

MATHEUS ALVES DOS SANTOS

**USINAGEM DE MATERIAIS FABRICADOS POR
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO DE
ARCO (MADA) COM E SEM ALÍVIO DE TENSÃO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2025

MATHEUS ALVES DOS SANTOS

**USINAGEM DE MATERIAIS FABRICADOS POR MANUFATURA
ADITIVA POR DEPOSIÇÃO DE ARCO (MADA) COM E SEM ALÍVIO
DE TENSÃO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos para a obtenção do título de **Bacharel
em Engenharia Mecânica**.

Área de Concentração: Usinagem

Orientador: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

UBERLÂNDIA

2025

MATHEUS ALVES DOS SANTOS

**USINAGEM DE MATERIAIS FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA POR
DEPOSIÇÃO DE ARCO (MADA) COM E SEM ALÍVIO DE TENSÃO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de **Bacharel em Engenharia
Mecânica.**

Área de Concentração: Usinagem

Banca Examinadora:

Prof Dr. Rosemar Batista da Silva - FEMEC-UFU - Orientador

Prof. Dr. Éder Silva Costa - ESTES - UFU

Me. Elhadji Cheikh Talibouya Bá - Pós-Graduando - FEMEC-UFU

Uberlândia, Dezembro de 2025.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e oportunidade de me educar.

À minha família - Matias, Anice e Maria Vitória - por todo amor e cuidado até aqui, sem vocês toda essa jornada não seria possível.

À minha namorada - Morgana - por todo companheirismo ao longo desses anos que fortaleceu e me motivou durante todo período de graduação.

Ao Professor Rosemar Batista da Silva, que sem sua ajuda não seria possível hoje a escrita deste trabalho, que orientou com toda paciência e cuidado ao longo do presente trabalho.

Aos amigos do LAPROSOLDA Diandro Bailoni Fernandes, Ricardo Martins, Daniel Dominices, Neandro Teodoro, André Morita e Pedro Lucas Cunha - pelo apoio fornecido para a realização das partes práticas, além de contribuir com o fornecimento das amostras.

Ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da UFU e ao Laboratório de pesquisa LAPROSOLDA da UFU pelo apoio durante a realização desse trabalho.

SANTOS, M. A. **Usinagem de materiais fabricados por Manufatura aditiva por deposição de Arco (MADA) com e sem alívio de tensão**. 2025. 86 f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Uberlândia - MG.

Resumo

A manufatura aditiva (MA) vem se consolidando como uma das principais tecnologias da Indústria 4.0 para produção de peças metálicas por deposição controlada de material camada a camada. Entre os diferentes processos, destaca-se o processo de soldagem a arco, como MIG/MAG, que possibilitam a fabricação de componentes de médio e grande porte com elevada taxa de deposição. No entanto, devido às características intrínsecas do processo, em que a superfície produzida é irregular, com tolerâncias abertas e pobre acabamento, torna-se necessário o emprego de operações de usinagem subsequentes para garantir melhores exatidão e acabamento. Nesse contexto, o torneamento é essencial para garantir, corrigir imperfeições e aproximar a peça da dimensão final que não pode ser obtida apenas pela MA. Este trabalho investigou a usinabilidade de dois tubos fabricados por manufatura aditiva por processo MIG/MAG com arame A5.28 ER90S-B3 e com diâmetro de 90 mm x 120 mm de comprimento x 9 mm de espessura. Uma das peças foi submetida ao tratamento para alívio de tensões residuais pelo método de vibração pós-deposição. Foram utilizados os mesmos parâmetros de usinagem para ambas as peças. Foram variados 2 valores de velocidades de corte (v_c) (56 m/min e 140 m/min). O avanço e a profundidade de corte foram mantidos constantes em todos os ensaios ($f = 0,05$ mm/rotação e $a_p = 0,5$ mm). O torneamento foi realizado com aplicação de fluido de corte. A fim de avaliar a integridade da superfície das peças, a rugosidade (R_a e R_t), a microdureza e a microestrutura abaixo da superfície torneada foram analisadas. O desgaste da ferramenta também foi monitorado. Os resultados mostraram que a peça submetida ao pós-tratamento por vibração apresentou valores menores de rugosidade superficial. Para a velocidade de corte de 56 mm/min, houve uma redução de 27% no parâmetro R_a , enquanto para 140 mm/min a redução foi de 47%. Quanto à microdureza, o tratamento pós alívio de tensões contribuiu com a diminuição da média de dureza na amostra depositada, com queda de 306 HV (deposição convencional) para 271 HV (alívio de tensão por vibração). Porém, após os processos de torneamento, a média de dureza da amostra depositada de forma convencional se elevou independente da velocidade de corte. Menor taxa de desgaste das ferramentas foi observado após a usinagem da peça submetida ao tratamento de alívio de tensões, reforçando o potencial da técnica como alternativa viável para melhoria da usinabilidade de material feito por MA utilizado neste trabalho.

Palavras-chave: Usinagem, Manufatura aditiva, Processo MIG/MAG, Arame A5.28 ER90S-B3, Rugosidade, Microdureza, Desgaste de ferramenta.

SANTOS, M. A. **Machining of materials manufactured by arc deposition additive manufacturing (ADM) with and without stress relief process**. 2025. 86 p. Final Graduation Project (Bachelor of Mechanical Engineering) - Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlandia.

Abstract

Additive manufacturing has established itself as one of the main technologies of Industry 4.0, enabling the production of metal parts through controlled layer-by-layer material deposition. Among the different processes, the use of arc welding techniques, such as MIG/MAG, stands out, enabling the manufacture of medium and large components with a high deposition rate. However, due to the intrinsic characteristics of the process, in which the resulting irregular surface, wide tolerances and poor finishing, subsequent machining operations are necessary to ensure better accuracy and finishing of workpieces. This work aimed to evaluate the machinability of two tubes manufactured by additive manufacturing using the MIG/MAG process with A5.28 ER90S-B3 wire with a 90 mm diameter x 120 mm length x 9 mm thickness. One of the workpieces was subjected to a residual stress relief test using the post-deposition vibration method. The same machining parameters were used for both parts. Two cutting speeds (v_c) were varied (56 m/min and 140 m/min). Feed and depth of cut were kept constant in all tests ($f = 0.05$ mm/rev. and $a_p = 0.5$ mm). Tests were carried out with coolant. To evaluate the surface integrity of workpieces, the roughness (R_a and R_t), microhardness and microstructure below the machined surface were analyzed. Tool wear was also monitored. The results showed that the part subjected to post-treatment by vibration presented lower surface roughness values. For a cutting speed of 56 mm/min, there was a 27% reduction in the R_a parameter, while for 140 mm/min the reduction was 47%. As for microhardness, post-stress relief treatment contributes to a decrease in the average hardness of the deposited and stress-relieved sample, dropping from 306 HV (conventional deposition) to 271 HV (vibration stress relief). However, after the turning processes, the average hardness of the conventionally deposited sample increased regardless of the cutting speed. A lower tool wear rate was observed after machining the part subjected to stress relief treatment, reinforcing the potential of the technique as a viable alternative for improving machinability of the material made by MA tested in this work.

Keywords: *Machining, Additive manufacturing, MIG/MAG process, A5.28 ER90S-B3 wire, Roughness, Microhardness and Tool wear.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Classificação dos processos de MA em sete grandes categorias (Hybrid Manufacturing Technologies, 2020).	18
Figura 2.2 - Esquema do Processo PBF utilizando laser como fonte de calor e leito em pó (Souza, 2022, adaptado).	19
Figura 2.3 - Etapas sequenciais de fabricação de um flange: 1) Modelagem 3D e definição do produto; 2) Geração do arquivo STL; 3) Planejamento da trajetória de deposição; 4) Composição da linguagem de programação; 5) Deposição; 6) Pós processamentos; 7) Acabamento e inspeção (Ferraresi, 2023, adaptado).	20
Figura 2.4 - Ilustração esquemática do processo de soldagem de deposição com energia direcionada de soldagem MIG/MAG (Modenesi, Marques, Santos, 2012).	21
Figura 2.5 - Esquema do processo de soldagem MIG/MAG (Rodrigues, 2011).	22
Figura 2.6 - Modos de transferência metálica no processo GMAW (Modenesi, 2008).	22
Figura 2.7 - Seção transversal de manufatura aditiva do aço VP50IM. a) Microestrutura do início da estrutura com presença de ferrita e perlita, b) Microestrutura do meio da estrutura com presença de ferrita e perlita c) Microestrutura do topo a estrutura com presença de cementita (Toaldo, 2022, adaptado).	23
Figura 2.8 - Influência do cromo na resistência a ruptura dos aços (Neto, 2019).	26
Figura 2.9 - Vista em Perspectiva da Distribuição das Tensões Residuais em peças unidas por Manufatura Aditiva Longitudinal (a) e Transversal (b) Após a Soldagem (Serrati, 2024, adaptado).	28
Figura 2.10 - Direções principais e as grandezas físicas do processo de torneamento (Ferraresi, 1977).	29
Figura 2.11 - Representação da relação entre avanço de uma ferramenta de raio de ponta r (Sanches, 2011).	31
Figura 2.12 - Mecanismo da formação do cavaco em torneamento (Machado <i>et al.</i> , 2011).	32
Figura 2.13 - Tipos de desgastes em ferramenta de corte: (A) Desgaste de cratera; (B) Desgaste de flanco; (C) e (D) Desgaste de entalhe (Machado <i>et al.</i> , 2011).	33
Figura 2.14 - Parâmetros de desgaste das ferramentas de corte (Norma ISO 3685, 1993, adaptado).	34
Figura 2.15 - Diagrama dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da	

temperatura no processo de usinagem (Machado et al., 2009).....	36
Figura 2.16 - Esquema ilustrando aspecto geral de uma superfície de uma peça (Santos e Sales, 2008).....	40
Figura 2.17 - Acabamento superficial na usinagem interna a 3000 rpm e $a_p=0,125$ mm apresentando vibrações durante o processo (Cabau; Cossich, 2015, adaptado).....	41
Figura 2.18 - Esquema representando o parâmetro de Rugosidade R_a (Espanhol 2008, adaptado).	42
Figura 2.19 - Esquema representando o parâmetro de Rugosidade R_t (Espanhol, 2008, adaptado).	42
Figura 2.20 - Perfil de microdureza variando os parâmetros de V_c e f (Houffman <i>et al.</i> , 2020).	44
Figura 2.21 - Esquema para realização de medição de dureza Vickers (Costa, 2019, adaptado).	45
Figura 3.1 - Fluxograma de atividade para o desenvolvimento do trabalho.....	48
Figura 3.2 - Foto do sistema de alívio de tensões no processo de fabricação da amostra II.	49
Figura 3.3 - Imagem das amostras depositadas por manufatura aditiva com arame AWS A5.28 ER90S-B3 usadas para o presente trabalho.	50
Figura 3.4 - Processos de corte em serra fita e cortadora metalográfica para confecção de amostras.....	51
Figura 3.5 - Amostras A e B embutidas e preparadas sendo A com processo de vibração pós soldagem e B sem a realização de tratamento de vibração, ademais da ampliação, mostrando a imagem microscópica dos pontos de medição de microdureza.....	52
Figura 3.6 - Torno IMOR MAXI 520 utilizado nos ensaios de torneamento.	53
Figura 3.7 - Especificação da pastilha de metal duro da marca SwissTech, modelo TNMG 160404 (CF Ferramentas, 2025).....	53
Figura 3.8 - Desenho do suporte para ferramentas de torneamento externo 20X20 - MTJNR 2020 K16 - TNMG 16 (Piveta ferramentas, 2025).	54
Figura 3.9 - Foto do set-up para torneamento de desbaste das amostras de aço feito por MA.	54
Figura 3.10 - Ilustração da divisão de regiões ao longo do comprimento da peça nas amostras para a realização dos ensaios de torneamento.....	55
Figura 3.11 - Foto da amostra I após a realização dos ensaios 1 e 2.	56

Figura 3.12 - Superfícies das peças após a realização de ensaio de torneamento	57
Figura 3.13 - Medição da rugosidade superficial das superfícies.	58
Figura 3.14 - Microscópio Olympus SZ61 utilizado nas medições dos desgastes das ferramentas de corte (Prolab, 2025).	58
Figura 4.1 - Rugosidade Ra em função da velocidade de corte para as diferentes amostras de aço.....	60
Figura 4.2 - Rugosidade Rt em função da Velocidade de corte para as diferentes amostras de aço.....	61
Tabela 4.1 - Tabela de parâmetros (Aouici <i>et al.</i> , 2013, adaptado).....	61
Figura 4.3 - Efeito da velocidade de corte sobre a rugosidade perante as taxas de avanço (Aouici <i>et al.</i> , 2013, adaptado).	62
Figura 4.4: Rugosidade da superfície versus velocidades de avanço e corte para liga de aço EN8 no processo de torneamento utilizando pastilhas de metal duro com face plana não revestida à base de tungstênio DCMT 11T312 e profundidade de corte constante de 1,5 mm (Vikram e Ratnam, 2012, adaptado).	63
Figura 4.5 - Faixas de velocidade de corte e avanço determinadas para diferentes tipos de materiais conforme norma ISO 3685 (Metalzenith, 2025, adaptado).....	64
Figura 4.6 - Microestrutura das amostras I e II antes da realização dos processos de torneamento.....	65
Figura 4.7 – Microestruturas da peça depois da realização da usinagem (a, b, c e d) - representando testes 1,2 3 e 4 respectivamente.....	66
Figura 4.8 - Perfil de dureza abaixo da superfície usinada após torneamento na amostra I, sem alívio de tensões.	67
Figura 4.9 - Perfil de dureza abaixo da superfície usinada após torneamento na amostra II, com alívio de tensões.	68
Figura 4.10 - Superfície de saída das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 56$ m/min, amostra I teste 1 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 56$ m/min, amostra II teste 3, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm.....	70
Figura 4.11 - Superfície de saída das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 140$ m/min, amostra I teste 2 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 140$ m/min, amostra II teste 4, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm.....	71
Figura 4.12 - Ponta das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 56$ m/min, amostra I teste 1 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 56$ m/min, amostra II teste 3, com	

alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm.....	71
Figura 4.13 - Ponta das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 140$ m/min, amostra I teste 2 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 140$ m/min, amostra II teste 4, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm.	72
Figura 4.14 - Superfície primária das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 56$ m/min, amostra I teste 1 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 56$ m/min, amostra II teste 3, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm.....	72
Figura 4.15 - Superfície primária das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 140$ m/min, amostra I teste 2 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 140$ m/min, amostra II teste 4, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm.....	72
Figura 4.16 - Superfície secundária das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 56$ m/min, amostra I teste 1 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 56$ m/min, amostra II teste 3, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm.....	73
Figura 4.17 - Superfície secundária das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 140$ m/min, amostra I teste 2 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 140$ m/min, amostra II teste 4, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação de Usinabilidade (Beddoes; Bibby, 2003, adaptado).....	39
Tabela 2.2 - Parâmetros de corte utilizados empregados no torneamento do aço AISI 316L (Houffman <i>et al.</i> , 2020, adaptado).....	43
Tabela 3.1 - Composição química das amostras Sem tratamento e Com tratamento de alívio de tensão de acordo com o mapa EDS	52
Tabela 3.2 - Condições de corte empregadas nos ensaios de torneamento.	56
Tabela 4.1 - Tabela de parâmetros (Aouici <i>et al.</i> , 2013, adaptado).....	61
Tabela 4.2 - Valores experimentais dos testes de torneamento em liga de aço EN8 com dureza de 170,4 HB, utilizando pastilhas de metal duro com face plana não revestida à base de tungstênio DCMT 11T312 e profundidade de corte constante de 1,5 mm (Vikram e Ratnam, 2012, adaptado).....	63
Tabela 4.3 - Valores de desgaste das ferramentas medidos para várias condições de corte empregadas nos ensaios de torneamento.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

APC - Aresta postiça de corte

ASTM - American Society for Testing and Materials

AWS - American Welding Society

CAD - Desenho assistido por computador

CBN - Nitreto de Boro Cúbico

CNC - Comando Numérico Computadorizado

DED - Deposição com energia direcionada

f - Avanço [mm/rev]

GMA-DED - Gas Metal Arc-Directed Energy Deposition

GMAW - Gas Metal Arc Welding

HV - Dureza Vicker

ISO - Organização Internacional para Padronização

MA - Manufatura Aditiva

MAG - Metal Active Gas

MADA - Manufatura Aditiva por Deposição de Arco

MADA - Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

MIG - Metal Inert Gas

MQR - Machine Qualification Record

NBR - Normas Brasileiras de Normas

n - Rotação [rpm]

PBF - Powder Bed Fusion

PQR - Procedure Qualification Record

PVD - Physical Vapor Deposition

Ra - Rugosidade Média Aritmética [μm]

Rt - Rugosidade Total [μm]

TR - Tensão Residual

UFU - Universidade Federal de Uberlândia

Vc - Velocidade de corte [m/min]

VSR - Vibratory Stress Relief

ap - Profundidade de Corte [mm]

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	10
1. INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO II	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. Manufatura Aditiva Para Aços.....	13
2.1.1. Conceito.....	13
2.1.2. Principais Processos de Fabricação por MA.....	15
2.1.3. Processo de Deposição com energia direcionada.	18
2.1.4. Aços Liga e o Arame A5.28: ER 90S-B3 para deposição em MADA	23
2.1.5. Alívio de tensões em peças soldadas.....	25
2.2. Torneamento de aços	26
2.2.1. Definição e grandezas físicas do torneamento	27
2.2.2 Mecanismos De Formação Do Cavaco no Torneamento.....	30
2.2.3 Tipos de desgaste em ferramentas de corte.....	31
2.2.5. Mecanismos de desgaste	34
2.2.6. Fatores que afetam a usinabilidade de um material.....	36
2.3. Integridade de Superfícies Usinadas.....	39
2.3.1. Rugosidade	40
2.3.2. Dureza do material usinado	42
2.3.3. Alterações Metalúrgicas	44
CAPÍTULO III	47
3. METODOLOGIA	47
3.1. Materiais e equipamentos utilizados	49
3.2. Metodologia Utilizada	55
CAPÍTULO IV	59
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
1.1. Rugosidade	59
4.2 Microestrutura	66
4.3. Microdureza	67
4.4. Desgaste das Ferramentas de Corte.....	70

CAPÍTULO V.....	76
CONCLUSÕES	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA) tem se consolidado como uma escolha cada vez mais relevante nos processos de fabricação, principalmente em relação de peças que são fabricadas por usinagem, por vários motivos. Um deles é ausência da necessidade de estocar grandes volumes de matéria-prima, como barras, tarugos e chapas, o que por sua vez dispensa grandes almoxarifados, como também de dispensar contêineres para a colocação de cavacos (Thiesen Junior, 2021). Além disso, a peça feita por MA exige menor quantidade de sobre-metal durante a usinagem, o que configura um produto racionalizado aproximando as dimensões da pré forma ao formato final desejado.

A partir de 1980 iniciaram-se pesquisas relacionadas a processos de fabricação por adição de material onde inicialmente, a técnica foi chamada de prototipagem rápida (Rapid Prototyping - RP), devido a sua capacidade de reproduzir protótipos tridimensionais de maneira rápida e generalizada, o que mais tarde a norma ASTM - F2792 (2012) da Sociedade Americana de Teste e Materiais definiu como Manufatura Aditiva (Ferraresi, 2018).

A Manufatura Aditiva pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de camadas que são depositadas seguindo informações obtidas diretamente de representações geométricas computacionais. Nesse processo podem ser utilizados vários tipos de materiais e métodos de deposição a depender da complexidade e finalidade da peça que será gerada (Volpato; Carvalho, 2018). Dentre os principais processos de fabricação por MA, destaca-se aquele que envolve a deposição de múltiplas camadas de metal por meio de um arco elétrico, seguindo uma trajetória gerada por softwares de fatiamento. Esses softwares fornecem as coordenadas para um robô equipado com uma tocha de soldagem MIG/MAG, que realiza a deposição e a fabricação de estruturas com diferentes modelos (Volpato; Carvalho, 2018). Durante esse processo, devido ao aporte térmico característico do processo que pode atingir na poça de fusão temperaturas próximas a 3000°C, as variações térmicas geram tensões internas na peça que podem afetar a

microestrutura da peça, como também características mecânicas, como a sua dureza, por exemplo, o que exige mais atenção dos técnicos de usinagem para a seleção de ferramentas de corte, dentre outros parâmetros, pois em alguns casos a dureza da peça feita por manufatura aditiva pode ser maior do que aquela de peças produzidas por processos tradicionais de fabricação, por exemplo a laminação (Volpato; Carvalho, 2018).

Processos de Manufatura Aditiva que apresentem maior exatidão das peças produzidas a fim de atender a requisitos geométricos mais detalhados, normalmente necessitam de um pós-processamento ou de acabamento posterior para que a peça atinja as dimensões e tolerâncias especificadas de projeto (Ferraresi, 2023). Portanto, é fundamental o desenvolvimento de métodos inovadores e eficazes para produzir peças com propriedades mecânicas que atendam aos requisitos de projeto como aquelas que são feitas por processos tradicionais, conformação mecânica, fundição e usinagem, por exemplo. Neste sentido, como a maioria destas peças feitas por MA necessitam de pelo menos um estágio com operação de usinagem para chegar à forma e dimensões finais, é importante realizar estudos e entender como o método de fabricação da peça e as propriedades pode influenciar na seleção de parâmetros de corte de usinagem (Ferraresi, 2018).

As tensões residuais provenientes da soldagem são aquelas que permanecem no material mesmo sem a presença de cargas externas ou variações térmicas. Elas surgem devido às variações de temperatura e às diferentes velocidades de resfriamento que ocorrem ao longo do ciclo térmico do processo de deposição e podem permanecer na peça quando o material retorna à temperatura ambiente após o término da soldagem. A natureza e a intensidade dessas tensões se alteram constantemente conforme o material passa pelas fases de aquecimento, fusão e posterior resfriamento (Serrati, 2024).

Com o objetivo de reduzir os efeitos negativos provocados pelas tensões residuais geradas na soldagem, são aplicados procedimentos específicos de alívio. Esses métodos podem envolver abordagens térmicas ou mecânicas, com destaque para o método de alívio de tensões por vibração mecânica.

O método de alívio de tensões por vibração mecânica baseia-se na aplicação de um ou mais modos vibratórios, seja em frequência ressonante ou abaixo dela em uma estrutura metálica soldada ou depositada por manufatura aditiva. Para isso, utilizam-se excitadores de alta potência, conforme descrito por Shankar (1982), dispositivos os quais normalmente são compostos por massas excêntricas conectadas a motores de velocidade ajustável, acompanhados por sistemas de controle e alimentação correspondentes (Serrati, 2024). O alívio das tensões residuais é uma estratégia utilizada para reduzir os possíveis danos que esses esforços podem provocar nos componentes.

Neste trabalho foram realizados ensaios de torneamento cilíndrico externo em duas amostras produzidas pela deposição do arame AWS A5.28 ER90S-B3 por processo de

Manufatura Aditiva a Arco (MADA), com a técnica de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). Esta técnica se baseia na multi deposição de cordões de solda para criar uma pré-forma da peça sobre um substrato previamente selecionado, de acordo com a estrutura desejada. Foram utilizadas duas amostras do mesmo material, sendo que uma delas foi submetida ao ensaio de alívio de tensões e a outra foi depositada pelo método tradicional, sem pós-tratamento.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar ensaios de usinagem das peças feitas com arame AWS A5.28 ER90S-B3 por meio do processo de manufatura aditiva e verificar se há influência do uso de tratamento de tensões residuais por meio de vibração após a deposição na usinabilidade do material. Os ensaios de torneamento foram realizados com duas velocidades de corte sendo 56 m/min e 140 m/min; o avanço e a profundidade de corte foram mantidos constantes em todos os ensaios ($f = 0,05$ mm/rotação e $a_p = 0,5$ mm). As ferramentas foram pastilhas de metal duro da SwissTech, modelo TNMG 160404. As variáveis de saída analisadas foram rugosidade da peça, a microdureza, a microestrutura das amostras e a análise dos desgastes sofridos pela ferramenta de corte no processo de torneamento.

Esta monografia foi estruturada em cinco capítulos:

CAPÍTULO I - Apresenta-se a introdução, em que são informados o contexto do trabalho, os objetivos e resumo das variáveis de entrada e de saída investigadas. Destaca-se ainda a relevância e a abrangência do tema, justificando sua importância para a área.

CAPÍTULO II - Seção que apresenta revisão bibliográfica reúne e fundamenta teoricamente as informações pertinentes relacionadas a manufatura aditiva para aços, torneamento de aços e integridade de superfícies usinadas servindo como base para o desenvolvimento do trabalho.

CAPÍTULO III - Contém a metodologia que descreve detalhadamente os materiais, técnicas e procedimentos utilizados ao longo do trabalho.

CAPÍTULO IV - Apresenta os resultados e discussões dos resultados, mostrando os dados obtidos, acompanhados de interpretações e comentários técnicos.

CAPÍTULO V - Abrange as conclusões referentes aos resultados alcançados, bem como recomendações para pesquisas futuras.

Por fim, são indicadas as referências bibliográficas utilizadas, as quais fundamentaram a elaboração deste trabalho.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados a definição de Manufatura Aditiva e as características de cada um dos seus processos, além de citar aspectos microestruturais das peças resultantes de cada deposição, como mudanças de microestrutura e alterações em concentrações de tensões residuais. Além disso, serão apresentados os conceitos de processos de usinagem convencionais com foco na operação de torneamento e seus principais parâmetros operacionais, além de integridade de superfícies usinadas e desgastes de ferramenta em processos de torneamento.

2.1. Manufatura Aditiva para Aços

2.1.1. Conceito

A intensa concorrência e a crescente complexidade na fabricação dos produtos têm levado as empresas a realizarem mudanças significativas no processo de desenvolvimento de formas de fabricação de materiais. Essas mudanças visam, sobretudo, reduzir o tempo de desenvolvimento e fabricação sem perda de qualidade das peças, e ao mesmo tempo buscando manter competitividade no mercado. Para isso, é essencial tanto a melhoria na gestão do processo quanto a adoção de novas técnicas e ferramentas de projeto, análise, simulação e otimização de peças (Volpato; Carvalho, 2018).

Neste contexto, nos últimos vinte anos, a manufatura aditiva (MA) evoluiu rapidamente na indústria. No século XX, a MA era chamada de prototipagem rápida e manufatura em camadas, e que teve base na estereolitografia. A MA tem o potencial de produzir diretamente um produto funcional a partir de dados gerados por softwares de design auxiliado por computador (CAD) (Li, *et al.*, 2019).

A norma ABNT NBR/ISO/ASTM 52900:2018 define a manufatura aditiva como um processo de união de materiais para a fabricação de peças a partir de modelos 3D, geralmente por deposição camada por camada. Esse método contrasta com os conceitos de processos tradicionais, como a manufatura subtrativa, que consiste na remoção de material por processos como a usinagem, e a manufatura formativa, que envolve geração de produtos por meio de processos de conformação e de fundição do material.

Dentre as várias vantagens da MA, ela se destaca por permitir fabricar peças de diferentes formas geométricas pela deposição de camada por camada e não exige processos de usinagem com máquinas de 5 eixos, por exemplo, para gerar geometrias complexas nos estágios iniciais. Nos processos convencionais, como fresamento, torneamento e retificação, a fabricação de algumas peças poderia ser inviável devido a altos custos ou dificuldades operacionais, como as de realizar fixações de peças de geometrias complexas (Gibson, *et al.*, 2015).

Outra vantagem da MA é o menor grau de automação exigido do que processos de usinagem com máquinas CNC de 3 ou 5 eixos, por exemplo, reduzindo significativamente a necessidade de intervenção do operador ao longo do processo. O operador em geral precisa cuidar da preparação do equipamento, incluindo o fornecimento de materiais e a configuração dos parâmetros da máquina de soldagem, além da remoção e limpeza da peça ao término da fabricação. Durante a produção de peça por MA, utilizam-se dados geométricos extraídos de um sistema de planejamento do processo, diretamente a partir do modelo computacional 3D da peça. Essas informações são então enviadas à máquina seguindo uma sequência de fabricação, permitindo que ela realize o trabalho de forma autônoma, sem a necessidade de supervisão contínua (Volpato; Carvalho, 2018).

Apesar das grandes vantagens, os processos de manufatura aditiva enfrentam diversos desafios que precisam ser superados para tornar esses processos mais viáveis. Entre esses desafios, podem ser citados o tempo de produção de um único componente, que é significativamente maior em comparação aos processos de fabricação em massa, a disponibilidade de máquinas com a flexibilidade necessária para trabalhar com diferentes materiais, geometrias e precisão adequada, que variam conforme a peça, e o custo dos equipamentos (Bourell, *et al.*, 2009).

Segundo Ferraresi (2023), com o aumento da utilização e a disponibilização dos resultados de pesquisas relacionadas à manufatura aditiva, a qualificação de máquinas de manufatura aditiva (Machine Qualification Record - MQR) torna-se essencial para garantir que o equipamento seja capaz de produzir amostras que atendam às propriedades exigidas em todo o envelope de construção para aquele processo. Além disso, a qualificação de procedimentos de manufatura aditiva (Procedure Qualification Record - PQR) é crucial para demonstrar a capacidade do procedimento em produzir componentes específicos que

atendam às propriedades finais exigidas. Então, a qualificação de operadores de manufatura aditiva é fundamental para determinar a aptidão dos operadores em concluir a fabricação de componentes aceitáveis para um determinado modelo de máquina. Desta forma, a qualificação do conjunto máquina e operador é realizada por processo, enquanto o procedimento exige uma qualificação por componente. Isso são recomendações de fabricação via GMA-DED - AWS D20.1/D20.1M:2019 e que podem elevar o custo de processos que utilizam MA.

2.1.2.Principais Processos de Fabricação por MA

A escolha do processo de fabricação por manufatura aditiva a ser utilizado dependerá à primeira vista da geometria da peça a ser fabricada. Peças pequenas e com geometria complexa requerem baixas taxas de deposição, sendo assim, os processos de fabricação por manufatura aditiva tais como a soldagem a laser, feixe de elétrons e micro-plasma são os mais adequados. Já para o processamento de componentes de maiores dimensões são recomendados processos com maiores taxas de deposição, como os de soldagem a arco, por exemplo (Alberti, *et al.*, 2014).

Apesar do constante desafio imposto pelo surgimento de novas tecnologias e processos de fabricação, a norma ABNT NBR/ISO ASTM 52900:2018 classifica os processos de manufatura aditiva em sete grandes grupos, que serão listados a seguir e ilustrados de forma esquemática na Figura 2.1. É importante destacar que os processos dentro de cada categoria podem ser combinados com processos de usinagem com máquinas equipadas com Comando Numérico Computadorizado (CNC), que resulta em um processo conhecido como manufatura híbrida (combinação da rota de fabricação aditiva com a rota subtrativa em um único equipamento) como uma solução para conferir maior versatilidade e menor tempo de processamento (Ferraresi, 2018).

- Fotopolimerização em Cuba (Vat Photopolymerization) - método em que um fotopolímero líquido presente em um recipiente é solidificado seletivamente por meio de polimerização ativada pela luz.
- Fusão em Leito de Pó (Powder Bed Fusion) - método em que a energia térmica funde seletivamente áreas específicas de um leito de pó.
- Jateamento de Ligante (Binder Jetting) - método em que um agente de ligação líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó.
- Jateamento de Material (Material Jetting) - método em que gotículas de material de construção são depositadas seletivamente.
- Laminação de Folhas (Sheet Lamination) - método em que folhas de material são

unidas para formar uma peça.

- Extrusão de Material (Material Extrusion) - método em que o material é distribuído seletivamente através de um bico ou orifício.
- Deposição com Energia Direcionada (Directed Energy Deposition) - método em que a energia térmica focalizada é utilizada para fundir materiais à medida que são depositados.

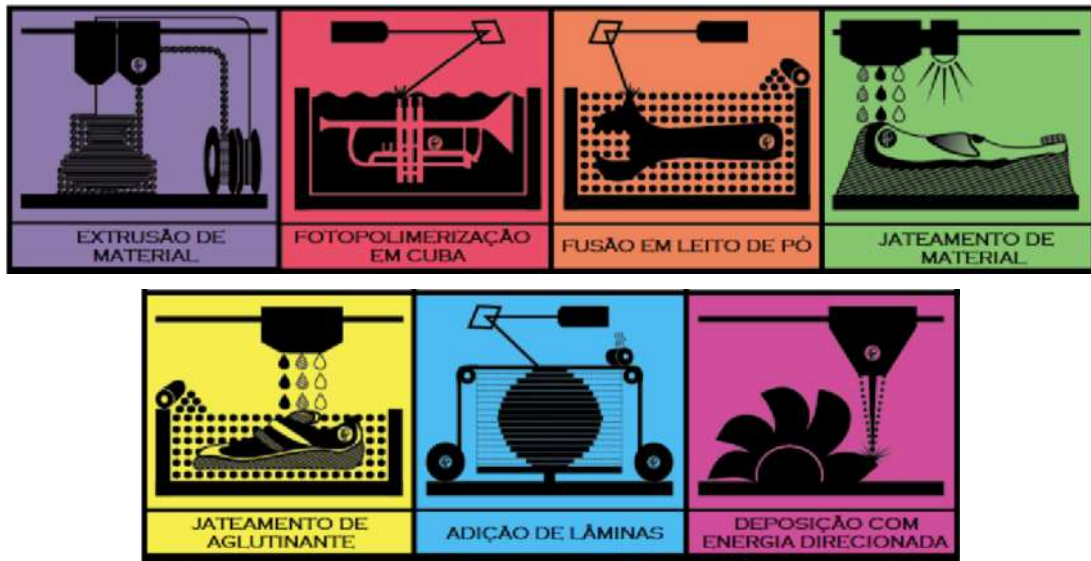


Figura 2.1 - Classificação dos processos de MA em sete grandes categorias (Hybrid Manufacturing Technologies, 2020).

Em termos de mercado, segundo Thomas-Seale *et al.*, (2018) comercialmente há disponíveis dois tipos de tecnologia muito utilizadas a nível industrial para deposição de material metálico, manufatura aditiva:

- Fusão em leito de pó (PBF); e
- Deposição com energia direcionada (DED).

A tecnologia de leito de pó para metais, conforme Figura 2.2, envolve os processos de sinterização ou fusão seletiva por laser e por feixe de elétrons, nos quais camadas finas de pó metálico são distribuídas sobre uma plataforma em câmara com gás inerte ou vácuo e processadas seletivamente conforme planos horizontais extraídos de projetos em desenho assistido por computador (Computer Aided Design - CAD). Em seguida realiza-se a deposição do material seguida da sinterização ou fusão, o que permite gerar peças com geometrias complexas, graças às possibilidades metalúrgicas dos diferentes pós. Apesar de suas vantagens, essa tecnologia demanda fontes de energia de alto custo, o que pode ser

um fator limitante para aquisição para muitas empresas. Além disso, o processo de leito de pó possui baixa velocidade de deposição de 0,5 a 2,5 kg/hora, recomendado para produção peças de dimensões limitadas pelas câmaras. Os consumíveis utilizados também apresentam custo elevado, o que impacta diretamente na viabilidade econômica da aplicação em larga escala (Ferraresi, 2023).

Uma variedade de pós-metálicos pode ser empregada nesse processo, sendo que os mais utilizados são os aços inoxidáveis, as ligas de titânio, os materiais termoelétricos, as superligas à base de níquel e as ligas com memória de forma (Souza, 2022).

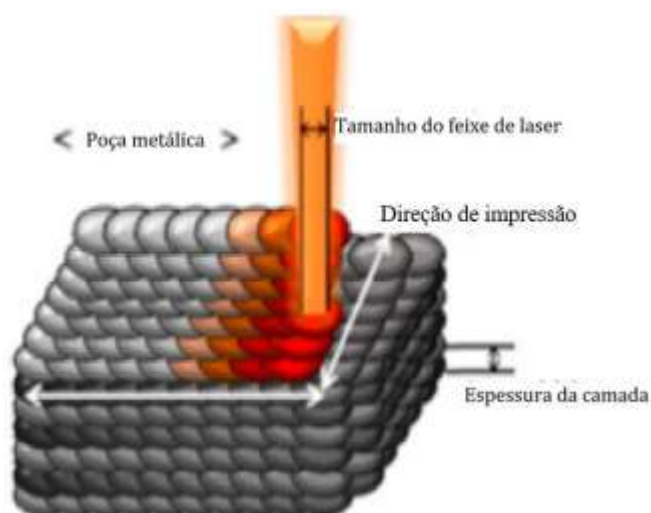


Figura 2.2 - Esquema do Processo PBF utilizando laser como fonte de calor e leito em pó (Souza, 2022, adaptado).

O processo de deposição por energia direcionada, conforme Figura 2.3, segundo Ferraresi (2023) consiste na fusão e quase ao mesmo tempo a deposição do material e são assistidos por uma fonte de calor intensa e concentrada. Eles são geralmente empregados na fabricação de pré-formas que é uma estrutura inicial, produzida camada por camada, que passara por processos de fresamento ou torneamento para que se torne um produto funcional. Para este processo, os métodos são típicos de soldagem para depositar camadas de metal fundido, seguindo trajetórias definidas pela geometria da peça a ser fabricada. Com a constante solidificação, obtém-se uma forma com dimensões muito próximas do produto final, mas com algum excesso nas dimensões, necessitando de etapas de usinagem, geralmente para desbaste fino e acabamento (Ferraresi, 2023).



Figura 2.3 - Etapas sequenciais de fabricação de um flange: 1) Modelagem 3D e definição do produto; 2) Geração do arquivo STL; 3) Planejamento da trajetória de deposição; 4) Composição da linguagem de programação; 5) Deposição; 6) Pós processamentos; 7) Acabamento e inspeção (Ferraresi, 2023, adaptado).

No presente trabalho, as peças selecionadas para a operação de usinagem foram fabricadas pelo processo de manufatura aditiva que emprega com energia direcionada. A manufatura aditiva por deposição a arco utilizando o processo GMAW (Gás Metal Arc Welding) é uma tecnologia emergente que gera grande expectativa em diversos setores industriais devido à sua capacidade de construir peças com maior produtividade e menor custo em comparação com outras tecnologias. Além disso, essa tecnologia permite a produção de peças com boas propriedades mecânicas e relativa complexidade (Galeazzi, 2024).

2.1.3. Processo de Deposição com energia direcionada.

Como já mencionado previamente, o processo de deposição por energia direcionada envolve a fusão do material simultaneamente à sua deposição, sendo ambos conduzidos com o auxílio de uma fonte de calor intensa e altamente concentrada. Nesses processos os principais parâmetros operacionais são tensão, indutância, intensidade da corrente da soldagem, velocidade de alimentação de arame, velocidade de avanço do arame, vazão do gás de proteção, distância da tocha a peça e polaridade (Modenesi, Marques e Santos, 2012).

A tensão, fator essencial para a estabilidade do arco elétrico, e a velocidade de alimentação do arame devem permanecer constantes. A indutância, por sua vez, atua na manutenção do equilíbrio da corrente e no controle de respingos do material sendo

adicionado. Além disso, tanto a fonte de energia quanto as estratégias de deposição, como a escolha da trajetória da tocha de soldagem, influenciam diretamente na qualidade da solda (Modenesi, Marques e Santos, 2012).

A soldagem a arco com proteção gasosa, conhecida como *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), é um método utilizado para unir peças metálicas através do aquecimento delas por meio de um arco elétrico, formado entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça que está sendo trabalhada. A proteção do arco e da área da solda contra a contaminação da atmosfera é feita por um gás ou uma mistura de gases, que podem ser classificados como inertes ou ativos. No Brasil, esse processo é chamado de MIG (*Metal Inert Gas*) quando utiliza proteção composta por gases inertes ou predominantemente inertes, e MAG (*Metal Active Gas*) quando se utilizam gases ativos ou misturas com maior concentração de gases ativos. (Modenesi, Marques, Santos, 2012). Neste processo há vários desafios e um deles é o acúmulo de calor nas camadas depositadas em função da alta taxa de deposição dessa técnica que demanda uma entrada de calor maior do que a necessária para processos como fusão em leito de pó, citado anteriormente e outras técnicas de deposição por energia direcionada (Silva, 2019).

O ciclo térmico resultante durante a deposição ilustrada na Figura 2.4 desempenha um papel crucial nos processos de manufatura aditiva, pois a peça é submetida a repetidas exposições a gradientes elevados de temperatura devido à aplicação sucessiva de camadas. Essa condição provoca uma distribuição complexa do gradiente térmico ao longo da peça, afetando diretamente as tensões residuais, as deformações, a microestrutura e, por consequência, o desempenho final do componente produzido (Zhao *et al.*, 2011).

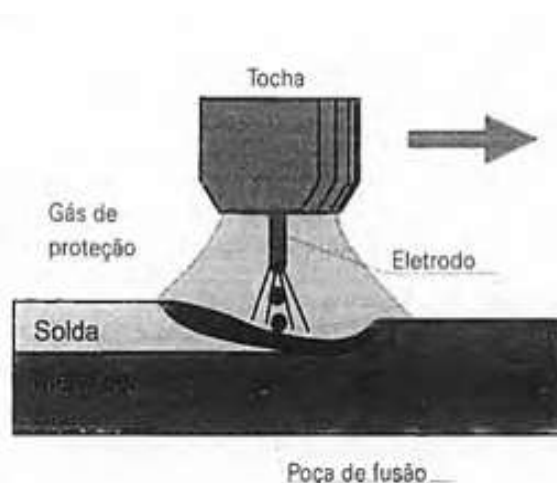


Figura 2.4 - Ilustração esquemática do processo de soldagem de deposição com energia direcionada de soldagem MIG/MAG (Modenesi, Marques, Santos, 2012).

O processo MIG/MAG une metais por meio da fusão gerada por um arco elétrico entre um arame continuamente alimentado e a poça de fusão. Um fluxo contínuo de gás é utilizado para proteger a poça de fusão da contaminação atmosférica e manter a estabilidade do arco, atuando como meio ionizante. A Figura 2.5 ilustra o processo de soldagem processo MIG/MAG. Quando gases inertes como hélio, argônio e suas misturas são usados, o processo é chamado de MIG. Já quando gases que interagem com o metal fundido, como o Dióxido de Carbono (CO_2), são utilizados, o processo é denominado MAG (Rodrigues, 2011).

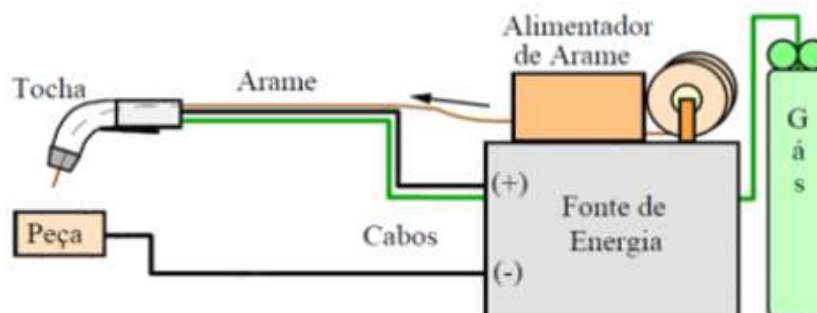


Figura 2.5 - Esquema do processo de soldagem MIG/MAG (Rodrigues, 2011).

Em processos de soldagem, a forma como o metal de adição é transferido do eletrodo para a peça através do arco é conhecido como transferência metálica. No processo de Soldagem MIG/MAG, existem três modos principais de transferência metálica entre o eletrodo e a peça: globular, curto-circuito e spray. Fatores determinantes para que esses modos de transferência aconteçam são: as correntes de soldagem, o diâmetro do arame, o comprimento do arco além das características da fonte e o gás de proteção (Rodrigues, 2011).

Na Figura 2.6 a, b e c, são mostrados esquemas dos modos de transferência globular, curto circuito e spray, respectivamente:



Figura 2.6 - Modos de transferência metálica no processo GMAW (Modenesi, 2008).

Segundo Silva (2020), a Manufatura Aditiva (MA) pode empregar uma variedade de processos e tecnologias. Dentre eles, destacam-se os métodos tradicionais de soldagem a arco, como MIG/MAG, que possibilitam a fusão e a deposição de diferentes materiais

metálicos com um custo relativamente acessível. Esse tipo de abordagem tem despertado interesse, originando inclusive uma vertente específica da MA conhecida como Manufatura Aditiva por Deposição de Arco (MADA).

A microestrutura do componente metálico fabricado por MADA é afetada pelo acúmulo de calor durante o processo de deposição. Esse fenômeno ocorre quando a entrada de calor na peça por meio do arco elétrico supera a saída de calor por condução, mantendo a peça aquecida durante a deposição, resultando em um balanço energético positivo. Na prática, isso leva ao aumento contínuo da temperatura da pré-forma ao longo do tempo de deposição. O acúmulo de calor é mais evidente na técnica MADA devido ao seu maior aporte de calor. Por isso, a microestrutura de um componente metálico produzido por MADA pode ser diferente daquela obtida por outros métodos de fabricação (Santos, 2022).

Essas mudanças podem ser vistas na Figura 2.7 onde é possível identificar ferrita e perlita tanto nas regiões iniciais quanto intermediárias da estrutura presentes na ampliação da imagem da microestrutura a) e b) da imagem. Já no topo, nos cordões finais, imagem de microestrutura c), observa-se a presença de cementita. Essa formação pode estar associada ao revenimento natural, considerando que o último cordão passa por um resfriamento significativamente mais lento e não é submetido a novos ciclos térmicos (Toaldo, 2022).

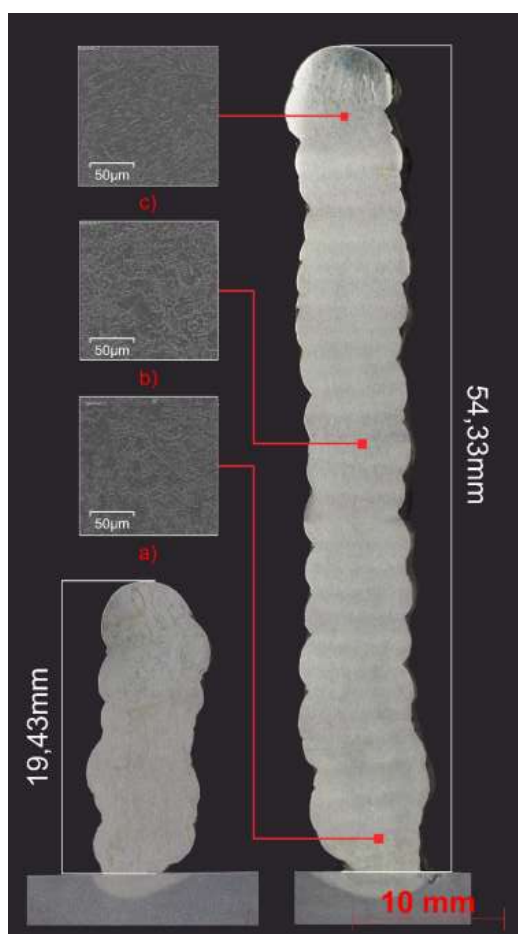


Figura 2.7 - Seção transversal de manufatura aditiva do aço VP50IM. a) Microestrutura do

início da estrutura com presença de ferrita e perlita, b) Microestrutura do meio da estrutura com presença de ferrita e perlita c) Microestrutura do topo a estrutura com presença de cementita (Toaldo, 2022, adaptado).

Dependendo do processo de manufatura aditiva, muitos parâmetros devem ser controlados e eles influenciam nas propriedades do material fabricado, inclusive podendo levar a alterações microestruturais em relação ao próprio material de deposição, arame ou pó. Mesmo dentro de um único processo, diferentes parâmetros podem resultar em microestruturas e composições químicas distintas. A velocidade de deposição e as condições de exposição ao calor, devido à absorção de energia pelo material, são parâmetros que influenciam essas variações (Neikter; Huang; Wu, 2019). Essas temperaturas referem-se à temperatura das camadas previamente depositadas após a adição de uma nova camada (Rodrigues *et al.*, 2020).

Para alcançar as propriedades mecânicas desejadas como em produtos metálicos fabricados por manufatura aditiva, o processo MADA é reconhecido por causar anisotropia nas propriedades dos componentes. Os ciclos térmicos localizados e complexos durante a deposição do material resultam em uma microestrutura heterogênea, o que leva a propriedades mecânicas anisotrópicas. Embora os componentes metálicos produzidos por MA possam ter resistência mecânica igual ou superior àquela dos metais fabricados por métodos convencionais de fabricação, sua ductilidade geralmente é menor. Isso se deve a uma combinação de fatores, como porosidade, defeitos de construção, contaminação, tensões residuais e acabamento superficial inadequado (Sames *et al.*, 2016).

2.1.4. Aços Liga e o Arame A5.28: ER 90S-B3 para deposição em MADA

Os aços ligas são aqueles que contêm adição intencional de elementos de liga além do carbono, visando obter determinadas características. A quantidade total desses elementos define a classe do material, que pode ser aço de baixa, média ou alta liga. Há atualmente disponíveis no mercado diversos tipos de aços de baixa e média liga, que podem ser comercializados com diferentes tratamentos térmicos para atender a variadas aplicações. Um exemplo são os aços de baixa e média liga resistentes ao calor, desenvolvidos para uso em altas temperaturas, sendo amplamente utilizados em tubulações e dispositivos que operam sob alta pressão e temperaturas entre 370 e 600°C (Santos, 2022).

Um exemplo desse aço é o ASTM A335 Gr.22, quando utilizado em tubos de aquecimento de superfície de caldeiras, é uma liga de aço cromo-molibdênio sem costura desenvolvida para suportar condições extremas de operação, como altas temperaturas e pressões. Sua composição química, marcada pela presença de cromo (Cr) e molibdênio (Mo)

(menos de 5% de elementos de liga Cr-Mo), confere ao material elevada resistência mecânica, estabilidade térmica e proteção contra oxidação e corrosão, características que o tornam amplamente empregado em sistemas industriais críticos, como usinas termoeletricas e plantas petroquímicas, onde a confiabilidade e a durabilidade dos componentes são essenciais para o desempenho seguro e eficiente (Zampier, 2014).

Quando a liga é formada predominantemente por ferro e carbono, eles são conhecidos como aços ao carbono. Já quando outros elementos de liga estão presentes na composição, temos os aços ligados, que podem ser classificados em aços de baixa, média e alta liga (Marques, Modenesi, Bracarense, 2011).

Oliveira (2019) define aço como uma liga metálica composta principalmente por ferro e carbono, com a quantidade de carbono variando de 0,008% a 2,11% em aços-carbono que contêm outros elementos apenas como resíduos do processo de fabricação. No entanto, esse valor máximo de carbono pode variar em aços-liga, que são aços-carbono contendo outros elementos de liga, ou quando esses elementos residuais estão presentes em quantidades acima do normal. Segundo este mesmo autor, para que se tenha padronização nos processos de soldagem e deposição, é importante que os operadores de deposição de MA utilizem arames com padrões regulamentados conforme norma American Welding Society, de forma a garantir melhor qualidade e padrão de execução na fabricação de peças advindas desse método de fabricação.

O arame AWS ER90S-B3 é amplamente empregado em equipamentos destinados ao ambiente marinho ou expostos à água do mar. Esses materiais são submetidos a tratamentos térmicos que incluem a normalização, seguida pelo revenimento, garantindo maior resistência e durabilidade (Santos, 2022).

Diversas combinações de Cromo e Molibdênio são empregadas como elementos de liga para a produção de diferentes tipos de aços. Dentre essas combinações, merece destaque o aço da família 2,25Cr-1,0Mo, utilizado na fabricação de caldeiras (Abreu, 2023).

As principais funções do cromo e do molibdênio incorporados à liga são:

- O cromo promove o aumento da resistência à corrosão e melhor estabilidade microestrutural, formando carbonetos dentro dos grãos, o que contribui para elevar a temperabilidade da liga. Na Figura 2.8 é ilustrada a influência do cromo na resistência dos aços da família Cr-Mo, mostrando uma redução até o percentual de 5% de cromo (Neto, 2019).

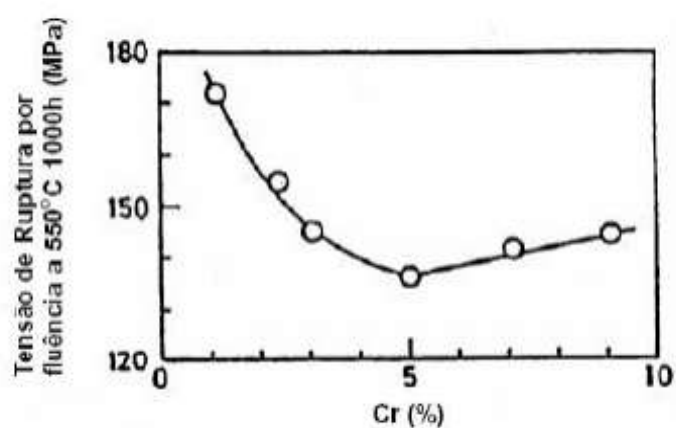


Figura 2.8 - Influência do cromo na resistência a ruptura dos aços (Neto, 2019).

- O molibdênio atua no aumento da resistência à fluência por meio do endurecimento causado pela solução sólida e pela precipitação de carbonetos, especialmente do tipo Mo_2C . Contudo, quando o teor de Mo excede 0,35%, observa-se uma redução na ductilidade sob condições de regime de fluência. Ainda assim, a combinação com Cr neutraliza esse efeito, permitindo sua aplicação, como no caso do aço 2,25%Cr-1,0%Mo (Ferreira, 2023).

2.1.5. Alívio de tensões em peças soldadas

Durante o processo de soldagem, altas temperaturas geram deformações plásticas e tensões residuais na estrutura do material, o que pode comprometer sua resistência mecânica e estabilidade dimensional (Serrati, 2024). Neste contexto, por causa do objetivo deste trabalho que é analisar se o método de alívio de tensões influencia na usinabilidade do material feito por MA, uma breve introdução sobre o processo de alívio de tensões será descrita.

O alívio de tensões vibratórias, traduzido do inglês, *Vibratory Stress Relief* (VSR), é amplamente empregado em grandes estruturas soldadas para estabilizá-las, evitando que se deformem durante processos posteriores de usinagem ou durante sua utilização em serviço. Durante o VSR, o nível de tensão aplicado em tais estruturas corresponde a apenas 5 a 10 por cento da tensão de escoamento do material. Por essa razão, não é claro de que forma essas cargas aplicadas influenciam os níveis de tensões residuais (Walker, 2011).

Ao colocar uma peça soldada em operação, seu desempenho e durabilidade estão intimamente ligados aos níveis de tensões residuais presentes nela. Em situações adversas, essas tensões podem causar a formação e propagação de trincas, tornando inviável o uso da peça. Assim, é necessário interromper o funcionamento do equipamento por um certo período para substituir o componente danificado (Serrati, 2024).

Ainda segundo Serrati (2014), minimizar os níveis de tensões residuais é essencial para assegurar um bom desempenho da peça ou estrutura soldada, além de reduzir o tempo de parada das máquinas.

Modenesi et al. (2006) definem o método de tratamento de vibração de acordo com o um processo mecânico que ocorre devido a uma deformação plástica parcial, que é gerada por uma ressonância de baixa frequência causada pela vibração. Esse alívio utiliza a energia vibracional para redistribuir as tensões internas presentes na estrutura metálica, promovendo, assim, um alívio das mesmas. Contudo, essa técnica não atua de forma uniforme, o que significa que algumas áreas podem apresentar um maior grau de relaxamento das tensões em comparação a outras.

Prohaszka, Hidasi e Varga (1975) afirmam que na soldagem o material apresenta um excesso de discordâncias em sua estrutura cristalina como resultado da deformação plástica causada pelo ciclo térmico do processo de deposição de material. Essa deformação plástica ocorre devido às variações anisotrópicas de temperatura, seja pelo seu aumento ou diminuição, assim como pelas transformações de fase que acontecem durante o processo de soldagem (Figura 2.9). O alívio acontece por meio da redução da quantidade de discordâncias presentes na estrutura cristalina.

Segundo Welding Handbook (1998) os principais efeitos das tensões residuais em

peças soldadas são:

- a) A adição de tensões residuais à carga que a solda tenha sido projetada para suportar pode levar ao colapso do material.
- b) Pode levar à redução da resistência à corrosão sob tensão pois as regiões submetidas a tensões de tração elástica podem sofrer corrosão localizada em ambientes agressivos.
- c) Podem levar à formação de trincas já que todos os mecanismos de trincamento são afetados pelo estresse residual e distorção causada pelo aquecimento localizado.

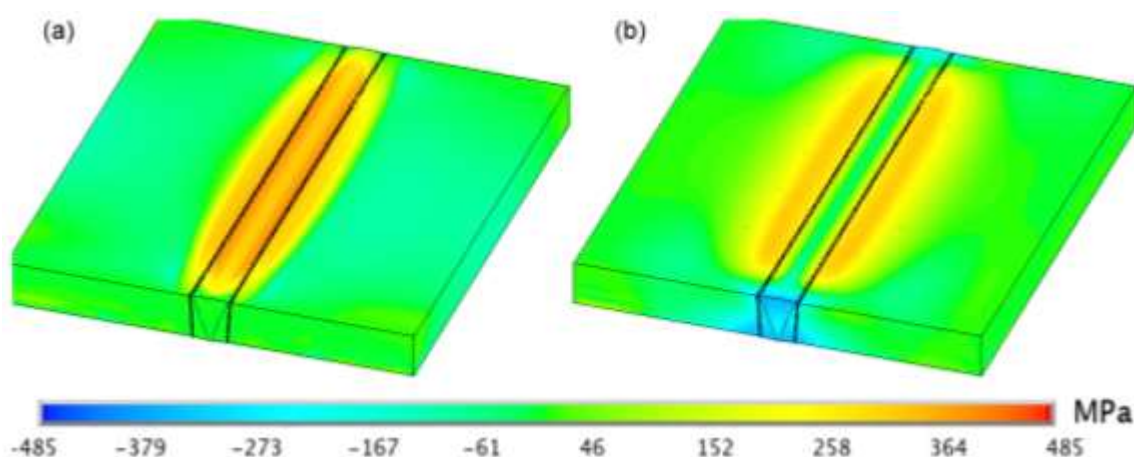


Figura 2.9 - Vista em Perspectiva da Distribuição das Tensões Residuais em peças unidas por Manufatura Aditiva Longitudinal (a) e Transversal (b) Após a Soldagem (Serrati, 2024, adaptado).

2.2 Torneamento de aços

A usinagem é caracterizada como um processo de fabricação destinado a atribuir à peça forma, dimensões e acabamento de acordo com o projeto por meio da remoção de cavaco, que representa a parte do material retirada da peça. (Machado, *et al.*, 2015). Ainda segundo o autor, dentre os principais processos de usinagem convencionais com ferramenta de geometria definida, o torneamento merece destaque pois é aquele mais amplamente empregado para processar materiais metálicos, visando gerar várias geometrias e formas de superfícies de revolução. Esse processo utiliza uma ou mais ferramentas monocortantes com geometria definida. Durante a operação, a peça é submetida a um movimento rotacional em torno de seu eixo principal, enquanto a ferramenta se desloca em sentidos transversal e

longitudinal. De acordo com Sanches (2011), o processo de torneamento pode envolver o monitoramento de forças de corte, potência e de vibrações. Estes parâmetros são interligados e se complementam mutuamente. Ainda em concordância com Sanches (2011), os dados obtidos a partir do monitoramento dessas variáveis permitem estabelecer correlações entre os parâmetros de corte e os resultados obtidos para as peças, em termos de integridade, que incluem a microdureza e rugosidade. Além disso, pode ser estabelecida relação entre forças e potência de corte e desgaste de ferramentas.

2.2.1. Definição e grandezas físicas do torneamento

No torneamento é importante compreender as grandezas físicas do processo pois os valores que são selecionados afetam diretamente as variáveis de saída que normalmente são monitoradas, tais como rugosidade, microdureza e microestrutura da peça, além do desgaste das ferramentas.

No processo de torneamento há três direções principais como ilustrado esquematicamente na Figura 2.10:

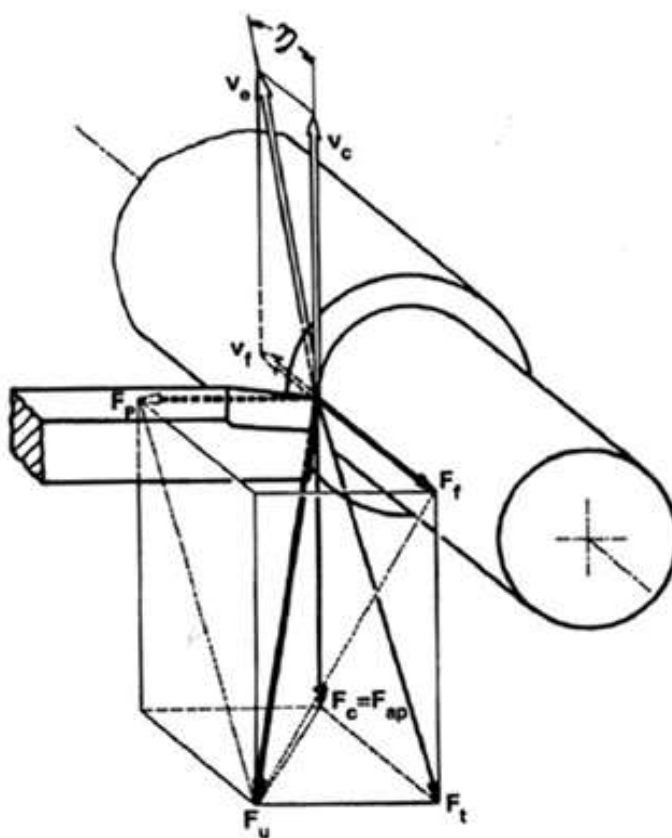


Figura 2.10 - Direções principais e as grandezas físicas do processo de torneamento (Ferraresi, 1977).

A direção de corte é determinada pelo vetor tangente à velocidade de corte em um ponto selecionado dentro da área de contato entre a ferramenta e a peça. Essa direção é ortogonal tanto ao eixo de rotação da peça quanto à linha radial que se estende do centro da peça até o ponto de corte escolhido. Desta figura, tanto o vetor velocidade de corte V_c quanto a força de corte F_c estão alinhados com a direção de corte, a direção de avanço corresponde ao deslocamento da ferramenta em relação à peça, sendo paralela ao eixo de rotação da peça no caso do torneamento cilíndrico. A velocidade de avanço V_f e componente da força de avanço, F_f estão alinhadas com essa direção. Por último, existe a direção de profundidade de usinagem ou de corte, que é perpendicular às duas anteriores e orientada no sentido radial da peça.

Neste processo, as velocidades de corte, de avanço e efetiva podem ser calculadas com base nas Equações (2.1), (2.2) e (2.3):

$$V_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad (2.1)$$

$$V_f = f * n \quad (2.2)$$

$$V_e = \sqrt{V_c^2 + \left(\frac{V_f}{1000}\right)^2} \quad (2.3)$$

Em que:

- d = diâmetro (mm)
- f = avanço (mm/rot)
- n = rotação (rpm)
- V_c = velocidade de corte (m/min)
- V_e = velocidade efetiva de corte (m/min)
- V_f = velocidade de avanço (mm/min)

Além destas variáveis de entrada, também é importante sobre a área da seção de corte (A), comprimento usinado (L_f), taxa de remoção de material (Q), e volume de material removido (V_r) conforme mostram nas Equações (2.4), (2.5), (2.6 e (2.7):

$$A = f * a_p \quad (2.4)$$

$$L_f = V_f * t_c = f * n * t_c = \frac{f * t_c * 1000 * V_c}{\pi * d} \quad (2.5)$$

$$Q = A * V_c = f * a_p * V_c \quad (2.6)$$

$$V_r = L_f * A = Q * t_c \quad (2.7)$$

Em que:

- A = seção transversal de corte (mm²)
- ap = profundidade de corte (mm)
- d = diâmetro (mm)
- f = avanço (mm/rev)
- Lc = comprimento usinado (mm)
- n = rotação (rpm)
- Q = taxa de remoção (mm³/min)
- t_c = tempo de corte (min)
- V_c = velocidade de corte (m/min)
- V_r = volume de material removido (mm³)

Em relação à influência das principais grandezas físicas do processo, em geral o aumento na velocidade de corte resulta em elevação da temperatura na área de corte, afetando as propriedades mecânicas do material sendo usinado. Já o avanço impacta a intensidade da força de avanço gerada no processo, assim como a espessura do cavaco obtido, de forma que ele interfere na rugosidade da peça, qualidade do acabamento superficial da peça, sendo que maiores valores de avanço resultam em maior valor de rugosidade da peça usinada para um mesmo raio de ponta (Machado *et al.*, 2011). Este efeito ocorre predominantemente devido a fatores geométricos, como ilustrado na Figura 2.11:

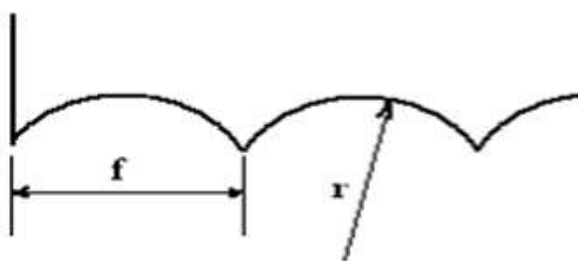


Figura 2.11 - Representação da relação entre avanço de uma ferramenta de raio de ponta r (Sanches, 2011).

2.2.2 Mecanismos De Formação Do Cavaco no Torneamento

Machado *et al.* (2015) relatam que a formação do cavaco ocorre como resultado da ruptura do material da peça, ocasionada por velocidades extremamente altas de deformação.

Para facilitar a compreensão desse processo, a formação do cavaco pode ser descrita nas seguintes etapas:

- Recalque: momento em que há o contato e a penetração da ferramenta no material
- Deformação plástica e fratura: inicialmente, o material passa por uma deformação elástica e, em seguida, por uma deformação plástica, até ocorrer a fratura, que na maioria das vezes se dá por cisalhamento. Em seguida, ocorre a abertura e a propagação de uma fissura, guiada por características específicas de cada material.
- Deslizamento das camadas: conforme o alcance da propagação das fissuras na etapa anterior, influenciado tanto pelo material usinado quanto pelas condições de corte, ocorrerá a fratura parcial ou total do material. Isso resultará na formação de cavacos contínuos ou descontínuos, de acordo com a resistência e o tamanho das camadas do material removido.
- Ejeção do cavaco: devido ao movimento relativo entre o cavaco e a ferramenta, aliado a pressões, temperaturas e velocidades elevadas, o atrito gera o surgimento de uma zona de cisalhamento secundário, ilustrada na Figura 2.12.

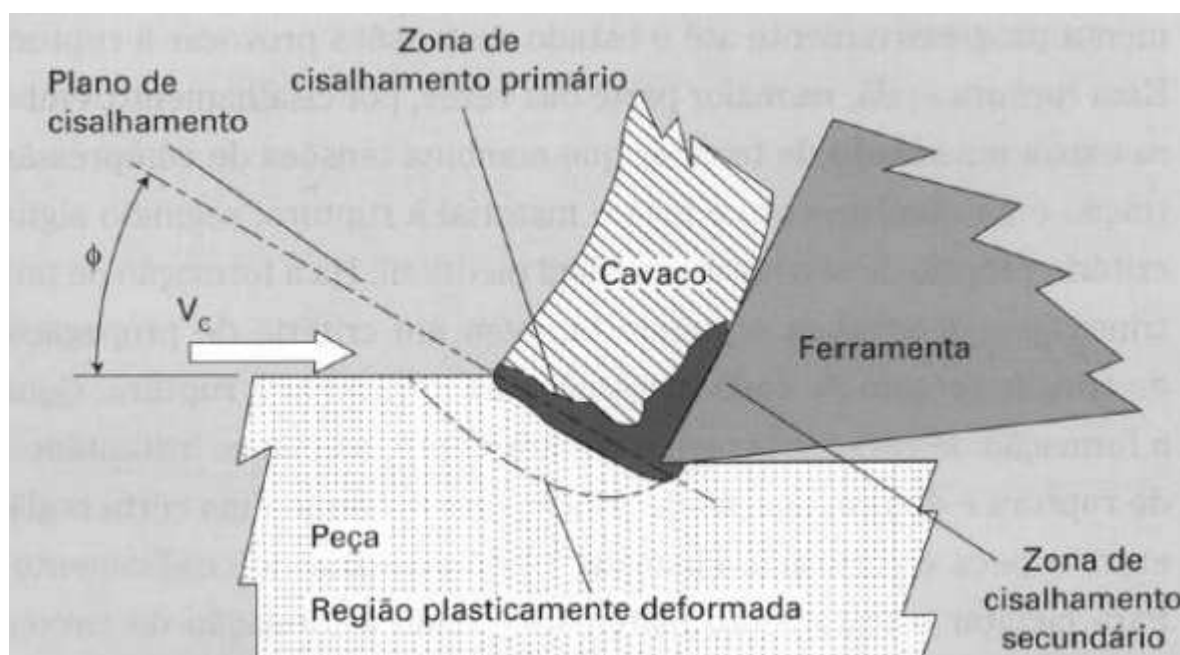


Figura 2.12 - Mecanismo da formação do cavaco em torneamento (Machado *et al.*, 2011).

2.2.3 Tipos de desgaste em ferramentas de corte

Durante o torneamento de metais, uma ferramenta de corte sempre sofrerá desgaste, ou seja, será degradada ao longo do uso, exigindo sua substituição em algum momento

(Machado *et al.*, 2011). O processo de corte gera alterações no formato da geometria original da ferramenta de corte devido ao desenvolvimento de diversos mecanismos de desgaste, sendo possível verificar desgastes progressivos no flanco e na superfície de saída da ferramenta.

Durante a usinagem, a ferramenta de corte entra em contato com a peça sob condições extremas de pressão e temperatura, o que promove seu desgaste. A análise dos mecanismos de falha e desgaste é essencial, pois influencia diretamente nos custos operacionais e na qualidade final do processo. De modo geral, os parâmetros de corte podem ocasionar desgaste, provocar deformações plásticas ou até levar à fratura da ferramenta.

Na Figura 2.13 é apresentada a padronização típica dos tipos de desgaste de ferramentas de corte. Os principais tipos são: desgaste de cratera na face, desgaste no flanco e de entalhe.

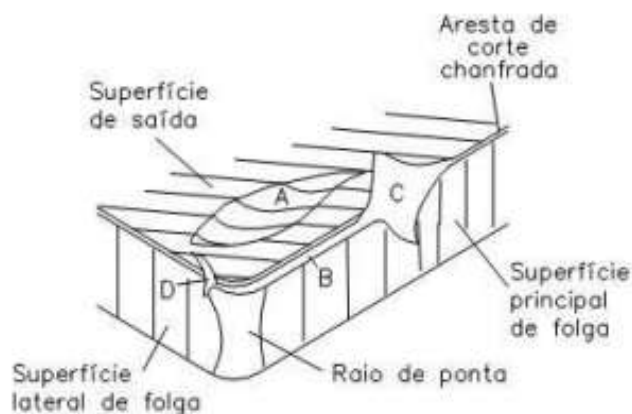


Figura 2.13 - Tipos de desgastes em ferramenta de corte: (A) Desgaste de cratera; (B) Desgaste de flanco; (C) e (D) Desgaste de entalhe (Machado *et al.*, 2011).

Na Figura 2.14 são apresentados parâmetros que são utilizados para quantificar os tipos de desgastes mostrados na Figura 2.13 de acordo com a norma ISO 3685 (1993).

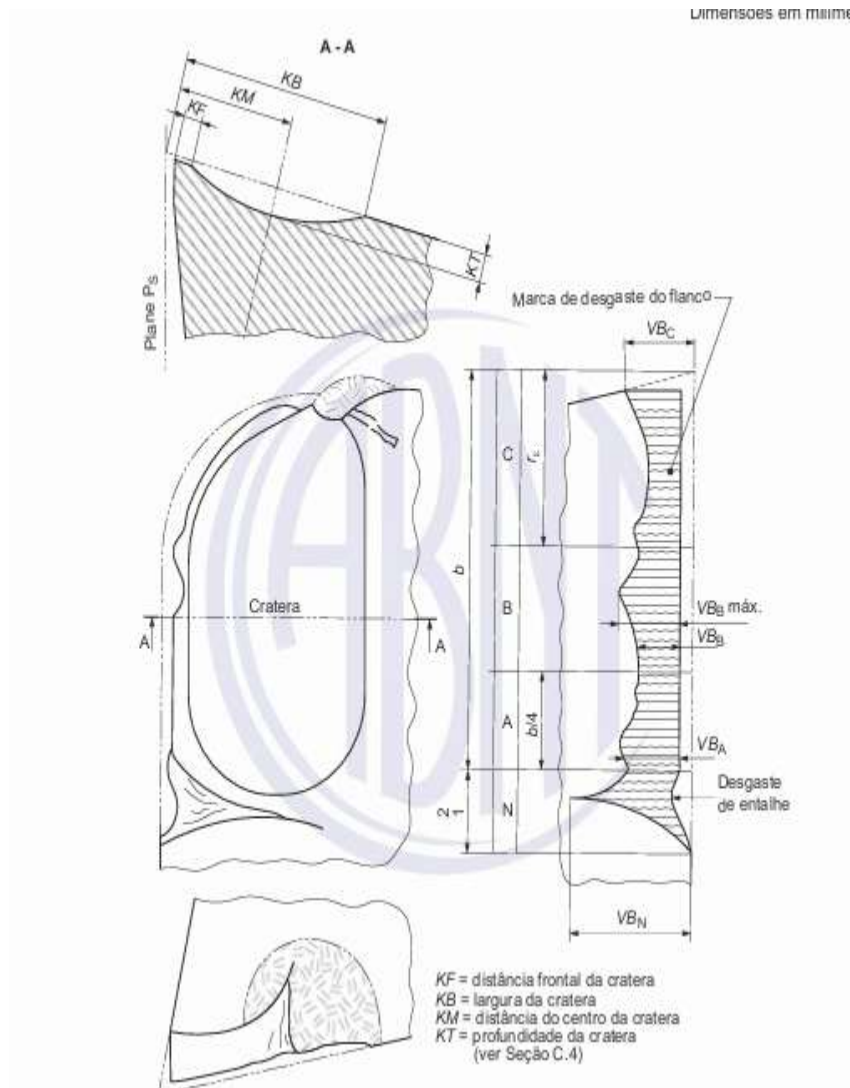


Figura 2.14 - Parâmetros de desgaste das ferramentas de corte (Norma ISO 3685, 1993, adaptado).

~Em que:

KT = profundidade da cratera

KM = distância do centro da cratera

VB_b = desgaste de flanco médio

VB_{b máx} = desgaste de flanco máximo

VB_c = desgaste de ponta;

VB_n = desgaste de entalhe

Dessa maneira, pode-se classificar como sendo três as formas existentes de desgastes em ferramentas de corte, são eles (Diniz; Marcondes; Coppini, 2013):

- Desgaste de flanco: O desgaste de flanco manifesta-se na área de folga da ferramenta

de corte. É aquele mais frequente nas operações de torneamento, provocado pelo atrito contínuo entre a peça usinada e a superfície de folga da ferramenta. Essa forma de desgaste aumenta com a velocidade de corte, podendo gerar defeitos dimensionais ou superficiais que podem levar à inutilização da peça.

- Desgaste de cratera: ele se desenvolve na superfície de saída da ferramenta de corte, e é causado pela interação entre o cavaco e a superfície da ferramenta, intensificada pelas altas temperaturas presentes nesta região. A utilização de ferramentas de metal duro com revestimento contribui significativamente para a redução desse tipo de desgaste.
- Desgaste de entalhe: ele normalmente ocorre nas extremidades da zona de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, alterando o perfil da ponta da ferramenta e impactando diretamente na qualidade do acabamento superficial. Esse tipo de desgaste é favorecido por condições de corte com altas temperaturas e velocidades elevadas, sendo mais comum durante a usinagem de materiais com elevada resistência térmica.

A norma ISO 3685/1993 estabelece parâmetros para quantificar os desgastes em ferramentas de corte, definindo critérios específicos para sua reafiação ou substituição. Essa norma também orienta os procedimentos de medição de cada tipo de desgaste. No caso do desgaste de flanco, são utilizados os valores médio (VB) e máximo (VB_{max}) da largura da região desgastada. Para o desgaste por cratera, avaliam-se a profundidade máxima (KT), a largura (KB) e a distância entre o centro da cratera e a aresta de corte (KM). Já os entalhes formados na superfície de folga são mensurados por meio dos parâmetros VBN e VBC.

Conforme estabelecido pela norma ISO 3685/1993, existem parâmetros específicos que devem ser considerados como limites para a reafiação ou substituição de ferramentas de metal duro, que são:

- Desgaste de flanco médio, $VB = 0,3 \text{ mm}$;
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{max} = 0,6 \text{ mm}$, caso o desgaste não ocorra de forma regular ao longo do flanco;
- Profundidade da cratera, $KT = 0,06 + 0,3f \text{ [mm]}$, em que f representa o avanço;
- Distância frontal entre cratera e flanco, $KF = 0,02 \text{ mm}$;
- Falha catastrófica.

2.2.5. Mecanismos de desgaste

Segundo Machado *et al.*, (2009), os diferentes tipos de desgaste observados nas

ferramentas de corte estão associados a diversos mecanismos atuantes durante o processo de usinagem. Esses mecanismos são ilustrados na Figura 2.15, em função da temperatura gerada na zona de corte variável diretamente afetada por fatores como a velocidade de corte e o avanço da ferramenta.

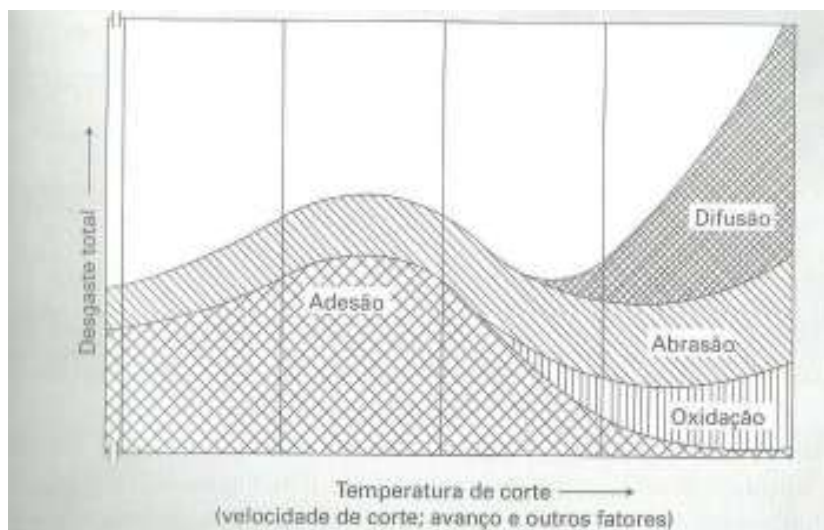


Figura 2.15 - Diagrama dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura no processo de usinagem (Machado et al., 2009).

Desta figura, observa-se que são quatro os principais mecanismos de desgaste: adesão, abrasão, oxidação e difusão. Observa-se que o aumento da temperatura na zona de corte intensifica o desgaste total da ferramenta. ao empregar condições de corte que geram temperaturas mais baixas, observa-se a predominância dos mecanismos de adesão e abrasão, sendo a adesão o mais significativo. Já na usinagem que geram temperaturas elevadas, o mecanismo de adesão tende a reduzir, enquanto os processos de oxidação e difusão são ativados e predominantes, com a difusão apresentando crescimento exponencial conforme a temperatura se eleva (Machado *et al.*, 2009).

- **Abrasão:** conforme Machado *et al.* (2009), quando há movimento relativo entre duas superfícies, o desgaste abrasivo pode ser classificado como de “dois corpos” ou de “três corpos”. O desgaste de dois corpos ocorre quando partículas duras integradas a uma das superfícies provocam a remoção ou deslocamento de material. Já o desgaste de três corpos se caracteriza pela presença de partículas abrasivas soltas, que não estão fixadas a nenhuma das superfícies e podem rolar ou deslizar entre elas. No contexto da usinagem, ambos os tipos podem ocorrer. O desgaste de dois corpos se dá quando precipitados duros como óxidos, carbonetos, nitretos ou carbonitretos presentes na peça ou no cavaco atuam diretamente sobre a ferramenta. Por sua vez,

a abrasão de três corpos acontece quando essas partículas são destacadas por adesão e passam a circular livremente no fluxo de material, contribuindo para o desgaste da ferramenta.

- **Difusão:** segundo Machado *et al.* (2009), o mecanismo de desgaste de difusão “envolve a transferência de material, no nível atômico, e é fortemente dependente da temperatura, do tempo e da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fluxo.” A solubilidade entre elementos está relacionada à afinidade química existente entre eles. O tamanho dos átomos desempenha papel fundamental nesse processo: átomos menores que os da matriz tendem a ocupar os espaços intersticiais, formando soluções sólidas intersticiais; enquanto átomos de tamanho semelhante aos da matriz originam soluções sólidas substitucionais. Por outro lado, átomos significativamente maiores não se dissolvem na matriz, impossibilitando a ocorrência de difusão. O mecanismo de difusão, segundo os autores, está associado à presença de uma zona de aderência também chamada de zona morta ou zona de fluxo localizada na interface entre a ferramenta e o cavaco. Apesar das altas velocidades relativas entre peça, cavaco e ferramenta, e do curto tempo de contato entre os materiais, essa zona de aderência proporciona condições favoráveis para que a difusão ocorra de forma efetiva.
- **Oxidação:** Machado *et al.* (2009) afirmam que o mecanismo de oxidação ocorre devido ao aquecimento intenso da aresta, o que favorece a formação de uma película de óxido na superfície de saída e nas proximidades da aresta lateral. Esse processo pode acelerar o desgaste da aresta lateral, comprometendo rapidamente o acabamento superficial das peças usinadas e, conseqüentemente, levando à perda de vida útil da ferramenta.
- **Adesão:** a adesão é um mecanismo de desgaste que se manifesta sob condições de altas temperaturas e pressões na zona de corte, promovendo a “soldagem” entre o cavaco e a face de saída da ferramenta. Esse fenômeno está diretamente relacionado à formação da aresta postiça de corte (APC), especialmente em operações realizadas com baixas velocidades de corte, nas quais o desgaste causado pela APC tende a ser mais significativo em ferramentas de metal duro (Ferraresi, 1977). A APC se desenvolve de forma progressiva até que se rompe abruptamente, provocando a remoção de partículas da superfície da ferramenta.

2.2.6. Fatores que afetam a usinabilidade de um material

A usinabilidade está relacionada à maior ou menor facilidade com que um material pode ser usinado sob um conjunto específico de condições de corte. A comparação entre

diferentes materiais pode ser feita considerando a durabilidade da ferramenta, as forças de corte, a formação do cavaco e a qualidade do acabamento superficial da peça em condições de corte equivalentes (Policena, 2022).

A usinabilidade é influenciada por diversos fatores de entrada independentes (variáveis controláveis) que impactam os fatores de saída dependentes (variáveis de resposta). Os elementos de entrada incluem as características do material de trabalho, ferramentas de corte (tipo de material e geometria), parâmetros de corte, processos de usinagem, fluidos de corte e máquinas-ferramentas (rigidez e capacidade). As variáveis de saída envolvem o estado da ferramenta, rugosidade, precisão dimensional, temperatura, forças aplicadas na usinagem, vibrações e propriedades do cavaco (Rao, 2006).

O processo de usinagem exige uma produção eficiente de componentes usinados em relação ao custo. Baixo consumo de energia (forças de corte reduzidas), cavacos pequenos (fragmentados), maior durabilidade da ferramenta e superfícies com pouca rugosidade são indicativos que o material apresenta boa usinabilidade. Alguns desses elementos estão diretamente relacionados às condições mecânicas e térmicas constantes do processo de usinagem. Outras características dependem não só das tensões contínuas de superfície e temperaturas geradas, mas também das interações mecânicas, microestruturais e químicas entre a ferramenta e o cavaco (Childs *et al.*, 2000).

A usinabilidade não está limitada apenas às características do material; também envolvem os gastos com ferramentas de corte, equipamentos operacionais e mão de obra. Em diversas situações, os custos do material influenciam indiretamente a usinabilidade, sendo que os parâmetros obtidos estão, de modo geral, relacionados aos processos de fabricação (Policena, 2022).

A facilidade de usinagem pode ser avaliada com base em diversos critérios, como: a vida útil esperada da ferramenta, o nível de acabamento superficial que se pode alcançar, o grau de precisão dimensional obtido, a sensibilidade às variações nas condições de corte (como velocidade e profundidade), além da força e da energia exigidas durante o processo.

Ao iniciar uma operação de usinagem, os parâmetros de corte podem ser selecionados também com base em materiais de referência, conhecendo-se a usinabilidade deles. A Tabela 2.1 apresenta os índices de usinabilidade de diversos metais, conforme dados de Beddoes e Bibby (2003), utilizando o aço ABNT 1112 como referência (índice de usinabilidade igual a 1). A partir dessa tabela, nota-se que os materiais mais difíceis de usinar recebem uma classificação mais baixa, e materiais fáceis de usinar recebem uma classificação mais alta.

Tabela 2.1 - Classificação de Usinabilidade (Beddoes; Bibby, 2003, adaptado).

Material	Classificação de usinabilidade
Aço AISI 1112	1,0
Aço AISI 1020	0,60
Aço AISI 1040	0,61
Aço AISI 3140	0,55
Ligas de Mg	5,0 - 10
Aço com chumbo AISI 4140	0,70
Aço inoxidável 304	0,25
Superligas de Inconel Ni	0,1-0,2
Alumínio AA-1100	2,0
Alumínio AA-7075-T6	1,0
Latão	2,0

De acordo com Ezugwu, Wang e Machado (1999), o desgaste precoce das ferramentas de corte ocorre devido à ativação simultânea de fenômenos mecânicos e físico-químicos ao longo do processo de usinagem. A seguir, alguns desses fenômenos são apresentados:

- O intenso endurecimento do material da peça favorece significativamente o desgaste abrasivo e severo, resultante da presença de grandes carbonetos na microestrutura da superfície endurecida.
- A compatibilidade metalúrgica do material da ferramenta de corte com a superfície usinada, devido às elevadas temperaturas de corte, leva a ocorrência do mecanismo de difusão na ferramenta que resulta em desgaste químico. Normalmente as ferramentas que estão sujeitas a este mecanismo de desgaste apresentam superfície lisa e brilhante.
- A dificuldade de controle na formação do cavaco endurecido durante o corte contribui para o desgaste, ocasionando crateras e camadas de adesão na ferramenta.
- A baixa capacidade de difusão térmica desses materiais gera temperaturas elevadas na interface cavaco-ferramenta, além de grandes variações térmicas dentro do material.

Conforme as considerações previamente mencionadas, a vida da ferramenta de corte sob determinado carregamento mecânico e térmico pode ser aprimorada caso o material da ferramenta apresenta elevada dureza em altas temperaturas, excelente resistência ao

impacto e ao desgaste, alta tenacidade e uma estabilidade química adequada em condições térmicas extremas. No entanto, reunir todas essas características em um único material de ferramenta de corte, especialmente sob exigentes condições de carregamento, é um desafio significativo (Ezugwu; Pashby, 1992).

2.3. Integridade de Superfícies Usinadas

A integridade de uma peça é compreendida com base nos fatores que caracterizam a estrutura da superfície usinada e o material base. Normalmente, ela é determinada por aspectos mecânicos, metalúrgicos e químicos da superfície, como microestrutura, variações na microdureza e modificações nas tensões residuais, além de seus impactos na fadiga e corrosão do material. Em geral, ao ser submetida a um processo de usinagem, a peça estará sujeita a transformações estruturais na superfície da peça como também em camadas abaixo da superfície. A intensa deformação plástica ocorre devido à influência das forças de corte e do atrito gerado pelo flanco da ferramenta, levando ao endurecimento da camada superficial, conhecido como encruamento (Jang *et al.*, 1996)

A configuração da ferramenta e os ajustes dos parâmetros de corte exercem grande impacto na qualidade da superfície usinada. As características do corte são determinadas por diversos fatores, incluindo abrasividade, adesividade, encruamento, condutividade térmica e dureza do material da peça (Policena, 2022).

Mesmo que uma superfície pareça estar lisa, ela ainda apresenta imperfeições decorrentes do próprio processo de formação. Não há superfície com zero defeito. A representação de uma superfície real pode ser visualizada na Figura 2.16. Suas características são classificadas em três níveis: erros de forma, ondulação e rugosidade, conforme a distância entre as irregularidades.

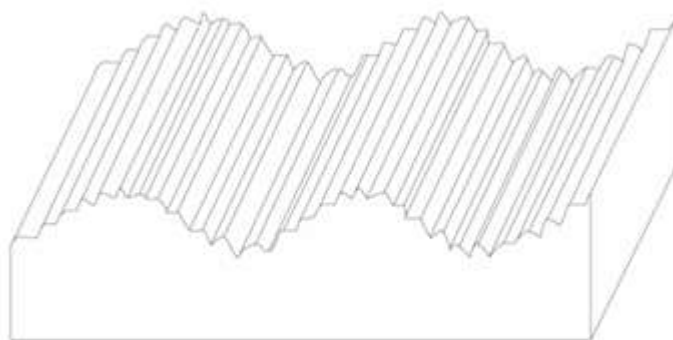


Figura 2.16 - Esquema ilustrando aspecto geral de uma superfície de uma peça (Santos e Sales, 2008).

A seguir será dada ênfase nos desvios microgeométricos, rugosidade, dureza e alterações metalúrgicas, que foram variáveis de saída analisadas no estudo do torneamento das amostras empregadas no presente trabalho.

2.3.1. Rugosidade

De acordo com a norma ISO 4287 (NBR ISO 4287:2002), a rugosidade corresponde ao conjunto de pequenas irregularidades, incluindo saliências e reentrâncias, que definem a textura de uma superfície. Essas variações podem ser analisadas por meio de dispositivos eletrônicos, por exemplo, com o rugosímetro. A rugosidade exerce um papel importante no desempenho dos componentes mecânicos, influenciando fatores como a qualidade do deslizamento, a resistência ao desgaste, a precisão do acoplamento forçado, a eficiência no escoamento de fluidos e lubrificantes, a aderência das camadas protetoras, a resistência à corrosão e à fadiga, além da vedação e da estética da peça.

O tamanho, a orientação e o nível de irregularidade da rugosidade podem revelar suas origens, que incluem falhas nos mecanismos das máquinas-ferramentas, vibrações no sistema peça-ferramenta, desgaste das ferramentas e até o próprio método de conformação da peça. As variações na superfície, como ranhuras e sulcos, surgem das marcas de avanço e são consequência do contato entre a ferramenta e a peça durante o deslocamento ou posicionamento no processo de usinagem, como na Figura 2.17. A profundidade média dessas irregularidades é determinada dentro de um pequeno intervalo chamado "cut-off", que corresponde a um comprimento de medição da rugosidade analisada na amostra (Reis, 2022).



Figura 2.17 - Acabamento superficial na usinagem interna a 3000 rpm e $a_p=0,125$ mm apresentando vibrações durante o processo (Cabau; Cossich, 2015, adaptado).

Um dos principais parâmetros de rugosidade utilizados para avaliar a qualidade de superfície é o parâmetro R_a , do inglês *surface roughness average* (rugosidade média aritmética), representa a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média ao longo do percurso de medição (NBR ISO 4287:2002). Este parâmetro (R_a), conforme mostrado na Figura 2.18, é o mais empregado também para analisar a textura superficial dos materiais e para o controle de qualidade de superfícies usinadas voltadas para aplicações industriais. Essa medida pode ser associada à altura de um retângulo, cuja área equivale à soma absoluta das regiões delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, considerando o percurso de medição (l_m) como comprimento.

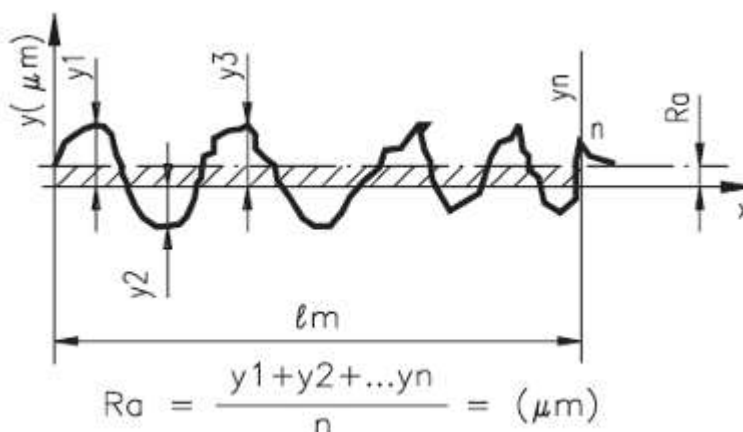


Figura 2.18 - Esquema representando o parâmetro de Rugosidade R_a (Espanhol 2008, adaptado).

Outro parâmetro muito empregado para analisar qualidade de superfícies é a rugosidade R_t , que corresponde a distância entre pico e vale mais profundo no comprimento de avaliação dando foco nas irregularidades mais extremas como na Figura 2.19 (Espanhol, 2008).

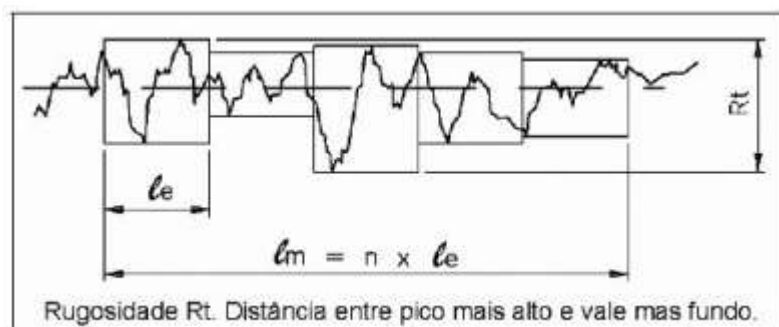


Figura 2.19 - Esquema representando o parâmetro de Rugosidade R_t (Espanhol, 2008,

adaptado).

Em que:

- l_m (Percurso de apalpamento): comprimento total de avaliação somando todos os percursos de medição;
- l_e (Comprimento de amostragem): divisões do percurso que são medidos, de modo que permita fazer a separação das ondulações, também chamado de cut-off;
- n (Comprimentos elementares): Número de cut-off considerados na medição.

2.3.2. Dureza do material usinado

De acordo com Silva (2017), a dureza é uma propriedade mecânica do material que lhe confere resistência à deformação plástica, geralmente causada por penetração de outro material mais duro. Nos materiais usinados, essa propriedade é influenciada pelo encruamento superficial que pode ser gerado durante o processo de usinagem. Além disso o encruamento superficial, definido como endurecimento por deformação plástica, ocorre devido ao deslocamento das discordâncias, que interagem entre si ou com outras imperfeições (Hissanaga, 2013). Essas interações diminuem a mobilidade das discordâncias, dificultando a sua movimentação e, conseqüentemente, a ocorrência de deformação plástica, que por sua vez aumenta a resistência mecânica do material e, portanto, causando aumento também de sua dureza. A dureza máxima, por sua vez, corresponde à maior resistência do material e costuma ser observada próximo à superfície (Silva, 2017).

Na Figura 2.20 é mostrado um gráfico com os dados do perfil de dureza do aço AISI 316L em função de 4 condições de cortes definidas como A 01, A 02, A 03 e A 04 em um processo de torneamento utilizando insertos TNMG 16 04 04R-K 2035 com cobertura PVD (do inglês *Physical Vapor Deposition*) de TiAlN+TiN sem a utilização de fluido de corte durante o torneamento. A Tabela 2.2 mostra os parâmetros utilizados durante o torneamento.

Tabela 2.2 - Parâmetros de corte utilizados empregados no torneamento do aço AISI 316L (Houffman *et al.*, 2020, adaptado).

Condição	Vc [m/min]	f [mm/rot]	Ra [mm]
A 01	145	0,15	0,4
A 02	145	0,30	0,4
A 03	195	0,15	0,4
A 04	195	0,30	0,4

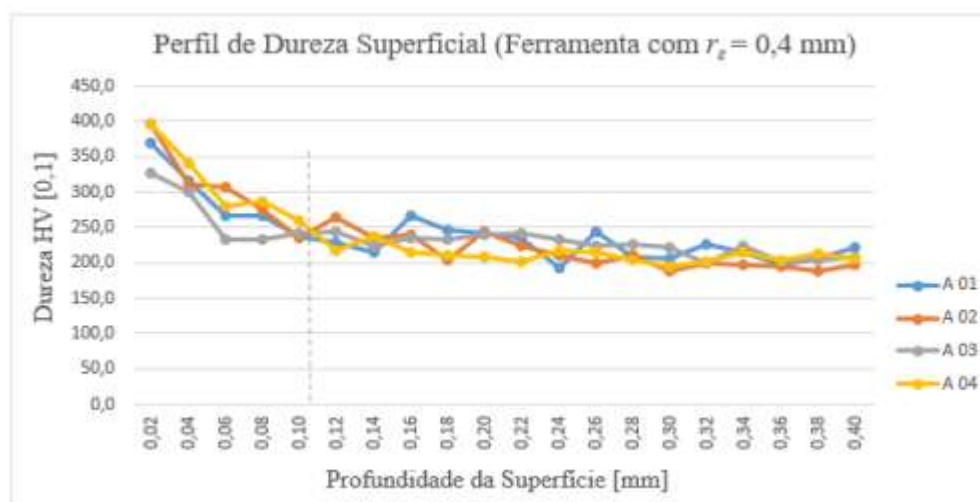


Figura 2.20 - Perfil de microdureza variando os parâmetros de V_c e f (Houffman *et al.*, 2020).

Observa-se que os valores de dureza permaneceram acima de 250 HV até a profundidade de 0,10 mm. A partir desse ponto, houve uma leve redução na dureza das amostras usinadas com ferramenta de raio de ponta medindo 0,4 mm, com exceção da amostra 03, que apresentou o valor de 250 HV já na profundidade de 0,06 mm. Essa particularidade, segundo os autores, pode ser atribuída ao fato de a amostra 03 ter sido usinada com a maior velocidade de corte e o menor avanço por volta, o que resultou em uma deformação menos significativa na camada sub-superficial.

Verifica-se também que as amostras A 02 e A 04, usinadas com maior avanço da ferramenta ($f_n = 0,30$ mm/rot), apresentaram valores de dureza mais elevados na região próxima à superfície (0,02 mm), alcançando cerca de 400 HV. Esses valores são ligeiramente superiores aos observados nas amostras submetidas a menor avanço ($f_n = 0,15$ mm/rot).

A dureza de uma superfície usinada resulta dos efeitos térmicos e mecânicos do processo. Altas temperaturas tendem a reduzir a dureza superficial, como também, baixas temperaturas podem favorecer o aumento da dureza superficial devido aos esforços de corte que geram encruamento. Camadas mais espessas apresentam maior dureza próxima à borda. Fatores como composição química, velocidade de corte e tipo de ferramenta influenciam o perfil de dureza. Processos como têmpera e revenimento alteram a microestrutura, afetando a resistência ao desgaste e à fadiga. O controle das condições de usinagem é essencial para equilibrar dureza, resistência mecânica e integridade do material (Griffiths, 2001).

Entre os diversos métodos de ensaio de dureza, destacam-se o ensaio de risco (MOHS), o ensaio de ressaltos (Shore) e o ensaio por penetração, mais utilizado atualmente, abrangendo as escalas Rockwell, Vickers e Brinell (Costa, 2019). No caso do ensaio Vickers (Figura 2.21), o material é submetido a uma carga aplicada sobre sua superfície por meio de

um penetrador de diamante, que possui formato de pirâmide reta com base quadrada e ângulo de 136° entre as faces opostas (Costa, 2019). A dureza Vickers é definida pelo quociente entre a carga aplicada (kgf) e a área da indentação. A profundidade da deformação superficial gerada é aferida e associada a um valor numérico que representa a dureza do material. A carga utilizada varia de 1 a 100 kgf que é aplicada por um período entre 10 e 15 segundos. Após o ensaio, as diagonais da marca deixada na superfície são medidas com um microscópio, e a média aritmética desses valores é calculada. Em seguida, determina-se a área da superfície inclinada da indentação. (Rodrigues, 2016).

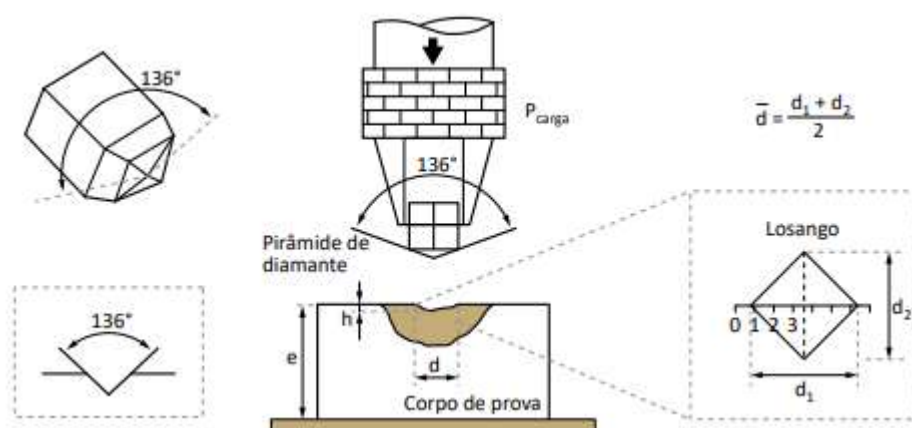


Figura 2.21 - Esquema para realização de medição de dureza Vickers (Costa, 2019, adaptado).

2.3.3. Alterações Metalúrgicas

Segundo Santos e Sales (2008), as mudanças metalúrgicas são originárias a partir das intensas temperaturas e forças de corte geradas durante a usinagem. Entre essas modificações, destacam-se as deformações plásticas, a formação de microtrincas, as alterações de fase, o desprendimento de partículas das arestas postiças, o surgimento de tensões residuais e o ataque intergranular.

Essas alterações podem causar distorções nas peças e diminuir a resistência à fadiga e à corrosão sob tensão delas.

As modificações mecânicas podem se manifestar como deformações plásticas resultantes de processos a quente ou a frio, além de rasgos, emendas e defeitos como trincas, variações na dureza, e tensões residuais distribuídas na camada superficial. As mudanças metalúrgicas envolvem transformações de fases, variações no tamanho e na distribuição dos grãos e da precipitação de partículas, além da presença de inclusões indesejadas no material, fenômenos de geminação, recristalização e martensita não temperada ou super temperada (Bordin, 2013).

Os materiais com maior tendência a sofrer alterações nas camadas subsuperficiais incluem os aços endurecidos, os inoxidáveis e as ligas de titânio e níquel. Uma modificação frequente durante a usinagem de aços endurecidos é a formação da chamada camada branca, relacionada à integridade superficial conforme ilustra a Figura 2.22. Este nome é utilizado pelo fato de as substâncias empregadas nos ataques químicos para revelação da microestrutura não reagirem com esta estrutura. (Santos; Sales, 2008).

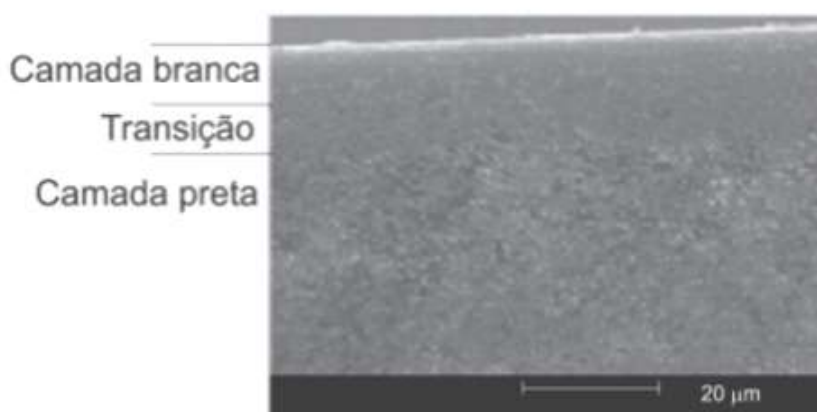


Figura 2.22 - Foto de camada branca em aço AISI 52100 originadas durante o torneamento (Santos; Sales, 2008, adaptado).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos utilizados na realização dos ensaios experimentais, incluindo a etapa inicial para obtenção de dados das características microestruturais da peça a ser ensaiada, além dos equipamentos, materiais e acessórios empregados neste estudo, como também os parâmetros de corte. Também serão detalhados os parâmetros de saída analisados. Na Figura 3.1 é mostrado fluxograma com as principais informações essenciais ao desenvolvimento deste trabalho.

Inicialmente, foram retiradas amostras de ambas as peças com o objetivo de analisar a dureza e a microestrutura dos materiais e estabelecer com base nestes parâmetros as referências para as amostras após a usinagem.

A primeira etapa consistiu na preparação das amostras para a realização dos ensaios. Nessa fase, o substrato de deposição foi cortado e usinado com o objetivo de melhorar sua fixação na placa do torno, viabilizando os ensaios subsequentes. Além disso, o cilindro foi usinado com os mesmos parâmetros de velocidade de corte e penetração de trabalho externamente para padronizar suas superfícies, garantindo uniformidade no início dos testes.

A segunda etapa consistiu em realizar os ensaios de torneamento com a amostra A com processo de vibração pós soldagem e B sem a realização de tratamento de vibração a fim de comparar a usinabilidade das peças fabricadas pelos dois processos realizados. Para tanto, foram realizados os testes de fator único a fim de verificar o comportamento das principais variáveis de saída (rugosidade, microdureza na superfície usinada e o desgaste das ferramentas de corte) para a variação de cada um dos parâmetros de entrada (velocidade de corte).

As próximas seções apresentam a caracterização dos materiais empregados neste estudo, a metodologia adotada nas duas etapas experimentais, além dos equipamentos e parâmetros utilizados para a medição das variáveis de saída.

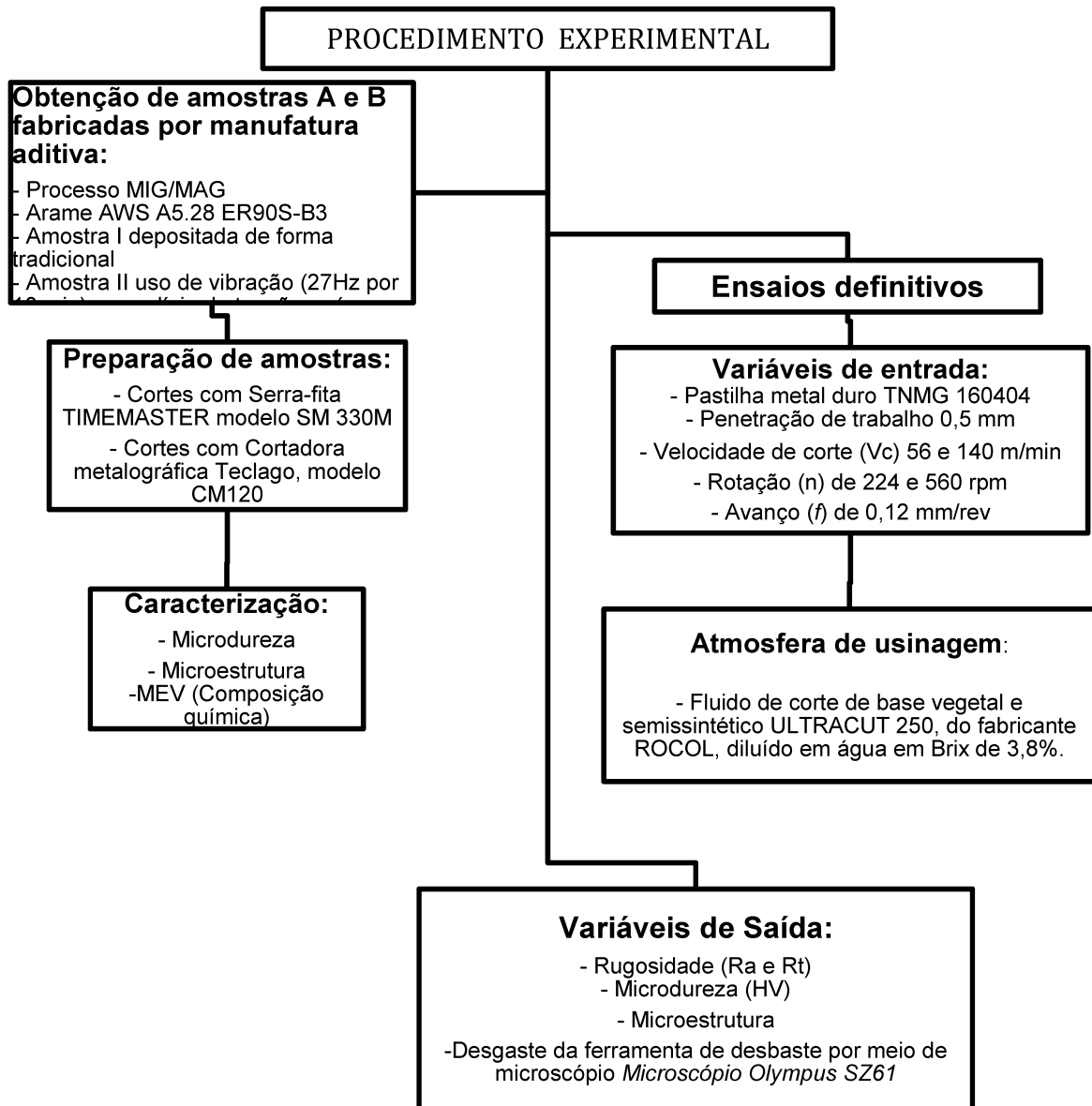


Figura 3.1 - Fluxograma de atividade para o desenvolvimento do trabalho.

3.1. Materiais e equipamentos utilizados

Neste trabalho foram utilizadas duas amostras, I e II, com diâmetro de 90 mm de diâmetro externo por 120 mm de comprimento por 9 mm de espessura por manufatura aditiva pelo processo de soldagem MIG/MAG empregando arame AWS A5.28 ER90S-B3 que foi depositado utilizando arco elétrico com parâmetros definidos em 25 Volts de tensão e corrente em 0,5 Amperes, conforme Figura 3.2. Após a fabricação, a amostra II passou por um processo de vibração para alívio de tensão após sua deposição, sendo deixado 10 minutos em vibração a uma frequência de 27 Hz. As imagens das duas peças estão mostradas nas Figuras 3.3 a) e b) respectivamente.

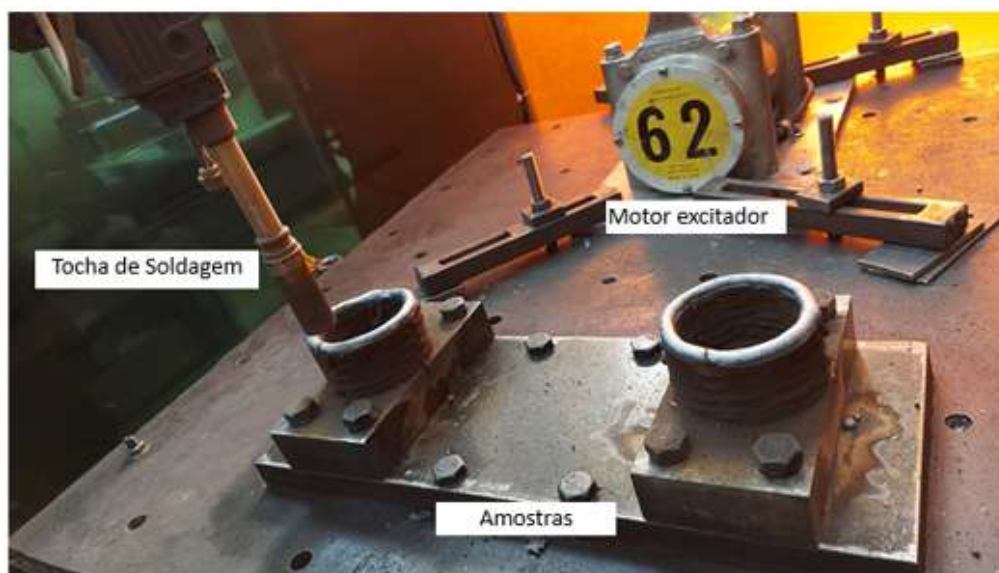


Figura 3.2 - Foto do sistema de alívio de tensões no processo de fabricação da amostra II.

O processo de alívio de tensões por vibração é realizado por meio de um motor com massa desbalanceada, acoplado diretamente à peça a ser tratada ou a uma mesa. Tanto o componente quanto a mesa devem ser desacoplados de estruturas rígidas e do solo, utilizando calços, coxins, molas ou almofadas de borracha para garantir o isolamento. A rotação do motor é regulada por um circuito eletrônico, que também acompanha a frequência de vibração do sistema por meio de um acelerômetro conectado à peça ou ao suporte do motor. O alívio de tensões por vibração, sem norma específica, é feito em frequência ressonante, ajustada manualmente pelo operador até atingir o ponto de maior energia vibratória (Serrati, 2024).



a) Amostra A: material feito por deposição convencional de MA, sem alívio



a) Amostra B, material feito por deposição convencional de MA seguido de tratamento por vibração para alívio de tensões residuais após a MA.

Figura 3.3 - Imagem das amostras depositadas por manufatura aditiva com arame AWS A5.28 ER90S-B3 usadas para o presente trabalho.

Para a realização dos ensaios de usinagem, inicialmente as amostras foram analisadas através de uma pequena amostra de cada peça que foi retirada para a caracterização do material com o auxílio de uma serra-fita da marca TIMEMASTER, modelo SM 330M. Também foram retiradas porções das amostras no sentido de crescimento da deposição a arco elétrico. Esse corte foi realizado com uma cortadora metalográfica da marca Teclago, modelo CM120. Ambos os equipamentos pertencem ao Laboratório de pesquisa LAPROSOLDA da FEMEC-UFU. Na Figuras 3.4. a) e b) são mostrados a serra de fita e a cortadora metalográfica, respectivamente.

As amostras extraídas das peças, tanto daquela sem tratamento quanto na amostra submetida ao alívio de tensão por vibração, foram embutidas (Figura 3.5) e posteriormente lixadas com lixas em granulometria mesh# 80, 120, 220, 320, 600 e 1200 mesh, nesta ordem, e em seguidas submetidas ao processo de polimento com alumina de 1 μm . Esse processo é fundamental para retirada de alterações subsuperficiais causadas por danos térmicos. Para o ataque químico e a revelação da microestrutura, as superfícies foram atacadas com reagente

água régia (90 ml de HCl + 10 ml de HNO₃) por 15s.

O processo de lixamento das amostras também foi necessário para preparo das amostras para a realização dos ensaios de microdureza do material antes e depois dos processos de torneamento. A microdureza foi medida no Laboratório LAPROSOLDA a partir de um microdurômetro da marca SHIMADZU série HMV-G com penetrador Vickers. Para a realização da medição deste parâmetro foi empregada uma carga de 490,3 kN (HV0,5) e tempo de aplicação de 15 segundos. O procedimento de medição foi realizado conforme estabelece a norma ASTM E92-23 onde foram realizadas 35 medições em pontos distintos, encontrando uma média para os materiais A e B de 270,9 HV e 305,5 HV respectivamente.



a) Serra-fita da marca TIMEMASTER modelo SM 330M



b) Cortadora metalográfica da marca Teclago, modelo CM120

Figura 3.4 - Processos de corte em serra fita e cortadora metalográfica para confecção de amostras.

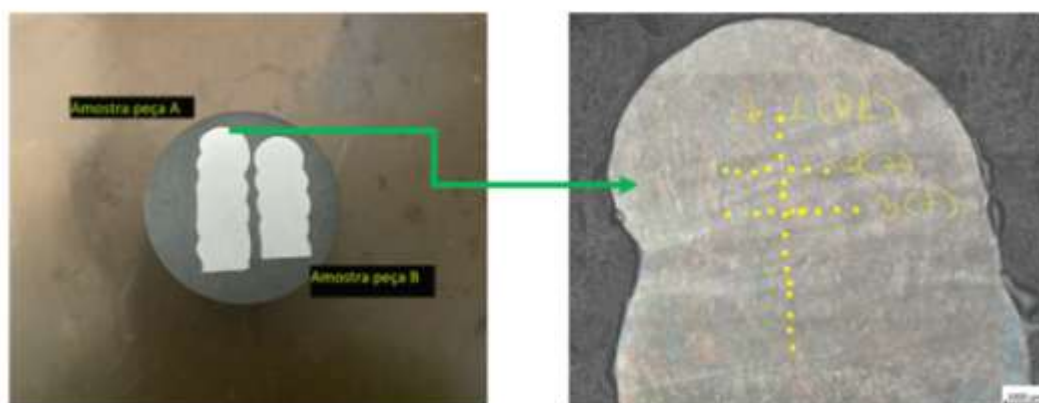


Figura 3.5 - Amostras A e B embutidas e preparadas sendo A com processo de vibração pós soldagem e B sem a realização de tratamento de vibração, ademais da ampliação, mostrando a imagem microscópica dos pontos de medição de microdureza.

As micrografias das amostras foram obtidas utilizando o microscópio óptico Zeiss AX10 e o microscópio eletrônico de varredura (MEV) Hitachi TM4000 plus. Para avaliar a composição química do material foram realizados ensaios de espectroscopia por dispersão de energia (EDS), no equipamento Oxford X1, associado ao MEV, equipamentos estes, pertencentes ao LAPROSOLDA. Na Tabela 3.1 é apresentada a composição química dos materiais.

Tabela 3.1 - Composição química das amostras Sem tratamento e Com tratamento de alívio de tensão de acordo com o mapa EDS

Elemento	Fe	Cr	Mo	Mn	Si	Ni	Amostra
% em peso	95,2	2,4	1,2	0,6	0,5	0,1	Sem tratamento
	95,2	2,6	0,9	0,6	0,4	0,2	Com tratamento de alívio de tensão

Antes dos ensaios definitivos de torneamento, as duas peças precisaram passar por operação de desbaste para remover as irregularidades na superfície em função dos vários passes de cordão de solda depositados por MA. Estes ensaios foram realizados em torno do fabricante IMOR do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da UFU conforme ilustra a Figura 3.6, modelo MAXI-II-520 com rotação máxima de 1400 rpm. A máquina possui uma potência de 7,5 kW com capacidade de usinar barras com diâmetros de até 520 mm em balanço e de 1500 mm entre pontas.



Figura 3.6 - Torno IMOR MAXI 520 utilizado nos ensaios de torneamento.

Os ensaios de torneamento foram realizados com insertos intercambiáveis de metal duro, classes P e M, do fabricante SwissTech, especificação TNMG 160404 a Figura 3.7 a) e b). Foi selecionado suporte para fixá-las com especificação (20X20 - MTJNR 2020 K16 - TNMG 16) (Figura 3.8). Essas pastilhas são recomendadas para a usinagem do aço feito por MA.

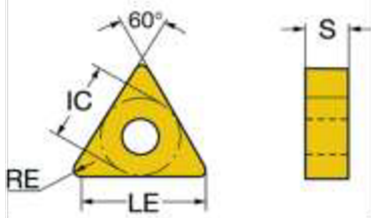
	 <table><tr><td>Comprimento efetivo da aresta de corte (LE)</td><td>15,5198 mm</td></tr><tr><td>Raio do canto (RE) Ⓢ</td><td>0,3969 mm</td></tr><tr><td>Diâmetro do círculo inscrito (IC)</td><td>9,525 mm</td></tr><tr><td>Espessura da pastilha (S)</td><td>4,7625 mm</td></tr></table>	Comprimento efetivo da aresta de corte (LE)	15,5198 mm	Raio do canto (RE) Ⓢ	0,3969 mm	Diâmetro do círculo inscrito (IC)	9,525 mm	Espessura da pastilha (S)	4,7625 mm
Comprimento efetivo da aresta de corte (LE)	15,5198 mm								
Raio do canto (RE) Ⓢ	0,3969 mm								
Diâmetro do círculo inscrito (IC)	9,525 mm								
Espessura da pastilha (S)	4,7625 mm								
a) Foto do inserto de metal duro com embalagem	b) Detalhes da geometria e dimensões do inserto de metal duro								

Figura 3.7 - Especificação da pastilha de metal duro da marca SwissTech, modelo TNMG 160404 (CF Ferramentas, 2025).

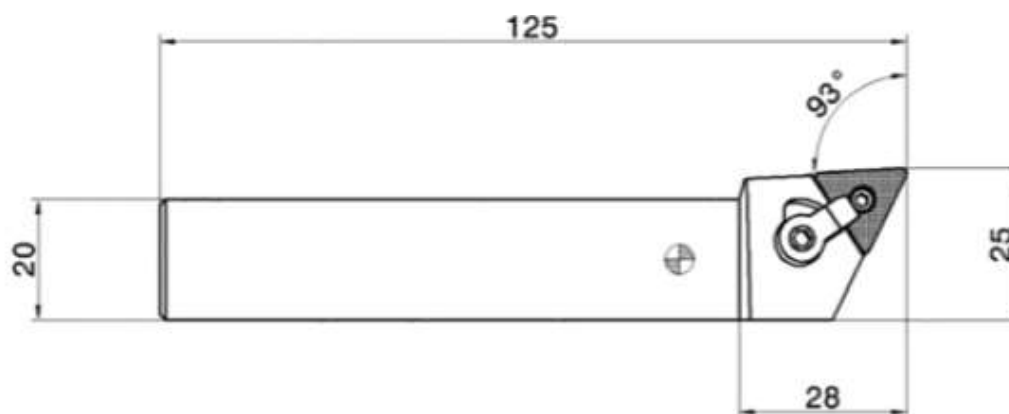


Figura 3.8 - Desenho do suporte para ferramentas de torneamento externo 20X20 - MTJNR 2020 K16 - TNMG 16 (Piveta ferramentas, 2025).

A operação de torneamento foi realizada na presença de fluido de corte aplicado na zona de corte via técnica convencional (abundância) a vazão de 2,4 L/min, a qual foi mantida durante todos os processos de torneamento. Empregou-se um sistema com mangueira flexível e bocal do tipo pato e foi mantido à distância de 125 mm da interface peça e ferramenta (Figura 3.9). O fluido de corte é de base vegetal e semissintético ULTRACUT 250, do fabricante ROCOL, que foi diluído em água e resultou em um Brix de 3,8%.



Figura 3.9 - Foto do set-up para torneamento de desbaste das amostras de aço feito por MA.

3.2. Metodologia Utilizada

Para os ensaios de usinagem de torneamento cilíndrico externo, primeiramente cada amostra foi previamente torneada no IMOR MAXI-II-520 com condições de corte consideradas mais brandas a fim de evitar danos térmicos nas peças e fazer com que ambas apresentassem as mesmas rugosidade e textura iniciais. Desta forma, os seguintes parâmetros foram selecionados: penetração de trabalho, $a_e = 1$ mm, velocidade de corte igual $V_c = 61,19$ m/min (valor obtido em função da rotação do torno igual a 224 rpm), e avanço em 0,12 mm/rot. O diâmetro final de cada amostra foi igual a 85 mm.

Em seguida, a 2 etapa.

Para cada amostra selecionaram-se 2 regiões ao longo do comprimento do cilindro a fim de realizar 2 ensaios por peça, conforme ilustrado na Figura 3.10. Assim, cada ensaio foi realizado em 45 mm de peça.



Figura 3.10 - Ilustração da divisão de regiões ao longo do comprimento da peça nas amostras para a realização dos ensaios de torneamento.

Os ensaios foram feitos utilizando-se o mesmo procedimento na seção anterior utilizando o mesmo torno citado, com fluido de corte, porém com valores de velocidade de corte diferentes, conforme Tabela 3.2. O avanço e a profundidade de corte foram mantidos constantes em todos os ensaios, iguais a $f = 0,05$ mm/rot. e $a_e = 0,5$ mm, considerados típicos para condição de acabamento. Para cada uma das condições de corte, realizaram-se 10 passes ao longo de 45 mm de comprimento da barra (L_c , que é o percurso de corte por cada ensaio), retirando 5 mm no diâmetro das amostras preparadas, que resultou em um diâmetro final de 80 mm, para as amostra I e II, conforme Figura 3.11 e Figura 3.12, respectivamente.

Tabela 3.2 - Condições de corte empregadas nos ensaios de torneamento.

Condição Amostra	Teste	Vc [m/min]	Vf [mm/min]	n [rpm]
I - Aço por MA sem tratamento	1	56	11,2	224
	2	140	28	560
II - Aço por MA com tratamento de vibração após a deposição	3	56	11,2	224
	4	140	28	560

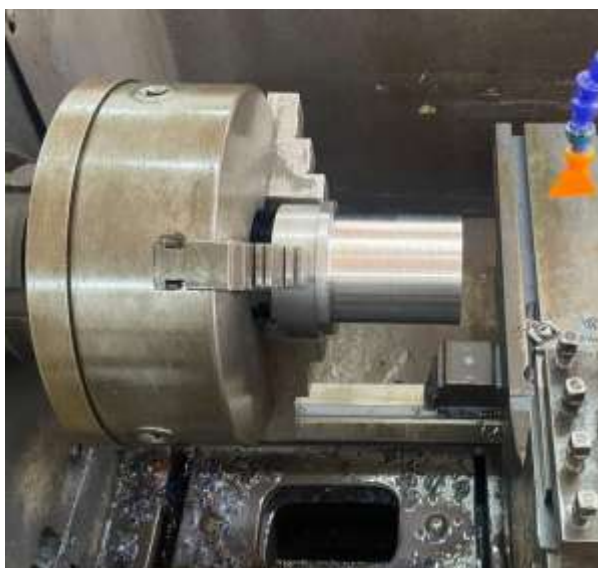


Figura 3.11 - Foto da amostra I após a realização dos ensaios 1 e 2.



a) Superfície resultante dos testes 1 e 2 na amostra A



b) Superfície resultante dos testes 3 e 4 da amostra B

Figura 3.12 - Superfícies das peças após a realização de ensaio de torneamento

Após a realização dos ensaios de torneamento, as amostras foram submetidas à medição da rugosidade em cada uma das superfícies usinadas conforme a Figura 3.13. A medida foi realizada em 3 pontos distintos ao longo do diâmetro da amostra, com espaçamento em torno de 120° entre elas e em seguida foram calculadas a média e o desvio padrão das medições.

A rugosidade das superfícies foi avaliada com rugosímetro portátil modelo SJ-201P, Mitutoyo do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da UFU. Utilizou-se um filtro cut-off de 0,8 mm nas medições, com um comprimento de avaliação de 5 mm para avaliar R_a (Rugosidade média aritmética) e R_t (distância entre pico e vale mais profundo no comprimento).



a) Vista superior do sistema de medição de rugosidade da amostra A



b) Vista lateral do sistema de medição de rugosidade da amostra B

Figura 3.13 - Medição da rugosidade superficial das superfícies.

Posterior ao processo de usinagem, foram realizadas as imagens e medição do desgaste das ferramentas de corte VB, VN e desgaste de entalhe com o uso do estereomicroscópio do fabricante Olympus modelo SZ61 (Figura 3.14) do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da UFU.



Figura 3.14 - Microscópio Olympus SZ61 utilizado nas medições dos desgastes das ferramentas de corte (Prolab, 2025).

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados de rugosidade da superfície usinada (parâmetros R_a e R_t), perfil de microdureza abaixo da superfície e dos desgastes da ferramenta após os ensaios de torneamento das amostras que foram produzidas por processo MIG/MAG com arame AWS A5.28 ER90S-B3 com e sem alívio de tensão.

1.1. Rugosidade

Nas Figura 4.1 e 4.2 são apresentados os resultados do acabamento superficial das amostras feitas por manufatura aditiva sem e com processo de vibração pós deposição, respectivamente.

Ao analisar os resultados da Figura 4.1, observa-se que a peça fabricada por MA tradicional praticamente não sofreu influência da velocidade de corte, ao aumentar de 56 m/min para 140 m/min, indo de $R_a = 2,03 \pm 0,172 \mu\text{m}$ para $R_a = 1,92 \pm 0,262 \mu\text{m}$ respectivamente, com uma queda de aproximadamente 5%. Por outro lado, a rugosidade R_a na peça submetida ao pós-tratamento por vibração para alívio de tensões, aumentando a V_c de 56 m/min para 140 m/min reduziu a rugosidade $R_a = 1,47 \pm 0,055 \mu\text{m}$ para $R_a = 1,02 \pm 0,06 \mu\text{m}$, representando uma queda de 31 % com aumento na velocidade de corte o que indica, portanto, uma melhora substancial na qualidade superficial.

Considerando os valores de rugosidade média (R_a), Figura 4.1, obtidos para as amostras sem tratamento e com tratamento de alívio de tensões residuais por vibração, para um mesmo valor de velocidade de corte, observa-se que houve reduções significativas ao usinar a amostra II, que passou por alívio de tensão. Ao empregar a velocidade de corte de 56 m/min, a rugosidade diminuiu cerca de 27% indo de $R_a = 2,03 \mu\text{m}$ (Aço por MA tradicional) para $R_a = 1,47 \mu\text{m}$ (Aço por MA com pós tratamento), enquanto que para a $V_c = 140 \text{ m/min}$, a

redução foi ainda mais expressiva, atingindo aproximadamente 47% indo de $R_a = 1,93 \mu\text{m}$ (Aço por MA tradicional) para $R_a = 1,02 \mu\text{m}$ (Aço por MA com pós tratamento).

Esses resultados evidenciam o impacto positivo do tratamento de alívio de tensões por vibração na qualidade superficial da peça. Segundo Mendonça (2016) tensões residuais afetam a rugosidade, principalmente porque processos que geram tensões residuais como o torneamento também alteram a microestrutura e topografia da superfície, causando deformações e mudanças na integridade superficial, o que indiretamente se reflete na rugosidade. A TR pode levar a distorções dimensionais e a uma superfície mais "degradada", que pode ter uma rugosidade diferente da esperada, mesmo que não seja a rugosidade primária que é o caso da usinagem da amostra II que diferente da amostra I tem menores tensões residuais devido ao tratamento por vibração o que pode ter contribuído com valores menores de rugosidade R_a e R_t .

Em relação ao parâmetro R_t , à altura máxima pico-a-vale individual, Figura 4.2, observou-se uma redução proporcional em ambas as amostras com o aumento da velocidade de corte de 56 m/min para 140 m/min. Essa diminuição foi de aproximadamente 25%. Ao comparar os resultados da amostra sem tratamento com aquela submetida ao alívio de tensões residuais por vibração, verificou-se uma redução de cerca de 22% nos valores de R_t , independente da velocidade de corte.

A redução dos valores de R_a e R_t obtidos na peça que passou por alívio de tensões, amostra II, sugere que o alívio de tensões contribuiu para uma superfície menos propensa à formação de picos acentuados, o que pode melhorar a resistência à fadiga e reduzir o atrito dependendo da aplicação do uso.

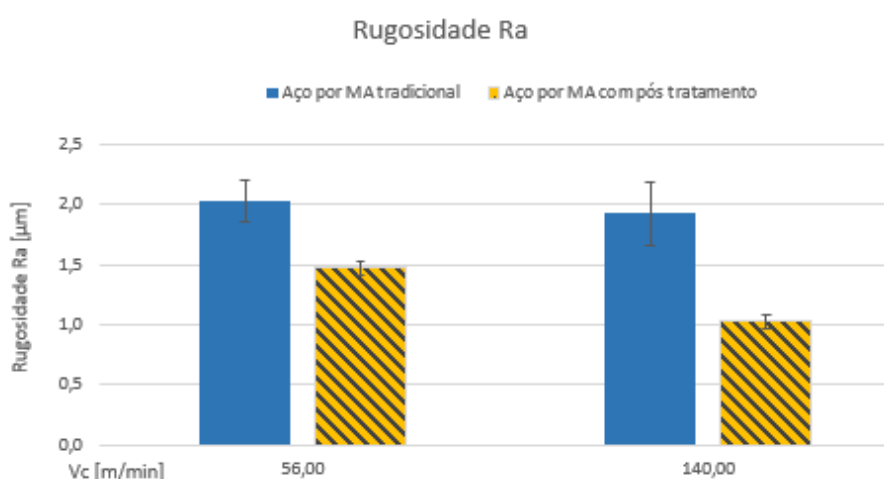


Figura 4.1 - Rugosidade R_a em função da velocidade de corte para as diferentes amostras de aço.

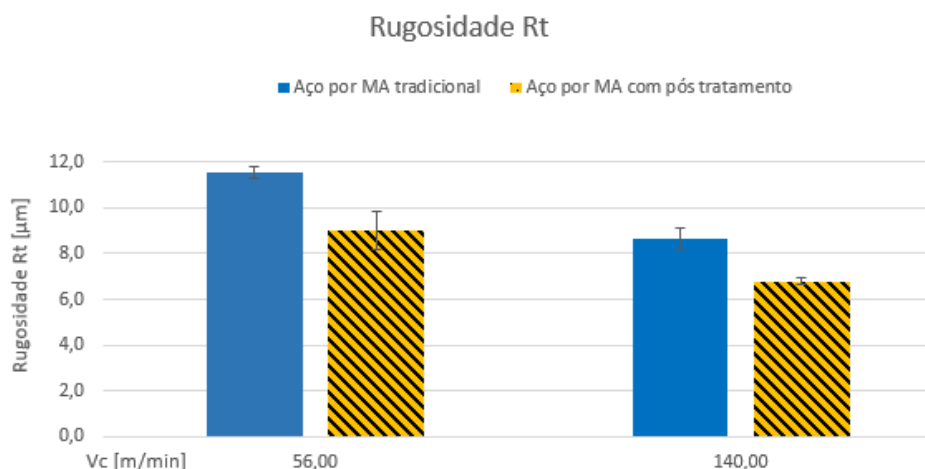


Figura 4.2 - Rugosidade Rt em função da Velocidade de corte para as diferentes amostras de aço

Aouici *et al.*, (2013) investigaram a influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade superficial e as forças de corte no processo de torneamento de acabamento de aço endurecido utilizando ferramentas de Nitreto de Boro Cúbico (CBN) com diferentes parâmetros de corte testados, variados em três níveis (Figura 4.3) velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Eles avaliaram, dentre outros parâmetros de saída, os parâmetros de rugosidades Ra, Rt e Rz. Os resultados demonstraram que, para os parâmetros Ra e Rt, o avanço e a velocidade de corte foram os fatores que exerceram maior influência sobre o acabamento superficial. Entre as interações analisadas, apenas a combinação entre velocidade de corte e avanço, apresentou significância estatística. A profundidade de corte, por sua vez, não mostrou influência significativa sobre os parâmetros de rugosidade, sendo relevante apenas em relação às forças de corte. A condição que resultou na menor rugosidade foi obtida com baixos valores de avanço $f = 0,08$ mm/rev e altas velocidades de corte $V_c = 240$ m/min conforme Tabela 4.1 .

Nível	Vc (m/min)	f (mm/volta)	ap (mm)
1	120	0,08	0,15
2	180	0,12	0,30
3	240	0,16	0,45

Tabela 4.1 - Tabela de parâmetros (Aouici *et al.*, 2013, adaptado).

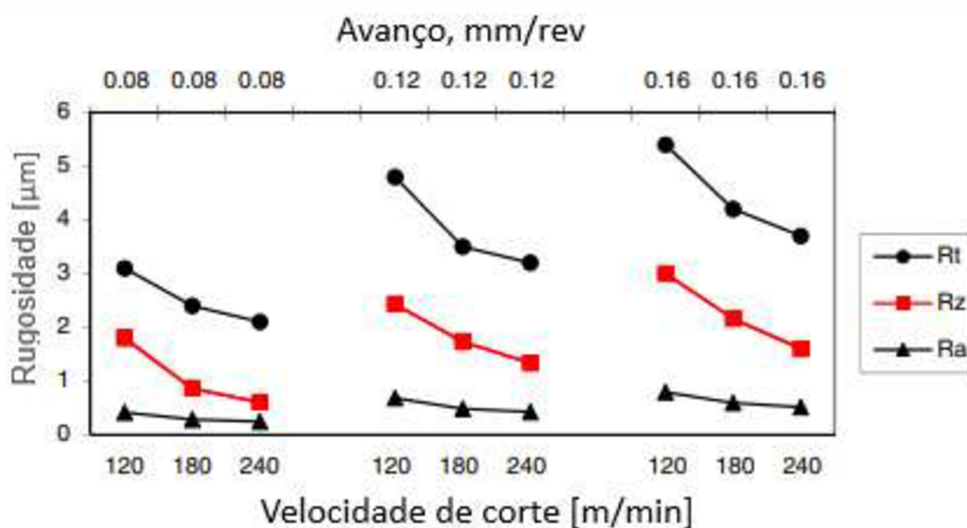


Figura 4.3 - Efeito da velocidade de corte sobre a rugosidade perante as taxas de avanço (Aouici *et al.*, 2013, adaptado).

Vikram e Ratnam (2012) realizaram um estudo sobre os parâmetros de usinagem que influenciam a rugosidade superficial em peças de materiais como o aço EN8, uma liga de alumínio e uma liga de cobre durante o torneamento a seco. A pesquisa concentrou-se na análise dos efeitos da velocidade de corte, do avanço e da dureza do material sobre a qualidade da superfície usinada. Os resultados na Figura 4.4 utilizando os parâmetros da Tabela 4.2, apontaram para o avanço como sendo aquele parâmetro com maior impacto na rugosidade superficial, seguido pela velocidade de corte.

Peça de Teste	Ra (μm)	Avanço (mm/revolução)	Velocidade do Fuso (rpm)	Velocidade de Corte (m/min)
1	3,5	0,15	1250	184,475
2	3,28	0,17		190,36
3	2,05	0,19		184,475
4	2,53	0,2		196,25
5	1,44	0,2	900	132,82
6	3,53	0,22		137,06
7	2,27	0,24		137,06
8	2,71	0,25		141,3
9	1,15	0,25	560	82,65
10	2,08	0,28		102,58
11	3,5	0,3		87,92

Tabela 4.2 - Valores experimentais dos testes de torneamento em liga de aço EN8 com dureza de 170,4 HB, utilizando pastilhas de metal duro com face plana não revestida à base de tungstênio DCMT 11T312 e profundidade de corte constante de 1,5 mm (Vikram e Ratnam, 2012, adaptado).

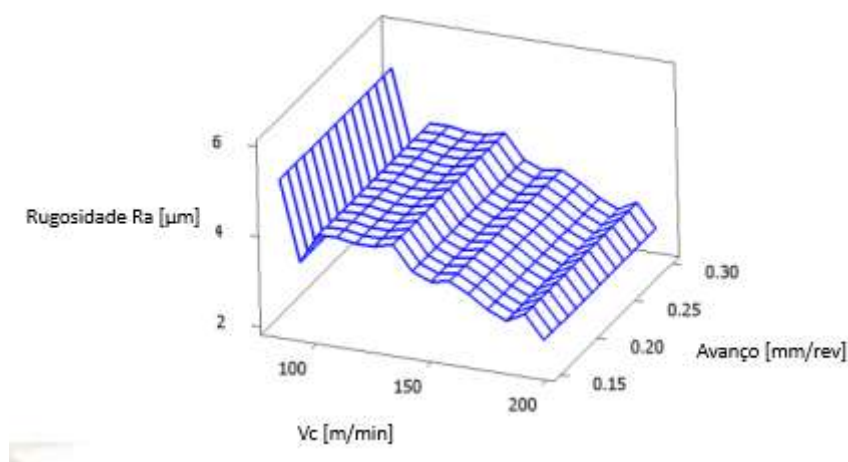


Figura 4.4: Rugosidade da superfície versus velocidades de avanço e corte para liga de aço EN8 no processo de torneamento utilizando pastilhas de metal duro com face plana não revestida à base de tungstênio DCMT 11T312 e profundidade de corte constante de 1,5 mm (Vikram e Ratnam, 2012, adaptado).

Machado *et al.* (2011), ao discutir os parâmetros que influenciam a qualidade superficial em operações de torneamento, destacou que a velocidade de corte exerce influência sobre a rugosidade da superfície usinada. Segundo os autores, o aumento da velocidade de corte tende a reduzir a rugosidade, principalmente devido à diminuição da formação de aresta postiça de corte e ao fluxo mais estável do cavaco durante a usinagem. Nesse contexto, os autores explicam que, em velocidades mais elevadas, a interface cavaco - ferramenta atinge temperaturas que desfavorecem a adesão do material à ferramenta, resultando em um acabamento superficial mais uniforme e com menor irregularidade geométrica.

Embora o aumento da velocidade de corte reduza a rugosidade em certa faixa, valores excessivos podem gerar desgaste acelerado da ferramenta, instabilidade térmica e piora do acabamento. Assim, o comportamento não é linear, mas depende de um regime otimizado que equilibre velocidade, material e ferramenta (Figura 4.5). Machado *et al.*, 2011 destacam que o controle da velocidade é essencial para obter baixa rugosidade, devendo ser aplicado com critério diante dos limites térmicos e mecânicos da usinagem.

Classificação do aço	Faixa típica de velocidade de corte (m/min)	Taxa de avanço recomendada (mm/rev)	Padrão de referência
Aço de baixo carbono (1018, 1020)	90-150	0,1-0,5	ISO 3685
Aço carbono médio (1045)	60-120	0,1-0,4	ISO 3685
Aço liga (4140, 4340)	40-100	0,08-0,3	ISO 3685
Aço inoxidável (304, 316)	30-80	0,05-0,25	ISO 3685

Figura 4.5 - Faixas de velocidade de corte e avanço determinadas para diferentes tipos de materiais conforme norma ISO 3685 (Metalzenith, 2025, adaptado).

4.2 Microestrutura

A microestrutura do material das duas peças retiradas antes do processo usinagem estão representadas nas Figura 4.6 a) e b). Estas amostras foram retiradas ao longo da altura de construção do cilindro depositado por manufatura aditiva. Das imagens das Figuras 4.6 a) e b) que são das amostras I e II, respectivamente, permitem observar que há maior uniformidade nos tamanhos dos grãos e na proporção de fases presentes.

As microestruturas das amostras após as realizações da usinagem estão representadas na Figura 4.7 a) a d). Também foram retiradas ao longo da altura de construção do cilindro e da direção de torneamento onde a) e b) são referentes a microestrutura da amostra depositada de forma tradicional e c) e d) referentes às amostras depositadas com pós tratamento de alívio de tensões residuais por vibração.

A microestrutura bainítica está presente em todas as micrografias de ambas as pré-formas sem presença de mudanças em todos os processos de usinagem, isto porque para o aço desta composição, 2,25Cr-1Mo, este constituinte pode ser alcançado em uma ampla faixa de taxas de resfriamento (PINHEIRO, 2014).

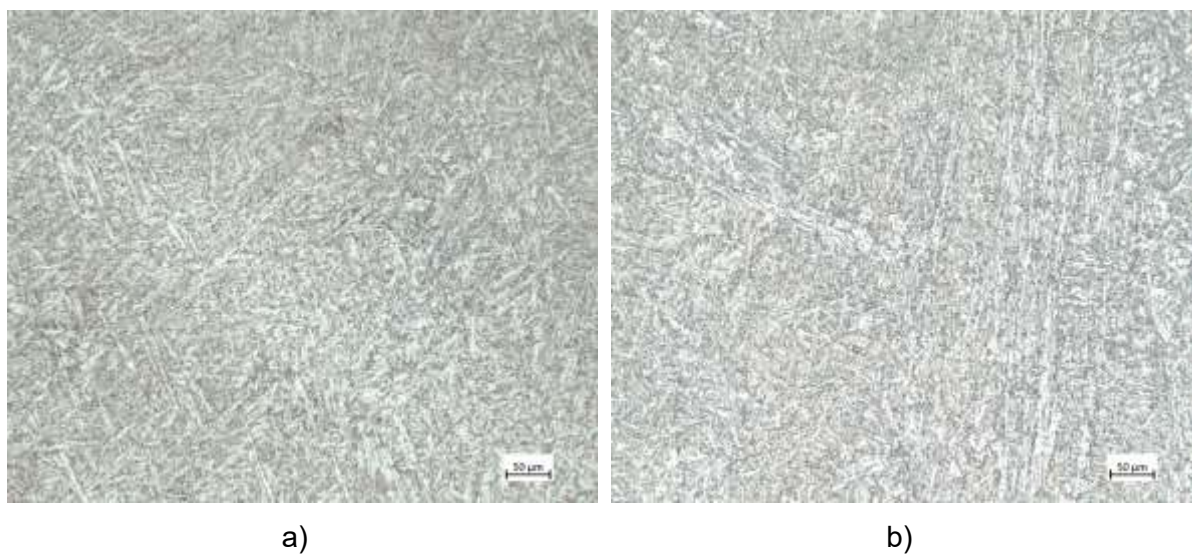


Figura 4.6 - Microestrutura das amostras I e II antes da realização dos processos de torneamento.

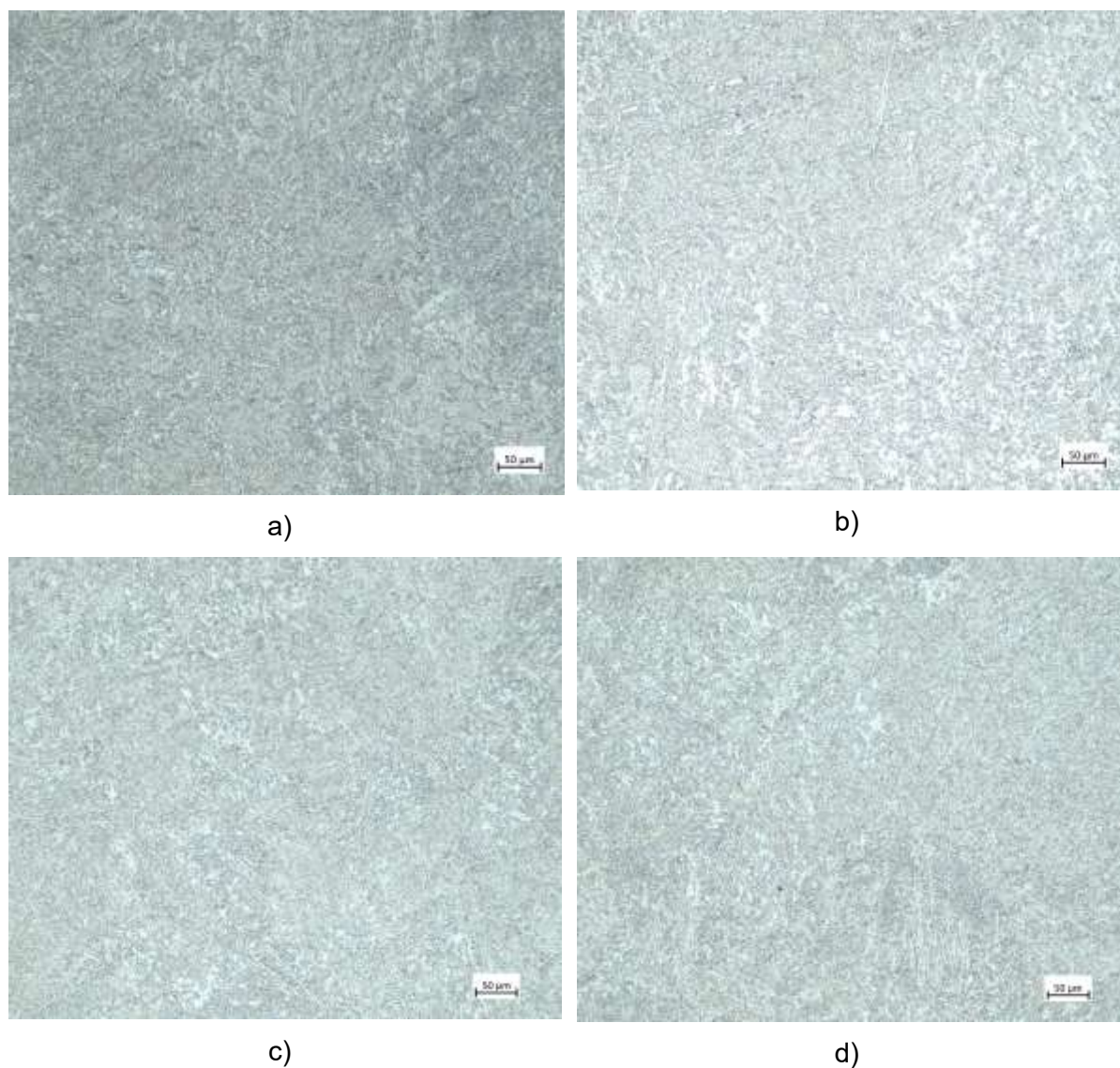


Figura 4.7 – Microestruturas da peça depois da realização da usinagem (a, b, c e d) - representando testes 1,2 3 e 4 respectivamente.

4.3. Microdureza

A microdureza abaixo da superfície usinada foi medida anteriormente e posteriormente aos ensaios de torneamento. Antes dos ensaios, a média de microdureza encontrada para a peça depositada por MA sem (amostra I) e com tratamento para alívio de tensões por vibração (amostra II) foi de $306 \pm 15,8$ HV e $271 \pm 14,8$ HV respectivamente, ou seja, a amostra II apresentou menor dureza em relação a amostra, cerca de 11,4% menor.

Nas Figuras 4.8 e 4.9 são apresentados os gráficos dos perfis de microdureza Vickers medidos abaixo das superfícies das amostras fabricadas por manufatura aditiva com o arame AWS A5.28 ER90S-B3, após o processo de torneamento em diferentes condições de velocidade de corte, nas amostras. A linha vermelha representa o valor médio da microdureza do material antes do processo de torneamento, considerando que a microestrutura do material está livre de danos térmicos ou de outras alterações que podem ser proporcionadas pelo processo de torneamento. Além disso, os outros pontos formam o perfil de microdureza das peças submetidas ao torneamento sob diferentes condições de velocidade de corte. Cada ponto no gráfico corresponde a medição realizada em diferentes regiões abaixo da superfície, para cada corpo de prova.

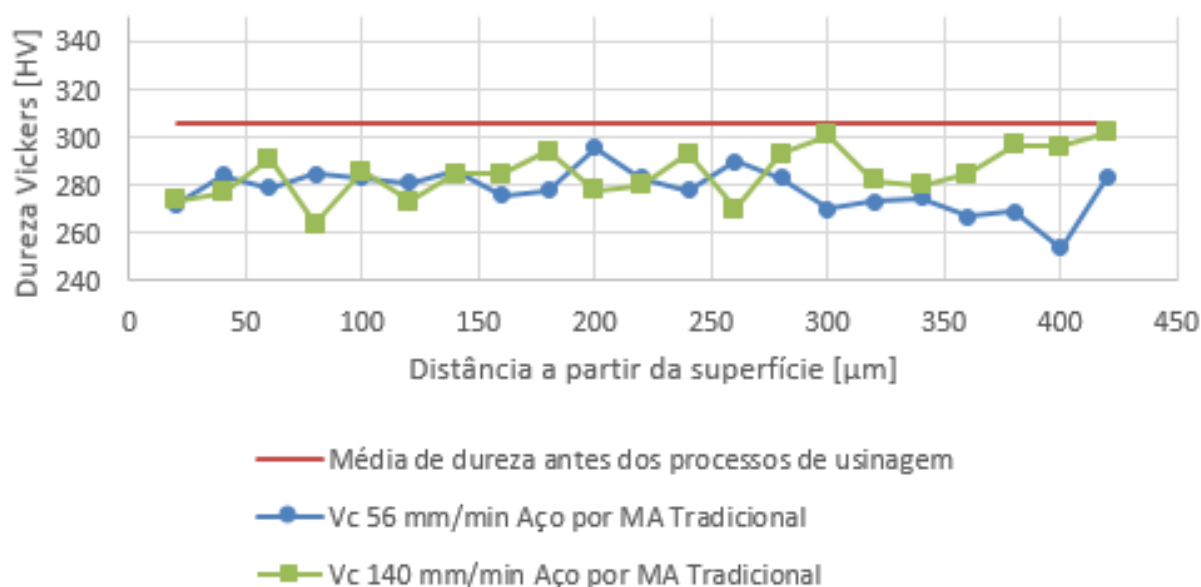


Figura 4.8 - Perfil de dureza abaixo da superfície usinada após torneamento na amostra I, sem alívio de tensões.

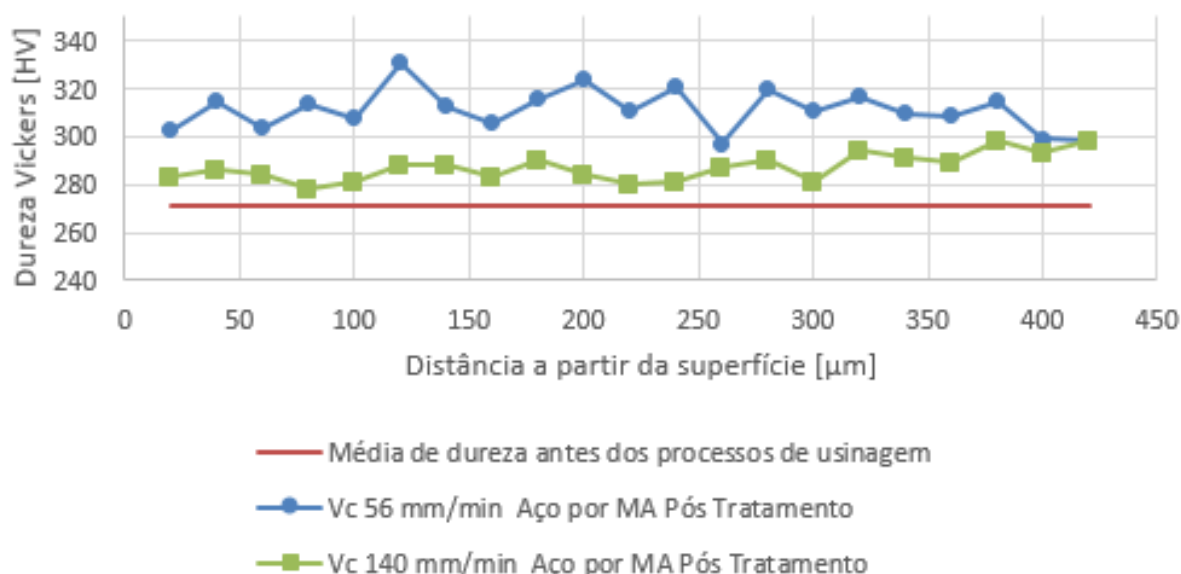


Figura 4.9 - Perfil de dureza abaixo da superfície usinada após torneamento na amostra II, com alívio de tensões.

Observa-se nos gráficos da Figura 4.8 após o torneamento, que se tem mudanças na microdureza próximas à superfície. Em geral, os valores obtidos para dureza na amostra I (Sem tratamento) foram menores em relação ao valor médio de referência, independente da velocidade de corte empregada. Isso se deve ao fato de a usinagem ter sido conduzida com parâmetros adequados ao material em questão, sem a aplicação de pressão suficiente para provocar uma deformação capaz de alterar sua microdureza. Nesse processo a maior dureza encontrada foi a de 302 HV utilizando 140 m/min de Vc, valor bem próximo à média apresentada anteriormente aos processos de usinagem da amostra I (Sem tratamento).

Na Figura 4.9 observa-se que os valores de microdureza aumentam após o torneamento realizado nas velocidades de 56 e 140 m/min. Esse incremento aproxima-se dos níveis de microdureza verificados na amostra I (sem tratamento) antes da usinagem. Dessa forma, embora o tratamento de alívio de tensões tenha reduzido a microdureza inicial do material, ele não foi capaz de eliminar os efeitos superficiais provocados pela usinagem, sobretudo na condição de 56 m/min, onde o aumento da dureza se mostrou mais com valores similares aos da média de microdureza anterior aos processos de usinagem da amostra I.

Pesquisas voltadas à comparação das propriedades mecânicas de estruturas soldadas, submetidas a tratamentos térmicos e por vibração mecânica com o objetivo de promover alívio de tensões, constataram que o tratamento por vibração não alterou os valores de resistência mecânica nem a energia absorvida ao impacto, os quais permaneceram inalterados em relação ao estado anterior ao tratamento. Por sua vez, o tratamento térmico resultou na diminuição da resistência mecânica e no aumento do alongamento, sem provocar variações nos valores de energia ao impacto. Em ambas as situações, observou-se uma

redução nos valores de dureza das estruturas, evidenciando a tendência de ocorrência do alívio de tensões (Crisi; Mendonça, 2006). É o que acontece nos valores de microdureza da amostra II (Com tratamento de alívio de tensões) antes dos processos de torneamento.

Em Machado et al. (2011), destaca-se que a velocidade de corte exerce influência direta sobre a microdureza da camada superficial do material usinado. De modo geral, velocidades mais elevadas reduzem o encruamento e, conseqüentemente, a elevação da microdureza; já velocidades mais baixas intensificam a deformação plástica, resultando em maior endurecimento superficial. Esse comportamento é perceptível no torneamento da amostra B onde $V_c = 56 \text{ m/min}$ obteve médias próximas de 300 HV enquanto $V_c = 140 \text{ m/min}$ obteve médias próximas de 285 HV. Embora o alívio de tensões tenha contribuído para a dureza, após o processo de usinagem, devido às características estruturais semelhantes entre amostras A e B, os valores de dureza da amostra B retornam aos mesmos patamares observados inicialmente na amostra A (sem alívio de tensão).

4.4. Desgaste das Ferramentas de Corte.

Nas Figuras 4.10 a 4.17 são apresentadas várias imagens de diferentes regiões das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios. Além disso, foi mensurado na Tabela 4.3 os valores de desgaste das ferramentas utilizadas nos testes.

Tabela 4.3 - Valores de desgaste das ferramentas medidos para várias condições de corte empregadas nos ensaios de torneamento.

Condição Amostra	Teste n°	V_c [m/min]	Desgaste de entalhe(VBn) (mm)	Desgaste de ponta (VN) (mm)	Desgaste de flanco (VB) (mm)
A - Aço por MA sem tratamento	1	56	0,005	0,006	0,001
	2	140	0,005	0,006	0,001
B - Aço por MA com tratamento de vibração após a deposição	3	56	0,001	0,006	0,001
	4	140	0,001	0,001	0,001

Nas Figuras 4.10 a) e 4.11 a), observa-se que as pontas da pastilha de metal duro utilizadas no desbaste das amostras depositadas sem alívio de tensões após a deposição,

com velocidades de corte de 56 m/min e 140 m/min, respectivamente, apresentaram desgaste de entalhe na aresta de corte com profundidade aproximada de 0,005 mm (Tabela 1). No teste 1, referente à amostra I com $V_c = 56$ m/min, o desgaste de entalhe ocorreu tanto na superfície principal de folga quanto na superfície lateral de folga, avançando até a superfície de saída, conforme ilustrado na Figura 4.10 a) e detalhado na Figura 4.14 a) e Figura 4.16 a). Já no teste 2, para a mesma amostra I e $V_c = 140$ m/min, verificou-se o mesmo tipo de desgaste de entalhe, porém localizado no raio de ponta (Figura 4.13 a)), sendo também visível a partir da superfície de saída (Figura 4.11 a)). Em contraste, a ponta da pastilha utilizada no torneamento da amostra II, submetida a alívio de tensões após a deposição, com velocidades de corte de 56 m/min e 140 m/min, não apresentaram desgastes significativos perceptíveis ao microscópio, como evidenciam as Figuras 4.10 b) e 4.11 b).

O entalhe surge quando a superfície da peça usinada já se encontra encruada em decorrência do corte ou de variações de temperatura. Esse desgaste se manifesta nas arestas principal e secundária de corte, justamente na região onde predomina o escorregamento, intensificado pela ação do meio envolvente, geralmente o ar ou o fluido de corte. Nessa condição, o material da peça provoca a formação de um sulco em formato de V na ferramenta, localizado na profundidade de corte da aresta principal e/ou na extremidade correspondente à aresta secundária de corte (Machado et al., 2009).

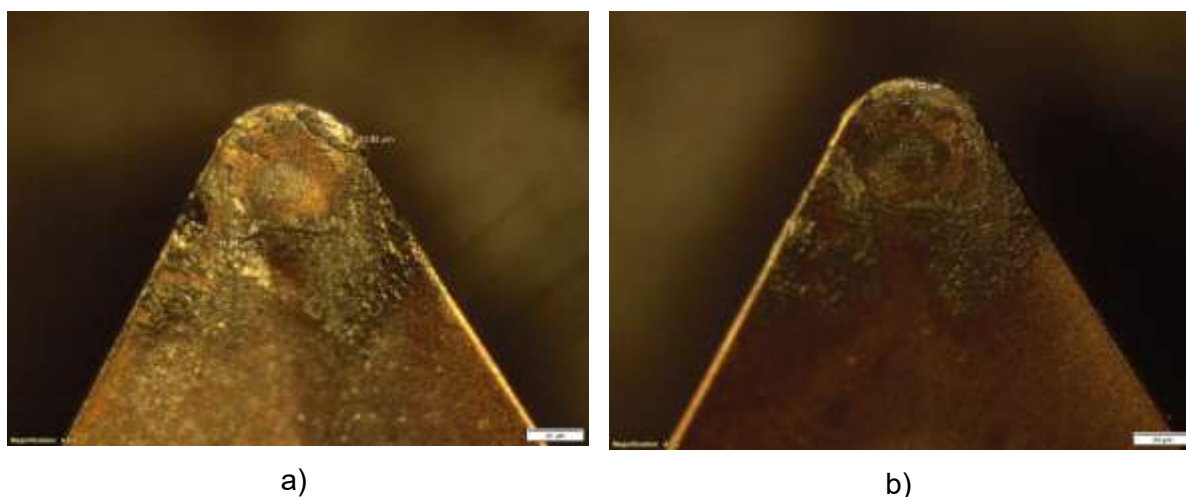


Figura 4.10 - Superfície de saída das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 56$ m/min, amostra I teste 1 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 56$ m/min, amostra II teste 3, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm

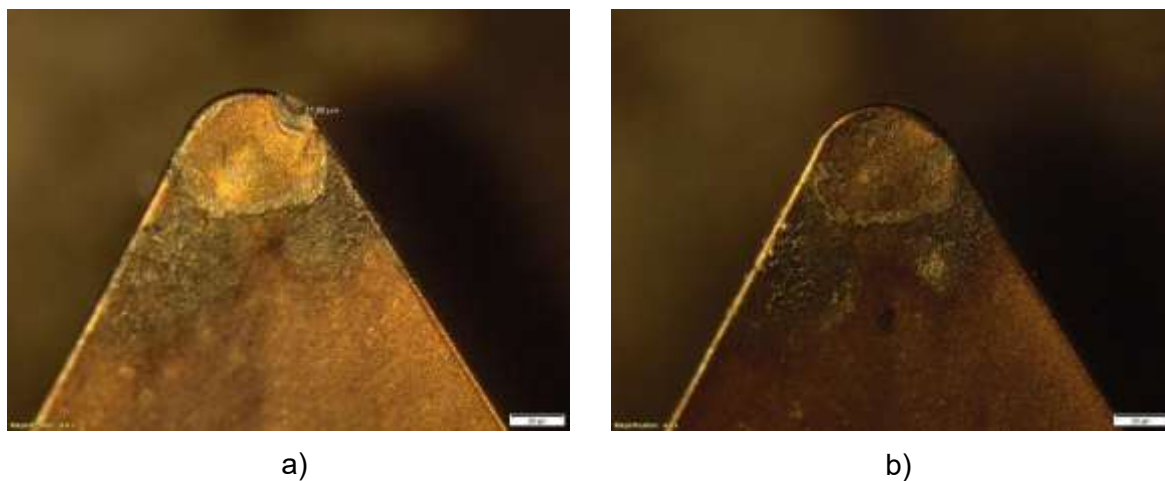


Figura 4.11 - Superfície de saída das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 140$ m/min, amostra I teste 2 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 140$ m/min, amostra II teste 4, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm

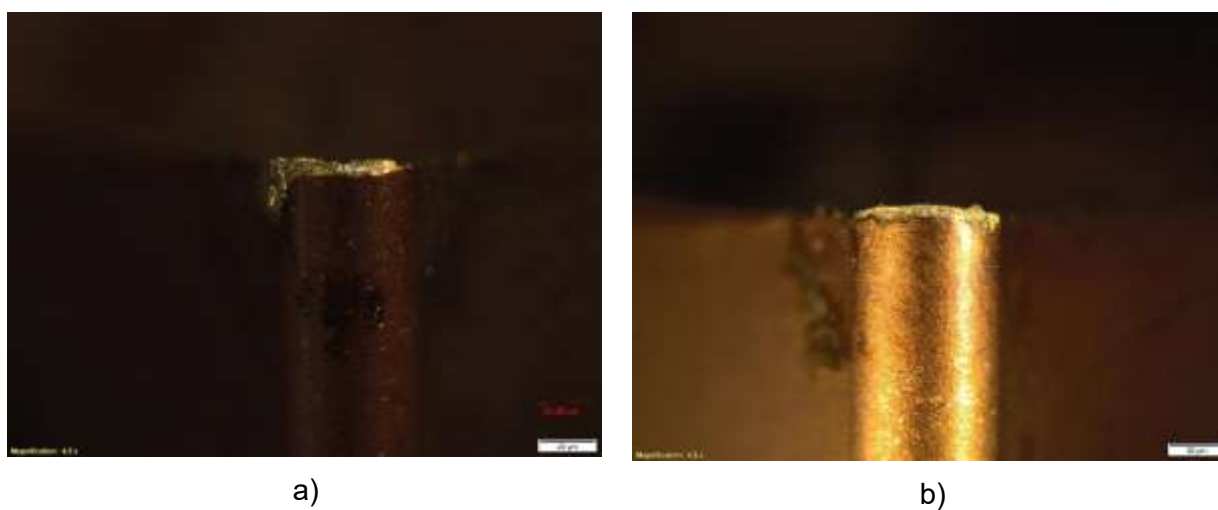


Figura 4.12 - Ponta das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 56$ m/min, amostra I teste 1 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 56$ m/min, amostra II teste 3, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm.



Figura 4.13 - Ponta das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 140$ m/min, amostra I teste 2 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 140$ m/min, amostra II teste 4, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm.

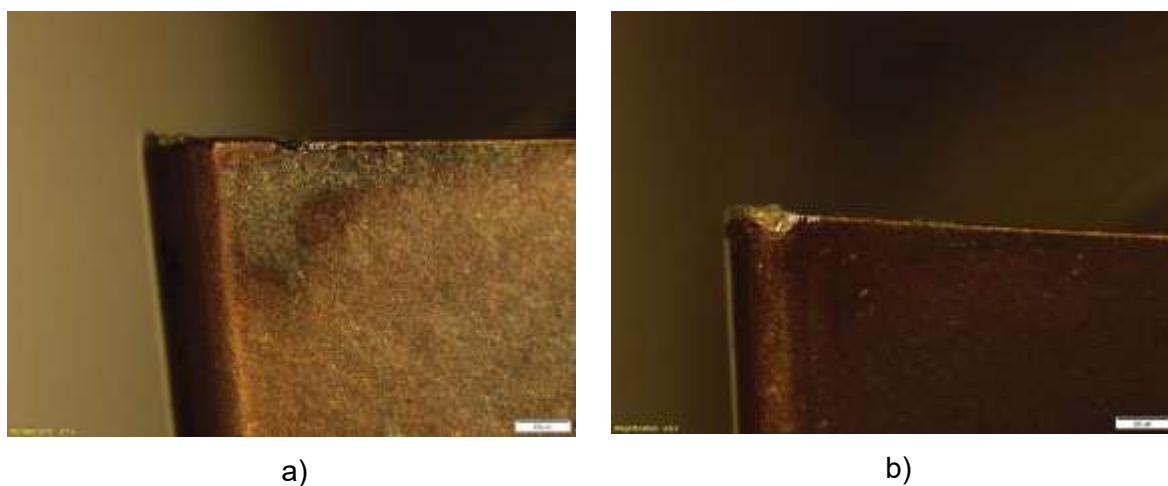


Figura 4.14 - Superfície primária das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 56$ m/min, amostra I teste 1 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 56$ m/min, amostra II teste 3, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm.

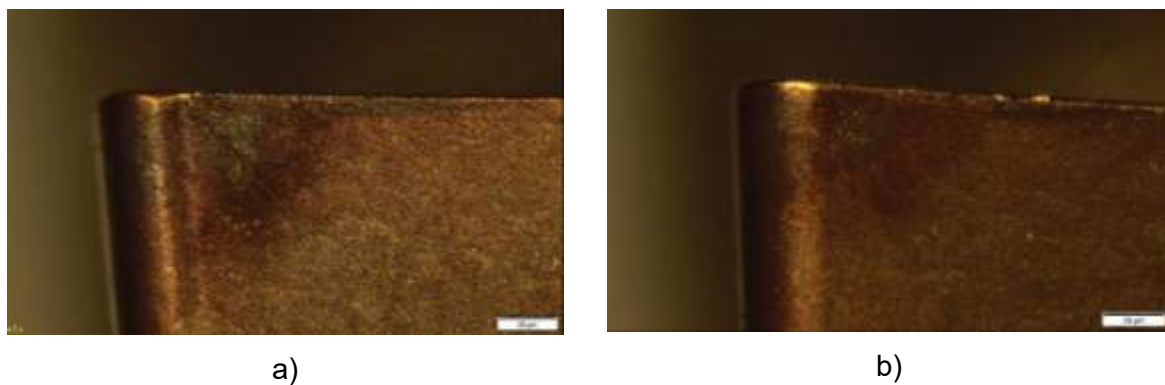


Figura 4.15 - Superfície primária das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 140$ m/min, amostra I teste 2 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 140$ m/min, amostra II teste 4, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm.

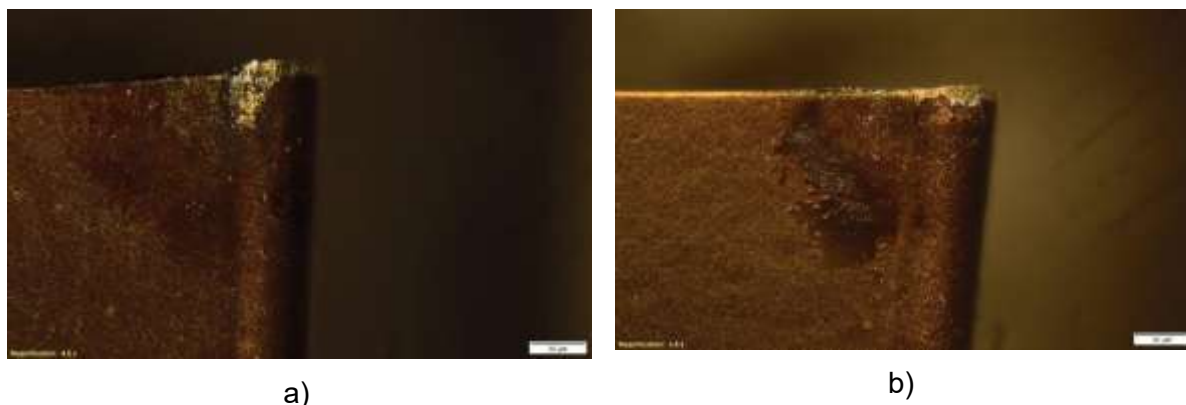


Figura 4.16 - Superfície secundária das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 56$ m/min, amostra I teste 1 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 56$ m/min, amostra II teste 3, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm.

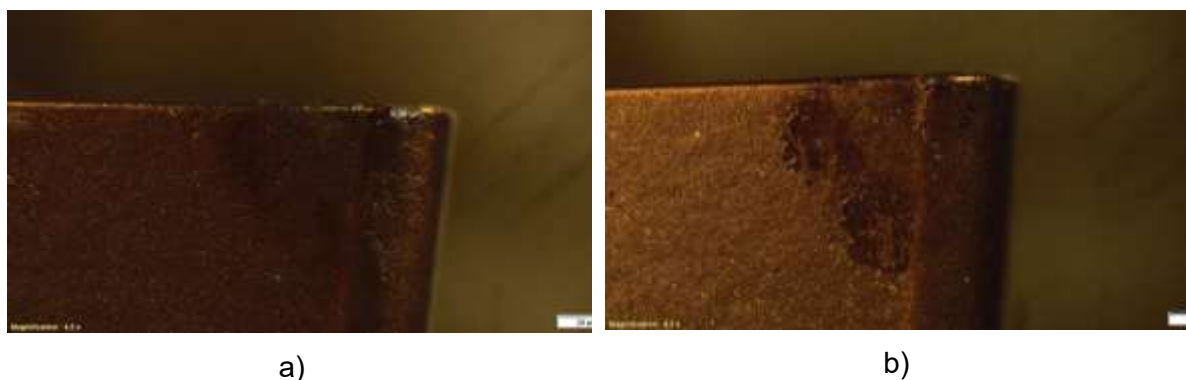


Figura 4.17 - Superfície secundária das ferramentas após a usinagem: a) $V_c = 140$ m/min, amostra I teste 2 sem alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm; b) $V_c = 140$ m/min, amostra II teste 4, com alívio de tensões após deposição e $L_c = 45$ mm.

Nas figuras 4.12 e 4.13 é notável a presença de desgastes de ponta nas pontas das pastilhas utilizadas na amostra I em ambos os testes 1 e 2, e no raio de ponta da pastilha utilizada no teste 3 com menor intensidade, porém presente quando se utiliza $V_c = 56$ m/min conforme Figura 4.13 a). Esse tipo de desgaste é caracterizado pela perda de corte da aresta cortante do raio de ponta.

Nas Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 não evidenciaram desgastes ao longo da superfície principal e lateral de folga, não contendo desgaste de flanco continuamente ao longo das arestas de corte, somente em alguns momentos a presença de oxidação do recobrimento das pastilhas.

Os resultados obtidos neste trabalho revelam um comportamento não usual em relação ao desgaste de ferramentas: os maiores desgastes foram observados em velocidades de corte baixa ($V_c = 56$ m/min), especialmente no aço por MA tradicional. Em contrapartida, nas amostras de aço por MA com pós-tratamento, o desgaste foi em pequenas proporções

visíveis como no raio de ponta em $V_c = 140$ m/min que apresentou um desgaste de $5,79 \mu\text{m}$ no início do raio de ponta, algo pontual comparado aos desgastes que aconteceram na Figura 4.12 com $V_c = 56$ m/min nas amostras com e sem alívio de tensões residuais após a deposição.

Esse comportamento de desgaste mais presente em baixas velocidades de corte ocorrido nos ensaios, contraria a expectativa tradicional de que velocidades de corte mais altas resultam em maior desgaste devido ao aumento da temperatura na zona de corte. No entanto, estudos como os de Amorim & Costa (2003) e Maia *et al.* (2005) já indicam que velocidades de corte reduzidas podem intensificar o desgaste por adesão e abrasão, especialmente quando o tempo de contato entre ferramenta e peça é prolongado e há formação de cavacos aderentes.

Além disso, Amorim e Costa (2003) observou que, em ensaios com aço ABNT 1040 e 1045, velocidades mais altas proporcionam menor desgaste de flanco e melhor acabamento superficial, corroborando os resultados encontrados neste trabalho. A presença do pós-tratamento no aço usinado mostrou ter contribuído para uma interação tribológica mais favorável na região de corte, reduzindo o coeficiente de atrito e facilitando o corte, o que explica a ausência de desgaste acentuado mesmo em velocidades de corte mais elevada, como é o caso daquela utilizada neste trabalho, $V_c=140$ m/min.

Desta forma, os resultados obtidos demonstram que a relação entre velocidade de corte e desgaste da ferramenta não é linear, e depende fortemente das propriedades do material usinado que estão relacionadas aos tratamentos térmicos ou mecânicos a que são submetidos os materiais, das condições de corte e tribológicas do sistema peça-ferramenta-cavaco. O desempenho superior do aço que passou por pós-tratamento no torneamento em maior velocidade de corte reforça a importância de considerar modificações microestruturais no planejamento de processos de usinagem.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos nesta investigação do processo de usinagem de materiais fabricados por processo MIG/MAG com arame AWS A5.28 ER90S-B3 com e sem alívio de tensão, as seguintes conclusões podem ser retiradas deste trabalho:

- As microestruturas das duas peças feitas por manufatura aditiva, amostra I (sem alívio de tensão) e amostra II (que foi submetida ao alívio de tensões) apresentaram homogeneidade microestrutural e uniformidade na presença de bainita independente da sua condição, sem ou com alívio de tensões.
- Os valores de microdureza das amostras foram: de $306 \pm 15,8$ HV e $271 \pm 14,8$ HV para a amostra sem tratamento de alívio de tensões por vibração e aquela com tratamento de alívio de tensões, respectivamente, resultando em uma diminuição de 11,4% desse parâmetro.
- Após a usinagem da amostra I (sem tratamento de vibração), os valores de microdureza próximos à superfície mostraram-se inferiores ao valor médio inicial de 306 HV, para $V_c = 56$ m/min dureza média de 278 HV e para $V_c = 140$ m/min dureza média de 285 HV, indicando que o processo de torneamento não gerou deformações significativas capazes de alterar a dureza do material.
- Há incremento da dureza no processo de torneamento da amostra II (com tratamento de vibração) em relação a dureza que antecede o torneamento (271 HV). Na condição de corte onde $V_c = 56$ m/min, teve média de dureza de 312 HV após o torneamento e a $V_c = 140$ m/min teve dureza média de 287 HV. Isso demonstra que, embora o

tratamento de vibração tenha reduzido a dureza inicial, os efeitos da usinagem restabeleceram os níveis de encruamento superficial, aproximando-se a dureza dos valores médios da amostra I (sem alívio de tensões por vibração).

- Os resultados corroboram pesquisas que apontam que o tratamento por vibração não altera significativamente propriedades mecânicas globais, mas reduz a dureza inicial, sem impedir que a usinagem restabeleça níveis próximos aos da condição sem tratamento.
- Na amostra I, peça fabricada por MA tradicional apresentou pouca variação nos valores de rugosidade média (R_a) ao aumentar a velocidade de corte de 56 m/min para 140 m/min, indo de 2,02 μm para 1,93 μm respectivamente com redução de apenas 5%.
- Na amostra II, submetida ao alívio de tensões por vibração após a deposição, a rugosidade R_a apresentou reduções expressivas indo de 1,47 μm quando $V_c = 56$ m/min para 1,02 μm quando $V_c = 140$ m/min, uma redução de 31% com o aumento da velocidade de corte.
- Com velocidade de corte de 56 m/min, a rugosidade média (R_a) foi 27% menor na peça tratada por vibração após a deposição e 47% com velocidade de 140 m/min. Esses resultados demonstram que o pós-processamento promoveu uma superfície mais homogênea e menos irregular, com melhora substancial na qualidade superficial.
- Na amostra I, peça fabricada por MA tradicional houve pouca variação nos valores de rugosidade média (R_t) ao aumentar a velocidade de corte de 56 m/min para 140 m/min, indo de 11,54 μm para 8,66 μm respectivamente com redução de 25%.
- Na amostra II, submetida ao alívio de tensões por vibração após a deposição, a rugosidade R_t apresentou reduções indo de 9,0 μm quando $V_c = 56$ m/min para 6,8 μm quando $V_c = 140$ m/min, uma redução de 24% com o aumento da velocidade de corte.
- A amostra II apresentou valores de R_t cerca de 22% menores em relação à amostra I, independentemente da velocidade de corte, reforçando o efeito positivo do alívio de tensões para esse parâmetro.
- Houve desgaste de entalhe significativo ao empregar velocidade de corte de 56 m/min em ambas as amostras I e II, com profundidade aproximada de 0,005 mm. Esse desgaste ocorreu tanto nas superfícies principal e lateral de folga quanto no raio de ponta.
- Os desgastes ocorreram com maior frequência ao longo do raio de ponta da

ferramenta com médias de 0,006 mm devido a penetração da ponta da ferramenta ter sido menor. Com exceção do Teste 4 e $V_c = 140$ m/min onde esse desgaste foi na faixa de 0,001 mm quase não perceptível no microscópio.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

As seguintes sugestões para trabalhos futuros são propostas:

- Realizar torneamento com amostras de comprimento usinado, maior percurso de corte para estender o desgaste da ferramenta e observar como é o seu comportamento.
- Realizar tratamento térmico de normalização seguido por têmpera e revenimento de peças feitas por MA de modo a avaliar o efeito destes ciclos de tratamento na propriedade mecânica em amostras com e sem pós processamento após a usinagem.
- Utilizar outras ferramentas de corte e elevar o valor da velocidade de corte e empregar diferentes valores de avanço para entender o comportamento do desgaste e da rugosidade entre peças feitas por MA e peças produzidas por laminação, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, D., **Tribocorrosão em aços inoxidáveis ferríticos: uma abordagem metodológica**. 2019. 139f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- ALBERTI, E. A. *et al.* Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. **Rev. Soldag. Insp.**, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 190-198, 2014. DOI: doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.11.
- AOUICI, H.; *et al.* Experimental investigation of cutting parameters influence on surface roughness and cutting forces in hard turning of X38CrMoV5-1 with CBN tool. **Sadhana: Academy Proceedings in Engineering Sciences**, v. 38, n. 3, p. 429-445, 2013. DOI: doi.org/10.1007/s12046-013-0147-z.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Classificação e aplicação de materiais de corte duros para pastilhas intercambiáveis. ABNT NBR ISO 513:2013. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Manufatura aditiva - Princípios gerais - Terminologia*. ABNT NBR/ISO/ASTM 52900, 2018. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6175: *Usinagem - Processos mecânicos*. 2. ed. Rio de Janeiro, 2015.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM E92-23: Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM F2792-12: *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. West Conshohocken: ASTM International, 2012.
- BEDDOES, J.; BIBBY, M. J. **Principles of Metal Manufacturing Processes**. Burlington: Elsevier B.H., 2003.
- BORDIN, F. M. **Efeito do tratamento da microgeometria de brocas helicoidais de metal-duro sobre a integridade superficial dos furos**. Orientador: Rodrigo Panosso Zeilmann. 2013. Dissertação de Mestrado - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/handle/11338/799>. Acesso em: 12 abr. 2025.
- BOURELL, D. L.; ROSEN, D. W.; LEU, M. C. **Roadmap for Additive Manufacturing and Its Impact**. Austin TX, 2009. DOI: doi.org/10.1089/3dp.2013.0002.
- CABAU, A. F.; COSSICH, L. G. **Análise de vibração no torneamento interno utilizando ferramentas com a relação comprimento diâmetro alta**. Orientador: Milton Luiz Polli. 2015. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/10387>. Acesso em: 18 jun. 2025.
- CF Ferramentas. Imagem do produto Inserto TNMG 160404 PF UN6020 Swissblue. Disponível em: <https://www.cfferramentas.com.br/10-unid-inserto-tnmg-160404-pf-un6020-swissblue>. Acesso em: 26 set. 2025.
- CHILDS, T. *et al.* **Metal Machining: Theory and Applications**, 1. ed., New York: John Wiley & Sons Inc., 2000. *E-book*. Disponível em:

<https://soaneemrana.com/onewebmedia/METAL%20MACHINING%20;%20THEORY%20APPLICATION%20BY%20THOMAS%20CHILDS.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2024.

COSTA, H. M. **Ensaio Mecânicos**. 1º ed. Rio de Janeiro: SESES, 2019. *E-book*.

CRISI, G. S.; MENDONÇA, D. P. Stress relief of welds by heat treatment and vibration: a comparison between the two methods. **Vibratory Stress Relief Library**, Philadelphia, 2006. Disponível em: <https://dogruenerji.net/wp-content/uploads/2017/05/comparison-between-two-methods.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2025.

ESPANHOL, V. **Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco**. Orientador: Flávio José Lorini. 2008. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/14374>. Acesso em: 18 set. 2025.

EZUGWU E. O.; PASHBY I. R. High speed milling of nickel-based superalloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 33, n. 4, p. 429-437, 1992. DOI: [doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90277-Y](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90277-Y).

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M.; MACHADO, A. R. The machinability of nickel-based alloys: a review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 86, n. 1-3, p. 1-12, 1999. DOI: [doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00314-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00314-8).

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1970. *E-book*.

FERRARESI, H. N. **Custo e qualidade de fabricação de um flange em aço carbono via manufatura aditiva por deposição a arco**. Orientador: Ruham Pablo Reis. 2023. Tese de doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/39367>. Acesso em: 15 abr. 2025.

FERRARESI, H. N. **Efeito dos ciclos térmicos da manufatura aditiva por soldagem a arco sobre a dureza e microestrutura da ZAC de um ferro fundido nodular**. Orientador: Américo Scotti. 2018. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24287>. Acesso em: 15 abr. 2025.

FERREIRA, R. M. S. **Aço cromo - molibdênio ASTM A387 grau 22 classe 2 e sua soldabilidade aplicado em fabricação de conversores-LD**. Orientadora: Ivanilza Felizardo. 2023. Monografia de conclusão de curso em especialização em Soldagem - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/eca04ea7-53b8-4e52-9e0e-354b8a579179>. Acesso em: 20 maio 2025.

GALEAZZI, Daniel. **Desenvolvimento de um sistema integrado de manufatura aditiva por deposição a arco usando a variante GMAW com alimentação dinâmica CMT**. Orientador: Mateus Barancelli Schwedersky. 2024. Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024. Disponível em: <https://labsolda.ufsc.br/public/teses-e-dissertacoes/teses/1117-desenvolvimento-de-um-sistema-integrado-de-manufatura-aditiva-por-deposicao-a-arco-usando-a-variante-gmaw-com-alimentacao-dinamica-cmt>. Acesso em: 15 abr. 2025.

GIBSON, I. *et al.* **Additive manufacturing technologies**. 2 ed. New York: Springer, 2015. *E-book*.

GRIFFITHS, B. **Manufacturing Surface Technology**. London: Penton Press, 2001, p. 233. *E-book*.

HISSANAGA, B. M. M. S. **Variáveis do processo termomecânico que influenciam na relação elástica do vergalhão CA-60**. 2013 Dissertação de mestrado - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

ISO, I. S. **Tool-life testing with single-point turning tools**. International Standard ISO 3685, 1993.

ISO, I. S. **Surface Texture: Profile Method - Terms, Definitions and Surface Texture Parameters**. Geometrical Product Specifications (GPS): International Standard ISO. 4287 1997.

JANG, D. Y. *et al.* Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel. **Wear**, v. 194, n. 1-2, p. 168-173, 1996. DOI: doi.org/10.1016/0043-1648(95)06838-4.

LI, J. *et al.* **Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing**. International Journal of Automation Technology, v. 13, n. 3, p. 346-353, 2019. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/ijat/13/3/13_346/_pdf. Acesso em: 21 mar. 2025.

LOJA PROLAB. **Estereomicroscópio binocular com zoom 180x**. [imagem]. Disponível em: <https://www.lojaprolab.com.br/estereomicroscopio-binocular-com-zoom-180x-94810>. Acesso em: 01 out. 2025.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**, 2° ed., São Paulo: Edgard Blucher, 2011.

MENDONÇA, Luísa Barros de. **Influência dos parâmetros de corte nas tensões residuais geradas no fresamento do aço SAE 4340**. Rio de Janeiro: Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, 2016.

METAL ZENITH. **Turning: precision metal removal process in steel manufacturing**. [S. l.], 23 out. 2023. Disponível em: https://metalzenith.com/blogs/heat-treatment-processing-terms/turning-precision-metal-removal-process-in-steel-manufacturing?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 4 dez. 2025.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: 2012. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2025.

NEIKTER, M.; HUANG, A.; WU, X. Microstructural characterization of binary microstructure pattern in selective laser-melted Ti-6Al-4V. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, p. 1381–1391, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03941-6> (doi.org in Bing)

NETO, Inoel Bagueira Leal. **Técnicas e metodologias para a análise de carbetos no aço ferrítico 2,25Cr-1Mo**. Orientador: Adriana da Cunha Rocha. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/18024>. Acesso em 20 abr 2025.

OLIVEIRA, J. M. **Caracterização de peça em aço inox 316L fabricada por manufatura aditiva (DMLS)**. Orientador: Marcelo Vasconcelos de Carvalho. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16332/1/PG_DAMEC_2019_1_19.pdf. Acesso em: 20 abr. 2025.

PINHEIRO, P. H. M. **Efeitos da temperatura de interpasse sobre as alterações metalúrgicas e propriedades mecânicas de juntas dissimilares do aço astm a182-f22 soldadas com ligas de níquel**. [S.l.]: UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, 2014.

POLICENA, M. R. **Estudo de usinabilidade e influência do acabamento gerado por fresamento frontal na resistência à corrosão por pites em aços inoxidáveis duplex**. Orientador: André João de Souza. 2022. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/257709>. Acesso em: 27 maio 2025.

PROHASZKA, J.; HIDASI, B.; VARGA, L. Vibration-Induced Internal Stress Relief. **Periodica Polytechnica Mechanical Engineering**, v. 19, n. 1, p. 69-78, 1975.

RAO, V. R. Machinability evaluation of work materials using a combined multiple attribute decision-making method. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, v. 28, p. 221-227, 2006. DOI: doi.org/10.1007/s00170-004-2348-4.

RODRIGUES, T. A. *et al.* In-situ strengthening of a high strength low alloy steel during Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). **Additive Manufacturing**, v. 34, 2020. DOI: [10.1016/j.addma.2020.101200](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101200).

RODRIGUES, T. V. **Tratamento térmico pós-soldagem para alívio de tensões residuais em chapas de aço soldadas: modelagem e análise experimental**. Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco. 2011. Dissertação de mestrado - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: https://dippg.cefet-rj.br/ppemm/attachments/article/81/10_Telmo%20Viana%20Rodrigues.pdf. Acesso em: 27 maio 2025.

SAMES, W. J. *et al.* The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. **International Materials Reviews**, v. 61, n. 5, p. 315-360, 2016. DOI: [10.1080/09506608.2015.1116649](https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649).

SANCHES, H.; AUGUSTO, B. **Avaliação do processo de usinagem com corte interrompido utilizando a análise de esforços e frequências**. Orientadora: Izabel Fernanda Machado. 2011. Dissertação de mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-15042011-134305/>. Acesso em: 27 abr. 2025.

SANTOS, M. R. N. **Caracterização de pré-formas de aços 2,25Cr1Mo fabricadas via manufatura aditiva por deposição a arco com e sem resfriamento ativo por quase-imersão**. Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho. 2022. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/34462>. Acesso em: 21 abr. 2025.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. *Artliber*, [S. l.], v. 53, n. 9, p. 1689-1699, 2007. DOI: [10.1017/CBO9781107415324.004](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004).

SERRATI, D. S. M. **Avaliação numérica-experimental do alívio de tensões residuais de soldagem por vibração e tratamento térmico**. Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho. 2024. Tese de doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/45050>. Acesso em: 15 abr. 2025.

SHANKAR, S. **Vibratory stress relief of mild steel weldments**. 1982. Tese de doutorado (Indian Institute of Science) - Faculty of the Oregon Graduate Center, 1982. Disponível em: <https://metronicmetal.com/wp-content/uploads/2020/11/VibratoryStressReliefOfMildSteelWeldments.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2025.

SILVA, B. H. S.; **Avaliação e Aplicabilidade de Arame Ultrafino em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)**. Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho. 2020. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/29303>. Acesso em: 18 jun. 2025.

SILVA, B. L. B. **Influência da velocidade de corte na integridade superficial em torneamento de aço inoxidável duplex**. 2017. Projeto final de curso (Departamento de Educação Superior) - CEFET, Rio de Janeiro, 2017.

SILVA, L. J. **Near-immersion active cooling for wire + arc additive manufacturing: from concept to application**. Orientador: Américo Scotti. 2019. Tese de doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/27393>. Acesso em: 21 abr. 2025.

SOUZA, L. B. O. **Correlação entre processos de fabricação convencional e por manufatura aditiva com as propriedades do aço inoxidável 316L**. Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho. 2022. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/34965>. Acesso em: 16 abr. 2025.

THIESEN JUNIOR, A. **Selection of processing parameters for the laser directed energy deposition process applied to additive manufacturing: a methodological proposal**. Orientador: Claudimir A. Carminatti. 2021. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/227036>. Acesso em: 15 abr. 2025.

THOMAS-SEALE, L. E. J.; KIRKMAN-BROWN, J. C.; ATTALLAH, M. M.; ESPINO, D. M.; SHEPHERD, D. E. T. **The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry**. International Journal of Production Economics, [S. l.], v. 198, p. 104–118, fev. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.02.003>

TOALDO, P. H. **Avaliação da influência dos parâmetros de processamento na manufatura aditiva do aço VP50IM por arco elétrico a gás**. Orientador: Anderson Geraldo Marenda Pukasiewicz. 2022. Dissertação de mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2022. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/30843>. Acesso em: 2 mar. 2025.

VIKRAM, K. A.; RATNAM, C. Empirical model for surface roughness in hard turning based on analysis of machining parameters and hardness values of various engineering materials. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 2, n. 3, p. 3091-3097, 2012. Disponível em: https://www.ijera.com/papers/Vol2_issue3/SP2330913097.pdf. Acesso em: 3 ago. 2025.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. **Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D**. In: VOLPATO, N. (Org.) **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo, SP: Edgard Blucher Ltda., 2018. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Manufatura_aditiva/ni9dDwAAQBAJ?hl=en&gbpv=1. Acesso em: 2 mar. 2025.

WALKER, C. A theoretical review of the operation of vibratory stress relief with reference to the stabilization of large-scale fabrications. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, v. 225, n. 3, p. 195-204, 2011. DOI: doi.org/10.1177/0954420711402877

ZHAO, H. *et al.* A 3D dynamic analysis of thermal behavior during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, n. 3, p. 488-495, 2011. DOI: doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.002.