

ENG 02298 TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES E DA MICROESTRUTURA
DO AÇO DIN 42 CrMo4 MOD TEMPERADO EM ÓLEO MINERAL E EM
SOLUÇÃO DE POLIALQUILENO GLICOL PARA APLICAÇÃO EM FIXADORES
DE TORRES EÓLICAS**

Rochele M. Sant' Anna
191161

Prof^a Dra. Liane Roldo

Junho de 2016

ROCHELE M. SANT' ANNA

**ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES E DA MICROESTRUTURA
DO AÇO DIN 42CrMo4 MOD TEMPERADO EM ÓLEO MINERAL E EM
SOLUÇÃO DE POLIALQUILENO GLICOL PARA APLICAÇÃO EM
FIXADORES DE TORRES EÓLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em junho de 2016 como requisito para obtenção do Título de Engenheira de Materiais pelo curso de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Profa. Dra. Liane Roldo

Porto Alegre

2016

“Alguns homens veem as coisas como são e dizem ‘Por quê?’,
eu sonho com as coisas que nunca foram e penso ‘Por que não?’”

George Bernard Shaw

AGRADECIMENTOS

À Sociedade Brasileira por proporcionar meu acesso a uma das melhores Universidades do Brasil, sendo esta pública, gratuita e de excelência acadêmica. Prometo honrar este investimento exercendo minha profissão de forma ética e buscando recompensar minha pátria com os conhecimentos técnicos adquiridos.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial à Escola de Engenharia e ao Departamento de Engenharia de Materiais, por tornarem o meu maior sonho em uma árdua realidade repleta de desafios e aprendizados, por me proporcionar todos estes anos de vivência em um lugar repleto de diversidade e cultura.

Aos queridos professores, e a eles poderia dedicar páginas de agradecimentos. Todos fizeram parte desta conquista, desde minha alfabetização, até a finalização desta graduação. Representando alguns deles, meu muito obrigada à Professora Maria Alice Kauer, por formar uma engenheira que gosta de escrever, pelas balas na véspera do vestibular, pelo abraço amigo sempre que a encontro no campus do Vale. Ao Professor Álvaro Meneguzzi por me acolher na Engenharia de Materiais. À Professora Jane Zoppas que me contagiou com sua paixão por corrosão e me fez enxergar que o mundo é repleto de frestas. Ao Professor Sandro Amico por sempre exigir o nosso melhor. Aos demais professores amados do Departamento de Engenharia, cada um a sua maneira marcado em meu coração, em minha formação.

Ao querido Wilbur, por sempre nos receber com um sorriso no rosto e nos alegrar com uma paçoquinha. Pela extrema boa vontade e bom humor nas minhas análises finais.

À minha querida orientadora Prof^a Liane Roldo, por ser uma inspiração, uma professora que transborda conhecimento, didática e excelência acadêmica. Pelas correções e melhorias, por instigar a minha curiosidade e exigir sempre o meu melhor.

Aos colegas e amigos da Gerdau- Usina de Charqueadas por acreditarem e tornarem possível este estudo. Em especial à Renata Becker, minha liderança inspiradora; aos amigos dos laboratórios Químico e Metalúrgico.

Aos amigos que conheci durante esta caminhada, que foram minha força, coragem e muitas vezes motivação para persistir. Quantas horas de estudo vocês tornaram mais fáceis. Em especial aos BFF's Bruno Bavaresco e Filipe Corrêa- que estão ao meu lado desde o primeiro dia.

À minha família, às tias e primos queridos que tiveram que compreender meus momentos de ausência ao longo destes anos. Ao meu irmão Igor por fazer de mim sua inspiração, mesmo me superando a cada dia.

A aquele que iniciou como meu namorado, se tornou noivo e hoje tenho orgulho em ter como marido: Maurício. Pelo estímulo constante, por acreditar no meu potencial e sempre apoiar minhas escolhas. Por tornar os momentos difíceis mais leves, seja com um abraço carinhoso ou um potinho de Nutella; por comemorar as aprovações nas mais temidas disciplinas com sorrisos e champanhes. Um obrigada especial pelas injeções de ânimo durante os dias de medo e correria. Te amo!

À minha Vovó Teresa. Aquela que olhou no fundo dos meus olhos e afirmou que eu tinha capacidade para conquistar uma vaga nesta Universidade. Que é uma das minhas melhores amigas e incentivadoras. A mulher mais forte que conheço, só em estar na tua presença já me sinto invencível. Te amo!

À minha Mãe, por ter olhado TODOS os meus cadernos da faculdade, assim como fazia desde a pré-escola, alegando que, apesar de não compreender os cálculos e fórmulas, achava linda a minha dedicação. Por ser meu chão, a voz da minha razão e por vezes dar voz aos meus sonhos. Pelos gritinhos motivacionais de: “vai filha!”, ou simplesmente por entrar calada no meu quarto quando sabia que eu precisava estudar apenas para me dar um beijo. Por estourar champanhe quase à meia noite ao saber que eu tinha passado direto em FQI. Pelos lanches, cobertores, colos e principalmente pela paciência. As minhas vitórias são, na verdade, tuas.

RESUMO

Energias renováveis fazem parte dos principais debates ao redor do mundo, dentre essas energias destaca-se no Brasil a energia eólica. Contudo o que muitas vezes inviabiliza seu uso são os custos dos materiais, geralmente importados. Para tanto, uma siderúrgica local desenvolveu um aço nacional a fim de substituir os aços importados utilizados na produção de fixadores das torres eólicas, uma variação do aço DIN 42CrMo4, o qual deve atender uma série de exigências quanto às suas propriedades- principalmente dureza, tração e fragilização em temperaturas negativas- para que a segurança e a qualidade das peças sejam garantidas. Este trabalho visa o estudo da possibilidade de substituição do óleo mineral pela solução de Polialquileno Glicol (PAG) como meio de resfriamento para a têmpera do aço DIN 42CrMo4 MOD. O PAG tem demonstrado as mesmas ou melhores propriedades em relação ao óleo mineral garantindo menor impacto ambiental e segurança operacional. Estudou-se a respeito de sua composição química específica, através de análises de espectrometria de emissão óptica, e simulação termofísica para obtenção da curva TRC, bem como os tratamentos térmicos de têmpera com solução de PAG em concentrações iguais a 20% e 30%, a fim de verificar a microestrutura obtida, bem como os resultados obtidos nos ensaios de dureza, tração e fragilização em temperaturas negativas a fim de compará-los com as exigências feitas para esta aplicação quando a têmpera é realizada com óleo mineral. Com base nos resultados obtidos observou-se que é possível a substituição do óleo mineral por soluções de PAG nas concentrações de 20% e 30% como meio de têmpera para o aço DIN 42CrMo4 MOD.

Palavras-chave: DIN 42CrMo4 MOD, Polialquileno Glicol, têmpera, fixador eólico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplos de Aerogeradores pelo tipo de rotor. (a) horizontal multipás (b) horizontal duas pás (c) horizontal três pás (d) vertical Darrieus (e) vertical savonius.	15
Figura 2. Componentes de aerogeradores horizontais em diferentes configurações.	16
Figura 3. Fixadores aplicados em torres eólicas.	17
Figura 4. Digrama Ferro-Carbono mostrando região de normalização.	21
Figura 5. Estrutura martensítica apresentando ripas e placas típicas. Ataque Nital. Aumento 1000x.	22
Figura 6. Estágios de resfriamento durante o processo de têmpera.	22
Figura 7. Síntese do Polialquileno Glicol (PAG).	25
Figura 8. Processos de resfriamento durante a têmpera (a) em óleo mineral (b) em solução aquosa de PAG.	26
Figura 9. Gradientes de resfriamento durante a têmpera (a) em óleo mineral (b) em solução aquosa de PAG.	27
Figura 10. Efeito da concentração do PAG nas velocidades de resfriamento.	28
Figura 11. Estrutura de martensita revenida, apresentando menor definição da estrutura acicular devido à transformação de revenimento.	29
Figura 12. Representação de um dilatômetro.	30
Figura 13. Relação entre a curva de fração transformada isométrica e o diagrama TTT.	31
Figura 14. Curva TRC para o aço AISI 4140.	32
Figura 15. Esquema da barra para retirada de amostras para ensaios de tração, impacto, dureza e metalografias.	34
Figura 16. Esquema de funcionamento de um Espectrometro de Emissão Óptica.	35
Figura 17. Espectrômetro de Emissão Óptica Modelo ARL- 4460.	36
Figura 18. Amostra após análise em Espectrômetro de Emissão Óptica ARL- 4460.	36
Figura 19. Simulador Termomecânico Gleeble 3500®.	37
Figura 20. Câmara do Simulador Termomecânico Gleeble 3500®. (a) Posicionado no dilatômetro com termopar acoplado. (b) Corpo de prova durante aquecimento para curva TRC.	38
Figura 21. Representação dos ciclos de teste.	39
Figura 22. Ciclos de Tratamentos Térmicos utilizados.	40
Figura 23. Tanque Fleron com agitação.	41
Figura 24. Instron Universal, modelo 300LX.	45
Figura 25. Corpo de prova para ensaio Charpy com entalhe em "V"	46
Figura 26. Verificação das dimensões do entalhe em "V".	46
Figura 27. Ensaio de Impacto Charpy em temperatura negativa. (a) Sistema de resfriamento. (b) Corpo de prova imerso em álcool. (c) Detalhe do termopar.	47
Figura 28. Equipamento MFL, modelo PSW 30115.	47
Figura 29. TRC obtido através do Simulador Termomecânico Gleeble 3500® para o aço DIN 42CrMo4 MOD.	49
Figura 30. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado em água. Aumento 500x. Ataque Nital 2%.	50
Figura 31. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado em água. Aumento 1000x. Ataque Nital 2%.	51
Figura 32. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado a óleo. Aumento 500x. Ataque Nital 2%.	52
Figura 33. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado a óleo. Aumento 1000x. Ataque Nital 2%.	52
Figura 34. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado a óleo e duplamente revenido. Aumento 50x. Ataque Nital 2%.	53

Figura 35. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado a óleo e duplamente revenido. Aumento 200x. Ataque Nital 2%.....	54
Figura 36. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado em PAG 20% e duplamente revenido. Aumento 500x. Ataque Nital 2%.....	55
Figura 37. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado em PAG 20% e duplamente revenido. Aumento 1000x. Ataque Nital 2%.....	55
Figura 38. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado em PAG 30% e duplamente revenido. Aumento 500x. Ataque Nital 2%.....	56
Figura 39. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado em PAG 30% e duplamente revenido. Aumento 1000x. Ataque Nital 2%.....	57
Figura 40. Esquema de medição de dureza.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades mecânicas exigidas para aplicação em fixadores de torres eólicas.....	18
Tabela 2. Composição química do Aço DIN 42CrMo4.....	19
Tabela 3. Graus de Severidade de Têmpera em diferentes meios de resfriamento.....	24
Tabela 4. Composição química do Aço DIN 42CrMo4 Modificado.....	49
Tabela 5. Resultados de Dureza Rockwell C no núcleo das amostras.....	59
Tabela 6. Resultados de Tração para as três condições de têmpera estudadas.....	61
Tabela 7. Resultados de Impacto Charpy para três condições de têmpera estudadas.....	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1.	Problema de Pesquisa.....	13
2	OBJETIVOS	14
2.1.	Objetivos Específicos.....	14
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Aerogeradores	15
3.1.1	Fixadores para torres eólicas.....	17
3.1.2	Aço DIN 42crMo4.....	19
3.2	Tratamentos Térmicos	20
3.2.1	Normalização.....	21
3.2.2	Têmpera.....	21
3.2.2.1	Meios de Têmpera.....	23
3.2.3	Revenido.....	28
3.3	Construção das Curvas TTT e TRC	30
3.3.1	Curvas de Transformação, Tempo, Temperatura (TTT).....	31
3.3.2	Curvas de Transformação em Resfriamento Contínuo (TRC).....	32
4.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	33
4.1	Amostras	33
4.2	Métodos de caracterização	34
4.2.1.	Espectrômetro de Emissão Óptica (E.E.O.).....	35
4.2.2	Obtenção do Diagrama de Transformação no Resfriamento Contínuo (TRC).....	37
4.2.3	Caracterização Metalográfica.....	39
4.3	Tratamentos Térmicos	40
4.3.1	Normalização.....	41
4.3.2.	Têmpera.....	41
4.3.3	Revenido.....	42
4.4	Ensaio Mecânicos	43
4.4.1	Teste de Dureza.....	43

4.4.2	Ensaio de Tração Uniaxial	44
4.4.3	Ensaio de Impacto- Charpy	45
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1	Caracterização do Aço	47
5.1.1	Espectrômetro de Emissão Óptica (E.E.O.)	47
5.1.2	Diagrama de Transformação no Resfriamento Contínuo (TRC)	47
5.1.3	Análise Metalografica	49
5.2	Ensaaios Mecânicos	57
5.2.1	Ensaio de Dureza	57
5.2.2	Ensaio de Tração Uniaxial	58
5.2.3	Ensaio de Impacto	60
6.	CONCLUSÕES	63
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1. INTRODUÇÃO

É notória a necessidade de atender à demanda nacional de materiais que viabilizem o uso de estruturas para fins de obtenção de energias renováveis. Em termos de energia renovável destaca-se, no Brasil, as usinas de energia eólica, instalações gigantescas que diariamente são testadas nas mais variadas condições de intempéries e outras forças da natureza.

Aerogeradores, ou Sistemas de Geração Eólica, são equipamentos capazes de converter a energia cinética dos ventos em energia elétrica. Visto que os ventos são considerados como provenientes de fonte inesgotável e não poluente, está é considerada como uma fonte de energia renovável. Podem ser constituídos de rotores horizontais ou verticais, sendo os horizontais mais difundidos devido à sua maior eficiência. Seu funcionamento se dá a partir da captação dos ventos pelas pás que convertem a potência destes ventos em um rotor central. Em seguida, as rotações transmitidas pelo rotor seguem através de um gerador o qual converte a energia mecânica fornecida pelas rotações em energia elétrica.

Diversos materiais constituem os aerogeradores. Suas pás são constituídas de materiais rígidos como madeira, aço ou polímeros e fibra de carbono; as torres podem ser fabricadas em aço ou concreto. Os fixadores utilizados em diversos componentes das torres eólicas, como por exemplo parafusos e barras roscadas utilizadas para fixação do gerador, fixadores para as pás nos rotores, são constituídos de ligas de aço capazes de atender às propriedades exigidas para esta aplicação, tais como ligas de aço ao cromo-níquel-molibdênio, bem como os aços SAE 4140 e CSN 32CrB4.

O Aço DIN 42CrMo4 MOD foi desenvolvido com o objetivo de atender as necessidades de aplicação em fixadores de torres eólicas. Além de uma composição química diferenciada para alcançar propriedades exigidas de tração, impacto e dureza- tradicionalmente é realizado um tratamento térmico de têmpera em óleo sob agitação seguido por duplo revenimento. Este tratamento não alcança de maneira satisfatória todas as propriedades exigidas

pela aplicação, apresentando fragilização em temperaturas negativas quando os valores de dureza e tração eram obtidos.

Para alcançar as propriedades exigidas para a aplicação do aço em fixadores de torres eólicas, originalmente a indústria utiliza um ciclo de tratamento térmico que consiste em uma têmpera em óleo mineral seguida de duplo revenimento a 510°C. Contudo, este tratamento não vem alcançando os resultados esperados, apresentando fragilização no revenimento onde ocorre a diminuição da tenacidade à fratura em temperaturas negativas quando os resultados de resistência e dureza são alcançados. Sendo assim, estudou-se a possibilidade de substituição do óleo mineral por solução aquosa de polialquileno glicol (PAG) em concentrações iguais a 20% e 30%, a fim de obter propriedades superiores às obtidas com óleo mineral. Optou-se, inclusive, por alterar a temperatura do duplo revenimento para 560°C a fim de evitar a temperatura da zona de fragilização de revenido.

1.1 Problema de Pesquisa

É possível substituir o óleo mineral por solução de polialquileno glicol como meio de resfriamento de têmpera para o aço DIN 42CrMo4 Modificado, utilizado em fixadores de torres eólicas?

2. OBJETIVOS

Analisar a possibilidade de substituição do óleo mineral por solução de polialquilenoglicol (PAG) como meio de resfriamento para a têmpera do aço DIN 42CrMo4 MOD, cuja aplicação final se dá em fixadores de torres eólicas.

2.1 Objetivos Específicos

- Testar diferentes tratamentos térmicos com diferentes concentrações de PAG;
- Analisar e identificar a microestrutura após tratamentos térmicos;
- Analisar as propriedades mecânicas do aço temperado com PAG e óleo mineral;
- Comparar os resultados obtidos entre óleo e PAG;
- Verificar as melhores condições de tratamento térmico.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aerogeradores

Os aerogeradores, também conhecidos como torres eólicas ou sistemas de geração eólica, são estruturas compostas por um conjunto de equipamentos capazes de realizar a conversão da energia cinética proveniente do movimento dos ventos em energia elétrica. **(1)**

São classificados de acordo com o tipo de rotor que utilizam, podendo ser horizontais ou verticais. Nos rotores verticais o gerador permanece fixo e apenas o rotor gira com os ventos. Seu custo é menor e são menos eficientes em comparação aos rotores horizontais. Já os rotores horizontais, mais difundidos devido à sua eficiência, são constituídos por multipás, sendo o projeto de torres eólicas mais utilizado o de rotores horizontais de três pás com alinhamento ativo e gerador de indução com estrutura rígida (Figura 1). **(2)**

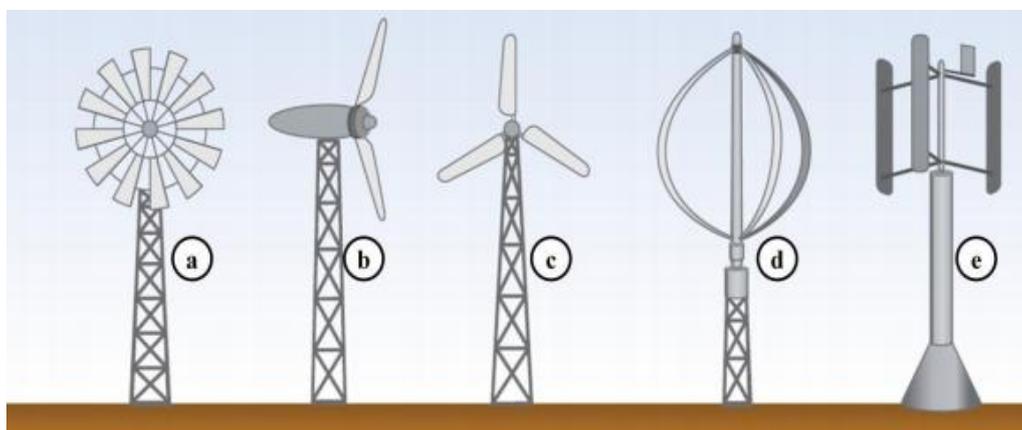


Figura 1. Exemplos de Aerogeradores pelo tipo de rotor. (a) horizontal multipás (b) horizontal duas pás (c) horizontal três pás (d) vertical Darrieus (e) vertical savonius.
Fonte: Adaptado de SOUTH et al., 1983

A Figura 2 apresenta os principais componentes de aerogeradores de rotores horizontais:

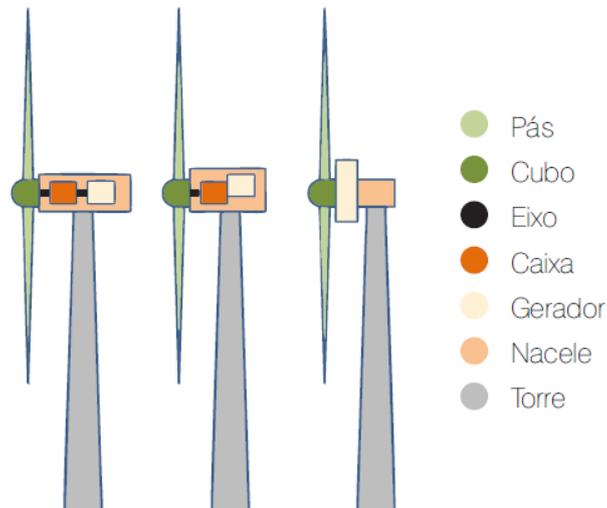


Figura 2. Componentes de aerogeradores horizontais em diferentes configurações.
 Fonte: ABDI- Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2014.

- Torre: Tem como finalidade suportar e posicionar o rotor e o nacelle em uma altura propícia para seu funcionamento. Podem ser torres cônicas, fabricadas em aço laminado ou concreto, usadas em alturas entre 80 e 100 m; ou torres treliçadas, fabricadas em aço galvanizado utilizadas em alturas superiores a 100 m. representam entre 20% a 25% dos custos dos aerogeradores. **(4)**
- Rotor: Constituído pelos elementos que irão interagir diretamente com os ventos, o cubo e as pás. As pás são constituídas de compósitos laminados ou sanduíches, recobertos por material pré-impregnado (prepregs), sendo fixadas ao tubo do rotor por fixadores metálicos do tipo T-Bolt. O cubo é fabricado em ferro fundido e acomoda os rolamentos e os motores que ajustam os ângulos das pás. **(4)**
- Nacele: Composta por vários subcomponentes (eixo, gerador, caixa multiplicadora) que juntos convertem a energia mecânica fornecida pelo rotor em energia elétrica. Seu tamanho varia de acordo com os seus componentes e geralmente é fabricado em aço ou ligas metálicas de alta resistência, sendo o componente de maior peso do sistema. **(4)**

3.1.1 Fixadores para torres eólicas

Fixadores para aplicação em torres para produção de energia eólica devem aliar as seguintes propriedades mecânicas: alta tenacidade em baixas temperaturas e alta resistência. A aplicação final do aço é na forma de fixadores das pás (T-bolts) e da base (chumbadores) de torres eólicas. A Figura 3, apresentada abaixo, indica as diferentes funções dos fixadores aplicados em torres eólicas. **(5)**

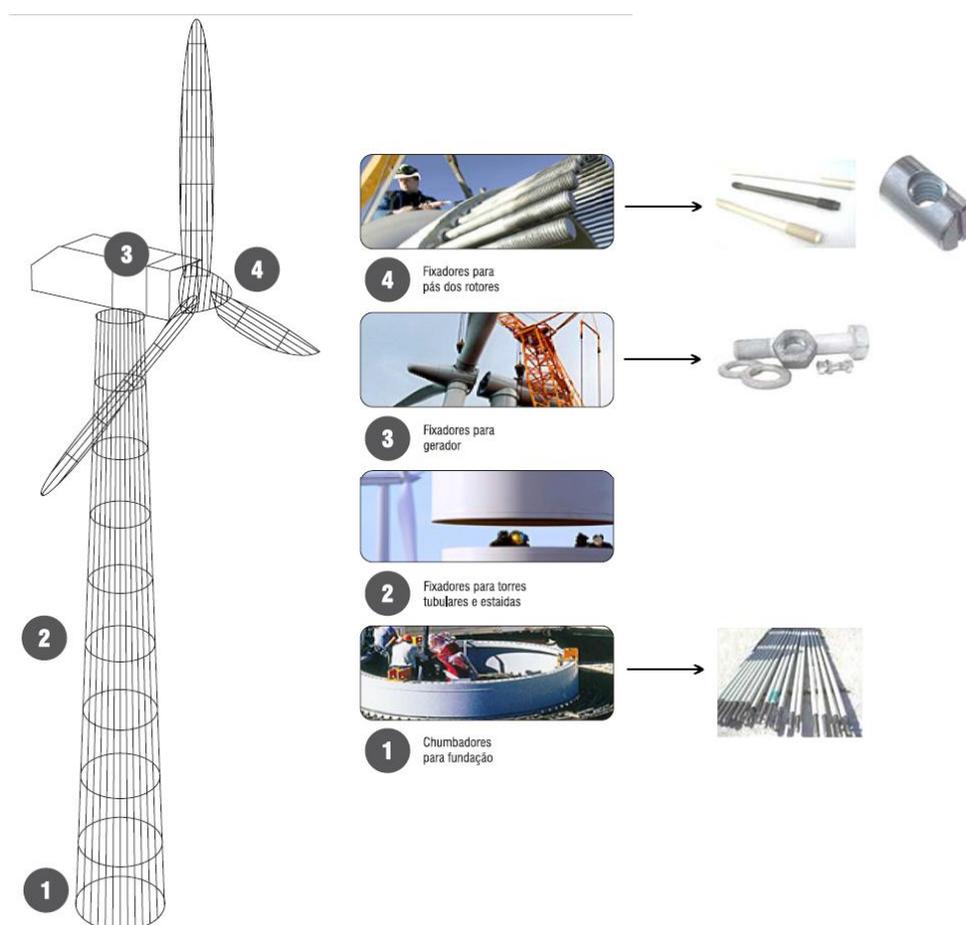


Figura 3. Fixadores aplicados em torres eólicas.

Fonte: Friedberg. Disponível em <www.august-friedberg.com/>

As normas brasileiras, e internacionais, tais quais a NBR 8800, geralmente especificam somente os valores de propriedades mecânicas que devem ser alcançados para esta finalidade, permitindo a faixas de composição química abertas e não exigem o tipo de tratamento térmico que deverá ser executado, desde que as propriedades sejam alcançadas. A Tabela 1

apresenta as propriedades mecânicas relativas a resistência que exigem medições a temperatura ambiente e ensaio para medição de energia de impacto que deve ser realizado em temperatura negativa (-40°C). **(5)**

Tabela 1. Propriedades mecânicas exigidas para aplicação em fixadores de torres eólicas.

Propriedade Mecânica	Exigência para a aplicação
Limite de Resistência	Mínimo 1050 MPa
Limite de Escoamento	Mínimo 940 MPa
Redução de Área	Mínimo 48%
Alongamento	Mínimo 9%
Energia de Impacto (-40°C)	Mínimo 27J

Fonte: NBR 8800, 2008

Historicamente, o aço SAE 4340, um aço também para beneficiamento, contudo ligado ao cromo- níquel- molibdênio, vem sendo utilizado para esta aplicação. No entanto o elevado custo do níquel, aproximadamente \$200/quilo, acaba aumentando muito o custo de produzir esta liga. Também é possível atender às propriedades mecânicas descritas acima com a utilização de outros aços, tais como SAE 4140 e CSN 32CrB4, desde que sejam utilizados fornos de tratamento térmico com aquecimento por indução. **(5)**

Neste contexto, o aço DIN 42CrMo4 se torna uma alternativa viável para produção de fixadores eólicos devido ao seu custo mais competitivo, uma vez que em sua produção é possível utilizar ciclos de tratamento térmico em equipamentos convencionais. **(5)**

Além disso, a substituição por um aço de custo reduzido tem grande importância estratégica, visto que há uma demanda crescente por nacionalização de insumos utilizados para construção de parques eólicos no Brasil. Esta demanda está suportada por empréstimos concedidos pelo BNDES a empresas que atendam ao percentual mínimo de nacionalização. **(5)**

A aplicação final do aço é na forma de fixadores das pás (T-bolts) e da base (chumbadores) de torres eólicas. A Figura 3 indica as diferentes funções dos fixadores aplicados em torres eólicas. **(5)**

3.1.2 Aço DIN 42CrMo4

O aço DIN 42CrMo4 é um aço de baixa liga, ou seja, possui até 5% de elementos de liga em sua composição química, possuindo como principais elementos de liga o cromo e o molibdênio. **(6)**

A Tabela 2 apresenta a composição química do aço DIN 42CrMo4.

Tabela 2. Composição química do Aço DIN 42CrMo4

AÇO	%C	%Si	%Mn	%P Máx	%S Máx	%Cr	%Mo
DIN 42CrMo4	0,38- 0,43	0,15- 0,35	0,75- 1,00	0,03	0,04	0,80-1,10	0,15- 0,25

Fonte: Villares Metals, Disponível em <www.villaresmetals.com.br>.

Considerado como um aço para beneficiamento com temperabilidade média, utilizado principalmente em áreas de construção mecânica, tais como na fabricação de diferentes componentes mecânicos onde se deseja uma boa combinação de resistência mecânica média, resistência à fratura e elevada resistência à fadiga. **(5)**

Possui ainda uma boa ductilidade e resistência ao choque sendo resistente a fluência até temperaturas de 540°C, mantendo estas propriedades mesmo após longa exposição. A sua resistência ao desgaste pode consideravelmente ser aumentada através de tratamentos térmicos superficiais por chama ou indução. Os índices dos elementos de liga cromo e molibdênio propiciam elevados valores de resistência mecânica, bem como melhoram propriedades mecânicas importantes, como a dureza. **(5)**

A presença do cromo influencia a liga devido a sua tendência para formação de carbonetos, tendo como principal função de sua fração dissolvida aumentar a temperabilidade do aço e, ainda, um suave efeito na diminuição da taxa de amolecimento na têmpera. Além disso, ocorre um aumento na resistência à corrosão, a altas temperaturas e ao desgaste. **(8)**

Já a presença do molibdênio – elemento fortemente formador de carbonetos- possui como maior influência na liga o aumento na temperabilidade e na resistência do aço, visto que as partículas de carboneto não dissolvidas na austenita permanecem inalteradas durante a têmpera. Durante o revenimento, uma segunda dispersão de finos precipitados ricos nos elementos de liga se forma e retarda a taxa de amolecimento durante o revenimento e aumenta bastante a resistência a quente e a fluência destes aços. **(9)**

Segundo o ASM Metals Handbook vol 4, 1991, os seguintes ciclos de tratamento térmico são indicados para o aço DIN 42CrMo4:

- Recozimento: O tratamento deve ser feito na temperatura próxima de 850°C, mantendo-se esta temperatura por no mínimo 1 hora para cada 25 mm de espessura. Após, resfriar lentamente no forno.
 - Normalização: O tratamento deve ser feito na temperatura entre 870°C e 900°C, mantendo-se esta temperatura por no mínimo 1 hora para cada 25 mm de espessura. Após deve-se resfriar ao ar. Em alguns casos especiais é possível utilizar ar forçado.
 - Têmpera: Austenitizar em temperatura entre 840°C e 870°C. Deve-se manter o aquecimento por 1 hora para cada 25 mm de espessura e adicionar 1 hora para cada 25 mm adicionais. O resfriamento pode ser realizado em óleo ou polímero. Ainda, Segundo o Heat Treaters Guide (1995), fazendo-se uso de solução aquosa com polímero é possível obter uma menor variação dimensional e maior homogeneidade microestrutural.
- (10)**

3.2 Tratamentos Térmicos

Segundo Chiaverini (1998), tratamento térmico é um conjunto de operações que incluem aquecer e resfriar ligas metálicas, buscando alterar as suas propriedades em três fases distintas: aquecimento, manutenção da

temperatura e resfriamento. Controla-se as condições de tempo, temperatura, atmosfera e velocidade de resfriamento dependendo do componente metálico que está sendo tratado de forma a garantir as alterações microestruturais desejadas, uma vez que o resfriamento e o aquecimento dos aços nos tratamentos térmicos têm influência direta sobre a mudança da microestrutura e, conseqüentemente, sobre as características mecânicas da peça produzida.

(8)

3.2.1 Normalização

Tratamento térmico que tem como objetivo homogeneizar e ou refinar os grãos do aço. Consiste em um ciclo de aquecimento a fim de austenitizar o aço, seguido de um resfriamento lento no próprio forno ou ao ar, a fim de manter uma taxa de resfriamento apropriada (Figura 4). Considerando os aços ao carbono, trabalha-se em temperaturas cerca de 55° acima da linha crítica do diagrama de fases ferro-carbono, onde é possível produzir uma fase austenítica homogênea, sendo comumente aplicadas temperaturas acima de A_{c3} ou A_{cm} , dependendo da composição química do aço de trabalho. (11)

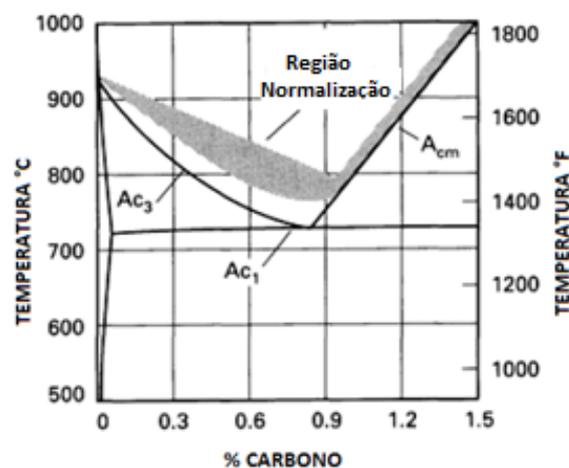


Figura 4. Diagrama Ferro-Carbono mostrando região de normalização.
Fonte: ASM Metals Handbook vol 4.

3.2.2 Têmpera

Segundo Costa e Silva (2006), têmpera é um tratamento térmico no qual o aço, após aquecimento até ponto de austenitização, passa por um resfriamento rápido o suficiente para evitar a transformação de microestrutura

perlítica e bainítica, obtendo então a forma metaestável conhecida como martensita (Figura 5). (9)

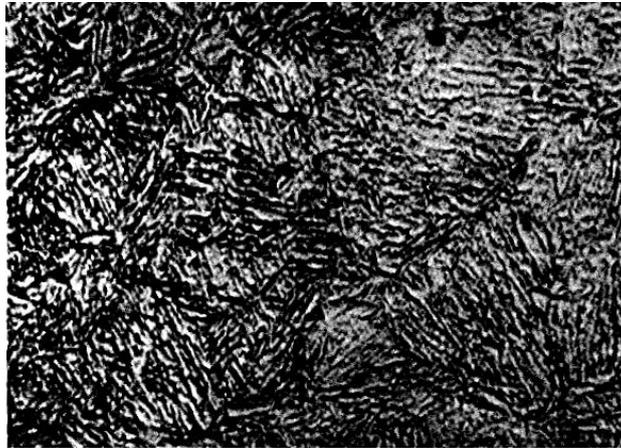


Figura 5. Estrutura martensítica apresentando ripas e placas típicas. Ataque Nital. Aumento 1000x.

Fonte: Chiaverini, 6^o Ed, 1988.

Obter esta estrutura martensítica garante a obtenção das propriedades mecânicas necessárias para a aplicação do aço, tais como resistência mecânica, dureza e tenacidade à fratura. Aços para a construção mecânica exigem a presença de martensita revenida para alcance satisfatório destas propriedades. (12)

A têmpera ocorre em três estágios, conforme Figura 6 abaixo:

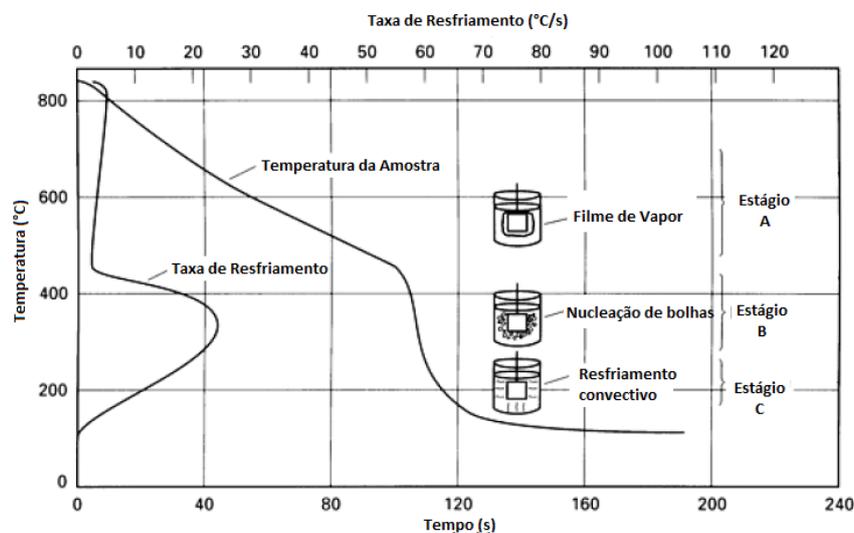


Figura 6. Estágios de resfriamento durante o processo de têmpera.

Fonte: ASM Metals Handbook vol 4.

Na primeira etapa, correspondente ao estágio A, temos uma baixa taxa de resfriamento, visto que o filme de vapor que envolve a peça uniformemente acaba isolando-a termicamente. Utilizando-se água como meio de resfriamento temos este estágio por um tempo mais longo, já quando utiliza-se banhos de sais fundidos como meio de resfriamento este estágio não ocorre. O filme de vapor pode ainda ser rompido com o uso de agitação durante o resfriamento. **(13)**

No estágio B, há um aumento na taxa de resfriamento graças ao colapso deste filme de vapor, dando início a nucleação de bolhas de vapor sobre a peça. A fim de evitar a estagnação das bolhas na superfície da peça, é importante o uso de agitação nesta fase. **(13)**

Na última etapa, estágio C, temos o resfriamento da peça por condução e convecção, o que se inicia quando a nucleação das bolhas de vapor cessa devido ao fato da peça encontrar-se a uma temperatura inferior a temperatura necessária para a ebulição do meio de têmpera. A taxa reduzirá de acordo com o aumento na viscosidade do meio de resfriamento. **(13)**

3.2.2.1 Meios de Têmpera

São utilizados meios distintos de resfriamento a fim de controlar a velocidade de resfriamento durante a têmpera, tais meios possuem diferentes capacidades de extração do calor, permitindo que a têmpera seja mais ou menos severa. Os meios mais utilizados são: água, óleos minerais e ar. Podem ser utilizadas ainda soluções de polímero em água, sais e outros meios gasosos. **(9)**

Quanto maior a velocidade de resfriamento durante a têmpera, maior será o grau de severidade ao qual o aço estará exposto, sendo que com o aumento neste grau de severidade há uma maior probabilidade de surgimento de defeitos, tais como trincas e empenamentos. Para classificar o grau de severidade dos meios de têmpera considera-se o fator H, o qual toma por referência a água ($H=1$), conforme Tabela 3. **(14)**

Tabela 3. Graus de Severidade de Têmpera em diferentes meios de resfriamento.

Meio de Têmpera	Severidade de Têmpera (H)
Óleo sem agitação	0,20
Óleo moderadamente agitado	0,50
Óleo violentamente agitado	0,70
Água sem agitação	1,00
Água fortemente agitada	1,50
Salmoura sem agitação	2,00
Salmoura fortemente agitada	5,00

Fonte: da Costa e Silva, A.L.V.; Mei, P.R. Aços e Ligas Especiais, 2006.

Os óleos minerais utilizados como meio de resfriamento, também conhecidos como fluidos de têmpera, tem sua origem em óleo derivados do petróleo, sendo produzidos com óleos parafínicos básicos os quais são selecionados para a aplicação de têmpera rápida em aços. Estes óleos são utilizados quando deseja-se um meio de resfriamento menos agressivo do que a água, a fim de evitar possíveis trincas ou deformações provenientes do resfriamento. Sendo assim, fornece um resfriamento uniforme com taxas mais baixas, quando comparado com a água. **(14)**

Sendo estes óleos originados de fontes não renováveis, temos desvantagens quanto a variação de preços e condições para abastecimento de estoques, além disso, os óleos minerais apresentam baixíssima biodegradabilidade, o que dificulta e encarece seu descarte, são inflamáveis e tóxicos, requerendo cuidados durante a sua operação e manuseio a fim de evitar acidentes e intoxicações ou até mesmo incêndios de grandes proporções. **(14)**

A família dos Polialquilenos Glicols (PAGs) foi criada a cerca de 60 anos atrás, contudo, os estudos de inovação para estes polímeros seguem

crecendo, assim como a necessidade de novos materiais pela indústria. Consiste em um copolímero de óxido de etileno e óxido de propileno (Figura 7).

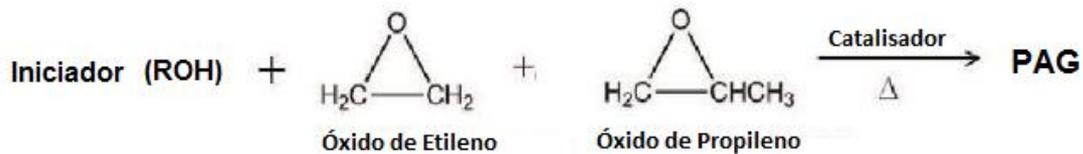


Figura 7. Síntese do Polialquileno Glicol (PAG).

Fonte: Jarvis, L.M; Totten, G.E.; Webster G.M. Advanced Materials & Process, 1990.

Estes óxidos, em presença de um iniciador- tipicamente um álcool- formam o polímero, que pode ser tanto um homopolímero quanto um copolímero, dependendo da aleatoriedade de formação dos blocos. A formação mais comum é o copolímero aleatório, os quais podem ser classificados como solúveis em água, uma propriedade que garante as condições necessárias para a maioria de suas aplicações. **(15)**

A variação em seu peso molecular pode afetar diretamente o seu desempenho. Sendo assim, os PAGs utilizados para fins de têmpera em solução aquosa são aqueles que possuem um alto peso molecular. **(16)**

O PAG é comumente utilizado como lubrificante em operações de corte de metais evitando o desgaste do ferramental, bem como em engrenagens. O atrito na interface das superfícies de corte com o ferramental, ou dos metais em contato nas engrenagens, pode ser reduzida significativamente com o uso de solução aquosa de PAG. Com diferentes concentrações do polímero em água é possível obter propriedades lubrificantes variadas. Outra utilização viável para as soluções aquosas de PAG se dá nos tratamentos térmicos de envelhecimento de alumínio. **(13)**

O polialquileno glicol (PAG) vem sendo utilizado como um importante meio de resfriamento para têmpera uma vez que torna possível a obtenção de propriedades intermediárias entre as obtidas através do resfriamento com óleos minerais e água, visto que promove um molhamento acelerado da peça, alcançando maiores velocidades de resfriamento do que a água, além de em

muitos casos proporcionar a substituição de óleos minerais neste tratamento térmico. **(16)**

Esta substituição vem sendo estudada devido às reduções nos impactos ambientais já que este é um polímero biodegradável, e na redução de possíveis acidentes, uma vez que o polímero não é inflamável, além de não produzir fumaças tóxicas durante o processo.

O processo de têmpera consiste em, após a austenitização da peça, imergir esta em uma solução de água com PAG em uma concentração pré-determinada e possíveis aditivos necessários, a qual formará, após ser atingida uma temperatura de aproximadamente 70°C, um filme polimérico contínuo ao redor da peça, o qual fica separado desta por meio de um vapor de água superaquecido (Figura 8). **(17)**

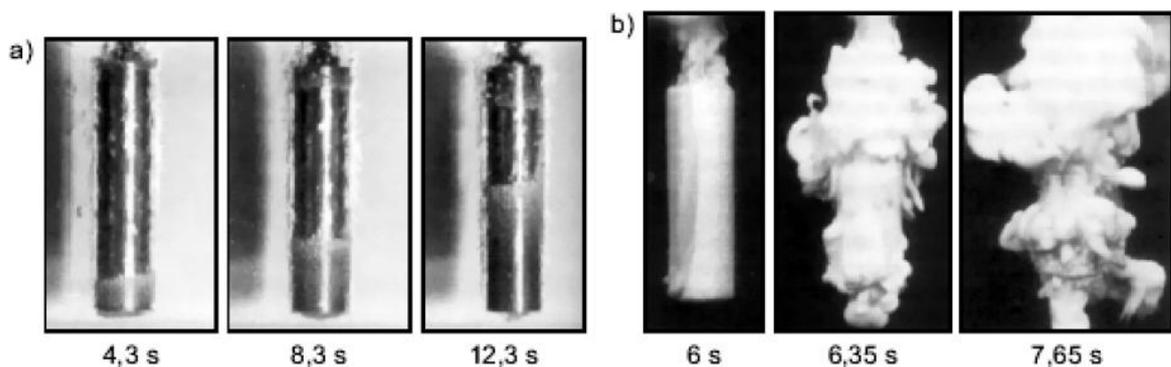


Figura 8. Processos de resfriamento durante a têmpera (a) em óleo mineral (b) em solução aquosa de PAG.

Fonte: CANALE, L.C.F.; TOTTEN, G.E; CANALE, A.C., 2006.

Durante o resfriamento da peça ocorre, simultaneamente, um rompimento súbito deste filme, elevando as taxas de resfriamento (Figura 9). Sendo este processo de resfriamento uniforme, obtém-se uma redução no gradiente térmico do resfriamento fazendo com que haja uma menor probabilidade de incidência de trincas ou empenamentos, se comparado com o resfriamento com óleos minerais. **(17)**

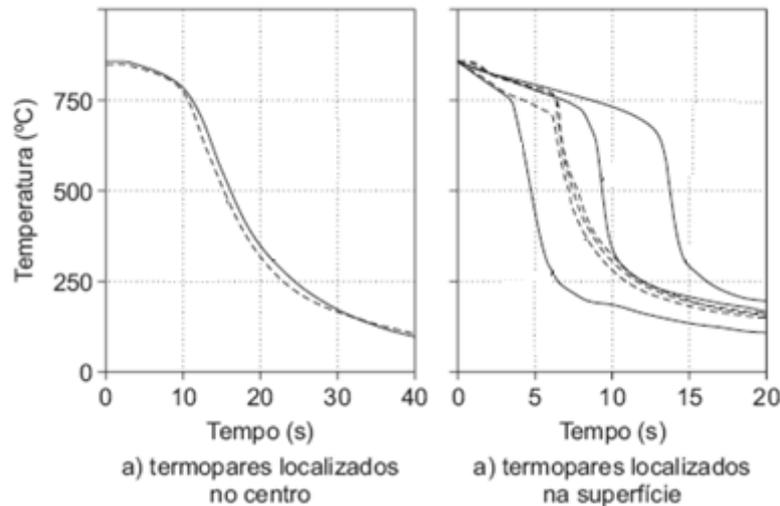


Figura 9. Gradientes de resfriamento durante a têmpera (a) em óleo mineral (b) em solução aquosa de PAG.

Fonte: CANALE, L.C.F.; TOTTEN, G.E; CANALE, A.C., 2006.

Os principais fatores que podem influenciar na velocidade deste meio de resfriamento são: a temperatura, a agitação e a concentração do banho de imersão. **(13)**

Quanto menor a temperatura do banho de imersão, maior será a velocidade de resfriamento da peça, contudo, quanto mais próxima da temperatura de ebulição da água o banho estiver, mais lento irá se tornar o resfriamento. É importante ressaltar que a temperatura não afeta a viscosidade do polímero. **(13)**

Aumentando-se a agitação do banho de imersão, temos um aumento na velocidade de resfriamento durante todas as suas etapas. Também é possível obter uma melhor homogeneidade nas propriedades obtidas, bem como uma redução nas possíveis trincas e/ou empenamentos apenas variando a agitação do banho de imersão durante o processo de resfriamento, sendo necessária uma maior agitação nas primeiras duas etapas do resfriamento- para que uma maior velocidade seja atingida- seguida de uma redução durante a terceira fase a fim de reduzir as distorções. **(17)**

A concentração do banho de imersão é um dos fatores mais importantes no processo de têmpera que faz uso de soluções poliméricas, já que a taxa de

resfriamento é diminuída com o aumento da concentração de polímero no banho. (17)

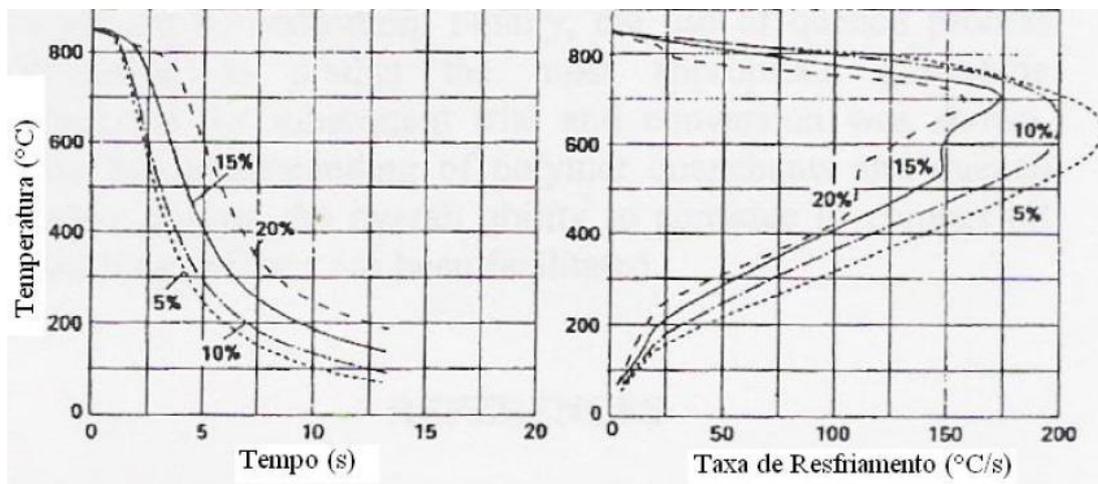


Figura 10. Efeito da concentração do PAG nas velocidades de resfriamento.
Fonte: JARVIS, L.M; TOTTEN, G.E.; WEBSTER, G.M, 1990.

Uma maior concentração de polímero aumenta o filme polimérico, fazendo com que a extração de calor da peça fique prejudicada. Soluções com concentrações entre 5% e 10% de PAG em água, em aços de baixa temperabilidade, aumentam a homogeneidade das propriedades. Já soluções entre 10% e 20% são indicadas para aços com maior temperabilidade, visto que aceleram as características de têmpera em comparação aos óleos. (Figura 10) (17)

3.2.3 Revenido

Este tratamento térmico geralmente é antecedido por uma têmpera, tendo como objetivo final atingir valores mais adequados de resistência mecânica e tenacidade, visto que a martensita obtida através da têmpera é extremamente dura e frágil, dependendo da porcentagem de carbono presente no aço, podendo isto afetar seu desempenho devido à presença de possíveis trincas e baixa tenacidade. (9)

O tratamento consiste em aquecer o aço a uma temperatura abaixo da temperatura de austenitização, mantendo-o nesta temperatura até que seja alcançado revenimento uniforme. Em um primeiro estágio- entre 100°C a

250°C- ocorre uma redução no teor de carbono da martensita para 0,25 % e há formação de carbonetos de transição. Em um segundo estágio- entre 200°C e 300°C- temos uma transformação da austenita retida em ferrita e cementita. Já no terceiro estágio- entre 250°C e 350°C- temos a substituição de carbonetos de transição e martensita por cementita e ferrita. **(10)**

A estrutura de martensita revenida, constituída pela fase α mais a fase cementita, é obtida então através do reaquecimento da martensita originada na têmpera a qual é de estrutura TTC monofásica, com redução na dureza, precipitação de carbonetos. A ferrita precipita na martensita em forma de agulhas na fase final do revenimento. As partículas de cementita extremamente pequenas e uniformemente distribuídas acabam sendo tão duras quanto à martensita, contudo possui melhores propriedades de tenacidade e ductilidade. **(10)**

Para aços com alta temperabilidade, deve-se optar por um duplo revenimento. O primeiro deve ocorrer logo após a têmpera, quando ainda temos a peça morna, para que ocorra, durante o tratamento, alívio de tensões, revenimento da martensita e precipitação de carbonetos a partir da austenita retida. Já o segundo revenimento tem como objetivo principal revenir a nova martensita formada no primeiro revenido. **(9)**

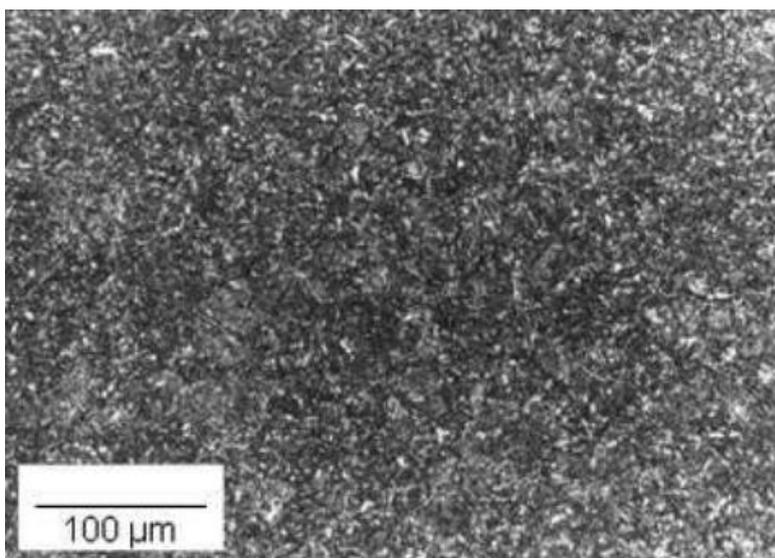


Figura 11. Estrutura de martensita revenida, apresentando menor definição da estrutura acicular devido à transformação de revenimento.
Fonte: Costa e Silva, Aços e Ligas Especiais, 2º Ed.

Durante o processo de revenimento, deve-se evitar faixas de temperatura nas quais é observada fragilização do revenido, compreendidas entre as temperaturas de 250°C e 315°C e entre 400°C e 550°C. **(9)** Estas fragilizações são observadas na martensita revenida, apresentando padrões de fratura tanto intergranular quanto transgranular, sendo que o determinante para o modo de fratura do aço são as impurezas presentes no aço. **(10)**

Para evitar estas faixas de fragilização no revenido são utilizadas temperaturas superiores a 500°C e deve-se fazer um resfriamento rápido a fim de evitar que o aço permaneça nestas faixas de temperatura. **(9)**

3.3 Construção das Curvas TTT e TRC

As curvas de Transformação, Tempo Temperatura (TTT) e Transformação no Resfriamento Contínuo (TRC), geralmente são obtidas fazendo-se uso de um dilatômetro- um equipamento sensível às variações de comprimento da amostra a partir de mudanças que ocorrem na sua temperatura ou por transformações de fase- para verificar contrações ou expansões causadas por diferenças estruturais da amostra original. **(9)**

No dilatômetro, a amostra é aquecida por indução, tendo-se um termopar acoplado através de solda, a fim de detectar tais variações de temperaturas. Mantém-se uma das extremidades da amostra fixa e outra ligada em um extensômetro capaz de detectar suas variações de comprimento (Figura 12). **(9)**

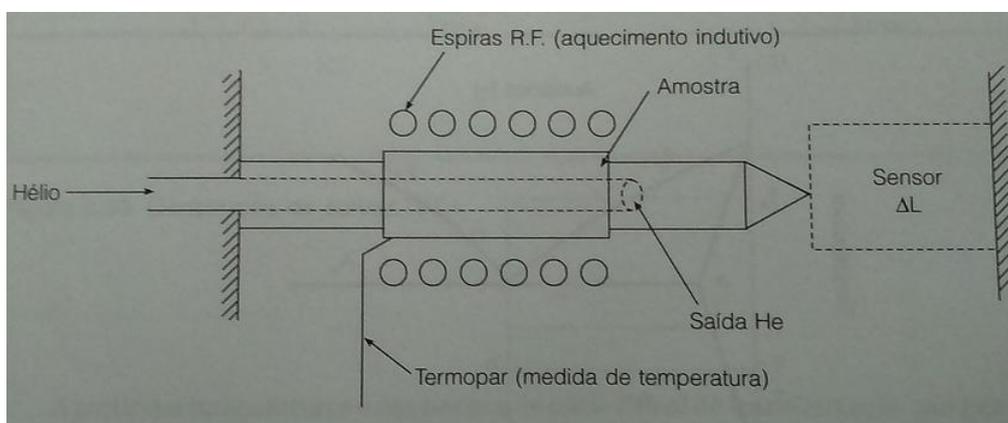


Figura 12. Representação de um dilatômetro.
Fonte: Costa e Silva, Aços e Ligas especiais, 2006.

Para confirmação das microestruturas obtidas a cada mudança de fase análises metalográficas devem ser realizadas. Os vários corpos de prova submetidos às mesmas condições de tempo e temperatura são então, resfriados para uma temperatura de interesse, sendo em seguida temperados. Através da análise metalográfica dos corpos de prova é possível acompanhar a evolução das transformações. **(9)**

3.3.1 Curvas TTT

Curvas Temperatura, Tempo, Transformação são utilizadas com a finalidade de acompanhar e prever a formação dos constituintes do aço. Os experimentos do dilatômetro são repetidos com um mesmo material até que seja possível obter resultados que são registrados em um gráfico de temperatura x tempo.

Os experimentos precursores realizados por Davenport e Brain deram origem a curvas de fração transformada em transformação isotérmica- em forma de S- onde o início e o final da transformação são determinados através da análise de uma fração transformada por metalografia. Após sucessivas experiências nas quais a temperatura de austenitização é mantida enquanto a temperatura de transformação é variada, obtem-se os resultados os quais geram o diagrama TTT (transformação tempo-temperatura), apresentado na Figura 13. **(14)**

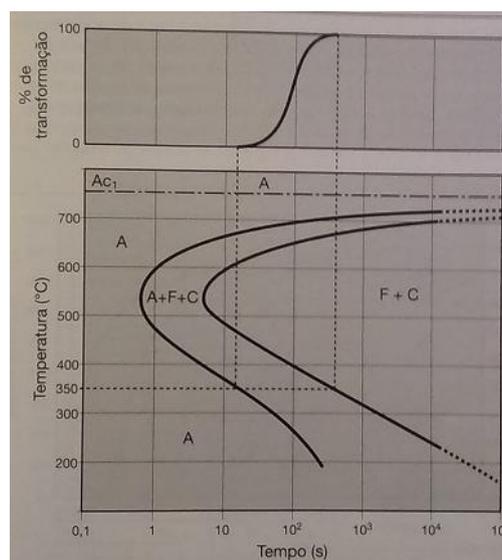


Figura 13. Relação entre a curva de fração transformada isométrica e o diagrama TTT.
Fonte: Colpaert, Metalografia de Produtos Siderurgicos Comuns; 2008.

Estas curvas são ferramentas importantes no estudo de transformações de fases dos aços, contudo a maior parte dos tratamentos térmicos reais faz uso de meios de resfriamento contínuo e não da manutenção de uma temperatura constante, podendo causar erros a aplicação de diagramas isotérmicos. **(14)**

3.3.2 Curvas TRC

Curvas de transformação em resfriamento contínuo são geralmente obtidas em dilatômetros, de maneira semelhante às curvas isotérmicas. O aço é austenitizado aplicando-se um resfriamento com uma taxa de resfriamento contínuo. Não é incomum que a velocidade de resfriamento necessária para evitar as transformações difusivas apresentada no diagrama TTT correspondente não é a velocidade crítica de têmpera. **(14)**

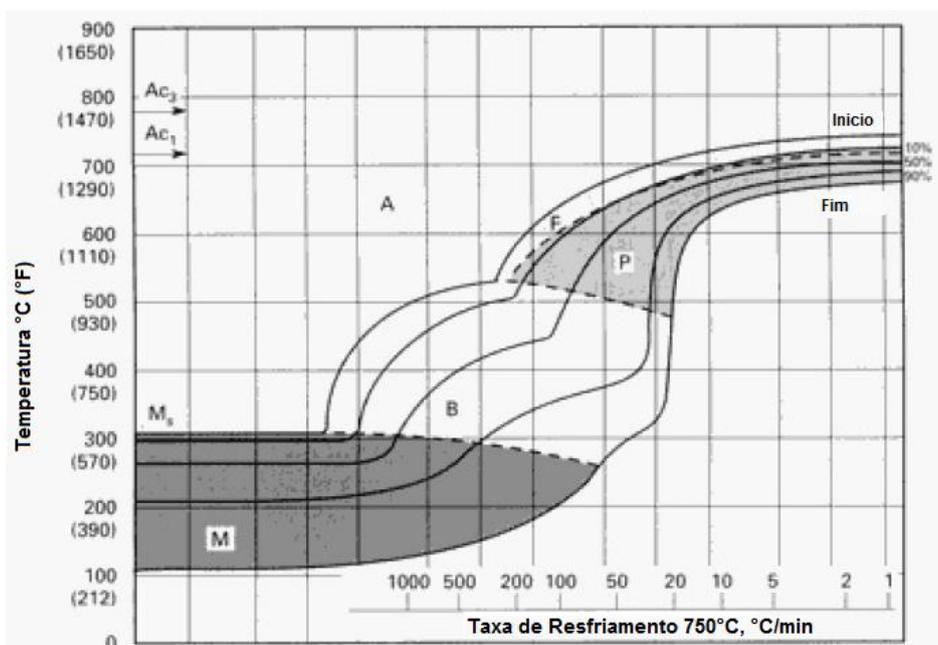


Figura 14. Curva TRC para o aço AISI 4140.
Fonte: Fonte: ASM Metals Handbook vol 4.

Nestes diagramas, como o exemplo da Figura 14, são apresentadas as microestruturas que podem ser esperadas com as diferentes taxas de resfriamento: ferrita, perlita, bainita e martensita. Para que a transformação martensítica ocorra, é necessário que o resfriamento seja rápido o suficiente, de maneira a evitar o nariz da curva de transformação. **(10)**

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Amostras

As amostras de aço utilizadas correspondem ao aço DIN 42CrMo4 Modificado, as quais são oriundas de processo de laminação à quente, provenientes de tarugos obtidos por lingotamento contínuo. O Quadro 1 sintetiza todas as amostras utilizadas para a realização das análises no aço de estudo.

Quadro 1. Resumo das caracterizações realizadas no estudo

Tipo de Caracterização	Comprimento da barra	Comprimento da Amostra	Nº de Amostras
Gleeble	300 mm	86 mm	15
Tratamentos Térmicos *	550 mm	550 mm	15
Tração	550 mm	300 mm	15
Impacto	550 mm	55 mm	45
Dureza	550 mm	12 mm	6
Metalografia	550 mm	12mm	6

* Todas as amostras para realização dos ensaios mecânicos e metalografias foram retiradas das barras termicamente tratadas.

A partir das informações do Quadro 1, observa-se que cinco amostras de 300 mm de comprimento por 38,10 mm de diâmetro, provenientes de barra redonda laminada a quente, oriunda de tarugo obtido por processo de lingotamento contínuo foram retiradas de uma barra do aço, a fim de serem desdobradas em três corpos de prova de 86 mm de comprimento, os quais serão utilizados nos ensaios de caracterização do aço, totalizando 15 amostras.

Quinze amostras de 550 mm por 38,10 mm de diâmetro, as quais foram termicamente tratadas, para as análises metalográficas, confirmação da composição química, bem como sua homogeneidade; os ensaios mecânicos, sendo cinco amostras, para cada variação nos meios de resfriamento, (Figura 15).

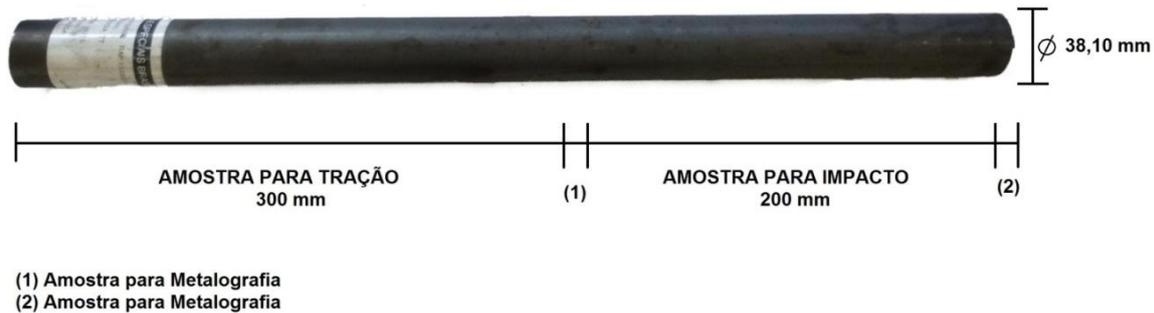


Figura 15. Esquema da barra para retirada de amostras para ensaios de tração, dureza e metalografias.

Fonte: Cedida pela Gerdau Aços Especiais S/A

4.2 Métodos de Caracterização

A caracterização por vários métodos de investigação do aço DIN 42CrMo4 MOD faz-se necessária visto que o estudo visa conhecer as propriedades mecânicas obtidas após tratamento térmico do aço com PAG e alcançar as propriedades mecânicas já conhecidas com óleo mineral e exigidas pelo cliente. Para a correta execução de tais tratamentos é importante o conhecimento da composição química do aço, de uma simulação física para obter o diagrama de transformação no resfriamento contínuo (TRC) específico para o aço de estudo, bem como a posterior análise das microestruturas obtidas nos tratamentos térmicos propostos.

Com o objetivo de verificar a composição química exata do aço DIN 42CrMo4 MOD, optou-se por análise em espectrômetro de emissão óptica de arco voltaico, visto que esta é a técnica referência para a análise direta de amostras metálicas sólidas, oferecendo rapidez e precisão nos resultados. A fim de obter o diagrama de transformação no resfriamento contínuo (TRC) do aço DIN 42CrMo4 MOD, fez-se uso de simulação física através da utilização do Simulador Termomecânico Gleeble 3500®,

Para determinar as microestruturas obtidas após os processos de tratamento térmico, bem como possíveis falhas e defeitos, fez-se uso das técnicas clássicas de metalografia.

4.2.1 Espectrômetro de Emissão Óptica (E.E.O.)

A análise se dá a partir de uma fonte de excitação de elétrons a qual produz centelhas que ionizam a amostra na atmosfera de Argônio. Esta centelha ioniza o Argônio gerando uma atmosfera de plasma, uma forte descarga é então aplicada fundindo e evaporando a superfície de contato com a amostra. Assim, todos os elementos presentes neste plasma são excitados emitindo seu espectro característico. Por fim, passam por lentes de difração, seguindo para um coletor de íons e então, para um detector fotoelétrico (Figura 16). **(18)**

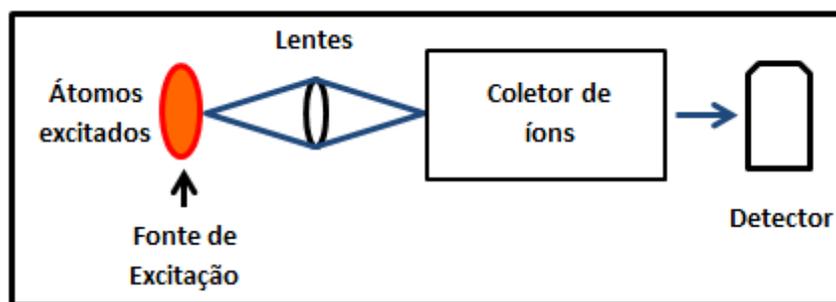


Figura 16. Esquema de funcionamento de um Espectrômetro de Emissão Óptica.
Fonte: The Spectroscopy Net, 2008.

A análise simultânea de até 60 elementos responde às exigências da indústria metalúrgica, seja no controle da produção, pesquisa e desenvolvimento, controle de entrada de materiais ou seleção de sucatas. **(18)**

Para caracterizar o aço DIN 42CrMo4 MOD, amostras provenientes de barra redonda laminada a quente (Figura 15) foram submetidas à análise química em Espectrômetro de Emissão Óptica Modelo ARL- 4460 (Figura 17). Este aparelho contém ambiente a vácuo na câmara de espelhos e detectores fotoelétricos e faz uso de gás de arraste com argônio de pureza igual a 99,999%.



Figura 17. Espectrômetro de Emissão Ótica Modelo ARL- 4460.
Fonte: Cedida pela Gerdau Aços Especiais S/A

Em cada amostra foram realizadas cinco queimas a meio raio da amostra, visto que a região de núcleo e periferia devem ser evitados pois podem apresentar variações na composição química oriundas de segregações ou de variações na temperatura durante os processos de lingotamento contínuo e laminação a quente, conforme procedimento padrão para este equipamento, obtendo-se com isto- a composição exata do aço de estudo (Figura 18).



Figura 18. Amostra após análise em Espectrômetro de Emissão Ótica ARL- 4460.
Fonte: Cedida pela Gerdau Aços Especiais S/A

4.2.2 Obtenção do Diagrama de Transformação no Resfriamento Contínuo

Para a verificação da microestrutura do material em diferentes temperaturas e intervalos de tempo foi construída uma Curva no Resfriamento Contínuo (TRC) do aço em questão.

Foi utilizado o simulador termomecânico Gleeble 3500® (Figura 19) que possui um software de análise de dados de dilatométrica, o qual permite a identificação das temperaturas de início e fim das transformações de microestrutura, uma vez que os resultados dos processos de simulação física realizados pelo Gleeble são capazes de fornecer uma reprodução exata em laboratório de processos realizados em escala industrial. Esta simulação é utilizada, ainda, com objetivo de prever as microestruturas para o aço objeto de estudo, bem como possíveis resultados de propriedades mecânicas esperadas.



Figura 19. Simulador Termomecânico Gleeble 3500®.
Fonte: Cedida pela Gerdau Aços Especiais S/A

O início e fim das transformações são determinados através de dois métodos: Método da Derivada, no qual o software calcula a segunda derivada da curva de dilatação x temperatura e nos pontos onde ocorre inflexão da curva temos os pontos de mudanças microestruturais, e o Método da Tangente- no qual um ponto é marcado na curva de dilatação x temperatura próximo ao

ponto de onde está ocorrendo a transformação, através do software constrói uma reta tangente ao ponto, a mudança microestrutural estará iniciando/terminando quando a reta tangente coincidir com os valores da curva de dilatação x temperatura.

O corpo de prova é então acoplado no dilatômetro do equipamento a fim de medir pequenas variações no diâmetro do material durante o aquecimento e o resfriamento, tornando possível a determinação das temperaturas Ac_1 e Ac_3 (Figura 21), das mudanças microestruturais e para a construção de diagramas TRC (Figura 20). Uma barra móvel no dilatômetro realiza a medida da dilatação, este movimento da barra é recebido pelo transdutor que então repassa estes dados para o software.

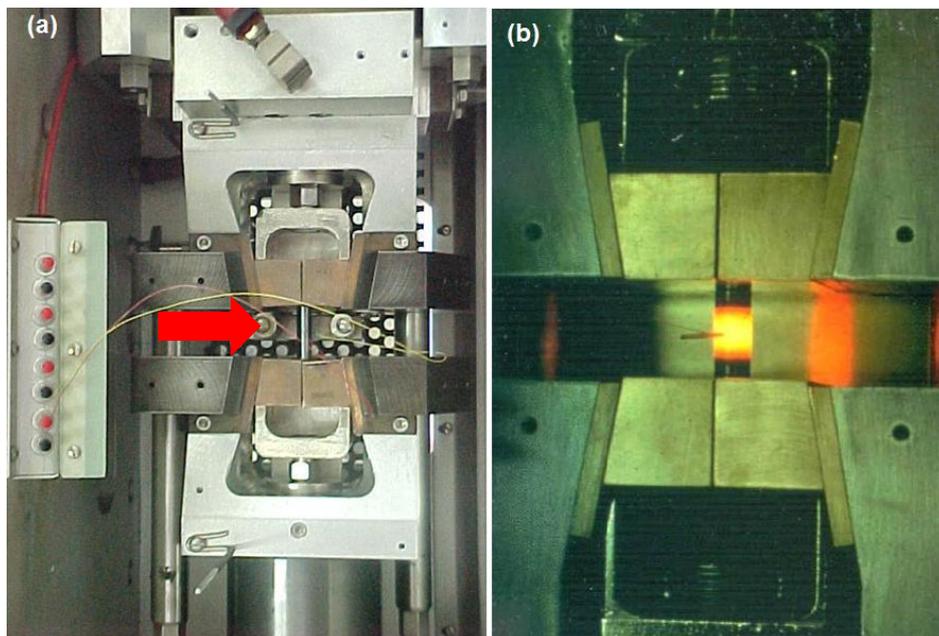


Figura 20. Câmara do Simulador Termomecânico Gleeble 3500®. (a) Posicionado no dilatômetro com termopar acoplado. (b) Corpo de prova durante aquecimento para curva TRC.
Fonte: Cedida pela Gerdau Aços Especiais S/A.

A partir da obtenção destas temperaturas de Ac_1 e Ac_3 foi definido um ciclo de aquecimento da amostra em temperatura 100°C acima da temperatura Ac_3 , com uma taxa de 20°C/s , permanência por 1 minuto na temperatura, para homogeneização da seção, seguida de resfriamento a uma taxa constante até alcançar a temperatura do ambiente. Conforme o esquema apresentado na Figura 21, o ciclo foi repetido para variadas taxas de resfriamento.

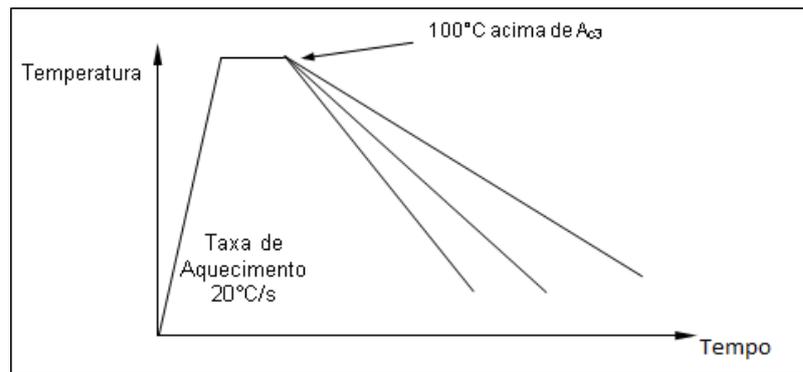


Figura 21. Representação dos ciclos de teste.

Cada ciclo forneceu os parâmetros da dilatométrica, os quais foram utilizados na construção do diagrama TRC da Figura 29. Análises de dureza e microestrutura foram realizadas- em cada corpo de prova- para confirmar a presença da microestrutura esperada.

4.2.3 Caracterização Metalográfica

Para realizar a análise metalográfica, os corpos de prova foram lixados e polidos a fim de diminuir os riscos para uma melhor visualização da microestrutura no microscópio óptico. As granulometrias das lixas utilizadas seguiram a seguinte ordem: 100, 220, 300, 400, 600 e 1200; para o polimento utilizou-se uma politriz metalografica marca Skill Tec, modelo PSK-2V, utilizando um pano de polimento de feltro e suspensão de alumina ($3\ \mu\text{m}$) em água.

A fim de revelar a microestrutura presente, optou-se pelo ataque químico seletivo com Nital 2%, Conforme o Metals Handbook vol. 9 (1996) este reagente é indicado para todas as ligas de aço, identificando bem a diferença entre ferrita e martensita. Após o ataque a peça foi seca com álcool etílico e jato de ar quente. **(19)**

As imagens correspondentes às microestruturas obtidas a partir dos tratamentos térmicos realizados foram obtidas através da observação em Microscópio óptico Zeiss AxioCam ERC 5s, com aumento de 50, 100, 200, 500 e 1000x.

4.3 Tratamentos Térmicos

Com intuito de alcançar as propriedades mecânicas necessárias para aplicação do aço objeto deste estudo em fixadores de torres eólicas, foram realizados tratamentos térmicos nas amostras previamente identificadas na seguinte ordem: normalização, têmpera em óleo ou em PAG e duplo revenido.

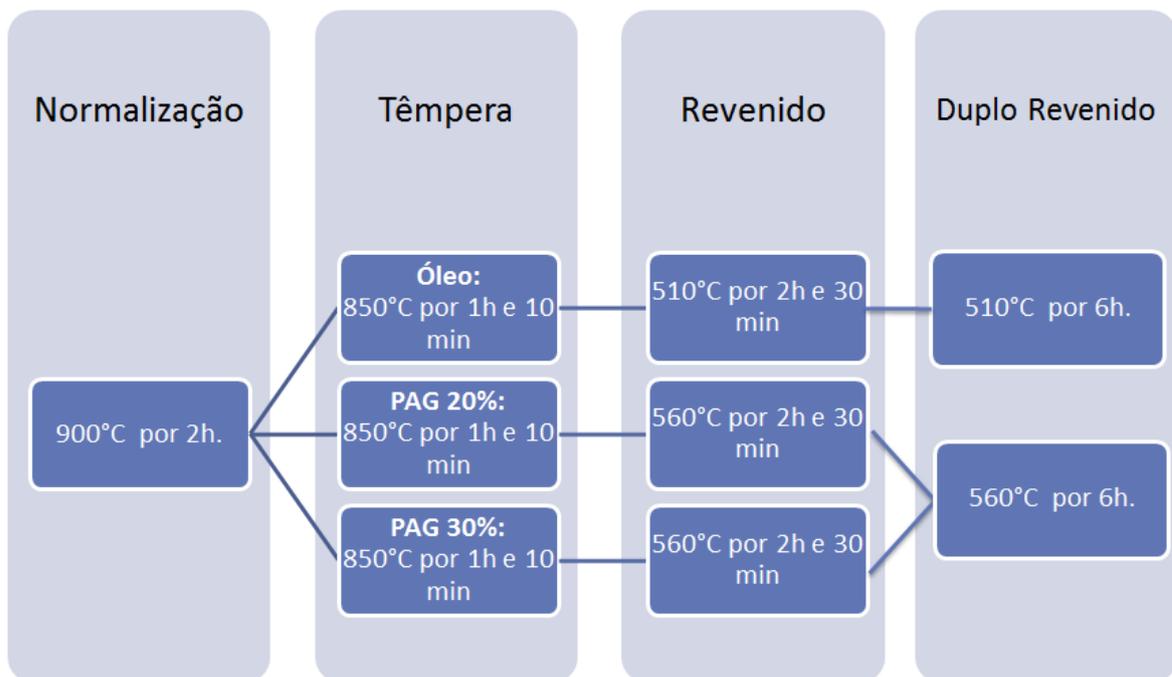


Figura 22. Ciclos de Tratamentos Térmicos utilizados.
Fonte: Cedida pela Gerdau Aços Especiais S/A.

Todos os ciclos de aquecimento das amostras foram realizados em um forno Sanchis- Modelo HM12.

Para as amostras temperadas, optou-se pelo uso de tanque com agitação, visto que, de preferência para uso correto do PAG em solução com água a agitação se faz necessária uma vez que ocorre um aumento na velocidade do resfriamento, obtendo-se uma melhor homogeneidade nas propriedades das amostras. O tanque utilizado é da marca Fleron, com capacidade de 500 litros (Figura 23).



Figura 23. Tanque Fleron com agitação.
Fonte: Cedida pela Gerdau Aços Especiais S/A.

4.3.1 Normalização

Primeiramente as amostras oriundas de processos de laminação passaram por tratamento térmico de normalização a fim de obter uma homogeneização e alívio de tensões da microestrutura e, com isso, garantir uma melhor e mais uniforme resposta para o tratamento de têmpera tanto com as diferentes concentrações de PAG, quanto com óleo mineral.

Com base no diagrama TRC obtido através da simulação termomecânica, optou-se por um ciclo de normalização a 900°C por duas horas e trinta minutos, seguido de resfriamento lento ao ar.

4.3.2 Têmpera

Na segunda etapa do tratamento térmico, optou-se por tratamento térmico de têmpera. O ciclo consistiu, para todas as variações dos meios de resfriamento, em um aquecimento de 850°C a fim de obter uma microestrutura austenítica, conforme diagrama TRC (Figura 29) para o aço em questão. As amostras foram mantidas neste patamar de temperatura por uma hora e dez minutos, tempo utilizado pela indústria siderúrgica para o aço em questão, e os meios de resfriamentos foram variados, a fim de comprar a viabilidade da substituição do óleo mineral, utilizado hoje pela indústria, pelo PAG.

Foram realizadas, ainda, têmperas em água e em óleo com a finalidade de verificar se as microestruturas obtidas estarão de acordo com as microestruturas esperadas pelo Diagrama TRC obtido para o aço de estudo.

- Têmpera com resfriamento em Óleo Mineral

Cinco amostras foram temperadas em tanque com agitação fazendo-se uso de óleo IPITEMP 38, um óleo mineral a base de óleos básicos parafínicos utilizado em tratamentos térmicos industriais. Este meio de resfriamento possui fator de severidade igual a 0,5 devido a moderada agitação, correspondendo a um fator menor do que o da água ($H=1,0$). Este meio menos severo tem como objetivo reduzir a possibilidade de distorções e formação/propagação de trincas. **(14)**

O óleo encontrava-se a temperatura ambiente de 25°C. As amostras ficaram completamente imersas no banho de óleo por dez minutos, a fim de garantir a têmpera das amostras.

- Têmpera com resfriamento em PAG

Dez amostras foram temperadas utilizando-se cinco para cada variação de concentração de PAG em solução aquosa, sendo as variações de concentrações iguais a 20% e 30%, visto que estudos anteriores demonstraram que soluções entre 20% e 35% proporcionam melhores velocidades de resfriamento para aços com boa temperabilidade **(16)** Observa-se que um refratômetro foi utilizado para confirmar a concentração do polímero em solução aquosa.

As amostras foram imersas em tanque com agitação contendo a solução de PAG por um tempo de dez minutos, para fins de comparação com os resultados obtidos através de resfriamento com óleo mineral.

4.3.3 Revenimento

Este tratamento teve como objetivo aliviar as tensões residuais provocadas pela formação da microestrutura martensítica formada durante o

processo de têmpera. Além disso, é necessário melhorar também a tenacidade e ductilidade baixas oriundas desta microestrutura e ajustar a resistência mecânica e a dureza.

Optou-se por duplo revenimento das amostras devido ao teor de carbono do aço DIN 42CrMo MOD, uma vez que há uma maior tendência de retenção de austenita durante o processo de têmpera e que, durante o primeiro revenimento pode ocorrer precipitação de carbonetos na austenita retida, podendo ainda, durante o resfriamento, formar uma nova martensita que precisa ser eliminada no segundo revenido. **(9)**

De acordo com Costa e Silva e Mei, 2006, a fim de evitar a possível fragilização que ocorre para alguns aços quando aquecidos entre as temperaturas de 250°C e 500°C optou-se por ciclos- para as amostras que sofreram têmpera em solução de PAG- de revenimento a 560°C sendo o primeiro revenido mantido por aquecimento durante duas horas e trinta minutos, e o segundo revenido mantido por seis horas. Para as amostras temperadas em óleo, foi mantida a temperatura de 510°C utilizada originalmente, mantendo-se os mesmos tempos utilizados para o PAG. **(9)**

4.4 Ensaios Mecânicos

Existem relações entre a dureza de um material e outras propriedades mecânicas as quais também levam em conta a deformação mecânica. Sendo assim é possível relacionar os resultados obtidos através de um ensaio de dureza com os resultados de resistência à ruptura. Já o ensaio de tenacidade à fratura por impacto se fazem necessários uma vez que os resultados obtidos em ensaios de tração (sob baixas taxas de carregamento) não podem ser extrapolados a fim de se obter uma previsão do seu comportamento à fratura, sendo as condições do ensaio de impacto escolhidas de maneira que o material seja submetido à condições mais extremas sob taxas de carregamento mais altas, segundo a Norma NBR 6157. **(20)**

4.4.1 Teste de Dureza

- Dureza Rockwell C (HRC):

Para realização do ensaio de Dureza Rockwell C, as amostras - previamente tratadas termicamente- foram cortadas em Serra FMB, Modelo Centauro. Em seguida foram submetidas a sequencia de lixas nas seguintes granulometrias 100, 220, 300, 400, 600.

Os ensaios foram realizados em Durômetro Emco-Test DuroJ ,com utilização de penetrador cone de diamante e uma força de 150kgf, segundo a Norma ASTM E 18-03.

4.4.2. Ensaio de Tração Uniaxial

Consiste em um ensaio mecânico no qual a aplicação de uma força em um corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço, tendendo a esticá-lo ou alongá-lo. O corpo de prova, cujas dimensões devem ser padronizadas conforme a Norma ASTM E8/E8M (2008), é colocado em um equipamento de ensaios universal que aplica esforços crescentes na direção axial. Tais esforços são então medidos por um extensômetro a fim de obter a medida de carga por deslocamento do corpo de prova até o momento de sua ruptura. **(21)**

Para realização do ensaio de tração uniaxial, as amostras tratadas termicamente, temperadas e duplamente revenidas, foram usinadas em centro de usinagem da marca YCM, modelo XV560. Conforme especificação da Norma ASTM E8/E8M (2008).

Os ensaios foram realizados em Equipamento Instron Universal, modelo 300LX (Figura 24), seguindo também as exigências da Norma ASTM E8/E8M.



Figura 24. Instron Universal, modelo 300LX.
Fonte: Cedida pela Gerdau Aços Especiais S/A.

4.4.3 Ensaio de Impacto- Charpy

O ensaio de impacto Charpy visa determinar a resistência e a sensibilidade dos materiais quando submetidos a uma certa carga de impacto, medindo a quantidade de energia absorvida pelo material durante a fratura. É um ensaio simples e de baixo custo que pode ser reproduzido para diferentes faixas de temperatura, conforme a necessidade do material. **(20)**

Para realização do ensaio de impacto Charpy, as amostras tratadas termicamente, temperadas e duplamente revenidas, foram usinadas em centro de usinagem da marca YCM, modelo XV560, conforme especificação da Norma NBR 6157 (Figura 25). O entalhe em “V” com profundidade de 2 mm foi realizado em brochadeira.

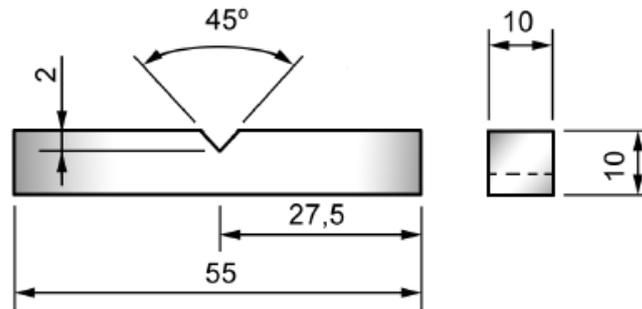


Figura 25. Corpo de prova para ensaio Charpy com entalhe em “V”
 .Fonte: Norma NBR 6157, 1980

As dimensões dos corpos de prova já entalhados foram conferidas em Projetor de Perfis Mitutoyo, modelo PJ300-H, conforme Norma NBR 6157 (Figura 26).

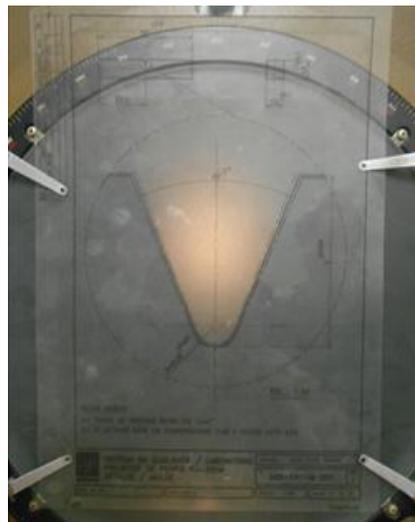


Figura 26. Verificação das dimensões do entalhe em “V”.
 Fonte: Cedida pela Gerdau Aços Especiais S/A.

Para as condições de utilização do aço DIN 42CrMo4 MOD, os quinze corpos de prova foram submetidos à temperatura de (-40°C) imergidos em etanol com pureza de 96% em recipiente de resfriamento com nitrogênio líquido sendo que a transferência dos corpos de prova do álcool até o martelo foi de no máximo 5 segundos até a liberação do martelo, com carga de 30mKg, conforme Norma NBR 6157 (Figura 27).

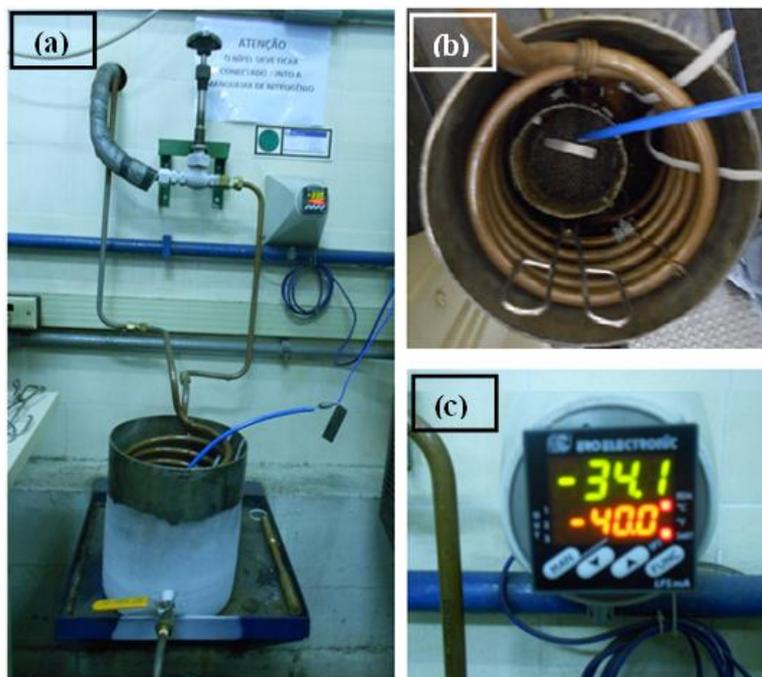


Figura 27. Ensaio de Impacto Charpy em temperatura negativa. (a) Sistema de resfriamento. (b) Corpo de prova imerso em álcool. (c) Detalhe do termopar.
Fonte: Cedida pela Gerdau Aços Especiais S/A.

Os ensaios foram realizados em Equipamento MFL, modelo PSW 30115. (Figura 28)



Figura 28 Equipamento MFL, modelo PSW 30115.
Fonte: Cedida pela Gerdau Aços Especiais S/A.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização do Aço

5.1.1 Espectrômetro de Emissão Óptica (E.E.O.)

A partir da análise química realizada em Espectrômetro de Emissão Óptica Modelo ARL- 4460, obteve-se a Tabela 4 a qual apresenta a composição química para o aço DIN 42CrMo4 MOD.

Tabela 4. Composição química do Aço DIN 42CrMo4 Modificado

AÇO	%C	%Si	%Mn	%P Máx	%S Máx	%Cr	%Mo	%Al	%Pb Máx	%N
DIN 42CrMo4 MOD	0,45- 0,48	0,18- 0,30	0,75- 0,90	0,02	0,01	1,0- 1,15	0,15- 0,22	0,005- 0,02	0,01	0,012

Os resultados mostram uma variação em todos os elementos analisados, provando que o aço objeto de estudo é sim uma variação do aço DIN 42CrMo4 , comprovando com isso a necessidade de obter as reais curvas TRC ao invés de utilizar as curvas do aço semelhante a fim de alcançar, através do tratamento térmico adequado, as propriedades necessárias para a aplicação em fixadores de torres eólicas.

5.1.2 Diagrama de Transformação no Resfriamento Contínuo

Utilizado o simulador termomecânico Gleeble 3500®, obteve-se o Diagrama TRC para o aço objeto de estudo, o qual foi utilizado na programação dos ciclos de tratamento térmico para têmpera em óleo e soluções aquosas de PAG (Figura 29).

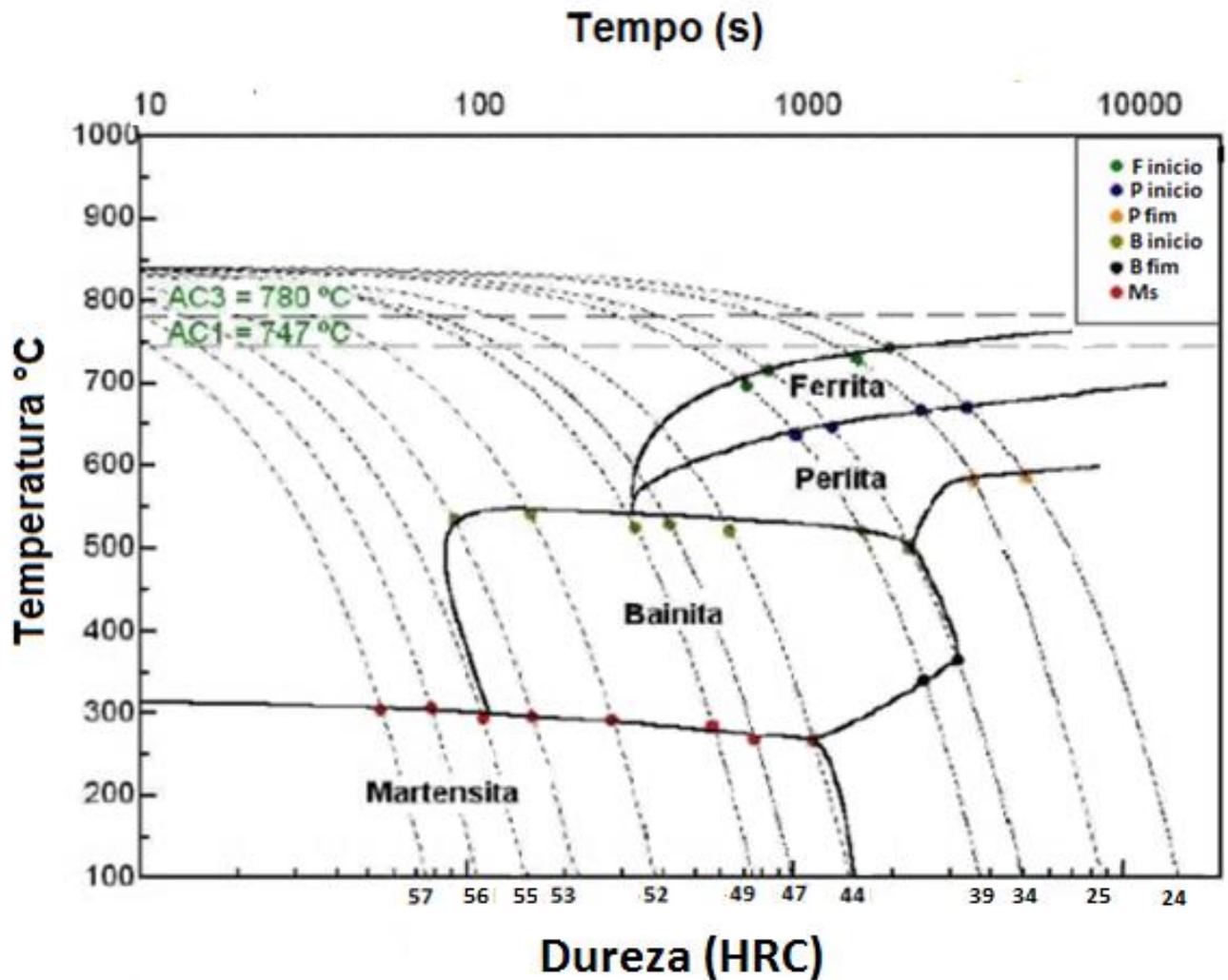


Figura 29. TRC obtido através do Simulador Termomecânico Gleeble 3500® para o aço DIN 42CrMo4 MOD.

Uma vez que o Diagrama de Transformação no Resfriamento Contínuo obtido é capaz de prever as microestruturas esperadas, bem como os valores correspondentes de dureza, sua obtenção torna possível uma programação eficaz de tratamento térmico, específica para o aço de estudo, com a finalidade de obter as propriedades mecânicas finais exigidas e especificadas pelo cliente, fazendo-se uso das diferentes opções de meios de resfriamento para têmpera como água, óleo e polialquileno glicol.

5.1.3 Análise Metalográfica

A fim de garantir as propriedades mecânicas faz-se necessária a confirmação das microestruturas presentes no aço após cada ciclo de tratamento térmico, devendo ser garantida a qualidade e homogeneidade da microestrutura obtida, sendo esperada, após têmpera a estrutura martensítica e, após o duplo revenimento, uma microestrutura martensítica refinada com a presença de carbonetos de cromo e molibdênio.

- Resultados para amostras temperadas em água

As Figuras 30 e 31 apresentam as imagens de microscopia óptica do aço DIN 42CrMo4 MOD após tempera em água:

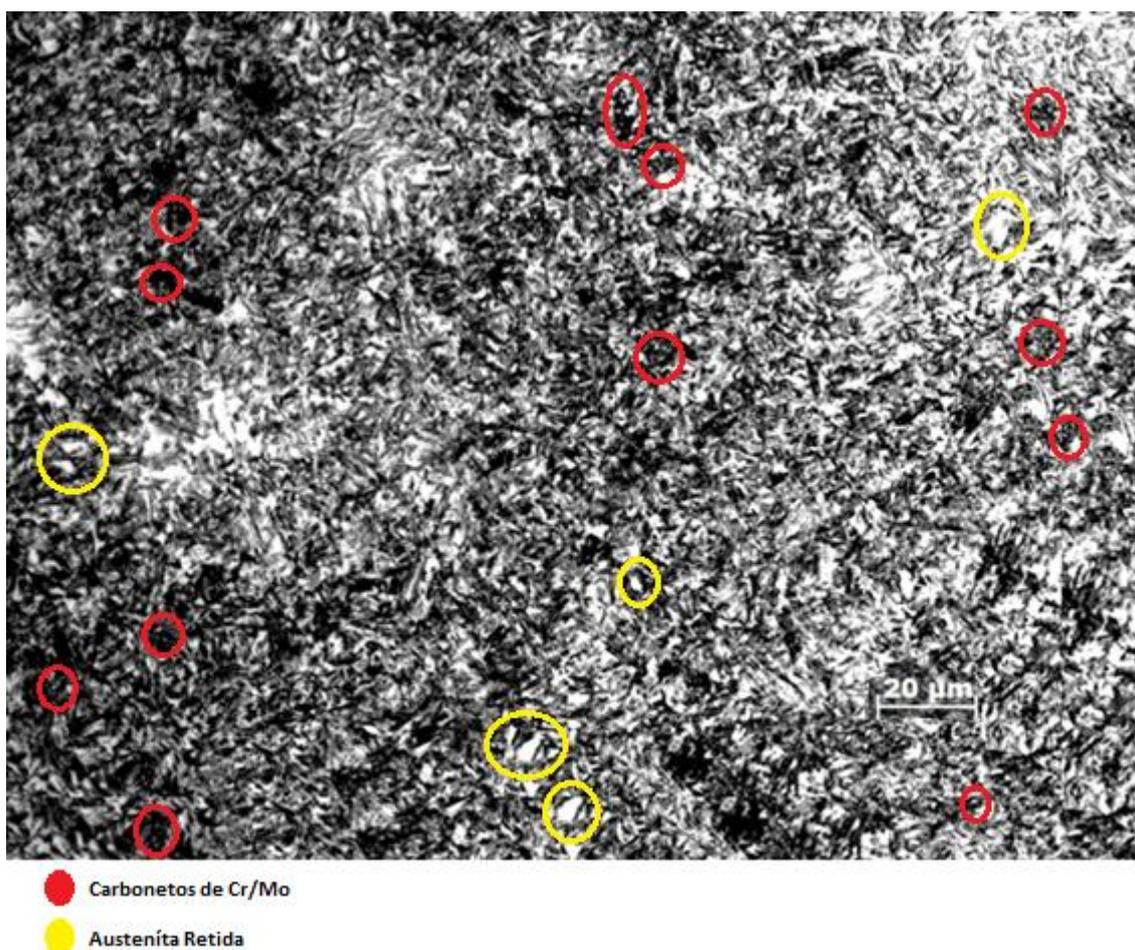


Figura 30. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado em água. Aumento 500x. Ataque Nital 2%.

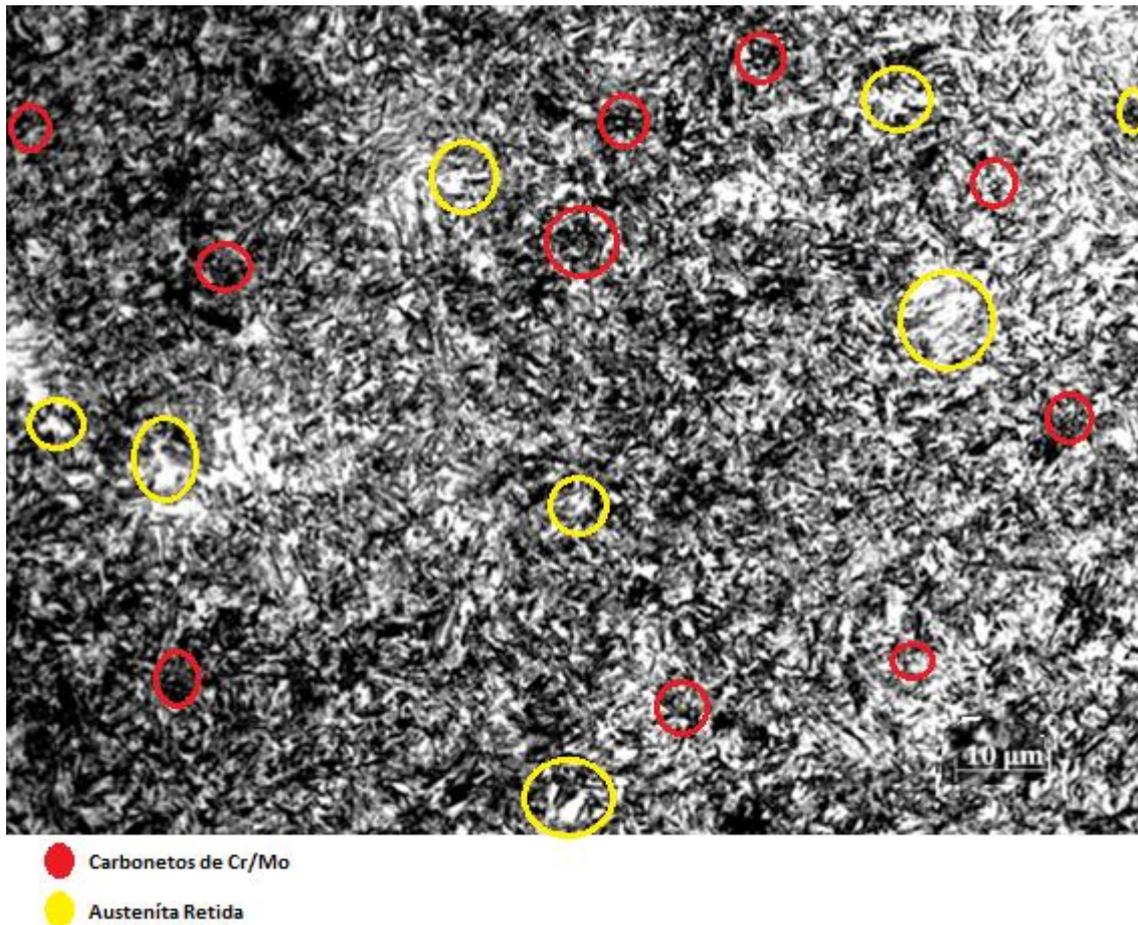


Figura 31. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado em água. Aumento 1000x. Ataque Nital 2%.

Através das amostras obtidas via metalografia é possível observar a eficiência do meio de têmpera, visto que se observa a estrutura martensítica em forma de placas, com presença aparente de austenita retida (exemplos destacados em amarelo) e carbonetos (exemplos destacados em vermelho), possivelmente de cromo e molibdênio, finamente dispersos. A microestrutura encontrada é compatível com os valores de dureza encontrados para a amostra iguais a 56 HRC.

- Resultados para amostras temperadas em óleo

As Figuras 32 e 33 apresentam as imagens de microscopia óptica do aço DIN 42CrMo4 MOD após tempera em óleo:

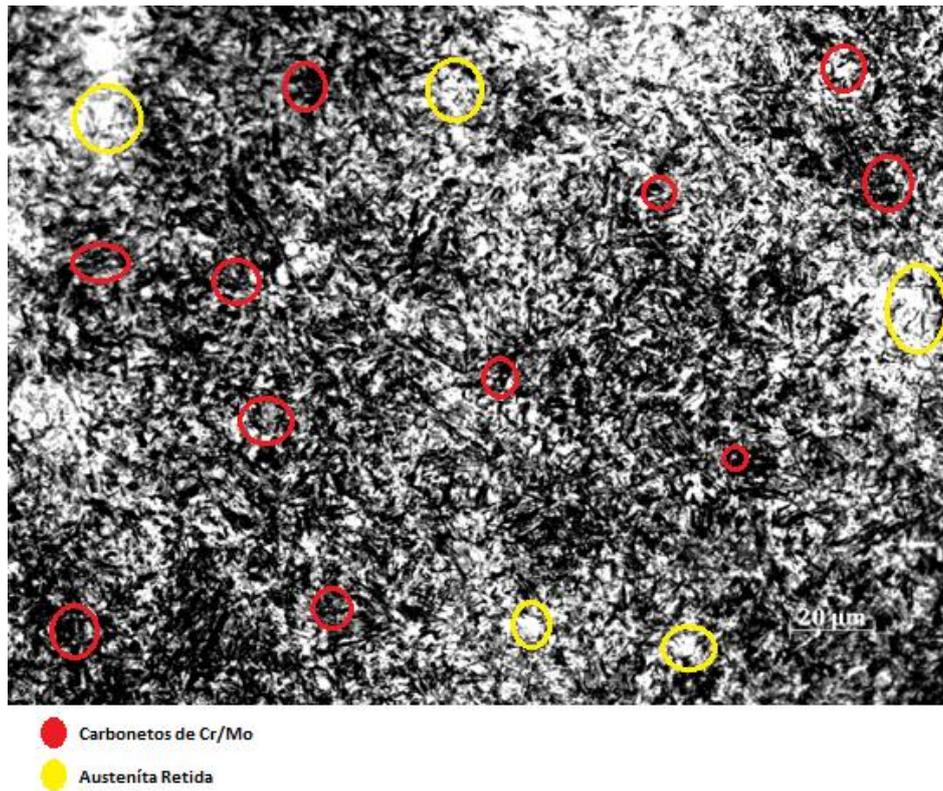


Figura 32. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado a óleo. Aumento 500x. Ataque Nital 2%.

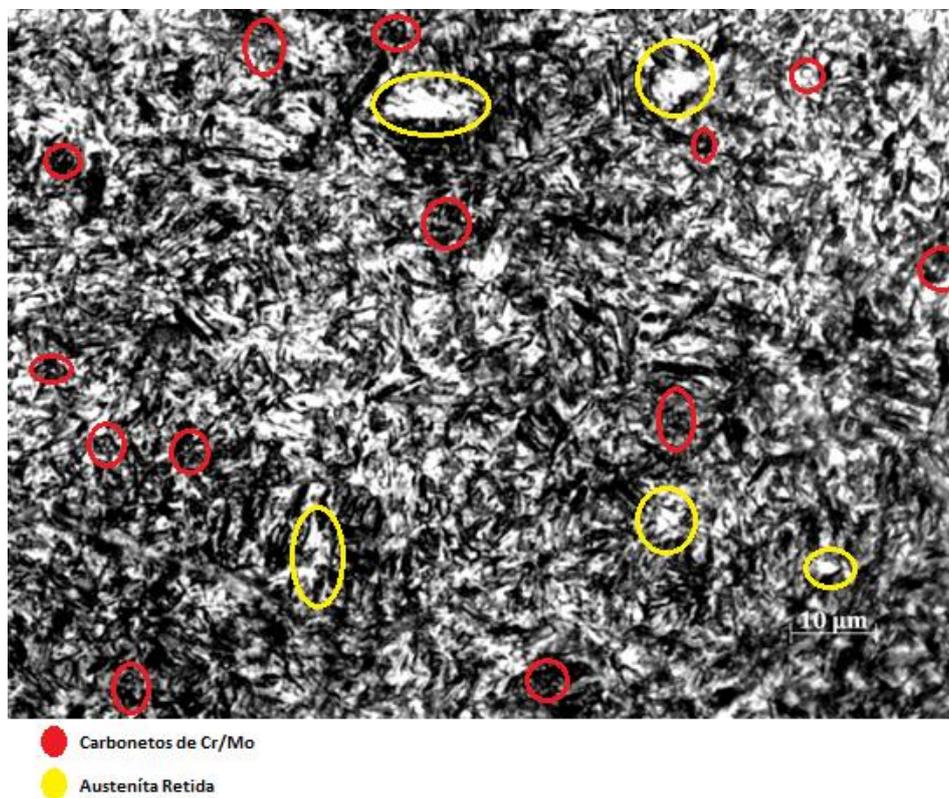


Figura 33. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado a óleo. Aumento 1000x. Ataque Nital 2%.

As imagens obtidas via metalografia mostram a eficiência do meio de têmpera, visto que se observa a estrutura martensítica em forma de placas, com presença aparente de austenita retida (exemplos destacados em amarelo) e carbonetos, possivelmente de cromo e molibdênio, uniformemente dispersos. A microestrutura, semelhante à microestrutura das amostras temperadas em água (Figuras 30 e 31), é compatível com os valores de dureza encontrados para a amostra iguais a 56 HRC

- Resultados para amostras temperadas em óleo e duplamente revenidas

As Figuras 34 e 35 apresentam as imagens de microscopia óptica do aço DIN 42CrMo4 MOD após tempera em óleo e duplo revenimento em temperatura igual a 510°C:

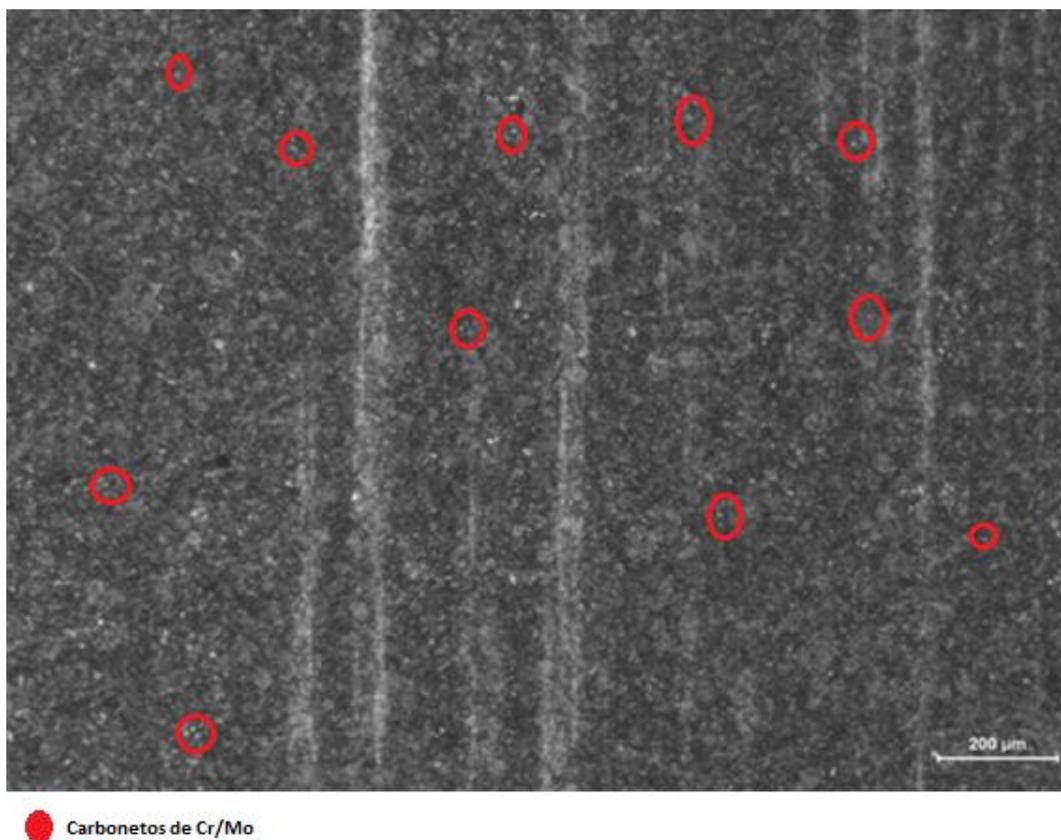


Figura 34. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado a óleo e duplamente revenido. Aumento 50x. Ataque Nital 2%.

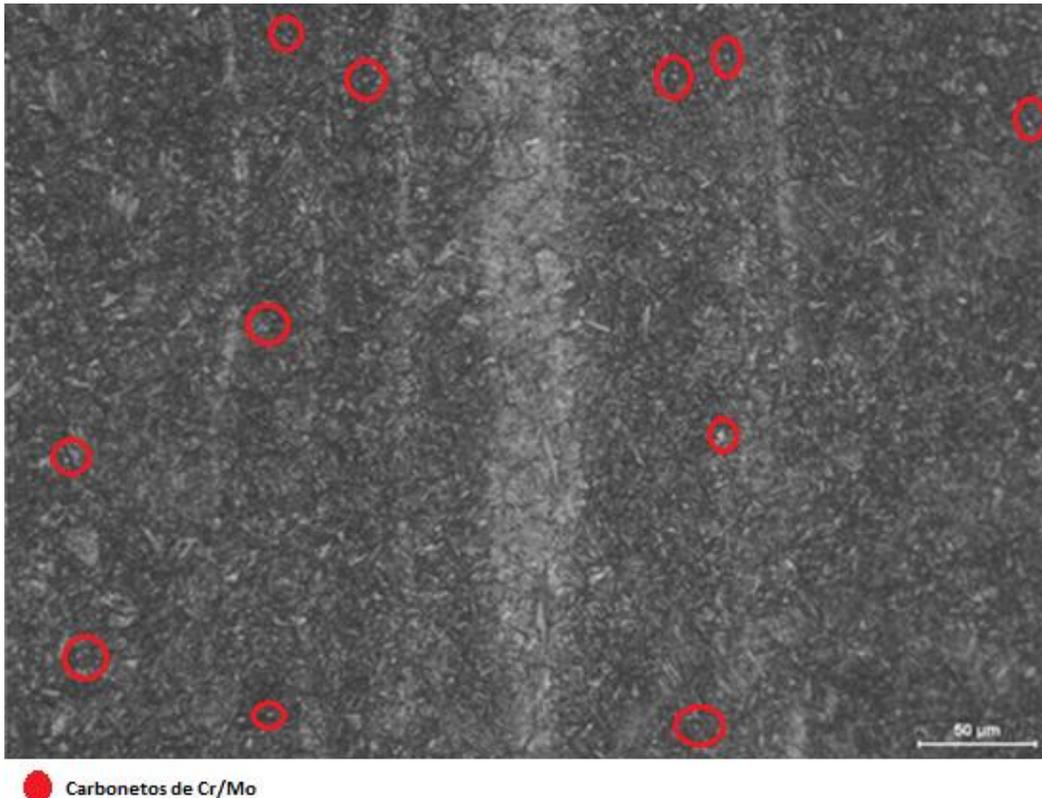


Figura 35. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado a óleo e duplamente revenido. Aumento 200x. Ataque Nital 2%.

Através das amostras obtidas via metalografia é possível observar a eficiência do meio de têmpera, visto que se observa a estrutura martensítica revenida refinada, com presença aparente de carbonetos, possivelmente de cromo finamente dispersos (exemplos destacados em vermelho). A microestrutura encontrada é compatível com os valores de dureza encontrados para a amostra iguais a 33 HRC.

- Resultados para amostras temperadas em PAG 20%

As Figuras 36 e 37 apresentam as imagens de microscopia óptica do aço DIN 42CrMo4 MOD após tempera em solução aquosa com PAG em concentração de 20% e duplo revenimento em temperatura igual a 560°C:

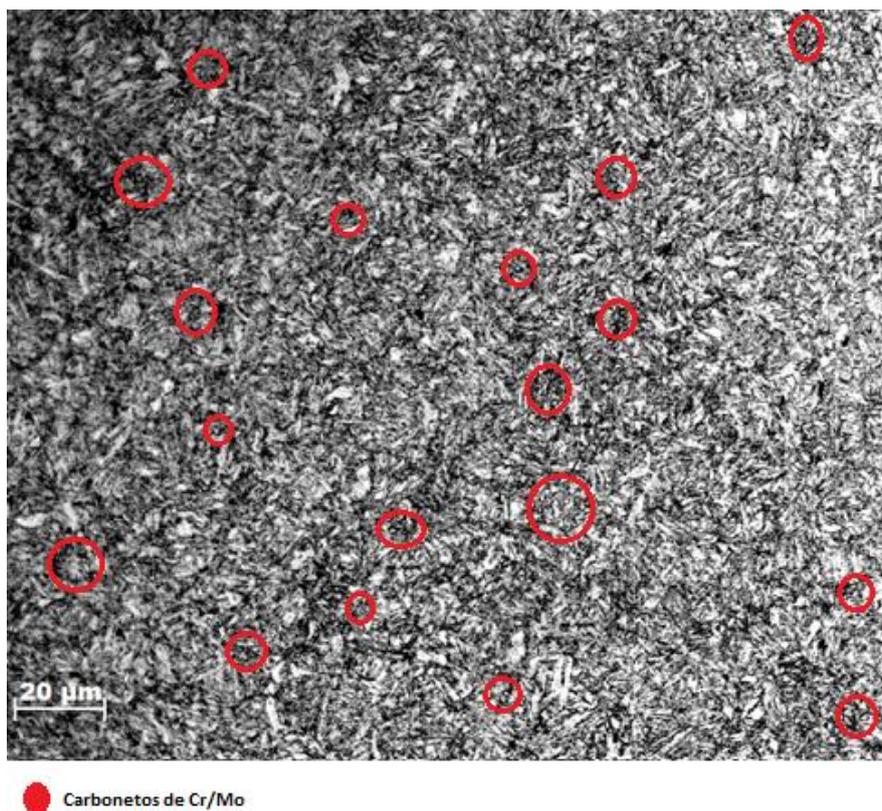


Figura 36. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado em PAG 20% e duplamente revenido. Aumento 500x. Ataque Nital 2%.

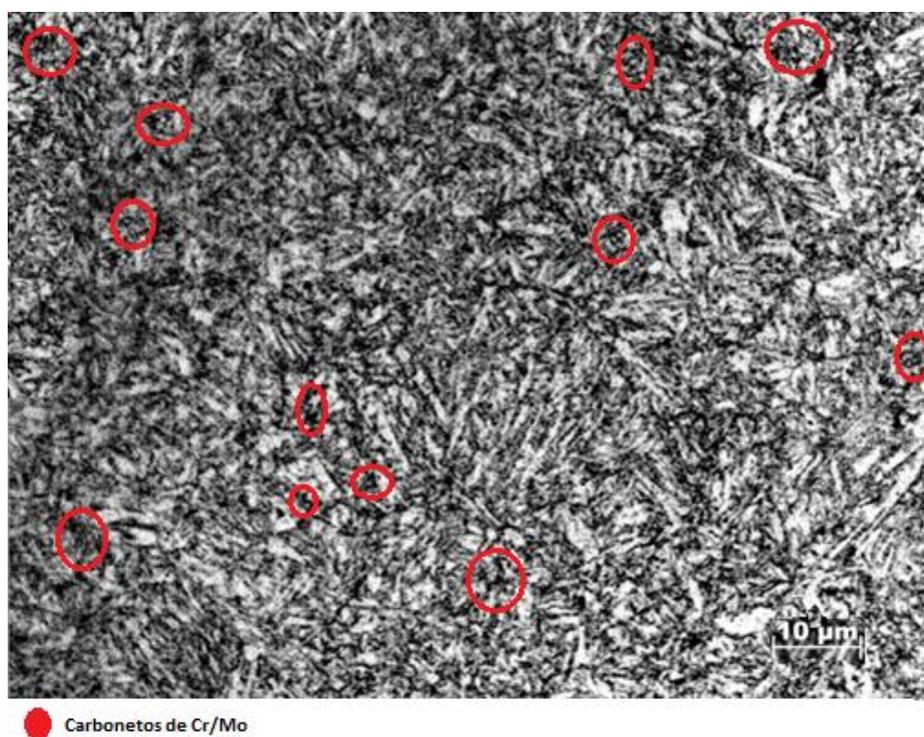


Figura 37. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado em PAG 20% e duplamente revenido. Aumento 1000x. Ataque Nital 2%.

As metalografias obtidas para este meio de resfriamento também mostram eficiência do meio de têmpera, uma vez que nestes também é possível observar uma estrutura martensítica revenida refinada homogênea, com presença de carbonetos (exemplos destacados em vermelho), possivelmente de cromo e molibdênio, precipitados.

- Resultados para amostras temperadas em PAG 30%

As Figuras 38 e 39 apresentam as imagens de microscopia óptica do aço DIN 42CrMo4 MOD após têmpera em solução aquosa com PAG em concentração de 30% e duplo revenimento em temperatura igual a 560°C:

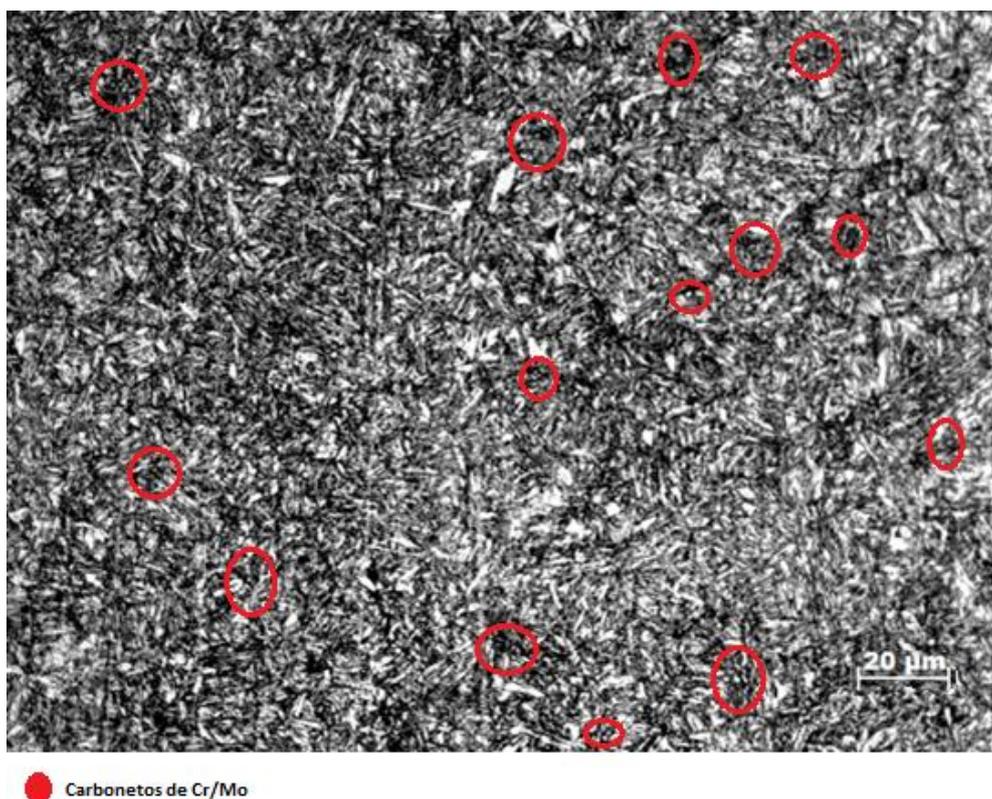
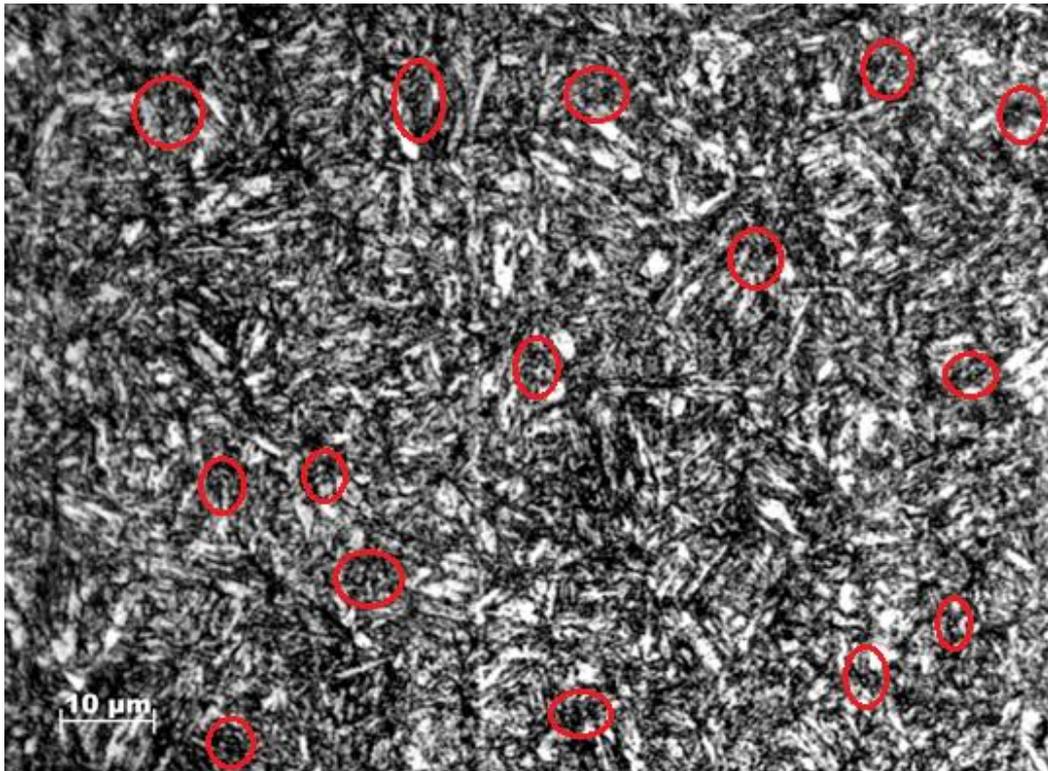


Figura 38. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado em PAG 30% e duplamente revenido. Aumento 500x. Ataque Nital 2%.



● Carbonetos de Cr/Mo

Figura 39. Imagem da microestrutura obtida por microscopia óptica para o aço DIN 42CrMo4 MOD temperado em PAG 30% e duplamente revenido. Aumento 1000x. Ataque Nital 2%.

Assim como nas metalografias obtidas para a concentração de 20% de PAG, metalografias obtidas para 30% de PAG mostram eficiência do meio de têmpera, uma vez que nestes também é possível observar uma estrutura martensítica refinada homogênea, com presença de carbonetos precipitados (exemplos destacados em vermelho).

Tanto as amostras temperadas em PAG 20% quanto 30% apresentam estrutura martensítica revenida em formato de ripas e presença de austenita retida. Segundo o TRC (Figura 29), é possível que haja ainda formação de estrutura bainítica, estrutura de difícil identificação devido à sua semelhança, tanto em aparência quanto em valores de dureza, com a estrutura martensítica.

Os carbonetos presentes são carbonetos de cromo e molibdênio, os quais geram uma dureza secundária no aço em questão, os quais, segundo Costa e Silva e Mei (2006), estão de acordo com os valores de dureza encontrados, valores em torno de 36 HRC.

5.2 Ensaio Mecânicos

Para garantir a aplicabilidade do aço DIN 42CrMo4 MOD em fixadores de torres eólicas, é necessário garantir os resultados quanto à tração e dureza e verificar uma possível fragilização em temperaturas negativas através do ensaio de impacto Charpy. O tratamento térmico apenas será considerado satisfatório quando essas três propriedades forem obtidas. Para tanto, seguem os resultados obtidos nos tratamentos térmicos estudados.

5.2.1 Ensaio de Dureza

A aplicação exige que seja realizado ensaio de dureza Rockwell C no núcleo das amostras, visando obter resultados entre 33 e 37 HC, valor exigido pelo cliente.

As amostras temperadas em água e óleo sem revenimento posterior, bem como as amostras temperadas em óleo e PAG e duplamente revenidas, com seção transversal de 38,1 mm, apresentaram os resultados apresentados na Tabela 5 abaixo:

Tabela 5: Resultados de Dureza Rockwell C no núcleo das amostras

Dureza Rocwell C Núcleo	Óleo SEM Revenido	Água SEM Revenido	Óleo COM Revenido	PAG 20% COM Revenido	PAG 30%COM Revenido
Média	56	56	33	35	37
Desvio Padrão	0,78	1,32	0,67	0,79	0,88

Os resultados foram consolidados através da média obtida através da medição de três pontos no núcleo em cada uma das 15 amostras estudadas. É exigido pelo cliente final que a medição seja feita no núcleo da amostra a fim de demonstrar que o núcleo da barra está devidamente temperado, conforme Figura 40.

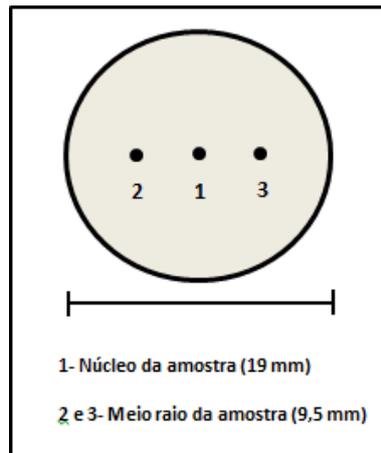


Figura 40. Esquema de medição de dureza.

Além das medições de núcleo, foram realizadas medições em uma distância equivalente a meio raio da amostra, conforme esquema da Figura 40. Foram obtidos os mesmos resultados médios tanto para o núcleo, quanto para o meio raio, demonstrando a eficiência e a homogeneidade da microestrutura obtida através dos diferentes meios de resfriamento de têmpera.

Segundo Heat Treaters Guide (1995), o meio de resfriamento de têmpera em solução aquosa com polímero possui índice de severidade próximo da água ($H= 1-1,2$). Sabendo-se que um meio de resfriamento mais brando resulta em menores valores de dureza, os valores obtidos são coerentes com os meios de resfriamento utilizados, visto que são valores próximos que aumentam de acordo com o aumento no meio de severidade.

Além disso, os resultados obtidos para as amostras temperadas em água e óleo validam os valores de dureza esperados pelo Diagrama TRC (Figura 29) para altas taxas de resfriamento.

5.2.2 Ensaio de Tração

Os resultados obtidos através do ensaio de tração, bem como os limites de tolerância exigidos pelo cliente para as amostras temperadas em óleo sob agitação e posteriormente duplamente revenidas em temperatura igual a 510°C, bem como amostras temperadas em PAG em concentrações iguais a

20% e 30%, também sob agitação e posteriormente duplamente revenidas em temperatura igual a 560°C são apresentados na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6: Resultados de Tração para as três condições de têmpera estudadas.

Têmpera em Óleo	Limite Mínimo	Limite Máximo	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Média	Desvio Padrão
Limite de Resistência (MPa)	1050	1170	1140	1156	1169	1170	1157	1158,4	12,17
Limite de escoamento (MPa)	940	-	1019	997	1029	1015	1021	1016,2	11,88
Redução de Área (%)	48	-	47	50	50	49	48	48,8	1,3
Alongamento (%)	9	-	13	15	13	14	14	13,8	0,83
Têmpera em PAG 20%	Limite Mínimo	Limite Máximo	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8	Amostra 9	Amostra 10	Média	Desvio Padrão
Limite de Resistência (MPa)	1050	1170	1171	1146	1169	1170	1157	1162,6	10,87
Limite de escoamento (MPa)	940	-	1102	1067	1105	1102	1167	1108,6	36,19
Redução de Área (%)	48	-	48	50	49	48	50	49	1
Alongamento (%)	9	-	13	14	14	13	14	13,6	0,54
Têmpera em PAG 30%	Limite Mínimo	Limite Máximo	Amostra 11	Amostra 12	Amostra 13	Amostra 14	Amostra 15	Média	Desvio Padrão
Limite de Resistência (MPa)	1050	1170	1138	1149	1145	1138	1147	1143,4	5,12
Limite de escoamento (MPa)	940	-	1024	1035	1037	1025	1033	1030,8	5,93
Redução de Área (%)	48	-	50	50	49	48	50	49,4	0,89
Alongamento (%)	9	-	15	14	14	13	15	14,2	0,83

A partir dos resultados obtidos é possível verificar que as amostras temperadas em óleo e duplamente revenidas estão dentro dos limites esperados para os limites de resistência a tração e de limite de escoamento, bem como com os resultados de alongamento. Apenas um resultado (Amostra 1) quanto à redução de área encontrou-se abaixo do esperado, contudo os outros quatro valores dentro dos limites esperados.

Os resultados obtidos mostram também que as amostras temperadas em PAG com concentração de 20% e duplamente revenidas estão dentro dos limites esperados para os limites de escoamento, redução de área e alongamento. Apenas um resultado quanto ao limite de resistência à tração encontrou-se acima do esperado, os outros quatro valores obtidos encontram-se dentro dos limites de resistência fixados pelo cliente.

Sobre as amostras temperadas em PAG com concentração de 30% e duplamente revenidas, pode-se observar que os resultados estão dentro dos limites esperados para os limites de resistência a tração, limites de escoamento, valores de redução de área e alongamento.

Sendo assim, tanto as amostras temperadas em óleo, quanto as amostras temperadas em concentrações de 20% e 30% de PAG alcançaram os valores exigidos pelo cliente quanto a resistência à tração. É possível observar que as amostras temperadas em PAG 30% apresentaram um menor desvio padrão para valores de limites de resistência a tração e limites de escoamento, quando comparados com os outros dois meios de resfriamento, o que indica uma maior estabilidade nos valores obtidos através deste meio de resfriamento.

5.2.3 Ensaio de Impacto

No ensaio de impacto Charpy, o qual é realizado em temperatura negativa a (-40°C), de acordo com a norma NBR 6157, para cada amostra termicamente tratada são retiradas três amostras (CP) a fim de que os ensaios sejam realizados.

Os resultados obtidos através do ensaio impacto Charpy em temperatura negativa (-40°C), bem como os limites de tolerância exigidos para as amostras temperadas em óleo sob agitação e duplamente revenidas em temperatura igual a 510°C e amostras temperadas em PAG em concentrações de 20% e 30% duplamente revenidas em temperatura igual a 560°C, são apresentados na Tabela 7 abaixo:

Tabela 7: Resultados de Impacto Charpy para três condições de têmpera estudadas

Óleo	Limite Mínimo	Limite Máximo	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
CP1	27 J	-	25	25	22	24	23
CP 2	27 J	-	23	23	23	26	25
CP 3	27 J	-	24	23	24	24	24
PAG 20%	Limite Mínimo	Limite Máximo	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8	Amostra 9	Amostra 10
CP1	27 J	-	27	26	28	27	28
CP 2	27 J	-	28	28	27	29	29
CP 3	27 J	-	27	27	27	27	27
PAG 30%	Limite Mínimo	Limite Máximo	Amostra 11	Amostra 12	Amostra 13	Amostra 14	Amostra 15
CP1	27 J	-	27	28	28	27	28
CP 2	27 J	-	28	26	27	29	29
CP 3	27 J	-	27	28	27	27	27

Segundo a Norma NBR 6157, para cada amostra tratada termicamente, são desdobrados três corpos de prova de impacto Charpy, totalizando 15 amostras para cada meio de resfriamento de têmpera. Todos os corpos de prova, correspondentes às amostras temperadas em óleo e duplamente revenidas a 510°C, ensaiados apresentaram fragilização em temperatura negativa, não atingindo o limite mínimo exigido para esta aplicação que deveria ser igual a 27 J. A verificação desta fragilização demonstra a importância do ensaio de impacto Charpy, visto que as demais propriedades mecânicas medidas não indicavam tal fragilização.

Possivelmente esta fragilização ocorre devido à fragilização causada pela temperatura de revenimento, a qual se encontra muito próxima das temperaturas consideradas causadoras de fragilização segundo Costa e Silva e Mei, 2006- entre 250°C e 500°C- para aços semelhantes ao aço estudado. **(9)**

Dentre os três corpos de prova ensaiados para cada amostra temperada em PAG 20%, apenas um deles apresentou valor inferior ao limite mínimo esperado, podendo este resultado ser desconsiderado. Sendo assim, o tratamento térmico de têmpera resfriado em solução de PAG com

concentração de 20%, seguido de duplo revenimento em temperatura de 560°C, 50°C acima da temperatura trabalhada nas amostras resfriadas em óleo, garantiu as especificações exigidas para a aplicação em fixadores de torres eólicas.

Assim como os resultados obtidos para uma concentração de PAG de 20%, dentre os resultados obtidos para a concentração de 30% de PAG apenas o corpo de prova 2 a amostra 12 que, após o ensaio de impacto Charpy apresentou valor inferior ao limite mínimo esperado, que é igual a 27J, podendo este resultado ser igualmente desconsiderado. Logo, o tratamento térmico de têmpera resfriado em solução de PAG com concentração de 30%, seguido de duplo revenimento em temperatura de 560°C, também garantiu as especificações exigidas para a aplicação em fixadores de torres eólicas.

6. CONCLUSÕES

- Com base nos resultados obtidos através do Espectrômetro de Emissão Óptica, conclui-se que o aço de estudo é o aço DIN 42CrMo4 Modificado.
- Visto que o aço de estudo é uma versão modificada do aço DIN 42CrMo4, não é aconselhável utilizar os diagramas de resfriamento conhecidos na literatura para este aço, pois algumas transformações podem estar deslocadas. Sendo assim, foi indispensável a determinação da Curva TRC o que garantiu os tratamentos térmicos adequados para o aço de estudo.
- As análises da microestrutura confirmaram, a partir de tratamentos térmicos de têmpera em óleo e PAG com concentrações de 20% e 30%, seguidos de duplo revenimento, a presença da microestrutura esperada a partir dos tratamentos térmicos realizados. Ainda a semelhança entre as microestruturas obtidas para cada meio de resfriamento, possibilita a substituição do aço temperado em óleo por PAG. Além disso, as análises realizadas nas amostras apenas temperadas em água e óleo confirmam a microestrutura martensítica esperada pelo Diagrama TRC obtido para o aço.
- O Ensaio de dureza Rockwell C, realizado nas amostras após duplo revenimento, apresentou valores próximos entre os diferentes meios de resfriamento utilizados, sendo que os valores encontrados para a concentração de 20% de PAG estavam dentro dos limites esperados, enquanto que os valores para o óleo e para 30% de PAG encontram-se exatamente nos limites de especificação. Os valores de dureza Rockwell C obtidos para as amostras apenas temperadas em água e óleo estão de acordo com os valores de dureza previstos pelo Diagrama TRC.
- Os três meios de resfriamento de têmpera apresentaram resultados dos ensaios de tração- o qual foi realizado após têmpera e duplo revenimento na temperatura de 510°C e 560°C

para óleo e PAG, respectivamente- dentro dos limites de especificação, comprovando a possibilidade de substituição.

- As amostras resfriadas em óleo e com duplo revenimento a 510°C, apresentaram fragilização em temperaturas negativas. Uma provável causa para esta fragilização é a temperatura de revenimento (510°C) a qual está próxima da faixa de fragilização causada pelo tratamento. As amostras temperadas em PAG e com duplo revenimento a uma temperatura igual a 560°C não apresentaram fragilização em temperaturas negativas, o que sugere a temperatura inadequada para revenimento das amostras temperadas em óleo. Assim, as amostras temperadas com PAG apresentaram valores de impacto dentro das especificações esperadas para a aplicação, confirmando a possibilidade de substituição do meio de resfriamento.
- As amostras que apresentaram fragilização durante o ensaio de impacto Charpy (-40°C) demonstram a importância da realização deste ensaio, visto que as demais propriedades mecânicas medidas, bem como imagens de microscopia óptica não indicavam tal fragilização.
- Por conseguinte, as propriedades obtidas através de têmpera em concentrações de PAG iguais a 20% e 30% se mostraram equivalentes ou superiores às obtidas através de têmpera em óleo mineral, demonstrando a compatibilidade entre estes meios de resfriamento, podendo-se portanto substituir o óleo mineral por soluções de PAG tanto em concentrações de 20% quanto 30% para o aço DIN 42CrMo4 MOD, para aplicação em fixadores de torres eólicas.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar a causa da fragilização do aço quando temperado em óleo e revenido em temperatura de 510°C.
- Estudar a possibilidade de têmpera com concentrações de PAG inferiores a 20%.
- Ampliar o estudo de substituição do óleo por solução de PAG para barras de aço com maiores dimensões.
- Estudar as propriedades mecânicas do aço temperado em PAG 20% e 30% duplamente revenido em 510°C.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Portal da Energia. Disponível em <www.portal-energia.com>. Acessado em 09 de junho de 2016.
2. Izumi, J. Y. Materiais elétricos, compêndio de trabalhos, vol 3. Unioeste, 2007
3. South, P.; Mitchell, R.; Jacobs, E. Strategies for the Evaluation of Advanced Wind Energy Concepts. Solar Energy Research Institute, Golden, CO, USA, 1983.
4. ABDI- Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. Mapeamento da cadeia produtiva na indústria eólica no Brasil. Brasil, 2014.
5. Relatório Técnico GG47915. Gerdau Aços Especiais S/A
6. Callister, W.D.; Rethwisch, D.G. Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução; 8ª Ed; LTC; Rio de Janeiro, 2013.
7. Villares Metals. Disponível em <www.villaresmetals.com> . Acessado em 10 março de 2016.
8. Chiaverini, V. Aços e Ferros Fundidos; 6º Ed; São Paulo, 1988.
9. da Costa e Silva, A.L.V.; Mei, P.R. Aços e Ligas Especiais; 2ª Ed; Edgard Blücher; São Paulo, 2006.
10. ASM Handbook Committee; ASM Handbook- Heat Treating; vol 4; 1991
11. ASM International; Heat Treaters Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels; 2º Ed; 1995.
12. ASM Handbook Committee; ASM Handbook- Metallography and Microstructures; vol 9; 1991
13. da Silva, C.E. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2009.
14. Colpaert, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns; 4ª Ed; Blucher; São Paulo, 2008.
15. Greaves, M.R. TLT, 34-39.
16. Knoll, P.K. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.
17. Jarvis, L.M; Totten, G.E.; Webster G.M. Advanced Materials & Process, 1990.

18. The Spectroscopy Net. Disponível em <www.thespectroscopynet.eu>. Acesso em 25 de março de 2016.
19. ASM Handbook Committee; ASM Handbook- Metallography and Microstructures; vol 9; 1991
20. Souza, S. A. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos; 5º Ed; Edgard Bluncher; São Paulo, 1982.
21. Davim, J.P.; Magalhães, A.G. Ensaios Mecânicos e Tecnológicos; 3ª Ed; Publindústria; Porto, 2010.
22. Norma ASTM E 18-03: Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials. 2003
23. Norma ASTM E8: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2008.
24. Norma NBR 6157: Determinação da resistência ao impacto em corpos-de-prova entalhados simplesmente apoiados. 1980.