



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SARA OLIVEIRA SILVA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE NA USINAGEM DO
AÇO ABNT 1020 UTILIZANDO BROCAS DE AÇO RÁPIDO COM E SEM
REVESTIMENTO DE TiN

TERESINA

2025

SARA OLIVEIRA SILVA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE NA USINAGEM DE AÇO
ABNT 1020 UTILIZANDO BROCAS DE AÇO RÁPIDO COM E SEM REVESTIMENTO
DE TiN

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Piauí como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Petteson Linniker Carvalho Serra.

TERESINA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Silva, Sara Oliveira

S586a Análise da influência da velocidade de corte na usinagem do aço ABNT 1020 utilizando brocas de aço rápido com e sem revestimento de TiN / Sara Oliveira Silva. - 2025.
61 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central, 2025.

Orientador : Prof Dr. Petterson Linniker Carvalho Serra .

1. Brocas helicoidais . 2. Aço rápido . 3. Furação . 4. Revestimento. I.Título.

CDD - 620

Elaborado por Maria Rosismar Farias CRB 3/631

SARA OLIVEIRA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE NA USINAGEM DO
AÇO ABNT 1020 UTILIZANDO BROCAS DE AÇO RÁPIDO COM E SEM
REVESTIMENTO DE TiN**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Piauí como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 17/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Petteson Linniker Carvalho Serra (Orientador)

Instituto Federal do Piauí

Prof. Dr. Marcos Guilherme Carvalho Bráulio Barbosa

Universidade Federal do Piauí

Prof. Dra. Jayna Kátia Dionísio dos Santos

Instituto Federal do Piauí

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me sustentado não só ao longo desses seis anos de curso, mas em toda a minha vida. Por ter estado comigo nos dias mais difíceis e ter me dado forças para continuar e realizar sonhos que eu nem sabia que tinha. Também agradeço aos meus pais, Melquisedeque e Seredânia por acreditarem em mim e nunca terem medido esforços para que esse sonho fosse possível, mesmo a quase 300 km de distância.

Quero agradecer também aos meus irmãos, Emanuel e Melissa, um em cada lado do estado e do país, que sempre estiveram ao meu lado, mas sempre me deram apoio e são uma inspiração de vida para mim.

Meus amigos de curso também merecem um lugar especial aqui: Jonas, Shaymar, Cicílio, Kaynan, Flávio e Maycon. Sem eles, esses seis anos teriam sido muito diferentes e sou muito grata por cada momento que enfrentamos. Às minhas amigas Maria Fernanda, Bárbara e Tatiane, um obrigado especial por estarem comigo há quase dez anos e à minha prima Thalyta.

Não posso deixar de mencionar meus professores Petteson, Jayna, Mário, Matias e Edivaldo Filho, que durante minha graduação foram exemplos de docência e que sempre me ajudaram quando possível e que são em quem me espelho para seguir uma carreira acadêmica. Uma menção também ao professor Marcos Guilherme, que se dispôs a me ajudar neste trabalho e que vai me acompanhar na minha jornada acadêmica a partir deste ano.

Por fim, agradeço aos técnicos dos laboratórios de materiais e usinagem, André e Stênio pelo acesso e por terem estado disponíveis quando precisei realizar os testes.

“É lá de casa que eu ganho a estrada e corro o
mundo inteiro. Tento, tombo, ergo, canto, luto,
vou e volto pra lá”

Marcos Almeida

RESUMO

O avanço dos processos de manufatura permitiu o desenvolvimento das operações de usinagem, desde a concepção de máquinas com controle numérico computadorizado (CNC) à criação de ferramentas mais resistentes ao desgaste, incluindo a aplicação de revestimentos superficiais. Esses fatores permitem que se utilize velocidades de corte mais altas e acelerem o processo produtivo. Por essa razão, este trabalho tem por objetivo analisar a influência da velocidade de corte no desgaste de brocas helicoidais de aço rápido com e sem revestimento de TiN e no acabamento superficial na usinagem do aço ABNT 1020. Foram analisados os seguintes aspectos: corrente elétrica requerida, temperatura das ferramentas antes e depois do processo, forma dos cavacos, rugosidade média dos furos, tolerância dimensional e microdureza próxima às bordas dos furos, além do desgaste de flanco das ferramentas. Através da análise dos resultados, constatou-se que o aumento da velocidade de corte não contribuiu para um bom acabamento superficial, nem de corrente elétrica, formação de cavacos ou desgaste da ferramenta. A presença de revestimento nas ferramentas levou a uma redução na rugosidade média e no desgaste de flanco máximo, mas apresentou resultados semelhantes às ferramentas não revestidas nos demais aspectos.

Palavras-chave: brocas helicoidais; aço rápido; furação; revestimento; velocidade de corte.

ABSTRACT

The advancement of manufacturing processes has allowed the development of machining operations, from the design of machines with computer numerical control (CNC) to the creation of more wear-resistant tools, including the application of surface coatings. These factors allow the use of higher cutting speeds and accelerate the production process. For this reason, this work aims to analyze the influence of cutting speed on the wear of high speed steel twist drills with and without TiN coating and surface finish in the machining of ABNT 1020 steel. The following aspects were analyzed: electric current, temperature of the tools before and after the process, chip shape, average roughness of the holes, dimensional tolerance and microhardness around the holes, in addition to the flank wear of the tools. Through the analysis of the results, it was found that the increase in cutting speed did not contribute to a good surface finish, nor required electric current, chip formation or tool wear. The presence of coating on the tools led to a reduction in average roughness and maximum flank wear, but presented similar results to uncoated tools in other aspects.

Keywords: twist drills; high speed steel; drilling; coating; cutting speed.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Tipos de usinagem	18
Figura 2	- Parâmetros de corte na furação	19
Figura 3	- Brocas de haste cônica e cilíndrica	20
Figura 4	- Partes de uma broca	21
Figura 5	- Detalhamento da ponta de uma broca	21
Figura 6	- Classificação da integridade superficial	26
Figura 7	- Indentador do ensaio de microdureza Vickers	27
Figura 8	- Tipos de desgaste	28
Figura 9	- Desgaste de flanco	29
Figura 10	- Metodologia empregada	30
Figura 11	- Broca (a) sem revestimento e (b) com revestimento	31
Figura 12	- Forno LT63013	32
Figura 13	- Corpos de prova submetidos a recozimento	33
Figura 14	- Máquina de Comando Numérico Romi D 600	33
Figura 15	- (a) Blocos antes do faceamento; (b) blocos após o faceamento	34
Figura 16	- Parâmetros recomendados pelo fabricante	35
Figura 17	- Instalação dos sensores de corrente	36
Figura 18	- Câmera termográfica Fluke Ti27	37
Figura 19	- Rugosímetro Mitutoyo SJ210	38
Figura 20	- Microdurômetro Shimadzu MHV-2T	39
Figura 21	- Blocos após o processo de furação (a) SR25, (b) CR25, (c) SR20, (d) CR20	40
Figura 22	- Monitoramento de corrente RMS no ensaio (a) SR25; (b) CR25; (c) SR20; (d) CR20	41
Figura 23	- Corrente média no processo de furação	42
Figura 24	- Temperaturas das ferramentas antes e depois da usinagem	42

Figura 25	-	Cavacos coletados no ensaio (a) SR25; (b) CR25; (c) SR20 e (d) CR20	43
Figura 26	-	Rugosidade obtidas nos ensaios (a) SR25 e CR25; (b) SR20 e CR20	45
Figura 27	-	Medida dos furos obtidas no (a) Bloco 1; (b) Bloco 2; (c) Bloco 3 e (d) Bloco 4	47
Figura 28	-	Microdureza Vickers próximas ao furo no ensaio (a) SR25, (b) CR25, (c) SR20, (d) CR20	49
Figura 29	-	Desgaste de flanco máximo obtido nas arestas de corte das brocas do Ensaio SR25 (a) e (b); Ensaio CR25 (c) e (d); Ensaio SR20 (e) e (f); e CR20 (g) e (h)	50
Figura 30	-	Desgaste de flanco máximo	51
Figura 31	-	Medidas dos furos no Bloco 1	56
Figura 32	-	Medidas dos furos no Bloco 2	57
Figura 33	-	Medidas dos furos no Bloco 3	58
Figura 34	-	Medidas dos furos no Bloco 4	59

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	Porcentagem
TiN	Nitreto de Titânio
v_c	Velocidade de corte
mm	Milímetro
R_a	Rugosidade média
R_q	Rugosidade quadrática
R_t	Diferença entre o picos e vales da superfície
R_z	Parâmetro bidimensional de altura máxima média
R_{sk}	Parâmetro bidimensional de assimetria
R_{ku}	Parâmetro bidimensional de curtose
HV	Microdureza <i>Vickers</i>
g	Grama
kg	Quilograma
P	Carga aplicada
d_1	Média aritmética das duas diagonais do indentador
VB_B	Desgaste de flanco médio
$VB_{B\text{ máx}}$	Desgaste de flanco máximo
$^{\circ}C$	Grau Celsius
mm/v	Milímetro por volta
RPM	Rotações por minuto
m/min	Metro por minuto
L	Profundidade do furo
D	Diâmetro do furo
A	Ampère
a	Avanço
N	Newton
$HV_{0,3}$	Microdureza <i>Vickers</i> com carga de 2942 N

T_0	Temperatura inicial da ferramenta
T_1	Temperatura final da ferramenta
μm	Micrometro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	JUSTIFICATIVA	16
4	REFERENCIAL TEÓRICO	17
4.1	USINAGEM	17
4.1.1	Furação	18
4.1.2	Ferramentas de corte	19
4.1.2.1	Brocas helicoidais	20
4.1.3	Materiais para ferramentas de corte	22
4.1.3.1	Aço Rápido	22
4.1.3.2	Revestimentos superficiais	23
4.1.4	Corrente RMS	23
4.1.5	Temperatura no processo de usinagem	24
4.1.6	Formação de cavacos	24
4.2	TOLERÂNCIA DIMENSIONAL	25
4.3	RUGOSIDADE	26
4.4	MICRODUREZA	27
4.5	DESGASTE DE FERRAMENTAS	28
4.5.1	Desgaste de flanco	29
5	METODOLOGIA	29
5.1	SELEÇÃO DAS FERRAMENTAS E PARÂMETROS DE CORTE	30
5.2	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	31
5.2.1	Tratamento térmico	31
5.3	USINAGEM DAS PEÇAS	33
5.4	CARACTERIZAÇÃO	37
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39

6.1	USINAGEM DAS PEÇAS	39
6.2	CORRENTE ELÉTRICA RMS	40
6.3	TEMPERATURA	42
6.4	ANÁLISE MACROSCÓPICA DE CAVACOS	43
6.5	RUGOSIDADE	44
6.6	TOLERÂNCIA DIMENSIONAL	47
6.7	MICRODUREZA	48
6.8	DESGASTE DE FLANCO	49
7	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	53
	ANEXO A – MEDIDAS OBTIDAS	56

1 INTRODUÇÃO

O avanço da indústria metal-mecânica foi impulsionado entre o final do século XVIII e início do século XIX por conta da Revolução Industrial. A princípio, os metais eram usinados com ferramentas de aço-carbono temperado e, com o desenvolvimento de materiais mais resistentes no século XX, surgiu a necessidade de ferramentas mais duráveis, destacando-se aquelas feitas de aço-rápido e metal duro (Machado *et al.*, 2015).

Além da evolução dos materiais, as operações de usinagem também evoluíram, a exemplo das máquinas controladas numericamente. Também se destacam os processos não-convencionais de usinagem, como usinagem a laser e por ultrassom. Entretanto, mesmo com o desenvolvimento dos processos não-convencionais, os processos convencionais como torneamento, fresamento e furação ainda são muito utilizados (Machado *et al.*, 2015).

O processo de furação se destaca dentro dos processos de manufatura, pois representa cerca de 30% dos processos de usinagem de metais leves e compósitos (Ba, 2022). Em razão disso, vêm se ampliando os estudos sobre as ferramentas de corte, como influência da geometria de ponta, material utilizado e revestimentos (Barbosa, 2021; Pralat *et al.*, 2022; Sousa *et al.*, 2021).

Apesar da importância de escolher corretamente as características adequadas para as ferramentas de corte, também é necessário identificar quais parâmetros de usinagem são mais apropriados para a realização de cada operação, pois o acabamento superficial dos furos, o desgaste da ferramenta e o tempo total de usinagem são fortemente influenciados por esses fatores, principalmente avanço, velocidade e profundidade de corte (Machado *et al.*, 2015; Yaşar, Günay, 2019).

Durante a operação de furação, a ferramenta sofre sob o efeito de fatores térmicos e mecânicos, causando danos e mudando sua condição inicial. Por esse motivo, além do desenvolvimento de materiais adequados para esses processos, surgiu a necessidade de estudar a aplicação de revestimentos superficiais para melhorar a performance dessas ferramentas (Pralat *et al.*, 2022).

Levando em consideração a importância de reduzir os tempos de troca de ferramenta por meio da busca por ferramentas mais resistentes ao desgaste e melhores condições de usinagem, este trabalho visa realizar uma análise da influência da velocidade de corte e do revestimento no acabamento superficial, tolerância dimensional, corrente elétrica requerida,

temperatura, desgaste de flanco e formação de cavaco utilizando brocas de aço rápido na usinagem de aço ABNT 1020.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar os efeitos da velocidade de corte em brocas helicoidais de aço rápido com e sem revestimento de TiN.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar os efeitos da velocidade de corte na furação do aço ABNT 1020 utilizando brocas de aço rápido com e sem revestimento;
- Verificar a corrente elétrica requerida em cada ciclo de furação;
- Verificar a qualidade dos furos quanto à tolerância dimensional e à rugosidade;
- Verificar a forma dos cavacos produzidos no processo;
- Avaliar a alteração da microdureza do material ao redor dos furos;
- Comparar o desgaste de flanco entre as brocas de aço rápido com e sem revestimento.

3 JUSTIFICATIVA

A escolha dos parâmetros adequados para a usinagem é de extrema importância para obter um processo produtivo mais eficiente, pois velocidades de corte mais altas alinhadas a uma ferramenta resistente ao desgaste e a bom acabamento superficial contribuem para um tempo de produção menor e melhor qualidade do produto.

Assim, este trabalho busca identificar qual velocidade de corte contribui para um menor desgaste de ferramenta e melhor qualidade dos furos, além de verificar como os revestimentos de ferramentas influenciam esses fatores em comparação às ferramentas que não possuem revestimento.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 USINAGEM

A usinagem caracteriza-se por ser um processo de fabricação em que há remoção de material de uma determinada peça para obter um produto com tamanho, formato e qualidade superficial desejados. Durante esse processo, ocorre produção de cavaco, que é o material removido da peça e apresenta forma geométrica irregular (Machado et al., 2015; Sharma, Tiwari, Dixit, 2016).

Segundo Machado *et al.* (2015), a usinagem é considerada complexa devido às dificuldades em escolher as condições ideais de fabricação, como os parâmetros de usinagem e a geometria das ferramentas de corte. Apesar da complexidade, este processo é notável por ser versátil, pois a possibilidade de variação dos parâmetros contribui para superar dificuldades técnicas e econômicas na fabricação, além de ter uma aplicabilidade em diversos materiais (El-Hofy, 2019).

Dentro de qualquer processo de usinagem é possível notar dois tipos de variáveis: as de entrada, que são independentes, e as de saída, que são dependentes. As variáveis de entrada são aquelas em que o operador escolhe para realizar a usinagem, como: material da peça, geometria inicial da peça, seleção do processo, material da ferramenta, parâmetros de usinagem e a presença de fluidos de corte. As variáveis de saída são aquelas que dependem das variáveis de entrada e são: força e potência de corte, geometria final do produto, acabamento superficial, falha da ferramenta devido ao consumo elevado de energia, economia do processo devido aos parâmetros de usinagem e aspectos ecológicos (El-Hofy, 2019).

Tendo em vista os tipos de ferramenta utilizadas, o processo de usinagem é dividido em dois tipos: convencional e não convencional (Figura 1). Nos processos convencionais, o material da ferramenta apresenta uma dureza maior do que o da peça a ser usinada e têm geometria definida, enquanto nos processos não há geometria definida para a peça (El-Hofy, 2019).

Figura 1 – Tipos de usinagem



Fonte: Machado *et al.* (2015).

Dentro dos processos de usinagem convencionais, o processo de furação é amplamente utilizado, constituindo um terço das operações de usinagem em metais leves e compósitos (Ba, 2022; Fischer, 2016). Suas características e ferramentas serão discutidos na seção a seguir.

4.1.1 Furação

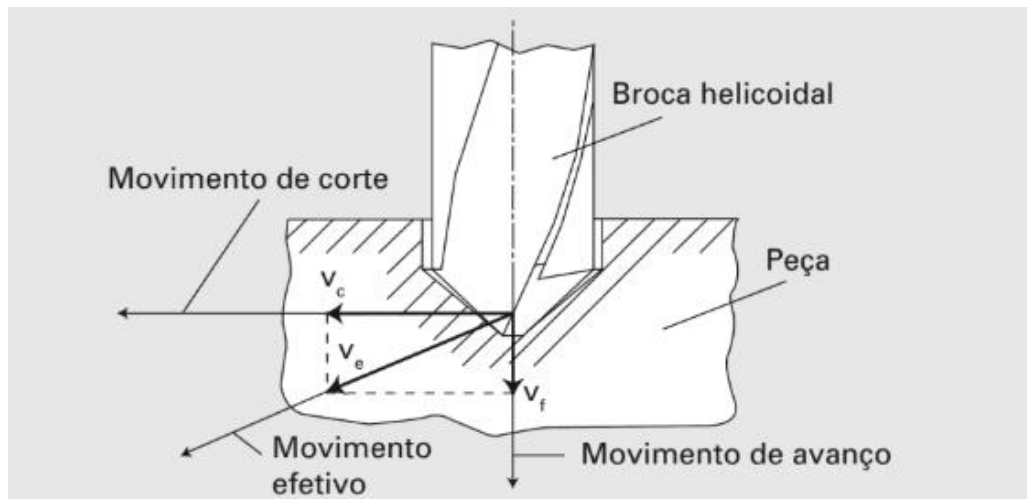
Dentre os processos convencionais de usinagem enquadra-se o processo de furação, no qual o movimento de avanço é realizado pela ferramenta, podendo ser manual ou automático. Assim como os outros tipos de usinagem, leva-se em consideração os movimentos e parâmetros de corte a fim de que se encontrem as melhores condições de fabricação (Machado *et al.*, 2015).

Tendo em vista que a indústria de usinagem está sempre buscando novas formas de melhorar o desempenho dos processos e reduzir custos, tem-se buscado a otimização de dois parâmetros da furação: o avanço e a velocidade de corte, pois esses dois fatores contribuem significativamente para a redução do tempo total de usinagem (Bhaskar, Kudal, 2017; Dixon, Walker, 2018).

A velocidade de corte (v_c) é definida pela taxa na qual a ferramenta rotaciona, tomando como referência a aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte. O avanço é caracterizado pela distância percorrida pela ferramenta em cada revolução e é

realizado entre a peça e a ferramenta de corte, levando a uma remoção contínua de cavaco (Machado et al., 2015; Dixon, Walker, 2018). A Figura 2 ilustra esses dois parâmetros de corte. Os movimentos de corte, de avanço e efetivo causam diretamente a saída de cavaco (Machado et al., 2015).

Figura 2 – Parâmetros de corte na furação



Fonte: Machado et al. (2015).

Além de otimizarem o processo de furação, a variação desses parâmetros impacta na força de corte, que tem influência sobre o acabamento superficial da peça usinada (Yaşar; Günay, 2019). No entanto, não são os únicos fatores determinantes para isso, pois a qualidade superficial também é afetada pela profundidade de corte, vibração da máquina e revestimento da ferramenta (Balaji et al., 2018; Li et al., 2019). Esses dois primeiros fatores não serão discutidos neste trabalho.

4.1.2 Ferramentas de corte

O sistema de usinagem geralmente é composto por três partes: a ferramenta de corte, a peça a ser usinada e a máquina-ferramenta. Sendo assim, a seleção da ferramenta e das variáveis de usinagem adequadas depende das propriedades da peça a ser usinada, da geometria e do material da ferramenta de corte, pois esses fatores influenciam na resistência ao desgaste, no custo final, na precisão do produto e na qualidade superficial (El-Hofy, 2019).

Diferentemente das operações de usinagem por abrasão, as ferramentas dos demais processos de usinagem convencional possuem uma geometria definida e são classificadas pelo

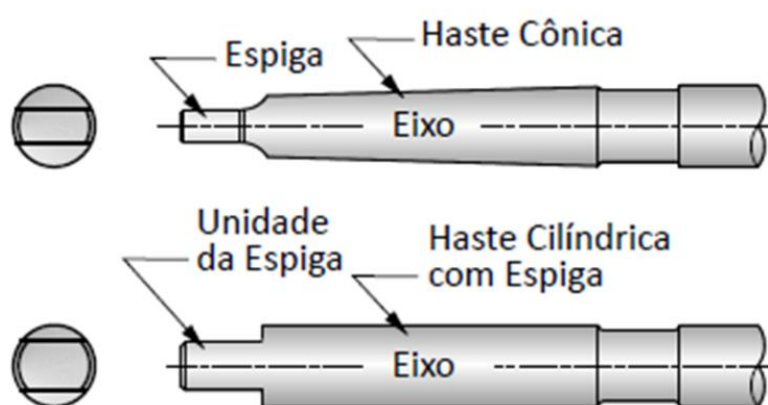
número de arestas de corte, que podem ser uma ou múltiplas. Por essa razão, as operações de torneamento, mandrilamento e aplainamento são considerados processos monocortantes, enquanto as operações como fresamento e furação são processos multicortantes (El-Hofy, 2019; Machado *et al.*, 2015).

No processo de furação, as ferramentas de corte mais utilizadas são as brocas helicoidais, compostas por duas ou mais hélices para retirada de material; brocas de centro, utilizadas para marcar o centro da furação; escareadores, utilizados para suavizar furos após a furação já ter sido realizada; e alargadores, indicados quando uma tolerância mais precisa é requerida (Dixon, Walker, 2018).

4.1.2.1 Brocas helicoidais

Brocas helicoidais são ferramentas giratórias que possuem um ou mais arestas cortantes e apresentam um ou mais canais para a passagem de cavaco e fluidos de corte. Elas podem ser de haste cônica ou cilíndrica (Figura 3), sendo que as mais utilizadas são estas últimas (El-Hofy, 2019). Para aumentar a vida dessas ferramentas, utilizam-se revestimentos superficiais, destacando-se o nitreto de titânio (Dixon, Walker, 2018).

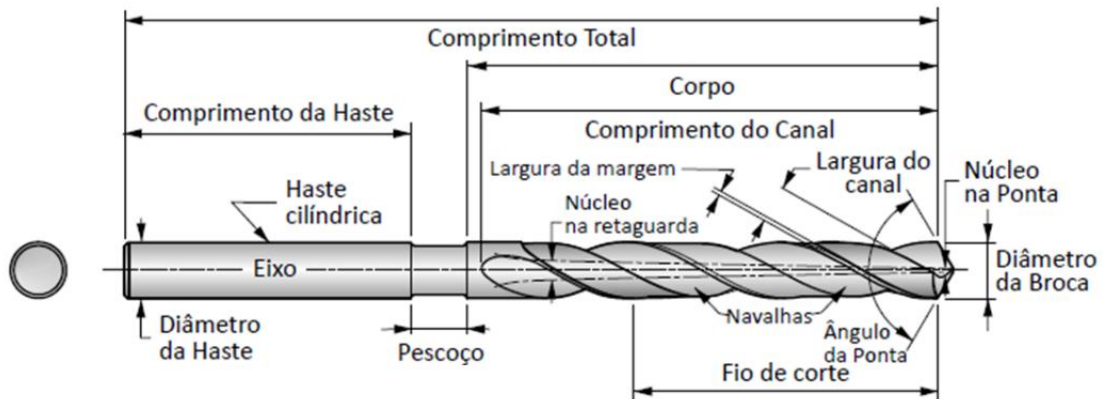
Figura 3 – Brocas de haste cônica e cilíndrica



Fonte: Dormer (2022).

A Figura 4 ilustra os principais componentes de uma broca, que são: a ponta, a haste e o corpo (Dixon, Walker, 2018).

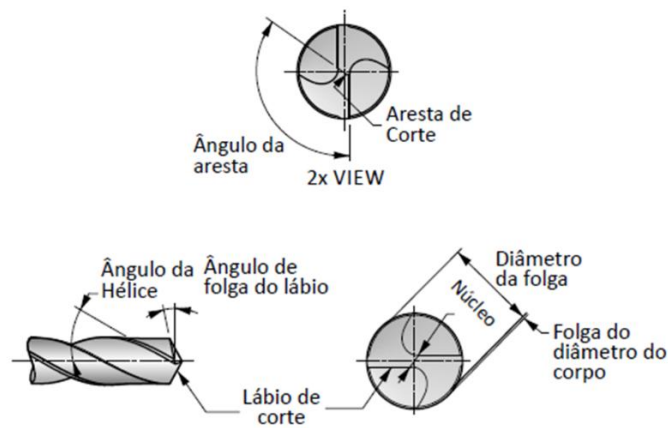
Figura 4 – Partes de uma broca



Fonte: adaptado de Dormer (2022).

A ponta é a extremidade cônica da broca que faz o corte, composta pelos lábios de corte dos canais e da face dos canais (Figura 5). A haste é a parte que é acoplada à máquina-ferramenta e pode ou não ter espiga, que é uma extremidade achatada para encaixar a broca na máquina. O corpo é a parte da broca situada entre a ponta e a haste e possui os canais, as margens e as navalhas (Dixon, Walker, 2018; Dormer, 2022).

Figura 5 – Detalhamento da ponta de uma broca



Fonte: adaptado de Dormer (2022).

Os canais são as ranhuras presentes no corpo da broca com a função de permitir a retirada de cavacos e a passagem do fluido de corte. As margens são as porções cilíndricas dos canais, não são cortantes e servem para oferecer folga para que a broca não fique presa nas paredes do furo (Dormer, 2022).

4.1.3 Materiais para ferramentas de corte

Aliada aos parâmetros de usinagem, a seleção dos materiais para as ferramentas de corte é fundamental, pois ferramentas que apresentam vida útil menor exigem que haja mais trocas de ferramentas durante o processo de fabricação (Bhaskar, Kudal, 2017).

Na busca das melhores condições de usinagem, tem-se aumentado a demanda por ferramentas fabricadas em materiais que apresentem propriedades como alta resistência a temperatura, dureza, resistência ao choque, à fadiga e ao desgaste, mas geralmente a característica mais procurada é a dureza (Podgornik *et al.*, 2020).

A utilização de metal duro é comum nas operações de furação devido à sua alta resistência a deformações plásticas localizadas (Callister Junior, Rethwisch, 2016). No entanto, algumas operações exigem que a ferramenta de corte possua uma elevada tenacidade e resistência à flexão e, por esse motivo, a utilização de metal duro é limitada (Serra *et al.*, 2020). Devido a essas limitações, tem-se ampliado a aplicação de Aço Rápido em processos de usinagem, especialmente dos que demandam um material com melhor tenacidade e uma geometria de ferramenta mais complexa (Ba, 2022).

4.1.3.1 Aço rápido

A norma ABNT NBR NM 116-1 (2004) define que os aços-rápidos são aqueles que possuem características que os permitem usinar materiais a altas velocidades de corte. Esses aços são ligas à base de ferro e apresentam valores variáveis de carbono, cromo, vanádio, molibdênio ou tungstênio, também podendo apresentar certos teores de cobalto.

Também conhecidos como *High Speed Steel* (aço de alta velocidade, em tradução livre), os aços rápidos possuem um alto teor de carbono e, por esse motivo, são mais resistentes e duros do que os outros tipos de aço-carbono, apesar de serem menos dúcteis (Callister Junior, Rethwisch, 2016). Além disso, a adição dos elementos de liga aliada ao teor de carbono também permite que o material da ferramenta apresente uma maior resistência ao desgaste e ao efeito do amolecimento pelo calor ao submeter a ferramenta a operações de corte industriais (ABNT NBR NM 116-1, 2005).

De acordo com a norma ABNT NBR NM 116-1:2005, o aço rápido é dividido em duas séries: ao molibdênio (série M) e ao tungstênio (série T). A norma sugere que os aços da série

M apresentam um teor de molibdênio entre 3,25% e 11% e, nos da série T, o teor de tungstênio varia entre 11,75% e 21%.

4.1.3.2 Revestimentos superficiais

O desgaste da ferramenta é um dos fatores que levam à diminuição da qualidade do acabamento superficial e também causa aumento no tempo de produção. Para evitar esses problemas, foram desenvolvidos revestimentos superficiais que garantem maior tempo de vida para as ferramentas (Aamir *et al.*, 2021; Czarniak *et al.*, 2022).

Os revestimentos permitem que as ferramentas operem a temperaturas mais elevadas, permitindo que sejam aplicadas em velocidades maiores. Eles são geralmente aplicados através de deposição química de vapor (CVD), deposição física de vapor (PVD) ou nitretação a plasma, além de haver a combinação desses tratamentos, nos chamados tratamentos duplex (Aamir *et al.*, 2020; Serra, 2022).

Dentre os materiais mais comuns para revestimentos, tem-se o nitreto de titânio (TiN), que favorece uma maior vida para ferramenta devido à sua alta dureza e resistência ao desgaste. Pode haver também a adição de outros metais nessa liga, como o alumínio e o cromo, além de aumentar ou diminuir o número de camadas depositadas para que haja um melhor desempenho (Reddy *et al.*, 2020).

4.1.4 Corrente RMS

Segundo Ferraresi (1970), tanto a potência elétrica como a mecânica são proporcionais aos valores de corrente elétrica requerida pela máquina-ferramenta. Assim, é possível prever o fim de vida da ferramenta ou identificar alterações nos parâmetros de corte, uma vez que os valores obtidos para a corrente elétrica do motor principal se alteram quando o desgaste evolui e/ou quando os parâmetros de corte são alterados (Barbosa, 2021).

O monitoramento desse parâmetro é não invasivo, logo, o processo não é interrompido à medida que os valores são coletados. Esses valores são atrelados à potência consumida, pois pode-se considerar a potência efetiva de usinagem como a potência de corte, que é diretamente relacionada com o comportamento do motor principal da ferramenta (Barbosa, 2021).

4.1.5 Temperatura no processo de usinagem

Os atritos entre o cavaco e a ferramenta e entre a ferramenta e a peça geram calor e, por consequência, aumentam a temperatura da ferramenta de corte. Esse efeito de formação e transmissão de calor é muito complexo no processo de usinagem, pois as características físicas e mecânicas da peça são alteradas pela mudança de temperatura (Ferraresi, 1970).

Assim, a temperatura da ferramenta tem bastante influência no desgaste, pois a oxidação e a difusão são fenômenos ligados ao desgaste e são aceleradas a maiores temperaturas. Ademais, a integridade superficial da peça é muito influenciada pela distribuição da temperatura nas camadas superficiais da peça, podendo causar mudança de dureza, tensões residuais e alterações na estrutura do material (Toenshoff; Denkena, 2013).

4.1.6 Formação de cavacos

Nos processos de usinagem, o material retirado da peça é deformado plasticamente e desliza pela superfície de saída, caracterizando o processo de formação de cavaco. Dependendo do comportamento da peça usinada, existem diferentes mecanismos de formação de cavaco, com fluxo contínuo ou descontínuo (Toenshoff; Denkena, 2013).

Dessa forma, ao variar o material da peça usinada ou os parâmetros de corte, obtém-se os seguintes mecanismos de formação de cavaco: formação contínua, lamelar, segmentada ou descontínua. Além disso, os cavacos podem ser classificados de acordo com sua forma, pois elas podem influenciar na segurança e na produtividade (Machado *et al.*, 2015; Toenshoff; Denkena, 2013).

Em relação à forma, a classificação dos cavacos pela forma é dividida da seguinte maneira: em fita, helicoidais, em espiral, em lascas ou pedaços. Cada uma dessas formas é influenciada tanto pelo material da peça como pelos parâmetros de corte. Velocidades de corte mais altas e avanços mais baixos produzem cavacos mais longos, o que é indesejável para o processo de usinagem quando se trata de segurança (Machado *et al.*, 2015).

4.2 TOLERÂNCIA DIMENSIONAL

O controle de qualidade dos produtos é essencial para que eles atendam às especificações técnicas necessárias para sua comercialização. No entanto, existem falhas nos processos de medição ao longo da fabricação e nenhum produto apresenta medidas perfeitas ao ser produzido. Então, para assegurar que as diferenças dimensionais não comprometam a utilização dos produtos, são determinadas as tolerâncias dimensionais (Albertazzi Júnior, de Sousa, 2019).

Segundo a norma ABNT NBR 6158 (1995), a tolerância é descrita como a diferença entre a dimensão máxima e a dimensão mínima de um elemento, ou seja, é uma faixa de valores aceitáveis para determinada característica de um produto de modo que ele apresente qualidade na função para a qual ele foi projetado, podendo ser simétrica ou não (Albertazzi Júnior, de Sousa, 2019). A norma também prevê campos de tolerância, que são definidos pela magnitude da tolerância e sua posição relativa referente à linha zero (ABNT NBR 6158, 1995).

Tendo em vista que, dependendo da finalidade, produtos distintos requerem diferentes tipos de precisão ao serem fabricados, a NBR 6158 (1995) define graus de tolerância que correspondem ao nível de precisão que as dimensões nominais precisam ter ao produzir um produto. Esses graus são representados pelas letras IT (*International Tolerance* – Tolerância Internacional, em tradução livre) seguidas de um número (por exemplo: IT8). Quanto menor for o número, maior é a precisão requerida. Para peças que funcionam acopladas a outras, o grau de tolerância varia de IT4 a IT11 para eixos e de IT5 a IT11 para furos (ABNT NBR 6158, 1995).

O sistema ABNT também determina uma classe de tolerância quando o grau de tolerância é associado a um afastamento fundamental. Neste caso, omite-se as letras IT e adiciona-se uma letra que indica o afastamento fundamental do elemento e um número que indica a tolerância padrão (por exemplo: H7). Para furos, essa representação é feita com letras maiúsculas e para eixos, com letras minúsculas (ABNT NBR 6158, 1995). Para brocas de aço rápido e utilização geral, a fabricante de ferramentas Dormer (2022) determina que a classe de tolerância é H12, indicando que os afastamentos inferior e superior são, respectivamente, 0 e 0,150 mm.

4.3 RUGOSIDADE

A integridade superficial de uma peça usinada não está relacionada apenas à textura da superfície ou à forma geométrica da peça e é decorrente de uma série de fatores, como deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica e tensões residuais. Assim, ela não engloba apenas as características da superfície em serviço (acabamento), mas também as camadas abaixo dela (alterações subsuperficiais) (Machado *et al.*, 2015). A Figura 6 indica a classificação da integridade superficial de um produto.

Figura 6 – Classificação da integridade superficial



Fonte: adaptado de Machado *et al.* (2015).

Como observado, uma das irregularidades superficiais inerentes ao processo de corte é a rugosidade. Ela é uma propriedade geométrica da superfície, enquanto as propriedades físicas estão são baseadas nas tensões residuais, estrutura cristalina e dureza (Toenshoff; Denkena, 2013). Diferentemente das ondulações e falhas, que representam erros de fabricação, a rugosidade é especificada conforme a aplicação da peça usinada e suas especificações são regidas pela norma ABNT NBR 4297 (2002).

Entre os parâmetros mais utilizados está a rugosidade média (R_a), que é frequentemente utilizada como uma métrica de controle de qualidade em aplicações de engenharia e as alterações no seu valor indicam alterações no processo de usinagem, como desgaste da ferramenta. Além disso, existem os valores de R_q , indicando o desvio padrão da rugosidade média; R_t e R_z , utilizados para determinar a altura máxima da rugosidade; e R_{sk} e R_{ku} , que são de natureza estatística e representam, respectivamente, a assimetria e o achatamento do perfil (Machado *et al.*, 2015).

4.4 MICRODUREZA

A medição da dureza de um material está ligada à sua resistência a uma deformação plástica localizada. Para realizar essa medição, foram desenvolvidas diferentes técnicas quantitativas de dureza, em condições específicas de carga e taxa de aplicação controladas, utilizando um indentador que é pressionado contra a superfície do material. O valor da dureza é um resultado proveniente da profundidade ou tamanho da indentação, sendo que materiais mais macios apresentarão uma profundidade maior e um menor número-índice de dureza (Callister Junior; Rethwisch, 2016).

Dentre os diversos ensaios de dureza, encontra-se o de microdureza Vickers (HV). Esse ensaio se diferencia dos demais por utilizar uma carga bem menor (entre 1 e 1000 g), enquanto ensaios como Rockwell e Brinnell podem chegar a 150 e 3000 kg, respectivamente. Além disso, como mostra a Figura 7, o indentador é de diamante, com geometria piramidal (Callister Junior; Rethwisch, 2016).

Figura 7 – Indentador do ensaio de microdureza Vickers



Fonte: Callister Junior; Rethwisch (2016).

Para obter o número de dureza, é feita a medição da indentação resultante e, em seguida, esse valor é convertido utilizando a seguinte fórmula:

$$HV = 1,854P/d_1^2 \text{ (Eq. 1)}$$

onde:

- HV: microdureza Vickers;
- P: carga aplicada;
- d_1 : média aritmética das duas diagonais do indentador (Callister Junior; Rethwisch, 2016).

4.5 DESGASTE DE FERRAMENTAS

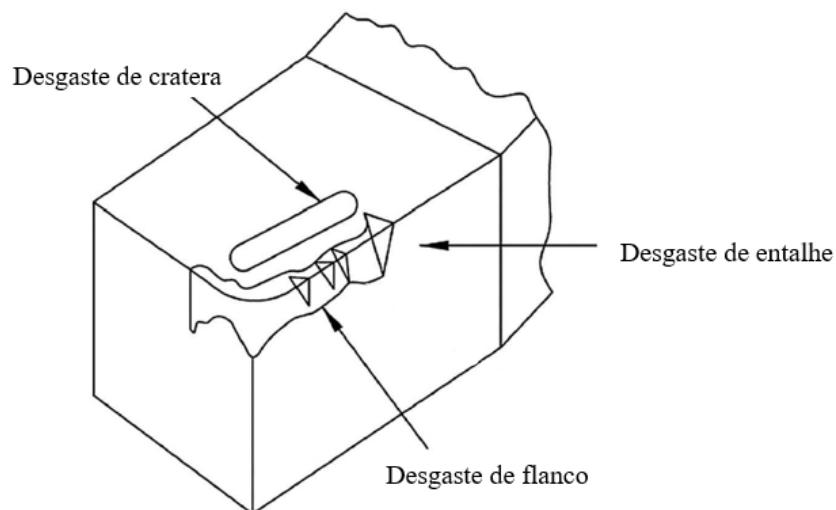
Qualquer ferramenta de corte, após sua utilização, sofrerá algum tipo de desgaste, independentemente de sua dureza e resistência ao desgaste e, por essa razão, em algum momento haverá a necessidade de trocá-la. Assim, é de extrema importância compreender os fenômenos de desgaste nos processos de usinagem, pois, apesar de os custos de ferramenta representarem uma parcela relativamente baixa do custo de fabricação, desgastes recorrentes e acelerados podem levar a trocas frequentes e, conseqüentemente, paradas na produção, levando a custos adicionais e perda de produtividade (Machado *et al.*, 2015).

Dentro desse contexto, existem diferentes fenômenos que levam à necessidade de troca de ferramenta devido à perda ou substituição das arestas. Os principais são avaria, desgaste e deformação plástica, entretanto, este trabalho abordará apenas o desgaste, que é caracterizado pela mudança da forma original da ferramenta, causando uma perda de material gradativamente (Machado *et al.*, 2015).

O desgaste da ferramenta ocorre por conta da interação entre ela e o cavaco, e a temperatura presente no corte tem grande influência neste fator, independentemente do material. Ele ocorre de maneira gradual e contínua e depende de diversos fatores, como o material da ferramenta, a peça que será usinada, parâmetros de usinagem, geometria da peça, entre outros (El-Hofy, 2019; Machado *et al.*, 2015).

Como é possível notar na Figura 8, existem três tipos de desgaste: desgaste de flanco, desgaste de cratera, e desgaste de entalhe. Este trabalho abordará apenas o primeiro.

Figura 8 – Tipos de desgaste



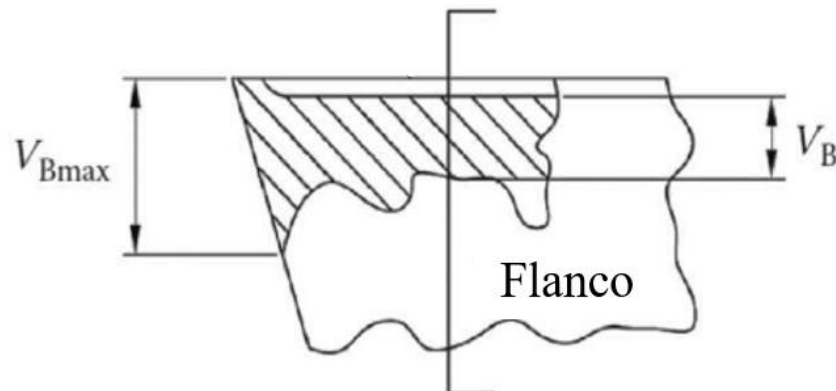
Fonte: adaptado de El-Hofy (2019).

4.5.1 Desgaste de flanco

Esse tipo de desgaste ocorre na superfície de folga da ferramenta e não é uniforme ao longo da seção ativa da aresta de corte para ferramentas com raio de ponta. Devido às altas temperaturas envolvidas no processo de usinagem, a maior parte do desgaste ocorre na ponta da ferramenta. Este tipo de desgaste depende de diversos fatores, como a dureza da ferramenta de corte em altas temperaturas de trabalho, quantidade e distribuição de constituintes duros na peça e grau de endurecimento por deformação do cavaco (El-Hofy, 2019).

Quando o desgaste atinge níveis em que o processo de usinagem pode sofrer riscos, a ferramenta precisa ser reafiada ou substituída. Para aumentá-lo, a norma ISO 3685 (1977) utiliza os seguintes parâmetros para desgaste de flanco: desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$), que são utilizados para definir quais critérios de fim de vida para uma ferramenta (Machado *et al.*, 2015). A Figura 9 demonstra como esse tipo de desgaste é apresentado.

Figura 9 – Desgaste de flanco



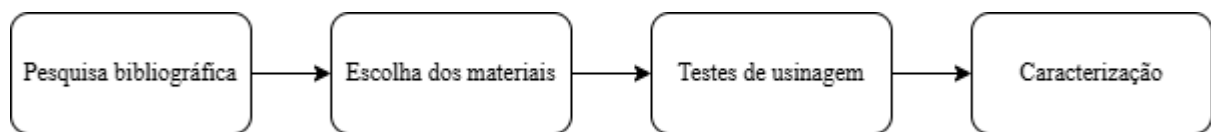
Fonte: adaptado de El-Hofy (2019).

5 METODOLOGIA

Este trabalho será dividido em quatro partes: a primeira consiste em uma pesquisa bibliográfica acerca dos temas abordados nele, a segunda se refere à escolha dos materiais utilizados, na terceira são realizados os testes de usinagem e na quarta é feita a caracterização dos materiais. A Figura 10 traz um fluxograma que ilustra as etapas.

A pesquisa bibliográfica envolveu os aspectos referentes ao tema, bem como estudos e pesquisas relevantes sobre os materiais utilizados, e a escolha dos materiais se refere tanto à seleção das ferramentas como dos blocos submetidos à usinagem. Os testes de usinagem englobam desde o preparo dos corpos de prova por faceamento até o monitoramento de corrente RMS, temperatura da ferramenta a análise macroscópica dos cavacos. Por fim, foi feita a caracterização é feita por meio da análise de rugosidade média e tolerância dimensional dos furos, microdureza na região próxima aos furos e desgaste de flanco das ferramentas.

Figura 10 – Metodologia empregada

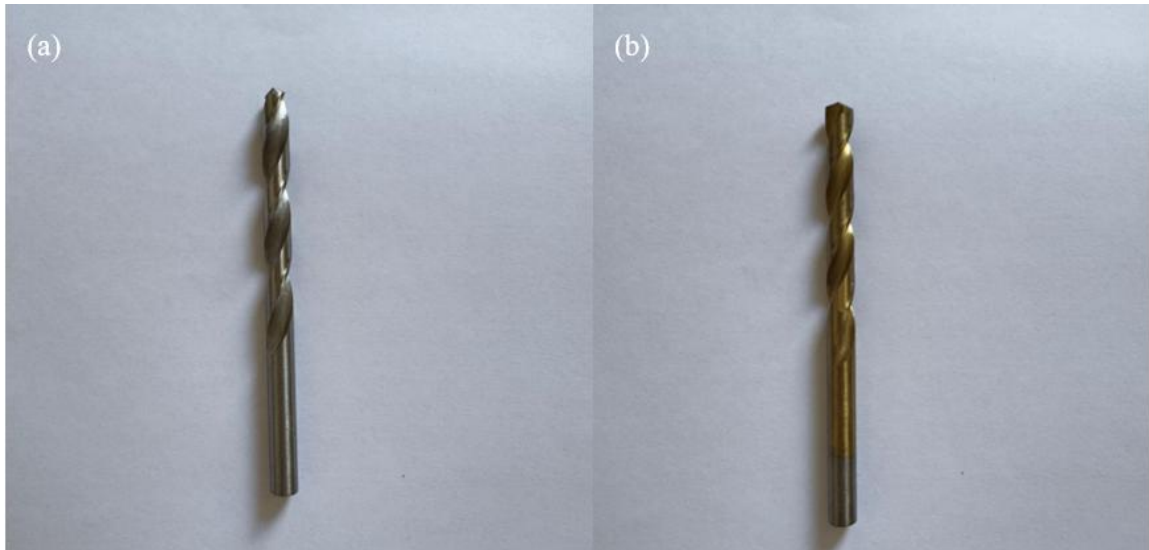


Fonte: Autora (2025).

5.1 SELEÇÃO DAS FERRAMENTAS E PARÂMETROS DE CORTE

A seleção das ferramentas de corte é uma etapa fundamental para determinar o processo de usinagem, pois é necessário escolher corretamente os materiais que apresentem as propriedades adequadas para cada aplicação. Para a realização deste trabalho, optou-se por brocas helicoidais já encontradas no mercado (Figura 11). Elas são de aço rápido com 8 mm de diâmetro com e sem revestimento e foram escolhidas por serem mais utilizadas em aplicações gerais. A escolha do aço rápido se deve ao fato de que ele apresenta uma alta tenacidade, além de um menor custo em relação a outras ferramentas e para o revestimento, foram escolhidas brocas de aço rápido revestidas com nitreto de titânio, devido à sua alta resistência ao desgaste (Serra, 2022).

Figura 11 – Broca (a) sem revestimento e (b) com revestimento



Fonte: Autora (2025).

Devido à alta complexidade, demanda de tempo e material para analisar múltiplos parâmetros de usinagem optou-se por deixar fixos o avanço e a profundidade de corte, variando apenas a velocidade de corte.

5.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

5.2.1 Tratamento térmico

Antes de iniciar o processo de furação nos corpos de prova, eles foram submetidos a um processo de recozimento para assegurar que todos apresentassem a mesma microestrutura e microdureza. O processo foi realizado em um forno indutivo modelo LT63013, da marca *Jung* (Figura 12), seguindo o procedimento recomendado pelo fabricante dos blocos.

Figura 12 – Forno LT63013



Fonte: Autora (2024).

Para fazer o tratamento de acordo com os padrões estabelecidos, foi feita a medição dos blocos para encontrar aquele com a maior dimensão, pois o tempo mínimo para o tratamento é de 1 hora para cada 25 mm de comprimento. Assim, a maior dimensão encontrada foi de 76,70 mm, fazendo com que o tempo mínimo na temperatura de patamar fosse de aproximadamente 3 horas.

Após a medição, seguiu-se a configuração do forno. Para isso, foi necessário configurar um novo programa de tempo e temperatura. Neste caso, foi definido que a temperatura inicial fosse igual à temperatura externa (32°C) e o tempo para atingir a temperatura máxima foi inicialmente de meia hora, porém, o forno não atingiu a temperatura necessária nesse tempo e foi preciso aumentá-lo para duas horas. A definição da temperatura de tratamento é feita pelo próprio fabricante do aço que, para este caso, é de 850 a 870°C. Assim, a temperatura definida no forno foi de 860°C com uma tolerância de $\pm 10^{\circ}\text{C}$.

Por fim, os corpos de prova foram dispostos no forno para a realização do recozimento (Figura 13). Ao finalizar o aquecimento dos blocos, eles passaram um resfriamento contínuo dentro do próprio forno. Após o tratamento, seguiu-se para a etapa de usinagem das peças.

Figura 13 – Corpos de prova submetidos a recozimento



Fonte: Autora (2024).

5.3 USINAGEM DAS PEÇAS

A usinagem das peças foi feita no Laboratório de Usinagem do Instituto Federal do Piauí – *Campus* Teresina Central utilizando um Centro de Usinagem por Comando Numérico modelo Romi D 600 (Figura 14).

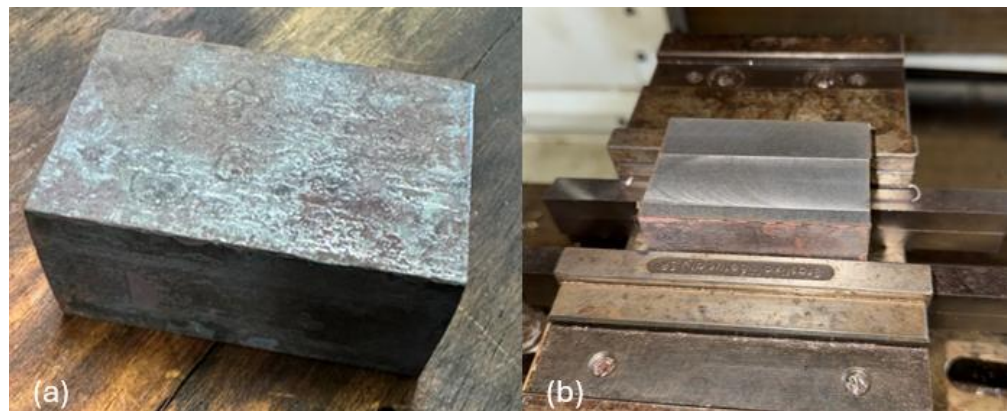
Figura 14 – Máquina de Comando Numérico Romi D 600



Fonte: Autora (2025).

Antes da furação, os blocos encontravam-se oxidados e, por isso, foi necessário realizar um faceamento a fim de retirar a camada oxidada. Ele foi feito com uma fresa com diâmetro de 50 mm e avanço de 0,35 mm/v e foi retirada uma camada de 0,5 mm de material. A Figura 15 mostra o aspecto dos blocos antes e depois do faceamento.

Figura 15 – (a) Blocos antes do faceamento; (b) blocos após o faceamento



Fonte: Autora (2025).

Ao finalizar o faceamento, os blocos foram submetidos ao processo de furação. A distância entre os furos foi 1,5 vezes maior que o diâmetro dos furos para que um não interfira no outro (Serra *et al.*, 2020). Assim, como as brocas tinham 8 mm de diâmetro, a distância entre os furos foi de 12 mm. O número de furos foi limitado ao tamanho da superfície dos blocos (76 mm x 51 mm), logo, considerando a distância mínima para que não haja interferência, foram feitos 15 furos por peça.

Após delimitar a quantidade de furos por bloco, seguiu-se a determinação dos parâmetros de corte. Inicialmente, os testes seriam conduzidos seguindo as recomendações do fabricante para brocas de aço rápido (Figura 16), no entanto, a velocidade de corte e o avanço recomendados levavam em consideração a utilização de fluido de corte. Como os testes foram realizados a seco, os parâmetros recomendados levariam a um superaquecimento da peça e da ferramenta, podendo causar quebra nas brocas, então reduziu-se a velocidade de corte para 25 m/min (1000 RPM) e 20 m/min (795 RPM) e o avanço para 0,09 mm/v.

Figura 16 – Parâmetros recomendados pelo fabricante
CONFIRA ABAIXO A VELOCIDADE E AVANÇO IDEAIS PARA BROCAS DE AÇO RÁPIDO

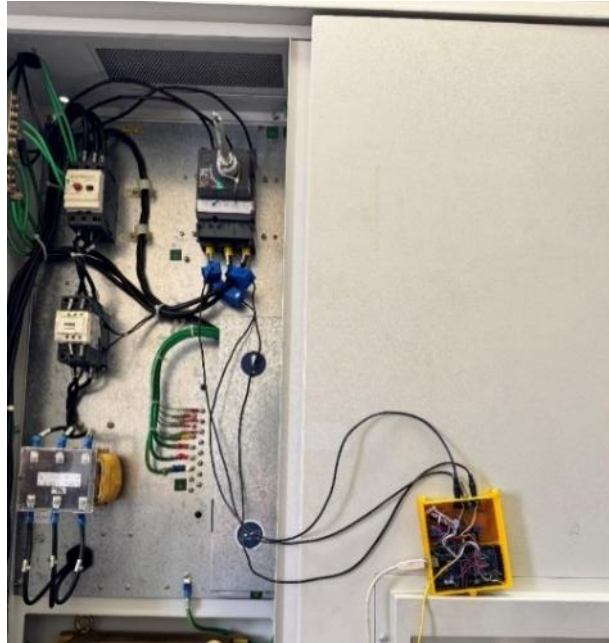
VELOCIDADE E AVANÇO PARA BROCAS DE AÇO RÁPIDO									
MATERIAL		AÇO 0.20 A 0.30%C (MACIO) E BRONZE	AÇO 0.30 A 0.40%C (MEIO - MACIO)	AÇO 0.40 A 0.50%C (MEIO - DURO) FERRO FUNDIDO	FERRO FUNDIDO (DURO)	FERRO FUNDIDO (MACIO)	COBRE	LATÃO	ALUMÍNIO
VELOCIDADE-CORTE (m/min)		35	25	22	18	32	50	65	100
Ø DA BROCA (mm)	AVANÇO (mm/V)	ROTAÇÕES POR MINUTO (rpm)							
1	0,06	11140	7950	7003	5730	10186	15900	20670	31800
2	0,08	5570	3975	3502	2865	5093	7950	10335	15900
3	0,10	3713	2650	2334	1910	3396	5300	6890	10600
4	0,11	2785	1988	1751	1433	2547	3975	5167	7950
5	0,13	2228	1590	1401	1146	2037	3180	4134	6360
6	0,14	1857	1325	1167	955	1698	2650	3445	5300
7	0,16	1591	1136	1000	819	1455	2271	2953	4542
8	0,18	1392	994	875	716	1273	1987	2583	3975
9	0,19	1238	883	778	637	1132	1767	2298	3534
10	0,20	1114	795	700	573	1019	1590	2067	3180

Fonte: Solidprize (2025).

A profundidade dos furos foi determinada após a seleção das ferramentas levando em consideração que a relação entre a profundidade do furo (L) e o diâmetro da broca (D) deve ser menor do que cinco ($L/D < 5$), pois para furações profundas é necessária a utilização de brocas especiais (Diniz, Marcondes, Coppini, 2013). Assim, ficou definido que os furos teriam uma profundidade de 30 mm, considerando que a altura da peça era de 37 mm e não se pretendia fazer um furo passante.

Quando os parâmetros foram definidos, o processo de furação foi iniciado, sendo monitorado por sensores de medição de corrente não invasivos, modelo SCT-013-000, com uma faixa de medição de 0 a 100 A (Figura 17). Os sensores foram conectados aos cabos de alimentação geral da máquina a fim de obter os valores de corrente elétrica durante a furação das peças.

Figura 17 – Instalação dos sensores de corrente



Fonte: Autora (2025).

Para verificar se a programação da máquina estava correta, foram feitos testes em vazio e um pré-teste utilizando a maior rotação em uma broca sem revestimento. Ao constatar que as condições estavam favoráveis para a usinagem, prosseguiu-se enfim para a etapa de furação, seguindo as informações da Tabela 1. Ela também inclui a nomenclatura dos ensaios que será utilizada neste trabalho.

Tabela 1 – Condições de usinagem em cada ensaio

Ensaio	Ferramenta	v_c (m/min)	a (mm/v)	Nomenclatura
Pré-teste	SR	25	0,09	-
1	SR	25	0,09	SR25
2	CR	25	0,09	CR25
3	SR	20	0,09	SR20
4	CR	20	0,09	CR20

Fonte: Autora (2025).

Os critérios de parada foram os mesmos utilizados no trabalho de Serra *et al.* (2019), com exceção do desgaste máximo ao longo da usinagem, pois o desgaste foi medido apenas após todos os furos serem feitos. Assim, os critérios foram os seguintes: falha completa da

ferramenta, ruído excessivo e número máximo de furos a depender da disponibilidade de material para os corpos de prova, considerando o que ocorresse primeiro.

As ferramentas também passaram por uma medição de temperatura antes de depois do processo de usinagem utilizando uma câmera termográfica da marca *Fluke*, modelo Ti27 (Figura 18).

Figura 18 – Câmera termográfica *Fluke* Ti27



Fonte: Autora (2025).

Ao final do processo de usinagem, os cavacos foram coletados para uma análise macroscópica. Em processos como a furação, o monitoramento dos cavacos é importante para a segurança humana, pois podem dificultar o manuseio nos processos, aderir à peça, à máquina ou à ferramenta, gerando perigo para o operador e prejudicar o acabamento das peças (Machado *et al.*, 2015; Toenshoff; Denkena, 2013).

5.4 CARACTERIZAÇÃO

A qualidade dos furos foi avaliada através da rugosidade média dos furos e por meio da tolerância dimensional. A rugosidade foi medida utilizando um rugosímetro *Mitutoyo* SJ210 (Figura 19) e foram obtidos os valores da rugosidade média (R_a). As medições foram feitas a cada três furos e foi obtida a rugosidade de quatro pontos diferente, girando o apalpador em 90° a cada 3 medidas.

Figura 19 – Rugosímetro Mitutoyo SJ210



Fonte: Autora (2025).

Para verificar se os furos estão dentro da tolerância descrita na seção 4.2, utilizou-se o software *ImageJ*, que converte as medidas em pixels para milímetros. Em seguida, as imagens foram transferidas para o software AutoCAD e as medidas foram realizadas utilizando as funções *3-points-circle* e *diameter-dimension*.

A fim de verificar a microdureza ao redor dos furos foi utilizado um microdurômetro da marca *Shimadzu* modelo MHV-2T (Figura 20). O teste foi realizado para observar a influência do processo de furação nas propriedades do material ao redor do furo e foi utilizada a escala *Vickers* aplicando uma carga de 2942 N ($HV_{0,3}$). As medidas foram obtidas a cada cinco furos e foi feito um perfil de microdureza com um afastamento de 0,5 mm do furo e 0,1 mm entre cada indentação.

Figura 20 – Microdurômetro Shimadzu MHV-2T



Fonte: Autora (2025).

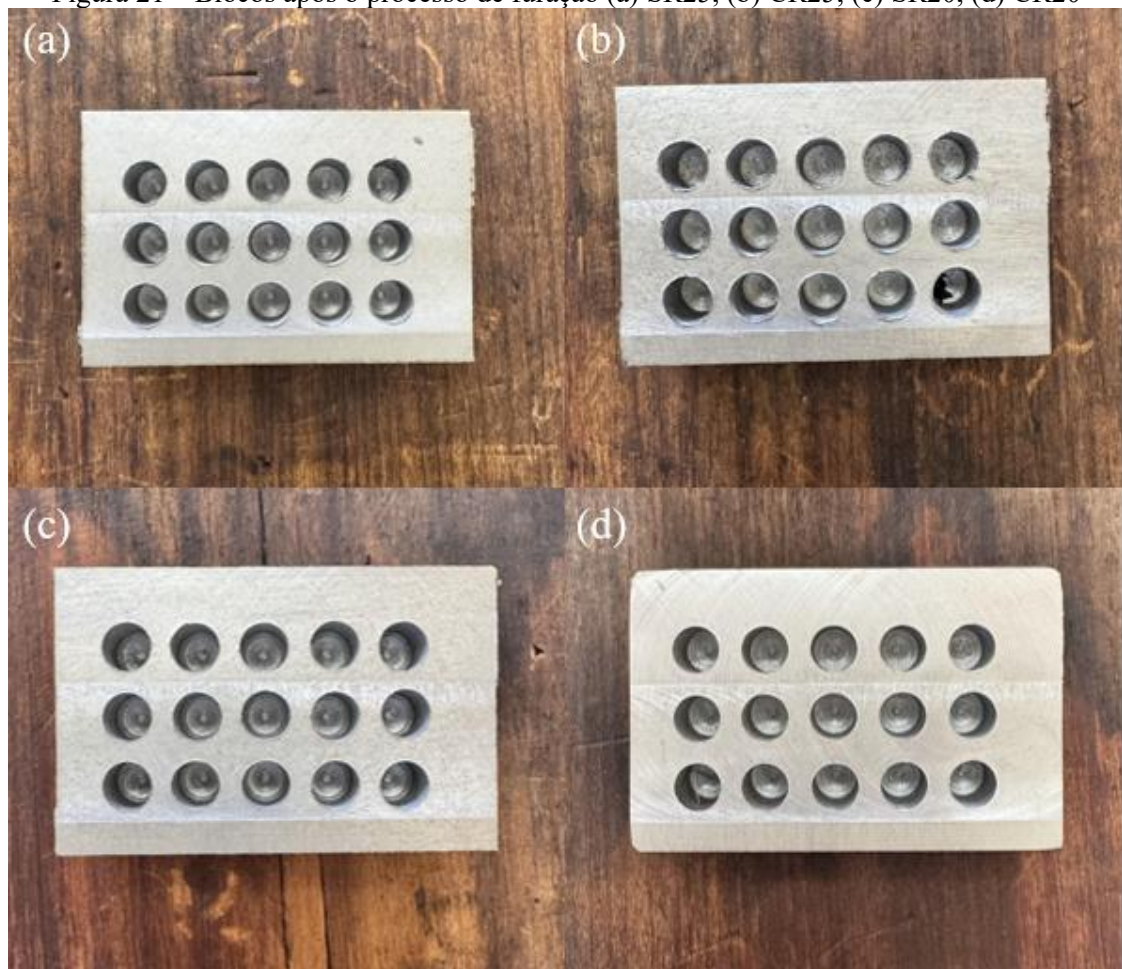
Além da qualidade dos furos, também foi verificado o desgaste de flanco das ferramentas para verificar a influência da velocidade de corte e do revestimento sobre as brocas. Para isso, o desgaste foi medido apenas no final do processo, após 15 furos. Ele foi observado através de um microscópio óptico portátil e sua medição foi realizada através do *software ImageJ*.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 USINAGEM DAS PEÇAS

A Figura 21 ilustra o aspecto dos blocos após serem usinados. Visualmente, nota-se a presença de rebarbas nos ensaios SR25 e CR25, que foram realizados a uma velocidade de corte mais alta, enquanto os ensaios SR20 e CR20, submetidos a uma menor velocidade de corte, apresentaram um aspecto superficial mais uniforme. Esse fenômeno ocorre porque, à medida que a broca se aproxima da saída do furo o material sofre deformação plástica e parte do material é empurrada para fora por meio da força exercida pela ferramenta, levando à formação das rebarbas (Choudhury, 2014; Aamir *et al.*, 2020). Assim, velocidades de corte mais altas contribuem para a formação de rebarbas mais altas e mais largas (Uddin *et al.*, 2018).

Figura 21 – Blocos após o processo de furação (a) SR25, (b) CR25, (c) SR20, (d) CR20

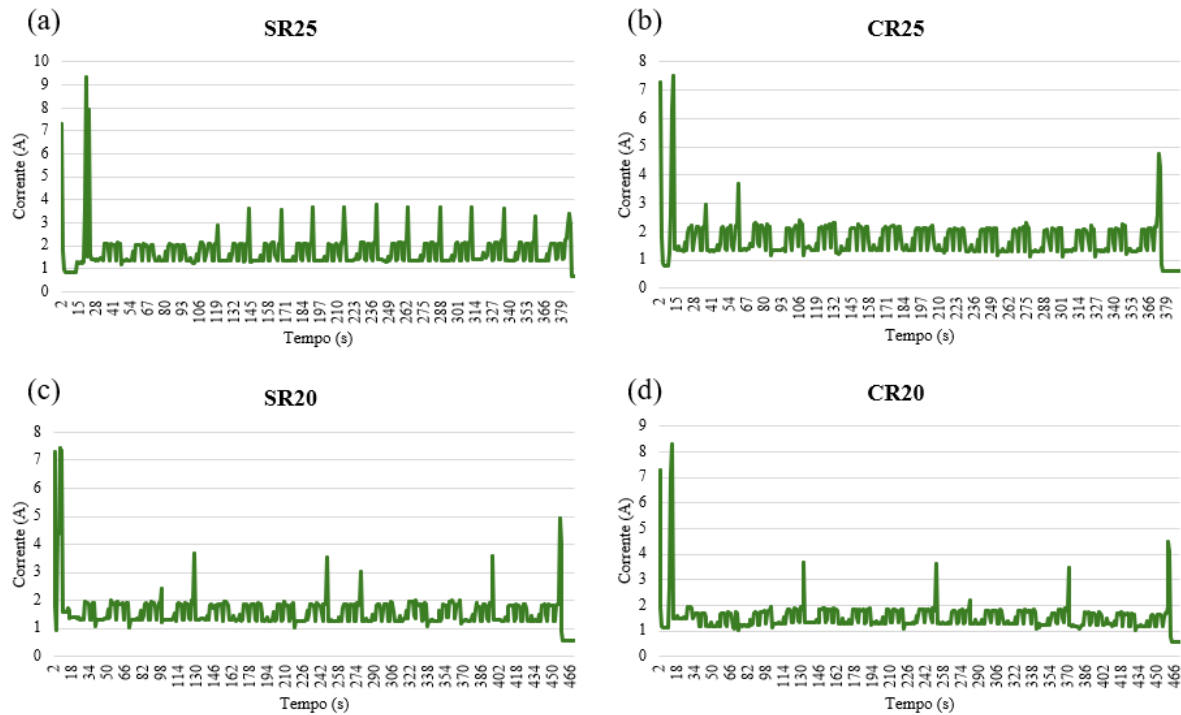


Fonte: Autora (2025).

6.2 CORRENTE ELÉTRICA RMS

A Figura 22 mostra o sinal de corrente elétrica em função do tempo durante todos os ensaios realizados. É importante observar que os ensaios SR20 e CR20 apresentam maior tempo de usinagem porque foram executados com uma velocidade de corte menor do que a dos ensaios SR25 e CR25.

Figura 22 – Monitoramento de corrente RMS no ensaio (a) SR25; (b) CR25; (c) SR20; (d) CR20



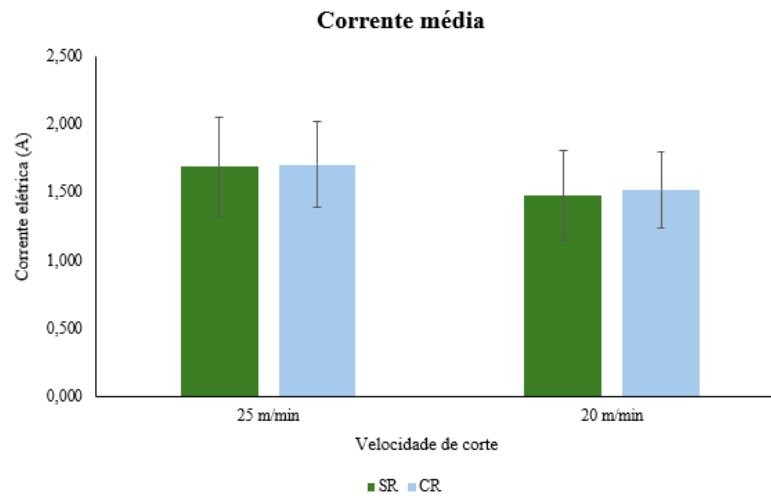
Fonte: Autora (2025).

Através da Figura 22 é possível observar que os maiores valores de corrente ocorrem no início do processo, os quais correspondem ao acionamento do eixo-árvore e seu posicionamento próximo à peça de trabalho. Também se verifica que para cada furo os valores de corrente se mantêm estáveis ao longo do processo, logo, não é possível identificar sinais de desgaste significativo através do monitoramento de corrente neste caso.

A Figura 23 ilustra os valores médios de corrente requerida durante o processo de remoção do material, excluindo os valores de acionamento do eixo-árvore e do movimento de aproximação rápida. Nota-se que, para as mesmas condições de corte não houve diferença significativa entre as ferramentas com ou sem revestimento.

No entanto, ao considerar a mudança na velocidade de corte, é possível perceber que, devido ao desvio padrão, as médias indicam que uma tendência de diminuição dos valores de corrente elétrica medidos. Isso se explica pelo fato de que a potência é diretamente proporcional à velocidade de corte (Ferraresi, 1970) e, como a corrente é diretamente proporcional à potência, seu valor cai ao diminuir o valor de v_c .

Figura 23 – Corrente média no processo de furação

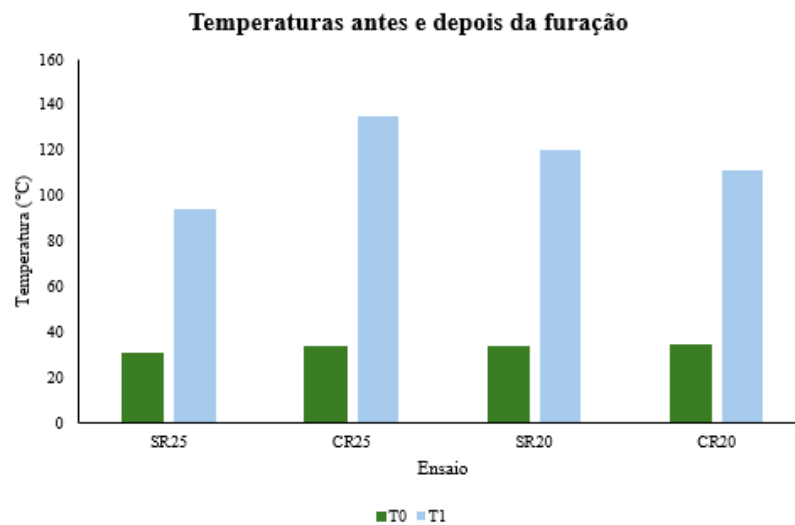


Fonte: Autora (2025).

6.3 TEMPERATURA

A distribuição da temperatura em um ciclo de usinagem depende dos parâmetros de corte, do material a ser usinado e do material da ferramenta (Machado *et al.*, 2015). Para verificar a alteração da temperatura em cada ensaio, utilizou-se uma câmera termográfica modelo *Fluke* Ti27. Na Figura 24 é possível observar as temperaturas iniciais (T0) e finais (T1) de cada ensaio.

Figura 24 – Temperaturas das ferramentas antes e depois da usinagem



Fonte: Autora (2025)

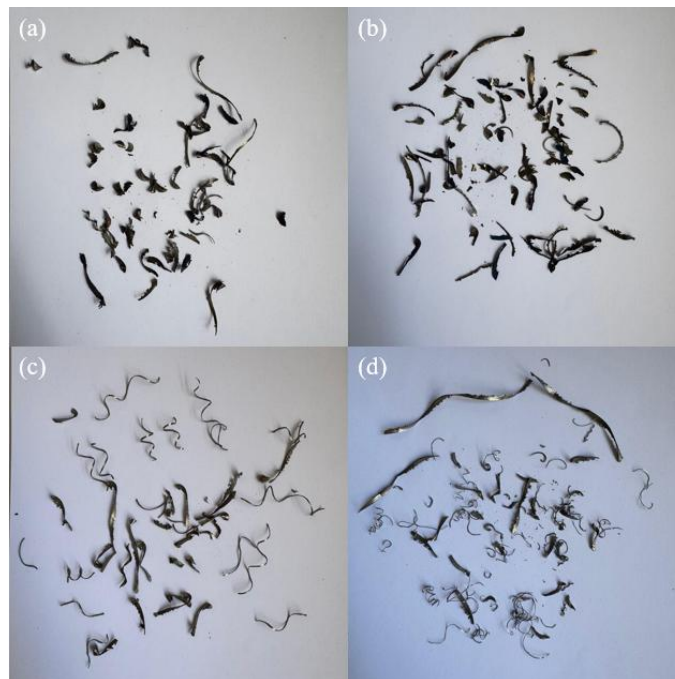
Pela Figura 24, é possível observar que a maior temperatura obtida após o processo foi a do Ensaio CR25, que atingiu 135°C. Segundo Ferraresi (1970), esse fenômeno ocorre por dois fatores: a velocidade de corte e a presença de titânio no revestimento da ferramenta. Assim, com o aumento da velocidade de corte, espera-se que a temperatura também aumente e metais de baixa condutibilidade térmica (como o titânio) geram altas temperaturas durante o processo de usinagem.

Apesar de ter uma velocidade de corte mais alta, o processo que apresentou uma menor temperatura foi o do Ensaio SR25, com a ferramenta sem revestimento. Neste caso, pode-se atribuir essa diferença à ausência de titânio na ferramenta em comparação com a do Ensaio CR25. Os Ensaio SR20 e CR20 apresentaram temperaturas intermediárias e neste caso a presença do revestimento não teve impacto significativo para que ela aumentasse.

6.4 ANÁLISE MACROSCÓPICA DE CAVACOS

Como mencionado na seção 5.3, o formato dos cavacos importa para melhorar o manuseio da peça e da máquina, a segurança dos operadores e o acabamento da peça. A Figura 25 ilustra a forma dos cavacos obtidos em cada operação de furação.

Figura 25 – Cavacos coletados no ensaio (a) SR25; (b) CR25; (c) SR20 e (d) CR20



Fonte: Autora (2025).

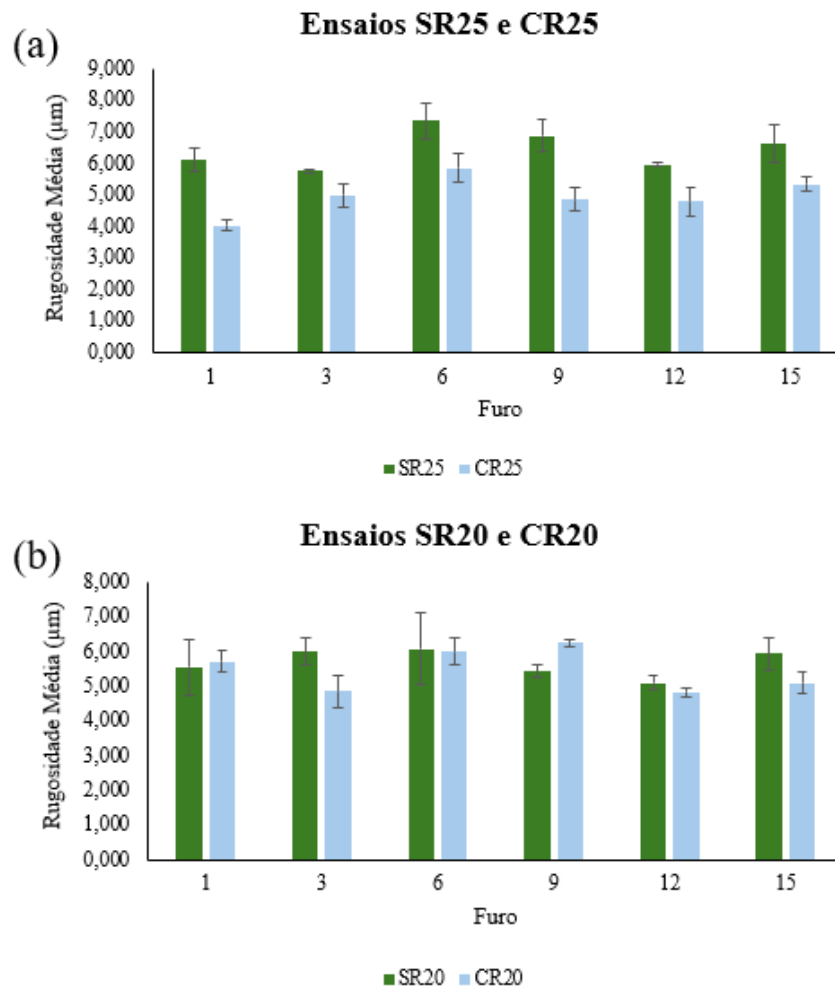
Observando a Figura 25, verifica-se que os Ensaios SR25 e CR25 (Figura 23 (a) e (b), respectivamente) apresentam cavacos em formato de fita curto, em arco conectado, em arco solto, fragmentado, segundo as definições de Machado et al., (2015), Toenshoff e Denkena (2013). Nos processos de furação, esses cavacos menores podem causar problemas no transporte da zona de separação do material ou atingir os olhos do operador se não estiver protegido adequadamente, mas se tratados de forma adequada, não apresentam grandes problemas quanto os cavacos longos (Toenshoff; Denkena, 2013).

O Ensaio SR20 gerou cavacos nos formatos de fita curto, helicoidal tipo arruela curto e cavaco em arco solto, enquanto o Ensaio CR20 apresentou nos formatos helicoidal tipo arruela longo, curto e emaranhado, cavaco em arco conectado. Com exceção dos cavacos helicoidais longos, esses ensaios demonstraram formatos que são mais favoráveis no processo de usinagem, pois apresentam mais segurança e não prejudicam tanto a ferramenta (Machado *et al.*, 2015).

6.5 RUGOSIDADE

A Figura 26 mostra os resultados de rugosidade obtidos nos ensaios. Eles comparam os valores de rugosidade média (R_a) das ferramentas com e sem revestimento para as mesmas condições de usinagem. O avanço se manteve fixo durante todo o experimento (0,09 mm/v), enquanto os dois primeiros ensaios foram feitos com uma velocidade de corte de 25 m/min e os dois últimos com 20 m/min.

Figura 26 – Rugosidade obtidas nos ensaios (a) SR25 e CR25; (b) SR20 e CR20



Fonte: Autora (2025).

Para melhor visualização, a Tabela 2 ilustra os valores médios obtidos.

Tabela 2 – Rugosidade média

Ensaio	R _a
SR25	6,457
CR25	4,982
SR20	5,698
CR20	5,467

Fonte: Autora (2025).

No Ensaio SR25, o valor médio de R_a para todos os furos foi de 6,457 μm . Durante o processo, os valores de rugosidade se mantiveram estáveis, exceto nos furos 6 e 9, nos quais esses valores chegaram a aproximadamente 7 μm .

Ao observar o Ensaio CR25, feito com uma ferramenta revestida nas mesmas condições do Ensaio SR25, nota-se que os valores de R_a diminuem consideravelmente, apresentando um valor médio de 4,982 μm , chegando a ser menor que 4 μm no primeiro furo e atingem valores maiores que 5 μm apenas nos furos 6 e 11. Esses valores indicam que, para essas condições, a ferramenta com revestimento se mostrou mais eficiente para obtenção de uma superfície mais uniforme.

O Ensaio SR20, efetuado com uma ferramenta sem revestimento e velocidade de corte de 20 m/min, obteve um valor médio de 5,698 μm para R_a . Este ensaio se demonstrou estável e, apesar de apresentar valores médios de rugosidade maiores que no Ensaio CR25, os resultados obtidos nele foram mais satisfatórios do que no Ensaio SR25, feito com o mesmo tipo de ferramenta. Nesse caso, nota-se que a redução da velocidade de corte levou a uma redução de R_a nas ferramentas sem revestimento, o que corrobora com os dados encontrados na revisão feita por Aamir et al. (2020).

O Ensaio CR20 foi executado com uma ferramenta revestida e os mesmos parâmetros de corte do Ensaio SR20. O valor médio de R_a foi de 5,467 μm , o menor entre todos os testes realizados. Neste ensaio, apenas o furo 9 obteve uma média que ultrapassasse 6 μm , mas este processo também demonstrou estabilidade.

Segundo a norma NBR/8404 (1984), furos para usinagem comum possuem uma classe de rugosidade N9 e N10, que indicam que o valor máximo de R_a deve ser 6,3 e 12,5 μm , respectivamente. Assim, observa-se que apenas o Ensaio SR25 apresentou valores fora da classe N9, mas ainda assim apresenta valores aceitáveis para a classe N10, fazendo com que todos os ensaios estivessem dentro do recomendado.

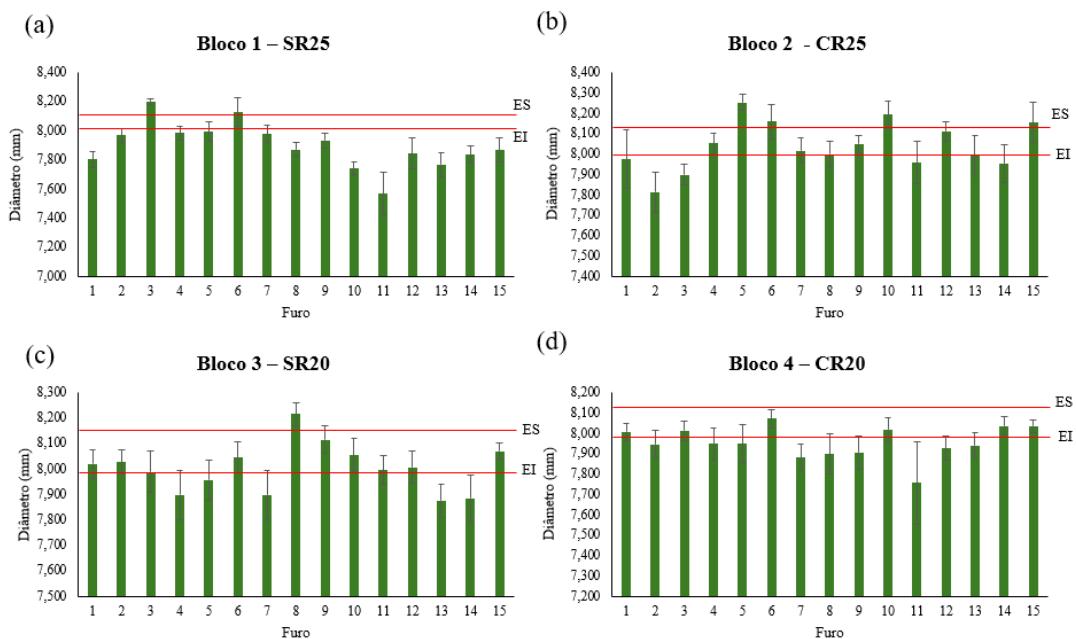
Portanto, observa-se através dos testes realizados, que os valores de R_a foram afetados pela alteração da velocidade de corte. Os testes com v_c mais baixa resultaram em uma rugosidade menor, bem como aqueles que utilizaram ferramentas revestidas.

6.6 TOLERÂNCIA DIMENSIONAL

Além da rugosidade média, utilizou-se a tolerância dimensional para verificar a qualidade dos furos e qual combinação de ferramenta e velocidade de corte proporcionaria um processo mais uniforme e preciso. Para isso, cada furo foi medido cinco vezes utilizando os *softwares ImageJ e AutoCAD*, como mencionado na seção 5.4. Para avaliar se os furos estavam dentro da tolerância, utilizou-se os critérios descritos na seção 4.2, que indicam o afastamento inferior como 8,000 mm e o superior como 8,150 mm.

A Figura 27 ilustra as medidas que foram obtidas e seus respectivos desvios-padrão. Cada bloco foi nomeado de acordo com o ensaio ao qual foi submetido.

Figura 27 – Medida dos furos obtidas no (a) Bloco 1; (b) Bloco 2; (c) Bloco 3 e (d) Bloco 4



Fonte: Autora (2025).

Os afastamentos superior e inferior estão indicados como ES e EI, respectivamente. Através dos gráficos apresentados é possível notar que o Bloco 1 (Figura 23a) não apresentou nenhum furo dentro da tolerância especificada e ficaram, principalmente, com um diâmetro abaixo do recomendado. Poderia-se considerar que a ferramenta apresentasse algum defeito de dimensão, no entanto, o Bloco 3 foi usinado utilizando o mesmo tipo de broca (sem revestimento) e foi o que apresentou a maior quantidade de furos dentro da tolerância.

Os Blocos 2 e 4 apresentaram, respectivamente, 4 e 6 furos dentro da tolerância requerida. Os dois foram usinados com brocas revestidas e mais uma vez observa-se que a utilização de uma velocidade de corte menor contribuiu para uma melhor exatidão, apesar de que menos da metade dos furos ficou dentro dos valores exigidos.

Comparando os melhores resultados entre as ferramentas, verificou-se que a ferramenta sem revestimento (no Bloco 3) apresentou mais da metade dos furos dentro da tolerância, enquanto a ferramenta revestida (no Bloco 4) apresentou apenas 6 furos dentro dos padrões.

Portanto, verificou-se que, apesar de uma menor velocidade de corte ter contribuído para a obtenção de mais furos dentro da tolerância, nenhum dos ensaios apresentou valores satisfatórios quando se trata da dimensão dos furos. Os estudos avaliados na revisão feita por Aamir *et al.* (2020) mostraram que o erro de dimensão em furos aumenta de forma diretamente proporcional com o aumento da velocidade de corte.

Outro ponto que vale destacar é que a utilização dos *softwares* exige certa minuciosidade, já que a medição é feita convertendo *pixels* em milímetros e a seleção dos pontos também depende da perspectiva da fotografia. O Anexo A inclui as medições que foram feitas e pode-se notar que a vista de alguns furos não ficaram totalmente perpendiculares à câmera, o que acrescentou uma imprecisão ao processo.

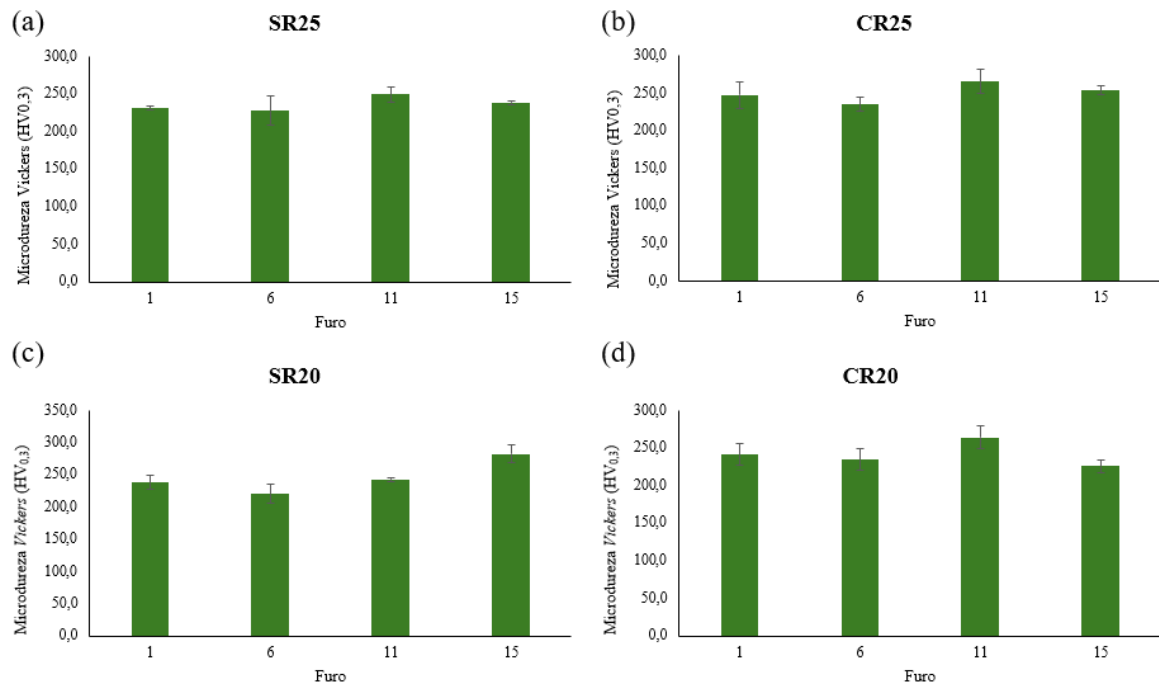
6.7 MICRODUREZA

A Figura 28 ilustra a média microdureza *Vickers* obtida próxima aos furos com seus respectivos desvios-padrão. Através dele, nota-se que a dureza ao redor dos furos aumentou em relação à dureza convencional do Aço ABNT 1020, que é de aproximadamente 210 HV. A microdureza média obtida no Ensaio SR25 foi de 237 HV, no Ensaio CR25, 251 HV, no Ensaio SR20, 246 HV e no Ensaio CR20, 242 HV.

Nota-se, então, que os valores de microdureza ficaram próximos de 240 HV, indicando que a alteração da velocidade de corte não produziu efeitos significativos na microdureza ao redor dos furos, mas gerou um aumento em relação à microdureza original do aço utilizado.

Como mencionado na seção 6.1, ocorre uma deformação plástica no material usinado, pois quando a ferramenta realiza o movimento para sair do furo, o material é empurrado para fora, formando as rebarbas e fazendo com que a dureza aumente (Aamir *et al.*, 2020; Choudhury; Lawal, 2014).

Figura 28 – Microdureza Vickers próximas ao furo no ensaio (a) SR25, (b) CR25, (c) SR20, (d) CR20



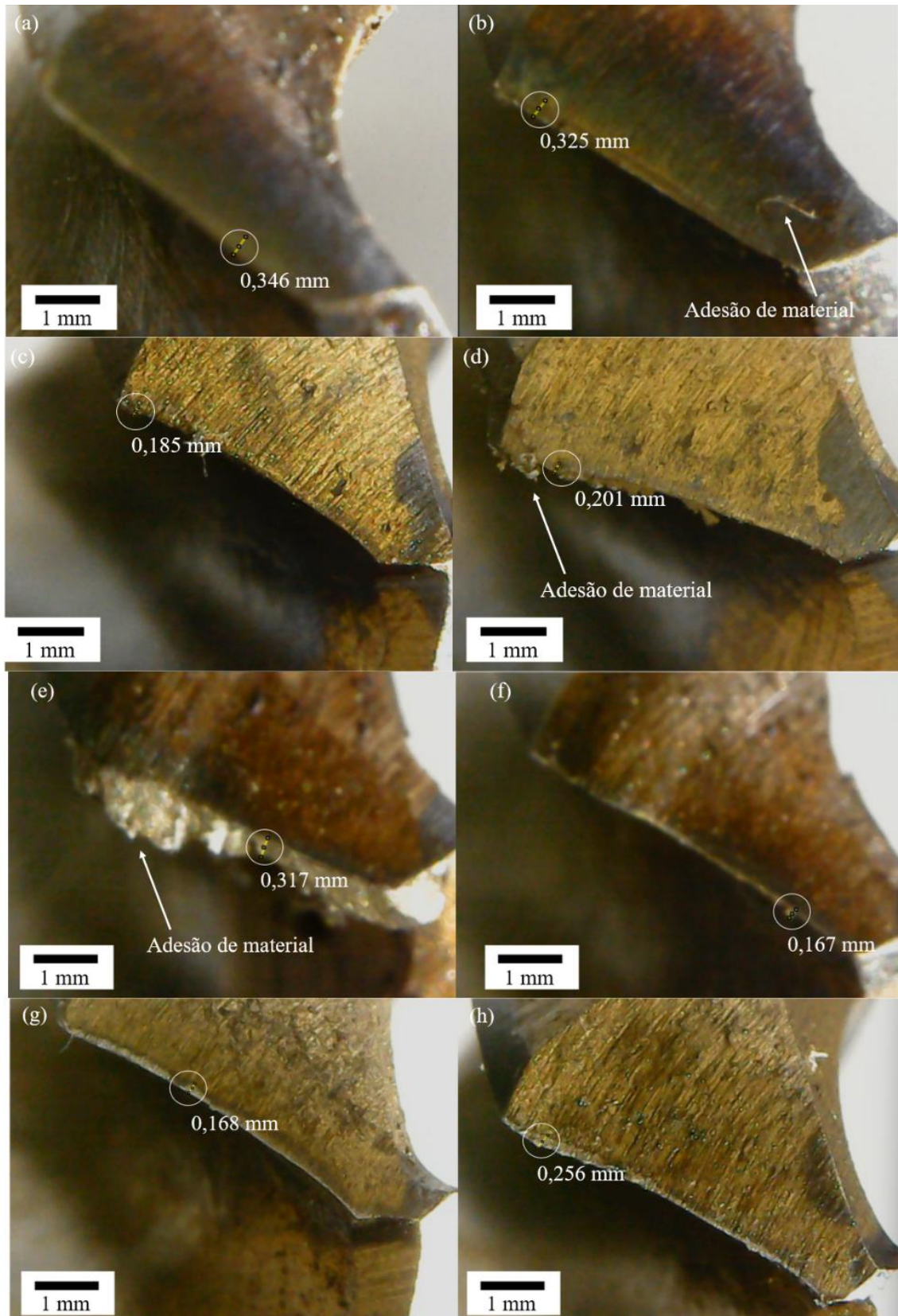
Fonte: Autora (2025).

6.8 DESGASTE DE FLANCO

A fim de verificar o desgaste de flanco das ferramentas, utilizou-se um microscópio digital portátil e o *software ImageJ*. O desgaste máximo foi medido em cada ferramenta após o fim dos 15 furos e através da Figura 29 é possível observar os valores obtidos nas arestas das brocas.

Além do desgaste de flanco, percebe-se também que houve adesão de material durante os processos, principalmente no Ensaio SR20. Esse comportamento ocorre por conta da utilização de uma menor velocidade de corte, que gera uma maior adesão do cavaco na ferramenta, pois em velocidades mais altas a temperatura é maior, diminuindo a resistência do material e, conseqüentemente, a pressão de contato (Ba, 2022).

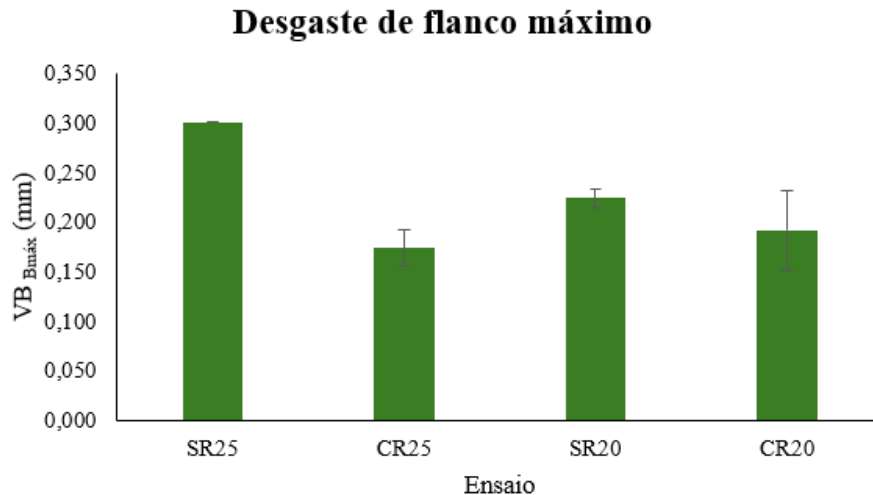
Figura 29 – Desgaste de flanco máximo obtido nas arestas de corte das brocas do Ensaio SR25 (a) e (b); Ensaio CR25 (c) e (d); Ensaio SR20 (e) e (f); e CR20 (g) e (h)



Fonte: Autora (2025).

Na Figura 30 tem-se graficamente os valores médios obtidos para cada ensaio e seus respectivos desvios-padrão.

Figura 30 – Desgaste de flanco máximo



Fonte: Autora (2025).

Como observado na Figura 29, os maiores valores de desgaste foram obtidos nos ensaios feitos com brocas sem revestimento (0,346 e 0,317 mm para os Ensaios SR25 e SR20, respectivamente). Por outro lado, o menores desgastes foram obtidos nas ferramentas revestidas (0,185 e 0,168 para os ensaios CR25 e CR20, respectivamente), uma vez que o revestimento tem a função de aumentar a resistência ao desgaste (Serra *et al.*, 2020). Quando se considera a influência da velocidade de corte para as mesmas ferramentas, nota-se que não houve diferença significativa.

7 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, é possível tirar as seguintes conclusões:

- O aumento da velocidade de corte promoveu a formação de rebarbas ao redor dos furos;
- Considerando a presença ou ausência de revestimento, o consumo de corrente elétrica não foi significativamente alterado, mas o aumento da velocidade de corte gerou um consumo maior;

- A temperatura da ferramenta revestida aumentou a uma velocidade de corte mais alta por causa da presença de titânio em seu revestimento;
- A velocidade de corte mais baixa não gerou diferença significativa na temperatura da ferramenta;
- Todos os ensaios apresentaram cavacos com formatos que não prejudicam o processo produtivo de forma grave, apesar de que os ensaios com velocidade de corte mais alta geraram cavacos que merecem mais atenção durante o transporte e operação;
- Os valores de rugosidade média dos furos se mantiveram dentro dos padrões indicados pela norma NBR/8404;
- A menor velocidade de corte e a utilização da ferramenta revestida geraram uma superfície com rugosidade mais baixa;
- Optar por uma menor velocidade de corte contribuiu para a obtenção de uma maior quantidade furos dentro da tolerância, no entanto, apenas um ensaio promoveu mais da metade dos furos dentro da faixa admissível;
- Os valores de microdureza ao redor dos furos aumentaram em relação à microdureza do material usinado por conta da ocorrência de deformação plástica quando a ferramenta faz o movimento de saída do furo;
- As brocas sem revestimento apresentaram maior desgaste de flanco do que as revestidas e, no processo com menor velocidade de corte houve adesão do cavaco à ferramenta.

Portanto, infere-se que, apesar de promover um tempo de produção mais rápido, o aumento da velocidade de corte promoveu desvantagem em todos os parâmetros analisados. Dessa forma, a utilização de velocidades de corte mais baixas permitiram um melhor acabamento, menor consumo de corrente elétrica, menor temperatura na ferramenta, melhor tolerância dimensional, obtenção de cavacos mais adequados e menor desgaste. A presença do revestimento nas ferramentas levou a uma redução da rugosidade média e no desgaste de flanco máximo, mas apresentou resultados semelhantes quando se compara às ferramentas sem revestimento nos demais aspectos analisados.

REFERÊNCIAS

AAMIR, Muhammad; GIASIN, Khaled; TOLOUEI-RAD, Majid; VAFADAR, Ana. A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 6, p. 12484–12500, 1 nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.003>.

AAMIR, Muhammad; DAVIS, Adrian; KEEBLE, William; KOKLU, Ugur; GIASIN, Khaled; VAFADAR, Ana; TOLOUEI-RAD, Majid. The effect of TiN-, TiCN-, TiAlN-, and TiSiN coated tools on the surface defects and geometric tolerances of holes in multi-spindle drilling of Al2024 Alloy. *Metals*, [s. l.], vol. 11, no 7, 1 jul. 2021. <https://doi.org/10.3390/met11071103>.

ALBERTAZZI JÚNIOR, Armando; DE SOUSA, André R. **Fundamentos da Metrologia Científica e Industrial**. 2. ed. Barueri: Manole, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4297**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6158**: Sistema de tolerância e ajustes. Rio de Janeiro. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 116-1**: Aços-rápidos – Parte 1: Classificação, designação e composição química. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8404**: Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos. Rio de Janeiro. 1984.

BA, Elhadji Cheikh Talibouya. Análise da Influência do Avanço e da Velocidade de Corte no Processo de Furação sobre os Parâmetros de Assimetria (RSK) e Curtose (RKU) na Caracterização Superficial Utilizando Brocas de Aço Rápido com e sem Revestimento DLC (Diamond-Like Carbon). 2022. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

BALAJI, M.; VENKATA RAO, K.; MOHAN RAO, N.; MURTHY, B. S. N. Optimization of drilling parameters for drilling of Ti-6Al-4V based on surface roughness, flank wear and drill vibration. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 114, p. 332–339, 1 jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.051>.

BARBOSA, Marcos Guilherme Carvalho Bráulio. Influência da preparação de aresta e do avanço na usinagem do aço VP20TS. 2021. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2021. Disponível em: <www.bae.unicamp.br>.

BHASKAR, Santosh V.; KUDAL, Hari N. Tribology of nitrided-coated steel-a review. **Archives of Mechanical Technology and Materials**, v. 37, n. 1, p. 50–57, 26 jan. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/amt-2017-0008>.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2016.

CHOUDHURY, I. A.; LAWAL, S. A. Burr Formation in Machining Processes: A Review. **Comprehensive Materials Processing: Thirteen Volume Set**. [S. l.]: Elsevier, 2014. v. 11, p. V11-283-V11-295. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01117-1>.

CZARNIAK, Paweł; SZYMANOWSKI, Karol; PANJAN, Peter; GÓRSKI, Jarosław. Initial Study of the Effect of Some PVD Coatings (“TiN/AlTiN” and “TiAlN/a-C:N”) on the Wear Resistance of Wood Drilling Tools. **Forests**, vol. 13, no 2, 1 fev. 2022. <https://doi.org/10.3390/f13020286>.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Editora Artiber, 2013. DORMER. **Furação 2021-2022**. 2022. Disponível em: https://www.dormerpramet.com/br/pt_BR/downloads-catalogs. Acesso em: 30 mar. 2023.

EL-HOFY, Hassan. **Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.

FISCHER, Cleiton. Avaliação do desgaste de brocas helicoidais de aço rápido boretadas e boretadas+TiN na furação a seco. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, 2016.

LI, Yuan; ZHENG, Guangming; ZHANG, Xu; CHENG, Xiang; YANG, Xianhai; XU, Rufeng. Cutting force, tool wear and surface roughness in high-speed milling of high-strength steel with coated tools. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 33, n. 11, p. 5393–5398, 1 nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12206-019-1033-3>.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; DA SILVA, Mário Bacci. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015.

PODGORNIK, Bojan; SEDLACEK, Marko; ŽUŽEK, Borut; GUŠTIN, Agnieszka. Properties of tool steels and their importance when used in a coated system. **Coatings**, v. 10, n. 3, 1 mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings10030265>.

PRAŁAT, Karol *et al.* Determination of twist drill bits wear: The effect of the composition and structure of the steels. **Polish Journal of Chemical Technology**, v. 24, n. 3, p. 8–13, 1 set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/pjct-2022-0016>.

REDDY, R. Hari Nath; ALPHONSE, Mathew; BUPESH RAJA, V. K.; PALANIKUMAR, K.; SAI KRISHNA SANJAY, D. R.; MADHU SUDHAN, K. V. Evaluating the wear studies and tool characteristics of coated and uncoated HSS drill bit - A review. 46., 2020. **Materials Today: Proceedings** [S. l.]: Elsevier Ltd, 2020. vol. 46, p. 3779–3785. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.022>.

SERRA, Petteson Linniker Carvalho. Nitretação e Estudo do Desempenho de Brocas de Aço Rápido AISI M2 - Efeitos na Evolução do Desgaste das Ferramentas e na Tolerância

Dimensional e Acabamento das Superfícies Usinadas. 2022. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2022.

SERRA, Petteson Linniker Carvalho *et al.* Estudo de nitretação a plasma e tratamento duplex em brocas de aço rápido. **Revista Materia**, v. 25, n. 2, p. 1–15, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1072>.

SHARMA, Anuj Kumar; TIWARI, Arun Kumar; DIXIT, Amit Rai. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 1–18, 20 jul. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.146>.

SOLIDPRIZE. **Velocidade e avanço para brocas de aço-rápido**. 2020. Disponível em: <https://www.solidprize.com.br/2011/04/velocidade-e-avanco-para-brocas-de-aco.html>. Acesso em: 24 jan. 2025.

SOUSA, Vitor F. C. et al. Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel. **Wear**, v. 476, 15 jul. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203695>.

TOENSHOFF, Hans Kurt; DENKINA, Berend. **Basics of Cutting and Abrasive Processes**. Garbsen: Springer, 2013. Disponível em: <http://www.springer.com/series/10642>.

UDDIN, Mohammad et al. Evaluating hole quality in drilling of Al 6061 alloys. **Materials**, v. 11, n. 12, 2 dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma11122443>.

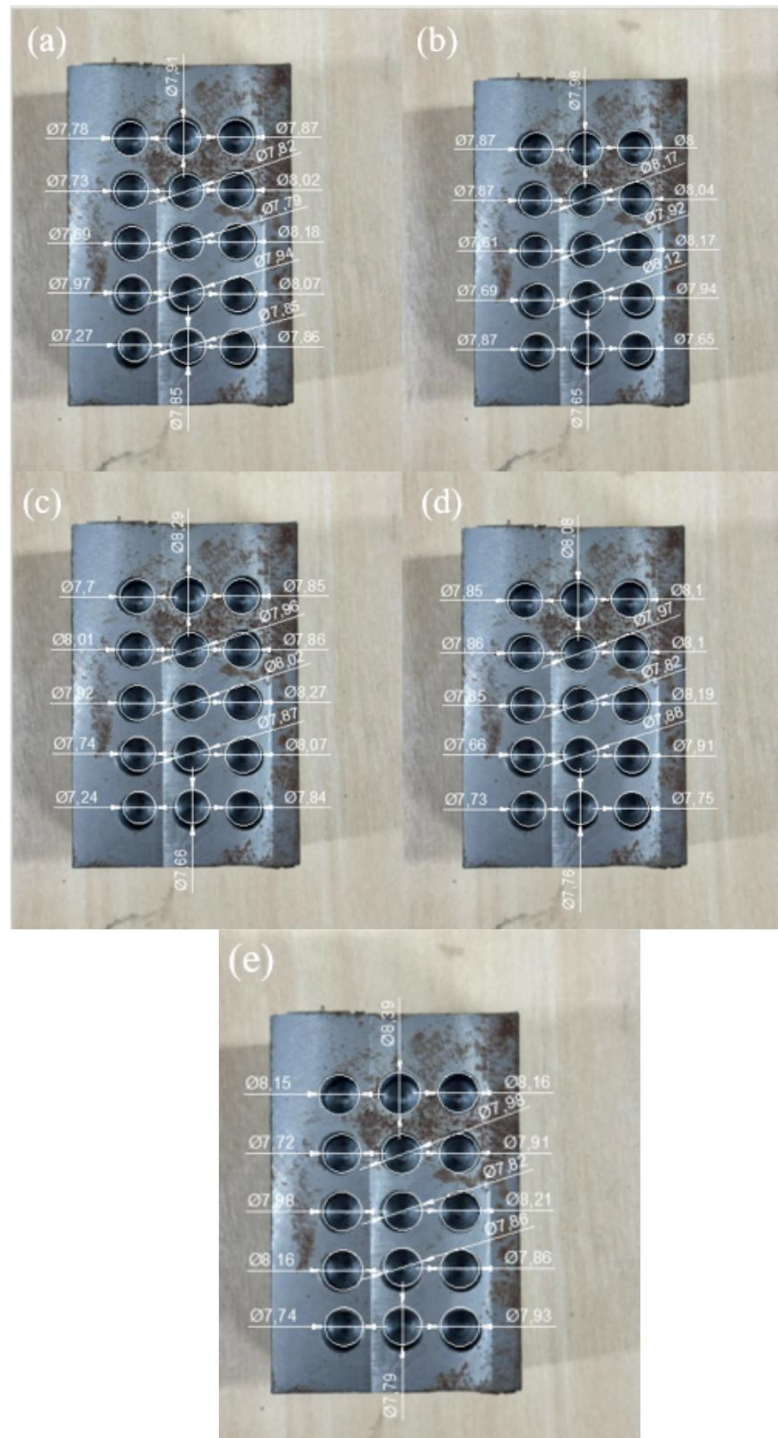
WALKER, John R.; DIXON, Bob. **Machining Fundamentals**. 10. ed. Tinley Park: The Goodheart-Willcox Company, Inc., 2018.

YAŞAR, Nafiz; GÜNAY, Mustafa. Experimental investigation on novel drilling strategy of CFRP laminates using variable feed rate. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, n. 3, 1 mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1658-2>.

ANEXO A – MEDIDAS OBTIDAS

Na Figura 31, encontram-se as medidas obtidas no Bloco 1, do ensaio SR25.

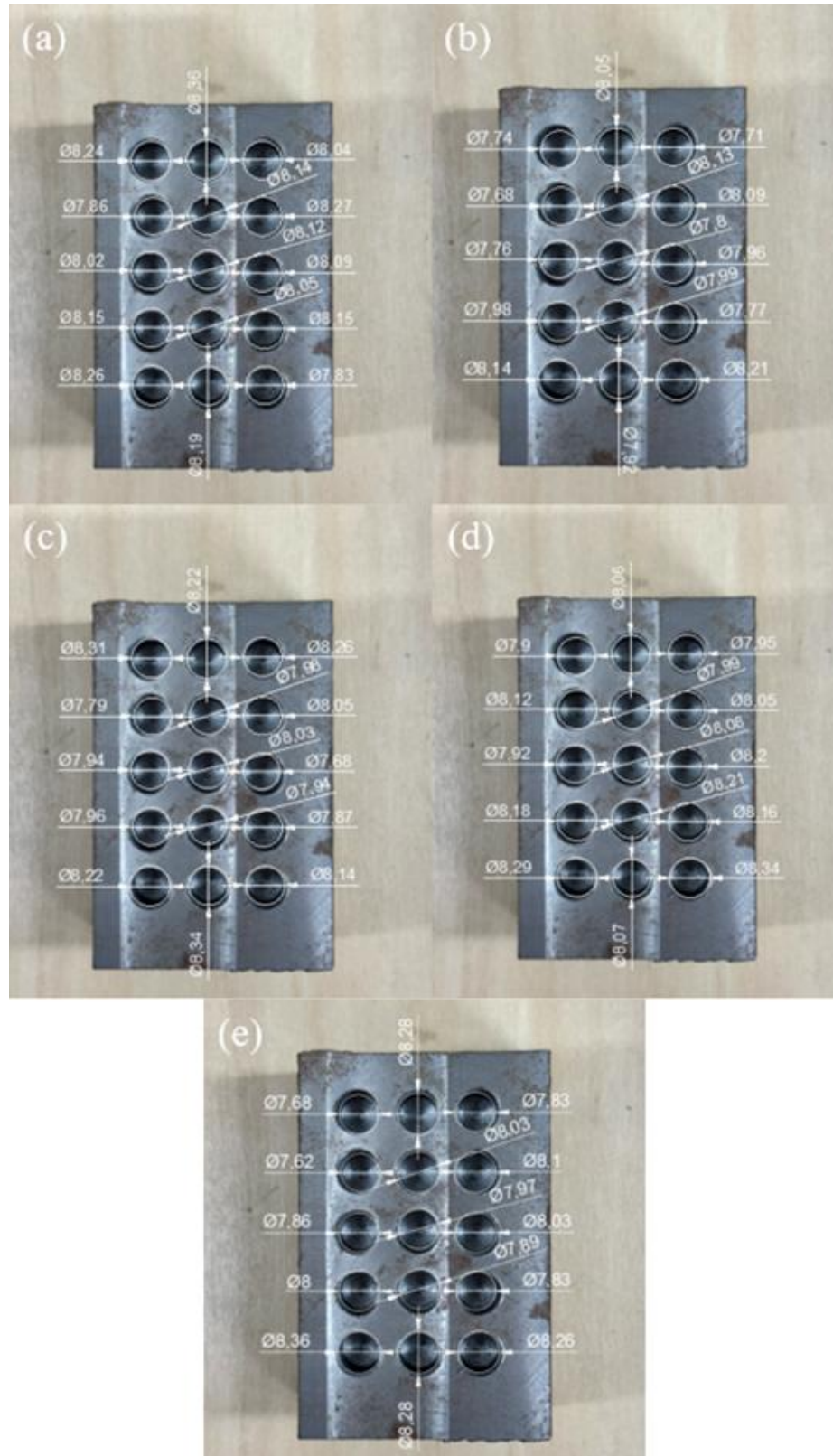
Figura 31 – Medidas dos furos no Bloco 1



Fonte: Autora (2025)

Na Figura 32, encontram-se as medidas obtidas no Bloco 2, do ensaio CR25.

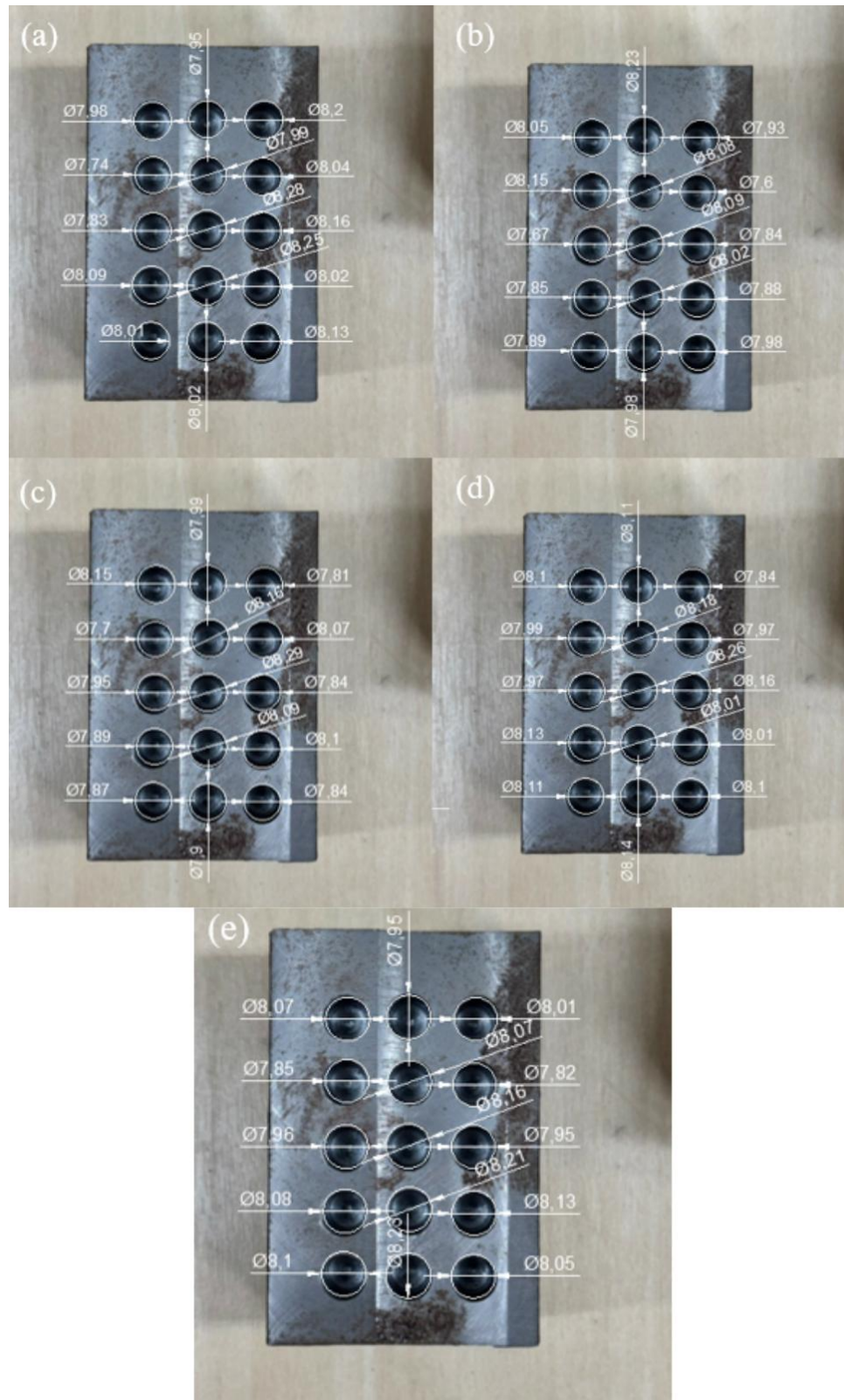
Figura 32 – Medidas dos furos no Bloco 2



Fonte: Autora (2025)

Na Figura 33, encontram-se as medidas obtidas no Bloco 3, do ensaio SR20.

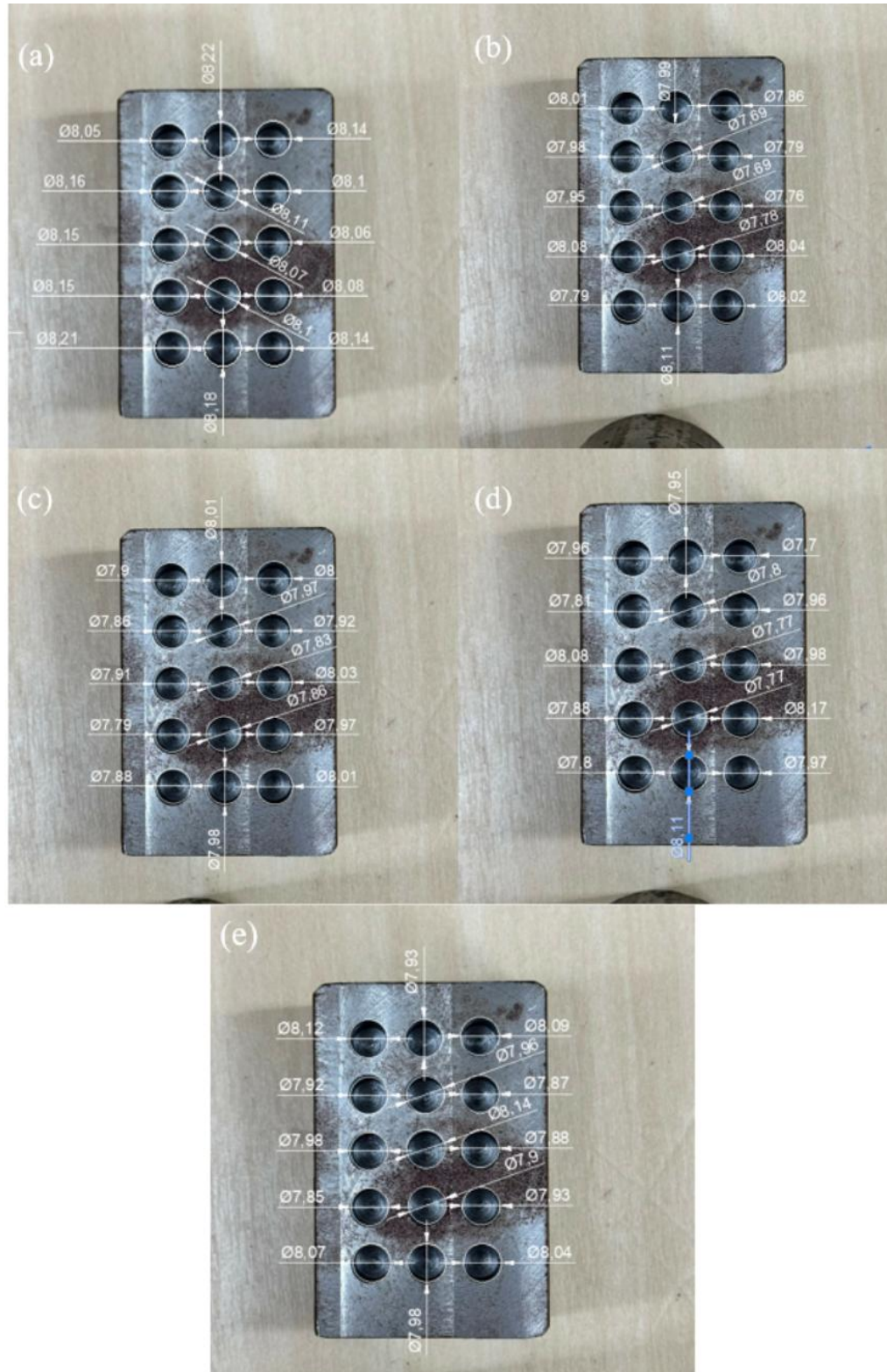
Figura 33 – Medidas dos furos no Bloco 3



Fonte: Autora (2025)

Na Figura 34, encontram-se as medidas obtidas no Bloco 4, do ensaio CR20.

Figura 34 – Medidas dos furos no Bloco 4



Fonte: Autora (2025)