

EFEITO DO TRATAMENTO DE RESFRIAMENTO E CRIOGENIA SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AISI/SAE 4140

L. G. M. N. Lima¹, E. T. Rasma¹, C. R. Rodrigues², E. A. de Carvalho¹

¹Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro

²Instituto Federal Fluminense

leh_lima92@hotmail.com

Av. Alberto Lamego, 2000 - Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes - RJ,
28035-200

RESUMO

Propriedades mecânicas de um aço podem ser aprimoradas através do controle adequado da composição química e microestrutura do material. Tem-se como objetivo no presente trabalho o estudo comparativo das estruturas, morfologia e propriedades mecânicas do aço AISI/SAE 4140 empregado na indústria após um tratamento de têmpera, seguido pelo tratamento subzero e/ou criogênico profundo. O tratamento criogênico (-196°C) e o subzero (-82°C) submetem os materiais a temperaturas muito baixas durante longos períodos de tempo. Este estudo simulou 3 rotas diferentes de tratamento térmico, após a têmpera, onde o lote foi dividido em 3 sub-lotes de corpos de prova, sendo o primeiro preservado de qualquer tratamento, o segundo sofreu subzero e o terceiro criogenia. Ao final os três sub-lotes foram reunidos e submetidos ao revenimento. Após o processo de tratamento térmico, foi realizado ensaio de tração, onde foi possível verificar que o material tratado criogenicamente se tornou mais dúctil e tenaz.

Palavras-chave: Tratamento Criogênico, Aço AISI/SAE 4140, Propriedades Mecânicas.

INTRODUÇÃO

O aprimoramento das propriedades mecânicas de um aço torna-se possível através do controle adequado da composição química, do tipo e natureza do meio de resfriamento e microestrutura do material. Aços de baixa e média liga muitas vezes são submetidos a tratamentos térmicos visando serem utilizados para uma aplicação estrutural específica. Assim, partindo da temperatura de austenitização, os aços sofrem o tratamento térmico, que consiste em ciclos de aquecimento e resfriamento com o objetivo de alterar as suas propriedades físicas e mecânicas, sem mudar a forma do produto, ao longo de todo o processo. (1)

A criogenia apresenta-se como um processo inovador capaz de potencializar as propriedades mecânicas da martensita revenida. O tratamento criogênico (-196°C) e o subzero (-82°C) submete os materiais a temperaturas muito baixas durante longos períodos de tempo, normalmente é utilizado após o tratamento térmico de têmpera no material. Esse tratamento possui custo relativamente baixo e afeta todo o volume do material, garantindo a manutenção de suas propriedades ao longo de toda a vida da ferramenta. (2)

O processo em geral visa o melhoramento das propriedades mecânicas de aços temperados e revenidos, como elevadas resistência ao desgaste, tenacidade, dureza, tensões residuais compressivas, dentre outras. A possibilidade de se estender algumas propriedades mecânicas de aços comumente empregados na indústria, apresenta a possibilidade de melhoria de desempenho sem aumento significativo de custos de fabricação. (3)

Esse tipo de tratamento de resfriamento é amplamente aplicado em ferramentas de corte, que são submetidas a altas taxas de desgaste. Ainda que haja melhoras nas propriedades mecânicas e no aumento da vida útil das peças aços ferramentas, não há muitas informações e pesquisas sobre as alterações na estrutura e nas propriedades mecânicas destes materiais, quando submetidos ao tratamento criogênico. (2)

MATERIAIS

O material analisado no presente trabalho foi o aço de médio carbono SAE 4140, adequado de acordo com a norma ASTM E8-00M. Os corpos de prova têm características especificadas de acordo com as normas técnicas. A partir de uma barra circular dos aços SAE 4140 foram retirados 11 corpos de prova com ½” de diâmetro.

As cabeças são as regiões extremas do corpo de prova, que possuem roscas, Figura 1, e foram fixadas nas garras da máquina de ensaio mecânico de tração, de modo que a força atuante na máquina fosse axial. Nas garras, foram utilizados dispositivos anti-escorregamento desenvolvido na UENF pelo engenheiro Carlan Rodrigues.



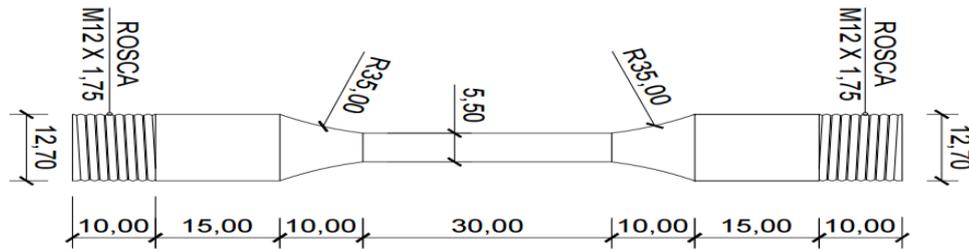


Figura 1: Corpo de prova usinado com rosca, anti-escorregamento.

MÉTODOS

Tratamentos Térmicos Aplicados nas Amostras

Os 11 corpos de prova iniciais, utilizados para o ensaio de tração, foram divididos em três lotes, após o tratamento térmico convencional, distribuídos da seguinte forma:

- ✓ O primeiro lote (com 3 amostras): foi separado para sofrer tratamento térmico convencional (têmpera) e na sequência o revenimento.
- ✓ O segundo lote (com 4 amostras): após a têmpera, foi então submetido ao tratamento térmico subzero.
- ✓ O terceiro lote (com 4 amostras): após a têmpera, foi submetido ao tratamento térmico criogênico profundo.



Figura 2: CP's dispostos no suporte, preparados para sofrer o tratamento térmico.

No tratamento térmico dito convencional, todas as amostras foram inicialmente submetidas à têmpera. As amostras foram austenitizadas a temperatura de 850°C por 25 minutos, a uma taxa de 10°C/min.

Todos os suportes, Figura 2, contendo os corpos de prova foram imediatamente imersos em óleo de têmpera perto do forno. Os suportes foram continuamente agitados por cerca de 10 minutos e depois deixados dentro de uma bandeja para escoamento do óleo e para retornar à temperatura ambiente, Figura 3.



Figura 3: CP's submetidos à têmpera.

No tratamento Subzero, as amostras foram resfriadas à $-93,5^{\circ}$ por 48 horas dentro de um freezer FORMA SCIENTIFIC - 72 HORIZONTAL, conforme ilustrado na Figura 4. Essa temperatura de $-93,5^{\circ}$ foi verificada através de um sensor termopar. Após o tratamento, foram colocadas em uma caixa de "isopor" até retornarem naturalmente à temperatura ambiente.



Figura 4: Freezer utilizado no experimento.

Já no tratamento Criogênico Profundo as amostras, após a têmpera, foram imersas em nitrogênio líquido por 72 horas (dentro do container Locator 8 Termo-online, ilustrado na Figura 5), a uma temperatura de -196°C , e

também foram deixadas em caixa térmica para que retornassem suavemente à temperatura ambiente.



Figura 5: Container com Nitrogênio Líquido

Todos os 11 corpos de prova sofreram revenimento a 200 °C por 25 minutos, a uma taxa de 10°C/min.

Preparação Metalográfica das Amostras

Para a caracterização metalográfica do aço foram produzidos corpos de prova seccionados em um cortador mecânico MESOTOM. Após essa etapa, através do uso de uma lixadeira semi-automática modelo Struers, foi realizado o lixamento das amostras utilizando lixas com granulometria cada vez menor até desaparecerem os traços da lixa anterior.

Na etapa seguinte as amostras foram polidas com pano de feltro empregando-se pastas de alumina de granulometria de 1,0 μ m e 0,3 μ m, até obter uma superfície espelhada e isenta de riscos. Logo após, foi realizado o ataque, utilizando nital 2% que é composto de uma mistura de 2% de Ácido Nítrico e 98% de Álcool Etílico. Todas essas etapas foram acompanhadas no microscópio OLYMPUS.

Caracterização da Estrutura e Morfologia

- Ensaio de Tração

Os corpos de prova foram fabricados para os ensaios de tração conforme a norma ASTM E8-00M, este ensaio consiste em submeter um material a um esforço que tende a esticá-lo ou alongá-lo. O teste foi realizado com o eixo de aplicação da carga paralelo ao eixo de conformação. Os

ensaios foram realizados numa máquina INSTRON modelo 5582, com uma

velocidade de deformação de 1,0 mm por minuto com o objetivo de avaliar as mudanças nas propriedades mecânicas antes e depois do tratamento.

Um extensômetro tipo “clip gage” foi fixado na região de teste, após o corpo de prova ser fixado nas garras do equipamento, sendo medidas as deformações correspondentes, Figura 6. Os esforços ou cargas foram medidos na própria máquina e o ensaio prosseguiu até a ruptura final do corpo de prova, Figura 6. Os resultados fornecidos pelo ensaio de tração foram comparados entre os materiais que sofreram o tratamento térmico convencional, subzero e criogênico profundo.



Figura 6 - Ensaio tração com extensômetro (à esquerda) e CP fraturado, ainda na Instron (à direita).

- Microscopia de Varredura a Laser

A caracterização morfológica do aço foi feita em um Microscópio Confocal (MC), modelo LEXT 3D MEASURING LASER MICROSCOPE OLS4000, da OLYMPUS, disponível no LAMAV/CCT/UENF, utilizando aumentos de 430, 1075 e 2136 vezes.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Microscopia de Varredura a Laser

A caracterização morfológica do aço SAE/AISI 4140 foi analisada através da microscopia CONFOCAL. Foi observado nas amostras, microestruturas em

formato de ripas (agulhas), características de uma estrutura martensítica, em consequência do resfriamento rápido no tratamento térmico de têmpera executado nas amostras.

Na Figura 7 e 8, é possível notar a obtenção de inclusões e poros, na microestrutura do material. Elas podem combinar-se entre si ou com o ferro ou carbono, presentes no material. As inclusões obtidas nessas micrografias com cor de ardósia, em forma globular e um núcleo escuro, em geral, são considerados como sulfuretos de manganês com partícula de óxido. Segundo a literatura, sua presença no aço não é muito nociva (4).

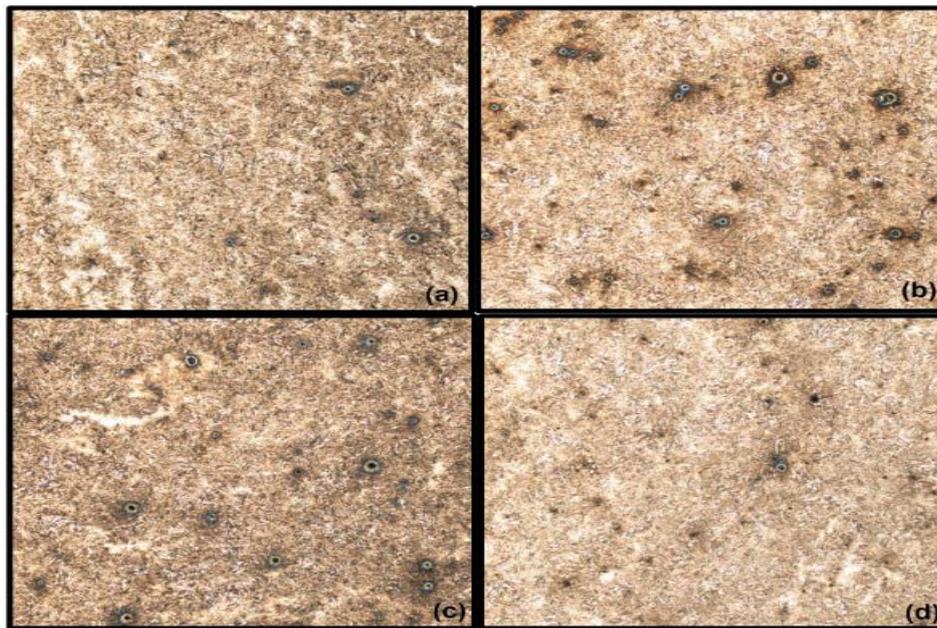


Figura 7 - Micrografias observadas no CONFOCAL em aumento de 430 vezes. Matriz martensítica: (a) temperado (antes do revenido); (b) temperado e revenido (Convencional); (c) Subzero (após revenido); (d) Criogênico (após revenido).

A partir do estudo das fotomicrografias, identificou-se estrutura martensítica, e presença de sulfuretos de manganês e óxidos, entretanto, não foi possível confirmar presença de austenita retida e carbonetos ultrafinos. Observou-se que, nas condições de tratamentos com temperatura abaixo de zero, houve um refinamento dos grãos martensíticos, quanto menor for a temperatura aplicada no aço.

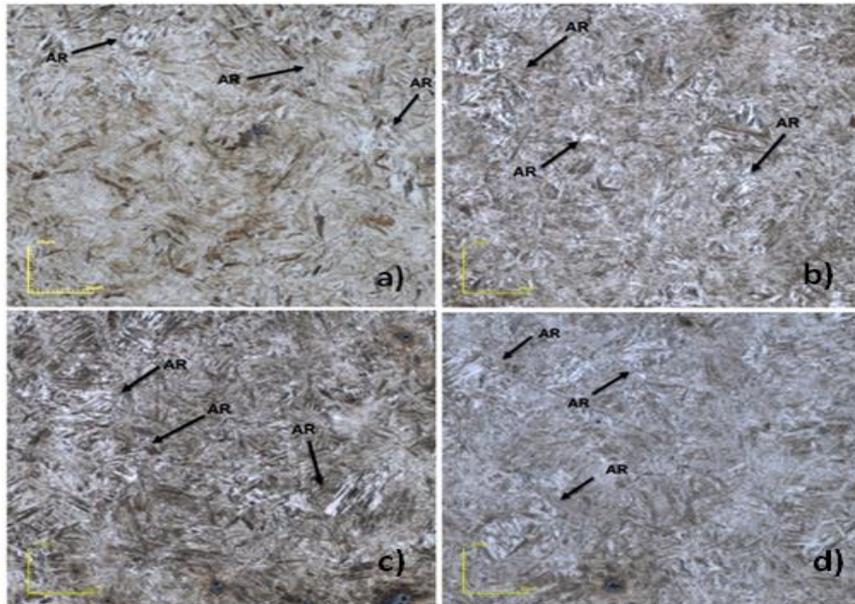


Figura 8 - Micrografia CONFOCAL. Ampliação 2136x. Matriz martensítica: (a) temperado (antes do revenido); (b) temperado e revenido (Convencional); (c) Subzero (após revenido); (d) Criogênico (após revenido). AR – austenita retida.

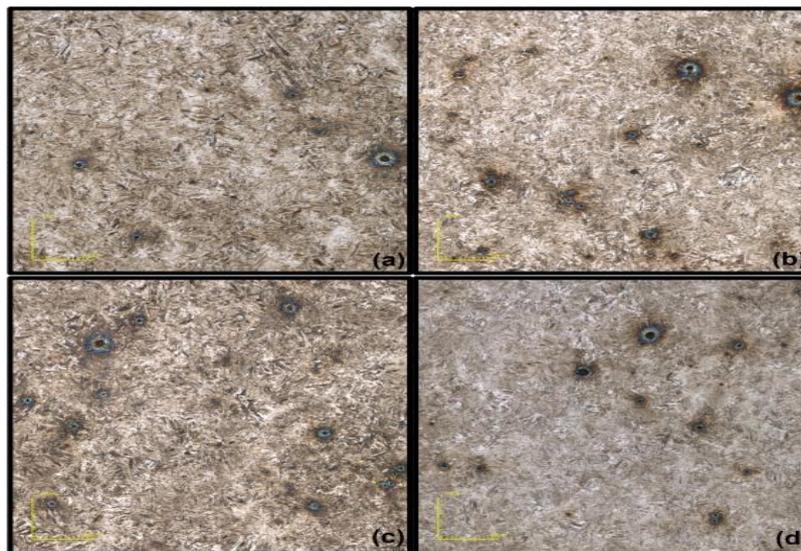


Figura 9 - Micrografias observadas no CONFOCAL em aumento de 1075 vezes. Matriz martensítica: (a) tratamento térmico de têmpera (antes do revenido); (b) tratamento térmico de têmpera e revenido (Convencional); (c) tratamento subzero (após o revenido); (d) tratamento criogênico (após o revenido).

Propriedades Mecânicas

- Comportamento geral das curvas de tensão x deformação

Os ensaios de tração foram realizados com o intuito de obter dados que auxiliassem na análise da influência dos tratamentos térmicos sobre o

comportamento do aço SAE 4140. O procedimento para a realização dos ensaios de tração foi realizado seguindo a norma ASTM E8-00M.

Os ensaios de tração foram realizados com o intuito de obter dados que auxiliassem na análise da influência dos tratamentos térmicos sobre o comportamento do aço SAE 4140. O procedimento para a realização dos ensaios de tração foi realizado seguindo a norma ASTM E8-00M.

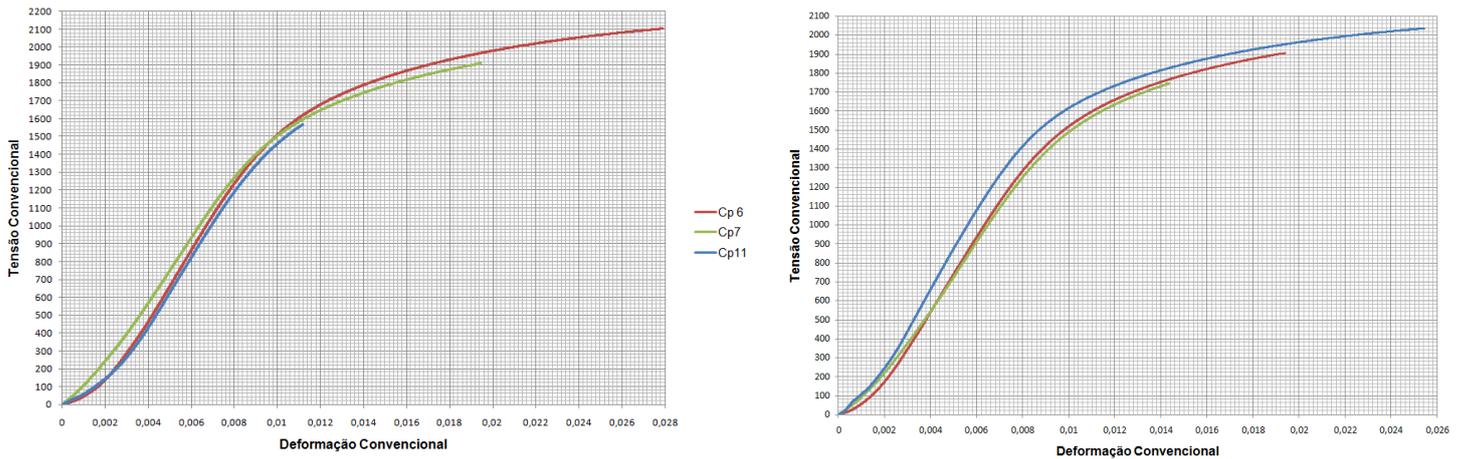


Figura 10 - Curvas Tensão Convencional x Deformação convencional - tratamento convencional (à esquerda) e tratamento subzero (à direita).

Observou-se que as curvas, Figura 10 e Figura11, mantêm as características típicas de metais dúcteis, apresentando uma região linear e elástica no início do ensaio, seguida de um escoamento, a partir da onde o comportamento do material passa a ser não linear, com deformações irreversíveis. A partir destes gráficos, foi possível a obtenção das propriedades descritas na Tabela I.

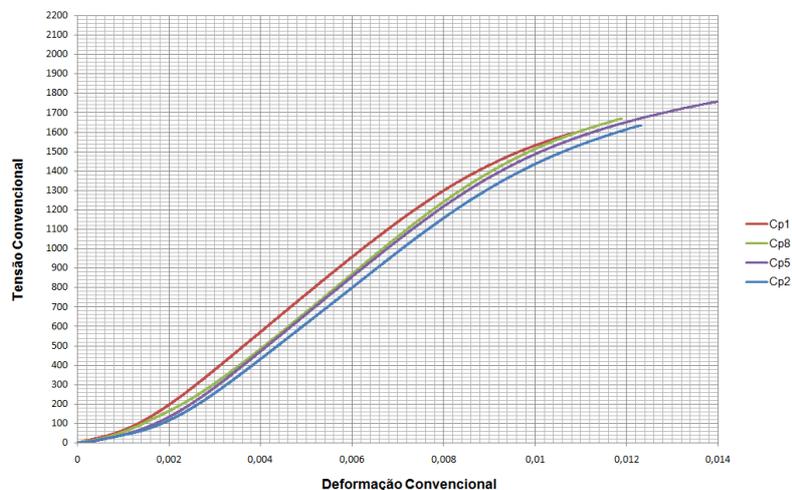


Figura 11 - Curvas Tensão Convencional x Deformação convencional - tratamento criogênico.

Tabela I: Média da Tensão Máxima e Tensão de Ruptura medidas nos corpos de prova.

Média dos Tratamentos			
Propriedades	Convencional	Criogênico	Subzero
σ_{max} (GPa)	2117,53	2122,55	2105,5
σ_{rup} (GPa)	2513,28	2512,1	2611,15
σ_{esc} (GPa)	1520	1505	1503,33
$\sigma_{max}/\sigma_{esc}$	1,4	1,41	1,4
$\Delta L\%$	9,18	7,5	8,4
$\Delta A\%$	12,7	10,75	14,27
E (Gpa)	180	181	187

- Módulo de Elasticidade

O Módulo de Elasticidade (E) pode ser considerado como rigidez, ou uma resistência do material à deformação elástica (Callister, 2013). Na Tabela I pode-se verificar que, os valores médios obtidos dos tratamentos térmicos convencional e subzero, não houve variação significativa entre esses dados. Entretanto, para o tratamento criogênico houve uma pequena elevação do módulo de elasticidade, o que significa que o material quando submetido ao tratamento criogênico, tornou-se mais rígido.

- Limite de Resistência à Tração e Limite de Ruptura

A tensão máxima (σ_{max}) é verificada quando a carga atinge o ponto máximo de carregamento, imediatamente antes do início da estrição e, portanto da queda da carga, caracterizada por uma rápida redução local da seção de fratura. O limite de resistência permaneceu praticamente inalterado entre os tratamentos.

O limite de ruptura (σ_{rup}), é a última tensão suportada pelo material antes da fratura, tem relação com a plasticidade do material, pois quanto maior a ductilidade do material, maior seria a deformação e o alongamento antes da ruptura, provocando a chamada estrição. Esse comportamento aconteceu para este material, sendo possível identificar na Tabela I, Figura 10 e Figura 11, que a ruptura do material ocorre conforme descrito na literatura, demonstrando que o material apresentou elevada deformação plástica.

- Limite de Escoamento

A tensão de escoamento (σ_{esc}) é determinada pelo ponto de interseção entre a curva de tensão x deformação, traçada uma reta paralela à sua porção linear e que dista 0,002 da origem do eixo das deformações. O limite de escoamento é a medida da resistência do metal à deformação plástica.

Através da análise da Tabela I, e dos gráficos de tensão x deformação (Figura 10 e Figura 11), o tratamento convencional proporcionou um pequeno aumento da resistência à deformação plástica do material, o que não foi observado para os outros tratamentos.

- Elongamento (EL%) e Redução de área (RA%)

A ductilidade pode ser demonstrada quantitativamente tanto como um alongamento percentual quanto como uma redução percentual na área. Considerando que a maior redução de área representa uma maior ductilidade, caso não houvesse alteração nas propriedades dos materiais, com os tratamentos térmicos propostos, logicamente, a maior redução de área (RA%) corresponderia ao maior alongamento (EL%). Como isso não se verificou, esses resultados logo, pode ser tomado como mais um indício positivo de que os tratamentos propostos alteraram as propriedades desse aço após a têmpera e antes do revenimento.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e das análises realizadas, neste trabalho podemos afirmar que:

Todos os tratamentos térmicos aplicados no aço SAE 4140, permitiram a obtenção de uma estrutura com coexistência da fase martensita.

O tratamento criogênico não apresentou uma grande variação na maioria das propriedades mecânicas analisadas, ao se comparar com outros tratamentos térmicos aplicados ao aço SAE 4140, neste trabalho.

A tensão de ruptura (σ_{rup}) teve um aumento expressivo no tratamento subzero ao compararmos com os outros tratamentos.

O Módulo de Elasticidade (E) foi afetado em um aumento de 3,74% para o tratamento criogênico e de 0,55% para o subzero.

REFERÊNCIAS

1. Callister, W. D. J. (2013) Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7a ed. Utah: John Wiley & Sons.
2. Moreira, J. C.; Ávila, R. F.; Godoy, G. C. D.; Abrão, A. M. (2009) Influência do tratamento criogênico na usinabilidade do aço rolamento ABNT 52100 temperado. Revista Matéria, v. 14, n. 3, p. 932 - 946.
3. Barron, R. F. (1982), "Cryogenic Treatment of Metals to Improve Wear Resistance", Cryogenics, August, pp. 409-413.
4. Colpaert, H. (2000) Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 6º ed. Edgard Blücher LTDA.

EFFECT OF COOLING TREATMENT AND CRYOGENICS ON MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL AISI / SAE 4140

ABSTRACT

Mechanical properties of steel can be enhanced through proper control of chemical composition and microstructure of the material. It has been the objective of the present study the comparative study of the structures, morphology and mechanical properties of steel AISI / SAE 4140 employed in the industry after a tempering treatment, followed by subzero and / or deep cryogenic treatment. The cryogenic treatment (-196 ° C) and subzero (-82 ° C) undergo materials at very low temperatures for long periods of time. This study simulated three different routes heat treatment after quenching, where the batch was divided into 3 sub-plots of test samples, the first being preserved from any treatment, the second and third suffered subzero cryogenics. At the end of the three sub-batches were collected and subjected to tempering. After the heat treatment process was performed tensile test, where it was possible to verify that the cryogenically treated material became more ductile and tenacious.

Keywords: Cryogenic treatment, AISI / SAE 4140, Mechanical properties.