

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS EM AÇOS COM ELEVADO TEOR DE CARBONO – SUBMISSÃO A TRATAMENTOS CRIOGÊNICOS EM PROCESSOS DE ESTAMPAGEM A FRIO

Filipe Augusto dos Santos Galvão¹, galvao.asg@gmail.com¹

Toni Jadson da Silva², jadson.toni@gmail.com²

David Alan Pereira³, david_lima_823@hotmail.com³

Lucio Garcia Veraldo Junior⁴, lucioveraldo@gmail.com⁴

¹Centro Universitário Salesiano de São Paulo, Campus São Joaquim

²Centro Universitário Salesiano de São Paulo, Campus São Joaquim

³Centro Universitário Salesiano de São Paulo, Campus São Joaquim

⁴Centro Universitário Salesiano de São Paulo, Campus São Joaquim

Resumo: Tratamentos térmicos em materiais metálicos, são utilizados em larga escala, na indústria de estampagem a frio, pois os mesmos conferem ao material ganhos em determinadas propriedades, e podem ser definidos como ciclos de aquecimento e resfriamento, sobre determinadas condições de temperatura e pressão, as quais devem ser controladas, cujo o objetivo é alterar suas características conferindo diferentes propriedades, tais como: aumento da dureza, tenacidade e maior controle dimensional. O tratamento térmico mais comumente utilizado em aços é o de têmpera, que consiste no aquecimento do material até o campo austenítico, seguido de resfriamento brusco até uma temperatura abaixo da zona de formação Martensítica, este resfriamento deve ser rápido o suficiente para obtenção de martensita, o que irá conferir uma ductilidade e tenacidade maior. O presente trabalho buscou explorar os processos criogênicos de resfriamento de aços de alto teor de carbono, após serem submetidos a tratamentos de têmpera, onde as peças são submetidas a temperaturas de -80° até -196°, com a utilização de nitrogênio líquido ou seco, o que permite um resfriamento rápido e eficiente, conferindo melhores propriedades, através de estudos de casos, foi comprovado que os tratamentos criogênicos possuem vantagem sobre os processos de resfriamento convencionais, óleo, salmoura, pois características como tamanho do grão e estabilidade interna, são melhoradas com tratamentos criogênicos

Palavras-chave: Aço, Carbono, Austenita, Martensita, Criogenia

TESTING OF MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES IN STEELS WITH HIGH CARBON CONTENT - SUBMISSION TO CRYOGENIC TREATMENTS FOR COLD STAMPING PROCESSES

Abstract: Heat treatment of metallic materials are used on a large scale in cold stamping industry, since they confer to the material properties in certain gains, and can be defined as cycles of heating and cooling on certain conditions of temperature and pressure, which must be controlled, whose goal is to change its characteristics conferring different properties, such as increased hardness, toughness and greater dimensional control. The heat treatment commonly used on the steel is temper, which consists of heating the material to the austenitic field, followed by quenching to a temperature below the martensitic forming zone, this cooling should be fast enough to obtain martensite, this will give a greater ductility and toughness. This study sought to explore the cryogenic process of high-carbon steel cooling after undergoing hardening treatments, where the parts are subjected to temperatures of -80 ° to -196 °, with the use of liquid or dry nitrogen, allowing a quick and efficient cooling, providing better properties, through case studies, it was proven that the cryogenic treatments have advantages over conventional cooling processes, oil, brine, for features such as grain size and internal stability are improved with cryogenic treatments.

Keywords: Steel, Carbon Austenite, Martensite, Cryogenics

1. INTRODUÇÃO

O presente artigo tem como objetivo, apresentar através da fundamentação teórica, e experimentos práticos, o processo criogênico de resfriamento de aços de alto teor de carbono, após passarem pelo processo de têmpera, analisá-los quanto as suas características mecânicas, e avaliar as alterações microestruturais, quanto ao tipo de resfriamento, pensando no ganho das propriedades mecânicas.

As propriedades mecânicas dos aços estão diretamente ligadas à microestrutura do material. Um controle adequado na composição química e microestrutural é capaz de otimizar as propriedades de um aço. Muitos aços de baixa e média liga são submetidos a tratamentos térmicos com o intuito de serem utilizados para determinada aplicação industrial. Assim, estes aços sofrem ciclos de aquecimento e resfriamento a partir da temperatura de austenitização, Krauss (1994). Segundo Callister, (2008), os aços, possuem uma região importante chamada de campo austenítico, que independe da porcentagem de carbono dos mesmos, a microestrutura é sempre composta da fase γ (austenita), onde apresenta uma estrutura CFC (Cúbica de Face Centrada). Durante o processo de obtenção de aços temperados, o material sofre uma transformação, passando de uma estrutura austenítica para outra, em que predomina a martensita. A transformação geralmente não é completa, restando, nos espaços entre as ripas e placas de martensita, uma fase residual de austenita retida, Krauss,(1994). Esta componente é indesejável, pois degrada as propriedades mecânicas dos aços temperados, sendo que a austenita retida pode tornar-se metaestável com o tempo, transformando-se posteriormente durante a ação do trabalho a frio, durante o revenido, ou simplesmente por envelhecimento à temperatura ambiente, Huang et.al, (2003) Estes fenômenos podem ocasionar mudanças dimensionais inesperadas, já que estas tensões podem resultar na formação de trincas, principalmente em peças de formas mais complexas e feitas de aços-ferramentas altamente ligados, grandes quantidades de austenita retida podem ainda impedir que se atinja a dureza final desejada no aço, porque a austenita pode se transformar num produto (ferrita mais carboneto) com dureza inferior à da martensita, durante as subsequentes operações de revenido, Chiaverini, (1988).

Aumentando – se a velocidade de resfriamento, os microconstituintes resultantes adquirem feições diferentes que afetam propriedades dos aços. Existe uma velocidade de resfriamento, denominada velocidade crítica, na qual os constituintes normais não são formados e o único microconstituente resultante da transformação da austenita é a martensita, que possui uma estrutura totalmente diferente dos outros constituintes, e em consequência, propriedades também diferentes.

Grande parte da austenita retida é transformada em temperaturas entre -110°C e -80°C e apenas uma pequena quantidade se transforma entre -196°C e -110°C . Assim o tratamento subzero diminui substancialmente a quantidade de austenita retida em relação ao tratamento térmico convencional a baixas temperaturas. O tratamento criogênico (TC) é um processo normalmente utilizado após o tratamento térmico de têmpera, consistindo essencialmente em submeter os materiais a temperaturas muito baixas durante períodos prolongados de tempo. O TC visa melhorar as propriedades mecânicas, tais como o aumento na resistência ao desgaste, o aumento da vida a fadiga, a redução da tensão residual, o aumento na dureza, a melhora da condutividade térmica, o aumento da estabilidade dimensional e o aumento na tenacidade e tensão de escoamento, Silvio Eduardo, (2012). O tratamento criogênico profundo é realizado a temperaturas próximas ao nitrogênio líquido (-196°C), e não só transforma a austenita retida em martensita como também altera a morfologia da martensita de tetragonal para octaedral. Então, após o tratamento criogênico, uma grande quantidade da austenita retida foi transformada em martensita e subsequentemente decomposta. Ao revenir esta martensita tratada criogenicamente, haverá a precipitação de finos carbonetos com uma distribuição mais homogênea na martensita revenida, o que faz com as propriedades mecânicas do aço melhore substancialmente, Moore e Collins, (1993)

2. OBJETIVO

O objetivo principal do presente artigo foi o estudo da microestrutura, e das propriedades mecânicas de um aço de alto teor de carbono, empregados nos processos de estampagem a frio, após sofrerem tratamento subzero e criogênico profundo.

Este artigo busca um melhor conhecimento nos processos de resfriamento de materiais metálicos aplicados a processos de estampagem a frio, após o processo de têmpera. Já que nesse processo de tratamento, denominado tratamento criogênico as temperaturas de resfriamento variam entre -80 a -196°C , conferindo ao material um considerável aumento em sua ductilidade, na capacidade de absorver e dissipar energia proveniente do impacto, tenacidade, além de uma melhor estabilidade dimensional. Para que engenheiros e estudantes da área possam se aprofundar e utilizar em seus trabalhos e estudos essa nova técnica de resfriamento brusco, que confere aos materiais metálicos excelentes características, que não se obtém com o processo de resfriamento convencionais.

2.1. Objetivos Específicos

- Pesquisar junto a literatura quais são as alterações microestruturais dos aços de alto carbono, aplicados a processos de estampagem a frio após o tratamento térmico de Têmpera, seguido de tratamento criogênico (subzero e criogênico profundo), e revenido;

- Avaliar o comportamento mecânico dos aços de alto carbono, aplicados a processos de estampagem quando submetidos a um ensaio de tração, durante o tratamento convencional e após o tratamento criogênico subzero e profundo;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A perlita consiste em camadas alternadas ou lameladas compostas pelas fases ferrita (α) e cementita (Fe_3C). Similar a perlita, a bainita possui uma microestrutura formada pelas fases ferrita (α) e cementita (Fe_3C), desta forma, processos de difusão estão envolvidos. Dependendo da temperatura de transformação, a bainita forma-se como ripas ou placas, sendo composta por uma matriz de ferrita e por partículas alongadas de cementita. Distinguem-se dois tipos de bainita, a superior, formada em temperaturas maiores e a inferior, formadas em temperaturas próximas a de transformação martensítica. A bainita superior é formada por uma série de tiras finas e estreitas (ripas) de ferrita que se encontram separadas por partículas alongadas de cementita precipitadas entre as ripas. Já na bainita inferior, a fase ferrita existe na forma de finas placas e a precipitação da cementita é mais fina, ocorrendo principalmente no seu interior, na forma de bastões ou lâminas muito finas, Callister, (2008).

As transformações perlítica e bainítica são concorrentes uma com a outra, pois, uma vez que dada fração de uma liga tenha se transformado em perlita ou em bainita, a transformação no outro microconstituente não será possível. As microestruturas formadas estão relacionadas com a taxa de resfriamento dos aços, e para resfriamentos rápidos, ocorre a transformação de austenita em martensita, Callister, (2008).

3.1. Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos podem ser descritos por ciclos de aquecimento e resfriamento, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidades de aquecimento e resfriamento, com o objetivo de alterar as propriedades de certos materiais metálicos, conferindo-lhes características determinadas e causando modificações em suas microestruturas sem que haja mudanças na forma do produto, Chiaverini (1988).

Os tratamentos térmicos mais comumente aplicados aos aços são os de têmpera e de revenimento. A têmpera consiste no aquecimento do material até o campo austenítico, seguido de resfriamento brusco até uma temperatura abaixo de M_s (temperatura de formação da martensita). Este resfriamento deve ser rápido o suficiente para obtenção de Martensita, sendo esta uma fase metaestável. A martensita possui estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), sendo formada por uma solução sólida supersaturada de carbono no ferro. O estado de altas tensões, a distorção do reticulado e a dureza extremamente elevada da martensita constituem inconvenientes que devem ser atenuados ou corrigidos. Para isso, submete-se o aço temperado à operações de revenimento. Posteriormente à têmpera, o aço é geralmente aquecido a uma temperatura abaixo da temperatura crítica e resfriado a uma taxa apropriada, para aumentar a ductilidade e a tenacidade, mas também para aumentar o tamanho do grão da matriz, aumentar a sua estabilidade dimensional, aliviar tensões de têmpera, reduzir a dureza desenvolvida durante o processo de soldagem e aliviar tensões induzidas pelo processo Chiaverini, (1988).

Quando a austenita é resfriada abaixo de sua temperatura crítica, ela se torna instável e começa a se transformar. O resultado desta transformação ocorre por processos de cisalhamento que resultam em estruturas tetragonais de corpo centrado ou estruturas cúbicas de corpo centrado altamente distorcidas, chamadas martensita (Moore e Collins, 1993). O efeito dos elementos de liga presente no aço durante a têmpera podem ser descritos conforme a seguir:

- Altera as temperaturas de início (M_i) e fim (M_f) da transformação martensítica;
- Aumenta a dureza da martensita;
- Altera a temperabilidade.

A maioria dos elementos de liga em solução na austenita abaixam a temperatura M_i , com a exceção do Cobalto e do Alumínio, Roberts e Cary, (1980).

A quantidade de austenita retida presente em aços de alto teor de Carbono pode variar bastante. Entre 2% e 45%, porém esse valor é extremamente sensível a pequenas mudanças na taxa de resfriamento, temperatura de austenitização. O processo de têmpera convencional dos aços, gera uma microestrutura com percentuais de no mínimo 15% de austenita retida, Roberts e Cary, (1980).

A utilização de uma microestrutura contendo martensita de alta dureza e austenita extremamente mole é prejudicial para o rendimento de aços com elevado teor de carbono, devido a instabilidade da austenita que pode transformar em trabalho, portanto é importante a utilização de meios para transformação dessa austenita retida. Essa transformação pode ser realizada através de revenimentos ou de maneira mais eficiente através de resfriamento Subzero, Silvio Eduardo, (2012).

3.2. Tratamentos Criogênicos

Os tratamentos a baixa temperatura, podem ser divididos em dois tipos, em função da temperatura abaixo de 0°C utilizada no processo, como mostrado a seguir:

1 – Tratamento Subzero: Quando as peças podem atingir temperaturas de até -80°C , com a utilização de gelo seco por exemplo.

2 – Tratamento Criogênico: A temperatura chega à cerca de -196°C , que é a temperatura do nitrogênio Líquido.

O processo criogênico não é um substituto de outros tratamentos térmicos de aço, mas uma extensão do ciclo térmico. Reasbeck, (1989).

A aplicação do tratamento em aços de elevado teor de carbono pode ser realizada antes ou após o revenimento, entretanto, há dúvidas sobre qual é o mais adequado e quantos ciclos são necessários para otimização na utilização do tratamento criogênico, Alexandru e Yun *et al.* (1998).

Um dos primeiros métodos usados em tratamento subzero foi proposto na extinta União Soviética por Gulyaev (1937), com o objetivo de eliminar a austenita retida presente nos aços após têmpera. As ferramentas eram tratadas em uma célula de resfriamento, que consistia de um recipiente com a parte interna de cobre e a externa de aço isoladas termicamente Fig. (1). O espaço entre as duas camadas do recipiente era preenchido com dióxido de carbono sólido ou substâncias como etano, etileno, freon-13, dentre outras. As temperaturas usadas eram na faixa de -80° a -100°C aplicadas durante um intervalo de tempo de $\frac{1}{2}$ a 1 hora, Zhmud (1980).

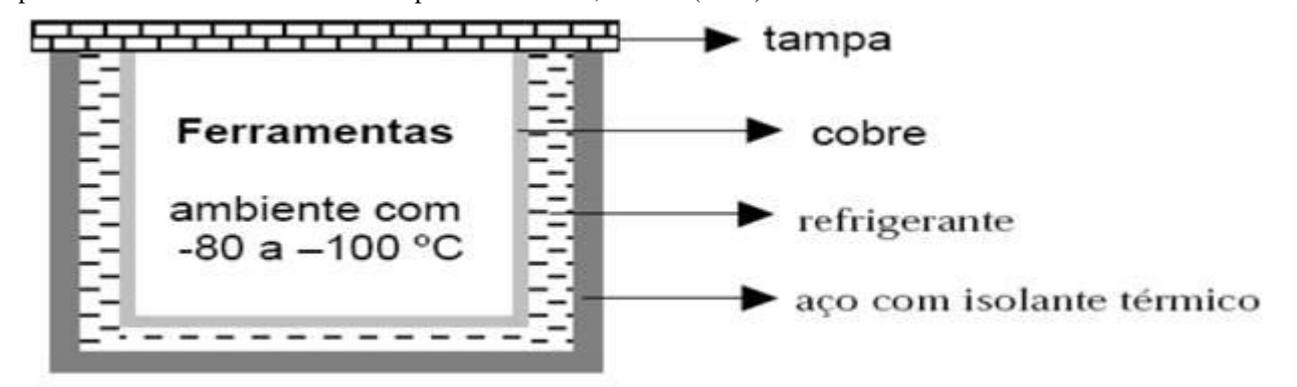


Figura 1 – Célula de resfriamento utilizada por Gulyaev (1937).

No tratamento subzero é possível observar um aumento da dureza, redução da tenacidade, estabilidade dimensional e pequeno aumento, em alguns casos, na resistência ao desgaste, Canale *et al.*, (2008).

Grande parte da austenita retida é transformada em temperaturas entre -110°C e -80°C e apenas uma pequena quantidade se transforma entre -196°C e -110°C . Assim o tratamento subzero diminui substancialmente a quantidade de austenita retida em relação ao tratamento térmico convencional a baixas temperaturas, Mariante (1999).

O tratamento criogênico profundo é realizado a temperaturas próximas ao nitrogênio líquido (-196°C), e não só transforma a austenita retida em martensita como também altera a morfologia da martensita de tetragonal para octaedral. Então, após o tratamento criogênico, uma grande quantidade da austenita retida foi transformada em martensita e subsequentemente decomposta. Ao revenir esta martensita tratada criogenicamente, haverá a precipitação de finos carbonetos com uma distribuição mais homogênea na martensita revenida, o que produzirá maior resistência a tenacidade na matriz martensítica aumentando assim, a resistência ao desgaste, Collins (1997).

A Figura 2 faz uma comparação da quantidade de austenita retida presente em um aço em função do teor de carbono quando temperado de modo convencional e temperado seguido de resfriamento, Reed Hill (1982).

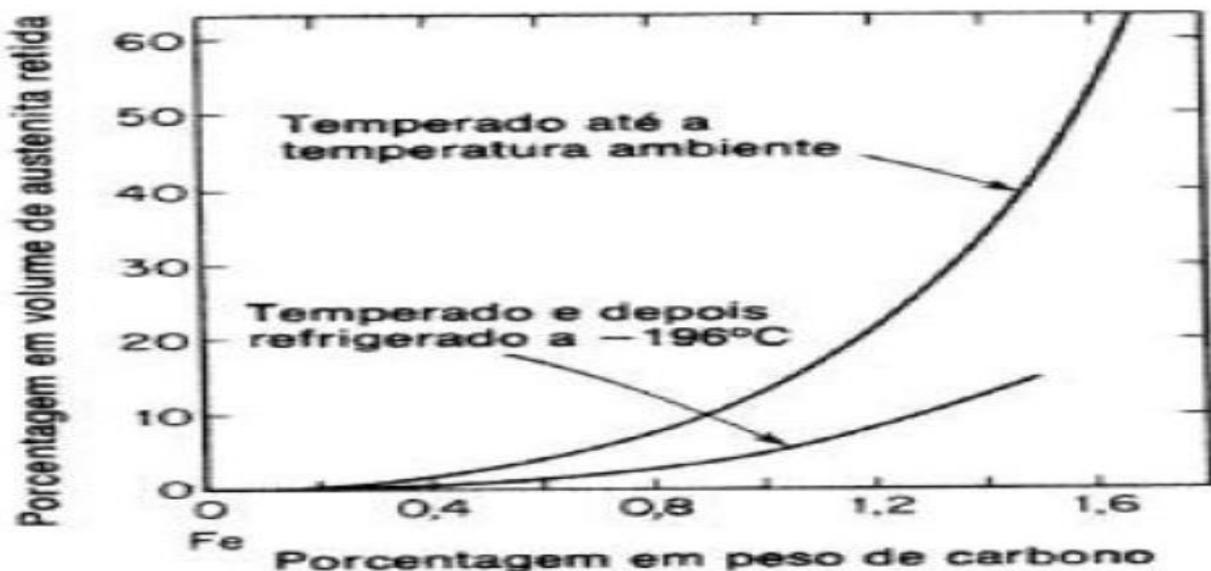


Figura 2 – Variação da austenita. (Reed Hill, 1982).

Collins e Domer (1997) verificaram que o tratamento criogênico tem efeito principalmente na martensita, causando mudanças cristalográficas e microestruturais que resultam em precipitação e distribuição mais fina de carbonetos na microestrutura revenida, com subsequente aumento na tenacidade e resistência ao desgaste.

A melhoria das propriedades mecânicas não pode ser atribuída somente à eliminação da austenita retida, uma vez que há uma melhora da propriedade com a contínua diminuição da temperatura. Isto pode ser explicado através da precipitação de carbonetos ultrafinos conhecidos como carbonetos η a temperaturas muito baixas, próximas a -190°C , durante longos períodos de resfriamento, Yun, Xiaoping e Hongshen (1998).

Finos carbonetos se precipitam na estrutura cristalina devido a mudanças microestruturais que ocorrem na martensita, fenômeno este denominado “condicionamento da martensita a baixas temperaturas”. Apesar de se tratar de um mecanismo ainda não totalmente entendido, com o resfriamento contínuo ocorre um aumento da energia de deformação, aumentando a instabilidade da martensita, possivelmente afetando a estrutura de discordâncias presente, na medida em que a rede cristalina do ferro sofre contração nos espaçamentos interatômicos. Collins (1996).

Kelker, Nash e Zhu (2003) demonstram indiretamente através de medição de resistividade e por uma técnica de identificação de densidade de defeitos, conhecida como PIPA (Photon Induced Positron Annihilation) que durante o processo criogênico existe: um aumento na densidade de discordâncias devido à conversão da austenita residual em martensita potencializando potencial termodinâmico para migração de átomos e, finalmente a formação de aglomerados de átomos de carbono e precipitação de carbonetos durante o revenimento.

Recente estudo realizado por Huang et al. (2003) mostra que através de técnicas de difração de nêutrons verificou-se que os parâmetros a e c da martensita comportam-se de maneira diferente durante as etapas de resfriamento criogênico e descongelamento.

O parâmetro a muda linearmente com as mudanças de temperatura, seguindo praticamente a mesma curva durante resfriamento criogênico e também durante o descongelamento o que indica um efeito termo-elástico puro.

Já o parâmetro c decresce com o resfriamento criogênico, mas não segue a mesma curva durante o descongelamento, tendo aumentado muito pouco seu valor.

Esses resultados sugerem o que ocorre segregação de átomos de carbono durante o tratamento criogênico. Os átomos de carbono ocupam predominantemente os interstícios octaédricos, supersaturando o reticulando. Quando ocorre, a segregação desses átomos afeta o parâmetro c do mesmo Huang et al (2003).

Assim o tratamento criogênico não só transforma a austenita retida em martensita, mas também altera a morfologia da martensita de tetragonal para octaedral. Então, após o tratamento criogênico grande quantidade da austenita retida é transformada em martensita e subsequentemente decomposta. Ao revenir esta martensita tratada criogenicamente, ocorre à precipitação de finos carbonetos e, devido a esta distribuição mais homogênea na martensita revenida, aumenta-se a resistência e tenacidade na matriz martensítica e, conseqüentemente, a resistência ao desgaste, Collins e Dormer (1997).

Embora a transformação da austenita – martensita e a precipitação de carbonetos sejam mencionados com frequência como a principal justificativa dos efeitos do tratamento criogênico, estas não se constituem como a única explicação satisfatória, pois há uma ampla variedade de materiais cuja resposta a baixas temperaturas não pode se explicar desse modo. As teorias mais plausíveis apontam a eliminação de tensões e pequenos defeitos a nível microcristalino, os quais proporcionam estruturas mais homogêneas e contínuas, Wurzbach e Defelice (2003).

4. EXPERIMENTO – MÉTODOS E RESULTADOS

Um ensaio de tração foi realizado em uma empresa do setor metalúrgico, foram utilizados dois corpos de prova de cada tipo de aço ferramenta (sem tratamento, têmpera convencional, subzero e criogênico). Uma vez que o corpo de prova estava fixado, um extensômetro tipo “clip gage” era fixado na região de teste. Desta forma foi possível registrar para cada teste a deformação verdadeira, a carga aplicada e o deslocamento do travessão. Após o carregamento atingir um valor de máximo e começar a cair consistentemente (detectado automaticamente pela máquina Instron) indicando o início da estricção, o equipamento parava e o “clip-gage” era removido, e o ensaio então prosseguia até a ruptura final do corpo de prova.

A preparação de amostras e corpos de prova para os ensaios de tração, foram feitas a partir de uma barra circular de aço SAE 4140, com $1/2''$ de diâmetro

A seção de teste dos corpos de prova apresentou diâmetros diferentes para cada um deles, dentro dos limites previstos pela norma ASTM E8-00 M, apresentados a seguir, Tab. (1).

Tabela 01 – Dimensões de trabalho dos corpos de prova testados.

TRATAMENTO TÉRMICO	d Inicial (mm)	L_0
Sem tratamento (1)	5,04	37,93
Sem tratamento (2)	5,05	35,70
Convencional (1)	4,43	39,17
Convencional (2)	4,43	42,22

Subzero (1)	4,33	38,54
Subzero (2)	4,48	40,64
Criogênico (1)	4,02	41,72
Criogênico (2)	4,82	39,75

4.1 Preparação de amostras para ensaios de tração:

A determinação da composição química do aço em estudo foi realizada utilizando a espectrometria de emissão ótica. Foi utilizado o equipamento PMI-Master Pro e os resultados obtidos foram ilustrados na tabela a seguir, tab. (02).

Tabela 02 – Composição Química do aço em estudo (Percentual de volume)

Fe	C	Si	Mn	Cr
97,5%	0,437%	0,306%	0,823%	0,924%

4.2 Tratamento térmico convencional

No tratamento térmico dito convencional, as amostras, foram inicialmente submetidas à têmpera, após foram austenitizadas a temperatura de 850°C por 25 minutos. A escolha desta temperatura de austenitização deve-se ao fato de ser a faixa de temperatura que normalmente é utilizada em tratamento térmicos deste aço.

4.3 Tratamento subzero

As amostras submetidas ao subzero, foram resfriadas a - 82 °C por 48 horas dentro de um freezer FORMA SCIENTIFIC - 72 HORIZONTAL. Após o tratamento duas amostras foram colocados em uma caixa de “isopor” até retornarem naturalmente à temperatura ambiente, e as outras duas amostras restantes seguiram para o tratamento criogênico profundo resfriando em nitrogênio líquido.

4.4 Tratamento criogênico profundo

As amostras do último lote, após o tratamento subzero foram imersas em nitrogênio líquido por 72 horas (dentro do container Locator 8 Termoonline), após o resfriamento, a uma temperatura de -196 °C, e depois deixadas também em caixa térmica para que retornassem suavemente à temperatura ambiente.

4.5 Ensaio de Tração

Da barra, na condição "como recebido", foram fabricados os corpos de prova para os ensaios de tração (conforme a norma ASTM E8-00 M). Embora a medida do diâmetro de alguns corpos de prova não tenha sido idêntica ao padrão, foram mantidas as razões recomendadas pela norma citada, validando assim os testes realizados. 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 0,2 mm por minuto com o objetivo de avaliar as mudanças nas propriedades mecânicas antes e depois do tratamento.

Os resultados fornecidos pelo ensaio de tração do material na condição de como recebido, serão comparados com os resultados obtidos do material após o tratamento térmico de tempera e revenido, subzero e criogênico profundo.

A figura 3 trata-se de um gráfico, cujas curvas de cor cinza se referem ao aço sem tratamento, a preta são dos corpos de prova submetidos ao tratamento térmico convencional, as vermelhas são associadas com os testes no material submetido ao tratamento subzero e as azuis com o criogênico.

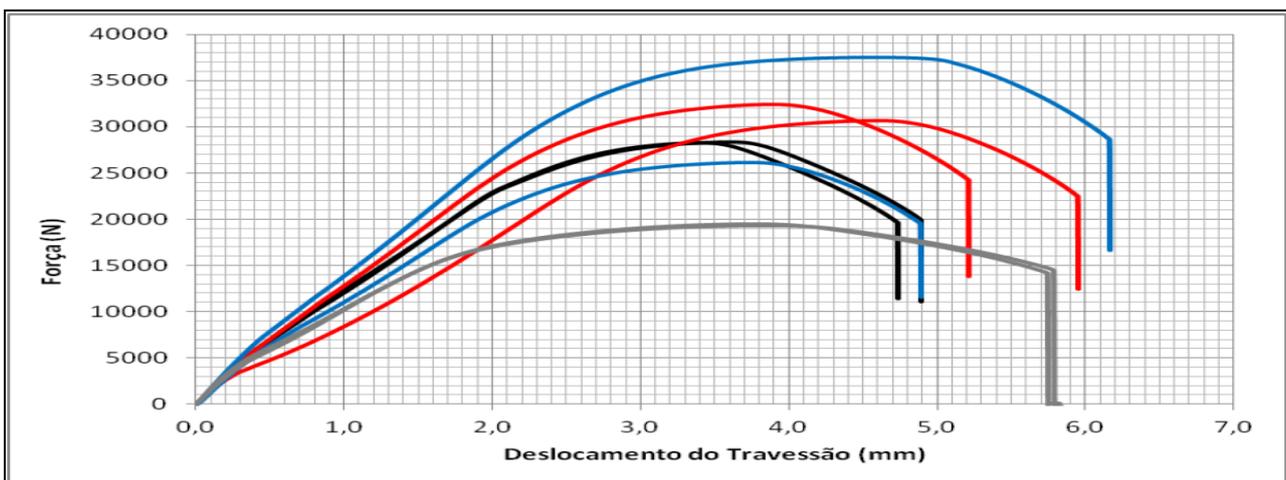


Figura 3 – Curvas Força x Deslocamento dos 6 corpos de prova estudados

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Pode se notar, após a análise do gráfico gerado pelo ensaio de tração realizado nas amostras, que de uma maneira geral todas as curvas mantiveram o mesmo aspecto, sendo apenas dissonante o segundo corpo de prova submetido ao tratamento subzero, que apresentou um formato com curvatura positiva na região elasto-plástica (0 a 3,0 mm). A inclinação da parte inicial do carregamento também foi bastante similar.

Percebe-se que o tratamento criogênico não só transforma a austenita retida em martensita, após o tratamento criogênico grande quantidade da austenita retida é transformada em martensita e subsequentemente decomposta. Ao reaver esta martensita tratada criogenicamente, ocorre à precipitação de finos carbonetos e, devido a esta distribuição mais homogênea na martensita revenida, aumenta-se a resistência e a tenacidade na matriz martensítica e, conseqüentemente, a resistência ao desgaste, e a resistência a tração.

Ao final conclui-se que a transformação da austenita – martensita e a precipitação de carbonetos, é a principal justificativa dos efeitos do tratamento criogênico. Os principais materiais utilizados em processos de estampagem a frio, quando submetidos a tratamentos criogênicos, melhoram de maneira satisfatória suas propriedades mecânicas, e diminuem as tensões internas que surgem após o tratamento térmico de têmpera, portanto é uma alternativa eficaz.

O presente estudo, serve como base para futuros trabalhos, pois este é um assunto que se mostrou muito promissor, principalmente nas indústrias do setor metalúrgico, devido aos ganhos em resistência nos aços ferramenta, porém deve-se pensar na viabilidade dos processos, por serem ainda pouco difundidos, não existem processos padronizados, e equipamentos específicos para a produção em massa, de tratamentos criogênicos.

6 REFERÊNCIAS

- Alexandru, I. et al (1990), “Influence de Traitements Thermiques à Basse Température Sur La Durée de Vie des Aciers à Outils à Coupe Rapide Très”, Mémoires et Etudes scientifiques Revue de Metallurgie, June, pp. 283-388.
- Callister, W. D. J. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7a ed. Utah: John Wiley & Sons, 2008.
- Collins, D.; Domer J. Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel. Heat Treatment of Metals, v. 3, p. 71-74, 1997.
- Canale, L. C. F.; Mesquita, R. A.; Totten, G. E. Failure analysis of heat treated steel components. 1ª. ed. Ohio: ASM International, v. 1, 2008.
- Chiaverini Vicente, Aços e Ferros Fundidos, 6ª edição, Associação Brasileira de Metais (ABM), São Paulo, 1988
- Collins, D. N. Deep cryogenic treatment of tool steels: a review. Heat Treatment of Metals, v. 23, n. 2, p. 40-42, 1996.
- Collins, D.; Domer J. Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel. Heat Treatment of Metals, v. 3, p. 71-74, 1997.
- Huang, J.Y., Zhu, Y. T., Liao, X. Z., Beyerlein, I. J., Bourke, M. A., Mitchell, T. E. (2003). Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel. Materials. In: Science and Engineering, V.339, p.241-244.
- Krauss, G. Steels: heat treatment and processing principles. Ohio: ASM International, 1994.
- Moore, K. e Collins, D. N. (1993), “Cryogenic Treatment of Three Heat Treated Tools Steels”, Engineering Materials, Vol. 86-87. pp. 47-54.
- Reasbeck, R.B. (1989), “Improved Tool Life by the Cryotough Treatment”, Metallurgia, April, n4, pp. 178-179.
- Reed-Hill. R. E.; Princípios de Metalurgia Física, 2ª ed., p 620 – 633, 1982
- Roberts, G. A. and Cary, R. A (1980), “Purpose and Effect of Alloying Elements”, Tool steels, 4th edition, pp. 213-218.
- Silvio Eduardo, Análise das Propriedades Mecânicas e Estruturais do Aço SAE 4140 Submetido a Tratamento Criogênico 2012. Dissertação (Mestrado em Mecânica) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro). Rio de Janeiro, 2012
- Wurzbach R.N, W. DeFelice ,Improving component wear performance through cryogenic treatment. (2003).

Zhmud', E. S. (1980), "Improved Tool Life After Shock Cooling", Translated from Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov, num.10, pp. 3-5

7 DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.