

INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NA OCORRÊNCIA DE TRINCAS DE SOLIDIFICAÇÃO EM AÇOS FUNDIDOS⁽¹⁾

Eduardo Monteiro de Castro⁽²⁾
Luiz Henrique Dias Alves⁽³⁾

RESUMO

Objetiva-se o estudo e o desenvolvimento de métodos para a redução de trincas de solidificação em aços fundidos. O problema pode estar relacionado com várias etapas do processo de fabricação de um fundido, ou seja, cada fase do processo pode ter sua parcela de responsabilidade no surgimento destas trincas, desde o projeto da peça, processo de alimentação, elaboração do aço, moldagem da peça, vazamento e solidificação. Portanto, foi feito um estudo de cada uma destas etapas, bem como experimentos visando melhorar as condições de solidificação como também reduzir as restrições às contrações.

Além de reduzir o número médio de trincas, também observou-se melhorias no rendimento metálico. Isto mostrou que a metodologia proposta apresentou os resultados esperados.

Palavras-chave: aço; trincas; solidificação

(1) V Seminário de Fundição – 17 a 19 de maio de 2004. Salvador-BA.

(2) Engenheiro Metalúrgico-UFF. Engenheiro de Processos da Amsted-Maxion Fundição e Equipamentos Ferroviários S/A.

(3) Engenheiro Metalúrgico-UFF. Mestre em Engenharia Mecânica-USP. Supervisor de Moldagem e Acabamento da Amsted-Maxion Fundição e Equipamentos Ferroviários S/A. Professor da cadeira de Fundição do curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense

1. Introdução

Trincas de solidificação são o resultado de tensões internas geradas durante o processo de solidificação. Normalmente estão relacionadas ao travamento ou obstrução das contrações, a deficiências de alimentação, temperatura de vazamento e rigidez do molde e machos. Podem ser potencializadas pela presença de elementos fragilizantes tais como S, P ou outros que segregam enriquecendo e fragilizando o líquido remanescente do processo de solidificação. Essas trincas são possivelmente um dos mais comuns e sérios defeitos encontrados em peças de aço fundidas^[1].

Algumas trincas de solidificação são visuais e podem atravessar completamente a seção da peça. Outras, que podem ser mais problemáticas, são encontradas por ensaios de partículas magnéticas^[2].

A associação francesa de fundição divide os fatores que favorecem a aparição de trincas de solidificação em três grupos: geometria da peça, fatores tecnológicos e fatores metalúrgicos^[2]. A geometria da peça pode favorecer a formação de trincas de solidificação quando oferecer obstáculos naturais à contração e quando causar concentrações de tensões. A solução para este tipo de problema deve estar ligada ao projeto da peça fundida^[2]. Os fatores tecnológicos que podem favorecer as trincas de solidificação estão ligados ao molde, à posição de canais, à massalotagem e à solidificação direcional^[6]. A rigidez de moldes e machos, em temperaturas vizinhas ao *liquidus*, também pode favorecer a formação destas trincas^[2]. As causas metalúrgicas podem estar ligadas à composição do aço, às impurezas existentes e ao tipo e morfologia das inclusões resultantes do processo de elaboração^[2].

2. Trincas de Solidificação

O primeiro estudo sobre o mecanismo de formação de trincas de solidificação em aço fundido foi realizado em 1928 por Korber e Schitzhowski^[2], e baseado nos resultados por eles obtidos, acreditou-se durante anos que as trincas se formavam após completa solidificação, na temperatura de aproximadamente 1300°C. Pesquisas posteriores realizadas por Hall, Pellini e Christopher^[2] procuraram medir simultaneamente as deformações e as temperaturas, de maneira a determinar o momento de início de formação da trinca. Mais recentemente Van Eeghem e De Sy^[2] procuraram aprimorar o método de ensaio através do registro contínuo durante a solidificação. Esses trabalhos buscaram desenvolver uma técnica para observar a formação de trincas desde o início até o fim do processo.

A solidificação inicia-se a uma temperatura abaixo da linha *liquidus*. São formadas dendritas primárias, as quais crescem às custas da fase líquida. Durante o estágio inicial da solidificação, a proporção de sólido é pequena, e as dendritas formadas estão dispersas e não mantêm contato umas com as outras^[2]. Nesse estágio o metal não deve trincar porque a massa possui baixa coesão, sendo que as contrações que ocorrem em todos os estágios de resfriamento são acomodadas sem dificuldade^[2]. A medida que a temperatura cai, as dendritas primárias crescem e finalmente se ligam para formar um arranjo coeso. Neste ponto existe o perigo de ocorrência de trincas pois, apesar do sólido estar interligado, esta ligação é enfraquecida pelo líquido existente entre os braços das dendritas, que muitas das vezes é rico em elementos que segregam, como carbono, enxofre, dentre outros. Se, no momento da ocorrência da trinca, a massa de filme líquido for espessa, pode

ocorrer realimentação a partir de outras partes da peça ou a partir de alimentadores; qualquer trinca formada nessas condições pode ser preenchida por metal líquido segregado^[6]. De fato, muitos autores observaram trincas preenchidas através de cuidadoso exame das áreas sujeitas ao trincamento. Em virtude do filme líquido residual se enriquecer em determinadas impurezas, uma trinca em aço preenchida por líquido contém em geral teor de enxofre e fósforo sensivelmente maior. Estudos mostraram que a zona segregada pode apresentar um enriquecimento em fósforo e enxofre de 6 a 8 vezes, quando comparada ao metal líquido original^[2].

A possibilidade de eliminação de uma trinca inicialmente formada pela realimentação por líquido foi explorada por Schmid e Crocher^[2]. Esses autores, utilizando isolamento do molde e alimentação através de massalotes colocados em posições estratégicas, conseguiram obter peças livres de trincas em regiões que solidificam por último^[2].

A zona mais perigosa para o trincamento deve ser, portanto, a do estágio final de solidificação, quando o metal se aproxima da solidificação completa e a espessura do filme líquido diminui. Neste estágio o aço tem baixa resistência e, se ocorrer trincamento, o metal líquido disponível não será suficiente para preencher as trincas formadas. Com a subsequente queda de temperatura, o líquido residual solidifica progressivamente até que esta se complete^[2].

Como a ocorrência de trincas se verifica desde uma temperatura entre a linha *solidus* e a linha *liquidus*, até a temperatura na qual o aço está completamente sólido, se conclui que a probabilidade ao trincamento se eleva a medida que o intervalo de solidificação cresce. Elementos de liga e impurezas que venham aumentar o intervalo de solidificação ou formar fases de baixo ponto de fusão, aumentam a tendência ao trincamento^[2]. Foi sugerido que o fósforo e o enxofre promovem aumento adicional da trinca de solidificação no estado sólido e que o nitreto de alumínio pode causar trincamento abaixo da temperatura de formação das trincas de solidificação^[2].

Se o grau de trincamento é dependente de tensões, é difícil visualizar como são formadas pequenas trincas. Como o tensionamento é suficiente para fraturar uma pele de aço mais fina e mais resistente, a trinca formada deveria se propagar para o interior da seção, mais quente e com menor resistência. No entanto, quando se considera que o mecanismo é resultante também de deformação, é possível imaginar que o aparecimento de uma trinca alivia tensões, o que não implica obrigatoriamente seu contínuo crescimento^[2].

Finalmente, é importante dizer que, estando o fenômeno de trincas de solidificação ligado a filmes de líquido interdendrítico, o tamanho de grão deve influenciar de maneira muito importante. Com menor tamanho de grão, as impurezas de baixo ponto de fusão e a deformação são redistribuídas, o que concorre para melhorar a resistência ao trincamento^[2].

2.1. Influência da Estrutura

Há uma ligação entre a estrutura e a temperatura de vazamento. Esta deve ser mais baixa quanto possível^[2]. Esta afirmação está ligada ao tamanho de grão. Ou seja, uma menor temperatura de vazamento deve ocasionar um maior refino de grão, pois gerará um menor aquecimento da areia na interface metal-molde. Com isso, o crescimento de grão é retardado, uma vez que a difusividade atômica é diminuída, fator essencial ao crescimento granular^[5].

Em adição, uma menor temperatura de vazamento diminui a contração, pois a faixa de permanência no estado líquido é menor. E, também, esta menor temperatura dificulta o processo de absorção de impurezas durante o vazamento^[2]. Por outro lado, uma temperatura baixa pode não queimar a resina, ligante da areia, e com isso, o macho ou molde não entra em colapso^[1].

No entanto, esta variável só tem um efeito significativo para moderadas velocidades de resfriamento ou paredes espessas, pois quando a velocidade de resfriamento aumenta ou a troca de calor entre paredes pouco espessas se torna relevante, esta temperatura passa a não ter ação no refino de grãos, sendo somente útil no impedimento de absorção de impurezas pelo metal^[5].

2.2. Areias de Fundição

Como já visto, tanto a rigidez do molde como dos machos, tem influência na formação de trincas. Esta rigidez está associada aos aglomerantes utilizados nas areias de fundição. E têm como objetivo unir os grãos de areia-base entre si, conferindo ao macho ou molde confeccionado determinada resistência mecânica, necessária à sua utilização^[1]. As areias de moldagem são classificadas como sintéticas-argilosas e areia de cura química. No caso das areias sintéticas argilosas a resistência dos machos e moldes é menor se comparada com as areias de cura química. Esta cura das resinas ocorre através da polimerização, que pode ser explicada como a fusão de várias moléculas chamadas monômeros, formando longas cadeias moleculares, ou polímeros. Para acelerar esta reação são utilizados compostos auxiliares, em conjunto com os aglomerantes, para promover sua cura.

Abaixo, na Figura 1^[1], está representado esquematicamente a reação de polimerização para um resina fenólica uretânica.

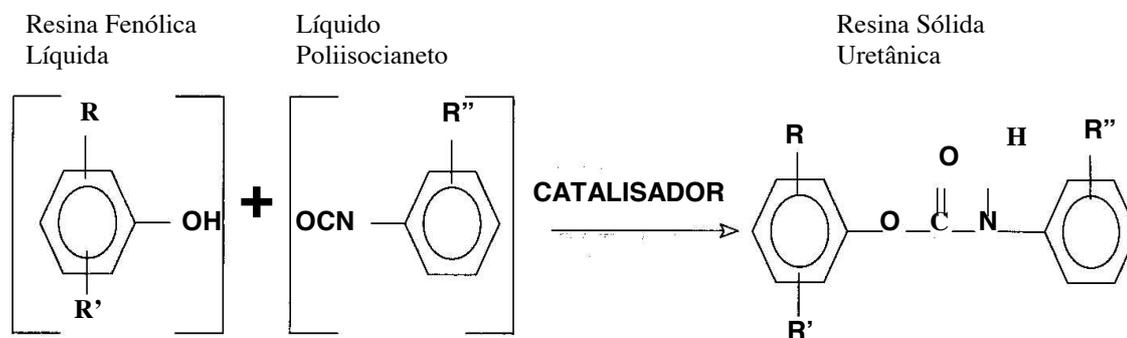


Figura 1. Reações químicas durante o processo de cura

3. Materiais e Métodos

Embora nem sempre seja possível isolar completamente as causas individuais da ocorrência das trincas, em geral uma ação coordenada sobre os diversos fatores tecnológicos que podem ser controlados é uma das melhores soluções de engenharia para reduzir o problema. Visando demonstrar este tipo de enfoque, selecionou-se para estudo, um bloco de transmissão de trator produzida em aço fundido pela Fundição da Amsted Maxion, com dimensões aproximadas de 1,5 x 1,5 x 1,5m e geometria complexa, conforme mostrado esquematicamente na Figura 2.

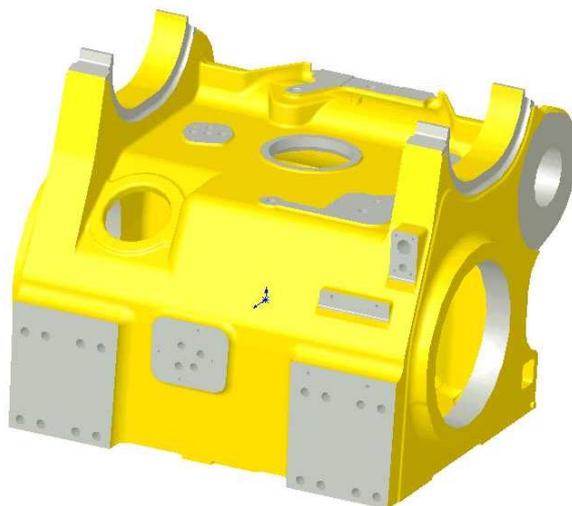


Figura 2. Bloco de transmissão de trator de esteira objeto de estudo

O estudo se dividiu em etapas, sendo primeiramente caracterizadas as trincas, assegurando se tratarem de trincas de solidificação. Em seguida, foi realizado um rastreamento estatístico de regiões do fundido favoráveis ao surgimento destas trincas. Na terceira etapa se propôs ações com vistas à solução do problema. As etapas e resultados são descritas abaixo.

3.1. Caracterização das Trincas

Para caracterizar que as trincas objeto de estudo eram trincas de solidificação, foi realizado ensaios de partículas magnéticas após a desmoldagem e jateamento da peça, uma vez que se definiu que trincas de solidificação são trincas formadas durante o processo de solidificação ou formadas nos primeiros estágios do fundido já totalmente solidificado.

Mapeadas as indicações, a peça foi submetida à linha de produção habitual, repetindo, obviamente, o ensaio de partículas magnéticas com seu respectivo mapeamento. Comparando-se os dois mapeamentos, observou-se nenhuma alteração, indicando que estas trincas foram formadas durante a solidificação, ou durante o resfriamento, provavelmente a altas temperaturas, quando a resistência do metal é mais baixa.

3.2. Regiões Favoráveis ao Surgimento das Trincas

Através da análise de um histórico de mapeamentos de partículas magnéticas, foi verificada regiões com uma frequência maior de ocorrência de trincas. E ao redor destas regiões, a incidência de trincas vai gradativamente diminuindo, conforme Figura 3. Nesta Figura é indicada a incidência percentual de trincas numa amostra de 36 peças. Os relevos (eixo vertical) mostram a intensidade de trincas em um dos planos. Os eixos horizontais descrevem esquematicamente o plano em questão.

Com base na revisão bibliográfica e nas observações descritas acima, formulou-se a hipótese de que as trincas em questão eram trincas de solidificação. Assim, decidiu-se avaliar o efeito das seguintes variáveis de processo sobre a incidência de trincas: composição química do aço, temperatura e tempo de vazamento, resistência da areia e projeto de alimentação.

Incidência de Trincas Totais ao longo da Superfície - Plano 1

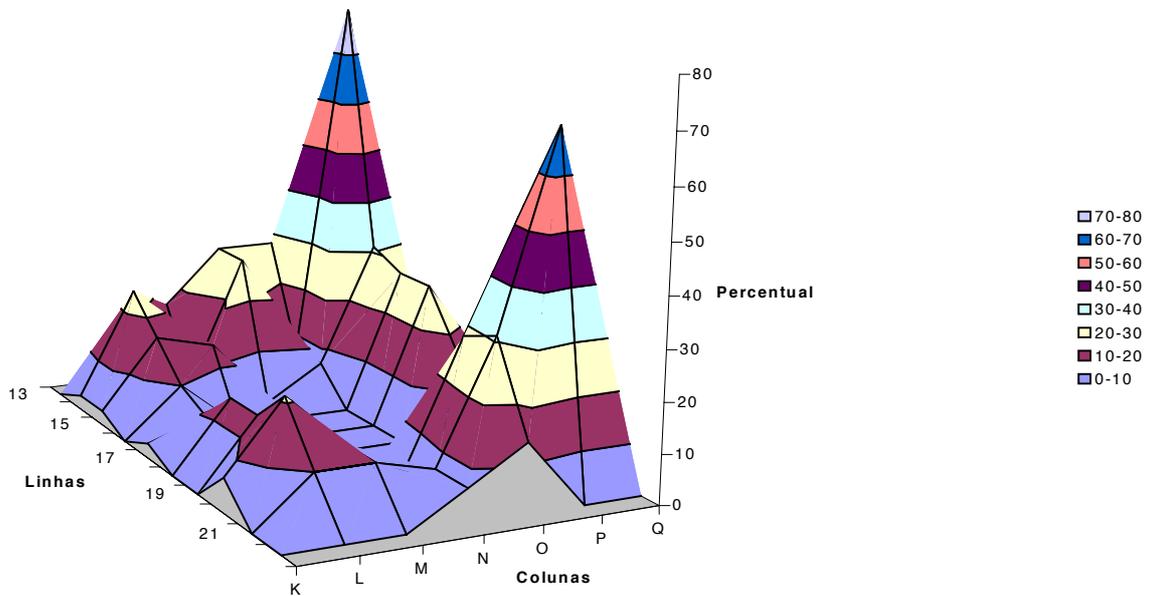


Figura 3. Gráfico representativo da intensidade de trincas em um dos planos da peça.

3.3. Avaliação do Efeito da Composição Química

Para avaliar, experimentalmente, a influência de cada elemento na formação das trincas de solidificação observada na peça, optou-se por uma amostra de 33 peças correlacionando individualmente a composição química com a incidência de trincas, obtendo os gráficos mostrados nas Figuras 4 e 5. É importante ressaltar que estas são análises simplificadas, supondo que as únicas variáveis são o percentual em peso do elemento químico e o número de trincas, deixando de lado as outras variações e suas interações.

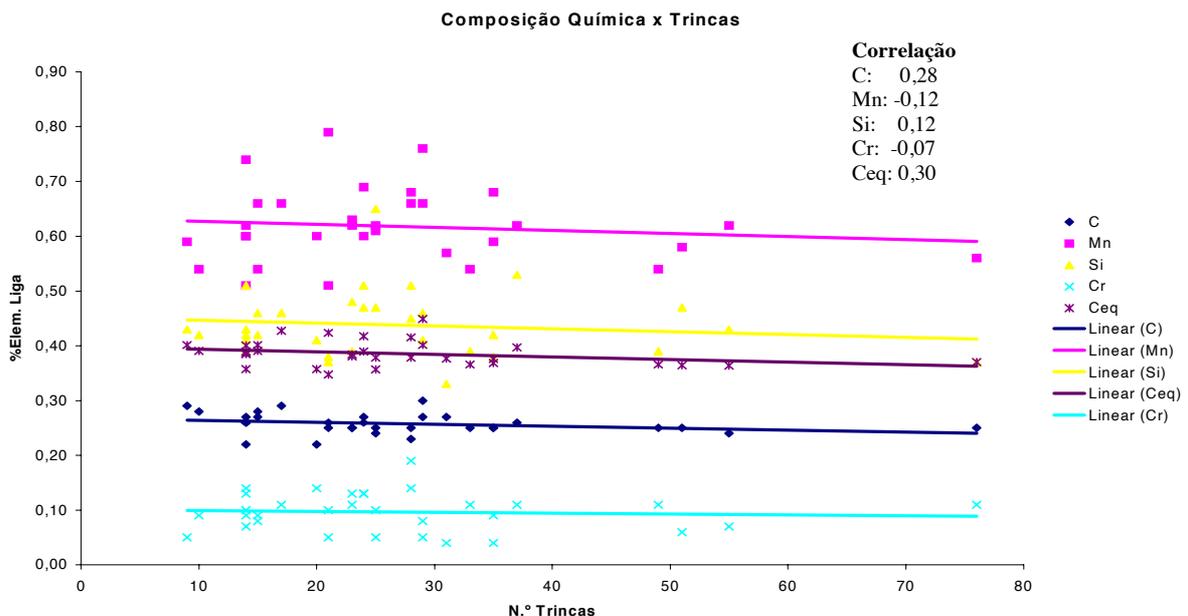


Figura 4. Composição química versus número de trincas (I). Ceq segundo Norma Caterpillar 1E38.

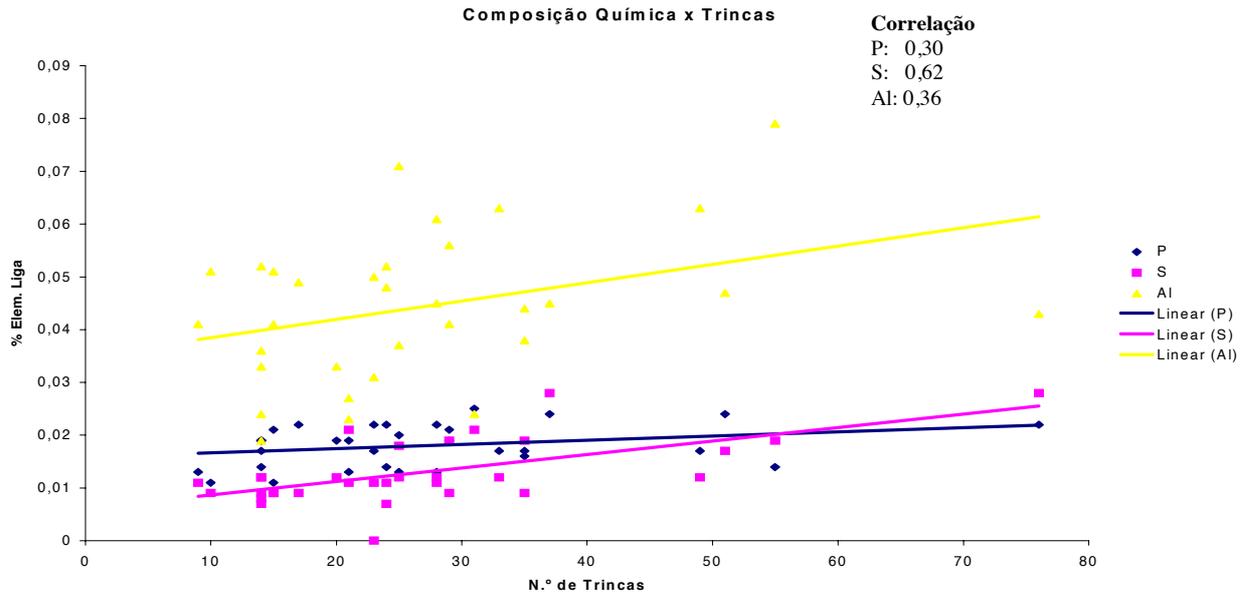


Figura 5. *Composição química versus número de trincas (II).*

3.4. Avaliação do Efeito da Temperatura de Vazamento

A Figura 6 indica o número de trincas nas peças em função da temperatura de vazamento. Estes dados foram colhidos numa amostra de 33 peças e, mais uma vez, as observações foram feitas de forma simplificada, partindo do princípio que outras variações não interagem.

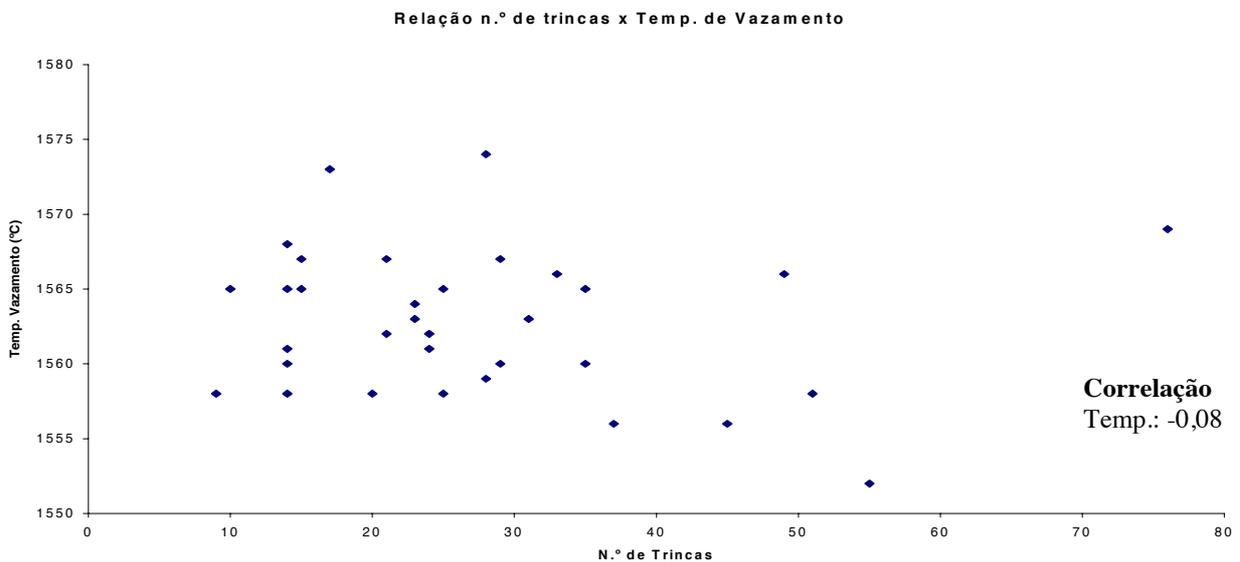


Figura 6. *Temperatura de Vazamento x número de trincas.*

3.5. Avaliação do Efeito do Tempo de Vazamento

Como método para inferir sobre a influência do tempo de vazamento na formação de trincas de solidificação foi plotado um gráfico de tempo de vazamento *versus* número de trincas nas peças, conforme mostrado na Figura 7. Os pontos indicam amostra de peças examinadas por partículas magnéticas.

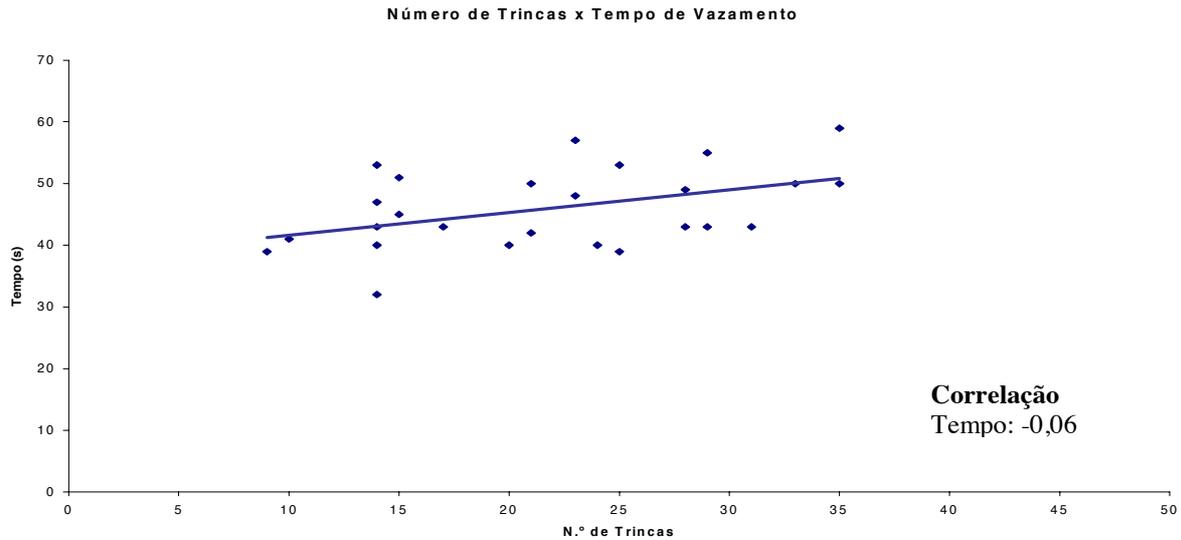


Figura 7. Gráfico relacionando número de trincas e tempo de vazamento para várias peças.

3.6. Avaliação do Efeito da Resistência da Areia

Utiliza-se no processo de fabricação desta peça, fenólico uretânico, 0,56% em peso de resina fenólica e 0,51% em peso de um líquido poliisocianato, comumente chamados de Parte I e Parte II, respectivamente. Com o objetivo de diminuir esta resistência, foi proposta uma quantidade menor desta resina, sendo Parte I 0,51% e Parte II 0,46%, respeitando a relação de desbalanceamento e a resistência mínima exigida.

A Figura 8 mostra a resistência a tração da areia para ambos os casos em função do tempo. As linhas A e B indicam, para um tempo médio de vazamento desta peça de 12 horas, a resistência encontrada para os dois casos.

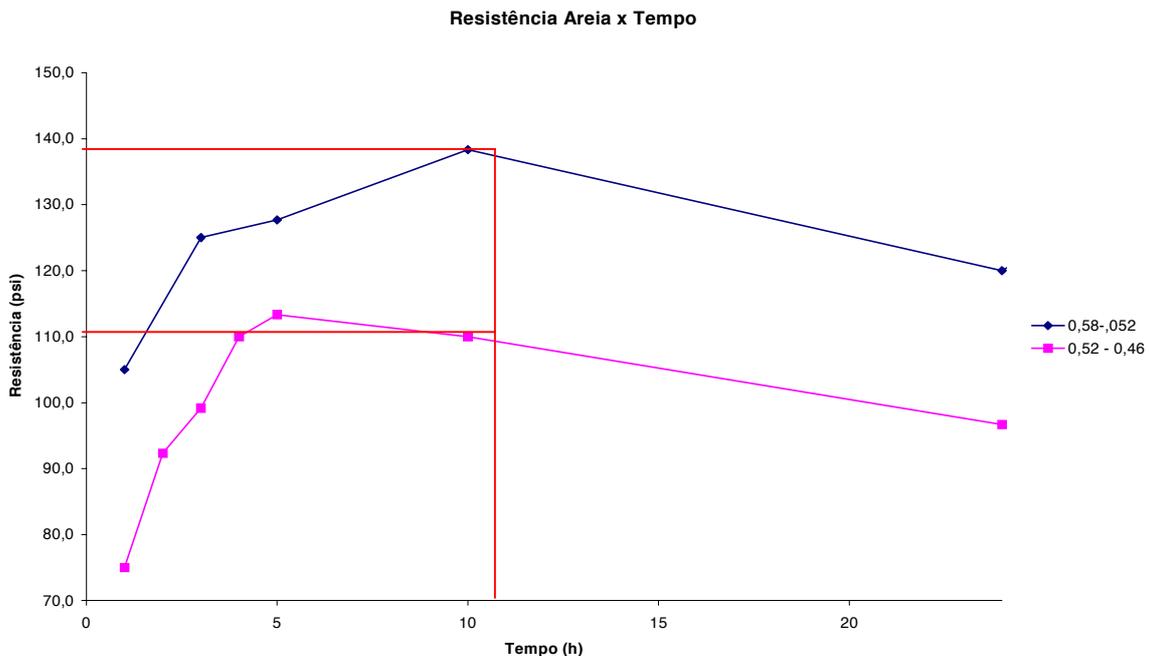


Figura 8. Resistência a tração x tempo. Linhas A e B indicam a resistência a tração para um tempo médio para vazamento de 12 horas.

3.7. Projeto de Alimentação

Notou-se que as regiões com maior índice de trincas são regiões alimentadas e, por consequência, solidificam-se por último, tornando-as locais favoráveis à segregação. Além disto, há naqueles locais diferenças bruscas de espessuras de parede, o que concorre para um aumento no número de trincas. De tal forma que, baseado na baixa eficiência dos alimentadores e em cálculos de transmissão de calor, alimentação de fundidos e tensões geradas na contração do metal, foram retirados aproximadamente 180Kg relativos a alimentadores, foram utilizados resfriadores em regiões super aquecidas e foram colocadas nervuras nas regiões com diferenças de espessura.

4. Resultados e Discussões

A Figura 9 compara, para um plano específico, a ocorrência de trincas no processo normal de produção com as peças experimentadas. Esta experiência reúne as modificações no projeto de alimentação da peça, juntamente com a diminuição na resistência a tração da areia, fixando composição química, tempo e temperatura de vazamento indicadas na Tabela 1.

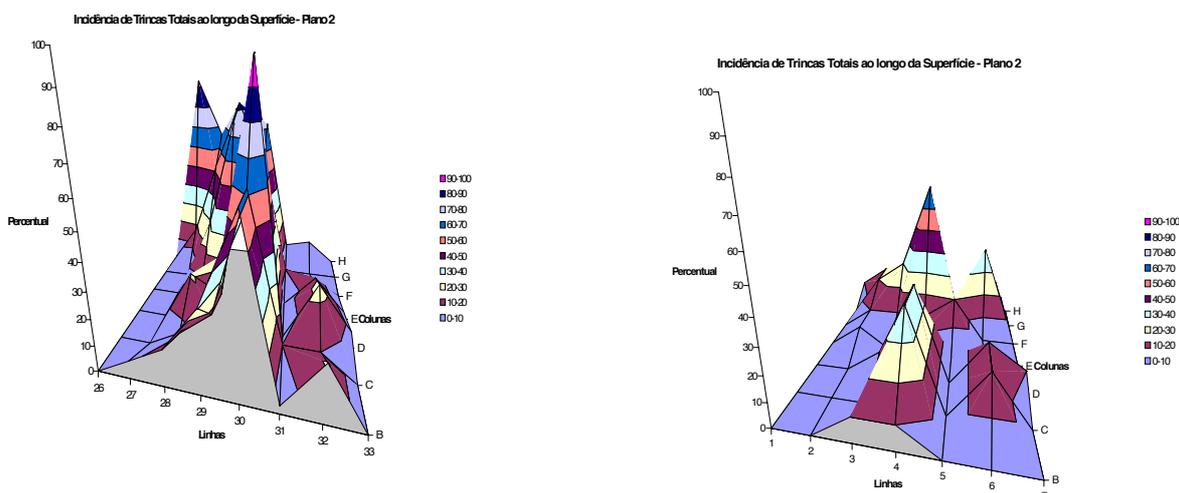


Figura 9. Gráfico comparativo entre o processo normal de produção e as peças experimentadas. O eixo horizontal indica a incidência percentual de trincas e os eixos horizontais indicam um plano específico da peça.

Fixação das outras variáveis

Peças	C	S	AI	P	Tempo (s)	Temperatura (°C)
1	0.26	0.020	0.048	0.022	38	1564
2	0.28	0.015	0.047	0.013	48	1561
3	0.25	0.008	0.025	0.015	27	1565
4	0.27	0.010	0.022	0.013	32	1565
5	0.27	0.009	0.021	0.023	33	1567

Tabela 1. Fixação das variáveis estudadas

Como pôde-se notar na figura 9, houve uma redução acentuada no número de trincas, permitindo produzir a peça dentro de um padrão de qualidade compatível com os níveis inicialmente propostos pela empresa.

5. Conclusões

Para os experimentos e análises estatísticas realizados, pôde-se tirar as seguintes conclusões:

1. As trincas estudadas não foram originadas no processo de tratamento térmico sofrido pela peça;
2. As regiões de surgimento das trincas não são aleatórias, sendo mais intensas em locais com grandes diferenças de espessura e regiões onde se utilizam alimentadores. A incidência destas trincas diminui progressivamente de acordo com que se afasta destas regiões;
3. Embora tenha sido feita uma análise estatística simplificada correlacionando a composição química do aço e o número de trincas na peça, é possível que os teores de alumínio, enxofre, fósforo, carbono e o carbono equivalente influenciem no surgimento destas trincas. Porém, quanto ao coeficiente de correlação, com exceção do enxofre, cujo resultado apresentou moderada correlação, todos os outros apresentaram-na baixa;
4. As variações de processo avaliadas relativas ao tempo e temperatura de vazamento não têm relação com a ocorrência de trincas;
5. A modificação proposta para novos percentuais de resina não afetaram as especificações, além de diminuir o custo da produção dos machos;
6. Embora se trate de apenas 5 peças experimentadas, pôde-se notar, nestas peças, um decréscimo aproximado de 35% no número total de trincas em relação às peças normalmente produzidas, além uma melhoria no rendimento metálico face ao melhor direcionamento da solidificação.

6. Referência Bibliográfica

- [1] FERNANDES, Deilon Lopes. SENAI/CETEF. Areias de fundição aglomeradas com ligantes químicos. Itáúna. 1997.
- [2] FINARDI, Jorge. ABM. Trincas de Solidificação em Aços Fundidos: Causas e Soluções. São Paulo. 1980.
- [3] FLINN, RICHARD A. Addison-Wesley Publishing Company. Fundamentals of Metal Casting. Michigan. 1963.
- [4] MAEHARA, Yukinobu. ELF. Padrões de Fabricação para Aços Fundidos. v. 1. São Paulo. 1989.
- [5] OHNO, Atsumi. Solidificação dos Metais. 1. Ed. São Paulo:LCTE, 1988. Tradução de: Paulo da Silva Pontes, Nivaldo Lemos Cupini. Solidification of Metals.
- [6] WLODAWER, R. Pergamon Press. Directional Solidification of Steel Castings. Winterthur/Switzerland. 1966.

THE INFLUENCE OF PROCESS VARIABLE IN THE OCURRENCE OF HOT TEARS IN STEEL CASTING⁽¹⁾

**Eduardo Monteiro de Castro⁽²⁾
Luiz Henrique Dias Alves⁽³⁾**

ABSTRACT

This paper has studed and developed rules to reduce hot tears in steel castings. However, this problem is involving in all steps of the casting's manufacturing, in other words, each production phase can be responsible for rising up hot tears, since the scrap's choice, passing to the melting process, until the shake out of the solid piece. Therefore, it was done a detailed study of each production phase, as well as, tests in order to modify the casting's project reducing high heating in critical areas.

Besides reducing the hot tears medium number, also it was observed improvements in the metallic output and in the inputs. The metodology used was enough and it seems that was confirmed.

Key Words: steel; tears; solidification

(1) V Foundry Seminar – MAY, 17 to 19, 2004. Salvador-BA

(2) Metallurgical Engineering-UFF. Amsted-Maxion Process Engineering

(3) Metallurgical Engineering-UFF. Master Degree in Mechanical Engeneering-USP. Supervisor of Mold and Finising Departments of Amsted-Maxion.