



Universidade Federal do Amazonas
Faculdade de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção - PPGE



SAYMON CASTRO SOMBRA DA SILVA

**INFLUÊNCIA DO RESFRIAMENTO ACELERADO NA FABRICAÇÃO DE
PRODUTOS METÁLICOS VIA MANUFATURA ADITIVA DED-GMAW**

MANAUS

2025

SAYMON CASTRO SOMBRA DA SILVA

**INFLUÊNCIA DO RESFRIAMENTO ACELERADO NA FABRICAÇÃO DE
PRODUTOS METÁLICOS VIA MANUFATURA ADITIVA DED-GMAW**

Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu, em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Amazonas como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

Área de Concentração: Tecnologias Emergentes

Linha de Pesquisa: Manufatura aditiva

Orientador: Jaime Casanova Soeiro Júnior, Doutor

MANAUS

2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

-
- S586i Silva, Saymon Castro Sombra da
Influência do resfriamento acelerado na fabricação de produtos metálicos via manufatura aditiva DED-GMAW / Saymon Castro Sombra da Silva. - 2025.
90 f. : il., color. ; 31 cm.
- Orientador(a): Jaime Casanova Soeiro Júnior.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Manaus, 2025.
1. Manufatura 4.0. 2. DED-GMAW-Directed energy deposition-gas metal arc . 3. Manufatura Aditiva. 4. Resfriamento acelerado. 5. Tenacidade ao entalhe. I. Soeiro Júnior, Jaime Casanova. II. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título
-

SAYMON CASTRO SOMBRA DA SILVA

**INFLUÊNCIA DO RESFRIAMENTO ACELERADO NA FABRICAÇÃO DE
PRODUTOS METÁLICOS VIA MANUFATURA ADITIVA DED-GMAW**

Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu*, em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Amazonas como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

Área de Concentração: Tecnologias

Emergentes

Linha de Pesquisa: Manufatura aditiva

Orientador: Jaime Casanova Soeiro Júnior,
Doutor.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jaime Casanova Soeiro Júnior
Universidade Federal do Amazonas
Orientador e Presidente

Prof. Dr. Rubelmar Maia de Azevedo Cruz Neto
Universidade do Estado do Amazonas
Membro Externo

Prof. Dr. Antonio do Nascimento Silva Alves
Universidade Federal do Amazonas
Membro Interno

Manaus, 27 de fevereiro de 2025

Dedico este trabalho a todos aqueles que me apoiaram ao longo da jornada, especialmente à minha família e orientador, sem os quais este esforço não teria sido possível.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, expresso minha profunda gratidão a Deus, criador do universo, cuja presença constante tem iluminado minhas decisões e atitudes, guiando-me e orientando-me ao longo desta jornada de vida.

À minha família, que esteve ao meu lado em cada etapa desta trajetória, especialmente aos meus pais, Nilzete Castro e Saul Sombra, por toda a educação, apoio, motivação, confiança e perseverança que me transmitiram ao longo da vida. À minha parceira e companheira, Keitiane Rodrigues, por seu apoio incondicional nos momentos mais desafiadores.

Manifesto também meus sinceros agradecimentos à Universidade Federal do Amazonas e à Faculdade de Tecnologia - FT, juntamente com o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGEP, onde tive o privilégio de contar com professores e colegas que foram fundamentais para o desenvolvimento da minha pesquisa, além de ter acesso irrestrito aos laboratórios.

Sou imensamente grato ao meu orientador, Prof. Dr. Jaime Casanova, por sua disponibilidade constante para esclarecer dúvidas e acompanhar os experimentos de laboratório. Ao meu amigo e colega de laboratório, Rigley Nery, com quem compartilhei momentos de alegria e desafios durante a produção das amostras. Agradeço também ao Dr. Antonio do Nascimento Silva Alves bem como todos os colegas de turma que estiveram presentes ao longo desta caminhada.

Por fim, expresso minha gratidão à FAPEAM pelo apoio concedido.

“Não espere por uma crise para descobrir
o que é importante em sua vida.”

Platão

RESUMO

A Manufatura Aditiva está ganhando cada vez mais espaço na indústria global, estabelecendo-se como uma alternativa eficaz às tecnologias subtrativas. Um dos segmentos promissores dessa área é a Manufatura Aditiva por Deposição com energia direcionada (DED), que se destaca por sua alta taxa de deposição e capacidade de criar geometrias de médio e grande porte com uma excelente razão Buy-To-fly, especialmente quando comparada ao processo de usinagem. No DED, destaca-se o processo de deposição por GMAW (Gas Metal Arc Welding), que utiliza o arco elétrico como fonte de energia. Este trabalho investigou a influência do resfriamento acelerado na fabricação de produtos metálicos por meio da manufatura aditiva DED-GMAW. Focalizando na energia de deposição e no tipo de resfriamento, o estudo analisa como esses fatores afetam a tenacidade ao entalhe, taxa de resfriamento e geometria das camadas depositadas. Utilizando chapas de aço ASTM A36 como substrato e arame ER110S-1, o sistema DED-GMAW foi equipado com um dispositivo de resfriamento indireto a água, permitindo uma análise comparativa entre resfriamento ao ar e a água. A pesquisa constatou que a combinação de alta energia de deposição com resfriamento acelerado resulta em produtos com boa resistência. Entre as conclusões obtidas, destaca-se que: o sistema de resfriamento indireto não afeta diretamente a geometria (altura e largura) das camadas depositadas; o fator mais influente na energia de impacto Charpy V é a energia de deposição das camadas; o sistema de resfriamento indireto não afeta negativamente a tenacidade do material. A partir deste trabalho verificou-se que o sistema de resfriamento indireto não tem impacto efetivo nem na geometria e nem na tenacidade ao entalhe, sendo assim viável seu uso para produzir produtos planos, utilizando arame ER110S-1, mais rápido que resfriando naturalmente ao ar.

Palavras-chave: Manufatura 4.0, DED-GMAW, Manufatura Aditiva, Resfriamento acelerado, Tenacidade ao entalhe

ABSTRACT

Additive Manufacturing is increasingly gaining ground in the global industry, establishing itself as an effective alternative to subtractive technologies. One of the promising segments in this area is Directed Energy Deposition (DED) Additive Manufacturing, which stands out for its high deposition rate and ability to create medium and large geometries with an excellent Buy-To-fly ratio, especially when compared to machining processes. In DED, the Gas Metal Arc Welding (GMAW) deposition process is notable, using the electric arc as an energy source. This work investigated the influence of accelerated cooling on the manufacturing of metallic products through DED-GMAW additive manufacturing. Focusing on deposition energy and cooling type, the study analyzes how these factors affect notch toughness, cooling rate, and the geometry of deposited layers. Using ASTM A36 steel plates as a substrate and ER110S-1 wire, the DED-GMAW system was equipped with an indirect water cooling device, allowing a comparative analysis between air and water cooling. The research found that the combination of high deposition energy with accelerated cooling results in products with good strength. Among the conclusions obtained, it is highlighted that: the indirect cooling system does not directly affect the geometry (height and width) of the deposited layers; the most influential factor in Charpy V impact energy is the deposition energy of the layers; the indirect cooling system does not negatively affect the material's toughness. From this work, it was verified that the indirect cooling system has no effective impact on either the geometry or notch toughness, making its use viable for producing flat products using ER110S-1 wire, faster than naturally cooling in air.

Keywords: Manufacturing 4.0, DED-GMAW, Additive Manufacturing, Accelerated Cooling, Notch Toughness

LISTA DE SIGLAS

Ar: Gás Argônio

ASTM: American Society for Testing and Materials

BJ: Binder Jetting

BTF: Buy to Fly

CNC: Comando Numérico Computadorizado

CO₂: Gás Carbônico

CP: Corpo de Prova

DED: Directed Energy Deposition

GMAW: Gas Metal Arc Welding

MA: Manufatura Aditiva

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

PBF: Powder Bed Fusion

PP: Produto Plano

SL: Sheet Lamination

ZAC: Zona Afetada Pelo Calor

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Categorias de MA para metais.....	20
Figura 2. Esquema ilustrativo do PBF.....	21
Figura 3. Esquema ilustrativo do Binder jetting.	23
Figura 4. DED-L (Deposição de energia direta a laser).....	25
Figura 5. Equipamentos DED-GMAW.....	26
Figura 6. Sistema de deposição com resfriamento forçado entre camadas. ..	29
Figura 7. Sistema de resfriamento NIAC.....	30
Figura 8. Substrato.	32
Figura 9. Fonte de deposição.	33
Figura 10. CNC com tocha acoplada.	34
Figura 11. Dispositivo de resfriamento acelerado.	35
Figura 12. Equipamento de aquisição de dados IMC SAP.....	35
Figura 13. Máquina de Ensaio Charpy.....	36
Figura 14. Microscópio Eletrônico de Varredura.	36
Figura 15. Posicionamento dos termopares em cada amostra.	38
Figura 16. Posição dos corpos de provas Charpy V em cada amostra.	40
Figura 17 PP fabricado via DED-GMAW.....	41
Figura 18. Altura PP1 (Amostra de baixa energia com resfriamento ao ar)....	42
Figura 19. Altura PP2 (Amostra de alta energia com resfriamento ao ar).	42
Figura 20. Altura PP3 (Amostra de baixa energia com resfriamento a água). 42	
Figura 21. Altura PP4 (Amostra de alta energia com resfriamento a água)....	43
Figura 22. Diferenças de Médias para Altura IC 95% de Tukey.....	44

Figura 23. Largura PP1 (Amostra de baixa energia com resfriamento ao ar).	44
Figura 24. Largura PP2 (Amostra de alta energia com resfriamento ao ar).	45
Figura 25. Largura PP3 (Amostra de baixa energia com resfriamento a água).	45
.....	45
Figura 26. Largura PP4 (Amostra de alta energia com resfriamento a água).	45
Figura 27. Energia de Deposição das Amostras.	47
Figura 28. Ciclo Térmico T1 (camada 6).	49
Figura 29. Ciclo Térmico T2 (camada 19).	50
Figura 30. Ciclo Térmico T3 (camada 28).	51
Figura 31. Efeitos Principais TRT1.	53
Figura 32. Interação entre fatores para TRT1.	53
Figura 33. Efeitos principais para TRT2.	54
Figura 34. Interação entre fatores para TRT2.	55
Figura 35. Efeitos principais para TRT3.	56
Figura 36. Interação entre fatores para TRT3.	56
Figura 37. Média das energias absorvidas de cada amostra.	57
Figura 38. Diferenças de Médias de Energia absorvida para IC 95% de Tukey.	58
.....	58
Figura 39. Efeitos principais para $E_{ab}(J)$.	58
Figura 40. Interação para $E_{ab}(J)$.	59
Figura 41 Gráfico de Pareto para resposta Energia absorvida (J)	60
Figura 42. Imagem do centro do entalhe de PP1.	61
Figura 43. Imagem do centro do entalhe de PP2.	61
Figura 44. Imagem do centro do entalhe de PP3.	62
Figura 45. Imagem do centro do entalhe de PP4.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Vantagens e Desvantagens DED-GMAW.....	27
Tabela 2 Composição química porcentagem mássica do substrato.....	32
Tabela 3 Composição química ER110S-1 (% em peso)	33
Tabela 4 Parâmetros utilizados durante a fabricação das amostras	37
Tabela 5 Amostras DED-GMAW com delineamento experimental fatorial completo.	39
Tabela 6 Média dos valores de largura das amostras	46
Tabela 7 Médias dos valores de energia de deposição.	47
Tabela 8 Altura aproximada dos termopares	48
Tabela 9 Taxas de resfriamento amostra/termopar	52
Tabela 10 Valores de energia absorvida de cada amostra.	57

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	5
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	16
2. OBJETIVO	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1. MANUFATURA ADITIVA USANDO METAIS.....	19
3.1.1. CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE MA EM METAIS.....	20
3.1.2. DEPOSIÇÃO COM ENERGIA DIRECIONADA - DED.....	25
3.1.2.1. MANUFATURA ADITIVA USANDO DED – ARCO ELÉTRICO (DED-GMAW) 26	26
3.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS	30
3.3.1. MÉTODO DE ENSAIO CHARPY V	31
4. METODOLOGIA	32
4.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	32
4.1.1. SUBSTRATO.....	32
4.1.2. ARAME DE DEPOSIÇÃO	33
4.1.3. EQUIPAMENTOS	33
4.2. FABRICAÇÃO DO PRODUTO PLANO	37
4.3. CÁLCULO DA ENERGIA DE DEPOSIÇÃO	38
4.4. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5.1 GEOMETRIA DAS CAMADAS	41

5.2	ANÁLISE TÉRMICA	46
5.2.1	ENERGIA DE DEPOSIÇÃO	46
5.2.2	TAXA DE RESFRIAMENTO	48
5.3.	ENERGIA ABSORVIDA DE IMPACTO	56
5.4.	FRACTOGRAFIAS (MEV)	60
6.	CONCLUSÕES	63
	IMPACTO SOCIAL	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
	APÊNDICES	73
	APÊNDICE A	73
	APÊNDICE B	74
	APÊNDICE C	75
	APÊNDICE D	76
	APÊNDICE E	77
	APÊNDICE F	78
	APÊNDICE G	79
	APÊNDICE H	80
	APÊNDICE I	81
	APÊNDICE J	82
	APÊNDICE K	84
	APÊNDICE L	85

APÊNDICE M	86
APÊNDICE N.....	87
APÊNDICE O.....	88
APÊNDICE P	89
APÊNDICE Q.....	91

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Após mais de 30 anos de intensa pesquisa e desenvolvimento, a Manufatura Aditiva (MA) se firma como um processo de fabricação estabelecido, sendo amplamente utilizado na indústria aeroespacial (HUANG *et al.*, 2013).

Dentre as várias técnicas de MA, a Manufatura Aditiva por deposição com energia direcionada (*Directed Energy Deposition* - DED) via GMAW (*Gas Metal Arc Weld*), se apresenta como uma alternativa vantajosa para a produção de componentes de médio a grande porte. Isso se deve às altas taxas de deposição, potencialmente sem limites de volume de construção, baixas taxas de defeitos na fabricação e custos reduzidos de matéria-prima e equipamento quando comparada a outras técnicas. A redução significativa de desperdício de material e prazos de entrega são um dos principais fatores motivadores do uso de DED-GMAW (WILLIAMS *et al.*, 2016).

A MA metálica tem maior atenção no método de Deposição de Energia Direta (DED) onde a energia na forma de calor é concentrada e utilizada para fundir o material geralmente fornecido em fio ou pó (ADDISPACE, 2016). Existem três principais categorias de métodos de DED para a MA de metais, que são baseados em arco elétrico, laser e feixe de elétrons. Embora os processos com fonte de energia concentrada (feixe de elétrons e laser) sejam mais precisos do que os que utilizam arco elétrico, o processo de arco elétrico apresenta algumas vantagens, como altas taxas de deposição de material, menor custo e adequação para fabricação de grandes componentes (ADINARAYANAPPA; SIMHAMBHATLA, 2017).

Ainda no DED, de acordo com os dados e dependendo do processo utilizado, a velocidade de deposição e potência podem variar muito gerando uma diferença de resfriamento e gradiente de temperatura de até 10 mil vezes, o que não ocorre em processos de fabricação convencionais (DEBROY *et al.*, 2021). A entrada de calor e a taxa de resfriamento tem efeito direto na microestrutura e nas propriedades mecânicas dos componentes produzidos o que implica na necessidade de um maior controle dos parâmetros para se obter peças confiáveis mecanicamente e de boa qualidade (WEI; DU, 2019),(LI *et al.*, 2019).

Existem dificuldades nesse controle de temperatura nos processos por DED-GMAW devido à grande entrega de calor, principalmente quando se aumenta a taxa de deposição pois aumenta consequentemente a entrada de calor. Nesse cenário, o calor excessivo pode gerar distorções de forma, tensões residuais, microestrutura com pouca resistência, oxidação entre outros aspectos indesejáveis para qualidade e resistência do produto fabricado (SCOTTI *et al.*, 2020).

As pesquisas estão se concentrando em estratégias de controle térmico durante a deposição. Isso inclui o desenvolvimento de sistemas de resfriamento auxiliares, como sistemas de resfriamento ativo e passivos integrados ao processo de deposição. Esses sistemas podem envolver o uso de fluidos refrigerantes, jatos de ar ou outras tecnologias para melhorar a dissipação de calor e controlar a taxa de resfriamento, evitando problemas relacionados ao resfriamento rápido (SCHARF-WILDENHAIN *et al.*, 2023), (MÜLLER *et al.*, 2019).

A pesquisa proposta apresenta vários pontos que servem de justificativa para a sua realização. Dentre esses pontos destacam-se a melhoria do processo de manufatura pois o estudo do resfriamento acelerado pode resultar em produtos com desempenho aprimorado. A eficiência de produção é outro ponto que pode ser melhorado pois um resfriamento acelerado do processo pode reduzir significativamente o tempo total de fabricação das peças, o que é um fator importante na produção industrial. Existe também uma contribuição em setores que exigem alta confiabilidade e desempenho como as indústrias automotiva, aeronáutica e médica. Por fim, contribui para os avanços científicos e tecnológicos da área de manufatura aditiva de metais, servindo de base para outras pesquisas e desenvolvimentos de diretrizes de fabricação.

2. OBJETIVO

Identificar entre os fatores, tipo de resfriamento (ao ar ou com sistema de resfriamento indireto a água) e energia de deposição (alta e baixa), qual o de maior influência sobre a tenacidade ao entalhe de um produto plano produzido por DED-GMAW.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MANUFATURA ADITIVA USANDO METAIS

A manufatura aditiva usando metais, popularmente conhecida como impressão 3D de metais, é uma tecnologia revolucionária que permite a fabricação de componentes metálicos adicionando camada por camada, a partir de um modelo digital. Essa abordagem inovadora oferece diversas vantagens em comparação aos métodos tradicionais de fabricação, incluindo maior liberdade de *design*, redução de desperdício de material e a capacidade de produzir peças personalizadas de maneira mais eficiente (AHN, 2021)(ZADI-MAAD; ROHIB; IRAWAN, 2018).

A MA garante a montagem de uma única peça ou fabricação personalizada, devido à capacidade dos processos de reduzir o custo total de fabricação, por meio de um processo de fabricação focado que reduz o tempo de tarefa, o desperdício de material e, conseqüentemente, melhora a relação entre o material comprado e o material utilizado na peça final (*Buy to Fly - BTF*), ao mesmo tempo em que aumenta a flexibilidade do *feedback* para transformar a matéria-prima em uma estrutura (DEREKAR, 2018).

A manufatura aditiva com metais tem ganhado destaque como uma tecnologia promissora na fabricação de componentes complexos. Esse processo envolve a adição de camadas sucessivas de material metálico fundido, resultando na construção tridimensional da peça desejada. A produção de geometrias complexas, também é um diferencial, reduzindo a necessidade de processos de usinagem e aumentando a eficiência do processo de fabricação (DEBROY *et al.*, 2018)(ZADI-MAAD; ROHIB; IRAWAN, 2018).

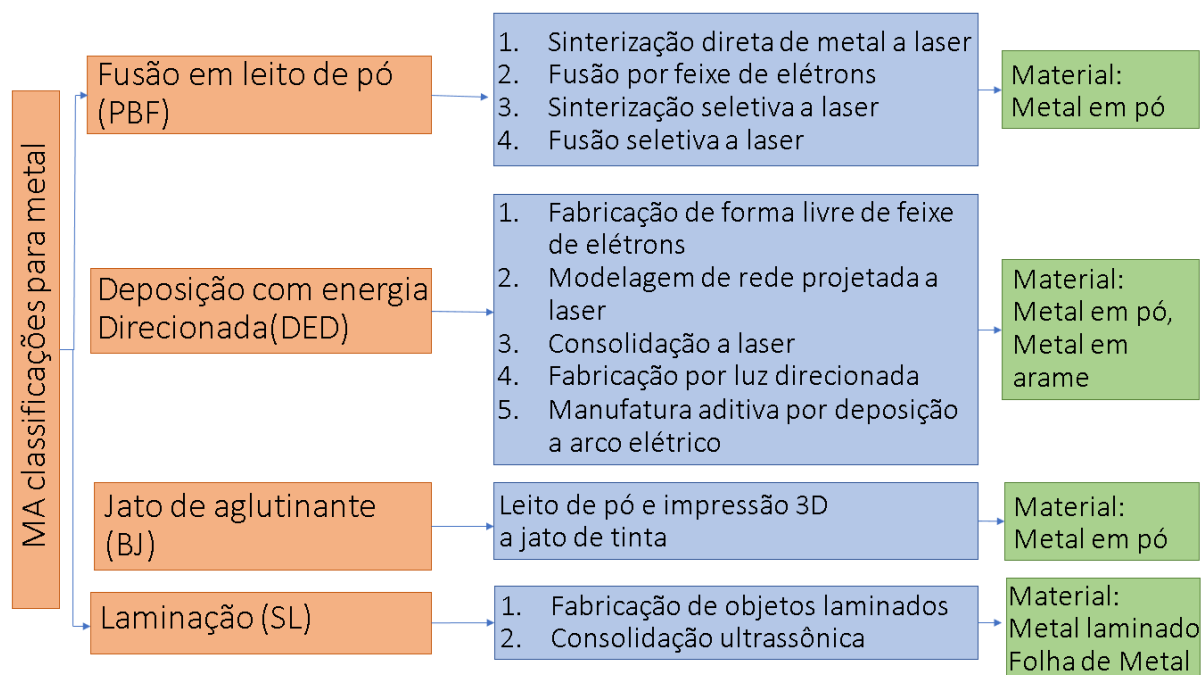
As pesquisas atuais encontram-se na melhoria e eficiência de processo. A pesquisa de TAPIA, 2014 concentra-se na monitorização e controle de processos na manufatura aditiva com metais. Os autores destacam a importância de técnicas avançadas de monitorização em tempo real, como análise de imagem e sensores, para garantir a qualidade e a consistência das peças fabricadas. O controle adequado dos parâmetros do processo é essencial para evitar defeitos e alcançar propriedades mecânicas desejadas (XIA *et al.*, 2020).

Os estudos de BANDYOPADHYAY; HEER, (2018) abordam os avanços na manufatura aditiva com que envolvem a utilização de múltiplos materiais e a escala de fabricação. A capacidade de imprimir componentes com diferentes materiais metálicos e cerâmicos e combinar propriedades específicas abre novas possibilidades de projeto e aplicações. Além disso, a pesquisa destaca a importância do desenvolvimento de métodos para a manufatura em larga escala, visando a viabilidade comercial dessa tecnologia.

3.1.1. CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE MA EM METAIS

Os processos de MA para peças metálicas podem ser classificados com base nas tecnologias utilizadas ou no estado da matéria-prima empregada. Em relação às tecnologias, existem quatro subcategorias principais: *Powder Bed Fusion* - PBF (fusão em leito de pó), *Binder Jetting* - BJ (jato aglutinante) e *Sheet Lamination* – SL (laminação) e *Directed Energy Deposition* (deposição com energia direcionada). A figura 1 ilustra as categorias de MA para metais bem como os tipos de energia e matéria prima (LI; SU; ZHU, 2022).

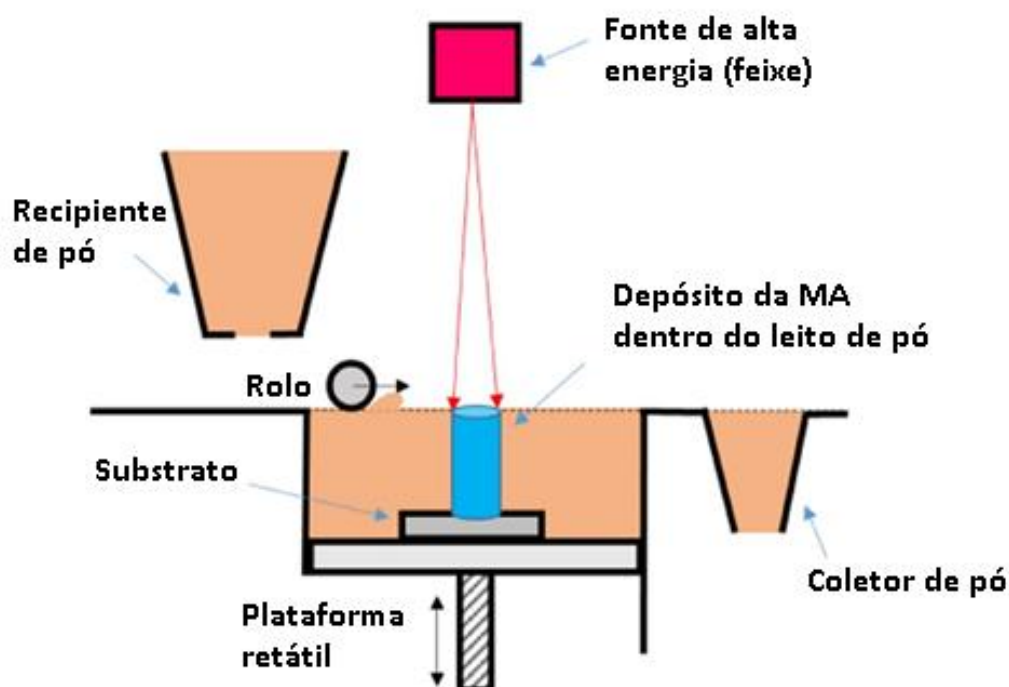
Figura 1. Categorias de MA para metais. Adaptado de (LI; SU; ZHU, 2022).



A fusão em leito de pó (*Powder Bed Fusion* - PBF) é um dos principais processos utilizados na manufatura aditiva. Sua descoberta remonta aos anos 1980, quando pesquisadores e cientistas começaram a explorar métodos de fabricação por adição de material em pó unindo tecnologias como laser, comando numérico computadorizado (CNC), robô e sistemas gráficos (DEV SINGH; MAHENDER; RAJI REDDY, 2021).

A PBF utiliza um leito de pó como material base para a construção da peça. O processo é iniciado com uma camada fina e uniforme de pó espalhada sobre uma plataforma. Em seguida, um feixe de energia, como um laser ou um feixe de elétrons, é direcionado para fundir seletivamente o pó, solidificando-o em uma camada sólida. A plataforma é então abaixada para a próxima camada de pó ser adicionada, repetindo-se o processo até que a peça esteja completamente formada (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010). A figura 2 ilustra o esquema PBF.

Figura 2. Esquema ilustrativo do PBF. Adaptado de (KOK et al., 2018).



Uma das características principais da PBF é a capacidade de produzir peças com alta precisão e complexidade geométrica. Ela permite a fabricação de estruturas internas complexas, como canais de refrigeração ou geometrias intrincadas, que seriam difíceis ou impossíveis de serem alcançadas por meio de métodos

convencionais de fabricação. Além disso, a PBF é adequada para uma ampla variedade de materiais, incluindo metais, polímeros e cerâmicas (SINGH *et al.*, 2019).

Os mecanismos da PBF variam dependendo do tipo de energia utilizada. No caso do laser, o feixe funde ou sinteriza seletivamente o pó, solidificando-o em cada camada sucessiva. Já o feixe de elétrons tem um efeito semelhante, aquecendo o pó para sua fusão e solidificação. A precisão é alcançada pelo controle preciso do feixe de energia, que permite a fusão seletiva do pó de acordo com o projeto da peça (DHANESH; DHANAWADE; BHATWADEKAR, 2017), (STAVROPOULOS; FOTEINOPOULOS, 2018).

Entre as vantagens da PBF estão a alta resolução, a qualidade de superfície e a capacidade de produzir peças com propriedades mecânicas superiores. Além disso, a PBF é adequada para a fabricação de peças personalizadas, protótipos funcionais e até mesmo produção em série. A tecnologia também permite a fabricação de peças com redução de material e menor desperdício (DEV SINGH; MAHENDER; RAJI REDDY, 2021).

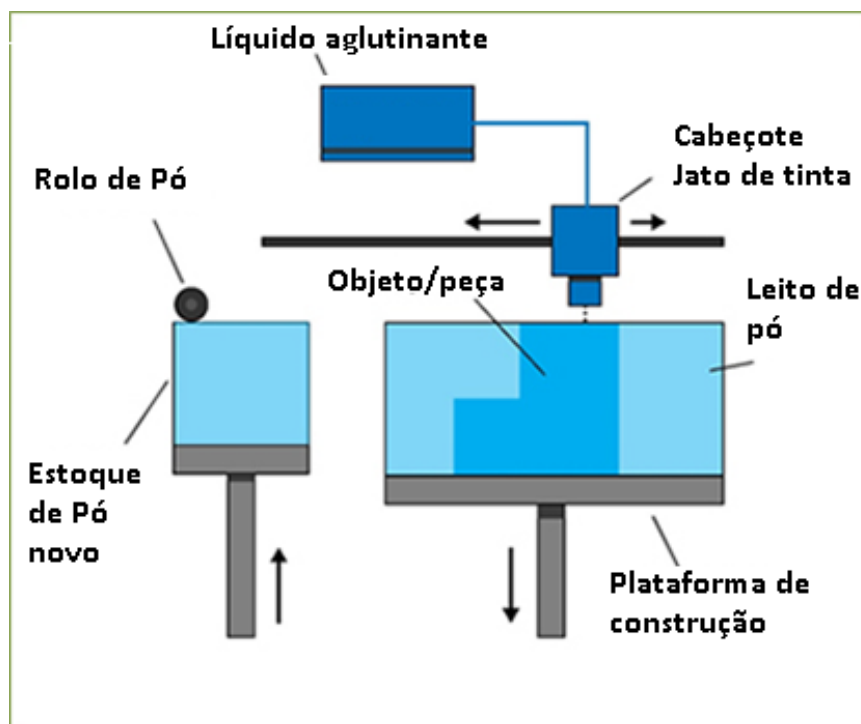
No entanto, a PBF também possui algumas desvantagens. O tempo de construção pode ser relativamente longo, dependendo da complexidade da peça e do tamanho do leito de pó. Além disso, a tecnologia requer equipamentos sofisticados e um ambiente controlado para garantir a qualidade do processo. Outro desafio é o pós-processamento, que pode ser necessário para melhorar a qualidade superficial da peça (KOK *et al.*, 2018).

O processo de *Binder Jetting* (BJ) é uma técnica de manufatura aditiva que permite a produção de peças tridimensionais através da deposição controlada de camadas de pó e aglutinante. A descoberta do BJ remonta aos anos 90, quando os pesquisadores buscavam uma forma mais rápida e eficiente de fabricar peças com geometrias complexas (ZIAEE; CRANE, 2019).

O BJ envolve a deposição de uma fina camada de pó de material, como metal, cerâmica ou polímero, em uma plataforma de construção. Em seguida, um cabeçote de impressão, como mostra a figura 3, deposita uma gota de aglutinante líquido em pontos específicos da camada de pó, solidificando-o e unindo as partículas entre si. Esse processo é repetido camada por camada, até que a peça esteja completamente formada (VENUKUMAR *et al.*, 2023).

Uma das principais características do BJ é sua capacidade de produzir peças em uma escala relativamente rápida, uma vez que não há necessidade de fusão ou solidificação por meio de calor intenso, como em outros processos de MA. Além disso, a técnica permite a fabricação de peças com alta complexidade geométrica e detalhes finos (SU *et al.*, 2022).

Figura 3. Esquema ilustrativo do Binder jetting. Adaptado de (FERIOTTI *et al.*, 2021).



Os mecanismos do BJ envolvem a deposição precisa de pó e aglutinante em camadas sucessivas, seguida pela união das partículas por meio da solidificação do aglutinante. O aglutinante pode ser uma substância líquida ou sólida que tem a função de aderir as partículas de pó, formando uma estrutura coesa (DOYLE *et al.*, 2015).

Entre as vantagens do BJ, destacam-se a capacidade de produzir peças com alta resolução, detalhes mínimos e complexidade geométrica. Além disso, a técnica oferece uma ampla variedade de materiais utilizáveis, incluindo metais, cerâmicas e polímeros. A produção em grande escala também é possível com o BJ (MARIANI *et al.*, 2021).

No entanto, o processo também apresenta algumas desvantagens. A qualidade superficial das peças produzidas pelo BJ pode ser inferior em comparação com outros

processos, exigindo pós-processamento para alcançar uma superfície lisa e adequada. Além disso, a resistência mecânica das peças pode ser limitada em comparação com outros métodos de fabricação aditiva (MARIANI *et al.*, 2021).

O processo de *Sheet Lamination* SL é uma técnica de MA que utiliza camadas de folhas ou fitas de material para construir peças tridimensionais. A descoberta do SL ficou nos anos 90, quando pesquisadores buscavam alternativas aos processos tradicionais de manufatura para a fabricação de objetos com geometrias complexas (BALOGLU; WILLNER, 2016).

O SL envolve a sobreposição de camadas de folhas ou fitas de material, geralmente plástico, papel ou metal, utilizando técnicas como colagem, soldagem ou adesão. As camadas são então cortadas de acordo com o perfil desejado da peça e, em seguida, unidas ou consolidadas para formar a estrutura final. Esse processo é repetido camada por camada até que a peça esteja completa (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

Os mecanismos do SL envolvem a sobreposição e união das camadas de folhas ou fitas de material. A colagem, soldagem ou adesão entre as camadas é essencial para garantir a integridade estrutural da peça. Dependendo do material utilizado, podem ser necessários processos de pós-processamento, como remoção de suportes ou acabamento superficial (JADHAV; JADHAV, 2022).

Entre as vantagens do SL, destacam-se a capacidade de fabricar peças de grande porte, a baixa complexidade dos equipamentos necessários e a possibilidade de trabalhar com uma ampla variedade de materiais. Além disso, o processo é relativamente rápido e permite a criação de peças com geometrias complexas. No entanto, o SL também apresenta algumas desvantagens. A precisão dimensional e a resolução superficial podem ser inferiores em comparação com outros processos de manufatura aditiva mais precisos, como a fusão seletiva a laser. Além disso, a resistência mecânica das peças pode ser afetada devido às interfaces entre as camadas e aos processos de união utilizados (JADHAV; JADHAV, 2022)(GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

3.1.2. DEPOSIÇÃO COM ENERGIA DIRECIONADA - DED

A última classificação trata-se da deposição com energia direcionada a qual será objeto de estudo desse trabalho. DED é uma técnica utilizada na manufatura aditiva, que consiste na adição controlada de material para construir ou reparar componentes tridimensionais. Nesse processo, um feixe de energia, como um laser ou um arco elétrico, é direcionado para fundir o material de alimentação em pó ou arame, que é depositado camada por camada, formando a peça desejada, (figura 4) (SHIM *et al.*, 2016).

Figura 4. DED-L (Deposição de energia direta a laser). Fonte:hannaamt.com



O DED é conhecido por sua versatilidade, permitindo a fabricação de peças com geometrias complexas, tamanhos variados e uma ampla gama de materiais, incluindo metais, polímeros e cerâmicas. Essa técnica oferece a capacidade de construir peças sob medida ou realizar reparos precisos em componentes danificados, reduzindo a necessidade de substituição completa (AHN, 2021).

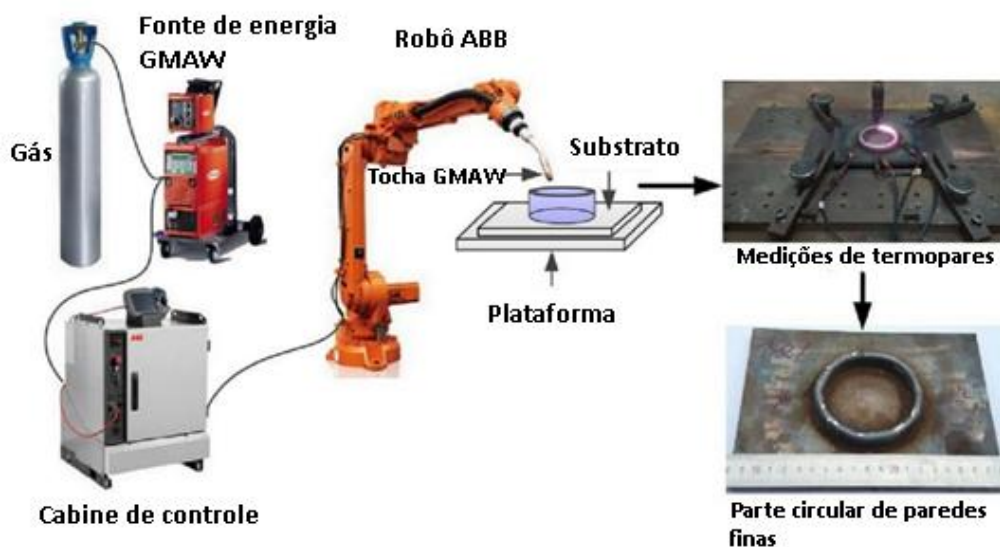
Dentre as variantes do DED, destaca-se a deposição de energia direta a arco elétrico. Nessa abordagem, um arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo e a peça de trabalho, gerando uma alta temperatura que funde o material de alimentação e o deposita na superfície de fabricação. A deposição a arco elétrico oferece vantagens como alta taxa de deposição, excelente aderência entre as camadas e a possibilidade de trabalhar com uma ampla gama de ligas metálicas (AHN, 2021).

3.1.2.1. MANUFATURA ADITIVA USANDO DED – ARCO ELÉTRICO (DED-GMAW)

A manufatura aditiva usando DED-GMAW tem se mostrado uma técnica promissora na fabricação de componentes metálicos. Esse processo combina as vantagens da soldagem com o potencial da manufatura aditiva, permitindo a deposição direta de material metálico fundido através do arco elétrico. O processo DED-GMAW utiliza como fonte de energia o processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) ou MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*) o qual utiliza o arco elétrico como fonte de calor (DEBROY *et al.*, 2018).

O sistema é composto basicamente por uma fonte de soldagem GMAW, um alimentador de arame, e um robô ou sistema CNC para controle de movimentação e posicionamento. A figura 5 ilustra um sistema DED-GMAW que utiliza um robô para movimentar a tocha de deposição.

Figura 5. Equipamentos DED-GMAW. Adaptado de (LI; XIONG, 2019).



Quanto aos materiais, o DED-GMAW é compatível com uma ampla variedade de metais, incluindo ligas de aço, titânio, níquel e alumínio em forma de arame. Isso possibilita a fabricação de peças com propriedades mecânicas específicas para atender às necessidades de diversas aplicações industriais (DEBROY *et al.*, 2018).

Para garantir a qualidade e precisão do processo, vários parâmetros devem ser cuidadosamente observados. A velocidade de deposição, a taxa de alimentação do material, a potência do feixe de energia ou da corrente do arco, a taxa de diluição e a temperatura de fusão são alguns dos principais parâmetros que afetam o resultado. Um controle adequado desses parâmetros é essencial para evitar defeitos, como porosidades, trincas ou desvios dimensionais (SINGH; SHARMA; RATHOD, 2020).

Além disso, é importante considerar a interação entre o arco e o metal de base, especialmente em ligas sensíveis ao calor, a fim de minimizar a zona afetada pelo calor (ZAC) e preservar a integridade do material (ISRAR; BUHL; BAMBACH, 2021). Alguns fatores tornam o processo vantajoso em relação a outros, principalmente no que se trata de produtividade. Porém existem também desvantagens conforme vemos na tabela 1 um compilado de vantagens e desvantagens do DED-GMAW.

Tabela 1 Vantagens e Desvantagens DED-GMAW.

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Custo reduzido	Tensões residuais e distorções
Construção de peças de grande porte	Experiência do operador
Velocidade de deposição	Acabamento grosseiro
Possibilidade de reparos e recuperação	Restrições em alguns materiais
Personalização e otimização de peças	Pós-processamento
Facilidade na programação de trajetória	<i>Heat accumulation</i> (acúmulo de calor)

As aplicações do DED-GMAW são vastas e incluem a produção de peças de reposição, reparo e recuperação de componentes industriais desgastados ou danificados, prototipagem rápida de peças de engenharia e produção de componentes estruturais em indústrias aeroespaciais, automotivas, naval e de energia (TAŞDEMİR; NOHUT, 2020).

A manufatura aditiva usando DED-GMAW oferece um potencial significativo na fabricação de peças metálicas personalizadas e complexas. A combinação da deposição de energia direta por arco elétrico com a soldagem GMAW permite um

controle do processo de deposição e das propriedades mecânicas do material. O controle dos parâmetros do processo, a otimização da eficiência energética e a escolha adequada dos materiais são elementos-chave para o sucesso da MA com DED-GMAW (DING *et al.*, 2015).

3.2. CONDIÇÕES DE RESFRIAMENTO

A problemática em torno do processo DED-GMAW está relacionada à taxa de resfriamento e à temperatura alcançada durante o processo de fabricação. Durante a deposição do material metálico por arco elétrico, uma quantidade significativa de calor é gerada, resultando em altas temperaturas as quais geram modificações no material, que se acumulam na região de fusão. Essas altas temperaturas podem levar a problemas como o desenvolvimento de tensões residuais, deformações e até mesmo a formação de defeitos estruturais, como trincas e inomogeneidades (SURYAKUMAR *et al.*, 2013).

Conforme a altura aumenta, devido ao número de camadas, mais energia na forma de calor é acumulado. Esse calor aumenta a molhabilidade, porém também aumenta a quantidade de material depositado e reduz a ondulação das camadas (RODRIGUES *et al.*, 2019).

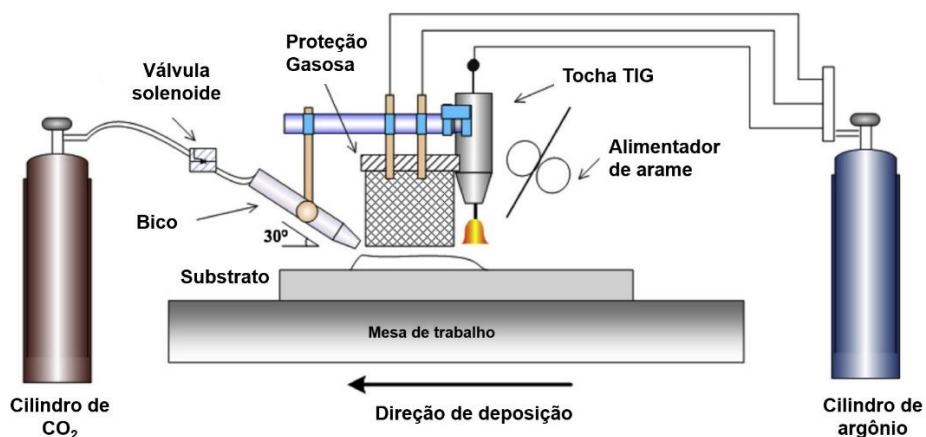
A microestrutura de solidificação, incluindo o tamanho e a forma dos grãos, depende principalmente do histórico térmico durante o processo de fabricação. Isso significa que, se o resfriamento durante a deposição for devidamente controlado, é possível obter as microestruturas desejadas e as propriedades mecânicas resultantes com um desempenho aceitável (WU *et al.*, 2018b).

Uma das alternativas de gerenciamento térmico do processo, seria aguardar o resfriamento da camada anterior até uma temperatura não crítica, para que a próxima camada seja depositada de forma mais estável e com menos calor acumulado. Contudo, esse tipo de resfriamento natural demanda longas esperas, sobretudo quando vai aumentando o número de camadas, o que prejudica a produtividade (ISRAR; BUHL; BAMBACH, 2021).

Algumas alternativas para acelerar esse processo de resfriamento vem sendo estudado ao longo dos anos. O uso de gás CO₂ forçado entre camadas na manufatura aditiva por arco elétrico, conforme mostra esquema da figura 6, melhora a eficiência

da fabricação por meio da diminuição do tempo de espera entre depósito de camadas além de outros benefícios como acabamento e microestrutura refinada (WU *et al.*, 2018a).

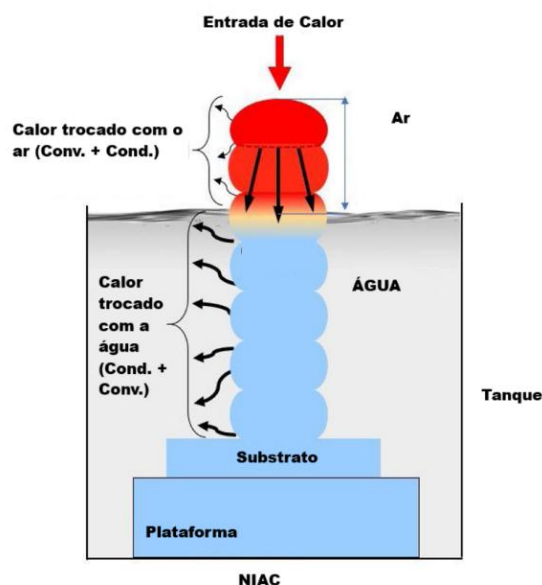
Figura 6. Sistema de deposição com resfriamento forçado entre camadas. Adaptado de (WU *et al.*, 2018a).



Fonte

Outra técnica criada para o gerenciamento térmico do processo foi o resfriamento ativo de quase imersão ou NIAC (*Near Immersive Active Cooling*), ilustrado na figura 7. Essa técnica consiste em fazer a deposição de material via arco elétrico dentro de um tanque com água. O nível da água vai subindo à medida que as camadas vão sendo depositadas melhorando a dissipação do calor. Dessa maneira o acúmulo de calor é mitigado e os problemas relativos a ele também (SILVA *et al.*, 2020).

Figura 7. Sistema de resfriamento NIAC. Adaptado de (SCOTTI *et al.*, 2020).



Entretanto, o uso de sistemas de remoção de calor em produtos metálicos fabricados com aços de alta resistência pode levar a alterações das propriedades mecânicas por meio da redução das taxas de resfriamento. Assim, o uso de aços de alta resistência, como o ER110S-1, apresenta desafios e oportunidades para a tecnologia DED-GMAW por oferecer a possibilidade de fabricar produtos de alta resistência e atender a requisitos de projetos mais complexos (MIRZAEI *et al.*, 2013; WANDTKE *et al.*, 2023; WEBER *et al.*, 2024). Entre os requisitos de projetos, podem-se destacar a alta resistência à tração e a energia absorvida no ensaio Charpy. Entretanto, para evitar problemas como a formação de microestruturas indesejáveis e a perda de propriedades mecânicas significativas, é necessário um controle rigoroso dos parâmetros de fabricação, que influenciam os ciclos térmicos, devido à complexidade microestrutural desses aços (MÜLLER; HENSEL; DILGER, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2019).

3.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Após discutir as técnicas de resfriamento em processos de DED-GMAW, é essencial compreender as propriedades mecânicas das peças fabricadas por esta tecnologia. O controle térmico afeta diretamente as propriedades, influenciando a performance dos componentes metálicos finais.

A avaliação das propriedades mecânicas é uma das maneiras mais eficazes de garantir que os componentes cumpram os requisitos de aplicação (SONG *et al.*, 2023).

Entre as muitas propriedades avaliadas, a tenacidade ao impacto é uma das mais importantes. A tenacidade ao impacto mede a capacidade de um material de absorver energia e deformar-se plasticamente antes de fraturar (WU *et al.*, 2018c).

3.3.1. MÉTODO DE ENSAIO CHARPY V

O ensaio de impacto Charpy V é amplamente utilizado para avaliar essa característica. O teste envolve a preparação de corpos de prova entalhados, que são então submetidos a um impacto mecânico. A energia absorvida durante a fratura de um corpo de prova é medida, fornecendo uma indicação clara da tenacidade do material. A avaliação da absorção de energia de impacto é particularmente relevante em indústrias como a aeronáutica e a automotiva, onde a resistência à fratura de um metal é crítica. A compreensão e o controle dessas propriedades mecânicas dos componentes fabricados por DED-GMAW permitem a produção de peças mais seguras e eficientes (WALLIN, 2022).

Na literatura atual existe uma boa quantidade de estudos sobre o arame de alimentação ER70S-6, no que diz respeito a propriedades mecânicas como impacto, dureza, tensão, fadiga e propriedades de fratura. Porém o mesmo não acontece com o ER110S-1 e outros aços de alta resistência que necessitam de mais investigações em situações de MA (KESSLER; SHERMAN, 2024).

3.3.2 FRACTOGRAFIA

A fractografia, em princípio, é o estudo das características de fratura dos materiais ao avaliar os padrões de superfície, microestruturas e propriedades mecânicas do material. Na manufatura aditiva, este ensaio é considerado crítico, devido à possibilidade de presença de defeitos não tradicionais, como porosidades, vazios, inclusões, fissuras e trincas, que podem ser introduzidos durante o processo de construção da peça (MORAIS *et al.*, 2014).

Nos processos de manufatura aditiva, as fractografias são relevantes pois fornecem dados para melhorar o projeto e controle de processos. O estudo das fractografias permite aos pesquisadores e engenheiros entenderem as características das fraturas resultantes dos processos de manufatura aditiva, o que pode resultar em melhorias significativas na qualidade e confiabilidade dos componentes produzidos.

Cada tipo de defeito obtido revela padrões específicos observados através do ensaio de fractografia. O exame adequado de fractografia em uma peça produzida pela manufatura aditiva exige a aplicação de técnicas analíticas, como a microscopia eletrônica de varredura (MEV). A MEV, em particular, é uma ferramenta essencial para análise dos padrões de ruptura, pois oferece imagens de alta resolução do local de fratura.

Além do mais, o estudo das fractografias na manufatura aditiva, contribui diretamente para o desenvolvimento de um conjunto de procedimentos de controle de qualidade e padrões de inspeção, para garantir a qualidade e a consistência dos componentes produzidos.

4. METODOLOGIA

4.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

4.1.1. SUBSTRATO

Foi utilizado como substrato chapas de aço ASTM A-36 de 6,35mm de espessura, medindo 210mm x 150mm conforme figura 8. A composição química do substrato é descrita na tabela 2.

Figura 8. Substrato.



Tabela 2 Composição química porcentagem mássica do substrato.

Material	C	Mn	Si	P	S
ASTM A36	0,29	1,20	0,40	0,04	0,05

4.1.2. ARAME DE DEPOSIÇÃO

O material utilizado na deposição foi o arame sólido de aço ER110S-1 com diâmetro de 1,2 mm, com resistência a tração de 760 MPa e 68 J a -51 °C (CP padrão pela norma ASTM A370) de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy V. A composição química do arame está descrita na tabela 3 conforme certificado do fabricante.

Tabela 3 Composição química ER110S-1 (% em peso)

C	Mn	Si	P	V	S	Ni	Cr	Mo	Ti	Zr	Al	Cu
0,030	1,610	0,360	0,0053	0,010	0,0035	2,460	0,280	0,310	0,0017	0,005	0,005	0,050

4.1.3. EQUIPAMENTOS

Para realização da deposição do metal foi utilizado um equipamento de DED-GMAW composto por uma fonte IMC™ Digiplus A7™ e como gás de proteção do arco elétrico, Argônio puro, como mostra a figura 9.

Figura 9. Fonte de deposição.



Para completar o sistema DED-GMAW, a fonte fica acoplada ao equipamento CNC GL-3020 (figura 10) que serve para fazer o deslocamento da pistola durante a deposição do metal. Dessa maneira a pistola pode se deslocar nos eixos X, Y e Z.

Figura 10. CNC com tocha acoplada.



Para controlar a movimentação do CNC foi utilizado o *software* livre MACH 3 de linguagem *G-code*, no qual é possível programar a trajetória de deposição do metal durante a fabricação.

O equipamento utilizado para realizar o resfriamento acelerado é um dispositivo constituído de uma mesa com um reservatório superior e outro inferior conforme figura 11. O reservatório superior serve para fazer o suporte do substrato e dentro dele há um sistema de jateamento de água. Essa água remove calor da parte de baixo do substrato acelerando o resfriamento durante a deposição. O reservatório inferior serve para armazenar a água que será bombeada dele para o reservatório superior. A água resfria o substrato e volta ao reservatório inferior por gravidade.

Figura 11. Dispositivo de resfriamento acelerado.



Durante a fabricação dos experimentos (PPs), a aquisição dos dados de deposição foi realizada utilizando o equipamento IMC[®] SAP V4Ti, figura 12. Os dados coletados serão tensão, corrente, temperatura, velocidade de alimentação do arame. O equipamento utiliza o *software* SAPTiv4.35s para coleta e monitoramento dos parâmetros.

Figura 12. Equipamento de aquisição de dados IMC SAP.



O Ensaio de impacto Charpy V foi realizado no laboratório, a temperatura ambiente de +25°C, através da máquina de ensaio de impacto marca “TINIUS OLSEN IT MQI 004” (conforme figura 13), capacidade 408 J, certificado 9648/2023 em 19/05/2023. As fractografias foram tiradas com o MEV Jeol JSM-IT500HR, figura 14.

Figura 13. Máquina de Ensaio Charpy.



Figura 14. Microscópio Eletrônico de Varredura.



4.2. FABRICAÇÃO DO PRODUTO PLANO

Este trabalho usará como amostra para o experimento o Produto Plano (PP), que se trata de uma parede produzida com a transferência metálica pulsada com frequência de pulsação de 100 Hz e com os parâmetros, tabela 4, que foram baseados em testes preliminares. A vazão do jato de água do sistema de resfriamento indireto foi de 6,1 L/min com temperatura entre 25° e 28°C na entrada e entre 30° e 34°C no retorno.

A transferência metálica pulsada foi escolhida para a produção das amostras, pois, devido às altas taxas de energia do processo GMAW, ela oferece uma distribuição de energia de deposição mais uniforme e controlada (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

Os PP's foram construídos depositando camada sobre camada linearmente com altura de 30 camadas e com comprimento de aproximadamente 190mm. A partir desses PP's, foram retirados os corpos de prova (CP) para a realização das análises.

Tabela 4 Parâmetros utilizados durante a fabricação das amostras

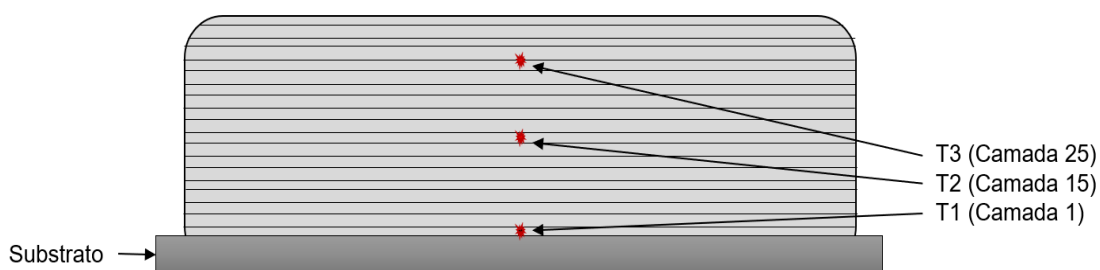
Parâmetros	Valores
Velocidade de Alimentação do arame (m/min)	5,5
Corrente de Pico (A)	250
Tempo de Pico (ms)	5
Corrente de Base (A)	125
Tempo de Base (ms)	5
Vazão do Gás (L/min)	15
Gás de Proteção	Argônio
DBCP (mm)	11
Temperatura entre Camadas	<100 °C

Os parâmetros (corrente e tensão do arco elétrico) foram adquiridos durante o processo de deposição com 5 kHz utilizando o equipamento IMC SAPTi. O *software*

SAPTiv4.35s foi utilizado para coleta dos ciclos térmicos, com 5 kHz, com um termopar tipo K, com 0,5 mm de diâmetro e soldado na 1ª, 15ª e 25ª camada, conforme mostra a figura 15. A temperatura adotada entre camadas foi menor que 100 °C e foi verificada com um pirômetro a laser.

Foram adquiridos os dados de temperatura através dos termopares T1 (1ª camada), T2 (15ª camada) e T3 (25ª camada). A partir desses dados foi possível extrair os ciclos térmicos das camadas por amostra. A partir dos ciclos térmicos foram extraídas as taxas de resfriamento. Foi escolhida uma faixa de temperatura entre 324°C e 200°C para obter as taxas de resfriamento. Essas temperaturas foram escolhidas devido todos os termopares conseguirem captar tais temperaturas. No T1 foi calculado a taxa de resfriamento com base na 6ª camada, no T2 foi calculado em função da 19ª camada e no T3 a taxa de resfriamento foi calculada em função da 28ª camada.

Figura 15. Posicionamento dos termopares em cada amostra.



Com esses 3 termopares foi realizado uma análise do experimento fatorial DOE (*Design os Experiments*), no qual relacionou as taxas de deposição nos 3 níveis de termopar com o tipo de resfriamento e com a média total de energia calculada de cada amostra. Para esses experimentos foi realizado um ajuste do nível de significância pelo procedimento *stepwise* de $\alpha = 0,15$ para indicar com mais clareza os fatores mais significativos do experimento.

4.3. CÁLCULO DA ENERGIA DE DEPOSIÇÃO

O cálculo da energia de deposição foi baseado nas equações de energia de soldagem e utilizou os valores de tensão e corrente adquiridos em cada PP. Assim, foi calculada a Potência Instantânea Média (*PIM*) de todas as 30 camadas

depositadas de cada amostra e os resultados foram utilizados na fórmula de energia de deposição (2). A determinação da energia entre alta e baixa foi realizada por meio da velocidade de deposição das camadas (V_d), à qual é inversamente proporcional a energia de deposição. Utilizando uma velocidade de deposição das camadas de 5 mm/s para energia alta e de 10 mm/s para energia baixa.

$$PIM = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \times I_i}{n} [W] \quad (1)$$

$$E = \frac{PIM}{V_d} [J/mm] \quad (2)$$

Na equação (1), U é a tensão, I é a corrente e n o número de amostras da aquisição. Na equação (2), E é a energia de deposição e V_d é a velocidade de deposição (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

4.4. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O arranjo experimental foi um fatorial completo 2^2 sem réplicas, no qual os dois fatores foram tipo de resfriamento categórico (ar e água) e energia de deposição (baixa e alta). Foram feitas quatro amostras conforme mostra a tabela 5.

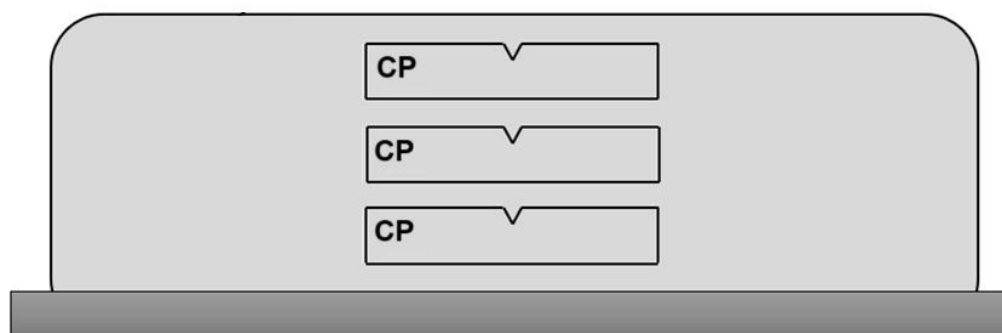
Tabela 5 Amostras DED-GMAW com delineamento experimental fatorial completo.

Produto	Tipo de	Energia de
Plano	Resfriamento	Deposição
PP1	Ar (+1)	Baixa (-1)
PP2	Ar (+1)	Alta (+1)
PP3	Água (-1)	Baixa (-1)
PP4	Água (-1)	Alta (+1)

Após a deposição de cada camada, foi realizada a medição da altura e da largura. Cada camada teve a medição nas extremidades e no centro da camada utilizando um paquímetro de 150 mm com resolução de 0,05 mm.

O ensaio de impacto Charpy V foi realizado com CP reduzido (2,5 mm x 10 mm x 55 mm) de acordo com a norma ASTM A370 in – 51 °C (WS A5.28). De cada PP foram retirados 9 CP's, conforme mostra a figura 16.

Figura 16. Posição dos corpos de provas Charpy V em cada amostra.



Foram realizadas fractografias dos CP's rompidos no ensaio de impacto Charpy V pela técnica de microscopia de eletrônica de varredura (MEV).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 GEOMETRIA DAS CAMADAS

A análise da geometria das camadas de cada PP, como exemplo a figura 17, foi realizada para avaliar a consistência e a qualidade do processo de manufatura aditiva DED-GMAW. Neste aspecto, foram explorados elementos como, a média de altura e largura das camadas, análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey.

Figura 17 PP fabricado via DED-GMAW



Foram realizadas 3 medidas de altura em cada camada, uma central e uma em cada extremidade. Os apêndices A, B, C e D tem todas as medições de altura e largura dos PP's. Os gráficos (Figuras 18, 19, 20 e 21) mostram as medidas de altura central dos PP's. Os gráficos de barras vermelhas são de alta energia e os de barras azuis são de baixa energia.

A altura e a largura média das camadas foram calculadas para todas os PP's. As médias foram calculadas excluindo as 3 primeiras camadas de cada PP pois as camadas iniciais podem apresentar variações devido aos ajustes iniciais do processo além de sofrer influência do substrato, ou seja, 27 camadas foram consideradas. Após a realização do teste de normalidade das alturas (apêndice I), foi constatado que os dados seguem uma distribuição normal para todas as amostras. Após essa análise prévia, foi aplicada a ANOVA para analisar a variação na altura das camadas.

Figura 18. Altura PP1 (Amostra de baixa energia com resfriamento ao ar).

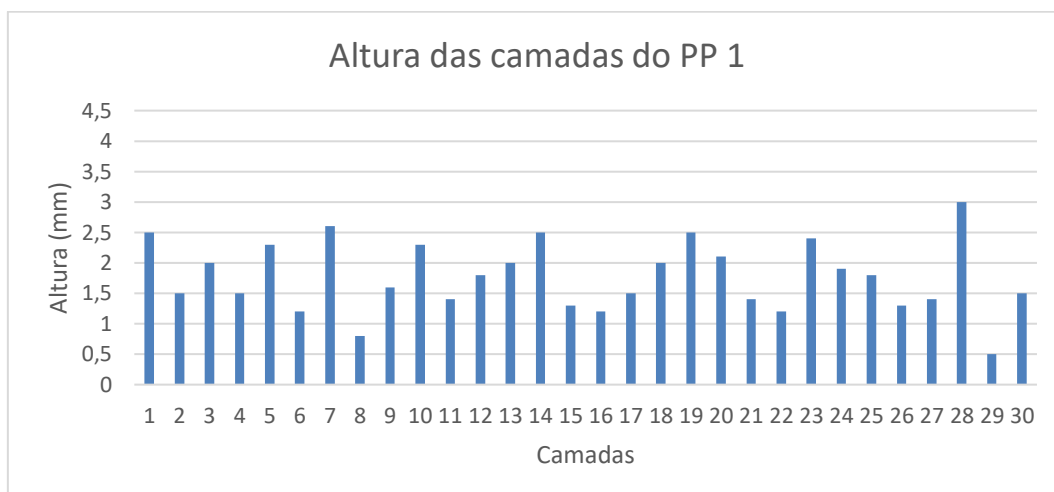


Figura 19. Altura PP2 (Amostra de alta energia com resfriamento ao ar).

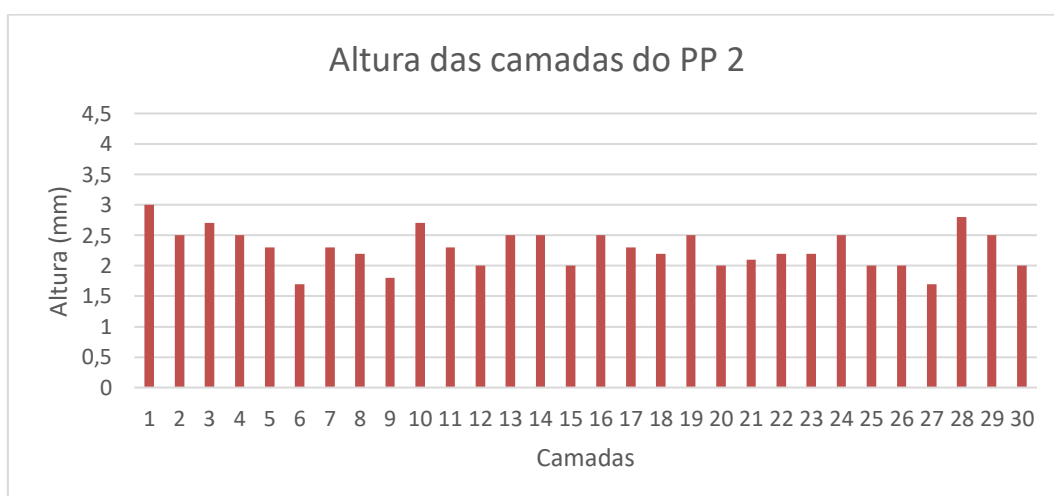


Figura 20. Altura PP3 (Amostra de baixa energia com resfriamento a água).

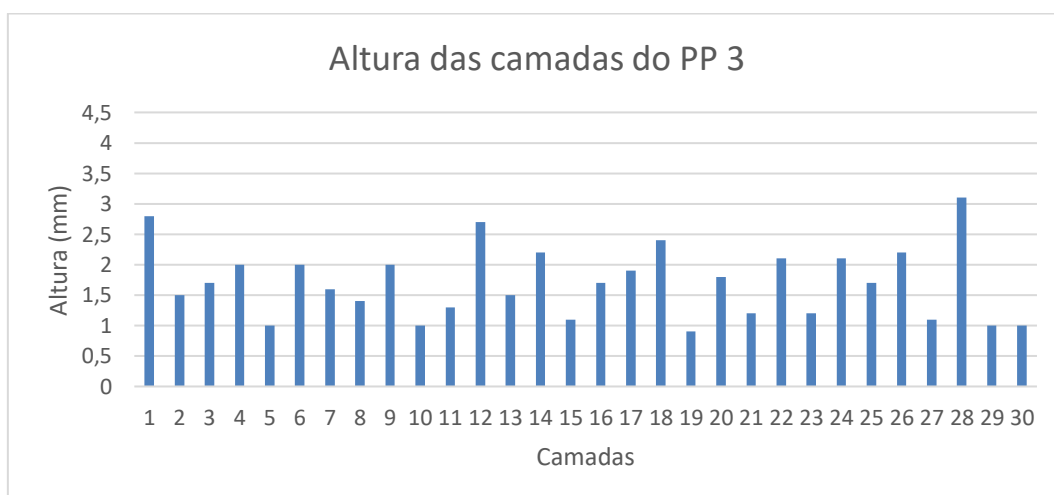
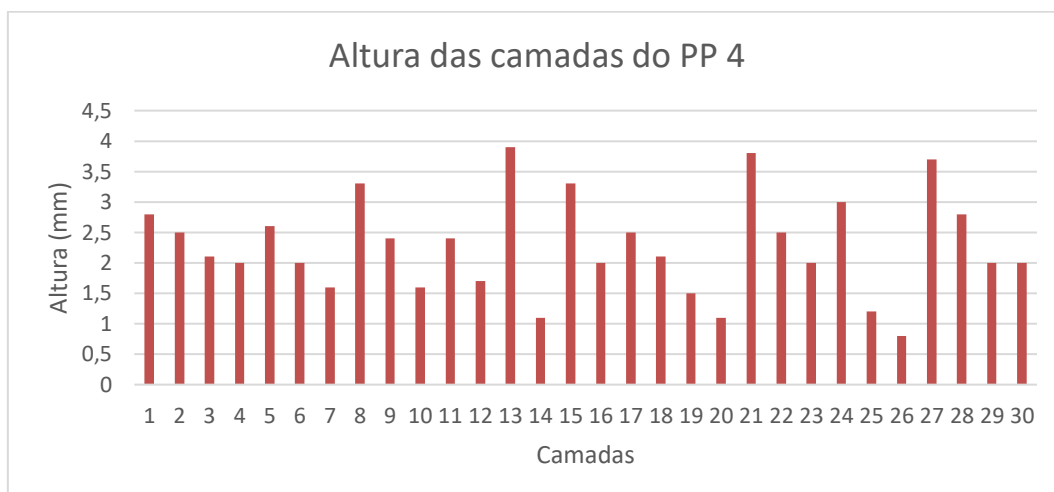


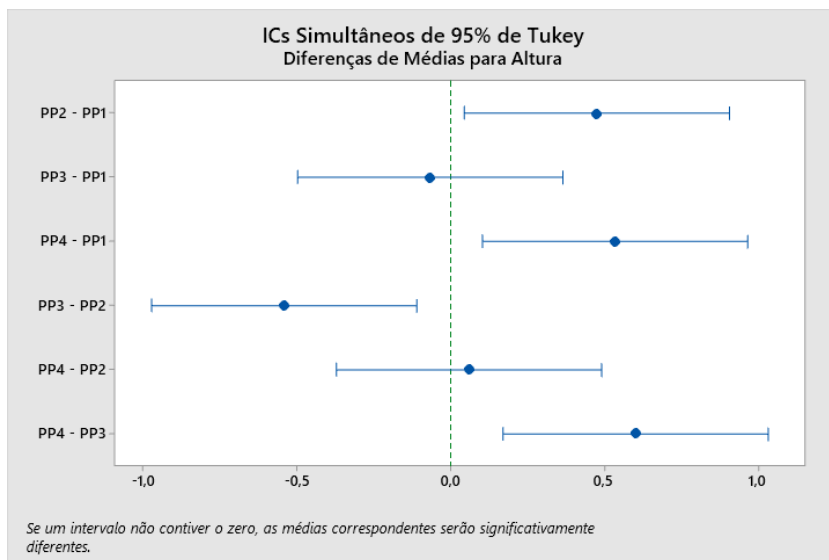
Figura 21. Altura PP4 (Amostra de alta energia com resfriamento a água).



Com base na análise de variância com um fator (Amostra) para as medidas de altura dos PP's (PP1, PP2, PP3 e PP4), os resultados apresentam evidências estatísticas significativas para afirmar que as médias de altura não são todas iguais entre as amostras ($p < 0.05$), rejeitando assim a hipótese nula.

O teste de Tukey foi então realizado como um teste *post-hoc* após a ANOVA para identificar pares de grupos significativamente diferentes entre as amostras. A ANOVA e o Teste de Tukey encontram-se completos no apêndice J. Ao considerar as médias das alturas individuais das amostras, verifica-se que as amostras PP2 (2,2148) e PP4 (2,274) possuem médias superiores comparativamente às amostras PP1 (1,741) e PP3 (1,674). Fica evidente ao examinar o teste de Tukey para comparações emparelhadas que as amostras PP2 e PP4 não diferem significativamente entre si, assim como as amostras PP1 e PP3 também não apresentam diferenças significativas. Entretanto, as amostras PP1 e PP3 são significativamente diferentes das amostras PP2 e PP4, indicando heterogeneidade na altura destes grupos de amostras como mostrado na figura 22. As amostras PP1 e PP3 tem diferentes métodos de resfriamento (PP1-Ar e PP2-Água), assim como PP2 e PP4 (PP2-Ar e PP4-Água). Analisando os grupos, é possível verificar que eles se dividem de acordo com as energias. O grupo PP1/PP3 compartilham da mesma energia de deposição baixa enquanto o grupo PP2/PP4 são de energia de deposição alta, o que leva a concluir que quanto maior a energia de deposição, maior a altura da camada depositada. A respeito do tipo de resfriamento, não foi possível notar influência sobre a altura da camada.

Figura 22. Diferenças de Médias para Altura IC 95% de Tukey.



Com relação a largura, foram realizadas igualmente 3 medidas de em cada camada, uma central e uma em cada extremidade. Os gráficos (Figuras 23, 24, 25, e 26) mostram todas as medidas de largura central dos PP's, sendo possível verificar o comportamento gráfico das variações.

É possível verificar graficamente que as camadas depositadas com alta energia (PP2 e PP4) tiveram as maiores dimensões se comparadas as depositadas com baixa energia (PP1 e PP3).

Figura 23. Largura PP1 (Amostra de baixa energia com resfriamento ao ar).

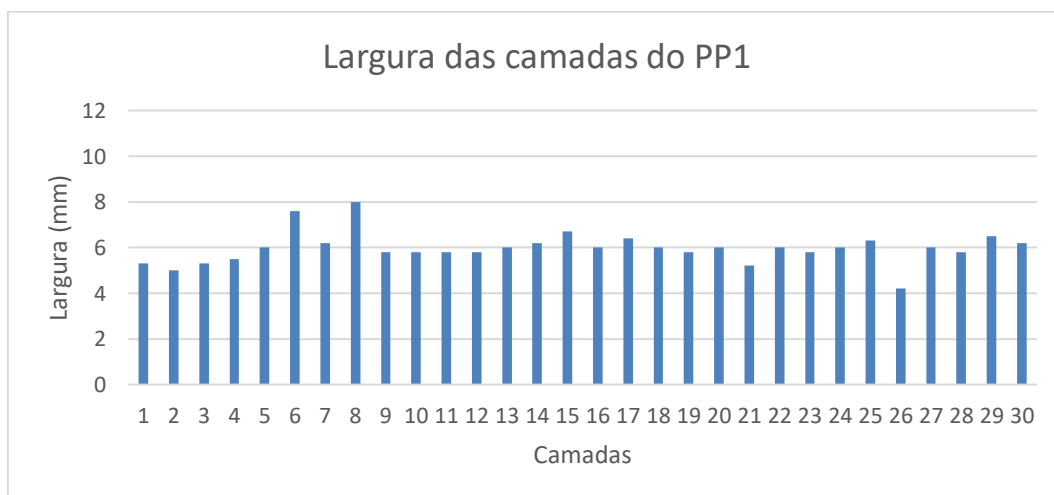


Figura 24. Largura PP2 (Amostra de alta energia com resfriamento ao ar).

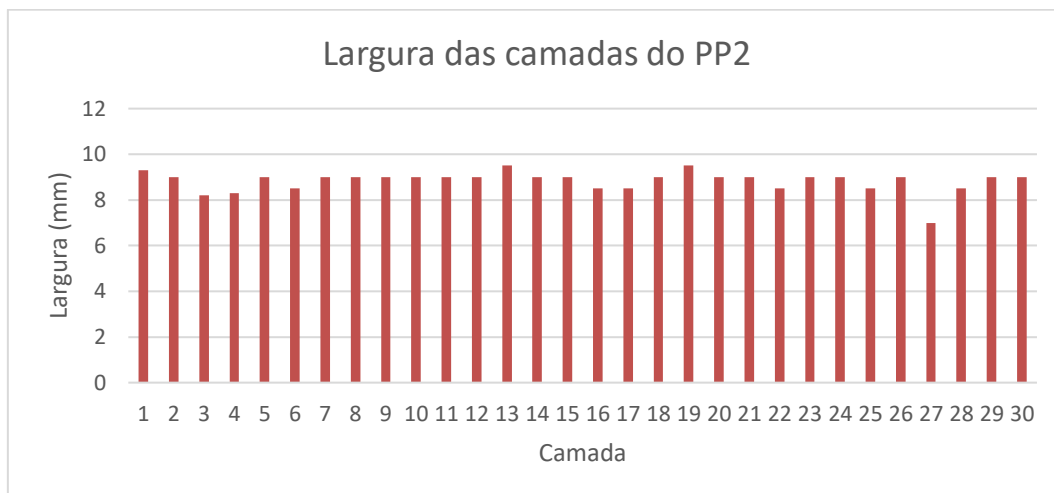


Figura 25. Largura PP3 (Amostra de baixa energia com resfriamento a água).

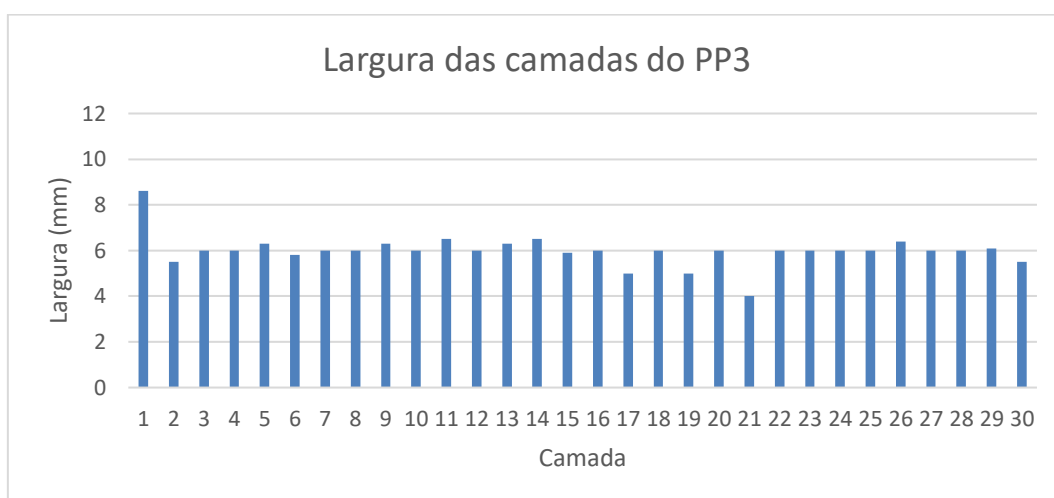
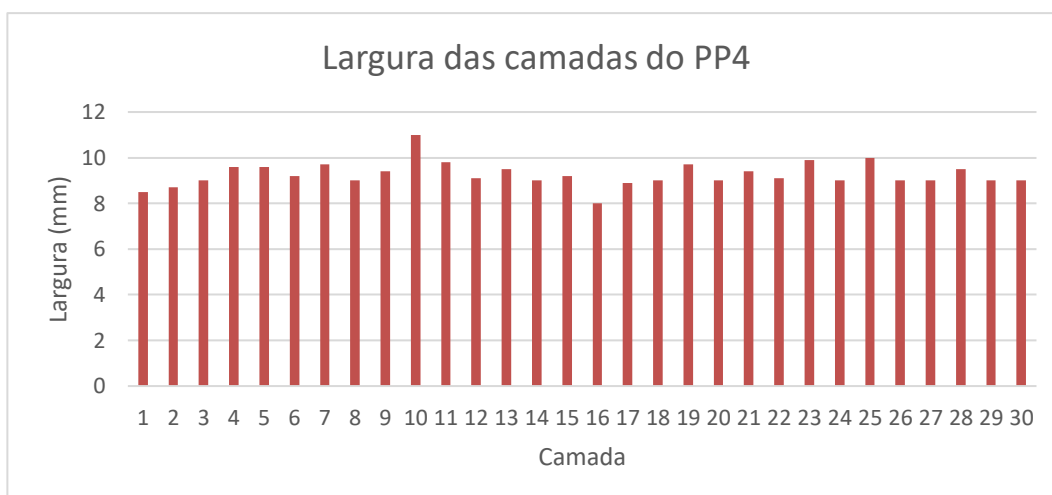


Figura 26. Largura PP4 (Amostra de alta energia com resfriamento a água).



Após a realização do teste de normalidade das larguras (Apêndice K), foi constatado que os dados não seguem uma distribuição normal de valores sendo inviável a realização do teste ANOVA.

Com base na tabela 6 da média dos valores de largura e nos gráficos 23, 24, 25 e 26, é possível relacionar que igualmente a análise de valores de altura, a energia também influencia no tamanho da largura das amostras. Quanto maior a energia maior o valor de largura. Quanto ao tipo de resfriamento, não parece ser um fator influente nas dimensões de largura.

Tabela 6 Média dos valores de largura das amostras

Amostra	Média	Desvio Padrão
PP1	6,059	0,679
PP2	8,8444	0,3965
PP3	5,911	0,520
PP4	9,319	0,531

Esses dados reunidos e as análises realizadas durante esta fase do estudo revelam uma distinta relação entre os parâmetros de deposição, especialmente a energia de deposição e as dimensões (altura e largura) das camadas depositadas. De acordo com o delineamento realizado (tabela 5), fica claro que altos níveis de energia de deposição, resultam em camadas de maior dimensão de altura e largura, e os tipos resfriamento (ar e acelerado por água) não parecem ter influência significativa nessas dimensões.

5.2 ANÁLISE TÉRMICA

5.2.1 ENERGIA DE DEPOSIÇÃO

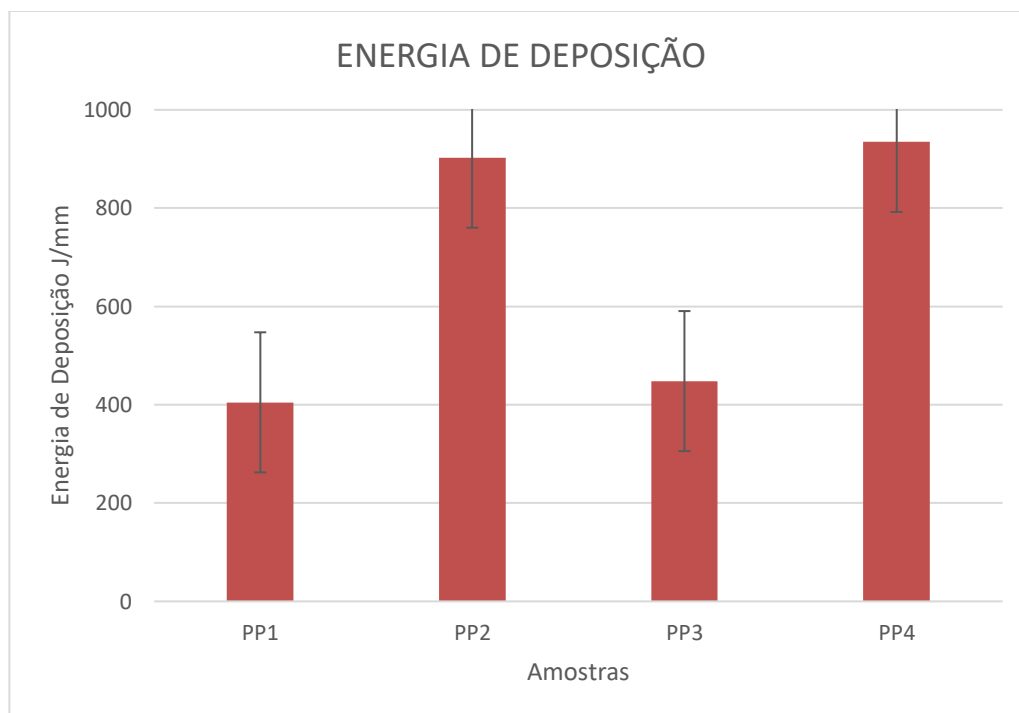
Os resultados da energia de deposição foram calculados como a média de todas as camadas aquisitadas em cada amostra para se conseguir um único valor por PP. A tabela 7 mostra como ficaram os valores de energia de deposição para cada amostra. Como ficou claro que os valores para energia alta ficaram próximos entre si bem como os de energia baixa (figura 27), foi feita uma ANOVA, conforme apêndice

L, entre os valores de energia (resposta) e a V_d (fator). O resultado mostrou que existem dois níveis de V_d avaliados no estudo, sendo eles 5 e 10. Na análise de variância efetuada, o valor F calculado é de 335,62, com um valor-P de 0,003. Isso indica que a hipótese nula (todas as médias são iguais) é rejeitada a favor da hipótese alternativa (nem todas as médias são iguais).

Tabela 7 Médias dos valores de energia de deposição.

Amostras	Velocidade de deposição V_d (mm/s)	Tipo de resfriamento	Energia de deposição (J/mm)	Desvio Padrão
PP1	10	Ar	404,94	$\pm 10,04$
PP2	5	Ar	902,72	$\pm 43,68$
PP3	10	Água	448,13	$\pm 15,12$
PP4	5	Água	934,68	$\pm 32,0$

Figura 27. Energia de Deposição das Amostras.



As médias para cada nível de V_d são apresentadas: 918,70 J/mm para $V_d=5\text{mm/s}$ e 426,5 J/mm para $V_d=10\text{mm/s}$. Essa diferença é considerável, comprovando a rejeição da hipótese nula na análise de variância. Os intervalos de

confiança de 95% para as médias também são fornecidos e não se sobrepõem, reforçando essa diferenciação. Em resumo foi comprovado que as médias 918,70 J/mm para $V_d=5\text{mm/s}$ e 426,5 J/mm para $V_d=10\text{mm/s}$ podem ser utilizadas individualmente para os valores de Energia de deposição alta ($V_d=5\text{mm/s}$) e baixa ($V_d=10\text{mm/s}$), facilitando a análise dos resultados subsequentes.

5.2.2 TAXA DE RESFRIAMENTO

Durante a fabricação de cada amostra, foi feita a aquisição dos dados de temperatura através dos termopares T1, T2 e T3. A Altura aproximada de cada termopar em cada PP está disponível na tabela 8. A partir desses dados foi possível extrair os ciclos térmicos de cada camada das amostras produzidas conforme as figuras 30 para T1, 31 para T2 e 33 para T3.

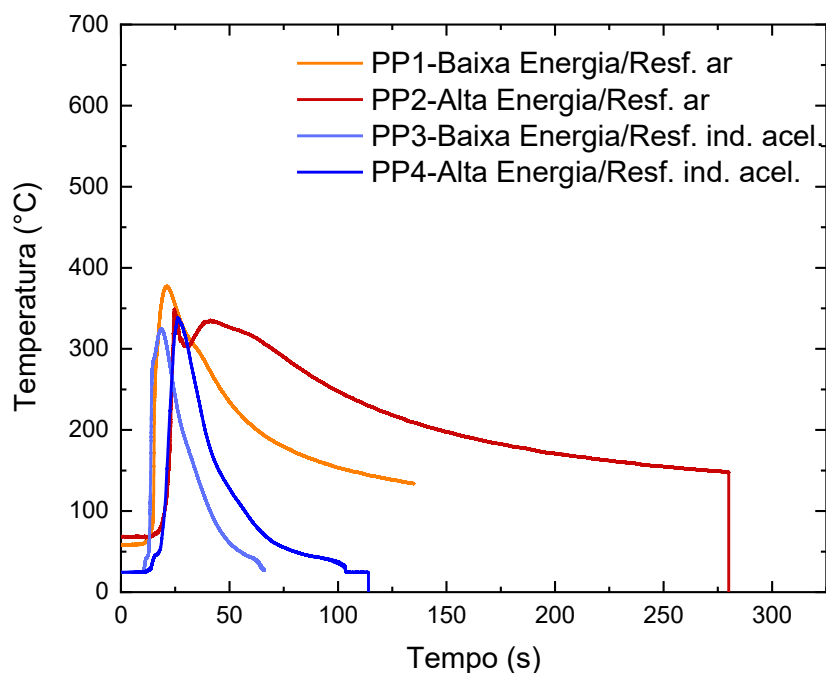
Tabela 8 Altura aproximada dos termopares

Altura Aproximada dos Termopares (mm)			
Amostra	T1	T2	T3
PP1	1	27,3	45,3
PP2	1	35	57,5
PP3	1	25,8	42,8
PP4	1	35	56,7

A distância entre os termopares e as camadas onde foram aqusitados os dados de temperatura são diferentes devido a energia de deposição e o tipo de resfriamento utilizado em cada amostra.

O ciclo térmico de T1 onde a camada aqusitada foi a 6ª, possui uma distância de aproximadamente 10mm para a amostra PP1 e PP3 os quais foram produzidos com baixa energia de deposição (tabela 5). Pelo gráfico da figura 28 é possível notar que apesar das distâncias entre termopar e camada aqusitada sejam as mesmas, as curvas de resfriamento são diferentes. Isso se deve ao tipo de resfriamento de cada PP. PP1 foi produzido com resfriamento natural ao ar e tem a curva menos inclinada e com um pico de temperatura mais alto (aproximadamente 390°C) enquanto PP3, que produzido utilizando o resfriamento acelerado a água, mostra uma curva mais inclinada e com um pico de temperatura mais baixo (aproximadamente 335°C).

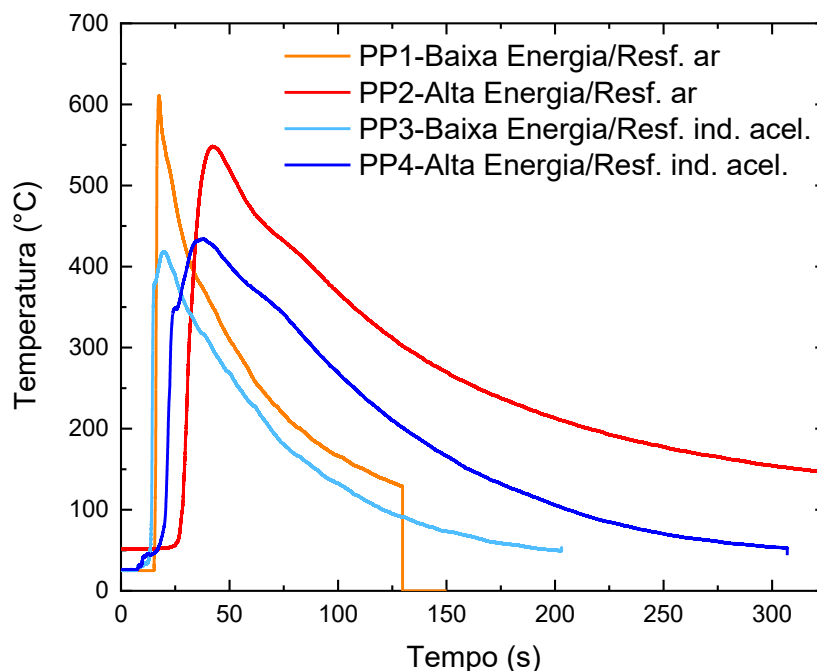
Figura 28. Ciclo Térmico T1 (camada 6).



Ainda no mesmo gráfico, as amostras produzidas com alta energia de deposição (PP2 e PP4) possuem uma distância entre termopar e camada aquisitada semelhante. PP2 tem uma distância de 13,7mm e PP4 de 12,7mm. Essa pequena diferença é notada apenas na temperatura de pico de ambas as curvas que ficam próximas de 350°C, pois a curva de PP4, que produzido utilizando o resfriamento acelerado a água, é muito mais inclinada que a curva de PP2 resfriada ao ar naturalmente. Em todos os casos a curva mais inclinada significa que a amostra levou um tempo menor para que a temperatura diminuísse, levando em conta que o termopar T1 também é o mais próximo do substrato o qual está em contato com fluxo de água do resfriamento.

Isso mostra que o tempo necessário para resfriar o PP até esse nível, é maior para as amostras resfriadas ao ar e menor para as amostras resfriadas a água dadas as suas respectivas energias de deposição.

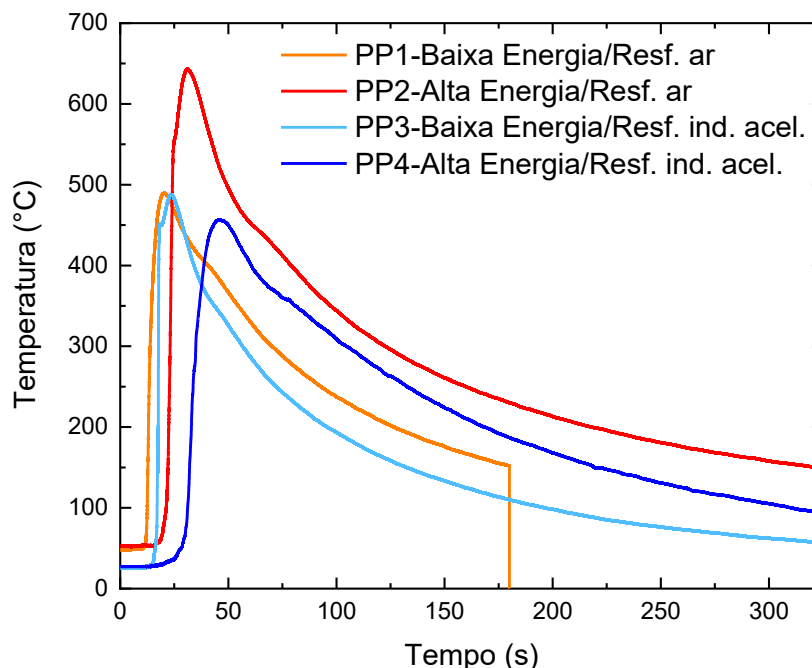
Figura 29. Ciclo Térmico T2 (camada 19).



O ciclo térmico de T2 onde a camada aquisitada foi a 19^a, possui uma distância de aproximadamente 7mm para a amostra PP1 e PP3 os quais foram produzidos com baixa energia de deposição (tabela 5). Pelo gráfico da figura 29 é possível notar que apesar das distâncias entre termopar e camada aquisitada sejam praticamente as mesmas, as curvas de resfriamento são diferentes. Isso também se deve ao tipo de resfriamento de cada PP. PP1 foi produzido com resfriamento natural ao ar e tem a curva menos inclinada e com um pico de temperatura mais alto (aproximadamente 620°C) enquanto PP3, que produzido utilizando o resfriamento acelerado a água, mostra uma curva mais inclinada e com um pico de temperatura mais baixo (aproximadamente 430°C).

Ainda no mesmo gráfico, as amostras produzidas com alta energia de deposição (PP2 e PP4) possuem uma distância entre termopar e camada aquisitada semelhante. PP2 tem uma distância de 9,5mm e PP4 de 8,1mm. Apesar da distância de PP2 ser maior que a distância de PP4, a temperatura de pico de PP2 (aproximadamente 650°C) é mais alta que a de PP4 (aproximadamente 440°C) devido ao tipo de resfriamento. As inclinações das curvas de resfriamento são similares devido ao fato de T2 está mais afastado do substrato e o resfriamento à água não ser mais tão eficiente quanto o medido em T1.

Figura 30. Ciclo Térmico T3 (camada 28).



O ciclo térmico de T3, conforme figura 30, onde a camada aquisitada foi a 28ª teve as curvas de PP1 e PP3 com temperaturas de pico de aproximadamente 490°C, porém o resfriamento do substrato deu uma maior inclinação a PP3 em relação a PP1. A amostra PP2, com distância do termopar T3 a camada medida de 6,5mm, teve a maior temperatura de pico, atingindo 650°C. Todavia a amostra PP4 com distância termopar T3 camada medida um pouco maior (7,3mm) teve a temperatura de pico menor de aproximadamente 460°C. A curva de PP4 fica abaixo da curva de PP2 que apesar de ser produzido com a mesma energia de deposição, tem o resfriamento ao ar enquanto PP4 tem o resfriamento acelerado à água. Pode se observar que o fato do termopar T3 estar mais distante do substrato (acima de 43mm) o resfriamento a água ainda influencia na curva do ciclo térmico, porém com menos eficiência no tempo de resfriamento em comparação com os medidos em T1 e T2.

A Partir dos ciclos térmicos foram extraídas as taxas de resfriamento conforme mostra os valores na tabela 9. Foi escolhida uma faixa de temperatura (324°C à 200°C) que foi captada por todos os termopares nas mesmas camadas de cada amostra, para manter um comparativo coerente nas medidas.

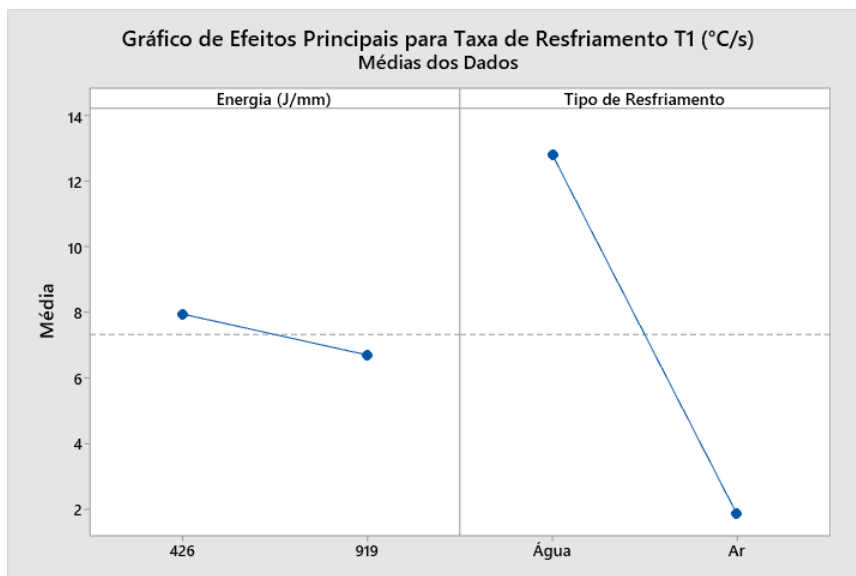
Tabela 9 Taxas de resfriamento amostra/termopar

Amostra	Taxa de resfriamento T1 (°C/s)	Taxa de resfriamento T2 (°C/s)	Taxa de resfriamento T3 (°C/s)
PP1(-)	2,7	3,5	1,9
PP2(+)	1	1,3	1,1
PP3(-)	13,2	3,2	2,8
PP4(+)	12,4	1,4	1,7

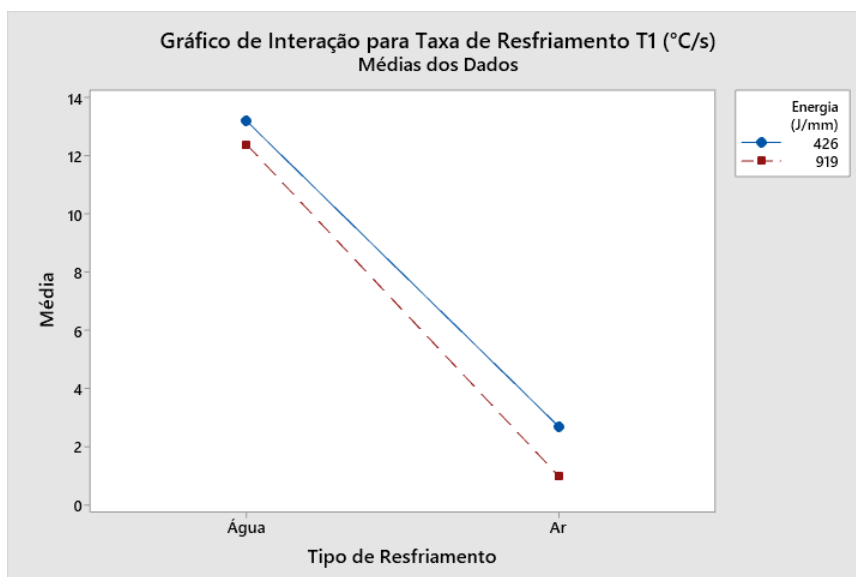
Com esses 3 termopares foi realizado uma análise do experimento fatorial DOE criado, no qual relacionou as taxas de deposição nos 3 níveis de termopar com o tipo de resfriamento e com a média total de energia calculada (Alta e Baixa). Para esses experimentos foi realizado um ajuste do nível de significância pelo procedimento *stepwise* de $\alpha = 0,15$ para indicar com mais clareza os fatores mais significativos do experimento.

A taxa de resfriamento em T1 (TRT1) em relação ao tipo de resfriamento foi examinada por meio de uma regressão fatorial, conforme mostra o apêndice M. Os resultados indicam um forte impacto do tipo de resfriamento sobre TRT1, o que sugere que diferentes métodos de resfriamento podem fazer com que a taxa de resfriamento altere significativamente. O valor-T de -11,66 e um valor-P de 0,007 confirmam a importância estatística dessa relação. O R^2 do modelo alto (98,55%), com R^2 ajustado para verificar a robustez do modelo ficando em 97,82%. Isso evidencia que o modelo de regressão consegue explicar um alto percentual da variação em TRT1 com base apenas no tipo de resfriamento.

A análise de variância também reitera a relevância do modelo, com um valor F de 135,87 e um valor-P de 0,007, reforçando que a variável tipo de resfriamento tem uma importância significativa na determinação de TRT1. Para ilustrar significância dos resultados foi gerado um gráfico de efeitos principais conforme figura 31 e um gráfico de interação conforme figura 32.

Figura 31. Efeitos Principais TRT1.

O gráfico da figura 31 mostra claramente que o tipo de resfriamento tem uma influência maior que a energia de deposição. O resfriamento a água aumenta a taxa de resfriamento no termopar T1 que é o termopar mais próximo do substrato, enquanto a energia de deposição tem pouca influência sobre a taxa de resfriamento. O gráfico da figura 32 mostra que para ambos os valores de energia, o tipo de resfriamento a água é o que mais aumenta TRT1. Como a linha vermelha pontilhada (alta energia de deposição) está abaixo da azul (baixa energia de deposição), isso sugere que, à medida que a energia aumenta, a eficiência do resfriamento diminui para ambos os meios.

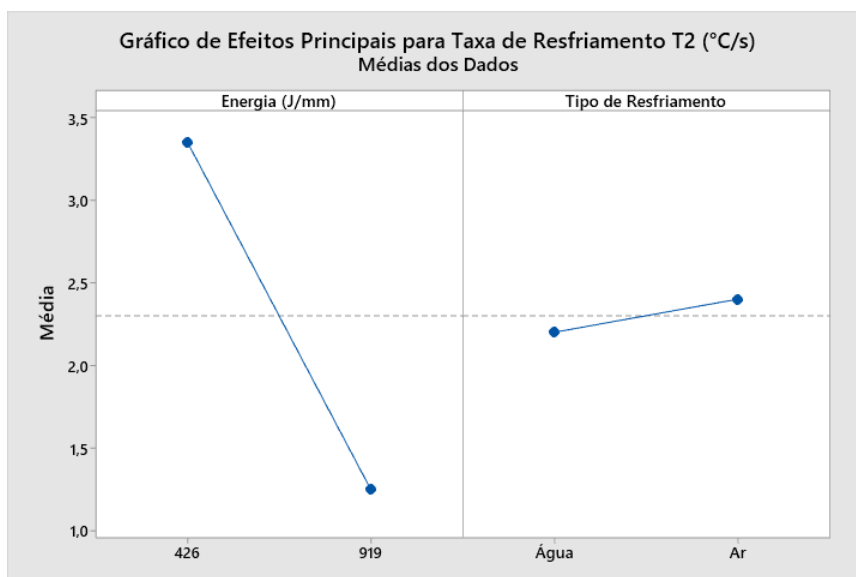
Figura 32. Interação entre fatores para TRT1.

Da mesma maneira foi feito a análise de regressão fatorial na taxa de resfriamento em T2 (TRT2) conforme mostra o apêndice N. A análise da regressão fatorial mostra que a energia tem um impacto significativo e negativo em TRT2, com um coeficiente de -1,0500. Isso significa que um aumento na energia de deposição conduz a uma TRT2 mais baixa, em uma relação inversamente proporcional.

O modelo da regressão demonstrou um alto R^2 de 98,88% com R^2 ajustado de 98,32%, indicando que quase a toda da variabilidade na TRT2 pode ser explicada pela energia de deposição.

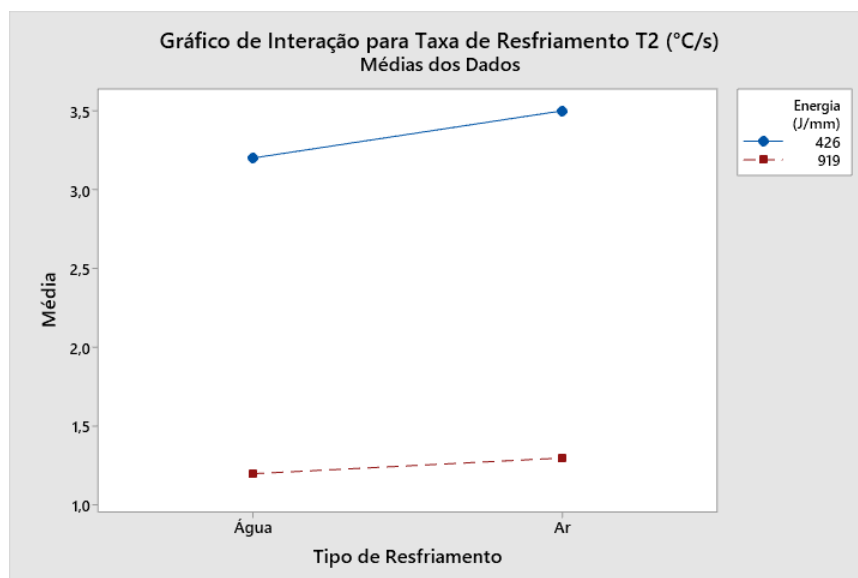
Na análise de variância, observa-se um valor F de 176,40 com um baixo valor-P de 0,006, confirmando a significância estatística do modelo. Isso reafirma o impacto da energia de deposição na determinação da TRT2. O gráfico de Efeitos principais, conforme a figura 33, mostra através da inclinação das retas que a energia de deposição tem um impacto muito maior em TRT2 do que o tipo de resfriamento. Quanto maior a energia menor é a taxa de resfriamento.

Figura 33. Efeitos principais para TRT2.



O gráfico da figura 34 mostra que não há interação entre os fatores, além de indicar que energias menores aumentam as taxas de resfriamento com uma leve inclinação para o resfriamento ao ar o qual apresentou um desempenho ligeiramente melhor.

Figura 34. Interação entre fatores para TRT2.



Já a análise de regressão fatorial feita em relação a taxa de resfriamento em T3 (TRT3), conforme mostra o apêndice O, não conseguiu apresentar modelo com o α de 0,15 então foi feita outra análise com o α padrão de 0,05. Com essa modificação, foi possível ter alguns dados que indicam que tanto a energia de deposição quanto o tipo de resfriamento apresentam impacto significativo na TRT3 devido seus coeficientes aparecerem negativos (-0,475 para energia e -0,375 para tipo de resfriamento). O coeficiente positivo da interação de 2 fatores (0,02250 na análise de variância) indica que a interação entre fatores também influencia na taxa de resfriamento em T3.

O gráfico de efeitos principais, conforme figura 35, mostra que tanto a energia de deposição quanto o tipo de resfriamento têm a mesma inclinação de reta, o que indica que os 2 fatores têm influência na TRT3. No gráfico de interação entre fatores da figura 36, os dados indicam uma diminuição notável na taxa média de resfriamento ao mudar do resfriamento acelerado a água para o ar como tipo de resfriamento. Com um nível de entrada de energia baixo, há uma redução significativa de aproximadamente 2,8 °C/s para pouco acima de 1,9 °C/s. Da mesma forma, em um nível de energia alto, a taxa média de resfriamento diminui de quase 1,7 °C/s para cerca de 1,1 °C/s ao mudar da água para o ar como refrigerante. Esses resultados

destacam a eficiência superior do sistema de refrigeração a água em comparação com o ar.

Figura 35. Efeitos principais para TRT3.

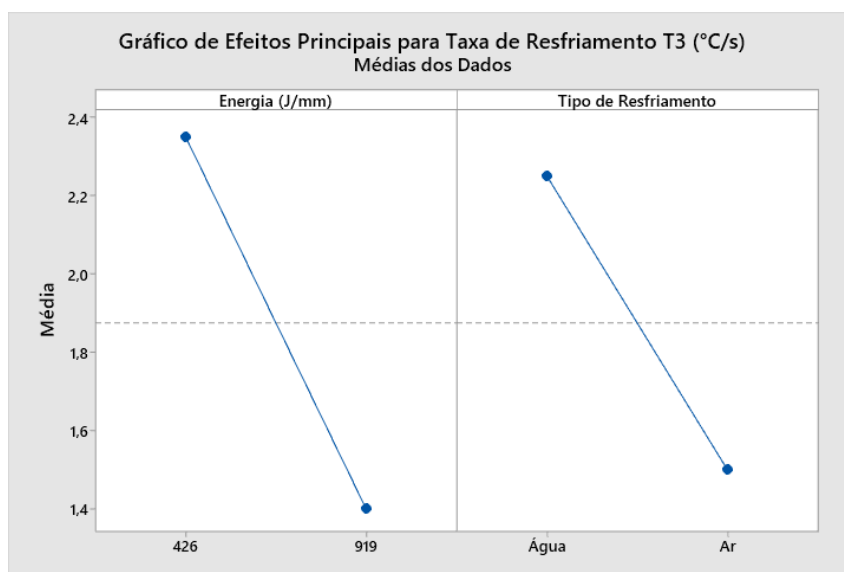
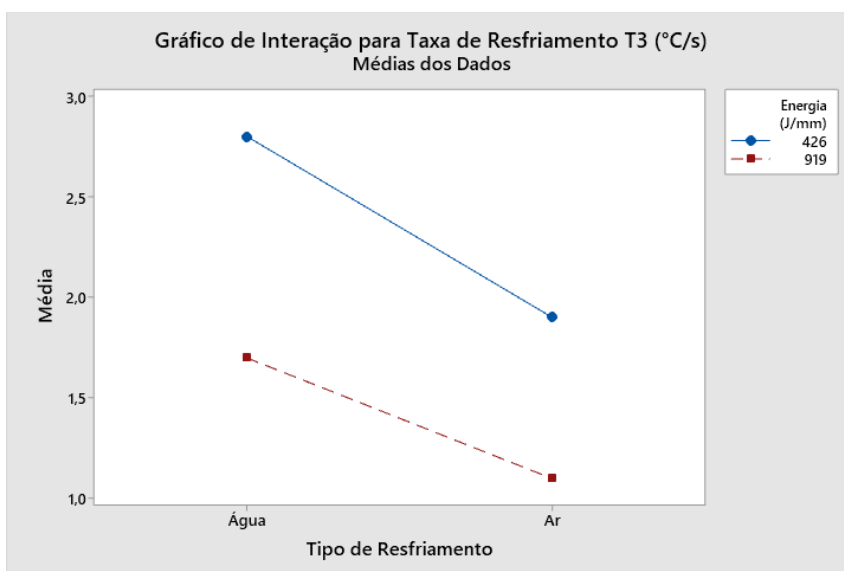


Figura 36. Interação entre fatores para TRT3.



5.3. ENERGIA ABSORVIDA DE IMPACTO

Com o resultado dos ensaios de impacto dos 9 corpos de prova Charpy V de cada amostra, foi feito uma ANOVA (Apêndice P) com o objetivo de investigar as diferenças nas médias de Energia Absorvida (E_{ab}) entre as quatro amostras (PP1,

PP2, PP3 e PP4), mostradas na Figura 37. Os resultados estatísticos indicam diferenças notáveis nas médias de E_{ab} entre os grupos testados. Com um valor F de 9,48 e um valor P igual a 0,000, a hipótese de que não há variação entre as médias é descartada, considerando um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Os valores obtidos nos ensaios de impacto são mostrados na tabela 10.

Figura 37. Média das energias absorvidas de cada amostra.

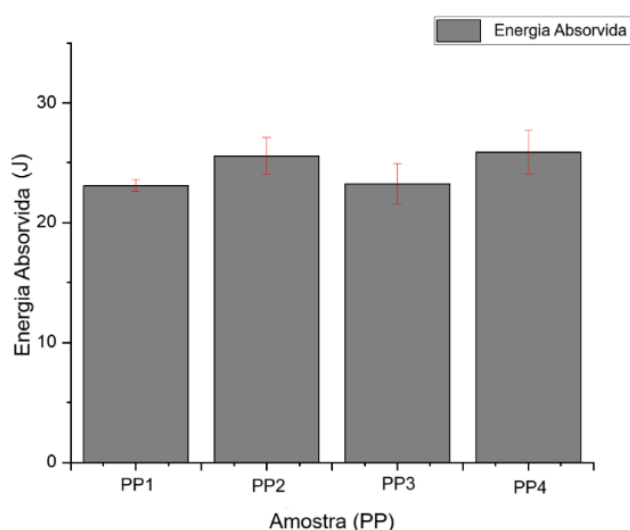


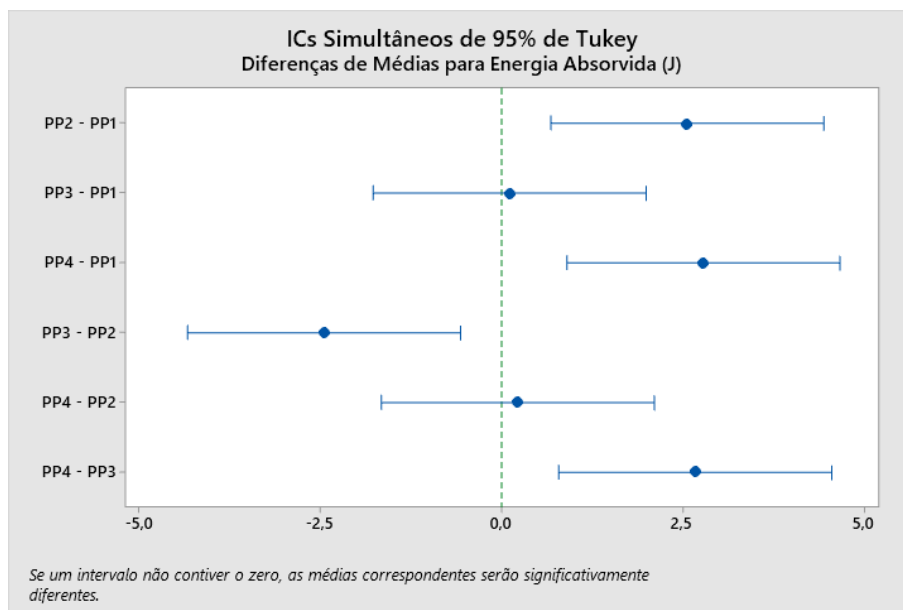
Tabela 10 Valores de energia absorvida de cada amostra.

Amostra	Energia Absorvida (J)									Média	Desvio Padrão	Tipo de Resfriamento
PP1(-)	22	23	23	23	23	23	23	24	24	23.1	±0.51	Ar
PP2(+)	23	24	25	25	26	27	27	27	27	25.6	±1.53	Ar
PP3(-)	20	21	23	23	24	24	24	25	25	23.2	±1.71	Água
PP4(+)	23	24	25	25	26	27	27	28	28	25.8	±1.84	Água

A análise de Tukey de comparações emparelhadas nos mostra que as amostras PP1 e PP3, com médias de aproximadamente 23,1 e 23,2 respectivamente, não apresentam diferença significativa entre si. Ele se dá entre as amostras PP2 e PP4, com médias próximas de 25,6 e 25,8. Contudo, existem diferenças estatisticamente significativas entre os grupos PP1 e PP3 quando comparados aos grupos PP2 e PP4. O gráfico de diferenças de médias (figura 38) ilustra bem como as

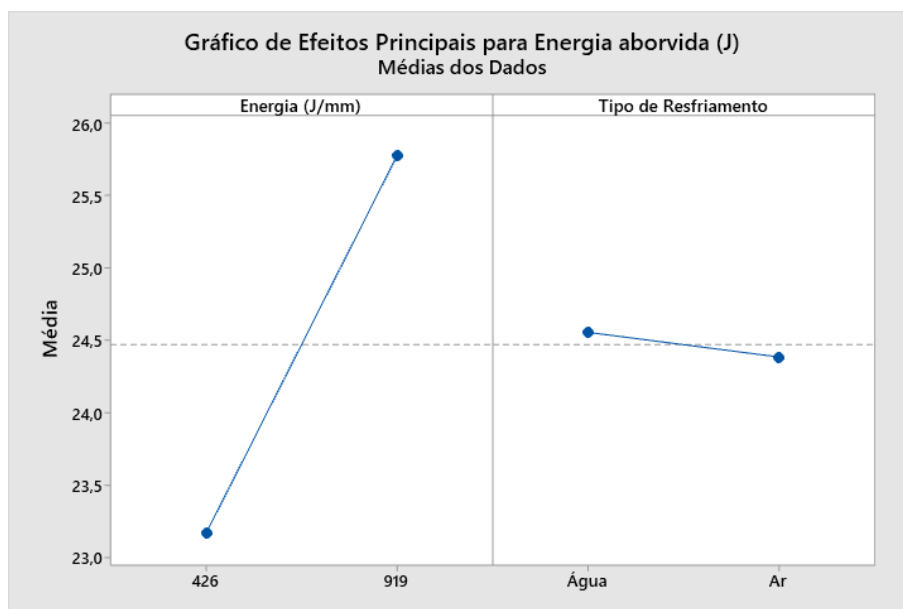
amostras PP1 e PP3 tem médias semelhantes entre si e diferentes de PP2 e PP4 que também são semelhantes entre si.

Figura 38. Diferenças de Médias de Energia absorvida para IC 95% de Tukey.



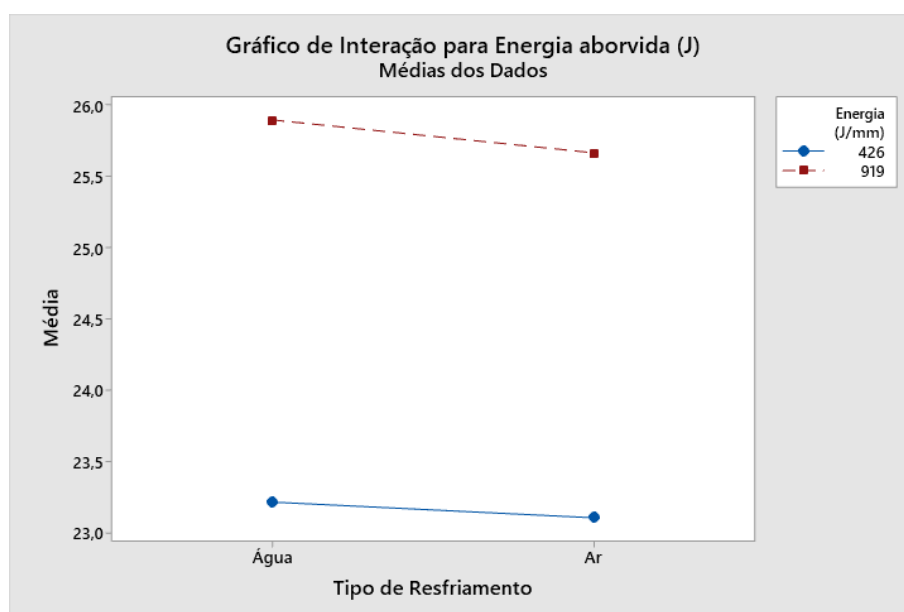
O gráfico de efeitos principais para E_{ab} na figura 39, mostra que o fator energia de deposição é mais influente que o fator tipo de resfriamento pois a inclinação da reta da energia mostra que quanto maior a energia de deposição maior a E_{ab} de impacto.

Figura 39. Efeitos principais para $E_{ab}(J)$.



O gráfico de interação para energia absorvida da figura 40, mostra que as variantes de resfriamento como água e ar não apresentam variações notáveis na média de energia absorvida pelos materiais. Os valores dos meios de resfriamento em ambos os níveis medianos são comparáveis, com as energias de deposição alta e baixa. A homogeneidade demonstra que, dentro desses parâmetros, o tipo de resfriamento não afeta significativamente a capacidade do material de absorver energia no ensaio de impacto Charpy V.

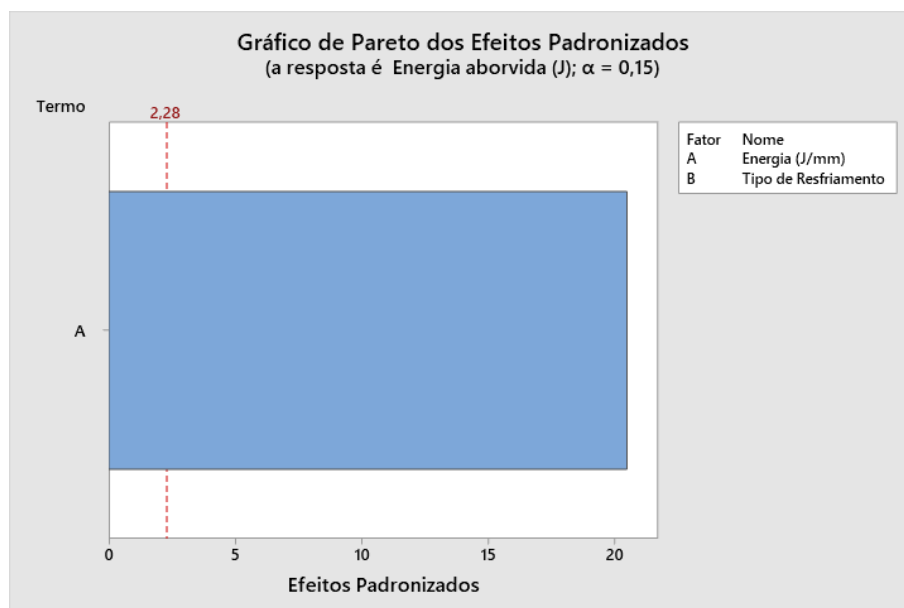
Figura 40. Interação para $E_{ab}(J)$.



O modelo de regressão não apresentou valores de R^2 nem R^2 ajustado para α de 0,05. Então foi realizado o *stepwise* com α de 0,15. Com o novo α , o modelo de regressão apresentou valor de R^2 99,53, R^2 ajustado de 99,29% e R^2 predito de 98,10%. O valor baixo de S de 0,127475, indica que o modelo descreve melhor a resposta conforme dados no apêndice Q.

O gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados, conforme figura 41, mostra que a barra que corresponde ao fator A, corta a linha de referência em 2,28 indicando que a energia absorvida sofre influência da energia de deposição.

Figura 41 Gráfico de Pareto para resposta Energia absorvida (J)



5.4. FRACTOGRAFIAS (MEV)

Para uma análise mais aprofundada das características de fratura dos corpos de prova Charpy V, foram extraídas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Estas foram conduzidas nas áreas de entalhe de amostras que passaram pelo ensaio Charpy V, visando observar a morfologia da fratura e destacar possíveis diferenças entre as amostras produzidas com resfriamento acelerado e as que resfriaram ao ar.

As imagens de MEV (figuras 42, 43, 44 e 45) revelaram características de fratura similares. Em todas as amostras, observaram-se regiões com predominância de fratura dúctil, caracterizada por uma grande quantidade de *dimples* (indicados em amarelo nas figuras), indícios de um processo de deformação plástica intensa antes da fratura.

Estes resultados indicam que nem o resfriamento acelerado a água, nem o aumento de energia de deposição influenciaram na característica de ductilidade do aço ER110S-1.

Figura 42. Imagem do centro do entalhe de PP1.

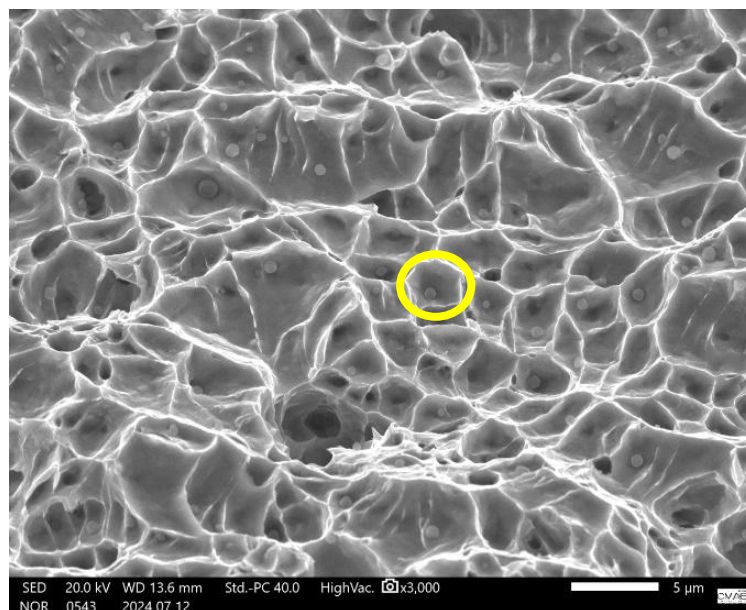


Figura 43. Imagem do centro do entalhe de PP2.

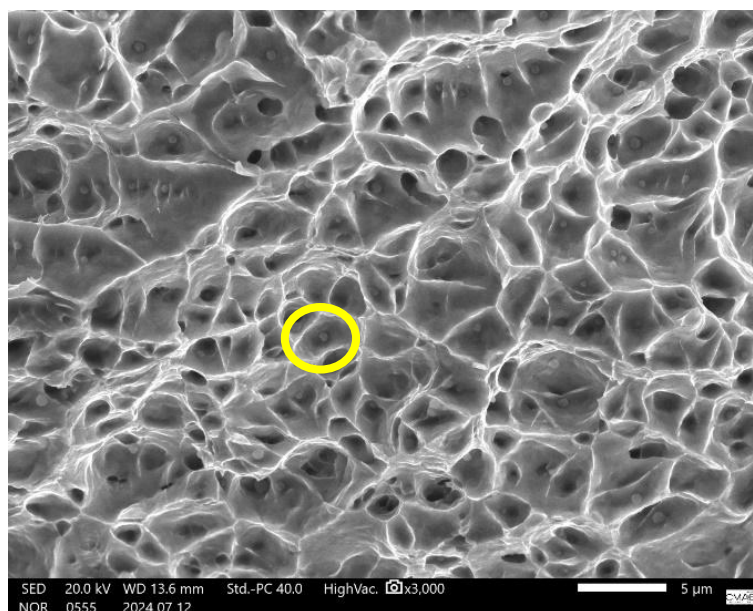


Figura 44. Imagem do centro do entalhe de PP3.

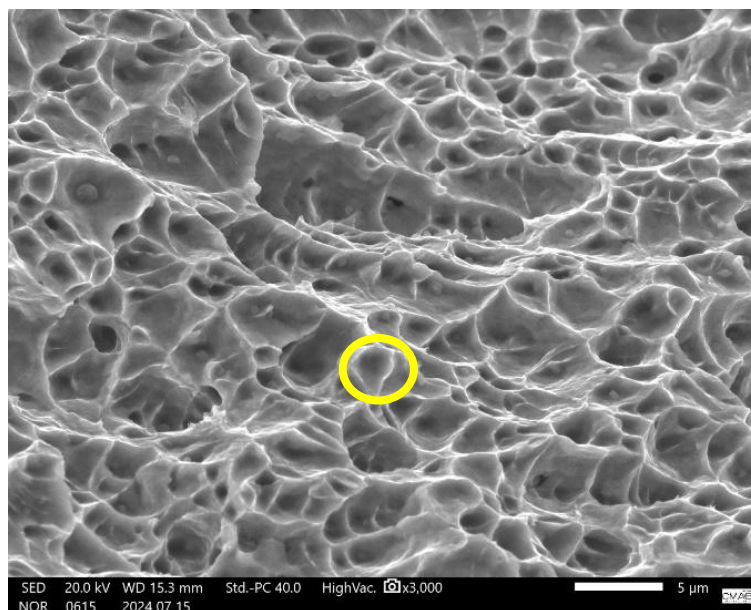
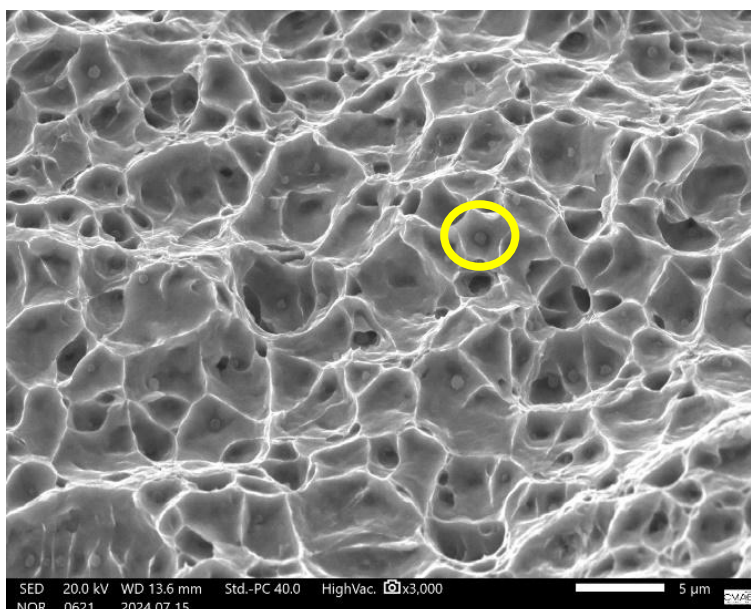


Figura 45. Imagem do centro do entalhe de PP4.



6. CONCLUSÕES

Com base nos materiais e métodos utilizados, pode-se concluir que:

A energia de deposição apresenta indícios de influenciar mais as dimensões das camadas, em altura e largura, em comparação com o sistema de resfriamento indireto.

O sistema de resfriamento indireto não mostrou influência significativa na geometria (altura e largura) da camada depositada.

O fator mais influente na energia de impacto Charpy V é a energia de deposição das camadas.

O sistema de resfriamento indireto não impacta na tenacidade do aço ER110S-1.

Não existe interação entre a energia de deposição das camadas e o tipo de resfriamento utilizado, na determinação da tenacidade do material.

Considerando que o sistema de resfriamento indireto não gera alteração na geometria, não apresenta influência, como fator, na energia de impacto Charpy V e por reduzir o tempo de depósito entre camadas, torna-se viável o uso do sistema de resfriamento indireto na fabricação de produtos metálicos via DED-GMAW.

IMPACTO SOCIAL

Este trabalho tem implicações significativas para a sociedade, particularmente na manufatura e na produção responsável. Com o uso da Manufatura Aditiva por deposição com energia direcionada, é possível reduzir significativamente o desperdício de material, graças à natureza do processo de adição de camada por camada. Isso representa um avanço significativo em direção à produção sustentável.

Além disso, isso pode ter reflexos diretos na economia, pois a capacidade de produzir produtos grandes e de alta resistência com eficiência aprimorada pode levar a custos de produção reduzidos. Isso, por sua vez, pode resultar em produtos mais acessíveis para os consumidores.

Este estudo também tem um potencial impacto direto no setor de trabalho, proporcionando novas oportunidades de emprego no campo emergente da manufatura aditiva de metais. Isso pode levar a uma maior demanda por habilidades específicas e treinamento especializado, incentivando a educação e o desenvolvimento de habilidades técnicas na força de trabalho em potencial.

Finalmente, os avanços no campo da manufatura aditiva de metais têm potencial para contribuir para várias indústrias, desde a indústria automotiva e aeroespacial até a medicina, com a capacidade de criar componentes e peças personalizadas que poderiam trazer inovações significativas. Portanto, o impacto social deste trabalho abrange sustentabilidade, economia, oportunidades de emprego e avanço tecnológico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISPACE. Study of the art of Additive Manufacturing Technologies, Trends, Opportunities, Challenges and Applications for the Aerospace Setor. 2016.

ADINARAYANAPPA, S. M.; SIMHAMBHATLA, S. Twin-wire welding based additive manufacturing (TWAM): Manufacture of functionally gradient objects. **Rapid Prototyping Journal**, v. 23, n. 5, p. 858–868, 2017.

AHN, D. G. **Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology**Korean Society for Precision Engineering, , 1 mar. 2021.

BALOGLU, M. V.; WILLNER, K. Material modelling of a sheet-layered lamination stack by homogenization. **PAMM**, v. 16, n. 1, p. 509–510, out. 2016.

BANDYOPADHYAY, A.; HEER, B. **Additive manufacturing of multi-material structures. Materials Science and Engineering R: Reports**Elsevier Ltd, , 1 jul. 2018.

DA SILVA, L. J. *et al.* Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 5–6, p. 2513–2523, 1 mar. 2020.

DEBROY, T. *et al.* **Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. Progress in Materials Science**Elsevier Ltd, , 1 mar. 2018.

DEBROY, T. *et al.* **Metallurgy, mechanistic models and machine learning in metal printing.** *Nature Reviews Materials* Nature Research, , 1 jan. 2021.

DEREKAR, K. S. **A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium.** *Materials Science and Technology (United Kingdom)* Taylor and Francis Ltd., , 24 maio 2018.

DEV SINGH, D.; MAHENDER, T.; RAJI REDDY, A. **Powder bed fusion process: A brief review.** *Materials Today: Proceedings. Anais...* Elsevier Ltd, 2021.

DHANESH, M.; DHANAWADE, A.; BHATWADEKAR, S. G. A. **A Review on Types of Powder Bed Fusion Process in Additive Manufacturing Technology.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.ijetsr.com>.

DING, D. *et al.* **Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests.** *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Springer London, , 26 out. 2015.

DOYLE, M. *et al.* **Effect of Layer Thickness and Orientation on Mechanical Behavior of Binder Jet Stainless Steel 420 + Bronze Parts.** *Procedia Manufacturing. Anais...* Elsevier B.V., 2015.

FERIOTTI, M. A. *et al.* **APLICAÇÕES DA MANUFATURA ADITIVA E IMPRESSÃO 3D NA FABRICAÇÃO DE MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS.** *Brazilian Journal of Production Engineering - BJPE*, p. 199–218, 22 set. 2021.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. Sheet Lamination Processes. Em: **Additive Manufacturing Technologies**. [s.l.] Springer US, 2010. p. 223–252.

HUANG, S. H. *et al.* **Additive manufacturing and its societal impact: A literature review**. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, jul. 2013.

ISRAR, R.; BUHL, J.; BAMBACH, M. A study on power-controlled wire-arc additive manufacturing using a data-driven surrogate model. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 2133–2147, 2021.

JADHAV, A.; JADHAV, V. S. A review on 3D printing: An additive manufacturing technology. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 2094–2099, 1 jan. 2022.

KESSLER, H. D.; SHERMAN, R. J. Tension and Charpy V-notch impact properties of wire arc additively manufactured ER80S-Ni1. **Structures**, v. 61, 1 mar. 2024.

KOK, Y. *et al.* Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review. **Materials and Design**, v. 139, p. 565–586, 5 fev. 2018.

LI, R.; XIONG, J. Role of substrate shape on thermal energy transmission in robotized wire and arc additive manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**, v. 25, n. 7, p. 1285–1294, 30 ago. 2019.

LI, Y.; SU, C.; ZHU, J. **Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects. Results in Engineering** Elsevier B.V., , 1 mar. 2022.

LI, Z. *et al.* Reducing arc heat input and obtaining equiaxed grains by hot-wire method during arc additive manufacturing titanium alloy. **Materials Science and Engineering: A**, v. 742, p. 287–294, 10 jan. 2019.

MARIANI, M. *et al.* 3D printing of fine alumina powders by binder jetting. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 41, n. 10, p. 5307–5315, 1 ago. 2021.

MIRZAEI, M. *et al.* Study of welding velocity and pulse frequency on microstructure and mechanical properties of pulsed gas metal arc welded high strength low alloy steel. **Materials and Design**, v. 51, p. 709–713, 2013.

MORAIS, W. A. *et al.* **Metal Mecânica Morfologias básicas das superfícies de fratura A análise de falhas: Parte 2.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.siderurgiabrasil.com.br>.

MÜLLER, J. *et al.* Design and parameter identification of wire and arc additively manufactured (WAAM) steel bars for use in construction. **Metals**, v. 9, n. 7, 1 jul. 2019.

MÜLLER, J.; HENSEL, J.; DILGER, K. Mechanical properties of wire and arc additively manufactured high-strength steel structures. **Welding in the World**, v. 66, n. 3, p. 395–407, 1 mar. 2022.

RODRIGUES, T. A. *et al.* Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties. **Additive Manufacturing**, v. 27, p. 440–450, 1 maio 2019.

SCHARF-WILDENHAIN, R. *et al.* Heat control and design-related effects on the properties and welding stresses in WAAM components of high-strength structural steels. **Welding in the World**, v. 67, n. 4, p. 955–965, 1 abr. 2023.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **SOLDAGEM MIG/MAG MELHOR ENTENDIMENTO MELHOR DESEMPENHO**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.artliber.com.br>.

SCOTTI, F. M. *et al.* Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 57, p. 23–35, 1 set. 2020.

SHIM, D. S. *et al.* Effect of layer thickness setting on deposition characteristics in direct energy deposition (DED) process. **Optics and Laser Technology**, v. 86, p. 69–78, 1 dez. 2016.

SINGH, R. *et al.* **Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview**. Materials Today: Proceedings. **Anais...Elsevier Ltd**, 2019.

SINGH, S.; SHARMA, S. K.; RATHOD, D. W. **A review on process planning strategies and challenges of WAAM**. Materials Today: Proceedings. **Anais...Elsevier Ltd**, 2020.

SONG, K. *et al.* Microstructure and Mechanical Properties of High-Strength, Low-Alloy Steel Thin-Wall Fabricated with Wire and Arc Additive Manufacturing. **Metals**, v. 13, n. 4, 1 abr. 2023.

STAVROPOULOS, P.; FOTEINOPOULOS, P. **Modelling of additive manufacturing processes: A review and classification.** **Manufacturing Review**EDP Sciences, , 2018.

SU, Z. *et al.* Overcoming the penetration–saturation trade-off in binder jet additive manufacturing via rapid in situ curing. **Additive Manufacturing**, v. 59, 1 nov. 2022.

SURYAKUMAR, S. *et al.* A study of the mechanical properties of objects built through weld-deposition. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 227, n. 8, p. 1138–1147, ago. 2013.

TAPIA, G.; ELWANY, A. **A Review on Process Monitoring and Control in Metal-Based Additive Manufacturing.** **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**American Society of Mechanical Engineers (ASME), , 1 dez. 2014.

TAŞDEMİR, A.; NOHUT, S. **An overview of wire arc additive manufacturing (WAAM) in shipbuilding industry.** **Ships and Offshore Structures**Taylor and Francis Ltd., , 2020.

VENUKUMAR, S. *et al.* **A Review on Metal Binder Jetting 3D Printing.** E3S Web of Conferences. **Anais...**EDP Sciences, 6 out. 2023.

WALLIN, K. Correlation of Charpy-V notch and different Charpy-U notch impact specimen energies for structural metals. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 200, 1 dez. 2022.

WANDTKE, K. *et al.* Influence of the WAAM process and design aspects on residual stresses in high-strength structural steels. **Welding in the World**, v. 67, n. 4, p. 987–996, 1 abr. 2023.

WEBER, B. *et al.* Tensile behaviour of WAAM high strength steel material and members. **Materials and Design**, v. 237, 1 jan. 2024.

WEI, Z.; DU, J. Heat and Mass Transfer of Additive Manufacturing Processes for Metals. Em: **Heat and Mass Transfer - Advances in Science and Technology Applications**. [s.l.] IntechOpen, 2019.

WILLIAMS, S. W. *et al.* Wire + Arc additive manufacturing. **Materials Science and Technology (United Kingdom)**, v. 32, n. 7, p. 641–647, 21 jun. 2016.

WU, B. *et al.* The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 258, p. 97–105, 1 ago. 2018a.

WU, B. *et al.* Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 23, p. 151–160, 1 out. 2018b.

WU, B. *et al.* **A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement.** *Journal of Manufacturing Processes* Elsevier Ltd, , 1 out. 2018c.

XIA, C. *et al.* **A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system.** *Journal of Manufacturing Systems* Elsevier B.V., , 1 out. 2020.

ZADI-MAAD, A.; ROHIB, R.; IRAWAN, A. **Additive manufacturing for steels: A review.** *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Anais...* Institute of Physics Publishing, 30 jan. 2018.

ZIAEE, M.; CRANE, N. B. **Binder jetting: A review of process, materials, and methods.** *Additive Manufacturing* Elsevier B.V., , 1 ago. 2019.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Altura e Largura PP1			
Camada	Altura (mm)	Altura por camada (mm)	Largura (mm)
1	2,5	2,5	5,3
2	4	1,5	5
3	6	2	5,3
4	7,5	1,5	5,5
5	9,8	2,3	6
6	11	1,2	7,6
7	13,6	2,6	6,2
8	14,4	0,8	8
9	16	1,6	5,8
10	18,3	2,3	5,8
11	19,7	1,4	5,8
12	21,5	1,8	5,8
13	23,5	2	6
14	26	2,5	6,2
15	27,3	1,3	6,7
16	28,5	1,2	6
17	30	1,5	6,4
18	32	2	6
19	34,5	2,5	5,8
20	36,6	2,1	6
21	38	1,4	5,2
22	39,2	1,2	6
23	41,6	2,4	5,8
24	43,5	1,9	6
25	45,3	1,8	6,3
26	46,6	1,3	4,2
27	48	1,4	6
28	51	3	5,8
29	51,5	0,5	6,5
30	53	1,5	6,2

APÊNDICE B

Altura e Largura PP2			
Camada	Altura (mm)	Altura por camada (mm)	Largura (mm)
1	3	3	9,3
2	5,5	2,5	9
3	8,2	2,7	8,2
4	10,7	2,5	8,3
5	13	2,3	9
6	14,7	1,7	8,5
7	17	2,3	9
8	19,2	2,2	9
9	21	1,8	9
10	23,7	2,7	9
11	26	2,3	9
12	28	2	9
13	30,5	2,5	9,5
14	33	2,5	9
15	35	2	9
16	37,5	2,5	8,5
17	39,8	2,3	8,5
18	42	2,2	9
19	44,5	2,5	9,5
20	46,5	2	9
21	48,6	2,1	9
22	50,8	2,2	8,5
23	53	2,2	9
24	55,5	2,5	9
25	57,5	2	8,5
26	59,5	2	9
27	61,2	1,7	7,5
28	64	2,8	8,5
29	66,5	2,5	9
30	68	1,5	9

APÊNDICE C

Altura e Largura PP3			
Camada	Altura (mm)	Altura por camada (mm)	Largura (mm)
1	2,8	2,8	8,6
2	4,3	1,5	5,5
3	6	1,7	6
4	8	2	6
5	9	1	6,3
6	11	2	5,8
7	12,6	1,6	6
8	14	1,4	6
9	16	2	6,3
10	17	1	6
11	18,3	1,3	6,5
12	21	2,7	6
13	22,5	1,5	6,3
14	24,7	2,2	6,5
15	25,8	1,1	5,9
16	27,5	1,7	6
17	29,4	1,9	5
18	31,8	2,4	6
19	32,7	0,9	5
20	34,5	1,8	6
21	35,7	1,2	4
22	37,8	2,1	6
23	39	1,2	6
24	41,1	2,1	6
25	42,8	1,7	6
26	45	2,2	6,4
27	46,1	1,1	6
28	49	2,9	6
29	50,2	1,2	6,1
30	51,2	1	5,5

APÊNDICE D

Altura e Largura PP4			
Camada	Altura (mm)	Altura por camada (mm)	Largura (mm)
1	2,5	2,5	8,5
2	5	2,5	8,7
3	7,1	2,1	9
4	9,1	2	9,6
5	11,7	2,6	9,6
6	13,7	2	9,2
7	15,3	1,6	9,7
8	18,6	3,3	9
9	21	2,4	9,4
10	22,6	1,6	11
11	25	2,4	9,8
12	26,7	1,7	9,1
13	30,6	3,9	9,5
14	31,7	1,1	9
15	35	3,3	9,2
16	37	2	8
17	39,5	2,5	8,9
18	41,6	2,1	9
19	43,1	1,5	9,7
20	44,2	1,1	9
21	48	3,8	9,4
22	50,5	2,5	9,1
23	52,5	2	9,9
24	55,5	3	9
25	56,7	1,2	10
26	57,5	0,8	9
27	61,2	3,7	9
28	64	2,8	9,5
29	66	2	9
30	68,5	2,5	9

APÊNDICE E

Média por camada de Potência e Energia de Deposição PP1		
Camada	Potência instantânea (W)	Energia de deposição (J/mm)
1	4120,57	412,06
2	4269,23	426,92
3	4126,58	412,66
4	3939,73	393,97
5	4041,41	404,14
6	4058,59	405,86
7	3936,15	393,62
8	4380,99	438,10
9	3982,11	398,21
10	4047,32	404,73
11	3967,17	396,72
12	4045,65	404,57
13	3993,87	399,39
14	4009,11	400,91
15	4051,68	405,17
16	4055,61	405,56
17	4122,25	412,23
18	4025,08	402,51
19	4046,09	404,61
20	4065,43	406,54
21	4145,31	414,53
22	4054,19	405,42
23	4141,48	414,15
24	3899,54	389,95
25	3991,46	399,15
26	4028,37	402,84
27	4086,32	408,63
28	3970,85	397,09
29	3936,9	393,69
30	3942,07	394,21

APÊNDICE F

Média por camada de Potência e Energia de Deposição PP2		
Camada	Potência instantânea (W)	Energia de deposição (J/mm)
1	4644,7	928,94
2	4544,64	908,93
3	4176,46	835,29
4	4140,5	828,10
5	4200,03	840,01
6	4144,32	828,86
7	4499,97	899,99
8	4459,64	891,93
9	4486	897,20
10	4525,58	905,12
11	4397,69	879,54
12	4540,48	908,10
13	4447,41	889,48
14	4642,86	928,57
15	4666,7	933,34
16	4581,65	916,33
17	4525,06	905,01
18	4505,96	901,19
19	4863,87	972,77
20	4761,49	952,30
21	4664	932,80
22	4701,64	940,33
23	4716,97	943,39
24	4820,78	964,16
25	4822,12	964,42
26	4647,01	929,40
27	4175,57	835,11
28	4654,29	930,86
29	4128,68	825,74
30	4321,94	864,39

APÊNDICE G

Média por camada de Potência e Energia de Deposição PP3		
Camada	Potência instantânea (W)	Energia de deposição (J/mm)
1	4844,04	484,40
2	4217,96	421,80
3	4873,5	487,35
4	4600,45	460,05
5	4664,01	466,40
6	4306,23	430,62
7	4611,3	461,13
8	4347,01	434,70
9	4612,03	461,20
10	4435,13	443,51
11	4331,43	433,14
12	4555,68	455,57
13	4490,82	449,08
14	4513,28	451,33
15	4418,78	441,88
16	4334,13	433,41
17	4411,06	441,11
18	4482,39	448,24
19	4425,9	442,59
20	4435,13	443,51
21	4490,82	449,08
22	4442,23	444,22
23	4231,29	423,13
24	4550,33	455,03
25	4532,32	453,23
26	4570,2	457,02
27	4512,23	451,22
28	4435,97	443,60
29	4446,03	444,60
30	4316,24	431,62

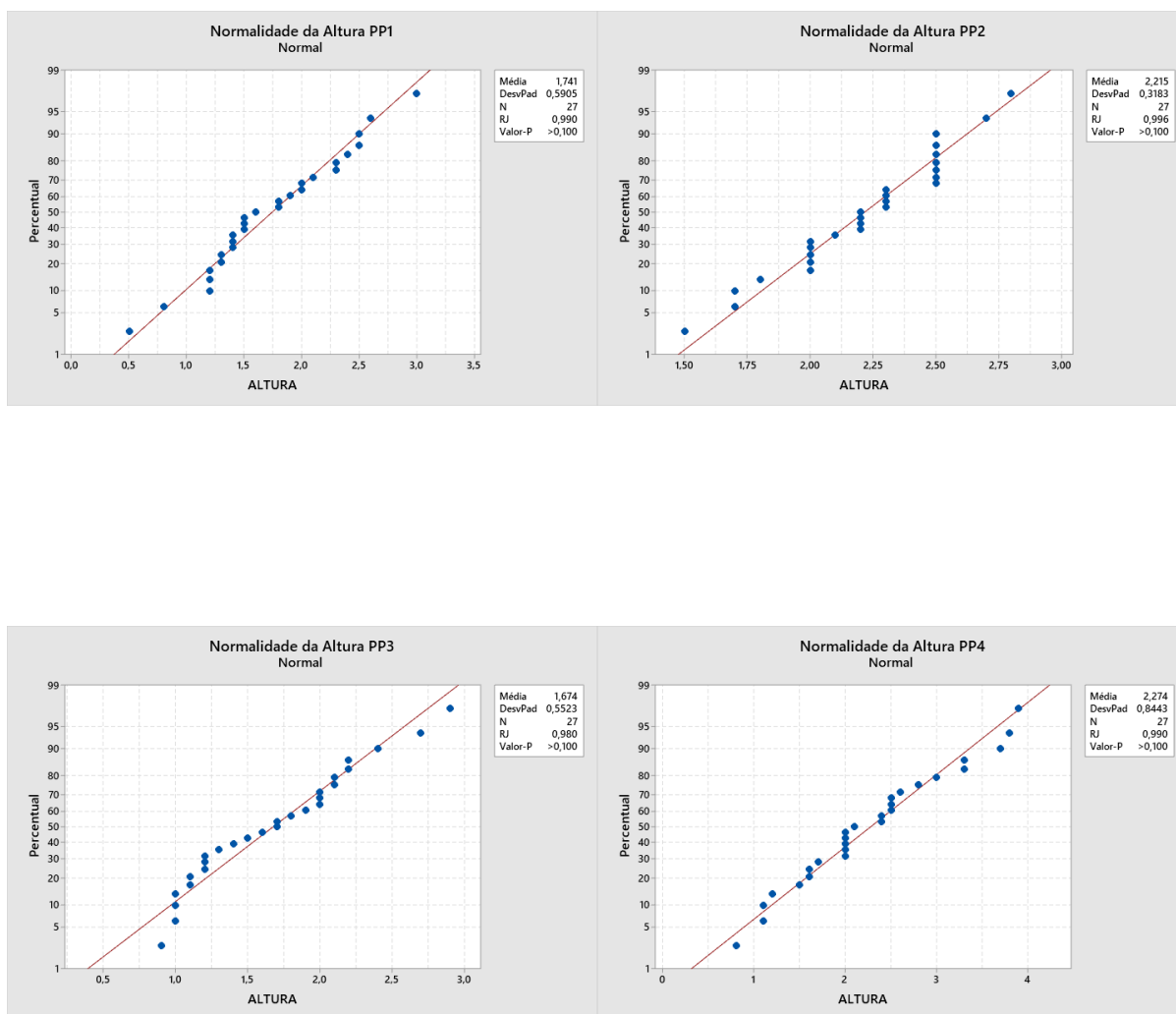
APÊNDICE H

Média por camada de Potência e Energia de Deposição PP4		
Camada	Potência instantânea (W)	Energia de deposição (J/mm)
1	4844,04	968,81
2	5121,51	1024,30
3	4873,5	974,70
4	4600,45	920,09
5	4664,01	932,80
6	4306,23	861,25
7	4611,3	922,26
8	4347,01	869,40
9	4612,03	922,41
10	4493,78	898,76
11	4545,25	909,05
12	4595,4	919,08
13	4615,76	923,15
14	4664,56	932,91
15	4762,26	952,45
16	4698,34	939,67
17	4483,13	896,63
18	4657,24	931,45
19	4633,91	926,78
20	4640,48	928,10
21	4738,92	947,78
22	4801,26	960,25
23	4800,45	960,09
24	4781,49	956,30
25	4807,3	961,46
26	4623,03	924,61
27	4716,65	943,33
28	4691,94	938,39
29	-	-
30	4797,76	959,55

APÊNDICE I

Testes de normalidade dos valores de altura

Ryan-Joiner (Similar ao Shapiro-Wilk)



APÊNDICE J

WORKSHEET

ANOVA com um fator: Altura versus Amostra

Método

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Amostra	4	PP1; PP2; PP3; PP4

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Amostra	3	7,894	2,6315	7,17	0,000
Erro	104	38,163	0,3670		
Total	107	46,057			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,605765	17,14%	14,75%	10,64%

Médias

Amostra	N	Média	DesvPad	IC de 95%
PP1	27	1,741	0,590	(1,510; 1,972)
PP2	27	2,2148	0,3183	(1,9836; 2,4460)
PP3	27	1,674	0,552	(1,443; 1,905)
PP4	27	2,274	0,844	(2,043; 2,505)

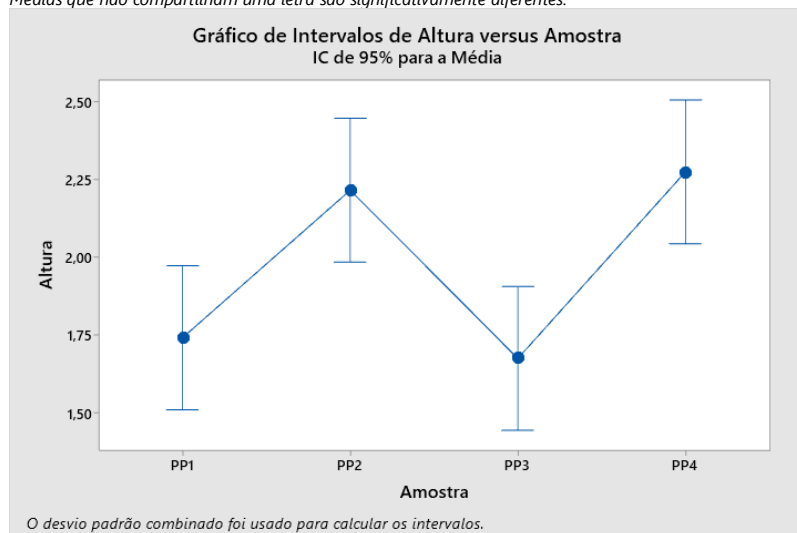
DesvPad Combinado = 0,605765

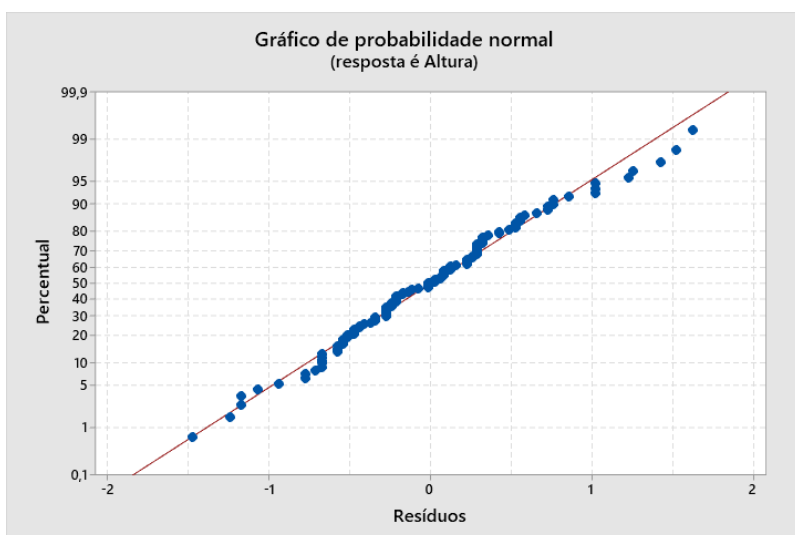
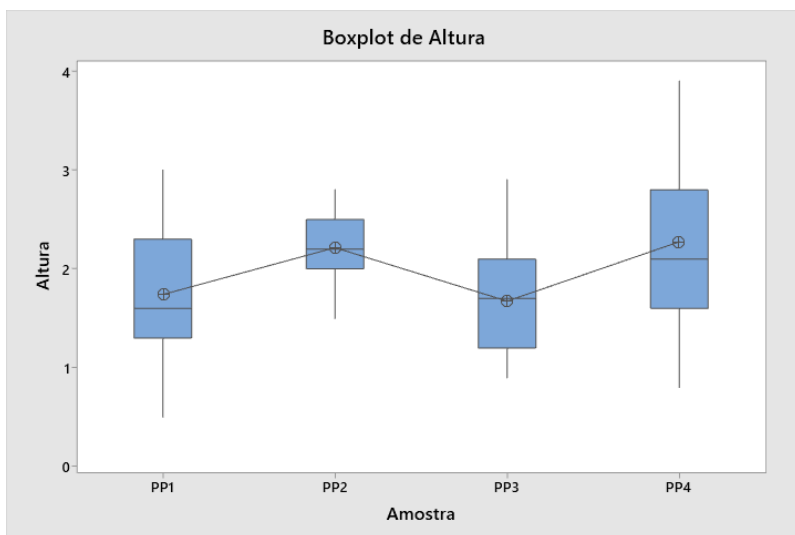
Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança

Amostra	N	Média	Agrupamento
PP4	27	2,274	A
PP2	27	2,2148	A
PP1	27	1,741	B
PP3	27	1,674	B

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

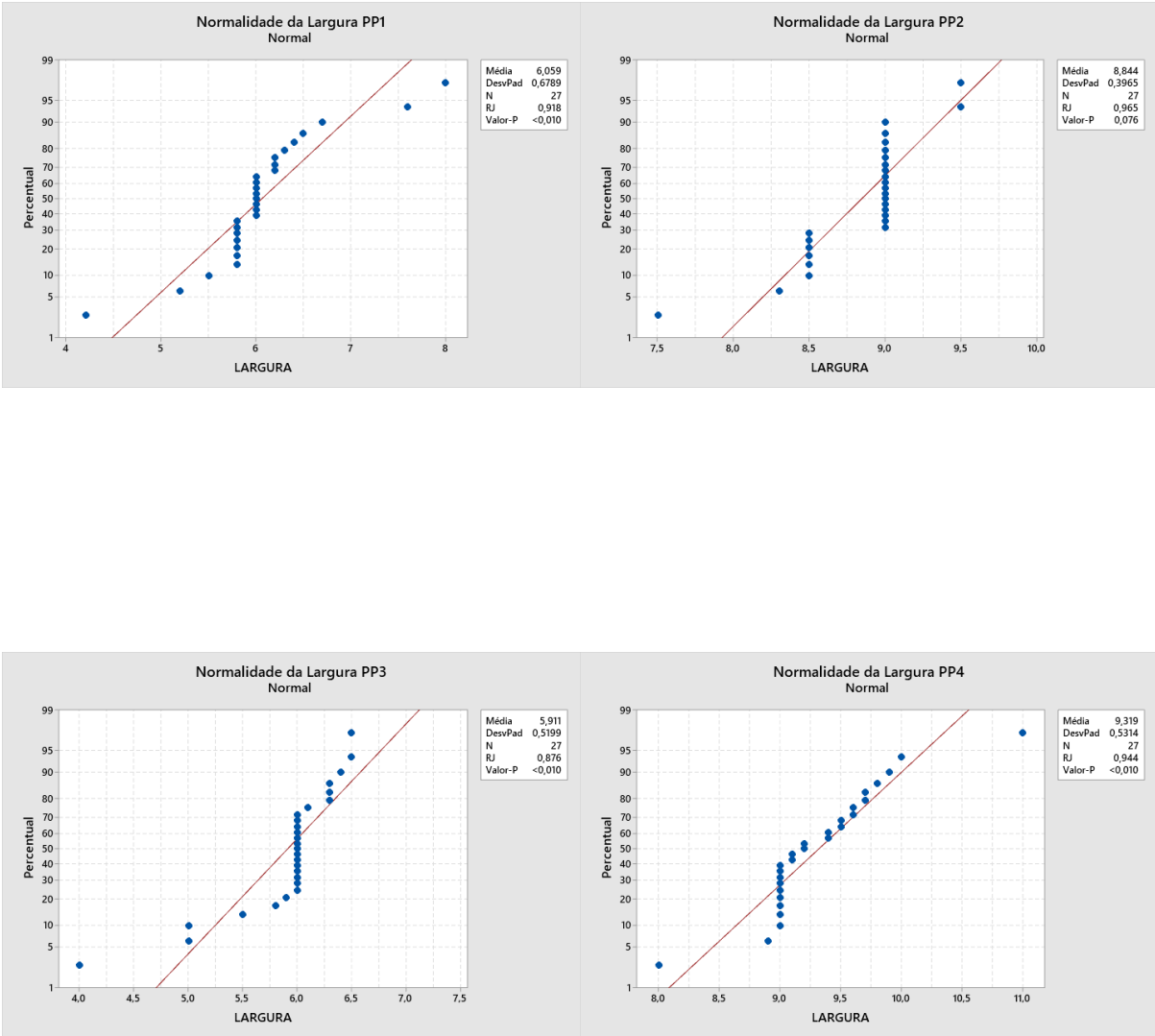




APÊNDICE K

Testes de normalidade dos valores de largura

Ryan-Joiner (Similar ao Shapiro-Wilk)



APÊNDICE L

WORKSHEET 1

ANOVA com um fator: Energia de deposição (J/mm) versus Vd(mm/s)

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa Nem todas as médias são iguais
Nível de significância $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Vd	2	5; 10

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Vd	1	242231	242231	335,62	0,003
Erro	2	1443	722		
Total	3	243674			

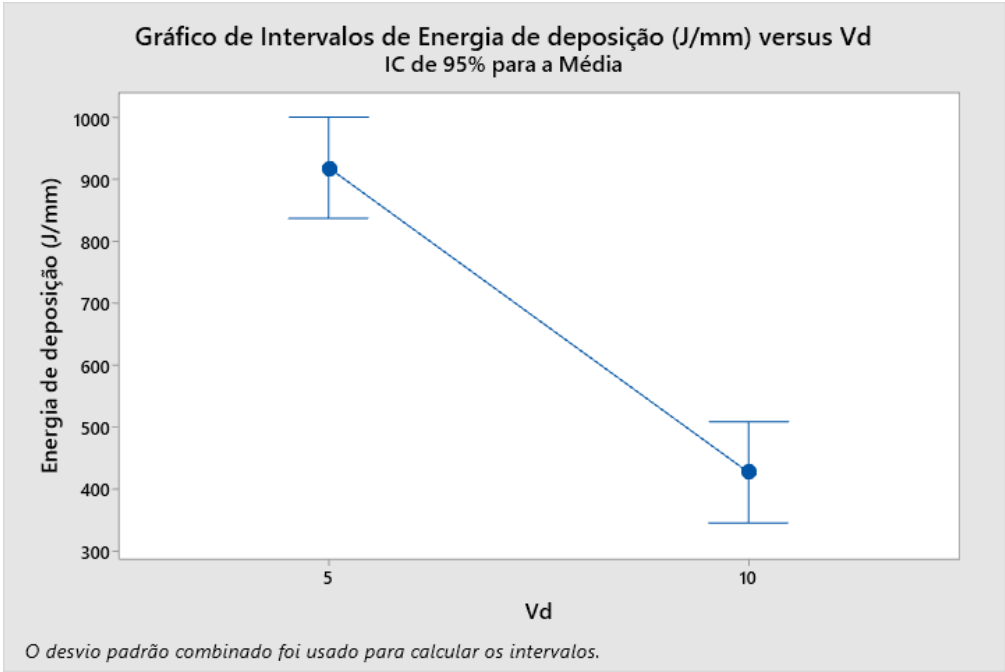
Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
26,8651	99,41%	99,11%	97,63%

Médias

Vd	N	Média	DesvPad	IC de 95%
5	2	918,7	22,6	(837,0; 1000,4)
10	2	426,5	30,5	(344,8; 508,3)

DesvPad Combinado = 26,8651



APÊNDICE M

WORKSHEET

Regressão Fatorial: Taxa de Resfriamento T1 (°C/s) versus Energia (J/mm); Tipo de Resfriamento

Seleção Stepwise de Termos

α para entrada = 0,15; α para remoção = 0,15

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de		Valor-T	Valor-P	VIF
			Coef	Coef			
Constante		7,325	0,470		15,59	0,004	
Tipo de Resfriamento	-10,950	-5,475	0,470		-11,66	0,007	1,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,939415	98,55%	97,82%	94,20%

Análise de Variância

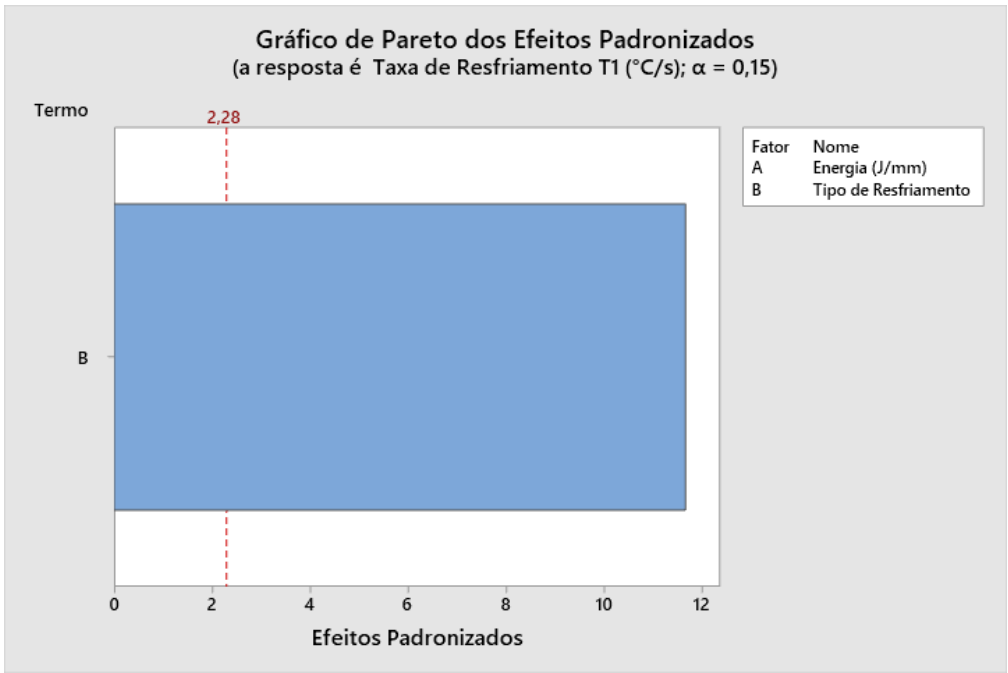
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	1	119,902	119,902	135,87	0,007
Linear	1	119,902	119,902	135,87	0,007
Tipo de Resfriamento	1	119,902	119,902	135,87	0,007
Erro	2	1,765	0,882		
Total	3	121,667			

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Taxa de Resfriamento T1 (°C/s) = 7,325 - 5,475 Tipo de Resfriamento

Estrutura de Aliases

Fator	Nome
A	Energia (J/mm)
B	Tipo de Resfriamento
Aliases	
I	
B	



APÊNDICE N

WORKSHEET

Regressão Fatorial: Taxa de Resfriamento T2 (°C/s) versus Energia (J/mm); Tipo de Resfriamento

Seleção Stepwise de Termos

α para entrada = 0,15; α para remoção = 0,15

Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante		2,3000	0,0791	29,09	0,001	
Energia (J/mm)	-2,1000	-1,0500	0,0791	-13,28	0,006	1,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,158114	98,88%	98,32%	95,52%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	1	4,41000	4,41000	176,40	0,006
Linear	1	4,41000	4,41000	176,40	0,006
Energia (J/mm)	1	4,41000	4,41000	176,40	0,006
Erro	2	0,05000	0,02500		
Total	3	4,46000			

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

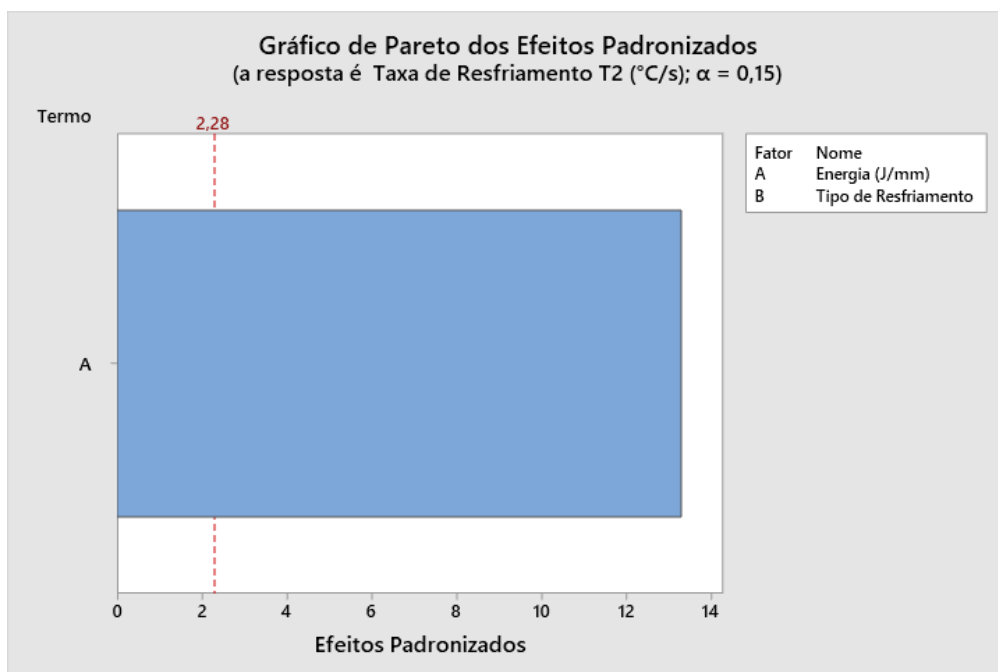
Taxa de Resfriamento T2 (°C/s) = 5,165 - 0,004260 Energia (J/mm)

Estrutura de Aliases

Fator	Nome
A	Energia (J/mm)
B	Tipo de Resfriamento

Aliases

I
A



APÊNDICE O

WORKSHEET

Regressão Fatorial: Taxa de Resfriamento T3 (°C/s) versus Energia (J/mm); Tipo de Resfriamento

Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de		Valor-T	Valor-P	VIF
			Coef	Coef			
Constante		1,875	*	*	*	*	
Energia (J/mm)	-0,9500	-0,4750	*	*	*	1,00	
Tipo de Resfriamento	-0,7500	-0,3750	*	*	*	1,00	
Energia (J/mm)*Tipo de Resfriamento	0,15000	0,07500	*	*	*	1,00	

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
*	100,00%	*	*

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	3	1,48750	0,49583	*	*
Linear	2	1,46500	0,73250	*	*
Energia (J/mm)	1	0,90250	0,90250	*	*
Tipo de Resfriamento	1	0,56250	0,56250	*	*
Interações de 2 fatores	1	0,02250	0,02250	*	*
Energia (J/mm)*Tipo de Resfriamento	1	0,02250	0,02250	*	*
Erro	0	*	*		
Total	3	1,48750			

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

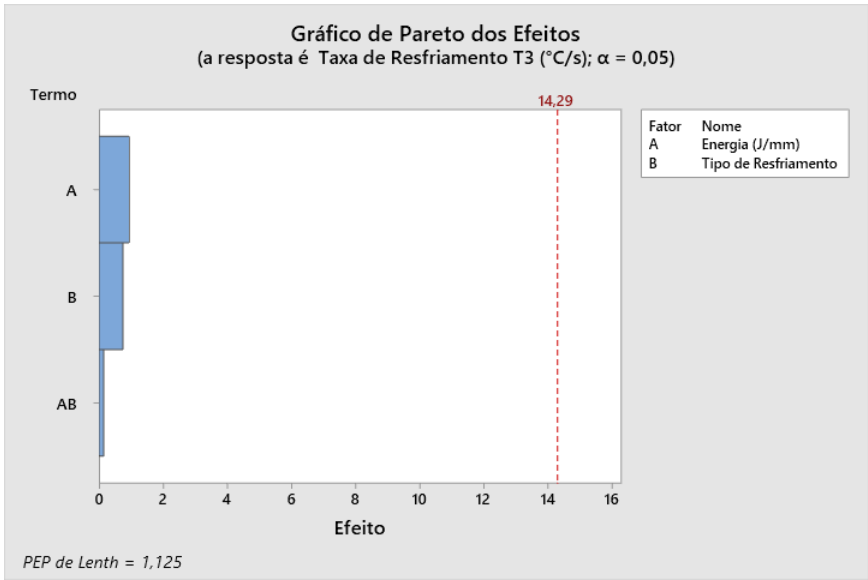
Taxa de Resfriamento T3 (°C/s) = 3,171 - 0,001927 Energia (J/mm)
- 0,5796 Tipo de Resfriamento
+ 0,000304 Energia (J/mm)*Tipo de Resfriamento

Estrutura de Aliases

Fator	Nome
A	Energia (J/mm)
B	Tipo de Resfriamento

Aliases

I
A
B
AB



APÊNDICE P

WORKSHEET 1

ANOVA com um fator: Energia Absorvida (J) versus Amostra

Método

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$

Assumi-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Amostra	4	PP1; PP2; PP3; PP4

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Amostra	3	61,64	20,546	9,48	0,000
Erro	32	69,33	2,167		
Total	35	130,97			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
1,47196	47,06%	42,10%	33,00%

Médias

Amostra	N	Média	DesvPad	IC de 95%
PP1	9	23,111	0,601	(22,112; 24,111)
PP2	9	25,667	1,500	(24,667; 26,666)
PP3	9	23,222	1,716	(22,223; 24,222)
PP4	9	25,889	1,764	(24,889; 26,888)

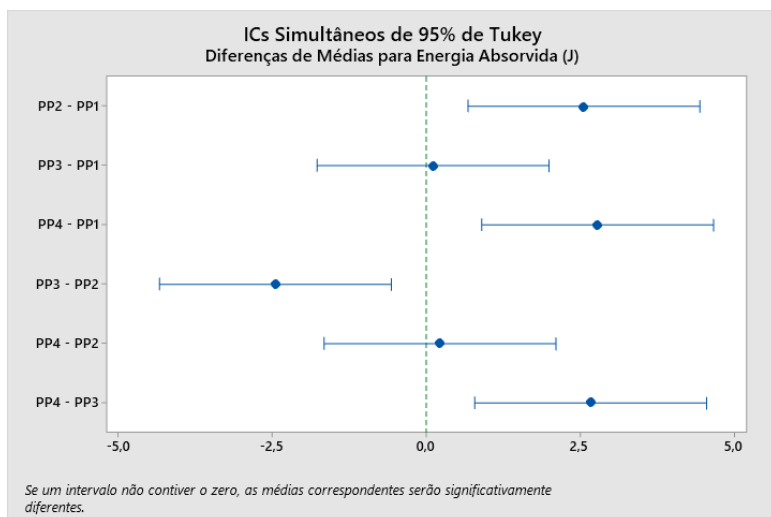
DesvPad Combinado = 1,47196

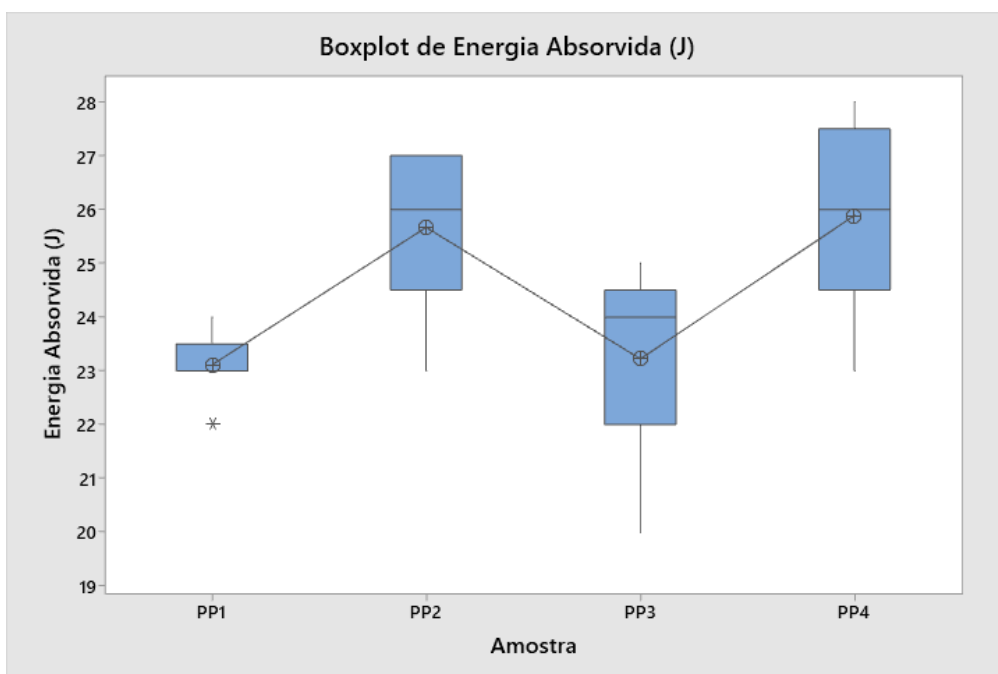
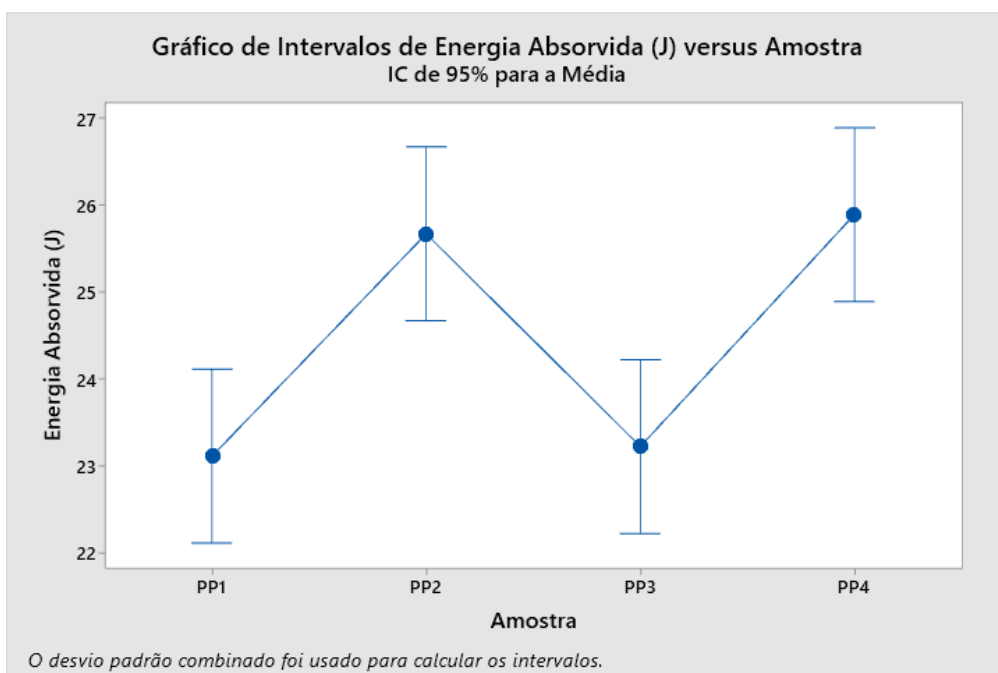
Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança

Amostra	N	Média	Agrupamento
PP4	9	25,889	A
PP2	9	25,667	A
PP3	9	23,222	B
PP1	9	23,111	B

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.





APÊNDICE Q

WORKSHEET 5

Regressão Fatorial: Energia absorvida (J) versus Energia (J/mm); Tipo de Resfriamento

Seleção Stepwise de Termos

α para entrada = 0,15; α para remoção = 0,15

Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante		24,4700	0,0637	383,92	0,000	
Energia (J/mm)	2,6100	1,3050	0,0637	20,47	0,002	1,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,127475	99,53%	99,29%	98,10%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	1	6,81210	6,81210	419,21	0,002
Linear	1	6,81210	6,81210	419,21	0,002
Energia (J/mm)	1	6,81210	6,81210	419,21	0,002
Erro	2	0,03250	0,01625		
Total	3	6,84460			

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Energia absorvida (J) = 20,910 + 0,005294 Energia (J/mm)

Estrutura de Aliases

Fator	Nome
A	Energia (J/mm)
B	Tipo de Resfriamento

Aliases

I
A

