

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO RAFAEL BORSATO

**AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DOS MEIOS DE RESFRIAMENTO
CONVENCIONAIS POR SOLUÇÃO POLIMÉRICA NO TRATAMENTO
TÉRMICO DE TÊMPERA DO AÇO SAE 4340**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2014

BRUNO RAFAEL BORSATO

**AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DOS MEIOS DE RESFRIAMENTO
CONVENCIONAIS POR SOLUÇÃO POLIMÉRICA NO TRATAMENTO
TÉRMICO DE TÊMPERA DO AÇO SAE 4340**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da coordenação de Mecânica -COMEC- da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^a. Ms. Sandra Mara Kaminski Tramontin

PONTA GROSSA

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Mecânica
Bacharelado em Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

**AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DOS MEIOS DE RESFRIAMENTO
CONVENCIONAIS POR SOLUÇÃO POLIMÉRICA NO TRATAMENTO TÉRMICO
DE TÊMPERA DO AÇO SAE 4340**

por

BRUNO RAFAEL BORSATO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 14 de agosto de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin
Orientadora

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz
Membro Titular

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato
Membro Titular

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima
Responsável pelos Trabalhos
de Conclusão de Curso

Prof. Dr. Laercio Javarez Junior
Coordenador do Curso de
Engenharia Mecânica

– O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha Professora orientadora Sandra M. Kaminski Tramontin, pelo seu grande empenho na orientação e transmissão de conhecimentos, paciência e tempo dedicados à leitura e orientação do trabalho.

Um agradecimento especial para o Professor Anderson Geraldo Marenda Pukasiewicz, pois me auxiliou no laboratório em todos os momentos que precisava.

Agradeço muito à minha família que sempre me deu o suporte e a estrutura que eu necessitava para conseguir alcançar meus objetivos, me educaram, se dedicaram e confiaram no meu potencial. Ensinaram-me que o futuro é construído a partir da constante dedicação no presente.

Bons amigos são a família que nos permitiram escolher, portanto devo agradecer a todos os amigos e colegas que me ajudaram com inesquecíveis momentos de convivência e companheirismo.

RESUMO

BORSATO, Bruno R. **Avaliação da substituição dos meios de resfriamento convencionais por solução polimérica no tratamento térmico de têmpera do aço SAE 4340.** 2014. 42 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

O presente trabalho tem como objetivo analisar a possibilidade da substituição dos meios convencionais de resfriamento no tratamento térmico de têmpera por uma solução polimérica. A partir de amostras de aço SAE 4340 submetidas ao tratamento térmico de têmpera seguido de revenido, foram realizados ensaios de tração, dureza e análise microestrutural. No tratamento térmico de têmpera, as amostras foram resfriadas em solução polimérica com concentração de 20%, 30% e em óleo mineral e, posteriormente, foram submetidas ao tratamento de revenimento. Após o revenido foram retiradas secções transversais das amostras para ensaio de dureza radial e longitudinal e análise metalográfica. Foram confeccionados corpos de prova para realização de ensaio de tração e comparação das propriedades mecânicas. No ensaio de dureza radial das amostras resfriadas em solução polimérica de 30% foi encontrado um valor, significativo, de 3,35% maior comparado com o resfriamento convencional à óleo mineral e 1,36 % maior na dureza longitudinal. Também obteve-se um valor significativo de 8,55% de diferença entre as tensões máximas de ruptura no ensaio de tração, sendo que a solução polimérica de 30% teve os melhores resultados. A segurança no momento do banho térmico também obteve bons resultados, visto que a solução polimérica não entra em combustão à altas temperaturas, diferente do óleo mineral. Na questão ambiental a utilização de solução polimérica também foi satisfatória, pois o descarte incorreto do óleo traz consequências irreversíveis ao meio ambiente.

Palavras-chave: Solução polimérica. Aço SAE 4340. Óleo mineral. Tratamento térmico. Microestrutura.

ABSTRACT

BORSATO, Bruno R. **Evaluation of replacing conventional means of cooling the polymer solution by heat treatment of hardening SAE 4340**. 2014. 41 leaves. Monograph (Mechanical Engineering) - Graduate Program in Mechanical Engineering, Federal Technological University of Paraná. Ponta Grossa, 2014.

This following work is purpose to examine the possibility of replacing the conventional means of cooling the heat treatment of hardening a polymer solution. From SAE 4340 steel samples subjected to heat treatment quenching followed by tempering, tensile, hardness and microstructural analysis were performed. In the tempering heat treatment, samples were cooled in a polymer solution with a concentration of 20% and 30% in mineral oil, and then were subjected to the tempering treatment. After tempering cross sections of the samples were removed for assay radial and longitudinal hardness and metallographic analysis. Specimens were prepared for conducting tensile test and comparison of mechanical properties. In the assay radial stiffness of the samples cooled polymer solution at 30% was one significant amount of 3.35% higher compared with conventional cooling with mineral oil and 1.36% in the longitudinal increased hardness. Also gave a significant value of 8.55% difference between the maximum breakdown force at the tensile test, and the 30% polymer solution had the best results. The safety at the time of the thermal bath also obtained good results, since the polymer solution is not combusted at high temperatures, than mineral oil. Environmental issue in the use of polymer solution was also satisfactory, as improper disposal of oil brings irreversible environmental consequences.

Keywords: Polymer solution. Steel SAE 4340. Mineral Oil. Heat treatment. Microstructure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de equilíbrio Fe-C.....	15
Figura 2 – Curvas de resfriamento contínuo.....	16
Figura 3 – Comparação do processo de resfriamento de: a) um óleo mineral e b) uma solução aquosa de polímero.....	19
Figura 4 – Curva TTT aço SAE 4340.....	21
Figura 5 – Retirada da amostra.....	23
Figura 6 – Temperatura de revenimento X dureza Brinell do aço SAE 4340.....	24
Figura 7 – Amarração “Cachos de Uva”.....	25
Figura 8 – Pontos de medição de Dureza Radial.....	27
Figura 9 – Pontos de medição de Dureza Longitudinal.....	27
Figura 10 – Dimensões de Usinagem.....	28
Figura 11 – CP 01 após ensaio de tração.....	33
Figura 12 – Ruptura prematura do CP nº 4 devido trinca.....	34
Figura 13 – Comparação entre as microestruturas de diferentes meios de resfriamento, de: a) Solução polimérica 20% ampliada 200x, b) Solução polimérica 30% ampliada 200x, c) Óleo mineral ampliada 200x, d) Solução Polimérica 30% ampliada 500x, e) Solução Polimérica 30% ampliada 500x e f) Óleo Mineral ampliada 500x.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química teórica do aço SAE 4340.....	20
Tabela 2 – Amostragem para tratamento térmico.....	22
Tabela 3 – Composição química Real do aço SAE 4340.....	23
Tabela 4 – Temperatura de Austenitização.....	23
Tabela 5 – Propriedades físico-químicas Hidrotêmpera 6 ®.....	26
Tabela 6 – Propriedades físico-químicas do óleo Voluta C ®.....	26
Tabela 7 – Dimensões dos Corpos de Prova para ensaio de tração.....	30
Tabela 8 – Ensaio de dureza Radial (HRc ± 2).....	30
Tabela 9 – Ensaio de dureza Longitudinal (HRc ± 2).....	31
Tabela 10 – Ensaio de tração dos CP's resfriados com 30% de solução PAG.....	32
Tabela 11 – Ensaio de tração dos CP's resfriados com 20% de solução PAG.....	34
Tabela 12 – Ensaio de tração dos CP's resfriados em óleo mineral.....	35
Gráfico 1 - Tensão X Deformação – Amostras 30%.....	32
Gráfico 1 - Tensão X Deformação – Amostras 20%.....	35
Gráfico 3 - Tensão X Deformação – Amostras resfriadas em óleo mineral.....	36

LISTA DE SIGLAS

ASTM	NORMA REGULAMENTADORA
C	CARBONO
C ₂ H ₆ O	COPOLÍMERO DE ÓXIDO DE ACETILENO
CP	CORPO DE PROVA
CP's	CORPOS DE PROVA
Cr	CROMO
Fe-C	FERRO-CARONO
Fe+Fe ₃ C	FERRITA E CEMENTITA
Fe ₃ C	CARBONETO DE FERRO OU CEMENTITA
HRc	UNIDADE DE MEDIDA ROCKWELL C
Mo	MOLIBDÊNIO
Mn	MANGANÊS
Ni	NÍQUEL
PAG	POLIALQUILENE GLICOL
SAE 4340	NORMA PARA DENOMINAÇÃO COMERCIAL DE AÇO
Si	SILÍCIO
TTT	TEMPO, TEMPERATURA, TRANSFORMAÇÃO
µm	MICROMETRO
UTFPR-PG	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – CAMPUS PONTA GROSSA

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	PROBLEMA	11
1.2	JUSTIFICATIVA	11
1.3	OBJETIVO GERAL	12
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.5	DELIMITAÇÃO DO TEMA	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS	14
2.2	TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS	15
2.3	TEMPERABILIDADE DOS AÇOS	17
2.4	MEIOS DE RESFRIAMENTO DE TÊMPERA	18
2.5	TÊMPERA EM SOLUÇÕES POLIMÉRICAS	18
2.6	PROCESSO DE REVENIMENTO PARA ALÍVIO DE TENSÕES	20
2.7	AÇO 4340	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	AMOSTRAGEM	22
3.2	TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO E REVENIMENTO	24
3.3	TÊMPERA E REVENIDO	24
3.4	RESFRIAMENTO	25
3.5	ENSAIOS DE DUREZA	26
3.6	ENSAIO DE TRAÇÃO	27
3.7	ENSAIO METALOGRAFICO	28
4	RESULTADO E DISCUSSÕES	30
4.1	ANÁLISE DE DUREZA RADIAL	30
4.2	ANÁLISE DE DUREZA LONGITUDINAL	31
4.3	RESISTÊNCIA MECÂNICA À TRAÇÃO DOS CP'S RESFRIADOS EM SOLUÇÃO POLIMÉRICA 30%	31
4.4	RESISTÊNCIA MECÂNICA À TRAÇÃO DOS CP'S RESFRIADOS EM SOLUÇÃO POLIMÉRICA 20%	33
4.5	RESISTÊNCIA MECÂNICA À TRAÇÃO DOS CP'S RESFRIADOS EM ÓLEO MINERAL	35
4.6	ANÁLISE MICROESTRUTURAL	36
5	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica traz diversas melhorias no universo da engenharia. O aço está cada vez mais presente no cotidiano e com isso há diversas tentativas de melhorias na utilização deste recurso, levando em conta a preocupação ambiental que é de suma importância para todos nós.

O tratamento térmico dos aços é um importante processo para a qualidade e determinação da utilização do material, bem como seu custo final. A partir deste processo, alteram-se as propriedades mecânicas do aço. Existem desde tratamentos térmicos que diminuem a dureza quanto aos que aumentam a resistência mecânica, dependendo da aplicação desejável (CHIAVERINI, 2003).

Os tratamentos térmicos envolvem o aquecimento e também resfriamento dos metais em diversos meios e velocidades. As aplicações podem ocorrer de duas maneiras: superficiais ou em toda peça. Além disso, é preciso levar em consideração o custo final do processo, a fim de manter a relação custo-benefício.

A velocidade de resfriamento do aço afeta consideravelmente o nível de dureza da peça. Com isto, o tratamento térmico mais utilizado é o de têmpera. Neste processo existem diversos meios de resfriamento tanto líquidos, como gasosos: água, óleos minerais, salmoura, gases (nitrogênio, argônio, hidrogênio e hélio) e soluções poliméricas (CHIAVERINI, 2003).

Usualmente os fluidos mais comuns para têmpera de aços carbono são os óleos minerais. Porém, a crescente preocupação com o meio ambiente, resultou em um grande interesse na utilização de novos fluidos.

Um fluido que tem ganho espaço são as soluções poliméricas, principalmente aos formulados a base de PAG (polialquile glicol). Segundo a pesquisa de Canale (2007) há vantagens sobre a utilização das soluções a base de PAG quando comparados à de óleos minerais, como custo, limpeza no processo (eliminação de desengraxantes) e flexibilidade.

1.1 PROBLEMA

Substituir os meios convencionais de resfriamento, em particular o óleo mineral, do processo de têmpera de aços pela solução polimérica, mantendo o ganho em

propriedades mecânicas com vantagens de custo-benefício, em segurança e principalmente ambientais.

1.2 JUSTIFICATIVA

Por se tratar de uma possibilidade de meio de resfriamento nos tratamentos térmicos, este trabalho demonstra de grande interesse na indústria metal-mecânica, focando nos impactos ambientais causados pelo processo.

Os óleos minerais oferecem grandes riscos de utilização por apresentarem um ponto de fulgor relativamente baixo, podendo causar incêndios e por gerar uma grande quantidade de fumaça durante o tratamento. A água é o meio de resfriamento mais acessível, porém devido ao resfriamento drástico, pode provocar resultados indesejáveis tais como empenamento e mesmo ruptura da peça. As soluções poliméricas são mais resistentes ao fogo além de serem biodegradáveis e inexistência de geração de fumaças tóxicas durante o processo.

Este trabalho avaliará as propriedades do aço SAE 4340, submetido ao tratamento térmico de têmpera em óleo mineral e em solução polimérica PAG com diferentes concentrações comparando os resultados obtidos. A eficiência de cada meio de resfriamento será estudada através da utilização de corpos de prova, os quais foram submetidos a análises de microestrutura e mecânica após o revenimento.

1.3 OBJETIVO GERAL

Avaliar as variações das propriedades mecânicas do aço SAE 4340 depois de temperados e revenidos por diferentes meios de resfriamento.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a utilização de solução polimérica como principal meio de resfriamento no processo de têmpera no aço SAE 4340.
- Avaliar as tensões de escoamento e tensões de ruptura dos corpos de prova resfriados nos diferentes fluidos de têmpera.

- Avaliar a dureza radial e longitudinal dos corpos de provas submetidos aos diferentes meios de resfriamento.
- Avaliar a mudança de microestrutura após tratamento de revenimento dos corpos de prova.

1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Pretende-se estudar a utilização da solução polimérica como substituto do óleo mineral no tratamento térmico de têmpera no aço SAE 4340, bem como considerar o impacto ambiental causado pelos mesmos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na fundamentação teórica serão estudadas as propriedades dos aços e classificação dos constituintes e suas porcentagens de constituição, e sua microestrutura.

Serão definidos e explicados os processos e parâmetros necessários para realização do projeto, assim como o experimento para obtenção dos resultados.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

O elemento de maior concentração presente no aço é o ferro. Chiaverini (1996) define que o aço é uma liga ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono na sua constituição resultado dos processos de fabricação. A porcentagem de carbono presente na liga altera significativamente a microestrutura e propriedades do aço.

Geralmente a indústria metal-mecânica requer aços de alta ductilidade, alta tenacidade e boa soldabilidade para aços com baixo teor de carbono e para aços com alta taxa de carbono prioriza-se a alta resistência mecânica, resistência a fadiga e ao desgaste.

Também é necessário destacar a presença ou não de elementos de liga, que são responsáveis pelas propriedades citadas acima, porém segundo Henry e Monde (2008) os aços referidos como micro ligas ou aços de baixa liga de alta resistência são mais atraentes para as muitas aplicações da engenharia, usufruindo também da melhoria das relações de peso em relação aos aços convencionais.

A figura 1 apresenta o diagrama de fases ferro-carbono (Fe-C). A partir do diagrama podemos verificar a solubilidade do elemento carbono na ferrita e na austenita em função da temperatura. Quando a concentração de carbono se eleva, este elemento não consegue se alojar nos espaços intersticiais entre os átomos de ferro formando uma nova fase que permite alojar mais átomos de carbono, esta fase é definida como cementita ou carboneto de ferro (Fe_3C).

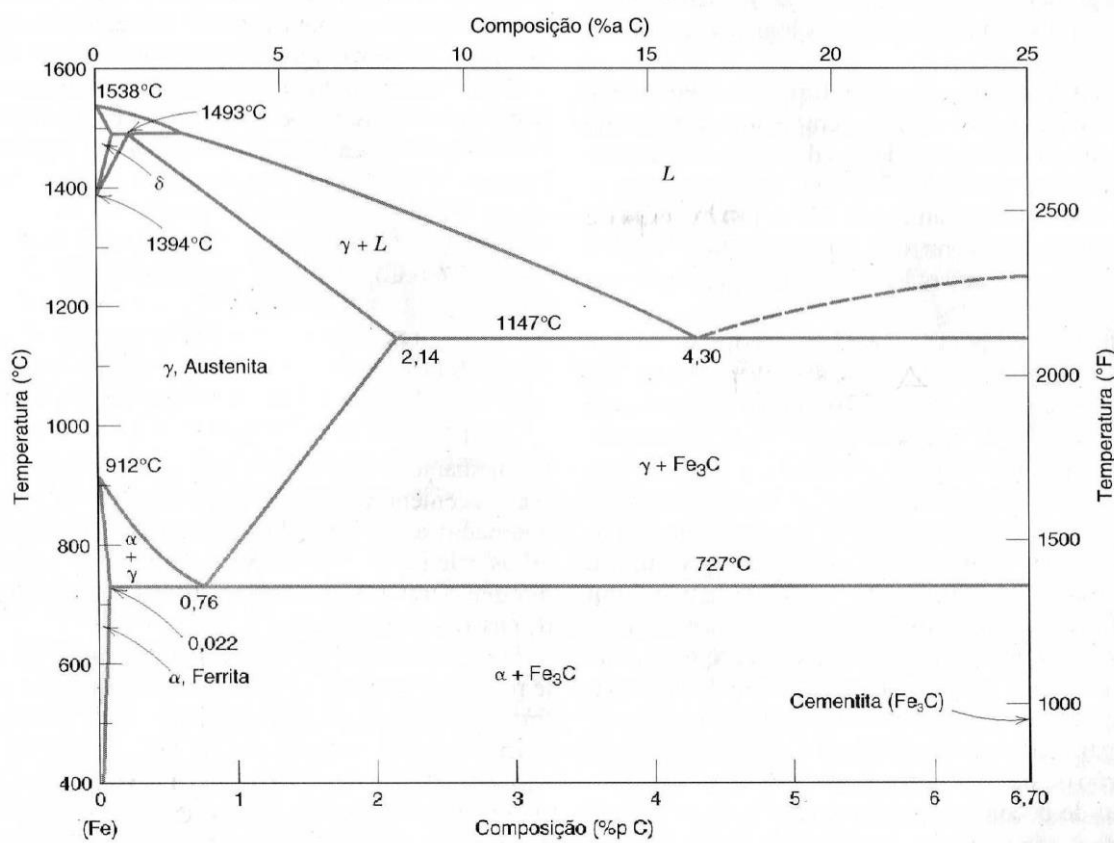


Figura 1 - Diagrama de equilíbrio Fe-C

Fonte: Callister Ciência e engenharia de materiais: Uma Introdução (2002)

O campo que será estudado em questão é da austenita, a qual possui melhores características para solicitações de trabalho a quente, e tratamentos térmicos, como, por exemplo, a têmpera. A austenita, sob diferentes taxas de resfriamento, se transforma em diferentes microestruturas. Caso seja resfriada lentamente, será transformada em ferrita e cementita, e se for esfriada rapidamente será transformada em martensita.

2.2 TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar suas propriedades (CHIAVERINI, 2003). Ou seja, o tratamento térmico pode ser dividido em três passos: aquecimento, tempo de permanência em determinada temperatura e resfriamento.

As características são obtidas através do aquecimento acima da temperatura crítica, onde ocorre completa austenitização do aço. A partir desta temperatura que iremos decidir as propriedades que se deseja aplicar ao aço.

Outro fator importante é o tempo de permanência à temperatura de aquecimento, a qual quanto mais tempo permanecida, maior a dissolução do carboneto de ferro, sempre tomando cuidado com o tempo, pois caso ultrapasse o recomendado poderá haver oxidação ou descarbonetação do aço.

O resfriamento é o fator mais importante, pois ele que determinará efetivamente a estrutura e as propriedades finais do aço. De acordo com a figura 2, podemos observar a formação das fases com diferentes tempos de resfriamento.

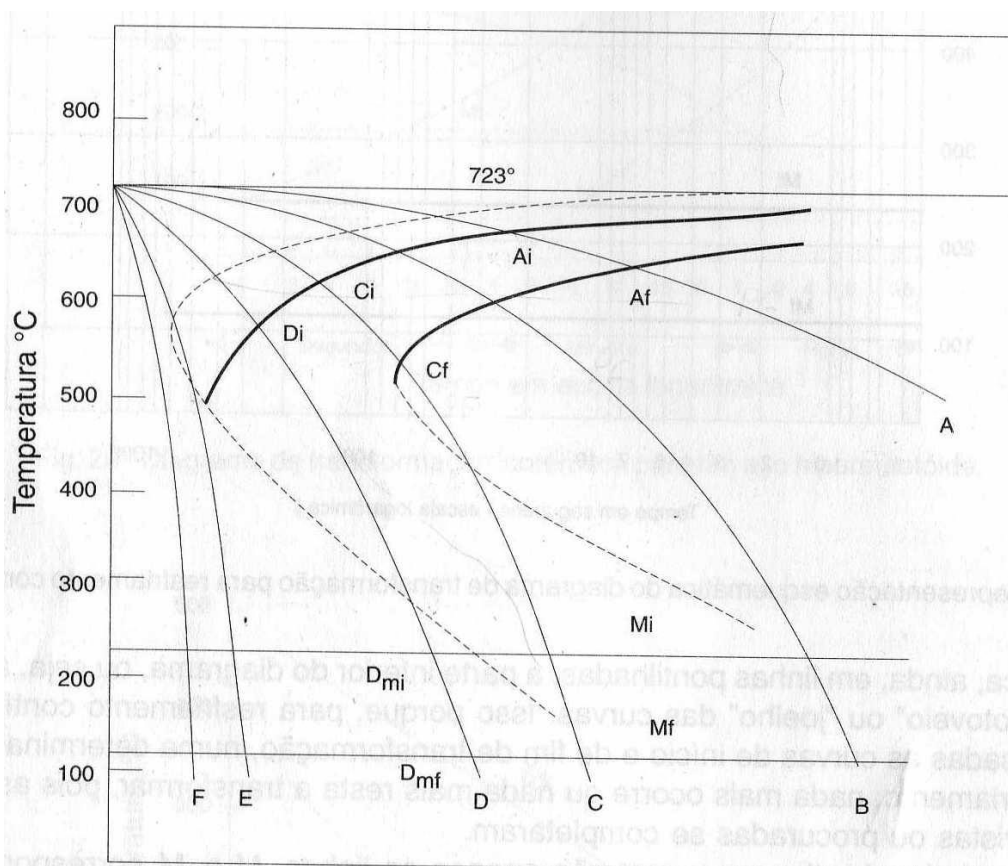


Figura 2 – Curvas de resfriamento contínuo
Fonte: Chiaverini Aços e Ferros Fundidos (1996)

Podemos notar que quando há resfriamento muito rápido, a curva de resfriamento não cruza a curva de transformação, de modo que não há transformação da austenita em produto lamelar, mas sim uma passagem para martensita, tornando o aço mais duro. Podemos assim definir a velocidade crítica de esfriamento como a

menor velocidade de esfriamento que produzirá inteiramente uma estrutura martensita.

Com isso a velocidade de esfriamento será escolhida de acordo com a estrutura e as propriedades que se deseja obter. Assim quando se deseja uma estrutura de máxima dureza, deve-se procurar produzir a estrutura martensítica, isto é, escolher um tratamento térmico com rápido resfriamento, e quando se visa o mínimo de dureza, deve-se optar pelo máximo tempo de resfriamento.

Por outro lado, velocidades de resfriamento muito rápido podem ocasionar consequências sérias, como tensões internas excessivas, empenamentos das peças e até mesmo aparecimento de fissuras. Com isso deve-se escolher aços que apresentem propriedades adequadas para que se possa fazer o tratamento térmico de têmpera.

2.3 TEMPERABILIDADE DOS AÇOS

Chama-se “temperabilidade” a “capacidade do aço endurecer” ou à “profundidade de endurecimento”. (CHIAVERINI, 2003)

Com isso, segundo Chiaverini (1996), é necessário o conhecimento da temperabilidade dos aços, porque o mais importante objetivo do tratamento térmico do aço é obter a maior dureza e a mais alta tenacidade, em condições controladas de velocidade de esfriamento, a uma profundidade determinada ou através de toda a sua secção de modo a reduzir ao mínimo as tensões de resfriamento.

Os fatores que afetam a temperabilidade dos aços são os mesmos que influem sobre a posição das curvas nos diagramas de transformação contínua, ou seja, tamanho do grão austenítico, homogeneidade da austenita e composição química.

Adotando o critério seguido por Chiaverini (1996), os fatores que afetam a temperabilidade dos aços podem ser agrupados da seguinte maneira:

-Fatores que diminuem temperabilidade:

- a) granulação fina da austenita
- b) inclusões não dissolvidas: carbonetos (ou nitretos) e inclusões não-metálicas

-Fatores que aumentam a temperabilidade:

- a) elementos dissolvidos da austenita (exceto cobalto)
- b) granulação grosseira da austenita

c) homogeneidade da austenita

A temperabilidade dos aços é aumentada pela presença de elementos de liga aproximadamente na seguinte ordem ascendente: níquel, silício, manganês, cromo, molibdênio, vanádio e boro.

2.4 MEIOS DE RESFRIAMENTO DE TÊMPERA

Como já foi estudada, a velocidade de resfriamento no tratamento térmico é um dos principais fatores para formação das propriedades desejadas. Os fatores que influenciam na velocidade de resfriamento dependem do tempo e meio de resfriamento.

Os meios usuais de esfriamento são: ambiente ao forno, ar e meios líquidos. O resfriamento mais demorado é, logicamente, o realizado dentro do forno, seguido pelo resfriamento ao ar ou para um meio líquido, no qual aliado a agitação resulta em taxas de resfriamento altíssimas (CHIAVERINI, 2003).

A escolha do meio de resfriamento é referente ao tipo de estrutura final desejada juntamente com a profundidade da alteração. Os óleos minerais têm sido os fluidos mais comuns para a têmpera de aços carbono e aços liga de tratamento térmico.

Porém, tem havido um grande interesse na substituição dos meios convencionais de resfriamento por meios alternativos devido à crescente preocupação ambiental, segurança e problemas toxicológicos. Uma das alternativas mais comuns são as soluções de polímeros solúveis em água. Especialmente os formulados à base de PAG, pois apresentam algumas vantagens quando comparados aos óleos minerais, como por exemplo: custo, desempenho, limpeza no processo e flexibilidade. (CANALE, 2007)

2.5 TÊMPERA EM SOLUÇÕES POLIMÉRICAS

Além dos custos, há um grande incentivo na utilização de soluções aquosas na indústria metal-mecânica. É de conhecimento geral da indústria os problemas causados pela utilização dos óleos minerais em tratamentos térmicos, que vão desde o risco de incêndio à necessidade de equipamentos de alto custo.

Com isto, ao longo dos anos, diversos polímeros solúveis em água têm sido utilizados. Dentre os mais utilizados estão os formulados com PAG. Polímeros PAG são copolímeros de óxido de etileno (C_2H_4O) e óxido de propileno (C_3H_6O). (CANALE, 2007)

Segundo a pesquisa de Canale (2007), durante o processo de resfriamento do aço austenitizado, o metal quente é imediatamente circundado por uma “camada de vapor”, resultando em resfriamento bastante vagaroso. A maior taxa de resfriamento ocorre quando se inicia o processo de nucleação de bolhas. Quando a temperatura da superfície da peça é menor que o ponto de ebulição do óleo, a taxa de resfriamento volta aos valores mais baixos do processo.

O processo de resfriamento em solução polimérica ocorre de maneira diferente. Quando ocorre a imersão do metal quente na solução, há formação de uma capa que envolve a superfície da peça, a qual separa a superfície do metal com o restante da solução polimérica. Entre estes dois meios ocorre a formação de vapor superaquecido. À medida que o resfriamento ocorre, a capa de polímero subitamente se rompe, resultando em taxas de resfriamentos elevadas, ocorrendo o resfriamento uniforme sobre toda a peça.

A figura 3 mostra a diferença do resfriamento de um típico óleo de têmpera e de um polímero.

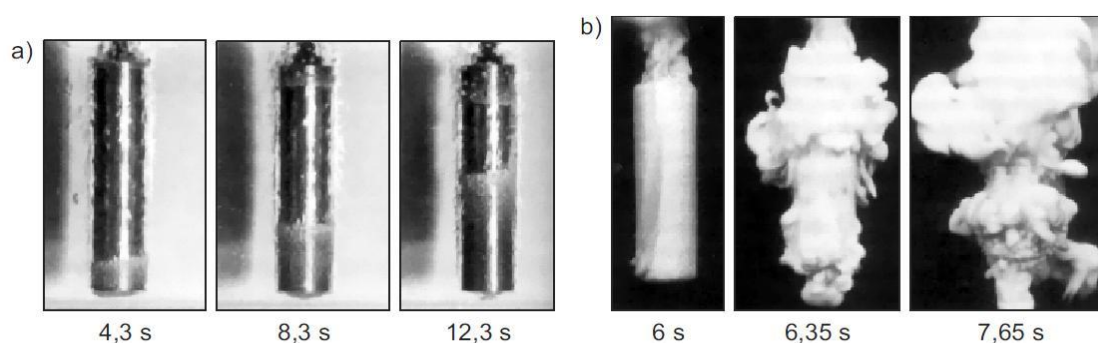


Figura 3 – Comparação do processo de resfriamento de: a) um óleo mineral e b) uma solução aquosa de polímero.

Fonte: Canale (2007)

Devido à alta flexibilidade da faixa de resfriamento da solução polimérica PAG, pode-se utilizar este meio de resfriamento em diversos componentes elaborados em aço carbono e aços liga, visto que o meio de têmpera com solução PAG resulta em menores velocidades de resfriamento do que a obtida por água ou óleo mineral.

2.6 PROCESSO DE REVENIMENTO PARA ALÍVIO DE TENSÕES

Tensões residuais internas podem se desenvolver em peças metálicas em devido ao resfriamento não uniforme da peça que foi tratada a uma temperatura elevada ou devido à uma transformação de fases que seja induzida mediante um resfriamento onde as fases de origem possuam densidades diferentes.

Problemas como distorção e empenamento podem ocorrer se essas tensões residuais não forem eliminadas. Essas tensões residuais podem ser removidas através do tratamento térmico de recozimento, onde a peça é aquecida até a temperatura recomendada, mantida a essa temperatura por um tempo suficiente para se atingir uma temperatura uniforme, e finalmente resfriada ao ar até a temperatura ambiente. Esta temperatura é relativamente baixa, evitando com que as propriedades obtidas pelo tratamento de têmpera não seja significativamente alteradas. (CALLISTER, 2002)

O revenimento é realizado logo após a têmpera, em temperaturas abaixo da temperatura crítica. Este tratamento modifica a estrutura temperada transformando-a em martensita revenida, melhorando sua ductilidade. Ao mesmo tempo que ocorre esta alteração estrutural, as tensões internas geradas após a têmpera são aliviadas.

2.7 AÇO 4340

O aço SAE 4340 contém, além do ferro e carbono, elementos como cromo, molibdênio e níquel em sua composição, tornando este aço com alta temperabilidade e boa tenacidade entre os aços para construção mecânica. Sua aplicação é utilizada em coroas, pinhões, terminais de direção, engrenagens, capas de rolamentos, tratores e veículos em geral. A faixa de composição química está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química teórica Aço SAE 4340

Composição Química (%)						
Tipo de Aço	Carbono (C)	Manganês (Mn)	Silício (Si)	Cromo (Cr)	Níquel (Ni)	Molibidênio (Mo)
SAE 4340	0,38-0,43	0,60-0,80	0,15-0,30	0,70-0,90	1,65-2,00	0,20-0,30

Fonte: Chiaverini Aços e Ferros Fundidos (1996)

A partir da composição química do aço, será possível a determinação da temperatura de austenitização necessária para aquecer as amostras.

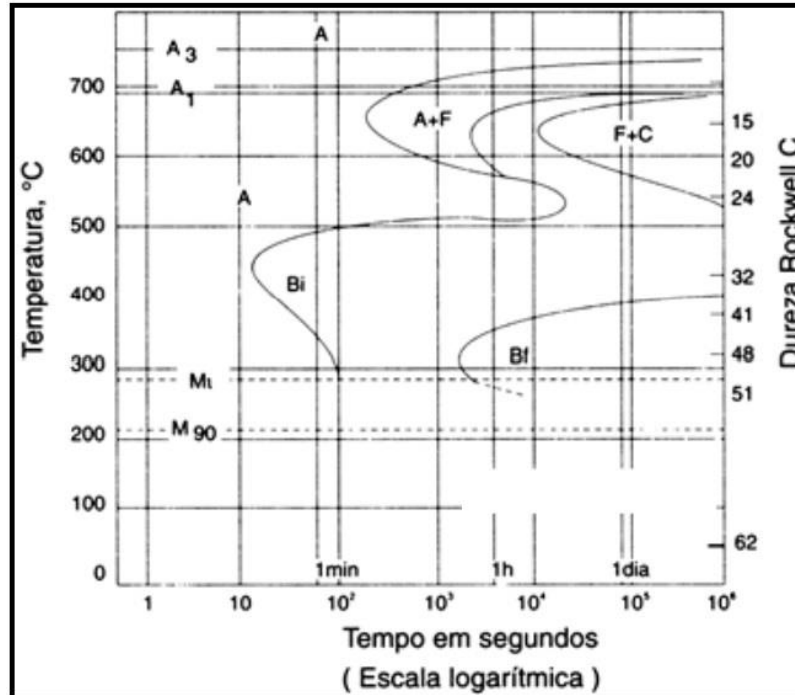


Figura 4 – Curva TTT SAE 4340
Fonte: ANAZAWA (2007)

As curvas TTT (tempo, temperatura e transformação) possibilitam o controle das transformações, apresentam formas gráficas para representarem as mudanças microestruturais que o aço pode sofrer durante o resfriamento da fase austenítica, para a construção deste gráfico é utilizado resfriamento à temperatura constante (isotérmica), temos como exemplo a figura acima, mostrando a curva TTT para os aços SAE 4340, mostrando as possíveis transformações para este aço (ANAZAWA, 2007)

O aço SAE 4340 quando submetido à um resfriamento rápido de 10 a 10^4 segundos da austenita que varia entre 300 a 540°C (região B da figura 4), o microconstituente formado é a bainita. Temperaturas acima de 540°C originam a perlita (ferrita e cementita $Fe+Fe_3C$) e abaixo de 300°C martensita, sendo que a bainita se apresenta junto com estes outros microconstituintes, sendo que no resfriamento, diferentes partes de uma peça resfriam em velocidades diferentes e os valores de dureza e resistência à tração da bainita são maiores que os da perlita, pois suas partículas de ferrita e cementita são maiores (CALLISTER, 2009).

3 METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é de avaliar comparativamente as propriedades finais de barras de aço laminados a quente quando temperadas em solução aquosa de polímero com diferentes concentrações, e óleo mineral. O aço SAE 4340 será analisado quanto as características de dureza, resistência mecânica e microestrutura após tratamento térmico de têmpera e revenido.

Após as amostras serem tratadas, será seccionado transversalmente os corpos de prova para ensaio de dureza Rockwell C. Serão submetidas ao ensaio de tração e subsequente análise das propriedades mecânica, bem como, dos seus constituintes químicos adquiridos durante o resfriamento que interferem diretamente nas propriedades mecânicas do aço em estudo. Os ensaios mecânicos analisam a variação da resistência mecânica e a influência da mudança microestrutural na sua ductilidade e tenacidade, alinhado juntamente com o impacto ambiental de cada tipo de resfriamento.

Também serão levantadas as principais vantagens da utilização da solução polimérica, nos quesitos relacionados às propriedades mecânicas, segurança e problemas ambientais.

3.1 AMOSTRAGEM

Para o aço SAE 4340, foram confeccionadas 9 amostras de 300 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro de uma barra cilíndrica laminada a quente a partir de um tarugo obtido por lingotamento contínuo. A tabela 2 apresenta os corpos de prova que serão submetidos aos três diferentes meios de resfriamento.

Tabela 2 - Amostragem para Tratamento Térmico

Tipo de Aço	Meios de Resfriamento		
	Solução PAG 30%	Solução PAG 20%	Óleo
SAE 4340	CP 01	CP 04	CP 07
	CP 02	CP 05	CP 08
	CP 03	CP 06	CP 09

Fonte: Autoria Própria

A partir destas barras, foram usinadas, conforme as dimensões estipuladas, os corpos de prova para ensaio de tração.

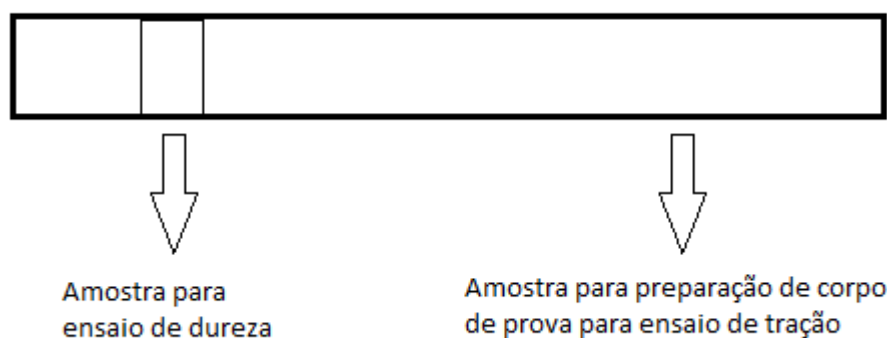


Figura 5 – Retirada da amostra
Fonte: Autoria Própria

Com relação à composição química das amostras, tomou-se base com os dados repassados pela empresa doadora das amostras para estudo, todas conforme a norma ASTM. De acordo com a empresa tem-se a seguinte composição química na tabela 3:

Tabela 3 - Composição química Real Aço SAE 4340

Composição Química (%)						
Tipo de Aço	Carbono (C)	Manganês (Mn)	Silício (Si)	Cromo (Cr)	Níquel (Ni)	Molibdênio (Mo)
SAE 4340	0,41	0,69	0,25	0,77	1,74	0,24

Fonte: Tormex Tornearia

3.2 TEMPERATURAS DE AUSTENITIZAÇÃO E REVENIMENTO

Para realização dos testes foram determinadas as temperaturas de austenitização e de revenimento para o aço em estudo. De acordo com SPIN (2007) a temperatura de austenitização pode ser obtida através da formula abaixo e seus resultados estão apresentados na tabela 4.

$$T = 910 - 203\sqrt{\%C} - 15,2(\%Ni) + 44,7(\%Si) + 104(\%V) + 31,5(\%Mo)$$

O cálculo acima resultou nas temperaturas conforme a tabela 4.

Tabela 4 - Temperatura de Austenitização

Tipo de Aço	Temperatura
SAE 4340	850±40

Fonte: Autoria Própria

A temperatura de revenimento adotada foi de 400°C para todas as amostras, sendo admitido uma tolerância de $\pm 10^\circ\text{C}$.

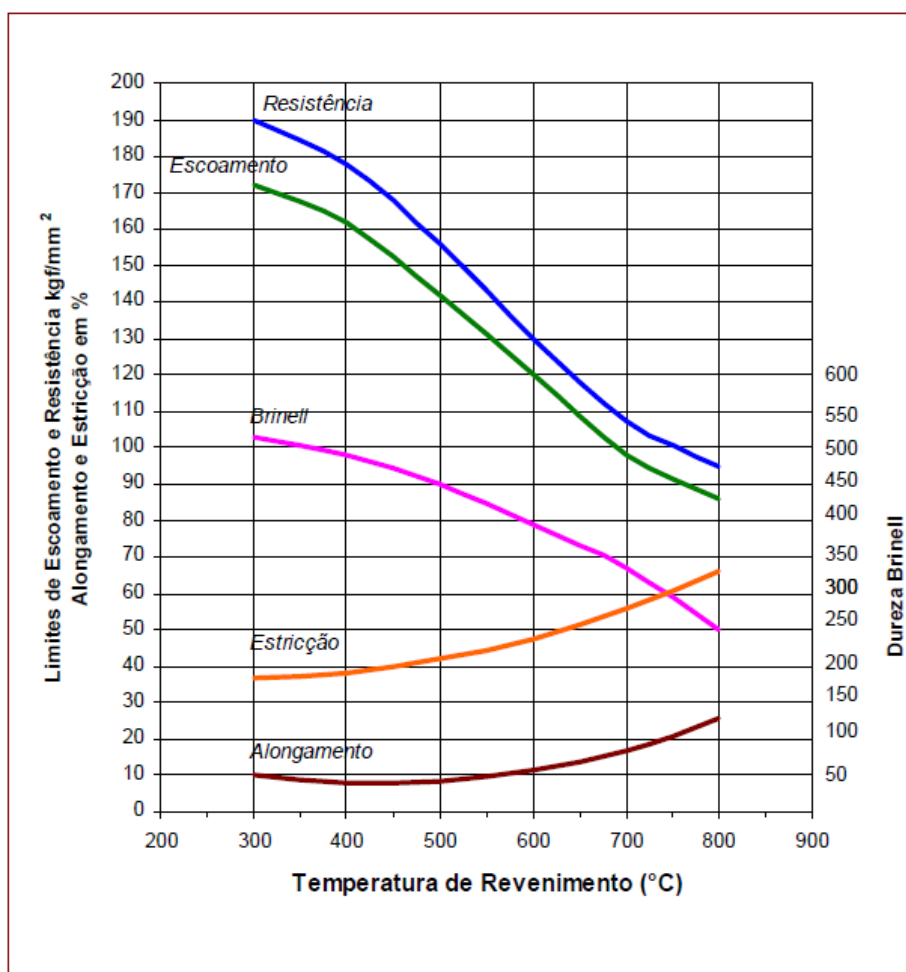


Figura 6 – Temperatura de Revenimento X Dureza Brinell do Aço SAE 4340
Fonte: VILLARESMETALS (2014)

Como podemos verificar pela figura 6, a temperatura de 400°C é uma temperatura mediana na qual as propriedades mecânicas do aço não sofrem grandes variações e ao mesmo tempo conseguimos diminuir as tensões residuais geradas pelo tratamento térmico.

3.3 TÊMPERA E REVENIDO

As amostras retiradas das barras foram aquecidas em um forno elétrico marca Jung, disponível no laboratório da UTFPR-PG, e mantidas na temperatura estabelecidas durante 1,5 horas para completa austenitização. Este tempo, foi

determinado pela indicação teórica, na qual o tempo de permanência das amostras no forno deve ser de 0,5 horas por polegada de espessura.

Após a austenitização, as amostras foram retiradas e inseridas em um tanque de resfriamento, com capacidade de 15 litros, previamente preparado com o meio de resfriamento.

As amostras foram amarradas em formato de “cachos de uva” com arame recozido para melhor manuseio durante retirada do forno para posterior tratamento térmico no tanque, conforme a figura 7.



Figura 7 – Amarração “Cachos de Uva”
Fonte: Autoria Própria

Após a têmpera as amostras foram submetidas ao tratamento de revenimento a 400° C, conforme estipulado no item 3.2.

3.4 RESFRIAMENTO

Foram realizados tratamentos térmicos com três diferentes meios de resfriamento. Primeiramente foi realizado o tratamento com um meio constituído de 30% de polímero PAG 30%, sendo 7 litros de água e 3 litros de polímero.

O polímero utilizado foi o Hidrotêmpera B06, da marca Quaker Chemical, tendo suas características descritas na tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades físico-químicas Hidrotêmpera 6

Características	Típico	Unidade
Aspecto visual	Líquido viscoso	Não aplicável
Cor visual	Amarelado	Não aplicável
Densidade à 25°C	1,080	g/cm ³
Viscosidade à 40°C	140,0	mm ² /s
Alcalinidade Total	52,0	mgKOH/g
pH - diluído a 5,0%	9,50	Não aplicável
Corrosão FoFo GG 25 - diluído a 5,0%	0	grau

Fonte: Quaker Chemical (2014)

O segundo tratamento foi realizado com concentração de 20% de polímero, sendo 3 litros de Hidrotêmpera e 12 litros de água.

Para o terceiro meio de resfriamento, foi utilizado o óleo mineral Voluta C® fornecido pela empresa Shell, tendo suas características descritas na tabela a seguir.

Tabela 6 - Propriedades físico-químicas óleo Voluta C®

Características	Típico	Unidade
Aspecto visual	líquido viscoso	Não aplicável
Cor visual	amarelo claro	Não aplicável
Densidade à 20°C	870	kg/m ³
Viscosidade à 40°C	30	mm ² /s
Temperatura de auto combustão	320	°C

Fonte: Shell (2014)

3.5 ENSAIOS DE DUREZA

Foram retiradas secções transversais dos corpos de prova para medição de dureza Rockwell C após tratamento de revenimento. É o método mais simples e direto para se medir dureza e mais utilizado nas indústrias devido ao fácil manuseio do equipamento.

Para isto as amostras foram seccionadas transversalmente e não foi necessário lixamento da superfície. As medidas foram feitas na superfície, na metade do raio e no núcleo das amostras conforme figura 8.



Figura 8 – Pontos de medição de Dureza Radial
Fonte: Autoria Própria

Também foram realizadas medições de dureza longitudinal, onde se alocou as extremidades do corpo de prova para ensaio de dureza, conforme figura 9.



Figura 10 – Pontos de medição de Dureza Longitudinal
Fonte: Autoria própria

O ensaio de dureza longitudinal foi realizado somente na extremidade do corpo de prova que mergulhou primeiro no meio de resfriamento. Esta escolha se fez devido ao motivo de se ter, para os diversos meio de resfriamento, a temperatura mais equivalente dos corpos de provas.

3.6 ENSAIO DE TRAÇÃO

Nove amostras foram usinadas para confecção de corpos de prova para ensaio de tração realizados em uma Máquina de Ensaio Universal EMIC DL10000,

disponibilizada pelo laboratório de metrologia e ensaios da UTFPR-PG. Todos os procedimentos de usinagem das amostras seguiram a norma ASTM E 8M.

A figura 10, demonstra o modelo de amostra que será utilizado para realizar o ensaio de tração. As amostras foram usinadas e obteve-se as dimensões descritas no quadro abaixo, sendo que todas estão dentro dos parâmetros estabelecidos por norma para realização do ensaio de tração.

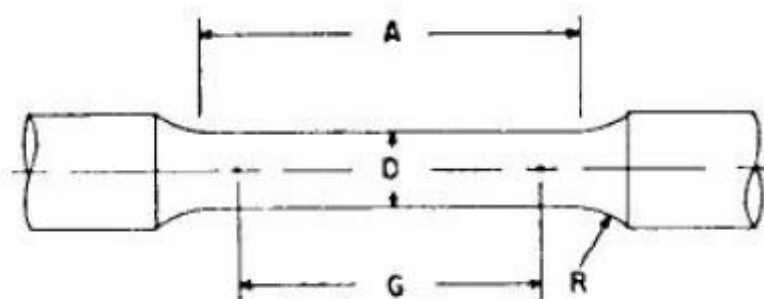


Figura 10 – Dimensões de usinagem
Fonte: ASTM E 8M (2014)

Tabela 7 - Dimensões dos Corpos de Prova para Ensaio de Tração

Dimensão	Valor	Unidade
Comprimento da seção - A	$88,0 \pm 2$	mm
Comprimento útil - G	$76,0 \pm 2$	mm
Diâmetro D1 - D	$9,0 \pm 0,5$	mm
Raio (R)	12,0	grau

Fonte: Autoria Própria

O diâmetro final da barra ficou de 9,0 mm por 300 mm de comprimento.

3.7 ENSAIO METALOGRAFICO

Para análises microscópicas, as amostras foram seccionadas transversalmente e embutidas em baquelite preto para melhor manuseio durante a sequência de lixamento com lixas de granulometria nº 320, 400, 600 e 1200 e polidas em suspensão de alumina de 1 a 0,3 μm . A revelação microestrutural foi realizada com reagente Nital 3% durante ± 10 segundos e lavadas com álcool e secas com ar quente. Após a

preparação, as amostras foram analisadas em um microscópio ótico marca Olympus modelo BX60.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

A seguir, serão demonstrados os resultados obtidos através dos ensaios de dureza radial, longitudinal e resistência a tração.

4.1 ANÁLISE DE DUREZA RADIAL

A tabela abaixo mostra os resultados de dureza radial das amostras tratadas do aço SAE 4340. As medições foram realizadas na superfície, na metade do raio e no núcleo da amostra, sendo o primeiro ponto da esquerda para direita, conforme figura 9. Podemos notar a diferença de dureza, na tabela 8, entre os meios de resfriamento em estudo, sendo os corpos de prova nº 1, 2 e 3 para solução PAG de 30%, os corpos nº 4, 5 e 6 para solução PAG de 20% e os corpos de prova nº 7, 8 e 9 para o resfriamento em óleo mineral.

Tabela 8 - Ensaio de Dureza Radial (HRC \pm 2)

Corpos de Prova	Ponto 01	Ponto 02	Ponto 03	Ponto 04	Ponto 05	Ponto 06	Ponto 07	Média
1 (30%)	45	45	45	44	45	45	46	45,0
2 (30%)	43	46	44	45	45	44	45	44,6
3 (30%)	43	45	45	45	44	44	45	44,4
4 (20%)	43	42	42	43	44	44	43	43,0
5 (20%)	40	42	42	41	43	42	42	41,7
6 (20%)	43	42	44	44	44	42	41	42,9
7 (Óleo)	43	42	40	46	43	46	43	43,3
8 (Óleo)	43	45	42	44	42	44	43	43,3
9 (Óleo)	44	44	43	44	46	40	40	43,0

Fonte: Autoria Própria

Nota-se que para o tratamento térmico das amostras com concentração de 30% de solução polimérica PAG, obteve-se uma média maior que a têmpera com concentração de 20% de solução polimérica. A diferença de dureza Rockwell C foi de 4,92%, comparado entre estas soluções.

Para o óleo, obteve-se uma dureza 3,35% menor comparada a solução de 30% e 1,6% maior que a dureza obtida através do resfriamento em solução 20%.

Com isto, os meios de resfriamentos que tiveram melhores resultados de dureza radial foram, respectivamente, solução 30%, óleo mineral e solução 20%.

4.2 ANÁLISE DE DUREZA LONGITUDINAL

Foram realizadas medições longitudinais nos corpos de prova, e obteve-se os resultados conforme tabela 9.

Tabela 9 - Ensaio de Dureza Longitudinal (HRc \pm 2)

Corpos de Prova	Ponto 01	Ponto 02	Ponto 03	Ponto 04	Ponto 05	Ponto 06	Ponto 07	Ponto 08	Média
1 (30%)	33	37	38	31*	34	33	37	37	35,6
2 (30%)	29*	34	35	37	37	33	36	33	35,0
3 (30%)	35	36	38	39	39	38	40	36	37,6
4 (20%)	37	35	35	36	36	36	36	36	35,9
5 (20%)	35	37	37	38	36	36	37	37	36,6
6 (20%)	30*	34	36	36	37	37	37	36	36,1
7 (Óleo)	35	33	37	39	39	34	38	35	36,3
8 (Óleo)	34	35	35	38	36	39	41	37	36,9
9 (Óleo)	35	35	36	38	39	37	36	38	36,8

***Valores desconsiderados**

Fonte: Autoria Própria

Os resultados obtidos para dureza longitudinal entre dos diferentes meios de resfriamento, foram bem próximos, sendo a média de 36,1 HRc de dureza radial com solução polimérica 30%, 36,2 HRc para o tratamento com solução de 20% e 36,6 HRc para óleo.

A diferença de dureza longitudinal entre os meios de resfriamentos foi mínima, cerca de 1,36% entre a maior e menor dureza obtida.

4.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA À TRAÇÃO DOS CP'S RESFRIADOS EM SOLUÇÃO POLIMÉRICA 30%

Todas as amostras foram ensaiadas no mesmo equipamento e apresentaram no início do tensionamento, uma variação errônea de Tensão X Deformação devido a acomodação das garras no corpo de prova, mas que não interferiram no resultado final do ensaio.

Tabela 10 - Ensaio de Tração dos CP's resfriados com 30% solução PAG

Corpo de Prova	Diâmetro (mm)	Secção Transversal (mm ²)	Tensão Esc. Conv. 0,2% (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Along. Ruptura (%)
CP 1	9.000	63.62	1370.2	1512.3	30.25
CP 2	9.000	63.62	1357.4	1498.5	33.51
CP 3	9.000	63.62	1355.9	1483.6	30.09
Número CPs	3	3	3	3	3
Média	9.000	63.62	1361	1498	31.28
Desv.Padrão	0.0000	0.0000	7.828	14.35	1.933
Coef.Var.(%)	0.0000	0.0000	0.5751	0.9578	6.178
Mínimo	9.000	63.62	1356	1484	30.09
Máximo	9.000	63.62	1370	1512	33.51

Fonte: Autoria própria

A tabela 10 mostra os resultados obtidos com os corpos de prova nº 1, 2 e 3, respectivamente, resfriados em solução aquosa PAG 30%, obtendo-se uma tensão máxima de ruptura de 1512,3 MPa e média de 1498 MPa.

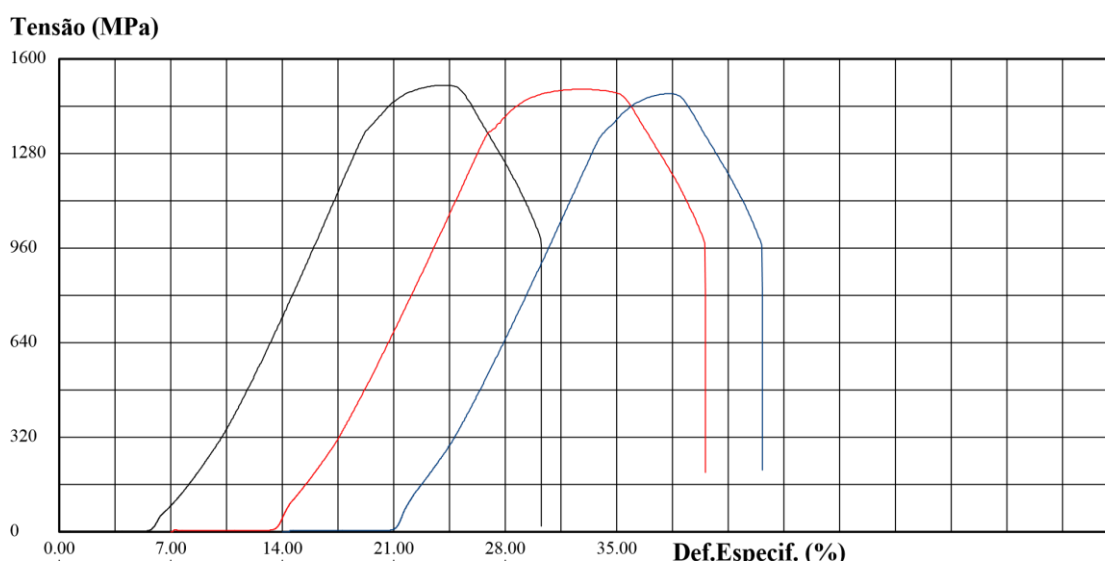


Gráfico 01 – Tensão X Deformação – Amostras 30%

Fonte: Autoria própria



Figura 11 – CP 01 após ensaio de tração
Fonte: Autoria Própria

A figura 11, demonstra a ruptura que ocorreu no ensaio de tração, pode-se notar que formou uma fratura dúctil cônica, resultante de um lento rompimento do metal com o gasto de uma energia considerável. A fratura dúctil em tração é normalmente procedida por uma redução localizada no diâmetro chamada estrição (DIETER, 1982).

4.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA À TRAÇÃO DOS CP's RESFRIADOS EM SOLUÇÃO POLIMÉRICA 20%

Para corpos de prova nº 4, 5 e 6, obteve-se tensão máxima de ruptura de 1449 MPa, e média de 1427,25 MPa, conforme tabela 11. Para tal média, considerou-se somente os valores obtidos dos corpos de prova nº 5 e nº 6, pois o nº 4 rompeu-se antes do esperado devido à presença de uma trinca, possivelmente causada durante o resfriamento.

Tabela 11 - Ensaio de Tração dos CP's resfriados com 20% solução PAG

Corpo de Prova	Diâmetro (mm)	Secção Transversal (mm ²)	Tensão Esc. Conv. 0,2% (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Along. Ruptura (%)
CP 4	9.000	63.62	1107.6	1122.7	17.54
CP 5	9.000	63.62	1309.9	1405.3	31.23
CP 6	9.000	63.62	1353.5	1449.2	30.63
Número CPs	3	3	3	3	3
Média	9.000	63.62	1257	1326	26.47
Desv.Padrão	0.0000	0.0000	131.2	177.2	7.739
Coef.Var.(%)	0.0000	0.0000	10.44	13.37	29.24
Mínimo	9.000	63.62	1108	1123	17.54
Máximo	9.000	63.62	1354	1449	31.23

Fonte: Autoria própria



Figura 12 – Ruptura prematura do CP nº 4 devido trinca

Fonte: Autoria Própria

A partir do gráfico 02, podemos observar que o comportamento do corpo de prova nº 4 a mantém-se constante até 1107,6 MPa, onde ocorre a ruptura prematura do CP, devido a presença de uma trinca possivelmente causada pelo resfriamento térmico conforme podemos observar na figura 12.

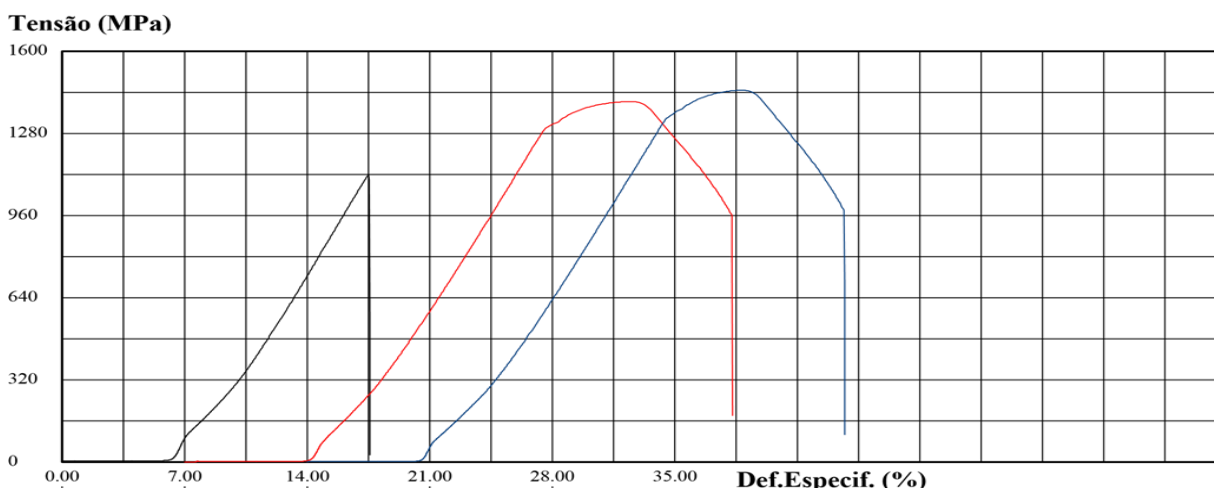


Gráfico 2 – Tensão X Deformação – Amostras 20%

Fonte: Autoria própria

Comparando as tensões de ruptura, verificamos um decréscimo de 5,62% da tensão máxima suportada comparado ao resfriamento de 30% de solução PAG.

4.5 RESISTÊNCIA MECÂNICA À TRAÇÃO DOS CP'S RESFRIADOS EM ÓLEO MINERAL

O ensaio de tração com as amostras resfriadas em óleo, sofreram o mesmo tipo de fratura cônica no formato de taça. A tabela 12 mostra os resultados, com os respectivos desvios padrão, após revenimento.

Tabela 12 - Ensaio de Tração dos CP's tratados em óleo

Corpo de Prova	Diâmetro (mm)	Secção Transversal (mm ²)	Tensão Esc. Conv. 0,2% (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Along. Ruptura (%)
CP 7	9.000	63.62	1211.8	1317.9	24.47
CP 8	9.000	63.62	1304.6	1398.2	29.71
CP 9	9.000	63.62	1299.9	1393.7	29.19
Número CPs	3	3	3	3	3
Média	9.000	63.62	1272	1370	27.79
Desv.Padrão	0.0000	0.0000	52.30	45.10	2.890
Coef.Var.(%)	0.0000	0.0000	4.112	3.292	10.40
Mínimo	9.000	63.62	1212	1318	24.47
Máximo	9.000	63.62	1305	1398	29.71

Fonte: Autoria própria

Pode-se notar, pelo gráfico 3, o comportamento da deformação ocorrida nos corpos de prova resfriado em óleo. Em todos, exceto o CP nº 4, obteve-se bons resultados.

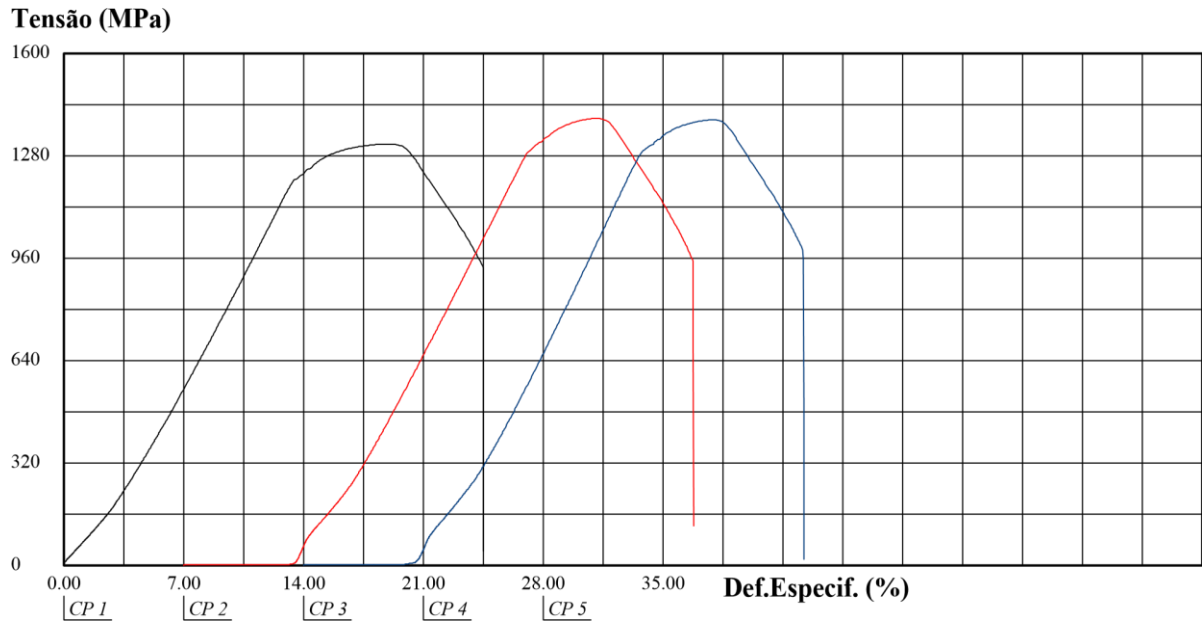


Gráfico 3 – Tensão X Deformação – Amostras resfriadas em óleo mineral
Fonte: Autoria própria

Os resultados de tensão máxima de resistência a tração das amostras resfriadas em polímero com concentração de 20% e 30% foram, respectivamente, de 4,73% à 8,55% maiores que os resfriados em óleo.

4.6 ANALISE MICROESTRUTURAL

As figuras a seguir mostram as microestruturas encontradas nas amostras do aço SAE 4340 para os diferentes meios de resfriamento. As microestruturas observadas nos três meios de resfriamento se equivalem e são compatíveis com os níveis de dureza encontrados nos ensaios realizados.

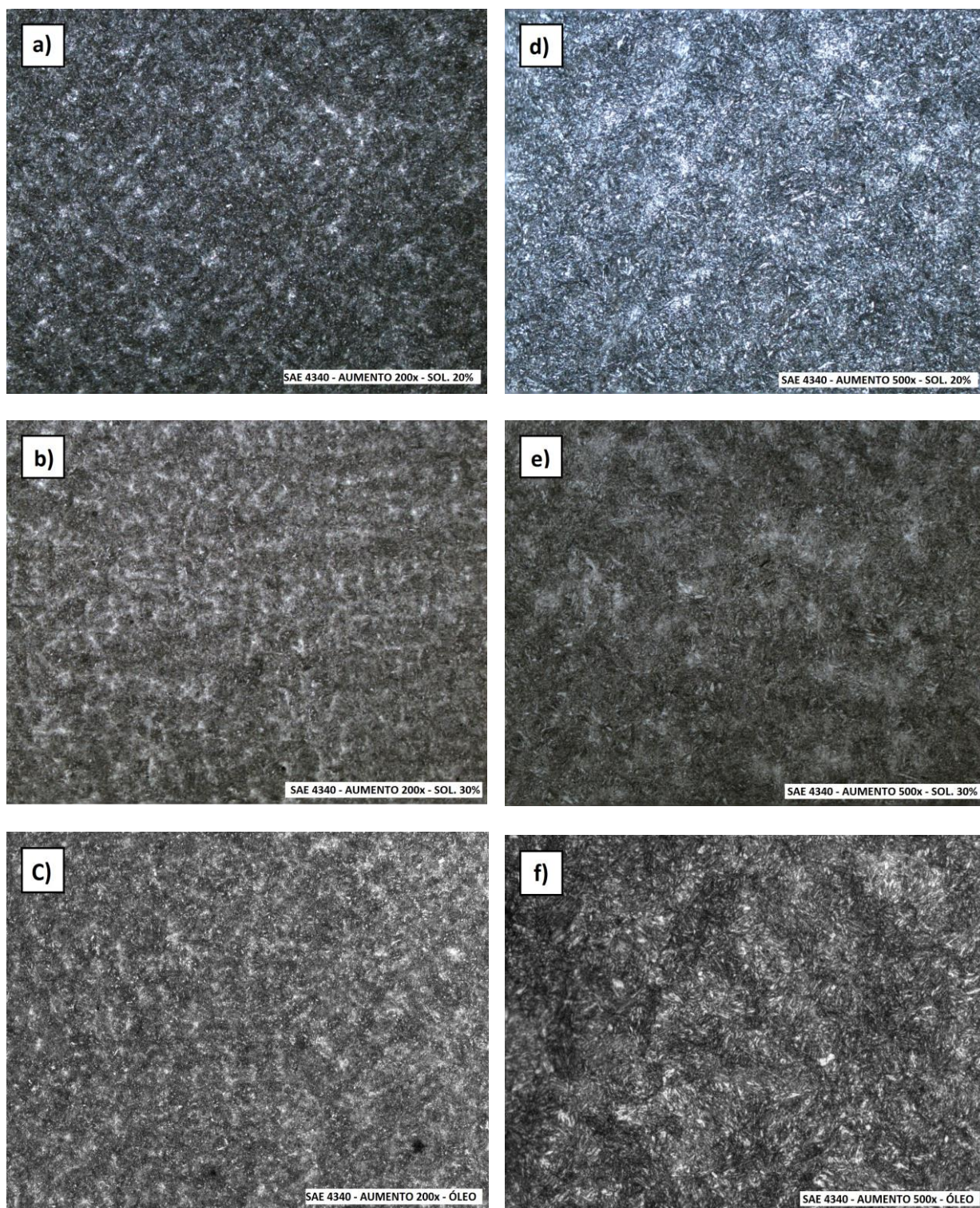


Figura 13 – Comparação entre as microestruturas de diferentes meios de resfriamento, de: a) Solução Polimérica 20% ampliada 200x, b) Solução Polimérica 30% ampliada 200x, c) Óleo mineral ampliada 200x, d) Solução Polimérica 20% ampliada 500x, e) Solução Polimérica 30% ampliada 500x e f) Óleo mineral ampliada 500x.

Fonte: Autoria própria

Nas amostras ampliadas 200x, observa-se uma micro estrutura bem refinada com presença de martensita revenida e martensita sem revenir. Nota-se grãos alongados e mais aciculares na figura 13 letra “b”.

Na figura 13, letras “d”, “e” e “f”, observamos a martensita revenida formada por grãos finos e alongados, normalmente de coloração escura devido a precipitação de carbeto.

A microestrutura predominante é a martensita revenida com grãos muito finos, combinando neste tratamento térmico, alta resistência mecânica, tendo ductilidade e tenacidade sem tornar a estrutura frágil. Pode-se visualizar melhor na amostras ampliadas 500x onde se observa agulhas finas, aciculares e compridas.

Nota-se também núcleos arredondados e claros, possivelmente formação de austenita retida, formado por um resfriamento muito rápido para a quantidade de liga presente no aço. Para evitar a formação de austenita retida, realiza-se tratamento de revenimento com temperatura mais elevada ou resfriando o aço mais lentamente. No caso de resfriamento em solução polimérica, pode-se diminuir a velocidade de resfriamento aumentando a concentração de polímero.

5 CONCLUSÃO

Para o aço SAE 4340 os resultados de ensaio de dureza mostraram que a utilização do meio de resfriamento polimérico é aplicável para o tratamento de têmpera. As diferenças de dureza encontradas (máximo de 4,92%) nas amostras revenidas foram satisfatórias, visto que o objetivo é de substituir o meio de resfriamento. As propriedades mecânicas nos corpos de prova resfriados em polímero foram em média, 8,55% maiores que as amostras resfriadas em óleo comprovando a eficiência deste meio de resfriamento para o aço em estudo.

Quando comparadas apenas as amostras resfriadas nas duas concentrações de polímero pode-se concluir que uma variação na concentração da solução dentro da faixa estudada não afeta significativamente as propriedades mecânicas, tendo diferença de 5,62% entre as concentrações, porém quanto maior a concentração de polimérico, melhor se torna o tratamento.

Com os ensaios realizados pode-se concluir que a utilização do meio de resfriamento polimérico é aplicável para substituir o óleo mineral para o tratamento térmico do aço estudado. A utilização do polímero apresenta vantagens como segurança operacional e limpeza do ambiente, pois após a têmpera em solução polimérica, as peças não necessitam limpeza, ao contrário das amostras resfriadas em óleo, pois nestas, deve-se realizar devido a formação de borra de óleo.

Outro fator importante é com relação ao descarte do fluido de resfriamento, sendo que o descarte incorreto de óleo mineral é danoso ao meio ambiente, e conseqüentemente, para nossa saúde. Por este motivo, prefere-se a utilização do polímero, pois é menos prejudicial ao meio ambiente sendo que o descarte do óleo deve ser coletado e obrigatoriamente enviado a um refinador que recuperará a maior quantidade possível de lubrificante básico.

REFERÊNCIAS

ASTM E 8M – Standard Test Method for Testing of Metallic Materials [Metric];

Boletim Técnico – Fluido Sintético Solúvel para Tratamento Térmico de metais – Hidrotêmpera 6; Disponível em: www.quakerchem.com – Acessado em 01 de junho de 2014;

CALLISTER, William D.. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2002. 589 p.

CANALE, L. C. F.; TOTTEN, George Edward; CANALE, Antonio Carlos. **POLÍMEROS DE TÊMPERA À BASE DE PAG.** *Revista Minerva – Pesquisa & Tecnologia*, São Paulo, p.209-213, 2007. Disponível em: <[http://www.fipai.org.br/Minerva%2003\(02\)%2009.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2003(02)%2009.pdf)>. Acesso em: 02 set. 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamentos Térmicos das Ligas Metálicas.** São Paulo: Abm, 2003. 272 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos.** 6. ed. São Paulo: Abm, 1990. 576 p.

DIETER, G.; **Metalurgia mecânica;** 1ª ed. Rio de Janeiro, LTC, 2000.

Ficha de Segurança – Shell Voluta Oil C 202; Disponível em: www.shell.com – acessado em 1 de junho de 2014.

HENRY, O.; MONDE, K. C.. **Evaluation of the Transformation Mechanisms and Mechanical Properties of Ferrite:** Martensite Microalloyed Steels. *Materials Research, Ogwashi-uku*, v. 11, n. 1, p.97-101, 03 mar. 2008.

KARLEBO, M.; BOFORS, A.; **Manual Bofors – Tratamento Térmico dos Aços;** Parte I, 1973;

METALS HANDBOOK, **Heat Treating**, V. 4, 10ª ed., 1991.

METALS HANDBOOK, **Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys**, V. 1, 10ª ed., 1990.

SOUZA, S.A. **Ensaaios dos materiais**, 1ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 2000.

SPIIM Jr., J.A.; ROCHA, A.S.; **Tópicos Avançados em Tratamentos Térmicos dos Aços;** Programa de Educação Continuada ABM, 2007;