, no caso das amostras com dureza alta, as inclusões servem como núcleo de fratura por fadiga.

Achamos importante frisar, que os resultados dos testes sobre a influência das inclusões na resistência à fadiga, obtidos nas amostras polidas, não podem ser diretamente aplicados, na maioria dos casos, nas peças de construção. Segundo G. E. Dieter³⁶, a resistência à fadiga dos elementos de construção pode ser, atualmente, relativamente pouco melhorada por métodos metalúrgicos. Porém, é muito mais conveniente melhorar a resistência à fadiga eliminando os fatores prejudiciais no desenho e fabricação das peças de construção. A influência destes fatores na resistência à fadiga pode ser pronunciada, como por exemplo, mostrou Wuppermann³⁷, no caso dos virabrequins.

Caso seja constatado ser necessário usar um aço com grau de pureza excepcionalmente bom, tem-se principalmente, duas possibilidades de se obter este grau de pureza:

- 1) Por seleção das corridas ou partes das corridas de aço, fundido e vazado no ar.
- 2) Aplicando vazamento ou refusão no vácuo. Qual destas soluções é melhor, depende, tanto do grau de pureza exigido, como do preço do aço, ainda aceitável.

Sobre o melhoramento do grau de pureza por vazamento no vácuo, ainda não existem, para o caso dos aços especiais,

todos os dados necessários. Para dar uma idéia da influência de vazamento no vácuo na redução do teor de oxigênio, citamos os seguintes resultados, publicados por A. Mund³⁸.

Aço elétrico básico, escória branca	20 — 50%
Aço elétrico básico, escória preta	40 — 50%
Aço Siemens-Martin, acalmado	40 — 50%

Paralelamente à redução do teor de oxigênio, baixa-se o teor das inclusões oxidadas, além disto o vazamento no vácuo favorece uma redução do tamanho das inclusões, como também uma mais uniforme distribuição das mesmas dentro dos lingotes. Estes efeitos do vazamento no vácuo são, no mínimo, em relação à influência nas propriedades físicas, de mesma importância que a diminuição do teor total das inclusões.

A refusão no vácuo dos aços de relativamente bom grau de pureza tem, normalmente, ainda maior efeito, no sentido de diminuir o teor das inclusões, como o vazamento no vácuo do aço com fusão no ar. A refusão no vácuo reduz o tamanho das inclusões micro oxidadas de aproximadamente N.º 2 ou 3 ASTM, para N.º 1 ASTM. Entretanto, é necessário lembrar que, segundo os dados de K. Bungardt e H. Vollmer³⁹, como também outras fontes⁴⁰, a refusão no vácuo diminui sensivelmente o grau de pureza macro, sem poder eliminar totalmente a ocorrência das inclusões macro esporádicas.

Em relação à escolha do método mais conveniente para se obter o grau de pureza exigido, pode ser útil, ainda, mencionar o seguinte.

A aplicação da prova de escada, testada com Magna-flux, pode ser recomendada no caso dos aços para peças sujeitas a cargas alternadas. O aumento do preço de produção dos aços, testados dêste modo, depende do rigor do teste e pode ser decisivo para o preço de venda do aço em questão.

É provável que, no caso dos aços para construções aéronaval (Aircraft — Quality-Steels), considerando fornecimento de relativamente grandes quantidades do material, é, atualmente, mais econômico produzir êstes aços com vazamento no vácuo, do que selecionar corridas ou partes de corridas, fabricadas com vazamento no ar.

Segundo F. Harders⁴¹, o custo de produção dos aços com fusão no vácuo é, atualmente, ainda muito alto. A fusão no vácuo pode, pois, ser aplicada, até a introdução das grandes instalações respectivas, por motivos econômicos, somente para produzir aços de alta liga, como também aços para finalidades especiais, por exemplo Rolamentos de alta qualidade.

6. CONCLUSÕES

1 — Os aços produzidos pelos processos atualmente em uso, sempre contêm inclusões não-metálicas micro e macro.

2 — O grau de pureza depende, sensivelmente, do tipo de aço, especialmente do teor de carbono.

3 — As inclusões micro e macro não são uniformemente distribuídas nos lingotes, mostrando uma acumulação nas partes da cabeça e, mais pronunciada, nos pés do lingote.

4 — Uma considerável redução do tamanho das inclusões só é possível com tratamento do aço líquido em vácuo.

5 — Consideradas as oscilações de pureza do aço nos lingotes por corrida, pode-se dizer que o grau de pureza deve ser expresso somente como valor médio da corrida.

6 — O vazamento ou fusão em vácuo podem ser recomendados no caso em que o aço produzido com fusão e vazamento no ar e com bom grau de pureza para êsse último processo, não satisfizer as exigências sôbre grau de pureza.

7 — Nos casos em que sejam feitas pesquisas para determinar a correlação entre inclusões não-metálicas e a resistência à fadiga das peças acabadas será indispensável, desde o início, uma estreita colaboração entre os consumidores e os produtores de aços especiais.

BIBLIOGRAFIA

1. BAEYERTZ, M. — *Nonmetallic Inclusions in Steel*. ASM, Cleveland, Ohio, 1947.
2. *Basic Open Heart Steelmaking*. A.I.M.E., New York, 1951.
3. SAMARIN, A. M. — *Physikalisch-chemische Grundlagen der Desoxydation von Stahl*. VEB Deutscher Verlag fuer Grundstoffindustrie, Leipzig, 1960.
4. HÜTTE — *Taschenbuch fuer Eisenhuettenleute*. 5. Auflage, pág. 130-145, Verlag von Wilhlm Ernest & Sohn, Berlin, 1961.
5. HAN, B. H. — *Desoxidação, desgasificação e reações dos elementos liga no aço*. Metallurgizdat, Moscou, 1960 (em russo).
6. PLOCKINGER, E. — *Die Abscheidungsbedingungen oxydischer Verunreinigungen des Stahles in der Pflanne*. Stahl u. Eisen 76 (1956), págs. 739-748.
7. LINDSAY, R. W., Editor. — *Quality Requirements of super-duty Steels*. Metallurgical Society Conferences, vol. 3, págs. 167-181. Interscience Publishers, New York, 1959.

ÍNDICE ALFABÉTICO

do VOLUME XIX de "ABM-BOLETIM" correspondente aos
números 74, 75, 76, 77, 78 e 79, do ano de 1963

Abrão, José	285 e	409
Aços para concreto protendido da CSBM		603
Aços para construção mecânica; inclusões nos		849
Almeida, Derson de		313
Almeida Bello, J. L. de		65
Almeida Filho, Carlos de		313
Alumínio; pistões de ligas de		831
Amorim, Hernani A. Lopes de		589
Areia de moldagem para ligas de magnésio		825
Balbi, Sebastião W.		313
Barbosa de Oliveira, Américo		155
Bidwell, R. M.	557 e	579
Böhmoletz, Paulo Miguel		729
Bradaschia, Clovis	669 e	685
Brosch, Carlos Dias		757
Camarão Sobrinho, Afrânio	285 e	373
Catani, Renato		629
Chiaverini, Vicente		129
Comportamento de lingoteiras na Usina de Monlevade da CSBM .		285
Concreto protendido, arames para		603
Congresso Anual da ABM, noticiário técnico do XVIII		781
Considerações sobre a estapagem profunda		263
Construção naval; chapas de aço para a		109
Construção naval; aços estruturais para a		103
Construção naval; forjado e fundidos para a		119
Construção naval. Impacto sobre as indústrias metalúrgicas. Reu- nião Aberta sobre —; introdução e debates		87
Construção naval; influência sobre as indústrias metalúrgicas do Brasil		93
Contrôle da especificação de manganês em aços semi-acalmados e acalmados na aciaria Siemens-Martin da CSN		313
Contrôle de qualidade numa usina siderúrgica; aplicação na Usina de Monlevade da CSBM		409
Cordeiro, Paulo		409
Cremer, Herbert		119
Cromo duro. A recuperação de árvores de manivela por		243
Cruz Santos, Aniceto		87
Descarbonetação em trilhos; estudo sobre a		451
Desoxidação do aço; influência de alguns fatores sobre a		373
Dittmar, Gerd		345
Equipamentos para indústrias de base; sua fabricação no Brasil		65
Estampagem profunda, considerações sobre		263

Fabricação de Ferro Silício com o emprêgo de carvão de vapor grosso nacional	277
Ferro fundido de alto silício, para peças resistentes à corrosão ..	787
Ferro silício com o emprêgo de carvão grosso nacional, fabricação de	277
Forjados e fundidos para a construção naval	119
Fornos Siemens-Martin; mecanismo de desgaste das abóbadas nos Fratura de peças de aço; relação do aspecto da —, com a do acidente	433
Freire, Sergio M. Moniz	637
Freitas, Clauer Trench de	499
Fundição de peças de alto silício, com elevada resistência à corrosão	579
Fundição. Propriedades dos metais líquidos que interessam à —	787
Gomes, Juvenal Osório	669
Gonçalves Filho, José	195
Gonçalves Penna, Antonio Carlos	277
Grees, Edmundo	179
Grundig, Werner	313
Guimarães, Cyro	637
Hasek, Mario Lucio	787
Haydt, Heliton M.	313
Herek, Jean	571 e 579
Herek, Jean	409
Inclusões não metálicas nos aços para construção mecânica; problemas na produção e no recebimento	849
Indústria de base; fabricação de equipamentos no Brasil para a —, Instituto de Energia Atômica; contribuições do — ao XVIII Congresso Anual:	65
— Considerações metalúrgicas sôbre um reator de conversão com liga líquida de tório (com Discussão)	557
— Desenvolvimento de ligas de tântalo para cápsulas para plutônio líquido	539
— Estado atual da tecnologia de produção de tório metálico	571
— Organização e realizações da Divisão de Metalurgia do IEA	579
— Redução do UF pelo magnésio	589
Instituto Militar de Engenharia: origens, fatores determinantes e características gerais	205
Kahl, Ary Barbosa	205
Kinsch, Jean Nicolas	603
Laminação do aço; modernos trens de —, para perfis pequenos ..	345
Leishman, Robert Stuart	103
Lima e Silva, Armênio de	285 e 373
Lingotamento do aço; influência de alguns fatores sôbre o	373
Lingoteiras na Usina de Monlevade de CSBM. Comportamento de	285
Lo Ré, Vicor	825
Lopes, Lucas	129
Lúcio, Álvaro	433
Madunic, Ivica	849
Magnésio, ligas de —; areias de moldagem para	825
Manganês em aços semi-acalmados e acalmados na aciaria Siemens-Martin da CSN. Contrôles de especificação de	313

Marcondes Machado, Luís Sérgio	225
Materiais utilizados na construção de permutadores de calor para operação em baixas temperaturas	225
Mercado presente e futuro do aço no Brasil	155
Metais líquidos; propriedades que interessam à fundição	669
«METAMIG» Usina Siderúrgica de Metais de Minas Gerais S/A.	839
Miller, Jack	151
Minério de ferro; sua industrialização	729, 757 e 773
Molibdênio, determinação fotométrica do —, em aço e em ferro fundido	629
Murta, Clécio Campi	433
Oka, Nobuo	109
Permutadores de calor para operação em baixas temperaturas; materiais utilizados na construção de	225
Pfeifer, Henrique Carlos	5
Pelotização; evolução recente dos processos de	757
Pelotização; industrialização dos finos de minérios de ferro pela Pereira da Silva, Paulo Sérgio C.	579
Pimenta, José Luiz Resende	849
Pistões de ligas de alumínio; problemas de fabricação e de ser- viço de	831
Polimento eletrolítico; contribuição ao conhecimento teórico e prático do	523
Purgação de gás de uma usina siderúrgica	499
Rasmussen, José Einar	523
Recuperação de árvores de manivela pelo cromo duro. A	243
Redução direta de minérios de ferro; análise comparativa de diver- sos processos	5
Regnier, Sylvio	499
Rego Monteiro, Joaquim Carlos	93
Ribbe, Alberto Paulo	243
Ribeiro, Luiz Carlos W.	313
Ruptura de peças de aço em serviço; aspecto das fraturas	637
Siderurgia; usina de METAMIG, informações preliminares	839
Solubilidade dos gases nos metais sólidos e líquidos; seus efeitos e eliminação	685
Souza Santos, T. D. de	579
Souza, Sérgio Augusto de	825
Siderurgia no Brasil; introdução ao tema da Reunião Aberta	129
Siderurgia no Brasil; meios de financiamentos da —; Contribui- ção da Reunião Aberta	195
Siderurgia no Brasil; mercado presente e futuro do aço; contribui- ção da Reunião Aberta sobre —;	155
Siderurgia no Brasil; Reunião Aberta sobre «Fundamentos bá- sicos da	129
Siderurgia no Brasil; Reunião Aberta sobre —; meios de produção e meios de financiamento;	179
Siderurgia no Rio Grande do Sul; estudo comparativo dos pro- cessos de redução direta aplicáveis;	5
Silva, Elmo Coutinho da	263
Silveira, Rubens Corrêa da	277
Sistema de gás de uma usina siderúrgica; purgação de um	499
Sugiyama, Moriyuki	787

Trilhos; estudo sobre a descarbonetação em —;	451
Urânio; redução do UF_4 , pelo magnésio	589
Usina de Monlevade da CSBM; organização e funcionamento do contrôle de qualidade	409
Vieira, Paulo de Lima	839
Yague, Luis Alonso	373 e 409
Weinbaum, Otto	831
Zanella, Mario Manghi	451
Zeitlin, Miguel Paul	225