

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ESTRUTURAIS DO AÇO AISI/SAE 4140 SUBMETIDO A TRATAMENTO CRIOGÊNICO*

Letícia Gomes Mathias Netto Lima¹
Eline Tourinho Rasma²
Carlan Ribeiro Rodrigues³
Eduardo Atem de Carvalho⁴

Resumo

Propriedades mecânicas podem ser melhoradas por meio de tratamentos térmicos, isso foi demonstrado por meio de estudos ao longo dos anos. O tratamento criogênico tem demonstrado que pode melhorar as propriedades dos aços temperados e revenidos, ao se reduzir a presença da austenita residual e ao promover a precipitação de microcarbonetos. Nesse contexto o presente trabalho, pretende realizar tratamentos de resfriamento e criogenia, buscando melhorias nas propriedades de aços temperados e posteriormente revenidos. Foram preparados corpos de prova em aços SAE 4140 submetidos a tratamento térmico de têmpera (a 850°C), e após foi realizado o tratamento criogênico (-196°C) ou resfriamento (-82°). E por fim, as amostras passaram pelo processo de revenimento. O tratamento criogênico ou de resfriamento são procedimentos que costumam ser utilizados após o tratamento térmico de têmpera, estes consistem em submeter os materiais a temperaturas muito baixas durante períodos prolongados de tempo. Foi realizado ensaio de tração nas amostras já preparadas, assim foi possível realizar um estudo comparativo sobre as mudanças estruturais, morfológicas e mecânicas de um aço SAE 4140. Para as análises estruturais, morfológicas e mecânicas foram utilizadas técnicas de caracterização como microscopia ótica, difração de raios-X e microdureza.

Palavras-chave: Aço SAE 4140; Tratamento Criogênico; Propriedades Mecânicas.

ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURAL STEEL AISI / SAE 4140 SUBMITTED TO TREATMENT CRYOGENIC

Abstract

Mechanical properties can be improved by heat treatments, it has been demonstrated by studies over the years. The cryogenic treatment have shown that it can improve the properties of the quenched and tempered steels, to reduce the presence of residual austenite and promoting the precipitation of micro carbides. In this context, this work aims at conducting cooling treatments and cryogenics, seeking improvements in hardened steels properties and subsequently tempered. Samples were prepared in SAE 4140 steel heat treated for tempering (850°C) and was carried out after cryogenic treatment (-196°C) or cooling (-82 °). Finally, the samples passed through the tempering process. The cryogenic cooling treatment or procedures that are usually used after the tempering heat treatment, this consists in subjecting the material to very low temperatures for prolonged periods of time. Tensile test was performed on the samples already prepared, so it was possible to carry out a comparative study on the structural, morphological and mechanical changes of a steel SAE 4140. For structural, morphological and mechanical characterization analyzes were used techniques such as optical microscopy, X-ray diffraction and hardness.

Keywords: SAE 4140 steel; Cryogenic treatment; Mechanical properties.

- ¹ Engenharia Metalúrgica e de Materiais, graduanda, CCT/LAMAV, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.
- ² Licenciatura em Química, mestranda em Engenharia e Ciência dos Materiais, OEMM/LAMAV, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.
- ³ Tecnólogo em Manutenção Industrial, mestrando em Eng. e Ciência dos Materiais, Professor do ensino tecnológico, área industrial, Instituto Federal Fluminense (IFF), Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.
- ⁴ Engenharia Mecânica, PhD, Professor associado, OEMM/LAMAV, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O aprimoramento das propriedades mecânicas de um aço torna-se possível através do controle adequado da composição química e microestrutura do material. Muitos aços de baixa e média liga são submetidos a tratamentos térmicos com o propósito de serem utilizados para uma determinada aplicação estrutural. Deste modo, a partir da temperatura de austenitização, os aços sofrem ciclos de aquecimento e resfriamento, ao longo de todo o tratamento. [1]

O presente trabalho tem como objetivo o estudo comparativo das estruturas, morfologia e propriedades mecânicas do aço SAE 4140, empregado na indústria após tratamento subzero e criogênico profundo, seguido de revenimento.

O tratamento criogênico (TC) submete os materiais a temperaturas muito baixas durante longos períodos de tempo, e é normalmente utilizado após o tratamento térmico de têmpera no material. É um tratamento de custo relativamente baixo e não só afeta a superfície, como todo o volume do material, garantindo a manutenção de suas propriedades ao longo de toda a vida. [2-4]

Este processo visa melhorar as propriedades mecânicas de aços temperados e revenidos, aumentando a resistência ao desgaste, o aumento da vida a fadiga, a redução da tensão residual, o aumento da dureza, a melhora da condutividade térmica, o aumento da estabilidade dimensional e o aumento na tenacidade e tensão de escoamento. [3]

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 [5].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O material analisado no presente trabalho foi o aço de médio carbono SAE 4140, adequado de acordo com a norma ASTM E8-00M. O material foi fornecido pela Vectra Metal Comércio de Aços e Metais.

Os corpos de prova têm características especificadas de acordo com as normas técnicas. A preparação dos corpos de prova se deu a partir de uma barra circular dos aços SAE 4140. Foram retirados 15 corpos de prova (CP's) com ½" de diâmetro, para sofrer os tratamentos térmicos. As cabeças são as regiões extremas do corpo de prova, que possuem roscas, figura 1, e foram fixadas nas agarras da máquina de ensaio mecânico de tração, de modo que a força atuante na máquina fosse axial. Nas agarras, foram utilizados dispositivos anti-escorregamento desenvolvido no nosso próprio laboratório pelo técnico e engenheiro Carlan Rodrigues.



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

2.2 Métodos

Todas os CP's foram inicialmente submetidos à têmpera. Foram austenitizados a temperatura de 850°C por 25 minutos, a uma taxa de 10°C/min. Em seguida, foi feita a imersão no óleo de têmpera HYDRATEMP AC de forma homogênea, onde, todo o conjunto foi imerso, de uma vez só, continuamente agitados por cerca de 10 minutos, seguido de resfriamento natural até a temperatura ambiente, sendo isso possível, devido ao suporte de aço inox, figura 2. Após, o primeiro lote, foi separado, para que sofresse o revenimento, para a obtenção do tratamento convencional.



Figura 2: CP's submetidos à têmpera

2.2.1 Tratamentos térmicos aplicados nas amostras

Os 15 corpos de prova iniciais, utilizados para o ensaio de tração, foram divididos em três lotes, após o tratamento térmico de têmpera, e distribuídos da seguinte forma:

- ✓ O primeiro lote (com 5 amostras): foi separado para sofrer tratamento térmico convencional, têmpera e na sequência o revenimento.
- ✓ O segundo lote (com 5 amostras): após o tratamento térmico de têmpera, foi então submetido ao tratamento térmico subzero, e em seguida o revenimento.
- ✓ O terceiro lote (com 5 amostras): após o tratamento térmico de têmpera, foi submetido ao tratamento térmico criogênico profundo, e após o revenimento.



Figura 3: CP's dispostos no suporte, preparados para sofrer o tratamento térmico.

Para o tratamento Subzero, os CP's foram resfriados, após a têmpera, à (-80°C) por 48 horas dentro de um freezer FORMA SCIENTIFIC - 72 HORIZONTAL, conforme

ilustrado na Figura 4. Após o tratamento, foram colocados em uma caixa de “isopor” até retornarem naturalmente à temperatura ambiente.



Figura 4: Freezer utilizado no experimento.

Já no tratamento Criogênico Profundo os CP's temperados, foram imersos em nitrogênio líquido por 72 horas (dentro do container Locator 8 Termoonline, ilustrado na Figura 5), a uma temperatura de (-196°C), e também foram deixados em caixa térmica para que retornassem suavemente à temperatura ambiente.



Figura 5: Container com Nitrogênio Líquido

Em seguida, todos os CP's foram reunidos novamente, para sofrerem revenimento a 200°C por 25 minutos, a uma taxa de 10°C/min.

- Caracterização da Estrutura e Morfologia

2.3 Análise Difratométrica

A análise por difração de raios X baseia-se na equação de Bragg que verifica a relação bem definida entre os parâmetros cristalográficos das fases cristalinas e os parâmetros difratados observados:

$2d\sin\theta = n\lambda$, onde:

- ✓ λ é o comprimento de onda de raios X incidentes;
- ✓ θ é o ângulo de difração;
- ✓ d é a distância interplanar dos planos cristalográficos que originam a difração;
- ✓ n é o número de ordem de reflexão.

A análise por difração de raios X foi feita com o objetivo de identificar as fases presentes nas ligas. O equipamento utilizado para esta análise é o difratômetro RIGA KU modelo ULTIMA IV com radiação de Cu-K α filtrada, disponível no LCFIS/UENF.

2.4 Ensaio de Tração

Da barra, na condição “como recebida”, os CP's foram fabricados e em seguida tratados termicamente para a realização do ensaio de tração (conforme a norma

ASTM E8-00M). 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 foram comparados entre os materiais que sofreram o tratamento térmico convencional, subzero e criogênico profundo.

2.5 Dureza

Após a realização de todas as rotas de tratamento térmico e dos ensaios de tração, foi feita a medição da dureza realizada com um durômetro do tipo PAMTEC série 1246 do fabricante PANAMBRA, modelo RBSM, Figura 32, de acordo com a norma ASTM E18-94 – Método-Padrão de Ensaio para Dureza Rockwell de Materiais Metálicos.

Utilizou-se um penetrador cone com ângulo de 120°, uma pré-carga de 98N (10kgf) e uma carga (força total) de 150kgf, com o tempo de aplicação a cerca de 6 segundos. Para uma média estática, para cada tratamento térmico, foram feitas três medidas em cada corpo de prova.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 1: Valores obtidos para as propriedades mecânicas.

Tratamento Criogênico					
Propriedades	CP#10	CP#16	CP#17	CP#18	Média
σ_{esc}	1660	1640	1620	1600	1630
σ_{max}	1840	1800	1748	1700	1774
σ_{rup}	1840	1800	1748	1700	1774
σ_{prop}	1318	1180	1220	1100	1200
E	183	184	177	190	184
$\sigma_{esc}/\sigma_{max}$	0,90	0,91	0,93	0,94	0,91
ϵ (%)	3,3	2,4	2,8	2,7	2,7
ΔA (%)	0,6	0,4	0,7	0,4	0,4
U_R	4,7	3,8	4,2	3,2	3,8
U_T	23,4	20,6	23,4	22,5	22,5

Tratamento Sub						
Propriedades	CP#3	CP#6	CP#7	CP#8	CP#9	Média
σ_{esc}	1580	1610	1610	1610	1640	1610
σ_{max}	1580	1780	1680	1660	1660	1660
σ_{rup}	1580	1780	1680	1660	1660	1660
σ_{prop}	1080	1040	1200	1140	1120	1120
E	212	200	203	193	200	200
$\sigma_{esc}/\sigma_{max}$	1	0,9	0,96	0,97	0,99	0,97
ϵ (%)	1,44	2,06	2,02	0,46	1,5	1,5
ΔA (%)	0,54	0,91	0,18	2,36	1,45	0,91
U_R	2,75	2,7	3,54	3,36	3,14	3,14
U_T	11,9	17,34	16,96	11,02	12,8	12,8

Tratamento Convencional					
Propriedades	CP#0	CP#1	CP#11	CP#19	Média
σ_{esc}	1640	1590	1600	1700	1620
σ_{max}	1740	1760	1830	1920	1795
σ_{rup}	1740	1760	1830	1920	1795
σ_{prop}	1160	1130	1200	1310	1180
E	197	202	185	196	196,5
$\sigma_{esc}/\sigma_{max}$	0,94	0,9	0,87	0,89	0,895
ϵ (%)	2,22	0,63	1,53	4,79	1,875
ΔA (%)	0,93	2,18	0,18	1,99	1,46
U_R	3,42	3,16	3,9	4,39	3,66
U_T	19,03	22,6	20,35	28,22	21,475

3.1 Comportamento das curvas de tensão x deformação

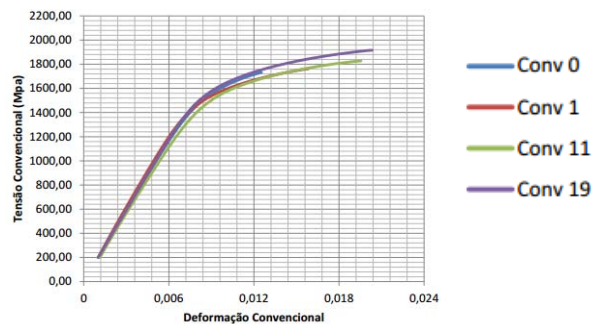


Figura 6: Curvas Tensão Convencional x Deformação convencional - tratamento convencional.

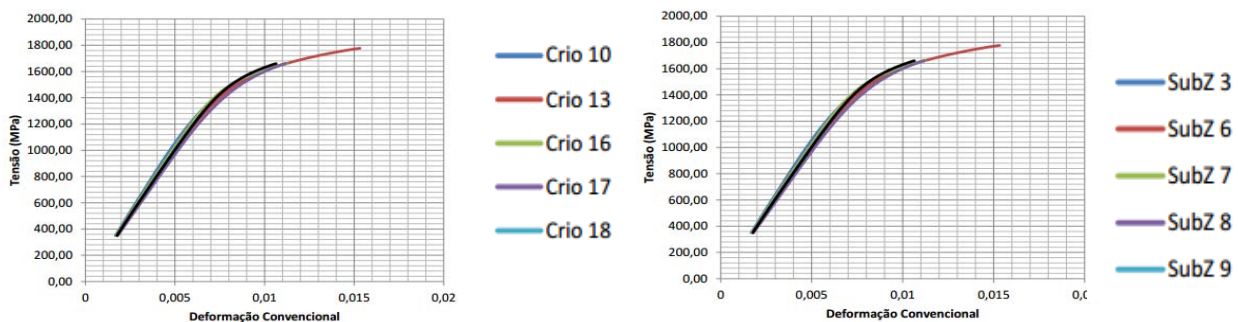


Figura 7: Curvas Tensão Convencional x Deformação convencional - tratamento subzero (à esquerda) e tratamento criogênico (à direita).

Observou-se que as curvas 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.

3.2 Módulo de Elasticidade

O Módulo de Elasticidade (E), ou Módulo de Young, pode ser considerado como rigidez, ou uma resistência do material à deformação elástica (Callister, 2013).

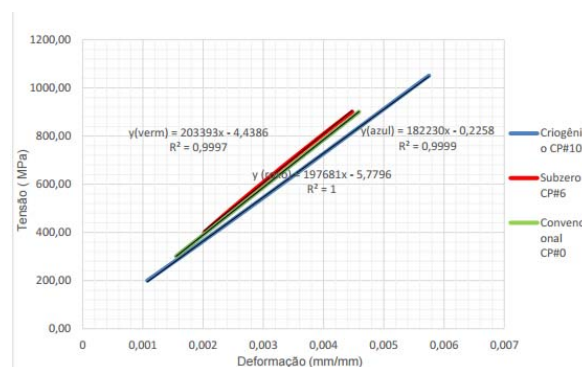


Figura 8: Gráfico módulo de elasticidade comparado entre os tratamentos propostos.

A partir dos dados 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 redução do módulo de

elasticidade, perante os outros tratamentos. Isto significa que o material quando submetido ao tratamento criogênico, tornou-se menos rígido, obtendo uma maior deformação elástica para um mesmo nível de tensão no material estudado.

3.3 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 ou 0,2% da origem do eixo das deformações. A importância do limite de escoamento para um metal é a medida de sua resistência à deformação plástica. Portanto, pode-se observar pela Tabela 1, que o tratamento criogênico proporcionou um pequeno aumento da resistência à deformação plástica do material. Entretanto, esses valores não tiveram diferença significativa para o aço.

3.4 Limite de Resistência à Tração e Limite de Ruptura

A tensão máxima (σ_{max}) ocorre quando a carga atinge o ponto máximo de carregamento, que por sua vez, é imediatamente anterior ao início da estricção e, portanto da queda da carga, caracterizada por uma rápida redução local da seção de fratura. A tensão de ruptura por sua vez, é a última tensão suportada pelo material antes da fratura. O limite de resistência permaneceu praticamente inalterado entre os tratamentos subzero e criogênico, entretanto, a média do tratamento convencional, foi maior em relação aos outros tratamentos, assim como na literatura.

O limite de ruptura 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 estricção. O que não aconteceu para este material, sendo possível identificar nos gráficos de Força x Deslocamento para cada tratamento, Figura 9 e Figura 10, que a ruptura do material ocorre no mesmo ponto que a tensão máxima ocorre, demonstrando que, apesar da natureza do material ser considerada dúctil, o material apresentou pouca deformação plástica.

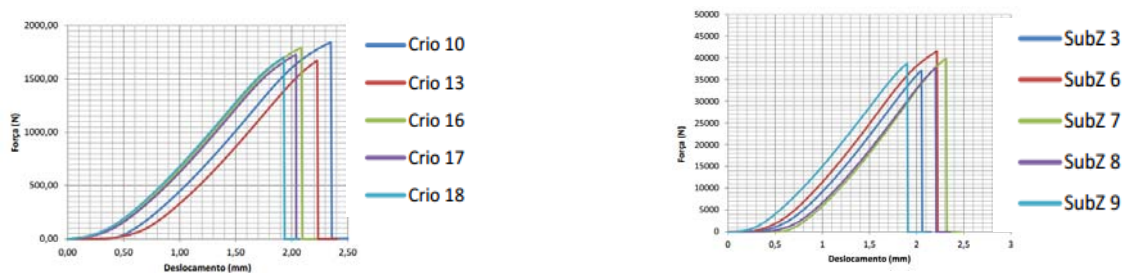


Figura 9: Gráfico Força x Deslocamento - tratamento criogênico (à esquerda) e tratamento subzero (à direita).

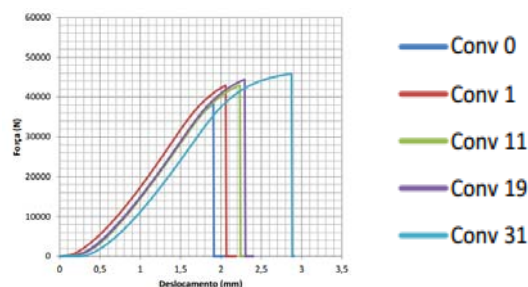


Figura 10: Gráfico Força x Deslocamento – tratamento convencional.

3.5 Elongamento dos Corpos de Prova (EL%) e Redução de Área (RA%)

A ductilidade pode ser expressa quantitativamente tanto como um alongamento percentual quanto como uma redução percentual na área. Partindo-se da hipótese 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. Esse resultado pode ser verificado na tabela 1 e nas curvas de tensão deformação (figuras 7 e 8).

3.6 Módulo de Resiliência e Módulo de Tenacidade

Resiliência é a capacidade de um material absorver energia quando deformado elasticamente e liberá-la quando descarregado. Já tenacidade corresponde à capacidade que o material apresenta de absorver energia até a fratura. Portanto, nota-se, pelos gráficos e tabelas, que não houve nenhum ganho significativo em relação aos tratamentos aplicados. Todos eles obtiveram valores próximos, podendo-se afirmar que, o aço ensaiado apresenta o fenômeno de transição dúctil frágil, o que é típico dos aços ferríticos.

3.7 Dureza

Os valores do ensaio dureza Rockwell C estão apresentados na Tabela 2 para cada tratamento térmico estudado. Observa-se que, praticamente, não houve variação significativa na dureza das amostras. A diferença entre as durezas obtidas se deve ao intervalo de erro do equipamento. Dessa maneira, pode-se tomar que os tratamentos térmicos não influenciaram nesta propriedade mecânica do material.

Tabela 2: Valores da medição de dureza para os tratamentos aplicados.

Dureza – Rockwell C	Têmpera	Convencional	Subzero	Criogênico
Medição A (HRC)	63	59	59	62
Medição B (HRC)	62	61	61	62
Medição C (HRC)	63	61	61	63
Média (HRC)	63	60	60	62

3.8 Difração de Raio-X

Para todos os tratamentos, as análises indicam a presença de ferrita (ferro – α) e de martensita, representada por ferro α' , nos difratogramas. Como pode ser observado, na Figura 13, fez-se uma comparação entre os tratamentos térmicos estudados. Observa-se que não houve nenhuma variação significativa na composição fásica do material em relação aos tratamentos aplicados.

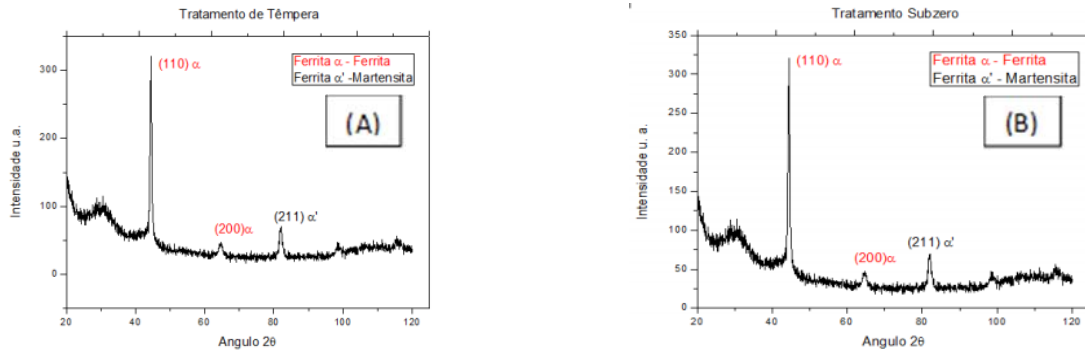


Figura 11: Difratoograma de raios X do aço SAE 4140 submetido ao tratamento de têmpera (A) e tratamento subzero (B).

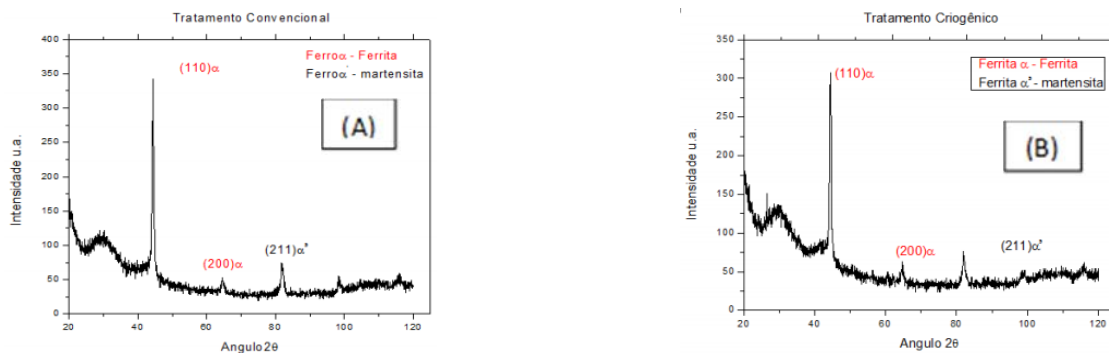


Figura 12: Difratoograma de raios X do aço SAE 4140 submetido ao tratamento convencional (A) e tratamento criogênico (B).

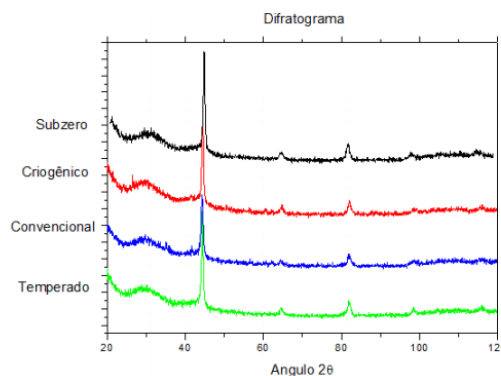


Figura 13: Difratoogramas das amostras submetidas a todos os tratamentos em estudo.

4 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o tratamento criogênico não apresentou uma grande variação nas propriedades mecânicas, ao compararmos com os outros tratamentos térmicos realizados no presente trabalho. As propriedades mecânicas do tratamento criogênico que prevaleceram sobre os outros tratamentos foram redução do módulo de elasticidade (que significa que o material tornou-se menos rígido, obtendo uma maior deformação elástica) e aumento da resistência à deformação plástica do material (limite de escoamento). A tensão máxima no tratamento convencional foi maior em relação aos outros tratamentos, como afirma a literatura. Já as outras propriedades, como a tenacidade, a dureza e a análise de Raio-x não tiveram nenhuma variação significativa em relação aos tratamentos aplicados. Isso significa

que, o tratamento criogênico deve ser realizado, quando se quer obter uma determinada propriedade do material, ou quando é requerida uma determinada aplicação, onde as propriedades obtidas pelo tratamento criogênico, sejam adequadas a tal aplicação.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio a esta investigação por parte das agências brasileiras: CNPq, CAPES, FAPERJ e UENF.

REFERÊNCIAS

- 1 Callister WDJ. (2008) Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7a ed. Utah: John Wiley & Sons.
- 2 Chiaverini V. (2008) Aços e Ferros Fundidos, 7 ed. ABM, São Paulo.
- 3 Novikov I. (1994) Teoria dos tratamentos térmicos dos metais. Editora UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 439, 457, 550p.
- 4 Senthilkumar D, Rajendran I, Pellizzari M, Siirainen J. (2011). "Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the residual state of stress of 4140 steel." Journal of Materials Processing Technology 211(3): 396-401.
- 5 Reed-Hill RE. (2008) Princípios de Metalurgia Física, 2ª ed ABM, São Paulo.
- 6 ASM Handbook. (1990) Properties and selection: Irons, Steel and HighPerformance Alloys. 10ª ed. USA: ASM International.