MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-
PPGEM

UTILIZAÇÃO DE SOLUÇÃO POLIMÉRICA EM SUBSTITUIÇÃO AO ÓLEO COMO MEIO DE RESFRIAMENTO NO TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA DE BARRAS DE AÇO.

Pedro Kupka Knoll

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

UTILIZAÇÃO DE SOLUÇÃO POLIMÉRICA EM SUBSTITUIÇÃO AO ÓLEO COMO MEIO DE RESFRIAMENTO NO TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA DE BARAS DE AÇO.

Pedro Kupka Knoll
Engenheiro de Materiais,

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2009

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Lírio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Augusto Silva de Oliveira - UFSC

Prof. Dr. Nestor Cezar Heck – PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Jaime Álvares Spim Junior – PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Lirio Schaeffer pela oportunidade e contribuições dadas na orientação desta dissertação de mestrado.

A Empresa Gerdau Charqueadas pela disponibilidade de equipamentos e materiais para a execução deste projeto.

Aos amigos Eng° Alexsandro Gehrke, Silvio Machado de Souza e Eng° Henrique Loss Lizze pelas contribuições e ensinamentos.

Aos amigos Engº Diego Lima e Engº Patrik Bonaldi pelo companheirismo desde o início do projeto.

Aos meus pais, Biaze e Rosálie, e meu irmão Daniel pelo suporte nos momentos difíceis.

A minha esposa Andresa Henrique Knoll pelo apoio e compreensão dada durante esta jornada.

A todos que colaboraram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....VI
LISTA DE TABELAS.....VIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....IX
RESUMO.....X
ABSTRACT.....XI
1 INTRODUÇÃO..... 1
2 REVISÃO DE LITERATURA 3
2.1 Microestruturas do Aço 3
2.2 Tratamentos Térmicos do Aço 9
2.3 Têmpera em Soluções Poliméricas..... 12
2.4 Aço SAE 4140..... 21
2.5 Aço SAE 4340..... 22
2.6 Aço DIN 31CrMoV9..... 22
3 METODOLOGIA..... 23
3.1 Amostragem 24
3.2 Temperaturas de austenitização e revenimento..... 25
3.3 Têmpera e Revenido..... 25
3.4 Meios de Resfriamento..... 26
3.5 Ensaios de Dureza 28
3.6 Ensaio de Tração 29
3.7 Ensaio Metalográfico..... 29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 30
4.1 Aço SAE 4140..... 30
4.2 Aço SAE 4340..... 34
4.3 Aço DIN 31CrMoV9..... 37
5 CONCLUSÕES..... 40
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS 42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de equilíbrio ferro-carbono. 4
Figura 2 – Curva TTT para o aço SAE 1080. 5
Figura 3 – Fotomicrografia mostrando um aço com estrutura martensítica. Os grãos agulhados são a martensita e a fase branca é austenita que não foi transformada após o resfriamento rápido. 7
Figura 4 – Micrografia eletrônica de martensita revenida. As pequenas partículas são cementitas dispersas em uma matriz ferrítica. 8
Figura 5 – Dureza em função da composição química para aços com martensita, martensita revenida e perlita fina em sua microestrutura. 8
Figura 6 – Possíveis transformações envolvendo a decomposição da austenita. 9
Figura 7 – Reação esquemática do processo de têmpera e revenido. 10
Figura 8 – Comparação do processo de resfriamento de: a) óleo mineral e b) solução aquosa de polímero. 12
Figura 9 – Gradientes de resfriamento de amostras resfriadas em óleo (A) e em solução de polímero PAG (B) 13
Figura 10 – Influência do meio de resfriamento na quantidade de austenita retida e percentual de carbonetos. 14
Figura 11 – Influência do meio de resfriamento na resistência ao desgaste, resistência ao impacto e espessura da camada carbonitretada. 15
Figura 12 – Resultados de dureza e empenamento de virabrequim de aço AISI 1043. . 16
Figura 13 – Estrutura química de polímeros de têmpera. (a) PAG. (b) PVP. (d) PSA. . 18
Figura 14 – Efeito da concentração de polímero na velocidade de resfriamento. 19
Figura 15 – Influência da temperatura do banho, concentração de polímero e agitação do meio na velocidade de resfriamento. 20
Figura 16 – Ilustração do efeito de variáveis de processo nas curvas de resfriamento de polímero PAG. 21
Figura 17 – Fluxograma do processo de fabricação. 23
Figura 18 – Retirada de amostra 24
Figura 19 – Austenitização das amostras. 26
Figura 20 – Tanque com meio de resfriamento e sistema de agitação. 26
Figura 21 – Coeficiente para obtenção da concentração de solução polimérica através de refratômetro. 27

Figura 22 – Representação esquemática dos pontos de medição de dureza. 28
Figura 23 – Retirada dos corpos de prova para ensaio de tração 29
Figura 24 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração. 29
Figura 25 – Representações gráficas dos ensaios de dureza realizados nas amostras do aço SAE 4140. 30
Figura 26 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de tração do aço SAE 4140. 32
Figura 27 – Microestruturas das amostras do aço SAE 4140. 33
Figura 28 – Representações gráficas dos ensaios de dureza realizados nas amostras do aço SAE 4340. 34
Figura 29 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de tração do aço SAE 4340. 35
Figura 30 –Microestruturas das amostras do aço SAE 4340. 36
Figura 31 – Representações gráficas dos ensaios de dureza realizados nas amostras do aço DIN 31CrMoV9. 37
Figura 32 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de tração do aço DIN 31CrMoV9. 38
Figura 33 – Microestruturas das amostras do aço DIN 31CrMoV9. 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 4140 21
Tabela 2 – Composição química do aço SAE 4340 22
Tabela 3 – Composição química do aço DIN 31CrMoV9 22
Tabela 4 - Amostragem 24
Tabela 5 – Composição química das amostras. 24
Tabela 6 – Temperaturas de austenitização 25
Tabela 7 – Propriedades físico-química do polímero utilizado. 27
Tabela 8 – Propriedades físico-química do óleo Voluta C ®. 28
Tabela 9 – Resultados de dureza das amostras do aço SAE 4140. 30
Tabela 10 – Resultados do ensaio de tração amostras do aço SAE 4140. 31
Tabela 11 – Resultados de dureza das amostras do aço SAE 4340. 34
Tabela 12 – Resultados do ensaio de tração das amostras do aço SAE 4340. 35
Tabela 13 – Resultados de dureza das amostras do aço DIN 31CrMoV9 37
Tabela 14 – Resultados do ensaio de tração das amostras do aço DIN 31CrMoV9. 38

LISTA DE SÍMBOLOS

T – Temperatura (ºC)

ρ - Densidade (kg/m³)

D – Diâmetro (mm)

G - Comprimento útil do corpo de prova (mm)

R – Raio mínimo (º)

A – Comprimento da seção reduzida (mm)

σ - Tensão (MPa)

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a possibilidade de substituição do óleo mineral por polímero PAG como meio de resfriamento de barras de aço laminadas a quente. Para isto foram selecionadas barras laminadas dos aços SAE 4140, SAE 4340 e DIN 31CrMoV9 tendo suas propriedades avaliadas quanto a dureza, microestrutura e propriedades mecânicas.

As amostras retiradas sofreram tratamento térmico de têmpera em laboratório sendo resfriadas em polímero PAG com concentração de 15% e 25% e em óleo mineral e, posteriormente, foram submetidas ao tratamento de revenimento a 600 ± 10 °C. Após o revenimento, as amostras foram seccionadas transversalmente para a medição de dureza na superfície, na metade do raio e no núcleo da amostra. A mesma amostra foi preparada para avaliação da microestrutura. O restante da amostra foi usinada para realização do ensaio de tração e conseqüente obtenção das propriedades mecânicas.

Para os aços SAE 4140 e SAE 4340, as diferenças de dureza encontradas foram de no máximo 10% estando esta diferença dentro de uma tolerância aceitável nas especificações de clientes. As propriedades mecânicas dos corpos de prova resfriados em polímero foram, em média, 13% maiores do que as amostras resfriadas em óleo, comprovando a eficiência deste meio de resfriamento para estes dois aços em estudo. As diferenças encontradas nas amostras do aço DIN 31CrMoV9 não foram significativas sendo que a diferença média entre as durezas foi de 3,5%, enquanto que a diferença média entre as propriedades mecânicas foi de 4%, podendo assim concluir que os meios de resfriamento em estudo se equivalem para o tratamento de têmpera do aço DIN 31CrMoV9.

Com este trabalho pode-se concluir que o meio de resfriamento polimérico é aplicável para a substituição do óleo como meio de resfriamento no tratamento térmico de têmpera de barras de aço laminadas. As vantagens identificadas na utilização do polímero como meio de resfriamento devem ser confrontadas com a necessidade de maior controle de processo durante a utilização deste meio de resfriamento para a aplicação em escala industrial.

ABSTRACT

The aim of this work is appraise the possibility of substitution of mineral oil to PAG polymer as quench bath of hot rolled bars of steel. For this were selected rolled bars of steels SAE 4140, SAE 4340 and DIN 31CrMoV9 and their hardness, microstructure and mechanical properties were appraise.

The samples were submitted to quench heat treatment at laboratory being quenched on PAG polymer with concentration of 15% and 25% and mineral oil and, subsequent, were submitted to temper with 600 ± 10 °C. After that, the samples were crosscut to hardness measurement on surface, middle of the radius and center of the sample. The same sample was prepared to microstructure evaluation. The rest of the sample was machined to tensile test and consequent obtaining of mechanical properties.

To the steels SAE 4140 and SAE 4340, the hardness differences found were a maximum of 10%. These differences are inside the range of tolerance specified by clients. The mechanical properties of the samples quenched on polymer baths were, in average, 13% higher than samples quenched on oil bath. These results prove the efficiency of polymer bath for both steels. The differences found on sample of steel DIN 31CrMoV9 were not significant. The average of harness differences was 3,5% and the average of mechanical properties differences was 4%. With that is possible to prove that the quench baths studied are equivalent for steel DIN 31CrMoV9.

With this work is possible to prove that the polymer quench bath is applicable to replace oil as quench bath on quench heat treatment of steel rolled bars. The advantages identified on polymer use as quench bath should be confronted with the needs of higher process control during the use of this quench bath to industrial application.

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias atuais têm exigido cada vez mais a aplicação de aços com as mais diferentes propriedades. Estas propriedades devem tornar os componentes capazes de suportar as mais diferentes condições de serviços ao menor custo possível. Os processos de fabricação utilizados usualmente nem sempre proporcionam as propriedades finais adequadas a uma determinada aplicação. As propriedades dos aços estão associadas com sua microestrutura e composição química. A microestrutura do aço é formada por vários cristais os quais são fisicamente ligados pela solidificação, mudança de fases no estado sólido, deformação a quente e a frio e tratamentos térmicos.

O tratamento térmico dos aços é um importante processo para proporcionar ao componente uma propriedade diferente da obtida após o processo de fabricação, muitas vezes sem afetar significantemente as dimensões do componente. O projeto de tratamento térmico de um componente é extremamente importante a fim de obter as propriedades finais objetivadas e evitar problemas como fissuras e empenamento dos componentes.

Existem diversos tipos de tratamentos térmicos para os aços, desde tratamentos que diminuem a dureza do aço até tratamentos que elevam consideravelmente a resistência mecânica final do componente. Todos os tipos de tratamentos térmicos passam pelas fases de aquecimento, pelo tempo de permanência na temperatura e pelo resfriamento. A variação dos parâmetros utilizados nestas fases irá determinar a microestrutura e, consequentemente, as propriedades mecânicas que serão obtidas após o tratamento térmico.

A velocidade de resfriamento que o aço será submetido afeta consideravelmente o nível de dureza do componente. Neste sentido, um dos tratamentos térmicos mais utilizados pela indústria metal-mecânica é o de têmpera, onde o aço é submetido a um resfriamento rápido após a austenitização. Este tratamento proporciona um aumento de dureza no componente possibilitando a utilização de aços com menores teores de elementos de liga para aplicações de alto desempenho.

Para realizar o resfriamento necessário na têmpera são utilizados fluídos que proporcionam diferentes taxas de resfriamento. Os meios de resfriamento mais usualmente utilizados são: óleo, água, ar e salmoura. A escolha do meio de têmpera

depende da composição química do aço e das propriedades finais desejadas. Quanto maio for a temperabilidade do aço menos severo pode ser o meio de têmpera.

Um dos meios de têmpera mais utilizados na atualidade é o óleo, porém este fluído vem perdendo espaço pelos riscos ambientais e de segurança que ele proporciona. O óleo apresenta um ponto de fulgor relativamente baixo podendo causar incêndios e gera uma elevada quantidade de fumaça. Para substituir o óleo como meio de resfriamento vem-se utilizando polímeros solúveis em água a fim de se obter as mesmas características do óleo no processo de resfriamento do aço.

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar as propriedades de barras dos aços SAE 4140, SAE 4340 e DIN 31CrMoV9, laminadas a quente, e submetidas ao processo de têmpera em soluções de polímero com concentrações de 15% e 25% comparando os resultados obtidos com o tratamento comumente utilizado, ou seja, utilizando óleo como meio de resfriamento. Para avaliar a eficiência do polímero como meio de resfriamento serão avaliadas as microestruturas e propriedades mecânicas dos aços após o revenimento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Microestruturas do Aço

As propriedades do aço estão associadas com sua microestrutura. A microestrutura do aço é formada por vários cristais os quais são fisicamente ligados pela solidificação, mudança de fases no estado sólido, deformação a quente e a frio e tratamentos térmicos. Cada tipo de microestrutura e produto é desenvolvido para se obter uma determinada faixa de propriedades por um roteiro de fabricação específico.

2.1.1 Diagrama Fe-C

O componente presente em maior quantidade no aço é o ferro, o qual apresenta duas formas cristalinas abaixo do seu ponto de fusão. Uma forma cristalina apresenta uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), a qual é estável a parir da temperatura ambiente até 912 °C e é conhecida como ferro-α ou ferrita e também de 1394 °C até a temperatura de fusão do ferro (1530 °C), onde é conhecida como ferrita-δ. A outra forma cristalina do ferro é estável entre 912 e 1394 °C, sua estrutura é cúbica de face centrada (CFC) e é conhecida como ferro-γ ou austenita.

Outro componente presente obrigatoriamente no aço é o carbono. A quantidade de carbono presente no aço varia desde 0,005 % em peso para aços ultra baixo carbono, até um máximo de 2,00 % em peso. O carbono altera profundamente a relação entre fases, microestrutura, e as propriedades do aço. Geralmente aços que requerem alta ductilidade, alta tenacidade e boa soldabilidade contém uma baixa quantidade de carbono, enquanto que aço com requisitos de alta resistência mecânica, resistência a fadiga e ao desgaste apresentam um alto teor de carbono.

A Figura 1 mostra o diagrama de fases ferro-carbono. A solubilidade do carbono na ferrita e na austenita varia em função da temperatura. Quando átomos de carbono não podem mais se alojar nos espaços intersticiais entre os átomos de ferro, uma nova fase que consegue alojar mais carbono na sua estrutura cristalina é formada. Esta fase é chamada de cementita ou carboneto de ferro (Fe_3C).

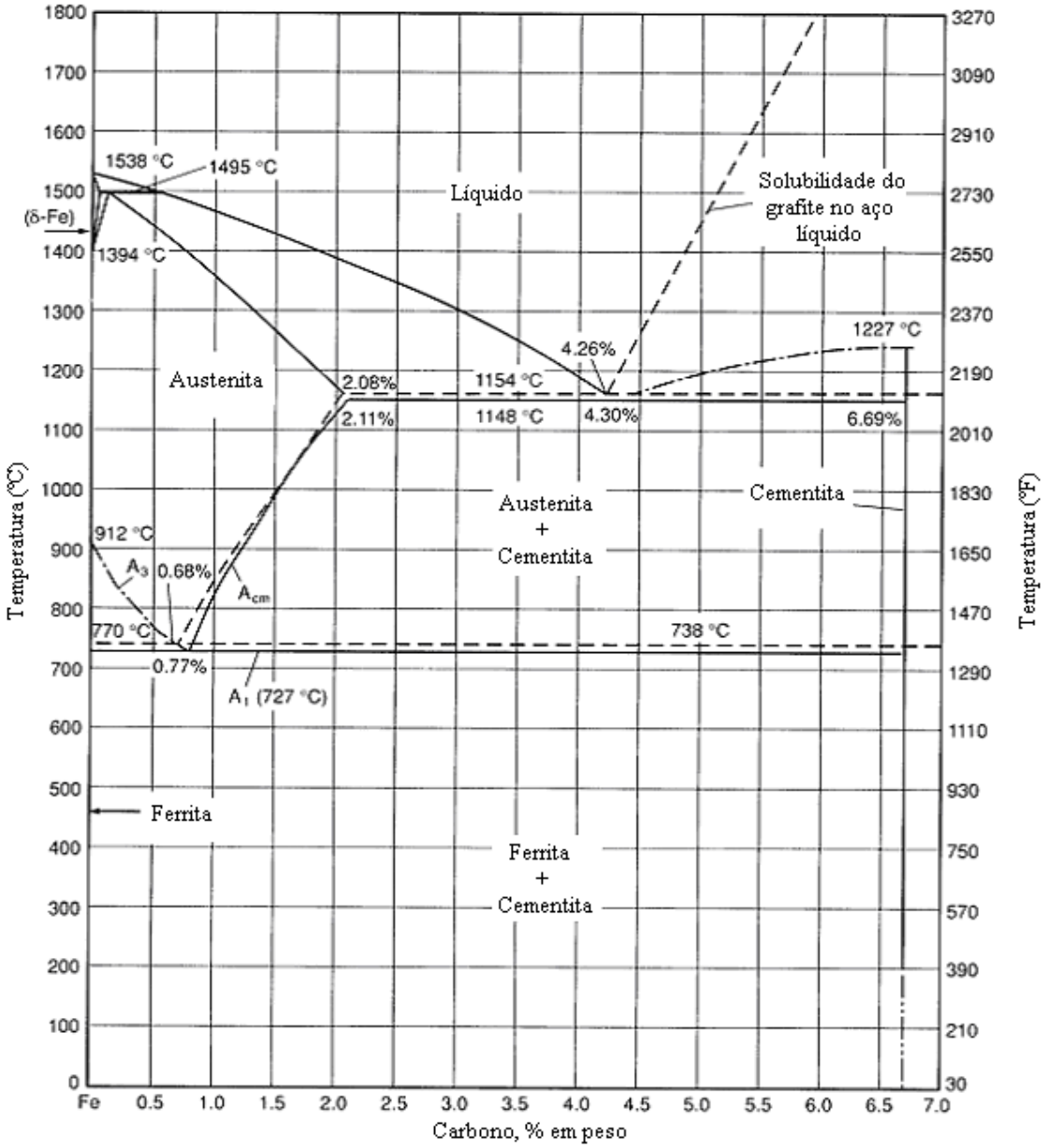


Figura 1 – Diagrama de equilíbrio ferro-carbono.[1]

O campo da austenita, mostrado na Figura 1, é a base para os trabalhos a quente e para alguns tratamentos térmicos dos aços carbonos como por exemplo a têmpera. A austenita é facilmente trabalhada a quente, portanto, grandes seções de aço podem ser reduzidas a menores seções e formas estruturais. A austenita, sob diferentes taxas de resfriamento, se transforma em outras microestruturas. Se for resfriada lentamente, a austenita irá se transformar em ferrita e cementita, se for resfriada rapidamente se transforma em uma fase metaestável chamada martensita

Além do ferro e do carbono, os aços contem outros elementos que alteram o diagrama ferro-carbono. Elementos como manganês e níquel são estabilizadores de

austenita, o que diminui as temperaturas críticas. Elementos como silício, cromo e molibdênio são estabilizadores de ferrita e formadores de carbonetos, o que aumenta as temperaturas críticas e diminui o campo austenítico [1].

2.1.2 Microestruturas

A Figura 2 mostra um diagrama de transformação para um aço SAE 1080 com 0,079 % de carbono. Este diagrama é conhecido como curva TTT (transformação tempo-temperatura) e mostra as condições nas quais as microestruturas são formadas para um determinado tipo de aço. A presença de outros elementos de liga no aço (por exemplo, Cr, Ni, Mo e W) pode causar alterações significativas nestes diagramas. Estas alterações incluem o deslocamento do "joelho" da transformação da austenita em perlita para tempos mais longos e a formação de um "joelho" separado para a bainita.

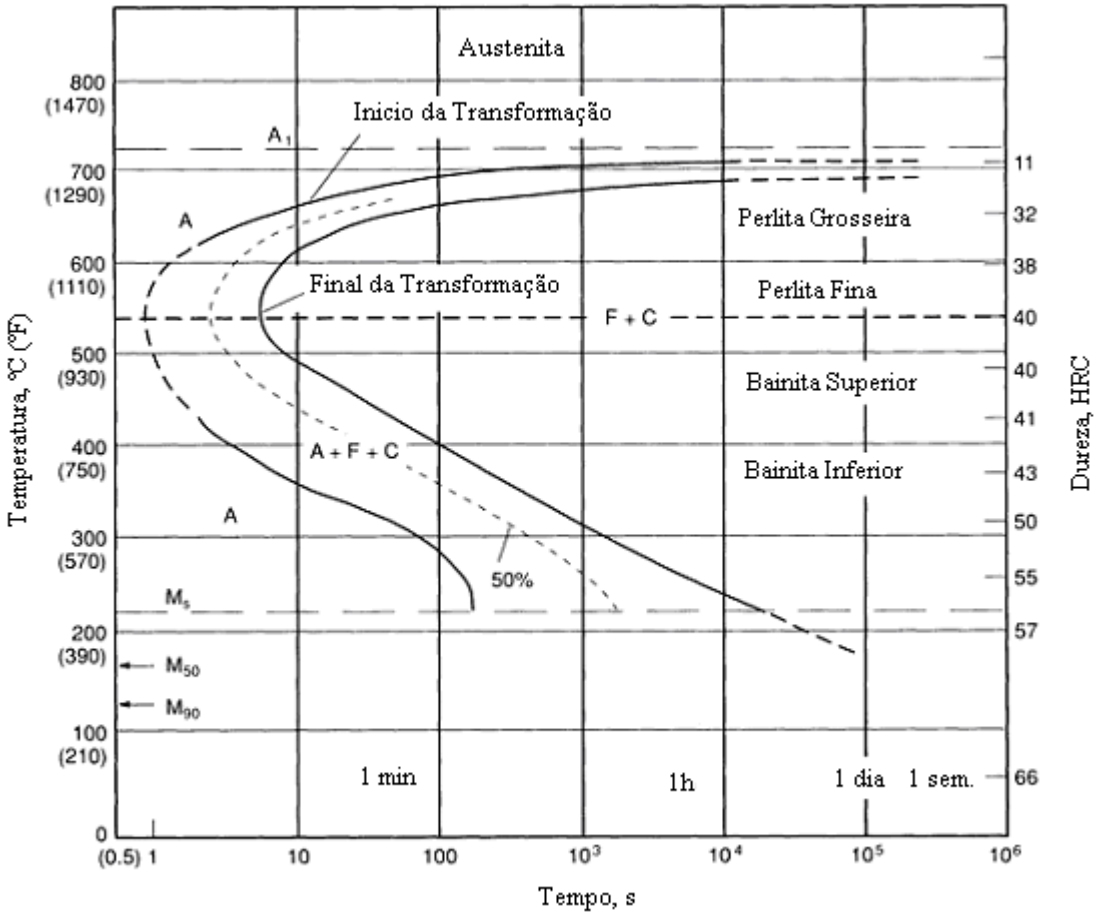


Figura 2 – Curva TTT para o aço SAE 1080 [1].

2.1.3 Martensita

A martensita é formada quando um aço austenitizado é resfriado rapidamente até uma temperatura relativamente baixa. A martensita é uma estrutura monofásica que não se encontra em equilíbrio, resultante de uma transformação sem difusão da austenita. A martensita ocorre quando a velocidade de resfriamento é suficientemente rápida para evitar a difusão de carbono. Nesta transformação, a austenita, CFC, se transforma em martensita com uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC). Todos os átomos de carbono permanecem como impurezas intersticiais na martensita, constituindo uma solução sólida supersaturada capaz de se transformar rapidamente em outras estruturas quando aquecidos a uma temperatura suficiente para que ocorra uma difusão considerável [2].

Duas microestruturas martensíticas são encontradas nos aços: em ripas e lenticular. Para aços com menos do que 0,6 % em peso de carbono, os grãos de martensita se formam em ripas (placas longas e finas), alinhados paralelamente uns aos outros. A martensita lenticular (em placas) é encontrada em aços que contem mais do que 0,6 % em peso de carbono. Nesta estrutura os grãos de martensita apresentam uma aparência em formato de agulha ou em placas [2].

Dentre as várias microestruturas apresentadas acima, a martensita é a que apresenta a maior resistência mecânica. Por ser uma fase muito dura, a martensita apresenta uma ductilidade desprezível. A elevada resistência e dureza da martensita estão relacionadas à eficiência dos átomos de carbono intersticiais em restringir o movimento das discordâncias e também ao fato de que a martensita apresenta uma estrutura cristalina TCC a qual apresenta um pequeno número de planos de escorregamento, dificultando assim a deformação do material. A austenita é ligeiramente mais densa do que a martensita, portanto, durante a transformação de fases ocorre um aumento de volume. Esse aumento de volume pode ocasionar o surgimento de trincas em peças temperadas devido as tensões internas do material.

Figura 3 – Fotomicrografia mostrando um aço com estrutura martensítica. Os grãos agulhados são a martensita e a fase branca é austenita que não foi transformada após o resfriamento rápido (1220x) [2].

2.1.3.1 Martensita Revenida

Por ser muito dura, a martensita é extremamente frágil e, portanto, aços com esta microestrutura não pode ser usado para a maioria das aplicações. Por este motivo é realizado um tratamento de revenimento para melhorar a ductilidade e tenacidade da martensita. Este tratamento resulta em uma estrutura chamada de martensita revenida e, também, alivia as tensões internas geradas durante a transformação austenita-martensita. Durante o revenimento, a martensita com sua estrutura TCC monofásica supersaturada com carbono se transforma em martensita revenida composta pelas fases estáveis ferrita e cementita. A microestrutura da martensita revenida consiste em partículas de cementita extremamente pequenas e uniformemente distribuídas dentro de uma matriz ferrítica. Essa estrutura é semelhante a cementita globulizada, porém as partículas de cementita são extremamente menores neste caso.

A martensita revenida pode ser quase tão dura e resistente quanto a martensita, porém sua ductilidade e tenacidade são bem superiores. O tamanho das partículas de cementita influencia o comportamento mecânico da martensita revenida. O aumento do tamanho das partículas diminui a área de contornos aumentando a ductilidade do material.

Figura 4 – Micrografia eletrônica de martensita revenida. As pequenas partículas são cementitas dispersas em uma matriz ferrítica (9300x) [2].

A Figura 5 mostra as durezas das microestruturas apresentadas acima em relação ao percentual de carbono do aço e, consequentemente, a concentração de Fe_3C. A Figura 6 apresenta as possíveis transformações da austenita em um aço.

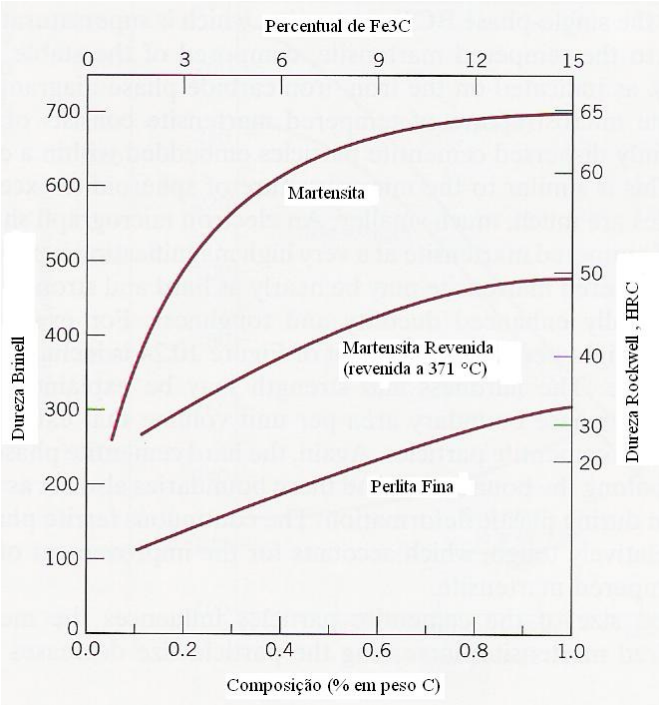


Figura 5 – Dureza em função da composição química para aços com martensita, martensita revenida e perlita fina em sua microestrutura [2].

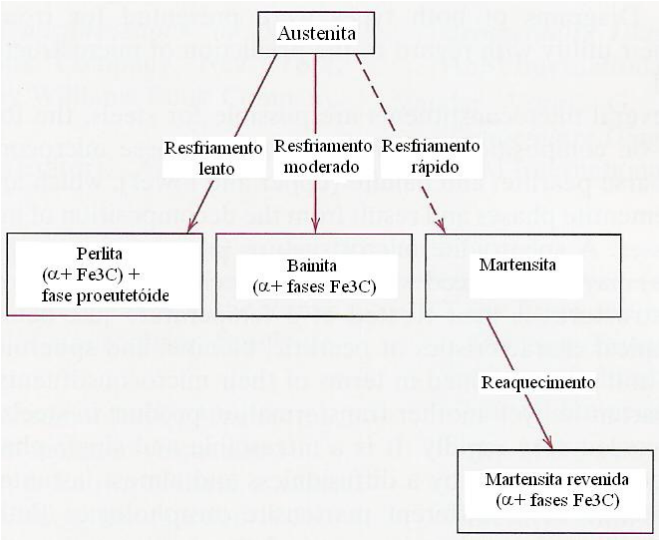


Figura 6 – Possíveis transformações envolvendo a decomposição da austenita [2].

2.2 Tratamentos Térmicos do Aço

Todos os tratamentos térmicos consistem basicamente de três etapas: aquecimento, tempo de permanência na temperatura e resfriamento.

A temperatura de patamar é um parâmetro de fundamental importância no tratamento térmico dos aços. A maioria dos tratamentos térmicos são realizados acima da temperatura de austenitização, porém, em alguns deles, o aço é mantido em temperaturas abaixo da temperatura de austenitização, esses tratamentos são chamados de subcríticos.

2.2.1 Beneficiamento

O tratamento térmico de beneficiamento é constituído de três estágios, austenitização, resfriamento rápido e revenimento. Para a completa austenitização do aço, o mesmo é aquecido a uma faixa de temperatura dentro do campo austenítico e mantido nesta temperatura por um tempo suficientemente longo para que todo o material esteja homogeneizado. Uma vez austenitizado, o aço é resfriado rapidamente geralmente em tanques com água, óleo, soluções poliméricas, banhos de sal ou gases a alta pressão. O grau de dureza e a profundidade de têmpera dependem, principlamente, das taxas de resfriamento estabelecidas e da composição do aço. Alguns aços devem ser resfriados muito rapidamente para atingir dureza e profundidade de têmpera

satisfatórios (ex SAE 1050), enquanto outros aços não necessitam de um resfriamento tão rápido (ex. SAE 8660) [5].

Após a têmpera (austenitização + resfriamento rápido), o aço se encontra com uma estrutura martensítica, extremamente dura e frágil. Além disso, devido ao maior volume da martensita (TCC) em relação a austenita (CFC), uma elevada concentração de tensão residual é encontrada no aço. Para minimizar estas tensões residuais e atingir as propriedades mecânicas desejadas, é realizado um tratamento térmico de revenimento.

O revenimento é realizado imediatamente após a têmpera em temperaturas abaixo da temperatura crítica. Este tratamento modifica a estrutura temperada transformando a estrutura em martensita revenida, melhorando assim a ductilidade. Ao mesmo tempo que ocorre esta modificação estrutural, as tensões internas geradas após a têmpera são aliviadas. A Figura 7 resume o tratamento de têmpera seguido de revenimento.

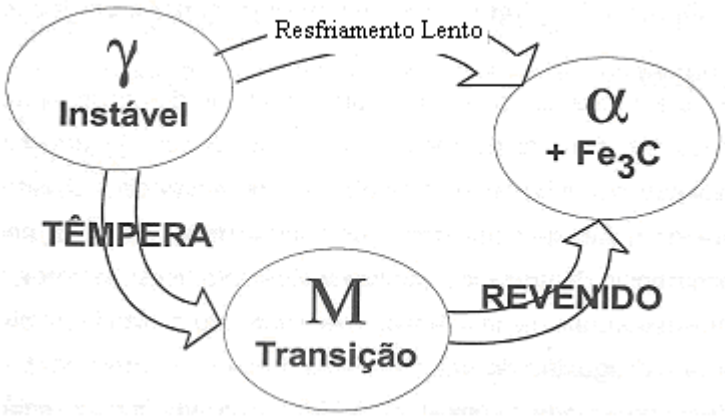


Figura 7 – Reação esquemática do processo de têmpera e revenido [17].

2.2.1.1 Mecanismos de transferência de calor.

A etapa de resfriamento rápido pode ser divida em três estágios.

No primeiro estágio, quando a peça austenitizada entra em contato com o meio de resfriamento, a sua temperatura é suficientemente alta para vaporizar o fluído ocorrendo o recobrimento da peça pelo vapor. O filme de vapor envolve a peça e atua como isolante térmico onde a troca de calor se dá principalmente por radiação devido à alta resistência térmica do filme. Neste estágio a taxa de resfriamento é relativamente

lenta. Para o processo de têmpera é necessário uma taxa de resfriamento elevada então, se faz necessário um controle de temperatura do fluído de têmpera, pois quanto menor for esta temperatura menos intensa será a etapa de recobrimento [7, 8].

O segundo estágio se dá quando o filme de vapor que recobria a peça é quebrado. A temperatura onde este fenômeno acontece é chamada de Temperatura de Leidenfrost. Nesta etapa o fluído de têmpera entra em contato com a superfície do metal evaporando imediatamente. Este contato causa uma forte transferência de calor do metal para o fluído sendo nesta etapa onde ocorre a maior taxa de resfriamento. O ponto de ebulição do líquido de têmpera irá determinar o final da etapa de formação de bolhas [6,8,9].

O terceiro estágio é o de convecção e ocorre quando a temperatura da superfície do metal está abaixo da temperatura de formação de vapor do fluído de têmpera. Nesta etapa a superfície do metal está permanentemente em contato com o fluído. A transferência de calor se dá por convecção e uma taxa de resfriamento lenta é novamente encontrada. Na fase de convecção é onde ocorre a transformação da austenita em martensita devendo-se fazer com que esta etapa seja a mais lenta possível devido ao aumento de volume existente nesta transformação a fim de minimizar possíveis fissuras, fragilizações e distorções na peça. Caso a peça seja resfriada em um meio gasoso, leitos fluidizados ou gases sob pressão, este é o único estágio existente. [9].

São muitos os fatores que condicionam o resfriamento de uma peça austenitizada em um meio de resfriamento. Dentre eles podemos destacar a massa da peça e a condutividade térmica do aço que está sendo utilizado, a natureza, temperatura e agitação do meio de resfriamento [18].

Tensi et. al. [6] demonstraram com corpos de prova cilíndricos temperados verticalmente em óleo de têmpera que ocorria uma destruição do filme de vapor e conseqüentemente um molhamento na superfície inferior do corpo de prova, logo após a imersão no fluído, sendo que no meio na outra extremidade continuava a presença do filme de vapor. Quanto mais tempo o corpo de prova ficava em contato com o fluido maior era a superfície sem o filme de vapor, até o momento que o filme era totalmente eliminado. Com isto era observado diferentes taxas de resfriamento e temperaturas de Leidenfrost ao longo do corpo de prova. Tensi aplicou a mesma metodologia utilizando como meio de resfriamento uma solução aquosa de polímero observando uma pequena diferença entre a presença simultânea de filme de vapor e formação de bolhas. Isto se deve a formação de um filme de polímero em volta da superfície do corpo de prova, o

qual garante o rompimento uniforme do filme de vapor e resulta em uma maior homogeneidade nas propriedades mecânicas do corpo de prova.

2.3 Têmpera em Soluções Poliméricas

Soluções aquosas de polímeros estão cada vez mais sendo utilizadas como meio de resfriamento no tratamento de têmpera dos aços em substituição aos óleos devido a sua superior resistência ao fogo, biodegradabilidade e a inexistência de geração de fumaças tóxicas durante o processo. Outro fator importante nesta mudança vem sendo a melhora significativa de performance dos polímeros em relação ao óleo. A Figura 8 mostra o processo de resfriamento de um óleo de têmpera e de uma solução aquosa de polímero. Quando ocorre a imersão da peça quente na solução, há a formação de um filme contínuo de polímero ao redor da peça, que é separado da superfície do metal por um vapor superaquecido. À medida que o resfriamento acontece, o filme de polímero subitamente se quebra resultando em taxas de resfriamento bastante rápidas. Isso ocorre simultaneamente por toda a superfície do metal, resultando em um processo de resfriamento uniforme. Quando a temperatura da superfície cai abaixo do ponto de ebulição da água, acontece o resfriamento convectivo [16, 28].

O processo de resfriamento em soluções aquosa de polímero leva a uma substancial redução dos gradientes térmicos e de transformação, resultando em menor potencial para o aparecimento de trincas e distorções se comparados ao processo que utiliza óleos minerais. Isso pode ser observado na Figura 9, em que os fluidos vaporizáveis provocam diferentes curvas de resfriamento ao longo da superfície da amostra, enquanto no caso do polímero as curvas de resfriamento praticamente se sobrepõem ao longo da superfície [16, 29].

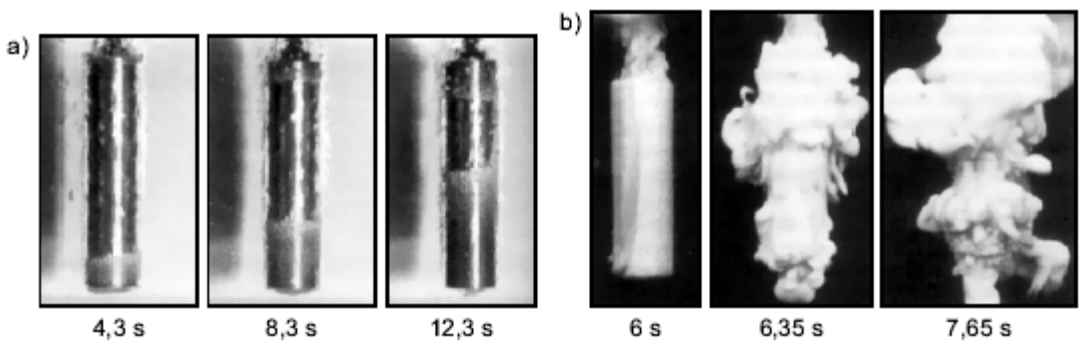


Figura 8 – Comparação do processo de resfriamento de: a) óleo mineral e b) solução aquosa de polímero [16].

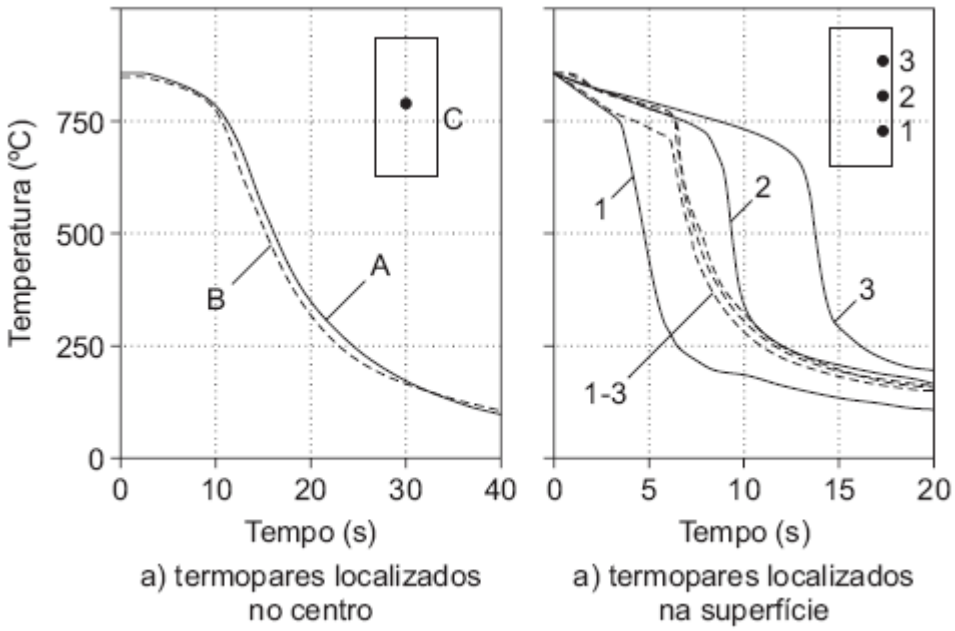


Figura 9 – Gradientes de resfriamento de amostras resfriadas em óleo (A) e em solução de polímero PAG (B) [16].

Um meio de têmpera polimérico é tipicamente uma solução aquosa concentrada de polímero solúvel em água, água e aditivos. Aditivos são usados para vários fins como, por exemplo, evitar a corrosão dos equipamentos e controle de espuma [12].

Kang et. al. [19] compararam os resultados de dureza, durabilidade e resistência a abrasão de punções de aço AISI H13 quando resfriados ao ar com peças resfriadas em duas etapas, primeiramente em solução aquosa de polímero com concentração de 16% seguido de resfriamento ao ar. Os resultados mostraram que as peças temperadas via solução polimérica seguida de resfriamento ao ar apresentaram maior uniformidade de dureza, maiores tempos de vida útil e maior resistência a abrasão do que as peças resfriadas ao ar.

Diaz et. al. [14] utilizaram o polímero PAG com concentração de 12% e obteve resultados muito semelhantes aos obtidos com óleo para os aços AISI 8620 e AISI 8617. Soluções entre 20% e 35% proporcionam menores velocidades de resfriamento e são utilizadas para aços com boa temperabilidade.

Han et. al. [15] temperaram válvulas automotivas do aço AISI H13 utilizando uma solução de 23,5% do polímero PAG obtendo uma estrutura mais refinada, uma maior uniformidade de dureza e uma melhor condição superficial quando comparada a peça resfriada em óleo.

Przylecka et. al. [21] estudaram a influência do meio de resfriamento na quantidade de austenita retida e carbonetos em aços DIN 16MnCr5 carbonitretados. Pode-se observar na Figura 10 que a maior concentração de austenita retida é encontrada na amostra temperada em óleo enquanto que a menor quantidade é encontrada nas amostras temperadas em água e polímero. A quantidade de carbonetos na camada carbonitretada não é dependente do meio de resfriamento. Os autores observaram ainda que a menor resistência ao desgaste foi encontrada na amostra temperada em solução polimérica. A resistência ao impacto é independente da quantidade de carbono na superfície e a espessura da camada carbonitretada fornece uma maior resistência ao impacto para as amostras carbonitretadas temperadas em solução de polímero. A Figura 11 mostra que os carbonetos, a martensita e a austenita retida na camada carbonitretada, quando temperada em solução polimérica aumenta a resistência ao impacto em relação as camadas temperadas em água ou óleo.

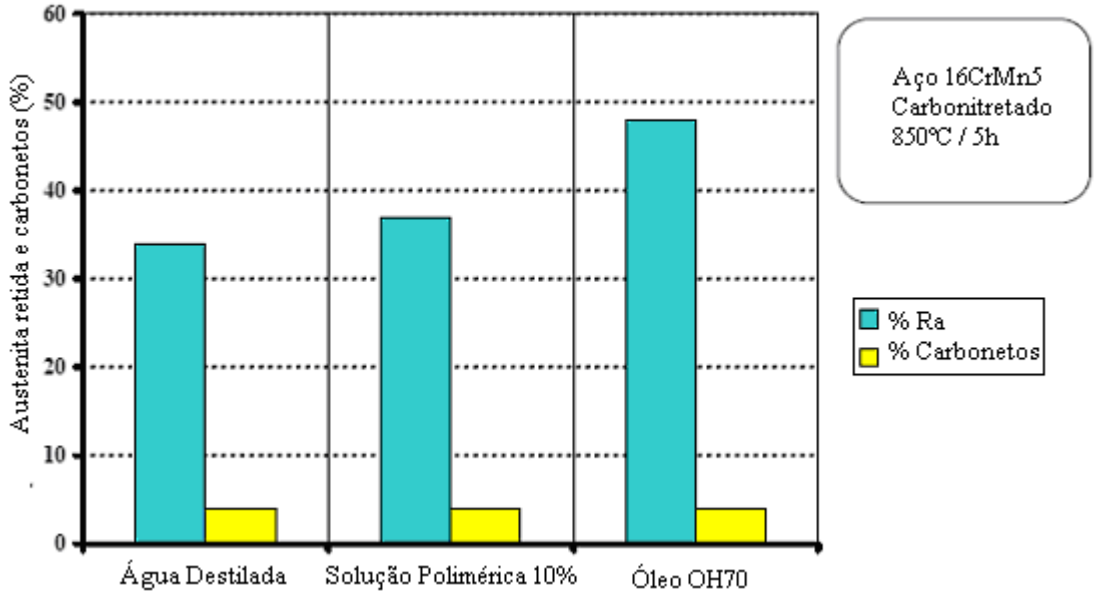


Figura 10 – Influência do meio de resfriamento na quantidade de austenita retida e percentual de carbonetos [21].

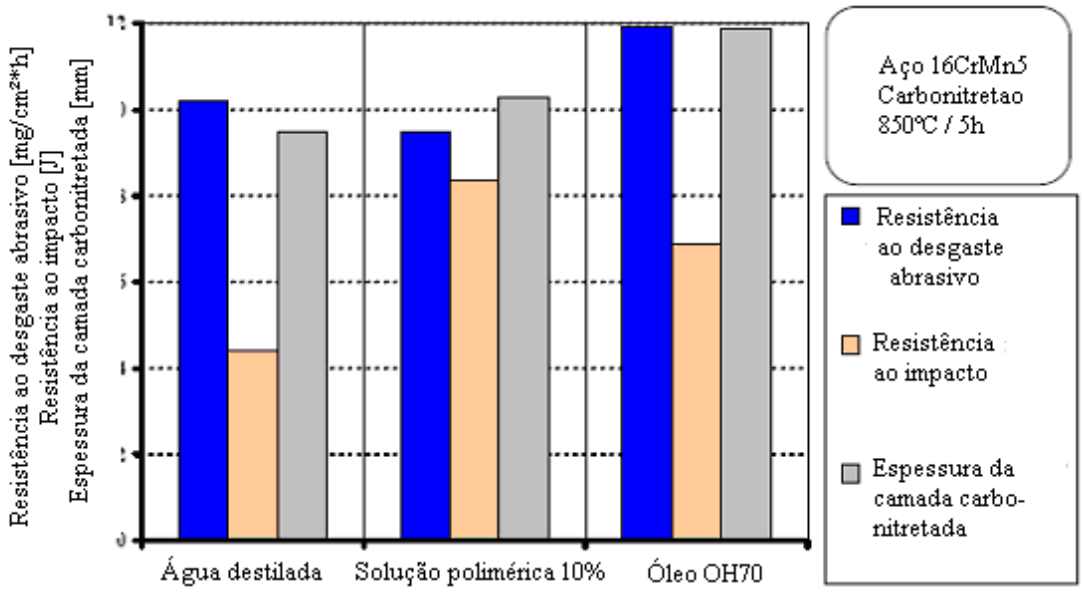
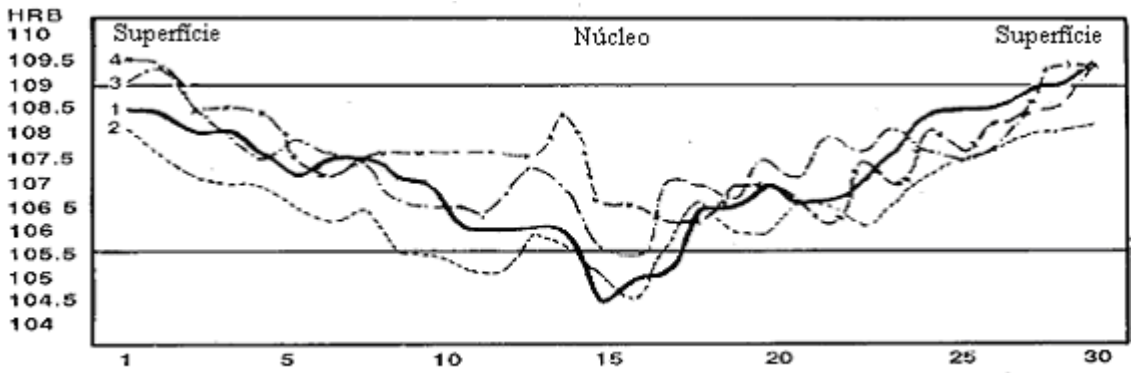


Figura 11 – Influência do meio de resfriamento na resistência ao desgaste, resistência ao impacto e espessura da camada carbonitretada [21].

Han et. al. [23] utilizaram a tecnologia ITQT (*Immersion Time Quenching Technology*), a qual varia a velocidade de resfriamento pelo controle eletrônico da agitação do banho, para tratar termicamente virabrequins de 17,8 e 18,4 kg de aço AISI 1043 comparando os resultados de dureza e distorção utilizando óleo e solução polimérica. Os resultados apresentados na Figura 12 mostram que a utilização de solução de polímero em conjunto com a tecnologia ITQT produzem melhores resultados de dureza e distorção quando comparado aos resultados encontrados nas peças temperadas em óleo.

Kang et al. [25] estudaram a utilização de solução polimérica na têmpera direta após forjamento de peças automotivas de aço AISI 1043 e AISI 1045. Os autores observaram que a utilização de uma solução polimérica em substituição ao óleo produziu maiores durezas e uma microestrutura mais refinada. Entretanto, quando a temperatura do polímero atinge aproximadamente 60 °C uma microestrutura ferrítica pró-eutetóide indesejada é formada. Sendo assim, para a utilização de soluções poliméricas recomenda-se a manutenção do banho em até 45 °C para se obter os resultados desejados.

Além de serem extremamente eficientes quando utilizadas nos processos de têmpera dos aços, as soluções aquosas de polímeros também podem ser utilizadas nos tratamentos de envelhecimento de ligas de alumínio [20, 24].



Número da Amostra	Conc. (%)	Temp. (°C)	Agitação	Empenamento (mm)
1	Óleo de têmpera 70	70	0,4 m/s - total - 0,4m/s	0.96
2	Poli (aquileno glicol) 20	45	0,55m/s - 20 seg. - 0m/s	0.4
3	Poli (aquileno glicol) 10	38	0,73m/s - 60 seg. - 0,12m/s	0.6
4	Poli (aquileno glicol) 7	39	0,73m/s - 90 seg. - 0,12m/s	1.0

1. Tempo de têmpera total é 4 minutos
2. Limite de empenamento é 1,2 mm

Figura 12 – Resultados de dureza e empenamento de virabrequim de aço AISI 1043 [23].

2.3.1 Principais polímeros utilizados

Um polímero é definido como uma grande molécula construída pela repetição de pequenas unidades químicas chamadas de monômeros. Se um polímero é preparado pela repetição de mais de um monômero este é chamado de copolímero. As propriedades dos polímeros dependem do seu tamanho o que é quantitativamente conhecido como peso molecular.

Os principais polímeros utilizados comercialmente como meio de têmpera em solução aquosa são: PAG (poli alquileno glicol), PVP (poli vinil pirrolidona) e PSA (poli sódio acrilato), sendo o copolímero PAG o mais utilizado [12].

O PAG é um copolímero de óxido de etileno (C_2H_4O) e óxido de propileno (C_3H_6O). A variação de seu peso molecular e a razão de óxidos de alquileno usados na fabricação do produto determina seu desempenho. Os copolímeros PAG que apresentam excelentes propriedades de têmpera quando usados em soluções aquosas são os que possuem alto peso molecular. A Figura 13(a) mostra esquematicamente a estrutura do copolímero PAG. O PAG apresenta o fenômeno de solubilidade inversa, isto é, apresentando solubilidade em água em temperatura ambiente e insolubilidade em

temperaturas elevadas. Um meio de têmpera com solução de PAG pode ainda promover um molhamento acelerado, o que resulta em maiores velocidades de resfriamento do que a obtida pela água e semelhante as velocidades atingidas pela salmoura sem que se tenha os perigos e corrosões proporcionadas pelo uso de sal ou soluções cáusticas. [3, 12 e 16].

A Figura 13(b) mostra a estrutura química do polímero PVP (Poli Vinil Pirrolidona). Este polímero é derivado da polimerização de N-vinil-2-pirrolidona sendo um polímero solúvel em água caracterizado por suas propriedades complexas. Como nos outros polímeros utilizados como meio de resfriamento na têmpera, concentração, temperatura do banho e agitação são os parâmetros a serem controlados para se obter as melhores características de resfriamento. As velocidades de resfriamento tendem a ser maiores, com o polímero PVP, durante a fase de estabilidade do filme e de vapor mas é menor durante o estágio de convecção. Como o PVP é solúvel até a temperatura de ebulição da água pode-se utilizar uma faixa de temperatura do banho mais ampla [3].

Outra classe de polímero utilizada como solução aquosa no tratamento de têmpera é o PSA (Poli sódio acrilato). O polímero PSA pode ser produzido pela homopolimerização de acrilato de sódio ou a hidrólise alcalina do poliacrilato de éster, o material tem a estrutura química ilustrada na Figura 13(c). Assim como o PVP, o polímero PSA é solúvel até a temperatura de ebulição da água. A capacidade de reduzir a taxa de remoção de calor é proporcional ao peso molecular do polímero e o efeito que isto irá produzir na viscosidade da solução. As curvas de resfriamento obtidas com soluções aquosas de PSA podem ser quase lineares com o tempo, o que é resultado de um maior resfriamento no estágio de recobrimento por vapor e velocidades de resfriamento menores durante a nucleação de vapor. Esta propriedade do PSA permite sua utilização no tratamento de têmpera de peças propensas a trincas. As velocidades de resfriamento apresentadas pelo PSA são menores quando comparadas a outros polímeros. Aumentando a concentração de PSA e a temperatura do banho pode-se obter velocidades de resfriamento tão baixas que possibilitam a formação de bainita ou perlita fina. Este tipo de tratamento não-martensítico pode ser utilizado quando se deseja menores valores de dureza.

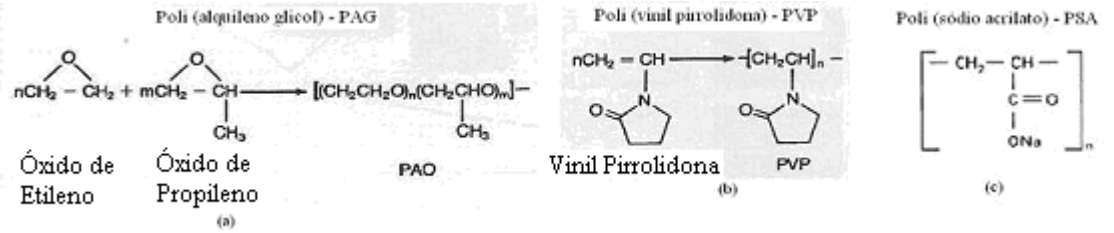


Figura 13 – Estrutura química de polímeros de têmpera. (a) PAG. (b) PVP. (d) PSA.

2.3.2 Fatores que influenciam na velocidade de resfriamento

Entre as diversas variáveis que atuam no processo de têmpera em solução polimérica três são destacadas como as principais, são elas: concentração do banho, temperatura do banho e agitação do tanque [10].

Com um aumento da agitação do banho ocorre um aumento na velocidade de resfriamento em todas as etapas de resfriamento. A agitação afasta as bolhas de gás e vapor da superfície da peça na primeira etapa, sendo observado a formação de pequenas bolhas na segunda etapa, aumentando assim a velocidade de resfriamento nestas duas etapas. Uma maior agitação resulta também em uma maior transferência de calor na terceira etapa de resfriamento [11].

Han et. al. [10] mostraram que variando a agitação do banho durante o processo de resfriamento pode-se obter melhor homogeneidade nas propriedades e menores distorções nas peças. Geralmente é desejável uma maior agitação na primeira e segunda etapa de resfriamento por proporcionar uma maior velocidade de resfriamento e, consequentemente, reduzindo uma potencial formação indesejável de perlita. Reduzir a agitação do meio durante a terceira etapa de resfriamento proporciona tempo para que o núcleo da peça alcance a mesma temperatura da superfície, reduzindo assim possíveis distorções.

A temperatura do meio de têmpera afeta sua capacidade de extração de calor. Considerando apenas o fator temperatura pode-se concluir que quanto menor for a temperatura do meio de têmpera maior será a velocidade de resfriamento, devido a maior diferença de temperatura entre a peça e o meio. Para fluídos viscosos como o óleo, a viscosidade é um fator que controla o processo de resfriamento. Em temperaturas mais baixas os óleos tornam-se mais viscosos fluindo com maior dificuldade resultando em menores velocidades de resfriamento [9].

Diferentemente do óleo, a temperatura não influencia significativamente a viscosidade de soluções aquosas de polímero, sendo assim, quanto mais baixa for a temperatura do banho maior será a velocidade de resfriamento. A medida que a temperatura do banho se aproxima do ponto de ebulição da água o resfriamento torna-se mais lento devido ao aumento da fase vapor diminuindo a capacidade de extração de calor [6].

No processo de têmpera utilizando solução polimérica como meio de resfriamento, a concentração do banho é um dos fatores mais importantes. A Figura 14 mostra que a taxa de resfriamento diminui com o aumento da concentração do polímero. O aumento de concentração produz um maior filme de polímero que atua como isolante térmico prejudicando a extração de calor da peça. Durante o processo de têmpera a concentração de polímero deve ser monitorada com um refratômetro ou viscosímetro. O índice de refração e a concentração têm uma relação linear, porém o índice de refração é altamente afetado pela presença de contaminantes no banho. Geralmente, soluções entre 5% e 10% de polímero em água aumentam a umectação na superfície da peça, aumentam a homogeneidade de propriedades dificultando formação de pontos de baixa dureza, baixas concentrações são utilizadas para aços de baixa temperabilidade. Soluções entre 10% e 20% aceleram as características da têmpera, quando comparadas a óleos, sendo indica para aços com maiores temperabilidades [12, 13].

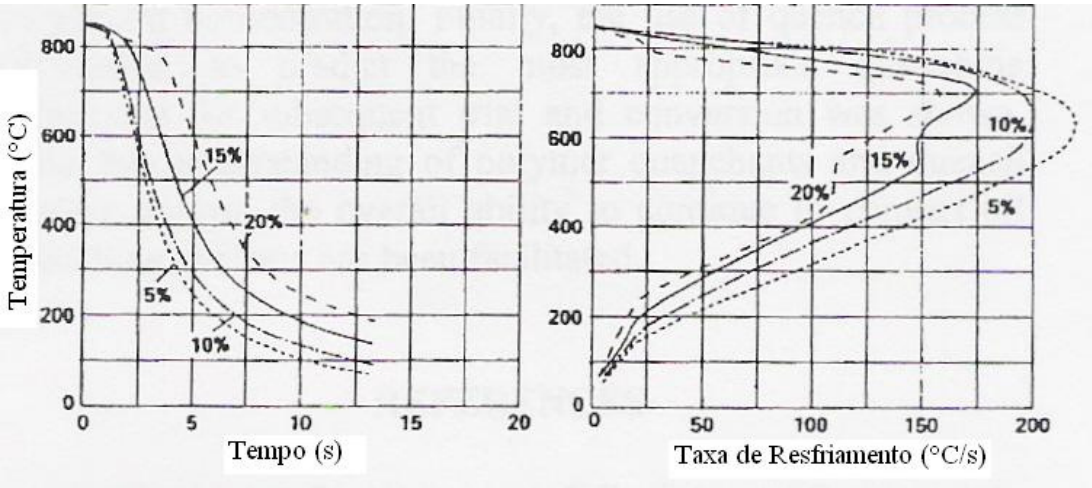


Figura 14 – Efeito da concentração de polímero na velocidade de resfriamento [12].

Utilizando meios adequados de controle de parâmetros do banho como concentração e temperatura, e também da agitação uniforme no tanque é possível obter valores de severidade de Grossman (H) que compreendem uma faixa desde os óleos

minerais (H ≈ 0,2) até os valores correspondentes a utilização de água em temperatura ambiente (H > 1). A Figura 15 ilustra essa flexibilidade que a utilização de soluções poliméricas trazem ao processo [16, 27].

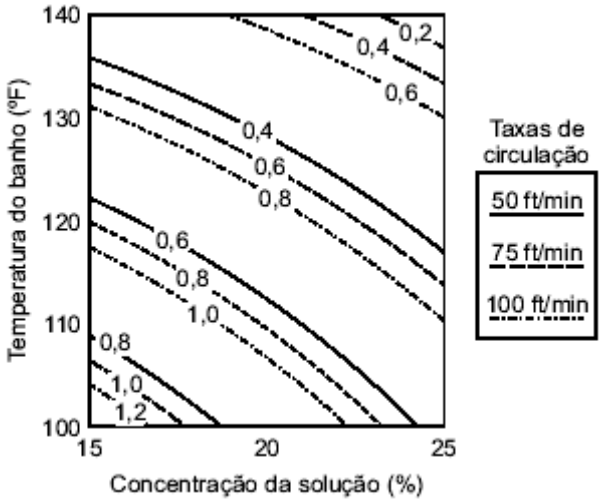


Figura 15 – Influência da temperatura do banho, concentração de polímero e agitação do meio na velocidade de resfriamento [16].

Para a utilização de soluções poliméricas se faz necessário um controle do banho para que suas características sejam mantidas. Durante o processo, vários contaminantes interagem com o banho, como por exemplo, carepa e óleos, que resultará em uma transferência de calor não uniforme devido a heterogeneidades na formação do filme de polímero gerando gradientes de temperaturas não desejáveis. Além dos contaminantes ocorre também a degradação do polímero que resulta na redução de seu peso molecular. Esta degradação pode ocorrer mecanicamente ou por oxidação/térmica. A determinação da viscosidade do banho é um excelente indicador da concentração do banho e é diretamente afetada pela degradação do polímero. Na Figura 16 pode-se observar claramente como o processo de degradação do polímero aumenta as taxas de resfriamento devido a diminuição da viscosidade e conseqüente maior transferência de calor [22, 26].

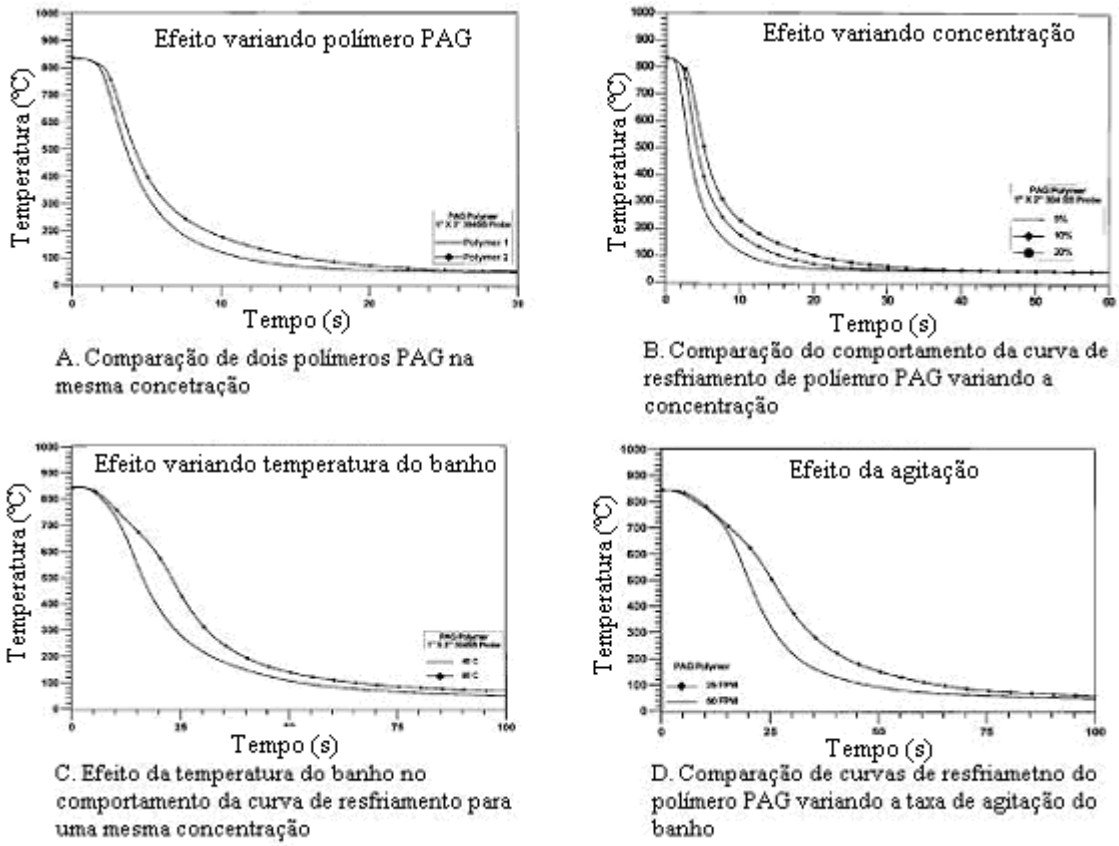


Figura 16 – Ilustração do efeito de variáveis de processo nas curvas de resfriamento de polímero PAG [26].

2.4 Aço SAE 4140

O aço SAE 4140 é um aço ligado ao cromo e molibdênio e apresenta boa resistência mecânica, média usinabilidade, baixa soldabilidade e temperabilidade relativamente alta. É utilizado em peças que exigem elevada dureza, resistência e tenacidade, como por exemplo, virabrequins, bielas, eixos, engrenagens, armas, parafusos e equipamentos para petróleo. A faixa de composição química deste aço está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 4140

C	Mn	P máx.	S máx.	Si	Cr	Mo
0,38 - 0,43	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,15 - 0,35	0,8 - 1,10	0,15 - 0,25

2.5 Aço SAE 4340

O aço SAE 4340 contém cromo, molibdênio e níquel em sua composição química o que torna este aço o de mais alta temperabiliade entre os aços para construção mecânica. Este aço apresenta baixa usinabilidade e soldabilidade e boa forjabilidade. É utilizado na fabricação de virabrequins para aviões, tratores e veículos em geral, além de engrenagens, componentes com boas propriedades mecânicas e eixos. A faixa de composição química está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química do aço SAE 4340

C	Mn	P máx.	S máx.	Si	Ni	Cr	Mo
0,38 – 0,43	0,60 - 0,80	0,030	0,040	0,15 - 0,35	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30

2.6 Aço DIN 31CrMoV9

O aço DIN 31CrMoV9 é utilizado para nitretação devido ao seu elevado teor de cromo que facilita a formação de nitretos. A composição química deste aço é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química do aço DIN 31CrMoV9

C	Mn	P máx.	S máx.	Si máx.	Cr	Mo	V
0,26 - 0,34	0,40 - 0,70	0,025	0,030	0,040	2,30 – 2,70	0,15 – 0,25	0,10 – 0,20

3 METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho foi avaliar comparativamente as propriedades finais de barras de aços laminadas a quente quando temperadas em solução aquosa de polímero PAG com diferentes concentrações, e óleo mineral. Para isto, foram selecionados os aços SAE 4140, SAE 4340 e DIN 31CrMoV9 sendo estes analisados quanto as características de dureza, propriedades mecânicas e microestrutura após tratamento de têmpera e revenido. A Figura 17 mostra um fluxograma do processo de fabricação de barras de aço temperadas e revenidas indicando a etapa do processo onde foram retiradas as amostras.

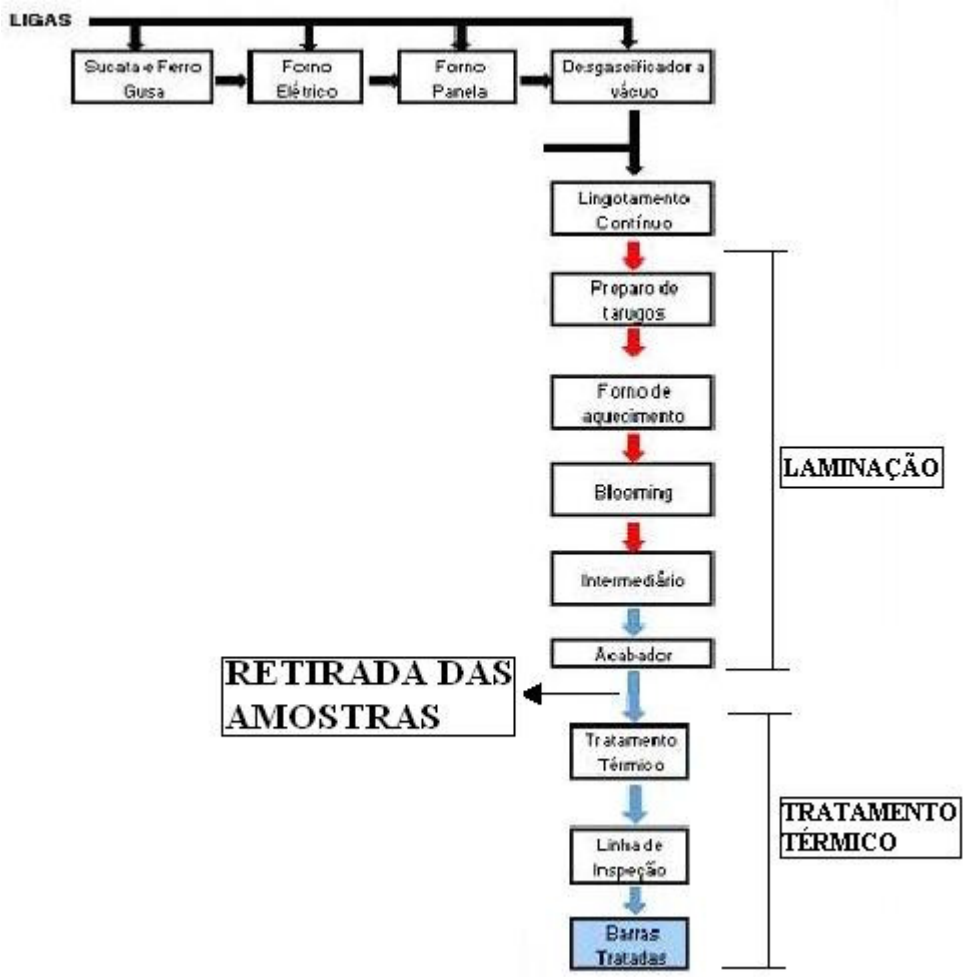


Figura 17 – Fluxograma do processo de fabricação.

3.1 Amostragem

Para cada tipo de aço foram retiradas 9 amostras de 300 mm de comprimento de uma mesma barra redonda laminada a quente a partir de tarugo obtido por lingotamento contínuo. A Tabela 4 mostra os diâmetros das amostras, obtidos após a laminação, e a quantidade de amostras utilizadas em cada meio de resfriamento. A Figura 18 mostra esquematicamente a retirada das amostras. As diferenças dos diâmetros das amostras são em função da não disponibilidade de barras de mesmo diâmetro para todos os aços em estudo.

Tabela 4 - Amostragem

Aço	Diâmetro (mm)	Meio de Resfriamento		
		PAG 15%	PAG 25%	Óleo
SAE 4140	**38,10**	3	3	3
SAE 4340	**31,75**	3	3	3
DIN 31CrMoV9	**33,34**	3	3	3

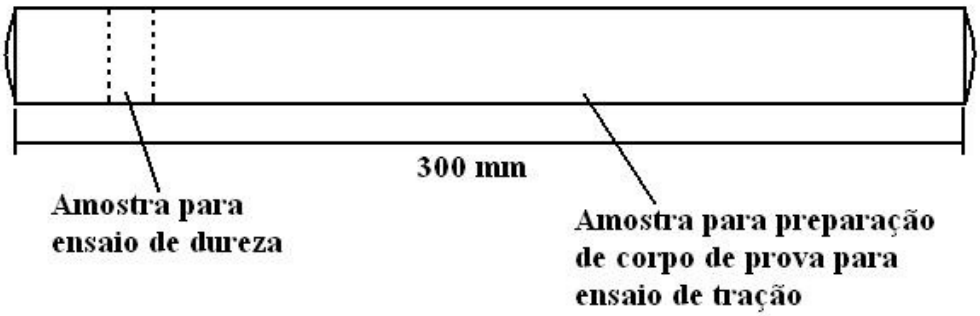


Figura 18 – Retirada de amostra

As amostras utilizadas foram analisadas em um espectrômetro de emissão ótica ARL 3560 tendo suas composições químicas apresentadas na Tabela 5. Todas as amostras apresentaram composição química de acordo com a norma.

Tabela 5 – Composição química das amostras.

Aço/Elemento	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Ceq.
SAE 4140	0,41	0,85	0,023	0,028	0,24	0,08	1,02	0,18	0,00	0,14	0,81
SAE 4340	0,40	0,69	0,021	0,015	0,25	1,75	0,75	0,23	0,00	0,12	0,84
DIN 31CrMoV9	0,32	0,59	0,016	0,024	0,25	0,09	2,46	0,19	0,11	0,14	0,99

3.2 Temperaturas de austenitização e revenimento

Para a realização dos testes foram determinadas as temperaturas de austenitização e de revenimento para os aços em estudo. As temperaturas de austenitização foram obtidas através da Equação 4 [17] e estão apresentadas na Tabela 6.

$$T = 910 - 203\sqrt{(\%C)} - 15{,}2(\%Ni) + 44{,}7(\%Si) + 104(\%V) + 31{,}5(\%Mo) \qquad (4)$$

Tabela 6 – Temperaturas de austenitização

Aço	Temperatura (°C)
SAE 4140	850 ± 10
SAE 4340	830 ± 10
DIN 31CrMoV9	870 ± 10

A temperatura de revenimento utilizada para todos os aços foi de 600 °C sendo admitido uma tolerância de ± 10 °C, para que fosse possível comparar apenas o efeito do meio de resfriamento sobre as propriedades dos aços. A temperatura de 600 ºC, considerada relativamente alta para tratamento de revenimento, foi utilizada no para que se obtenha uma estrutura homogênea que atenda os requisitos de fabricação semelhantes a linha de produção.

3.3 Têmpera e Revenido

As amostras retiradas das barras laminadas foram aquecidas em um forno elétrico Sanchis modelo ATT 1200 °C com potência de 6 kWh (Figura 19) e mantidas nas temperaturas estabelecidas durante 1 hora para completa austenitização. Após a austenitização, as amostras foram retiradas individualmente e inseridas, durante aproximadamente 10 minutos, em um tanque de resfriamento, com capacidade de 600 litros, previamente preparado com o meio de resfriamento. A temperatura do banho foi controlada por termopar tipo K e mantida abaixo de 35 °C. Um sistema de agitação compõe a estrutura do tanque utilizado (Figura 20).

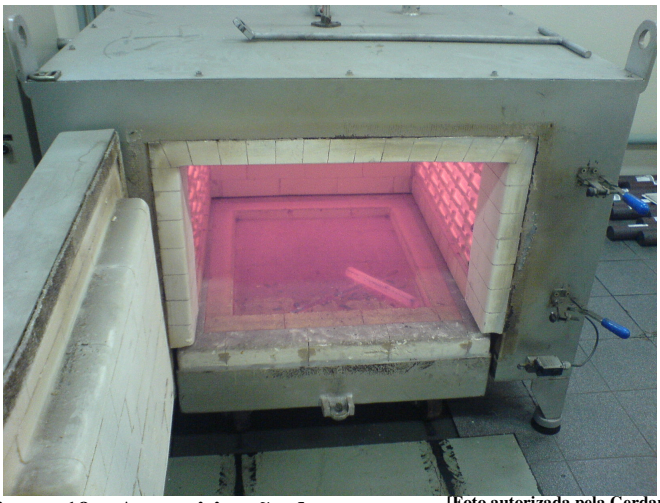


Figura 19 – Austenitização das amostras [Foto autorizada pela Gerdau].

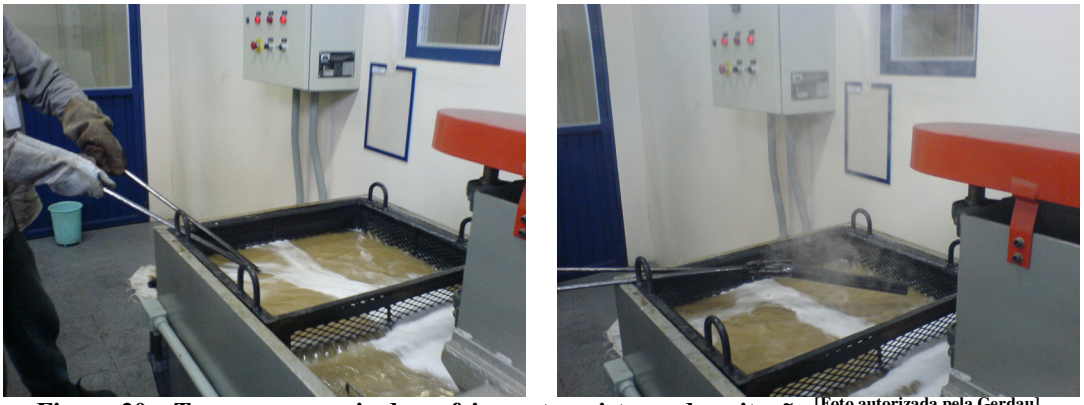


Figura 20 – Tanque com meio de resfriamento e sistema de agitação [Foto autorizada pela Gerdau].

Após a têmpera as amostras foram submetidas ao tratamento de revenimento a 600 °C.

3.4 Meios de Resfriamento

Os meios de resfriamento utilizados neste trabalho eram compostos de solução aquosa de polímero PAG com concentrações de 15% e 25%, e óleo mineral.

O polímero utilizado foi o Hidrotêmpera 6® fornecido pela empresa Quaker Chemical, tendo suas características descritas na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades físico-química do polímero utilizado [30].

CARACTERÍSTICAS	***TÍPICO***	***UNIDADE***
Aspecto visual	líquido viscoso	Não aplicável
Cor visual	amarelo	Não aplicável
Densidade a 25°C	1,080	g/cm³
Viscosidade a 40°C, cSt	140,0	mm²/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

Na preparação dos banhos foi utilizado um refratômetro para controle da concentração de polímero. A leitura do refratômetro foi multiplicada por 1,87 para obtenção da concentração, conforme Figura 21.

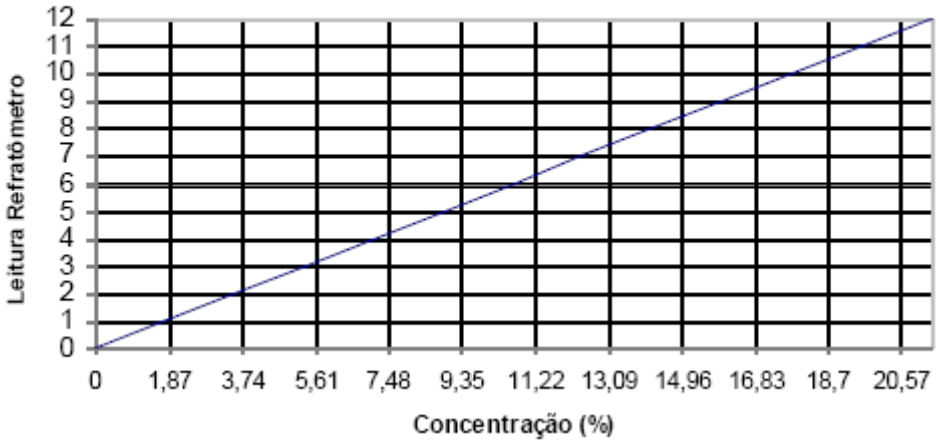


Figura 21 – Coeficiente para obtenção da concentração de solução polimérica através de refratômetro [30].

Foi utilizado ainda, como meio de resfriamento, o óleo mineral Voluta C® fornecido pela empresa Shell. As propriedades físico-químicas deste óleo estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades físico-química do óleo Voluta C ® [31].

Propriedade	Característica
Cor	Amarelo Claro
Estado Físico	Líquido a temperatura ambiente
Pressão de Vapor	Menor do que 0,5 Pa à 20 °C
Ponto de ebulição	280 °C
Densidade (ρ)	870 kg/m^3 à 20 °C
Temperatura de auto ignição	320 °C
Viscosidade cinética	30 mm^2/s à 40 °C
Densidade do vapor	Maior do que 1

3.5 Ensaios de Dureza

Três amostras de cada aço e meio de resfriamento foram preparadas para medição da dureza Brinell após o tratamento de revenimento. Para isto as amostras foram seccionadas transversalmente e tiveram suas superfícies submetidas a um esmerilhamento e subseqüente lixamento em lixas com granulometria número 320 e 600. As medições foram feitas na superfície, na metade do raio e no núcleo das amostras (Figura 22). Os ensaios foram conduzidos em um durômetro Wolpert BK 300B com esfera de 5,0 mm de diâmetro e carga de 750 kg. As medições das calotas foram realizadas no aparelho Dia Testor 2N.

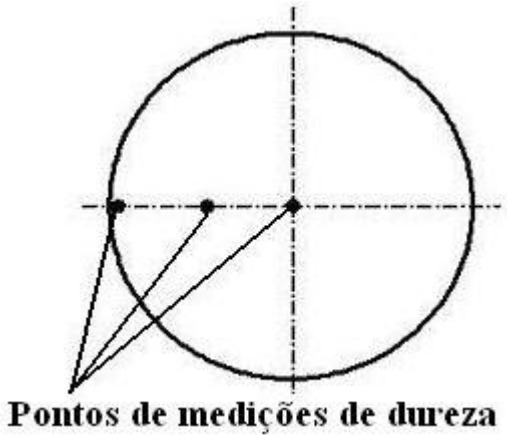


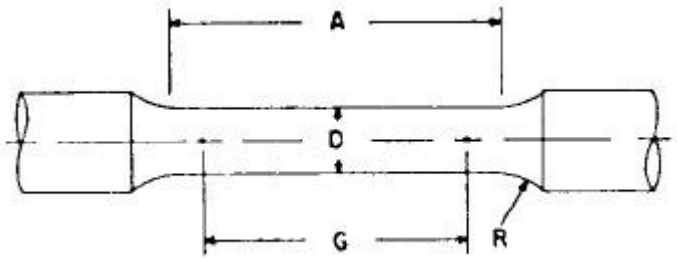
Figura 22 – Representação esquemática dos pontos de medição de dureza.

3.6 Ensaio de Tração

Três amostras de cada aço foram usinadas para confecção de corpos de prova para ensaio de tração realizados em uma máquina universal de ensaios Instron conforme a norma ASTM E 8M [32].

Os corpos de prova foram retirados na metade da secção da barra, conforme Figura 23, sendo usinado nas dimensões descritas na Figura 24.

Figura 23 – Retirada dos corpos de prova para ensaio de tração



Diâmetro	**12,5 ± 0,2 mm**
Comprimento útil (G)	**62,5 ± 0,1 mm**
Raio mín. (R)	**10 º**
Comprimento da seção reduzida (A)	**75 mm**

Figura 24 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração.

3.7 Ensaio Metalográfico

Para as análises microscópicas, as amostras foram seccionadas transversalmente e submetidas a uma seqüência de lixamento com lixas de granulometria n° 120, 200, 320, 400, 600 e 1000 e polidas com pasta de diamante de 4 e 1 μm. O ataque químico foi feito com reagente Nital 2%. Após a preparação as amostras foram analisadas em um microscópio ótico Olympus BX 60M com ampliação de 500 x.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Aço SAE 4140

4.1.1 Análise de dureza

A Tabela 9 mostra os resultados de dureza (± desvio padrão) das amostras do aço SAE 4140. As medições foram realizadas na superfície, na metade do raio e no núcleo da amostra. A Tabela 9 mostra ainda as diferenças percentuais entre os meios de resfriamento em estudo. A Figura 25 representa graficamente os resultados de dureza.

Tabela 9 – Resultados de dureza das amostras do aço SAE 4140.

Aço	Meio de Resfriamento	Dureza (HB)		
		Superfície	½ Raio	Núcleo
SAE 4140	PAG 25%	215 (± 4,0)	220 (± 7,5)	219 (± 4,5)
	PAG 15%	217 (± 6,7)	224 (± 9,5)	222 (± 2,9)
	Óleo	213 (± 9,8)	215 (± 4,0)	210 (± 4,6)
	Diferenças			
	25% - 15%	-1%	-2%	-1%
	25% - Óleo	1%	2%	4%
	15% - Óleo	2%	4%	5%

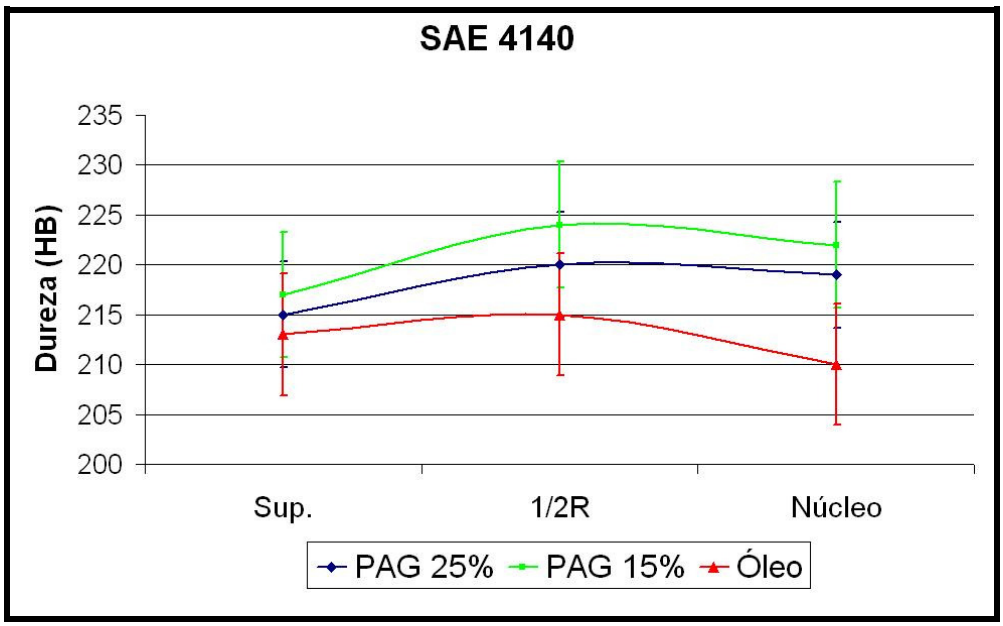


Figura 25 – Representações gráficas dos ensaios de dureza realizados nas amostras do aço SAE 4140.

Os resultados de dureza dos três grupos de amostras se equivalem. As diferenças encontradas não são significativas uma vez que a diferença máxima foi de 5%. Os valores encontrados nas amostras ensaiadas apresentaram uma uniformidade ao longo de secção transversal.

4.1.2 Resistência mecânica

A Tabela 10 mostra os resultados, com os respectivos desvios padrão, dos ensaios de tração do aço SAE 4140 após o revenimento. Os resultados de resistência a tração das amostras resfriadas em polímero PAG com concentração de 25% e 15% foram aproximadamente 14% maiores do que aos das amostras resfriadas em óleo enquanto que os resultados de limite de escoamento foram 9% maiores. Este resultado mostra uma maior resistência mecânica das amostras resfriadas em polímero em comparação as amostras resfriadas em óleo quando submetidas a um mesmo tratamento de revenimento. Os resultados mostram ainda que, para as concentrações de polímero estudadas, os resultados não apresentam diferenças significativas. A Tabela 10 mostra ainda as diferenças percentuais entre os meios de resfriamento em estudo. A Figura 26 representa graficamente estes resultados.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de tração amostras do aço SAE 4140.

Amostra	RT (MPa)	LE (MPa)	Red. Area (%)	Alongamento (%)
PAG 25%	1026 (± 12)	855 (±12)	53 (± 4)	18 (± 1)
PAG 15%	1020 (± 4)	844 (± 4)	55 (± 2)	19 (± 1)
Óleo	884 (± 9)	774 (± 8)	63 (± 2)	16 (± 1)
Diferentas				
25% - 15%	1%	1%	-5%	-2%
25% - Óleo	14%	9%	-19%	13%
15% - Óleo	13%	8%	-13%	14%

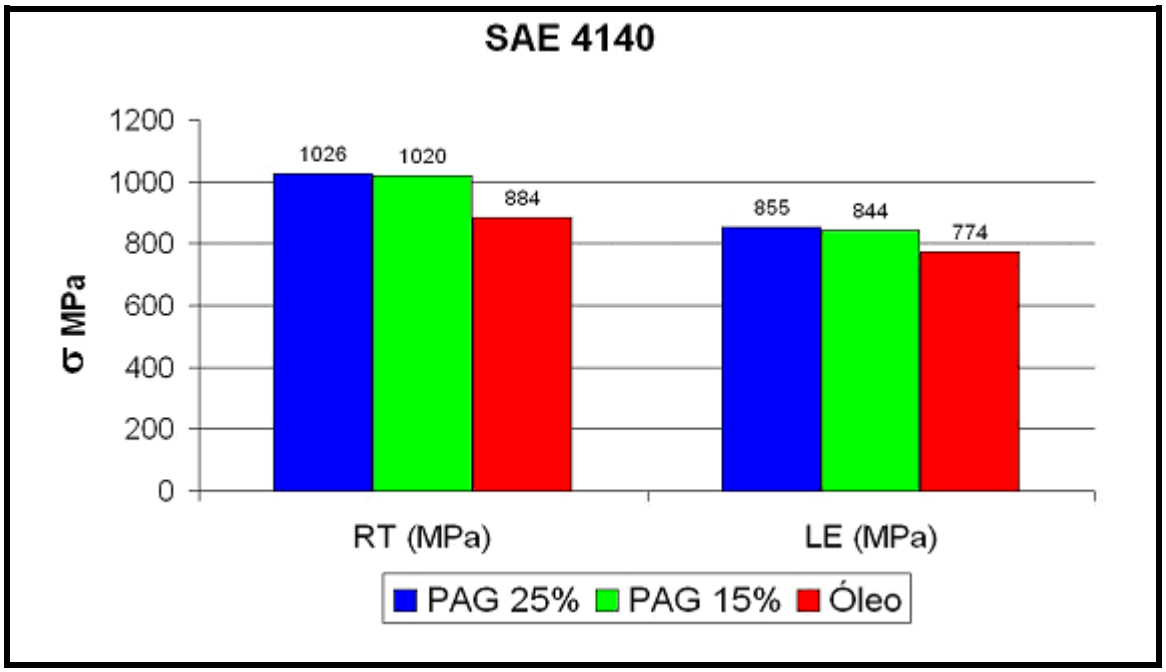


Figura 26 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de tração do aço SAE 4140.

4.1.3 Análise da microestrutura

A Figura 27 mostra as microestruturas encontradas nas amostras do aço SAE 4140 sendo observada uma estrutura com martensita revenida nas amostras retiradas após o revenimento. As estruturas encontradas após o revenimento são compatíveis com o tratamento térmico utilizado sendo equivalente para os três meios de resfriamento em estudo.

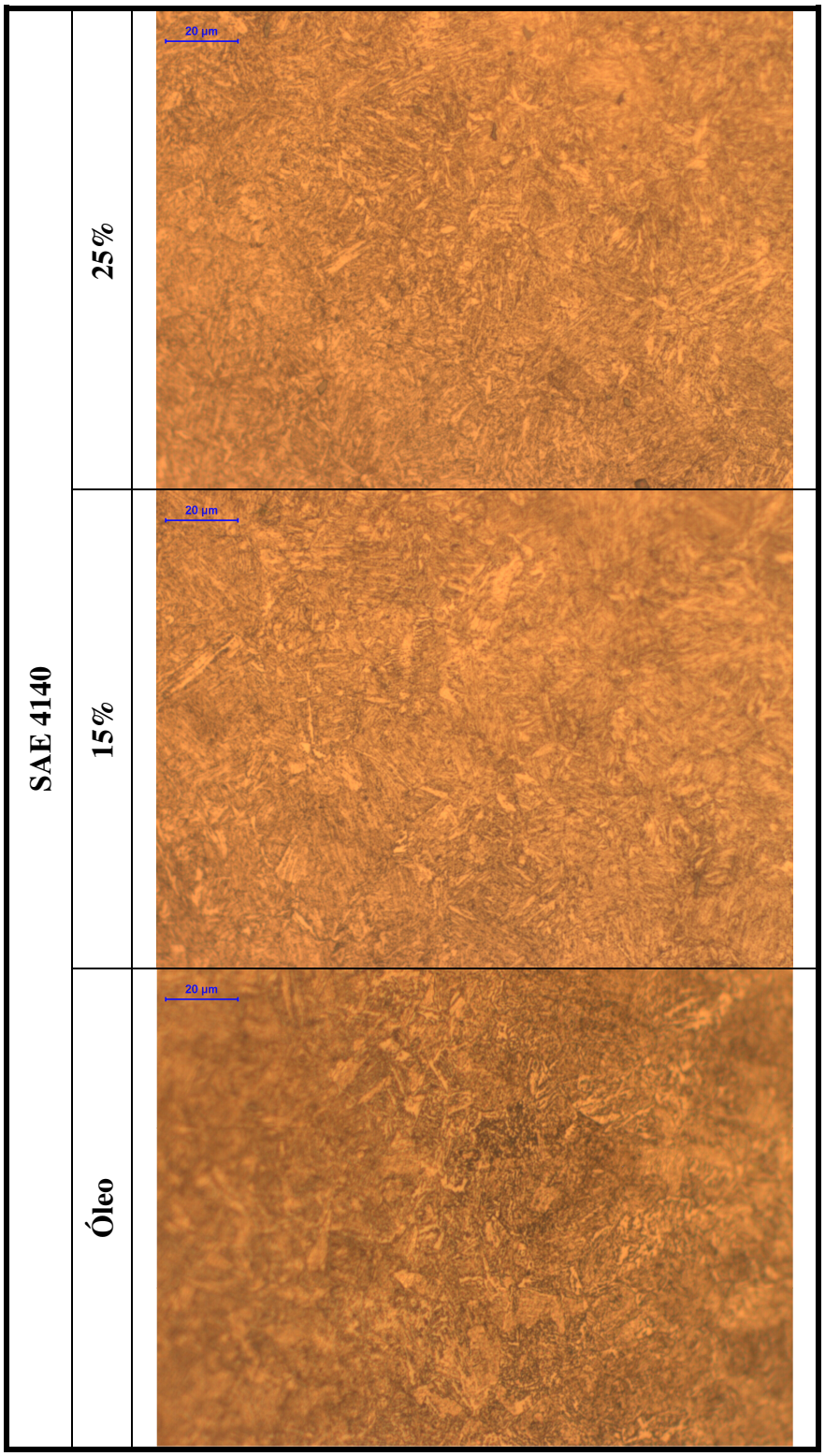


Figura 27 – Microestruturas das amostras do aço SAE 4140 (Ataque Nital 2% - 500x).

4.2 Aço SAE 4340

4.2.1 Análise de dureza

Os resultados das medições de dureza realizadas nas amostras do aço SAE 4340 estão apresentados na Tabela 11 e representados graficamente na Figura 28.

Tabela 11 – Resultados de dureza das amostras do aço SAE 4340.

Aço	Meio de Resfriamento	Dureza (HB)		
		Superfície	½ Raio	Núcleo
SAE 4340	**PAG 25%**	224 (± 5,0)	220 (± 7,5)	222 (± 12,7)
	PAG 15%	233 (± 5,0)	240 (± 8,7)	238 (± 5,0)
	Óleo	227 (± 2,9)	226 (± 13,3)	215 (± 4,0)
	Diferenças			
	25% - 15%	-4%	-9%	-7%
	25% - Óleo	-1%	-3%	3%
	15% - Óleo	3%	6%	10%

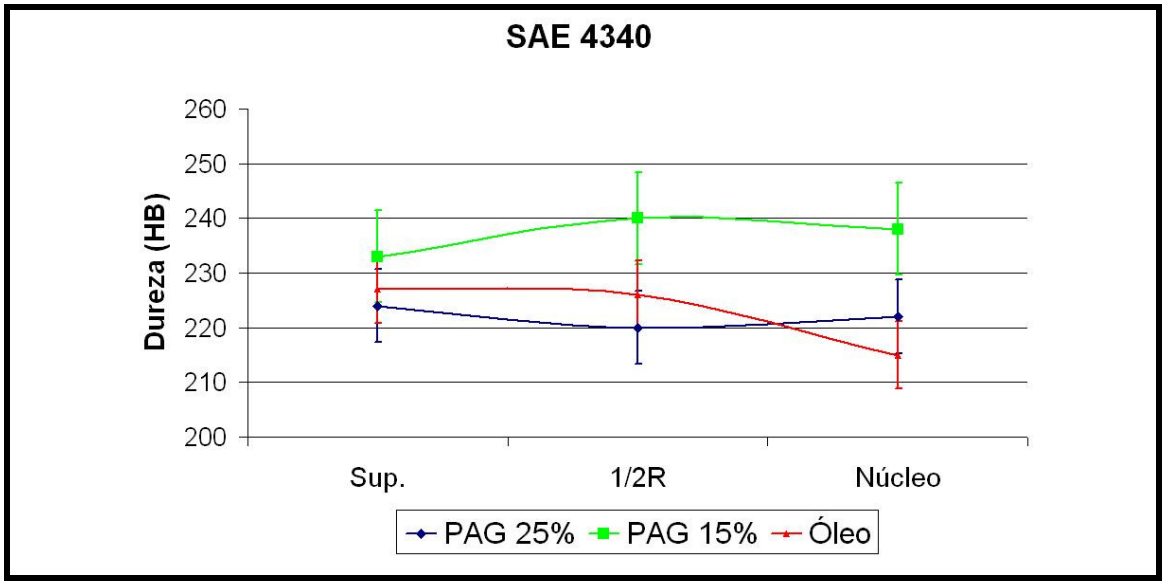


Figura 28 – Representações gráficas dos ensaios de dureza realizados nas amostras do aço SAE 4340.

Assim como no aço SAE 4140, no aço SAE 4340 as diferenças encontradas nos corpos de prova após o revenimento não são significativas. As amostras dos três meios de resfriamento apresentaram o mesmo nível de dureza e uma uniformidade ao longo da secção transversal.

4.2.2 Resistência mecânica

A Tabela 12 mostra os resultados dos ensaios de tração do aço SAE 4340. As diferenças de 4% e 6% entre as amostras resfriadas em polímero podem ser consideradas como não significativas, porém quando comparadas as amostras resfriadas em óleo pode-se observar diferenças consideráveis sendo que as amostras resfriadas em polímero foram entre 13% e 17% mais resistentes do que as amostras resfriadas em óleo. Na Figura 29 pode-se observar os resultados representados graficamente.

Tabela 12 – Resultados do ensaio de tração das amostras do aço SAE 4340.

Amostra	RT (MPa)	LE (MPa)	Red. Area (%)	Alongamento (%)
PAG 25%	1097 (± 7)	976 (± 5)	54 (± 0)	18 (± 0)
PAG 15%	1144 (± 8)	1033 (±6)	54 (± 1)	18 (± 1)
Óleo	952 (± 8)	854 (± 8)	62 (± 0)	15 (± 1)
Diferenças				
25% - 15%	-4%	-6%	0%	-2%
25% - Óleo	13%	12%	-15%	19%
15% - Óleo	17%	17%	-15%	20%

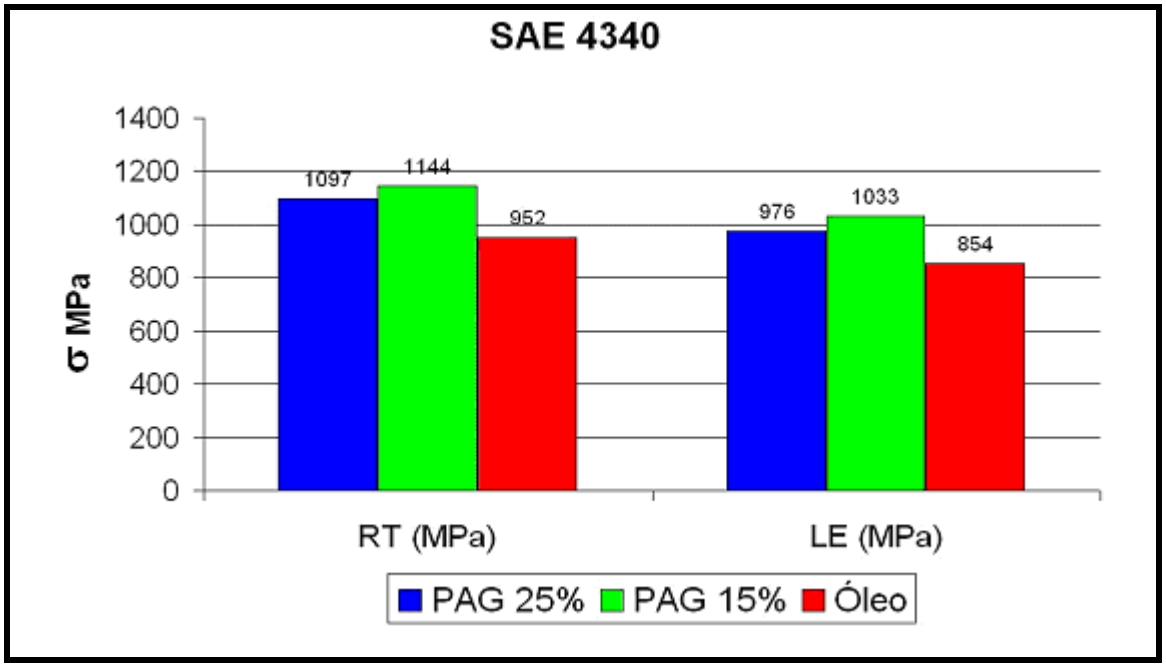


Figura 29 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de tração do aço SAE 4340.

4.2.3 Análise de microestrutura

A Figura 30 mostra as microestruturas encontradas nas amostras do aço SAE 4340. A presença de martensita revenida é claramente observada nas amostras retiradas

após o revenimento. As estruturas das amostras resfriadas nos três meios de resfriamento se equivalem e são compatíveis com os níveis de dureza encontrados nos ensaios realizados.

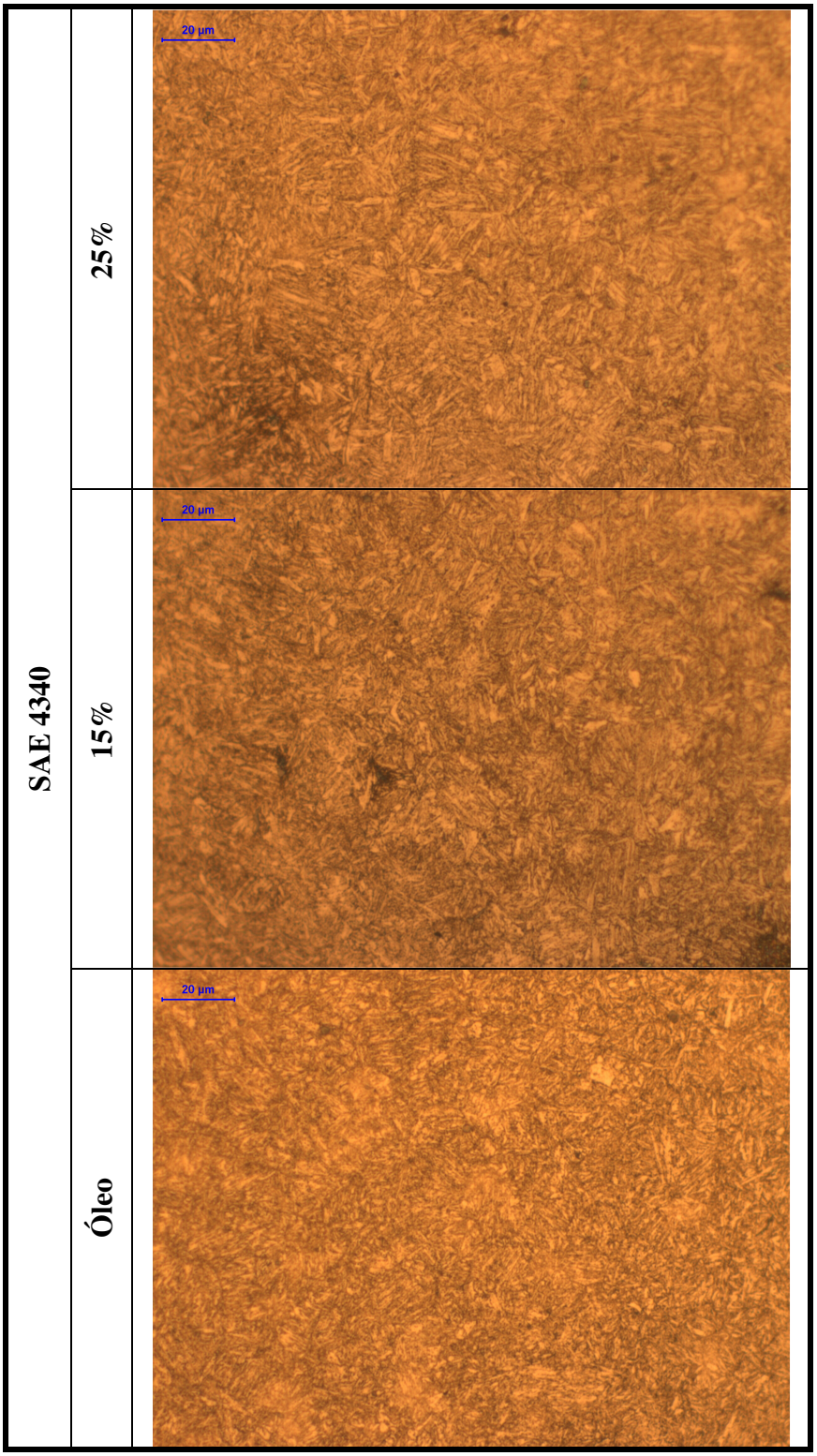


Figura 30 –Microestruturas das amostras do aço SAE 4340 (Ataque Nital 2% - 500x).

4.3 Aço DIN 31CrMoV9

4.3.1 Análise de dureza

Os resultados das medições de dureza realizadas nas amostras do aço DIN 31CrMoV9 estão apresentados na Tabela 13 e representados graficamente na Figura 31.

Tabela 13 – Resultados de dureza das amostras do aço DIN 31CrMoV9

Aço	Meio de Resfriamento	Dureza (HB)		
		Superfície	½ Raio	Núcleo
DIN 31CrMoV9	PAG 25%	226 (± 7,6)	229 (± 5,0)	231 (± 2,9)
	PAG 15%	225 (± 12,1)	224 (± 5,0)	230 (± 8,7)
	Óleo	238 (± 6,4)	243 (± 6,0)	236 (± 5,5)
	Diferenças			
	25% - 15%	0%	2%	0%
	25% - Óleo	-5%	-6%	-2%
	15% - Óleo	-6%	-8%	-3%

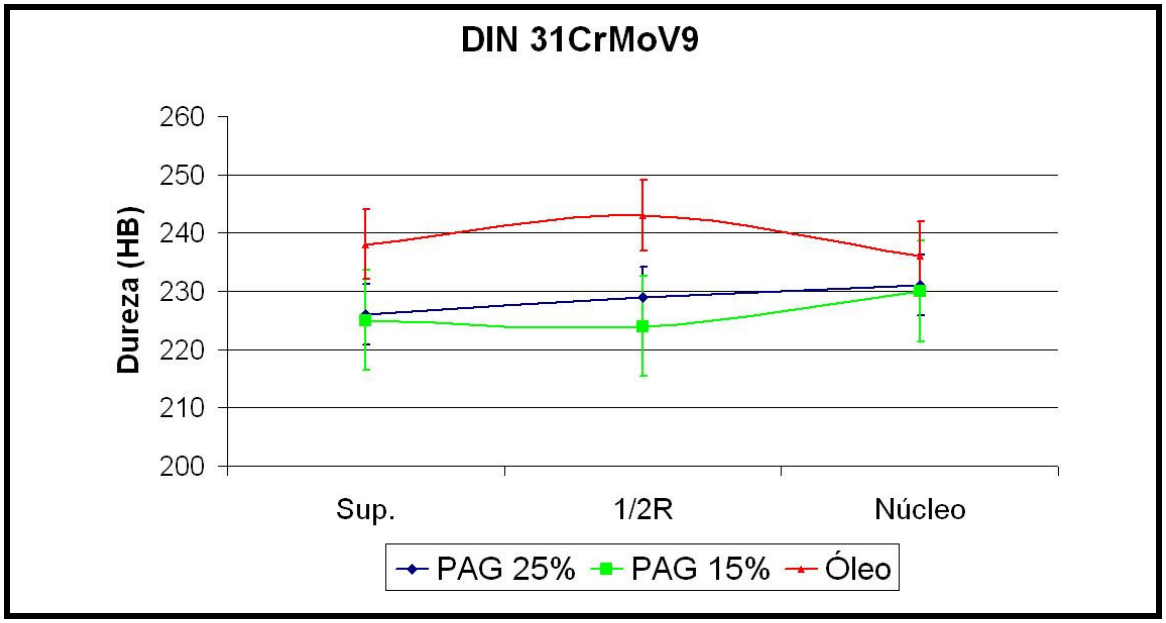


Figura 31 – Representações gráficas dos ensaios de dureza realizados nas amostras do aço DIN 31CrMoV9.

Nas medições realizadas após o revenimento não foram encontradas diferenças significativas mostrando que, assim como nos outros aços em estudo, o meio de resfriamento polimérico é compatível com o óleo.

4.3.2 Resistência mecânica

As propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração estão apresentadas na Tabela 14. Pode-se observar que, assim como nas medições de dureza, não houve diferença significativa entre as amostras em estudo. As amostras resfriadas em óleo apresentaram uma resistência mecânica levemente superior as amostras resfriadas em polímero reforçando os resultados encontrados nos ensaios de dureza. A Figura 32 apresenta graficamente os resultados encontrados.

Tabela 14 – Resultados do ensaio de tração das amostras do aço DIN 31CrMoV9.

Amostra	RT (MPa)	LE (MPa)	Red. Area (%)	Alongamento (%)
PAG 25%	1128 (± 8)	1016 (± 6)	59 (± 1)	15 (± 1)
PAG 15%	1141 (± 5)	1018 (± 5)	61 (± 1)	16 (± 1)
Óleo	1184 (± 8)	1082 (± 12)	56 (± 1)	13 (± 1)
Diferenças				
25% - 15%	-1%	0%	-3%	-3
25% - Óleo	-5%	-7%	5%	17%
15% - Óleo	-4%	-6%	8%	20%

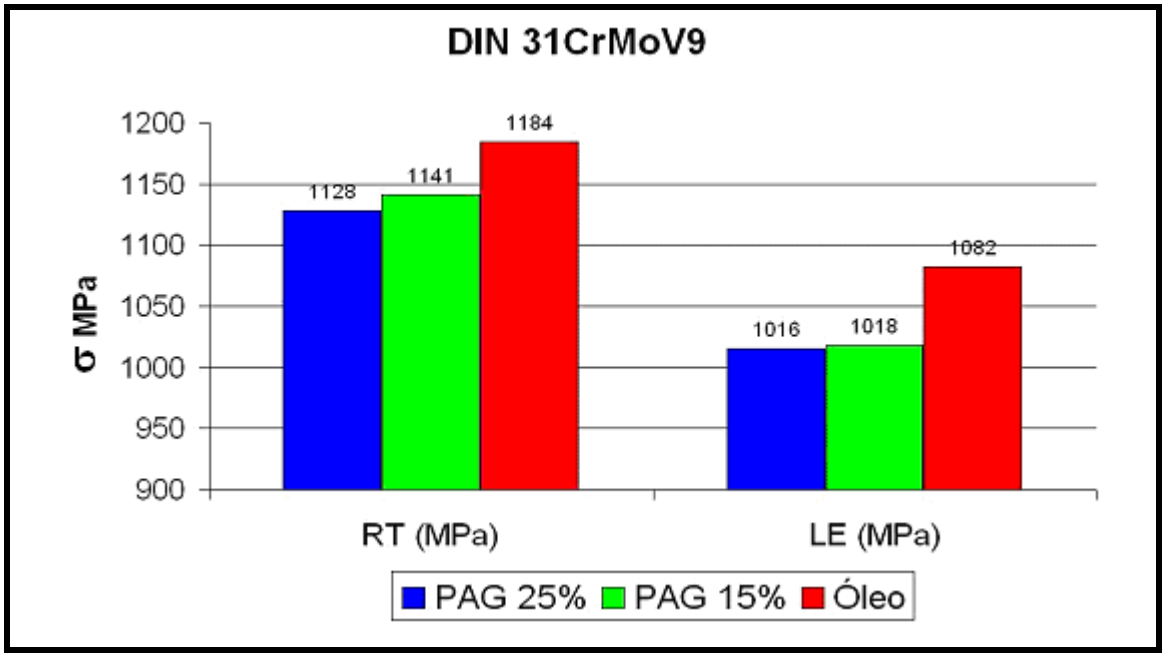


Figura 32 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de tração do aço DIN 31CrMoV9.

4.3.3 Análise de microestrutura

A Figura 33 mostra as microestruturas encontradas nas amostras do aço DIN 31CrMoV9. Assim como nos outros aços estudados pode-se observar a presença de

microestrutura revenida amostras analisadas obtendo-se assim a estrutura desejada para este tipo de tratamento térmico.

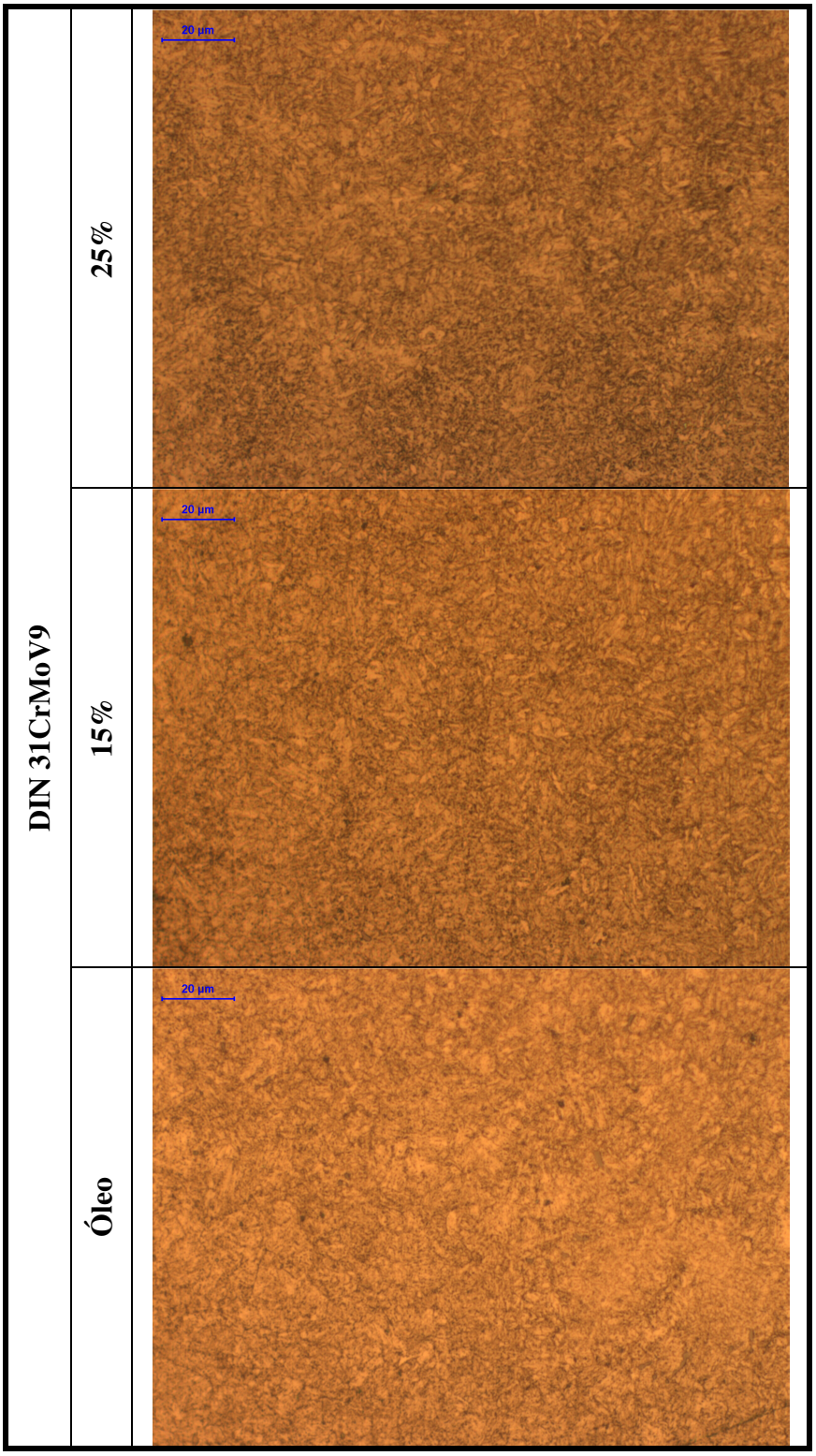


Figura 33 – Microestruturas das amostras do aço DIN 31CrMoV9 (Ataque Nital 2% - 500x).

5 CONCLUSÕES

Para o aço SAE 4140 os resultados dos ensaios de dureza mostraram que a utilização do meio de resfriamento polimérico é aplicável para o tratamento de têmpera. As diferenças de dureza encontradas (máximo 5%) nas amostras revenidas estão dentro de uma tolerância aceitável nas especificações dos produtos fabricados na linha de produção. As propriedades mecânicas dos corpos de prova resfriados em polímero foram, em média, 11% maiores do que as amostras resfriadas em óleo, comprovando a eficiência deste meio de resfriamento para o aço em estudo.

Da mesma forma, nas amostras do aço SAE 4340 as diferenças de dureza encontradas nas amostras revenidas (máxima de 10%) não são significativas sendo que as propriedades mecânicas apresentaram resultados, em média, 15% maiores do que as amostras resfriadas em óleo, comprovando a similaridade em termos de eficiência do meio de resfriamento polimérico em relação ao óleo para o tratamento de têmpera deste aço.

O aço DIN 31CrMoV9 mostrou resultados semelhantes de dureza, sendo que a diferença média entre as durezas encontradas nas amostras revenidas foi de 3,5%, enquanto que a diferença média entre as propriedades mecânicas foi de 4%, podendo assim concluir que os meios de resfriamento em estudo se equivalem para o tratamento de têmpera do aço DIN 31CrMoV9.

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.

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 dos aços estudados. A utilização do polímero apresenta vantagens como segurança operacional e limpeza do ambiente, porém requer um maior controle do meio de resfriamento exigindo troca de calor extremamente eficiente para manter a

temperatura do banho e agitação constante cabendo avaliação destas condições para aplicação em escala industrial.

Os custos envolvidos nos meios de resfriamento em estudo se equivalem, sendo que, para a substituição do óleo pelo polímero, se faz necessário um investimento inicial para adaptações nas instalações e na montagem do primeiro banho. Após a montagem do banho, assim como no óleo, são necessárias apenas reposições periódicas de polímero e aditivos.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Comparar os meios de resfriamento avaliando temperaturas de revenimento diferentes;
- Comparar a diferença na tenacidade dos aços para os diversos meios de resfriamento estudados;
- Avaliar comparativamente novos aços e novas concentrações de solução polimérica;
- Realizar ensaios de microdureza a fim de se obter a profundidade de têmpera em cada meio de resfriamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. METALS HANDBOOK, **Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys,** V. 1, 10ª Edição, 1990;
2. CALLISTER Jr., W.D.; **Materials Science and Engineering an Introduction**; Ed. John Wiley & Sons, Inc. – 5ª Edição, 1999;
3. METALS HANDBOOK, Heat Treating, V. 4, 10ª Edição, 1991;
4. KARLEBO, M.; BOFORS, A.; **Manual Bofors – Tratamento Térmico dos Aços**; Parte I, 1973;
5. RONDEAU, D.; T**he Effects of Part Orientation and Fluid Flow on Heat Transfer Around a Cylinder**; Tese de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais - Worcester Polytechnic Institute, Worcester, EUA, 2004;
6. TENSI, H.M and STICH, A.; **Influence of Wetting Kinematics on Temperature Distribuition an Heat Flux**; Procedings of Intenational Heat Treating Conference: Equipment and Process, p. 327-335, 1994;
7. PURNELL; **Improved Quenching of Steel by Polymer Agitation;** United States Steel Corporation;
8. PORTER, D.A.; EASTERLING, K.E.; **Phase Transformation in Metals and Alloys**; Chapman & Hal, 1981;
9. TENSI, H.M.; STICH, A.; TOTTEN, G.E.; **Fundamentals About Quenching by Submerging;** Proceedings of International Heat Treating Conference: Equipment end Process, p.243-251, 1994.
10. HAN, S.W.; KANG, S.H.; TOTTEN, G.E.; WEBSTER, G.M.; **Principles and Applications fo the Immersion Time Quenching System in Bacth and Continuous Process;** Proceedings of International Heat Treating Conference: Equipment end Process, p.337-345, 1994.
11. TOTTEN, G.E.; LALLY, K.S.; **Proper Agitation Dictates Quench Success;** Heat Treating, p. 12-31, 1992;
12. JARVIS, L.M.; TOTTEN, G.E.; WEBSTER, G.M; **Aqueous Polymer Quenchants: How Do They Work and What Are The Differences?**; Advanced Materials & Process, 1990;
13. **Heat Treater Eliminates Smoke And Fire From Quenching Operations;** Heat Treating Progress, p. 55-56, 2004;

14. DIAZ, D.; GARCIA, H.; BAUTISTA, B.; **Conversion and Use of Polymer Quenchants in Integral Quench Furnance Applications.;** Proceedings of The First International Conference on Quenching and Control of Distortion, p. 65-69, 1992;
15. HAN, S.W.; KANG, S.H.; **Successful Use of Polymer Quenchants With Crack-Sensitive Steels;** Materials Science and Technology;
16. CANALE, L.C.F.; TOTTEN, G.E; CANALE, A.C; **Polímeros de Têmpera à Base de PAG;** Minerva, p. 209-214, 2006;
17. SPIM Jr., J.A.; ROCHA, A.S.; **Tópicos Avançados em Tratamentos Térmicos dos Aços**; Programa de Educação Continuada ABM, 2007;
18. **Notas de Aula** - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Disponível em www.fe.up.pt - acessado em 03 de abril de 2008;
19. KANG, S.H.; HAN, S.W.; WEBSTER, G.M.; TOTTEN, G.E.; **Successful Use of Polymer Quenchants With Crack-Sensitive Steels: Part II – manufacture of Hexagon Nut Punch Pin;** Quenchants and Quench Technology – a Division of G.E. Totten & Associates. Disponível em: www.quenchtek.com - acessado em 03 de abril de 2008;
20. TOTTEN, G.E.; WEBSTER, G.M.; **Type I Polymer Quenchant Alternatives to Water: A Review**; Quenchants and Quench Technology – a Division of G.E. Totten & Associates. Disponível em: www.quenchtek.com - acessado em 03 de abril de 2008;
21. PRZYLECKA, M.; GESTWA, W.; TOTTEN, G.E.; **Use of Aqueous Polymer Quenchants For Hardening of Carbonitrided Parts**; Quenchants and Quench Technology – a Division of G.E. Totten & Associates. Disponível em: www.quenchtek.com - acessado em 03 de abril de 2008;
22. TOTTEN, G.E.; WEBSTER G.M.; **Importance of Quench Bath Maintenance**; Quenchants and Quench Technology – a Division of G.E. Totten & Associates. Disponível em: www.quenchtek.com - acessado em 03 de abril de 2008;
23. HAN, S.W.; KANG, S.H.; TOTTEN, G.E.; WEBSTER, G.M.; **Immersion Time Quenching Technology To Facilitate Replacement of Quench Oils With Polymer Quenchants For Production of Automotive Parts**; Quenchants and Quench Technology – a Division of G.E. Totten & Associates. Disponível em: www.quenchtek.com - acessado em 03 de abril de 2008;

24. TOTTEN, G.E.; WEBSTER, G.M.; JARVIS, L.M.; BATES, C.E.; **Effect of Section Size, Quenchant Concentration and Agitation on The Physical Properties of Type I Polymer Quenched Aluminum Alloys;** Quenchants and Quench Technology – a Division of G.E. Totten & Associates. Disponível em: www.quenchtek.com - acessado em 03 de abril de 2008;

25. KANG, S.H.; HAN, S.W.; TOTTEN, G.E.; WEBSTER, G.M.; **Direct Forge Quenching With Poly (Alkylene Glycol) Polymer Quenchants;** Quenchants and Quench Technology – a Division of G.E. Totten & Associates. Disponível em: www.quenchtek.com - acessado em 03 de abril de 2008;

26. JARVIS, L.M.; WEBSTER, G.M.; TOTTEN, G.E.; **Cooling Curve Analysis of Polymer Quenchants;** Quenchants and Quench Technology – a Division of G.E. Totten & Associates. Disponível em: www.quenchtek.com - acessado em 03 de abril de 2008;

27. TOTTEN, G.E.; WEBSTER, G.M.; BLACKWOOD, R.R.; JARVIS, L.M.; NARUMI, T.; **Chute Quench Recommendations for Continuos Furnance Applications With Aqueous Polymer Quenchants;** Heat Treatment of Metals Journal; Pág. 36 – 39; 1996.2;

28. TOTTEN, G.E.; LISCIC, B.; KOBASKO, N.I.; HAN, S.W.; SUN, Y.H.; **Advances in Polymer Quenching Technology;** Quenchants and Quench Technology – a Division of G.E. Totten & Associates. Disponível em: www.quenchtek.com - acessado em 03 de abril de 2008;

29. HAN, S.W.; KANG, S.H.; TOTTEN, G.E.; WEBSTER, G.M.; **Applications of Polymer Quenchants for High Hardenability, Crack-Sensitive Steels;** Quenchants and Quench Technology – a Division of G.E. Totten & Associates. Disponível em: www.quenchtek.com - acessado em 03 de abril de 2008;

30. **Boletim Técnico – Fluido Sintético Solúvel para Tratamento Térmico de Metais – Hidrotêmpera 6;** Disponível em: www.quakerchem.com – acessado em 01 de maio de 2008;

31. **Ficha de Segurança – Shell Voluta Oil C 202;** Disponível em: www.shell.com – acessado em 18 de maio de 2008;

32. **ASTM E 8M – Standard Test Method for Tension Testing of Metalic Materials [Metric]**;