




Influência da temperatura de envelhecimento na dureza do aço inoxidável 17-4 PH produzido por *Fused Filament Fabrication* (FFF)

Vitor Mendes Cavaleiro¹ Eduardo Luis Schneider¹ Marcelo Favaro Borges¹ Afonso Reguly¹ Jorge Luiz Braz Medeiros¹ Luciano Volcanoglo Biehl¹ Wagner Caraméz² Bruno Oliveira¹ Julio Cesar Martini³ 

Resumo

A liga 17-4 PH destaca-se pela sua alta resistência mecânica e à corrosão. Com o avanço da FFF, torna-se importante entender a influência dos tratamentos térmicos nessas peças. Este estudo avalia a resposta em dureza do 17-4 PH fabricado por FFF submetido a solubilização (1150 °C/60 min) e envelhecimento a 480 °C e 620 °C por 30, 60 e 90 min, comparando os resultados com valores obtidos por métodos convencionais. A condição de 480 °C/60 min atingiu 36 HRC, enquanto 620 °C apresentou pico de 28 HRC em 30 min, reduzindo-se com tempos maiores. A porosidade remanescente de ~12% nas amostras FFF resultou em diminuição de ~18,2% (480 °C) e ~15,6% (620 °C) em relação às durezas convencionais para 60 min. Os resultados confirmam que o FFF reproduz o comportamento típico de endurecimento por precipitação da liga 17-4 PH, oferecendo uma rota de menor custo e boa flexibilidade geométrica para aplicações em que a dureza máxima não é o principal critério de projeto.

Palavras-chave: Aço inoxidável 17-4 PH; Manufatura aditiva; Fabricação por Fusão de Filamento (FFF); Endurecimento por precipitação.

Influence of aging temperature on the hardness of 17-4 PH stainless steel produced by fused filament fabrication (FFF)

Abstract

The 17-4 PH alloy stands out for its high mechanical strength and corrosion resistance. With the advancement of FFF, it becomes important to understand the influence of heat treatments on such parts. This study evaluates the hardness response of 17-4 PH manufactured by FFF after solution treatment (1150 °C/60 min) and aging at 480 °C and 620 °C for 30, 60, and 90 min, comparing the results with values reported for conventional processing. The 480 °C/60 min condition reached 36 HRC, whereas aging at 620 °C showed a peak of 28 HRC at 30 min, decreasing at longer times. The ~12% residual porosity in FFF samples resulted in hardness reductions of ~18.2% (480 °C) and ~15.6% (620 °C) compared to conventional values at 60 min. The results confirm that FFF reproduces the characteristic precipitation-hardening behavior of 17-4 PH, offering a lower-cost and geometrically flexible alternative for applications in which maximum hardness is not the primary design requirement.

Keywords: 17-4 PH stainless steel; Additive manufacturing; Fused Filament Fabrication (FFF); Precipitation hardening.

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

²Tecnimim, Porto Alegre, RS, Brasil.

³Martini Science, Porto Alegre, RS, Brasil.

*Autor correspondente: 00096217@ufrgs.br

E-mails: mendesvcv@tcd.ie; prof.eduardo@ufrgs.br; favaro@ufrgs.br; areguly@gmail.com; jorge.braz@furg.br; lucianobiehl@furg.br; wagner.caramez@tecnimim.com.br; bruno.dco@hotmail.com; martini.science@hotmail.com



1 Introdução

Nas últimas décadas, os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação têm se destacado em aplicações estruturais nas indústrias aeronáutica, química e nuclear [1], devido à sua resistência à corrosão [2] e propriedades mecânicas. Dentre eles, o aço inoxidável martensítico 17-4 PH [3], cuja composição química está apresentada na Tabela 1, é particularmente notável. Sua alta dureza e resistência são obtidas por meio da precipitação de finas partículas de cobre na matriz martensítica durante o tratamento térmico [4,5]. Esses precipitados agem como barreiras eficazes ao movimento das discordâncias, o que resulta no endurecimento do material [6].

A liga 17-4 PH é amplamente reconhecida como uma das ligas endurecíveis por precipitação mais estudadas na área de manufatura aditiva [7]. Estudos recentes têm se concentrado na caracterização da microestrutura [8], no tipo de tratamento térmico [9,10] e nas propriedades mecânicas resultantes [11].

Quando solubilizado, o aço 17-4 PH apresenta microestrutura martensítica [12]. A dureza e resistência mecânica podem ser aumentadas por envelhecimento artificial entre 480 e 620 °C [13], processo no qual precipitados ricos em cobre inicialmente formam estrutura cúbica de face centrada (CFC). Com o crescimento acima de 6 nm, esses precipitados tendem a mudar para estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). O envelhecimento precoce gera precipitados coerentes com a matriz, aumentando a resistência mecânica devido à distorção da rede cristalina [14]. Porém, com envelhecimento prolongado, ocorre coalescência dos precipitados, reduzindo a distorção e, consequentemente, a dureza e resistência mecânica do material [15].

Dentre os métodos mais comuns de manufatura aditiva metálica, destaca-se o processo chamado de sinterização seletiva a laser (SLS). No entanto, uma das suas maiores desvantagens, é a dependência do uso de lasers de alta potência, o que pode resultar em altos custos operacionais e de manutenção [16]. Nesse contexto, a fabricação por fundição de filamento (FFF) surgiu como uma alternativa promissora e econômica para a produção de peças metálicas [17]. Os filamentos são inseridos em um sistema de extrusão termicamente controlado, com um bico de deposição e acionado por um mecanismo de rodas giratórias. Este conjunto se move precisamente no plano X-Y, depositando material fundido camada por camada em uma plataforma de construção que se move na direção Z, permitindo a criação de estruturas tridimensionais complexas. Essa versatilidade de geometria, favorece a indústria, com a possibilidade de obtenção de produtos mais leves, prazos de entrega mais curtos e com menores custos de processos [18-23].

A manufatura aditiva por FFF aplicada a metais enfrenta desafios significativos em relação à impressão de polímeros, devido à necessidade de alta carga de partículas metálicas no filamento e à limitação de materiais comerciais. Além disso, fatores como a movimentação do filamento no extrusor, aderência à mesa e complexidade da composição do ligante dificultam a definição de propriedades ideais, exigindo muitos testes experimentais [24].

Apesar disso, ainda há uma escassez de estudos voltados à otimização das condições de impressão para melhorar propriedades mecânicas, como resistência à tração, em peças sinterizadas produzidas por FFF [25]. Especificamente para a liga 17-4 PH, os estudos na literatura são ainda mais limitados, indicando a necessidade de mais pesquisas para consolidar parâmetros e garantir a repetibilidade do processo [26].

Estudos utilizando diferentes métodos de manufatura como Deposição de Energia Dirigida (Directed Energy Deposition - DED) [27], Forno a Arco Elétrico (Electric Arc Furnace) [28] e Fabricação por Fusão de Filamento (Fused Filament Fabrication - FFF) [9] foram feitos nos últimos anos para investigar a influência do tratamento térmico nas propriedades de dureza da liga 17-4 PH e concluíram com seus resultados que a dureza da liga atinge seu pico de dureza com tratamento térmico de envelhecimento a 480 °C durante 1 h.

Mais recentemente, um novo tipo de filamento feito com uma mistura de polímeros com pós metálicos, a série Ultrafuse da BASF fornece filamentos da liga 316L e da liga 17-4 PH. Esse feedstock consiste em uma matriz polimérica de Polioximetileno (POM) e Polipropileno (PP) com partículas dispersas de aço inoxidável, com porcentagem em massa superior a 80%. A etapa de extração do ligante (debinding) é realizada por processo catalítico semelhante ao empregado em *Metal Injection Molding* (MIM), favorecendo a remoção controlada do POM antes da sinterização [29].

Godec et al. [25] investigaram a impressão 3D de peças metálicas por FFF utilizando um feedstock com 55% em massa de aço inoxidável 17-4 PH, avaliando parâmetros de impressão para maximizar a resistência mecânica antes do debinding e da sinterização. A densidade de preenchimento foi o parâmetro mais influente, pois maiores valores resultaram em peças mais compactas, com melhor adesão entre camadas e menor volume de vazios. Os pontos de contato entre trilhas adjacentes foram identificados como as regiões mais suscetíveis à ruptura, especialmente quando a espessura de camada é elevada ou a temperatura de extrusão é insuficiente para promover coalescência adequada.

Além disso, o controle da taxa de deposição e da temperatura de processamento é essencial para minimizar tensões e deformações acumuladas durante a impressão

Tabela 1. Composição química (% peso) da liga de aço inoxidável 17-4 PH, conforme a norma ASTM A705 [3]

C (%)	P (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)	Nb (%)	Mn (%)	Si (%)
0,07	0,04	15-17,5	3-5	3-5	0,15-0,45	1	1

e o resfriamento do feedstock. A utilização de suportes refratários de sinterização (setters) é recomendada para reduzir empenamentos e evitar trincas durante a remoção da base aquecida [29].

Neste trabalho, investigamos a influência de diferentes ciclos de envelhecimento na dureza da liga 17-4 PH fabricada por Fused Filament Fabrication (FFF) utilizando um filamento comercial. As amostras impressas foram submetidas às etapas de debinding, sinterização, solubilização e envelhecimento, permitindo avaliar a resposta ao tratamento térmico e compará-la aos valores reportados para rotas convencionais de processamento. O estudo também discute o papel das etapas de debinding e sinterização, realizadas segundo princípios semelhantes aos empregados em Metal Injection Molding (MIM), destacando-se o potencial da rota FFF como alternativa de menor custo e maior flexibilidade geométrica para a fabricação de componentes metálicos.

2 Metodologia

A preparação das amostras para os ciclos de envelhecimento seguiu a sequência de processos detalhada na Figura 1. Os corpos de prova (CPs) foram projetados no software SolidWorks e impressos com uma impressora Ultimaker S5, utilizando o filamento BASF Ultrafuse 17-4 PH. O projeto dos CPs foi baseado na norma DIN 50125, utilizada para ensaios de tração em materiais metálicos [30].

O software de fatiamento Ultimaker Cura foi empregado para preparar o arquivo de impressão. A orientação das

linhas de deposição foi definida no software (Figura 2a) e replicada na mesa de impressão (Figura 2b).

A impressão dos corpos de prova foi realizada com os seguintes parâmetros: altura de camada de 0,15 mm, densidade de preenchimento de 105% e espaçamento entre as linhas de preenchimento de 0,381 mm, com sobreposição de 25%. A temperatura do bico extrusor e da mesa de impressão foram mantidas em 245 °C e 100 °C, respectivamente. A velocidade de impressão utilizada foi de 25 mm/s.

Os processos de debinding e sinterização utilizados seguiram parâmetros específicos descritos pelos guidelines do fornecedor do material [29]. O debinding foi realizado em forno aquecido a 120 °C, utilizando como atmosfera o ácido nítrico (HNO_3) com pureza de 99,999%. O processo foi considerado finalizado quando se obteve uma perda mínima de massa de 10,5%. Em seguida, a sinterização foi conduzida sob atmosfera de hidrogênio (H_2), iniciando-se com aquecimento a uma taxa de 5 K/min até 600 °C, temperatura mantida por 1 h. Após esse patamar, o aquecimento continuou à mesma taxa até atingir 1300 °C, onde permaneceu por 3 h, seguido de resfriamento controlado dentro do próprio forno.

A Figura 3 ilustra o ciclo térmico de solubilização e envelhecimento aplicado às amostras. Os corpos de prova foram solubilizados em um forno elétrico Sanchis a 1150 °C por 1 hora, seguidos por têmpera em água à temperatura ambiente. Para facilitar o manuseio, as amostras foram presas a um arame. Posteriormente, as amostras solubilizadas foram submetidas ao tratamento de envelhecimento nas temperaturas de 480 °C e 620 °C, por tempos de 30, 60 e 90 minutos. Uma condição de amostra



Figura 1. Fluxograma dos procedimentos experimentais para avaliação do envelhecimento de amostras produzidas por FFF utilizando a liga 17-4 PH.

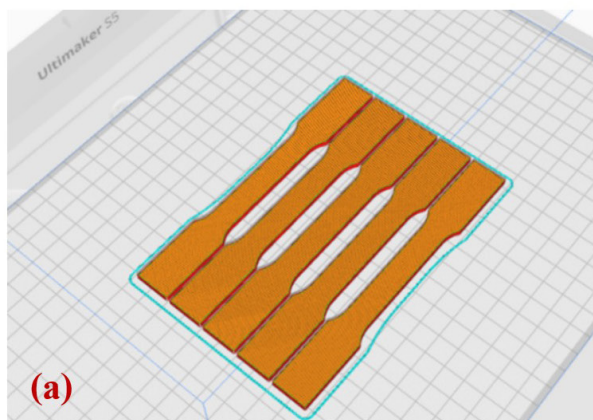


Figura 2. Representação da orientação de impressão das camadas: (a) visualização no software de fatiamento Ultimaker Cura e (b) detalhe da impressão na mesa.

apenas solubilizada, sem envelhecimento, também foi estudada para fins de comparação.

Para a avaliação da dureza, foi realizado o ensaio Rockwell C (HRC), conforme a norma ASTM E18 [31].

Foram testadas três amostras por condição, com um mínimo de três indentações em cada. Os resultados foram usados para calcular a média e o desvio padrão. A composição química das amostras foi determinada por fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF).

A preparação metalográfica seguiu um procedimento padrão. As amostras foram embutidas em baquelite e lixadas sequencialmente com granulometrias de 120, 220, 320, 420, 600 e 1000, com rotação de 90° entre cada troca de lixa.

Em seguida, o polimento foi realizado com uma suspensão de alumina de 2 µm [32]. Finalmente, foi realizado um ataque químico com reagente Vilella (1g de ácido pícrico, 5 ml de HCl, 100 ml de etanol).

Por fim, as dimensões dos corpos de prova foram medidas após a impressão e após os processos de debinding e sinterização, a fim de quantificar as retrações características do processo de fabricação.

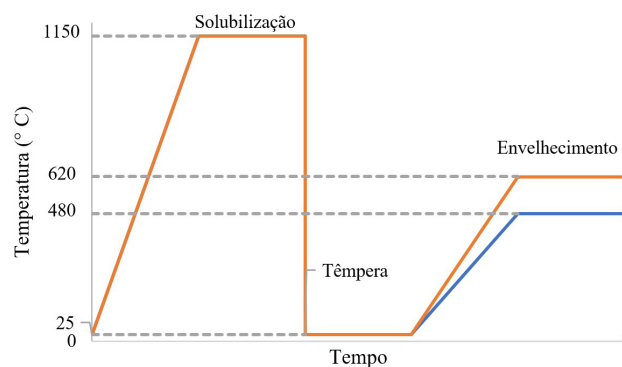


Figura 3. Esquematização do processo de solubilização e envelhecimento, contendo a temperatura de solubilização e as duas temperaturas de envelhecimento utilizadas.

3 Resultados e discussões

A Figura 4 apresenta a comparação visual entre um corpo de prova após a impressão e o mesmo após os processos de debinding e sinterização. As medições dimensionais realizadas antes e depois desses processos revelaram uma retração consistente: a largura reduziu de 17,78 mm para 14,87 mm (16,3%), o comprimento diminuiu de 143,24 mm para 119,48 mm (16,6%) e a espessura contraiu de 4,9 mm para 4,1 mm (16,3%). Esses valores estão alinhados com os fatores de *shrinkage* e *overscale* fornecidos pelo fabricante, sendo uma característica do processo.

A Tabela 2 apresenta o resultado médio e desvio padrão a partir de três ensaios de composição química realizados por fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF), expressos em percentual em peso (% peso). De todos os elementos analisados — Cr, Ni, Cu, Nb, Mn e Si — estão dentro das faixas indicadas pelas normas de referência seguidas pela BASF. Isso confirma a conformidade da liga com os padrões esperados, assegurando a qualidade do material e sua adequada resposta aos tratamentos térmicos.

Na Figura 5a, observa-se a amostra após o ciclo completo de debinding e sinterização, na qual poros alongados e alinhados paralelamente às linhas de deposição evidenciam o padrão característico do processo de impressão. Esses poros correspondem aos espaços remanescentes entre as linhas de preenchimento do material e refletem diretamente a influência dos parâmetros de impressão na microestrutura da peça. Em relação aos parâmetros de impressão, foi adotada uma distância entre linhas de preenchimento de 0,381 mm, com uma sobreposição de 25%, o que reduz a distância efetiva entre os centros das linhas para aproximadamente 285,75 µm. A análise quantitativa foi realizada utilizando o software Image J a partir da Figura 5a. Para isso, foram traçadas várias linhas perpendiculares às linhas de impressão na micrografia, permitindo medir as distâncias entre os centros dos



Figura 4. Comparação dos corpos de prova antes e após processos de debinding e sinterização.

poros alinhados. A média das distâncias obtidas foi de aproximadamente 304 μm , valor que confirma a estimativa teórica. A orientação da impressão, juntamente com a possível formação de planos inclinados durante o lixamento, dificulta a visualização precisa das interfaces entre as camadas, comprometendo a medição exata das distâncias entre os caminhos de deposição [25].

A avaliação da porosidade, também realizada a partir da mesma micrografia, foi feita no software Image J por meio da segmentação da imagem.

Nesse procedimento, a imagem é convertida em preto e branco com base na intensidade dos pixels, onde os pixels abaixo do valor definido são classificados como poros e os acima como material sólido, permitindo calcular a porcentagem da área ocupada pelos poros em relação à área total da amostra. A partir dessa análise, foi obtido um valor médio de porosidade de aproximadamente 12%. Esses resultados demonstram a forte correlação entre os parâmetros de deposição e as características metalográficas observadas, ressaltando a importância do controle preciso desses parâmetros para otimizar a densificação da peça.

A figura 5b, obtida com ampliação de 200x, mostra a microestrutura da amostra após ataque químico com reagente de Vilella, na condição solubilizada, temperada e envelhecida a 620 °C por 1 h. Nela, destaca-se a matriz martensítica com estrutura acicular típica da liga 17-4 PH. As regiões escuras e alinhadas indicam a presença de porosidades decorrentes do padrão de preenchimento. Devido ao tamanho reduzido

dos precipitados responsáveis pelo endurecimento, estes não são visíveis em microscopia óptica [33].

Os parâmetros de deposição, em especial o espaçamento entre linhas de 0,381 mm e a sobreposição de 25%, exercem papel fundamental na densificação inicial das peças produzidas por FFF [25]. A retração linear anisotrópica observada durante a sinterização, da ordem de 20% nos planos XY e 26% no eixo Z, reforça a influência da orientação das camadas e do espaçamento entre linhas na consolidação do material. Essa anisotropia afeta a contração dimensional e a uniformidade microestrutural ao longo dos diferentes eixos da peça [34].

No presente estudo, adotamos parâmetros de impressão voltados à elevada compactação do “verde” (densidade de preenchimento de 105%, sobreposição de 25%, altura de camada de 0,15 mm, temperatura do bico de 245 °C e mesa a 100 °C), ainda assim observou-se porosidade remanescente (~12%). Isso indica que, além do preenchimento nominal, a porosidade decorre da arquitetura em camadas e das transformações durante debinding e sinterização (remoção de ligante, retração e coalescência), compondo um componente estrutural/praticamente intrínseco à rota FFF nas janelas de processo aqui utilizadas. Por outro lado, reconhecemos uma parcela potencialmente ajustável: melhoria da ligação entre trilhas (p. ex., calibração de largura de extrusão vs diâmetro de bico, número de perímetros, ângulo de trajetória e temperatura/ambiente de câmara), cinética de debinding (exposição/tempo e etapas térmicas para minimizar inchamento/localização de vazios) e perfis de sinterização

Tabela 2. Resultados de análise química obtidos por fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF), expressos em percentual em peso (% em peso), acompanhados da média e do desvio padrão

EDXRF	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)	Nb (%)	Mn (%)	Si (%)
1	16,736	4,397	4,166	0,233	0,323	0,873
2	16,728	4,397	4,166	0,235	0,312	0,897
3	16,805	4,459	4,171	0,236	0,315	0,895
Média	16,756	4,418	4,168	0,235	0,317	0,888
Desvio Padrão	0,042	0,036	0,003	0,002	0,006	0,013

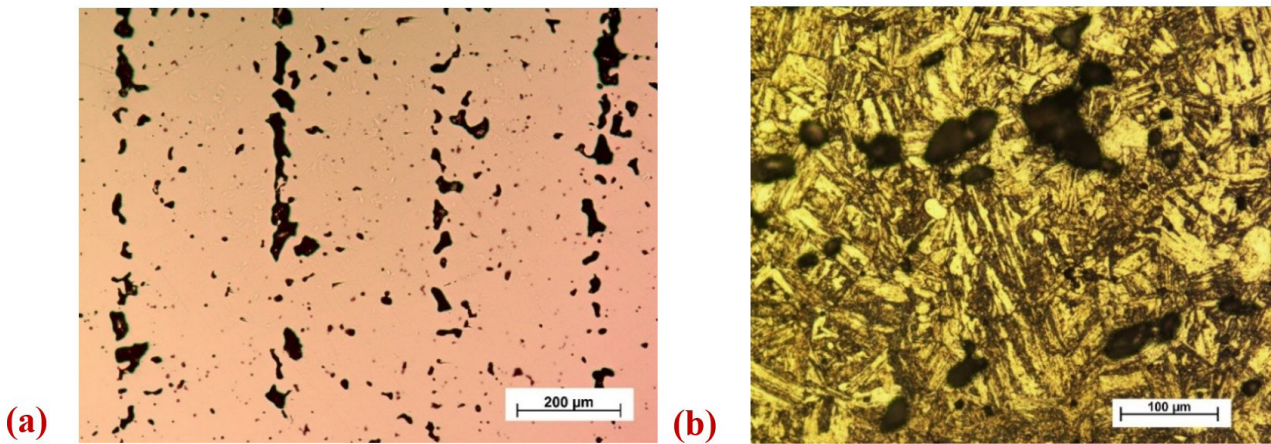


Figura 5. Micrografias ópticas da amostra de 17-4 PH obtida via FFF envelhecida a 480 °C durante 1 h. (a) Amostra após o ciclo completo de debinding e sinterização, com ampliação 100 x; (b) Metalografia com ampliação 200 x após ataque com reagente Vilella.

(rampas, patamares intermediários e materiais de apoio (suportes) que favoreçam crescimento de pescoços e limitem deformações). Tais ajustes, possivelmente combinados a pós-densificação, como Prensagem Isostática a Quente (Hot Isostatic Pressing - HIP), quando disponível), podem reduzir a porosidade para patamares menores do que os aqui reportados, ainda que não a eliminem por completo. Em síntese, parte da porosidade é inerente à cadeia FFF adotada, mas há espaço técnico para reduções adicionais que serão investigadas de forma sistemática em trabalho subsequente, junto com uma análise microestrutural comparativa (como impressa, solubilizada, envelhecida a 480 °C e a 620 °C) correlacionando densificação e propriedades mecânicas.

O gráfico apresentado na Figura 6 mostra a variação da dureza HRC em função do tempo de envelhecimento térmico para as duas temperaturas utilizadas de 480 °C e 620 °C.

As curvas de envelhecimento para ambas as temperaturas (480 °C e 620 °C) mostram um comportamento típico de ligas endurecíveis por precipitação. A dureza aumenta inicialmente com o tempo, atinge um pico e, em seguida, começa a diminuir devido ao superenvelhecimento. A queda na dureza a 480 °C é menos acentuada do que a observada a 620 °C, evidenciando uma cinética de endurecimento mais lenta e estável.

O aumento inicial da dureza é atribuído à nucleação e ao crescimento de precipitados finos e homogêneos, que atuam como barreiras eficazes ao movimento das discordâncias. Com o aumento do tempo de envelhecimento, ocorre a coalescência desses precipitados, o que reduz sua densidade e a distorção da rede cristalina. Essa redução na barreira ao movimento das discordâncias explica a posterior diminuição da dureza.

Analizando a curva de envelhecimento a 480 °C, a dureza inicial da amostra solubilizada foi de 22 HRC. Após 0,5 h de tratamento, a dureza subiu consideravelmente para 30 HRC. O valor máximo de 36 HRC foi atingido com 1 h de envelhecimento, e uma pequena redução para 35 HRC foi observada após 1,5 h, indicando que a dureza se mantém próxima ao pico.

Para o envelhecimento a 620 °C, o pico de dureza ocorreu mais cedo. A dureza subiu para 28 HRC em 0,5 h, diminuiu para 27 HRC após 1 h, e alcançou 22 HRC em 1,5 h. Esse comportamento demonstra que, em temperaturas mais elevadas, o superenvelhecimento ocorre de forma mais acelerada.

Quando comparados com os dados de um estudo de Hsiao et al. [28], que utilizou um processo convencional (forno a arco elétrico seguido de forjamento e laminação), onde para 620 °C o pico de dureza de 35 HRC foi observado em 0,5 h, com queda para 32 HRC após 1 h, mostrando tendência semelhante, porém ligeiramente superiores aos resultados obtidos por FFF. A dureza obtida via FFF foi cerca de 18,2% menor na temperatura de 480 °C para o tempo de 60 min, enquanto que para este mesmo tempo a 620 °C a dureza do material fabricado por FFF foi em média 15,6% menor. Essa diferença nos valores absolutos pode ser atribuída à maior densificação e menor porosidade das peças obtidas por processos convencionais.

No entanto, a similaridade na tendência das curvas confirma a ocorrência do mesmo mecanismo de endurecimento por precipitação, independentemente do método de fabricação. Esses resultados, assim como a comparação com outros estudos, estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3. Comparação de resultados de ensaio de dureza das amostras envelhecidas neste trabalho com os resultados de outros trabalhos relacionados

Método de manufatura	Envelhecimento		Dureza (HRC)	Referência
	Temperatura (° C)	Tempo (h)		
FFF	480	1	36	Hsiao et al. [28]
Electric Arc Furnace	480	1	44	
FFF	620	1	27	Hsiao et al. [28]
Electric Arc Furnace	620	1	32	

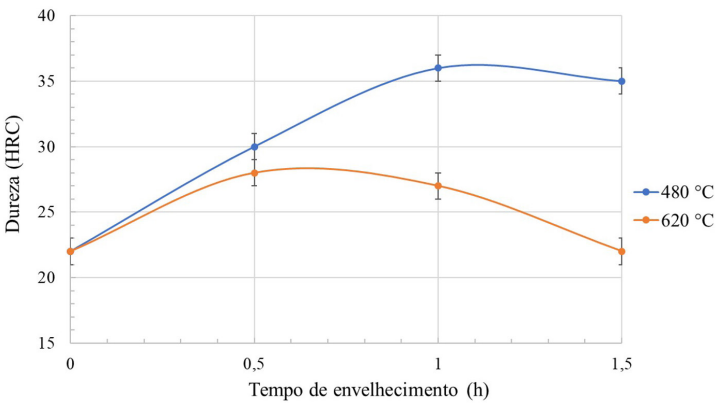


Figura 6. Efeitos do tempo e temperatura de envelhecimento na dureza (HRC) das amostras.

4 Conclusão

Este trabalho avaliou a influência dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento na dureza do aço inoxidável 17-4 PH fabricado por Fusão de Filamento (FFF). Os resultados demonstram que o FFF é uma rota de manufatura aditiva viável, capaz de reproduzir as características microestruturais e a resposta térmica esperada da liga.

O processamento das amostras resultou em uma contração volumétrica de aproximadamente 16,5% após a sinterização, o que reflete a consolidação do material. A porosidade remanescente, estimada em 12%, mostrou-se alinhada às direções de impressão, confirmando a influência direta dos parâmetros de processamento na microestrutura final da peça. O tratamento térmico de envelhecimento se mostrou eficaz em todas as condições analisadas. A condição de 480 °C por 60 min obteve a dureza máxima de 36 HRC, um aumento de ~63,4% em relação à amostra apenas solubilizada. Para a temperatura de 620 °C, a dureza máxima foi alcançada em 30 min com 28 HRC, o que corresponde a um incremento de ~27,3%.

Quando comparado a processos convencionais, como a rota de forno a arco elétrico (EAF), a dureza obtida via

FFF foi cerca de 18,2% menor na temperatura de 480 °C para o tempo de 60 min, enquanto que para este mesmo tempo a 620 °C a dureza do material fabricado por FFF foi em média 15,6% menor.

Em suma, embora a rota FFF apresente limitações inerentes, como a maior porosidade e a consequente redução na dureza em comparação com métodos convencionais, ela se mostra uma alternativa promissora. A capacidade de reproduzir o comportamento típico de endurecimento por precipitação, aliada a outras vantagens como liberdade de design, menor tempo de desenvolvimento e potencial para redução de custos, posiciona o FFF como uma opção estratégica. Para muitas aplicações, a maximização da dureza não é o único ou principal critério de desempenho, tornando o FFF uma solução de engenharia balanceada, que oferece um compromisso entre propriedades mecânicas satisfatórias e a otimização do processo. Por fim, reconhecemos que, embora um componente de porosidade seja estrutural/praticamente intrínseco à cadeia FFF utilizada, reduções adicionais são plausíveis via ajustes finos de trilhas, debinding e sinterização — e, quando disponível, pós-densificação —; essa otimização, junto da comparação microestrutural abrangente entre todas as condições térmicas, já está planejada como continuidade deste trabalho.

Referências

- 1 Sowa R, Parlinska WM, Arabasz S, Dziedzic A, Dul I. Influence of double solution treatment on hardness in 17-4 PH steel. *Zastita Mater.* 2015;56(3):261-268. <https://doi.org/10.5937/ZasMat1503261S>.
- 2 Viswanathan UK, Banerjee S, Krishnan R. Effects of aging on the microstructure of 17-4 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering A.* 1988;104:181-189. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90420-X](https://doi.org/10.1016/0025-5416(88)90420-X).
- 3 ASTM International. ASTM A705/A705M-23: Specification for age-hardening stainless steel forgings. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2023. https://doi.org/10.1520/A0705_A0705M-23.
- 4 Murayama M, Katayama Y, Hono K. Microstructural evolution in a 17-4 PH stainless steel after aging at 400 °C. *Metallurgical and Materials Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science.* 1999;30A(2):345-353. <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0323-2>.
- 5 Othen PJ, Jenkins ML, Smith GDW. High-resolution electron microscopy studies of Cu precipitates in α -Fe. *Philosophical Magazine. A. Physics of Condensed Matter. Defects and Mechanical Properties.* 1994;70(1):1-24. <https://doi.org/10.1080/01418619408242533>.
- 6 Chung CY, Tzeng YC. Effects of aging treatment on ϵ -Cu precipitation and mechanical properties of MIM 17-4 PH stainless steel. *Materials Letters.* 2019;237:228-231. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.11.107>.
- 7 Li K, Yang T, Gong N, Wu J, Wu X, Zhang DZ, et al. Additive manufacturing of ultra-high strength steels: a review. *Journal of Alloys and Compounds.* 2023;965:171390. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171390>.
- 8 Hu Z, Zhu H, Zhang H, Zeng X. Experimental investigation on selective laser melting of 17-4 PH stainless steel. *Optics & Laser Technology.* 2017;92:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.07.012>.
- 9 Li C, Chen Y, Zhang X, Liu T, Peng Y, Wang K. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel manufactured by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology.* 2023;26:5707-5715. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.283>.
- 10 Cheruvathur S, Lass EA, Campbell CE. Additive manufacturing of 17-4 PH stainless steel: post-processing heat treatment to achieve uniform microstructure. *Journal of the Minerals Metals & Materials Society.* 2016;68(3):930-942. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1754-4>. PMID:39545097.
- 11 Yu C, Wang H, Yu Z, Huang Y, Xi M, Chen J, et al. Improving mechanical properties and isotropy of laser DED 17-4 PH stainless steel by ultrasonic vibration. *Scripta Materialia.* 2023;236:115673. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2023.115673>.

- 12 Mändl S, Fritzsche B, Manova D, Hirsch D, Neumann H, Richter E, et al. Wear reduction in AISI 630 martensitic stainless steel after nitrogen ion implantation. *Surface and Coatings Technology*. 2005;194(2-3):1-6. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.05.031>.
- 13 Shoushtari MRT. Effect of ageing heat treatment on corrosion behavior of 17-4 PH stainless steel in 3.5% NaCl. *Int J ISSI*. 2010;7(1):33-36.
- 14 Varney TC, Burns DE, Rottmann PF. Effects of heat treatment and geometry on mechanical properties of additively manufactured 17-4 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering A*. 2024;147199. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147199>.
- 15 Sun XY, Zhang B, Lin HQ, Zhou Y, Sun L, Wang JQ, et al. Correlations between stress corrosion cracking susceptibility and grain boundary microstructures in Al-Zn-Mg alloy. *Corrosion Science*. 2013;77:103-112. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.07.032>.
- 16 Shi X, Ma S, Liu C, Chen C, Wu Q, Chen X, et al. Performance of high layer thickness in selective laser melting of Ti6Al4V. *Materials (Basel)*. 2016;9(12):975. <https://doi.org/10.3390/ma9120975>. PMID:28774097.
- 17 BASF. Mixture for use in a fused filament fabrication process. Patent WO2016012486A1. 2016.
- 18 Allahverdi M, Danforth SC, Jafari M, Safari A. Processing of advanced electroceramic components by fused deposition technique. *Journal of the European Ceramic Society*. 2001;21(10-11):1485-1490. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(01\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(01)00047-4).
- 19 Thompson SM, Bian L, Shamsaei N, Yadollahi A. An overview of direct laser deposition for additive manufacturing: Part I. *Additive Manufacturing*. 2015;8:36-62. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.001>.
- 20 Frazier WE. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014;23(6):1917-1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>.
- 21 Emelogu A, Marufuzzaman M, Thompson SM, Shamsaei N, Bian L. Additive manufacturing of biomedical implants: a feasibility analysis. *Additive Manufacturing*. 2016;11:97-113. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.04.006>.
- 22 Levy GN, Schindel R, Kruth JP. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing technologies. *CIRP Annals*. 2003;52(2):589-609. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60206-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60206-6).
- 23 Groover MP. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. 7th ed. Hoboken: Wiley; 2020.
- 24 Gloeckle C, Konkol T, Jacobs O, Limberg W, Ebel T, Handge UA. Processing of polymer-metal feedstocks for fused filament fabrication and production of metallic implants. *Materials (Basel)*. 2020;13(19):1-16. <https://doi.org/10.3390/ma13194413>. PMID:33022989.
- 25 Godec D, Cano S, Holzer C, Gonzalez-Gutierrez J. Optimization of the 3D printing parameters for tensile properties of FFF 17-4 PH stainless steel. *Materials (Basel)*. 2020;13(3):774. <https://doi.org/10.3390/ma13030774>. PMID:32046236.
- 26 Zhang Y, Roch A. Fused filament fabrication and sintering of 17-4 PH stainless steel. *Manufacturing Letters*. 2022;33:29-32. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.06.004>.
- 27 Pan L, Kwok CT, Niu B, Huang X, Cao Y, Zou X, et al. Enhancement in hardness and corrosion resistance of DED 17-4 PH stainless steel via heat treatment. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;23:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.114>.
- 28 Hsiao CN, Chiou CS, Yang JR. Aging reactions in a 17-4 PH stainless steel. *Materials Chemistry and Physics*. 2002;74(2):134-142. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(01\)00460-6](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(01)00460-6).
- 29 BASF. BASF 3D Printing Solutions GmbH. Process guidelines. Heidelberg: BASF; 2022.
- 30 DIN Media. DIN 50125:2022-08: Testing of metallic materials – tensile test pieces. Berlin: DIN Media; 2022. <https://doi.org/10.31030/3337825>.
- 31 ASTM International. ASTM E18-22: Test methods for Rockwell hardness of metallic materials. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2022. <https://doi.org/10.1520/E0018-22>.
- 32 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13284:1995: Preparação de corpos de prova para análise metalográfica. Rio de Janeiro: ABNT; 1995.
- 33 Li K, Sridar S, Tan S, Xiong W. Effect of homogenization on precipitation behavior and strengthening of 17-4 PH stainless steel fabricated by LPBF. *arXiv*. 2021:1-26.

- 34 Gonzalez-Gutierrez J, Guráñ R, Spoerk M, Holzer C, Godec D, Kukla C. 3D printing conditions determination for feedstock used in fused filament fabrication of 17-4 PH stainless steel parts. *Metalurgija*. 2018;57(1-2):117-120.

Recebido em: 3 Set 2025

Aceito em: 4 Dez 2025

Editor responsável:

Paula Fernanda da Silva Farina 