

ESTUDO SOBRE O EFEITO DA DESSULFURAÇÃO NAS PROPRIEDADES DO AÇO FORJADO FABRICADO EM FORNO A ARCO VOLTAICO¹

*Luis Henrique Torres Dantas*²

*Eric Rafael dos Reis*³

*Thiago Lucas da Silva*⁴

*Leandro Felipe de Sousa*⁴

*Paulo Santos Assis*⁵

Resumo

O trabalho apresenta um estudo sobre o efeito do enxofre na qualidade final dos aços fundidos utilizados para a produção de peças forjadas. Para avaliar a qualidade final do aço, amostras foram submetidas a ensaios mecânicos tais como ensaio de tração, ensaio de dureza e ensaio de impacto além da caracterização química. Foram confeccionados corpos de provas de acordo com as respectivas normas e observado que o teor de enxofre e manganês influenciam diretamente a qualidade do aço, pois interferem na resistência mecânica, tenacidade e ductilidade.

Palavras-chave: Enxofre; Dessulfuração; Inclusões; Ensaios mecânicos.

EVALUATION OF THE EFFECT OF DESSULPHURIZATION IN FORGED STEELS PRODUCED IN AN ELECTRIC ARC FURNACE

Abstract

The paper presents a study on the effect of sulfur in the final quality of molten steel used for the production of forgings. To assess the quality of the final steel, samples were subjected to mechanical tests such as tensile test, hardness test and testing of impact than the chemical characterization. Bodies of evidence were made in accordance with their rules and noted that the sulfur and manganese directly influence the steel quality, therefore interfere with the mechanical strength, toughness and ductility.

Key words: Sulfur; Desulphurization; Inclusions; Mechanical tests.

¹ *Contribuição técnica ao 40º Seminário de Aciaria – Internacional, 24 a 27 de maio de 2009, São Paulo, SP, Brasil.*

² *Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista da Escola de Minas – UFOP.*

³ *Membro da ABM. Mestrando da REDEMAT – UFOP*

⁴ *Membro da ABM. Graduando da Escola de Minas - UFOP*

⁵ *Membro da ABM e da AIST. Professor Titular da Escola de Minas – Prof. da REDEMAT- Prof. Honorário da HUST, Tangshan, China.*

1 INTRODUÇÃO

Os produtos siderúrgicos, ao serem fabricados, apresentam normalmente, além do carbono como principal elemento de liga, uma série de impurezas de natureza metálica ou não, as quais se originam de reações entre as matérias primas empregadas ou de outros tipos de reações.⁽¹⁾

Essas impurezas normais são o fósforo, o enxofre, o manganês, o silício e o alumínio. A maior parte delas reage entre si ou com outros elementos não metálicos como o oxigênio e, eventualmente, o nitrogênio, formando as chamadas “inclusões não-metálicas”. A formação dessas inclusões se dá, em grande parte, na fase final de desoxidação dos aços.⁽¹⁾

Devido à tendência de se produzirem aços com propriedades cada vez melhores, em face das condições de sua aplicação se tornarem cada vez mais severas, o estudo do efeito das inclusões nessas propriedades e o aperfeiçoamento das condições de fabricação, têm concentrado, nos últimos anos, a atenção dos estudiosos na matéria. Na realidade, algumas das inclusões podem até mesmo ser consideradas necessárias ou benéficas devido ao efeito de certo modo positivo que podem acarretar. Mesmo assim, e principalmente quando as condições de serviço provocam o aparecimento de esforços cíclicos e alternados, alguns tipos de inclusões, podem ser prejudiciais, sobretudo quando sua quantidade, forma e dimensões estão além do que se considera aceitável.^(1,2)

O enxofre está contido nas matérias primas de fabricação do ferro e aço, e, portanto, sua presença no fluxo de produção siderúrgica é inevitável. O enxofre é desejável quando se procura fabricar aços de corte fácil para fabricação em série de peças. Existem inclusive aços resulfurados. No entanto na grande maioria dos casos, a obtenção de baixo teor de enxofre é desejável porque este elemento prejudica a isotropia das qualidades mecânicas especialmente a tenacidade.⁽³⁾

1.1 Princípio de Funcionamento do FEA

O processo básico de fabricação do aço em forno elétrico do ponto de vista químico é o processo mais completo e elástico de todos os processos de manufatura do aço. Compreende duas principais fases: a fase oxidante ou de refino e a fase redutora ou de desoxidação.⁽¹⁾

1.1.1 Fase oxidante

A fase oxidante compreende o carregamento, fusão e fervura da liga, até a primeira retirada da escória. De forma esquemática, o carregamento pode ser representado pelas entradas das matérias primas: sucata, calcário ou cal, sucata de retorno e coque. A sucata de aço é a matéria prima mais importante. Sua composição é basicamente 0,2% de carbono, 1,0% de manganês e 0,5% de silício e uma percentagem maior de ferro. O retorno é na verdade uma parte da sucata. Constituída de materiais que por algum motivo tiveram problemas em determinadas partes do processo, dentro da própria empresa. Uma das funções do calcário ou cal é formar a escória que se mantém sobre a liga que está no forno, formando assim uma espécie de película protetora para que a liga não entre em contato com a atmosfera, o que faria com que a liga reagisse com gases como o oxigênio (O₂), nitrogênio (N₂) etc.

1.1.2 Fase redutora

Após a retirada da escória do refino resta um banho no forno (a liga) ainda muito diferente do desejado ao final do processo. O aço em elaboração ainda contém C, Si e Mn em teores diferentes dos exigidos pela especificação; teor de oxigênio maior ou menor que o desejado, dependendo do grau de oxidação verificado durante a fase oxidante; inclusões não-metálicas, principalmente óxidos, silicatos e fosfatos que não tiveram tempo de migrar completamente para escória e em alguns casos teor residual de enxofre (S) maior que o admitido pela especificação.⁽¹⁾ Então, as finalidades desta fase são o ajuste do teor de carbono (recarburação), a desoxidação do banho, o acerto da composição, a eliminação do enxofre do banho e o aquecimento do banho à temperatura do vazamento. A recarburação é realizada utilizando coque granulado e também é possível o emprego de ferro-ligas com elevado teor de carbono. O período redutor favorece a absorção de gases pelo banho (principalmente hidrogênio e nitrogênio). Neste período é necessário evitar a introdução de umidade proveniente de materiais da escória. Convém também, reduzir ao mínimo a abertura das portas do forno e o tempo de manutenção do banho antes do vazamento. Após o vazamento normalmente injeta-se oxigênio na panela para sua limpeza, pois esta acumula restos de liga em seu fundo.

1.2 Influência da Composição Química em Fundidos e Forjados

A presença de quantidades controladas de ferrita em certos aços inoxidáveis aumenta a resistência à corrosão ao trincamento e melhora a soldabilidade. A ferrita ocorre controladamente na maioria dos aços inoxidáveis fundidos para produzir combinações controladas de características. Entretanto, a ferrita inviabiliza a capacidade de deformação plástica a quente sendo desta forma prejudicial nos casos de produtos forjados. A importante classe dos aços endurecíveis por encruamento não é forjada. Estes aços são geralmente as ligas de alto Mn(13%) que se tornam duros à medida que se deformam no trabalho.^(2,3)

1.3 Propriedades Mecânicas em Fundidos e Forjados

As principais propriedades mecânicas de interesse pelos projetistas são: Resistência, Ductilidade e Dureza. Para se determinar as características da peça de um aço fundido tem-se duas questões: Se o componente é feito de uma liga padrão, as características estão informadas na especificação padrão. Se for feito de alguma outra liga os testes padronizados de tração fornecerão os valores. Estes valores serão referentes a direção a qual foi realizado o teste e às medidas tomadas neste sentido. Muitas peças são feitas de produtos laminados como barras ou chapas. O processo de laminação muda às propriedades do metal. A maior vantagem é o aumento da resistência na direção da deformação ou eixo longitudinal. Ambos, laminação e forjamento têm propriedades direcionadas pelo processo de deformação. Entretanto a Tensão Limite de Resistência, o Alongamento Percentual e a Resistência ao Impacto diminuem na direção transversal ao eixo de laminação ou forjamento. Os laminados e forjados são anisotrópicos, isto é, apresentam diferentes valores de propriedades para diferentes direções. No caso de ligas equivalentes, a ductilidade e a resistência ao impacto do aço fundido ficam entre os valores longitudinais e transversais apresentados pelo forjado. No fundido o metal é isotrópico, apresentando propriedades similares em todas as direções. Com respeito

às propriedades, nos forjados, a maior parte das referências, provém de características longitudinais, para se obter características transversais é necessária uma requisição específica.^(2,3)

1.4 Efeito das Inclusões de Sulfetos nas Propriedades dos Aços

As inclusões nos aços podem ocorrer de diversas maneiras que são decorrentes de varias causas, sendo elas ligadas a reações que ocorrem no aço liquido, durante o seu processo de fabricação. As causas mais importantes são precipitação, separação deficiente dos produtos de oxidação e dessulfuração resultantes da adição de desoxidantes e dessulfurantes, formação de escórias nos fornos e nas panelas de vazamento, arrastamento para o metal líquido de produtos de erosão e corrosão do material refratário das paredes dos fornos, panelas ou dos canais de vazamento, adição de produtos como ferro-ligas ou aditivos de fundição, mais difíceis de dissolverem no banho metálico.

Em geral, as inclusões não metálicas podem ser classificadas em dois grupos principais: Endógenas, inclusões devidas às reações que ocorrem durante a elaboração do aço, ou durante sua solidificação, e geradas pela precipitação do enxofre e oxigênio sob a forma de sulfetos, óxidos, silicatos e aluminatos ou Exógenas, inclusões derivadas de fontes externas, como de escória, corrosão ou erosão de refratários das paredes do forno e canais de vazamento etc.^(2,3) O teor máximo de enxofre geralmente aceitável nos aços é de aproximadamente 0,05%. A presença dessa impureza forma inclusões de sulfetos, que são facilmente notadas ao microscópio, que são visíveis mesmo antes de qualquer ataque.⁽³⁾

As inclusões de sulfetos podem apresentar-se micrograficamente de diversas formas, como polígonos, quando se solidificam antes do aço, glóbulos ou disposições arbóreas, quando se formam nos espaços interdendríticos, especialmente nos produtos moldados ricos em S e Mn, sua coloração é cinzenta escura como ardósia, fosca e em geral homogênea.⁽³⁾

O enxofre combina-se com o manganês e com o ferro formando sulfeto de manganês e sulfeto de ferro. O de manganês solidifica-se a cerca de 1.600°C e o de ferro a cerca de 1.000 °C no eutético com o ferro. Como o sulfeto de ferro possui um ponto de fusão muito baixo, em relação ao do aço (o FeS solidifica em torno de 1.000°C), de modo que sua presença nos processos de conformação mecânica a quente, realizados normalmente acima de 1.000°C, confere ao aço a chamada "fragilidade a quente", defeito que deve ser evitado para permitir uma conformação mecânica correta. Nessas condições, faz-se necessária a adição de manganês, pois o enxofre tem maior afinidade por esse elemento do que pelo ferro e o sulfeto de manganês formado, cujo ponto de fusão é em torno de 1.600°C, elimina a fragilidade a quente. Além disso, o MnS forma-se em partículas diminutas, relativamente plásticas, deformando-se e amoldando-se no sentido em que o material é trabalhado.⁽¹⁾

A formação de MnS aumenta a forjabilidade do aço, a temperabilidade, a resistência ao choque e o limite elástico. Contudo, como as outras inclusões, o MnS pode ser prejudicial, principalmente nos aços efervescentes e semi-acalmados onde o teor de oxigênio é mais elevado que o normal. Pode-se ter, então, a formação de inclusões duplex, caracterizadas por serem constituídas de silicatos monofásicos ou óxidos multifásicos possuindo uma camada de sulfeto que pode atingir dimensões maiores que 100 microns. Se tais inclusões se formarem nas proximidades de bolhas, elas dão origem ao defeito chamado "pontos pretos". O aço é, em

consequência, prejudicado quando submetido a operação de dobramento e estiramento a frio. De qualquer modo, pela ação relativamente prejudicial do enxofre, procura-se mante-lo até 0,05% ou pouco mais nos aços-carbono comuns e até 0,025% nos aços-liga especiais.⁽¹⁾

O efeito do enxofre sobre as propriedades mecânicas dos aços é mínimo, quando o teor de carbono é muito baixo, tornando-se mais sensível, no sentido negativo, quando aumenta a quantidade de carbono. As propriedades mais afetadas são a resistência à tração, a ductilidade e a tenacidade.⁽¹⁾

O manganês, além de atuar como agente desulfurante, atua do mesmo modo que o silício e o alumínio, como elemento desoxidante. O manganês que não se combinou com o enxofre ou com o oxigênio pode atuar de duas maneiras: quando o teor de carbono é baixo, ele se dissolve na ferrita, aumentando sua dureza e resistência mecânica.^(3,4)

O processo de elaboração dos aços para fabricação de peças fundidas é normalmente feito em fornos elétricos a arco, na grande maioria dos casos a fusão e a elaboração dos aços, ocorre em regime oxidante. A oxidação é muito energética, sendo feita diretamente por lanças de oxigênio.⁽⁵⁾

O excesso de oxigênio no banho é utilizado como forma de degaseificação, ou seja, geram bolhas de monóxido de carbono, que passam através do banho arrastando outros gases eventualmente dissolvidos (hidrogênio e nitrogênio).^(5,6) Em consequência deste procedimento, a última etapa antes do vazamento, deve ser a retirada deste oxigênio residual, através da desoxidação. A desoxidação é feita geralmente com a adição de alumínio, devido a sua forte capacidade de desoxidação (baixa energia livre para formação do óxido de alumínio: Al_2O_3). Quando os aços fundidos apresentam níveis de alumínio residual da desoxidação em torno de 0,020%, favorecem a formação de inclusões de óxido-sulfetos do tipo II e precipitados em contornos de grãos como eutéticos. O principal efeito destes precipitados contínuos em contornos de grãos é a redução das propriedades mecânicas, particularmente as que envolve ductibilidade.⁽⁷⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando obter as informações das propriedades de aços fundidos e forjados, após dessulfuração, seguirá todo o processo para tais estudos, que diga-se de passagem é inédito. Foi realizado o acompanhamento da fabricação dos aços fundidos e forjados, analisando o teor de enxofre do aço logo após ser lingotado e feita a seleção de dois tipos de aços para os estudos em questão, sendo coletadas amostras em três corridas diferentes, e após será realizado a análise química, para determinação do teor de enxofre. Ambas passarão pelas mesmas análises, as quais serão citadas.

As amostras foram preparadas no laboratório da empresa que produziu os aços, e também houve preparação de outras réplicas que foram preparadas nos laboratórios da Escola de Minas – UFOP. Posteriormente foram realizados vários ensaios mecânicos, bem como feitas caracterizações micro-estruturais utilizando microscopia eletrônica de varredura. Ao todo, gastou-se o equivalente a 8 (meses) para a pesquisa em tela. Diante da dimensão do projeto, nesta etapa apresenta-se apenas os resultados desenvolvidos para aços forjados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Aços Forjados

A Tabela 1 mostra a composição do aço SAE 1025, enquanto as Tabelas 2 e 3 mostram a composição química do aço SAE 1045, com duas composições químicas distintas. Estes resultados foram derivados de análises químicas representativas realizadas nos laboratórios da empresa.

Tabela 1. Composição química do aço I (forjado) (%)

C	Mn	P	S	Si	Al
0,25	0,66	0,028	0,013	0,026	0,033

Tabela 2. Composição química do aço II (forjado) (%)

C	Mn	P	S	Si	Al
0,44	0,79	0,026	0,010	0,016	0,002

Tabela 3. Composição química do aço III (forjado) (%)

C	Mn	P	S	Si	Al
0,46	0,77	0,027	0,016	0,022	0,002

3.2 Análise Metalográfica

As amostras foram lixadas e polidas até ficarem propícias para análise metalográfica. Nital 2% foi utilizado no ataque químico. Segue abaixo nas Figuras 1 e 2 a microestrutura do aço I. Verificou-se a presença de ferrita e perlita fina, esta última em razão do tratamento térmico de normalização.

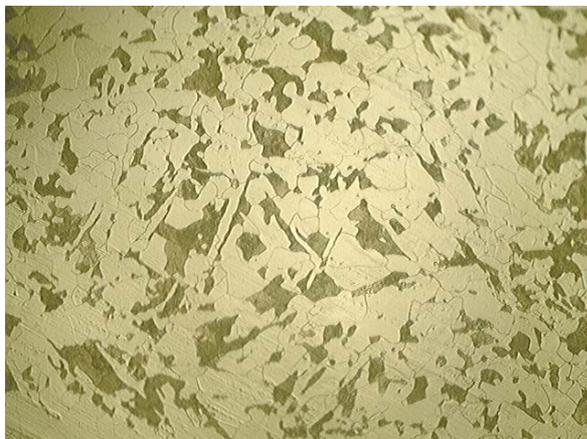


Figura 1. Aço I, ataque Nital 2%. Aumento de 250x. Tratamento térmico de normalização.

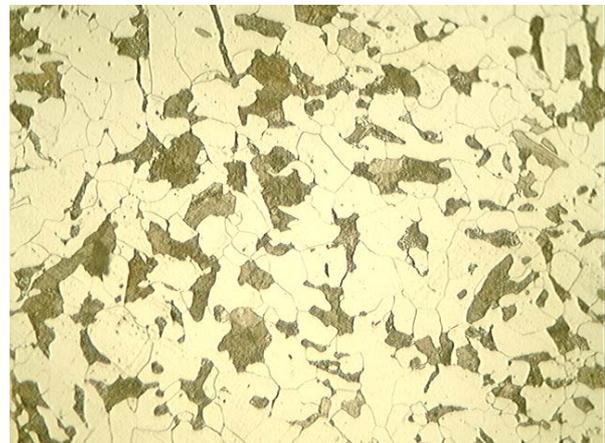


Figura 2. Aço I, ataque Nital 2%. Aumento de 450x. Tratamento térmico de normalização.

Para análise das inclusões de enxofre presentes no aço, utilizou-se o mesmo procedimento, mas sem ataque químico e com o diferencial de polimento com pasta de diamante. As Figuras 3 e 4 ilustram tais inclusões. Verificou-se claramente as inclusões de sulfetos que possuem características peculiares, como coloração

cinzenta escura em forma de glóbulos e elipsoidal. No aço II, encontra-se a mesma estrutura do aço I (SAE 1025), porém a proporção de ferrita e perlita são diferenciadas, encontramos cerca de 50% de cada. Este fato é devido que este aço possui uma porcentagem maior de carbono (SAE 1045).



Figura 3. Aço I, sem ataque Aumento de 250x.



Figura 4. Aço I, sem ataque Aumento de 450x.

O aço III possui a mesma microestrutura dos outros, porém verifica-se uma granulometria grosseira, em virtude de um tratamento térmico a temperaturas demasiadamente altas ou excessivamente demoradas a qual se denomina superaquecimento. Seu limite de escoamento e de resistência não foi muito afetado pelo superaquecimento, porém o alongamento, a estrição e a resistência ao choque foram fortemente diminuídos, ou seja, a granulação grosseira torna o aço menos dúctil, mais quebradiço.

Um aço superaquecido pode ser regenerado, isto é, pode retomar sua granulação normal, mediante tratamento térmico adequado. As Figuras 5 e 6 mostram a microestrutura do aço III.

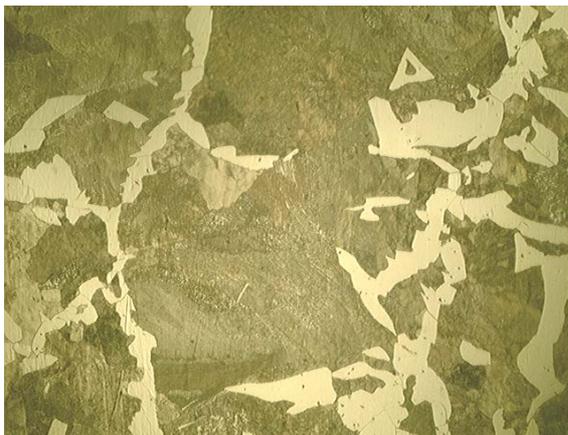


Figura 5. Aço II, ataque Nital 2% Aumento de 450x. Tratamento térmico de normalização.



Figura 6. Aço II, ataque Nital 2%. Aumento de 250x. Tratamento térmico de normalização.

Devido a esse problema de granulometria, este aço não pode ser analisado em função do teor de enxofre, pois essa característica predomina sobre as propriedades mecânicas, ou seja, o enxofre possui uma influência muito menor no

aço. Ou seja a microestrutura deve ser muito mais importante, diante da granulometria da estrutura do aço.

3.3 MEV

No aço I, verificou-se tratar de uma fratura dúctil. Identificou-se na amostra uma grande concentração de inclusões. Na Figura 7, podem-se ver inclusões de sulfetos de Manganês do Tipo II indicadas pelas setas amarelas, a partir de uma imagem feita com um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

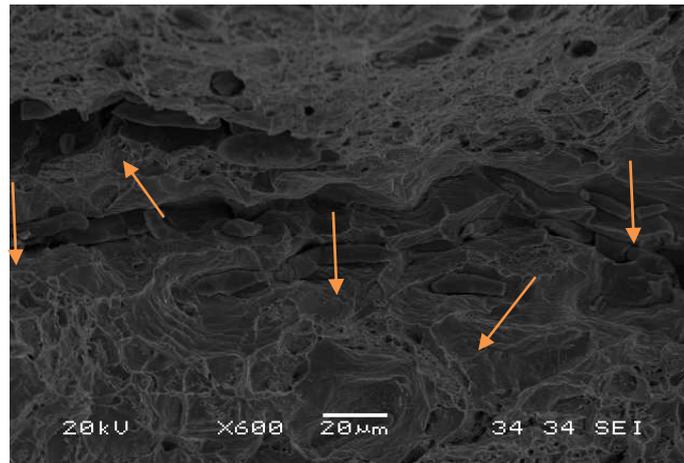


Figura 7. Foto tirada no MEV. Aumento de 600x. Inclusões de sulfetos de manganês tipo II. Aço I

Nas Figuras 8 e 9, verificou-se como é grande o número de inclusões. Não foi possível realizar o EDS para análise química, diante de limitações de tempo para utilização do MEV, posteriormente, em continuação deste trabalho, dever-se-á fazer a identificação de tais inclusões.

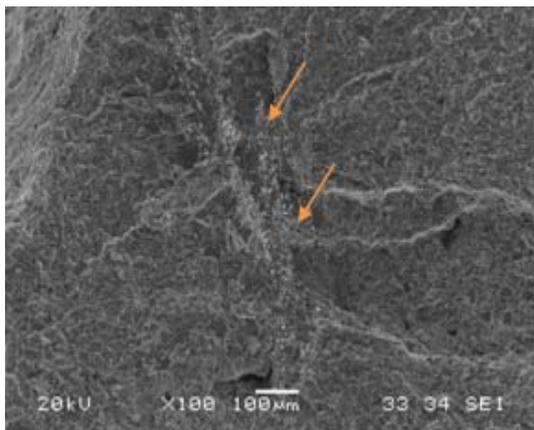


Figura 8. Foto tirada no MEV. Aumento de 100x. Inclusões de sulfetos de manganês tipo II. Aço I

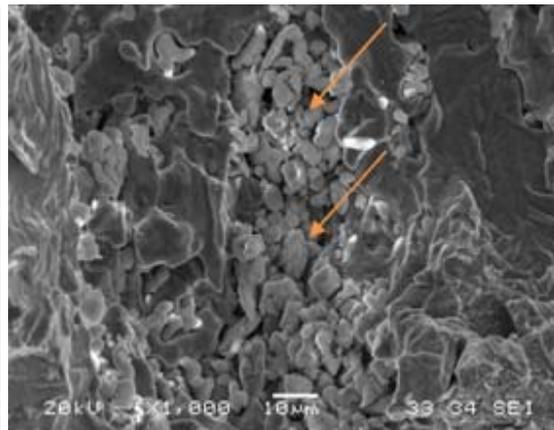


Figura 9. Foto tirada no MEV. Aumento de 1000x. Inclusões de sulfetos de manganês tipo II. Aço I

No aço III, verificou-se tratar de uma fratura frágil, esta se deve à grande granulometria que possui sua estrutura, que torna o aço frágil. Na figura 10 pode-se visualizar algumas inclusões e sua microestrutura.

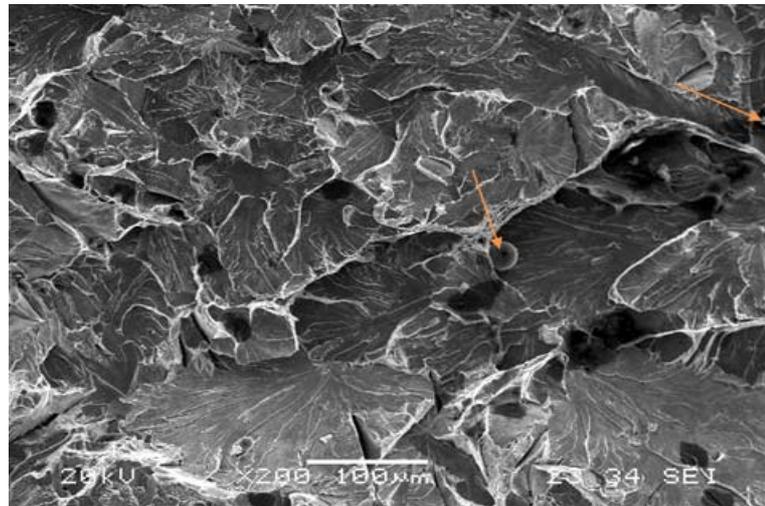


Figura 10. Foto tirada no MEV. Aumento de 200x. Aço III

Verifica-se uma grande quantidade de inclusões nas amostras analisadas. As inclusões de sulfetos promovem no aço uma diminuição na ductibilidade. A perda de ductibilidade é certamente estimulada pela formação de vazios nas interfaces das inclusões, porque, no arrefecimento, o MnS contrai-se mais do que a matriz do ferro e a coesão interfacial é provavelmente insuficiente para impedir a formação de vazios. A resistência a tração e o limite de escoamento também foram afetados, ou seja, diminuídos. A usinabilidade é fortemente melhorada, pode-se verificar pela ótima qualidade do corpo de prova que nos foi cedido.

3.4 Ensaio de Tração

No aço I, realizou-se o ensaio de tração de acordo com a norma ASTM E8M. O corpo de prova pode ser visualizado de acordo com a Figura 11. Neste ensaio o objetivo principal foi identificar o Limite de escoamento, limite de resistência à tração e ainda a estrição.



Figura 11. Corpo de prova utilizado no ensaio de tração

Os resultados obtidos são listados abaixo na Tabela 1, onde nos corpos de prova 1 e 2, são realizados cortes Longitudinais da peça e 3 e 4 cortes transversais.

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos aços médio carbono (0,2 a 0,5 %C), valores encontrados

Corpo de Prova	Limite de resistência a tração (kgf/mm ²)	Limite de Escoamento (kgf/mm ²)	Estricção (%)
1	46,84	24,98	18,88
2	47,47	25,31	18,88
3	46,52	25,59	33,33
4	47,15	23,95	33,33

O limite de escoamento médio (ρ_{ym}) dos corpos de corte longitudinais foi de, $\rho_{ym} = 25,14 \text{ kgf/mm}^2$ e os de corte transversais, $\rho_{ym} = 25,1 \text{ kgf/mm}^2$.

O limite de resistência à tração médio (ρ_{rm}) dos corpos de prova de corte longitudinais foi de $\rho_{rm} = 47,15 \text{ kgf/mm}^2$ e os de corte longitudinal, $\rho_{rm} = 46,83 \text{ kgf/mm}^2$.

A Tabela 2 mostra as propriedades mecânicas dos aços médio carbono segundo Chiaverini (2005), o limite de escoamento dos aços médios carbono (0,2 a 0,5% de carbono), está compreendido entre 20 a 27 kgf/mm^2 . O limite de resistência a tração está compreendido entre 39 a 48 kgf/mm^2 para os aços médios carbono. A estricção fica compreendida entre 52 e 23 %.

Tabela 2. Propriedades Mecânicas dos Aços médio carbono (0,2 a 0,5 %C), valores teóricos⁽²⁾

Propriedade	Aços médio carbono
Limite de Escoamento (kgf/mm ²)	24 a 27
Limite de Resistência a Tração (kgf/mm ²)	46 a 68
Estricção	52 a 23

Comparando-se os resultados desta contribuição com os encontrados na literatura, segundo, vê-se que o limite de resistência do corpo de prova 4 está aquém dos valores de literatura, e que a estricção dos corpos de prova 1 e 2 estão muito aquém daqueles indicados por Chiaverini (2005).

No aço II, onde 1, 2 e 3 são cortes longitudinais e 4, 5 e 6 são cortes transversais, foi verificado os seguintes valores de acordo com a Tabela 3.

O limite de escoamento médio (σ_{ym}) dos corpos de corte longitudinais foi de, $\sigma_{ym} = 66,77 \text{ kgf/mm}^2$ e os de corte transversal, $\sigma_{ym} = 60,52 \text{ kgf/mm}^2$.

O limite de resistência médio (σ_{rm}) dos corpos de prova de corte longitudinais foi de $\sigma_{rm} = 35,45 \text{ kgf/mm}^2$ e os de corte transversal, $\sigma_{rm} = 33,64 \text{ kgf/mm}^2$.

No aço III, foram verificados os seguintes valores de acordo com a tabela 4: o limite de escoamento médio (σ_{ym}) dos corpos de corte longitudinais foi de, $\sigma_{ym} = 72,82 \text{ kgf/mm}^2$. E o limite de resistência $\sigma_{rm} = 36,64 \text{ kgf/mm}^2$.

Tabela 3. Resultados do ensaio de tração realizados no laboratório

Corpo de Prova	Limite de resistência a tração (kgf/mm ²)	Limite de Escoamento (kgf/mm ²)	Estricção (%)
1	67,82	35,62	22,22
2	66,49	37,72	22,22
3	66,01	33,01	28,88
4	63,24	32,24	33,25
5	62,35	35,47	33,25
6	64,25	33,22	30,01

Tabela 4. Resultados do ensaio de tração realizados no laboratório. Aço III

Corpo de Prova	Limite de resistência a tração (kgf/mm ²)	Limite de Escoamento (kgf/mm ²)	Estricção (%)
1	69,94	35,97	5,0
2	75,31	37,69	4,7
3	73,21	36,24	4,9

3.5 Ensaio de Dureza

Realizou-se o ensaio de dureza para os aços em tela. Seguem abaixo os resultados obtidos, de acordo com o gráfico da Figura 12.

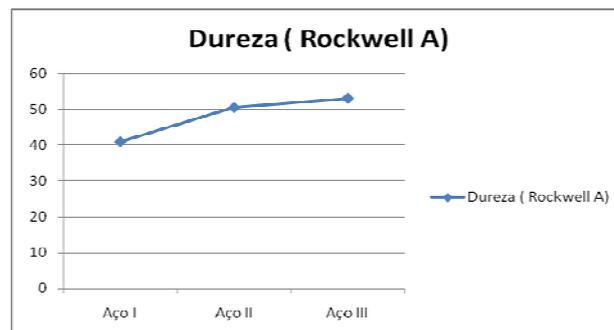


Figura 12. Análise da dureza dos aços (Rockwell A)

O aço I por ter uma menor quantidade de carbono possui uma menor dureza. O aço II e o aço III possuem praticamente a mesma dureza, pois se encontram a mesma faixa de carbono e o mesmo tratamento térmico.

3.6 Ensaio de Impacto

O Ensaio de impacto visou analisar a energia absorvida para cada tipo de aço, conforme visualizado na Figura 13, ou seja, a sua capacidade de deformação plástica. Seguem abaixo os resultados para os três tipos de aços selecionados. Como esperado, os aços tiveram um desempenho muito baixo, eles absorveram uma quantidade muito pequena de energia. A perda de ductilidade é certamente estimulada pela formação de vazios nas interfaces das inclusões, porque, no resfriamento, o MnS contrai-se mais do que a matriz do ferro e a coesão interfacial é provavelmente insuficiente para impedir a formação de vazios.

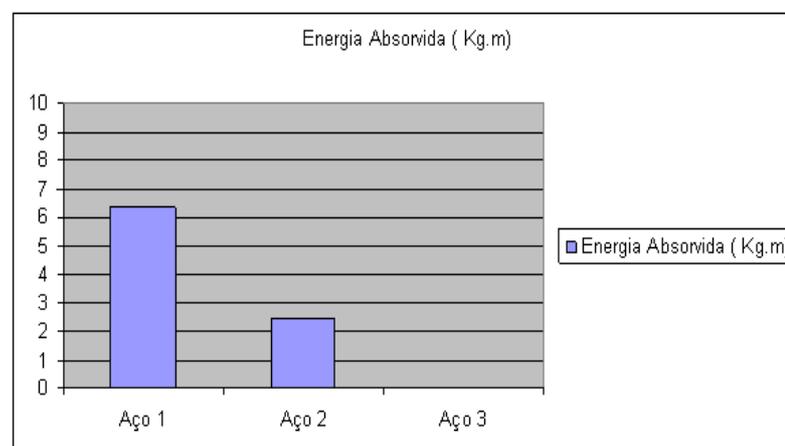


Figura 13. Análise da energia absorvida pelos aços, ensaio Charpy (kg.m)

O resultado desse trabalho mostrou que as alterações nas propriedades do aço forjado, comparado com a literatura, foram devidos ao tratamento térmico que produziu um material de grande granulometria e ainda ao grande número de inclusões presentes, como pode ser observado nas fotos do MEV. Assim, demonstrou-se que esses fatores alteram de forma significativa as propriedades do aço.

6 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados encontrados provou-se que o tamanho de grão mostrou-se mais influente nos resultados dos ensaios realizados do que a presença de inclusões de sulfetos de manganês.

No ensaio de impacto, verificou-se uma diminuição da ductilidade. Essa perda é certamente estimulada pela formação de vazios nas interfaces das inclusões, porque, no arrefecimento, o MnS contrai-se mais do que a matriz do ferro e a coesão interfacial é provavelmente insuficiente para impedir a formação de vazios.

No ensaio de dureza verifica-se que o teor de carbono foi determinante na medição da dureza. O teor de enxofre encontrado nos aços não teve influência significativa na determinação da mesma.

No ensaio de tração verifica-se que o enxofre alterou fortemente a estricção de forma negativa, de acordo com dados de literatura.

Agradecimentos

Agradecimentos aos funcionários do laboratório de Metalurgia Mecânica da Escola de Minas - UFOP, a Cia Semeato de Aços, a FAPEMIG, REDEMAT, CAPES pelo apoio aos autores deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 CHIAVERINI, V. *Aços e ferros fundidos*. 6. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1990.
- 2 CHIAVERINI, V. *Aços e ferros fundidos*. 7. ed. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. p. 209.
- 3 COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1974.
- 4 Companhia Semeato de Aços. Disponível em: <<http://www.csa.ind.br/br/empresa.php>>. Acesso em: 1 jan. 2008.
- 5 Centro de Informação Metal Mecânica. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br>>. Acesso em: 23 dez. 2007.
- 6 FINARD, J. Refino e desoxidação de aço destinado a peças fundidas. In: CONAF 93, 1993. São Paulo, SP: Abifa, 1993. p. 249-259
- 7 Finardi, J. Defeitos superficiais em aços fundidos. *Fundição e Matérias-primas*, v. 1, n. 7, p. 17-24, maio 1979.
- 8 Portal Tecnológico CIMM. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico>. Acesso em: 15 ago. 2008
- 9 Centro de Informações Metal Mecânica <http://www.cimm.com.br/portal/cimm/iframe/?pagina=/cimm/construtordepagin/htm/3_24_6896.htm>. Acesso em: 16 ago 2008.