

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE COMPARATIVA DA USINABILIDADE DO AÇO BAINÍTICO DE
RESFRIAMENTO CONTÍNUO DIN 18MnCrSiMo6-4 COM O AÇO DIN 20MnCr5

por

Calvin Chaves Zaccani

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, setembro de 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Chaves Zaccani, Calvin
Análise Comparativa da Usinabilidade do Aço
Bainítico de Resfriamento Contínuo DIN 18MnCrSiMo6-4
com o aço DIN 20MnCr5 / Calvin Chaves Zaccani. --
2023.
20 f.
Orientador: André João de Souza.

Coorientador: Alexandre da Silva Rocha.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Usinagem. 2. Forjamento. 3. Bainita. I. Souza,
André João de, orient. II. Rocha, Alexandre da Silva,
coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Calvin Chaves Zaccani

ANÁLISE COMPARATIVA DA USINABILIDADE DO AÇO BAINÍTICO DE
RESFRIAMENTO CONTÍNUO DIN 18MnCrSiMo6-4 COM O AÇO DIN 20MnCr5

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha (DEMET/UFRGS)

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza (Presidente)

Profa. Dra. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Porto Alegre, 04 de setembro de 2023

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Suzana por através de muito sacrifício me dar condições de estudar em tempo integral.

À minha namorada Isabelli por todo o companheirismo ao longo desta jornada.

Ao Centro Estudantil da Engenharia Mecânica (CEMEC) e seus membros pela amizade e por tornarem minha graduação uma experiência única.

À EPR Consultoria por todo o desenvolvimento profissional proporcionado.

Aos colegas do Grupo de Engenharia de Superfícies do Laboratório de Conformação Mecânica (LdTM) por me ensinarem o que é pesquisa e por todo o aprendizado.

Ao Laboratório de Automação e Usinagem (LAUS) pelo fornecimento da infraestrutura para realização deste trabalho e ao técnico Guilherme Schirmer pela disponibilidade e auxílio técnico com os experimentos.

Aos colegas Émerson Passari e Rodrigo Dietrich pelas contribuições neste trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por oferecer educação pública, gratuita e de qualidade e por suas políticas de inclusão que me permitiram continuar estudando.

ZACCANI, C.C. **Análise Comparativa da Usinabilidade do Aço Bainítico de Resfriamento Contínuo DIN 18MnCrSiMo6-4 com o Aço DIN 20MnCr5**. 2023. 13p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2023.

RESUMO

O processo convencional de forjamento a quente para produzir componentes demanda grande energia devido aos tratamentos térmicos. A utilização de aços modificados pode reduzir esses gastos, eliminando etapas como têmpera e revenimento. Neste estudo foi comparada a usinabilidade de pré-formas de engrenagem cônicas obtidas em cenário industrial do aço bainítico de resfriamento contínuo DIN 18MnCrSiMo6-4 e do aço automotivo de microestrutura ferrítico-perlítica DIN 20MnCr5 comumente utilizado na indústria. Foram estudados também os efeitos das diferentes rotas de forjamento nesses materiais. Foram coletados dados de força de usinagem, rugosidade, dureza e metalografia. Os resultados obtidos mostram que o aço bainítico de resfriamento contínuo exige mais força para remoção de material devido principalmente à sua maior dureza e menor concentração de enxofre quando comparado com o aço convencional. Contudo, o aço bainítico apresentou melhores resultados de acabamento superficial.

Palavras-chave: usinagem, forjamento, bainita.

ZACCANI, CC. **Comparative Analysis of Machinability between Continuous Cooling Bainitic Steel DIN 18MnCrSiMo6-4 and DIN 20MnCr5 Steel.** 2023. 13p. Mechanical Engineering End-of-Course Graduation Monography, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2023.

ABSTRACT

The conventional hot forging process for producing components demands significant energy due to thermal treatments. The use of modified steels can reduce these expenses by eliminating steps like quenching and tempering. This study compared the machinability of preforms from industrial scenarios: the bainitic steel DIN 18MnCrSiMo6-4 with continuous cooling and the automotive ferritic-pearlitic steel DIN 20MnCr5 commonly used in the industry. The effects of different forging routes on these materials were also investigated. Data on machining force, surface roughness, hardness, and metallography were collected. The results indicate that the bainitic steel with continuous cooling requires more machining force due primarily to its higher hardness and lower sulfur content when compared to conventional steel. However, the bainitic steel presented better results in surface finish.

Keywords: machining, forging, bainite.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
3	MATERIAIS E MÉTODOS	4
3.1	Caracterização dos Corpos de Prova.....	4
3.2	Usinagem dos Corpos de Prova	5
3.3	Medição de Forças	6
3.4	Medição de Rugosidade e Imagens de Textura.....	7
3.5	Análise Metalográfica e Medição de Microdureza	7
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	8
4.1	Forças de Fresamento.....	9
4.2	Rugosidade.....	10
4.3	Microestrutura e Microdureza.....	8
5	CONCLUSÕES	12
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	12
6	REFERÊNCIAS	12

1 INTRODUÇÃO

O forjamento a quente é um processo de conformação mecânica que envolve a deformação plástica de metais a altas temperaturas, geralmente acima da temperatura de recristalização. Essa técnica é utilizada para moldar o material em diferentes formas e tamanhos, produzindo peças com propriedades mecânicas superiores [Bhadeshia, 2015]. Grande quantidade de energia é necessária para produzir um componente pelo método de forjamento a quente convencional devido aos tratamentos térmicos envolvidos [Buchmayr, 2016].

As principais etapas do forjamento a quente incluem a austenitização, o recalçamento, o forjamento em matriz, a rebarbação e o resfriamento. Na etapa de austenitização, o material é aquecido a uma temperatura elevada para que sua estrutura mude para a fase austenítica, tornando-o mais maleável e facilitando a conformação. Em seguida, o recalçamento é realizado, onde o material aquecido é colocado entre matrizes de forjamento e submetido a pressão intensa para moldá-lo na forma bruta desejada. Após o recalçamento, o material pode passar por um processo adicional de forjamento em matriz, que permite uma conformação mais precisa e detalhada do produto final. Após a conformação, podem surgir rebarbas ou excessos de material nas bordas da peça, e o processo de rebarbação é realizado para remover essas imperfeições e obter uma superfície mais limpa e uniforme. Por fim, o resfriamento é realizado de forma controlada para evitar deformações indesejadas e reduzir tensões internas. O material pode ser resfriado ao ar ou por meio de técnicas específicas, como têmpera, para obter as microestruturas e propriedades mecânicas desejadas [Bhadeshia, 2015]. A Figura 1.1 mostra a rota de forjamento tradicional e o resfriamento controlado.

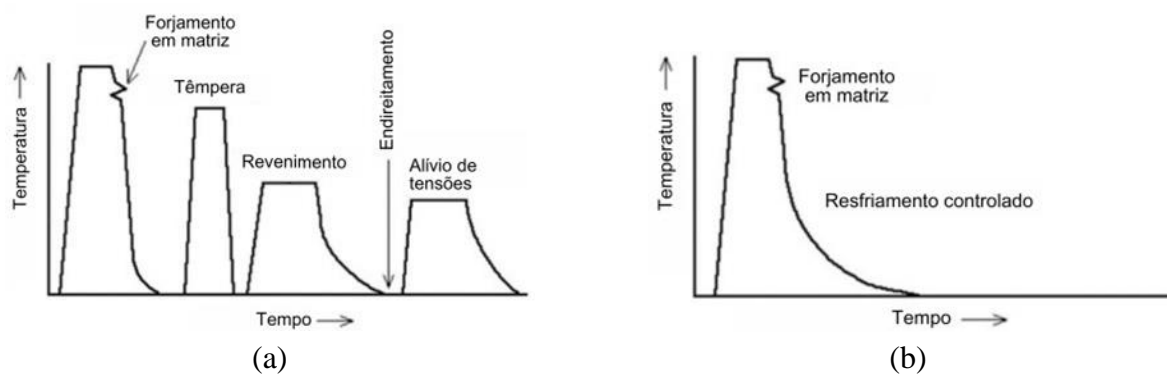


Figura 1.1 – Tratamentos térmicos no forjamento de aço. (a) Rota tradicional com têmpera e revenimento. (b) Rota de resfriamento controlado [adaptado de Bhadeshia, 2015].

O processo de forjamento é amplamente utilizado na indústria para produzir uma ampla variedade de peças, desde componentes automotivos e aeronáuticos até equipamentos industriais e ferramentas, devido à sua capacidade de conferir maior resistência, tenacidade e durabilidade aos materiais conformados [ASM International, 1991].

O uso de aços modificados é uma opção para reduzir os gastos energéticos o tempo de fabricação do componente devido à possibilidade de se atingir uma boa relação entre resistência mecânica e tenacidade após os processos de forjamento com resfriamento contínuo, sem necessidade das etapas de têmpera e revenimento [Buchmayr, 2016]. Assim, enquanto os aços temperados e revenidos utilizam um tratamento térmico complexo, incluindo endurecimento, recozimento e alívio de tensões, os aços de resfriamento contínuo só requerem resfriamento controlado a partir da temperatura de forjamento a quente. Devido à configuração mais simples,

esses aços podem economizar tempo e recursos de produção, reduzindo assim os custos de produção em até 90% [Eggbauer e Buchmayr, 2015].

Produto de uma transformação austenítica encontrado em alguns aços e ferros fundidos, a bainita se forma em temperaturas entre 540 °C e 215 °C. A microestrutura consiste em ferrita e uma fina dispersão de cementita na forma de agulhas ou placas dependendo da temperatura da transformação. A bainita é em geral mais resistente e mais dura que aços perlíticos; ainda assim, exibe uma combinação desejável de resistência e ductilidade [Callister e Rethwisc, 2020]. As microestruturas formadas predominantemente por bainita superior em forma de ripas paralelas e finas exibem maiores valores de tenacidade ao impacto que aquelas com morfologia de bainita granular, consistindo em uma estrutura de ferrita equiaxial e ilhas discretas de martensita e austenita [Caballero, et al., 2010]. A Figura 1.2 ilustra as diferentes morfologias da bainita.

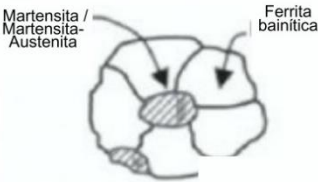
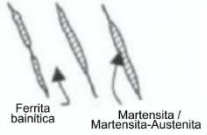
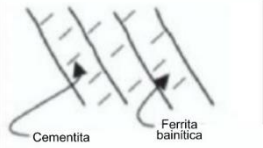
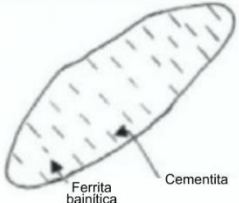
Tipo de bainita	Morfologia	Descrição
Bainita Granular	Ferrita irregular com Martensita-Austenita	
Bainita superior em ripas livre de cementita	Ferrita em ripas com Martensita-Austenita nas bordas	
Bainita inferior em ripas	Ferrita em ripas com cementita no interior das ripas	
Bainita inferior em placas	Ferrita em placas com cementita no interior da placa	

Figura 1.2 – Classificação morfológica da bainita [adaptado de Caballero, 2012]

A bainita é comumente formada pelo tratamento térmico de austêmpera, que consiste em austenitizar o material e resfriar rapidamente em um banho a uma temperatura entre 300 e 500 °C, mantendo por um determinado período, seguido pelo resfriamento ao ar em temperatura ambiente. Entretanto, os aços bainíticos avançados apresentam formação de bainita através do resfriamento controlado, sem necessidade de tratamentos térmicos posteriores. Para algumas aplicações, o resfriamento contínuo, a partir de temperaturas de laminação ou forjamento a quente, pode ser uma boa solução para obter condições de processamento robustas e reduzir os custos associados ao longo tempo de espera isotérmica, bem como aos tratamentos térmicos

subsequentes necessários [Rivas, 2022]. É bem estabelecido que a resistência da bainita é controlada principalmente pelo refinamento da microestrutura. Para aços com $C < 0,2\%$ em peso, forma-se predominantemente bainita granular [Buchmayr, 2016].

Para comprovar a aplicabilidade do processamento termomecânico de resfriamento contínuo são necessários diversos estudos sobre os efeitos de parâmetros de forjamento e seus efeitos nestes materiais. Silveira (2020) estudou o efeito de diversas rotas de forjamento na microestrutura e propriedades mecânicas dos aços bainíticos de resfriamento contínuo. Turra (2021) submeteu esse material a uma rota de forjamento industrial e comparou-o com o aço utilizado atualmente analisando microestrutura, resistência mecânica, ductilidade e tenacidade. Dalcin (2021) estudou o efeito de diversos parâmetros de nitretação desse aço visando a obtenção de uma camada mais resistente e maior dureza superficial.

Outra maneira de se avaliar os efeitos do forjamento é através de ensaios de usinabilidade. A usinabilidade é uma propriedade que depende da interação entre o processo de fabricação e as características do material da peça. No caso dos aços, a composição química, a microestrutura e os tratamentos térmicos e mecânicos têm um efeito acentuado na usinabilidade dessa classe de materiais metálicos. Tão importante quanto as propriedades de desempenho (resistência mecânica, à corrosão etc.), as propriedades de fabricação como a soldabilidade e a usinabilidade devem sempre ser consideradas na seleção de materiais metálicos. Em princípio, não se pode dizer que um material é melhor que outro. Dependendo das condições de contorno impostas em determinada seleção, é que se pode analisar se a seleção de um determinado material apresenta vantagens sobre outro. Desse modo, deve-se considerar as características exigidas pelo projeto e engenharia, que são as características técnicas, em seguida, devem ser considerados os aspectos de fabricação da peça, inclusive pensando nos equipamentos disponíveis em determinada instalação, que são as características tecnológicas, e, por último, deve-se considerar o aspecto comercial [Baptista, 2002].

A grandeza da força de usinagem é um critério de usinabilidade, pois, geralmente, materiais de difícil corte também apresentam trabalhos das forças de cisalhamento, deformação plástica e atrito maiores. As componentes da força de usinagem são influenciadas principalmente pelo material da peça, pelas condições de corte e pela geometria da ferramenta. Não é possível estabelecer uma relação ideal entre a estrutura do material da peça e a pressão específica de corte, devido aos diversos fatores intrínsecos ao processo de usinagem. Normalmente, a força de usinagem diminui com o aumento da temperatura na zona de corte. Ao mesmo tempo, todas as medidas que facilitam o fluxo de cavaco (fluido de corte, grande ângulo de saída) levam a uma diminuição das forças [Baptista, 2002].

A rugosidade de uma superfície está diretamente relacionada à usinabilidade do material. Por exemplo, uma superfície muito rugosa pode indicar dificuldades no processo de usinagem, com formação de cavacos irregulares e problemas de acabamento [Machado et al., 2015]. A especificação da rugosidade é feita de acordo com as exigências da aplicação, considerando que diferentes superfícies são necessárias para diversas finalidades. Processos de usinagem e tratamentos térmicos são fatores que influenciam diretamente na rugosidade dos materiais [Bernardos e Vosniakos, 2002].

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo avaliar a usinabilidade por fresamento frontal de um aço bainítico de resfriamento contínuo em comparação com a de um aço comumente utilizado na indústria para obtenção de engrenagens devido à sua boa usinabilidade. Esta avaliação comparativa consistirá na análise dos dados adquiridos de força, rugosidade, microdureza e metalografia. Também serão investigados os efeitos das diferentes rotas de forjamento destes

materiais na sua usinabilidade, pois estas afetam a microestrutura e consequentemente as propriedades finais do componente forjado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentados a caracterização dos corpos de prova utilizados, as metodologias dos ensaios de fresamento e sua medição de forças, rugosidade, metalografia e microdureza. De acordo com Gonzales (1992), os melhores parâmetros de corte e as características da fresa devem ser associados também às condições metalúrgicas dos materiais. Dessa forma, deve-se utilizar a análise química, a dureza e a microestrutura para identificar as melhores combinações, capazes de promover vantagens na usinabilidade.

3.1 Caracterização dos Corpos de Prova

Neste trabalho foram utilizados o aço bainítico de resfriamento contínuo DIN 18MnCrSiMo6-4 da empresa Swiss Steel e o aço DIN 20MnCr5, comumente aplicado na indústria automotiva. A Tabela 3.1 apresenta a composição química dos materiais obtida através do espectrômetro de emissão óptica Bunker Q2 ION e a Figura 3.1 a microestrutura dos aços conforme recebido, na forma de tarugos cilíndricos. O aço bainítico é formado por bainita granular e ferrita, enquanto o aço DIN 20MnCr5 apresenta microestrutura formada por ferrita e perlita.

Tabela 3.1 – Composição química dos materiais estudados [Turra, 2021].

Aço	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
DIN 20MnCr5	0,214	0,231	1,400	0,020	0,029	0,184	1,225	-
DIN 18MnCrSiMo6-4	0,189	1,190	1,350	0,009	0,015	0,063	1,170	0,263

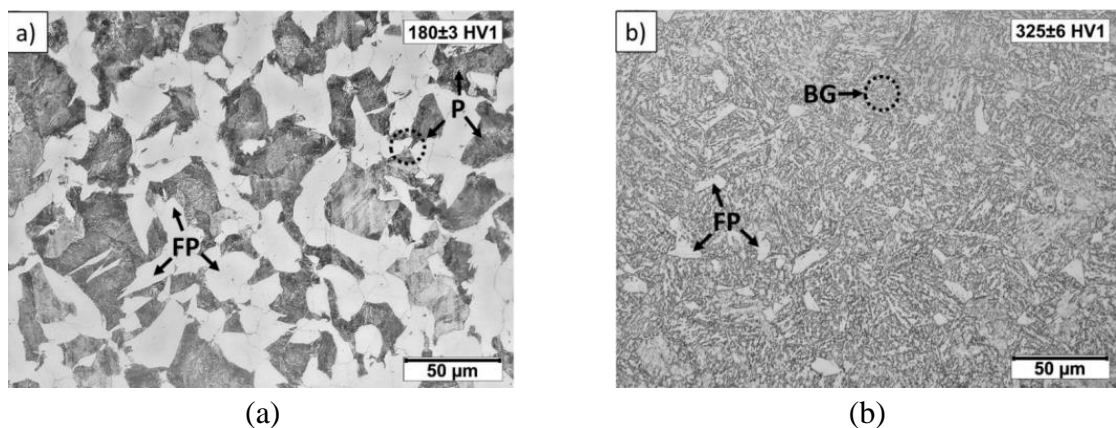


Figura 3.1 – Microestrutura dos aços conforme recebido: (a) DIN 20MnCr5
(b) DIN 18MnCrSiMo6-4 [Turra, 2021].

Dois tarugos de cada material com 38 mm de diâmetro e 54 mm de altura (Fig. 3.2a) foram austenitizados a 1100 °C em um forno indutivo com tempo de encharque de cinco minutos para homogeneização da temperatura. Após, foram conformados em cenário industrial com uso de uma matriz fechada e uma prensa de fricção em uma pré-forma de engrenagem cônica

(Fig. 3.2b). Posteriormente as pré-formas são usinadas na forma de engrenagens cônicas de dentes helicoidais (Fig. 3.2c). As pré-formas foram então resfriadas com ar calmo e ar forçado. A Tabela 3.2 sumariza os parâmetros utilizados nas quatro amostras.

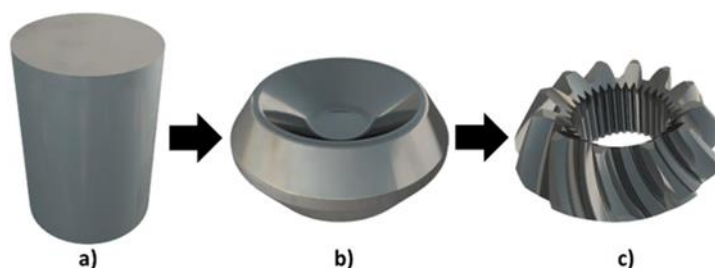


Figura 3.2 – Processamento termomecânico para obtenção da engrenagem: (a) tarugo; (b) pós forjamento; (c) pós usinagem na empresa [Turra, 2021].

Tabela 3.2 Parâmetros de forjamento dos corpos de prova.

Corpo de prova	Material	Temperatura de austenitização	Resfriamento
CP1	DIN 20MnCr5	1100 °C	Ar calmo
CP2			Ar forçado
CP3	DIN 18MnCrSiMo6-4		Ar calmo
CP4			Ar forçado

3.2 Usinagem dos Corpos de Prova

Os corpos de prova (Fig. 3.2b) foram fresados no centro de usinagem ROMI Discovery 308 (Figura 3.3) disponível no Laboratório de Automação e Usinagem (LAUS-UFRGS). Essa máquina-ferramenta possui uma rotação máxima de 4000 rpm e potência máxima de 5,5 kW.



Figura 3.3 – Centro de usinagem ROMI Discovery 308 [Cortesia do LAUS].

A ferramenta de corte utilizada consistiu em um cabeçote fresador Mitsubishi BRP6P-040A03R com 30 mm de diâmetro nominal para três insertos Mitsubishi RPMT 1204M0E-JS

VP15TF. Durante o fresamento, foi empregado um conjunto de três arestas novas para a usinagem de cada corpo de prova (CP1 a CP4).

Um dispositivo de fixação foi desenvolvido com o intuito de fixar os corpos de prova com dimensões específicas (Fig. 3.4a) no dinamômetro piezelétrico Kistler 9272 para a aquisição dos dados de força. A Figura 3.4b mostra a peça presa ao dispositivo antes da usinagem.

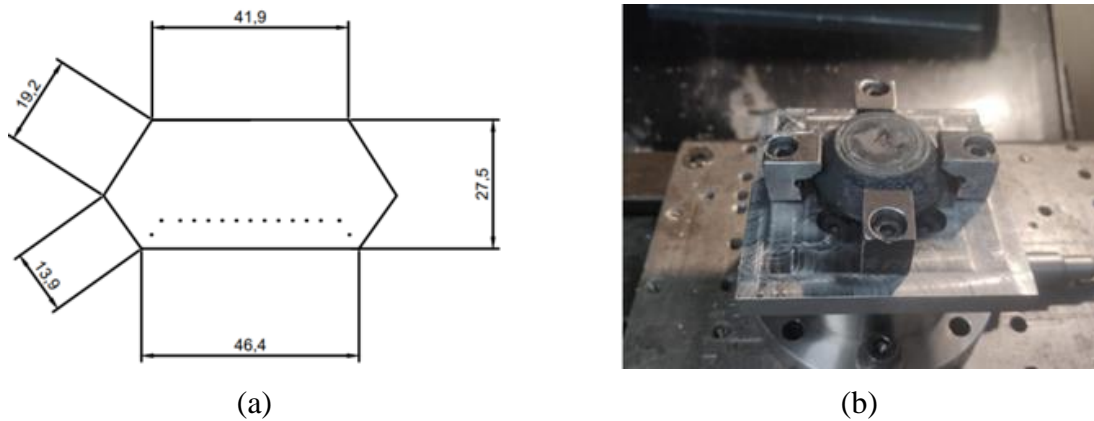


Figura 3.4 – (a) Desenho das dimensões dos corpos de prova. (b) Imagem do corpo de prova preso no dispositivo de fixação

Foram realizados dois passes ao longo de todo o comprimento na região central de cada corpo de prova; o primeiro para tirar a carepa e nivelar a amostra e o segundo para gerar a superfície a ser analisada. A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros de corte utilizados. Todos os passes foram realizados com a aplicação do fluido de corte em abundância BD Fluid B90 da Bondmann Química.

Tabela 3.3 – Parâmetros de fresamento utilizados.

Parâmetro	Valor
Velocidade de corte (v_c)	120 mm/min
Avanço por dente (f_z)	0,3 mm/dente
Profundidade axial de corte (a_p)	1,0 mm

3.3 Medição de Forças

A fim de adquirir as componentes ortogonais da força de usinagem (F_x , F_y , F_z), utilizou-se o sistema monitor do LAUS (Fig. 3.5) formado por dinamômetro piezelétrico Kistler modelo 9272, amplificador de carga Kistler modelo 5070A e placa de aquisição de sinais Measurement Computing modelo PCIM-DAS 1602/16 acoplada ao microcomputador dedicado com software LabVIEW 9.0. Foi considerada uma taxa de aquisição de 1,0 kS/s.

A partir das componentes ortogonais (F_x , F_y , F_z), calcula-se a força de usinagem (F_u) através da Equação (3.1).

$$F_u = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3.1)$$

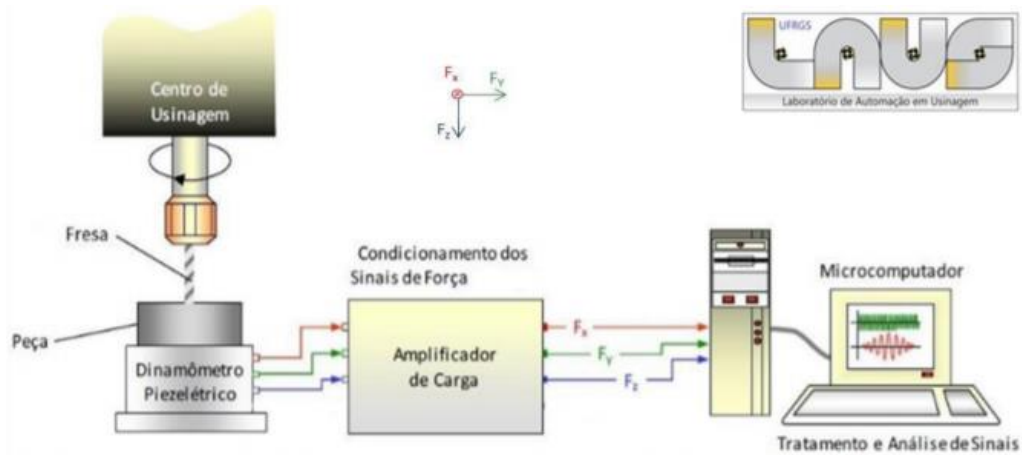


Figura 3.5 – Sistema monitor [Cortesia do LAUS].

Na determinação dos valores de F_u , considerou-se a média aritmética de 1000 pontos coletados durante o fresamento na região estável da amostra usinada, isto é, desconsiderando a entrada e a saída da fresa na peça.

3.4 Medição de Rugosidade e Imagens de Textura

Para avaliar a rugosidade das superfícies fresadas das quatro amostras, empregou-se o rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ 201P (Fig. 3.6a), o qual possui resolução de $0,01 \mu\text{m}$. Para a medição, adotou-se um comprimento de amostragem $l_e = 0,8 \text{ mm}$ e um comprimento de avaliação $l_m = 5 \times 0,8 = 4,0 \text{ mm}$. Os perfis de rugosidade e os parâmetros R_a e R_z foram coletados com auxílio do software SurfTest SL Tools. R_a corresponde à média aritmética dos desvios absolutos da superfície em relação à linha central no comprimento l_m , e R_z representa a média aritmética das cinco alturas entre os picos e vales de cada comprimento l_e [NBR ISO 4287, 2002]. Além disso, imagens das texturas das superfícies usinadas foram capturadas utilizando o microscópio digital USB Dino Lite modelo AM 413 ZT (Fig. 3.6b) auxiliado pelo software Dino Capture 2.0.



Figura 3.6 – (a) Rugosímetro Mitutoyo SJ-201P; (b) Microscópio Dino Lite AM 413 ZT

3.5 Análise Metalográfica e Medição de Microdureza

Com o objetivo de compreender melhor as microestruturas resultantes das diferentes rotas de conformação às quais os corpos de prova foram expostos antes e após a usinagem, análises

metalográficas foram realizadas nas amostras. Esses procedimentos permitem examinar as propriedades e a qualidade estrutural dos materiais em um nível microscópico.

A superfície da amostra metálica foi então preparada, por meio de lixamento e polimento, para remover qualquer camada superficial e garantir uma superfície plana e homogênea. Após, as amostras sofreram ataque químico com Nital 5% (5 ml HNO_3 + 95 ml álcool etílico) durante cinco segundos. Durante o processo de imersão, o ácido nítrico na solução ataca seletivamente certos componentes do metal, como grãos, inclusões e outros constituintes microestruturais. Isso resulta em mudanças na aparência da superfície da amostra. Através do microscópio óptico Olympus FX50-100x do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM-UFRGS) (Fig. 3.7a), os diferentes constituintes da microestrutura do material foram identificados. As análises se concentraram na região próxima à superfície fresada.

O ensaio de microdureza Vickers é um método para medir a dureza de materiais em escalas microscópicas. Ele usa um penetrador de diamante em forma de pirâmide de base quadrada para criar uma impressão na superfície da amostra. A dureza Vickers é calculada a partir das medições das diagonais da impressão. Essas análises combinadas fornecerão informações abrangentes sobre as características físicas e mecânicas dos quatro corpos de prova fresados. Foram feitas três medidas em região próxima à área fresada em cada corpo de prova com uma carga de 5 kg (HV_5) e tempo de ensaio de 10 s utilizando o microdurômetro Pantec MV50A do LdTM (Fig. 3.7b).

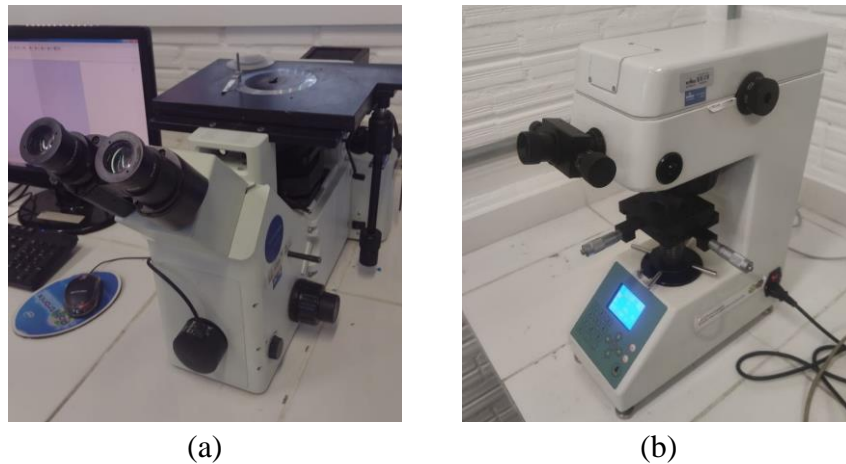


Figura 3.7 – (a) Microscópio Olympus FX50-1000x; (b) Microdurômetro Pantec MV50A

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados do fresamento dos corpos de prova: força de usinagem, rugosidade, microdureza e metalografia, interligando os resultados obtidos nos ensaios com as propriedades intrínsecas dos materiais em questão.

4.1 Microestrutura e Microdureza

A Figura 4.1 mostra as imagens das microestruturas obtidas dos quatro corpos de prova estudados. Observa-se que o aço bainítico de resfriamento contínuo (CP3 e CP4) apresenta uma microestrutura mais refinada quando comparado ao aço convencional (CP1 e CP2).

O aço DIN 20MnCr5, que nas condições de recebimento (Figura 3.1a) apresenta ferrita e perlita, após o forjamento e fresamento apresenta uma estrutura formada majoritariamente por

bainita e ferrita. O resfriamento a ar forçado aumentou a proporção de bainita e gerou um maior refinamento de microestrutura

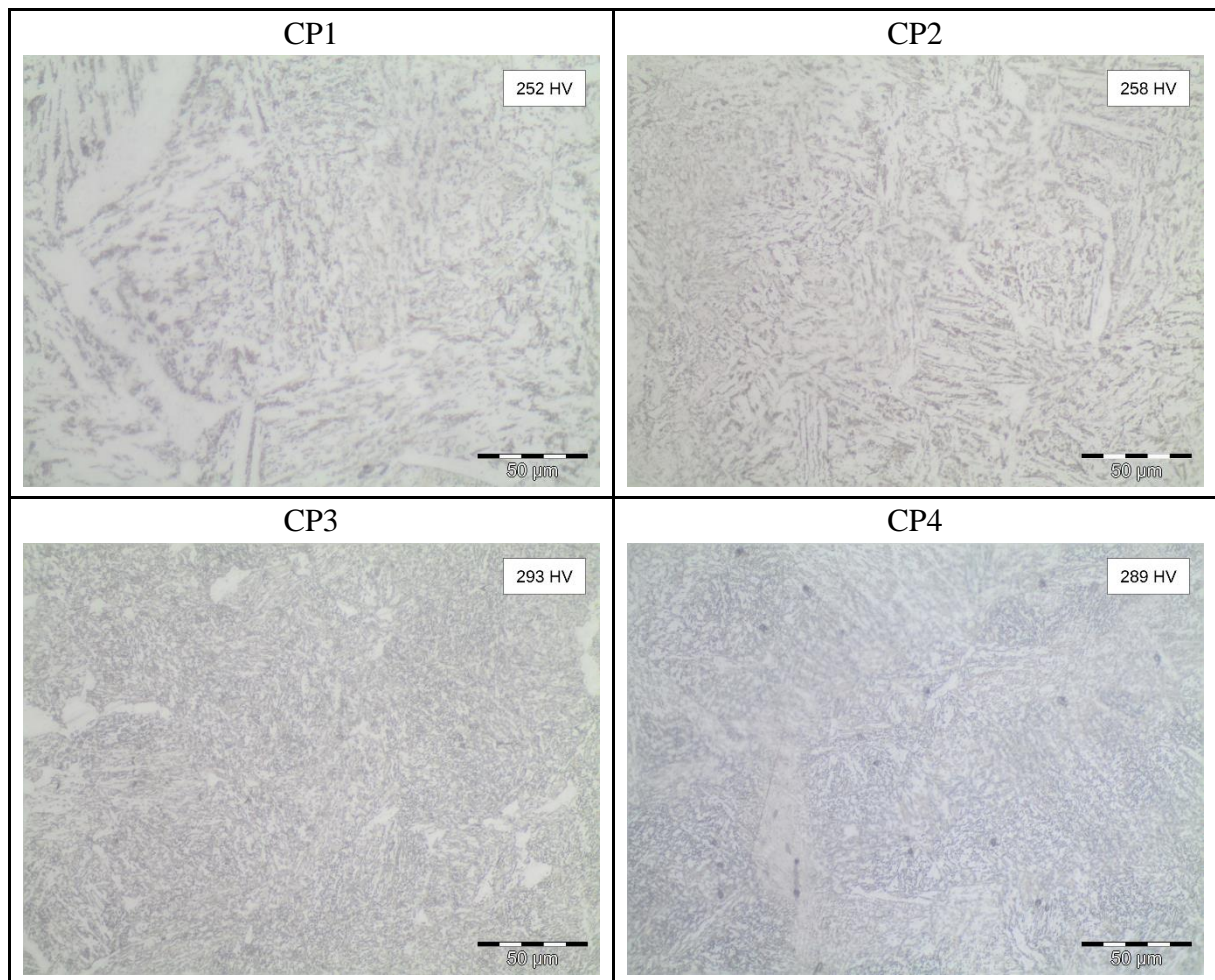


Figura 4.1 – Metalografia dos corpos de prova após a usinagem

O aço DIN 18MnCrSiMo6-4 após o forjamento apresenta majoritariamente bainita granular com uma pequena porção de ferrita poligonal (blocos brancos). Quando comparado com as condições conforme recebido (Figura 3.1b), nota-se que houve um refinamento na microestrutura, com diminuição na quantidade e no tamanho da ferrita poligonal.

As durezas e as microestruturas obtidas no presente trabalho foram semelhantes às encontradas por Turra et al, 2021, que estudaram o efeito das deformações em diferentes temperaturas nestes mesmos aços e relacionaram o maior refinamento do grão do aço bainítico ao menor tamanho de seu grão austenítico.

4.2 Forças de Fresamento

As médias aritméticas das forças de usinagem para os dois passes nos quatro corpos de prova são apresentadas na Figura 4.2. Observam-se diferenças de amplitudes entre os passes provavelmente devido à menor profundidade axial de corte do primeiro ($a_p < 1,0$ mm). Vale lembrar que o primeiro foi realizado para tirar a carepa e nivelar a amostra e o segundo para gerar a superfície a ser analisada com a profundidade de corte correta ($a_p = 1,0$ mm).

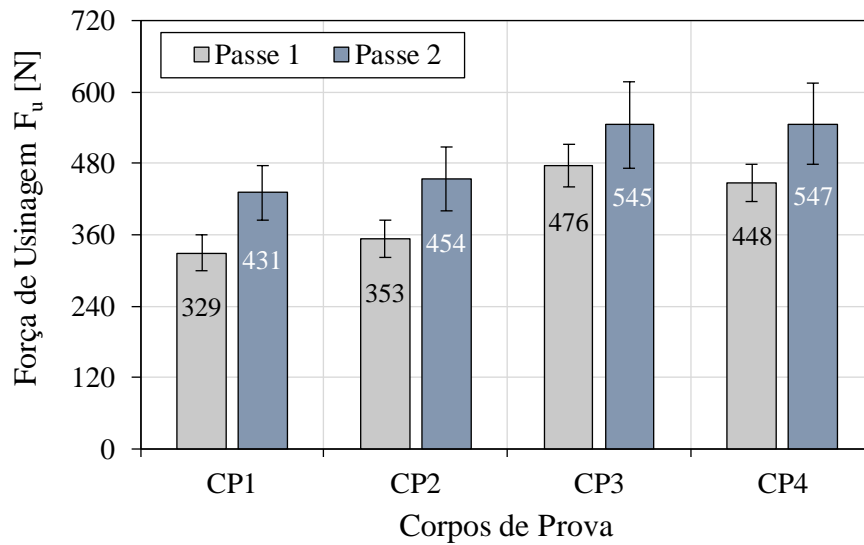


Figura 4.2 – Gráfico dos resultados de força de usinagem (F_u) para os dois passes.

Os corpos de prova do aço bainítico de resfriamento contínuo (CP3 e CP4) apresentaram maiores valores médios de F_u , independentemente do método de resfriamento. Isso mostra que o aço DIN 18MnCrSiMo6-4 apresenta uma pressão específica de corte maior que o aço DIN 20MnCr5, resultando em uma maior resistência à remoção de material.

O aço convencional (CP1 e CP2) apresenta uma dureza 20% menor que o do aço bainítico de resfriamento contínuo (CP3 e CP4) devido principalmente a sua microestrutura que possui uma fração maior de ferrita e um tamanho de grão médio maior. Uma dureza maior tende a dificultar o processo de usinagem pois há uma maior resistência à deformação e à remoção de cavacos o que exige maior potência da máquina e contribui com o desgaste prematuro da ferramenta de corte. Além disso, a maior concentração de enxofre no aço DIN 20MnCr5 pode ter favorecido o corte. Segundo Diniz, et al. (2008), o enxofre diminui a ductilidade do material e a resistência ao cisalhamento das micro soldas produzidas no desgaste por adesão, além de diminuir a resistência dos cavacos, facilitando sua fratura e evacuação. Os dois materiais analisados apresentam níveis de manganês semelhantes. De acordo com Machado, et al. (2015), quando o manganês se combina com enxofre, originam-se inclusões de sulfeto de manganês, as quais desempenham um papel crucial na usinagem do material ao se deformarem plasticamente. Isso resulta na formação de planos de menor resistência, consequentemente reduzindo a quantidade de energia requerida para a ocorrência e disseminação de trincas.

Para o aço convencional DIN 20MnCr5, observa-se ainda que o resfriamento a ar forçado (CP2) gerou uma força média 5,3% maior que o resfriamento a ar calmo (CP1). No caso, a curva de resfriamento mais larga, que permite um rearranjo dos átomos em estruturas de maior granulometria e predominantemente ferríticas, resultou em uma estrutura mais macia. A dureza menor da amostra CP1 gerou o pior acabamento superficial nesse estudo.

4.3 Rugosidade

A Figura 4.3 apresenta macrografias dos corpos de prova e a Tabela 4.1 a média aritmética dos valores de rugosidade R_a e R_z medidos após o fresamento dos quatro corpos de prova. Observa-se nas imagens que a textura do aço DIN 18MnCrSiMo6-4 (CP3 e CP4) possui marcas mais suaves, resultando em perfis de rugosidade com picos menos elevados e vales menos profundos. Consequentemente, os valores de rugosidade R_a e R_z foram menores.

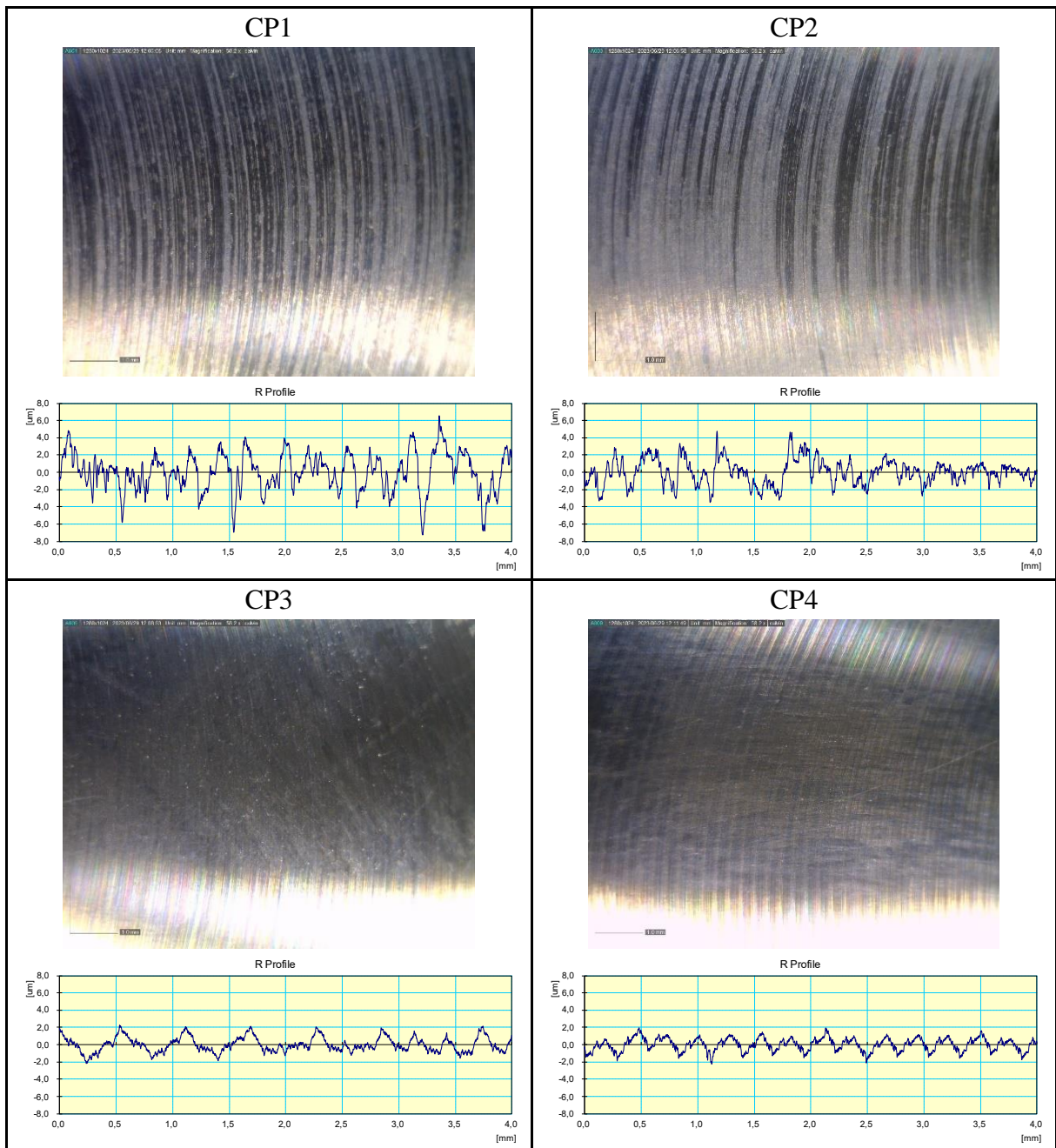


Figura 4.3 – Superfícies e perfis de rugosidade dos corpos de prova.

Tabela 4.1 – Valores de rugosidade medidos nos corpos de prova

Amostra	R_a (μm)	R_z (μm)
CP1	$1,75 \pm 0,32$	$11,50 \pm 3,74$
CP2	$1,22 \pm 0,08$	$7,00 \pm 0,89$
CP3	$0,67 \pm 0,04$	$3,69 \pm 0,29$
CP4	$0,70 \pm 0,10$	$3,62 \pm 0,26$

Além disso, o aço DIN 18MnCrSiMo6-4 apresentou resultados muito parecidos para ambos os meios de resfriamento; já no aço DIN 20MnCr5, o tratamento térmico tem relevante efeito no acabamento superficial.

O efeito resultante de dois fatores (queda de ductilidade *vs.* aumento de dureza) é que determina a melhoria ou não da usinabilidade [Gonzales, 1992]. Valores altos para a dureza significam dificuldades de usinagem (aumento das forças), ao passo que valores médios e baixos se associam com boas propriedades de usinabilidade, mas que as medidas de dureza não serviriam de um modo absoluto como guia para determinação de verdadeira usinabilidade [Chiaverini, 1988]. Entretanto, o aumento da dureza dificulta o empastamento do cavaco e a adesão de material sobre a ferramenta, e reduz a formação de rebarbas na superfície usinada [Machado et al., 2015]. Como supracitado, o aço bainítico de resfriamento contínuo (CP3 e CP4) possui uma dureza maior que o do aço convencional (CP1 e CP2). Isso pode ter dificultado o empastamento dos cavacos e reduzido a ocorrência de falhas na superfície usinada, favorecendo o acabamento na usinagem do aço DIN 18MnCrSiMo6-4.

5 CONCLUSÕES

Foram investigadas comparativamente as usinabilidades do aço bainítico de resfriamento contínuo DIN 18MnCrSiMo6-4 e do aço ferrítico-perlítico DIN 20MnCr5 no processo de fresamento frontal. A escolha do material ideal para usinagem exige uma análise criteriosa das necessidades específicas da aplicação. Através da análise dos resultados de força, rugosidade, microdureza e metalografias, as seguintes conclusões foram obtidas:

- As diferentes taxas de resfriamento não apresentaram efeito notável nos resultados para o DIN 18MnCrSiMo6-4. Para o aço DIN 20MnCr5, uma menor taxa de resfriamento gerou uma menor dureza, menor força de usinagem e um acabamento superficial inferior.
- O aço DIN 20MnCr5 exigiu menos esforços na ação de corte devido principalmente à sua menor dureza (maior proporção de ferrita em sua microestrutura) e à maior concentração de enxofre (fragilização do cavaco).
- O aço DIN 18MnCrSiMo6-4 possui uma dureza maior que o do aço convencional. Isso pode ter dificultado o empastamento dos cavacos e reduzido a ocorrência de falhas na superfície usinada, contribuindo com a redução da rugosidade.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Abordar outros aspectos não menos importantes como encruamento, ductibilidade e condutividade térmica dos materiais.
- Realizar ensaios de longa duração visando avaliar o desgaste da ferramenta de corte.

6 REFERÊNCIAS

ASM International, 1991. *ASM Metals Handbook, Volume 4: Heat Treating*. Novelty, USA ASM International.

Baptista, A. L. B., 2002. Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços. *REM: Revista Escola de Minas*, vol. 55, n. 2, p. 103-109.

Bernardos, P. G. e Vosniakos G. C., 2002. Predicting surface roughness in machining: a. *Internactional Journal of Machine tools and Manufacture*, v. 43, n. 8, p. 833-844.

Bhadeshia, H. K. D. H., 2015. *Bainite in Steels - Theory and Practice*. 3. ed., Leeds, London: Maney Publishing.

Buchmayr, B., 2016. Critical Assessment 22: Bainitic Forging Steels. *Materials Science and Technology*, v. 32, n. 6, p. 517-522.

Caballero, F. G., Capdevila, C., Chao, J. Cornide, J., Garcia-Mateo, C., Roelofs, H., Hasler, S. e Mastrogiacomio, G., 2010. The microstructure of continuously cooled tough bainitic steels. *Proceedings of the International Conference Super-High Strength Steels*, vol. 2, p. 1-8.

Caballero, F. G., Roelofs, H., H., Hasler, Capdevila, C., Chao, J. Cornide, J., Garcia-Mateo, C., 2012. Influence of bainite morphology on impact toughness of continuously cooled cementite free bainitic steels. *Materials Science and Technology*, vol 28, p95-102.

Callister, W. D. e Rethwisc, D. G., 2020. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC.

Chiaverini, V., 1988. *Aços e Ferros Fundidos* 6.ed., São Paulo: ABM.

Dalcin, R. L., Rocha, A. S., Castro, V. V., Oliveira, L. F., Neves, J. C. K., Silva, C. H. e Malfatti, C. F., 2021. Influence of plasma nitriding with a nitrogen rich gas composition on the reciprocating sliding wear of a DIN 18MnCrSiMo6-4 steel. *Materials Research*, vol. 24, n. 4, e20200592.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C. e Coppini, N. L., 2008. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 4. ed. São Paulo: Artliber.

Eggbauer, G. e Buchmayr, B., 2015. High-strength bainitic steels for forged products. *Berg Huettenmaenn Monatsh*, v. 160, p. 209-213.

Gonzales, G. S. (1992) *Aspectos metalúrgicos da usinabilidade do aço SAE 12L14 submetido a crescentes níveis de deformação a frio por trefilação*. 100 fls. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T. e Silva, M. B., 2015. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 3. ed. São Paulo: Blucher.

NBR ISO 4287, 2002. *Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Rivas, L. M., 2022. Viewpoints on technological aspects of advanced. *Metals*, v. 12, n. 2 p. 195

Silveira, A. C. F., Bevilaqua, W. L., Dias, V. W., Castro, P. J., Epp, J. e Rocha, A. S., 2020. Influence of hot forging parameters on a low carbon continuous cooling bainitic steel microstructure. *Metals*, v. 10, n. 5, p. 601.

Turra, C. J., 2021. *Caracterização Mecânica e Metalúrgica de um Aço Bainítico de Resfriamento Contínuo Aplicado no Processo Industrial de Forjamento a Quente*. 104 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica, UFRGS, Porto Alegre, RS.