

## **ESTUDO AVALIATIVO DA TENACIDADE AO IMPACTO DE UM AÇO SAE 1644 SUBMETIDO A TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO.**

S. A. Lopes<sup>1</sup>, D. A. Coimbra<sup>1</sup>, M. R. de Almeida<sup>1</sup>, W. C. Oliveira<sup>1</sup>, H. M. Santos<sup>1</sup>, P.

B. C. Moreira<sup>1</sup>, P. C. R. Filho<sup>1</sup>, E. Fagury Neto<sup>1</sup>, M. P. A. Mafra<sup>1</sup>

Fl. 17, Qd. 04, Lt. Especial, Marabá, PA, 68505-080, Brasil.

samaralvess@hotmail.com

<sup>1</sup>Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará

### **RESUMO**

*Este trabalho faz um estudo sobre a tenacidade do aço SAE 1644, após ser submetido a tratamentos termoquímicos de cementação, e tratamento térmico pós cementação (têmpera e revenido), com temperatura fixa e tempo variável, foram analisadas 6 (seis) condições diferentes de pós-tratamento termoquímico. Para as análises experimentais, foram confeccionados 15 corpos de provas para o ensaio de impacto com as dimensões definidas pela norma internacional ASTM E23-94 e 05 amostras de aproximadamente 30 mm de comprimento por 20 mm de largura e 10 mm de espessura, para ensaio de dureza e metalografia. Foram realizadas análises das imagens metalográficas das amostras com tratamento e sem o tratamento termoquímico, para verificar a mudança da microestrutura para posteriormente, avaliar a resistência mecânica através do ensaio de impacto e dureza.*

**Palavras-chave:** *Aço, tratamentos termoquímicos, cementação, tenacidade, ensaio de impacto.*

### **INTRODUÇÃO**

O aço é um dos produtos mais versáteis do mundo, sendo utilizado desde embalagens de alimentos até na fabricação de grandes estruturas da construção civil ou naval. A vasta utilização desse material mundo a fora se deve a sua versatilidade no que se referem as suas propriedades mecânicas, isso aliado ao seu

baixo custo quando comparado a outros materiais metálicos. Há muitos séculos atrás o homem descobriu que com aquecimento e resfriamento podia modificar as propriedades mecânicas de um aço, isto é, torná-los mais duro, mais mole, mais maleável, etc. Mais tarde, descobriu também que a rapidez com que o aço era resfriado e a quantidade de carbono que possuía influía decisivamente nessas modificações <sup>(1)</sup>.

Os tratamentos termoquímicos visam o endurecimento superficial dos aços, pela modificação parcial da sua composição química nas secções que se deseja endurecer. A aplicação de calor em meio apropriado pode levar a essa alteração da composição química do aço até uma profundidade que depende da temperatura de aquecimento e do tempo de permanência a temperatura de tratamento em contato com o meio em questão. A modificação parcial da composição química, seguida geralmente de tratameto térmico apropriado, produz também uma alteração na estrutura do material, resultando, em resumo uma modificação igualmente parcial das propriedades mecânicas <sup>(2)</sup>.

Essa probabilidade de se aliar uma superfície dura com um núcleo mais mole e tenaz é de grande importância em inúmeras aplicações, sobretudo porque, pelo emprego de aços com elementos de liga, pode-se conseguir núcleo de elevada resistência e tenacidade, com superfície extremamente dura, resultando num material capaz de suportar em alto grau certos tipos de tensões <sup>(2)</sup>.

O processo clássico de endurecimento superficial é a cementação, isto é, o enriquecimento superficial de carbono de certos aços, aquecidos convenientemente em contato com substâncias carbonáceas <sup>(3)</sup>.

O propósito do seguinte trabalho é a avaliação da tenacidade ao impacto de um aço raramente produzido, o aço SAE 1644, visando a obtenção de suas propriedades características, por meio de ensaio de dureza e impacto e análises microestruturais.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Para as análises experimentais, foram confeccionados corpos-de-prova Charpy e amostras planas retangulares, que em seguida foram tratadas termoquimicamente em temperaturas pré-definidas e tempos variados conforme o fluxograma da Figura 1. Posteriormente realizou-se a análise metalográfica e

ensaios mecânicos de dureza e impacto para obtenção de dados experimentais específicos e, por conseguinte analisá-los mais precisamente.

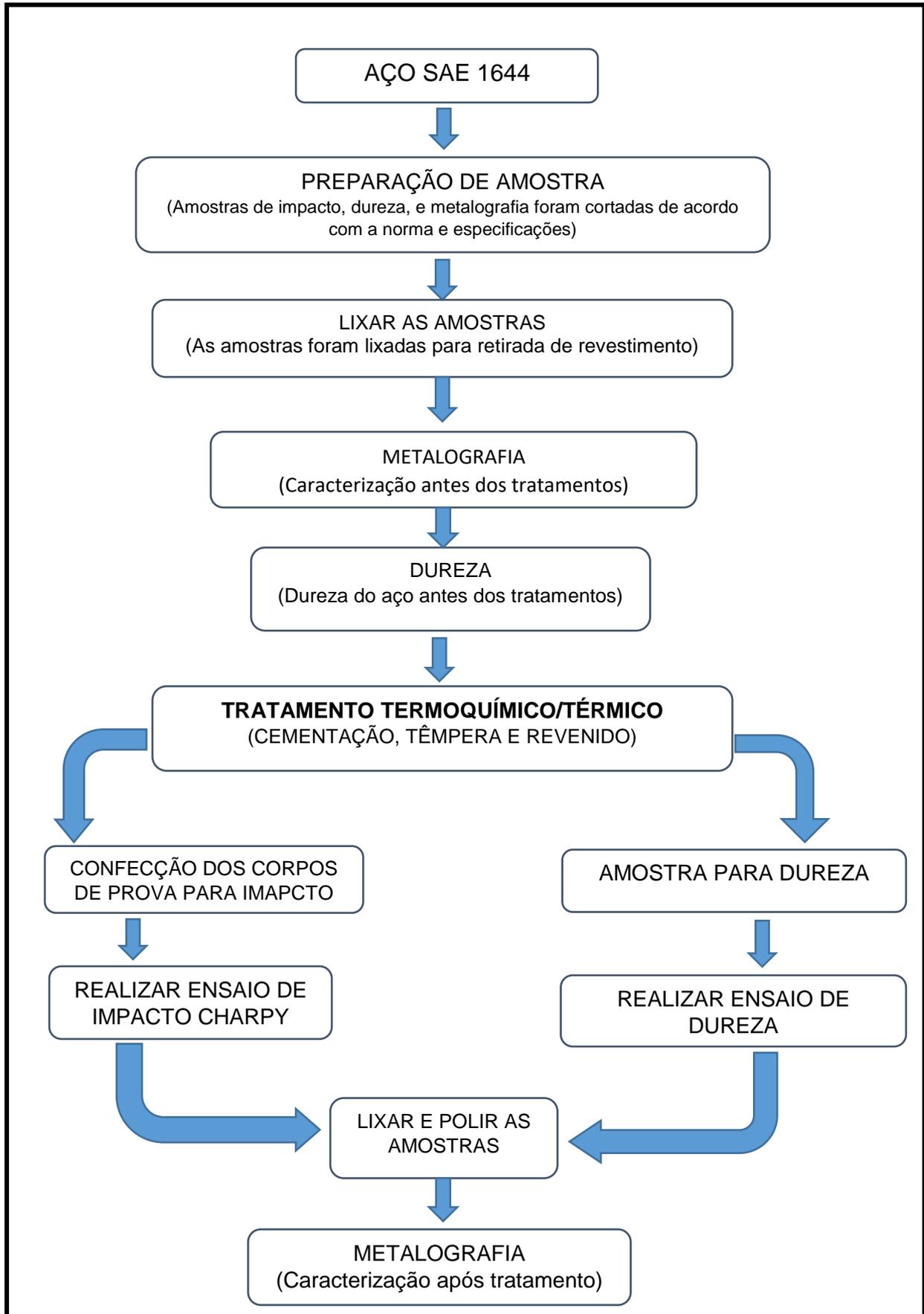
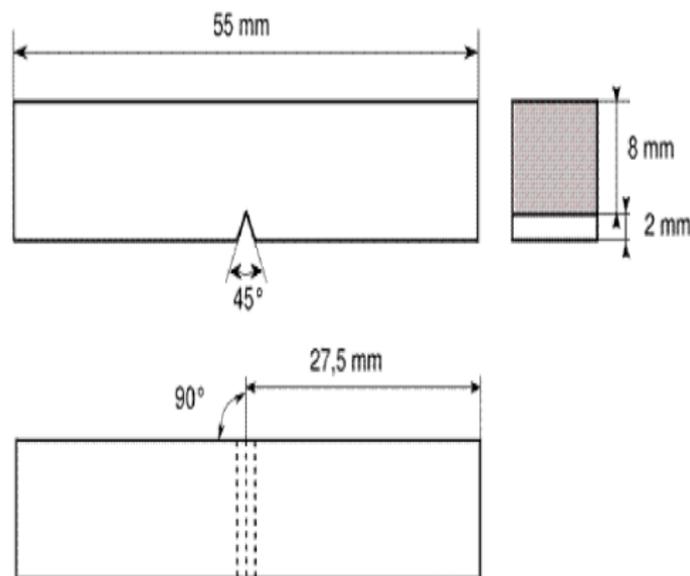


Figura 1 – Fluxograma da prática experimental.

O aço utilizado neste estudo se trata do aço SAE 1644 obtido em forma de tarugo de 4 m por 130 mm x 130 mm, fornecido pela empresa SINOBRAS. O mesmo foi cortado em tamanhos menores para a usinagem dos corpos de provas seguindo as normas e especificações distintas. Foram cortadas cinco amostras retangulares de aproximadamente 30 mm de comprimento por 20 mm de largura e a espessura padrão de 10 mm para realização das análises e ensaios experimentais antes do tratamento, para obtenção de dados para análise do comportamento do aço antes e depois da cementação. As amostras foram lixadas para realização do ensaio de dureza e polidas com alumina  $0,3\mu\text{m}$  e atacadas com Nital 3% (com o objetivo de identificar as fases presentes) por aproximadamente 10 segundos e em seguida analisadas em um microscópio.

O tratamento termoquímico realizado nesse trabalho foi cementação sólida, seguindo do tratamento térmico pós cementação, de têmpera e revenido. Para a realização do tratamento termoquímico e térmico foram confeccionados quinze corpos de prova para o ensaio de impacto pós-tratamentos (sendo três corpos de prova para cada condição), no qual também foi realizado ensaio de dureza e metalografia nos mesmos. Os tratamentos e as amostras foram distribuídos de acordo com a Tabela 1.

As dimensões apropriadas para o ensaio de impacto são definidas pela norma internacional **ASTM E23 - 94** e nacional **ABNT NBR ISO 148 - 2**, demonstrado na Figura 2 <sup>(4)</sup>.



**Figura 2** – Corpo de prova para ensaio de impacto.

Neste trabalho foi realizado o tratamento termoquímico de cementação sólida, seguindo do tratamento térmico pós cementação, de têmpera e revenido. As amostras e os respectivos tratamentos foram distribuídos de acordo com a Tabela 1.

**Tabela 1 – Distribuição das amostras e dos tratamentos.**

<b>Condição</b>	<b>Tratamento</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Tempo</b>
<b>Condição 1</b>	-	-	-
<b>Condição 2</b>	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	840°C	30 minutos
	Revenido	450°C	15 minutos
<b>Condição 3</b>	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	840°C	30 minutos
	Revenido	450°C	30 minutos
<b>Condição 4</b>	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	840°C	60 minutos
	Revenido	450°C	15 minutos
<b>Condição 5</b>	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	840°C	60 minutos
	Revenido	450°C	30 minutos
<b>Condição 6</b>	Cementação	X	X
	Têmpera	840°C	X
	Revenido	450°C	X

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise química

A análise química do aço SAE 1644 realizada pelo espectrômetro de emissão ótica (THERMO) é mostrada na tabela X, o aço se enquadra na classificação estabelecida.

**Tabela 2 – Análise química do aço SAE 1644 realizada por espectrometria de emissão ótica (THERMO).**

<b>ANÁLISE QUÍMICA</b>							
<b>Nº</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
1	0,444	0,170	0,909	0,019	0,009	0,093	0,014
2	0,453	0,168	0,901	0,017	0,008	0,092	0,014
3	0,448	0,164	0,899	0,017	0,010	0,091	0,013
4	0,458	0,325	1,195	0,020	0,019	0,094	0,014
<b>MÉDIA</b>	<b>0,451</b>	<b>0,207</b>	<b>0,976</b>	<b>0,018</b>	<b>0,011</b>	<b>0,093</b>	<b>0,014</b>
<b>DS</b>	<b>0,006</b>	<b>0,079</b>	<b>0,146</b>	<b>0,002</b>	<b>0,005</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>
<b>Ni</b>	<b>V</b>	<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>Sn</b>	<b>N</b>	<b>Mn/S</b>	<b>Mn/Si</b>
0,062	0,033	0,215	0,001	0,015	0,010	97,742	5,347
0,062	0,034	0,215	0,001	0,014	0,012	109,878	5,363
0,061	0,035	0,211	0,001	0,015	0,010	94,632	5,482
0,062	0,033	0,214	0,001	0,016	0,011	63,564	3,677
<b>0,062</b>	<b>0,034</b>	<b>0,214</b>	<b>0,001</b>	<b>0,015</b>	<b>0,011</b>	<b>91,454</b>	<b>4,967</b>
<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,002</b>	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>19,723</b>	<b>0,862</b>

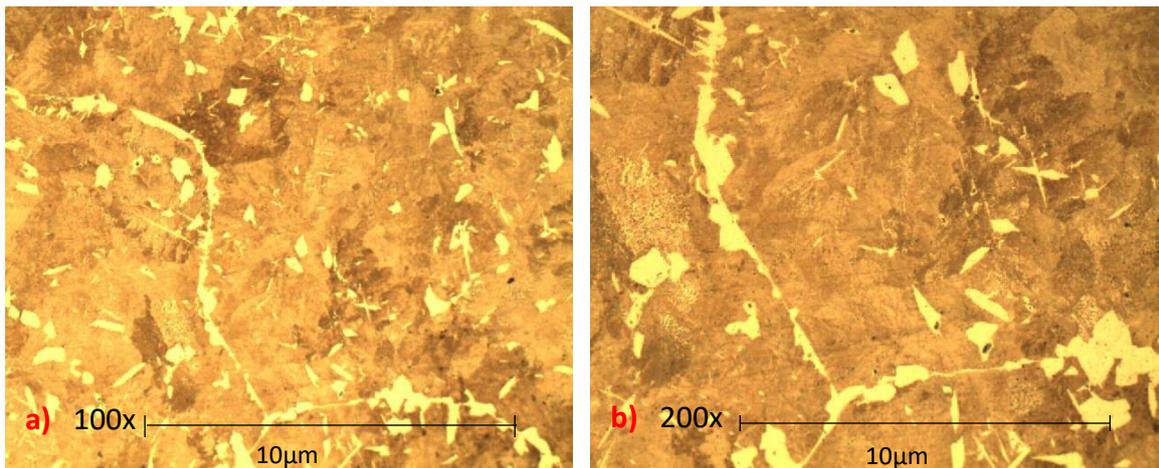
**Tabela 3 – Análise química do aço SAE 1644 pós-tratamento realizada por espectrometria de emissão ótica (THERMO).**

<b>ANÁLISE QUÍMICA</b>							
<b>Nº</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
1	0,765	0,22	1,005	0,016	0,009	0,113	0,016
2	0,786	0,188	0,968	0,015	0,008	0,102	0,014
3	0,772	0,194	0,905	0,014	0,01	0,106	0,015
4	0,778	0,305	1,096	0,016	0,009	0,122	0,016
<b>MÉDIA</b>	<b>0,775</b>	<b>0,227</b>	<b>0,993</b>	<b>0,015</b>	<b>0,009</b>	<b>0,01</b>	<b>0,015</b>
<b>DS</b>	<b>0,007</b>	<b>0,039</b>	<b>0,057</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,007</b>	<b>0,001</b>
<b>Ni</b>	<b>V</b>	<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>Sn</b>	<b>N</b>	<b>Mn/S</b>	<b>Mn/Si</b>
0,062	0,033	0,215	0,001	0,015	0,01	97,505	4,842
0,062	0,034	0,215	0,001	0,014	0,012	99,152	5,831
0,061	0,035	0,211	0,001	0,015	0,01	98,32	6,112
0,062	0,033	0,214	0,001	0,016	0,011	83,642	4,544
<b>0,062</b>	<b>0,034</b>	<b>0,214</b>	<b>0,001</b>	<b>0,015</b>	<b>0,011</b>	<b>94,6548</b>	<b>5,33225</b>
<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,002</b>	<b>0</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>5,50638</b>	<b>0,63925</b>

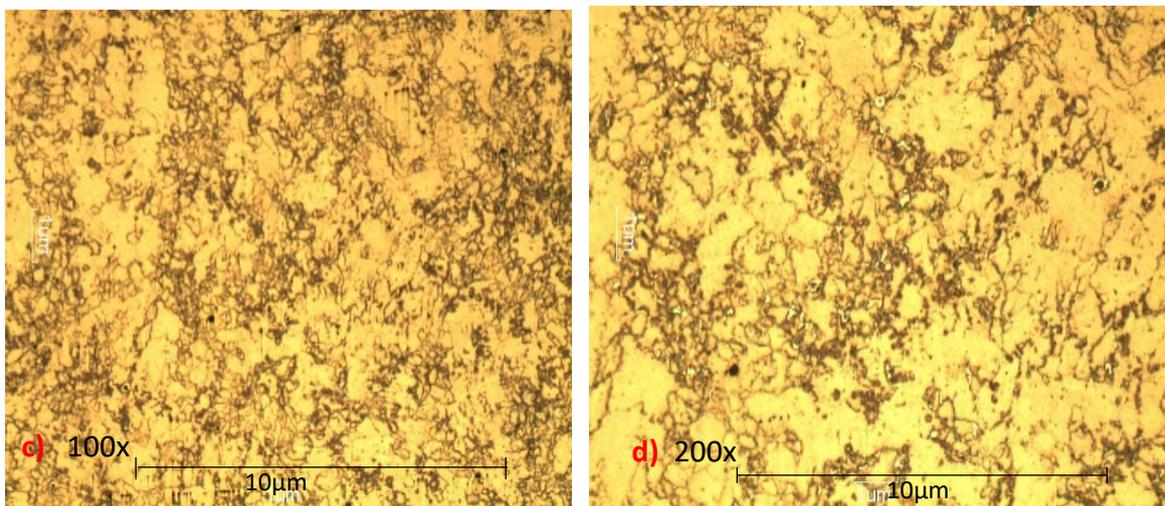
Observa-se nas análises químicas que após os tratamentos térmicos de pós cementação que os elementos constituintes do aço SAE 1644 não obtiveram variações significativas, com exceção do carbono que teve um aumento considerável devido ao processo de cementação realizado, confirmando o alto grau de eficiência dos tratamentos realizados.

### Análise metalográfica

As Figuras 3 e 4 da metalografia do aço SAE 1644 foram analisadas para verificar o arranjo microestrutural antes e pós-tratamento termoquímico. Neste caso foi apresentado apenas a micrografia da condição 3 que foi o melhor resultado obtido.



**Figura 3** – Micrografia observada do aço SAE 1644 antes dos tratamentos, ataque Picral 4%, com aumento de (a) 100x (b) 200x.



**Figura 4** – Micrografia observada do aço SAE 1644 pós-tratamento termoquímico, ataque Picral 4%, com aumento de (a) 100x (b) 200x. Condição 3.

Observa-se pela micrografia da figura 3 que não sofreu tratamento a presença da fase ferrita e perlita. A partir da microestrutura revelada observa-se que é uma

micrografia incomum de aços médio carbono, onde temos a fase perlítica (escura) e ferrítica (clara) distribuídas de acordo com o teor de carbono do aço. Nota-se na microestrutura em questão a predominância da fase perlítica (coloração escura) com quase inexistência de fase ferrítica (coloração clara) e uma fase bem clara e com formato bem irregular, esta fase se deve aos precipitados formados pela adição de vanádio e estão distribuídas por toda microestrutura do aço.

A alta solubilidade do vanádio na austenita faz com que estes precipitados que são carbonetos e nitretos de vanádio se formem durante o resfriamento do produto, no momento da transformação da austenita para ferrita. Estes precipitados, agem como barreiras físicas para o movimento de discordâncias, assim elevando as propriedades mecânicas do material, sendo este o mecanismo de endurecimento por precipitação. Quanto mais finos e dispersos estes precipitados, mais elevado será o ganho de resistência. Os carbonetos e nitretos de vanádio apresentam estrutura cristalina cúbica de face centrada <sup>(5)</sup>.

Na figura 4 observa-se o arranjo micro estrutural da peça após a cementação e pós-tratamentos térmicos de tempera e revenido para a condição 3. Em comparação com a microestrutura observada antes do tratamento termo químico observou-se uma redução da região clara e irregular apresentada na microestrutura anterior, o aumento do percentual de carbono contribuiu para o aumento da dureza, bem como, a solubilização dos precipitados de vanádio formando precipitados menores e mais uniformes, o que gera um aumento da dureza observada no material, o vanádio também é responsável pelo refino dos grãos e pelo retardamento de recuperação e da recristalização da fase austenítica devido a sua alta solubilidade nesta fase. Nota-se o aumento do refino de grãos em relação a microestrutura não tratada, sendo esse também um dos fatores determinante para o grande aumento da dureza, assim como a formação de pequenas agulhas de martensita observadas na microestrutura da peça tratada.

### Análise de impacto

A partir do gráfico de Dureza x Tenacidade (Figura 5), percebe-se que são propriedades inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a dureza, menor a tenacidade. Isso ocorre quando a dureza do material é maior, o que o torna mais frágil, com isso, rompe facilmente quando submetido ao impacto, já que absorve

valores baixos de energia. É possível ainda prever através das microestruturas das condições testadas qual propriedade desempenha um melhor papel para cada tipo de solicitação de serviço, ou seja, por comparação consegue-se uma relação ideal entre dureza e tenacidade

Assim como a tenacidade é a capacidade de absorção de energia mecânica em regime elástico e plástico e é representada pela área total do diagrama tensão-deformação e a dureza é a resistência ao risco, que é medida experimentalmente por vários processos, como a resistência oferecida pela superfície à penetração, nota-se, levando em consideração a maior dureza e menor energia que a condição 3 é a mais adequada.

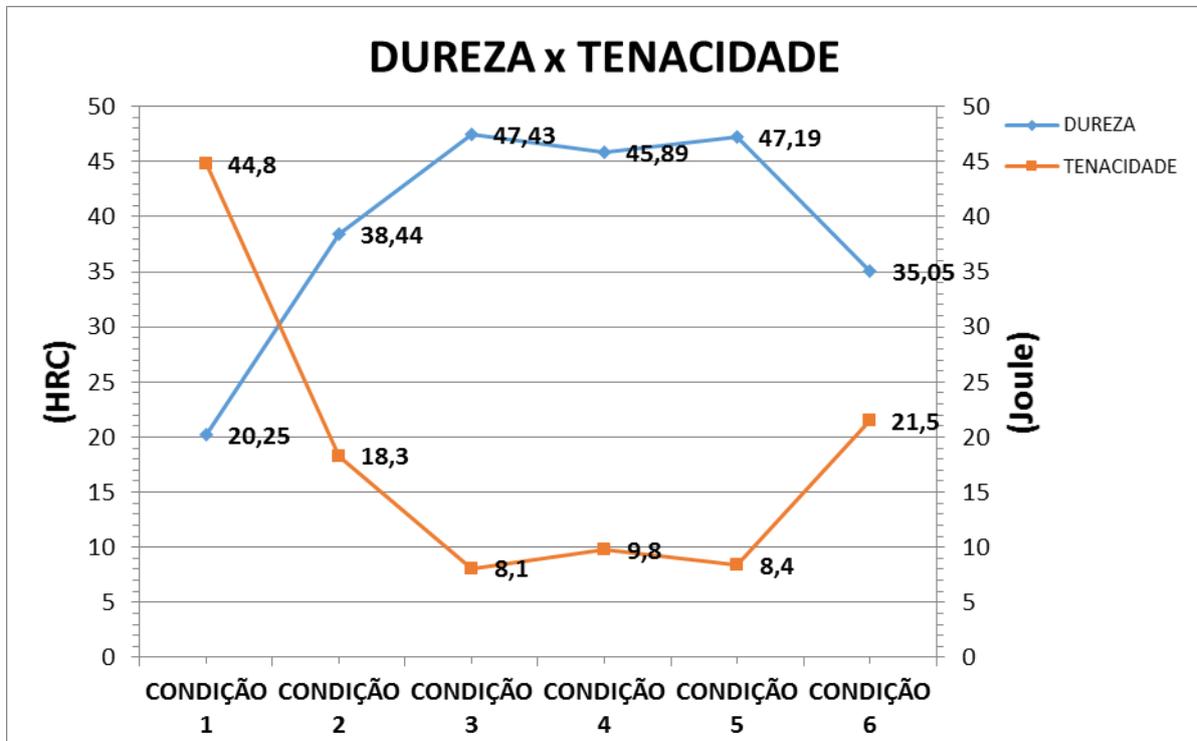


Figura 5 – Gráfico de Dureza x Tenacidade.

## CONCLUSÕES

Através das análises experimentais antes e pós tratamentos podemos afirmar que foi obtido uma boa de eficiência no processo de cementação. Houve um aumento significativo na dureza por conta do aumento do teor de carbono no aço, conseqüentemente tornou o material mais frágil, o que levou o mesmo a apresentar baixos valores de energia absorvida no ensaio de tenacidade ao impacto, uma vez

que, a tenacidade caminha de forma inversamente proporcional à dureza do material.

Podemos concluir também que o objetivo deste estudo foi alcançado com sucesso, pois após as avaliações dos resultados de impacto e dureza do aço SAE 1644 os resultados apresentados mostraram-se bastante interessantes, principalmente os observados na condição 3.

## REFERÊNCIAS

- [1] Centro universitário Padre Anchieta. **Ciência dos materiais – Aços carbono**. Unianchieta, Jundiaí-São Paulo, 2007.
- [2] CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6. ed. São Paulo: ABM, 1988.
- [3] PANDOLFO, D. **Estudo da Tenacidade ao Impacto de um aço SAE 1020 Submetido a Tratamento Térmico**. Porto Alegre. Trabalho de Conclusão de Curso, PUCRS, 2009.
- [4] AMERICAN society for metals. **Metals Handbook**. 4ª Edição. ASM, Metals Park, 1990.
- [5] AMOURY NETO, J. S. **Caracterização mecânica e levantamento da curva jominy do aço sae 1644 produzido em uma siderúrgica local**. Marabá. Trabalho de Conclusão de Curso, UFPA, 2014.
- [6] GONÇALVES, R. B. P. **Estudo avaliativo da resistencia ao impacto de um aço SAE 4140 após tratamento termoquímico de cementação**. Marabá. Trabalho de Conclusão de Curso, UFPA, 2014.

## **STUDY THE IMPACT TOUGHNESS OF EVALUATIVE A STEEL SAE 1644 SUBMITTED TO TREATMENT CEMENTATION THERMOCHEMICAL.**

### **ABSTRACT**

This work is a study about the toughness of the SAE 1644 steel, after being subjected to thermochemical treatment of carburizing, and after hardening heat treatment (quenching and tempering), fixed and variable time temperature were analyzed six (6) different conditions post thermochemical-treatment. For

experimental analysis, 12 were prepared test samples for impact testing with the dimensions defined by international standard ASTM E23-94 and 05 samples approximately 30 mm long by 20 mm wide and 10 mm thick for testing hardness and metallography. Metallographic analysis of the images of samples with and without treatment thermochemical treatment were performed to verify the change of the microstructure to further evaluate mechanical strength by impact and hardness test.

**Key-words:** steel, thermochemical treatments, carburizing, toughness, impact test.