

Faculdade de Tecnologia de Sorocaba

TÊMPERA NO AÇO INOX AISI 420 E A INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE REVENIMENTO NA RESISTÊNCIA A CORROSÃO

Marcos Rogério de Souza Macedo¹ Marcos Dorigão Manfrinato²

¹ Aluno de Graduação em Tecnologia em Processos Metalúrgicos da Faculdade de Tecnologia de Sorocaba. Av. Eng. Carlos Reinaldo Mendes, 2015 – Além Ponte – Sorocaba – SP, (marcos.ticano@hotmail.com)

² Orientador: Professor Mestre da Faculdade de Tecnologia de Sorocaba. Av. Eng. Carlos Reinaldo Mendes, 2015 – Além Ponte, Sorocaba-SP

Resumo – Os aços inoxidáveis martensíticos AISI 420 são muito usados na fabricação de facas, componentes mecânicos e moldes de injeção, por terem elevada dureza e uma moderada resistência à corrosão. Para obter essa última características, ele deve ser temperado e revenido. Sua composição base é o Fe, C e Cr com adição de Ni, Mo e ou V possibilitando a ele ter uma estrutura austenítica no aquecimento e martensítica na têmpera, a resposta ao revenimento também se dá a esses elementos. A resistência a corrosão está intimamente ligada ao ciclo de tratamento térmico usado, as combinações das temperaturas de austenitização e revenimento possuem grande impacto na resistência a corrosão do material. Nesse trabalho vamos avaliar qual a melhor temperatura de austenitização para se obter a maior dureza e a influência das temperaturas de revenimento na corrosão. Para isso foi realizado três tratamentos térmicos de temperas nas temperaturas de austenitização de 950, 1000, 1050°C sem realiza posterior revenimento, com os resultados das durezas das três amostras e com ajuda do software Origin, para elaboração de uma equação matemática, que determinou que a temperatura de austenitização de 995°C se obtém a maior dureza que é 53,4HRC. Para avaliar a influência das temperaturas de revenimento na corrosão foi realizado tratamento térmico de tempera na temperatura de austenitização de 1000°C e o revenimento em temperaturas de 300, 350, 400, 450, 500, 550 e 600°C. As amostras foram submetidas a ensaio de dureza, análise metalográfica e teste de corrosão por Salt Spray com duração de 96 horas. Com os resultados de dureza e de corrosão das amostras revenidas foi possível observar o segundo endurecimento e foi possível identificar macroscopicamente que quanto maior a temperatura de revenimento, maior será a quantidade de sítios de corrosão que se forma, salvo na amostra revenimento de 550°C que se obteve um resultado inesperado.

Abstract – AISI 420 martensitic stainless steel is widely utilized in knife manufacturing, mechanical components, and injection molds, due to its high hardness and corrosion resistance. For the obtention of these characteristics, the steel needs to be quenched and tempered. AISI 420 steel is composed of Fe and Cr, with the addition of Ni, Mo, and V, providing an austenitic microstructure during heating and martensitic microstructure after quenching, tempering result is also influenced by these elements. Corrosion resistance is intimately linked to the utilized heat treatment cycle, the combination of austenitization temperature and tempering are fundamental to the corrosion resistance of the material. This work will evaluate the best austenitization temperature to obtain the highest hardness of the material and the influence of tempering on corrosion resistance. For that, it was performed three different heat treatments of quenching, with austenitization temperatures of 950, 1000, and 1050°C. Analyzing the results of the hardness of samples after treatments with Origin software polynomial fitting, the ideal austenitization temperature was 995°C with a hardness of 53,4 HRC. To evaluate the influence of tempering temperatures on corrosion resistance, quenching was performed at an austenitization temperature of 1000°C and tempering temperatures of 300, 350, 400, 450, 500, 550, and 600°C. Samples were submitted to hardness test, metallographic analysis, and corrosion test by Salt Spray for 96h. By observing the hardness and corrosion results of tempered samples, it was possible to observe a second hardening and it was possible to identify macroscopically that the higher the tempering temperature, the higher the formed corrosion sites, with exception of sample tempered at 550°C, which has presented an unexpected result.

Palavras-chave: AISI 420. Têmpera. Revenimento. Resistência a Corrosão

Introdução

O uso do ferro pelo homem remonta a 1200 AC (COLPAERT, 2008). Embora o ferro seja abundante na crosta terrestre, sua presença na forma sem óxidos, ou seja, o ferro metálico na natureza é muito raro, por isso o homem desenvolveu processos para extrair o ferro do minério de ferro mais comum. Em diferentes etapas desse processo, observou-se que a presença de carbono que afeta positivamente suas propriedades, resultando em uma das principais ferro-ligas, o aço. A produção de aço passou a ser em massa, no século XVIII (COLPAERT, 2008).

O aço com teor de cromo superior a 10,5% é chamado de aço inoxidável, que possui boa resistência à corrosão. Esse teor de cromo combinado com o oxigênio da atmosfera produz uma reação que resulta na formação de uma fina camada passiva de óxido de cromo (Cr_2O_3), protegendo o material de ataques corrosivos (MACEDO, 2016).

A corrosão é um grande problema para as nações no mundo, um relatório apresentado pela empresa *Nexa Resources S.A.* em abril de 2020 mostra que em 2019 aproximadamente 30% da produção mundial de aço foi perdida devido à corrosão, um custo equivalente entre 1 a 5% do produto interno bruto (PIB) dependendo do país. Esses valores são gastos em prevenção, manutenção e substituições de componentes corroídos (NEXA RESOURCES S.A, 2020).

A corrosão é o fenômeno de deterioração e perda, indesejável e irreversíveis de material devido a reações químicas e eletroquímicas com o meio ambiente (GENTIL, 2014).

Os aços inoxidáveis são divididos em cinco grupos: ferríticos; austeníticos; duplex; endurecíveis por precipitação e martensíticos (COLPAERT, 2008).

Neste trabalho, o aço inoxidável martensítico, mais especificamente o AISI420, foi estudado com a finalidade de obter a temperatura de austenitização que resulta na maior dureza e compreender melhor a influência das temperaturas de revenimento na resistência à corrosão e favorecendo e ampliando as possibilidades de aplicação desse material.

Objetivos

Os objetivos deste trabalho são avaliar qual a melhor temperatura de austenitização para se obter a maior dureza e a influência das temperaturas de revenimento na corrosão através do ensaio corrosivo de névoa salina (Salt Spray).

Revisão Bibliográfica

Aço Inoxidável

Devido sua alta empregabilidade, os aços inoxidáveis são um dos principais materiais e um dos mais usados na engenharia (MEI, 2010).

O aço inoxidável é uma liga à base de ferro, carbono e cromo, suas propriedades físicas e químicas são melhores em relação ao aço comum, devido ao cromo e aos outros elementos de liga, como níquel e molibdênio.

Para um aço ser considerado inoxidável ele deve possuir porcentagem em peso de Cr superior a 10,5%. Esta porcentagem é responsável por inibir a formação da corrosão, como mostra a **Figura 1** em que é possível observar que com o aumento do teor de cromo temos a redução da corrosão em mm/ano (CHIAVERINI, 1982).

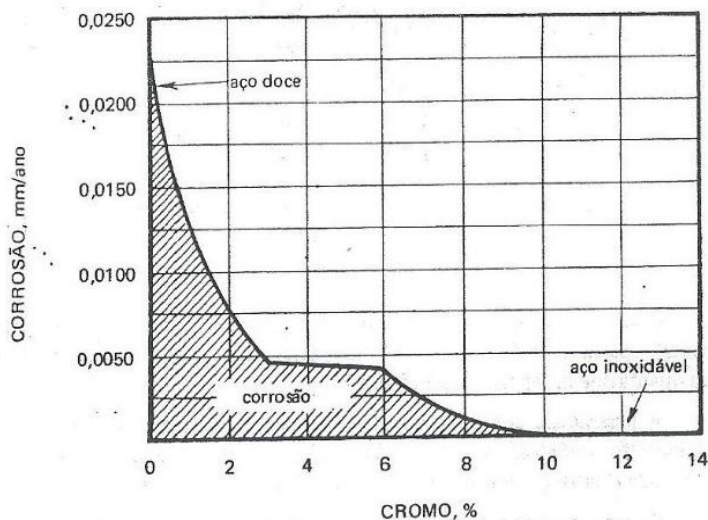


Figura 1- Influência da porcentagem de cromo na resistência a corrosão (CHIAVERINI, 1982).

Esses aços possuem moderada resistência à corrosão atmosférica devido à formação de um filme em sua superfície. Este filme é composto por óxido de cromo (Cr_2O_3) insolúvel, chamado de camada passiva (CHIAVERINI, 1982).

A formação dessa camada é o resultado da interação do oxigênio do ar com a superfície do material, como ilustra a **Figura 2**.

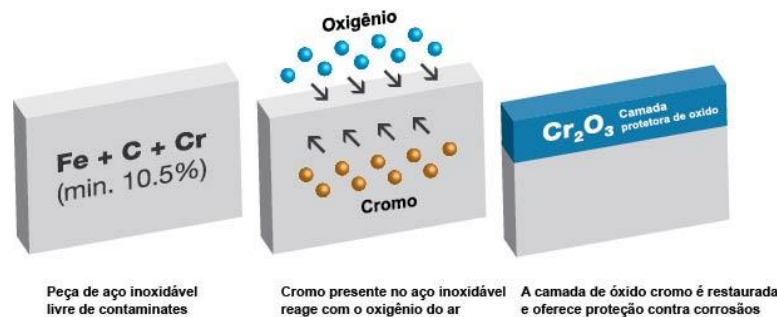


Figura 2 – Processo de passivação do aço inoxidável (Walter,2021).

Porém, apenas a interação do Cromo da composição química do material com o oxigênio da atmosfera não é suficiente para evitar a corrosão, existem outros pontos importantes, e um deles é a temperatura de tratamento térmico ao qual o material foi submetido, que pode favorecer ou evitar as chamadas corrosão intercrystalina ou intergranular (CHIAVERINI, 1982).

Aços inoxidáveis martensíticos

Existem diferentes grupos de aços inoxidáveis, classificados por suas microestruturas (ferríticos, austeníticos e martensíticos), tipo de endurecimento (PH – Endurecidos por precipitação) os duplex e super duplex, que consistem em duas microestruturas diferentes (CHIAVERINI, 1982).

Entre esses tipos de aços inoxidáveis, os martensíticos são usados na fabricação de talheres, moldes de injeção de polímeros, instrumentos cirúrgicos e odontológicos, na fabricação de peças de turbinas a vapor, dispositivos de fixação e na necessidade de maquinário de alta resistência mecânica e resistência à corrosão durante o uso (MACEDO, 2016).

A composição química do aço inoxidável martensítico tem um teor de carbono superior a 0,10% e um teor de cromo entre 11% e 18% (em peso). Este é um fator que melhora a temperabilidade do material, aumentando assim sua resistência mecânica (GOMES & FERREIRA, 2015).

Na série de aços inoxidáveis martensíticos, temos: AISI 403, 410, 414, 416, 420, 431, 440A, 440B, 440C e 501. Estes são magnéticos e podem ser endurecidos por tratamento térmico de têmpera e revenido (CHIAVERINI, 1982).

A resistência a corrosão dos aços inoxidáveis martensíticos também estão intimamente ligados ao ciclo de tratamento térmico, sendo que o mesmo é sempre usado no estado temperado e revenido. A resistência a corrosão desses aços está ligada a precipitação dos carbonetos de cromo no revenimento (CANDELARIA & PENEDO, 2003).

Tratamento termico de têmpera e revenimento

O tratamento térmico de têmpera consiste em alterar a microestrutura do metal, a fim de obter propriedades mecânicas específicas como: alta dureza e aumento no limite de resistência a tração. O tratamento térmico de têmpera trata-se de um tratamento térmico para endurecimento do material. O mesmo consiste em aquecer um aço acima da temperatura de austenitização e depois causar um resfriamento brusco, para que haja a transformação da austenita na estrutura metaestável martensita (CHIAVERINI, 1982).

A martensita é uma estrutura supersaturada de carbono no ferro, sendo o produto de uma transformação sem difusão. Ela se forma através do resfriamento brusco, em que não há tempo da estrutura se estabilizar. A Austenita é CFC (Cúbica de Face Centrada) muda sua estrutura cristalina para TCC (Tetragonal de Corpo Centrado) aprisionando os carbonos de forma que não possibilite a formação da perlita e possuindo mais carbono em sua matriz do que o aço solubiliza em temperatura ambiente. Estas tensões proporcionam uma alta dureza ao material, porém o deixa com uma característica frágil (CHIAVERINI, 1982; REBECHI, 2011; ROSSINO, 2019).

Para uma estrutura 100% martensítica, alguns fatores são fundamentais, como o tempo de aquecimento, temperatura, velocidade de resfriamento e atmosfera controlada do forno. O tempo de aquecimento é determinado em relação as dimensões do material, de modo a ter um tratamento homogêneo. Já a temperatura é definida conforme o tipo de material usado e as propriedades desejadas; a atmosfera do forno, por sua vez, deve ser controlada para evitar oxidação e de modo que não haja perda de elementos químicos para a mesma (CHIAVERINI, 1982; GALLO, 2006).

O resfriamento é considerado a etapa mais importante da têmpera, porque é neste momento que há a transformação da microestrutura em martensita. Após a introdução do material tratado no meio líquido, o resfriamento ocorre em três etapas, como mostra a **Figura 3**.

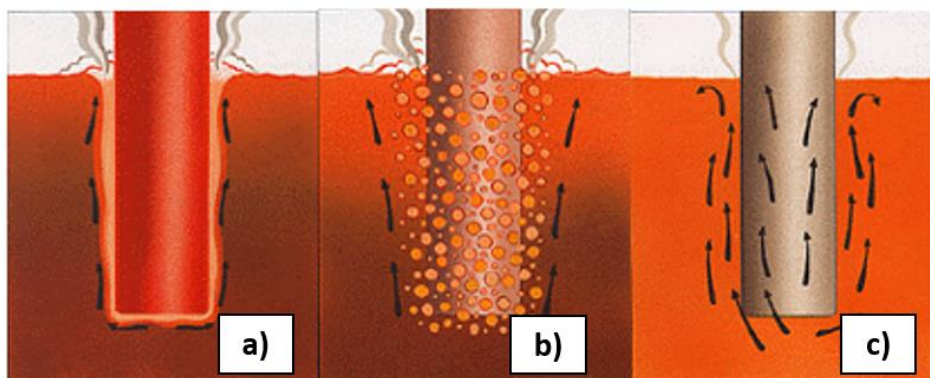


Figura 3- Mecanismo do resfriamento em que a) primeira etapa- formação de película na superfície da peça, b) segunda etapa - Formação de bolhas em forma de vapor e c) terceira etapa- troca de calor por convecção (Houghton,2003).

Na Figura 3.a) ocorre a primeira etapa, onde há a formação de uma película de vapor que envolve a peça, esta película dificulta a troca de calor do material com o meio de resfriamento, o tornando mais lento, portanto, essa película deve ser removida através da agitação, para um resfriamento mais rápido. Na segunda etapa, apresentada na Figura 3.b), após a quebra da película há a formação das bolhas de vapor, as quais se desprendem rapidamente e a troca de calor é por convecção, é nessa etapa que ocorre a maior taxa de resfriamento. Isso se dá abaixo da temperatura de difusão, aumentando assim as tensões residuais da peça responsáveis pela estrutura martensítica. Na terceira etapa, a temperatura da peça está abaixo do ponto de fusão do meio e a troca de calor é por condução e convecção, como mostra a Figura 3.c) (CARVALHO, 2004; COLPAERT, 2008).

Para escolher o meio de resfriamento deve-se considerar a taxa de resfriamento, a viscosidade do líquido e a possibilidade de formar o filme entre o meio e a peça. Para a formação de uma microestrutura com 100% de martensita, o resfriamento deve ser eficiente (PATRICÍNIO, 1999).

Como dito anteriormente, a grande quantidade de tensões gerada na martensita faz com que o material tenha característica frágil. Devido a isto, é realizado o tratamento de revenimento após a têmpera, para o alívio das tensões internas e aumento da ductilidade do material. Este tratamento consiste em aquecer o material temperado a uma temperatura subcrítica selecionada a partir de uma dureza final desejada (MARTINS, 2002).

No revenimento, diferentes temperaturas proporcionam diferentes transformações na microestrutura e nas propriedades do material. Entre 100°C e 200°C, não há modificações estruturais, porém, ocorre o início do alívio das tensões e a dureza cai levemente. De 200°C até 300°C, ocorre um maior alívio das tensões, ocasionando em uma maior perda de dureza no aço, mas ainda assim não há modificação estrutural. Entre 300°C e 360°C inicia-se a precipitação de carbonetos finos, originando a estrutura “troosita”, a dureza diminui. Na faixa de 360°C a 500° é onde ocorrem as maiores transformações na estrutura e nas propriedades do material, ocasionando em estruturas chamadas de “sorbita”. Quanto maior a temperatura, maiores se tornam as partículas que se precipitaram, diminuindo significativamente a dureza do material. Entre 500 a 600°C nos aços contendo Ti, Cr, Mo, V, Nb ou W ocorre o endurecimento secundário, devido a precipitação de carbeto deste elemento, o que aumenta a dureza quando há a presença desses elementos de liga. Entre 600°C e 700°C ocorre a recuperação e recristalização da martensita, ocorrer a esferoidização da cementita, em que a dureza cai drasticamente (CHIAVERINI, 1982, COLPAERT ,2008).

Aço inox AISI 420

No Brasil, a Associação Brasileiro de Normas Técnicas (ABNT), segue a nomenclatura da *American Iron and Steel Institute* (AISI) usada para designar os aços inoxidável. Dentro da família dos aços inoxidáveis está o AISI 420, um dos aços inoxidáveis martensíticos e um dos mais usados comercialmente (MACEDO, 2016).

Os aços inoxidáveis martensíticos AISI 420 são geralmente utilizados em moldes para injeção de plásticos em componentes mecânicos que precisam ser resistentes à corrosão e ter resistência mecânica. São comercializados no estado recozido, para facilitar a conformação do material e após a conformação é submetido a tratamento térmico para obter a dureza desejada (PINEDO, 2004).

Apresentando o teor de cromo entre 12 a 14% em peso, o AISI 420 tem a menor resistência à corrosão dos aços inoxidáveis. Seu teor de carbono é superior a 0,15%, o que é responsável pela obtenção da estrutura martensítica (MACEDO, 2016).

Para realizar o tratamento de têmpera é necessário aquecer o material até a temperatura de austenitização, entre 980°C a 1065°C, nessa faixa de temperatura ocorre a completa dissolução dos carbonetos sem que ocorra um acentuado crescimento dos grãos austeníticos fazendo com que o material tenha uma maior dureza quando resfriado (MACEDO, 2016).

Devido à dissolução completa do cromo e carbono na matriz, a supersaturação da martensita é aumentada, resultando em deformação estrutural o que dificulta a movimentação das discordâncias, aumentando a dureza do material. O aumento da dureza ocorre até a temperatura de austenitização de 1050°C, já em temperaturas acima, a dureza diminui devido ao aumento da austenita retida por ser livre de discordâncias (PINEDO, 2004).

Esse processo é ilustrado na **Figura 4**, em que se tem o aumento da dureza do material até uma austenitização 1050°C e depois a dureza diminui, comparado ao pico de dureza, mas ainda se mantém alta.

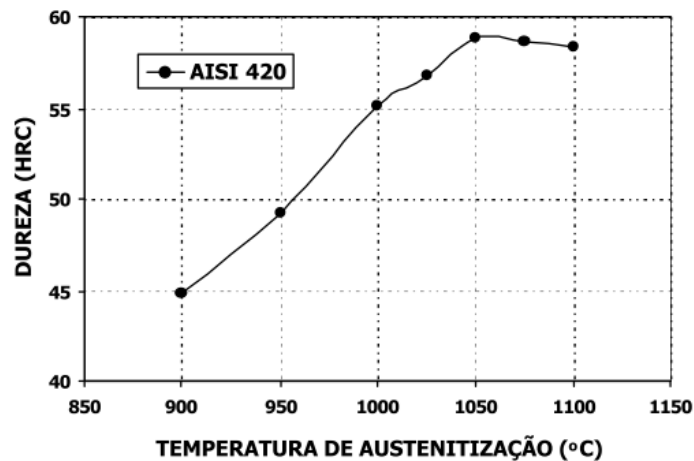


Figura 4 - Curva de têmpera para diferentes temperaturas de austenitização e suas durezas (CANDELÁRIA & PINEDO, 2003).

O revenimento deve ser feito logo em seguida da têmpera, para reduzir a tensão interna do material, aumentando a ductilidade e a tenacidade para que possa ser utilizado em serviço. Nesse tratamento, o material é reaquecido abaixo da temperatura de austenitização e então resfriado lentamente ao ar, para aliviar as tensões da estrutura martensítica e aumentar a ductilidade do material (MACEDO, 2016).

Em temperaturas de revenimento acima de 350°C, o material sofre o endurecimento secundário e a dureza do material aumenta devido à precipitação de carbonetos do tipo M_3C , conforme mostrado a **Figura 5**. Esse aumento de dureza se mantém até uma temperatura de revenimento de 500°C e após esta temperatura a dureza do material diminui devido à transformação do precipitado M_3C_7 em $M_{23}C_7$ (SANTOS et al. 2015).

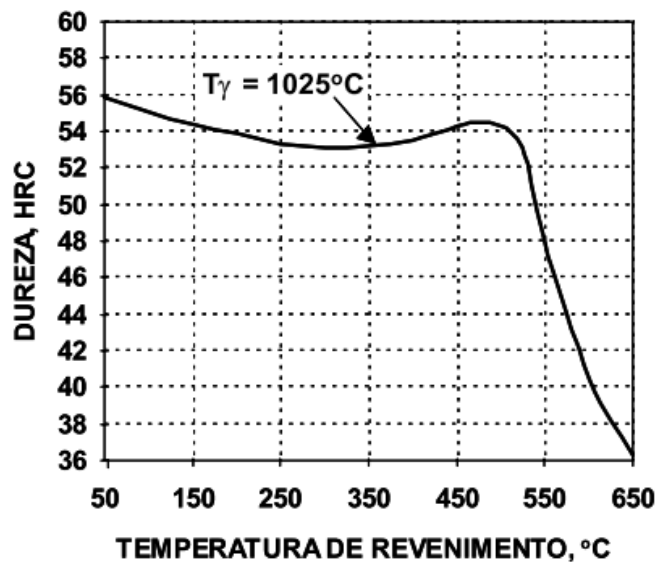


Figura 5 - Aço AISI 420, curva de revenimento (PINEDO, 2004).

No aço inoxidável martensítico AISI 420, a resistência à corrosão está diretamente relacionada com a quantidade de tensão interna do material, o tamanho do grão e a quantidade de cromo dissolvido na matriz (PINEDO, 2004).

Corrosão

Apesar da nomenclatura de inoxidável, nenhum material é totalmente resistente a corrosão. Em determinadas condições de uso e ambiente de trabalho, o aço inox pode ser suscetível à corrosão (MEI, 2010). Os materiais expostos a mecanismos químicos ou eletroquímicos sofrerão degradação irreversível e indesejável, que pode não estar relacionada a efeitos mecânicos (GENTIL, 2014).

A corrosão química ou seca ocorre quando o material está em contato direto com o agente corrosivo sem a presença de eletrólito (solução aquosa que faz o transporte dos íons) e sem corrente elétrica. Já a corrosão eletroquímica ou úmida acontece com a presença de eletrólito e com corrente elétrica (transferência de carga ou elétrons por meio do eletrólito) (GENTIL, 2014).

Para que aconteça a corrosão é necessário a formação de um mecanismo, em que diferentes potenciais entre duas ou mais superfícies ou estruturas metálicas formam os chamados pares galvânicos. Essas pilhas de corrosão levam à dissolução de metais em áreas específicas, ou seja, corrosão localizada. As partes do cátodo e do ânodo podem ser identificadas macroscopicamente e essa diferença de potencial está relacionada à heterogeneidade de materiais, estruturas ou ambientes corrosivos (GEMELI, 2014).

Diferenças nos contornos de grão, que funcionam como estas pilhas, geralmente se devem à presença de precipitados e diferentes fases da solução sólida inicial, podendo ser um local propício a corrosão no interior do material (GENTIL, 2014)

Isso acontece nos aços inoxidáveis quando o cromo que se precipita no contorno do grão se combina com o carbono para formar o carbeto de cromo $Cr_{23}C_6$, ou se combina com o ferro $(Cr, Fe)_{23}C_6$. Nesta área, o teor de cromo é reduzido, prejudicando a passivação e formando um par galvânico, onde o grão é o cátodo e o contorno do grão é o ânodo, ocasionando a corrosão (GENTIL, 2014).

O ensaio de névoa salina (Salt Spray) é uma simulação que replica a influência da atmosfera do oceano (maresia) em diferentes metais com ou sem camada protetora. O teste de névoa salina tem sido amplamente aceito como uma ferramenta para avaliar a espessura e uniformidade e porosidade de revestimentos metálicos ou não metálicos, sendo amplamente utilizado para avaliar a resistência à corrosão por pites. O teste de névoa salina pode ser usado para filtrar materiais revestidos, pode revelar pontos da superfície do material onde a camada particularmente é mais fina ou comparar diferentes lotes do mesmo produto. No teste de névoa salina, a névoa é produzida com ar comprimido e uma solução de (NaCl) cloreto de sódio aquoso. As gotas são pulverizadas e caem na amostra por gravidade. A suspensão em si não é corrosiva devido ao seu pH ser próximo a 7 (neutro), mas a solução é um eletrólito forte que conduz eletricidade entre os diferentes potenciais do metal (BASS EQUIPAMENTOS LTDA, MANUAL OPERACIONAL, 1998/2003).

O pH ou potencial de Hidrogênio é uma escala que mede a acidez ou alcalinidade de uma substância que pode variar de 0 a 14 na escala de pH sendo o 7 o neutro da escala. Quanto mais baixo for o pH na escala a substância é considerada ácida, ou seja, maior será a concentração de íons H^+ e menor a concentração dos íons OH^- . E quanto maior for o pH na escala a substância é considerada alcalina, ou seja, menor será a concentração de íons H^+ e maior a concentração dos íons OH^- . Íons são espécie química carregadas eletricamente que apresentam número de prótons e elétrons diferentes (SARDELA E MATEUS, 1996).

Os eletrólitos possuem uma propriedade físico química importante das soluções, essa propriedade possui a capacidade de conduzir corrente elétrica, devido ao movimento dos íons dentro da solução (BIANCHI, ALBRECHT E DAL TAMIR, 2005).

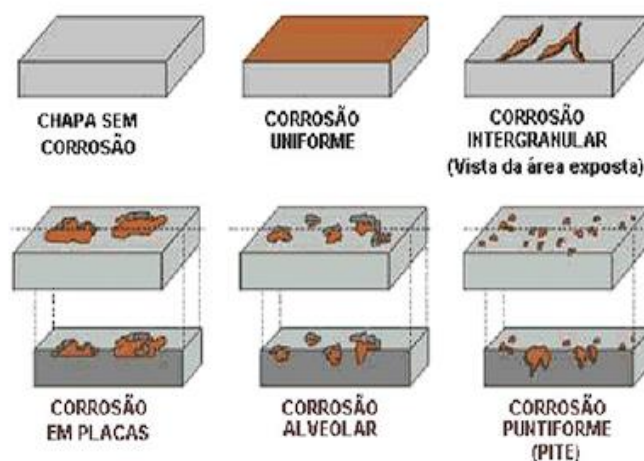


Figura 6-Alguns tipos de corrosão (Amaral.R.S.,2011)

Material

Para a execução desse trabalho foi necessário em primeiro momento a caracterização do material, para isso foi submetido a análise de composição química em espectrômetro de emissão ótica por centelha da marca Spectro Maxx.

Foi submetida o material a cinco análises de composição química ao longo do comprimento da barra e tomando a média dessas queimas como resultado.

Após o ensaio de composição química e já caracterizado como aço inoxidável AISI 420, a barra do material foi cortada em equipamento de serra circular com refrigeração.

As amostras cortadas ficaram conforme a **Figura 7** com dimensões aproximadas de 27 x 22 x 10mm.



Figura 7- Amostras cortadas da barra de Aço Inox AISI 420

Após serem cortadas todas as faces das amostras foram lixadas em lixadeira de bancada com a gramatura da lixa #50 para a realização da medição da dureza do material.

Dureza

O material é fornecido no estado recozido e para caracterizar esse estado, após o lixamento foi realizado o ensaio de dureza Rockwell em durômetro conforme **Figura 8** em escala Rockwell B com penetrador esférico de 1/16" pré-carga de 10kgf e com carga de 100kgf. Para o tratamento de austenitização e resultados do revenimento a dureza foi realizada em escala Rockwell C, com penetrador cônico de ponta de diamante com pré-carga de 10kgf e carga de 150kgf. Em cada amostra foram feitas 15 impressões divididas entre as duas maiores faces das amostras.



Figura 8- Durômetro marca Mitutoyo HR-400

Metalografia

As amostras foram cortadas em suas seções transversais e embutidas com baquelite. Após o embutimento as amostras foram preparadas de acordo com a norma ASTM E3-2015. Foram utilizadas lixas de granulometria #100, #200, #320, #400, #600 e #1200 e a cada troca de lixa a amostra foi virada a 90° no sentido horário. E depois do lixamento as amostras foram polidas com solução em suspensão de óxido de alumina de granulometria de 1µm e 0,5µm.

Para a análise da microestrutura, a amostra foi primeiramente atacada quimicamente com o reagente Vilella de composição química de (5mL HCl + 2g. Ácido Pírico + 100mL de Álcool Etilico) e depois foi analisado a microestrutura

através de um microscópio da marca Olympus modelo CX31 com câmera modelo Evolution LC Color e software de captura Image-Pro Plus 6.2 com lente de aumento de 100x, apresentado na **Figura 9**.



Figura 9 - Microscópio óptico Olympus modelo CX31

Tratamento térmico

Para determinar o tempo de tratamento térmico de austenitização de cada amostra foi utilizada a Equação 1. Foram acrescidos 5 minutos no tempo resultante da equação, chamado de tempo de encharque, para que a temperatura externa seja a mesma do núcleo da amostra.

$$Tempo = \frac{1h}{1"} = \frac{\#(h)}{2} = \frac{\frac{dimensão (mm)}{25,4}}{2} \times 60min \quad (eq. 1)$$

As temperaturas de austenitização foram as de 950°C, 1000°C e 1050°C, com um tempo de duração dentro da mufla de 35 minutos para cada amostra. Essas três amostras não foram submetidas a tratamento térmico de revenimento. Como o resultado de dureza dessas três amostras foi definido a melhor temperatura de austenitização para obter a maior dureza com ajuda do software Origin, por meio de equação matemática.

Foi realizado o tratamento de têmpera na temperatura de austenitização de 1000°C com óleo de têmpera pré-aquecido em 80°C para o resfriamento das amostras. Após o tratamento térmico de têmpera foi realizado o revenimento em quatorze amostras, sendo separada um par de amostra para cada temperatura de revenimento, foi usada as temperaturas de 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C e 600°C para o revenimento, onde uma amostra do par foi para o ensaio de dureza e microestrutura e outra para ensaio de Salt Spray.

Salt Spray (Névoas Salinas)

O ensaio de nevoa salina foi realizado em uma temperatura de 35°C ± 2°C e concentração de 5% de solução de cloreto de sódio (NaCl) com o pH entre 6,50 e 7,20. O Ensaio de Salt Spray está em conformidade com as normas ABNT NBR8094 e a DIN 50.021. O tempo de duração do ensaio de Salt spray foi de 92h e a cada 24h foram retiradas fotos de cada amostra de corpo de prova.

Também foram coletadas amostras da solução salina recolhida em proveta, para que fossem realizadas as medições de pH, e de volume que deve ser entre 1 e 2mL. As regiões em que não havia necessidade de estar em contato com a névoa salina foram pintadas com tinta epóxi, para não serem influenciadas pelo ensaio, deixando assim, uma das faces maiores exposta a névoa.

Após as 92h de ensaio as amostras foram limpas com líquido fosfatizante Ferrox, com o intuito de neutralizar a ferrugem do material.

Com a superfície corroída removida as amostras foram lavadas e secas. Para avaliar a superfície que sofreu a corrosão pela nevoa salina foi usado um Microscópio Eletrônico Digital USB com zoom de 1000x e software de captura de imagem.

Resultados e Discussão

O resultado da composição química do material é apresentado na **Tabela 1**, juntamente com o valor nominal da liga, Ni, Mo e V, são elementos adicionais permitidos na liga.

AISI420	C	SI	Mn	Cr	P	S	Ni	Mo
Nominal	0,15 máx.	1,0 máx.	1,0 máx.	12-14	0,04 máx.	0,03 máx.	-	-
Espectrômetro	0,38	0,26	0,42	13,06	0,03	0,01	0,50	0,05

Tabela 1- Composição química, em% em peso, do aço inoxidável martensítico AISI420, conforme norma ASTM A273-13.

A caracterização da estrutura recozida do material está apresentada na **Figura 10**, em que se observa a presença de ferrita, fase branca, e os pontos escuros são os precipitados, possivelmente carbonetos ricos em cromo ($M_{23}C_6$). Caracterizando o material nesse estado, igualmente apresentado por Macedo (2016).

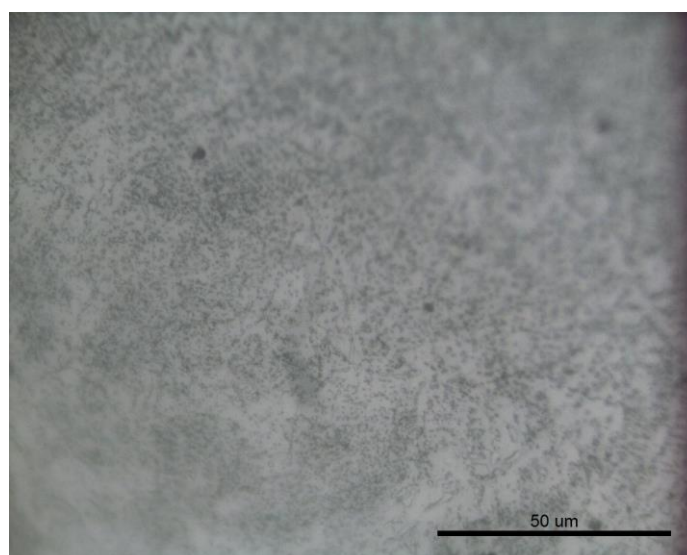


Figura 10 – Metalografia do aço AISI 420 no estado recozido com aumento de 1000x.

Os resultados de dureza do material recozido estão apresentados na **Tabela 2**, em que é possível observar uma média de dureza de $91,2 \pm 1,2$ HRB.

MB	Nº de impressões	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Média	Desvio Padrão
	Dureza HRB	89,3	92,3	91,2	92,8	89,6	90,1	92,7	92,4	92,1	92,0	91,0	89,3	90,6	91,1	90,8	91,2	1,20823

Tabela 2- Resultado das durezas do aço AISI 420 no estado recozido

Em seguida, foi realizado o tratamento térmico de têmpera, utilizando fornos tipo mufla com medidor de temperatura acoplado, nas temperaturas de 950°C, 1000°C e 1050°C.

Logo após ao tratamento de têmpera as três amostras foram submetidas a análise de dureza em escala HRC. A **Figura 11** apresenta o gráfico de dureza em função da temperatura de austenitização, em que foi realizado o a regressão linear em uma equação de segundo grau para definir a melhor temperatura, ou seja, a temperatura em que é alcançada a maior dureza.

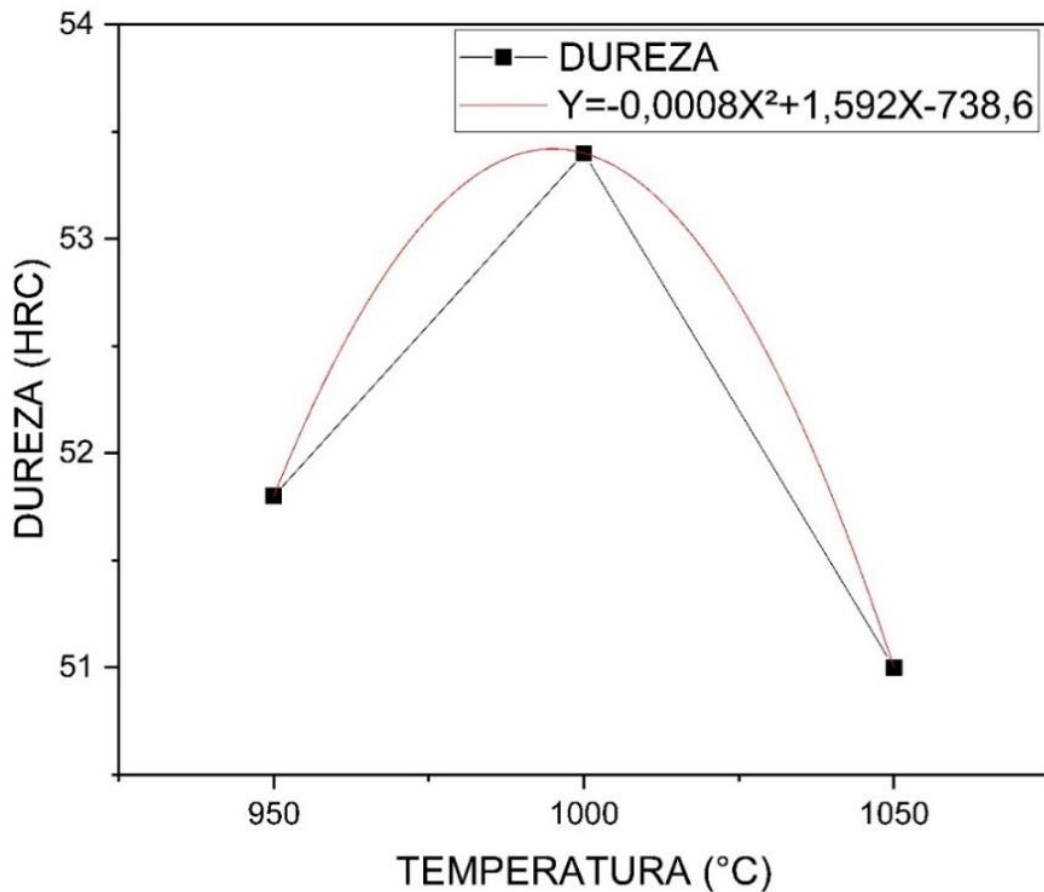


Figura 11 - Gráfico de dureza em função da temperatura de austenitização

Transformando a equação com variáveis diferentes para um melhor entendimento temos a Equação 2.

$$HRC = -738,6 + 1,592T_{\gamma} - 0,0008T_{\gamma}^2 \quad (\text{eq. 2})$$

A equação 2 foi derivada em função da temperatura e igualada a zero conforme equação 3 para que fosse possível determinar a temperatura ideal para obtenção da maior dureza possível.

$$\frac{\partial HRC}{\partial T_{\gamma}} = 0 \quad (\text{eq. 3})$$

Substituindo a Equação 2 na Equação 3 temos:

$$\begin{aligned} 0 &= 1,592 - 0,0016T_{\gamma} \\ T_{\gamma} &= 995^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (\text{eq. 4})$$

Portanto, de acordo com a Equação 4, a temperatura ideal para se obter a maior dureza do aço AISI 420 é de 995°C. Substituindo este valor na Equação 2 nós temos que a dureza máxima será de 53,42 HRC na temperatura de 995°C de acordo com as equações obtidas através do gráfico de dureza em função da temperatura.

$$\begin{aligned} HRC &= -738,6 + 1,592(995) - 0,0008(995)^2 \\ HRC &= 53,4 \end{aligned} \quad (\text{eq. 5})$$

A **Figura 12** apresenta os resultados de metalografia das amostras temperadas a 950, 1000 e 1050°C, é possível observar a formação da estrutura de martensita em todas as amostras, caracterizada pelas “agulhas” devido a distorção do retículo cristalino gerando tensões internas. Juntamente com o resultado de dureza, é possível observar que até 1000°C o aumento da temperatura de austenitização é proporcional ao aumento de dureza do material. Segundo Pinedo (2004), isso

se deve ao aumento da dissolução do carboneto de cromo, o que aumenta o teor de cromo e principalmente o teor de carbono na matriz, aumentando a dureza do material, a 1050°C a austenita retida está presente em grande quantidade, reduzindo a dureza do material.

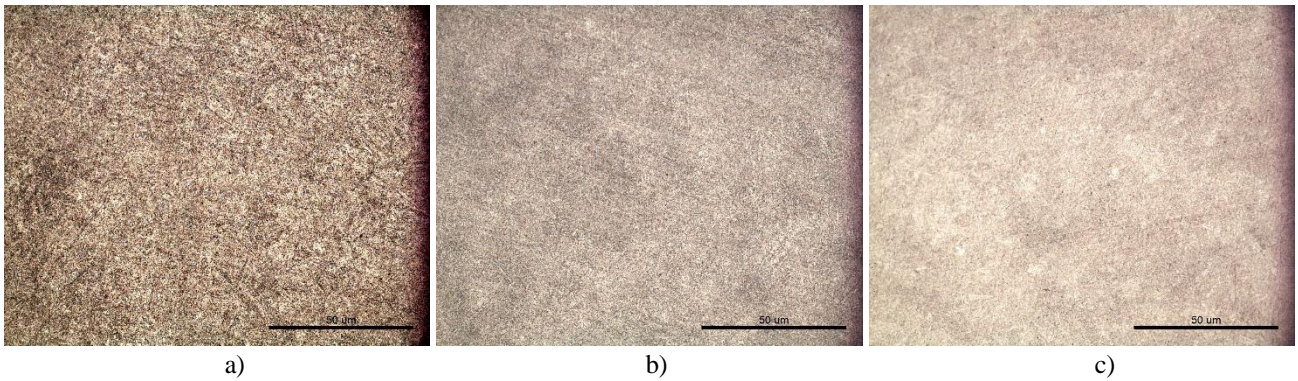


Figura 12 – Metalografia das amostras austenitizadas a a) 950°C, b) 1000°C e c) 1050°C, temperadas com ampliação de 100x

Após a resolução da equação para determinar a melhor temperatura de austenitização para a realização da têmpera e obter a maior dureza, foram realizados novos tratamento de têmpera com austenitização a 1000°C em mais sete amostras e revenimento nas temperaturas de 300, 350, 400, 450, 500, 550, e 600°C por 40 minutos. A **Figura 13** apresenta os resultados de dureza em função da temperatura de revenimento.

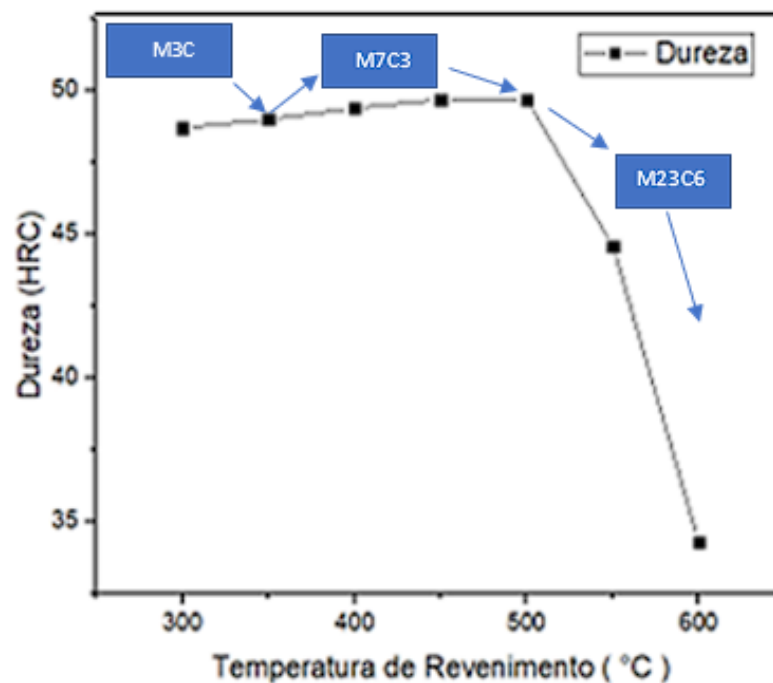
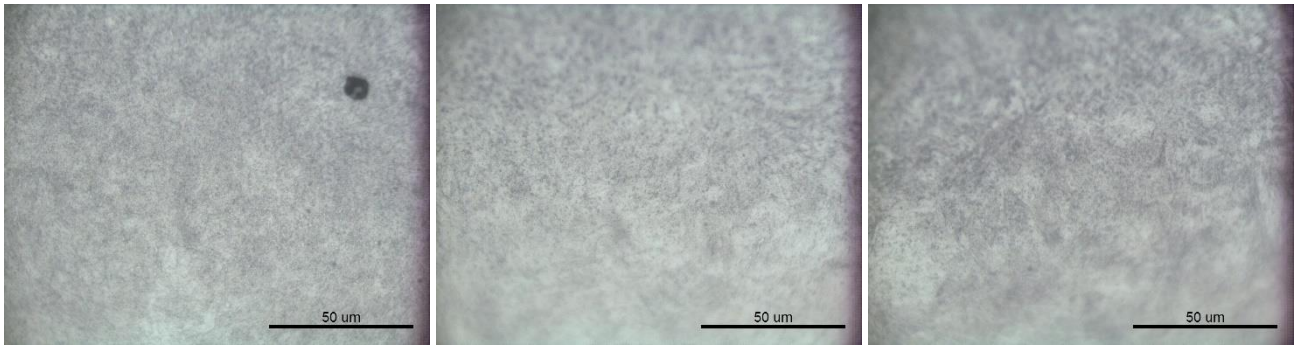


Figura 13- Gráfico de dureza do Aço AISI420 em função de diferentes temperaturas de revenimento

Pode-se observar que a dureza aumenta com o aumento da temperatura de revenimento até 500°C, devido a precipitação de carbonetos finos(M₃C) em carbonetos (M₇C₃) na matriz martensítica, conforme Pinedo a diminuição após 500°C, ocorre devido a transformação do carboneto (M₇C₃) em carbonetos (M₂₃C₆) e ao coalescência que ocorre acima desta temperatura.

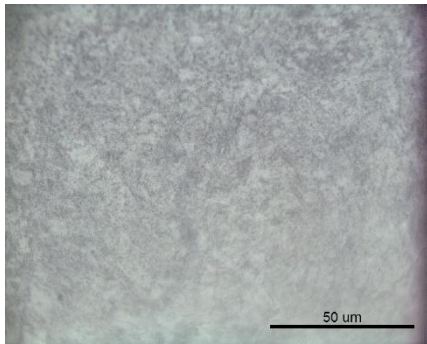
A **Figura 14** mostra as microestruturas após o tratamento térmico de revenimento, onde foi observado um leve aumento no tamanho dos precipitados formados. Em todos eles, a microestrutura característica da martensita revenida pode ser verificada.



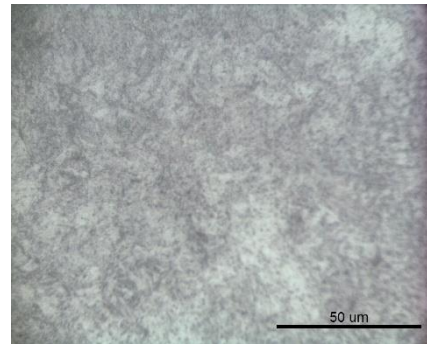
a)

b)

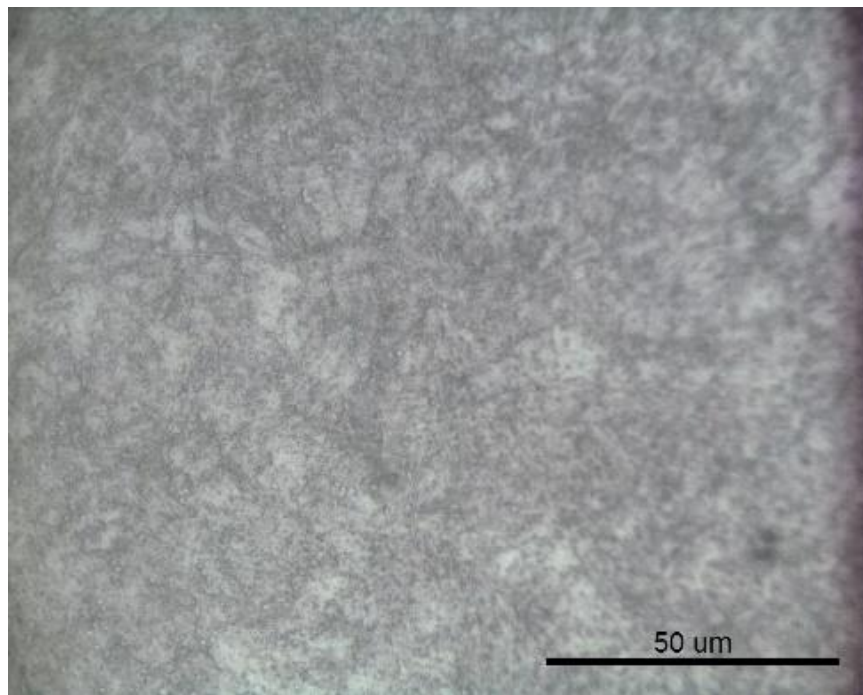
c)



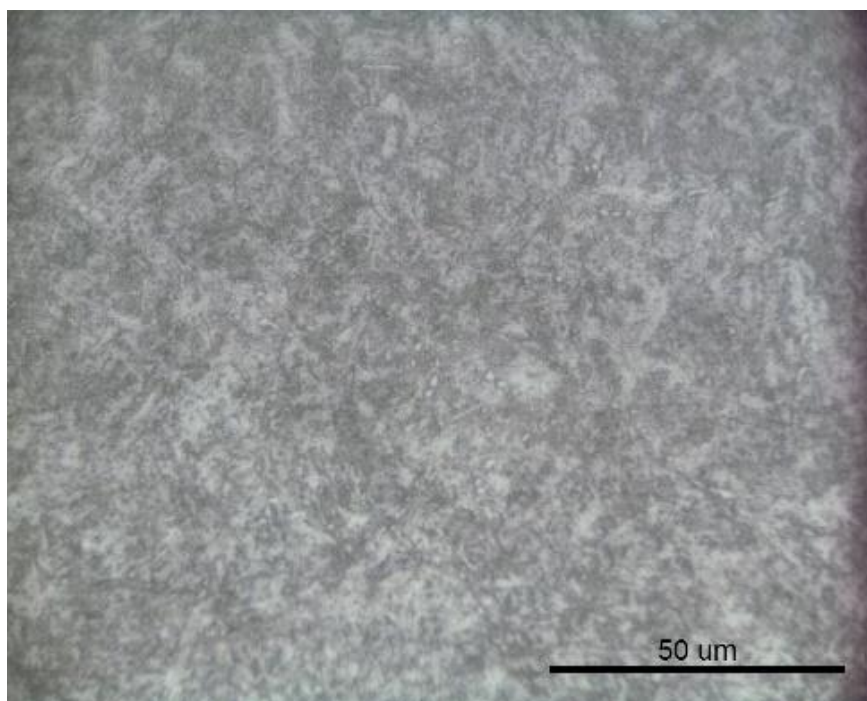
d)



e)



f)



g)

Figura 14 – Metalografia das amostras de AISI 420 temperadas e revenidas a a)300°C, b) 350°C, c) 400°C, d) 450°C, e) 500°C, f) 550°C e g) 600°C ampliadas em 1000x

A 550 e 600°C, devido à presença de maior proporção de ferrita, pode-se observar um aumento no tamanho e número de precipitados coalescidos.

Após o tratamento térmico de têmpera e revenimento as amostras foram ensaiadas no Salt Spray.

A **Tabela 3**, mostra o resultado das amostras revenidas a 300, 350, 400, 450, 500, 550 e 600°C no período de 24, 48, 72 e 96 horas no Salt spray, os pontos de corrosão podem ser observados macroscopicamente, e esses pontos de corrosão aumentam à medida que a temperatura de revenimento aumenta e o tempo de exposição ao ensaio. Isto ocorre devido à precipitação de carboneto de cromo, e a resistência à corrosão diminui no endurecimento secundário.

Tabela 3 – Análise macroscópica das amostras revenidas a diferentes temperaturas após ensaio de névoa salina

Temperatura de Revenimento (°C)	Tempo de ensaio (h)			
	24h	48h	72h	96h
300	24HORAS 	48 HORAS 	72 HORAS 	96 HORAS
350	24HORAS 	48 HORAS 	72 HORAS 	96 HORAS
400	24HORAS 	48 HORAS 	72 HORAS 	96 HORAS



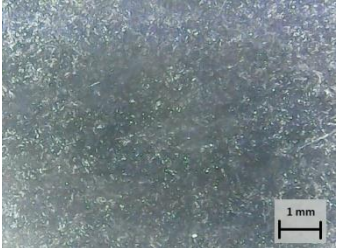
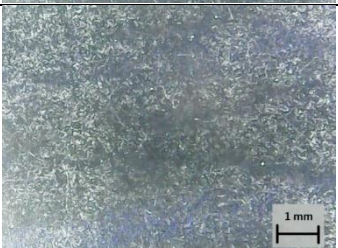



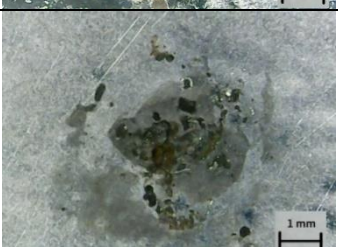
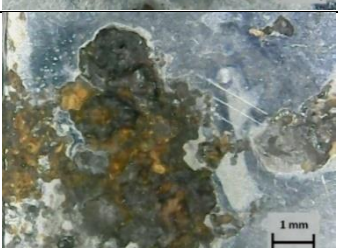
As amostras de 300 e 350°C apresenta pequenas manchas, principalmente nas bordas do material, a amostra de 400°C tem início aos pontos ou sítios de corrosão, isso ocorre pela precipitação dos carbonetos finos (M_3C) em carbonetos (M_7C_3) que migram para o contorno do grão o que reduz a porcentagem de Cromo na matriz e evitando a formação do filme de passivação que protegem a peça.

Se compararmos as imagens das amostras revenidas a 500 e 550°C, observamos que a amostra que foi revenida a 550°C, possui menos sítios de corrosão em relação a amostra revenida a 500°C, isto pode ser explicado pois a 500°C há o pico de endurecimento secundário da amostra onde ainda sofre influência da precipitação dos carbonetos (M_7C_3). Porém, com o aumento da temperatura de revenimento para 550°C, outros tipos de carbonetos podem se formar, de acordo com os elementos de liga do material, neste caso os elementos Ti, Mo, V, Nb ou W. Estes carbonetos podem ser classificados como carbonetos $M_{23}C_6$ e reduzem a dureza do material devido ao coalescimento dos mesmos. Esta formação dos carbonetos secundários possibilita que a matriz fique rica em cromo, possibilitando a formação da camada passiva resistente à corrosão, uma vez que o carbono está reagindo com outros elementos mais reativos do que o cromo (como por exemplo o molibdênio) e o mesmo fica livre na matriz para a produção do filme passivo. Já em 600°C, todo o molibdênio já reagiu com o carbono disponível, portanto, há novamente a formação de carbonetos de cromo, dificultando a formação da camada passiva de óxido de cromo. Isto proporciona o resultado observado nas amostras revenidas a 600°C, em que a corrosão retorna em grandes quantidades de sítios de corrosão (PINEDO, 2004; CHIAVERINI, 1982; COLPAERT, 2008).

Conforme a norma ASTM B117-2009, a condição ideal para o aço inoxidável é resistir 24 horas nestas condições de teste, o que não é o caso dos aços inoxidáveis martensíticos AISI 420. A aplicação destes materiais requer que sejam resistentes à corrosão, mas que tenham boa resistência mecânica, porém esse material não é indicado para ambientes com alto grau de corrosão.

Após retirar a amostra da névoa salina e limpá-la com Ferrox, verificou-se que quanto maior a temperatura de revenimento da amostra, maior a intensidade dos sítios de nucleação da corrosão. Como visto no trabalho de Pinedo (2004), um aumento na temperatura de revenimento produz mais carbonetos de cromo. Esses carbonetos de cromo formam um par galvânico com a base, auxiliando na abertura de sítios de corrosão localizada, como mostra a **Tabela 4**.

Tabela 4 – Micrografia das amostras limpas com Ferrox após o ensaio de névoa salina

Temperatura de Revenimento (°C)	Superfícies de corrosão
300	
350	
400	
450	
500	
550	
600	

Conclusão

Conclui-se que o aço inox AISI 420 é um aço com moderada resistência a corrosão e alta dureza, porém, diferentes temperaturas de austenitização para tempera e revenimento podem alterar o desempenho nestes aspectos. Diferentes temperaturas de austenitização podem proporcionar diferentes durezas ao material, o que foi concluído que para este material a melhor temperatura de austenitização para a tempera foi a de 995°C. A dureza também é influenciada pelas temperaturas de revenimento. Temperaturas acima de 450°C apresenta um pico de endurecimento secundário na faixa em torno de 500°C e uma redução na dureza em temperaturas acima do pico. Outro ponto importante é que a temperatura de revenimento tem um fator fundamental para a resistência a corrosão, em que quanto maior a temperatura de revenimento, maior a quantidade de pites ou sítios de corrosão que terá no material, devido ao fato do elemento cromo presente na matriz do aço migrar para os contornos de grão, diminuindo assim a resistência a corrosão do material, salvo quando na composição química possuir elemento químico mais reativo ao carbono em relação ao cromo. Para situações mais extremas, o aço inox martensítico AISI 420 não se mostrou o ideal, apresentando uma grande área corroída. Portanto, é possível concluir que o aço AISI 420 possui alta dureza e moderada resistência a corrosão se submetido a tratamentos térmicos ideais para sua utilização.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pela oportunidade de cursar a Fatec Sorocaba.

A minha família, principalmente a esposa pelo incentivo e pela paciência e compreensão das ausências devido aos estudos.

Aos meus amigos: Miguel Rubira Danelon e Crislaine Pereira da Rocha que sempre que precisei me ajudaram

Ao meu orientador Professor Mestre Marcos Dorigão Manfrinato pela paciência, compreensão e pela ajuda para a finalização deste trabalho.

A Fupresa S/A na pessoa do Coordenador Industrial Júlio Cesar Munhoz e o encarregado Ademilson José do Couto por permitir a realização da parte prática do trabalho nas dependências da empresa.

E a todos que diretamente ou indiretamente me ajudaram.

Referências

AMARAL, R.S. **Análise de Segurança de Dutos com Defeitos de Corrosão**, Dissertação de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto-MG,2011

BASS EQUIPAMENTOS LTDA, **Manual Operacional Salt Spray**, 1998/2003

BIANCHI, ALBRECHT, DAL TAMIR. **Universo da Química. Volume único** 1ed., São Paulo, FTD, 2005.

CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G.. **Ciências e Engenharia de Materiais**. 9 ed., Rio de Janeiro, LTC,2016.

CANDELARIA, A. F.; PINEDO C. E.. **Influência Dos Parâmetros De Tratamento Térmico Sobre a Resistência À Corrosão Do Aço Inoxidável Martensítico AISI 420**, CE Revista de Ciência dos Materiais, Cartas, v.22, n.16, p. 1151-1153,2003.

CARVALHO A.R.T. **Estudo da influência da agitação e da Severidade de Têmpera do meio de resfriamento na determinação de velocidades críticas de têmpera**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia mecânica. Universidade Estadual de Campinas. São Luis-MA,2004.

COLPAERT H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4.ed.. São Paulo: Blucher,2008.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 5.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais- ABM; 1982.

GALLO G.B. **Influência do tratamento sobre a tenacidade de um aço AISI SAE 1045 com médio teor de carbono, avaliada por ensaio de impacto**. Dissertação de Mestrado. UNESP Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Guaratinguetá- SP,2006.

GEMELLI, E. **Corrosão de Materiais Metálicos e Sua Caracterização**.1. ed. 2. Reimpr., Rio de Janeiro, LTC, 2014.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC; 2014.

GOMES, B.C.; FERREIRA, R.A.; BACALTCHUK, C.M.B.. **Estudo da Caracterização Metalográfica, da Corrosão e Dureza dos Aços Inoxidáveis CF8M , AISI 316L e AISI 420 Utilizados em Válvulas de Segurança na Indústria Offshore Brasileira**. 2015. Projeto Final de Bacharel em Engenharia Mecânica -Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro.

LEITE, A.O.S.,**Desenvolvimento e estudo de tintas epóxis anticorrosivas ecologicamente corretas**. 2004. 167f. Tese (Doutorado em Química Inorgânica) – Pós Graduação em Química Inorgânica - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

MACEDO, M.M.. **Influência do tratamento térmico de revenimento na tenacidade à fratura dinâmica e na tenacidade a fratura assistida pelo ambiente de um aço inoxidável martensítico AISI 420**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MARTINS, M. **Temperabilidade joiminy e influência do revenido sobre a dureza-um estudo em aços estruturais nacionais**. Dissertação (mestrado)-Universidade Estadual de Santa Catarina, Florianópolis,2002.

MEI P.R. **Aços e ligas especiais**. 3.ed. São Paulo: Blucher; 2010.

NEXA RESOURCES S.A. **Relatório anual de 2020**, Informação retirada do site da empresa <https://www.nexareport.com/2020/> >acessado em 17 de abril de 2021.

PATROCÍNIO A.B. **Determinação de velocidades críticas de têmpera em aços por meio de curvas de resfriamento. Dissertação de Mestrado**. Ciência e engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo. São Carlos-SP,1999.

PINEDO, C.E. Tratamento térmico e superficial do aço inoxidável martensítico AISI 420 destinado a moldes para injeção de polímeros Parte I – tratamento térmico1, **2º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes - ABM, 21 a 23 de setembro, São Paulo/SP; 2004**.

PINEDO, C.E. **Tratamento térmico e superficial do aço inoxidável martensítico AISI 420 destinado a moldes para injeção de polímeros Parte II** - tratamento térmico. 2º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes - ABM, 21 a 23 de setembro, São Paulo/SP; 2004.

REBECHI J.G. **Correlação numérica entre a taxa de resfriamento, microestruturas e propriedades mecânicas para o tratamento térmico do Aço AISI/SAE 4140. Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2011

ROSSINO L.S. **Aços ao Carbono e Ferros Fundido**. 2019 Power Point material de estudo da aula da matéria de metalografia da FATEC Sorocaba.

SANTOS, W.C. et. Al. **Desenvolvimento de dispositivo e estudo do comportamento ao microdesgaste abrasivo do aço AISI 420 temperado e revenido**.Revista Matéria, Rio de Janeiro, v.20, n.2, p.304-315, Abr./ June. 2015.

SARDELA e MATEUS. **Curso de Químico - Físico Química Vol.2**. 16º ed., Editora Ética, 1996.

WALTER, **Processo de Passivação**, acessado em junho de 2021. https://www.walter.com/pt_BR/surfox/processo-de-passivacao