



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE TRATAMENTOS
TÉRMICOS NAS VARIAÇÕES
MICROESTRUTURAIS DO AÇO SAE 4340**

Por,

Lucas Gomes Sevale

Brasília, 09 de Dezembro de 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NAS VARIAÇÕES MICROESTRUTURAIS DO AÇO SAE 4340

POR,

Lucas Gomes Sevale

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ ENM
(Orientador)

Prof. Palloma Vieira Muterle, UnB/ ENM (Co-
Orientador)

Prof. Cosme R.M.da Silva, UnB/ ENM (Examinador
Interno)

Brasília, 09 de DEZEMBRO de 2014

Dedicatórias

Dedico também este trabalho ao senhor Roberto. Que Deus esteja sempre confortando o seu coração, pela morte do seu filho FREDERICO REGIS SILVA, que era um exemplo de ser humano, e seria também um exemplo de engenheiro mecânico.

Dedico este trabalho aos meus pais Sergio e Fatima por sempre me darem apoio e força para que pudesse realizar esse sonho. Que sempre nas horas de dificuldades me mostravam que deveria erguer a cabeça e seguir em frente e me mostravam o quão capaz era de realizar esse sonho. Esse sonho sem vocês nunca se concretizaria.

In Memoriam, Frederico Regis Silva

Lucas Gomes Sevale

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a DEUS, por me dar saúde e força para realizar essa importante etapa da minha vida!

Agradeço aos meus pais, Sergio e Fatima, sem a ajuda de vocês nunca iria conseguir realizar esse sonho.

Aos meus irmãos Sergio Junior e Vanessa, pela companhia e dedicação comigo, vocês fazem parte desta história.

Aos meus sobrinhos Yago e Ysabella, por sempre compartilharem momentos de alegria.

A minha namorada Lara, pelo carinho, amor e companheirismo.

Ao professor Jorge e a professora Palloma, por acredita que era possível realizar o projeto.

Aos meus amigos por sempre partilhar momentos de alegrias e tristezas durante a graduação.

*Quando os caminhos são duros
Só os duros continuam caminhando
E a história não perdoa os fracos
“Anônimo”*

Lucas Gomes Sevale

RESUMO

Esse projeto procura avaliar o efeito do nível de austenita retida na alteração da dureza e dos microconstituintes do aço SAE 4340, tratado termicamente. A metodologia de avaliação adotada será, tratamentos térmicos, ensaios de dureza, difratometria de raio-x, microscopia ótica e análise química. Para avaliar todas as alterações que o aço sofreu após os tratamentos térmicos, todas as etapas da metodologia serão realizadas a fim de investigar as alterações. Assim espera-se observar que a medida em que os tratamentos térmicos forem sendo realizados, o aparecimento de bainita com os tratamentos térmicos, e a austenita retida que tem estrutura cristalina FCC se transformara em martensita (TCC) por difusão térmica.

ABSTRACT

This project seeks evaluate the effects of austenite levels retained in the changes of hardness and the composition of steel SAE 4340, thermal treated. The evaluation methodology used will be thermal treatment, hardness tests, x-ray diffraction, optics microscopy and chemical analysis. To evaluate all the changes suffer by the steel after the thermal treatments, all the methodology steps will be made in order to investigate the changes. Thus, it is expected notice that at the same time the thermal treatments are being made, the retained austenite, which has crystalline structure, will change in ferrite (CCC) by thermal diffusion.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2	OBJETIVO	1
1.3	METODOLOGIA	2
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2	REVISÃO TEORICA	3
2.1	AÇOS AO CARBONO	3
2.1.1	Aços ao Carbono	3
2.1.2	Aços Ligas e Aço SAE 4340 Com Suas Aplicações	5
2.1.3	Microestrutura do aço SAE 4340	6
2.1.3.1	Austenita	7
2.1.3.2	Bainita	8
2.1.3.3	Ferrita	8
2.1.3.4	Martensita	9
2.1.3.5	Perlita	9
2.2	TRATAMENTOS TÉRMICOS	9
2.2.1	Recozimento	10
2.2.2	Têmpera	13
2.2.3	Revenido	13
2.2.4	Sub Zero	14
3	MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	16
3.2	OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS	17
3.2.1	O CORTE	17
3.2.2	CORTES DOS CORPOS EM SISTEMA RADIAL E LONGITUDINAL	17
3.3	TRATAMENTOS TÉRMICOS	18
3.4	ANALISE METALOGRAFICA	21
3.4.1	Lixamento	21

3.4.2	Polimento	21
3.4.3	Ataque Químico	22
3.4.4	Microscopia	22
3.5	DIFRATOMETRIA DE RAIIO-X	22
3.6	ENSAIO DE DUREZA	22
4	RESULTADOS.....	24
4.1	ANALISES DAS DUREZAS	24
4.2	DIFRATOMETRIA DE RAIIO-X	27
4.3	METALOGRAFIA.....	29
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	34
5.1	CONCLUSÕES	34
5.2	TRABALHOS FUTUROS	35
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
	ANEXO II	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de transformação por resfriamento contínuo de um aço AISI 4340, com curvas de resfriamento superpostas, de modo a indicar as várias microestruturas que podem ser obtidas (CHIAVERINI 1998).....	Erro! Indicador não definido.
Figura 2: Possíveis transformações envolvendo a decomposição da austenita. As setas contínuas representam transformações que envolvem difusão; a seta tracejada envolve uma transformação onde a difusão está ausente.	Erro! Indicador não definido.
Figura 3: Influência do Recozimento sobre diversas estruturas	Erro! Indicador não definido.
Figura 4: O diagram de fases ferro-carbeto de ferro na vizinhança do eutetóide, indicando as faixas de temperatura do tratamento térmico para aços comuns ao carbono. (CALLISTER, 2002).....	12
Figura 5: Curva TTT do aço SAE 4340 onde: A, austenita; B, bainita; P, perlita;	Erro! Indicador não definido.
Figura 6: Corpos de prova, I amostra “A”, II amostra “B”.....	17
Figura 7: Planos utilizados na avaliação da dureza do material.....	18
Figura 8: Bancada para tratamento térmico sub zero.....	19
Figura 9: Método de lixamento com trabalho em sentido alternados.	21
Figura 10: Metalografias das Amostras não tratadas termicamente radial 1 e 2.....	30
Figura 11: Metalografias das Amostras não tratadas termicamente longitudinal 1 e 2.	30
Figura 12: Amostras tratadas termicamente por normalização radial 1 e 2.	31
Figura 13: Amostras tratadas termicamente por normalização longitudinal 1 e 2.....	31
Figura 14: Amostras tratadas termicamente por recozimento radial 1 e 2.....	32
Figura 15: Amostras tratadas termicamente por recozimento longitudinal 1 e 2.....	32
Figura 16: Amostras Tratadas Termicamente por tempera-revenido.....	33
Figura 17: Amostras Tratadas Termicamente por Sub Zero	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sistema SAE e AISI de classificação dos aços (Silva & Della Coletta, 1989).....	4
Tabela 2: Composição química do aço SAE 4340.....	16
Tabela 3: Composição Química do Aço SAE 4340 certificado pela TORK.	16
Tabela 4: Temperaturas medidas ao longo do do tratamento térmico subzero utilizando um Termopar Tipo E.	20
Tabela 5: Resultados dos Ensaio Radiais de Dureza HRC.....	24
Tabela 6: Resultados dos Ensaio Longitudinais de Dureza HRC.....	25
Tabela 7: Resultados dos Ensaio HRC.	27
Tabela 8: Resultados das Durezas Mediante Tratamentos Térmicos.....	34

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Símbolos Latinos

Q – Carga	[Kgf]
D – Diâmetro	[mm]
d - Calota Esférica	[mm]
L - Impressão Losango Regular	[mm]
HRC – Dureza Rockwell	
HBB – Dureza Brinell	
DRX – Difractometria de Raio-X	
CCC – Cubica Corpo Centrado	
CFC – Cubica de Face Centrada	
TTT – Tetragonal de Corpo Centrado	

Siglas

SAE - Society of Automotive Engineers
AISI - American Iron and Steel Institute
NTT - Não Tratado Termicamente
TTN - Tratado Termicamente Normalizado
TTR - Tratado Termicamente Recozido
TTT-R – Tratado Termicamente Temperado e Revenido
TTS-Z – Tratado Termicamente Sub Zero
DRX – Difractometria de Raio - X

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta informações básicas do que será abordado neste trabalho.

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

O aço é normalmente tomado como referencial de comparação para os materiais estruturais emergentes. O que frequentemente não é considerado é que este referencial está sempre em mudança, com as contínuas e notáveis descobertas feitas no campo do ferro e suas ligas. Essa é a razão pela qual o aço se mantém como o mais bem-sucedido material, com mais de uma bilhão de toneladas consumidas anualmente, contribuindo para uma melhor qualidade de vida (BHADESHIA, 2004).

Usualmente, aços são elementos utilizados em praticamente todos os projetos de engenharia, fazendo com que vários estudos sejam realizados para que se conheça cada vez mais as suas características. Em especial, o aço liga SAE 4340 utilizado neste trabalho, o qual possui vasta aplicabilidade na indústria automotiva, petrolífera e na construção naval, devido a capacidade que este tipo de material tem de conseguir suportar tensões dinâmicas (SEVALE 2014).

As propriedades mecânicas de uma liga metálica são função da respectiva composição química e do tratamento térmico ao qual foi submetida (isto é, a temperatura e o tempo de aquecimento à temperatura do tratamento e a taxa de resfriamento até a temperatura ambiente). Estes fatores impõem uma dada microestrutura ao material, a qual será responsável pelas propriedades finais do mesmo. Portanto, um controle adequado na composição química e no tratamento térmico ao qual será submetido é fundamental para que seja possível otimizar as propriedades mecânicas do aço (Callister, 2008).

A fim de avaliar as alterações nas propriedades mecânicas do aço liga SAE 4340, serão realizados tratamentos térmicos com tempo e temperatura controlada, com o objetivo de avaliar o quanto que cada tratamento influenciará no comportamento de dureza e dos seus microconstituintes.

1.2 OBJETIVO

A pesquisa em questão procura avaliar as alterações nos microconstituintes do aço SAE 4340 após os tratamentos térmicos de recozimento, tempera-revenido e sub zero; essas avaliações, serão realizadas através de ensaios de dureza, metalografia e difratometria de raio-x, após a realização de cada tratamento.

1.3 METOLOGIA

A metodologia adotada foi:

1 – Análise Química do Aço SAE 4340

2 - Fabricação de amostras tratadas termicamente (normalização e recozimento) para a avaliação da dureza e da microestrutura.

3 – Fabricação e Tratamento térmicos de recozimento, tempera e revenido e sub zero de corpos de prova;

4 – Avaliação dos constituintes das amostras do item 3, através da difratometria de raio-x;

5 - Realização de ensaios de dureza e microscopia ótica;

6 – Análise dos resultados;

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Agrupando todas essas informações, este trabalho se estruturará da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução;
 - ✓ Informações básicas do que será abordado neste trabalho.
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica;
 - ✓ Aço ao Carbono
 - ✓ Aço SAE 4340 e Suas Aplicações
 - ✓ Microestrutura do Aço SAE 4340
 - ✓ Tratamentos Térmicos
- Capítulo 3: Materiais e métodos;
 - ✓ Detalhamento de toda a caracterização, contendo informações específicas de cada equipamento que foi utilizado e métodos.
- Capítulo 4: Resultados;
 - ✓ Relatório dos resultados obtidos.
- Capítulo 5: Conclusão e Trabalhos Futuros;
 - Referências bibliográficas;
 - Anexos.

2 REVISÃO TEORICA

Este capítulo apresenta considerações gerais sobre aços ao carbono e aços ligas, seus constituintes, tratamentos térmicos.

2.1 AÇOS AO CARBONO

2.1.1 Aços ao Carbono

Aço é uma liga de Ferro-Carbono, produzido nas siderúrgicas por diferentes processos, e utilizado em praticamente todos os projetos de engenharia, principalmente na área de engenharia mecânica, variando sua aplicação de acordo com o teor de carbono que ele contém. De uma forma geral, os aços podem ser classificados da seguinte forma:

- Aços de baixo carbono “doce” contendo até 0.25% p.p. (percentual peso) Carbono, tem microestrutura de ferrita e perlita, e contém alta ductilidade, são bons para conformações mecânicas e soldagem, não são temperáveis e podem ser utilizados em construção de prédios, pontes, navios, automóveis.

- Aço de médio carbono “meio duro” contendo de 0.25% p.p. \leq Carbono \leq 0.50% p.p, são aços de boa temperabilidade em água, apresentam a melhor combinação de tenacidade, ductilidade, resistência mecânica e dureza, são os aços mais comuns, tendo inúmeras aplicações em construção, rodas e equipamentos ferroviários, engrenagens, virabrequins e outras peças de máquinas que necessitam de elevadas resistências mecânicas. São frequentemente utilizados na condição revenida com a microestrutura característica e denominada de martensita revenida. Possuem baixa endurecibilidade, no entanto, a adição de cromo, níquel e molibdênio melhoram a capacidade de serem tratadas termicamente dando origem a uma variedade de combinações resistência-ductilidade.

- Aço de alto carbono “duro” contém acima de 0,5% p.p. de carbono. Apresentam baixa conformabilidade e tenacidade, alta dureza e elevada resistência ao desgaste, quando temperados são frágeis. São comumente utilizados em trilhos, engrenagens, componentes sujeitos ao desgaste (martelo), tendo como propriedade a resistência ao desgaste e a abrasão.

Durante a solidificação dos aços, além das transformações principais de ferro, ocorrem concentrações não só de impurezas como também de carbono em certos pontos,

especialmente em bolhas. Essas concentrações apresentam-se na macrografia como pequenas manchas escuras, e quando examinadas ao microscópio, sem ataque, caracterizam-se frequentemente por um agrupamento de inclusões do tipo sulfureto, alumina, silicato e óxido globular. (COLPAERT 1983).

Para cada projeto deve-se utilizar um determinado aço específico, com um determinado percentual de carbono, e seus devidos elementos de liga, com o objetivo de obter um conjunto adequado de valores para as propriedades físico-químicas do material selecionado de modo a garantir a integridade da estrutura sob os mais diversos aspectos (por exemplo, garantir que a estrutura não falhe por escoamento, fratura, fadiga, corrosão, desgaste, etc e ainda tenha características adequadas de usinabilidade, conformabilidade, etc).

Os aços são classificados por, várias entidades sendo as mais comuns a "*American Iron and Steel Institute - AISI*", e "*Society of Automotive Engineers - SAE*"; que os classificam por números que descrevem: - o tipo do aço nos primeiros dois números, teor de carbono nos dois últimos números, tratamento térmico, elementos químicos tais como níquel, cobre, manganês e etc.; conforme mostrado na tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Sistema SAE e AISI de classificação dos aços (Silva & Della Coletta, 1989)

Designação		Tipos de Aço
SAE	AISI	
10XX	C 10XX	Aços-carbono comuns
11XX	C 11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil, com alto S
13XX	13XX	Aços manganês com 1,75% de Mn
23XX	23XX	Aços-níquel com 3,5% de Ni
25XX	25XX	Aços-níquel com 5% de Ni
31XX	31XX	Aços-níquel-cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	E 33XX	Aços-níquel-cromo com 3,5% de Ni e 1,57% de Cr
303XX	-	Aços resistentes à corrosão e ao calor ao Ni-Cr
40XX	40XX	Aços-molibdênio com 0,25% de de Mo
41XX	41XX	Aços-cromo-molibdênio com 0,5% ou 0,95% Cr e 0,12%, 0,2% ou 0,25% de Mo
43XX	43XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,82% de Ni, 0,5% ou 0,8% de Cr e 0,25% de Mo
46XX	46XX	Aços-níquel -molibdênio com 1,57% ou 1,82%de Ni, 0,2% ou 0,25 de Mo
47XX	47XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,05% de Ni, 0,45% de Cr e 0,20% de Mo
48XX	48XX	Aços-níquel -molibdênio com 3,5% de Ni, e 0,25% de Mo
50XX	50XX	Aços-cromo com 0,27%, 0,4% ou 0,5% de Cr
51XX	51XX	Aços-cromo com 0,8-1,05% de Cr
501XX	-	Aços de baixo cromo para rolamentos, com 0,5% de Cr
511XX	E511XX	Aços de médio cromo para rolamentos, com 1,02% de Cr
521XX	E521XX	Aços de alto cromo para rolamentos, com 1,45% de Cr
514XX	-	Aços resistentes à corrosão e ao calor ao Cr
515XX	-	Aços resistentes à corrosão e ao calor ao Cr
61XX	61XX	Aços-cromo-vanádio com 0,8% ou 0,95% de Cr e 0,1% ou 0,15% de V (mín)
86XX	86XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 0,55% de Ni, 0,5% ou 0,65% de Cr e 0,2% de Mo
87XX	87XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 0,55% de Ni, 0,5% de Cr e 0,25% de Mo
92XX	92XX	Aços-silício-manganês com 0,65%, 0,82%, 0,85% ou 0,87% de Mn, 1,40 ou 2% de Si e 0%, 0,17%, 0,32% ou 0,65% de Cr
93XX	93XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 3,25% de Ni, 1,2% de Cr e 0,12% de Mo
98XX	98XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,0% de Ni, 0,8% de Cr e 0,25% de Mo
950	-	Aços de baixo teor de em liga e alta resistência
XXBXX	XXBXX	Aços-boro com 0,0005% de B mín
XXLXX	CXXLXX	Aços-chumbo com 0,15-0,35% de Pb

2.1.2 Aços Ligas e Aço SAE 4340 Com Suas Aplicações

Com a crescente necessidade de aços com cada vez mais resistência mecânica, pesquisas levaram ao desenvolvimento de aços ligas chamados “ultra-resistentes” que segundo Malakondaiah, 1997, são considerados aços que possuem o limite convencional de elasticidade de no mínimo de 1 GPa. Desenvolvidos inicialmente para atender as indústrias aeronáutica, que trabalham com aços com resistência à tração na ordem de 2 GPa.

Os aços de alta resistência podem ser agrupados em três categorias em função de sua resistência à tração, são eles:

Alta liga: com percentuais de elementos de liga de, no mínimo, 10 a 12%; com isto não só as estruturas destes aços podem ser profundamente alteradas como igualmente os tratamentos térmicos comerciais sofrem modificações, exigindo técnicas e cuidados especiais, freqüentemente, operações múltiplas (CHIAVERINI, 1998). Empregados em componentes estruturais de aviões, vasos de pressão, componentes automotivos – exemplo aço AISI 18Ni Marage (250);

Média liga: limites de escoamento em torno de 1.705 MPa, resistência mantida até em torno de 700°C, revenido acima de 500°C de modo a se obter alongamento de cerca de 6%. Empregados em componentes gerais de aviões como engrenagens do trem de aterrissagem, eixos, parafusos, molas, componentes de bombas, estruturas de fuselagem e outros componentes estruturais de aviões (SILVA - 2006) - exemplo aço ABNT AF 1410.

Baixa liga: alcançando limites de escoamento entre 1.7 MPa e 2.3 MPa com tenacidade satisfatória. Empregados em invólucro de motores de foguetes a propulsor sólido, canos de canhões, parafusos, pinos e componentes estruturais de aviões, eixos, engrenagens, etc. (LEE; SU, 1999) - exemplo aço SAE 4340

Os elementos de liga que entram na composição dos aços, tanto como resíduos de processos, como elementos adicionados, se comportam de formas diferentes em função das quantidades e das possíveis associações entre eles, exercendo diversas alterações nos comportamentos dos aços. Desta forma, através da variação dos elementos de liga, na composição dos aços, obtêm-se ligas com comportamentos totalmente diferenciados (SILVA - 2006).

Os efeitos dos elementos de liga nos aços e ligas especiais envolvem não apenas alterações nas fases ou constituintes presentes em equilíbrio, mas também na maneira e velocidade com

que estas fases se formam. Naturalmente, a presença de elementos de liga pode, além disto, alterar as próprias características das fases presentes (SILVA; MEI - 1988).

Essas alterações na composição química em aços ligas, são feitas a fim de aumentar a dureza e a resistência mecânica, conferir uniformidade na resistência em peças de grandes dimensões, aumentar a resistência ao desgaste, conferir à corrosão, melhorar a capacidade de corte e melhorar propriedades elétricas e magnéticas (CHIAVERINI, 1998).

O aço SAE 4340, utilizado neste trabalho, é classificado como um aço baixa liga de médio carbono com 0,4% p.p.. Possui na sua composição química Cromo (0,7 – 0,9%), Molibdênio (0,6 – 0,8%) e Níquel (1,65 – 2,0%), apresentando alta tenacidade, alta resistência quando tratado termicamente e com alta resistência à fadiga. São facilmente usinável nas condições recozido, normalizado e revenido e apresentam boa ductilidade, quando recozido, a maioria das operações de conformação são executadas nesta condição, podendo ser dobrado, repuxado ou estampado. Podem ainda ser soldados por fusão ou por resistência. Pré-aquecimento e pós-aquecimento devem ser efetuados quando se usam métodos tradicionais de soldagem. Pode ser forjado no intervalo de temperatura de 900 ~1230°C.

Tipicamente o aço SAE 4340 é utilizado na fabricação de virabrequins para aviões, tratores e veículos em geral, componentes estruturais, como trens de pouso para aeronaves, eixos para turbinas e geradores hidráulicos, rotores integrados para turbinas a vapor, pilões e hastes de martelo para forjamento em matriz fechada, luvas e árvores universais para laminadores, eixos para calandras, engrenagens, pinhões, eixos para britadores, cilindro externo, “hub” de elevação e “manifold” (SILVA – 2006).

2.1.3 Microestrutura do aço SAE 4340

Para se alcançar as microestruturas ótimas para as diversas aplicações, os aços baixa-liga como é o caso do aço AISI 4340, geralmente, são tratados termicamente por austenitização, tempera, e depois revenimento para melhorar as suas propriedades mecânicas. Eles são utilizados mais frequentemente na condição revenida, tendo as microestruturas da martensita.

Os aços comuns ao carbono com médio teor de carbono possuem baixas endurecibilidades e podem ser termicamente tratados com sucesso somente em seções muito delgadas e com taxas de resfriamento muito rápidas. Adições de cromo, níquel e molibdênio melhoram a capacidade dessas ligas de serem termicamente tratadas dando origem a uma variedade de combinações resistência-ductilidade. Essas ligas termicamente tratadas são mais resistentes do que os aços com baixo teor de carbono, porém com o sacrifício de ductilidade e tenacidade

(COSTA 2013). Na Fig. 1 é apresentado de forma ilustrativa o diagrama de transformação de fases por resfriamento contínuo o aço AISI 4340, conforme a figura 1.

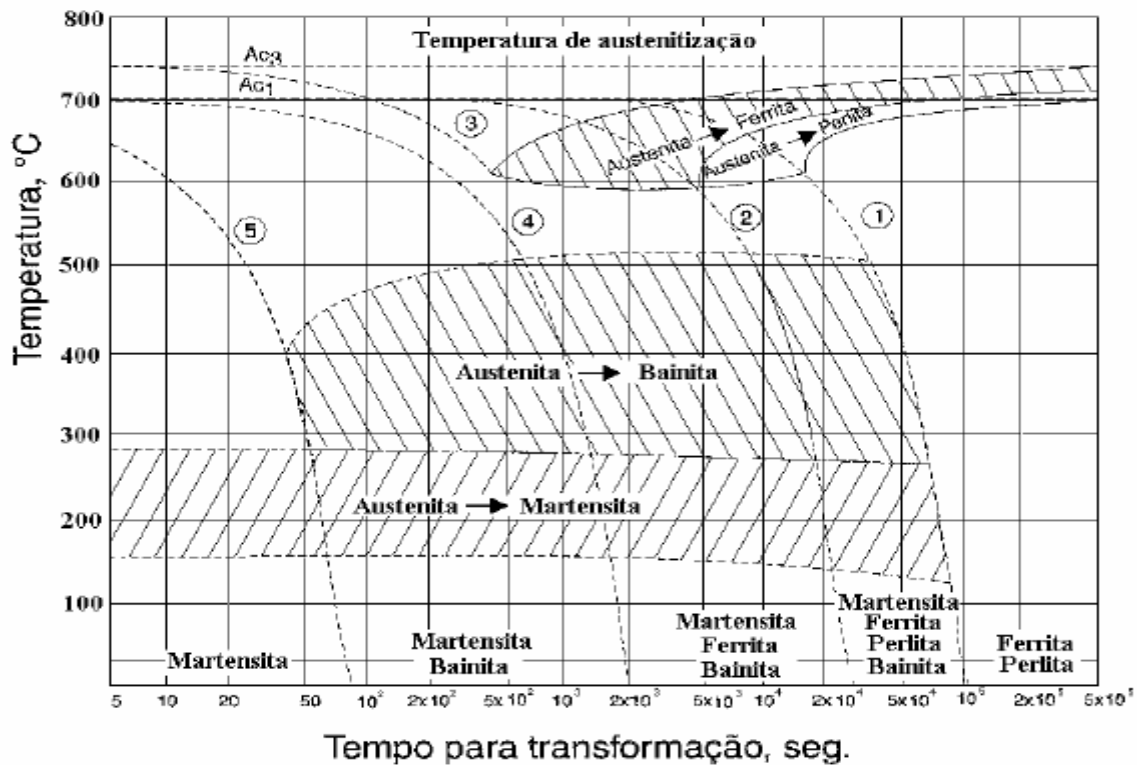


Figura 1: Diagrama de transformação por resfriamento contínuo de um aço AISI 4340, com curvas de resfriamento superpostas, de modo a indicar as várias microestruturas que podem ser obtidas (CHIAVERINI 1998).

Conforme pode se observar na Fig. 1, as fases encontradas nesse aço são as seguintes:

2.1.3.1 Austenita

É uma solução sólida de carbono no ferro gama. Apresenta-se ao microscópio, no caso de certos aços-liga, sob a forma de grãos aproximadamente poliédricos. Com os aços carbono não é possível obtê-la à temperatura ambiente (COLPAERT 1983). Aços-liga inteiramente autênticos não são atraídos pelo íman, pois o ferro neles existente está sob a forma gama, não possuindo a propriedade ferromagnética. Nos aços carbonos comuns, só é estável acima de 723°C, consta de uma solução sólida de carbono no ferro alfa, possui boa resistência mecânica e apreciável tenacidade (CHIVARENI 1979). A figura 2, mostra todas as possíveis transformações da austenita de acordo com o tipo de resfriamento (CALLISTER 2002).

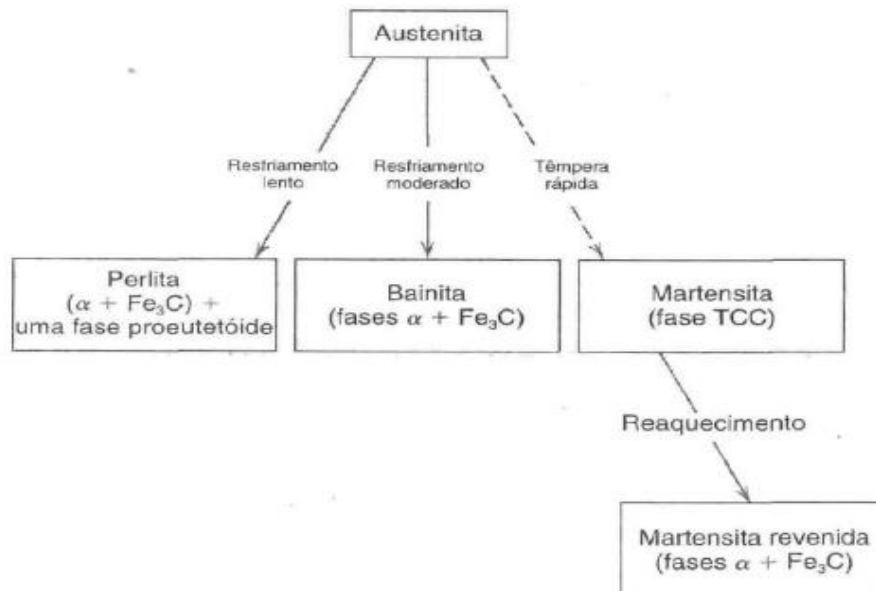


Figura 2: Possíveis transformações envolvendo a decomposição da austenita. As setas contínuas representam transformações que envolvem difusão; a seta tracejada envolve uma transformação onde a difusão está ausente.

2.1.3.2 Bainita

Sempre que a austenita se transforma em temperatura constante, acima da temperatura M_i e abaixo da temperatura de formação da perlita fina, aparece um produto de transformação denominado bainita, de aparência acicular (GROSSMAN; BAIN, 1972). Uma vez que os aços bainíticos possuem uma estrutura mais fina (isto é, partículas de ferrita α e Fe_3C menores), eles são, em geral, mais resistentes e mais duros do que os aços perlíticos; porém, ainda assim eles exibem uma combinação desejável de resistência e ductilidade (CALLISTER 2002).

2.1.3.3 Ferrita

Solução sólida de carbono no ferro- α e origina-se na zona crítica, durante o resfriamento, por transformação alotrópica do ferro gama. É a fase estável à temperatura ambiente. Pode-se neste estado, manter em solução sólida pequenas quantidades de impurezas (Si, P, Mn, etc.) e no máximo 0.022% de carbono, a 723°C (COLPAERT, 1983). Tem estrutura cristalina cúbica de corpo centrado “CCC”, até a temperatura 912°C, é um material ferromagnético a temperaturas inferiores a 768°C, possui densidade de 7,88 g/cm³, e dureza Brinell 80 (CHIAVERINI, 1965).

2.1.3.4 Martensita

Fase metaestável composta por ferro que está supersaturada com carbono que é o produto de uma transformação sem difusão (atérmica) da austenita. É formada quando ligas ferro - carbono austenitizadas são resfriadas rapidamente ou bruscamente (como no tratamento térmico de têmpera). É uma estrutura monofásica tetragonal de corpo centrado (TCC), resultante de uma transformação sem difusão de carbono. Das várias microestruturas que podem ser produzidas para uma dada liga de aço, a martensita é a mais dura, a mais resistente e, além disso, a mais frágil. Ela possui, na realidade, uma ductilidade desprezível. A sua dureza depende do teor de carbono, até aproximadamente 0,6%p (CALLISTER 2002). Na formação da estrutura martensítica há sempre uma expansão volumétrica, que é explicada pelo fato que o volume específico da martensita é maior que as outras microestruturas. A expansão volumétrica do metal aumenta com o aumento do conteúdo de carbono (ZAKHAROV 1962).

2.1.3.5 Perlita

A perlita é uma mistura específica de duas fases, formada pela transformação da austenita, de composição eutetóide, em ferrita e cementita (VAN VLACK,1970). É o constituinte micrográfico formado por finas lamelas justapostas de ferrita e de cementita e que ocorre abaixo de 723°C nas ligas ferro-carbono. Como a perlita é formada de lamelas moles de ferrita e outras duras de cementita, sua dureza é intermediária entre as duas. A proporção de cementita que intervém na perlita é aproximadamente de 1 para 6 de ferrita (COLPAERT 1983).

2.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Tratamentos térmicos são operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os materiais, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as propriedades dos materiais ou conferir-lhes características determinadas, através da modificação da estrutura cristalina e de elementos de ligas, ou inclusões que são inseridas no tratamento térmico (Rebecchi, 2011). As propriedades mecânicas dos aços são funções da sua microestrutura, que depende de variáveis tais como elementos de liga presentes, suas concentrações e o tratamento térmico da liga (isto é, a temperatura, o tempo de aquecimento à temperatura do tratamento e a taxa de resfriamento até a temperatura ambiente) e o revenido posterior (Chiaverini, 2008). Segundo (Rebecchi, 2011) os principais objetivos dos tratamentos térmicos são: i) - Aumento ou diminuição da dureza;

ii) Aumento da resistência mecânica; iii) Melhoria da ductilidade; iv) Melhoria da usinabilidade; v) Melhoria da resistência ao desgaste; vi) Melhoria das propriedades de corte; - Melhoria da resistência à corrosão; vii) Melhoria da resistência ao calor; viii) Modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

Em geral, a melhoria de uma ou mais propriedades, mediante um determinado tratamento térmico, é alcançada com prejuízo de outras. É necessário, portanto, que o tratamento térmico seja escolhido e aplicado criteriosamente, para que os inconvenientes sejam reduzidos ao mínimo (Chiaverini, 2008). Esta seção tem como objetivo abordar os tratamentos térmicos conhecidos e aplicados ao aço SAE 4340, bem como os fatores de maior relevância para sua realização e propriedades que podem ser modificadas.

2.2.1 Reozimento

O termo reozimento se refere a um tratamento térmico no qual um material é exposto a uma temperatura elevada por um período de tempo prolongado, sendo ele então resfriado lentamente. Normalmente, o reozimento é realizado com os objetivos de (1) aliviar tensões; (2) tornar o material mais mole, dúctil e tenaz; e ou (3) produzir uma microestrutura específica (CALLISTER, 2002).

O reozimento *apaga*, por assim dizer, as texturas resultantes de tratamentos térmicos ou mecânicos anteriormente sofridos pelo material porque, ao passar pela zona crítica, este se recristaliza sempre sob a forma de grãos normais de austenita, qualquer que seja a textura que apresente antes de atingir a referida zona no aquecimento conforme a figura 3 (COLPAERT, 1983). Segundo Callister - 2003 são relatados três espécies distintas de reozimento:

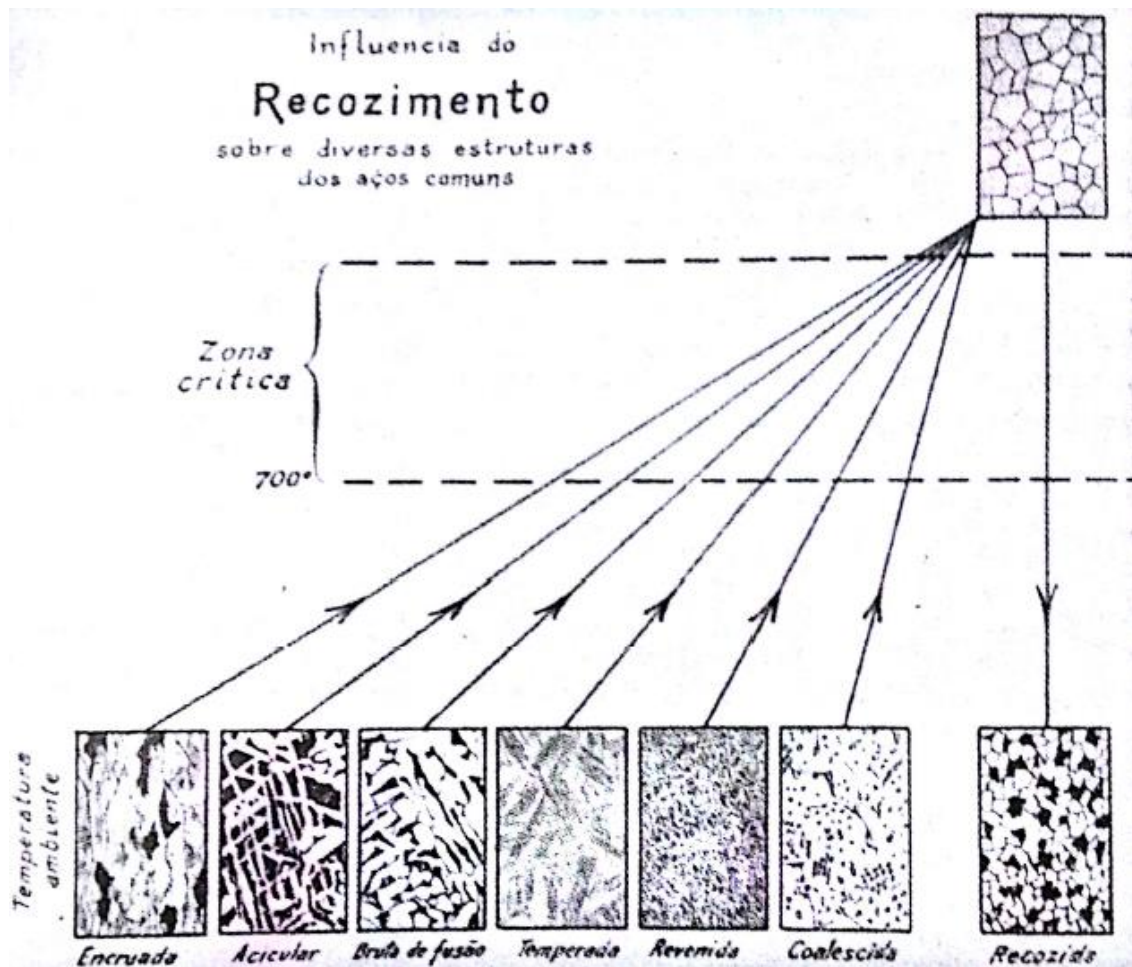


Figura 3: Influência do Recozimento sobre diversas estruturas dos aços comuns (COLPAERT, 1983).

Normalização

Consiste no aquecimento acerca de 100°C acima da zona de temperatura crítica, seguida de um resfriamento ao ar até a temperatura ordinária (Freire, 1983). Neste caso, pode-se admitir que a temperatura de aquecimento ultrapasse a linha A1 para aços hipoeutetóides, e para os aços hipereutetóides a linha Acm, conforme mostrado na figura 4. Como a velocidade de resfriamento é maior, alguns aços normalizados tendem ser menos dúcteis, e mais duros do que os plenamente recozidos, porém ocorrem diferenças significativas para teores acima de 0.5% p.p. de carbono. Os objetivos a serem alcançados nesse tratamento são:

- Refinar a granulação grosseira de peça de aço fundido principalmente;
- Uniformizar estrutura do material (após laminação, forjamento);
- Refinar estrutura (perlita mais fina);
- Reduzir a tendência ao empenamento no tratamento de têmpera;

(Chiaverini, 2008).

Recozimento Pleno

Consiste no aquecimento a cerca de 55°C acima da zona da temperatura crítica e resfriamento lento (Freire, 1983). Resfriado dentro do próprio forno, devido a isso, procedimento demora algumas horas. É usado com frequência em aços com teores baixos e médios de carbono que serão submetido a usinagem ou que irão experimentar uma extensa deformação plástica durante uma operação de conformação. A liga é austenitizada pelo seu aquecimento acima da linha A_3 ou A_1 , conforme indicado na figura 4 (CALLISTER, 2002). O processo de recozimento é realizado com o objetivo de induzir o aparecimento de grão pequenos e gerar o aparecimento de estrutura granular uniforme;

Recozimento Subcrítico

Consiste no aquecimento aquecimento abaixo ou muito próximo do limite inferior da zona de temperatura crítica, seguida por um resfriamento lento (temperatura de 550 a 650°C), (FREIRE, 1983). Os aços que sofrem recozimento subcrítico são moles, possuem um máximo de ductilidade, e são facilmente usinados ou deformados (CALLISTER 2007).

Para esses tipos de recozimento, temos um diagrama de fases que representar de forma esquemática os tipos de tratamentos com as devidas temperaturas, conforme a figura 4 abaixo.

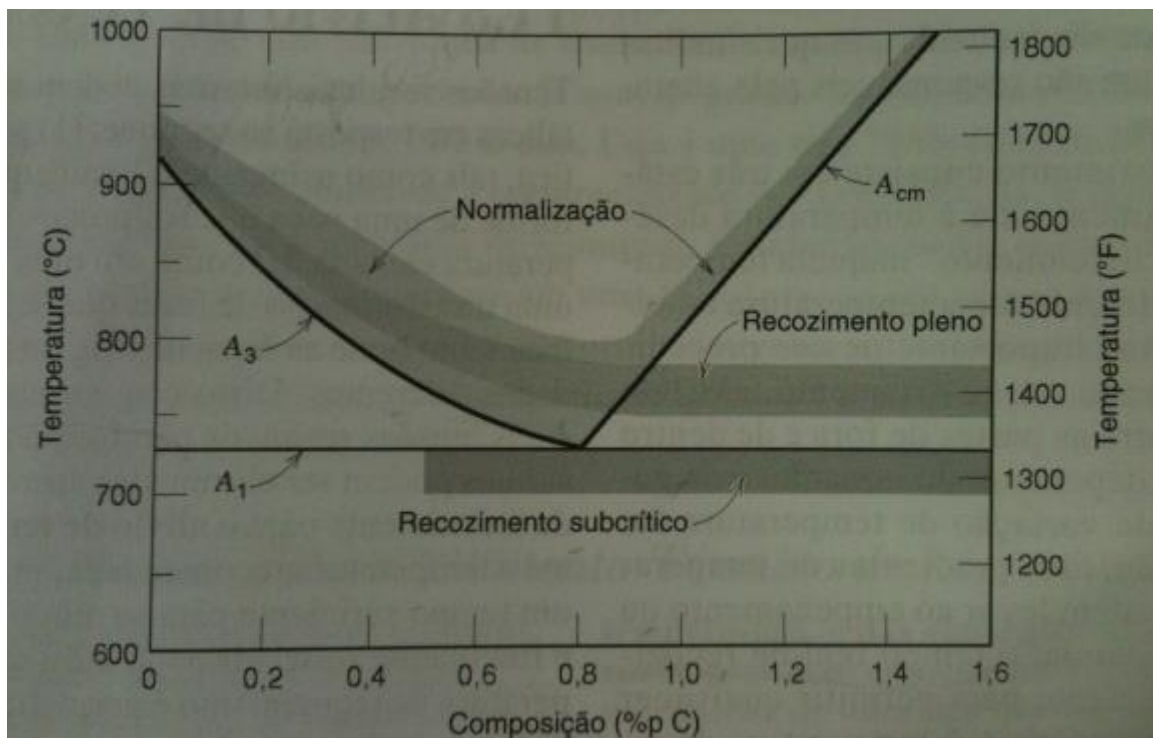


Figura 4: O diagram de fases ferro-carbeto de ferro na vizinhança do eutetóide, indicando as faixas de temperatura do tratamento térmico para aços comuns ao carbono. (CALLISTER, 2002).

2.2.2 Têmpera

A têmpera é o resfriamento rápido de um aço após o aquecimento acima da temperatura de austenitização em um meio de grande capacidade de resfriamento. O objetivo é transformar a austenita em martensita, que é o produto de maior dureza das transformações dos aços (Dufour, 2002). Esse é o tratamento térmico mais importante, pois é por intermédio dele, acompanhado pelo revenido, que se obtêm as estruturas e as propriedades que permitem o emprego do aço em peças de maior responsabilidade e em aplicações mais críticas, como as que se encontram na indústria mecânica, de transporte e de outros segmentos (Chiaverini, 2008).

A microestrutura obtida a partir de um tratamento térmico de têmpera e revenimento dependerá da taxa de resfriamento após austenitização. Se esta é rápida o suficiente o produto é a martensita. Caso contrário, produtos de transformação mais macios, tais como a bainita e a ferrita, são obtidos. A taxa de resfriamento é determinada em grande parte pelo meio de resfriamento utilizado, o qual pode ser salmoura, água, óleo, solução polimérica, sais fundidos ou ar, em ordem decrescente da capacidade de resfriamento (Dufour, 2002). As alterações das propriedades mecânicas são causadas pelas modificações da estrutura interna do aço. O resfriamento brusco impede a transformação normal, de modo que, por exemplo num aço de 0,9% p.p. de C, a austenita não se transforma em perlita, mas sim numa solução sólida supersaturada de carbono e ferro chamada Martensita. (J.M.Freire - 1983).

No aço SAE 4340, podemos observar conforme a figura 1, que a curva TTT, mostra que devido ao deslocamento da curva de transformação para a direita, o início da transformação ferrítica e bainítica sofrem um retardamento, devido aos elementos de liga, tendo então um maior tempo para se realizar a têmpera e forma martensita.

2.2.3 Revenido

A têmpera modifica profundamente as propriedades dos aços aumentando a dureza, resistência à tração, etc., mas, outras, como a resistência ao choque, o alongamento, a estrição, caem a valores muitos baixos. Além disso, o material fica com tensões internas apreciáveis.

O revenido é o tratamento térmico destinado aos aços previamente temperados (microestrutura martensítica), pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por este tipo de tratamento térmico (Chiaverini, 2008).

O aço revenido, além de apresentar tensões residuais consideravelmente menores, possui certa capacidade de alongar-se e assim, antes da fibra mais solicitada romper-se, ela se alonga, descarregando parte das tensões às fibras vizinhas, menos solicitadas (Freire,1983) (Colpaert, 1983). Segundo (SANTOS, 2006), para cada temperatura do revenido verificam-se as seguintes transformações:

- Entre 25 e 100°C, ocorre segregação ao uma redistribuição do carbono em direção a discordância; essa pequena precipitação localizada do carbono pouco afeta a dureza. O fenômeno é predominante em aços de alto carbono.

- Entre 100 a 250°C, às vezes chamado primeiro estágios do revenido – ocorre precipitação de carboneto de ferro do tipo épsilon, de fórmula Fe_2-3C , e reticulado hexagonal; este carboneto pode estar ausente em aços de baixo carbono e de baixo teor em liga; a dureza Rockwell C começa a cair, podendo chegar a 60.

- Entre 200 a 300°C, às vezes chamado de segundo estágio do revenido ocorre transformação de austenita retida em bainita; a transformação ocorre somente em aços-carbon de médio e alto teor de carbono; a dureza Rockwell continua a cair.

- Entre 400 a 600°C, ocorre uma recuperação da subestrutura de discordância; os aglomerados de Fe_3C passam a uma forma esferoidal, ficando mantida uma estrutura de ferrita fina acicular; a dureza Rockwell C cai para valores de 45 a 25.

- Entre 500 a 600°C, somente nos aços contendo Ti, Cr, Mo, V, Nb ou W, há precipitação de carboneto de liga; a transformação é chamada “endurecimento secundário” ou quarto estágio do revenido.

- Finalmente, entre 600 a 700°C, ocorre recristalização de crescimento de grão; a cementita precipitada apresenta forma nitidamente esferoidal; a ferrita apresenta forma equiaxial; a estrutura é freqüentemente chamada “esferoidita” e caracteriza-se por ser por muito tenaz e de baixa dureza, variando de 5 a 20 Rockwell C.

Podemos assim concluir que quanto maior o tempo e a temperatura de revenimento, menor será a dureza final.

2.2.4 Sub Zero

Nas últimas décadas, um interesse especial tem sido demonstrado pelos efeitos de baixas temperaturas (-80°C) no tratamento térmico dos aços. Estes tratamentos ficaram conhecidos como tratamento criogênico sub-zero (com o uso de metanol, gel seco ou freon) e têm por

objetivo transformar a austenita retida após a têmpera e melhorar a estabilização da martensita (Huang, 2003).

A utilização de diferentes ensaios sofisticados como MEV, EDS, raio X, assim como da simples microscopia ótica, tem comprovado essa transformação. As melhorias nos materiais também são baseadas no aparecimento de carbonetos, microcarbonetos e micronitreto devido às temperaturas extremamente baixas aplicadas e mantidas. A homogeneização das microestruturas e a redução das tensões internas completam o grupo de argumentos para justificar as gigantescas melhorias dos diferentes materiais (REASBECK, 1992).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A descrição dos materiais envolvidos nos testes realizados, bem como a metodologia e procedimentos aplicados é feita nesse capítulo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

O material utilizado para o desenvolvimento deste trabalho é o aço SAE 4340. Usualmente este aço é utilizado em componentes mecânicos em geral sob a ação de tensão dinâmica, ou seja, para fabricação de peças na indústria automotiva e na indústria petrolífera e construção naval. Com base nas informações da norma de referência do material, a composição química prevista segundo a norma “DIN W.Nr. 1.6565” é apresentado na tabela 2:

Tabela 2: Composição química do aço SAE 4340.

Composição Química	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%
	0.37-0.43	0.15-0.35	0.60-0.80	≤0.025	≤0.025	0.70-0.90	0.20-0.30	1.65-2.00

Para verificar, se a composição química do aço recebido estava conforme o que a norma ASTM A751 apresenta, foi enviado duas amostras para empresa “TORK-Controle Tecnológico de Materiais Ltda”, para realização da análise química. O resultado encontrasse na tabela 3.

Tabela 3: Composição Química do Aço SAE 4340 certificado pela TORK.

Elemento Químico	Norma (%) ASTM A 751	Certificado Fabricante	CP1	CP2
Carbono	0.37 - 0.43	0,4	0,39	0,4
Silício	0.15 - 0.30	0,28	0,27	0,3
Manganês	0.60 - 0.80	0,69	0,68	0,68
Fósforo	≤ 0.035	0,02	0,015	0,026
Enxofre	≤ 0.040	0,005	0,007	0,005
Cromo	0.70 - 0.90	0,82	0,77	0,82
Níquel	1.65 - 2.0	1,66	1,93	1,9
Molibdênio	0.20 - 0.30	0,21	0,22	0,22

Com as informações recebidas pela empresa TORC, juntamente com o comparativo com outra norma, podemos certificar que a composição química do aço estudado em questão, está dentro do padrão desejável, conforme o certificado que o fabricante dispõe.

3.2 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

3.2.1 O CORTE

As Amostras foram cortadas utilizando o equipamento do laboratório de materiais de engenharia mecânica conhecido como “cut-off”, ou policorte “STRUERS”, com discos abrasivos intensamente refrigerados, evitando deformações devido ao aquecimento ou a modificação da estrutura da amostra.

O disco utilizado foi “Diamond Cut-off Wheel – B0D20”, que conforme sua especificação é indicada para aços de elevada dureza. A errada seleção do disco de corte, causará um alto desgaste, juntamente com a perda do disco, ou até uma possível alteração da microestrutura do aço em questão. Após o corte, foram obtidas as seguintes amostras da figura 6, sendo definida como amostra I a maior, e amostra II a menor.

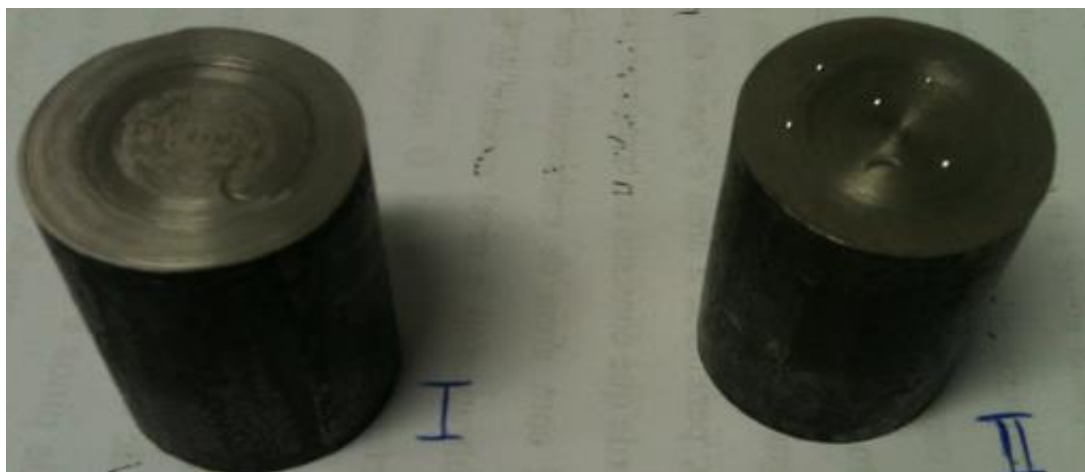


Figura 5: Corpos de prova, I amostra “A”, II amostra “B”.

3.2.2 CORTES DOS CORPOS EM SISTEMA RADIAL E LONGITUDINAL

Visando uma melhor avaliação do aço em questão, as amostras I e II foram novamente cortadas e redefinidas conforme a figura 7. Esses novos planos, possibilitaram um estudo das amostras tanto na posição radial, quanto longitudinal, possibilitando comparar as durezas e os constituintes do aço em questão conforme recebido e após os tratamentos de recozimentos.

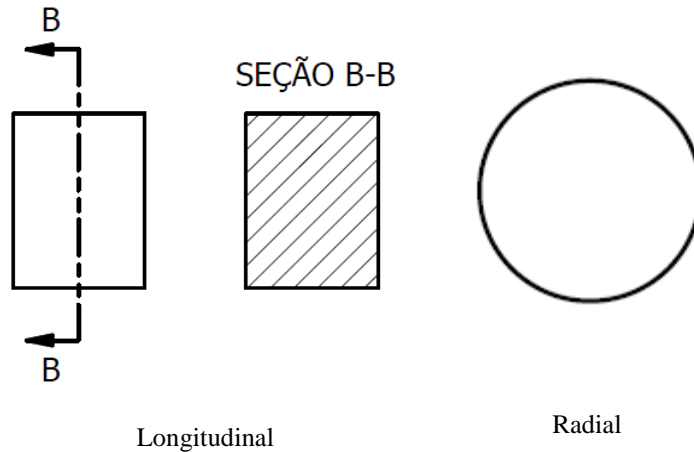


Figura 6: Planos utilizados na avaliação da dureza do material.

3.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Segundo a especificação deste tipo de aço, as temperaturas e os resfriamentos indicados para os tratamentos térmicos são:

- Normalização à 900°C, seguido por um resfriamento ao ar.
- Reozimento à 840°C, seguindo de um resfriamento no forno, não maior que 10 horas.
- Têmpera (830 – 850 °C), seguido por um resfriamento em óleo, para altas resistência (acima de 1350 MPa).
- Revenimento varia de acordo com o limite de resistência que se deseja obter:
 - -resistência próximos à 1800 MPa, revenimento será próxima à 230 °C;
 - -resistência entre (850 – 1350 MPa), revenimento será próxima à 500°C;

A partir dessas informações, foram realizados os seguintes tratamentos térmicos:

1ª Etapa

Normalização: Aquecendo a 900°C, retirando do forno e deixando a peça ser resfriada no ambiente por algumas horas.

Reozimento: Aquecendo a 850°C, e deixando resfriar a peça por algumas horas dentro do próprio forno.

2ª Etapa

Recozimento à 840°C, seguindo de um resfriamento no forno, não maior que 10 horas.

Têmpera: Aquecendo a 850°C, seguido de um resfriamento rápido em água.

Revenimento: Aquecendo a 600°C, seguido de um resfriamento lento no ar livre.

*Para a etapa 1 e 2, as amostras ficaram em isoterma por 2 horas.

3ª Etapa

Sub-Zero: Resfriamento com gelo seco à -80°C por 4 horas, medido com termopar tipo E “Cromel - Alumel”, conforme figura 8 abaixo, juntamente com os dados da tabela 4, que retratam as medições a cada 15 minutos de ensaio.



Figura 7: Bancada para tratamento térmico sub zero.

Tabela 4: Temperaturas medidas ao longo do do tratamento térmico subzero utilizando um Termopar Tipo E.

Tempo	Temperatura °C	Milivolts	Termopar gelo °C
Início	-76	-4.872	-76
15 minutos	-77	-4.802	-77
30 minutos	-77	-4.803	-77
45 minutos	-77	-4.803	-77
1 hora	-77	-4.803	-76
1 h e 15 minutos	-77	-4.794	-77
1 h e 30 minutos	-77	-4.801	-77
1 h e 45 minutos	-77	-4.802	-76
2 horas	-77	-4.802	-77
2 h e 15 minutos	-77	-4.802	-77
2 h e 30 minutos	-77	-4.805	-77
2 h e 45 minutos	-77	-4.809	-77
3 horas	-77	-4.803	-76
3 h e 15 minutos	-77	-4.798	-76
3 h e 30 minutos	-77	-4.784	-76
3 h e 45 minutos	-77	-4.779	-76
4 horas	-77	-4.779	-76
Média	-76,9	-4.802	-76,5

3.4 ANALISE METALOGRAFICA

3.4.1 Lixamento

Conjunto de operações realizado na amostra, que tem por objetivo eliminar riscos e marcar mais profundas da superfície dando um acabamento superficial, preparando a amostra lixa a lixa para o polimento, existindo dois processos de lixamento, o manual o automático, ambos úmido ou seco.

Devido ao alto grau de perfeição exigido no acabamento de uma amostra metalográfica idealmente preparada, é essencial que cada etapa da preparação seja executada cautelosamente, evidentemente, com isso é um dos processos mais demorados da preparação de amostras metalográfica.

O processo feito no laboratório, consistiu na técnica de lixamento semiautomático, e consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor (240-1200), mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior. Podemos analisar abaixo o processo que foi realizado no laboratório através da figura 8.

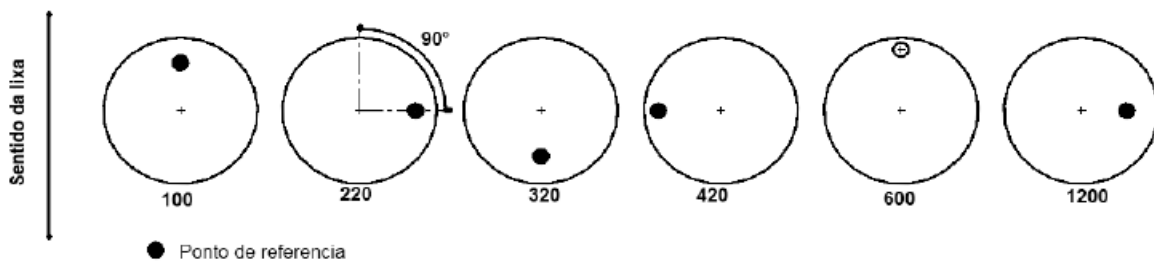


Figura 8: Método de lixamento com trabalho em sentido alternados.

3.4.2 Polimento

Após o lixamento deve-se ter um acabamento superficial polido isento de marcas. Para realizar o polimento deve-se garantir que a superfície da amostra esteja limpa, de modo a deixá-la isenta de traços abrasivos, solventes, poeiras e outros. Esta operação de limpeza pode ser feita simplesmente por lavagem com água, porém, aconselha-se usar líquidos de baixo ponto de ebulição (álcool etílico, fréon líquido, etc.) para que a secagem seja rápida. Dos processos existentes para a obtenção de uma superfície polida isenta de riscos, foi adotado o processo de polimento mecânico, que é realizado através de uma politriz.

A pasta abrasiva utilizado para polimento foi a pasta de diamante, devido as suas características de granulometria, dureza, forma dos grãos e poder de desbaste, juntamente com um pano de AL e CU, de granulometria abrasiva de 0,03 μ m.

3.4.3 Ataque Químico

Tem como objetivo permitir a identificação (visualização) dos contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura. Esse processo é realizado colocando-se um reagente ácido ou básico em contato com a superfície da peça entre 10 a 15 segundos, causando a corrosão da superfície. Os reagentes são escolhidos em função do material e dos constituintes microestruturais que se deseja contrastar na análise metalográfica microscópica, para o aço em questão foi escolhido o nital-10% (ácido nítrico 10% e álcool 90%).

3.4.4 Microscopia

O exame microscópico, com seus fatores de aumento, exige obviamente não só cuidados especiais, mas principalmente equipamento muito preciso e altamente especializado. A microscopia foi realizada para identificar a microestrutura do aço SAE 4340, após as etapas acima. O microscópio utilizado foi o “OLYMPUS-BX51” que possui lentes de aumento de 50x, 100x, 200x, 500x, 1000x, no departamento de engenharia mecânica SG-09.

Após as amostras passarem por todos os procedimentos anteriores, foram levadas a microscópio para fazer a análise de sua microscopia.

3.5 DIFRATROMETRIA DE RAIOS-X

Uma importante etapa do procedimento experimental, será a difratometria de raios-x, que permitirá realizar a identificação de fase no material, ou seja, percentual de seus constituintes, que posteriormente nos permitirá avaliar as mudanças sofridas no material utilizado. Foi utilizado um difratômetro de raios - x da marca Shimadzu, modelo XRD 6000, com os parâmetros operacionais de tensão de 30kV, corrente de 30mA e intervalo angular de varredura entre $10^{\circ} \leq 2\theta \leq 90^{\circ}$ com passo de 0,02 $^{\circ}$. As amostras utilizadas para análise de raios-X são cilíndricas e com dimensões de 2,5 cm de diâmetro e 1 mm de espessura, limpas com acetona.

3.6 ENSAIO DE DUREZA

Os ensaios de dureza realizados tiveram como objetivo avaliar a dureza entre as amostras sem tratamento térmico e com tratamento térmico, para verificar a influência que os tratamentos

térmicos causam na dureza do material. Para isso, foi utilizado o durometro Pantec modelo-RASN-RS, que se encontra no laboratório de engenharia mecânica da UnB, foi usado uma dureza HRC, com um penetrador cônico 120°, uma carga aplicada de 150 kgf, e um tempo de penetração de aproximadamente 15s.

1ª Etapa

Para avaliação após os tratamentos de recozimento e normalização, foram realizados ensaios tanto no sentido longitudinal, quanto no sentido radial das amostras, realizando 5 medidas em cada amostra e 5 medidas em cada plano.

2ª Etapa

Para avaliação após os tratamentos de têmpera-revenimento e sub zero, foram realizadas ensaios no sentido radial, realizando 5 ensaios depois dos tratamentos.

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISES DAS DUREZAS

1ª ETAPA

Os primeiros ensaios de durezas realizados nos corpos de provas, nos mostram as variações que o aço SAE 4340 teve após os tratamentos térmicos de normalização e recozimento. Essas alterações podem ser observadas através das tabelas 5 e 6 e os gráficos 1 e 2, que nos apresentam uma relevante diminuição da dureza após as amostras serem tratadas.

Tabela 5: Resultados dos Ensaio Radiais de Dureza HRC.

COM RECEBIDO			NORMALIZADO			RECOZIDO		
Posição	Amostra		Posição	Amostra		Posição	Amostra	
Radial	A	B	Radial	A	B	Radial	A	B
1	56	56	1	51	50,5	1	47,5	46
2	59	57	2	52	52,5	2	46,5	46,5
3	58,5	57,5	3	51,5	50,5	3	46,5	47
4	57,5	58	4	51	50	4	47	47
5	57,5	58,5	5	51,5	50	5	47	47,5
Média	57,7	57,4	Média	51,4	50,7	Média	46,9	46,8
Desvio Padrão	1,0	0,9	Desvio Padrão	0,4	0,9	Desvio Padrão	0,4	0,5
Cof. Var.	1,8%	1,5%	Cof. Var.	0,7%	1,8%	Cof. Var.	0,8%	1,1%

i. Plano Radial

Tratamentos Térmicos x Durezas

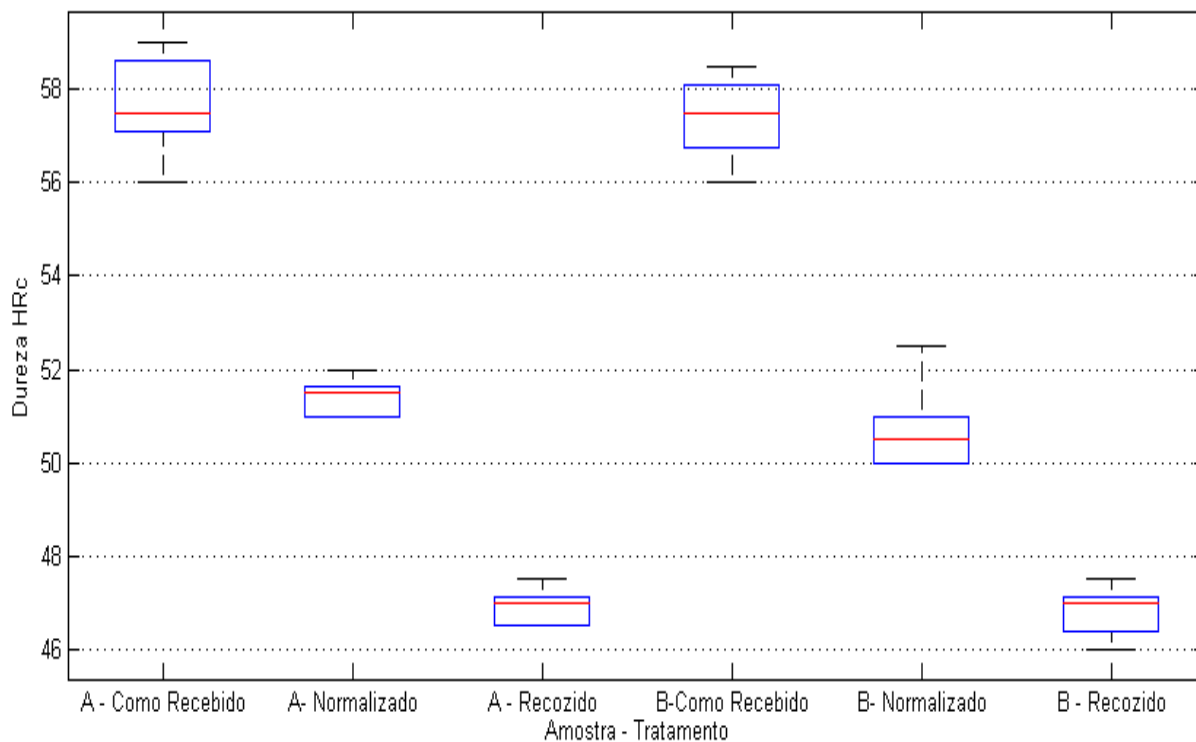


Gráfico 1 - Resultados de dureza radiais

Tabela 6: Resultados dos Ensaios Longitudinais de Dureza HRC.

Posição Radial	COM RECEBIDO		Posição Radial	NORMALIZADO		Posição Radial	RECOZIDO	
	Amostra			Amostra			Amostra	
	A	B		A	B		A	B
1	52	55,5	1	52	50,5	1	46,5	46
2	52,5	56	2	52,5	51	2	46	47,5
3	57	56,5	3	53	51	3	46,5	47
4	57,5	55	4	51,5	51,5	4	47,5	47
5	57	56	5	51,5	50,5	5	46	47,5
Média	55,2	55,8	Média	52,1	50,9	Média	46,5	47
Desvio Padrão	2,4	0,5	Desvio Padrão	0,6	0,4	Desvio Padrão	0,5	0,5
Cof. Var.	4,4%	0,9%	Cof. Var.	1,1%	0,7%	Cof. Var.	1,2%	1,2%

ii. Plano Longitudinal

Tratamentos Térmicos x Durezas

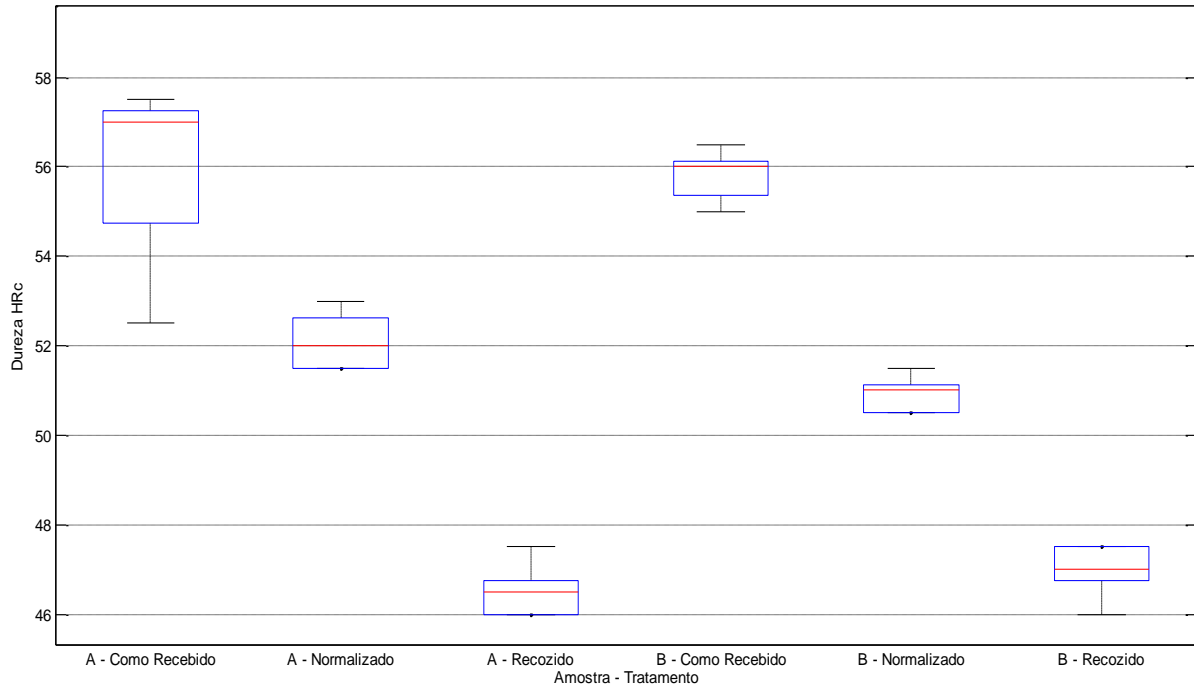


Gráfico 2 - Resultados de dureza longitudinal

Segundo (CALLISTER - 2002), os tratamentos térmicos de normalização e recozimento, tem como objetivos: (1) aliviar tensões; (2) tornar o material mais mole, dúctil e tenaz; e ou (3) produzir uma microestrutura específica; O recozido tem dureza menor, devido resfriamento no forno, deixando a estrutura mais grosseira que a normalização, justificando então a queda na dureza após serem realizados.

2ª ETAPA

Tendo em vista que os resultados das amostras A e B foram parecidos, foi adotado somente a amostra A na direção radial para realizar essa próxima etapa, uma vez que não houve mudanças microestruturais ao longo das amostras.

Os ensaios de dureza na amostra após tratamentos térmicos de recozimento, têmpera-revenido e sub zero, nos mostra as alterações que cada tratamento realiza na dureza do aço em questão, isso pode ser observado tanto pela tabela 7, quanto pelo gráfico 3, que representa a variação da dureza na escala HRC. Essas transformações, ocorrem devido aos seguintes fatores:

Tabela 7: Resultados dos Ensaio HRC.

Ensaio	Como Recebido	Recozido	Temperado-revenido	Sub Zero
1	58,0	46,5	54,0	52,0
2	58,5	46,0	53,5	52,5
3	59,0	46,5	54,5	53,0
4	57,5	46,0	54,0	51,5
5	58,0	47,0	53,0	52,5
Média	58,2	46,5	53,9	52,3
Desvio Padrão	0,5	0,50	0,4	0,5
Coef. Variação (%)	0,9	1,2	0,7	1,0

iii. Comportamento do SAE 4340 Mediante Tratamentos Térmicos

Tratamentos Térmicos x Durezas

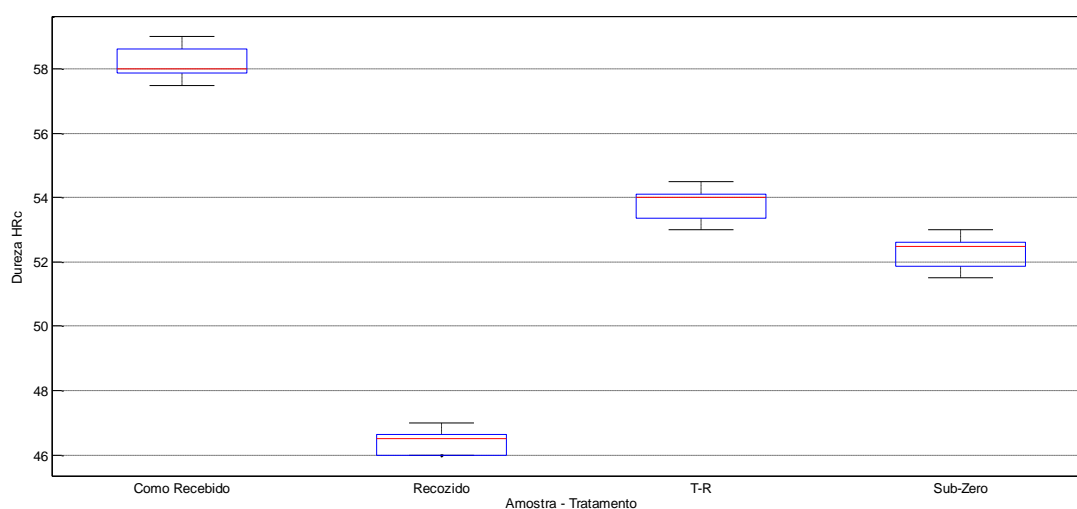


Gráfico 3 - Resultados de Dureza Após os Tratamentos Térmicos

- A têmpera tem o objetivo de transformar a austenita em martensita, que é o produto de maior dureza das transformações dos aços (Dufour, 2002).
- O revenido elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por este tipo de tratamento térmico (Chiaverini, 2008).
- O sub zero têm por objetivo transformar a austenita retida após a têmpera e melhorar a estabilização da martensita (Huang, 2003).

4.2 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

Para a comparação da estrutura cristalina antes e depois dos tratamentos térmicos de tempera-revenido e sub zero, foram feitas as análises por difração de raios-X, visando a identificação

dos constituintes obtidos após cada etapa de tratamento. O objetivo disso foi verificar se após o tratamento sub zero, será eliminado por completo a austenita que ficou retida mediante o tratamento de tempera. Para essas análises, foram comparados os picos ao longo dos processos do aço conforme recebido e após tratamentos.

No gráfico 4, está representado os constituintes do aço SAE 4340 como recebido. Esses constituintes, estão descritos de acordo com comparações de alguns trabalhos, tais como da BARATA – (2013), mostrando aonde está localizado cada constituintes durante o ensaio de difratometria de raio –X.

Ensaio de Difratometria de raio – X.

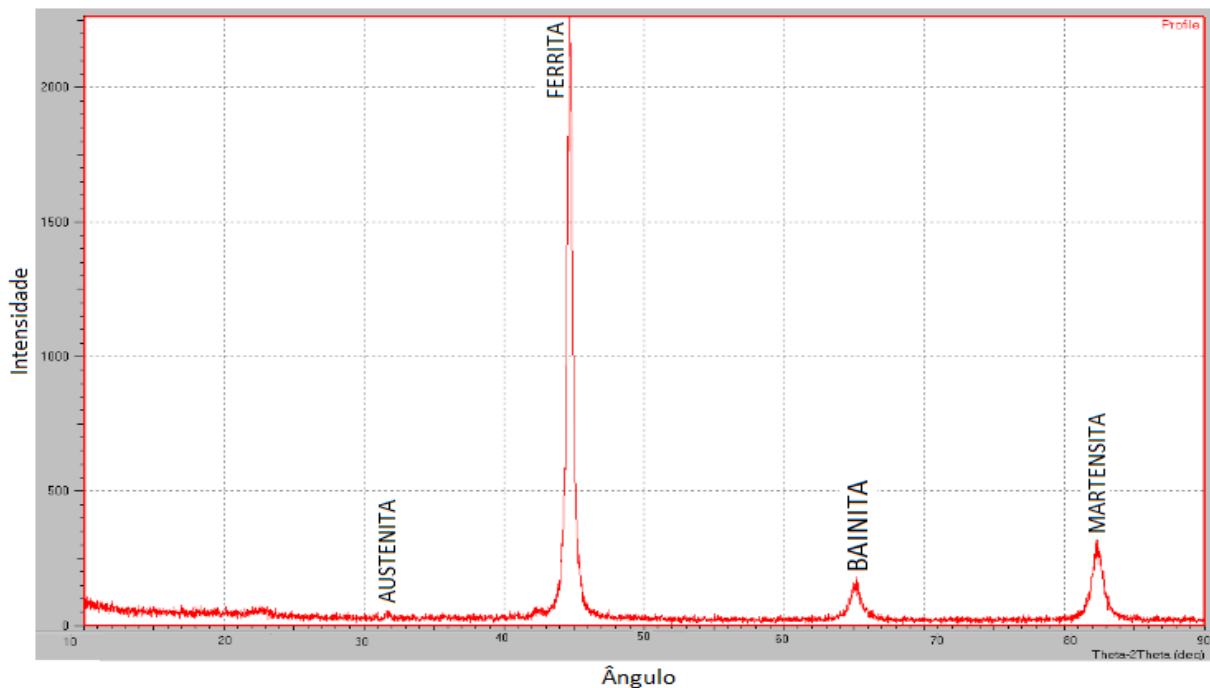


Gráfico 4 - Resultados dos constituintes do aço SAE 4340 conforme recebido

No gráfico 5, o tratamento de tempera tem como objetivos a transformação por difusão térmica da austenita em martensita, aumentando a dureza do material. Porém esse processo ainda contém alguns outros constituintes, conforme visto pelo primeiro pico do gráfico.

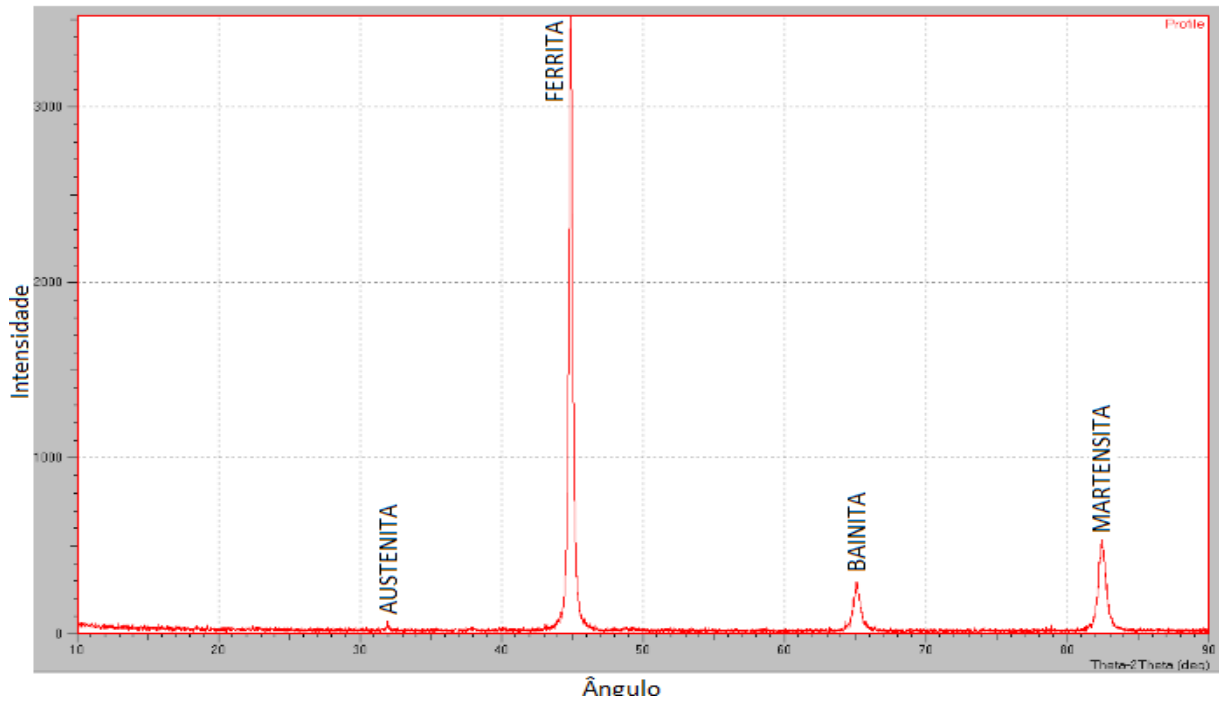


Gráfico 5 - Resultados dos constituintes do aço SAE 4340 têmpera-revenido

No gráfico 6, o tratamento sub zero consiste na transformação da austenita retida em martensita.

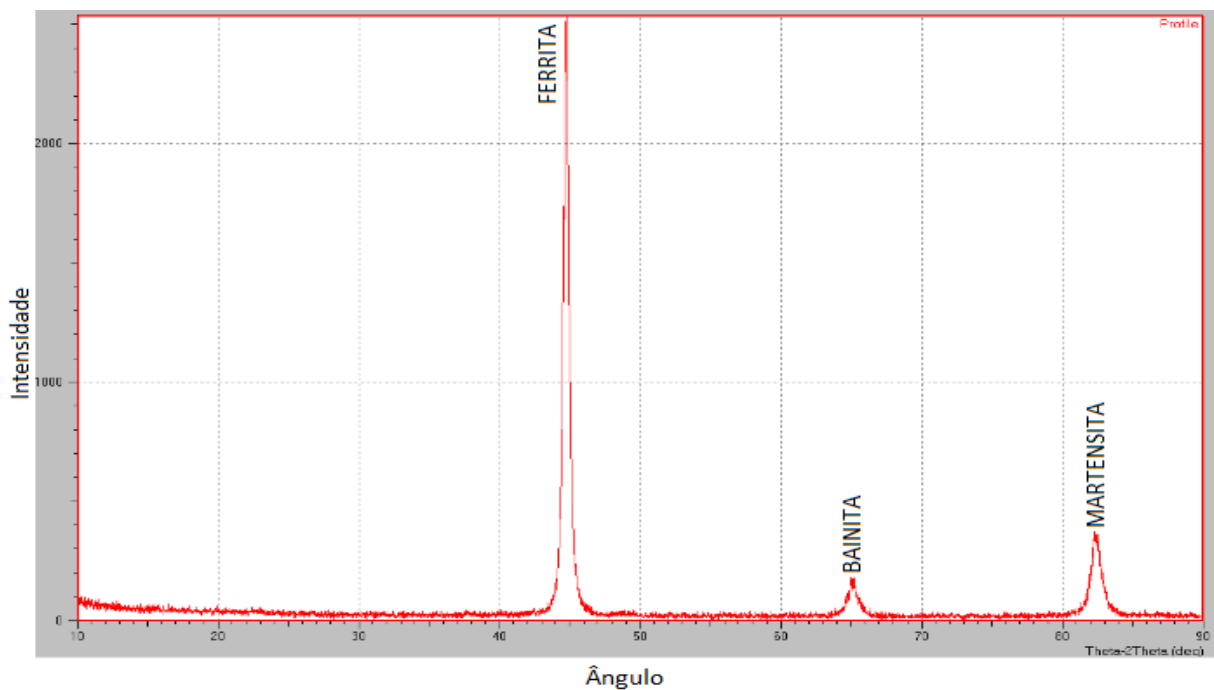


Gráfico 5 - Resultados dos constituintes do aço SAE 4340 sub zero

4.3 METALOGRAFIA

As análises metalográficas das amostras não tratada termicamente “NTT”, e as amostras tratadas termicamente “TT” por normalizadas, recozidas, temperadas-revenido e sub zero,

juntamente com uma comparação dos constituintes em questão, estão descritas a seguir.

i. Conforme Recebido

A microestrutura do aço 4340 atacada com Nital (Nital 10%), apresenta-se, com regiões claras (ferrita e austenita) e regiões escuras (martensita), conforme visto nas imagens A,B,C e D.

1 - NTT radial
Aumento 200x (Nital 10%)



2 – NTT radial
Aumento 100x (Nital 10%)

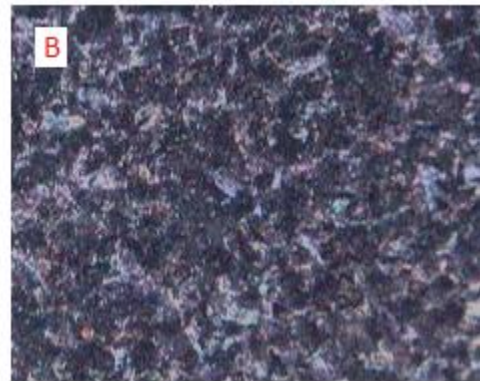


Figura 9: Metalografias das Amostras não tratadas termicamente radial 1 e 2.

1 – NTT longitudinal
Aumento 200x (Nital 10%)



2 – NTT longitudinal
Aumento 200x (Nital 10%)

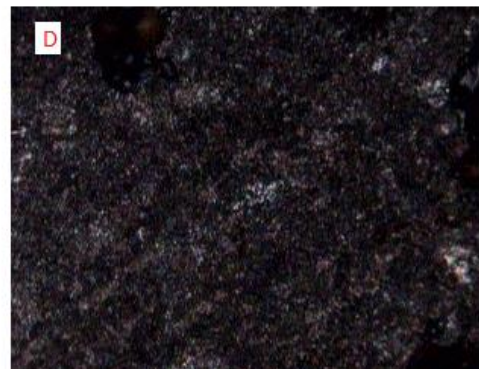


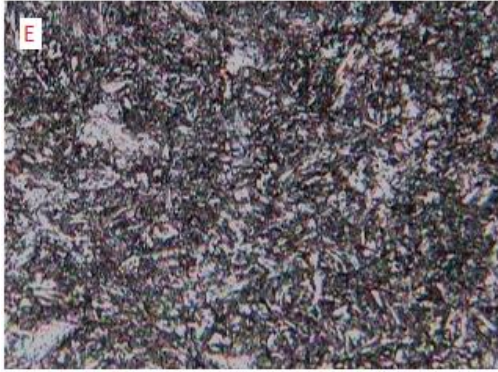
Figura 10: Metalografias das Amostras não tratadas termicamente longitudinal 1 e 2.

ii. Normalizado e Recozido

A formação de microestrutura do aço 4340 após normalização e recozimento, ambos atacados

com Nital (Nital 10%), observa-se que a morfologia básica produzida no aço microligado é de uma matriz ferrítica (clara) com ilhas de segunda curva TTT fase (escura), composta por bainita ou perlita, mais martensita conforme visto nas imagens de E a L.

E – TTNormalizado radial
Aumento 100x (Nital 10%)



F – TTNormalizado radial
Aumento 200x (Nital 10%)



Figura 11: Amostras tratadas termicamente por normalização radial 1 e 2.

G – TTNormalizado Longitudinal
Aumento 100x (Nital 10%)



H – TTNormalizado Longitudinal
Aumento 200x (Nital 10%)

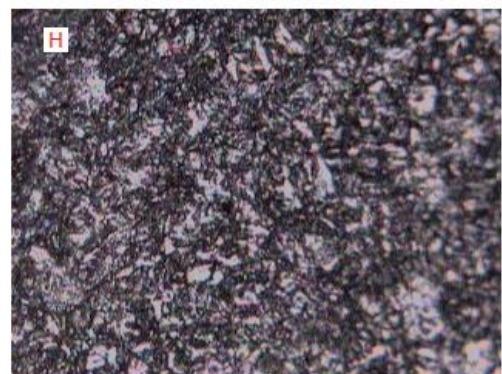


Figura 12: Amostras tratadas termicamente por normalização longitudinal 1 e 2.

1 – TTRecozida Longitudinal
Aumento 200x (Nital 10%)



2 – TTRecozido Longitudinal
Aumento 200x (Nital 10%)



Figura 13: Amostras tratadas termicamente por recozimento radial 1 e 2.

1 – TTRecozida Longitudinal
Aumento 200x (Nital 10%)



2 – TTRecozido Longitudinal
Aumento 200x (Nital 10%)



Figura 14: Amostras tratadas termicamente por recozimento longitudinal 1 e 2.

iii. Temperado – Revenido

Atacados com o reagente Nital (Nital 20%). Observa-se a coloração da fase ferrítica (clara), e a escura com (martensita + bainita), conforme a imagem M.

TTTêmpera-Revenido
Aumento 1000x

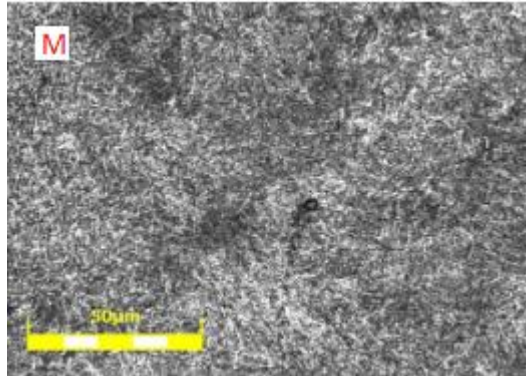


Figura 15: Amostras Tratadas Termicamente por tempera-revenido.

iv. **Sub Zero**

Atacados com o reagente Nital (20%). Observa-se a coloração da fase ferrítica (clara), e a escura com (martensita e bainita), conforme a imagem N.

TTSub Zero
Aumento 1000x

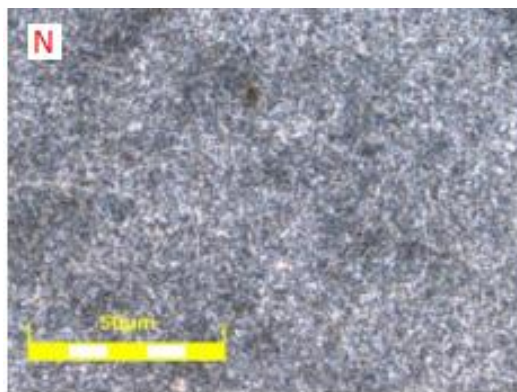


Figura 16: Amostras Tratadas Termicamente por Sub Zero

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Tendo como base os resultados obtidos neste trabalho, as conclusões apresentadas mediante as etapas realizadas são:

- Com as análises de dureza das amostras, pode-se observar que devido a diferença no tempo de resfriamento característico de cada tratamento, os constituintes foram alterados, aumentando/diminuindo a dureza conforme vista pelos gráficos e pelos resultados das tabelas como média, conforme visto na tabela 8.

Tabela 8: Resultados das Durezas HRC Mediante Tratamentos Térmicos

Como Recebido	Normalizado	Recozido	Têmpera -Revenido	Sub Zero
58	52	46	53	52

- Através da difração de raio – X realizada no aço SAE 4340 conforme recebido e após tratamentos térmicos, pode-se perceber algumas alterações nas quantidades das fases do aço. Porém devem ser realizadas novas análises para identificar melhor os picos apresentados pelos ensaios.
- Através da microscopia óptica foram identificadas alterações entre as microestruturas do aço SAE 4340, após serem submetidos aos tratamentos de têmpera-revenido e sub zero.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, algumas sugestões para continuação deste trabalho:

1. Ensaio de desgaste nas amostras com e sem austenita retida, avaliando como a resistência ao desgaste será afetado.
2. Avaliar a vida à fadiga das amostras com e sem austenita retida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ A.J. Abdalla; R.M. Anazawa; T.M.Hashimoto; M.S. Pereira; G. A. SOUZA; G. R. CARRER; O.M.M. SILVA. **Caracterização Microestrutural de Aços Multifásicos Por Microscopia Óptica Com A Utilização de Diferentes Ataque Químico**, 2008.
- ✓ BHADESHIA, H.. **Bainite Transformations. Current Opinion in Solid State and Materials Science** 8, 2004, p 211.
- ✓ BRESSAN, J.D. **Estudo da resistência ao desgaste de aço AISI 422 tratado termicamente, nitretado e com revestimentos aspergidos de carboneto de cromo e níquel.**
- ✓ CANALE, L. C. F., Mesquita, R. A., Totten, G. E., (2008), **Failure analysis of heat treated steel components**. 1ª. Ed. Ohio: ASM International, v. 1.
- ✓ CHAUSSIN, C., HILLY G. **Metalurgia** – 1967, eda Ediciones Urmo
- ✓ CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1998.
- ✓ CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 4ª ed. Associação Brasileira de Metais, 1979.
- ✓ COLPAERT, Hubertus, **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**, Editora Edgard Blucher LTDA (3 edição), 1974.
- ✓ COSTA, Giselle Barata. **Influência da hidrogenação sobre a microestrutura e magnetização de saturação do aço AISI 4340 (AMS 6414K e AMS 6415S)**, 2013.
- ✓ COUTINHO, Telmo de Azevedo. **Metalografia de Não-Ferrosos**, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo – 1980.
- ✓ Da Silva, F. Valdinei, **Influência da austenita retida no crescimento de trincas curtas superficiais por fadiga em camada cementada de aço sae 8620** – (1997).
- ✓ DUFOUR, J.D., (2002), **An Introduction to Metallurgy**. 4 ed. Houston-TX, Cooper Cameron Corporation.
- ✓ FREIRE, J.M. **Materiais de Construção Mecânica**, Rio de Janeiro – LTC, 1983
- ✓ FREIRE, José de Mendonça. **Fundamentos de Tecnologia Mecânica: Materiais de**

Construção Mecânica. Editora LTC, 1983.

- ✓ GROSSMAN, M. A., BAIN, E. C. **Principios de tratamiento térmico.** MADRID: Editorial Blume, 1972. 279p.
- ✓ HERNANDEZ, A. F. **Estudo da influencia da criogenia na resistencia ao desgaste abrasivo do aço ASTM 743 Tipo CA6NM** – Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília DF, 2009.
- ✓ HUANG, J. Y. et al., (2003), **Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel.** Materials Science & Engineering, Los Alamos, 2003. 241-244.
- ✓ Jr. D. Callister, William, **Ciencia e engenharia de materiais uma introdução,** LTC (sétima edição)
- ✓ LEANDRO, M.R. **Estudos das propriedades mecânicas dos aços H13 e “H13 modificado” aplicados em matrizes de extrusão de alumínio.** 2009.
- ✓ LEE, W. S.; SU, T. T. **Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions.** *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 87, 1999, p 198-206.
- ✓ NORTON, R.L. **Projeto de Máquinas,** 2 Ed. 2004
- ✓ NUSS, Flávia Fernandes Navarro. **Avaliação da influência do tratamento criogênico a tenacidade à fratura do aço SAE 4140 associado a um entalhe não-singular,** 2012.
- ✓ PARRISH, G. (1980). **The influence of microstructure on the properties of case-carburized components.** Ohio, ASM.
- ✓ PEREIRA, R. L. **Curso de tratamentos térmicos dos metais,** USP, São Carlos: Serviço de Publicações e Encadernação da Escola de Engenharia de São Carlos, 1963.
- ✓ REBECHI, J. G., (2011), **Correlações Numéricas entre taxas de resfriamento, microestruturas e propriedades mecânicas para o tratamento térmico do aço AISI/SAE 4140.** Dissertação _ Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ✓ SEVALE, L. G., **Avaliação das Propriedades Das Propriedades Mecânicas e dos Constituintes do Aço SAE 4340.** In Congresso Regional de Estudante de Engenharia Mecânica-CREEM, Rio de Janeiro-2014.
- ✓ SILVA, A.L.da Costa, 1953 – **Aços e ligas especiais/** 2a ed. 1988

- ✓ SILVA, Aluísio Pinto da . Estudo da transformação da austenita retida induzida por deformação, em um aço AISI 4340 com estrutura multifásica. Tese de doutorado Universidade Estadual Paulista, 2006.
- ✓ Silva, M. J., & Della Coletta, D. (1989). Tecnologia de Materiais. São Paulo: SENAI/SP.
- ✓ SOUZA, Augusto Sérgio de. Composição Química dos Aços. 2ª ed. Editora Edgard Blücher, 2006.
- ✓ SOUZA, S. A. Ensaio mecânicos de materiais metálicos. 3.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1977. 216p.
- ✓ VLACK, V. Princípios de ciência dos materiais. 12ª reimpressão, São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1970.
- ✓ ZAKHAROV, B. Heat-treatment of Metals. 2ª ed., Moscow: Peace Publishers, 1962.



RELATÓRIO DE ENSAIO N°: 14062744AQSP

FL. 1/1



Empresa interessada : **JORGE LUIZ DE ALMEIDA FERREIRA**
 Campus Univ. Darcy Ribeiro - Depto de Eng.Mecânica/ SG9 – UnB – Asa Norte – Brasília/DF

Pedido de ensaio : 266070

Natureza do trabalho : **ANÁLISE QUÍMICA**

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

QUANTIDADE.....: 02 amostras

IDENTIFICAÇÃO.....: CP1 E CP2

MATERIAL.....: Aço SAE 4340

REF. DO CLIENTE.....: E-mail de 13/05/2014

RESULTADOS OBTIDOS


COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)

		CP1	CP 2
Carbono	(C)	0,39	0,40
Silício	(Si)	0,27	0,30
Manganês	(Mn)	0,68	0,68
Fósforo	(P)	0,015	0,026
Enxofre	(S)	0,007	0,005
Cromo	(Cr)	0,77	0,82
Níquel	(Ni)	1,93	1,90
Molibdênio	(Mo)	0,22	0,22
Ferro	(Fe)	Restante	Restante

Procedimento Analítico utilizado: Emissão Óptica

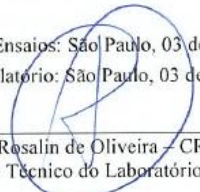
Norma de Referência: ASTM A 751, ed. 2011.

Procedimentos Tork: séries P-200 e P-300.


 José A. F. Lopez – CRQ 04402043
 Chefe do Laboratório Químico

Local Data dos Ensaio: São Paulo, 03 de Junho de 2014.

Emissão do Relatório: São Paulo, 03 de Junho de 2014.


 Eng. Leopoldo Rosalin de Oliveira – CREA 0600318910
 Gerente Técnico do Laboratório Tork SP

Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0056.

Os resultados apresentados no presente documento têm significação restrita e se aplicam somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração. As opiniões e interpretações expressas neste relatório não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório.

RAQ - Rev 4

AM

TORK Controle Tecnológico de Materiais Ltda.

SP - Rua Cruzeiro, 415 a 423 - CEP 01137-000 - Tel./fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br
 RJ - Rua Leopoldino de Oliveira, 392 - Turiagu - CEP 21360-060 - Tel./Fax: (21) 3830-0011 - e-mail: torkrj@laboratorios-tork.com.br

