

## Aplicação de soluções poliméricas na têmpera do aço inoxidável 17 4 PH solubilizado

### Application of polymer solutions in the quenching of solubilized 17 4 PH stainless steel

Ricardo Vieira Gonçalves<sup>1</sup> , Jorge Luis Braz Medeiros<sup>1</sup> , Luciano Volcanoglo Biehl<sup>1</sup> ,  
José de Souza<sup>1</sup> , Carlos Octávio Damas Martins<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Av. Itália, Km 8, s/n, 96203-900, Campus Carreiros, Rio Grande, RS, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Sergipe, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Av. Marechal Rondon, s/n, 49100-000, São Cristóvão, SE, Brasil.

e-mail: jorge.braz@furg.br

#### RESUMO

A têmpera em soluções poliméricas representa um avanço significativo nos tratamentos térmicos de diferentes classes de aços. A sua aplicação na solubilização de aços inoxidáveis endurecido por precipitação 17 4 PH, potencializa uma nova alternativa aos meios convencionais de resfriamento em água ou óleo. As soluções poliméricas geram nas superfícies dos aços um filme de elevada tensão superficial que elimina a formação da fase vapor gerando aumento na velocidade das etapas de ebulição e convecção. Desta forma, os intermetálicos originados apresentam maior homogeneidade para o posterior envelhecimento artificial. Neste estudo foram analisados os efeitos no comportamento dos aços inoxidáveis 17 4 PH solubilizados com resfriamento em água e soluções poliméricas de 10 e 25% polivinilpirrolidona (PVP). Posteriormente as amostras receberam envelhecimento artificial na temperatura de 480°C. Verificou-se o comportamento microestrutural, distribuição de microdurezas e características relacionadas à difração de raios X (DRX). Os resultados demonstraram que a utilização solução polimérica de 10% contribuiu para a completa transformação martensítica na matriz, com valores maiores de microdureza, junto à superfície e distribuição homogênea de precipitados no processo de envelhecimento artificial. Conclui-se que a utilização de soluções poliméricas nos tratamentos térmicos de solubilização dos aços inoxidáveis 17 4 PH pode contribuir para melhora das suas propriedades metalúrgicas e mecânicas.

**Palavras-chave:** Aços inoxidáveis 17-4 PH; Têmpera intensiva; Soluções poliméricas.

#### ABSTRACT

The quenching in polymeric solutions represents a significant advance in the heat treatments of different classes of steels. Its application in the cooling, after the solubilization of stainless steels hardened by precipitation 17 4 PH, potentiates a new alternative to the conventional means of cooling in water or oil. The polymeric solutions form a film of high surface tension on the steel surfaces that eliminates the formation of the vapor phase, generating an increase in the kinetics of the boiling and convection stages. In this way, the generated intermetallics present greater homogeneity for subsequent artificial aging. In this study, the effects of quenching in water and in polymeric solutions of 10 and 25% in polyvinylpyrrolidone (PVP) on the metallurgical and mechanical properties of 17 4 PH stainless steels were analyzed. Subsequently, the samples were submitted to the heat treatment of artificial aging at a temperature of 480°C. The microstructural behavior, microhardness distribution and characteristics related to X ray diffraction (XRD) of the samples were analyzed. The results showed that the use of a 10% PVP polymer solution caused a complete martensitic transformation in the matrix, with higher microhardness values near the surface and homogeneous distribution of precipitates in the artificial aging process. It is concluded that the use of polymeric solutions in the tempering of 17 4 PH stainless steel can contribute to significant advances in their metallurgical and mechanical properties.

**Keywords:** Stainless steel 17-4 PH; Intensive quenching; polymeric solutions.

## 1. INTRODUÇÃO

A homogeneidade microestrutural dos aços inoxidáveis endurecidos por precipitação representa fator de elevada relevância na área de fabricação mecânica. O não atendimento deste requisito pode contribuir de forma decisiva para redução da resistência mecânica e da vida em fadiga dos componentes produzidos [1].

A realização de pesquisas que possam desenvolver novas rotas de tratamentos térmicos para a obtenção de microestrutura da matriz totalmente martensítica com intermetálicos nos aços 17 4 PH é justificado devido às potenciais melhorias nas propriedades mecânicas superficiais e do substrato desta classe de aço.

A têmpera é um tratamento térmico que objetiva o aumento da resistência mecânica dos materiais a partir da transformação microestrutural originada na distorção do reticulado cristalino [2]. Os mecanismos para a obtenção da martensita consistem no efeito adifusional e instantâneo do processo de têmpera devido à elevada velocidade de resfriamento [2, 3]. Na aplicação do tratamento de têmpera é determinante que as peças sejam austenitizadas e posteriormente imersas em fluidos de arrefecimento [2, 3]. No momento da interação do material com o fluido, o ciclo de resfriamento se desenvolve em três estágios consecutivos, identificados como filme de vapor, ebulição e convecção [3].

No primeiro estágio clamado de filme de vapor, existe a formação de uma cápsula de elevada tensão superficial ao redor dos materiais. Nesta condição, existe inibição da transferência de calor por ebulição e convecção, reduzindo a severidade do resfriamento. A ruptura do filme de vapor ocorre a partir da região inferior das peças originando variações na microestrutura e microdureza [2].

A transformação martensítica apresenta aumento do volume da rede cristalina em valores de 2 a 4%, originando tensões residuais que podem ter efeitos de expansão ou compressão. Esta condição é intensificada pelo fato da ruptura do filme vapor ocorrer de forma heterogênea potencializando as tensões residuais, deformações e trincamentos [3].

A utilização de soluções poliméricas, dissolvidas em água, é uma alternativa tecnológica com inúmeras vantagens, quando comparada aos meios convencionais de resfriamento. Entre as vantagens podem ser destacados a não inflamabilidade, biodegradabilidade, baixa toxicidade e diversidade de severidade de resfriamento [3,4]. Já no processo de têmpera a eliminação da fase vapor e aumentando a profundidade da transformação martensítica é uma evolução pela possibilidade de obtenção de maior homogeneidade microestrutural e de tensões residuais com caráter compressivas junto a superfície [4, 5, 6]. A variação das concentrações das soluções poliméricas contribuem para a flexibilização da severidade de têmpera podem ser aplicados em aços de reduzida e elevada temperabilidade. Esta condição é obtida a partir do aumento da viscosidade das soluções com maior concentração e conseqüentemente diminuição da severidade de têmpera. Já em menores concentrações a ebulição ocorre mais rapidamente aumentando a capacidade da transformação martensítica [2, 3].

O polímero de elevada solubilidade em água polivinilpirolidona (PVP) tem se destacado como meio de resfriamento. Comparado com outros polímeros como polialquilenoglicol (PAG) o polivinilpirolidona (PVP) apresenta maior cinética na dissolução do filme que envolve nas peças. A facilidade de ruptura do filme contribui para a maior severidade do PVP. Segundo Vieira *et al.* [2] o aumento da concentração de polímeros PVP eleva a viscosidade cinemática do fluido diminuído a severidade de têmpera. Koudil, Z. *et al.* [4] avaliou a viscosidade cinemática de soluções poliméricas a base de PVP, na qual as concentrações de 5, 10, 15 e 20% apresentaram, respectivamente, índices aproximados de 2, 6, 11, e 20 cSt.

Um importante grupo de materiais que surgiram para atender as necessidades das indústrias aeronáutica, aeroespacial, nuclear, química e naval, são os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação [7]. Eles são caracterizados por apresentarem propriedades mecânicas elevadas e resistência à corrosão juntamente com uma ductilidade que possibilita a fabricação de componentes pelos processos de conformação mecânica, usinagem, metalurgia do pó e soldagem [8, 9]. No desenvolvimento desses aços, a partir dos inoxidáveis austeníticos, as principais modificações foram à redução do teor de níquel e a adição de cobre para promover a formação de precipitados. O tratamento térmico de solubilização envolve a austenitização do material de modo a dissolver os compostos intermetálicos à base de cobre na matriz austenítica. Na sequência o aço é resfriado bruscamente de maneira a impedir a precipitação desses compostos. Em virtude do baixo teor de carbono da liga, a martensita formada possui baixa dureza. Desta forma na condição solubilizada permite usinagem do material. Para atingir a dureza final, o material é submetido a envelhecimento em temperaturas relativamente baixas, ocorrendo a nucleação de finos precipitados de cobre na matriz martensítica [7]. Devido às baixas temperaturas necessárias para esse tratamento de envelhecimento a variação dimensional é reduzida eliminando praticamente os problemas como distorção, trincas e decarbonetação [10, 11].

A proposta deste trabalho é estudar novas rotas de resfriamento de peças produzidas com o aço 17 4 PH que possam contribuir para a melhora suas propriedades metalúrgicas e mecânicas, utilizando-se solução polimérica a base PVP de 10 e 25%, comparando-se com o meio de resfriamento convencional em água.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada utilizando uma barra laminada de aço inoxidável endurecível por precipitação classe 17 4 PH com diâmetro de 15,5 mm. As amostras foram cortadas perpendicularmente ao seu eixo principal, com espessura de 9 mm. Após a preparação inicial com etapas de corte transversal e lixamento realizou-se a caracterização inicial utilizando-se as técnicas de espectrometria de emissão óptica, metalografia, microdureza e difração de raios X. O restante das amostras foi dividido em três conjuntos, contendo três unidades cada, destinados às diferentes rotas de solubilizações e meios de resfriamento propostos. Estes conjuntos foram identificados como: “0A”, “0B” e “0C” para solubilização e refriamento em água, “1A”, “1B” e “1C” para solubilização e resfriamento em solução 10% PVP e “2A”, “2B” e “2C” para solubilização e resfriamento em solução 25% PVP.

As duas soluções poliméricas, utilizadas nos tratamentos térmicos de têmpera posterior a solubilização, foram preparadas com polímero polivinilpirrolidona Durquench 90, da marca Duferrit, contendo 10 e 25% em volume dissolvido em água [1]. Estas concentrações foram escolhidas por apresentarem, taxas de resfriamento mais próximas da água e do óleo de têmpera respectivamente. Com o objetivo de melhorar a homogeneidade e aumentar a taxa de agitação dos meios durante os resfriamentos, os diferentes fluidos foram inseridos separadamente antes de cada solubilização, em um volume aproximado de cinco litros cada, em um tanque retangular contendo uma bomba operando submersa. Esse equipamento produziu uma velocidade de saída do fluido em seu recalque de 0,7 m/s. Todos os fluidos estavam em temperatura ambiente no momento do resfriamento.

Para os tratamentos térmicos de solubilização, cada conjunto identificado foi transferido para forno de atmosfera controlada com nitrogênio com grau de pureza 99,99%, previamente aquecido a uma temperatura de 1040°C, permanecendo nessa temperatura pelo tempo de 37 minutos, conforme condição de “encharque” de 60 minutos para cada 25,4 mm da maior espessura. Após o tempo de aquecimento, cada conjunto foi imerso no respectivo tanque de resfriamento contendo os diferentes fluidos.

Após as solubilizações e têmperas, todas as amostras foram envelhecidas artificialmente através de novo aquecimento em forno a uma temperatura de 480°C e mantidas pelo tempo de uma hora, conforme condição H 900. Decorrido esse tempo, as amostras foram retiradas do forno e resfriadas ao ar.

As análises microestruturais das amostras foram realizadas com a utilização de microscópio óptico de luz refletida marca Olympus modelo GX51 e sistema de aquisição de imagens Analysis, sendo o reagente utilizado o reativo de Vilela.

Os perfis de microdureza foram realizados após o envelhecimento artificial das amostras. As medições foram obtidas em dez pontos com afastamento entre si de 0,1 mm a partir da superfície em direção ao núcleo dos corpos de prova. O microdurômetro utilizado é da marca Shimadzu, modelo HMT 2T, sendo selecionada aplicação de carga de 300 gramas e um tempo de indentação de 10 segundos.

Para análise qualitativa das fases presentes nas amostras, foi utilizada a técnica de análise de difração de raios X. O equipamento utilizado foi o difratômetro Bruker, modelo D8 Advance, dotado de um tubo de cobre com tensão de 40 kV e corrente de 40 mA. As seções das amostras apresentaram varredura de forma contínua nos ângulos de 10° a 90°, com passo de 0,05° e tempo de 1 segundo. Todos os difratogramas foram gerados com o software Origin Pro 8.5.0.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1. Análise química

A composição química do material utilizado neste estudo pode ser visualizada na Tabela 1, juntamente com os teores máximos especificados para essa classe de aço [7, 8, 12, 13].

O resultado da análise de composição química da amostra inicial demonstrou que os percentuais de cada elemento de liga estão em consonância com os padrões de referência normativa para a classe dos aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação tipo 17 4 PH [7, 8, 12–14]. Portanto, a partir da composição química do aço, foi possível estimar a temperatura inicial de transformação martensítica ( $M_i$ ) através da equação 1.

$$M_i (^{\circ}C) = 539 - 423(\%C) - 30,4(\%Mn) - 17,7(\%Ni) - 12,1(\%Cr) - 7,5(\%Mo) \quad (1)$$

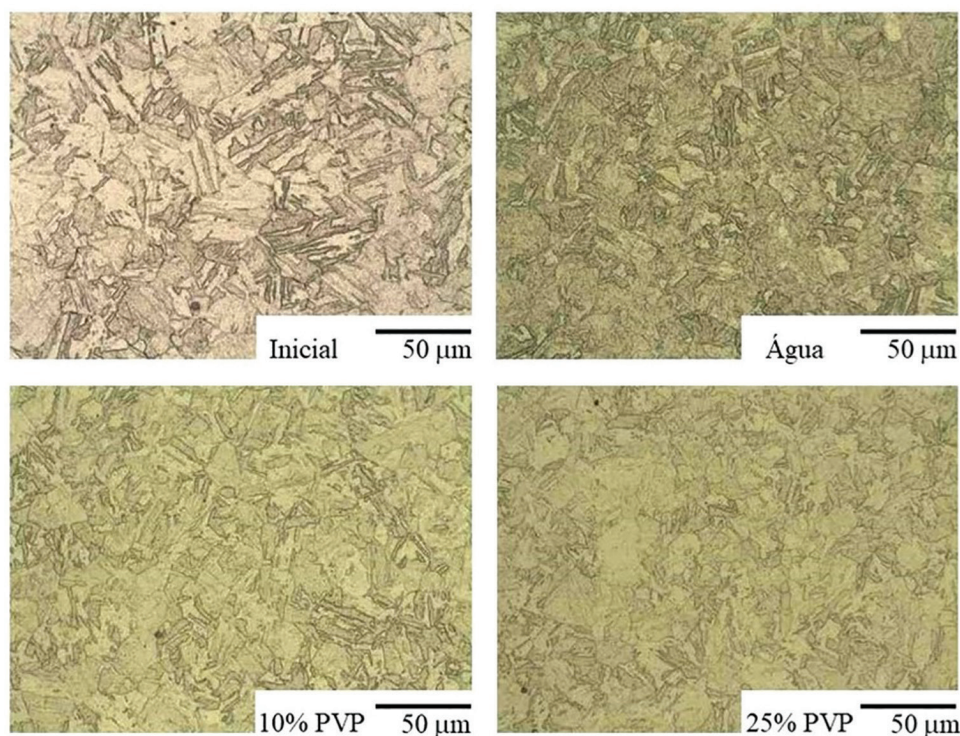
**Tabela 1:** Composição química do aço 17-4 PH (% em massa).

ELEMENTO	C	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu	Mo	N
PADRÃO (%)	0,07 máx.	1,00 máx.	15,00–17,50	3,00–5,00	0,04 máx.	0,03 máx.	3,00–5,00	–	–
MEDIDO (%)	0,05	0,63	16,87	4,20	0,002	0,003	3,00	0,03	0,002

Aplicando a essa equação os percentuais da amostra inicial da Tabela 1, a temperatura  $M_i$  encontrada foi de aproximadamente 220°C. Por meio dessa estimativa, após a solubilização e têmpera, esta classe de aço irá originar a microestrutura martensítica. Estudos de HSHIAO *et al.* [15] obtiveram experimentalmente, a partir de amostras de aço inoxidável 17 4 PH, curvas dilatométricas de aquecimento e resfriamento a uma taxa de 10°C/s. Como resultado a temperatura  $M_i$  encontrada foi de aproximadamente 105°C, onde os autores apontam que a diferença entre os valores calculado e obtidos de forma experimental pode estar ligada à estabilidade da austenita. Este efeito é mais acentuado durante o resfriamento, uma vez que o efeito do cobre na liga não é considerado na equação e a baixa taxa de resfriamento aplicada quando comparada a água, por soluções poliméricas com elevada concentração e óleo de têmpera. Já as concentrações de poliméricas mais baixas aumentam de forma significativa a cinética de resfriamento a apresentam a ruptura do filme polimérico de forma homogênea [1, 15].

### 3.2. Comportamento microestrutural

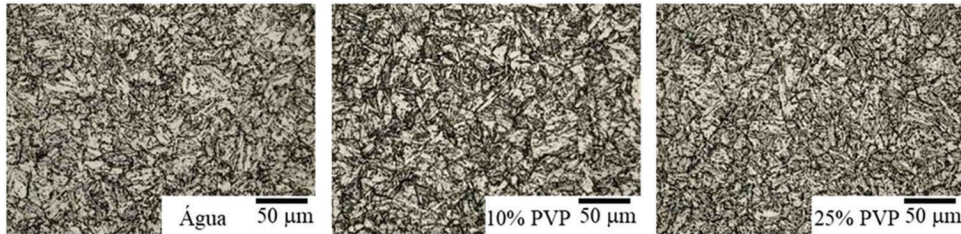
As imagens obtidas por microscopia óptica das amostras laminadas (inicial) e após o a solubilização com têmpera em água e soluções poliméricas com concentrações de 10% e 25% PVP são apresentadas na Figura 1.



**Figura 1:** Micrografias da amostra inicial e após a solubilização em água e soluções poliméricas com concentrações de 10 e 25% PVP.

Por sua vez, a análise da micrografia da amostra laminada, disposta na Figura 1, revela que antes da realização de qualquer tratamento térmico o aço já se encontrava com microestrutura essencialmente martensítica, sendo originada por laminação controlada. Após a execução das solubilizações e têmpera, novamente é possível verificar as amostras com matriz martensítica típica dos aços 17 4 PH juntamente o com a presença de intermetálicos, evidenciando a eficiência dos tratamentos [7, 8, 15]. As micrografias da Figura 1 demonstram também que a utilização dos diferentes meios de resfriamentos não ocasionara diferenças significativas entre as microestruturas resultantes. Um resultado relevante desse estudo foi à ausência de trincas nas amostras, ainda que o resfriamento após a solubilização tenha ocorrido com taxas significativamente elevadas.

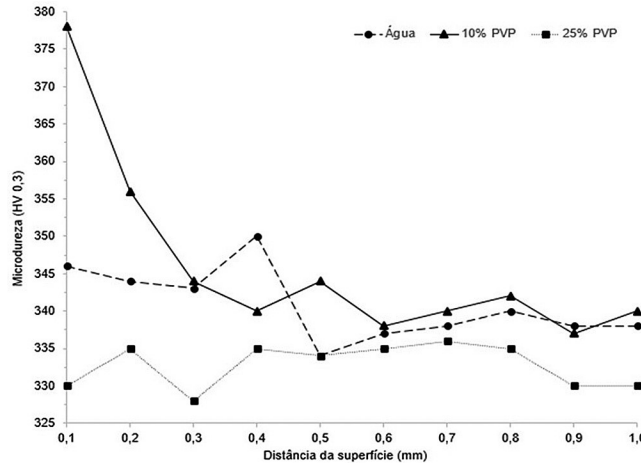
Após o envelhecimento do aço, cujas micrografias estão mostradas na Figura 2, as microestruturas apresentaram uma martensita mais uniforme e mais fina em relação às solubilizadas, além de se mostrarem morfológicamente mais similares comparando as três imagens. Também verificou-se homogeneidade nos precipitados de cobre originados. Para os parâmetros utilizados no envelhecimento neste trabalho, as microestruturas não apresentaram presença de austenita residual. Por outro lado, HSIAO *et al.* [15] observaram presença de quantidades significativas de austenita reversa aplicando ao aço 17 4 PH uma temperatura de 620°C por quatro horas, pela temperatura ser mais elevada e se encontrar próxima ao patamar intercítico quando comparados a temperatura de 480°C.



**Figura 2:** Micrografias das amostras após solubilização, têmpera em água e soluções poliméricas com concentrações de 10 e 25% PVP, seguidas de envelhecimento artificial na temperatura de 480°C.

### 3.3. Comportamento microdureza

O perfil de microdureza das amostras temperadas em água e em soluções poliméricas de 10 e 25% PVP pode ser visualizado na Figura 3. Verifica-se que na solução com 10% PVP houve um aumento significativo junto à superfície. Este comportamento está associado à formação de tensões residuais compressivas [2, 3]. A eliminação da fase vapor pelo envelopamento com o filme de polímeros atua de forma definitiva no efeito adifusional e instantâneo na cinética de resfriamento [2, 3].



**Figura 3:** Perfil de microdureza das amostras solubilizadas e temperadas em água e em soluções poliméricas com concentrações de 10 e 25%, apresentando média de três pontos.

O comportamento das amostras temperadas na solução polimérica com 25% apresentara valores de microdureza inferiores aos demais meios de resfriamento estudados. Este comportamento tem relação ao aumento da viscosidade da solução polimérica que ocasiona maior dificuldade de colapso do seu filme diminuído a severidade do meio de resfriamento [2, 3]. Mesmo que o principal mecanismo de endurecimento dos aços endurecidos por precipitação não seja a transformação martensítica, a transformação efetiva junto a superfície torna-se um fator relevante nas tensões residuais [1].

O comportamento relacionado as etapas de solubilização, têmpera e envelhecimento no substrato apresentaram homogeneidade de microdureza. Na profundidade de 0,1 mm o comportamento da microdureza apresentou relação similar ao encontrado nos processos de têmperas em diferentes soluções. Esta condição contribui para a condição de manutenção das tensões residuais compressivas na superfície [2, 3, 15–19]. Na Tabela 2

**Tabela 2:** Resumo dos valores médios ( $n=3$ ) de microdureza  $HV_{0,3}$  após os tratamentos térmicos.

INICIAL	SOLUBILIZAÇÃO			ENVELHECIMENTO		
	ÁGUA	10% PVP	25% PVP	ÁGUA	10% PVP	25% PVP
SUBSTRATO	346	341	333	419	419	419
SUPERFÍCIE	347	370	330	420	440	400

podem ser visualizados de forma geral os valores de médios de microdureza do substrato para as amostras de aço 17 4 PH solubilizado e resfriado em água, solução polimérica 10% PVP e 25% PVP. Ainda verificou-se os valores de microdureza, após o envelhecimento na temperatura de 480°C. Os valores de microdureza do substrato mantiveram-se uniformes, porém na superfície as amostras temperadas com solução polimérica 10% PVP apresentaram valores mais elevados. Este fenômeno se associa a ruptura uniforme do filme de polímero e aumento da severidade da transformação martensítica [1, 15].

As análises de microdureza evidenciaram as principais diferenças da aplicação dos fluidos utilizados no resfriamento. Os valores médios de microdurezas registrados na Tabela 2 ficaram relativamente próximos no substrato com diminuição dos valores quando do uso de solução polimérica na medida em que sua concentração foi aumentada junto à superfície. Estes resultados encontram-se em consonância com o registrado em estudos de Vieira *et al.* [2, 3], concluindo experimentalmente que a redução da capacidade de resfriamento das soluções está ligada ao aumento da concentração de PVP, resultando em menores índices de microdureza obtidos. Por outro lado, as dispersões em torno das médias mostraram significativa diferença quando se opta entre água ou solução polimérica.

As baixas dispersões observadas nos resfriamentos utilizando soluções como fluido encontra relação com a elevação da taxa de agitação, provocada pela bomba instalada no tanque de resfriamento. Para CANALE *et al.* [16], essa agitação impacta em maior homogeneidade na taxa de resfriamento, implicando também em aumento da severidade de têmpera, efeito este sentido na superfície dos componentes sob tratamento. Além disso, a utilização de soluções se beneficiou de uma das características desse fluido que é a de proporcionar colapso instantâneo da camada de vapor em toda a superfície da peça, trazendo mais uniformidade ao resfriamento [9]. Um importante resultado observado no uso de solução com a menor concentração foi à alta microdureza registrada em pontos mais próximos à superfície da peça, seguida de uma grande redução nos valores subsequentes, culminando com uma ligeira estabilidade nos pontos mais próximos ao núcleo. Esse comportamento indica um forte indício de formação de tensões compressíveis na superfície da peça.

A utilização de água, por sua vez, trouxe um valor médio de microdureza superior aos demais. Entretanto, a grande dispersão dos valores de microdureza pontuais denuncia a irregularidade no resfriamento, fruto da grande instabilidade do filme de vapor gerado e que colapsa facilmente, conforme apontado por Totten *et al.* [2–4, 20, 21].

Ao final do envelhecimento artificial, todas as amostras apresentaram valores médios de microdureza dentro das especificações para a classe de aço, independente do meio de resfriamento utilizado na solubilização anterior acima do patamar mínimo da norma de referência e envelhecimento. Isso indica a precipitação de compostos intermetálicos de cobre responsáveis pelo endurecimento da liga. Em pesquisas aplicadas a um material da mesma classe e utilizando parâmetros de envelhecimento semelhantes ao deste trabalho, porém efetuando solubilização com resfriamento ao ar, obtiveram 425 HV de microdureza [8]. HSIAO *et al.* [15] avaliaram o efeito da dureza em aço 17 4 PH sob diferentes tempos e temperaturas de envelhecimento. Os resultados mostram um pico de microdureza de aproximadamente 440 HV para a condição H 900. Entretanto, para tempos entre duas e oito horas de envelhecimento sob a mesma temperatura, observaram que não há uma diminuição substancial da microdureza.

### 3.4. Difração de raios X (DRX)

Os difratogramas (DRX) das amostras iniciais do aço 17 4 PH e das amostras tratadas termicamente por solubilização nos diferentes meios de resfriamento seguidos de envelhecimento são exibidos, respectivamente, nas Figuras 4 e 5.

O difratograma da Figura 4 mostra três picos característicos de martensita, reafirmando o observado na análise metalográfica do aço 17 4 PH de partida. Este espectro assemelha-se aos resultados obtidos em estudos utilizando materiais de especificação semelhante ao deste trabalho [17, 19]. Os demais espectros das amostras da Figura 5, após a aplicação dos diferentes tratamentos térmicos, revelaram semelhança com amostra inicial

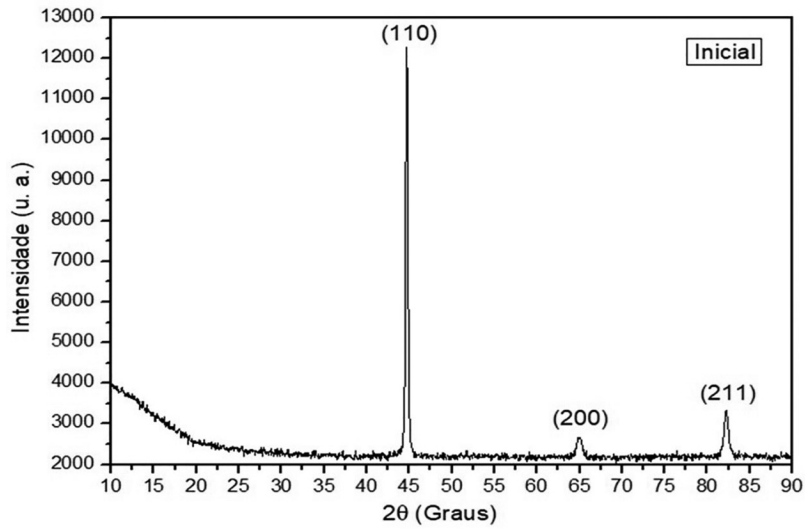


Figura 4: Difratoograma DRX do aço 17-4 PH antes da aplicação dos tratamentos térmicos.

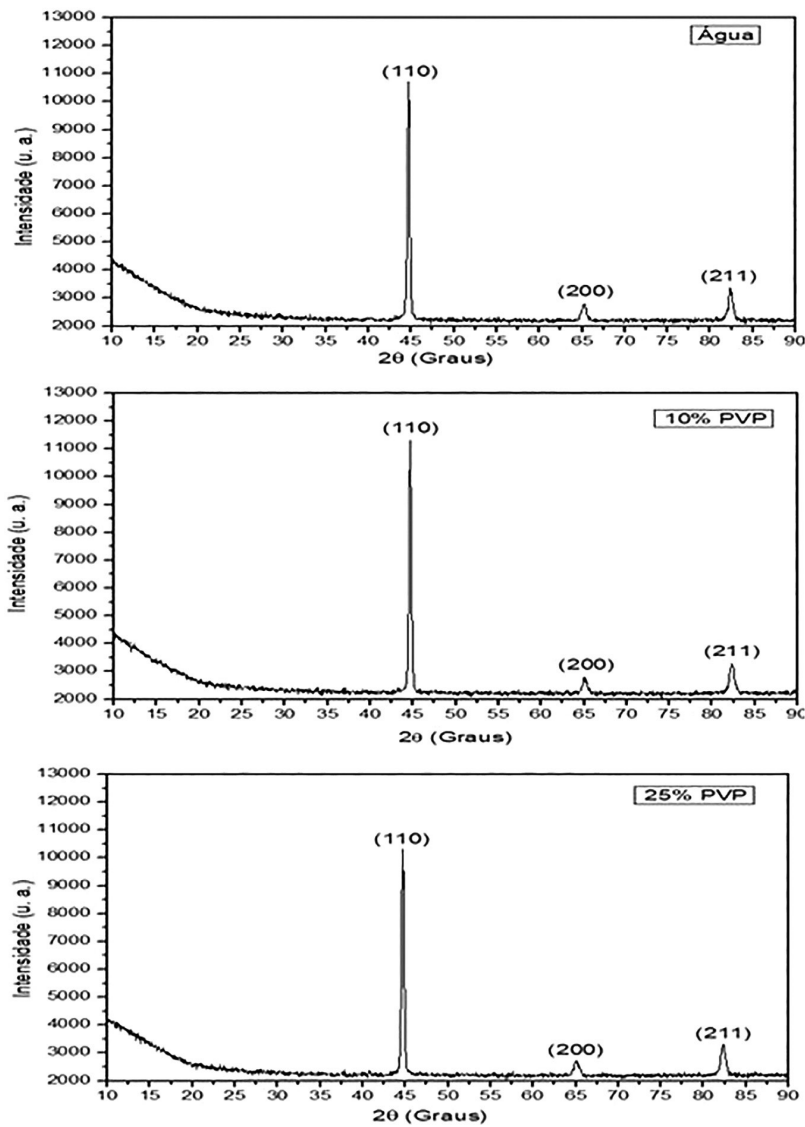


Figura 5: Difratoograma DRX após os tratamentos térmicos de solubilização em água, solução 10% PVP, 25% PVP seguidos de envelhecimento.

em relação aos “picos” e respectivos ângulos  $2\theta$ . O DRX de todos os ciclos de solubilização e envelhecimento confirmam a ausência de picos relativos à austenita retida.

BHAMBROO *et al.* [9] analisaram a evolução da formação da austenita retida no aço 17 4 PH, para envelhecimentos a 580°C em tempos que variaram de quinze minutos a seis horas. Pelos espectros DRX das amostras, concluíram que a austenita reversa inicia nos estágios iniciais do envelhecimento, atingindo um patamar máximo no tempo de uma hora com ângulo  $2\theta$  de aproximadamente 43,5°.

#### 4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados e discussões conclui-se que:

As microestruturas resultantes em todos os processos de solubilização, têmpera e envelhecimento artificial apresentaram matriz martensítica, independentemente dos meios de resfriamentos utilizados na têmpera após a solubilização.

Após o envelhecimento, o meio mais intensivo de resfriamento (solução polimérica 10% em solução aquosa) não ocasionou trincas ou deformações nas amostras.

A severidade de têmpera em água foi elevada, porém minimizada pela fase vapor. O resfriamento em solução contendo 10% de PVP apresentou eliminação da fase vapor e valores mais elevados de microdureza junto à superfície. Nesta concentração foram detectados valores mais elevados de microdureza junto a superfície com comportamento de tensões residuais compressivas.

Aumentando a concentração de PVP para 25% a viscosidade e a espessura do filme polimérico na superfície das peças diminuiu a severidade, sendo o fenômeno registrado nas microdurezas junto a superfície.

Após a solubilização e envelhecimento artificial todos os difratogramas (DRX) apresentaram similaridade entre si, com três picos característicos de matriz martensita e precipitados coerentes.

Após o envelhecimento, ficou evidenciando a inexistência de austenita retida nas amostras temperadas em soluções poliméricas.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] SUN, Y., HERBET, R.J., AINDOW, M., “Effect of heat treatments on microstructural evolution of additively manufactured and wrought 17-4PH stainless steel”, *Materials & Design*, v. 156, pp. 429–440, 2018.
- [2] VIEIRA, E.R., BIEHL, L.V., MEDEIROS, J.L.B., *et al.*, “Evaluation of the characteristics of an AISI 1045 steel quenched in different concentration of polymer solutions of polyvinylpyrrolidone”, *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, pp. 1–8, 2021.
- [3] VIEIRA, E.R., BIEHL, L.V., MEDEIROS, J.L.B., *et al.*, “Efeitos da variação da concentração de solução polimérica aquosa a base de PVP na têmpera de aço AISI 4140”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 3, pp. 1–11, 2019.
- [4] KOUDIL, Z., IKKENE, R., MOUZALI, M., “Cooling capacity optimization: calculation of hardening power of aqueous solution based on poly(n-vinyl-2-pyrrolidone)”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 23, pp. 551–559, 2014.
- [5] RAMESH, G., PRABHU K.N., “Effect of polymer concentration on wetting and cooling performance during immersion quenching”, *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 47, pp. 859–881, 2016.
- [6] OLIVEIRA, R.C.L.M., BIEHL, L.V., MEDEIROS, J.L.B., *et al.*, “Análise comparativa entre a têmpera e partição versus a têmpera e revenimento para o aço SAE 4340”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 3, pp. 1–9, 2019.
- [7] SHEN, S., LI, X., ZHANG P., *et al.*, “Effect of solution-treated temperature on hydrogen embrittlement of 17-4 PH stainless steel”, *Materials Science and Engineering: A*, v. 703, pp. 413–421, 2017.
- [8] WANG, D., CHI, C.T., LI, Y.L., *et al.*, “The effects of fabrication atmosphere condition on the microstructural and mechanical properties of laser direct manufactured stainless steel 17-4 PH”, *Journal of Materials Science & Technology*, v. 35, n. 7, pp. 1315–1322, 2019.
- [9] BHAMBROO, R., ROYCHOWDHURY, S., KAIN, *et al.*, “Effect of reverted austenite on mechanical properties of precipitation hardenable 17-4 stainless steel”, *Materials Science and Engineering: A*, v. 568, pp. 127–133, 2013.
- [10] FONSECA, M.G., MEDEIROS, J.L.B., COZZA, L.M., *et al.*, “Redução do percentual de austenita retida pelo processo de shot peening”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, n. 2, pp. 1–13, 2021.



- [11] LEO, P., D'OSTUNI, S., PERULLI, P., *et al.*, "Analysis of microstructure and defects in 17-4 PH stainless steel sample manufactured by selective laser melting", *Procedia Manufacturing*, v. 41, pp. 66–73, 2019.
- [12] PINEDO, C.E., LARROTA, S.I.V., NISHIKAWA, A.S., *et al.*, "Low temperature active screen plasma nitriding of 17-4 PH stainless steel", *Surface & Coatings Technology*, v. 308, pp. 189–194, 2016.
- [13] MEDEIROS, J.L.B., REGULY, A., STROHAECKER, T.R., "Applying Oxi-nitrocarburizing surface strengthening process to corrosion prevention in MIM 17-4 PH Stainless Steels", *Espacios*, v. 36, n. 20, pp. 21–26, 2015.
- [14] BORGES, H.O., BONAMIGO, A.O., VIEIRA, R.L., *et al.*, "Avaliação da efetividade do tratamento termoquímico de carbonitreção em engrenagens de motocicletas", *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, n. 3, pp. 1–8, 2021.
- [15] HSIAO, C.N., CHIOU, C.S., YANG, J.R., "Aging reactions in a 17-4 PH stainless steel", *Materials Chemistry Physics*, v. 74, n. 2, pp. 134–142, 2002.
- [16] CANALE, L.C.F., TOTTEN, G.E., CANALE, A.C., "Polímeros de têmpera à base de PAG", *Minerva*, v. 3, n. 2, pp. 209–214, 2006.
- [17] PINEDO, C.E., LARROTA, S.I.V., NISHIKAWA, A.S., *et al.*, "Low temperature active screen plasma nitriding of 17-4 PH stainless steel", *Surface & Coatings Technology*, v. 308, pp. 189–194, 2016.
- [18] NEZHADFAR, P.D., SHRERTHA, R., PHAN, N., *et al.*, "Fatigue behavior of additively manufactured 17-4 PH stainless steel: Synergistic effects of surface roughness and heat treatment", *International Journal of Fatigue*, v. 124, pp. 188–204, 2019.
- [19] YELI, G., AUGER, M.A., WILFORD, K., *et al.*, "Sequential nucleation of phases in a 17-4 PH steel: Microstructural mechanical properties", *Acta Materialia*, v. 125, n. 15, pp. 38–49, 2017.
- [20] TRAN, T.T., PHAM, A.H, Van Hoang V., *et al.*, "Stress and distortion of 100Cr6 steel after quenching in aqueous 4% polyvinylpyrrolidone solution", *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 28, pp. 1–17, 2022.
- [21] NAZARI, H., AGHAJANI, H., AL-AZAWI, F.H.S., "Diffusion induced decomposition of cementite layers during gas nitriding of 4140 steel: thermodynamical and kinetical aspects", *Surface Topography: Metrology and Properties*, v. 10, n. 1, 015049, 2022.