

ALGUNS ASPECTOS DO PROBLEMA DAS INCLUSÕES NOS AÇOS ⁽¹⁾

JORGE DO AMARAL CINTRA ⁽²⁾

RESUMO

São lembrados alguns aspectos, dentre os mais importantes, relativos ao problema da presença de inclusões não-metálicas nos aços. Dos trabalhos encontrados na literatura são tiradas conclusões práticas, sendo ainda equacionados alguns problemas a serem resolvidos, em particular, pelos fabricantes de veículos.

1. INTRODUÇÃO

No presente trabalho são abordados, ainda que de leve, os seguintes aspectos do problema das inclusões, os quais serão tratados logo a seguir, sob número anteposto:

- 2 — Origem das inclusões;
- 3 — Identificação e análise das inclusões;
- 4 — Influência do tipo de lingotagem no conteúdo e distribuição das inclusões;
- 5 — Influência das inclusões na resistência à fadiga;
- 6 — Classificações das inclusões;
- 7 — Relação entre o teor de inclusões e o comportamento de peças de veículos em serviço.

Convém salientar que nosso propósito é o de proporcionar uma visão de conjunto sobre o assunto e equacionar alguns problemas que aguardam solução; não temos a intenção de apresentar resultados experimentais originais.

(1) Contribuição Técnica n.º 428. Apresentada à Reunião Aberta sobre «Problemas de qualidade nas peças automobilísticas» do XVI Congresso Anual da ABM; Pôrto Alegre, 1961.

(2) Membro da ABM; Engenheiro da Mercedes-Benz do Brasil S/A.; Professor Assistente de Física dos Metais da Escola Politécnica de São Paulo, SP.

2. ORIGEM DAS INCLUSÕES

Quanto à origem, as inclusões podem ser exógenas ou endógenas. Se a solubilidade de um elemento cai com o abaixamento da temperatura de um banho de metal líquido ou do metal já solidificado, êle precipitará como um constituinte à parte. É o caso do oxigênio e do enxôfre, que precipitam quase completamente como óxidos e sulfuretos. De maneira análoga tem-se também a precipitação de alguns nitratos e carbonetos. Vê-se, então, que os aços possuem, comumente, constituintes não metálicos. Na prática corrente, porém, os nitretos e carbonetos são considerados parte da estrutura metálica, ao passo que os óxidos e sulfuretos são taxados de "*inclusões*" não metálicas, de origem interna ou "*endógenas*".

Por outro lado, durante o processo de fabricação, o aço em estado líquido está em contacto com refratários, escórias e atmosferas contaminantes, como o ar. Partículas de refratários, se destacam e são arrastadas pela corrente líquida; também a superfície desta reage com o ar, dando origem a uma película de óxido que, carregada e fragmentada, será incorporada ao lingote. É muito provável que essas partículas tenham, por via de reação com o aço, sua composição alterada. Tem-se aí originadas as inclusões de origem externa, também chamadas "*exógenas*".

Desde há muito têm os metalurgistas se preocupado com o problema das inclusões, ora tentando evitar seu aparecimento ou pelo menos controlar seu tipo, número e distribuição, ora provocando-as, com o fito de melhorar determinada propriedade, como é o caso dos sulfuretos nos aços de "*usinagem fácil*" ("*free cutting steels*").

Abordemos alguns aspectos da origem das *inclusões exógenas*. Foi comprovado diretamente que as inclusões que se encontram nos aços solidificados foram adquiridos ou formados nos últimos estágios de sua fabricação¹. As partículas de escória adquiridas durante o vazamento são eliminadas no intervalo entre essa operação e a lingotagem, pela facilidade que têm em flutuar. Elas não podem, portanto, formar inclusões exógenas.

Parece haver¹ duas fontes principais de ataque químico aos refratários da panela: o ataque da escória e o ataque do próprio aço. As escórias básicas atacam rapidamente e lavam os refratários ácidos da panela, produzindo compostos que são líquidos às temperaturas usuais do aço nessa ocasião. Em sua maior parte, as partículas de refratários têm a oportunidade de flutuar. Uma certa porção, porém, é carregada pela corrente de metal líquido e vai para o lingote.

A segunda maneira de ataque químico consiste na ação do aço líquido sobre um refratário ácido. Ela se faz através, principalmente, do manganês que ataca a sílica. Sabe-se, por exemplo, que os aços austênicos (contendo de 12% a 14% de Mn) atacam severamente os refratários ácidos que estes não podem ser utilizados em tais casos. Post e Luersen³ concluíram que, para limpeza do aço, é conveniente manter a relação Mn-Si próxima da unidade, uma vez bem controlados o tempo e a temperatura de vazamento, a temperatura de lingotagem, quantidade de Al adicionada para controle do grão e grau de desoxidação no forno. Eles verificaram que a maioria das indicações detectadas por processos magnéticos têm sua origem na reação do aço sobre o refratário. De acordo com eles, quando o aço líquido de um forno elétrico básico é vazado em uma panela revestida com refratário ácido, por exemplo, 65% SiO₂ — 30% Al₂O₃ — 5% Fe₂O₃, este é, inicialmente, amolecido ou derretido na interface. Ocorrem então reações químicas entre o metal líquido e esta interface, de modo que sua composição química se aproxima da de uma escória em equilíbrio contendo SiO₂ — MnO — FeO — Al₂O₃. A relação Mn/Si no aço terá uma influência marcante em sua viscosidade e, portanto, em sua capacidade de resistir à erosão. Os glóbulos de escória ácida eventualmente destacados são arrastados pela corrente de metal líquido e constituem inclusões.

Sims¹ mostrou que qualquer matéria estranha contida no aço por ocasião do vazamento na panela tem tempo suficiente para sobrenadar antes da lingotagem. Além disso, Fedock² demonstrou experimentalmente, utilizando a técnica do traçador radioativo, que do refratário da panela, só é arrastado pela corrente líquida, material proveniente da válvula e do revestimento da panela ao redor da mesma, dentro de um raio de 50 cm, aproximadamente.

Além disso, quando um aço desoxidado é lingotado, a superfície exposta reage com o ar para formar, inicialmente, uma película de FeO. Esta reagirá, em seguida, com os desoxidantes. Se o aço for acalmado com Al, este reage para formar ferro aluminato ou alumina, futuras inclusões no lingote. Se for acalmado com Si, forma-se SiO₂, que poderá constituir inclusões no lingote.

Quando o material estranho entra na lingotaria junto com o metal líquido, em sua maioria flutuará, apesar da agitação provocada pela corrente líquida. Uma parte, porém, fica retida no aço solidificado. Isto ocorre com tanto mais facilidade quanto mais baixa a temperatura de lingotagem e quanto maior for o tempo gasto nessa operação.

As *inclusões exógenas* ocorrem em grande variedade, mas geralmente são distinguíveis das endógenas pelos seguintes característicos ¹:

- a) São geralmente maiores;
- b) Ocorrem mais esporadicamente;
- c) Têm localização preferencial nos lingotes e peças fundidas;
- d) Possuem formas irregulares e estrutura complexa.

As *inclusões endógenas* formam-se por precipitação de certos constituintes. São constituídas principalmente pelos óxidos e sulfuretos; as reações que lhes dão origem, podem ser provocadas quer por simples variação da solubilidade durante o resfriamento e solidificação do aço.

A fonte principal dos óxidos são as adições de desoxidantes. Estes reagem com o oxigênio imediatamente após a adição, de acordo com as reações: $O + Mn \rightarrow MnO$; $2O + Si \rightarrow SiO_2$; $3O + 2Al \rightarrow Al_2O_3$.

Os produtos das reações precipitam, constituindo as inclusões de óxidos. Muitas flutuam em direção à escória, à qual se incorporam. De acordo com Sims ¹ as inclusões de óxidos que se encontram nos lingotes se formaram após a lingotagem.

3. IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DAS INCLUSÕES

Há vários métodos para localização, identificação e análise das inclusões. Remetemos o leitor às referências (4), (5), (6) e (7) para um conhecimento detalhado dos mais comuns: ataque químico, fratura, ultrassom, magnético, luz branca refletida, luz polarizada refletida, técnicas petrográficas, análise química, difração de Raios X, etc. Lembremos que estes três últimos métodos dependem da extração da inclusão do seio do metal. Além disso convém alertar contra um engano que pode não ser raro quando da aplicação do Magnaflux a uma superfície metálica, de barras, por exemplo. Há sinais ou descontinuidades detectadas pelo método que nem sempre são inclusões.

Além desses métodos, vale a pena mencionar em particular a análise com auxílio da microsonda eletrônica, inventada por Castaing ^{8 e 9}, permitindo análise de uma região com cerca de 2 micron de diâmetro. Em interessante trabalho, Bizouard e Philibert ¹⁰ determinaram a constituição e a composição química de uma inclusão o que permite, em geral, a determinação de sua

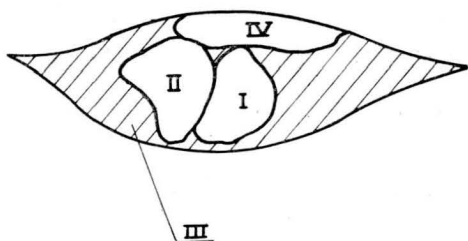


Fig. 1 — Esquema de uma inclusão complexa, com a presença de quatro fases distintas, as quais permitem, em geral, a determinação de sua origem. Ref. 10.

origem. A figura 1 esquematiza a inclusão fotografada pelos autores. Nela encontram-se quatro fases:

- FASE I: 3% Al; 54% Ti; 6,5% Mn e 0,7% Fe
 FASE II: 0,8% Al; 39% Ti; 25% Mn e 0,7% Fe
 FASE III: 7,1% Al; 9% Si; 12,3% Ti; 27,5% Mn e 0,7% Fe
 FASE IV: sulfureto, provavelmente de Mn, contendo 2-3% de Fe.

A composição do aço era a seguinte: C = 0,44%; Si = 0,09%; Mn = 0,95%, tendo recebido adições de Ti. A fase III constitui a matriz vitrosa.

4. INFLUÊNCIA DO TIPO DE LINGOTAGEM NA DISTRIBUIÇÃO E CONTEÚDO DAS INCLUSÕES

Na lingotagem direta (“top pouring”), apesar da parte superior do metal líquido manter-se em agitação, uma grande parte das inclusões tem oportunidade de flutuar. Outra parte fica retida próximo à superfície do lingote devido ao resfriamento mais rápido aí, ou entre dendritas.

Na lingotagem indireta (“bottom pouring”), também chamada invertida ou “em placa”, a última porção do metal líquido deve escoar dentro de um canal de metal já solidificado e a distribuição das inclusões é diferente. A experiência tem mostrado que a superfície do lingote é bastante limpa e, com certa facilidade, se encontra uma zona contaminada, concêntrica, com aumento de intensidade de contaminação no pé do lingote.

G. G. Aristow¹¹ mostrou que a lingotagem invertida, quando utilizado refratário de boa qualidade, produz um aço mais limpo. De acordo com o autor, o refratário dos canais, quando poroso, é capaz de reter parte dos constituintes não-metálicos.

5. INFLUÊNCIA DAS INCLUSÕES NA RESISTÊNCIA À FADIGA

Influência do tipo de inclusão — Sims¹ menciona que, em extensivo trabalho no Battelle Institute, não foi encontrada uma só ruptura por fadiga iniciada em inclusão de sulfureto. Menciona ainda o trabalho de Hyler, Tarasov e Favor, que estudaram rupturas por fadiga em aço temperado, verificando que de 75 rupturas, 70 tiveram início em inclusões. Destas, 55% eram óxidos do tipo ferro aluminato e as outras, ciano-nitretos de Ti. Dieter, Macleary e Ramon (citados por Sims¹), em ensaios de fadiga com forjados verificaram que as rupturas por fadiga sempre se iniciaram em óxidos.

Cumming, Strolen e Schulte¹¹, em extensivo estudo com aço tipo SAE 4340 verificaram que, sem exceção, as trincas de fadiga se iniciaram junto a inclusões duras, do tipo silicato de Mn e Al, em geral esféricas.

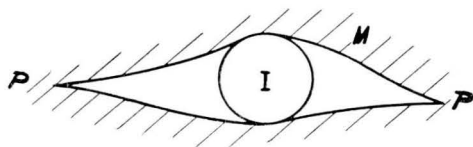


Fig. 2 — Esquema de inclusão, com parte esférica dura de silicatos (I), produzindo cavidade no aço (M) e concentração de tensões em P.

Frith¹² encontrou, como ponto de escorvamento de rupturas por fadiga, inclusões de alumina, silicatos de Al, ciano-nitretos de Ti e silicatos esféricos. Talvez o maior interesse de suas pesquisas esteja em que, junto às inclusões esféricas de silicatos encontrou evidência de cavidades (fig. 2), formadas provavelmente durante a solidificação, devido à grande diferença de coeficientes de contração (o do aço maior do que o do material da inclusão). Por outro lado, também com os óxidos ocorre tal diferença.

Explicação teórica — Para que seja bem compreendida a ação mecânica de uma inclusão, há necessidade de rever o conceito de concentração de tensões. Quando em uma peça há variações bruscas de secção, um orifício por exemplo, nas bordas desta variação aparecem tensões diferentes da tensão nominal (longe do orifício). Consideremos o caso simples de uma cha-

pa (fig. 3), sujeita a uma força axial F com um orifício de diâmetro d . A tensão nominal é $t = \frac{F}{A}$, mas no ponto P , por exemplo, a tensão é de cerca de $3t$. O fator "3", em geral " k ", chama-se coeficiente de "concentração de tensões".

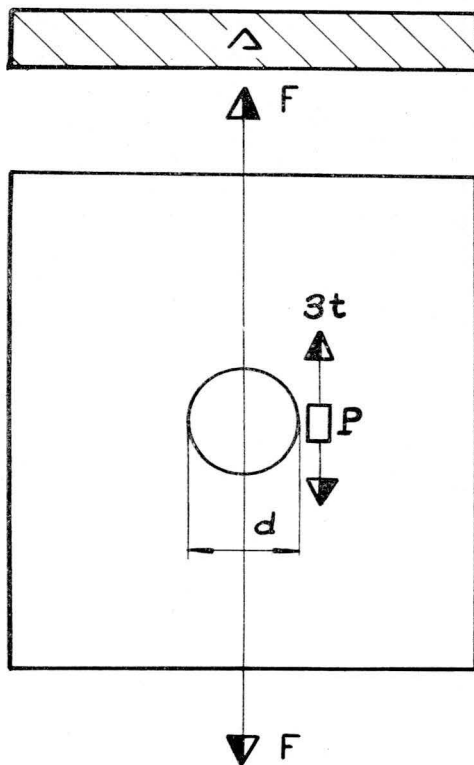


Fig. 3 — Placa sujeita a uma força axial F , com um orifício, produzindo concentração de tensões no ponto P .

Se o orifício estiver cheio com um outro material (sulfureto, silicato, etc.), de módulo de elasticidade diferente do módulo do aço, teremos um coeficiente " k " diferente de 3. Se, além disso, o orifício não for circular, teremos um novo motivo para esperar variação de k . De maneira geral teremos, então, provocada pela presença de uma inclusão, uma tensão kt , no aço, em certo ponto, junto à mesma.

Se, ainda, houver uma diferença de coeficientes de contração entre o aço e o material da inclusão, à tensão kt deve ser somada outra t' , de tração no aço e de compressão na inclusão. Em resumo, teremos, para as inclusões moles: kt e, para as duras, com diferença de coeficiente de contração: $kt + t'$. No caso da cavidade ter-se-á nos pontos P , apenas kt , sendo k um coeficiente bastante alto, de concentração de tensões no fundo de uma trinca, já iniciada. Seria o pior de todos, em igualdade com outras condições, como posição, estado do aço, etc.

Dado, então, o fato de haver uma região, embora pequena, de altas tensões, é fácil entender como é possível que aí se inicie uma ruptura por fadiga. Embora a tensão nominal t seja inferior ao limite de escoamento do metal, é possível que seja encontrada uma ou mais inclusões de tal maneira posicionadas que haja, no metal justaposto, uma região em que ocorra escoamento, encruamento e finalmente ruptura. A pequena trinca que então se forma produzirá em seu fundo, alta concentração de tensões que farão com que o processo se repita, dando-se assim a propagação da mesma até ruptura final da peça.

Distribuição e número das inclusões — É claro que o aumento do número de inclusões faz aumentar a probabilidade de encontrar-se uma inclusão numa região de tensão nominal relativamente alta e, portanto, em posição perigosa.

Quanto à distribuição das inclusões, é óbvio que uma inclusão numa região neutra (região de tensões nulas) ou de baixas tensões, é inofensiva. Assim, uma inclusão situada no eixo de uma peça submetida à torção não produzirá alta concentração de tensões, principalmente se comparada a outra idêntica, situada na periferia. Portanto, para que dada inclusão seja deletéria é preciso que se localize em regiões em que a tensão nominal seja relativamente alta.

Variação do limite de resistência à fadiga — Para dar uma idéia da questão, Sims¹ afirma que, em números redondos e tomando como base o aço "aircraft quality", pode-se esperar que num aço excepcionalmente contaminado, haja uma perda de 15-20% de sua resistência à fadiga e que noutro, excepcionalmente limpo, haja um ganho de 15-20% dessa mesma resistência. Além disso, como a curva de encruamento de um aço depende de seu estado quanto ao tratamento térmico (ou dureza), é de se esperar que este tenha influência no efeito de determinada inclusão. As conclusões experimentais de Frith¹² corroboram com esta suposição.

6. CLASSIFICAÇÃO DAS INCLUSÕES

Mencionaremos duas, práticas: uma devida ao Instituto Sueco Jernkontoret, adotada pela ASTM, e a outra de origem alemã e publicada pelo autor Diergarten. Ambas apresentam vários tipos e, dentro de cada tipo, vários tamanhos (Jernkontoret 5 tamanhos, ao passo que Diergarten 6), e espessuras. Não seria fácil compará-las. Entretanto, o que talvez se possa dizer é isto: apesar de a classificação Jernkontoret (ou ASTM, como é mais comumente conhecida) apresentar apenas 5 tamanhos (de quatro tipos A, B, C e D) e a Diergarten, 6, parece que a primeira contém uma gama mais ampla de tamanho que a segunda, parecendo que talvez o 6.º tamanho Diergarten corresponda ao 3.º ou 4.º ASTM. Esta iria, portanto, mais além quanto à densidade de material incluso dentro do campo de observação.*

O tamanho das inclusões influencia o efeito deletério das mesmas sobre a resistência de uma peça. Quanto maior a inclusão, maior seu efeito. É um resultado experimental.

Uma das razões disto (pouco apontada na literatura), está provavelmente na variação do tamanho da inclusão em relação ao tamanho do grão. Com efeito, já não é mais possível desconsiderar a heterogeneidade do material na escala em que se está trabalhando. Consideremos, por exemplo, que a gama de tamanhos ASTM 5-8 corresponde à gama de diâmetros médios dos grãos de 25 a 75 micron. Por outro lado, em experiência com SAE 4340, Cummings e outros¹³ encontraram inclusões que variavam, em diâmetro, dentro dessa mesma faixa.

7. RELAÇÃO ENTRE O TEOR DE INCLUSÕES E O COMPORTAMENTO DE PEÇAS DE VEÍCULOS

Chegamos, a esta altura, ao problema mais importante para o montador de veículos. De um lado ele deseja utilizar peças de alta qualidade, bõa resistência, para o que deve usar aço de qualidade, inclusive quanto a sua limpeza. Por outro lado, ele não quer impôr ao fabricante do aço uma carga exagerada, fazendo exigências desnecessárias quanto ao teor de inclusões. Pergunta-se então, até que ponto um controlador de qualidade deve exigir, e portanto até que ponto deve ceder, quanto à limpeza do aço. É claro que isto dependerá da peça, sua finali-

(*) O autor agradece ao Eng. Ivica Madunic, ora em Acesita, pela observação acima.

dade, principalmente, mas o problema continua e pode ser precisado da seguinte maneira: *“dada uma certa peça, a ser fabricada com determinado aço (com certas características mecânicas), qual o teor de inclusões admissível e como expressá-lo convenientemente?”*.

Para dar solução conveniente a êste problema parece que devemos conjugar nossos esforços para o bem comum. Ou a resposta ao mesmo já existe para alguns ou pelo menos em alguns casos particulares e seria interessante se todos a soubessemos, ou deve ainda ser dada e uma programação de estudos poderia ser feita no futuro. As experiências seriam executadas, de preferência, sôbre as peças acabadas.

8. CONCLUSÕES

Do que foi dito parece-nos possível tirar algumas conclusões práticas, a saber:

- Não há dúvida de que as inclusões são deletérias, sendo responsáveis pelo início de rupturas progressivas e baixando a resistência à fadiga.
- Êsse efeito depende: do tamanho, da distribuição, da posição e principalmente do tipo de inclusão.
- Ao se classificar um aço quanto ao seu teor de inclusões, há necessidade de se distinguir os tipos, devendo-se dar muito mais importância aos óxidos e silicatos que aos sulfuretos.
- A lingotagem invertida é preferível à direta, desde que se use bom refratário nos canais. Se êste fôr de má qualidade, a segunda é preferível.
- Do refratário da panela só tem importância a porção ao redor da válvula e obviamente o desta também.
- Para um aço de forno elétrico básico e vazado em panela revestida com tijolos ácidos, convém manter a relação Mn/Si próxima da unidade, para efeito de limpeza do aço.
- O problema mais importante a ser resolvido consiste na especificação das inclusões (segundo Jernkontoret (ASTM) por exemplo), para cada peça de um veículo que vá trabalhar sob esforços alternados.

*

AGRADECIMENTO

O autor deseja agradecer à Direção da Mercedes-Benz do Brasil S. A., particularmente na pessoa de seu Vice-Presidente, Exmo. Sr. General Edmundo de Macedo Soares e Silva, que encorajou a confecção e permitiu a publicação do presente trabalho.

BIBLIOGRAFIA

1. CLARENCE, F. SIMS — *The Nonmetallic Constituents of Steel*. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, vol. 215, pág. 367, junho, 1959.
2. FEDOCK, M. P. — *Sources of Inclusion in Pouring Refractories*. Proceedings of Electric Furnace Steel Conference, vol. 11, pág. 269, 1953.
3. POST, C. B. e LUERSEN, G. V. — *The Interaction of Liquid Steel with Ladle Refractories*. Transactions of AIME, vol. 185, pág. 15, janeiro, 1949.
4. *Metals Handbook*. American Society for Metals, pág. 445, abril, 1960.
5. *ASTM Standards*, Part. I, E. 45-51, pág. 1477, 1952.
6. PENNA, E. — *Contribuição ao estudo de extração e análise de inclusões não metálicas em aços ao carbono*. ABM-Boletim, n.º 59, vol. 16, pág. 387, abril, 1960.
7. BAEYERTZ, M. — *Nonmetallic Inclusions in Steel*. ASM, 1949.
8. "La Microsonde Electronique". Panfleto distribuído pela firma francesa CAMECA: 103, Boulevard Saint-Denis. Courbevoie (Seine).
9. CASTING, R. — *Thèse*. Paris, 1951. Publication ONERA, n.º 55.
10. BIZOUARD, Mme A. e PHILIBERT, M. J. — *Sur l'analyse d'inclusions non métalliques dans les aciers*. Revue de Metallurgie, pág. 123, julho, 1959.
11. ARISTOV, G. G. — *Refractories for the Bottom-Pouring of Steel*. Traduzido de Ogneupory, vol. 17, pág. 364, 1952 (tradução Butcher, número 3271).
12. FRITH, P. H. — *Fatigue Test on Rolled Alloy Steels Made in Electric and open Hearth Furnaces*. Journal, British Iron and Steel Institute, vol. 180, pág. 26, 1955.
13. CUMMINGS, H. N.; STEELEN, F. B. e SCHULTE, W. C. — *Relation of Inclusions to the Fatigue Properties of SAE 4340 Steel*. Transactions of the American Society for Metals, vol. 49, pág. 482, 1957.