

## Estudo da viabilidade de produção de novas ligas de ferro fundido hipoeutético para tixoconformação

D. M. Benati\*, L. V. Torres, E. J. Zoqui

Faculdade de Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia de Fabricação  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Rua Mendeleev 200, CEP 13083-860, Caixa Postal 6122, Campinas – SP

(Recebido em 14/11/2012; revisado em 20/08/2013; aceito em 29/08/2013)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

### Resumo:

Trabalhos recentes da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP apontaram resultados promissores na aplicação de ferros fundidos hipoeutéticos como matéria-prima em processos de tixoconformação. Contudo, identificou-se o surgimento de uma camada de óxido ao redor do material que pode, se incorporada à peça tixoconformada, impactar no comportamento mecânico do produto. Adições de cromo poderão minimizar este efeito, além de promover uma clara melhoria das propriedades mecânicas. Este trabalho descreve o projeto e produção de ferros fundidos hipoeutéticos modificados ao cromo, com composição Fe-2,5%C-X%Cr-1,5%Si para teores de cromo de 2,5, 5,0 e 7,0%.

**Palavras-chave:** Ferros fundidos hipoeutéticos; material semi-sólido; tixoconformação.

### Abstract:

Thixoforming Laboratory of State University of Campinas in a recent paper pointed to promising results applying hypoeutectic cast iron as raw material for thixoforming processes. These results, however, showed the presence of a thick oxide layer around the material under processing at high temperatures which, if incorporated into final product, impact negatively on its mechanical properties. Adding chromium to these alloys can minimize or avoid this negative effect and also promote significant improves on its mechanical properties. This work describes the project and production of hypoeutectic cast iron alloyed to chromium with chemical composition of Fe-2.5wt%C-Xwt%Cr-1.5wt%Si for 2.5, 5.0 and 7.0wt% of Cr.

**Keywords:** Hypoeutectic cast iron; semi-solid material; thixoforming.

## 1. Introdução

A tixoconformação é uma técnica de processamento de materiais no estado semi-sólido que permite a produção de peças com geometrias *near net shape* e melhores propriedades mecânicas com razoável redução no custo final de produção, quando comparada aos tradicionais métodos de fundição e conformação plástica [1]. Dentro das várias possibilidades de materiais passíveis de trabalho, as ligas alumínio-silício são as mais utilizadas, servindo a diversos segmentos industriais. Poucos são os trabalhos focados às ligas ferrosas. Como os ferros fundidos representam mais de 60% do mercado de peças fundidas e a tixoconformação é uma técnica de produção que pode substituir ou melhorar a fundição convencional, desenvolver matérias-primas ferrosas para estas aplicações é de fundamental importância para disseminar esta tecnologia.

Em recente trabalho desenvolvido pelo Laboratório de Tixoconformação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP [2] pesquisou-se a viabilidade da produção de ferros fundidos hipoeutéticos para aplicações em tixoconformação, obtendo-se excelentes resultados. Neste trabalho, mapeou-se o comportamento morfológico e reológico da liga Fe-2,6%C-1,5%Si, (carbono equivalente de 3,1%) às temperaturas de 1160 e 1180°C. O comportamento morfológico mostrou-se bastante promissor uma vez que não houve alteração significativa à alta temperatura, indicando estabilidade de processo. O trabalho revelou também que as tensões necessárias à conformação plástica, bem como a viscosidade aparente, foram consideravelmente baixas, similares às encontradas para ligas Al-Si-Cu-Mg também desenvolvidas pelo grupo de pesquisa [3].

Neste projeto, contudo, identificou-se o surgimento de uma camada espessa de óxido ao redor do material em processamento que pode, se incorporada à peça

\*Email: [dmbenati@fem.unicamp.br](mailto:dmbenati@fem.unicamp.br) (D. M. Benati)

tixoconformada, causar descontinuidades impactando no comportamento mecânico final do produto. A incorporação de cromo poderá minimizar este efeito, porém a principal vantagem é a melhoria das características mecânicas. De maneira geral, adições de cromo tem três propósitos majoritários: formar carbonetos, aumentar resistência à corrosão do material e estabilizar a estrutura para aplicações em altas temperaturas. O cromo tem influência sobre a fineza e a dureza da perlita e tende a aumentar a quantidade e a dureza dos carbonetos eutéticos. Para menores teores de cromo, carbonetos  $M_3C$  formam a matriz; um maior teor provoca uma mudança no padrão de solidificação para uma estrutura na qual os carbonetos  $M_7C_3$  estão cercados por uma matriz austenítica ou por seus produtos de transformação. Devido às características de solidificação, ferros fundidos hipoeutéticos contendo  $M_7C_3$  são comumente mais resistentes do que ferros contendo  $M_3C$  [4].

## 2. Projeto de novas ligas Fe-2,5%C-X%Cr-1,5%Si

Os ferros fundidos empregados nesta pesquisa foram projetados através do software de simulação Thermo-Calc com o objetivo de atingir uma composição química que forneça cerca de 50% de líquido logo após a fusão da fase eutética, ou seja, composições com carbono equivalente de cerca de 3,0% – com esta premissa, obtem-se ligas aplicáveis para tixoconformação em temperaturas imediatamente superiores à eutética já com teor de líquido de 50%, ou seja, com fração líquida suficiente para a maior parte dos processamentos no estado semi-sólido. A Figura 1 mostra o provável diagrama de fases para estes ferros fundidos, considerando teores fixos de carbono e silício, 2,5% e 1,5% respectivamente, com o cromo variando desde 0 até 7%, de modo que seja possível avaliar todas as zonas de solidificação para todos os ferros fundidos propostos neste estudo. A faixa de tixoconformação ideal para estes ferros fundidos estaria, então, representada pela zona rosa ( $L + \gamma$ ) do diagrama, e iria até cerca de 1300°C.

## 3. Materiais e Métodos

Uma vez concebidas as ligas e conhecidos seus diagramas de transformação de fases, avança-se às etapas de produção e caracterização do material bruto de fusão, bem como caracterização das temperaturas de trabalho em função das temperaturas *solidus* e *liquidus* das ligas. As ligas Fe-C-Cr-Si estudadas neste trabalho foram fabricadas e doadas pela empresa IMBIL – Indústria e Manutenção de Bombas ITA Ltda.

Para as simulações com o software Thermo-Calc foram utilizadas as composições químicas reais de cada uma das ligas estudadas, e foram obtidas, como saída do programa, as curvas de fração líquida *versus* temperatura para cada uma das ligas. Nestas simulações, o software empregou uma rotina de

cálculos avaliando condições de solidificação fora do equilíbrio, tomando como base o modelo de Scheil.

Foi avaliada a microestrutura das ligas na sua forma bruta de fusão. As análises microestruturais foram precedidas de preparação metalográfica convencional, lixamento até grão 1500 e polimento com pasta de diamante até 1µm, seguidas de ataque químico com o reagente nital (que corresponde a uma mistura de álcool etílico mais ácido nítrico) na concentração 1%. As microestruturas foram avaliadas com microscopia óptica.

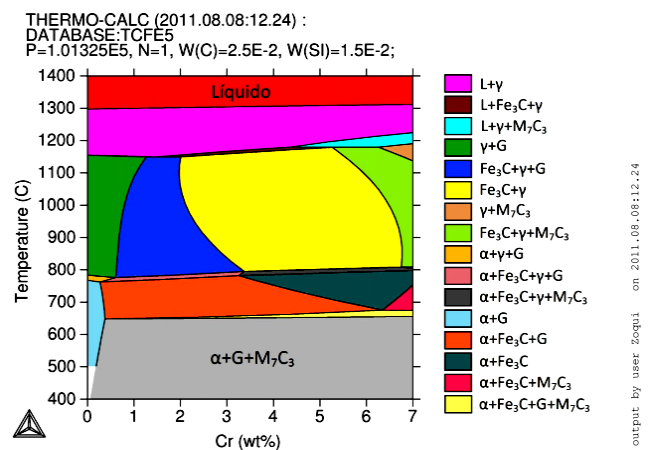


Figura 1. Diagrama de fases para as ligas Fe-2,5%C-X%Cr-1,5%Si mostrando corte para 2,5%C e 1,5%Si

## 4. Resultados e Discussão

Análises de composição química utilizando a técnica de combustão para avaliação de C e S e espectroscopia de emissão óptica por centelha para análise dos demais componentes validaram o projeto inicial das ligas propostas, conforme mostra a Tabela 1. Todas as ligas apresentaram composição dentro do esperado (com variações menores que 2% para o C, da ordem de 20% para o Si, e da ordem de 5% para o Cr em relação às composições alvo). O carbono equivalente apresentou valores da ordem de 3% (com variações menores que 5%), de acordo com os requisitos do projeto.

Tabela 1. Composição química das ligas. Fe em balanço

Liga	Elemento (%)				
	C	Si	Cr	Mn	C <sub>eq</sub> *
2,5%Cr	2,55	1,89	2,82	0,30	3,19
5,0%Cr	2,55	1,29	4,75	0,27	2,99
7,0%Cr	2,52	1,75	7,24	0,33	3,12

\*Carbono equivalente = %C + 1/3%Si

A análise microestrutural mostrou, de acordo com a previsão do diagrama de fases da Figura 1, uma microestrutura com ausência de grafita livre, conforme mostra a Figura 2a e 2b para as ligas contendo 2,5%Cr e 7,0%Cr e, por conseguinte, também para a liga com 5,0%Cr. Já as Figuras 2c e 2d mostram a microestrutura da liga contendo 5,0%Cr, evidenciando uma matriz perlítica muito fina com cementita e ledeburita ao longo dos contornos de grão

dendríticos, com colônias de eutético chegando a tamanhos da ordem de 300 $\mu$ m, conforme se vê na Figura 2d.

As demais composições ligadas ao cromo apresentaram, de modo análogo, estrutura eutética rica em cementita e ledeburita, em detrimento de grafita livre, como resultado da ação inibidora do cromo na precipitação de grafita com consequente formação de carbonetos  $M_7C_3$  e  $M_3C$ .

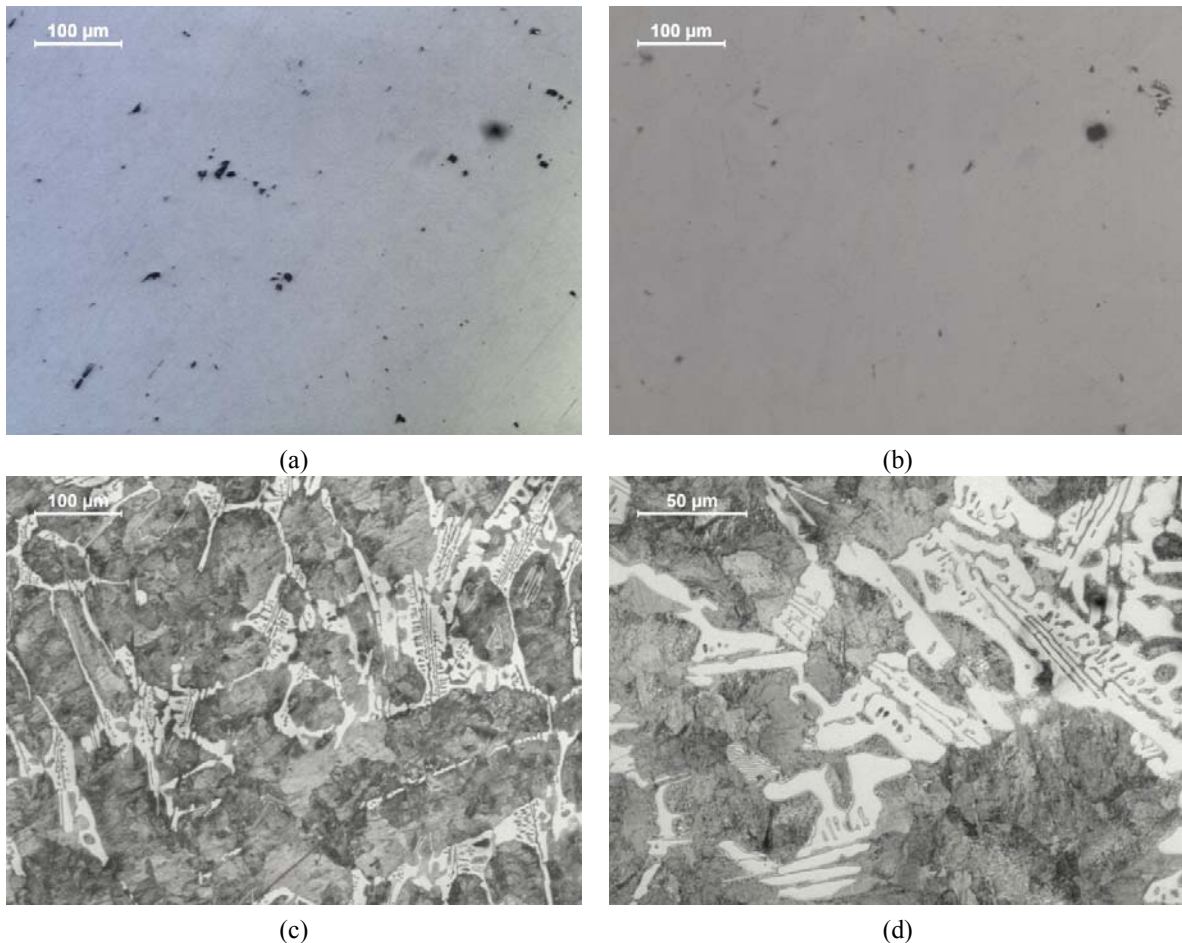


Figura 2. Microestruturas encontrada para as ligas: a) e b) contendo 2,5%Cr e 7,0%Cr, respectivamente, mostrando ausência de grafita livre na matriz; c) e d) contendo 5,0%Cr mostrando matriz perlítica e placas de cementita e ledeburita nos contornos interdendríticos

Foram construídas, com auxílio do software Thermo-Calc, curvas de fração líquida por temperatura para as três ligas propostas, como pode ser visto na Figura 3, com intuito de mapear as zonas de transformação de fases e, por conseguinte, as possíveis janelas para o processamento destes materiais no estado semi-sólido.

Com premissa nos três critérios termodinâmicos para avaliação da tixotrocoformabilidade de ligas Al-Si estabelecidos por Liu *et. al.* [5], Roca *et. al.* [2] determinaram novos patamares considerando diversas particularidades dos

ferros fundidos hipoeutéticos. De acordo com tais hipóteses adaptadas:

1º) O maior “joelho”, ou última inflexão da curva deve estar compreendido entre 40 e 60% de fração líquida;

2º) A sensibilidade, traduzida como a derivada da curva no ponto de interesse (no caso 1160 e 1180 $^{\circ}$ C) deve ser menor que 0,030 $^{\circ}$ C $^{-1}$ ;

3º) O intervalo de solidificação não deve ser maior que 130 $^{\circ}$ C.

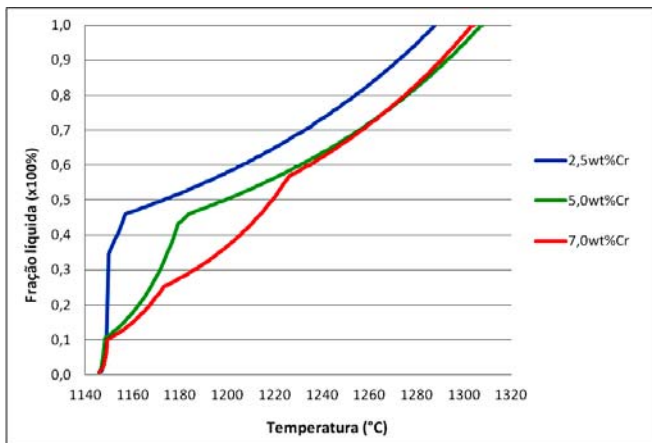


Figura 3. Curvas de fração líquida *versus* temperatura para as ligas avaliadas

Conforme mostra a literatura [2,5], tais critérios obedecidos simultaneamente tendem a garantir melhor controle da fase líquida durante o reaquecimento e maior controle microestrutural durante o processamento no estado semi-sólido, maximizando assim a robustez e desempenho das ligas no processo de tixoconformação.

Em relação ao terceiro critério, para intervalos de solidificação muito grandes (no caso maiores que 130°C), há relatos na literatura de ligas com tendência de apresentar trinca a quente [5]; assim sendo, a concordância com este critério evita tal ocorrência.

Com auxílio das informações extraídas das Figuras 1 e 3, a Tabela 2 apresenta os parâmetros encontrados para as três ligas propostas, de acordo com as premissas apresentadas para avaliação da tixoconformabilidade. Todas as ligas avaliadas neste trabalho apresentaram parâmetros dentro de padrões adequados para aplicação em processos de tixoconformação.

Tabela 2. Critérios para avaliação termodinâmica da tixoconformabilidade

	Critério Roca <i>et. al.</i> [2]	Liga	Parâmetro
Posição do “joelho”, ou inflexão mais alta da curva $f_L \times T^*$	Entre 0,40 – 0,60%	2,5%Cr	0,47%
		5,0%Cr	0,45%
		7,0%Cr	0,56%
Sensibilidade ( $df_L/dT$ )*	Para 1160°C: <0,030°C <sup>-1</sup>	2,5%Cr	0,003°C <sup>-1</sup>
		5,0%Cr	0,013°C <sup>-1</sup>
		7,0%Cr	0,006°C <sup>-1</sup>
Sensibilidade ( $df_L/dT$ )*	Para 1180°C: <0,030°C <sup>-1</sup>	2,5%Cr	0,004°C <sup>-1</sup>
		5,0%Cr	0,005°C <sup>-1</sup>
		7,0%Cr	0,005°C <sup>-1</sup>
Intervalo de solidificação	< 130°C	2,5%Cr	120°C
		5,0%Cr	110°C
		7,0%Cr	80°C

\* $f_L$  = fração líquida, T = temperatura

#### 4. Conclusões

As principais conclusões deste trabalho foram:

- É possível prever e projetar novas ligas tixoconformáveis com auxílio do software Thermo-Calc. Um processo de produção cuidadoso é capaz de fornecer as composições químicas alvo definidas;
- As microestruturas das ligas, conforme previsto pelo diagrama de fases, apresentaram uma matriz perlítica muito fina com fase eutética composta de cementita e ledeburita;
- A avaliação termodinâmica realizada através de curvas de fração líquida por temperatura obtidas com auxílio do software Thermo-Calc mostrou que todas as ligas propostas

apresentaram um potencial de tixoconformabilidade promissor.

#### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a FAPESP pelo suporte financeiro através dos processos 2011/19997-0 e 2009/08478-1 e a IMBIL – Indústria e Manutenção de Bombas ITA Ltda. pela fabricação e doação das ligas estudadas.

## Referências

- [1] Flemings, M. C., Riek, R. G., Young, K. P. Rheocasting Processes. AFS International Cast Metals Journal, v. 1, p. 11-22, 1976.
- [2] Roca, A. S., Fals, H. D. C., Pedron, J. A., Zoqui, E. J. Thixoformability of Hypoeutectic Gray Cast Iron. Journal of Materials Processing Technology, v. 212, p. 1225-1235, 2012.
- [3] Benati, D. M. Avaliação da Tixoconformabilidade de Ligas Al-Xwt%Si-2,5wt%Cu-0,5wt%Mg. 2008, 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP/FEM/DEF, Campinas, São Paulo.
- [4] Gundlach, R. B., Doane, D. V. Alloy Cast Irons. In: ASM Handbook, Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys, v. 1, 10<sup>a</sup> ed., ASM International, Ohio, USA, 1990.
- [5] Liu, D., Atkinson, H. V., Jones, H. Thermodynamic Prediction of Thixoformability in Alloys Based on the Al-Si-Cu and Al-Si-Cu-Mg Systems. Acta Materialia, v. 53, p. 3807-3819, 2005.