

SANA BALDÉ

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Análise do comportamento em corte ortogonal de materiais depositados através de diferentes variantes de Wire and Arc Additive Manufacturing sujeitos a tratamento térmico

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
setembro, 2023

Análise do comportamento em corte ortogonal de materiais depositados através de diferentes variantes de Wire and Arc Additive Manufacturing sujeitos a tratamento térmico

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

SANA BALDÉ

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Orientadora: Carla Maria Moreira Machado,
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientador: Telmo Jorge Gomes dos Santos,
Professor Catedrático, Universidade NOVA de Lisboa

Análise do comportamento em corte ortogonal de materiais depositados através de diferentes variantes de Wire and Arc Additive Manufacturing sujeitos a tratamento térmico

Copyright © 2023 Sana Baldé

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus familiares

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar queria agradecer à minha orientadora, Professora Carla Machado, por toda orientação dada para a realização deste trabalho, bem como o apoio e a motivação que me tem dado ao longo destes anos. Queria também agradecer ao doutorando, Pedro Fonseca, por toda a sua disponibilidade para ensinar e todo o acompanhamento dado na realização deste trabalho, sou grato pela oportunidade de ter aprendido muito com ele ao longo destes meses. Ao meu coorientador, Professor Telmo Santos, sou muito grato pela sua disponibilidade e contributo na realização desta dissertação, e agradeço também pela oportunidade de ter aprendido muito ao longo destes anos com ele. Agradeço ao professor José Xavier, pela sua disponibilidade em fornecer a tecnologia de correlação de imagens, que foi muito útil na realização desta dissertação. Ao professor Alexandre Velhinho e ao CENIMAT deixo os meus agradecimentos pela disponibilidade e pela utilização do microscópio ótico para a realização da análise microestrutural das amostras retiradas das paredes produzidas por WAAM. Agradeço aos meus familiares sobretudo à minha tia, Celeste Monteiro, por ter me apoiado ao longo da minha vida e ter contribuído muito na minha educação. Aos meus amigos sou muito grato pelos apoios e palavras motivadoras recebidos ao longo destes anos. Agradeço também aos meus colegas da faculdade pelo apoio e o companheirismo ao longo deste percurso, e agradeço especialmente aos meus padrinhos, Miguel Ameixas e Luís Gonçalves e aos meus afilhados Pedro Tavares, Samuel Barbosa e Miguel Matos.

Por último lugar não menos importante queria agradecer ao meu amigo e colega, Rui Silva, que me tem apoiado muito ao longo destes anos.

RESUMO

A maquinagem de peças produzidas por WAAM constitui um desafio devido à sua microestrutura particular e aos padrões de tensão residual que normalmente são encontrados. Esses fatores podem afetar a maquinabilidade e o acabamento superficial das peças e podem exigir técnicas de maquinagem específicas para alcançar os resultados desejados.

O trabalho a decorrer no NTI no âmbito da investigação dos processos de WAAM tem vindo a demonstrar que é possível melhorar as propriedades mecânicas se forem realizados tratamentos térmicos após o fabrico dos componentes. Como o tratamento térmico subsequente de um componente WAAM pode afetar sua maquinabilidade, é importante estudar o seu comportamento durante o corte, uma vez que pode alterar a microestrutura e aliviar tensões residuais no material, o que por sua vez resulta em alterações das propriedades mecânicas e maquinabilidade.

Assim, o objetivo deste trabalho de dissertação é a análise do processo de corte ortogonal aplicado em estruturas produzidas por diferentes variantes de WAAM, com e sem subsequente tratamento térmico, e fornecer uma análise mais detalhada em relação à seleção de parâmetros, forças envolvidas, tensões e processo de formação de avara.

Experimentalmente foram produzidas duas paredes através de cada uma das tecnologias (WAAM e HF-WAAM) sendo posteriormente uma de cada sujeita a tratamento térmico de normalização. Procedeu-se à preparação e caracterização das amostras para realização da análise microestrutural e medição das respetivas durezas. Procedeu-se ainda à preparação dos provetes para realização dos ensaios de corte ortogonal. Após preparação para aplicação da tecnologia DIC, foram realizados um total de 48 ensaios experimentais de corte ortogonal.

Assim sendo, o objetivo principal do trabalho foi cumprido, e a principal conclusão que se pode retirar é a de que, apesar do incremento na dureza proporcionada pelo HF-WAAM, e/ou do refinamento de grão proveniente dos tratamentos térmicos, foi assegurada a viabilidade e até a vantagem de maquinar tais componentes com propriedades mecânicas melhoradas, por via da maquinabilidade aprimorada.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, WAAM, Corte Ortogonal, HF-WAAM, Aço de Alta Resistência e Baixa Liga, Tratamento Térmico

ABSTRACT

Machining parts produced by WAAM is challenging due to the unique microstructure and residual stress patterns that are typically encountered. These factors can affect the machinability and surface finish of parts and may require specific machining techniques to achieve the desired results.

The work being carried out at NTI within the scope of research into WAAM processes has demonstrated that it is possible to improve mechanical properties if heat treatments are carried out after manufacturing the components. As subsequent heat treatment of a WAAM component can affect its machinability, it is important to study its behaviour during cutting, as it can alter the microstructure and alleviate residual stresses in the material, which in turn results in changes to the mechanical properties and machinability.

Thus, the objective of this dissertation work is to analyse the orthogonal cutting process applied to structures produced by different variants of WAAM, without and with subsequent heat treatment, and to provide a more detailed analysis in relation to the selection of parameters, forces involved, stresses and chip formation process.

Experimentally, two walls were produced using each of the technologies (WAAM and HF-WAAM) and one of each was subsequently subjected to normalization heat treatment. The samples were then prepared and characterized to carry out the microstructural analysis and measure their respective hardness. The specimens were also prepared for orthogonal cutting tests. After preparation for the application of DIC technology, a total of 48 experimental orthogonal cutting tests were carried out.

Therefore, the main objective of the work was achieved, and the main conclusion that can be drawn is that, despite the increase in hardness provided by HF-WAAM, and/or the grain refinement resulting from heat treatments, ensuring viability and even the advantage of machining such components with improved mechanical properties, through improved machinability.

Keywords: Additive Manufacturing, WAAM, Orthogonal Cutting, HF-WAAM, HSLA Steel, Heat Treatment

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação e Objetivos.....	1
1.2	Estrutura da Dissertação	4
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1	Materiais utilizados – High-strength low-alloy Steel	5
2.2	Fabrico Aditivo em Metais	7
2.3	Wire and Arc Additive Manufacturing.....	7
2.4	Corte Ortogonal.....	10
2.4.1	Fundamentos do Corte Ortogonal.....	10
2.4.2	Corte ortogonal realizado em amostras de WAAM e HF-WAAM	11
2.5	Síntese do Capítulo.....	19
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	21
3.1	Produção das Amostras	21
3.2	Tratamento Térmico	25
3.3	Caracterização das Amostras.....	26
3.3.1	Preparação das Amostras	26
3.3.2	Análise Microestrutural	29
3.3.3	Análise da Dureza	29
3.4	Corte Ortogonal das Amostras	30
3.4.1	Preparação dos provetes.....	30
3.4.2	Ferramenta de corte.....	31

3.4.3	Câmara de alta velocidade e Correlação Digital de Imagens	33
3.4.4	Aparato experimental.....	35
3.4.5	Ensaio de corte ortogonal.....	36
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	40
4.1	Caracterização das amostras.....	40
4.2	Forças de Corte.....	43
4.3	Energia Específica de Corte	46
4.4	Ângulo de Corte.....	48
4.5	Coefficiente de Atrito	50
4.6	Deformações.....	52
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	55
6	REFERÊNCIAS	59
	ANEXO 1	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Representação esquemática do processo WAAM	8
Figura 2.2 Representação esquemática das diferentes técnicas de WAAM.....	8
Figura 2.3 Morfologia do corte Ortogonal	10
Figura 2.4 Microestrutura na zona central das amostras	11
Figura 2.5 Microestrutura ao longo da direção de construção das amostras.....	12
Figura 2.6 Variação da dureza ao longo das amostras	13
Figura 2.7 Ensaio de compressão uniaxial nas amostras de WAAM e HF-WAAM.....	13
Figura 2.8 Níveis de rugosidade nas amostras de WAAM, HF-WAAM e aço de baixo carbono	14
Figura 2.9 Resultados das forças de corte para as amostras de WAAM, HF-WAAM e aço de baixo carbono	15
Figura 2.10 Morfologia e raio das aparas para as amostras de WAAM, HF-WAAM e aço de baixo carbono	16
Figura 2.11 CTR das amostras de WAAM, HF-WAAM e aço de baixo carbono	17
Figura 2.12 Identificação das zonas primárias e secundárias de corte (WAAM)	18
Figura 2.13 Identificação das zonas primárias e secundárias de corte (HF- WAAM).....	18
Figura 2.14 Identificação das zonas primárias e secundárias de corte (aço de baixo carbono)	18
Figura 3.1 Equipamento de WAAM	22
Figura 3.2 Andamento do processo de construção da parede	23
Figura 3.3 Amostra de WAAM convencional.....	24
Figura 3.4 Amostra de HF-WAAM	24
Figura 3.5 Diferença das superfícies das camadas de WAAM convencional e de HF-WAAM.....	24
Figura 3.6 Amostra WAAM convencional após tratamento térmico.....	25
Figura 3.7 Amostra HF-WAAM após tratamento térmico.....	26
Figura 3.8 Divisão das amostras em zonas para estudo	26
Figura 3.9 Processo de embutimento das amostras.....	27
Figura 3.10 Polidor automático	27
Figura 3.11 Superfície das amostras	28
Figura 3.12 Polimento	29
Figura 3.13 Indentador e marca da indentação de teste de microdureza Vickers	29
Figura 3.14 Divisão das paredes	30
Figura 3.15 Acabamento superficial das amostras.....	31
Figura 3.16 Máquina-Ferramenta para Corte Ortogonal.....	31

Figura 3.17 barra de aço HSS para obter o gume de corte.....	32
Figura 3.18 Especificação do gume de corte.....	32
Figura 3.19 Técnica para afiar o gume de corte	32
Figura 3.20 Fotografias do mecanismo de formação da apara obtidas com câmara de alta velocidade	33
Figura 3.21 Pintura das amostras	33
Figura 3.22 Configuração experimental de DIC 2D	34
Figura 3.23 Configuração da câmara auxiliada com os holofotes.....	35
Figura 3.24 Aparato experimental do corte ortogonal.....	36
Figura 3.25 Amostra encastrada na peça de fixação	36
Figura 3.26 Forças de corte que atuam na ferramenta.....	37
Figura 4.1 Medições e variações de dureza ao longo das amostras produzidas.....	41
Figura 4.2 Medições e variações de dureza ao longo das amostras com tratamento térmico	41
Figura 4.3 Microestrutura das amostras WAAM (esquerda) e amostras HF-WAAM (direita), ao longo da direção de construção	42
Figura 4.4 Microestrutura das amostras WAAM (esquerda) e amostras HF-WAAM (direita) sujeitas a tratamento térmico, ao longo da direção de construção	42
Figura 4.5 Exemplo do comportamento das três componentes da força (Ensaio 1)	43
Figura 4.6 Resultados das medições da Força de Corte para as diferentes amostras WAAM.....	45
Figura 4.7 Resultados das medições da Força de Corte para as diferentes amostras HF-WAAM.....	45
Figura 4.8 Resultados experimentais para a energia específica de corte considerando as diferentes amostras WAAM.....	46
Figura 4.9 Resultados experimentais para a energia específica de corte considerando as diferentes amostras HF-WAAM	47
Figura 4.10 Ângulo de corte obtido através dos modelos MSSP e MEP considerando as diferentes amostras WAAM.....	49
Figura 4.11 Ângulo de corte obtido através dos modelos MSSP e MEP considerando as diferentes amostras HF-WAAM	50
Figura 4.12 Resultados experimentais para o ângulo de atrito e coeficiente de atrito considerando as diferentes amostras WAAM.....	50
Figura 4.13 Resultados experimentais para o ângulo de atrito e coeficiente de atrito considerando as diferentes amostras HF-WAAM	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Elementos constituintes das ligas de HSLA e as suas influências	6
Tabela 2.2	Características das diferentes técnicas de WAAM.....	8
Tabela 2.3	Parâmetros do processo WAAM.....	9
Tabela 2.4	Materiais usados em WAAM e as suas aplicações.....	9
Tabela 3.1	Parâmetros WAAM utilizados	22
Tabela 3.2	Composição química do fio metálico de HSLA (W%).....	23
Tabela 3.3	Composição química do gás de proteção	23
Tabela 3.4	Parâmetros do Tratamento Térmico	25
Tabela 3.5	Parâmetros de desbaste e polimento.....	28
Tabela 3.6	Parâmetros de medição de durezas.....	30
Tabela 3.7	Configurações de processamento para DIC	35
Tabela 3.8	Parâmetros de corte utilizados.....	37
Tabela 3.9	Planeamento dos ensaios de WAAM e HF-WAAM.....	38
Tabela 4.1	Valores máximos das forças de corte medidos nos ensaios	44
Tabela 4.2	Valores de energia específica de corte calculados nos diferentes ensaios.....	47
Tabela 4.3	Valores do ângulo de corte calculados através dos princípios MSSP e MEP	48
Tabela 4.4	Valores do ângulo de atrito e coeficiente de atrito medidos experimentalmente	51

SÍMBOLOS E SIGLAS

AM	<i>Additive Manufacturing</i> - Fabrico Aditivo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
a	Avanço [mm]
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i> - Dispositivo de carga acoplada
CTR	<i>Chip Thickness Ratio</i> – Taxa de deformação da apara
DIC	<i>Digital Image Correlation</i> - Correlação Digital de Imagem
EBM	<i>Electron Beam Melting</i> - Fusão por feixe de eletrões
f	Velocidade de avanço [mm/min]
F_c	Força de corte [N]
F_t	Força de Avanço [N]
FCT-UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa
fps	<i>Frames per second</i> - Fotogramas por segundo
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HF-WAAM	<i>Hot Forging Wire and Arc Additive Manufacturing</i>
HSLA	<i>High strength low alloy steel</i>
k	Energia Total de Corte [GJ/m ³]
k_c	Energia Cinética por unidade de volume [GJ/m ³]
k_d	Energia de Dobragem da Apara por unidade de volume [GJ/m ³]
k_f	Energia do Atrito por unidade de volume [GJ/m ³]
k_γ	Energia de Superfície das superfícies Novas [GJ/m ³]
LBM	<i>Laser Beam Melting</i>
LMD	<i>Laser Metal Deposition</i>
MEP	<i>Minimum Energy Principle</i> – Princípio da energia mínima

MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MSSP	<i>Maximum Shear Stress Principle</i> - Princípio da Tensão de Corte Máxima
NTI	Núcleo de Tecnologia Industrial
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
p	Profundidade de corte [mm]
SCE, k_s	Energia específica de corte [GJ/m ³]
t_0 , UCT	espessura da apara não deformada [mm]
v_c	Velocidade de corte [m/min]
WAAM	<i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i>
α	Ângulo de saída [°]
β	Ângulo de Atrito [°]
ϕ	Ângulo de Corte [°]
γ	Ângulo de ataque [°]
μ	Coeficiente de Atrito
τ_s	Tensão de Corte [MPa]

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicial apresenta-se uma contextualização da situação em estudo e os principais motivos que conduziram a esta investigação. Estabelecem-se os objetivos principais que direcionam o presente trabalho.

1.1 Motivação e Objetivos

Este trabalho enquadra-se numa sequência de estudos realizados no Núcleo de Tecnologia Industrial (NTI) do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI), no âmbito do pós-processamento de componentes produzidos por fabrico aditivo, nomeadamente por *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM).

A motivação para investigar o corte ortogonal em componentes produzidos por Fabrico Aditivo decorre da necessidade de entender e otimizar o processo de maquinagem desses componentes. As técnicas AM, como WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*), podem produzir peças complexas com formato quase-final e pouco desperdício de material, mas essas peças geralmente exigem operações de pós-processamento, como maquinagem, para obter o acabamento superficial, tolerâncias e requisitos funcionais desejados.

A maquinagem de peças produzidas por WAAM constitui um desafio devido à microestrutura única e aos padrões de tensão residual que normalmente são encontrados. Esses fatores podem afetar a maquinabilidade e o acabamento superficial das peças e podem exigir técnicas de maquinagem específicas para alcançar os resultados desejados. Com efeito, a presença de tensões residuais pode causar distorção ou empeno durante a maquinagem. Torna-se então importante utilizar estratégias que minimizem a acumulação de calor e evitem a deformação da peça, o que pode incluir a utilização de refrigeração controlada, bem como o uso de baixas velocidades de corte para minimizar a quantidade de calor gerado.

Outro desafio na maquinagem destes componentes é a presença de uma microestrutura única, muitas vezes caracterizada por grãos colunares e uma composição de material não uniforme, o que pode afetar a maquinabilidade das peças e resultar em acabamento superficial indesejado.

Além disso, é importante considerar as propriedades específicas do material usado no processo WAAM, como dureza, tenacidade e resistência ao desgaste. Essas propriedades podem afetar a seleção de ferramentas de corte e parâmetros de corte e podem exigir abordagens diferentes em comparação com a maquinagem de aço produzido convencionalmente.

Por outro lado, o trabalho a decorrer no NTI no âmbito da investigação dos processos de WAAM tem vindo a demonstrar que é possível melhorar as propriedades mecânicas se forem realizados tratamentos térmicos após o fabrico dos componentes. Como o tratamento térmico subsequente de um componente WAAM pode afetar sua maquinabilidade, é importante estudar o seu comportamento durante o corte, uma vez que pode alterar a microestrutura e aliviar tensões residuais no material, o que por sua vez resulta em alterações das propriedades mecânicas e maquinabilidade. Em alguns casos, o tratamento térmico subsequente pode resultar em melhor maquinabilidade dado, por exemplo, o melhorar a ductilidade do material, resultando em forças de corte mais baixas e melhor acabamento superficial. Além disso, o recozimento permite reduzir as tensões residuais no material, o que pode reduzir a probabilidade de deformação ou empeno durante a maquinagem. No entanto, também pode resultar em maquinabilidade reduzida porque pode resultar num aumento na dureza do material, dificultando o corte. Além disso, se por via do recozimento houver alterações na microestrutura do material, esta afeta as suas propriedades mecânicas e a resposta às forças de corte.

Verifica-se então que é importante considerar o efeito do tratamento térmico subsequente na maquinabilidade dos componentes WAAM, uma vez que os parâmetros de corte e as ferramentas podem precisar ser ajustados dependendo das propriedades específicas do material e da microestrutura do componente após o tratamento térmico, a fim de obter o acabamento superficial desejado, precisão dimensional e correta formação da apara.

Sem tratamento térmico, a microestrutura de uma peça WAAM pode ser caracterizada por grãos colunares que são alongados na direção da deposição. Isso pode resultar em propriedades anisotrópicas do material e pode afetar a formação de apara, tipicamente caracterizada por formas e tamanhos irregulares e que podem ter tendência a aderir à ferramenta de corte devido à natureza anisotrópica do material.

Após o tratamento térmico, a microestrutura da peça WAAM é alterada, dependendo do processo específico de tratamento térmico utilizado. Após a realização de tratamento térmico o material pode apresentar uma microestrutura mais fina e uniforme, alterando a sua ductilidade ou tenacidade. Isso pode resultar na formação de aparas mais previsível, com menor variabilidade na forma e no tamanho, podendo também ter menos probabilidade de aderir à ferramenta de corte devido à ductilidade melhorada do material. No geral, as diferenças na formação de apara entre uma peça WAAM sem e com tratamento térmico podem ser complexas e dependem de vários fatores.

O corte ortogonal é uma ferramenta importante no estudo do comportamento e deformação do material. Ao entender a maneira como os materiais respondem às forças de corte e outras tensões externas, o desenvolvimento de processos de corte mais adequados para materiais e aplicações específicas é simplificado. Em primeiro lugar, o corte ortogonal é um processo de corte mais simples e controlado quando comparado com o corte oblíquo. No corte ortogonal, a aresta de corte da ferramenta é perpendicular à superfície da peça de trabalho, o que permite um controle mais fácil das forças de corte e formação de aparas, o que torna mais fácil analisar e entender o comportamento do material durante o corte, fornecendo informações valiosas sobre as propriedades e a maquinabilidade do material. Por outro lado, o corte oblíquo envolve um processo de corte mais complexo, no qual a aresta de corte forma um ângulo em relação à superfície da peça. Isso pode resultar em uma formação de aparas e forças de corte mais complicadas, que podem ser mais difíceis de analisar e entender. Portanto, começar com o corte ortogonal permite que se construa uma base sólida de conhecimento antes de passar para processos de corte mais complexos, como o corte oblíquo.

Em segundo lugar, o corte ortogonal tem vindo a ser utilizado como referência para comparar diferentes ferramentas de corte, parâmetros e materiais. Tal acontece porque o corte ortogonal é um processo bem compreendido e reportado, o que facilita a comparação e avaliação de diferentes estudos. Portanto, começar com o corte ortogonal pode fornecer uma linha de base para estudos futuros, o que pode ajudar a padronizar as pesquisas na área.

Finalmente, o corte ortogonal é frequentemente usado como uma etapa preliminar na pesquisa, o que pode contribuir para identificar as melhores condições e parâmetros de corte para um determinado material. Essas informações podem ser usadas posteriormente em processos de corte mais complexos, como corte oblíquo, que podem fornecer uma compreensão mais detalhada do comportamento e das propriedades do material.

Estudar a maquinabilidade de peças produzidas por WAAM constitui uma novidade porque a microestrutura das peças produzidas pode ser diferente dos processos de fabricação tradicionais, significando que o desgaste da ferramenta, a rugosidade da superfície, e as forças de corte e outros parâmetros de corte podem precisar ser otimizados para peças produzidas em WAAM. Por outro lado, produzem-se componentes de forma quase final, o que pode reduzir significativamente a quantidade de desperdício de material e quantidade de operações de corte. Portanto, estudar a maquinabilidade das peças produzidas pela WAAM pode ajudar a identificar maneiras de reduzir ainda mais o desperdício de material e melhorar a eficiência do processo de fabricação. Como existe potencial para ser usada numa ampla gama de produtos, entender a maquinabilidade das peças produzidas por WAAM é crucial para a adoção bem-sucedida dessa tecnologia nessas indústrias.

Em súmula, a investigação do corte ortogonal de peças produzidas em WAAM, com e sem tratamentos térmicos, pode contribuir para um melhor entendimento da maquinabilidade dessas peças e promover a otimização dos parâmetros de processo, conduzindo a processos de fabricação mais eficientes e econmicos.

Assim sendo, o objetivo deste trabalho de dissertação  a análise do processo de corte ortogonal aplicado em estruturas produzidas por diferentes variantes de WAAM, sem e com subsequente tratamento térmico, e fornecer uma análise mais detalhada em relação  seleção de parâmetros, forças envolvidas, tensões e processo de formação de apara. Pretende-se criar desta forma uma fonte confiável de conhecimento sobre a previsão do comportamento do material durante o processo de corte, permitindo melhores decisões e planeamento operacional, com vista à melhoria dos níveis de produtividade e eficiência do processo.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada nos seguintes 5 capítulos:

- **Capítulo 1:** Motivação e objetivo da realização deste trabalho de dissertação.
- **Capítulo 2:** Revisão da literatura  o estado da arte, que representa
- **Capítulo 3:** Procedimento experimental
- **Capítulo 4:** Análise e discussão de resultados obtidos durante o trabalho experimental
- **Capítulo 5:** Conclusão dos resultados obtidos neste trabalho e sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Ao longo do presente capítulo apresentam-se os conceitos envolvidos, incluindo-se a sua explicação e fundamentação teórica. Apresenta-se ainda a revisão bibliográfica em que se destacam os principais estudos anteriores desenvolvidos nesta área.

2.1 Materiais utilizados – *High-strength low-alloy Steel*

O aço é dos materiais mais utilizados em toda a indústria, por possuir várias ligas com diferentes propriedades químicas e físicas, utilizadas consoante a finalidade que se pretende, e ser de fácil aquisição [1]. Por haver uma gama tão ampla de aços, estes podem ser tanto fáceis como difíceis de trabalhar. Isto causa um grande dilema quando se está a escolher o processo de fabrico para manipular uma matéria-prima, uma vez que se pretende escolher o processo mais eficiente e económico para a peça e material em questão. Uma das grandes vantagens do WAAM é a facilidade que este tem de alterar os seus parâmetros consoante as características do material utilizado, para obter o melhor resultado possível.

Neste trabalho serão utilizadas amostras de *High-strength low-alloy Steel (HSLA)* produzidas através de WAAM. Este aço apresenta melhores propriedades mecânicas e resistência à corrosão do que os aços carbono convencionais, bem como uma melhor soldabilidade e ainda apresenta a vantagem de ser mais leve mesmo apresentando uma maior resistência [2].

Na Tabela 2.1 apresenta-se os elementos tipicamente presentes nas ligas HSLA, e a influência que estas têm na liga [3].

Tabela 2.1 Elementos constituintes das ligas de HSLA e as suas influências [3]

Elemento	Quantidade (W%)	Influência
Carbono (C)	< 0.25	Fortalecimento.
Manganês (Mn)	0.5 - 2	Atrasa a decomposição de austenite durante o arrefecimento acelerado. Fortalecimento de solução sólida. Diminui a temperatura de transição de dúctil para frágil.
Silício (Si)	0.1 – 0.5	Desoxidante em aço fundido. Fortalecimento de soluções sólidas.
Alumínio (Al)	> 0.02	Desoxidante. Limita o crescimento do grão.
Nióbio (Nb)	0.02 – 0.06	Fortalecimento muito forte de ferrite [Nb (C, N)]. Controlo do tamanho do grão. Atrasa a transformação de γ para α .
Titânio (Ti)	0 – 0.06	Controlo do tamanho do grão (formação de TiN). Fortalecimento forte de ferrite.
Vanádio (V)	0 – 0.1	Fortalecimento forte de ferrite (VN).
Azoto (N)	< 0.012	Forma TiN, VN e AlN.
Molibdênio (Mo)	0 – 0.3	Promove a formação de bainite. Fortalecimento de ferrite.
Níquel (Ni)	0 – 0.5	Aumenta a resistência à fratura.
Cobre (Cu)	0 – 0.55	Melhora a resistência à corrosão. Fortalecimento de ferrite.
Crómio (Cr)	0 – 1.25	Melhora a resistência à corrosão atmosférica (quando também é adicionado Cu).

2.2 Fabrico Aditivo em Metais

O fabrico aditivo surgiu na 4ª revolução industrial, Indústria 4.0, que tinha como objetivo promover integração de sistemas de produção inteligentes e tecnologias de informação avançadas [4]. O fabrico aditivo baseia na deposição de camadas sucessivas de material, como polímeros e ligas metálicas de alta resistência, até criar a geometria pretendida. Permite fabricar peças com as mais variadas geometrias, totalmente customizáveis, e com elevado nível de complexidade. O fabrico aditivo permite reduzir o custo das peças reduzindo o desperdício de material e facilitar a fabricação de montagens complexas, em uma única peça, que seriam feitas de muitos subcomponentes [5]

Para produzir peças metálicas através do fabrico aditivo tem de se escolher uma das variantes do processo do fabrico aditivo que diferem sobretudo na fonte de energia e no material base. Consoante os requisitos e as características que se pretendem no produto final, pode-se optar por tecnologias que utilizam pó metálico ou arame como material base. Por norma, os produtos criados a partir de pó têm um excelente acabamento superficial e uma elevada precisão, sem praticamente nenhuma limitação em termos geométricos, mas são extremamente poluentes, dispendiosos e é mais provável o aparecimento de defeitos tais como porosidades [1].

As principais variantes do fabrico aditivo de metais que utilizam pó metálico são: Laser Beam Melting (LBM) e *Laser Metal Deposition (LMD)* que utilizam um laser como fonte de energia; e *Electron Beam Melting (EBM)* cuja fonte energética é um feixe de eletrões [6]. A variante *Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)* utiliza fio metálico como material base.

2.3 Wire and Arc Additive Manufacturing

A primeira patente relativa à produção de objetos tridimensionais com recurso a um arco elétrico remonta à década de 1920, pelo cientista Baker [5]. Mas não foi até ao início do século XXI, que grupos de investigação começaram a trabalhar e a investir neste ramo, que o processo WAAM teve relevância. Rapidamente se tornou um processo atrativo, pelo simples facto que este tinha a possibilidade de reduzir quase 50 % do custo de maquinagem de ligas de alta resistência [7].

O WAAM, cujo processo está ilustrado na Figura 2.1, é uma das variantes do fabrico aditivo que utiliza um arco elétrico como fonte de energia e um fio metálico como material de adição. Estes processos baseiam-se nos diferentes tipos de soldadura já existentes, tais como *Plasma Arc Welding (PAW)*, *Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)* e *Gas Metal Arc Welding (GMAW)* [1], [8], ilustradas na Figura 2.2 [9], e cujas características destas diferentes técnicas de WAAM estão apresentadas na Tabela 2.2. A taxa de deposição no método baseado em GMAW é 2 a 3 vezes maior que a dos métodos baseados

em GTAW ou PAW, por outro lado, o a técnica GMAW é menos estável e liberta mais fumo e gera mais salpicos devido à atuação da corrente elétrica diretamente na matéria-prima [8]. A variante WAAM apresenta uma vantagem de ter uma taxa de deposição muito superiores as das variantes que usam pó metálico como material de base [1].

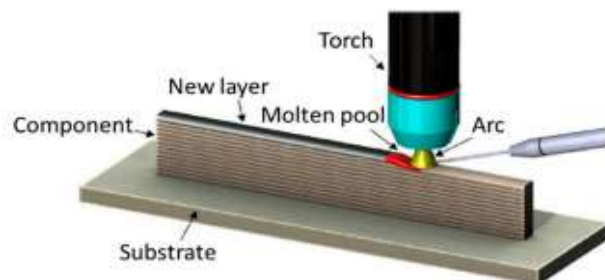


Figura 2.1 Representação esquemática do processo WAAM [1]

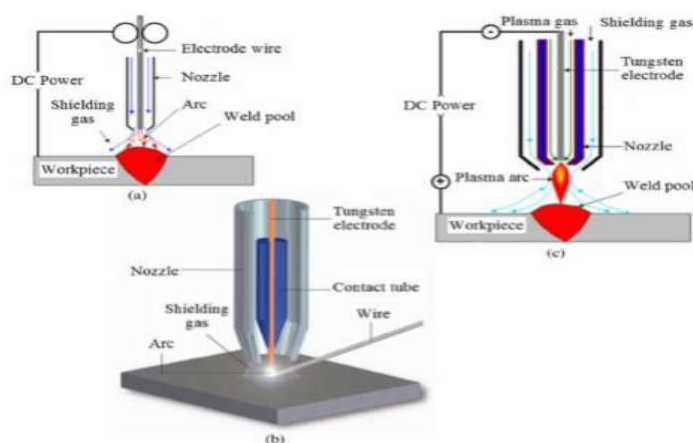


Figura 2.2 Representação esquemática das diferentes técnicas de WAAM: a) GMAW; b) GTAW; c) PAW [9]

Tabela 2.2 Características das diferentes técnicas de WAAM [8]

Técnica	Fonte de Energia	Características
Baseada em GTAW	GTAW	Eléttrodo não consumível; processo separado de alimentação de fio; é necessária rotação do fio e da tocha; taxa de deposição: 1-2 kg/hora.
Baseada em GMAW	GMAW	Fio de eléttrodo consumível; baixa estabilidade do arco e formação de salpicos; taxa de deposição: 3-4 kg/hora.
	CMT (<i>Cold Metal Transfer</i>)	Eléttrodo de fio consumível alternativo; Processo de baixa entrega térmica sem salpicos e elevada tolerância; taxa de deposição: 2-3 kg/hora.
	Tandem GMAW	Dois fios de eléttrodos consumíveis; fácil mistura para controlar a composição para fabricação de materiais intermetálicos; taxa de deposição: 6-8 kg/hora.
Baseado em PAW	Plasma	eléttrodo não consumível; processo separado de alimentação de arame; a rotação do fio e da tocha é necessária; taxa de deposição: 2-4 kg/hora.

Os principais parâmetros do processo WAAM estão apresentados na Tabela 2.3, como é de notar o WAAM apresenta os mesmos parâmetros da soldura por arco, pois como já referido as técnicas de WAAM baseiam-se nos diferentes tipos de soldadura.

Tabela 2.3 Parâmetros do processo WAAM

Parâmetros	Unidades
Corrente elétrica	Ampere
Tensão elétrica	Volt
Velocidade de alimentação	m /s
Caudal do gás	l/min
Tipo de gás de proteção	-
Ângulo da tocha	°
Distância da ponta da tocha a peça de trabalho	mm
Velocidade de deposição	mm /s

O processo WAAM não está limitado a aços. Pode recorrer-se ao processo WAAM para fabrico de peças em titânio, níquel, alumínio, aço e outros metais e superligas [8]. Na Tabela 2.4 apresentam-se algumas aplicações destes metais.

Tabela 2.4 Materiais usados em WAAM e as suas aplicações, adaptado de [8]

Aplicação	Ligas				
	Titânio	Alumínio	Aço	Níquel	Bimetal
Aeroespacial	●	●		●	●
Automóvel		●	●		●
Indústria Naval	●		●		
Resistência à corrosão	●			●	●
Altas Temperaturas	●			●	●
Ferramentas e moldes			●		

As peças produzidas por WAAM apresentam acabamento superficial de baixa qualidade [10], por isso necessitam de passar por processos de acabamento superficial. A engenharia tem como um desafio a produção equipamentos híbridos que integram tecnologias de fabrico aditivo e subtrativa em uma única máquina [1].

Os principais tipo de defeitos que ocorrem em componentes do WAAM são porosidades, distorção e delaminação das camadas devido ao aparecimento de tensões residuais e fissuras [8].

Existem ainda outras variantes do processo, nomeadamente *Hot-Forging Wire and Arc Additive Manufacturing* (HF-WAAM), onde ocorre deformação plástica a quente do cordão de soldadura depositado, para melhorar as propriedades mecânicas do material.

2.4 Corte Ortogonal

2.4.1 Fundamentos do Corte Ortogonal

O corte ortogonal, cuja geometria está representada na Figura 2.3, é uma simplificação dos processos de corte convencionais, que considera os mecanismos de formação de apara um fenómeno bidimensional [11]. Os resultados obtidos podem ser extrapolados para os processos de corte convencional [12]. Os pressupostos do corte Ortogonal são os seguintes:

- são geradas aparas contínuas e não há formação da aresta postiça de corte.
- A ferramenta é perfeitamente aguda sem arredondamento na aresta de corte o que garante que a face de folga não toca a superfície maquinada.
- A espessura da apara antes do corte h é pequena em relação à largura de corte b .
- Existe uma zona de deformação primária relativamente delgada que se pode assimilar a um plano (plano de deformação).
- A aresta de corte é perpendicular ao vetor velocidade de corte (ângulo de posição $\chi = 90^\circ$).
- Todo o material da apara escoar na direção de saída sem fluxos laterais (ângulo de inclinação, $\lambda = 0^\circ$). [13]

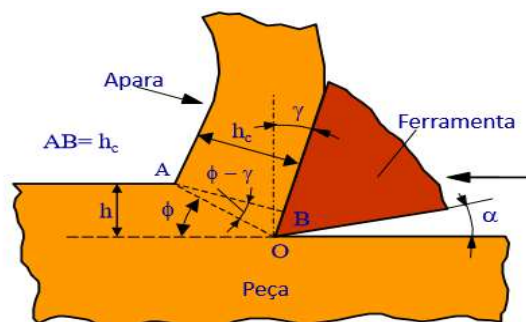


Figura 2.3 Morfologia do corte Ortogonal [13]

Os principais parâmetros do corte ortogonal são os seguintes:

- γ – ângulo de ataque $[\circ]$
- v – Velocidade de corte $[m/min]$
- a – Avanço de corte $[mm]$
- p – Profundidade de corte $[mm]$
- ϕ – ângulo de corte $[\circ]$

2.4.2 Corte ortogonal realizado em amostras de WAAM e HF-WAAM

2.4.2.1 Caracterização das amostras

A caracterização da microestrutura de uma amostra é essencial para estimar se uma amostra tem bom desempenho mecânico. Em relação a WAAM e a sua variante de forjamento a quente sabe-se que temos comportamento anisotrópico, pois apresentam menor resistência na direção em que as suas camadas foram depositadas. No entanto, verificou-se que passando por processos de maquinagem, era visível a presença de microestrutura homogênea independentemente da direção, como pode ser observado na Figura 2.4 [14].

São visíveis na Figura 2.4 grãos muito refinados, o que se deve às elevadas taxas de arrefecimento a que as amostras de WAAM estão sujeitas. Estas taxas são relativamente elevadas nas amostras de WAAM, e isto vai ter uma influência direta no processo de crescimento grão tornando-o num processo não linear. A formação de grãos menores de austenite que durante o arrefecimento são transformadas em ferrite poligonal com uma superfície homogênea, como se verifica [14]. A amostra da variante de forjamento à quente apresenta maior refinamento de grão quando comparado a amostra de WAAM convencional.

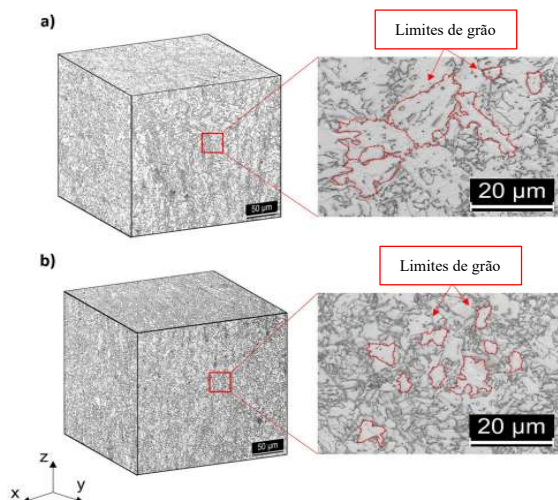


Figura 2.4 Microestrutura na zona central das amostras: a) produzida por WAAM; b) produzida por HF-WAAM [14]

A microestrutura ao longo da direção da disposição das camadas está ilustrada na Figura 2.5, onde as amostras apresentam microestruturas irregulares ao longo da direção de deposição, alterando o tamanho do grão ao longo da altura, como consequência do efeito dos diferentes comportamentos térmicos em cada zona do material durante a deposição das camadas. Nas zonas centrais das amostras, verificou-se que estas apresentavam maior grão, resultado de dois efeitos térmicos distintos: o aumento da dificuldade em dissipar o calor pelas camadas subjacentes, que são progressivamente mais quentes; e os efeitos térmicos repetitivos causados pela deposição das camadas sobrejacentes, que originam um efeito de tratamento térmico [14]. Além disso, na parte inferior da amostra, a maior parte do calor é

dissipado através do substrato que se encontra a uma temperatura inferior, aumentando a taxa de arrefecimento do material quando comparado às camadas superiores e, portanto, forma uma microestrutura mais fina [14]. Por sua vez, as camadas do topo estão sujeitas a menos ciclos térmicos, o que vai gerar um grão mais fino comparando aos grãos da zona central [14].

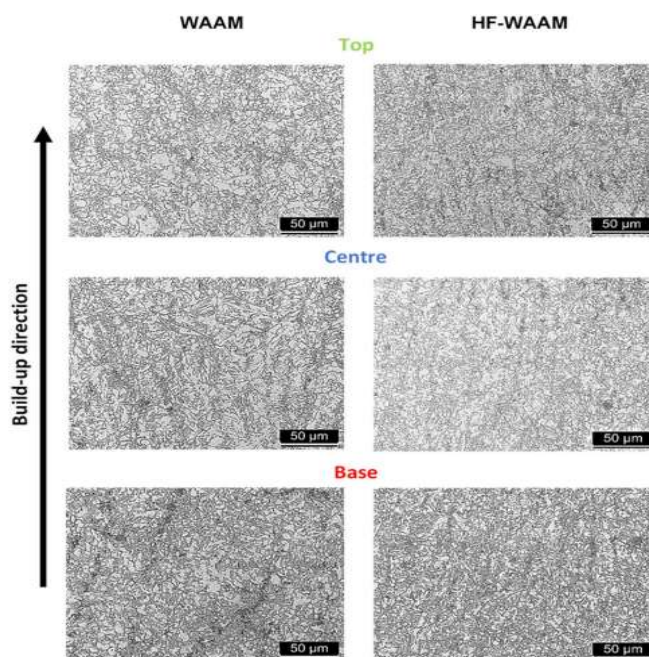


Figura 2.5 Microestrutura ao longo da direção de construção das amostras do WAAM e HF-WAAM [14]

2.4.2.1 Medição da Dureza

A dureza é uma propriedade importante no processo de maquinagem, visto que tem influência na qualidade e maquinabilidade, dificultando esta última.

A variante WAAM com forjamento a quente que tem o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas, como é o caso da dureza, sendo esperado que tenham níveis de durezas mais elevados. Estes resultados podem-se confirmar em ensaios de dureza Vickers [HV 0.5] realizados em amostras de WAAM e HF-WAAM que se encontram ilustrados na Figura 2.6, onde se verifica que a dureza das amostras de HF-WAAM apresentam valores no intervalo de 240-300 HV enquanto que as amostras de WAAM têm dureza a variar no intervalo de 220-260 HV [14]. Estes valores de dureza são por sua vez maiores que a dureza dos aços de baixo carbono, da ordem de 160-180 HV [14].

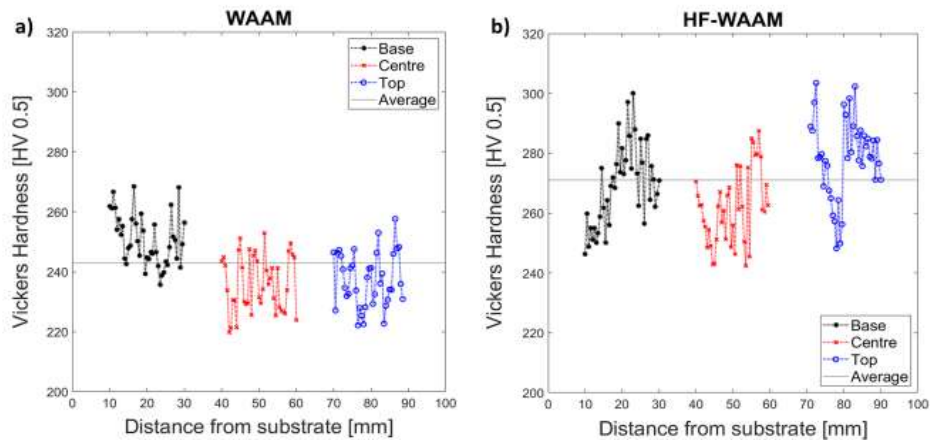


Figura 2.6 Variação da dureza ao longo das amostras: a) WAAM; b) HF-WAAM [14]

Analisando a distribuição de dureza ao longo da direção de deposição das camadas, em ambas as amostras a dureza diminui da base para o centro e aumenta do centro para o topo, estando de acordo a variação do tamanho de grão [14]. Este tem impacto direto nos níveis de dureza, pois quanto mais grãos se tem, maior será o número de limites de grão, sendo que estes atuam como uma barreira à propagação de defeitos. A maior dureza na amostra HF-WAAM é gerada pelos efeitos do forjamento a quente quando o material está na faixa de temperatura de trabalho a quente, promovendo o efeito de grão refinado no material [14]. Os efeitos do forjamento a quente revelaram grandes melhorias mecânicas quanto ao limite de cedência nas amostras de HF-WAAM em comparação com as do WAAM, como se pode verificar nos resultados ilustrados na Figura 2.7, dos ensaios de compressão uniaxial realizadas, a tensão de cedência das amostras de HF-WAAM é maior a do WAAM em todas as zonas das amostras.

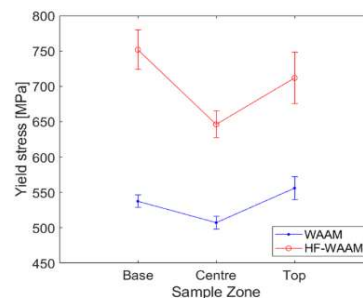


Figura 2.7 Ensaio de compressão uniaxial nas amostras de WAAM e HF-WAAM [14]

2.4.2.2 Medição da rugosidade

A rugosidade superficial após um processo de maquinagem é uma característica que na maioria das aplicações deseja-se que sejam de baixo níveis pois pode comprometer as tolerâncias geométricas.

Na Figura 2.8 são apresentados os resultados da rugosidade superficial para diferentes velocidades de corte, para os componentes de WAAM, HF-WAAM e aço isotrópico de baixo carbono. A maquinagem de componentes de aço HSLA fabricados por WAAM apresentam valores de rugosidade mais baixos em comparação com a maquinagem de aço de baixo carbono. Os valores médios de

rugosidade superficial foram menores na faixa de 5% a 90% para amostras WAAM e de 7% a 84% para amostras HF-WAAM [14]. Este é um resultado geral da menor deformação plástica que os materiais com maior dureza sustentam na superfície maquinada, comparativamente aos materiais mais macios [14]. Os níveis de rugosidade superficial mais uniformes foram alcançados ao maquinar com uma velocidade de corte mais alta, provavelmente devido aumento dos efeitos térmicos que reduz o material aderido na superfície de saída da ferramenta [14]. No entanto, os maiores valores de rugosidade superficial foram alcançados com maior espessura de apra não deformada, provavelmente devido às vibrações geradas pela maior quantidade de material removido [14].

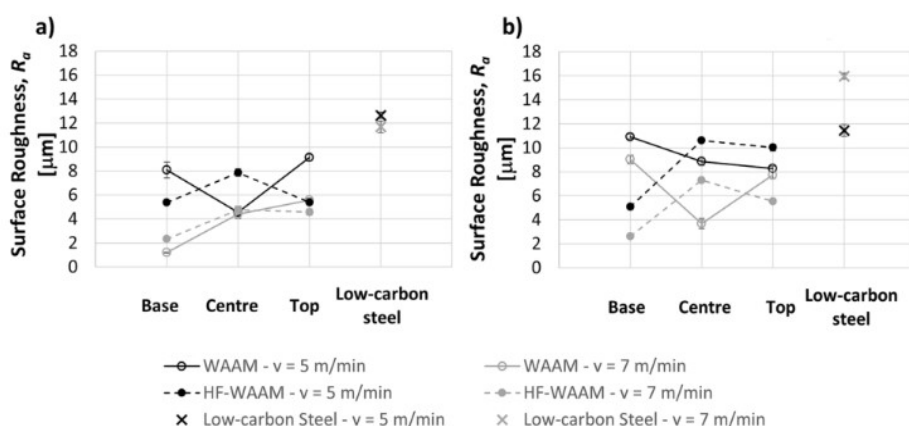


Figura 2.8 Níveis de rugosidade nas amostras de WAAM, HF-WAAM e aço de baixo carbono: a) UCT=0,3 mm; b) UCT=0,6 mm [14]

2.4.2.3 Análise das forças de corte

A análise das forças de corte é fundamental para avaliação da maquinagem de peças [10], [15][16]. A análise e previsão de forças de corte tem um papel importante no projeto de ferramentas de corte, na estimativa de desgaste de ferramentas, previsão de vibração, previsão de rugosidade superficial e por outra parte permite estimar a energia consumida durante o processo [16].

A influência da velocidade de corte e consequente espessura da apra não deformada, nas forças de corte para as amostras de WAAM, HF-WAAM e aço de baixo carbono, estão representadas na Figura 2.9. Não se verificou influência significativa da velocidade de corte nos resultados da força de corte, como esperado. Por outro lado, aumentando a espessura da apra não deformada, a força de corte aumenta, devido à maior quantidade de material removido durante o corte [14]. A força de corte tende a aumentar com o aumento da dureza, mas tal não se verificou necessariamente [14]. A força de corte tende a aumentar com o aumento da espessura da apra não deformada em todas as amostras.

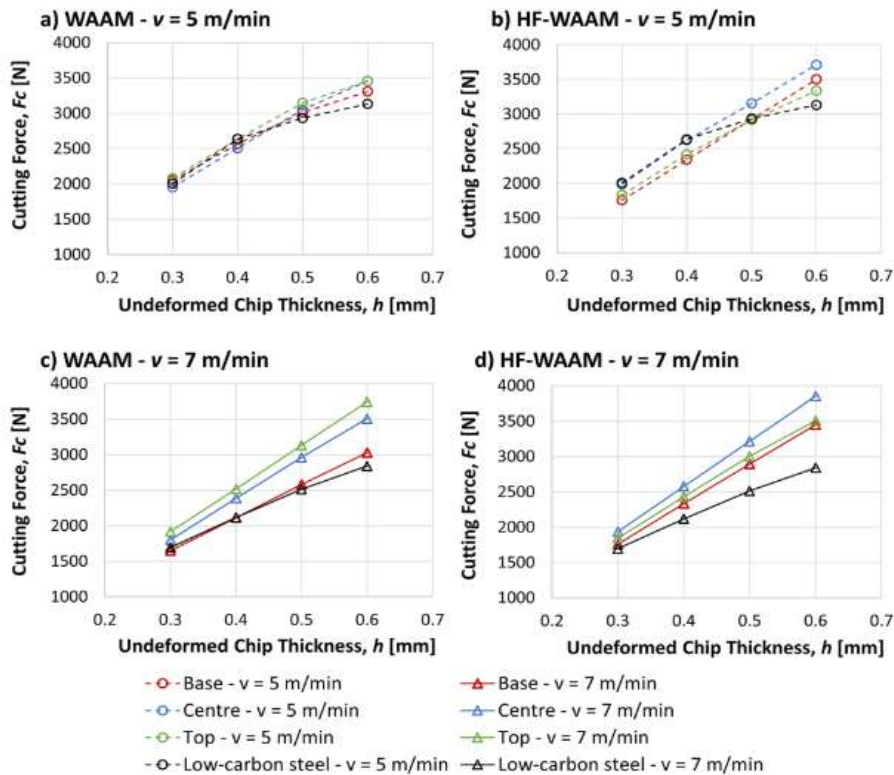


Figura 2.9 Resultados das forças de corte para as amostras de WAAM, HF-WAAM e aço de baixo carbono: a) WAAM ($v=5$ m/min); b) HF-WAAM ($v=5$ m/min); c) WAAM ($v=7$ m/min); d) HF- WAAM ($v=7$ m/min) [14]

2.4.2.4 Análise da apara

A Figura 2.10 representa as análises das imagens macroscópicas de três amostras (WAAM, HF-WAAM e aço de baixo carbono). O raio da curvatura tende a diminuir com o aumento do ângulo de corte e com a diminuição da UCT [14]. Por outro lado, aumentando o ângulo de corte reduz-se a temperatura na zona de corte primária, levando a um aumento do atrito, gerando menor curvatura na apara [14]. Segundo as medições do raio da apara apresentadas na Figura 2.10 e os resultados de ângulo de corte e atrito mostrados anteriormente, é possível confirmar que tais relações foram observadas para quase todas amostras, sendo mais evidentes na zona superior das mesmas [14]. É possível observar que todas as operações de corte geraram apara contínuas.

	Base		Centre		Top	
	$h = 0.3 \text{ mm}$	$h = 0.6 \text{ mm}$	$h = 0.3 \text{ mm}$	$h = 0.6 \text{ mm}$	$h = 0.3 \text{ mm}$	$h = 0.6 \text{ mm}$
WAAM r	 6.71 ± 0.23	 7.81 ± 0.21	 7.91 ± 0.21	 6.18 ± 0.80	 4.02 ± 0.30	 6.81 ± 0.36
HF-WAAM r	 3.56 ± 0.15	 6.31 ± 0.27	 3.27 ± 0.02	 5.22 ± 0.42	 3.15 ± 0.32	 3.26 ± 0.10
Low-carbon steel r	 5.56 ± 0.12	 6.12 ± 0.14	r – chip thickness radius [mm]			

Figura 2.10 Morfologia e raio das aparas para as amostras de WAAM, HF-WAAM e aço de baixo carbono (UCT= 0,3 mm e UCT= 0,6 mm) [14]

O CTR (*chip thickness ratio*) é utilizado para avaliar a eficiência do processo de formação da apara, através do grau de deformação plástica gerado durante a maquinagem [14]. Pretende-se obter valores elevados de CTR, pois são acompanhados de maiores ângulos de corte e, portanto, menores forças de corte, promovendo uma melhor operação de corte [14]. Da análise da Figura 2.11 observa-se que as amostras do WAAM apresentaram maior valor de CTR na zona central das amostras, com aplicação da maior velocidade de corte (7 m/min) e maior UCT de 0,6 mm. Seguindo as amostras de HF-WAAM, os valores de CTR tornam-se mais homogêneos, revelando uma operação de corte mais consistente.

Em comparação com WAAM, os valores de CTR das amostras HF-WAAM foram melhorados ao maquinar a base (até 38%) e a zona central (até 28%) [14].

O aço de baixo carbono apresenta valores de CTR mais elevados os seus valores não alteraram com mudanças de velocidade e de UCT. Tais resultados estão geralmente de acordo com as medições de força de corte e as propriedades mecânicas superiores observadas para o material fabricado aditivamente [14].

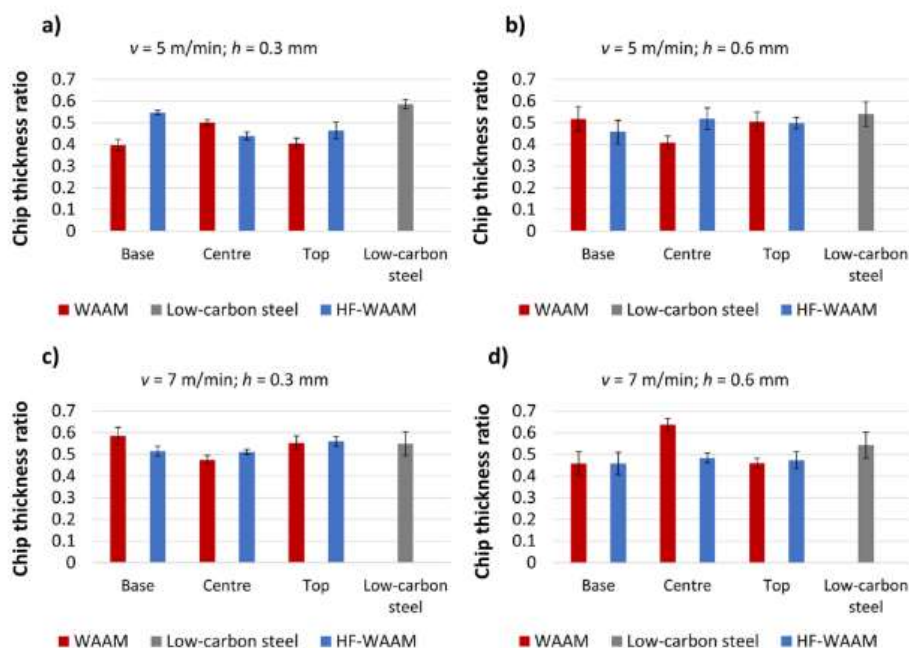


Figura 2.11 CTR das amostras de WAAM, HF-WAAM e aço de baixo carbono: a) $v=5 \text{ m/min}$ e $UCT=0,3 \text{ mm}$; b) $v=5 \text{ m/min}$ e $UCT=0,6 \text{ mm}$; c) $v=7 \text{ m/min}$ e $UCT=0,3 \text{ mm}$; d) $v=7 \text{ m/min}$ e $UCT=0,3 \text{ mm}$ [14]

As Figuras 2.12, 2.13 e 2.14 representam as imagens microscópicas das aparas geradas correspondentes à área da base de cada amostra (WAAM convencional, HF-WAAM e aço baixo carbono) ao cortar com UCT de 0,6 mm e velocidade de corte de 7 m/min.

A partir da Figura 2.12, em relação à apara originada do teste de corte WAAM, é possível identificar as zonas de corte primárias e secundárias. A zona de corte primária resulta das forças compressivas da ferramenta durante a penetração da ferramenta na amostra, representada por um efeito alongado nos grãos do material [14]. A zona de corte secundária forma-se entre a superfície de corte da ferramenta e a apara onde os efeitos de atrito levam a uma deformação plástica adicional, escoando o material numa direção paralela à superfície de corte da ferramenta. Durante a operação de corte, a dureza da amostra atua como uma força oposta à ferramenta [14].

Com isto como lado adjacente à ferramenta é liso, um perfil tipo dente de serra é gerado no lado oposto da apara, provavelmente devido a efeitos térmicos e à distribuição desigual de tensões durante a operação de corte (Figura 2.12 a) [14]. Observando o serrilhado em detalhe, é possível visualizar a deformação plástica quando submetido às forças compressivas no plano de corte, descrevendo uma forma de vórtice (Figura 2.12 b) [14].

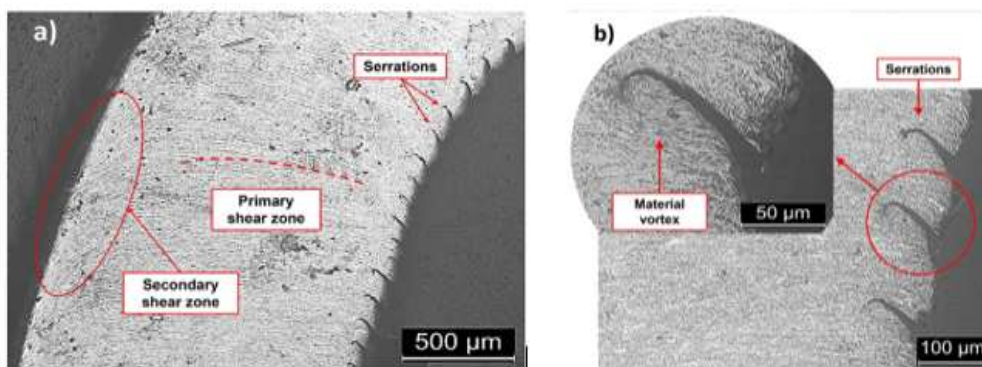


Figura 2.12 Identificação das zonas primárias e secundárias de corte (WAAM): a) identificação do serrilhado; b) detalhe da deformação plástica que descreve uma forma de vórtice [14]

A Figura 2.13 ilustra a apara originada da amostra HF-WAAM, onde é possível identificar zonas de cortes mais densas e lineares, devido ao efeito de grão refinado. As propriedades mecânicas desta amostras podem ter tido um impacto nas serrilhas criadas [14].

Como ilustrado na Figura 2.14, em relação às aparas geradas a partir de amostras de aço baixo carbono, também podem ser identificadas a presença de grãos maiores e, conseqüentemente, um deslocamento paralelo dos planos de corte, originado durante o processo de formação das aparas [14]. Também é possível observar o comportamento do material quando submetido à deformação por corte [14]. Comparando com as amostras da MA, é possível observar serrilhados maiores e desiguais nas aparas isotrópicas de aço baixo carbono, pois não se verifica o fenómeno de grão refinado nestas amostras [14].

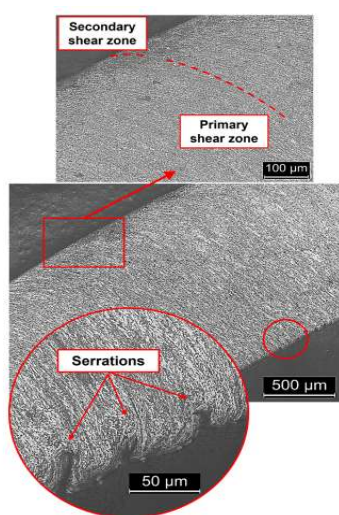


Figura 2.13 Identificação das zonas primárias e secundárias de corte (HF- WAAM) [14]

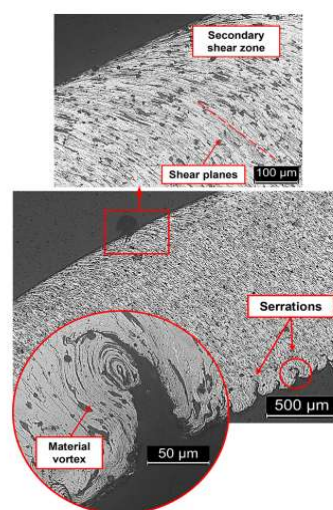


Figura 2.14 Identificação das zonas primárias e secundárias de corte (aço de baixo carbono) [14]

2.5 Síntese do Capítulo

No capítulo 2 deste documento apresentaram-se os fundamentos de corte ortogonal e a utilidade das simplificações que trazem para o estudo dos processos de corte convencional. Apresentaram-se ainda estudos realizados na aplicação de corte ortogonal realizadas em amostras de WAAM, da sua variante inovadora HF-WAAM e aço de baixo carbono. Este capítulo, em resumo, apresenta o estado da arte para o tema da dissertação. Com este trabalho vai-se acrescentar ao estado da arte o conhecimento do comportamento em corte ortogonal de componentes produzidas por diferentes técnicas de *Wire and Arc Additive Manufacturing* sujeitos a tratamento térmico.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é relatado de todo o procedimento experimental e todo o equipamento e tecnologias utilizadas para o desenvolvimento deste estudo. A primeira etapa foi a produção das amostras através do processo WAAM e da sua variante inovadora, HF-WAAM., é feita um relato do tratamento térmico feito. Após a finalização da produção e o tratamento térmico é descrita a preparação das amostras e tecnologia utilizada para medição de durezas e fazer uma análise microestrutural, que consiste nas etapas de corte, desbaste, polimento e ataque químico. Por fim é feita a descrição dos ensaios de corte ortogonal e as estratégias e tecnologias usadas para aquisição de forças de corte e para análise das deformações. Por fim são descritas as estratégias utilizadas para estimar as energias específicas de corte, os coeficientes de atrito, os ângulos de corte e as tensões de corte.

3.1 Produção das Amostras

Para produção das amostras utilizou-se o equipamento WAAM-GMAW (MIG) do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI), ilustrado na Figura 3.1, uma mesa com três eixos, com capacidade de produção num volume de $2760 \times 1960 \times 2000 \text{ mm}^3$ [17].

Produziram-se 4 paredes (duas amostras de HF-WAAM e duas de WAAM convencional) de 180 mm de comprimento e 100 mm de altura. Em Anexo 1 encontra-se o Código-G, que permite a produção semiautomático das paredes, com a necessidade dar o início ao programa após a deposição de cada duas camadas. Para evitar a elevada concentração de calor, que pode levar a distorção das camadas e ondulação nas amostras, então após a deposição deixou-se arrefecer a camada até aos 200°C [18], esperando 90 segundos é suficiente para que seja atingida essa temperatura. O Código-G está escrito de modo que é feita a deposição de duas camadas com um tempo de espera de 90 segundos entre a deposição das camadas, depois que a tocha volta a posição inicial é necessário controlar a temperatura até atingir os 200°C e iniciar o programa e assim sucessivamente até obter a altura desejada da parede.



Figura 3.1 Equipamento de WAAM

Os parâmetros de WAAM para a produção das paredes estão apresentadas na Tabela 3.1. Utilizou-se a estratégia de deposição *zig-zag* e com uma altura de camada de 2 mm. Foi necessário cortar substratos com as dimensões $260 \times 60 \times 8$ mm, é importante que as dimensões dos quatro substratos sejam da mesma dimensão para garantir a mesma taxa de calor dissipado através dos substratos em todas as paredes a produzidas.

Tabela 3.1 Parâmetros WAAM utilizados

Amostra	Corrente Elétrica [A]	Tensão Elétrica [V]	Velocidade de avanço [mm/s]	Velocidade Alimentação do fio [m/min]	Entrega Térmica [J/mm]	Frequência de Forjamento [Hz]
WAAM Convencional	95	21	6	3.9	221	0
HF-WAAM						8

Utilizou-se o fio metálico de HSLA (EN ISO 16834-A G 69 4 M Mn3Ni1CrM) de 1 mm da LINCOLN ELECTRIC, cuja composição química está apresentada na Tabela 3.2. Para a proteção do banho de fusão utilizou um caudal de 12 l/min do gás de proteção ARCAL™ Speed da Air Liquide, que

é composto por uma mistura de Árgon com dióxido de carbono na Tabela 3.3 é apresentada a sua composição.

Tabela 3.2 Composição química do fio metálico de HSLA (W%)

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu
0.08	1.70	0.44	1.35	0.23	0.30	0.08	0.25

Tabela 3.3 Composição química do gás de proteção

Ar	CO ₂
0.92	0.08

Na Figura 3.2 ilustra-se o andamento do processo, em que a Figura 3.2 a) representa uma fase inicial após a deposição de 5 camadas, a tocha está na posição de espera, e só depois de 90 segundos vai se iniciar a deposição da outra camada. A Figura 3.2 b) a parede está numa fase avançada com 70% da amostra feita, a tocha encontra-se na posição que é preciso o operador controlar a temperatura e iniciar o programa para a deposição das próximas duas camadas automaticamente. a Figura 3.2 c) representa a parede concluída com os 100 mm de altura pretendida.

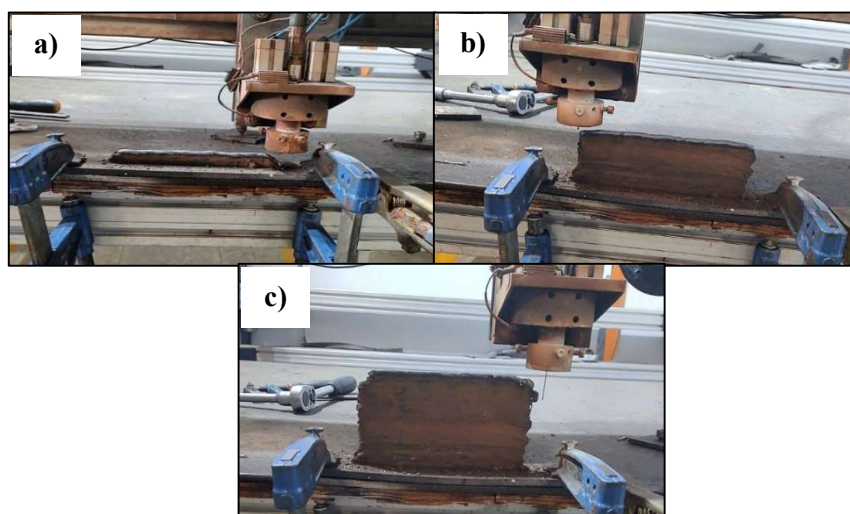


Figura 3.2 Andamento do processo de construção da parede: a) fase inicial, após a deposição de 5 camadas; b) fase em que 70% da parede está feita; c) parede concluída

Comparando as paredes de WAAM convencional, Figura 3.3, com as de HF-WAAM, Figura 3.4 pode -se observar a existência de uma maior quantidade de salpicos, tal como pode ser observado nos substratos, e de irregularidades na parede de HF-WAAM.



Figura 3.3 Amostra de WAAM convencional



Figura 3.4 Amostra de HF-WAAM

Na figura 3.5 é possível identificar a diferença das paredes forjada da não forjada. A parede que não foi forjada, WAAM convencional, ilustra-se na Figura 3.5 a). A parede produzida por HF-WAAM, apresenta uma camada plana devido ao efeito do forjamento durante a deposição da camada como pode ser observado na Figura 3.5 b).



Figura 3.5 Diferença das superfícies das camadas de WAAM convencional e de HF-WAAM: a) superfície da camada de WAAM convencional; b) superfície da camada de HF-WAAM

3.2 Tratamento Térmico

Fez-se o tratamento térmico de uma amostra de HF-WAAM e uma amostra de WAAM convencional, foi utilizado o forno BTHERM, como objetivo de comparar o comportamento ao corte ortogonal das amostras sujeitas a tratamento térmico com as amostras que não passaram por este processo. O tratamento térmico tem como principal objetivo aumentar a resistência e a tenacidade dos componentes, mas este processo é acompanhado por aparecimento de tensões residuais e distorção geométrica [19].

Para realização do tratamento térmico das amostras definiu-se os parâmetros apresentados na Tabela 3.4. Ambas as amostras foram coladas ao mesmo tempo no forno.

Tabela 3.4 Parâmetros do Tratamento Térmico

Temperatura [°C]	900
Tempo [s]	3600

Após o tratamento térmico deixou-se as amostras a arrefecer ao ar livre, a Figura 3.6 apresenta a amostra de WAAM convencional após a ter terminado o tratamento térmico e na Figura 3.7 ilustra-se a amostra de HF-WAAM após o tratamento térmico, é visível que amostra de HF-WAAM apresenta um elevado nível de salpicos quando comparadas com amostra de WAAM convencional.

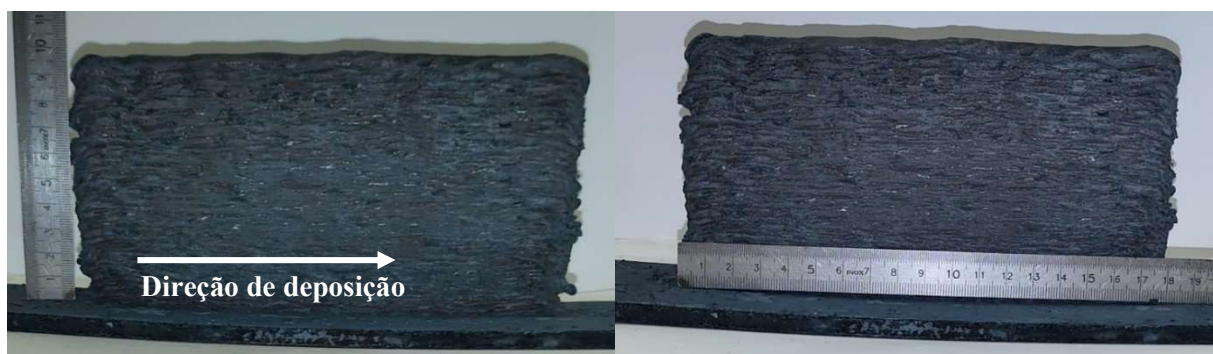


Figura 3.6 Amostra WAAM convencional após tratamento térmico



Figura 3.7 Amostra HF-WAAM após tratamento térmico

3.3 Caracterização das Amostras

Para a preparação das amostras para a caracterização das mesmas seguiu-se o guia da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) [20], em que as etapas são o corte das amostras, embutimento das mesmas, que consiste em envolvê-las em resina, processos de desbaste, polimento e por fim um ataque químico. Depois das amostras estarem prontas realizou-se a inspeção da microestrutura com o auxílio de um microscópio e foi feito a medição da dureza ao longo da superfície.

3.3.1 Preparação das Amostras

Para a caracterização e o estudo ao comportamento ao corte ortogonal das paredes as amostras foram cortadas em três zonas distintas da amostra (base, centro e topo) como ilustrado na Figura 3.8, a zona limitada a vermelha ficou reservado para o estudo do corte ortogonal e o resto foi aproveitado para caracterização das amostras nas zonas de interesse.

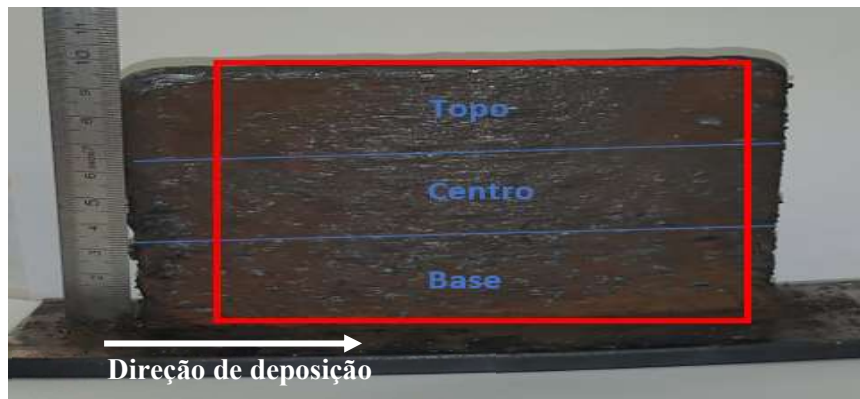


Figura 3.8 Divisão das amostras em zonas para estudo

Após cortar as amostras usando a serra de fita GBS 218 GH da IMET SPA, procedeu-se ao processo de embutimento a frio. O embutimento foi feito utilizando uma mistura de resina, EpoxiCure da BUEHLER, e catalisado de endurecimento, EpoxiCure da BUEHLER, numa relação de 4 de resina para 1 de catalisador.

No total são 12 amostras, que resultam de 4 paredes (WAAM convencional, WAAM convencional com tratamento térmico, HF-WAAM e HF-WAAM com tratamento térmico) cada uma com três zonas de interesse de estudo (base, centro e topo). As 12 amostras, cuja mistura se deixou a endurecer 24 horas, estão ilustradas na Figura 3.9 a). A Figura 3.9 b) representa as 12 amostras após o processo ser finalizado.



Figura 3.9 Processo de embutimento das amostras: a) embutimento das amostras; b) amostras após embutidas

As amostras passaram por uma etapa de desbaste, que tem como o objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície, utilizou-se polidor automático BUEHLER AutoMet 250 ilustrado na Figura 3.10, cujo parâmetros do processo utilizados estão apresentados na Tabela 3-5. Realizaram-se sucessivos desbastes com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) sucessivamente até desaparecerem os traços da lixa anterior, a sequência foi (P80, P320, P400, P600, P1200, P2500), em que P80 é a lixa de granulado maior e P2500 é o de menor granulado. O objetivo de passar por uma sequência de várias lixas e não lixar apenas com a lixa P2500 é o facto de lixar com apenas com a lixa P2500 tornaria o processo menos eficiente e ter o acabamento pretendido seria mais difícil.



Figura 3.10 Polidor automático

Tabela 3.5 Parâmetros de desbaste e polimento

Tempo [s]	90
Velocidade Angular da base [rot/min]	350
Velocidade Angular pinos [rot/min]	60
Força dos pinos nas amostras [N]	10

Na Figura 3.11 apresenta-se superfície das amostras: a Figura 3.11 a) antes de ser lixada, Figura 3.11 b) depois de passar pelas lixas P320, Figura 3.11 c) depois de ser lixada com P600, Figura 3.11 d) depois de ser lixada com a lixa P2500. Observou elevado nível de porosidade nas amostras WAAM convencional, por outro lado as amostra de HF-WAAM verificou-se que efeito do forjamento teve influência na porosidade, reduzindo estas de uma forma significativa, mesmos resultados obtidos na literatura [17].

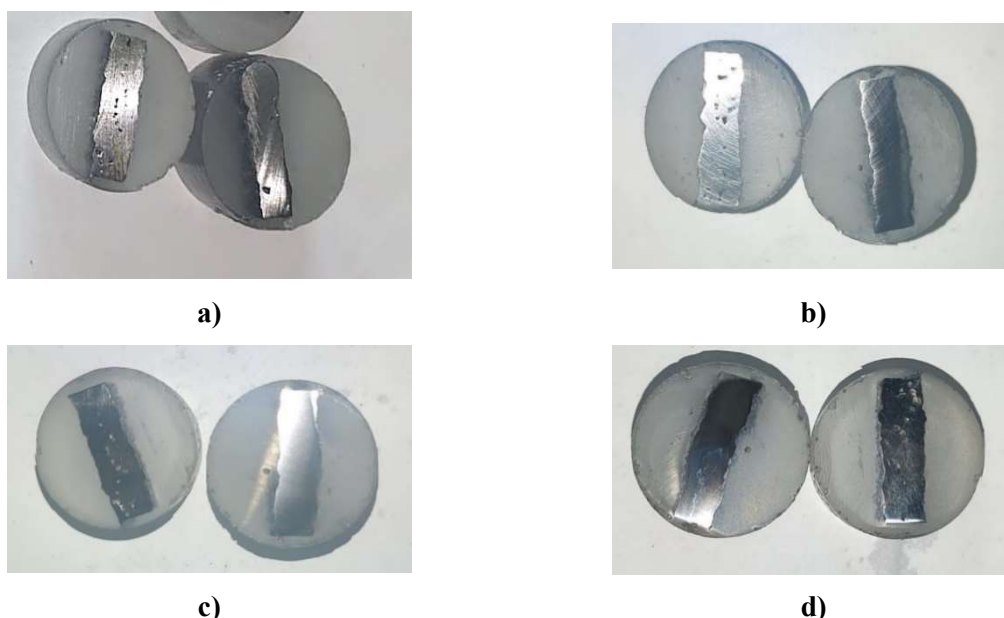


Figura 3.11 Superfície das amostras: a) antes de lixar; b) depois de P320; c) depois de P600; d) depois de P2500

Após a sequência de desbastes procedeu-se ao polimento, Figura 3.12, que tem como objetivo a remoção dos riscos resultantes do desbaste promovendo assim a um acabamento espelhado [21], utilizou-se a pasta de diamante de 1 μm ilustrada na Figura 3.12 a), antes de realizar o polimento fez-se uma limpeza na superfície a polir, de modo a deixá-la completamente limpa. Na Figura 3.12 b) ilustra-se a superfície após ser polida.



a)



b)

Figura 3.12 Polimento: a) pasta de diamante; b) Superfície das amostras após depois de polida

Procedeu-se ao ataque químico das amostras utilizando uma solução de ácido nítrico com etanol (nital), cujo 3% da mistura é ácido nítrico, utilizado na literatura [22], as superfícies polidas das amostras foram imersas na mistura durante 3 segundos e depois a amostra foi limpa imediatamente em água e secada com ar comprimido. Esta etapa permite que os contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura possam ser reveladas no microscópio [21], ou seja, cria um contraste.

3.3.2 Análise Microestrutural

Para fazer uma análise microestrutural das 12 amostra, utilizou-se o microscópio Leica DMI5000 do CINEMAT, todas as amostras foram analisadas em 5 escalas diferentes (500 μm , 200 μm , 100 μm , 50 μm e 20 μm). Esta análise permite observar as microestruturas e as fases presentes em cada amostra e as diferenças microestruturais entre as diferentes paredes (WAAM, HF-WAAM, WAAM com tratamento térmico e HF-WAAM com tratamento térmico) e verificar como a microestrutura e as fases variam nas três zonas de interesse (base, centro e topo).

3.3.3 Análise da Dureza

Para obter a variação da dureza longo da altura das paredes (base, centro e topo) recorreu-se ao teste microdureza Vickers, que consiste aplicar uma carga estática com um indentedor em forma de diamante, Figura 3.13, na amostra que se pretende medir a dureza. O valor da dureza Vickers, por sua vez é obtida pela relação da carga aplicada, P [N], com a média das diagonais da indentação, d [mm], através da equação 3.1 [23]. A máquina utilizada é da marca MITUTOYO.

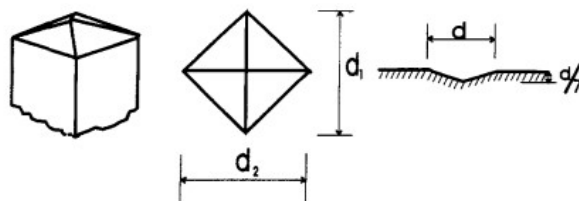


Figura 3.13 Indentador e marca da indentação de teste de microdureza Vickers [23]

$$H_v = 1,8544 \frac{P}{d^2} \quad (3.1)$$

Os parâmetros utilizados para a medição das durezas estão representados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 Parâmetros de medição de durezas

Parâmetros	Valor
Carga [kg]	0.5
Distância entre indentações consecutivas [mm]	1
Duração da aplicação da carga [s]	10

3.4 Corte Ortogonal das Amostras

3.4.1 Preparação dos provetes

Com objetivo de estudar o comportamento do material ao corte ortogonal, utilizando a serra de fita dividiu-se amostras em três amostras de 50 mm com o objetivo de fazer vários testes de corte ortogonal com diferentes valores de parâmetros de corte. Por sua vez, cada amostra de 50 mm foi dividida nas três zonas de interesse a estudar (base, centro e topo) como ilustrado na Figura 3.14.

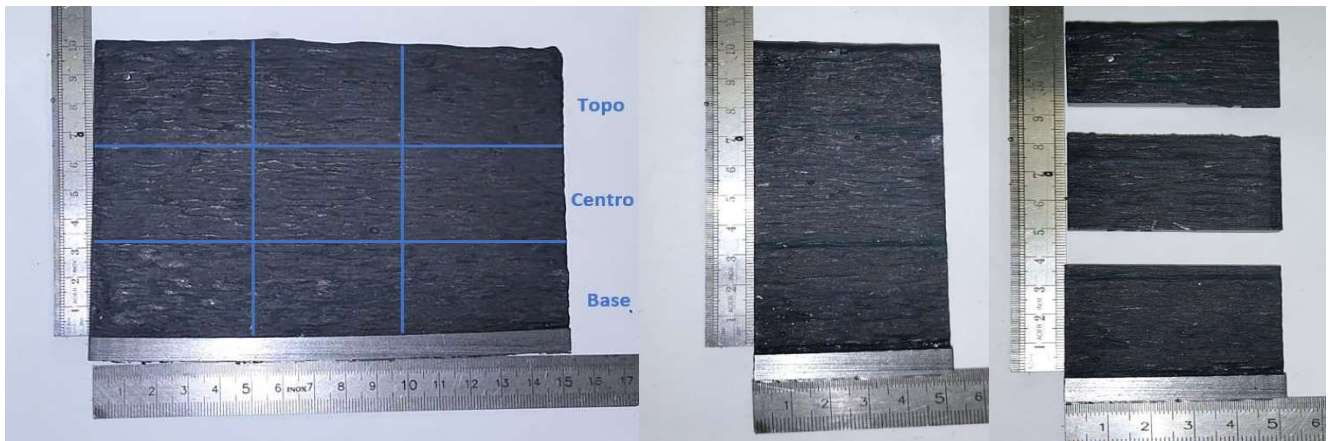
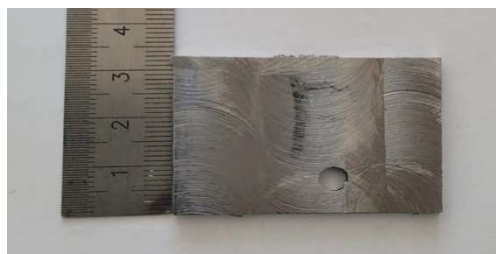


Figura 3.14 Divisão das paredes

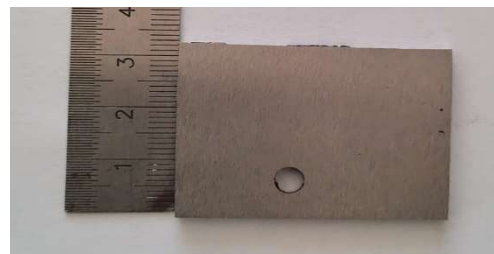
Foi feito um furo de 6 mm em cada amostra, útil para assegurar afixação das amostras durante o corte ortogonal, para a realização desta operação foi utilizada uma broca de 6 mm.

As 36 amostras passaram depois por um processo de fresagem para garantir uma espessura de 3 mm em todas elas e eliminar alguma irregularidade nas superfícies, em que se utilizou a fresadora Henrique Holke F-1010.

Para garantir uma superfície mais homogênea, eliminando completamente as irregularidades, as amostras foram ainda retificadas usando uma retificadora Sunlike Machinery. Na Figura 3.15 está ilustrado o acabamento superficial das amostras, após a fresagem das mesmas, Figura 3.15 a), e na Figura 3.15 b) depois de retificadas.



a)



b)

Figura 3.15 Acabamento superficial das amostras: a) após a fresagem; b) após retificadas

3.4.2 Ferramenta de corte

Para analisar o comportamento das amostras ao corte ortogonal utilizou-se a máquina-ferramenta ALBA TYPE-2S, que se encontra no laboratório do DEMI, representado na Figura 3.16, que tem característica ideal para realização deste tipo de corte, pois utiliza movimento relativo linear entre a peça e uma ferramenta de corte com um gume de corte.



Figura 3.16 Máquina-Ferramenta para Corte Ortogonal

O gume de corte foi obtido com uma barra de Aço de ferramenta (HSS) com as dimensões 10×10×100 mm ilustrado na Figura 3.17 e com as especificações do gume como ilustrado na Figura 3.18.

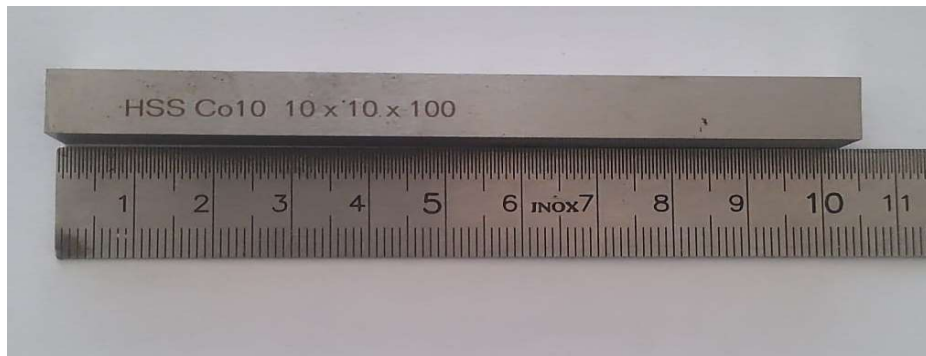


Figura 3.17 barra de aço HSS para obter o gume de corte

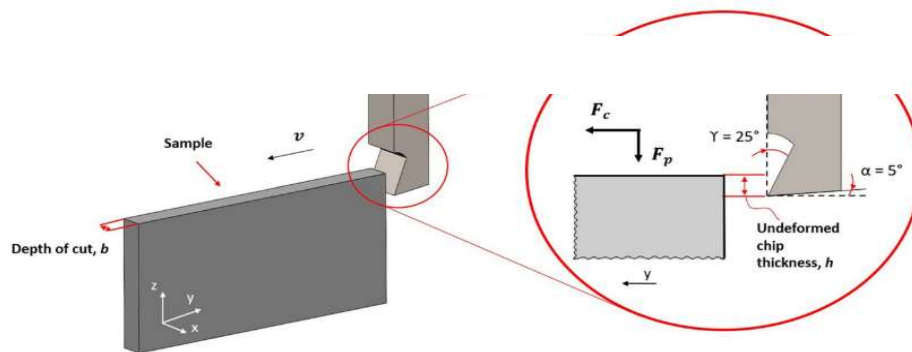


Figura 3.18 Especificação do gume de corte [14]

Na figura 3.19 ilustra-se a técnica utilizada para obter o gume de corte com o ângulo de ataque de 25° e ângulo de saída de 5° utilizou-se a prensa angular apresentada na Figura 3.19 a), que permite com a retificadora afiar o gume de corte com os ângulos pretendidos, na Figura 3.19 b) está ilustrado o gume de corte com as especificações desejadas.



a)



b)

Figura 3.19 Técnica para afiar o gume de corte: a) prensa angular; b) gume de corte com os ângulos pretendidos

3.4.3 Câmara de alta velocidade e Correlação Digital de Imagens

Uma câmara de alta velocidade permite observar o processo de corte e o mecanismo da formação da apara, que tem a capacidade de capturar todo o processo de corte como mostra a Figura 3.20.

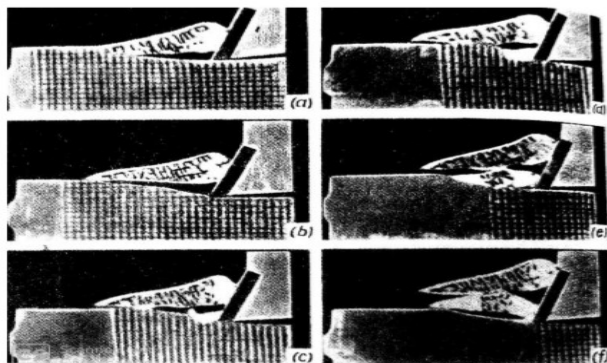


Figura 3.20 Fotografias do mecanismo de formação da apara obtidas com câmara de alta velocidade [24]

Foi também utilizado a tecnologia de correlação digital de imagens (DIC), uma tecnologia ótica inovadora que é utilizado para medir deformações, tensões, deflexões de estruturas e distorções, bem como para análise de propagação de fissuras e análise dinâmica de vibrações [25]. Esta tecnologia baseia-se na comparação de fotografias digitais de diferentes estágios do fenómeno em estudo, através do rastreamento de blocos de pixels esta técnica mede o deslocamento das superfícies e cria campos de deformações 2D e 3D e mapas de deformações [25][26]. Para que o DIC funcione de maneira eficaz, os blocos de pixels precisam ser aleatórios e únicos com uma variedade de níveis de contraste e intensidade [25].

Neste trabalho com objetivo de medir deformações, utilizou-se a técnica de DIC 2D, que tem a limitação de ser apenas aplicadas em amostras com uma superfície plana e com uma distribuição aleatória de intensidade cinza [27], logo pintou-se as amostras com tinta branca e preta como sugerido em [27], A Figura 3.21 ilustra as amostras pintadas com tintas acrílicas base mate em spray, com uma tinta branca como ilustrado na Figura 3.21 a) e de seguida para obter a intensidade cinza ilustrado na Figura 3.21 b) foi aplicada uma tinta preta.



a)



b)

Figura 3.21 Pintura das amostras: a) depois de pintadas de branco; b) contraste cinzento após pintar com preto

As etapas da implementação do método DIC 2D são as seguintes: preparação experimental das amostras, gravação das imagens durante o processo em estudo e por fim processamento das imagens adquiridas usando um programa de computador obtendo assim as informações de deslocamento e deformação desejadas [27]. Teve-se em conta um conjunto de recomendações, dicas e cuidados a ter na implementação desta tecnologia, que se encontram em [26].

A configuração experimental de DIC 2D, utiliza-se uma câmara CCD fixa, uma câmara de alta velocidade, necessária para gravar as imagens digitais da superfície da amostra durante as experiências também se utilizaram duas fontes de luz para iluminação e um computador com um software para processamento das imagens [27]. A câmara deve ser colocada com seu eixo ótico normal à superfície da amostra como representa a Figura 3.22, e a superfície da amostra deve manter-se no mesmo plano paralelo ao longo do ensaio [27].

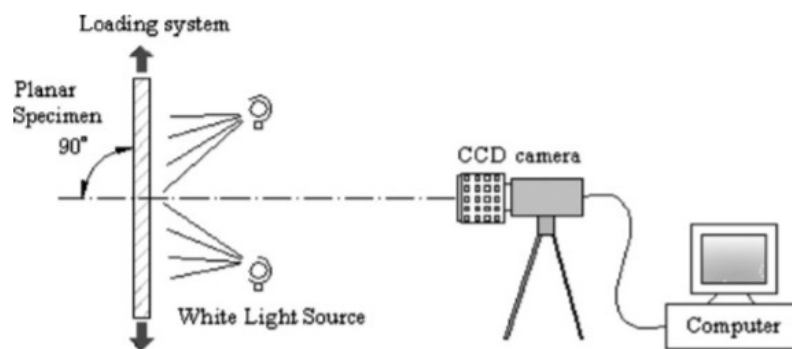


Figura 3.22 Configuração experimental de DIC 2D [27]

O movimento fora do plano da amostra deve ser evitado, pois esta produz ainda mais deslocamentos no plano levando a resultados indesejados. Para minimizar o efeito do movimento fora do plano a câmara foi colocada longe da amostra para se aproximar de um sistema de imagem telecêntrico [27]. O sistema de imagem não deve sofrer distorção geométrica, para remover o efeito das distorções na precisão das medidas pode-se recorrer às técnicas de correção de distorção referidas em [28][29][30][31][32][33][34].

Utilizou-se a câmara de alta velocidade, FASTCAM Mini AX50 da Photrom, equipada com a lente Nikon AF NIKKOR 200 mm. Para uma correta luminosidade, as capturas de vídeos foram realizadas com dois holofotes LED de 100 W da V-TAC, como ilustrado na Figura 3.23. Os vídeos foram gravados com a câmara a uma distância de 300 mm da amostra utilizando um *frame rate* de 2000 fps com uma resolução de 1536 × 768 pixels a uma velocidade de obturação de $\frac{1}{5000}$ s.

Para o processamento dos vídeos, com o objetivo de obter os campos das deformações, utilizou-se o software MatchID 2D 2023 versão 2.0, utilizando as configurações de processamento apresentadas na tabela 3.7.

Tabela 3.7 Configurações de processamento para DIC

Subset size	13
Step size	5
critério de correlação	<i>Zero-Normalized Cross-Correlation (ZNCC)</i>
Shape Function Assignment All ROI	opção <i>Affine</i>

Para o pós-processamento escolheu-se a opção *Automatic Stain Calculation* com os parâmetros: *Strain Window* = 5, *Point Tolerance* = 0%. Utilizou-se ainda o Tensor *Green-Lagrange* e a *Interpolation Bilinear Quadrilateral (Q4)*.



Figura 3.23 Configuração da câmara auxiliada com os holofotes

3.4.4 Aparato experimental

O aparato experimental está apresentado na Figura 3.24. Este é semelhante ao utilizado por Pedro Fonseca [14], para a aquisição das forças de corte durante os ensaios utilizou-se um dinamômetro Kistler 9257B e um amplificador de sinal Kistler LabAmp [14] .

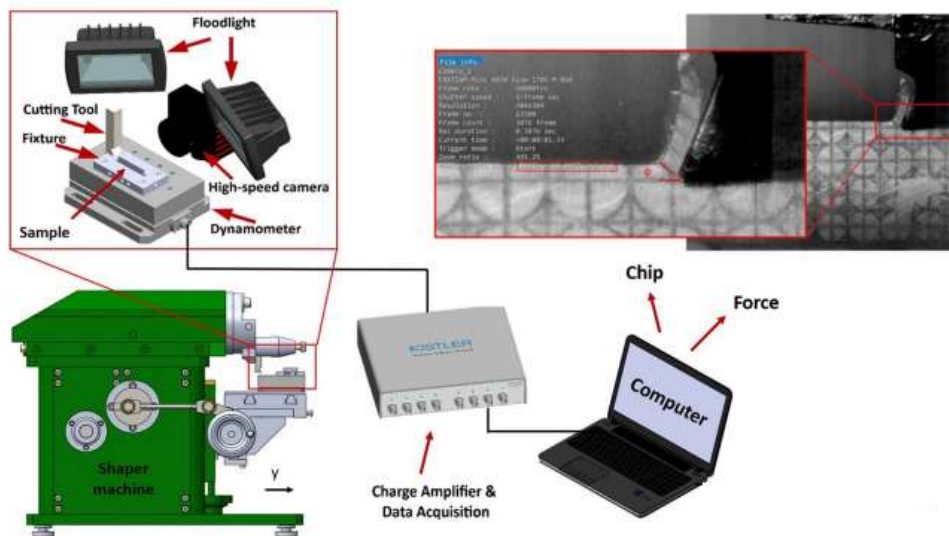


Figura 3.24 Aparato experimental do corte ortogonal adaptado de [14]

Houve uma necessidade de fazer uma peça para a fixação das amostras durante o corte ortogonal, partindo do bloco maciço de aço de 110×65×25 mm. As roscas da peça de fixação foram feitas com caçonete. Para garantir uma melhor fixação das amostras durante o ensaio foi feita um rasgo com uma maior profundidade quando comparadas a profundidade do rasgo da peça de fixação utilizada por Pedro Fonseca além disso foi feita um furo de 6 mm nas amostras e na peça de fixação, que permite uma ligação com um pino que atravessa a amostra de um lado para o outro como é possível observar na Figura 3.25, as amostras são fixadas ainda através de 6 parafusos M8, que não atravessam as amostras.

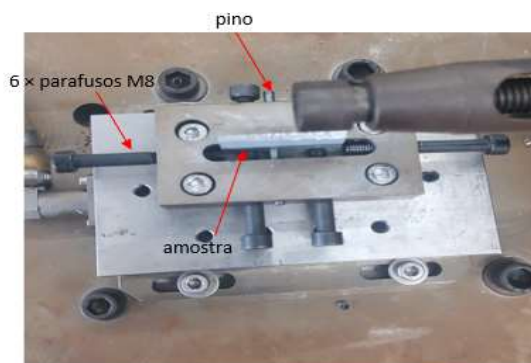


Figura 3.25 Amostra encastrada na peça de fixação

3.4.5 Ensaios de corte ortogonal

Os parâmetros em que foram realizados os experimentos de corte ortogonal estão apresentados na Tabela 3.8. Todas as paredes apresentam uma espessura de 3 mm e os ensaios foram realizados sem lubrificação.

Tabela 3.8 Parâmetros de corte utilizados

Parâmetros	Valores utilizados	
Velocidade de corte [m/min]	5	7
Espessura da Apra Não Deformada [mm]	0.3	0.6

Cada amostra passa por todas as combinações de velocidade e espessura da apra não deformada definida, que são quatro combinações para cada zona de cada parede. Na Tabela 3.9 estão representados os ensaios realizados nas amostras de WAAM e HF-WAAM sem tratamento térmico (ensaio 1 a 24) e com tratamento térmico (ensaio 25 a 48), um total de 48 ensaios, em que v_c representa a velocidade de corte e t_0 a espessura da apra não deformada.

As componentes de força de corte, F_c [N], e a força de avanço, F_t [N], ilustrados na Figura 3.26, foram adquiridas pelo sistema de aquisição de forças formada por um dinamômetro Kistler 9257B, um amplificador de sinal Kistler LabAmp e um computador com software KISTLER, que permite obter as forças nas direções x, y e z. O dinamômetro faz a aquisição das forças que são posteriormente processadas pelo amplificador e o software da Kistler retorna como saída um arquivo .csv, que contém as medições das forças de corte em cada ensaio. A aquisição foi realizada com uma frequência de amostragem de 10 kHz.

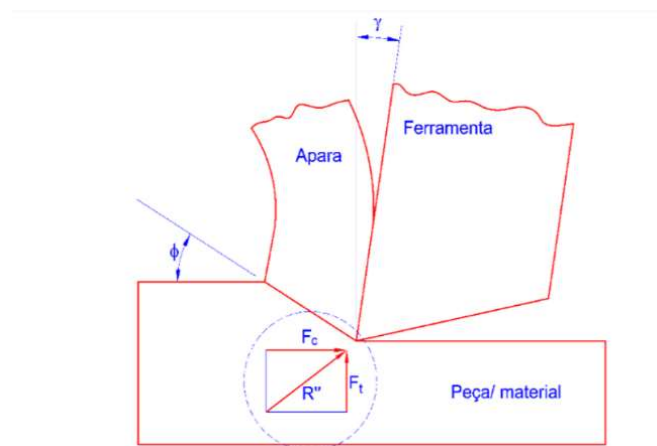


Figura 3.26 Forças de corte que atuam na ferramenta [12]

Tabela 3.9 Planeamento dos ensaios de WAAM e HF-WAAM

Ensaio	v_c [m/min]	t₀ [mm]	Zona	Parede
# 1 e # 25	5	0.3	Base	WAAM
# 2 e # 26	5	0.6	Base	WAAM
# 3 e # 27	7	0.3	Base	WAAM
# 4 e # 28	7	0.6	Base	WAAM
# 5 e # 29	5	0.3	Centro	WAAM
# 6 e # 30	5	0.6	Centro	WAAM
# 7 e # 31	7	0.3	Centro	WAAM
# 8 e # 32	7	0.6	Centro	WAAM
# 9 e # 33	5	0.3	Topo	WAAM
# 10 e # 34	5	0.6	Topo	WAAM
# 11 e # 35	7	0.3	Topo	WAAM
# 12 e # 36	7	0.6	Topo	WAAM
# 13 e # 37	5	0.3	Base	HF-WAAM
# 14 e # 38	5	0.6	Base	HF-WAAM
# 15 e # 39	7	0.3	Base	HF-WAAM
# 16 e # 40	7	0.6	Base	HF-WAAM
# 17 e # 41	5	0.3	Centro	HF-WAAM
# 18 e # 42	5	0.6	Centro	HF-WAAM
# 19 e # 43	7	0.3	Centro	HF-WAAM
# 20 e # 44	7	0.6	Centro	HF-WAAM
# 21 e # 45	5	0.3	Topo	HF-WAAM
# 22 e # 46	5	0.6	Topo	HF-WAAM
# 23 e # 47	7	0.3	Topo	HF-WAAM
# 24 e # 48	7	0.6	Topo	HF-WAAM

O coeficiente de atrito, μ , que é obtido pela equação 3.2, depende do ângulo de ataque, γ [°], da força de corte, F_c [N], e da força de avanço, F_t [N]. Da equação 3.2 também é obtido o do ângulo de atrito, β [°].

$$\mu = \frac{F_t + F_c \operatorname{tg}(\gamma)}{F_c - F_t \operatorname{tg}(\gamma)} = \operatorname{tg}(\beta) \quad (3.2)$$

O ângulo de corte, ϕ [°], foi calculado usando dois modelos teóricos, o Princípio da Energia Mínima (MEP) da autoria de Ernst e Merchant, e o Princípio da Tensão de Corte Máxima (MSSP) da

autoria de Lee e Shaffer, cujas equações são 3.3 e 3.4 respetivamente, pode se verificar que segundo estes princípios o ângulo de corte varia apenas com ângulo de atrito, β [°] e ângulo de ataque, γ [°].

$$\phi^{MEP} = \frac{\pi}{4} - \frac{(\beta - \gamma)}{2} \quad (3.3)$$

$$\phi^{MSSP} = \frac{\pi}{4} - (\beta - \gamma) \quad (3.4)$$

As tensões de corte, τ_s [MPa], foram calculadas utilizando a equação 3.5, que varia com a força de corte, F_c [N], força de avanço, F_t [N], com ângulo de corte, ϕ [°], e é inversamente proporcional a largura de corte, b [mm], e a espessura da apara não deformada, t_0 [mm].

$$\tau_s = \frac{F_c \cos \phi - F_t \sin \phi}{bt_0} \sin \phi \quad (3.5)$$

No processo de maquinagem é importante determinar a energia necessária para realização do processo. A energia necessária divide se em cinco parcelas como está ilustrada na equação 3.6 em que a energia total, k [GJ/m³], é soma da energia de deformação plástica designada por energia específica de corte, K_s GJ/m³, energia do atrito por unidade de volume, K_f , GJ/m³, que é a energia dissipada pelo atrito na face de ataque da ferramenta, a energia de superfície das superfícies novas que se formam, K_γ [GJ/m³], a energia de dobragem da apara por unidade de volume que é necessário para a flexão plástica da apara, K_d [GJ/m³] e a energia cinética por unidade de volume necessário para acelerar a apara, K_c [GJ/m³] [13].

$$k = k_s + k_f + k_\gamma + K_d + K_c \quad (3.6)$$

Na formulação clássica e tradicional sempre existiu a convicção de que nas operações de corte as componentes k_γ e K_c são desprezáveis. A componente K_d representa 5% do valor total e k_s representa 75% da energia total [13], logo é comum estimar a energia total pela equação 3.7 em que energia, k é aproximadamente igual a energia específica de corte, k_s .

$$k \approx k_s \quad (3.7)$$

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados apresentados são os das imagens obtidas no microscópio da microestrutura presente nas diferentes amostras (WAAM e HF-WAAM com e sem tratamento térmico) nas diferentes zonas de interesse (base, centro e topo). Em relação aos ensaios de corte ortogonal são apresentados e discutidos os resultados obtidos das forças de corte, energias específicas de corte, ângulos de corte, tensões de corte, deformações obtidas pela tecnologia de DIC e os efeitos do atrito através dos coeficientes de atrito. Os resultados experimentais do corte ortogonal são analisadas e discutidas tendo em conta as combinações de parâmetros de corte utilizados e a variação destes resultados nas diferentes amostras (WAAM, HF-WAAM com e sem tratamento térmico) bem como nas diferentes zonas de interesse (base, centro e topo).

4.1 Caracterização das amostras

Nas Figuras 4.1 e 4.2 apresentam-se as medições de dureza registadas nas zonas de interesse para os ensaios de corte. Considerando as amostras sem tratamento térmico, quer nos espécimes produzidos por WAAM, como nos produzidos por HF-WAAM, a dureza manteve-se numa gama de 280-340 HV.

No caso das paredes produzidas por WAAM, o gradiente de dureza apresenta um comportamento diferente do habitualmente apresentado na literatura uma vez que, ao longo da altura, diminui da base para o centro e do centro para o topo. No caso das paredes produzidas por HF-WAAM, o gradiente de dureza apresenta o comportamento esperado, ou seja, com a dureza a diminuir da base para o centro e a aumentar do centro para o topo. Este perfil de dureza pode justificar-se devido aos diferentes comportamentos térmicos desenvolvidos ao longo da direção de construção dos componentes, originando diferente refinamento e tamanho de grãos. Além disso, os gradientes de dureza apresentam um intervalo mais pequeno ao longo da altura da parede no processo HF-WAAM, mostrando maior estabilidade da deposição.

Considerando as amostras com tratamento térmico, observa-se o efeito da normalização ao se verificar maior homogeneidade microestrutural. Com efeito, para ambas as técnicas de deposição (convencional e com forjamento), apesar da diminuição média da dureza em todas as zonas de interesse (na gama de 250-280 HV), verifica-se uma maior estabilização dos valores, não existindo diferenças significativas quando se altera a zona de interesse.

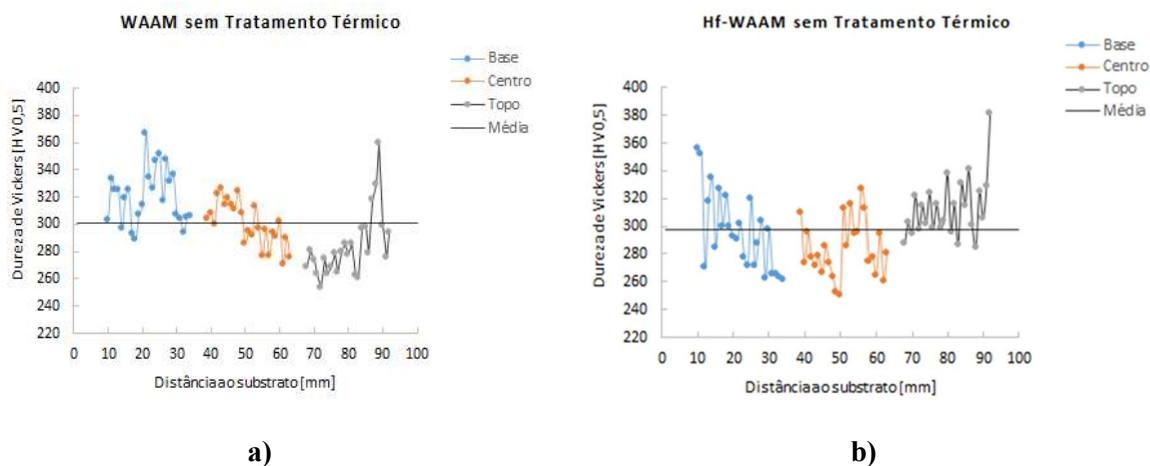


Figura 4.1 Medições e variações de dureza ao longo das amostras produzidas por: a) WAAM; b) HF-WAAM

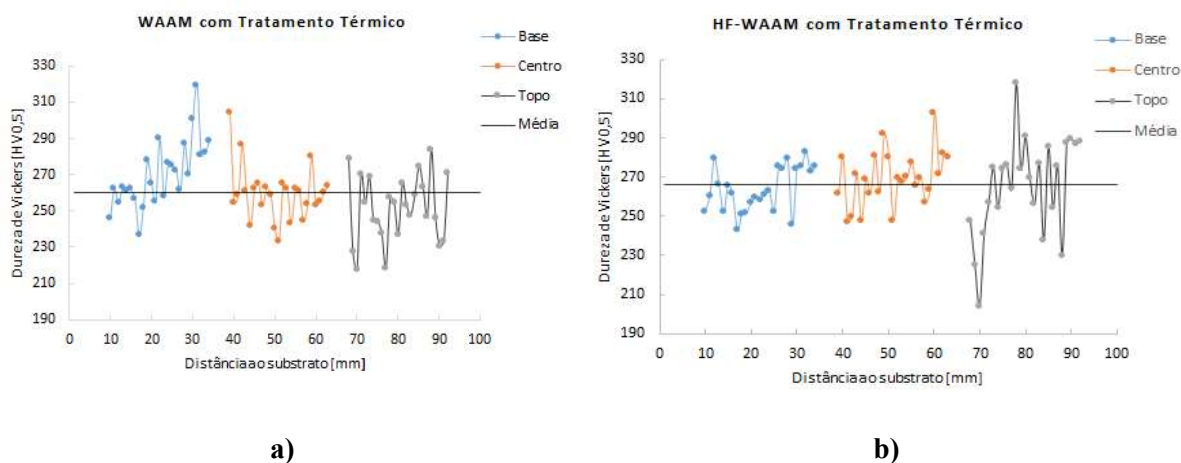


Figura 4.2 Medições e variações de dureza ao longo das amostras com tratamento térmico: a) WAAM; b) HF-WAAM

Conforme ilustrado na Figura 4.3, as amostras (paredes finas) não sujeitas a tratamento térmico revelaram diferentes microestruturas ao longo da direção da construção, com alterações no tamanho de grão ao longo da altura da parede.

Em relação à estrutura padrão WAAM, observaram-se grãos de maior dimensão no centro da parede, quando comparado à base e topo, validando as medições de dureza com valores inferiores.

Os maiores valores de dureza na amostra HF-WAAM são gerados pelos efeitos do forjamento a quente quando o material está, aparentemente, na faixa de temperaturas de trabalho a quente. Conforme descrito por Duarte *et al.* [17], a variante WAAM forjada a quente pode gerar um refinamento microestrutural, em especial, promovendo uma redução no tamanho de grão e assim melhorando as propriedades mecânicas.

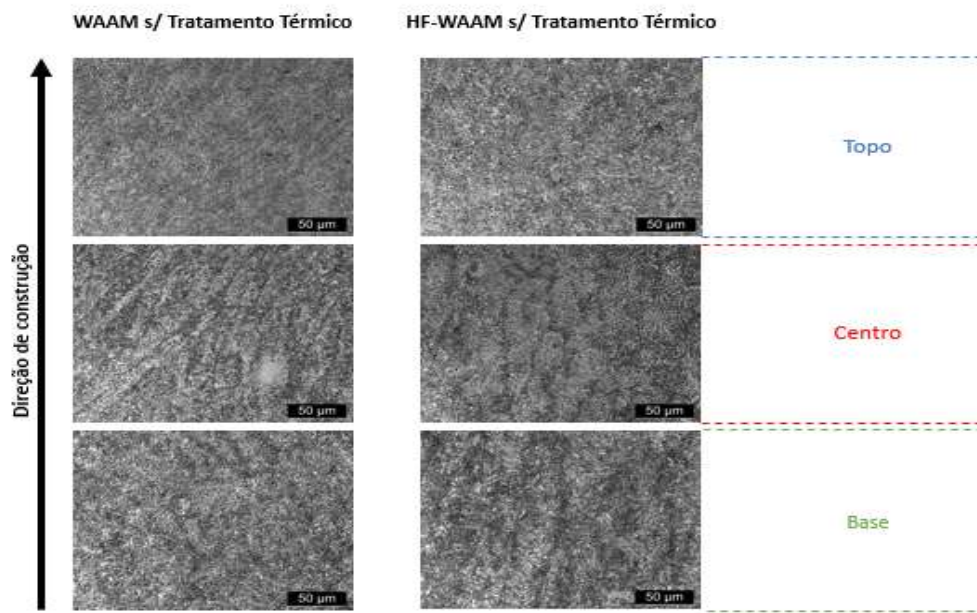


Figura 4.3 Microestrutura das amostras WAAM (esquerda) e amostras HF-WAAM (direita), ao longo da direção de construção

Pode observar-se, através da Figura 4.4, que o tratamento de normalização promoveu alterações na microestrutura do material, sendo evidente o efeito de recristalização na estrutura e uma maior homogeneidade na distribuição dos grãos ao longo das diferentes zonas de interesse.

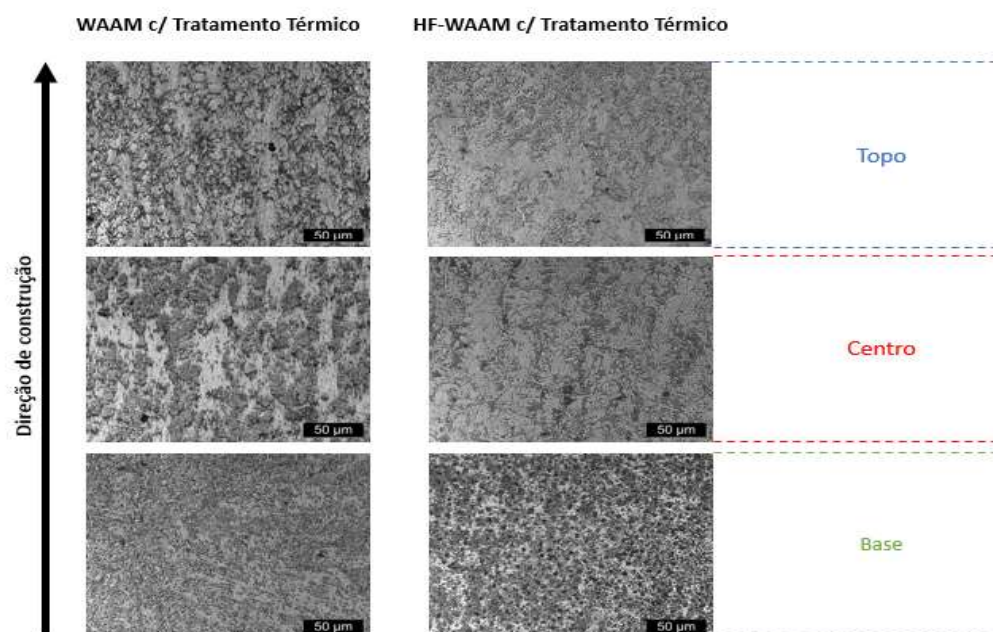


Figura 4.4 Microestrutura das amostras WAAM (esquerda) e amostras HF-WAAM (direita) sujeitas a tratamento térmico, ao longo da direção de construção

4.2 Forças de Corte

O sistema de forças de corte desenvolvido em qualquer operação de corte pode ser dividido em três componentes diferentes. A primeira é composta pela força de corte F_c , aplicada na ferramenta e paralela à direção de corte, a segunda é a força de avanço F_t , que atua perpendicularmente à força de corte, e ambas são aplicadas no plano de trabalho. A terceira é composta pela força passiva, F_p , que atua perpendicularmente ao plano de trabalho.

A Figura 4.5 mostra o resultado típico de dados adquiridos das medições diretas do dinamômetro, após o sinal ser filtrado, para as três componentes de força, durante o tempo de duração da operação de corte. É fundamental identificar e distinguir a frequência utilizada, uma vez que o sinal adquirido pode ser influenciado por gamas de frequência indesejáveis. Assim, o sinal adquirido foi filtrado através de um filtro passa-baixo *Butterworth* de 2ª ordem, com frequência de corte de 50 Hz, correspondente ao sinal da instalação elétrica.

É ainda possível observar que os valores da força passiva são muito pequenos quando comparados com os das forças de avanço e corte. Desta forma, e tal como já havia sido referido na literatura [14], a força passiva pode ser ignorada para o corte ortogonal, pois não fornece dados significativos para a análise do processo.

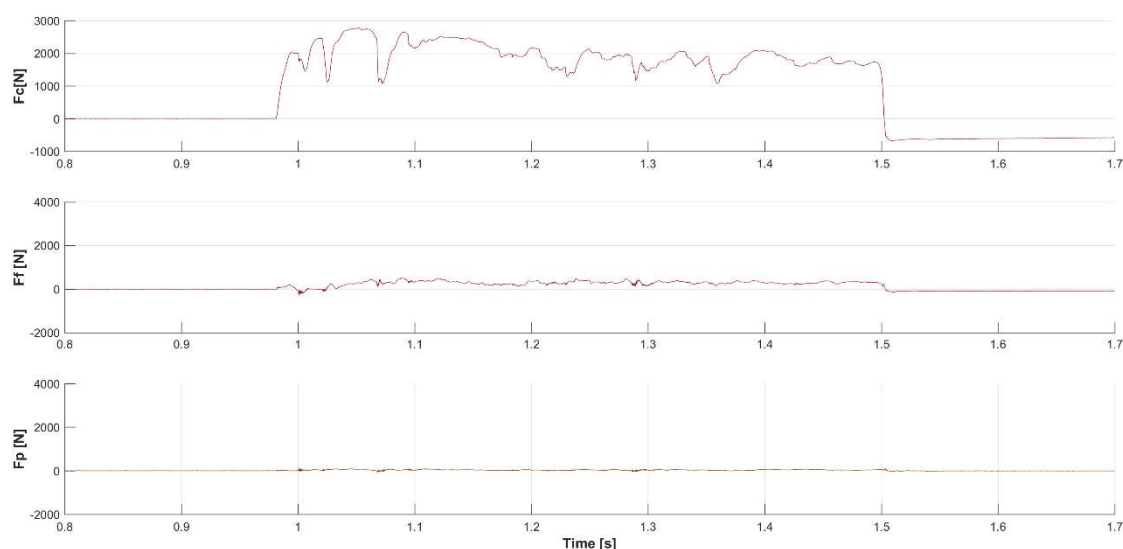


Figura 4.5 Exemplo do comportamento das três componentes da força (Ensaio 1)

Neste trabalho, a análise das forças centrou-se nos valores máximos da força de corte e avanço. Os resultados obtidos para estes valores estão apresentados na Tabela 4.1 que correspondem, aos ensaios de corte realizados em componentes sem e com tratamento térmico.

Tabela 4.1 Valores máximos das forças de corte medidos nos ensaios

Ensaio	Sem tratamento térmico		Ensaio	Com tratamento térmico	
	F _c [N]	F _t [N]		F _c [N]	F _t [N]
# 1	2772.0	517.5	# 25	1638.0	479.5
# 2	2720.5	531.4	# 26	2648.5	601.3
# 3	1794.1	551.4	# 27	1249.6	400.0
# 4	3709.5	962.9	# 28	2770.1	570.8
# 5	1373.0	521.3	# 29	2128.8	575.6
# 6	3881.4	931.2	# 30	2852.6	678.7
# 7	1526.7	568.4	# 31	1109.8	382.1
# 8	3800.3	1059.8	# 32	3182.7	668.0
# 9	1716.0	431.6	# 33	1655.4	490.5
# 10	3107.6	489.0	# 34	2801.7	777.2
# 11	1244.5	482.9	# 35	1448.0	417.8
# 12	3698.7	681.3	# 36	3028.1	572.6
# 13	2100.4	494.3	# 37	1503.8	427.8
# 14	3661.0	683.7	# 38	3031.7	691.8
# 15	1227.1	428.7	# 39	1511.7	484.8
# 16	---	---	# 40	2948.8	606.0
# 17	1929.7	463.0	# 41	1015.5	305.8
# 18	2527.7	475.3	# 42	2451.1	482.4
# 19	1071.0	368.9	# 43	1167.6	311.6
# 20	3032.3	536.6	# 44	2598.6	597.6
# 21	2823.5	433.6	# 45	1725.5	514.2
# 22	3108.1	470.9	# 46	2858.1	647.6
# 23	1722.3	502.0	# 47	1452.0	500.5
# 24	3741.0	923.8	# 48	3382.6	733.1

Através da análise das Figuras 4.6 e 4.7 pode verificar-se que a velocidade de corte não tem grande influência nas forças de corte geradas, uma vez que todos os ensaios apresentam um comportamento semelhante. Não será um caso a generalizar, porque os valores utilizados de velocidade de corte no limador são muito baixos quando comparados com outras operações de maquinagem.

É também conhecimento difundido em termos de operações de corte por arranque de apra que as forças de corte tendem a aumentar com o aumento dos valores de dureza. Embora tais observações tenham sido em certa medida demonstradas para amostras WAAM e HF-WAAM quando o corte é realizado com avanços mais elevados (Figuras 4.6b e 4.7b), tal diferença não se mostrou substancial, como seria de esperar, desaparecendo mesmo quando cortamos com avanços mais baixos (Figuras 4.6a

e 4.7a). Este facto pode ser atribuído ao maior tamanho de grão das amostras WAAM em comparação com o HF-WAAM, o que leva a uma “igualdade” entre as forças de corte, ou seja, os valores de força de corte provenientes da dureza superior dos ensaios HF- WAAM são semelhantes aos valores da força de corte do maior tamanho de grão das amostras WAAM. Esta relação entre o aumento das forças de corte e avanço com o aumento do tamanho de grão foi anteriormente documentada na maquinagem de ligas de níquel.

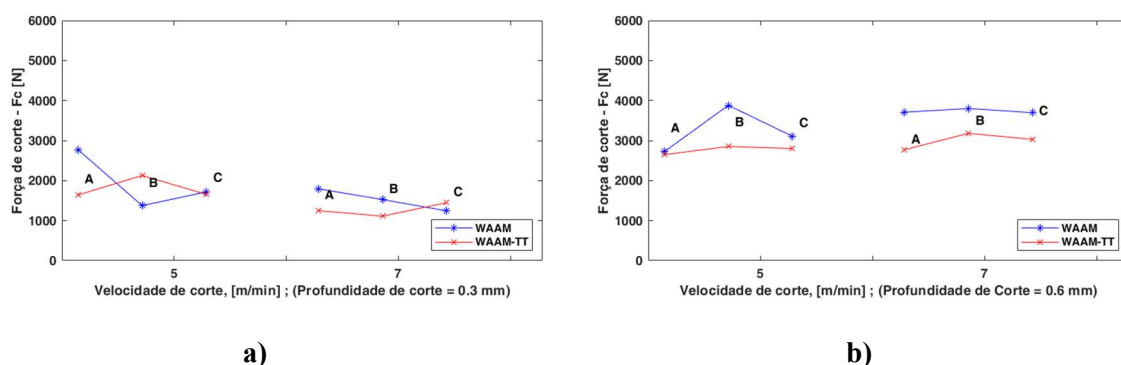


Figura 4.6 Resultados das medições da Força de Corte para as diferentes amostras WAAM: (a) profundidade de corte = 0.3 mm e (b) profundidade de corte = 0.6 mm

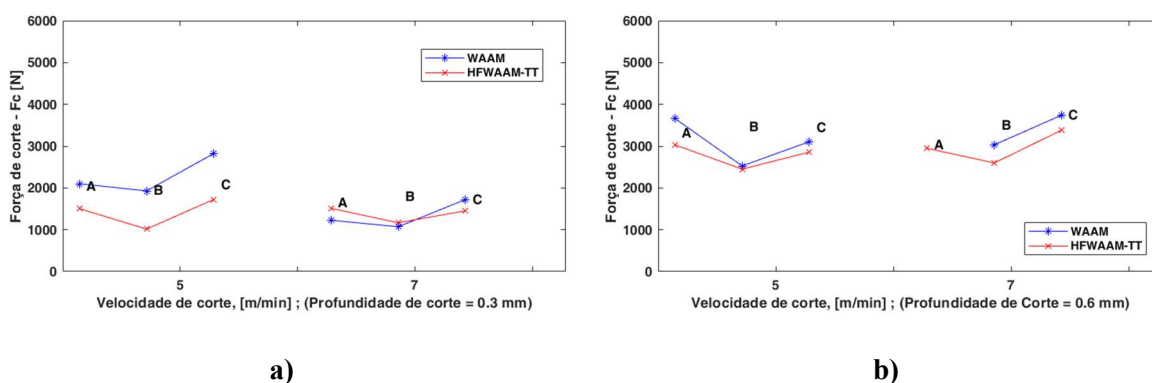


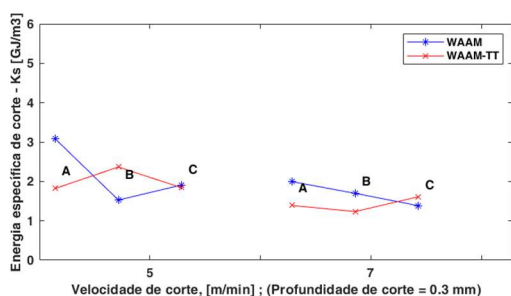
Figura 4.7 Resultados das medições da Força de Corte para as diferentes amostras HF-WAAM: (a) profundidade de corte = 0.3 mm e (b) profundidade de corte = 0.6 mm

Quando comparados os valores das forças entre componentes não sujeitos e sujeitos a tratamento térmico, verifica-se, em termos médios, uma diminuição das forças de corte nas amostras com tratamento térmico. Neste caso verifica-se que a normalização, apesar de garantir uma melhoria das propriedades mecânicas do material, permite de certa forma melhorar a maquinabilidade do material no que diz respeito ao esforço aplicado no componente a maquinar.

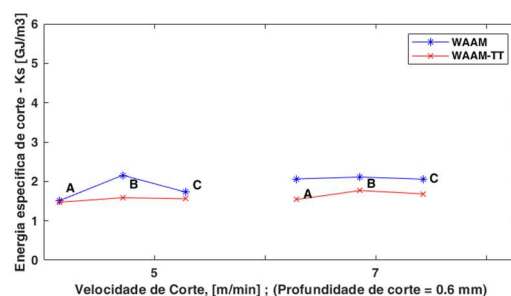
Assim, uma conclusão importante pode ser prevista: quer a dureza superior proporcionada pelo HF-WAAM, como o refinamento de grão proveniente dos tratamentos térmicos, não se mostram fatores limitativos à operação de corte, comprovando a viabilidade e até a vantagem de maquinar tais componentes com propriedades mecânicas melhoradas.

4.3 Energia Específica de Corte

A energia específica de corte descreve a quantidade de energia necessária para remover uma unidade de volume de material da peça. Assim, o SCE surge como um importante parâmetro de maquinagem para qualquer indústria, sendo essencial para fornecer informações sobre os parâmetros ideais a serem utilizados durante o processo de corte, de forma a atingir o mínimo consumo de energia possível, garantindo a exequibilidade e o desempenho do processo. Na tabela 4.2 apresentam-se os valores calculados, para cada ensaio, da Energia Específica de Corte. Da observação desta tabela pode verificar-se que, para as amostras sem tratamento térmico, os valores da energia específica de corte variam entre 1.38 e 3.08 GJ/m³ no caso dos provetes WAAM e entre 1.19 e 3.14 GJ/m³ nos provetes HF-WAAM. Para as amostras sujeitas a tratamento térmico os valores da energia específica de corte variam entre 1.23 e 2.37 GJ/m³ no caso dos provetes WAAM e entre 1.13 e 1.92 GJ/m³ nos provetes HF-WAAM. As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os resultados do SCE para cada amostra, de acordo com os parâmetros operacionais utilizados. É possível notar que os valores de SCE apresentam uma distribuição bastante regular, independentemente dos parâmetros de corte usados e do tipo/zona de amostra. Portanto, é possível confirmar que nem as propriedades mecânicas (neste caso, os diferentes valores de dureza e tamanho de grão entre amostras/zonas), a velocidade de corte e a espessura inicial da apara alteraram os valores de SCE, para as condições de corte utilizadas.



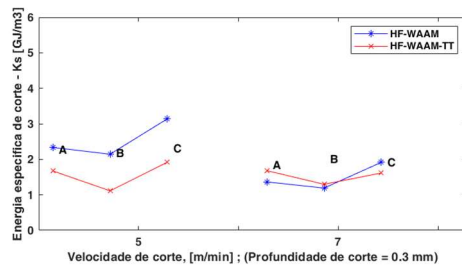
a)



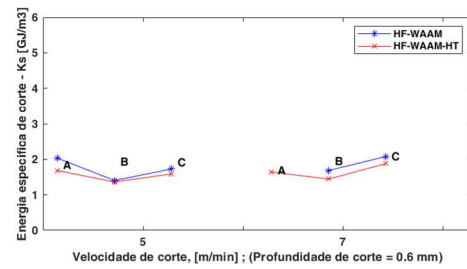
b)

Figura 4.8 Resultados experimentais para a energia específica de corte considerando as diferentes amostras WAAM:

(a) profundidade de corte = 0.3 mm e (b) profundidade de corte = 0.6 mm



a)



b)

Figura 4.9 Resultados experimentais para a energia específica de corte considerando as diferentes amostras HF-WAAM:

(a) profundidade de corte = 0.3 mm e (b) profundidade de corte = 0.6 mm

Tabela 4.2 Valores de energia específica de corte calculados nos diferentes ensaios

Ensaio	Sem tratamento térmico	Ensaio	Com tratamento térmico
	K_s [GJ/m³]		K_s [GJ/m³]
# 1	3.08	# 25	1.82
# 2	1.51	# 26	1.47
# 3	1.99	# 27	1.39
# 4	2.06	# 28	1.54
# 5	1.53	# 29	2.37
# 6	2.16	# 30	1.58
# 7	1.70	# 31	1.23
# 8	2.11	# 32	1.77
# 9	1.91	# 33	1.84
# 10	1.73	# 34	1.56
# 11	1.38	# 35	1.61
# 12	2.05	# 36	1.68
# 13	2.33	# 37	1.67
# 14	2.03	# 38	1.68
# 15	1.36	# 39	1.68
# 16	---	# 40	1.64
# 17	2.14	# 41	1.13
# 18	1.40	# 42	1.36
# 19	1.19	# 43	1.30
# 20	1.68	# 44	1.44
# 21	3.14	# 45	1.92
# 22	1.73	# 46	1.59
# 23	1.91	# 47	1.61
# 24	2.08	# 48	1.88

O efeito do tratamento térmico é bem visível, principalmente nos ensaios realizados em amostras produzidas por HF-WAAM, no sentido em que os valores de energia específica de corte se tornam ainda mais independentes das condições utilizadas, assumindo valores inferiores, o que denota maior facilidade em cortar o material, consumindo menos energia. Será importante realçar que os valores de energia específica de corte são valores próximos de 2.0 GJ/m³, o que é um valor típico dos aços.

4.4 Ângulo de Corte

Os valores do ângulo de corte calculados analiticamente segundo o Princípio da Tensão de Corte Máxima (MSSP) e o Princípio de Energia Mínima (MEP) encontram-se apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 Valores do ângulo de corte calculados através dos princípios MSSP e MEP

Ensaio	Sem tratamento térmico		Ensaio	Com tratamento térmico	
	ϕ [°] (MSSP)	ϕ [°] (MEP)		ϕ [°] (MSSP)	ϕ [°] (MEP)
# 1	34.43	39.71	# 25	28.68	36.84
# 2	33.95	39.47	# 26	32.21	38.60
# 3	27.92	36.46	# 27	27.25	36.12
# 4	30.45	37.72	# 28	33.36	39.18
# 5	24.21	34.60	# 29	29.87	37.43
# 6	31.51	38.25	# 30	31.62	38.31
# 7	24.58	34.79	# 31	26.00	35.50
# 8	29.42	37.21	# 32	33.15	39.07
# 9	30.88	37.94	# 33	28.49	36.75
# 10	36.06	40.53	# 34	29.50	37.25
# 11	23.79	34.40	# 35	28.91	36.95
# 12	34.56	39.78	# 36	34.29	39.65
# 13	31.76	38.38	# 37	29.12	37.06
# 14	34.42	39.71	# 38	32.15	38.57
# 15	25.74	35.37	# 39	27.22	36.11
# 16	---	---	# 40	33.39	39.19
# 17	31.51	38.25	# 41	28.24	36.62
# 18	34.35	39.68	# 42	33.87	39.43
# 19	25.99	35.50	# 43	30.06	37.53
# 20	34.96	39.98	# 44	32.05	38.52
# 21	36.27	40.63	# 45	28.40	36.70
# 22	36.38	40.69	# 46	32.23	38.62
# 23	28.75	36.87	# 47	25.98	35.49
# 24	31.13	38.06	# 48	32.77	38.89

Pode observar-se que os valores obtidos através do Princípio da Tensão de Corte Máxima (MSSP) são sempre inferiores aos obtidos pelo Princípio de Energia Mínima (MEP). No primeiro caso, para as amostras de WAAM os valores variam nas gamas 24°-36°, sem tratamento térmico, e 26°-34° com tratamento térmico. Nos ensaios com amostras HF-WAAM os valores variam nas gamas 26°-36°, sem tratamento térmico, e 26°-34° com tratamento térmico. No que respeita aos valores obtidos pelo Princípio de Energia Mínima (MEP), para as amostras de WAAM os valores variam nas gamas 34°-41°, sem tratamento térmico, e 36°-40° com tratamento térmico (Figura 4.10). Nos ensaios com amostras HF-WAAM os valores variam nas gamas 35°-41°, sem tratamento térmico, e 36°-40° com tratamento térmico (Figura 4.11).

No caso do cálculo do ângulo de corte não se observa que exista algum efeito significativo dos tratamentos térmicos.

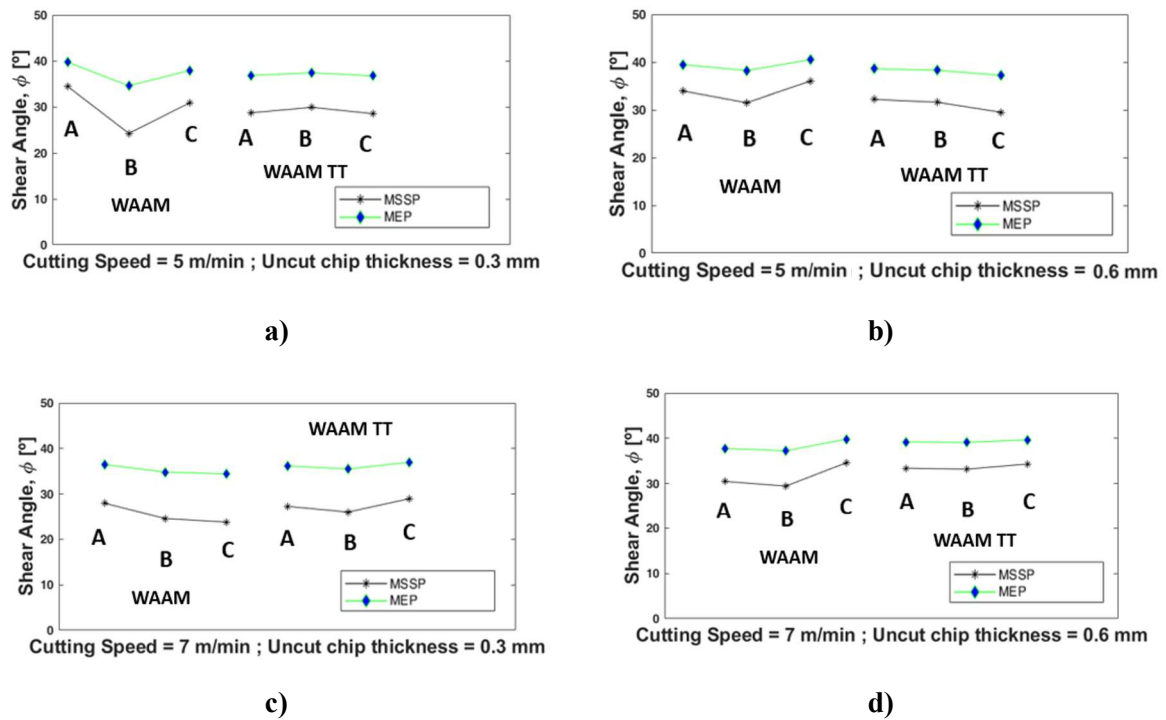


Figura 4.10 Ângulo de corte obtido através dos modelos MSSP e MEP considerando as diferentes amostras WAAM:
(a) $v_c = 5$ m/min; $p = 0.3$ mm; (b) $v_c = 5$ m/min; $p = 0.6$ mm; (c) $v_c = 7$ m/min; $p = 0.3$ mm; (d) $v_c = 7$ m/min; $p = 0.6$ mm

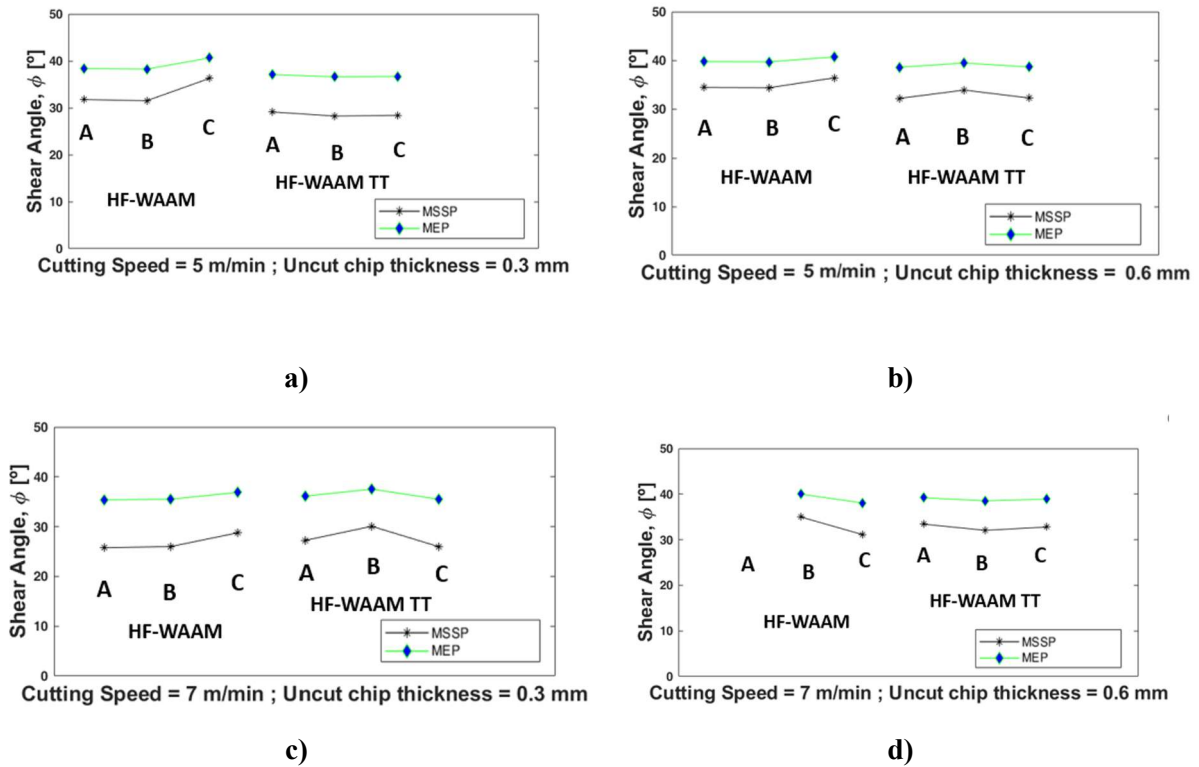


Figura 4.11 Ângulo de corte obtido através dos modelos MSSP e MEP considerando as diferentes amostras HF-WAAM: (a) $v_c = 5 \text{ m/min}$; $p = 0.3 \text{ mm}$; (b) $v_c = 5 \text{ m/min}$; $p = 0.6 \text{ mm}$; (c) $v_c = 7 \text{ m/min}$; $p = 0.3 \text{ mm}$; (d) $v_c = 7 \text{ m/min}$; $p = 0.6 \text{ mm}$

4.5 Coeficiente de Atrito

Os valores do ângulo de atrito e coeficiente de atrito medidos experimentalmente encontram-se apresentados na tabela 4.4. As Figuras 4.12 e 4.13 representam graficamente o coeficiente de atrito médio, μ , bem como o ângulo de atrito β desenvolvido entre a apra e a ferramenta, para as diferentes condições de corte dos ensaios.

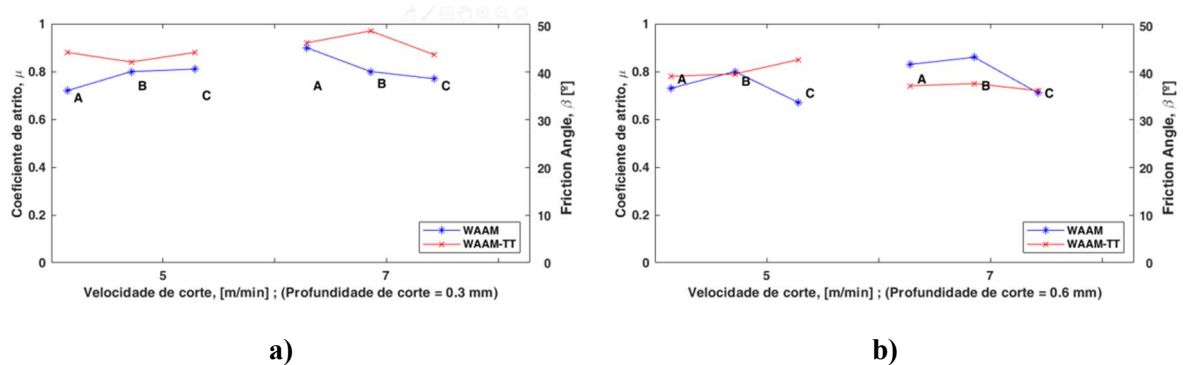
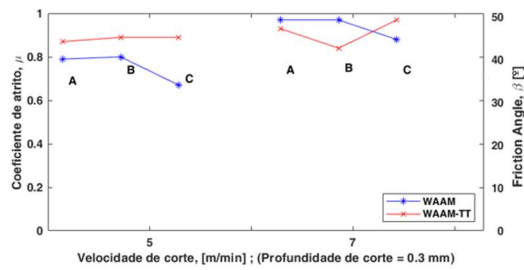
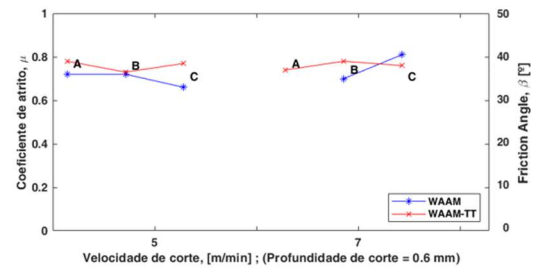


Figura 4.12 Resultados experimentais para o ângulo de atrito e coeficiente de atrito considerando as diferentes amostras WAAM: (a) profundidade de corte = 0.3 mm e (b) profundidade de corte = 0.6 mm



a)



b)

Figura 4.13 Resultados experimentais para o ângulo de atrito e coeficiente de atrito considerando as diferentes amostras HF-WAAM: (a) profundidade de corte = 0.3 mm e (b) profundidade de corte = 0.6 mm

Tabela 4.4 Valores do ângulo de atrito e coeficiente de atrito medidos experimentalmente

Ensaio	Sem tratamento térmico		Ensaio	Com tratamento térmico	
	β [°]	μ [-]		β [°]	μ [-]
# 1	35.57	0.72	# 25	41.32	0.88
# 2	36.05	0.73	# 26	37.79	0.78
# 3	42.08	0.90	# 27	42.75	0.92
# 4	39.55	0.83	# 28	36.64	0.74
# 5	45.79	1.03	# 29	40.13	0.84
# 6	38.49	0.80	# 30	38.38	0.79
# 7	45.42	1.01	# 31	44.00	0.97
# 8	40.58	0.86	# 32	36.85	0.75
# 9	39.12	0.81	# 33	41.51	0.88
# 10	33.94	0.67	# 34	40.50	0.85
# 11	46.21	1.04	# 35	41.09	0.87
# 12	35.44	0.71	# 36	35.71	0.72
# 13	38.24	0.79	# 37	40.88	0.87
# 14	35.58	0.72	# 38	37.85	0.78
# 15	44.26	0.97	# 39	42.78	0.93
# 16	---	---	# 40	36.61	0.74
# 17	38.49	0.80	# 41	41.76	0.89
# 18	35.65	0.72	# 42	36.13	0.73
# 19	44.01	0.97	# 43	39.94	0.84
# 20	35.04	0.70	# 44	37.95	0.78
# 21	33.73	0.67	# 45	41.60	0.89
# 22	33.62	0.66	# 46	37.77	0.77
# 23	41.25	0.88	# 47	44.02	0.97
# 24	38.87	0.81	# 48	37.23	0.76

O atrito entre superfícies é, predominantemente, afetado pela natureza dos materiais, pela condição de lubrificação e pela magnitude da força normal à superfície (neste caso, considerada como a força de avanço). Como pode ser observado, a velocidade de corte produziu efeitos menores nas propriedades de atrito. Tal fator também pode comprovar que não foram produzidos efeitos de amaciamento térmico no material.

4.6 Deformações

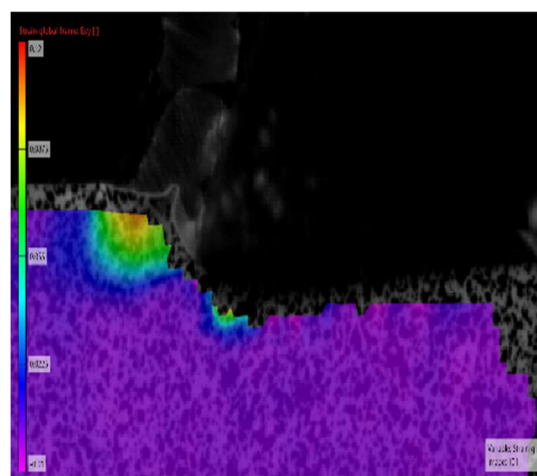
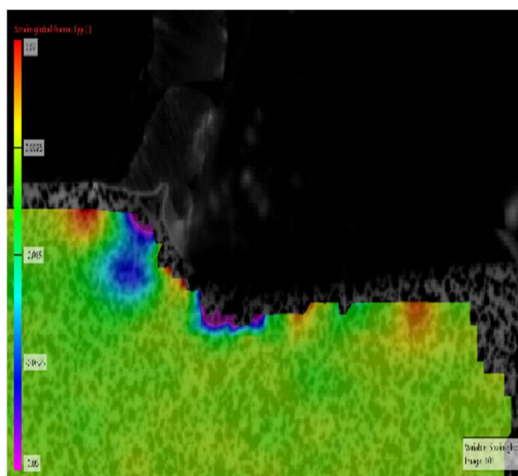
Os resultados das deformações obtidos utilizando a Tecnologia *DIC*, encontram-se na Figura 4.14, para os ensaios 2, 3 e 19, cujos parâmetros de corte e as amostras/zonas de interesse utilizados em cada ensaio foi anteriormente descrito (Tabela 3.9). Na segunda coluna está ilustrado o campo das deformações (ϵ_{yy}), perpendicular à direção de corte, e na terceira coluna está representado o campo das deformações correspondente às extensões de corte (ϵ_{xy}). O valor negativo das deformações indica que o material na mesma zona está a compressão, e os valores positivo de deformação indica que o material está a tração.

Ensaio

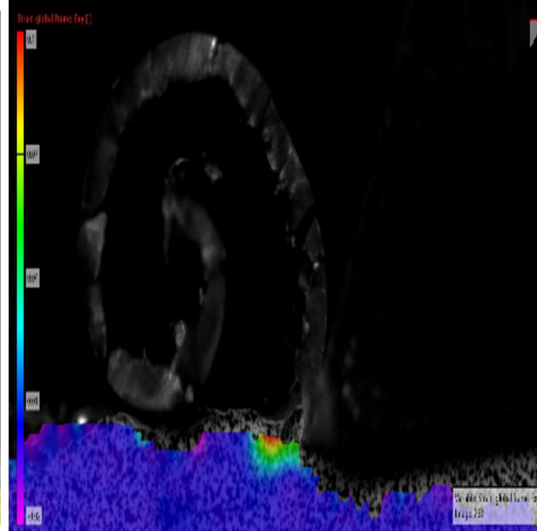
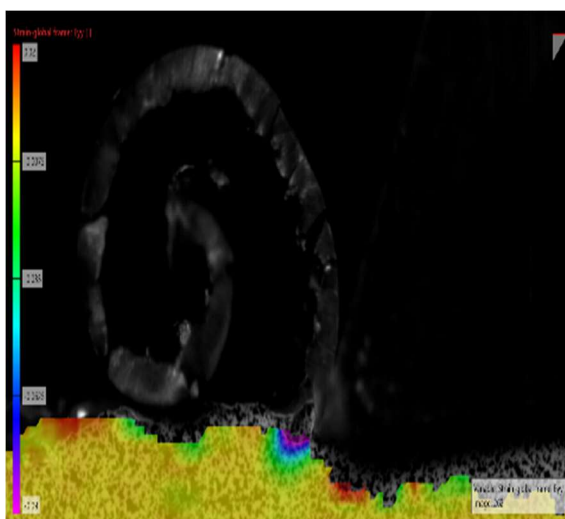
Campo das deformações ε_{yy}

Campo das deformações ε_{xy}

2



3



36

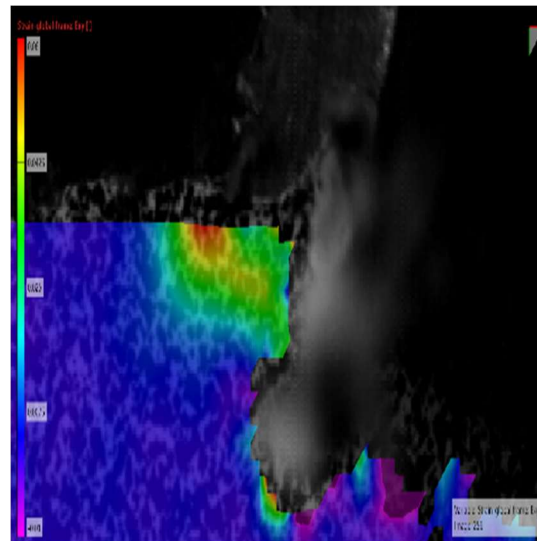
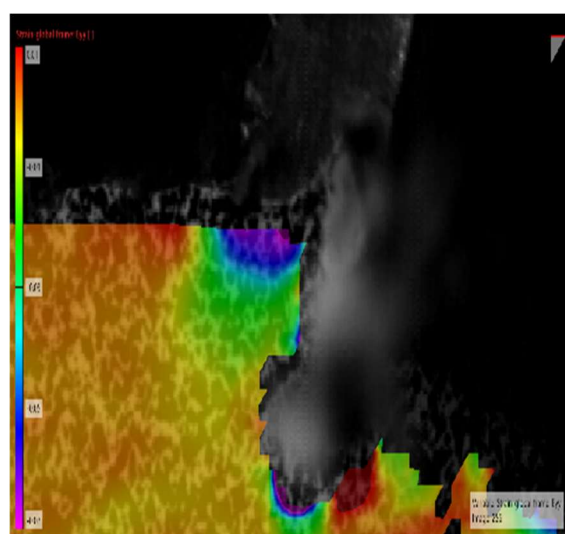


Figura 4.14 Resultados experimentais das deformações obtidos utilizando a Tecnologia DIC

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Sendo o objetivo deste trabalho a análise do processo de corte ortogonal aplicado em estruturas produzidas por diferentes variantes de WAAM, sem e com subsequente tratamento térmico, pode constatar-se que foi alcançado com sucesso. Com efeito, este trabalho permitiu acrescentar ao conhecimento existente uma análise mais detalhada em relação ao comportamento do material durante o processo de corte.

Uma vez que a pesquisa atual do NTI no âmbito da investigação dos processos de WAAM tem vindo a demonstrar que é possível melhorar as propriedades mecânicas se forem realizados tratamentos térmicos após o fabrico dos componentes, e como o tratamento térmico subsequente de um componente WAAM pode afetar sua maquinabilidade, considera-se com este trabalho ter contribuído para estudo do seu comportamento durante o corte, uma vez que pode alterar a microestrutura e aliviar tensões residuais no material, o que por sua vez resulta em alterações das propriedades mecânicas e maquinabilidade.

A partir da literatura existente, é já reconhecido o potencial da tecnologia AM (e especialmente do processo WAAM), onde os níveis de eficiência de produção, bem como a vasta gama de materiais passíveis de utilização constituem um fator desafiante para a indústria metalúrgica. A realização de trabalhos de investigação fundamental na maquinabilidade deste tipo de componentes continua esparsa.

A operação de corte ortogonal foi assim utilizada para fornecer uma análise de cariz teórico sobre a operação de corte, por se tratar da melhor abordagem para caracterizar a maioria das operações de maquinagem.

Todo o procedimento experimental foi realizado para avaliar os diferentes parâmetros do processo na resposta do material correspondente. Foi estudado o efeito das propriedades mecânicas distintas entre as amostras WAAM e HF-WAAM, com e sem tratamento térmico, bem como a distribuição microestrutural ao longo da altura dos componentes.

Desta forma, com base nos resultados experimentais e na discussão apresentada no capítulo anterior, podem-se evidenciar as seguintes conclusões:

- A partir da caracterização das diferentes estruturas WAAM, clarificaram-se os efeitos do forjamento a quente do processo HF-WAAM nas propriedades do material através das diferentes zonas ao longo da altura da parede, mostrando gradientes de dureza melhorados e tamanhos de grãos menores em comparação com as amostras WAAM padrão.

- A partir das forças adquiridas foi possível observar que a velocidade de corte não influenciou as forças de corte e avanço medidas. Como esperado, apenas a espessura inicial da apara (ou avanço)

mostrou efeito significativo nas forças medidas, devido às maiores quantidades de material removido durante a operação de corte.

- Adicionalmente, observou-se que as propriedades mecânicas não levaram a diferenças significativas nas forças medidas, para os parâmetros de corte selecionados. A anisotropia e dureza superior dos componentes HSLA fabricados aditivamente, não se revelaram fatores limitantes à operação de corte. Quer a dureza superior proporcionada pelo HF-WAAM, como o refinamento de grão proveniente dos tratamentos térmicos, não se mostram fatores limitativos à operação de corte, comprovando a viabilidade e até a vantagem de maquinar tais componentes com propriedades mecânicas melhoradas.

- A energia específica de corte foi mantida ao longo das diferentes condições dos testes experimentais. Portanto, foi possível confirmar que nem as diferentes propriedades mecânicas das amostras, ou os parâmetros de corte utilizados, produziram alterações significativas no processo de remoção de material e na condição de desgaste da ferramenta. Neste caso, o efeito do tratamento térmico é bem visível, principalmente nos ensaios realizados em amostras produzidas por HF-WAAM, no sentido em que os valores de energia específica de corte se tornam ainda mais independentes das condições utilizadas, assumindo valores inferiores, o que denota maior facilidade em cortar o material, consumindo menos energia.

- A partir dos modelos de predição para o ângulo de corte, os resultados experimentais revelaram que o princípio da tensão de cisalhamento máxima (MSSP), baseado na teoria de Lee e Shaffer, foi o modelo que forneceu valores inferiores, quando comparado com o princípio de energia mínima (MEP) proposto por Ernst e Merchant. No caso do cálculo do ângulo de corte não se observou existir efeito significativo dos tratamentos térmicos.

- Os ensaios de corte foram realizados a seco (sem qualquer tipo de lubrificação). Desta forma, a velocidade de corte revelou pequenos efeitos sobre o atrito durante a operação de corte. Por outro lado, a espessura da apra inicial demonstrou ser pouco significativa sobre o atrito, devido aos maiores planos de corte gerados assim como à maior quantidade de material removido. Os resultados revelaram valores de atrito ligeiramente inferiores obtidos nos ensaios em componentes HF-WAAM, em comparação com as amostras WAAM. Os tratamentos térmicos não apresentaram ter influência em relação ao atrito gerado na interface apra-ferramenta. Os resultados do coeficiente de atrito e do ângulo de atrito estão em conformidade com os valores de referência para contato aço-aço, considerando operações de corte a seco.

- As imagens obtidas pela câmara de alta velocidade podem ser usadas para avaliar o ângulo de corte real do processo de corte ortogonal. No entanto, a preparação das amostras tendo em vista a utilização da tecnologia DIC não se mostrou a mais adequada, dado a elasticidade da tinta se ter revelado

inadequada. Com efeito, ao ser realizado o corte, a tinta deformou de forma diferente da do material a estudar, obstruindo a visibilidade na zona de interesse.

Assim sendo, o objetivo principal do trabalho foi cumprido, e a principal conclusão que se pode retirar é a de que, apesar do incremento na dureza proporcionada pelo HF-WAAM, e/ou do refinamento de grão proveniente dos tratamentos térmicos, assegurando a viabilidade e até a vantagem de maquinar tais componentes com propriedades mecânicas melhoradas, por via da maquinabilidade aprimorada.

No entanto, apesar de se considerar que o trabalho desenvolvido cumpriu o objetivo principal proposto, mais investigação deve ser realizada para análise da maquinabilidade de componentes produzidos por WAAM e/ou HF-WAAM, com ou sem tratamentos térmicos. Alguma desta investigação compreende:

- Fabricação de amostras com maiores dimensões, diferentes parâmetros e fabricadas em diferentes materiais, a fim de avaliar a influência das propriedades mecânicas geradas nas correspondentes operações de maquinagem.
- Avaliar o comportamento térmico durante a operação de corte, para comparar com as considerações teóricas existentes no modelo de corte ortogonal.
- Aplicar diversas combinações diferentes de parâmetros de corte e diferentes ângulos de saída das ferramentas, a fim de otimizar as operações de conformação.

REFERÊNCIAS

- [1] T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos, and J. P. Oliveira, “Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM),” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 7, 2019, doi: 10.3390/ma12071121.
- [2] N. Johnson and P. Sanders, “High strength low alloy (HSLA) aluminum,” *Int. J. Met.*, vol. 6, no. 1, pp. 61–62, 2012, doi: 10.1007/BF03355480.
- [3] S. Vervynckt, K. Verbeken, B. Lopez, and J. J. Jonas, “Modern HSLA steels and role of non-recrystallisation temperature,” *Int. Mater. Rev.*, vol. 57, no. 4, pp. 187–207, 2012, doi: 10.1179/1743280411Y.0000000013.
- [4] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0,” *Procedia Manuf.*, vol. 11, no. June, pp. 545–554, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.
- [5] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, “Wire + Arc additive manufacturing,” *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom)*, vol. 32, no. 7, pp. 641–647, 2016, doi: 10.1179/1743284715Y.0000000073.
- [6] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, and C. Emmelmann, “Additive manufacturing of metals,” *Acta Mater.*, vol. 117, pp. 371–392, 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
- [7] S. R. Singh and P. Khanna, “Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials,” *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 118–128, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.030.
- [8] B. Wu *et al.*, “A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement,” *J. Manuf. Process.*, vol. 35, no. July, pp. 127–139, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.
- [9] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, “Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 81, no. 1–4, pp. 465–481, 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7077-3.
- [10] E. Götze, F. Zanger, and V. Schulze, “Orthogonal cutting of laser beam melted parts,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1960, 2018, doi: 10.1063/1.5034919.

- [11] D. Ferraresi, "Fundamentos da Usinagem dos Metais". 11ª Edição, Editora Edgard Blücher, 2003. ISBN: 8521208596
- [12] A. M. P. de Jesus, "Fundamentos do Corte: Teoria e Exercícios". FEUP, Porto, 2019. ISBN: 9789727522453
- [13] J.J.P. Teixeira, "Fundamentos físicos do corte dos metais". Edições EDINOVA, 2001. ISBN: 9789725951002
- [14] P. P. Fonseca *et al.*, "Orthogonal cutting of Wire and Arc Additive Manufactured parts," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 119, no. 7–8, pp. 4439–4459, 2022, doi: 10.1007/s00170-022-08678-3.
- [15] F. Montevecchi, N. Grossi, H. Takagi, A. Scippa, H. Sasahara, and G. Campatelli, "Cutting Forces Analysis in Additive Manufactured AISI H13 Alloy," *Procedia CIRP*, vol. 46, pp. 476–479, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.04.034.
- [16] C. H. Lauro, L. C. Brandão, D. Baldo, R. A. Reis, and J. P. Davim, "Monitoring and processing signal applied in machining processes – A review," *MEASUREMENT*, vol. 58, pp. 73–86, 2014, doi: 10.1016/j.measurement.2014.08.035.
- [17] V. R. Duarte, T. A. Rodrigues, N. Schell, R. M. Miranda, J. P. Oliveira, and T. G. Santos, "Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM)," *Addit. Manuf.*, vol. 35, no. April, p. 101193, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101193.
- [18] A. N. M. Tanvir *et al.*, "Phase stability and mechanical properties of wire + arc additively manufactured H13 tool steel at elevated temperatures," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 67, pp. 80–94, 2021, doi: 10.1016/j.jmst.2020.04.085.
- [19] B. L. Ferguson, Z. Li, and A. M. Freborg, "Modeling heat treatment of steel parts," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 34, no. 3, pp. 274–281, 2005, doi: 10.1016/j.commatsci.2005.02.005.
- [20] A. Interanational, "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens 1," *ASTM Int.*, vol. 03.01, no. July, pp. 1–12, 2012.
- [21] . P. S. S., "Wear and Corrosion Studies on Ferritic Stainless Steel (Ss 409M)," *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 04, no. 04, pp. 502–511, 2015, doi: 10.15623/ijret.2015.0404088.
- [22] A. Mazahery and M. O. Shabani, "Plastic deformation on worn surface of sintered diffusion alloyed Fe-Ni-Cu steel powders," *Mater. Technol.*, vol. 28, no. 3, pp. 117–121, 2013, doi: 10.1179/1066785712Z.000000000096.

- [23] S. Igarashi, A. Bentur, and S. Mindess, "Microhardness testing of cementitious materials," *Adv. Cem. Based Mater.*, vol. 4, no. 2, pp. 48–57, 1996, doi: 10.1016/S1065-7355(96)90051-6.
- [24] V. Arshinov and G. Alekseev, "Metal Cutting Theory and Cutting Tool Design," *Mir Publ.*, no. Third Edit, 1976.
- [25] N. McCormick and J. Lord, "Digital image correlation," *Mater. Today*, vol. 13, no. 12, pp. 52–54, 2010, doi: 10.1016/S1369-7021(10)70235-2.
- [26] E. M. C. Jones *et al.*, "A Good Practices Guide for Digital Image Correlation," *Int. Digit. Image Correl. Soc.*, pp. 1–94, 2018, [Online]. Available: <http://idics.org/guide/>
- [27] B. Pan, K. Qian, H. Xie, and A. Asundi, "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 6, 2009, doi: 10.1088/0957-0233/20/6/062001.
- [28] M. A. Sutton *et al.*, "Metrology in a scanning electron microscope: Theoretical developments and experimental validation," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 10, pp. 2613–2622, 2006, doi: 10.1088/0957-0233/17/10/012.
- [29] M. A. Sutton, N. Li, D. C. Joy, A. P. Reynolds, and X. Li, "Scanning electron microscopy for quantitative small and large deformation measurements Part I: SEM imaging at magnifications from 200 to 10,000," *Exp. Mech.*, vol. 47, no. 6, pp. 775–787, 2007, doi: 10.1007/s11340-007-9042-z.
- [30] M. A. Sutton *et al.*, "Scanning electron microscopy for quantitative small and large deformation measurements Part II: Experimental validation for magnifications from 200 to 10,000," *Exp. Mech.*, vol. 47, no. 6, pp. 789–804, 2007, doi: 10.1007/s11340-007-9041-0.
- [31] Y. Sun and J. H. L. Pang, "AFM image reconstruction for deformation measurements by digital image correlation," *Nanotechnology*, vol. 17, no. 4, pp. 933–939, 2006, doi: 10.1088/0957-4484/17/4/016.
- [32] S. Yoneyama, A. Kitagawa, K. Kitamura, and H. Kikuta, "In-plane displacement measurement using digital image correlation with lens distortion correction," *JSME Int. Journal, Ser. A Solid Mech. Mater. Eng.*, vol. 49, no. 3, pp. 458–467, 2006, doi: 10.1299/jsmea.49.458.
- [33] M. Luo, "Displacement/strain measurements using an optical microscope and digital image correlation," *Opt. Eng.*, vol. 45, no. 3, p. 033605, 2006, doi: 10.1117/1.2182108.
- [34] S. Yoneyama, "Lens distortion correction for digital image correlation by measuring rigid body displacement," *Opt. Eng.*, vol. 45, no. 2, p. 023602, 2006, doi: 10.1117/1.2168411.

ANEXO 1

```
G04 P200;  
M84;  
M42 P4 S0;  
M84;  
G01 Y-180 E1500;  
M84;  
M42 P4 S255;|  
M84;  
G01 Y-15;  
M84;  
M42 P5 S0;  
M84;  
G01 Y+15;  
M84;  
G01 Z2.0;  
M84;
```

