



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS - PPGCEM

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE DEPOSIÇÃO, DA
FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO E DO TIPO DE RESFRIAMENTO NA ENERGIA
ABSORVIDA NO ENSAIO DE CHARPY V DE PRODUTOS METÁLICOS OBTIDOS
POR MANUFATURA ADITIVA**

RIGLEY JORGE NERI CORRÊA JÚNIOR

Manaus-AM

2025

RIGLEY JORGE NERI CORRÊA JÚNIOR

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE DEPOSIÇÃO, DA
FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO E DO TIPO DE RESFRIAMENTO NA ENERGIA
ABSORVIDA NO ENSAIO DE CHARPY V DE PRODUTOS METÁLICOS OBTIDOS
POR MANUFATURA ADITIVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas, como requisito final para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Casanova Soeiro Junior
Coorientador: Prof. Dr. Antonio do Nascimento Silva
Alves

Manaus-AM

2025

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

C824e	Corrêa Júnior, Rigley Jorge Neri Estudo sobre a influência da energia de deposição, da frequência de pulsação e do tipo de resfriamento na energia absorvida no Ensaio Charpy V de produtos metálicos obtidos por manufatura aditiva / Rigley Jorge Neri Corrêa Júnior . 2025 157 f.: il. color; 31 cm. Orientador: Jaime Casanova Soeiro Junior Coorientador: Antonio do Nascimento Silva Alves Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas. 1. Manufatura aditiva. 2. Aços de alta resistência. 3. GMAW - Gas Metal Arc Welding. 4. Ensaio de impacto Charpy. I. Soeiro Junior, Jaime Casanova. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título
-------	--

RIGLEY JORGE NERI CORRÊA JÚNIOR

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE DEPOSIÇÃO, DA
FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO E DO TIPO DE RESFRIAMENTO NA ENERGIA
ABSORVIDA NO ENSAIO DE CHARPY V DE PRODUTOS METÁLICOS OBTIDOS
POR MANUFATURA ADITIVA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas, UFAM, como parte dos requisitos para obtenção do grau de mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Data: 06 de março de 2025.

Banca examinadora

Prof. Dr. Jaime Casanova Soeiro Junior
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Marcionilo Neri da Silva Júnior
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Rubelmar Maia de Azevedo Cruz Neto
Universidade Estadual do Amazonas

*“Todos nós precisamos de
histórias. O que acontece
em nossas vidas diárias
muda nossas histórias.”*

Wong Kar Wai

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de mestrado à minha família, cujo amor, apoio e sacrifício tornaram possível esta jornada. À minha mãe e meu pai, por seu constante incentivo e compreensão, e aos meus irmãos, por serem minha fonte de inspiração.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste projeto de mestrado. Em primeiro lugar, agradeço à minha família pelo apoio incondicional ao longo desta jornada. Suas palavras de encorajamento e suporte emocional foram fundamentais para me manter motivado nos momentos desafiadores.

Aos meus amigos, colegas e professores, expresso minha sincera gratidão pela orientação, pelas discussões valiosas e pela inspiração ao longo deste trabalho de qualificação. Suas contribuições e perspectivas foram essenciais para o desenvolvimento deste projeto.

Meu reconhecimento especial vai ao meu orientador, Professor Doutor Jaime Casanova, cujo profissionalismo, dedicação e apoio foram fundamentais para a condução deste estudo. Também expresso minha profunda gratidão ao meu coorientador, Prof. Dr. Antonio do Nascimento Silva Alves, por sua valiosa orientação, suporte acadêmico e incentivo ao longo deste processo.

Um agradecimento especial também ao Saymon, meu parceiro de laboratório, que esteve comigo ao longo de mais de cinco meses intensos de trabalho na produção dos corpos de prova do projeto. Sua dedicação, colaboração e empenho foram indispensáveis para alcançarmos nossos objetivos. Não posso deixar de mencionar minha irmã Adrielly Corrêa, Adan Milano, e meu cunhado Adan Milano, por todo o suporte pessoal ao longo do mestrado. Meu profundo agradecimento também aos meus melhores amigos Pedro Calvacanti e Vitoria Leal, pelo companheirismo, amizade, palavras de conforto e apoio inestimável. Além disso, expresso minha gratidão à minha amiga Ana Carolina pelo suporte ao longo dessa jornada.

Agradeço ainda à FAPEAM pelo apoio financeiro por meio da bolsa de pesquisa, além da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES). Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) com o projeto N° 409870/2023-4 e pela FAPEAM com o projeto N° 01.02.016301.01378/2023-69.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho, meu mais sincero obrigado.

RESUMO

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) se destaca como uma técnica específica para a manufatura aditiva de materiais metálicos, oferecendo vantagens na produção de peças de grandes dimensões com elevadas taxas de deposição de material. Essa técnica é especialmente usada em setores industriais como aeroespacial, automobilístico e de petróleo e gás. No entanto, um dos principais desafios desse processo está relacionado ao acúmulo de calor durante a deposição das camadas, o que impacta diretamente a geometria, promovendo alterações indesejáveis nas microestruturas e consequentemente gerando alterações nas propriedades mecânicas da peça. Uma opção para reduzir o tempo o qual as camadas inferiores ficam aquecidas durante e após a deposição das novas camadas é empregar técnicas de resfriamento que removam o calor ao longo do processo de deposição, em especial, o resfriamento indireto, onde um fluido refrigerante auxilia a remoção do calor. Nesse contexto, este trabalho aborda parâmetros e condições de fabricação como fatores em um delineamento experimental para analisar a influência das variações desses parâmetros na energia absorvida no ensaio de impacto Charpy V de produtos metálicos fabricados via MADA. Os parâmetros considerados foram: energia de deposição do material, frequência de pulsação e tipo de resfriamento. Os resultados indicam que houve alteração significativa de dureza na comparação entre as médias de microdureza das camadas do CP2, CP3 e CP7. Entretanto, as diferenças não ultrapassam 7,15 %. Também foi observado na análise das dimensões geométricas, que a energia de deposição é o fator mais influente, amostras com alta energia de deposição apresentaram largas médias menores e alturas maiores. Embora a energia de deposição se apresente como um dos fatores de maior influência no processo, não foi capaz gerar uma diferença significativa na energia absorvida no ensaio Charpy, uma vez que as médias obtidas não apresentaram variações relevantes entre as amostras.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, Aços de alta resistência, GMAW, Ensaio de impacto Charpy.

ABSTRACT

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) is a specific technique for additive manufacturing using metallic materials, offering advantages in producing large, high-quality parts with high material deposition rates. This technique is particularly used in industrial sectors such as aerospace, automotive, and oil and gas. However, one of the main challenges of this process is related to heat accumulation during layer deposition, which directly impacts geometry, leading to undesirable changes in microstructures and consequently altering the mechanical properties of the part. One approach to reducing the time that the lower layers remain heated during and after the deposition of new layers is to employ cooling techniques that remove heat throughout the deposition process, especially indirect cooling, where a coolant fluid aids in heat dissipation. In this context, this study examines manufacturing parameters and conditions as factors in an experimental design to analyze the influence of variations in these parameters on the absorbed energy in the Charpy V impact test of metallic products manufactured via WAAM. The considered parameters were deposition energy, pulse frequency, and cooling type. The results indicate a significant variation in hardness when comparing the microhardness averages of layers CP2, CP3, and CP7. However, the differences did not exceed 7.15%. Additionally, in the analysis of geometric dimensions, deposition energy was identified as the most influential factor, with samples exhibiting high deposition energy showing smaller average widths and greater heights. Although deposition energy appears to be one of the most influential factors in the process, it did not generate a significant difference in the absorbed energy in the Charpy test, as the obtained averages did not show relevant variations among the samples.

Keywords: Additive manufacturing, High-strength steels, GMAW, Charpy impact test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Categorias de AM para materiais metálicos.	10
Figura 2: Processo (a) SLM e (b) DED.	11
Figura 3: Representação esquemática do processo MADA.	12
Figura 4: Esquema das três técnicas a arco elétrico. (a) MIG/MAG, (b) TIG e (c) Plasma....	13
Figura 5: Modos de Transferência MIG/MAG. a) Curto-circuito, (b) Pulsado, (c)	15
Figura 6: Representação do método MIG/MAG pulsado.....	17
Figura 7: Esquema da transferência MIG/MAG pulsado.	17
Figura 8: Transferência térmica. (a) Soldagem em chapa e (b) MADA.	19
Figura 11: Esquema das formas de gerenciamento térmico.	21
Figura 12: Alongamento à tração vs limites de escoamento para aços de alta resistência.....	24
Figura 13: Sistema de manufatura aditiva por arco elétrico.	27
Figura 14: Sistema de produção sendo 1- Fonte de energia IMC Digi plus A7, 2- Sistema CNC de controle, 3-Sistema de captação de dados dos ciclos térmicos com aquisição de dados SAP e 4- Sistema de captação de aquisição de dados.....	27
Figura 15: Sistema de resfriamento à água.....	28
Figura 16: Sistema de resfriamento, 1- Tocha, 2- Reservatório, 3- Bancada de captação de dados, 4- Tanque, 5- Bomba e 6- Fonte de energia,	28
Figura 17: (a) Painel principal do Mach 3, (b) Painel do SAPTI4.35.	29
Figura 18: (a) Deposição em uma única camada, alta energia; (b) Deposição em múltiplas camadas, alta e baixa energia; (c) Cordão com alta energia e frequência alta; (d) Cordão com baixa energia e alta frequência.	29
Figura 19: 10 CPs fabricadas via MADA.....	34
Figura 20: Posicionamento do termopar nos CPs.....	36
Figura 21: CPs para análise de macrografia, micrografia e microdureza.....	38
Figura 22: Esquema da retirada dos corpos de prova Charpy V dos CPs.	39
Figura 23: 1- Equipamento de ensaio, 2- Geometria dos corpos de provas , 3- Ensaio de impacto 3 4- Corpos de provas rompidos.....	40
Figura 24: Localização das impressões de dureza HV0,5. (a) CP com marcação das camadas analisadas para o ensaio; (b) marcação e (c) visualização da marcação.	41
Figura 25: Energia de deposição captadas no sistema de aquisição de dados para os 10 CPs.	43

Figura 26: Gráficos representativos das curvas de tensão e corrente para diferentes condições de energia e frequência de pulsação: (a) CP3 – baixa energia, 100 Hz; (b) CP6 – alta energia, 1000 Hz; (c) CP3 – alta energia, 100 Hz e CP1 – baixa energia, 1000 Hz.	44
Figura 27:(a) Gráfico de Pareto para a largura média, (b) Gráfico dos efeitos principais para a largura média.	46
Figura 28: Gráfico de interação dos fatores A e C (energia de deposição e tipo de resfriamento) para a largura média.	47
Figura 29: (a) Gráfico de Pareto para altura média, (b) Gráfico dos efeitos principais para altura média.	49
Figura 30: Ciclos térmicos para os três termopares (T1, T2. T3).....	51
Figura 31: (a) Gráfico de Pareto para taxa de resfriamento T1.	53
Figura 32: Gráfico dos efeitos para taxa de resfriamento T1.	54
Figura 33: Gráfico de Pareto para nível de significância de 0,15 para a taxa de resfriamento T1.	55
Figura 34: Taxa de resfriamento T1.	56
Figura 35:Gráfico de Pareto para taxa de resfriamento T2.	57
Figura 36: Gráfico dos efeitos para taxa de resfriamento T2.	58
Figura 37: Gráfico de Pareto para nível de significância de 0,15 para a taxa de resfriamento T2.	59
Figura 38: Taxa de resfriamento T2.	60
Figura 39: (a) Gráfico de Pareto para taxa de resfriamento T3.	61
Figura 40: Gráfico dos efeitos para taxa de resfriamento T3.	62
Figura 41: Gráfico de Pareto para nível de significância de 0,15 para a taxa de resfriamento T3.	63
Figura 42: Taxa de resfriamento T3.	64
Figura 43: Taxa de resfriamento do T1, T2 e T3.....	64
Figura 44: Taxa de resfriamento do T1 em função da altura da 6° camada.	65
Figura 45: Micrografia do CP1 com ampliação a) 100x, b) 200x e c) 400x.	66
Figura 46: Micrografia do CP4 com ampliação a) 100x, b) 200x e c) 400x.	66
Figura 47: Micrografia do CP5 com ampliação a) 100x, b) 200x e c) 400x.	67
Figura 48: Micrografia do CP8 com ampliação a) 100x, b) 200x e c) 400x	68
Figura 49: Média total da energia absorvida os CPs.	70
Figura 50: (a) Gráfico de Pareto para a energia de impacto de Charpy.	71

Figura 51: Gráfico dos efeitos para a energia de impacto de Charpy.....	71
Figura 52: Diferença de médias para usando Teste Tukey CP3-CP2.....	72
Figura 54: Médias de Energia absorvida no ensaio de Charpy V para os CPS.....	73
Figura 55:Análise fractográfica da superfície de fratura do corpo de provas resfriado ao ar para o ensaio de Charpy V para o CP1, CP2, CP3, CP4 e CP9.	74
Figura 56:Análise fractográfica da superfície de fratura do corpo de prova resfriado a água para o ensaio de Charpy V para o CP5, CP6, CP7, CP8 e CP10.	75
Figura 57:Valores médios de microdureza para os CPs.....	77
Figura 58: Teste de Tukey. diferença de médias das camadas do CP2.	78
Figura 59:Teste de Tukey de diferença de médias das camadas do CP3.	79
Figura 60:Teste de Tukey de diferença de médias das camadas do CP7.	80
Figura 61: Teste de Tukey. Diferença de médias das camadas do CP1.	81
Figura 62: Médias de microdureza das 6° camadas.	82
Figura 63 :Teste de Tukey de diferença de médias da 6° camada dos CPs.....	83
Figura 64: Médias de microdureza das camadas 19°.	83
Figura 65: Teste de Tukey de diferença de médias da 19° camada dos CPs.....	84
Figura 66: Médias de microdureza das camadas 19° e 23°.	84
Figura 67: Teste de Tukey de diferença de médias das camadas 19° e 23° dos CPs.	85
Figura 68:: Médias de microdureza das camadas 28°.	86
Figura 69:Teste de Tukey de diferença de médias das camadas 28° dos CPs.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros do processo MADA.	14
Tabela 2: Principais metais usados em MADA.	21
Tabela 3: Composição química porcentagem mássica das chapas de aço utilizadas.	26
Tabela 6: Parâmetros para definição da energia de deposição.	30
Tabela 7: Parâmetros de correntes e tempos da frequência de pulsação estudado.	30
Tabela 8: Energia de deposição definidas para a fabricação dos CPs.	31
Tabela 9: Parâmetros a serem estudados.	32
Tabela 10: Delineamento dos parâmetros de fabricação por meio de um DOE feito no MINITAB.	33
Tabela 11: Critérios de análise dos ciclos térmicos das camadas escolhidas por amostras.	36
Tabela 12: Definição da camada escolhida para análise do ciclo térmico de cada termopar.	37
Tabela 13: Dados das respostas geométricas médias dos CPs.	45
Tabela 14: Sumário do Modelo para largura média dos CPs.	45
Tabela 15: Sumário do Modelo para altura média dos CPs.	48
Tabela 16: Taxa de resfriamento por termopares para o intervalo de temperatura de 324°-200°.	52
Tabela 17: Sumário do Modelo para taxa de resfriamento T1.	52
Tabela 18: Sumário do Modelo para taxa de resfriamento T1 após Stepwise Selection.	54
Tabela 19: Sumário do Modelo para taxa de resfriamento T2.	56
Tabela 20: Sumário do Modelo para taxa de resfriamento T2 após Stepwise Selection.	58
Tabela 21: Sumário do Modelo para taxa de resfriamento T3.	61
Tabela 22: Sumário do Modelo para taxa de resfriamento T3.	62
Tabela 23: Dados coletados da energia de impacto por amostra e subgrupo.	69
Tabela 24: Sumário do modelo para energia de impacto.	70
Tabela 25: Agrupamento usando Método de Tukey e 95% de confiança com as médias geral por CP.	72
Tabela 26: Dados coletados de microdureza.	76
Tabela 27: Testes Simultâneos de Tukey para as Diferenças de Médias para o CP2.	78
Tabela 28: Testes Simultâneos de Tukey para as Diferenças de Médias para o CP3.	79
Tabela 29: Testes Simultâneos de Tukey para as diferenças de médias para o CP7.	80
Tabela 30: Testes Simultâneos de Tukey para as diferenças de médias para o CP1.	81

Tabela 31: Testes Simultâneos de Tukey para as diferenças de médias para o CP3.....	85
---	----

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	4
2.	OBJETIVO	7
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	8
3.1.	Manufatura aditiva.....	8
3.2.	Manufatura aditiva em materiais metálicos.....	9
3.2.1.	Manufatura aditiva por deposição a arco (MADA).....	12
3.2.2.	Modos de transferências metálicas (MIG/MAG)	14
3.2.3.	Energia de deposição em MADA.....	18
3.2.4.	Técnicas de resfriamento	20
3.2.5.	Metais utilizados em manufatura aditiva por deposição a arco (MADA)	21
4.	METODOLOGIA	26
4.1	Material de substrato	26
4.2	Material de adição	26
4.3	Procedimento de fabricação.....	26
4.4.	Impacto de Charpy.....	39
4.5.	Fractografias	40
4.6.	Ensaio mecânico de MicrodurezaVickers (HV0,5).....	41
4.7.	Análise estatística	41
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1.	ENERGIA DE DEPOSIÇÃO	43
5.2.	ANÁLISE DA GEOMETRIA POR CAMADA DEPOSITADA.	44
5.2.1.	Largura média.....	45
5.2.2.	Altura média	48
5.3.	CICLOS TÉRMICOS	51
5.3.1.	Taxa de resfriamento T1.....	52
5.3.2.	Taxa de resfriamento T2.....	56
5.3.3.	Taxa de resfriamento T3.....	60
5.4.	MICROESTRUTURAS	65
5.4.1.	Microestruturas do CPs resfriados ao ar.....	65
5.4.2.	Microestruturas do CPs resfriados à água	66
5.5.	ENERGIA ABSORVIDA (J)	68
5.6.	FRACTOGRAFIAS	73

5.7.	MICRODUREZAS VICKERS HV0,5	76
5.7.1.	Análise de Microdureza Vickers HV0,5 das camadas por CP	77
5.7.2.	. Análise de Microdureza Vickers HV0,5 das 6°,19°, 23° e 28° camadas.	82
6.	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICES	95
	APÊNDICE A: TABELAS DAS DIMENSÕES GEOMÉTRICAS (ALTURA E LARGURA) DOS CPS	96
	APÊNDICE B: TABELAS DAS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO DOS CPS	106
	APÊNDICE C: GRÁFICOS DOS TESTES DE NORMALIDADE PARA ENERGIA DE DEPOSIÇÃO DOS CPS	116
	APÊNDICE D: GRÁFICOS DOS TESTES DE NORMALIDADE PARA ALTURA DOS CPS	118
	APÊNDICE E: GRÁFICOS DOS TESTES DE NORMALIDADE PARA LARGURA DOS CPS	120
	APÊNDICE F: REGRESSÃO FATORIAL: ALTURA MÉDIA (MM) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL	122
	APÊNDICE G: REGRESSÃO FATORIAL: LARGURA MÉDIA (MM) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL	125
	APÊNDICE H: TABELAS DOS DADOS TRATADOS DAS TAXAS DE RESFRIAMENTOS T1, T2 E T3	128
	APÊNDICE I:REGRESSÃO FATORIAL: TAXA DE RESFRIAMENTO T1 (°C/S) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL	130
	APÊNDICE J: REGRESSÃO FATORIAL: TAXA DE RESFRIAMENTO T1 (°C/S) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL	133
	APÊNDICE L:REGRESSÃO FATORIAL: TAXA DE RESFRIAMENTO T2 (°C/S) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL	134

APÊNDICE M: REGRESSÃO FATORIAL: TAXA DE RESFRIAMENTO T2 (°C/S) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL	137
APÊNDICE N: REGRESSÃO FATORIAL: TAXA DE RESFRIAMENTO T3 (°C/S) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL	138
APÊNDICE N:REGRESSÃO FATORIAL: TAXA DE RESFRIAMENTO T3 (°C/S) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL	141
APÊNDICE P: FIGURAS DAS MICROESTRUTURAS DAS CAMADAS 6°, 19°, 23° E 28° DOS CPS.....	142
APÊNDICE O: GRÁFICOS DOS TESTES DE NORMALIDADE PARA OS DADOS DE ENERGIA ABSORVIDA (J)	152
APÊNDICE Q: REGRESSÃO FATORIAL: ENERGIA DE IMPACTO (J) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL	153
APÊNDICE R: GRÁFICOS DOS TESTES DE NORMALIDADE PARA OS DADOS DE MICRODUREZA VICKERS 0,5 POR CP.....	156
APÊNDICE S: GRÁFICOS DOS TESTE DE NORMALIDADE PARA OS DADOS DE MICRODUREZA VICKERS 0,5 PARA 6°, 19°, 23° E 28° CAMADA.	

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A manufatura aditiva (MA) é uma técnica que é caracterizada por produzir peças a partir de um modelo 3D, sendo fabricadas pela deposição camada a camada, possibilitando um melhor custo-benefício na produção de peças individuais ou em pequenos lotes, além de reduzir o tempo de espera que não seriam possíveis por outros processos de fabricação convencionais. (Waterman; Dickens, 1994; Guo; Leu, 2013).

O processo envolve a combinação de um sistema de movimento, uma fonte de calor e deposição de material (Williams *et al.*, 2016). Possui características, como liberdade de design, complexidade, leveza e consolidação da peça, e estão atraindo interesses particulares na fabricação aditiva de metal para aplicação aeroespaciais, marítimas, automotivas e na indústria de petróleo e gás (Thomas; Venkat, 2016).

Destaca-se a manufatura aditiva por deposição por energia direcionada, que permite a produção de peças sob demanda e altamente personalizadas em termos de geometria e melhores propriedades mecânicas da peça, além de oferecer uma variedade de materiais e processos para diversas aplicações (Dornelles, 2022). Esse método é especialmente promissor para componentes que exigem alta resistência estrutural, sendo capaz de produzir peças com essa característica (Gomes; Wiltgen, 2020).

Especificamente, a manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) se sobressai nesse contexto, utilizando como fonte de calor o arco elétrico e um arame como alimentador de material para fabricar componentes de maior energia de deposição, com alta taxa de deposição e velocidade. Esse método faz uso de fontes de energia baseadas em processos de soldagem, como o MIG/MAG (Dornelles, 2022; Alberti, *et.al.*, 2014; Ding *et al.*, 2015). Além disso, tem sido aplicado em diversos materiais metálicos, como ligas de titânio, níquel, alumínio e aços (Wu *et.al.*, 2018).

Nesse tipo de processo, é necessário um controle dos parâmetros de deposição bem definidos, pois isso possibilita a produção de peças com elevadas propriedades mecânicas, uniformidade e bom acabamento (Lima, 2023). É fundamental realizar estudos para compreender como os parâmetros do processo afetam as propriedades do material e o desempenho das peças, incluindo resistência, ductilidade, tenacidade, tensão residual, precisão geométrica e estabilidade, especialmente em condições de alta taxa de deposição de material (Huang *et al.*, 2015).

Os parâmetros como tensão do arco elétrico, corrente elétrica da fonte de soldagem, transferência metálica, velocidade de alimentação, velocidade de deposição, diâmetro do arame e quantidade de energia podem levar a desvios geométricos e volumétricos, além de impactar negativamente as propriedades mecânicas e físicas. Esses fatores exercem uma influência significativa na qualidade das camadas depositadas (Silva; Barbosa; Carvalho, 2015).

Como a MADA possui acúmulo de calor à medida que mais material é depositado na fabricação das peças, especialmente com componentes de parede fina, onde a dissipação de calor é mais restrita (Yang; He; Zhang, 2016).

Neste contexto, o modo de transferência do metálica é uma variável que influencia que a energia de deposição durante o processo MADA, devido à forma de onda do pulso e ao modo de transferência de gotas, que permitem um controle (Zhai *et al.*, 2020).

Esse acúmulo de calor pode ter vários impactos na geometria da camada depositada, como o aumento da largura, a oxidação excessiva e alterações metalúrgicas indesejáveis, que podem comprometer as propriedades mecânicas das peças (Wu *et al.*, 2017). Além disso, esse superaquecimento das camadas pode reduzir a produtividade do processo, afetando negativamente o rendimento e a eficiência da fabricação.

As propriedades mecânicas das peças metálicas produzidas pelo processo MADA podem variar devido à influência dos ciclos térmicos na microestrutura durante o processamento. Devido os múltiplos ciclos térmicos, resultam no significativo acúmulo de calor durante o processo da deposição das camadas. Consequentemente, a variação nas propriedades mecânicas acaba dependendo dos parâmetros de deposição, das condições do processo e das propriedades do material utilizado (Aldalur, 2020; Wu, 2018). Para controlar os efeitos adversos da energia excessiva durante a fabricação por manufatura aditiva, foram desenvolvidas técnicas de resfriamento.

O tempo de resfriamento é outro que pode impactar as propriedades mecânicas das juntas soldadas, resultando em um aumento da dureza e uma redução da ductilidade. Esses efeitos podem ser avaliados pela quantidade de energia absorvida no ensaio Charpy V (Vasconcelos *et al.*, 2021).

Nesse contexto, considerando que os parâmetros de deposição do material influenciam na microestrutura e propriedades mecânicas do componente fabricado via MADA, e que esses parâmetros podem ser controlados, o presente projeto busca investigar os fatores de fabricação de produtos metálicos via manufatura aditiva, tais como a variação na energia de deposição, tipo de resfriamento, utilizando a técnica de resfriamento passivo que atua exclusivamente no

substrato, mitigando o calor com um fluido refrigerante e a frequência de pulsação visando uma energia de deposição distribuída de maneira mais controlada, o que pode ajudar a reduzir o acúmulo de calor nas camadas.

Dessa forma, o objetivo é identificar os principais fatores que influenciam a energia absorvida no ensaio de Charpy V, utilizando o consumível de alta resistência ER110S-1. Assim compreender como esses fatores afetam o comportamento mecânico das peças para otimizar o processo de produção e garantir a qualidade dos componentes fabricados por MADA.

2. OBJETIVO

Estabelecer modelos experimentais que relacionam fatores do processo de manufatura aditiva por deposição a arco elétrico e sua influência na resistência mecânica de produtos fabricados por manufatura aditiva, verificando a influência da energia de deposição, frequência de pulsação e do tipo de resfriamento nas propriedades do aço de alta resistência ER 110 S-1.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Manufatura aditiva

A norma ASTM (2012) define a manufatura aditiva como o “processo de construção de objetos tridimensionais sólidos a partir da deposição de camadas, sendo oposta à manufatura subtrativa”. Entre as tecnologias existentes em prototipagem rápida se destaca a Manufatura Aditiva 3D, capaz de produzir peças com os mais variados materiais. A sua união com a indústria de fabricação representou uma abordagem inovadora de produção, permitindo a criação de peças e objetos complexos, oferecendo possibilidades não antes utilizadas pelos métodos convencionais (Alcalde; Wiltgen, 2018; Rodrigues *et al.*, 2017; Witgen, 2020).

A sua aplicação se torna economicamente viável, em função de seu volume de produção usado em diversas aplicações, tamanho de peça, complexidade e custo do material (Bermam, 2012). Existem diversos tipos de processos de fabricação via manufatura aditiva que podem ser aplicados a uma variedade de materiais, incluindo polímeros, metais, cerâmicas e compósitos. Essas técnicas envolvem métodos de deposição e formas de junção e fusão. (Oliveira, 2022).

Os processos de manufatura aditiva pode ser classificada pelo uso de matérias baseados em líquidos, sólidos e pó, o que permite a fabricação de uma ampla gama de produtos com propriedades e características distintas (Chua; Leong; Lim, 2010). No âmbito técnico em 2015 houve a união entre a *American Society of Testing Materials*, - ASTM e a *International Organization for Standardization* para criação da ISOS/ASTM 52900:2015 que propõe sete categorias ou grupos: fotopolimerização em cuba, extrusão de material, jateamento de material, jateamento de aglutinante, fusão em leito de pó, adição de lâminas e deposição com energia direcionada.

- (i) Fotopolimerização em cuba (Estereolitografia): Este processo envolve a criação de objetos tridimensionais por meio da foto-polimerização de uma resina líquida sobre uma plataforma. Isso é alcançado pela exposição à luz, o que leva ao endurecimento da resina.
- (ii) Extrusão de material (Modelagem por Deposição de Material Fundido - FDM): Neste método, o material é depositado em filamentos, camada por camada, permitindo a construção gradual do objeto.

- (iii) Jateamento de material: Este processo utiliza um fotopolímero como material base, que é solidificado por meio da exposição a raios UV. Além disso, uma cera pode ser utilizada nesse processo.
- (iv) Jateamento de aglutinante: Envolve o uso de um agente aglutinador líquido para unir as partículas do material, que são depositadas na forma de fusão de pó.
- (v) Fusão em leito de pó: Neste método, partículas de material são fundidas por meio de difusão de pó, geralmente usando laser ou feixe de elétrons. Isso possibilita a construção camada por camada do objeto desejado.
- (vi) Adição de lâminas: O material é depositado na forma de finas chapas que são unidas para formar o objeto. Frequentemente, laser ou facas são usados para definir o contorno do objeto.
- (vii) Deposição de energia direcionada (DED): Neste processo, um arame ou pó é fundido por meio de energia térmica concentrada e depositado em camadas, permitindo a construção progressiva do objeto desejado.

3.2. Manufatura aditiva em materiais metálicos

Com o avanço das novas técnicas de manufatura aditiva, se tornou possível inserir diversos metais como matéria prima de fabricação, permitindo várias possibilidades. (Gomes; Wiltgen, 2020). Na engenharia, os materiais metálicos são mais utilizados devido suas propriedades e características mecânicas, como: dureza, tenacidade, resistência à tração, elasticidade e entre outras. Assim, produtos obtidos via manufatura aditiva usando ligas de alumínio, ligas de titânio, aço inoxidável e outros tipos de materiais como matéria prima do processo se tornam soluções de fabricação (Herzog, Seyda, Wycisk, Emmelmann, 2016).

Essa técnica viabiliza a fabricação de componentes complexos e/ou feitos sob medida, sem requerer o uso de equipamentos caros, como punções, matrizes ou moldes de fundição, e frequentemente minimizando a quantidade de etapas (Debroy *et al.*, 2018).

Além de que peças produzidas a partir da manufatura aditiva, é possível depositá-la em uma peça única, superando as limitações encontradas nos processos convencionais, como usinagem. Assim, é possível obter uma redução significativa na quantidade de peças necessárias para um produto, já que todo o elemento pode ser fabricado como uma única peça, eliminando a necessidade de múltiplas conexões, contribuindo ainda para a redução de estoque, diminuição de tempo e espera e manutenção corretiva, gerando peças de alta desempenho em diversas aplicações (Farias; Vilarinho, 2022).

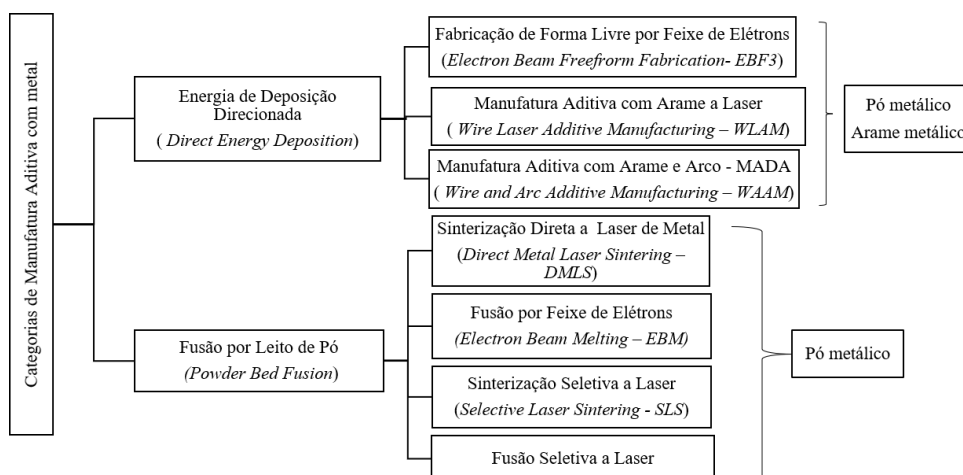
A manufatura aditiva é amplamente aplicada em diversas ligas metálicas utilizadas em variados setores industriais, incluindo aeroespacial, automotivo, odontológico, joalheria, petróleo e gás, ortopedia, eletrônicos impressos e ferramentas. Algumas das aplicações potenciais incluem válvulas de controle de óleo e gás, peças de bicos e carcaças de combustível de motores, aplicações de rotores/bombas e componentes de suportes em aço inoxidável (Berger, 2012).

Diante os padrões estabelecidos pela norma ISO/ASTM 52900:2015(E) (American Society for Testing and Materials, 2015), os processos de manufatura aditiva (MA) para aplicação em metais, são classificados em duas categorias principais, como mostrado na **Figura 1** são elas: Fusão em Leito de Pó (PBF – *Powder Bed Fusion*) e Deposição por Energia Direcionada (DED – *Directed Energy Deposition*).

Outras subdivisões relevantes incluem o método de distribuição do material sendo depositado (através de leito de pó ou bocal de deposição) e a forma da matéria-prima (pó ou filamento/arame). De acordo com os diversos processos envolvendo fusão a leito de pó, a maioria dos equipamentos disponíveis no mercado se concentra principalmente na Fusão Seletiva a Laser (SLM – *Selective Laser Melting*) e na Fusão por Feixe de Elétrons (EBM – *Electron Beam Melting*).

Quanto aos processos DED, a variação mais significativa ocorre na fonte de calor utilizada para fundir o material, sendo as mais comuns o laser (DED-L), o feixe de elétrons (DED-EB) e o arco elétrico, comumente referido como manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) (Farias; Vilarinho, 2022; Schoinochoritis *et al.*, 2017).

Figura 1: Categorias de AM para materiais metálicos.

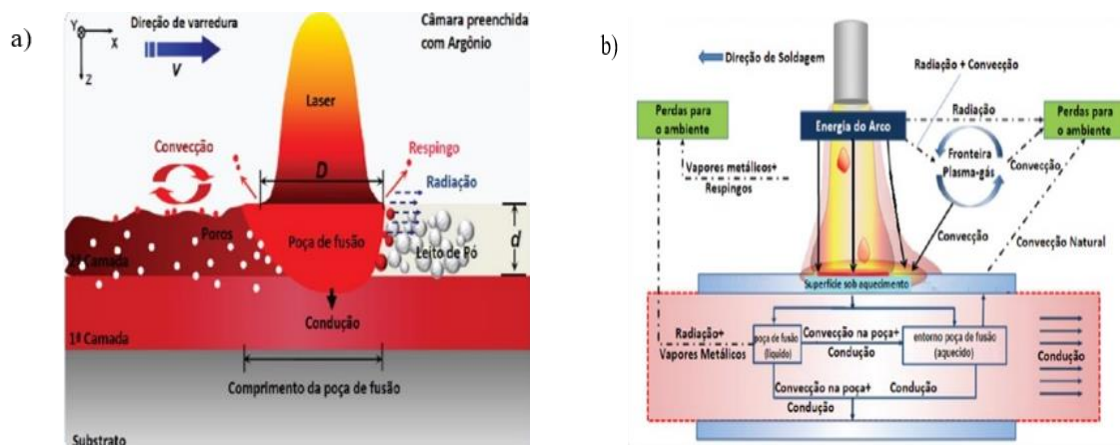


Fonte: Adaptado de Li *et al.*, 2022.

Os processos PBF e DED têm características térmicas semelhantes, como a condução de calor no material depositado e a aplicação de calor intenso em áreas restritas, resultando na evaporação do metal na poça de fusão. Contudo, uma diferença chave é a dissipação de calor: no DED, o calor se dispersa para o ambiente, enquanto no PBF, é transferido para o pó circundante. Além disso, devido ao tamanho menor das peças no PBF, as poças de fusão são menores, levando a taxas de resfriamento mais altas (Farias; Vilarinho, 2022).

A **Figura 2 (a)** mostra os fenômenos térmicos do processo em leito de pó, como no SLM. Em relação, a **Figura 2 (b)** destaca os fenômenos típicos dos processos de energia direcionada. É importante notar que os fenômenos encontrados na soldagem são semelhantes aos observados no processo MADA.

Figura 2: Processo (a) SLM e (b) DED.



Fonte: Adaptadas de Farias; Vilarinho, 2022 de Shi *et al.*, 2016 e Liskevych *et al.*, 2013.

Segundo King *et al.*, 2015, ter noção sobre os fenômenos físicos durante o processo de fabricação em Manufatura Aditiva pode permitir saber sobre os efeitos dos parâmetros dos processos de fabricação, influenciando assim na qualificação do componente sendo depositado, tendo maior controle do processo, assim melhorando as chances de ter a produção de peças qualificadas.

Nos sistemas DED, o material é depositado diretamente na poça de fusão e pode ser aplicado sobre peças já existentes (Rosli *et al.*, 2021). Essa técnica utiliza um braço multi-eixo com um bocal ou queimador para fundir e depositar o material metálico. (ASTM F42, 2019; Gomes; Wiltgen, 2020; Yakout *et al.*, 2018).

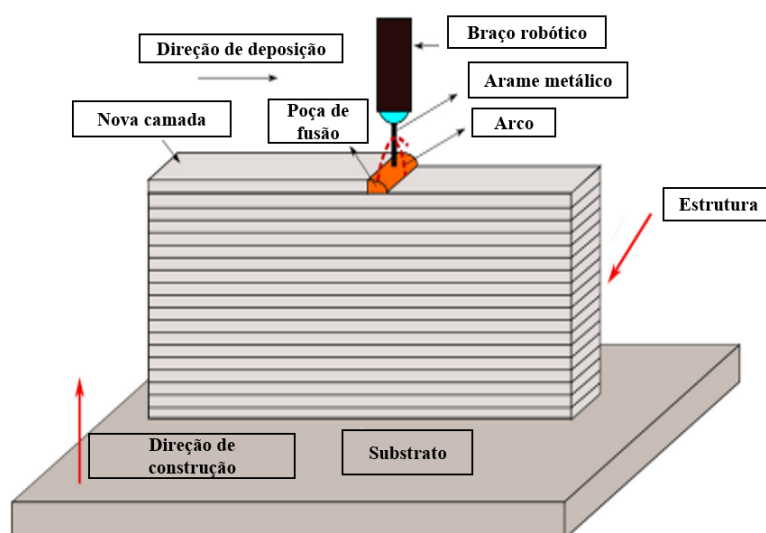
Entre as tecnologias de manufatura aditiva utilizando materiais metálicos, a manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), que utiliza a fusão do arame maciço por arco elétrico,

destaca-se por seus benefícios econômicos e eficiência na utilização de matéria-prima, além de altas taxas de deposição (Gomes, 2018). Esta técnica apresenta potencial para aplicações em componentes com demanda por resistência estrutural, proporcionando peças de alta resistência e compatibilidade com diversos materiais.

3.2.1. Manufatura aditiva por deposição a arco (MADA)

A MADA é um processo que utiliza o arco elétrico como fonte de energia. Entre os sistemas de deposição direcionada, possui alta eficiência energética e uma rápida taxa de deposição do material. Isso permite a produção de peças com maior velocidade, reduzindo o tempo de produção e tornando-se uma alternativa competitiva em relação aos processos tradicionais, como a fundição e o forjamento. Além disso, a MADA oferece uma maior seleção de materiais disponíveis e requer um investimento em equipamentos relativamente menor (Arsan *et al.*, 2020; Dornelles, 2022). Considerada a técnica que é capaz de criar peças complexas e personalizadas, reduzindo o desperdício de material e melhorando a eficiência na fabricação de componentes metálicos. Esse processo consiste na deposição de material camada por camada, iniciando-se sob um substrato, como mostrado na **Figura 3** (Vimal *et al.*, 2020).

Figura 3: Representação esquemática do processo MADA.



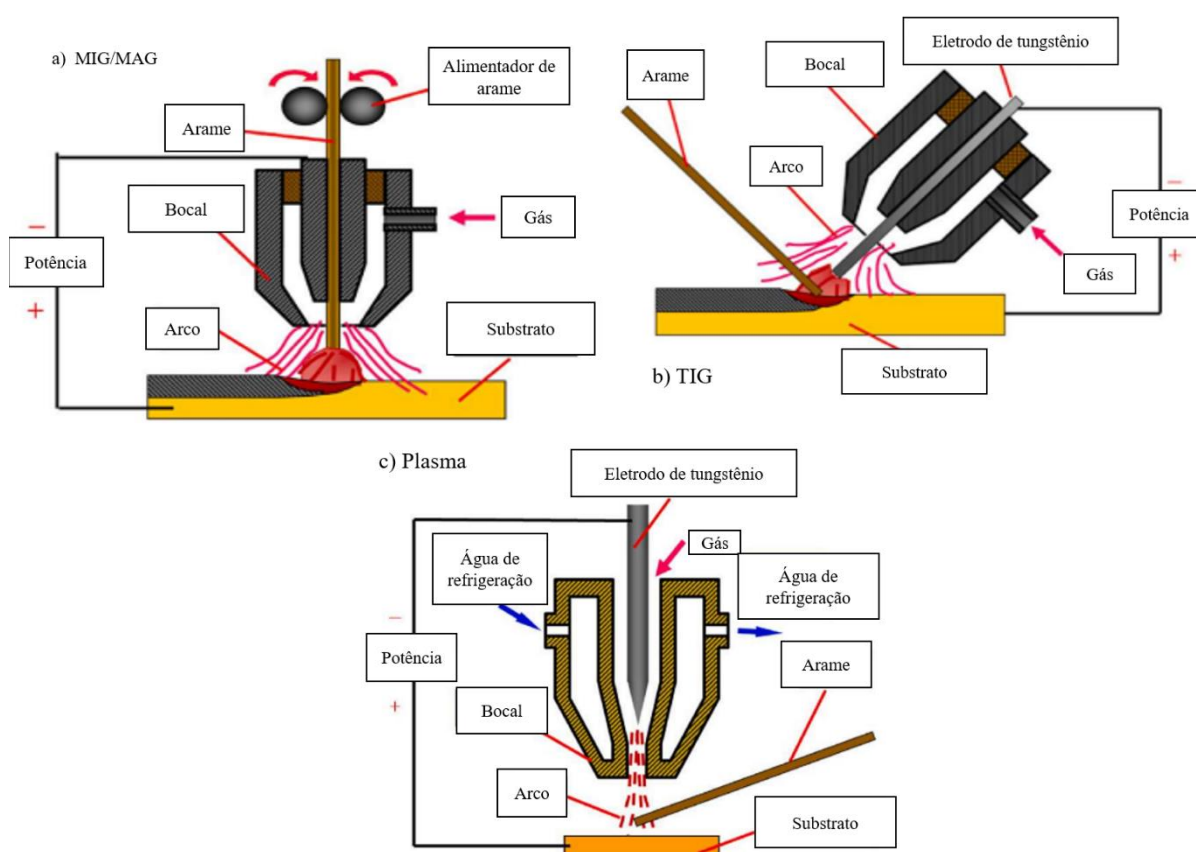
Fonte: Adaptado de Misha *et al.*, 2023.

Essa técnica possui dois principais tipos de fonte de energia que podem ser empregados: MIG/MAG (*Metal Inert Gas Metal Active Gas*) e arco TIG (*Gas Tungsten Arc Weld*). Ambos utilizam o arco elétrico como fonte de energia e proteção gasosa, que pode ser constituída por gases inertes ou misturas, visando proteger a poça de fusão.

No TIG, é utilizado um eletrodo de tungstênio não consumível, necessitando ainda do metal de adição para a deposição do material. Já no MIG/MAG, um eletrodo consumível é aquecido, fundindo e iniciando a transferência metálica através de gotas no estado líquido por meio do arco elétrico que é mantido entre a fonte e a reação onde está sendo depositado o material (Rosa, 2020; Machado, 1996).

Além desses, a técnica PAM (*Plasma Arc Welding*), similar ao TIG, so muda que o arco é comprimido através de um bico (Li *et. al.*, 2022). O esquema dessas técnicas pode ser visto na **Figura 4**.

Figura 4: Esquema das três técnicas a arco elétrico. (a) MIG/MAG, (b) TIG e (c) Plasma.



Fonte: Adaptado Li *et al.*, 2022.

O processo MIG/MAG é amplamente adotado devido à sua alta produtividade e custo acessível (Cordeiro; Ferraresi, 2012). Além disso, a variedade de controles de transferência metálica, a alimentação automatizada de arame e a capacidade das bobinas de eletrodo são características destacadas (Willians *et al.*, 2016).

A seleção precisa dos materiais e os ajustes adequados dos parâmetros de soldagem se tornam essenciais para o processo MIG/MAG, devido à sua complexidade e à sua influência significativa no resultado da deposição do material (Modenesi, 2015).

Os parâmetros do processo que são usuais em MADA estão contidos na **Tabela 1**, sendo similares aos da soldagem, já que os processos se baseiam em técnicas de soldagem convencionais.

Tabela 1: Parâmetros do processo MADA.

Parâmetros	Unidades
Corrente	Ampere
Tensão	Volt
Velocidade de alimentação do arame	m/s
Fluxo de gás	L/min
Gás de proteção	-
Inclinação da tocha	°
Transferência Metálica	-
Distância do bico de contato a peça	mm

Fonte: Adaptado de Balde, 2023.

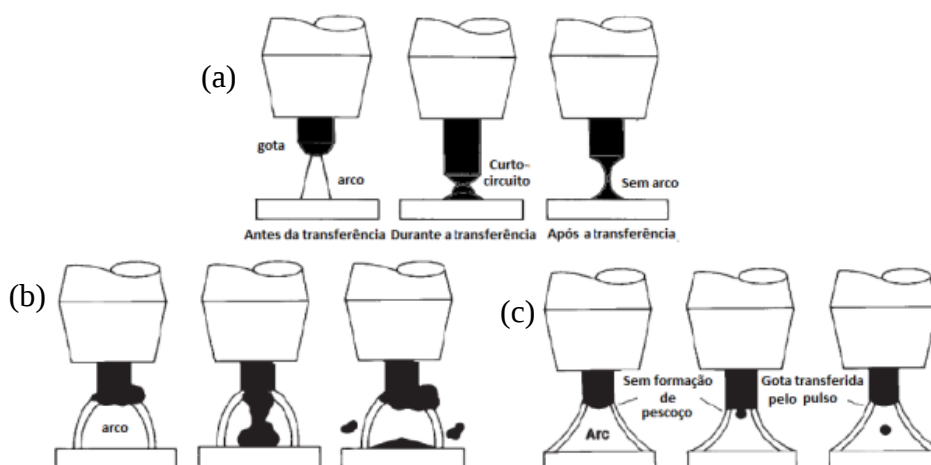
3.2.2. Modos de transferências metálicas (MIG/MAG)

A seleção da transferência metálica para o processo MIG/MAG é essencial, pois consiste na transferência das gotas metálicas fundidas do eletrodo para a poça de fusão. Esse processo influencia diversos aspectos, como a posição de soldagem, a qualidade do cordão, a quantidade de respingos, a formação de fumos, a estabilidade e o desempenho operacional. Os parâmetros do processo, como corrente, tensão do arco, tipo de metal de adição, polaridade, gás de proteção e comprimento do arco, determinam o tipo de transferência de metal a ser utilizada (Lesnewich, 1958; Modenese, 2007; Smith, 1966).

De acordo com Da Silva *et al.*, (2011) e Roqueti *et al.*, (2014) para garantir essas qualidades de deposição de material, é essencial ajustar os fatores do processo para alcançar uma transferência metálica regular. Existem quatro tipos básicos de transferência metálica no MIG/MAG, cada um caracterizado pela frequência e tamanho das gotículas, sendo elas: curto-circuito, globular, spray e pulsado. Os três primeiros modos são classificados como naturais,

enquanto o quatro é considerado controlado. A **Figura 5** apresenta a comparação entre os modos de transferência metálica descritos logo em seguida.

Figura 5: Modos de Transferência MIG/MAG. a) Curto-circuito, (b) Globular e (c) Goticular (“Spray”)



Fonte: Adaptado de Da Silva *et al.*, 2011.

Nota-se na **Figura 5 (a)** a transferência por curto-circuito: Neste modo, gotas de metal derretido formam-se na ponta do eletrodo, não caindo imediatamente na poça de solda devido ao arco elétrico ser insuficiente. Em vez disso, essas gotas preenchem a lacuna entre o eletrodo e a poça de solda, causando um curto-circuito temporário. A tensão superficial da poça de solda rapidamente recupera a gota de metal, restabelecendo o arco elétrico. Este processo de curto-circuito e reacendimento ocorre várias vezes por segundo, proporcionando um arco contínuo. Embora ofereça alta qualidade de solda e menor respingo, pode ser instável, exigindo ajustes nos parâmetros de soldagem.

Na **Figura 5 (b)** transferência globular: Acontece em baixas correntes e tensões intermediárias, onde gotas de metal formam-se na ponta do eletrodo e são projetadas para a poça de fusão pela gravidade. As gotas são frequentemente maiores que o eletrodo, resultando em respingos. Embora menos estável que o modo de curto-circuito, é preferível em comparação ao globular devido à sua qualidade de material depositado e apresenta menos respingos, sendo mais versátil para soldagem em diferentes posições.

Por fim, na **Figura 5 (c)** transferência goticular ou Spray: Caracteriza-se por velocidades altas de alimentação do arame e tensões elevadas, resultando em gotículas menores que o

diâmetro do arame. Estas gotas são impulsionadas para a poça de fusão por forças eletromagnéticas. Embora seja eficiente, especialmente em soldagem plana, pode levar a deformações em chapas finas devido às altas correntes. Embora seja útil, apresenta limitações, principalmente em chapas finas, onde pode causar distorções.

3.2.2.1 Modo de transferência pulsado

Nos últimos anos, tem sido implementada no processo MIG/MAG controles dinâmicos para a transferência metálica. Esses controles monitoram e ajustam o sinal de corrente de forma dinâmica e cíclica, visando uma deposição mais controlada. O objetivo é obter uma transferência metálica mais homogênea, controlar o tamanho da poça de fusão e regular a taxa de deposição. Isso é alcançado ao ajustar a distribuição de calor entre o eletrodo e o metal de base (Scotti; Ponomarev, 2014).

Segundo Da Silva *et al.* (2011), a transferência pulsada no MIG/MAG busca integrar as vantagens da transferência por curto-circuito, adequada para soldar chapas finas e em várias posições, com os benefícios da transferência globular, como arco estável, transferência metálica regular e soldas de boa qualidade mecânica e estética (Cordeiro; Ferraresi, 2012).

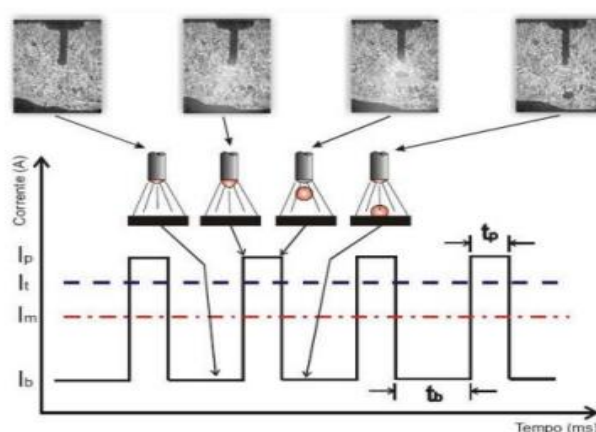
Desenvolvida para unir as melhores características dos métodos de curto-circuito e globular, a transferência pulsada alterna entre dois níveis de corrente: a corrente de base e a corrente de pulso, proporcionando uma transferência metálica estável e consistente com aporte de energia adequado (Scotti; Ponomarev, 2014).

A transferência metálica nesse modo, ocorre em queda livre, de forma controlada em pulsos regulares, se alternando entre dois níveis de corrente: um baixo, denominado de corrente de base, onde se aquece o arame, sem que haja transferência, e outro alto, como corrente de pico, na qual se impulsiona a ponta do arame na poça de fusão. Este método oferece vantagens como a transferência metálica controlada, influenciando a dimensão e a frequência das gotas, que são ajustadas pela pulsação da corrente, mantendo um arco elétrico estável e reduzindo os respingos ao longo do processo de deposição (Fisher, 2011; Sudnik, 2011; Will, 2009).

Além do pulso de corrente proporcionar uma melhor estabilidade do comprimento do cordão de solda (Scotti. Ponomarev, 2008). Garantindo uma transferência controlada sem respingos, transferindo uma única gota de metal fundido da ponta do eletrodo para a poça de fusão a cada pulso de corrente, também definido como UGPP - "uma gota por pulso" (Fisher, 2011).

A **Figura 6** apresenta as principais variáveis dessa transferência metálica, destacando a corrente de pico (I_p) e o tempo de pico (t_p), que influenciam diretamente o destacamento da gota. Além da corrente de base (I_b) que é ajustada para equilibrar a fusão do arame com sua alimentação, enquanto o tempo de base (t_b) é ajustado de acordo com o tamanho desejado da gota (Abdalla, 2005; Andrade, 2012).

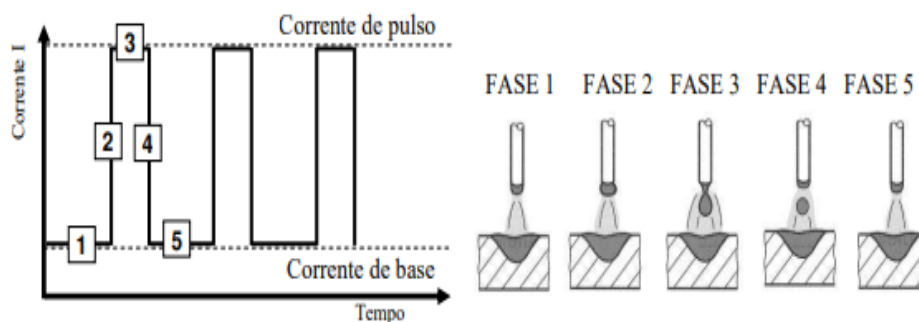
Figura 6: Representação do método MIG/MAG pulsado.



Fonte: Will, 2009 adaptado de Barra, 2003.

Após a abertura do arco elétrico, ele se mantém estável sem interrupções de curto-circuito. A **Figura 7** ilustra o perfil teórico de uma onda durante a soldagem com corrente pulsada. Na primeira fase, a corrente de base é predominantemente usada para sustentar o arco e para aquecer o material base e o eletrodo. Durante a segunda fase, a corrente elétrica é aumentada para o nível de corrente de pulso. Na terceira fase, o material fundido na ponta do eletrodo se estreita. Na quarta fase, a corrente é reduzida e a gota se desconecta do eletrodo. E por fim, na quinta fase, essa gota é transferida para a poça de fusão (Fisher, 2011).

Figura 7: Esquema da transferência MIG/MAG pulsada.



Fonte: Baum, 1999.

A transferência pulsada destaca-se por operar em diferentes potências, adequar-se à chapas finas e grossas e permitir a soldagem de diversos materiais, como aço, inoxidável e alumínio, sem curto-circuito ou respingos. Isso permite alta qualidade no material depositado em relação a propriedades mecânicas e melhor aparência (acabamento). No entanto, o processo pulsado apresenta algumas desvantagens, como sua complexidade e a necessidade de ajustar vários parâmetros para obter resultados ideais, conforme apontado (Anderson *et al.*, 1996; Fisher, 2011).

Os ajustes mais detalhados dos parâmetros, como frequência de pulsação, duração do pulso e corrente/tensão, podem ser realizados experimentalmente para encontrar os parâmetros ideais, sendo que os parâmetros de pulso trabalham em conjunto com a velocidade de alimentação do arame (Fisher, 2011).

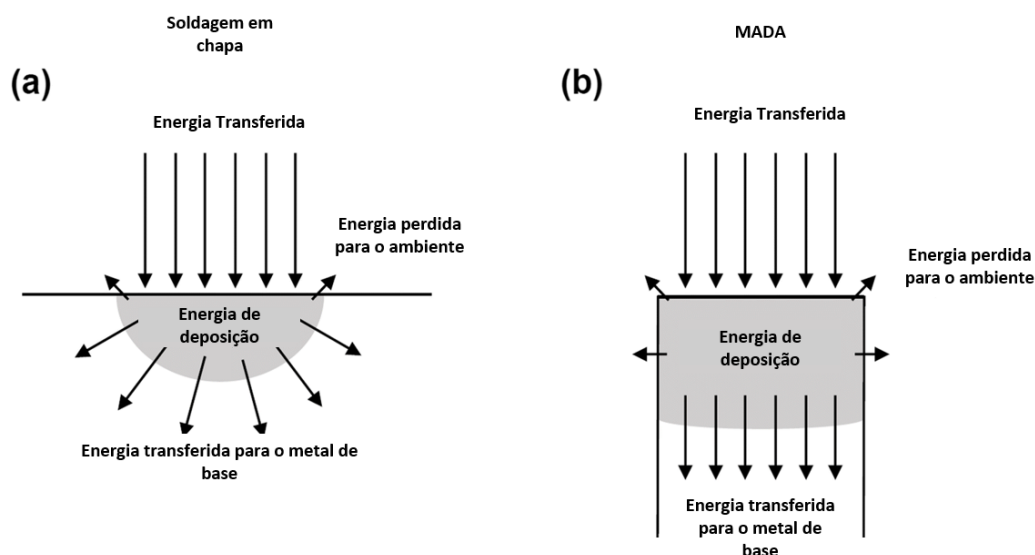
Devido às altas taxas de energia, a transferência pulsada apresenta um aporte de energia de soldagem mais homogênea (Scotti, Ponomarev, 2014). Essa técnica alinha as gotas metálicas com o eixo do eletrodo, o que é crucial para a Manufatura Aditiva por Deposição ao Arco (MADA), garantindo uma geometria estável e previsível nas peças produzidas (Fernandes, Oliveira *et al.*, 2020).

3.2.3. Energia de deposição em MADA

Nos processos de manufatura aditiva para ligas metálicas, a técnica de MADA se destaca pela sua alta taxa de deposição. No entanto, a alta energia de deposição associado a essa técnica podem levar ao acúmulo de calor nas peças na dificuldade de dissipar o calor, comprometendo a estabilidade do processo e a características metalúrgicas do material depositado. Isso pode resultar em tensões residuais, distorções, oxidação e modificações indesejadas na geometria e na metalurgia. Durante a deposição, também são comuns problemas como respingos (Ding *et al.*, 2015; Fernandes, 2020, Schreibner, 1980; Manz, 2010; Wu *et.al.*, 2017).

De acordo com Silva (2019) a MADA é a técnica que mais sofre com problemas relacionados ao acúmulo de calor causado durante a deposição das camadas. Em comparação, com a soldagem convencional em chapas, onde a difusão térmica é uniforme, na MADA o calor se concentra na direção da deposição à medida que as camadas são adicionadas (Mohebbi, Kühl e Ploshikhin, 2020), como ilustrado na **Figura 8**.

Figura 8: Transferência térmica. (a) Soldagem em chapa e (b) MADA.



Fonte: Adaptado de Mohebbi, Kuhl e Ploshikhin (2020).

Esse acúmulo de calor sofrido durante o processo, influencia na microestrutura do componente metálico que estar sendo produzido, pois ocorre o fenômeno de mais entrada de calor do que saída (distribuição de calor insuficiente), que se aumenta ao longo do tempo de deposição, ou seja, à medida que aumenta a altura das camadas até um limite (Souza, 2020; Yang *et al*, 2017)

Segundo Cunningham *et al.* (2018), as variações na distribuição de calor ou as diferenças nas histórias térmicas durante a construção das camadas causa o desenvolvimento de diferentes fases e microestruturas dentro da peça, resultando em propriedade não homogêneas. As características microestruturais e propriedades mecânicas de peças fabricadas a partir da manufatura aditiva a arco elétrico diferem daquelas produzidas por métodos de fabricação convencionais, como a fundição ou forjamento. Entre essas diferenças são atribuídas aos ciclos localizados de aquecimento e resfriamento durante o processo de deposição das camadas. As mudanças nos parâmetros do processo, juntamente com as variações contínuas na geometria do metal durante a deposição, influenciam diretamente o comportamento do processo e os ciclos térmicos locais (Babu *et al.*, 2023). De acordo com Wu *et al.* (2018) à medida que uma peça é construída, uma parte crescente do calor se dissipa para o ambiente por meio de processos de convecção e radiação. No entanto, esses métodos de dissipação de calor são menos eficientes do que a transferência direta de calor para um substrato frio, resultando em uma dissipação mais lenta do calor e uma acumulação durante o processo.

A transferência de calor para as camadas já depositadas é um aspecto crítico, pois influencia a taxa de resfriamento e os ciclos térmicos das camadas, podendo resultar em mudanças na microestrutura ao longo da peça. Assim, é essencial implementar métodos que controlem adequadamente os ciclos térmicos aplicados ao material (Rodrigues *et al.*, 2019).

Devido aos desafios relacionadas a dissipação da energia durante o processo, uma possibilidade seria esperar o resfriamento da camada recém depositada antes de iniciar a próxima deposição. No entanto, esse método de controle, compromete a produtividade de produção, devido aos longos tempos de esperar necessários, principalmente em peças de grandes dimensões (Felices, 2020).

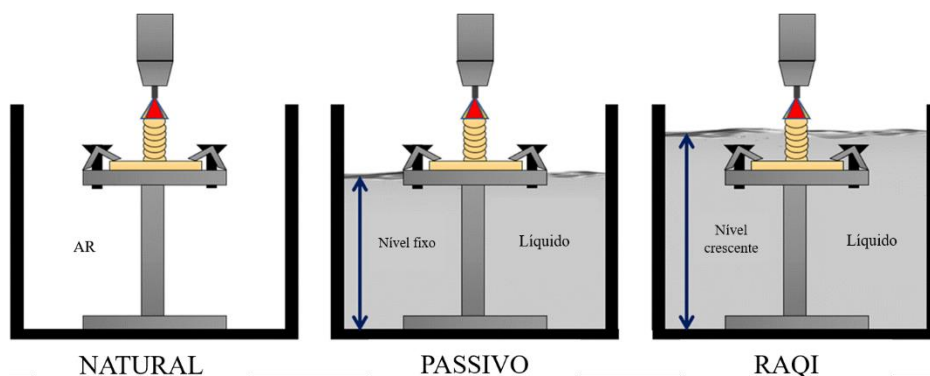
Uma outra alternativa é criar a pré-forma sobre uma plataforma resfriada, porém essa estratégia se torna mais eficaz principalmente para as camadas iniciais (Lu *et al.*, 2017). Além disso, o controle da entrada de calor pode ser ajustado pela variação da velocidade de deposição, da taxa de alimentação de arames ou da corrente de soldagem. A modificação da entrada de calor não apenas influencia as características das peças finais, mas também ocasiona mudanças na geometria e nas dimensões das camadas (Babu *et al.*, 2023).

3.2.4. Técnicas de resfriamento

Assim se destaca técnicas de resfriamento para auxiliar mitigando o calor ao logo do processo de fabricação via MADA, logo foram comparadas três formas de gerenciamento térmico: resfriamento natural, resfriamento passivo (somente do substrato) e resfriamento ativo por RAQI, conforme mostrado na **Figura 11**.

O resfriamento natural ocorre espontaneamente através da dissipação natural do calor no ambiente, resultando em uma taxa de resfriamento mais lenta, o que pode levar ao acúmulo de calor, afetando negativamente a qualidade da peça, causando tensões residuais e deformações. O resfriamento passivo utiliza um fluido refrigerante que entra em contato exclusivamente com o substrato, dissipando o calor de forma mais controlada que o resfriamento natural. Embora eficaz na redução da temperatura do substrato, este método pode não eliminar completamente o acúmulo de calor nas camadas superiores. Já o resfriamento ativo aumenta a taxa de resfriamento, reduzindo a temperatura entre passes e mitigando o acúmulo de calor nas pré-formas. Isso melhora a geometria, reduz a necessidade de usinagem e aumenta a isotropia das propriedades mecânicas, elevando a produtividade ao diminuir ou eliminar o tempo de parada entre camadas (Da Silva *et al.*, 2018).

Figura 9: Esquema das formas de gerenciamento térmico.



Fonte: Adaptado de Da Silva (2019).

Além de lidar com problemas como tensões residuais, distorções geométricas e oxidação, ainda permite ajustar as características mecânicas e geométricas da pré-forma. Essa técnica pode aumentar a eficiência da operação de fabricação, permitindo uma taxa de construção mais rápida e períodos de espera mais curtos ou menos frequentes. Ao utilizar água como líquido refrigerante, a técnica também contribui para a sustentabilidade ambiental da Manufatura Aditiva, tornando-se uma alternativa para aprimorar a eficiência e a qualidade dos processos de fabricação. Assim, ao realizar um controle de energia mais eficaz das pré-formas por meio da técnica RAQI (resfriamento ativo por quase imersão), seria possível integrar um aumento na produtividade de fabricação com melhorias nas características mecânicas e geométricas (Da Silva *et al.*, 2020).

3.2.5. Metais utilizados em manufatura aditiva por deposição a arco (MADA)

Diversos materiais metálicos de engenharia, incluindo titânio, alumínio, ligas de níquel e aços podem ser utilizados através da manufatura aditiva por deposição a arco (MADA). Utiliza-se arames comerciais, originalmente desenvolvidos para soldagem e disponíveis em bobinas, abrangendo uma ampla gama de ligas como insumos (Wu, 2018). A **Tabela 2** detalha as ligas empregadas e suas respectivas aplicações.

Tabela 2: Principais metais usados em MADA.

Aplicações		Ligas		
Aeroespacial	Titânio	Alumino	Aço	Níquel
Automotivo		Alumino		

Indústria Naval	Titânio	Aço	
Resistência a corrosão	Titânio	Aço	Níquel
Altas temperaturas	Titânio		Níquel
Ferramentas e moldes			

Fonte: Adaptado de WU *et.al*, 2018.

Segundo Dutta e Froes (2018), as ligas de titânio têm sido utilizadas na fabricação aditiva de componentes aeroespaciais e terrestres, devido à sua alta relação resistência-peso e seu excelente desempenho à corrosão, no entanto não é tão frequente, principalmente por ter alto custo em relação às demais ligas. Em especial, a liga de Ti6Al4V é a mais usada em relação ao titânio puro, devido seu alto desempenho em relação a alta resistência, apresentando excelentes propriedades mecânicas, tenacidade e resistência à corrosão (Leyens; Peters, 2003).

Devido ao seu alto custo, pode se utilizar fonte de energia com um custo menor de fabricação, que é o caso da técnica MADA, pois não precisa manusear pó, além de ter um custo menor que usando técnicas de manufatura a laser e a base de pó (Wang *et al.*, 2013).

De acordo com Jin *et al.*, (2023), no entanto, a microestrutura das ligas de titânio por MADA, possui menor resistência em comparação às técnicas SLM e EBM, devido os grandes tamanhos de grãos gerados pelos diversos ciclos térmicos gerados durante a fabricação, precisando de otimização dos processos para refinamento.

De acordo com Sinha e Yagati (2023) os segmentos indústrias buscam utilizar materiais leves, que é o caso de alumínio e suas ligas, isso abrange desde ligas de Al-Cu, Al-Si, Al-Mg-Si até Al-Zn-Cu, sendo bastantes utilizadas em Manufatura aditiva a Arco (MADA). As ligas de Al-Cu são usuais pelo fato de possuírem baixa densidade, excelentes propriedades mecânicas e alta resistência à corrosão, o que torna uma escolha comum para fabricação de peças em aeronaves e automóveis. No entanto, durante o processo de fabricação, ocorre uma solidificação não uniforme, gerando defeitos como porosidade, trincas, tensões residuais e distorções, que precisam ser minimizados para que o processo seja adotado amplamente. Em geral, as peças de liga de alumínio fabricadas por manufatura aditiva têm propriedades mecânicas inferiores em comparação com aquelas que são usinadas a partir de material de tarugo, para melhorar a sua resistência a tração, a maioria das peças de alumínio depositadas passam por um tratamento térmico pós-processo para refinar a microestrutura (Wu *et al.*, 2018)

As superligas de níquel possuem a capacidade de se manter a altas resistências em temperaturas elevadas e ao alto custo ligado à sua fabricação por métodos convencionais.

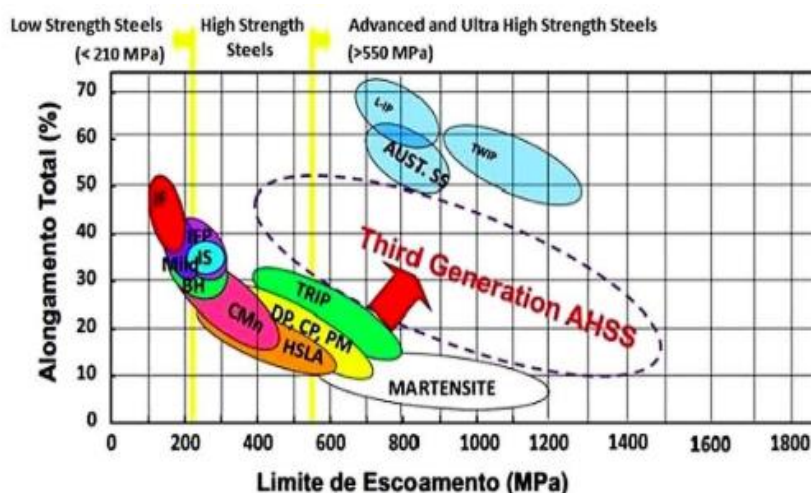
Devido a suas boas propriedades de resistência e resistência a oxidação em temperaturas superiores a 550 °C, as superligas de níquel são bastante utilizadas em alguns segmentos, como descrito na **Tabela 2**. Várias ligas, incluindo a Inconel 718 e o Inconel 625, têm sido estudadas após passarem pelo processo de manufatura aditiva a arco (Wu *et al.*, 2018).

Sabendo que os materiais metálicos, como ligas de níquel, ligas de titânio, ligas de alumínio, tem sido usado, e devido os níveis de pesquisas na técnica de MADA indicam um interesse na utilização na fabricação de peças de aço devido às suas inúmeras aplicações industriais (Ban; Shi, 2018; Norrish *et al.*, 2021). Os aços são ligas ferrosas amplamente utilizadas na indústria devido aos seus diversos tipos, propriedades químicas e físicas distintas, além de serem de fácil obtenção (Rodrigues *et al.*, 2019). Nos últimos anos, o uso de aço de alta resistência tem sido usado em vários segmentos devido às suas vantagens em resistência mecânica, soldabilidade, ductilidade e tenacidade (Tong *et al.*, 2018).

Este tipo de aço apresenta resistência duas a três vezes maior do que o aço-carbono. Isso possibilita a construção de estruturas mais leves, otimizando o espaço disponível e reduzindo custos de montagem, influenciando também com um menor impacto ambiental (Miki, Homma, Tominaga, 2002; Ban; Shi, 2018). Os aços de alta resistência são comumente empregados em aplicações estruturais devido à sua resistência à tração relativamente elevada e uma taxa de alongação na ruptura em torno de 20%. Adicionalmente, esses aços geralmente apresentam baixos teores de carbono em sua composição, o que melhora sua capacidade de soldagem, conformação e resistência à corrosão (Babu *et al.*, 2023).

Segundo Keeler e Kimchi (2014), é possível categorizar os aços de alta resistência conforme a faixa de seu limite de escoamento, já que todos os tipos de aços têm densidade e módulo elástico semelhantes. Aços com limite de escoamento abaixo de 210 MPa são classificados como aços convencionais. Os aços de alta resistência (*HSS - High Strength Steel*) apresentam um limite de escoamento variando de 210 MPa a 550 MPa e uma resistência à tração entre 270 MPa e 700 MPa. Enquanto isso, os aços avançados de alta resistência (*AHSS - Advanced High Strength Steel*) possuem um limite de escoamento superior a 550 MPa e resistência à tração acima de 700 MPa. Em relação à microestrutura, os HSS são ferrítico-perlíticos, enquanto os AHSS contêm fases adicionais como martensita, austenita e bainita (Matlock *et al.*, 2012). A **Figura 12** mostra as classes de aços de alta resistência em um gráfico de alongação versus limite de escoamento.

Figura 10: Alongamento à tração vs limites de escoamento para aços de alta resistência.



Fonte: Adaptado de Mateo, 2015.

Na manufatura aditiva por deposição a arco elétrico, o de aço de alta resistência se torna mais econômico em comparação com o uso de ligas como titânio e níquel. Devido ser um material acessível e, quando se combina com a técnica de MADA que não precisa de ferramentas caras, torna ideal para a produção de pequenas séries ou protótipos em aço nessas condições (Bourlet *et al.*, 2020).

Além disso, o alto limite de escoamento dos aços de alta resistência contribui para a redução do tempo de produção, principalmente se for ter aplicações em peças de grandes dimensões, como na construção civil, com o uso desses aços é possível atingir a mesma resistência usando menos material, o que se torna uma grande influência no processo de modo geral (Muller, Hensel, Dilger, 2022).

Durante a fabricação por MADA, os aços de alta resistência sofrem mudanças de fases, transformando a austenita em fases como ferrita de contorno de grão, bainita, ferrita acicular e martensita. Essas transformações são influenciadas pela temperatura e taxa de resfriamento, impactando as propriedades mecânicas da peça final. Assim, controlar as temperaturas é essencial para essas transformações, podendo ser ajustadas pela temperatura, tempo de espera ou técnicas de resfriamento auxiliares (Zhang *et al.*, 2019; Mai *et al.*, 2020; Ding, 2020).

Devido ao longo tempo de produção e a exposição elevada ao calor, pode ser usada tecnologia de resfriamento ativo, esse método não apenas diminui o tempo de calor, mas também melhora as propriedades mecânicas como tenacidade do aço de alta resistência (Muller, Hensel, Dilger, 2022). Estudos têm investigado as características de aços de alta resistência

utilizados na manufatura aditiva, como arames classificados como AWS A5.28 ER110S-G (Rodrigues *et al.*, 2019), ER100 (Bourlet, 2020) e entre outros.

De acordo com Tong *et al.* (2018), a tenacidade ao impacto é uma característica importante para os aços de alta resistência, que está diretamente relacionada à resistência à fratura. À medida que a resistência mecânica desses aços aumenta, a tenacidade ao impacto tende a ser reduzida. Portanto, é importante investigar esse parâmetro, especialmente em materiais produzidos por manufatura aditiva.

Embora muitos estudos se concentrem na resistência à tração e dureza desses materiais, há poucas pesquisas sobre sua tenacidade ao impacto, que é essencial para avaliar a capacidade de absorção de energia e o comportamento dúctil ou frágil da estrutura. A tenacidade depende tanto da resistência mecânica quanto da ductilidade, sendo fundamental para a segurança em diversas aplicações. O teste de impacto Charpy é um dos métodos mais comuns para avaliá-la (Cao *et al.*, 2017).

Segundo Waqas *et al.* (2019), os resultados do teste de impacto Charpy devem ser analisados de forma mais detalhada, juntamente com a investigação da microestrutura e da superfície de fratura dos corpos de prova, a fim de confirmar a quantidade de energia absorvida durante o impacto, pois a tenacidade é influenciada por fatores como a composição, a microestrutura e a temperatura. Em estruturas em camadas, como as produzidas por manufatura aditiva, a anisotropia da tenacidade pode ocorrer devido a mudanças na microestrutura e no tamanho dos grãos (Rojas *et al.*, 2014).

Além do teste de Charpy, o estudo deve incluir análises metalográficas e fractográficas. A fractografia, que identifica o mecanismo de falha do material, pode explicar como a propagação da trinca ocorre e quais fatores determinam a maior ou menor absorção de energia, dependendo do comportamento dúctil ou frágil do material. As fraturas dúcteis apresentam superfícies com covinhas devido ao rasgo do material e à deformação plástica, enquanto as fraturas frágeis são caracterizadas por facetas de clivagem e mínima deformação plástica (Rojas *et al.*, 2014; Waqas *et al.*, 2018).

4. METODOLOGIA

4.1 Material de substrato

O material utilizado no substrato foi o aço carbono ASTM A36 com 210 mm de largura, 150 mm de comprimento e 6,34 mm de espessura. A composição química do substrato é descrita na **Tabela 3**.

Tabela 3: Composição química porcentagem mássica das chapas de aço utilizadas.

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

Fonte: ASTM A36 – Norma ASTM.

4.2 Material de adição

Os CPs produzidas utilizaram um arame maciço classificado como ER110S-1, com diâmetro de 1,2 mm e com requisito de energia absorvida no ensaio Charpy V, **Tabela 4**. A composição química é descrita na **Tabela 5** de acordo com a descrição do fabricante.

Tabela 4: Propriedades mecânicas do metal consumíveis.

Material	Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Resistência ao Impacto (J)*
ER110S-1	760 Mín	660 Mín	15 Mín	68 J a -51 °C

Nota: * dimensão do corpo de prova Charpy V foi 10 mm x 10 mm x 55 mm

Fonte: ER110S-1 - Certificado de qualidade do fabricante.

Tabela 5: Composição química em porcentagem mássica do metal de adição.

Material	C	Mn	Si	P	V	S	Ni	Cr	Mo	Ti	Zr	Al	Cu
ER110S-1	0,03	1,61	0,6	0,01	0,01	0,01	2,46	0,28	0,31	0,01	0,01	0,01	0,50

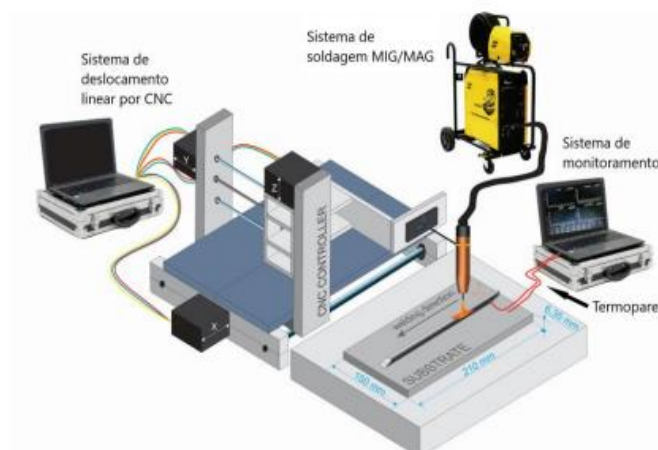
Fonte: ER110S-1 - Certificado de qualidade do fabricante

4.3 Procedimento de fabricação

Para a produção dos CPs por manufatura aditiva foi usado um sistema que é composto por um equipamento MIG/-MAG, com pistola fixa em um sistema comum sistema de deslocamento linear nos eixos X, Y e Z com movimentos controlados por CNC GL-3020 e com

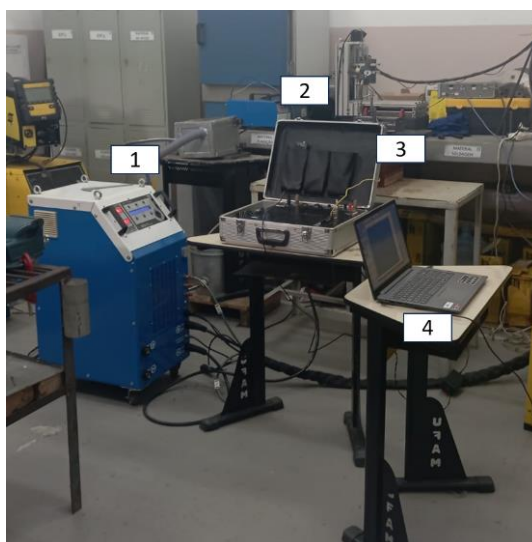
precisão de 0,02 mm. O sistema consegue realizar todo o processo de soldagem e captura dos dados, como mostrado na **Figura 13** e **14**.

Figura 11: Sistema de manufatura aditiva por arco elétrico.



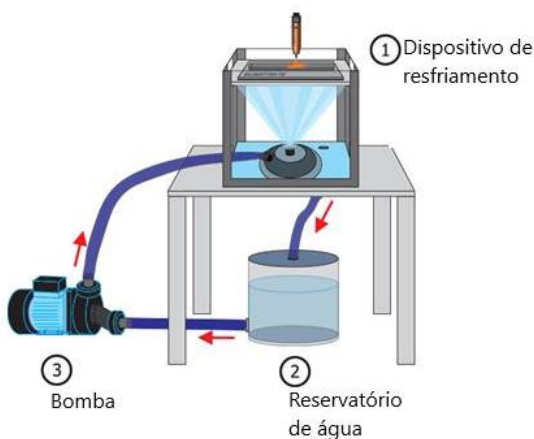
Fonte: Oliveira, 2022.

Figura 12: Sistema de produção sendo 1- Fonte de energia IMC Digi plus A7, 2- Sistema CNC de controle, 3- Sistema de captação de dados dos ciclos térmicos com aquisição de dados SAP e 4- Sistema de captação de aquisição de dados.



Foi utilizado uma adequação do sistema de resfriamento usado por Oliveira (2020) de soldagem em operação para conseguir ser utilizado em trabalhos que envolvam a MADA. Nessa etapa foi construída uma base de fixação dos CPs e adaptada ao sistema de jatos colidentes, como na **Figura 15**, para simular a mitigação de calor no processo de deposição de material.

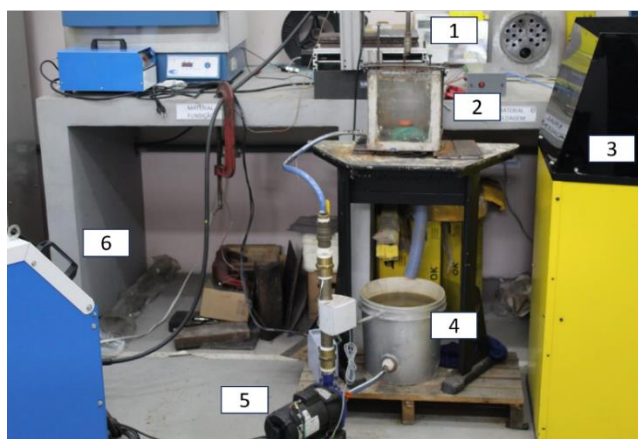
Figura 13: Sistema de resfriamento à água.



Fonte: Oliveira, 2020.

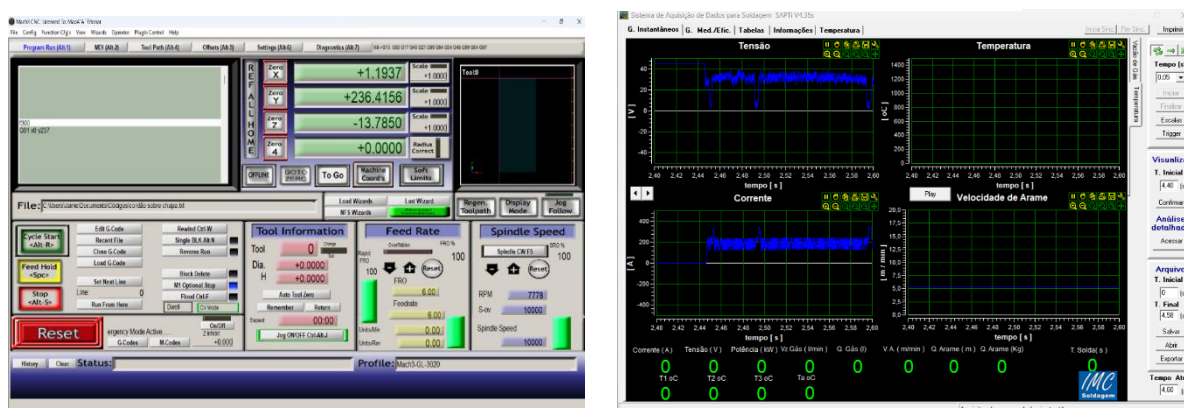
Onde se realizou algumas adaptações como troca de bomba e ajustes no acoplamento das chapas para soldagens, como mostrado na **Figura 16** A água que foi utilizada teve variação de 27-28 °C na temperatura de entrada e 29-32 °C de saída, como uma vazão de 6,1 l/min.

Figura 14: Sistema de resfriamento, 1- Tocha, 2-Reservatório, 3-Bancada de captação de dados, 4-Tanque, 5-Bomba e 6- Fonte de energia,



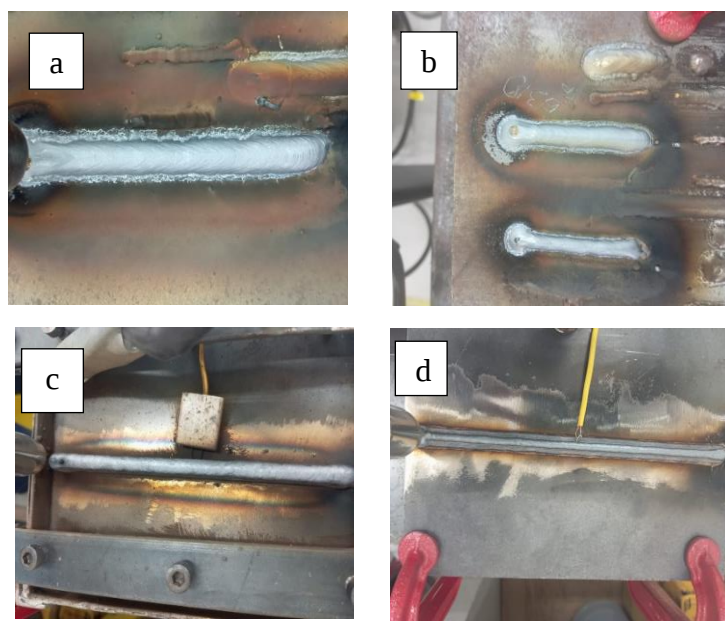
Foi utilizado o *software Mach 3* para movimentar do CNC com programação no código G e o *software SAPTiv4.35* para a coleta dos dados referente a tensão, corrente e temperatura, como mostrado na **Figura 17 (a)** e **Figura 17 (b)**.

Figura 15: (a) Painel principal do Mach 3, (b) Painel do SAPTi4.35.



Conduziu-se uma série de ensaios-teste, ilustrados nas **Figura 18**, com o objetivo de determinar os parâmetros ideais de energia de deposição. Os cordões apresentados nas **Figuras 18 (c) e 18 (d)** foram escolhidos devido às suas características de deposição mais adequadas para a fabricação dos CPs em função da energia de deposição alta e baixa. As deposições foram realizadas no Laboratório de Soldagem – UFAM do Departamento de Engenharia Mecânica.

Figura 16: (a) Deposição em uma única camada, alta energia; (b) Deposição em múltiplas camadas, alta e baixa energia; (c) Cordão com alta energia e frequência alta; (d) Cordão com baixa energia e alta frequência.



Para a aquisição dos dados foram utilizados o software *SAPTiV4.35* para a coleta dos dados referente a tensão, corrente e temperatura ao longo do processo de deposição de cada camada dos CPs. O programa captura os dados e logo em seguida gera arquivos com as

informações para serem tratadas. Foram utilizados os parâmetros de deposição descritos da **Tabela 6**.

Tabela 4: Parâmetros para definição da energia de deposição.

Parâmetro	Valores
Velocidade de alimentação de arame	5,5 m/min
DBCP	11 mm
Vazão de gás de proteção (100 % Argônio)	15 L/min
Velocidade de deposição	600mm/min (10 mm/s), 300 (5 mm/s) e 450 mm/min (7,5mm/s)

Os parâmetros da frequência de pulsação, como ilustrado na **Tabela 7**, foram estabelecidos previamente, com base ao manual de parâmetros do equipamento para pulsado.

Tabela 5: Parâmetros de correntes e tempos da frequência de pulsação estudado.

Parâmetro	Nomenclatura	1º nível	2º nível	Ponto central
Corrente de base (A)	I_b	150	150	150
Tempo de base(ms)	T_b	0,5	5	2,75
Corrente de pico (A)	I_p	250	250	250
Tempo de pico(ms)	T_p	0,5	5	2,75

Nota: 0,5 ms é 1000 Hz, 5 ms é 100 Hz em frequência de pulsação e 2,75 é 550 Hz.

Para calcular a energia de deposição durante o uso do sistema de soldagem *MIG/MAG*, foi empregado o método da Potência Instantânea Média (*PIM*), que consiste em determinar a média dos produtos da corrente pela tensão em cada ponto de amostragem durante o processo de deposição, conforme explicado na **Equação 1**. A energia de deposição foi então calculada usando a **Equação 2**, sem considerar o fator de eficiência do processo.

Essa energia é obtida ao dividir a potência instantânea média pela velocidade de deposição (v), a qual, para este processo específico, é um parâmetro com $v = 300$ mm/min e 600 mm/min, como mostrado na **Tabela 4**. Destaca-se que o valor do fator de " η " foi excluído dessa análise.

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

onde, n é o número de amostras da aquisição.

$$E_d = \frac{PIM}{v} \text{ [J/mm]} \quad (2)$$

As energias de deposição então foram determinadas variando os parâmetros de velocidade de deposição e os valores de frequência de pulsação, conforme descrito na **Tabela 8**.

Tabela 6: Energia de deposição definidas para a fabricação dos CPs.

Parâmetro	Tempo de pulsação (ms)	Corrente média (A)	Tensão média (V)	Velocidade de deposição (mm/s)	Energia de deposição (J/mm)
Energia baixa	0,5	215	20,7	10	445,05
Energia alta	0,5	208	20,9	5	869,44
Energia baixa	5	216	20	10	432
Energia alta	5	198	23,5	5	930,6
Energia média	2,75	191	22,4	7,5	570,45

Para a fabricação dos CPs por MADA por meio do material de adição ER110S-1, foram produzidas 10 amostras, conforme ilustrado na **Figura 19**, cada uma composta por 30 camadas. A variação dos fatores e níveis para cada amostra foi conduzida de acordo com o delineamento experimental descrito na **Tabela 9**.

Durante todo o processo de deposição foram empregadas duas condições de energia, sendo elas: alta e baixa. A energia baixa foi com uma velocidade de deposição de 300 mm/min, enquanto a energia alta de 600 mm/min e uma energia central de 450 mm/min.

Foi estabelecida uma temperatura de interpasse de 60 °C entre uma camada e outra. Uma das etapas iniciais foi feita a remoção da camada de óxido da superfície de todos os substratos para evitar contaminação durante o processo de deposição do material, deixando a região central da chapa limpa e lisa.

4.3.1 Delineamento experimental

Foi realizado um delineamento experimental para identificar qual o fator ou fatores são mais influentes, sendo três fatores em dois níveis. A metodologia envolveu a análise de cada fator, com dois níveis, para investigar a relação entre esses fatores e as variáveis de resposta: geometria, taxa de resfriamento, microdureza Vickers e a energia de impacto Charpy V, conforme a **Tabela 9**.

Tabela 7: Parâmetros a serem estudados.

Fatores	Nomenclatura	1º nível	2º nível	Ponto central
Energia de deposição (J/mm)	A	Alta (+1)	Baixa (-1)	Central (0)
Tipo de resfriamento	C	Ar	Água	-
Frequência de pulsação (Hz)	B	1000 (+1)	100 (-1)	550 (0)

O primeiro fator a ser estudado será a energia de deposição, analisando seu efeito na geometria, ciclos térmicos e tenacidade das peças sob variações de energia alta e baixa. O acúmulo de calor durante a deposição pode comprometer a microestrutura e as propriedades mecânicas. Então controlar a energia de deposição pode garantir a qualidade e integridade das peças. Em seguida, será investigado o tipo de resfriamento, visando compreender como o resfriamento indireto afeta a macroestrutura e microestrutura das peças, por meio de testes de ar e água.

O terceiro fator será a frequência de pulsação da corrente elétrica, com foco em entender como os ciclos de frequência de pulso influenciam na deposição do material. Assim, esse delineamento experimental oferecerá a possibilidade de identificar qual ou quais os fatores serão mais influentes e se há interação entre os fatores estudados na propriedade mecânica desses produtos.

Os valores de cada configuração foram coletados por meio de um arranjo ortogonal e posteriormente analisados utilizando o software MINITAB™, através de métodos como a ANOVA. Como indicado na **Tabela 10**, esse arranjo foi gerado utilizando o mesmo software.

Tabela 8: Delineamento dos parâmetros de fabricação por meio de um DOE feito no MINITAB.

CP	Energia de deposição (J/mm)	Frequência de Pulsação (Hz)	Tipo de Resfriamento
CP1	Baixa	1000	AR
CP2	Alta	1000	AR
CP3	Baixa	100	AR
CP4	Alta	100	AR
CP5	Baixa	1000	Água
CP6	Alta	1000	Água
CP7	Baixa	100	Água
CP8	Alta	100	Água
CP9 (PC)*	Baixa	550	AR
CP10 (PC)*	Alta	550	Água

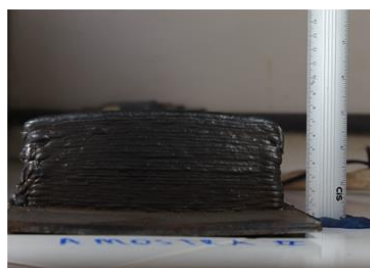
Nota: PC: Ponto central.

Figura 17: 10 CPs fabricadas via MADA.

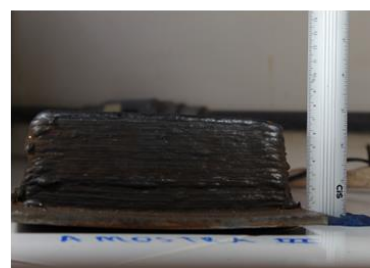
CP1: A1;P1;N1



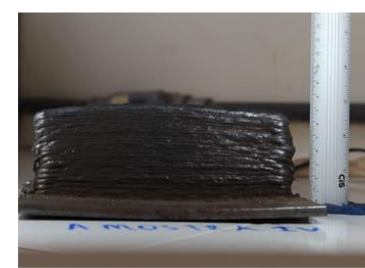
CP2: A2;P1;N1



CP3: A1;P2;N1



CP4: A2;P2;N1



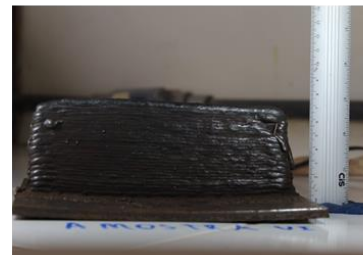
CP5: A1;P1;N2



CP6: A2;P1;N2



CP7: A1;P2;N2



CP8: A2;P2;N2



CP(PC): A1;P3;N1



CP(PC): A2;P3;N2



CP: Corpo de prova;
 N1: Resfriamento ao Ar;
 N2: Resfriamento a Agua;
 A1: Baixa Energia;
 A2: Alta Energia;
 P1: Frequência de pulsação 0,5;
 P2: Frequência de pulsação 5;
 P3: Frequencia de pulscão 2,75.

4.3.2 Medições geométricas dos CPs

Para coletar os dados das dimensões de altura e largura dos CPs, adotamos uma estratégia que envolveu aguardar que a temperatura da camada atingisse aproximadamente 50°C após a deposição das camadas, conforme medida por um pirômetro. Em seguida, utilizamos um paquímetro para realizar as medições. Três medições foram feitas para cada dimensão (altura e largura), uma no centro e uma em cada extremidade da amostra, assumindo a média dos três valores para a largura dos CPs.

Essas múltiplas medições foram realizadas para garantir uma representação precisa das dimensões da amostra, reduzindo o erro experimental e fornecendo uma estimativa confiável da altura e largura médias. Além disso, permitiu-nos detectar variações ao longo da amostra, especialmente nas extremidades, onde distorções ou imperfeições podem ser mais pronunciadas devido ao processo de deposição das camadas ou a manipulações anteriores.

Essa abordagem nos proporcionou uma visão mais completa e precisa das dimensões da amostra, essencial para avaliar sua uniformidade e qualidade, os dados coletados de largura e altura de todas os CPs estão na seção de **APÊNDICES A**.

4.3.3 Captação dos ciclos térmicos

Para captar os dados de temperatura dos CPs e realizar a análise dos ciclos térmicos das camadas, foi empregado um termopar do tipo K, com um diâmetro de 0,5 mm. Esse tipo de termopar é composto por uma junção de Chromel (elemento positivo) e Alumel (elemento negativo).

Para obter dados mais precisos da temperatura de pico, o termopar foi posicionado diretamente na parede dos CPs. Essa escolha permitiu uma análise mais detalhada dos ciclos térmicos ao longo do processo de fabricação. Além disso, o termopar foi colocado no ponto central da parede para uma medição mais linear das temperaturas em toda a espessura das camadas.

De acordo com a **Figura 20**, o método adotado posicionou um único termopar para monitorar as variações de temperatura durante a deposição das camadas em três alturas, como descrito na **Tabela 11**. O termopar, inicialmente nomeado como T1, foi

colocado na 1ª camada para coletar dados de temperatura até a 15ª camada. À medida que a deposição avançava, o termopar era reposicionado e passava a ser referido como T2, coletando dados das camadas da 16ª até a 25ª. Por fim, como T3, foi posicionado para monitorar o resfriamento das camadas 26ª até a 30ª. Dessa forma, o termopar único foi ajustado em sua posição ao longo do processo, possibilitando a coleta contínua dos ciclos térmicos

Figura 18: Posicionamento do termopar nos CPs

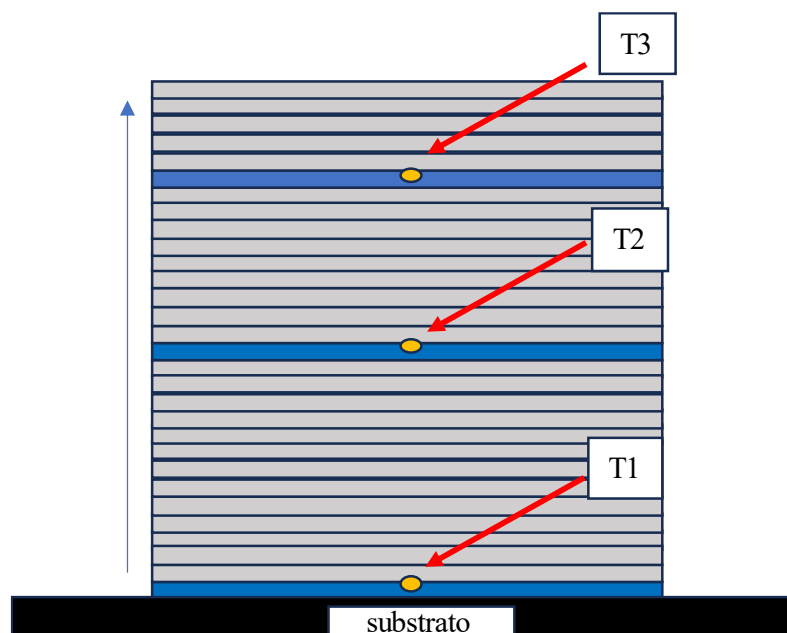


Tabela 9: Critérios de análise dos ciclos térmicos das camadas escolhidas por amostras.

Termopar	Camada da posição do Termopar	Camadas que geraram ciclos térmicos sobre o Termopares
T1	1°	2° à 15°
T2	15°	16° à 25°
T3	25°	26° à 30°

Para a análise do ciclo térmico dos CPs, estabeleceu critérios específicos. Utilizamos o software SAPTiv4.35 para coletar e tratar as temperaturas/tempo de cada camada, e posteriormente o *software* Origin.TM para filtrar os dados. A partir da análise

dos ciclos térmicos de todas as camadas, foi realizada uma análise do intervalo de temperatura que poderia representar a taxa de resfriamento para cada termopar.

Para a análise da influência sobre a taxa de resfriamento, utilizou-se o ciclo térmico do T1 da 6° camada de todas os CPs, além das camadas 19° para representar o T2. No caso da camada 19° do T2 do CP1, onde a captura de dados não foi ideal, optou-se pela camada 23° para sua representação, e por fim, a camada 28° foi utilizada para representar o T3.

Definiu-se um intervalo de temperatura entre 324°C e 200°C devido todas as camadas para avaliação do ciclo térmicos estarem dentro desse intervalo, para analisar a taxa de resfriamento de cada amostra, conforme detalhado na **Tabela 12** abaixo.

Tabela 10: Definição da camada escolhida para análise do ciclo térmico de cada termopar.

Termopar	Camada da posição do Termopar	Camada definida	CP
T1	1°	6°	CP1, CP2, CP3, CP4, CP5, CP6, CP7, CP8, CP9 e CP10
T2	15°	19° e 23°	CP1* ¹ , CP2, CP3, CP4, CP5, CP6, CP7, CP8, CP9 e CP10
T3	25°	28°	CP1 ² , CP2, CP3, CP4, CP5, CP6, CP7, CP8, CP9 e CP10

1. Nessa amostra não foi possível captar as informações da camada 19. Mas foi utilizado os dados da camada 23.

2. No CP1 não foi possível captar o ciclo térmico.

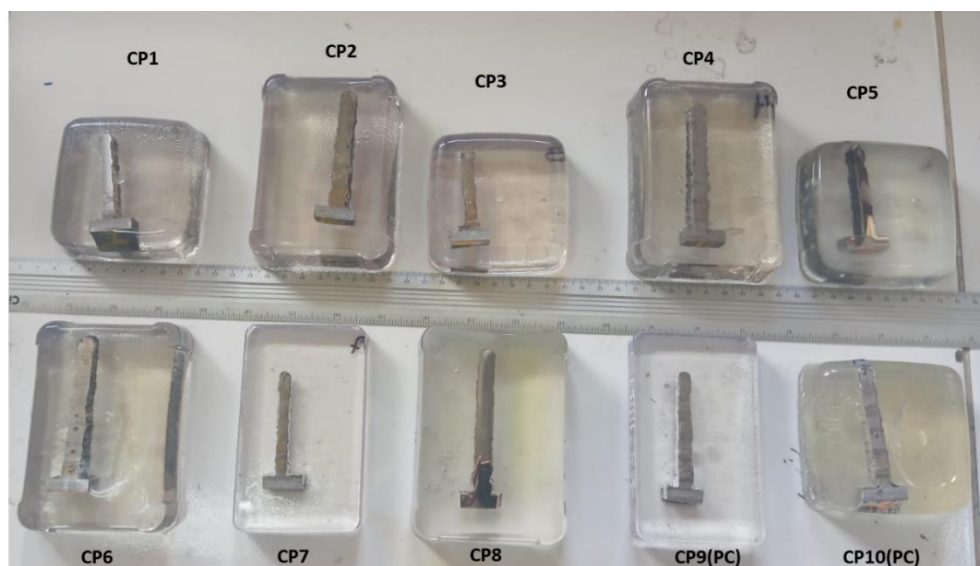
4.3.4 Ensaios metalográficos

Para os ensaios metalográficos, foram produzidos mais 10 CPs, **Figura 21**, com dimensões aproximadas de 100 mm de comprimento, dos quais foram retiradas fatias de 25 mm de espessura para a realização das análises de micrografia, macrografia e microdureza Vickers (HV 0,5).

Os cortes dos corpos de prova foram realizados na serra-fita do laboratório de usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica, enquanto os ensaios metalográficos foram conduzidos no Laboratório de Físico-Química do Departamento de Engenharia de Materiais. Para a análise metalográfica, após a produção das peças, foram retirados corpos de prova com aproximadamente 10 mm de espessura para caracterização microestrutural, incluindo a obtenção de macroestruturas e microestruturas.

Na etapa de metalografia, os corpos de prova foram embutidos a frio e lixados com lixas de diferentes granulometrias (120, 220, 420, 600 e 1200). Em seguida, passaram pelo polimento com pasta de alumina para a obtenção dos resultados micrográficos. No total, 10 CPS foram preparadas seguindo esse processo.

Figura 19: CPs para análise de macrografia, micrografia e microdureza.



*PC- Ponto central.

4.4.4.1. Macrografias

Foram realizadas macrografias em 4 corpos de prova (resfriado ao ar e resfriado à água) com o intuito de evidenciar as camadas depositadas. A revelação foi conduzida utilizando uma solução de Nital a 15%, mantendo os corpos de prova em contato com a solução por cerca de 5 minutos, com intervalos de 15 segundos a cada minuto. As imagens das macrografias foram registradas com a utilização de uma câmera digital da marca CANON, modelo EOS T100 e com uma lente de 18-55 mm.

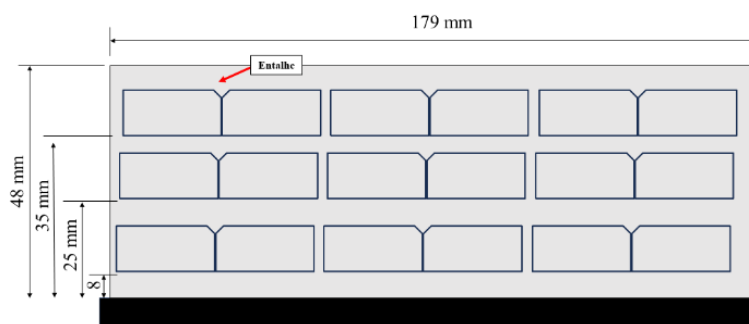
4.4.4.2 Micrografia

As análises micrográficas foram conduzidas por meio de um microscópio óptico para a observação da microestrutura, utilizando o reagente Nital a 2% de concentração.

4.4. Impacto de Charpy

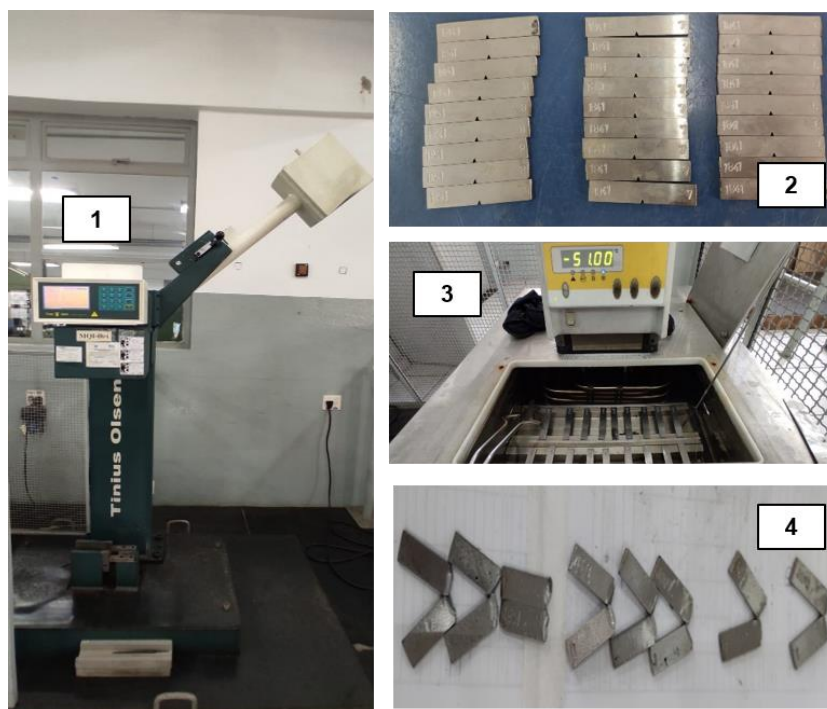
Os ensaios de impacto Charpy foram realizados à temperatura de -51°C , utilizando amostras com o entalhe traçado do tipo V e dimensões de $10 \times 2,5 \times 55 \text{ mm}$. A preparação dos corpos de prova e o método de ensaio foram adotados conforme as diretrizes da norma ASTM A 370/2020, especificamente mostrado na **Figura 22**.

Figura 20: Esquema da retirada dos corpos de prova Charpy V dos CPs.



A posição exata dos corpos de prova não pôde ser determinada, resultando em incerteza quanto à análise subsequente dos CPs em cada altura e aos valores de energia absorvida. Os ensaios foram contínuos no laboratório PROAQT, à temperatura ambiente de 25°C , utilizando uma Máquina de Ensaio de Impacto marca "TINIUS OLSEN IT MQI 004", com capacidade de 408J, como mostrado na **Figura 23**.

Figura 21: 1- Equipamento de ensaio, 2- Geometria dos corpos de provas ,3- Ensaio de impacto 3 4-
Corpos de provas rompidos.



Fonte: Autor, 2024.

A incerteza de medição foi de $\pm 1\%$ do valor indicado, com base em uma incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência $k=2$, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%, conforme determinado pela publicação EA-4/02.

Após os ensaios de impacto, foram coletados a energia absorvida para cada um de um total de 10 amostras, foram retirados 9 corpos de prova por amostra.

4.5. Fractografias

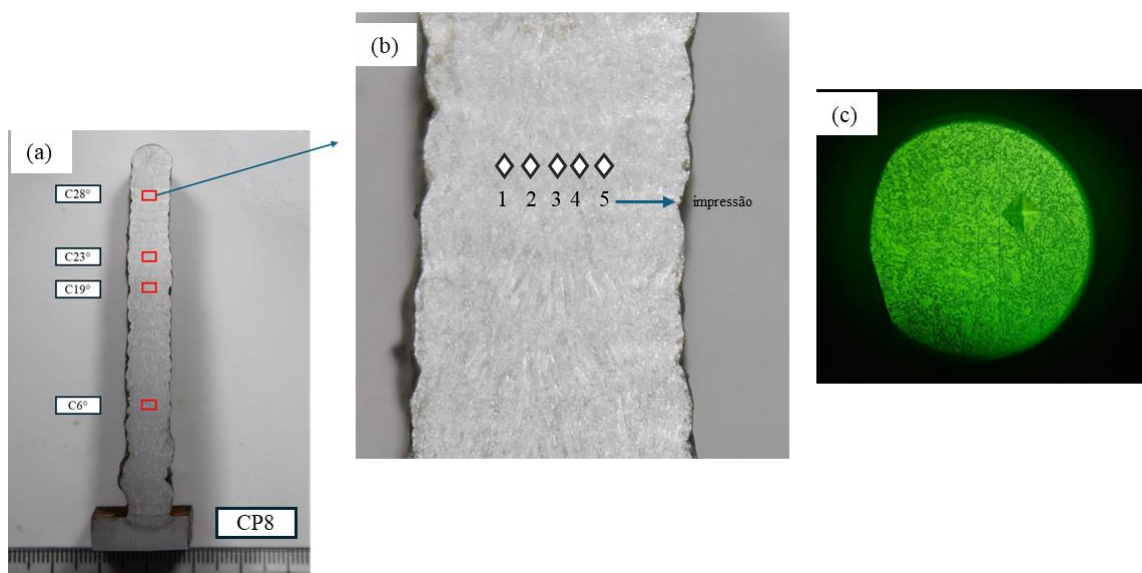
Após o ensaio de impacto Charpy V, foram realizadas as imagens de fractografia. Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura. Os CPs foram limpos com limpador ultrassônico antes da obtenção das imagens.

4.6. Ensaio mecânico de microdureza Vickers (HV0,5)

A avaliação dos impactos nas propriedades mecânicas das camadas depositadas foi realizada por meio de ensaios de microdureza Vickers, utilizando um microdurômetro equipado com um penetrador piramidal e operando em uma faixa de força de 0,10 gf a 1 kgf.

As medições foram feitas nas camadas 6^a, 19^a e 28^a, aplicando uma carga de 0,5 kgf (HV0,5). Para mapear as diferentes regiões dos CPs, foram realizadas cinco impressões por camada, com espaçamento de 0,3 mm entre elas, em conformidade com a norma NBR ISO 6507-1/2019. de um perfil de microdureza para mapear as diferentes camadas da região depositada, segundo a **Figura 24**.

Figura 22: Localização das impressões de dureza HV0,5. (a) CP com marcação das camadas analisadas para o ensaio; (b) marcação e (c) visualização da marcação.



4.7. Análise estatística

Foi utilizado o software Minitab® 19 para as análises estatísticas. O delineamento experimental completo com três fatores em dois níveis foi empregado para avaliar a influência do tipo de resfriamento (ao ar ou com água), frequência de pulsação (100 Hz e 1000 Hz) e energia de deposição (baixa ou alta) sobre as dimensões geométricas, ciclos

térmicos, energia absorvida no ensaio de Charpy e microdureza Vickers (HV0,5) das camadas depositadas.

Inicialmente, a normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, considerando $p\text{-valor} \geq 0,05$ como indicativo de distribuição normal e $p\text{-valor} < 0,05$ como evidência de não normalidade. Em seguida, foi aplicada a análise de variância ANOVA One-Way para cada cenário estudado, testando a hipótese nula de igualdade entre as médias dos grupos.

Quando a hipótese nula foi rejeitada ($p\text{-valor} < 0,05$), indicando a existência de diferenças significativas, foi realizado o teste de Tukey, que permite comparações múltiplas entre os grupos e a identificação dos níveis dos fatores que influenciaram significativamente as variáveis de resposta.

Além disso, foi conduzida uma análise de regressão para verificar os coeficientes de determinação R^2 e R^2 ajustado, com e sem a aplicação do método *Stepwise*, que adiciona ou remove variáveis conforme sua significância estatística, utilizando o critério padrão de 0,15 definido pelo software. Tanto a análise dos efeitos principais quanto a interação entre os fatores foram avaliadas para compreender a influência individual e combinada das variáveis estudadas sobre as respostas analisadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

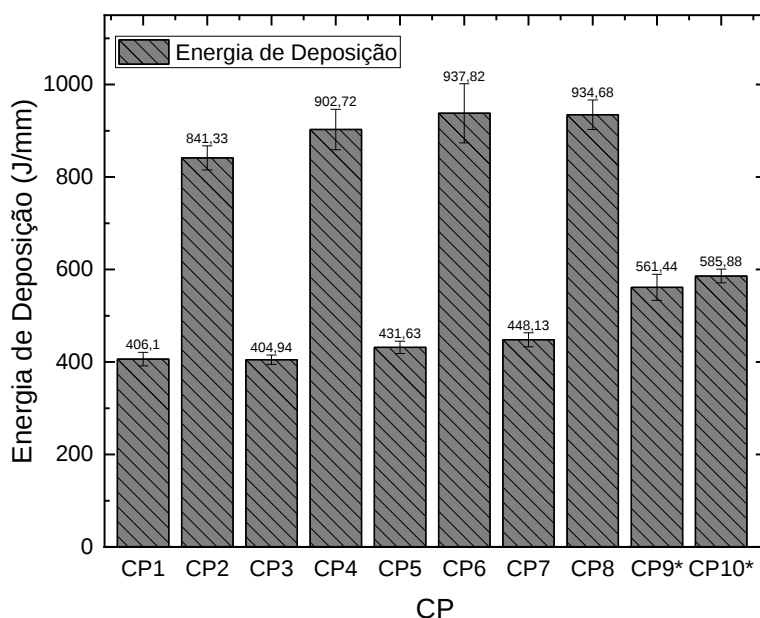
5.1. Energia de deposição

A energia de deposição de cada camada foi calculada para todos os CPs a fim de verificar a consistência com os valores definidos para o estudo. Os dados específicos de cada CP foram segmentados e organizados nos **APÊNDICE B**.

A energia de deposição média foi calculada para cada CP, a partir dos dados coletados, conforme mostrado na **Figura 25**. Essas médias foram então utilizadas no delineamento experimental para conduzir o estudo. Este processo permitiu garantir que as energias de deposição utilizadas na fabricação dos CPs estivessem de acordo com os parâmetros desejados, proporcionando uma base sólida para a análise posterior.

Foi realizado teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov os dados estão disponíveis no **APÊNDICE C**

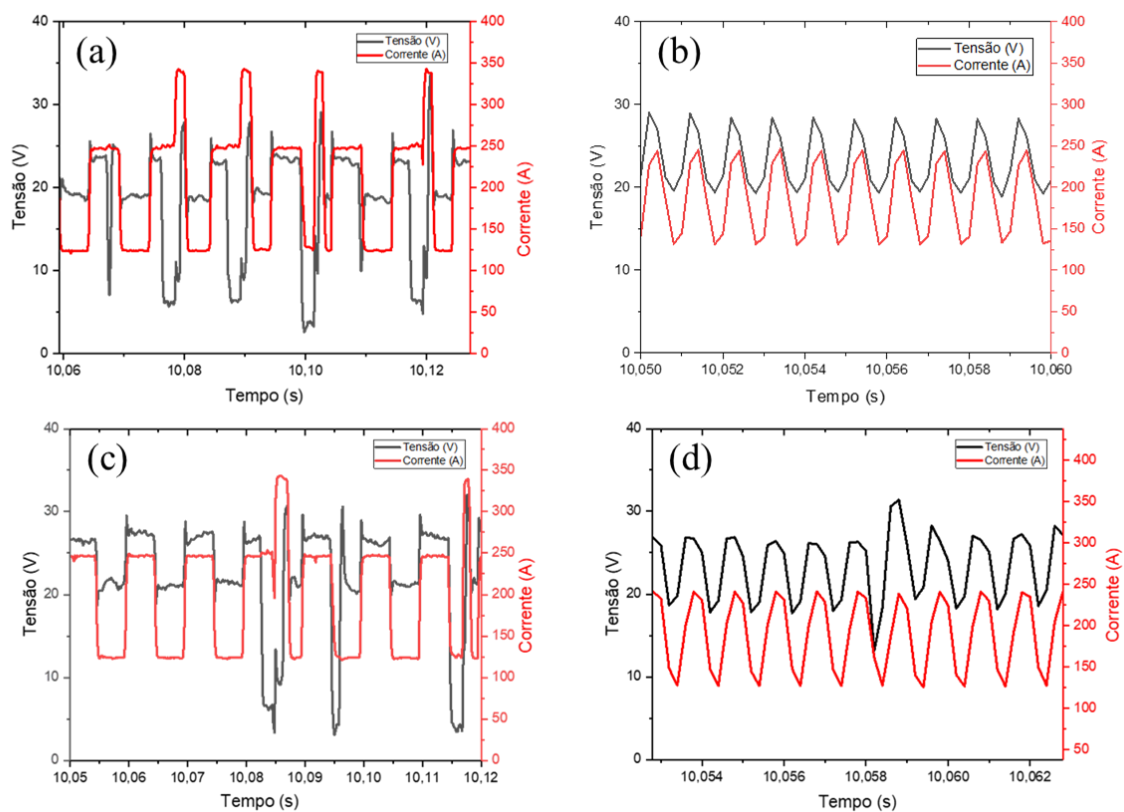
Figura 23: Energia de deposição captadas no sistema de aquisição de dados para os 10 CPs.



*PC- Ponto central.

A **Figura 26** mostra o comportamento da tensão e da corrente para os CPs com alta e baixa energia de deposição, considerando tanto alta quanto baixa frequência de pulsação.

Figura 24: Gráficos representativos das curvas de tensão e corrente para diferentes condições de energia e frequência de pulsação: (a) CP3 – baixa energia, 100 Hz; (b) CP6 – alta energia, 1000 Hz; (c) CP3 – alta energia, 100 Hz e CP1 – baixa energia, 1000 Hz.



5.2. Análise da geometria por camada depositada.

Foi realizada uma análise da geometria utilizando duas métricas principais: altura média e largura média dos CPs. Isso para identificar e discutir os fatores que mais influenciam cada métrica.

Primeiramente, foram realizados testes estatísticos para verificar a normalidade dos dados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov, considerando a altura média e a largura média dos CPS, conforme apresentado no **APÊNDICE D** e **E**. Os resultados indicaram que todos os dados seguem uma distribuição normal, uma vez que $p > 0,05$.

Após essa verificação, aplicou-se a análise de variância ANOVA para avaliar os efeitos principais e as interações entre os fatores. Como descrito na **Tabela 13** os valores de altura e largura média. Os dados coletados de largura e altura de todas os CPs estão na seção d **APÊNDICES A**.

Tabela 11:Dados das respostas geométricas médias dos CPs.

Amostra	Altura média (mm)	Desvio padrão	Largura média (mm)	Desvio padrão
CP1	1,90	±0,44	7,05	±0,49
CP2	2,43	±0,56	9,74	±0,57
CP3	1,74	±0,59	7,03	±0,58
CP4	2,21	±0,32	9,74	±0,39
CP5	1,74	±0,40	6,94	±0,51
CP6	2,29	±0,44	9,91	±0,45
CP7	1,67	±0,55	6,86	±0,44
CP8	2,27	±0,84	10,24	±0,45
CP9 (PC)	2,03	±0,48	7,81	±0,40
CP10 (PC)	1,94	±0,38	7,72	±0,43

5.2.1. Largura média

Para a largura média dos CPs, adotou-se o nível de confiança de 95%, e foram obtidos os valores da análise de regressão do modelo, como descrito na **Tabela 14**.

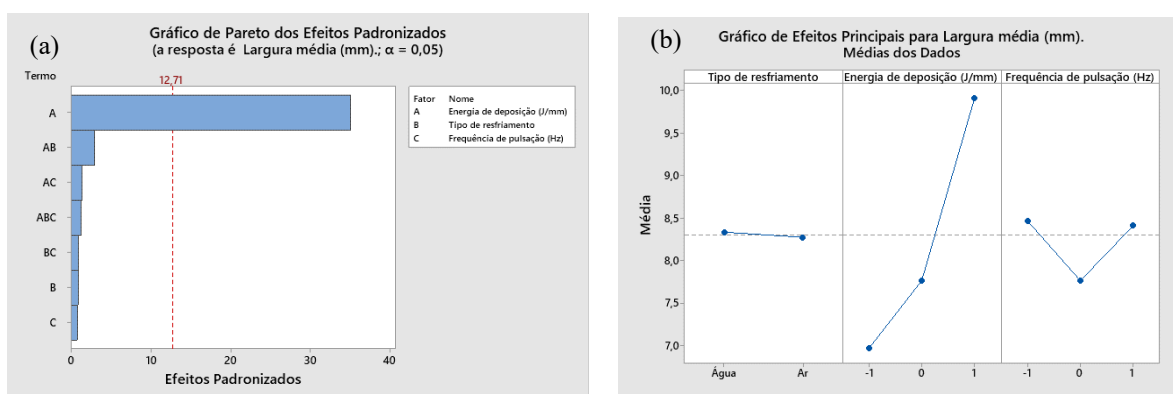
Tabela 12: Sumário do Modelo para largura média dos CPs.

S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)
0,118585	99,92%	99,92%	74,86%

Os gráficos para a análise da largura média são mostrados nas **Figura 27 (a)** e **27 (b)**, onde revela na **Figura 27 (a)** de efeito padronizado que o fator A (energia de deposição) e a interação entre os fatores A e C (energia de deposição e tipo de resfriamento) são os únicos que ultrapassam a linha de referência de significância de efeito, estabelecida em 12,7 para um valor de nível de confiança de 95%.

Isso indica que o fator A (energia de deposição) é o mais influente na largura das camadas depositadas que compõem os CPs produzidas via manufatura aditiva, seguido pela interação dos fatores AC (energia de deposição e tipo de resfriamento). Esses resultados sugerem que a energia durante a deposição tem um impacto significativo na largura das camadas, e essa influência pode ser ainda maior quando combinada com o tipo de resfriamento utilizado.

Figura 25:(a) Gráfico de Pareto para a largura média, (b) Gráfico dos efeitos principais para a largura média.



Com este resultado, pode-se observar uma melhoria mais significativa ao considerar os efeitos principais individuais na **Figura 27 (b)**, é evidente uma inclinação da reta do fator A (energia de deposição) entre os diferentes níveis, indicando uma relação inversa entre a energia de deposição e a largura dos CPs.

Esta relação também é confirmada pela inclinação da reta entre as médias mais altas e mais baixas. Assim, à medida que aumenta a energia de deposição, espera-se um aumento na largura média dos CPs.

Logo, amostras com energia de deposição mais alta tendem a ter mais calor depositado, consequentemente, resultando em larguras maiores, enquanto amostras com energia de deposição mais baixa tendem a ter menos calor sendo depositado, e, portanto, a ter larguras menores, como pode ser mostrado na **Tabela 14**.

Essa relação se deve ao fato de que, em energia de deposição mais alta, uma maior quantidade de material é depositada. Com mais material fundido, há uma maior capacidade de fluir lateralmente antes da solidificação ocorrer. Por outro lado, em uma energia de deposição mais baixa, há uma quantidade menor de material fundido na poça de fusão. Isso resulta em uma fusão menos intensa e em uma menor restrição ao fluxo

lateral do material antes da solidificação, o que contribui para larguras menores das camadas depositadas.

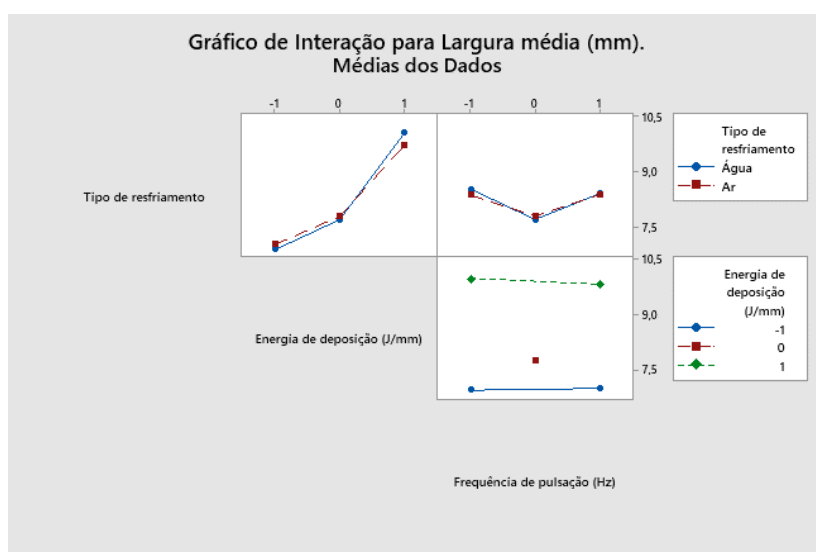
Ao comparar amostras com alta e baixa energia de deposição, observamos que a largura média da amostra CP2, com alta energia de deposição, é cerca de 38,16% maior do que a da amostra CP1, que possui baixa energia de deposição, sendo ambos com o tipo de resfriamento ao ar.

Essa análise em termos percentuais destaca o impacto considerável da variação na energia de deposição sobre as dimensões das camadas depositadas durante o processo de manufatura aditiva. Ao considerar amostras resfriadas com água, como CP6 e CP5, também se observou uma diferença significativa.

A largura média da CP6, com alta energia de deposição, é aproximadamente 42,79% maior do que a da CP5, com baixa energia de deposição. Essa discrepância realça ainda mais o efeito da variação na energia de deposição sobre as dimensões das camadas depositadas, especialmente quando associada a diferentes métodos de resfriamento.

O outro fator significativo é a interação entre os fatores A e B (energia de deposição e tipo de resfriamento) e A e C (energia de deposição e frequência de pulsação), como mostrado na **Figura 28**.

Figura 26: Gráfico de interação dos fatores A e C (energia de deposição e tipo de resfriamento) para a largura média.



Podemos observar padrões interessantes nos dados dos CPs CP1 a CP10. Esses CPs apresentam variações nas dimensões das camadas depositadas em resposta às

diferentes combinações de energia de deposição e tipo de resfriamento. Ao comparar os CPs CP4 (baixa energia de deposição, baixa frequência de pulsação e resfriamento ao ar) e CP5 (baixa energia de deposição, baixa frequência de pulsação e resfriamento a água), observamos que a largura média da CP4 é cerca de 4,88% menor do que a da CP8.

Isso destaca o impacto do tipo de resfriamento na largura das camadas depositadas, mesmo quando a energia de deposição e frequência de pulsação são iguais. Essa diferença percentual sugere uma influência do tipo de resfriamento na largura média das camadas.

Isso indica que, mesmo com a mesma energia de deposição, o tipo de resfriamento ainda tem um efeito perceptível na largura das camadas depositadas. Embora a diferença percentual seja relativamente pequena, sugere-se que o resfriamento a água pode promover uma ligeira expansão na largura das camadas em comparação com o resfriamento ao ar, mesmo para energias de deposição mais altas.

O modelo de regressão completo da largura média está disponível no **APÊNDICE F**.

5.2.2. Altura média

Para altura média dos CPs, adotou-se também o nível de confiança de 95%, e foram obtidos os valores da análise de regressão do modelo, como descrito na **Tabela 15**.

Tabela 13: Sumário do Modelo para altura média dos CPs.

S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)
0,0079057	99,99%	99,91%	96,82%

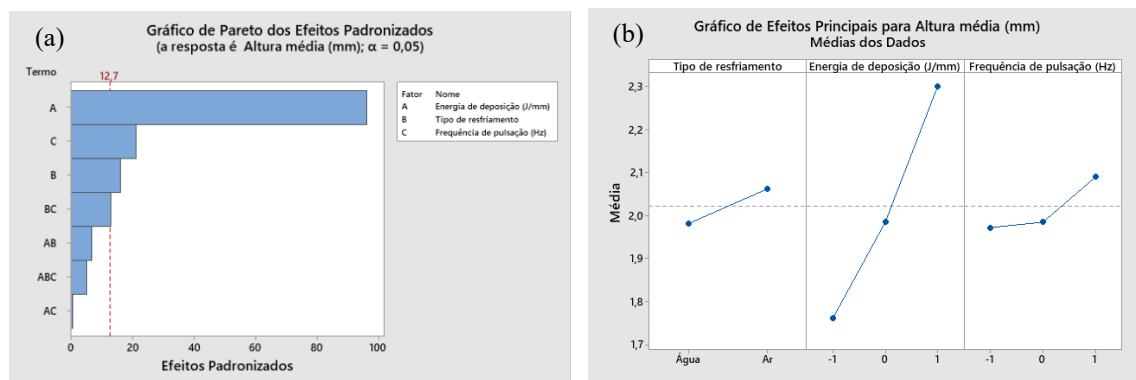
As **Figuras 29 (a)** e **29 (b)** mostram o resultado da análise de variância para a altura média dos CPs. Ao analisar os gráficos de Pareto da **Figura 29 (a)** para a variável resposta altura média, observa-se a significância de todos os fatores:

A (energia de deposição), B (frequência de pulsação), C (tipo de resfriamento) e da interação entre B e C (frequência de pulsação e tipo de resfriamento), todos ultrapassando a linha de significância estatística.

Na **Figura 29 (b)**, verifica-se que novamente a energia de deposição possui maior significância e efeito em relação aos demais. Isso pode ser justificado pelo fato de que a

energia de deposição influencia diretamente a fusão e solidificação do material durante o processo de manufatura aditiva, o que afeta diretamente a altura média dos CPs.

Figura 27: (a) Gráfico de Pareto para altura média, (b) Gráfico dos efeitos principais para altura média.



Com energia de deposição mais alta, há uma quantidade maior de material fundido depositado em cada camada. Isso resulta em uma poça de fusão mais profunda e mais larga, o que, por sua vez, contribui para uma altura média maior das camadas depositadas. Além disso, o aumento da energia de deposição pode levar a uma maior penetração do material na camada inferior, resultando em uma fusão mais profunda e, conseqüentemente, em uma altura média maior das camadas.

Por outro lado, amostras com energia de deposição mais baixa depositam menos material fundido a cada camada. Isso resulta em uma poça de fusão menos profunda e mais estreita, o que pode levar a uma altura média menor das camadas.

Percebe-se que os CPs resfriadas ao ar geralmente apresentam alturas superiores às resfriadas com água, devido ao efeito de resfriamento da água, que reduz a fusão e penetração das camadas. Ademais, uma frequência de pulsação mais alta contribui para alturas maiores, aumentando a taxa de deposição de material.

Ao comparar amostras com baixa e alta energia de deposição, há diferenças significativas na altura média das camadas depositadas. Entre os CPs CP1 e CP2, nota-se uma diferença percentual na altura média de aproximadamente 28%, indicando que uma energia de deposição mais alta está associada a uma maior altura. De forma semelhante, a diferença entre CP5 e CP6 é de cerca de 31,9%, o que reforça o efeito positivo da energia de deposição mais alta.

Na comparação entre amostras resfriadas ao ar e à água, observam-se diferenças percentuais nas alturas médias para amostras com a mesma energia de deposição. A diferença entre CP1 (resfriado ao ar) e CP5 (resfriado à água) é de aproximadamente 8,4%, sugerindo uma altura menor para os CPs resfriadas à água.

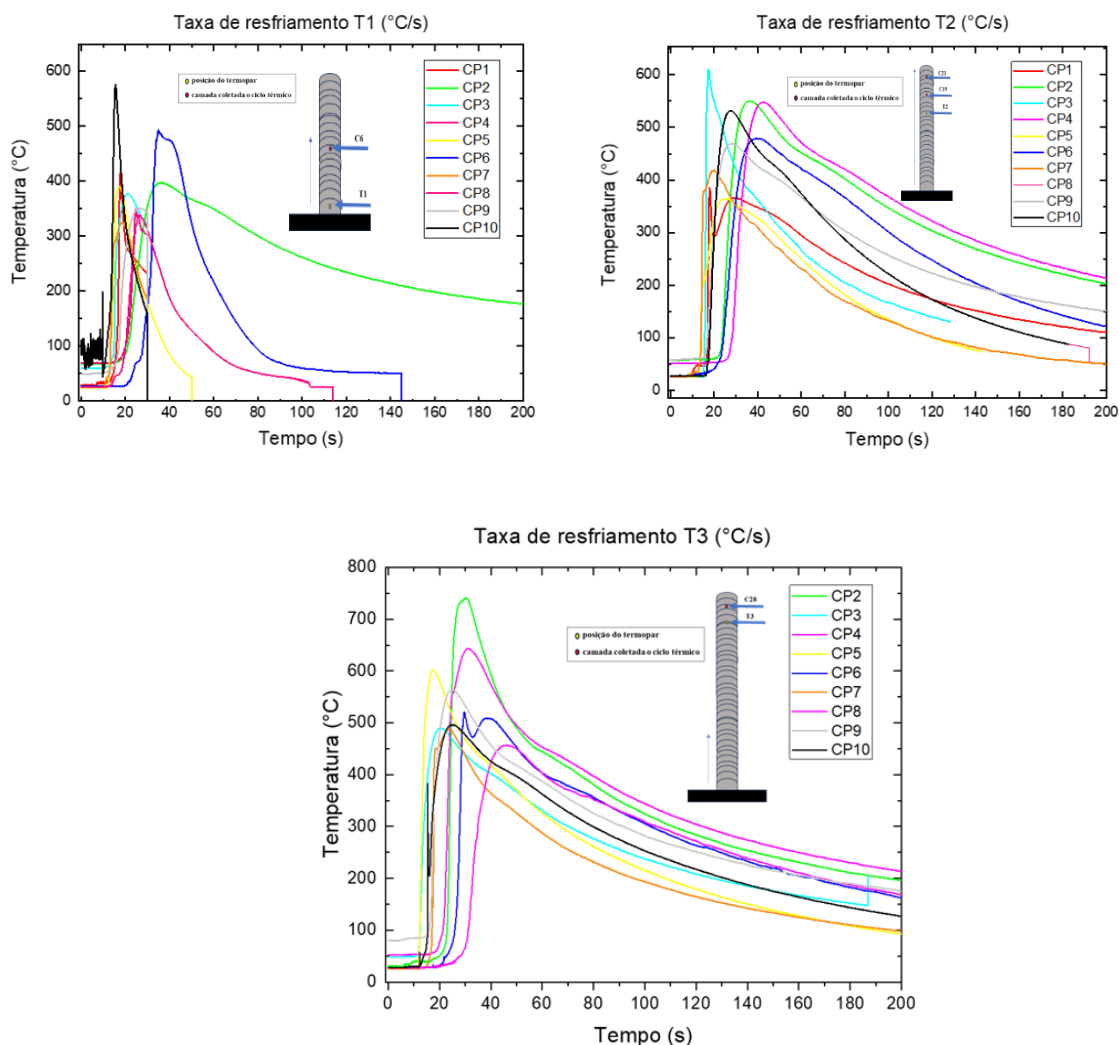
Da mesma forma, a diferença entre CP2 (resfriado ao ar) e CP6 (resfriado à água) é de cerca de 5,7%, evidenciando novamente a tendência de alturas menores para amostras resfriadas à água em comparação com aquelas resfriadas ao ar. Apesar dessas observações isoladas, a análise conjunta dos fatores revela que todos têm efeitos significativos na altura média, destacando-se a energia de deposição entre todas.

O modelo de regressão completo da altura média está disponível no **APÊNDICE G**.

5.3. CICLOS TÉRMICOS

A **Figura 30** mostra os ciclos térmicos, para as os três termopares das camadas estudadas, compostos pela representação das curvas de temperatura para as 10 camadas de deposição construídas em cada CP. Os ciclos foram obtidos a partir da aquisição de dados por meio do uso de termopar que foi reposicionado nas camadas (6°, 19°, 23° e 28°).

Figura 28: Ciclos térmicos para os três termopares (T1, T2, T3).



A **Tabela 16** exibe os valores das taxas de resfriamento para os três termopares utilizados durante a produção dos CPs. Esses dados foram utilizados para avaliar a influência dos diferentes fatores no processo. Por meio de análises estatísticas, foi possível determinar quais fatores exercem maior impacto nas taxas de resfriamento e,

consequentemente, nas propriedades dos CPs à medida que ocorre a deposição das camadas. No **APÊNDICE H** estão os intervalos completo dos ciclos térmicos.

Tabela 14: Taxa de resfriamento por termopares para o intervalo de temperatura de 324°-200°.

Amostra	Taxa de resfriamento T1 (°C/s)	Taxa de resfriamento T2 (°C/s)	Taxa de resfriamento T3 (°C/s)
CP1	7,0	2,5	*
CP2	0,9	1,3	1,3
CP3	2,7	3,5	1,9
CP4	1,0	1,3	1,1
CP5	17,9	3,8	2,6
CP6	10,1	2,5	1,7
CP7	13,2	3,2	2,8
CP8	12,4	1,4	1,7
CP9	2,4	1,1	1,4
CP10	18,7	3,3	2,1

Nota: * dado não coletado.

5.3.1. Taxa de resfriamento T1

No termopar T1, adotou-se um nível de significância $\alpha = 0,05$ com confiabilidade de 95% para avaliar a influência dos fatores. Os valores obtidos na análise de regressão são mostrados na **Tabela 17**.

Tabela 15: Sumário do Modelo para taxa de resfriamento T1.

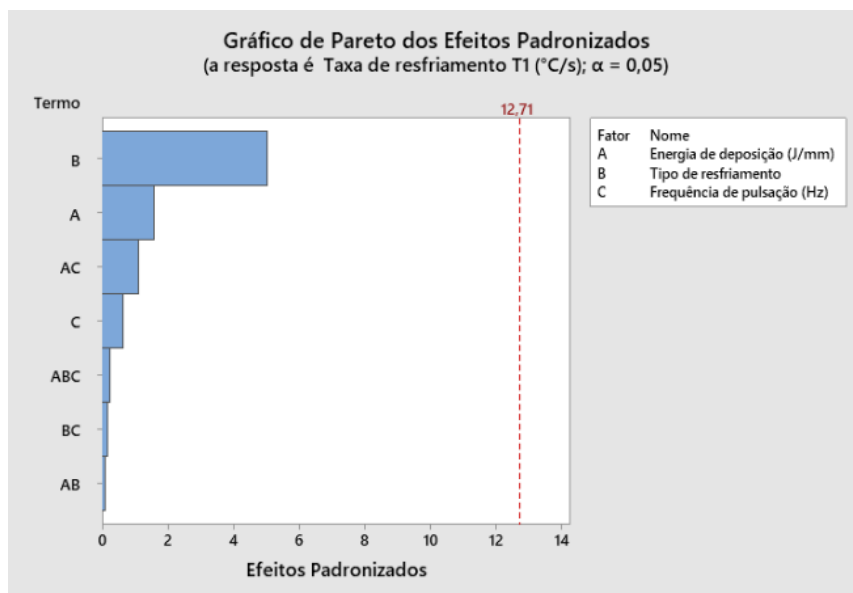
S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)
3,66824	96,79%	71,11%	0,00%

Os valores indicados na tabela mostram que R² e R² ajustado sugerem um bom ajuste do modelo aos dados. No entanto, o valor de R² predito, por ser significativamente mais baixo, indica que o modelo pode estar incluindo mais variáveis do que o necessário, reduzindo sua capacidade preditiva.

A **Figura 31** mostra que nenhum fator cruza a linha de referência, sugerindo a ausência de efeitos estatisticamente significativos na taxa de resfriamento em T1. Além disso, o gráfico de Pareto confirma essa observação, pois nenhum fator ultrapassa a linha

de referência de 12,71, reforçando que, estatisticamente, nenhum dos efeitos testados é significativo ao nível de 5% ($\alpha = 0,05$).

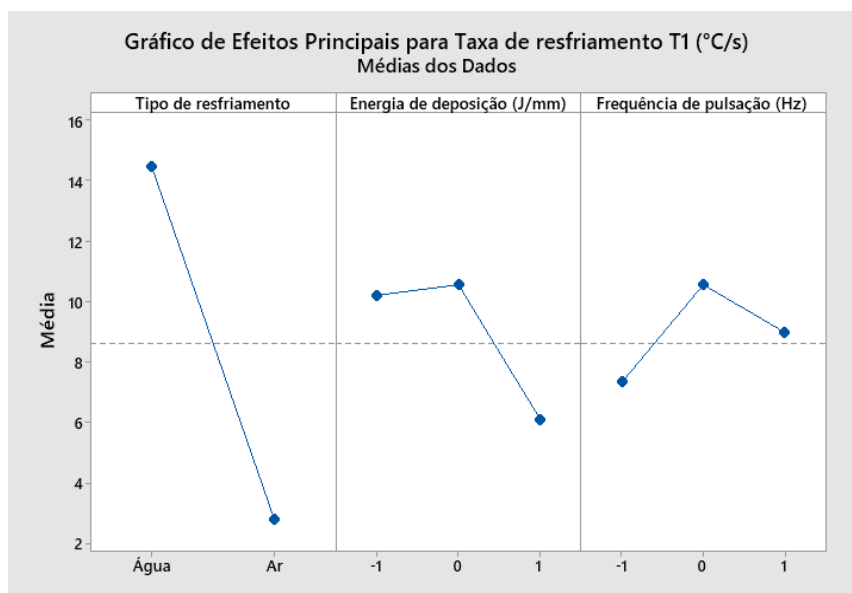
Figura 29: (a) Gráfico de Pareto para taxa de resfriamento T1.



No entanto, observa-se que o fator B (tipo de resfriamento) apresenta uma influência mais evidente, embora não estatisticamente significativa. Esse resultado pode ser interpretado como uma tendência, mas não como um efeito relevante dentro do nível de significância adotado. A dificuldade em determinar um fator significativo pode estar relacionada ao intervalo de temperatura utilizado, que pode não ter sido suficientemente representativo para capturar os efeitos esperados com precisão.

Na **Figura 32**, o gráfico de efeito individual destaca a influência do tipo de resfriamento em T1. A inclinação da reta, que se estende da água para o ar, sugere que a mudança no método de resfriamento está associada a uma redução na taxa de resfriamento. Esse resultado é especialmente relevante, pois os CPs resfriadas na água permanecem em contato indireto com o jato d'água durante o processo, enquanto os CPs resfriadas ao ar não possuem essa interação.

Figura 30: Gráfico dos efeitos para taxa de resfriamento T1.



A maior inclinação observada no gráfico pode ser atribuída à dissipação de calor mais eficiente proporcionada pelo contato direto com a água. Esse contato resulta em taxas de resfriamento mais rápidas em comparação com aquelas obtidas pelo resfriamento ao ar. Esses achados são corroborados pelos valores apresentados na **Tabela 15**, que evidenciam uma variação significativa entre os dois métodos.

Como nenhum efeito significativo foi identificado acima da linha de referência com um nível de significância de $\alpha = 0,05$, optou-se por realizar uma análise adicional utilizando o método *stepwise*, reduzindo o modelo e ajustando o nível de significância para $\alpha = 0,15$.

Dessa forma, obteve-se um modelo otimizado que se ajusta melhor aos fatores estudados, conforme descrito na **Tabela 18**.

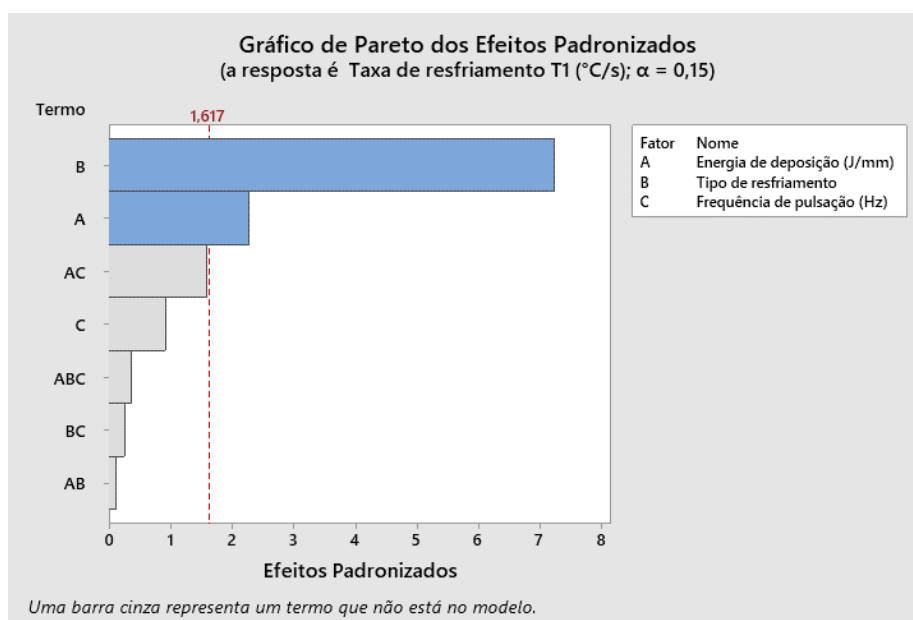
Tabela 16: Sumário do Modelo para taxa de resfriamento T1 após *Stepwise Selection*.

S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)
2,55488	86,10%	85,99%	78,81%

Nessa mudança, adicionamos as variáveis mais significativas e retiramos as menos significativas para obter um modelo mais ajustado que pudesse mostrar o efeito mais significativo. Conforme ilustrado na **Figura 33**, observamos que o fator B (tipo de

resfriamento) possui maior significância e logo em seguida o fator A (energia de deposição) exerce significância na taxa de resfriamento para o T1, ultrapassando a linha de referência de significância de 1,617.

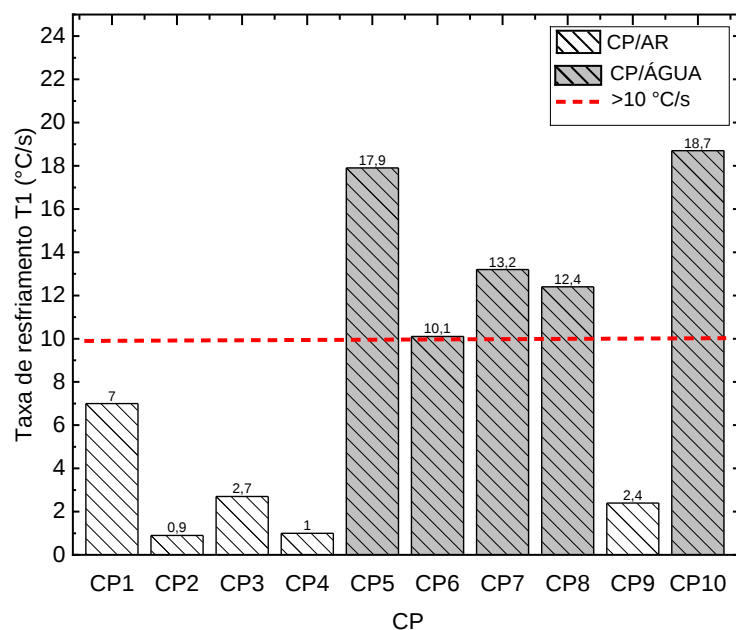
Figura 31: Gráfico de Pareto para nível de significância de 0,15 para a taxa de resfriamento T1.



A influência pode ser atribuída à proximidade do primeiro termopar com o substrato e ao contato indireto com a água, que modulam as taxas de resfriamento para essa condição. Além disso, o fator B (energia de deposição) também exerce influência.

Além disso fazendo uma análise estática clássica, verifica que os CPs fabricados com sistema de resfriamento a água apresentaram os maiores valores de taxa de resfriamento para o T1, conforme mostrado na **Figura 34**.

Figura 32: Taxa de resfriamento T1.



Ao comparar o CP1 (baixa energia de deposição, resfriado ao ar) com o CP5 (baixa energia de deposição, resfriado à água), observa-se que o CP5 (17,9°C/s) apresenta uma taxa de resfriamento aproximadamente 155,7% maior que o CP1 (7°C/s), evidenciando o efeito acelerador da água no resfriamento.

Para avaliar o impacto do resfriamento em condições de alta energia de deposição, comparou-se o CP4 (alta energia de deposição, resfriado ao ar) com o CP8 (alta energia de deposição, resfriado à água). O CP8 (12,4°C/s) apresentou uma taxa de resfriamento aproximadamente 1140% superior à do CP4 (1,0°C/s).

O modelo de regressão completo da taxa de resfriamento T1 sem e com *stepwise* estão disponíveis no **APÊNDICE I e J**

5.3.2. Taxa de resfriamento T2

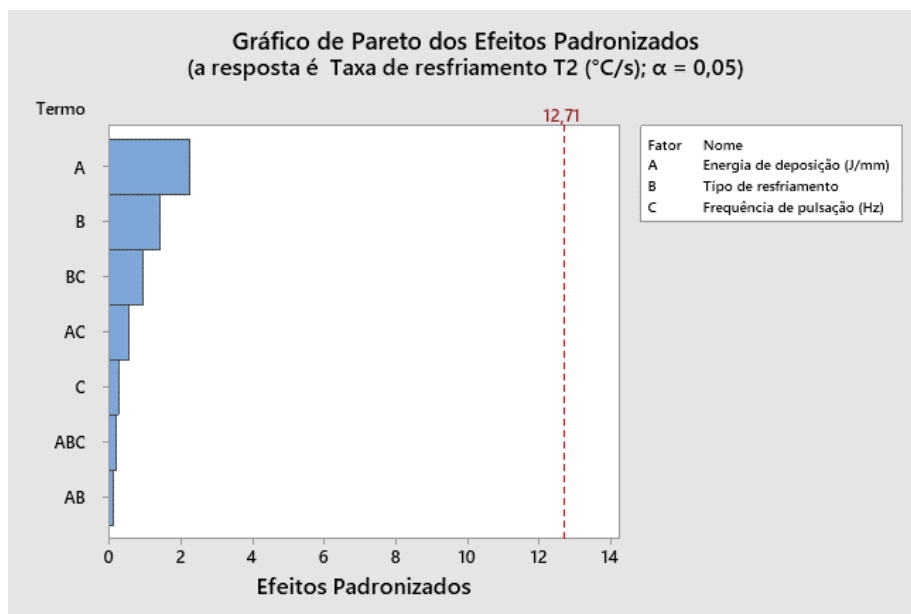
Assim para o T2, com um nível de confiança de 95% também, e com os valores durante a análise de regressão foi obtido como descrito na **Tabela 19**.

Tabela 17: Sumário do Modelo para taxa de resfriamento T2.

S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)
1,02774	89,17%	2,49%	0,00%

Os fatores permaneceram abaixo da linha de referência, como indicado na **Figura 35**. Não houve interseção da linha de referência com qualquer fator ou interação. No entanto, o fator A (energia de deposição) destacou-se como mais influente.

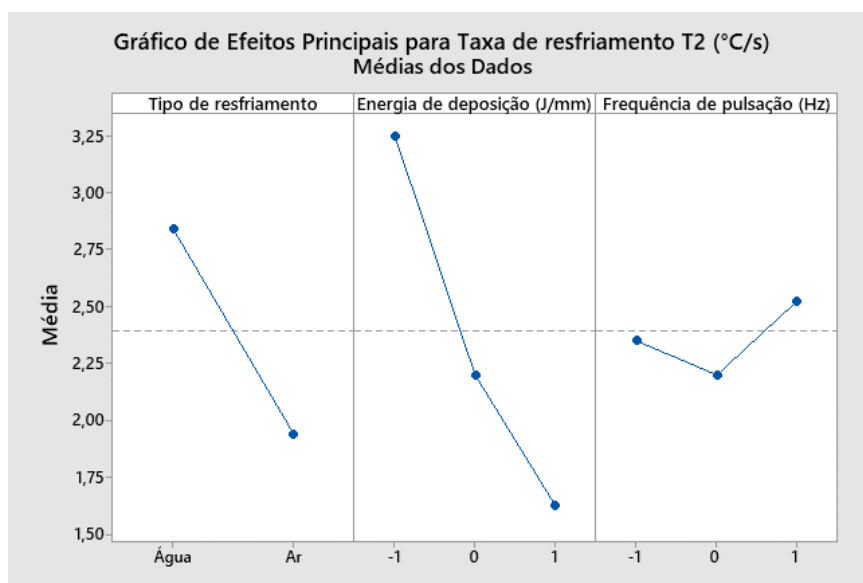
Figura 33: Gráfico de Pareto para taxa de resfriamento T2.



Com base na **Figura 36**, que representa o gráfico individual de efeitos, foi confirmado que, para a taxa de resfriamento T2, os CPs com energia de deposição mais baixa exercem uma maior influência resultando em um tempo de resfriamento mais rápido em comparação com amostras que possuem energia de deposição mais alta.

Essa observação pode ser justificada pelo fato de que, estando em um nível mais alto, as CPs com energia de deposição mais baixa já atingem um tempo de resfriamento mais rápido, enquanto as CPs com energia mais alta demandam um tempo maior para atingir o mesmo nível de resfriamento.

Figura 34: Gráfico dos efeitos para taxa de resfriamento T2.



Além disso, a inclinação da reta do fator C (tipo de resfriamento) também é notável, mostrando uma tendência de que as CPs resfriadas com água apresentam uma maior influência do que as CPs resfriadas ao ar neste termopar.

Isso pode ser atribuído ao contato indireto com água, que ainda exerce efeito nessa altura de deposição, permitindo uma dissipação de calor mais eficiente e resultando em uma maior taxa de resfriamento para as CPs resfriadas com água.

Após a realização de um novo teste, utilizando o método *stepwise*, com um valor de $\alpha = 0,15$, confirmou-se a energia de deposição como o fator mais influente. Assim o novo modelo consegue enquadrar os fatores estudados como mostrado na **Tabela 20**.

Tabela 18: Sumário do Modelo para taxa de resfriamento T2 após *Stepwise Selection*.

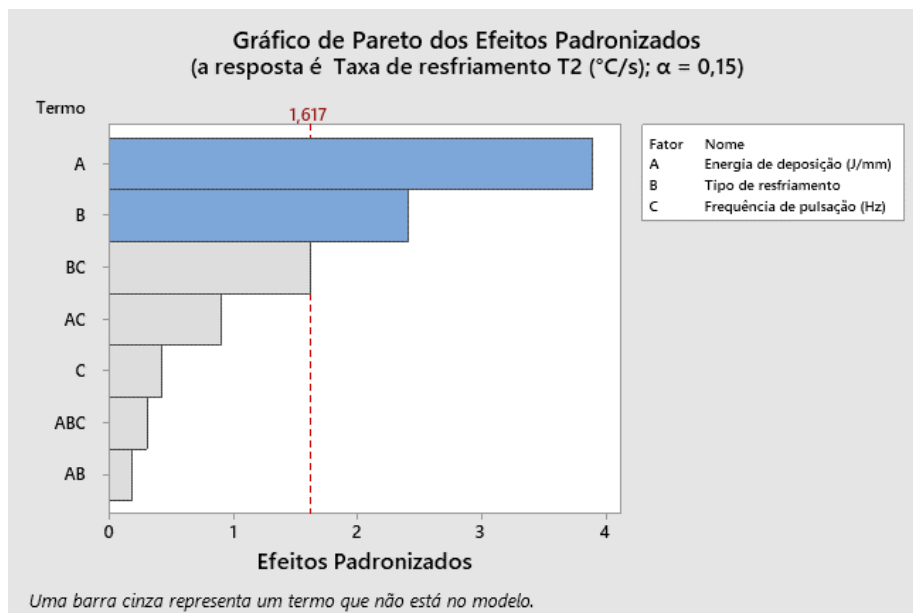
S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)
0,590732	74,94%	67,78%	50,96%

Na **Figura 37**, se confirma que o fator A (energia de deposição) é o fator mais como significativo. Em seguida com o fator B (tipo de resfriamento). Isso reforça a importância do tipo de resfriamento na taxa de resfriamento T2, evidenciando que ele ainda exerce uma influência considerável.

A inclusão do tipo de resfriamento como um fator significativo, mesmo após a análise *stepwise*. Isso ressalta a complexidade do processo de resfriamento, onde o

método utilizado pode impactar substancialmente a eficiência do processo ainda em uma altura considerável.

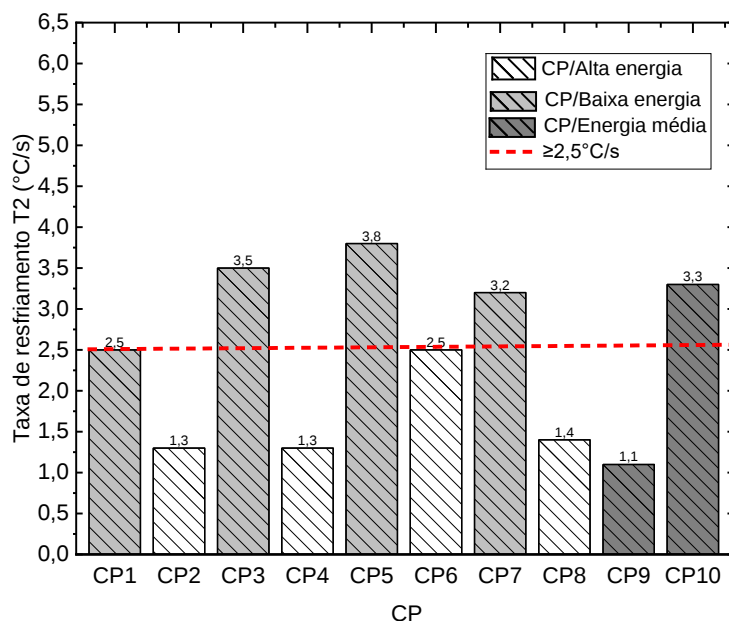
Figura 35: Gráfico de Pareto para nível de significância de 0,15 para a taxa de resfriamento T2.



Isso pode ser atribuído à sua posição mais distante do substrato e ao contato indireto com o jato de água, resultando em uma menor dissipação de calor. Segue-se o fator B (tipo de resfriamento) em termos de influência, seguido pela interação dos fatores B e C (frequência de pulsação e tipo de resfriamento). Esses resultados indicam uma tendência diferente à observada no T1, onde o fator B teve maior efeito, seguido pelo fator A.

Como mostrado na **Figura 38**, os CPs que tiveram maiores taxas de resfriamento no T2, foram as de baixa energia de deposição independentemente do tipo de resfriamento (ar ou água).

Figura 36: Taxa de resfriamento T2.



Analisando os CPs de resfriamento ao ar, o CP3 (baixa energia de deposição) é 169% superior ao CP4 (alta energia de deposição). Em relação aos CPs de baixa energia de deposição ao ar, o CP1 (camada de 23°) e o CP3 (camada de 19°) apresentam uma diferença de 1°C/s, que pode ser atribuída à altura do ciclo térmico coletado.

Como pode ser observado, o tipo de resfriamento no T2 ainda exerce influência sobre os resultados. Embora ambos os CPs (CP4 e CP7) apresentem a mesma energia alta de deposição, o CP4 possui uma taxa de resfriamento de 1,3°C/s, enquanto o CP7 atinge 3,2°C/s, com diferença de 1,9°C/s, fazendo com que o CP7 seja aproximadamente 146,15% superior ao CP4. Além disso, o CP10 (energia média de deposição) apresenta uma das maiores taxas de resfriamento para o T2.

O modelo de regressão completo da taxa de resfriamento T2 sem e com *stepwise* estão disponíveis no **APÊNDICE L e M**.

5.3.3. Taxa de resfriamento T3

Não foi usado o valor do T3 do CP1 devido à falta de dado. Assim, para a análise dos fatores, foram considerados de todas os CPs, exceto esse específico, garantindo a integridade dos dados e a consistência na avaliação estatística.

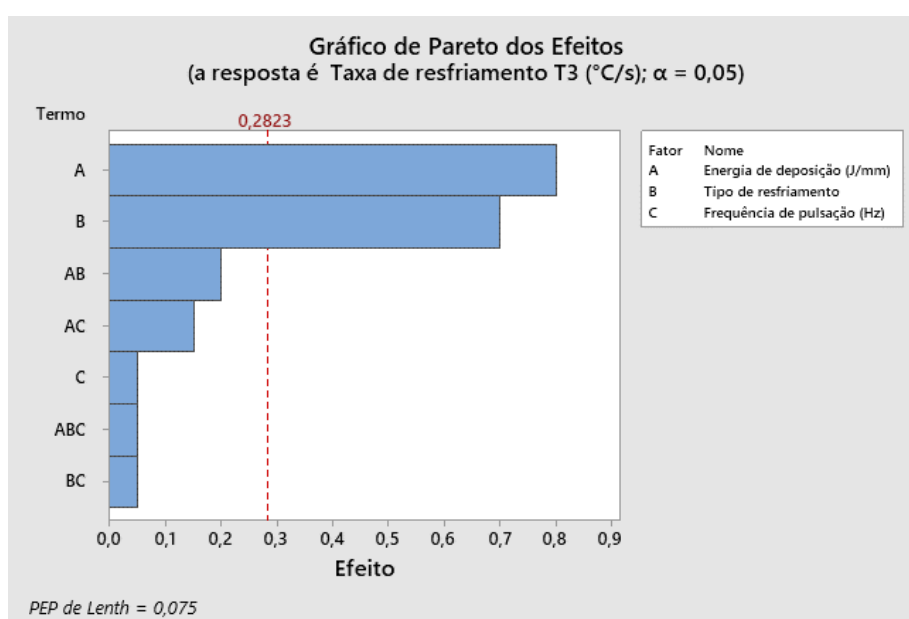
Apesar dessa exclusão, a linha de referência foi alterada em relação aos outros níveis anteriores, mas mantendo a confiabilidade de 95%. Sendo assim o modelo de regressão mostrado na **Tabela 21**.

Tabela 19: Sumário do Modelo para taxa de resfriamento T3.

S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)
*	100%	*	*

Conforme ilustrado na **Figura 39**, os fatores A (energia de deposição) e B (tipo de resfriamento) demonstraram ser significativamente influentes na taxa de resfriamento no T3. Essa constatação sugere uma interação complexa entre o tipo de resfriamento, a energia de deposição e as condições específicas, onde variações mais pronunciadas de temperatura e contato com o ambiente circundante, incluindo a água, podem ocorrer. Esses fatores conseguiram ultrapassar a linha de referência de confiabilidade estipulada, indicando que suas influências são estatisticamente significativas nesse contexto específico.

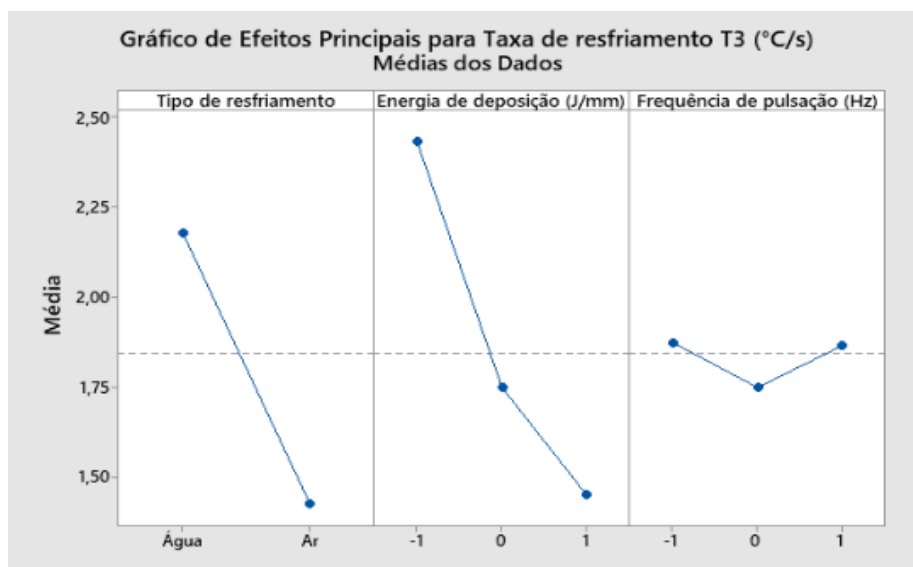
Figura 37: (a) Gráfico de Pareto para taxa de resfriamento T3.



Na **Figura 40** de efeitos individuais, observa-se o comportamento em que energias mais baixas exercem uma influência mais pronunciada na taxa de resfriamento devido à menor quantidade de energia em comparação com energias mais altas.

Além disso, destaca-se que o tipo de resfriamento com água possui uma influência maior do que o resfriamento ao ar, mesmo nesta condição específica. Isso sugere que, mesmo nas camadas finais do processo, o efeito indireto da água colabora para taxas de resfriamento mais rápidas do que aquelas observadas em condições de resfriamento ao ar.

Figura 38: Gráfico dos efeitos para taxa de resfriamento T3.



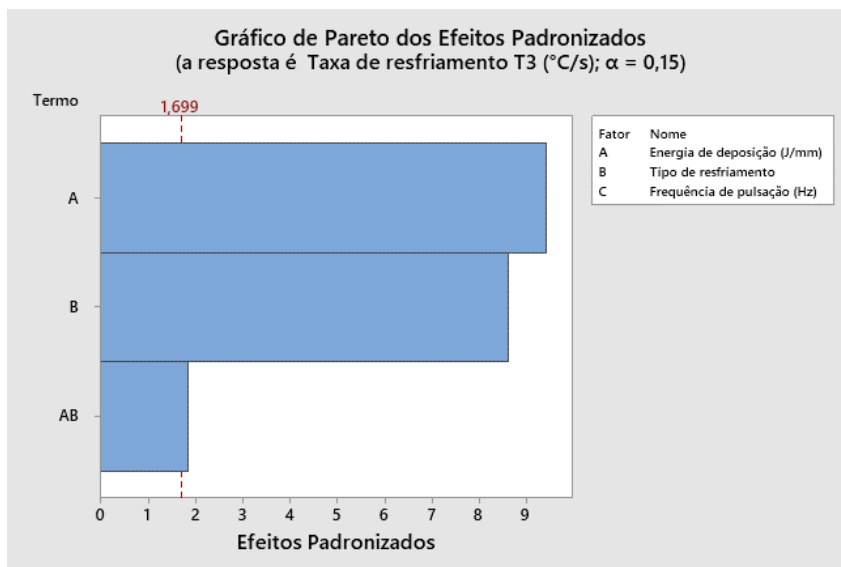
Além da análise convencional, foi conduzida uma análise adicional utilizando o método *stepwise*, como mostrado o modelo na **Tabela 22**, para confirmar os efeitos significativos dos fatores no T3.

Tabela 20: Sumário do Modelo para taxa de resfriamento T3.

S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)
0,113458	97,56%	96,10%	89,93%

Os resultados desta análise destacaram os fatores A (energia de deposição) e B (tipo de resfriamento) como os mais significativos. Além disso, foi observado que as interações entre esses fatores também apresentaram alguma significância, conforme evidenciado na **Figura 41**.

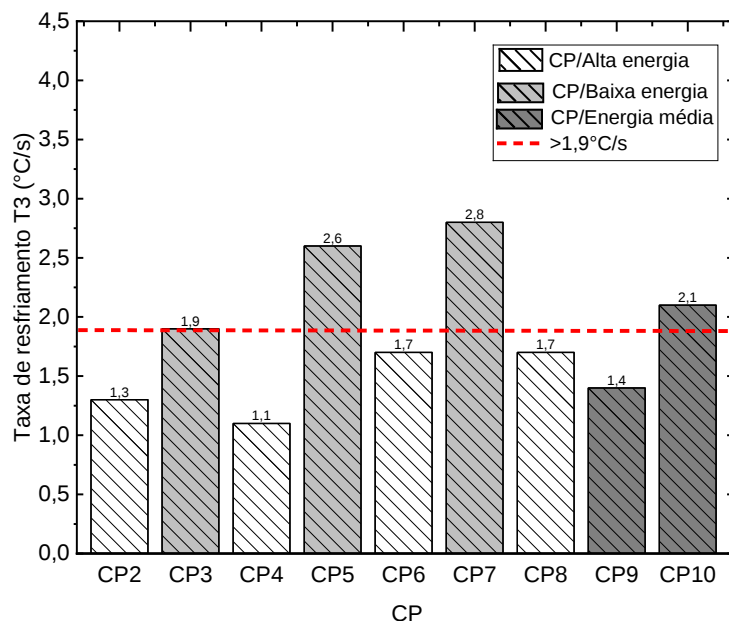
Figura 39: Gráfico de Pareto para nível de significância de 0,15 para a taxa de resfriamento T3.



Essa análise destaca a importância da energia de deposição e do tipo de resfriamento na determinação da taxa de resfriamento em diferentes alturas, onde os termopares foram posicionados. O modelo de regressão completo da taxa de resfriamento T3 sem e com *stepwise* estão disponíveis no **APÊNDICE N e O**

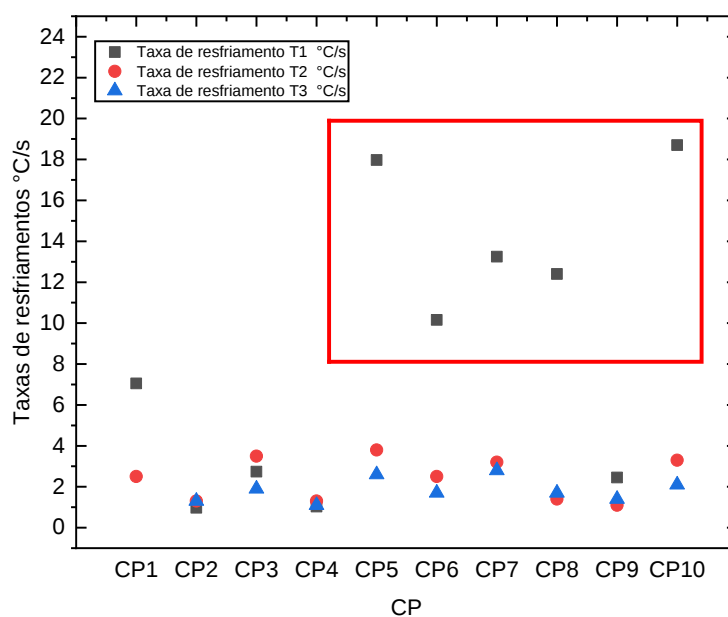
Na **Figura 42**, observa-se que os CPs de baixa energia de deposição apresentaram as maiores taxas de resfriamento em comparação com os demais para o T3. Esse comportamento é observado tanto no resfriamento a ar quanto a água. Além disso, o CP3 (baixa energia de deposição) resfria aproximadamente 46,15% mais rápido que o CP2 (alta energia de deposição) quando ambos são resfriados ao ar. As maiores taxas de resfriamento, no entanto, são observadas nos CPs de baixa energia de deposição a água (CP5 e CP7).

Figura 40: Taxa de resfriamento T3.



Por fim, percebe-se que, nos ciclos térmicos para T1, T2 e T3 (camadas de 6°, 19°, 23° e 28°), os CPs que apresentaram as maiores taxas de resfriamento foram, em sua maioria, os produzidos com o sistema de resfriamento a água no T1 (camada de 6°), conforme mostrado na **Figura 43**. A taxa de resfriamento superou 10°C/s para todos.

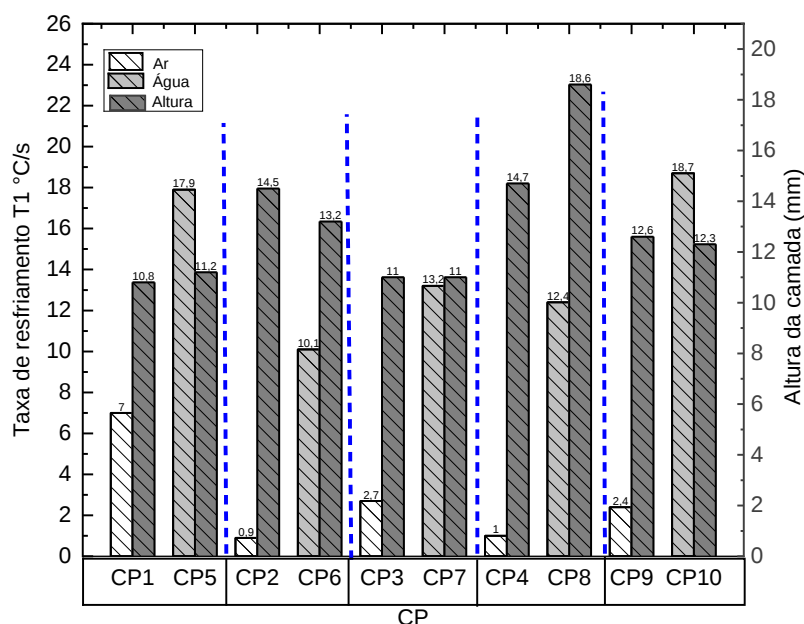
Figura 41: Taxa de resfriamento do T1, T2 e T3.



Ao analisar a taxa de resfriamento no T1 em função da altura da camada, observa-se que, para CPs com energia de deposição similares, a única variável modificada sendo

o tipo de resfriamento, surgem diferenças significativas nas taxas de resfriamento entre os ciclos. Esses resultados, ilustrados na **Figura 44**.

Figura 42: Taxa de resfriamento do T1 em função da altura da 6ª camada.



Embora o CP1 e o CP5 tenham alturas de camada semelhantes, com 10,8 mm e 11,2 mm, respectivamente, a diferença de 3,7% não justifica a grande disparidade na taxa de resfriamento. O CP1, resfriado ao ar, tem uma taxa de 7°C/s, enquanto o CP5, resfriado a água, atinge 17,9°C/s, uma diferença de 155,71%.

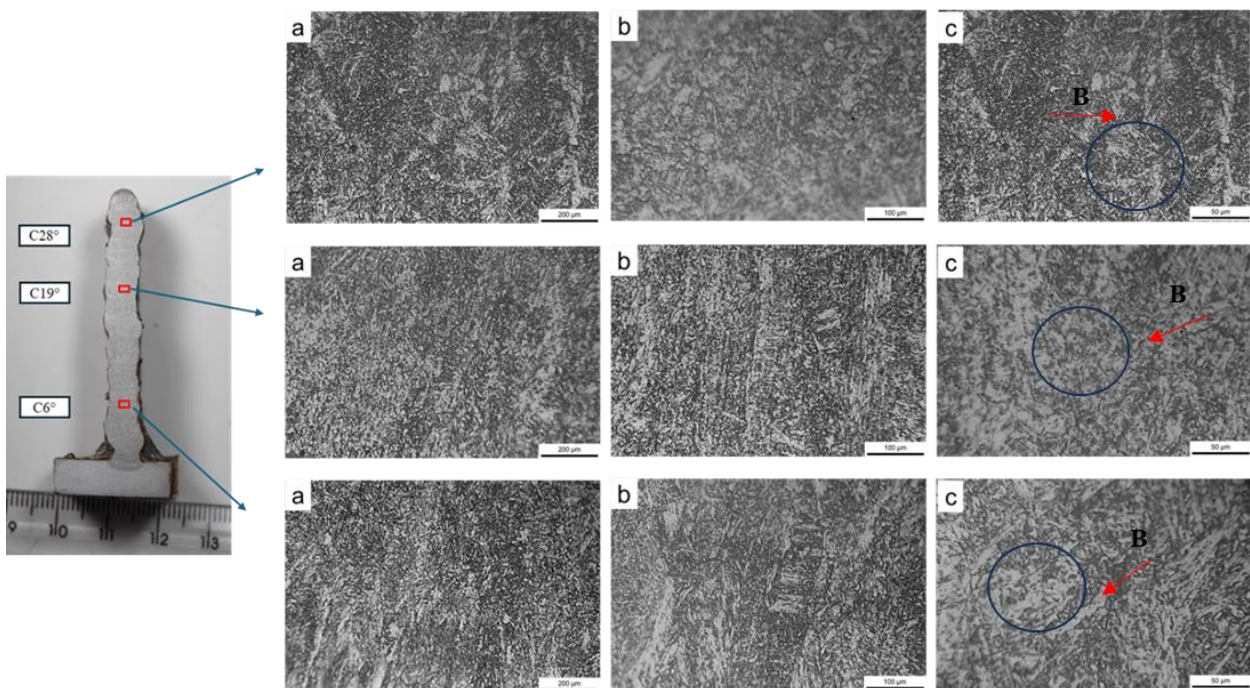
Já o CP4, de alta energia e resfriado ao ar, possui uma altura de 14,7 mm, enquanto o CP8, também de alta energia, tem 18,6 mm, uma diferença de 26,5%. A taxa de resfriamento do CP4 é de 1°C/s, enquanto o CP8, resfriado a água, atinge 12,6°C/s, uma diferença de 1.160%. Assim peças com altura menores e resfriadas a água apresentam maiores taxas de resfriamento, em comparação com peças fabricadas e resfriadas ao ar.

5.4. MICROESTRUTURAS

5.4.1. Microestruturas dos CPs resfriados ao ar

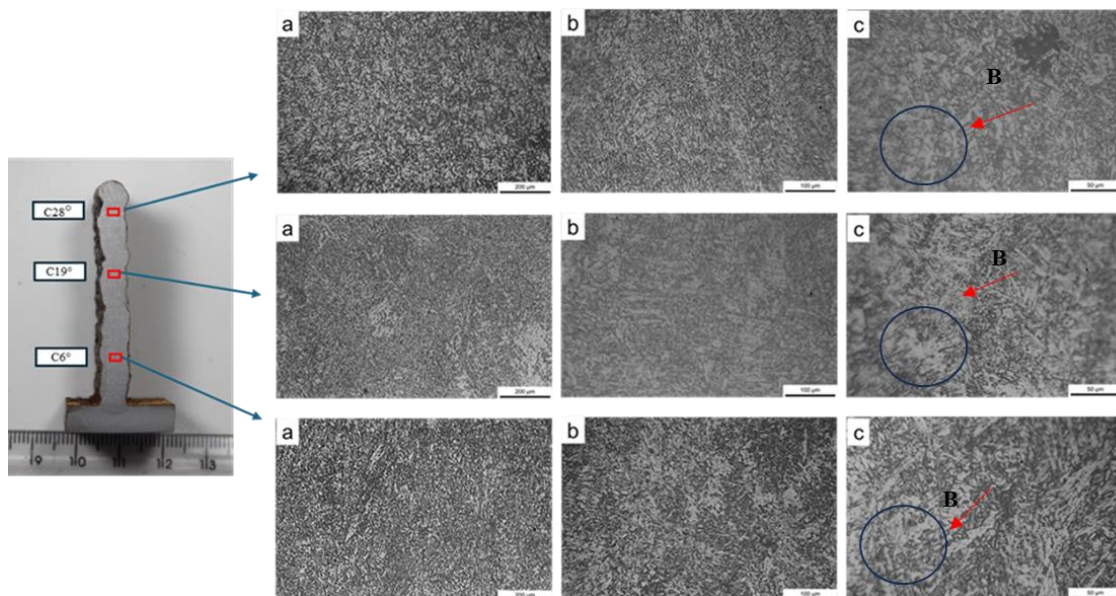
A microestrutura, composta por bainita (região clara) está presente no CP1 (resfriado ao ar), conforme a **Figura 45**. Fabricado com baixa energia de deposição, apresenta alta fração volumétrica desse constituinte em relação a outras possíveis microestruturas (região escura). A 6ª e 23ª camada possuem maior quantidade desse constituinte em comparação com a 28ª, que exibe uma fração mais elevada de bainita.

Figura 43: Micrografia do CP1 com ampliação a) 100x, b) 200x e c) 400x.



No CP4, também resfriado ao ar, **Figura 46**, mas com alta energia de deposição, observa-se também maior quantidade de bainita em todas as camadas (6^a, 19^a e 28^a).

Figura 44: Micrografia do CP4 com ampliação a) 100x, b) 200x e c) 400x.

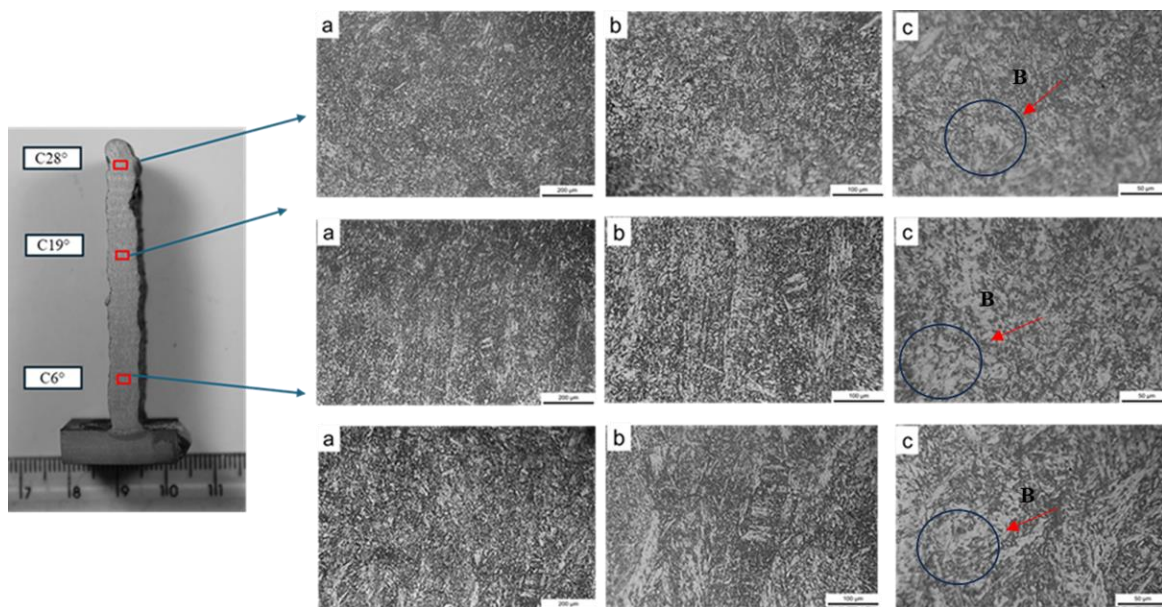


5.4.2. Microestruturas dos CPs resfriados à água

Na **Figura 47**, o CP5 (baixa energia de deposição, resfriado à água) apresenta microestruturas bainita. Observa-se que a 6^a e a 19^a camadas possuem uma maior fração

de bainita (região clara) conforme mostrado na **Figura 47 (b)**. Em uma ampliação que abrange da 6ª até a 28ª camada ao longo da deposição, é possível perceber pouca fração de placas de bainita à medida que é depositada as camadas da 6ª até a 28º.

Figura 45: Micrografia do CP5 com ampliação a) 100x, b) 200x e c) 400x.

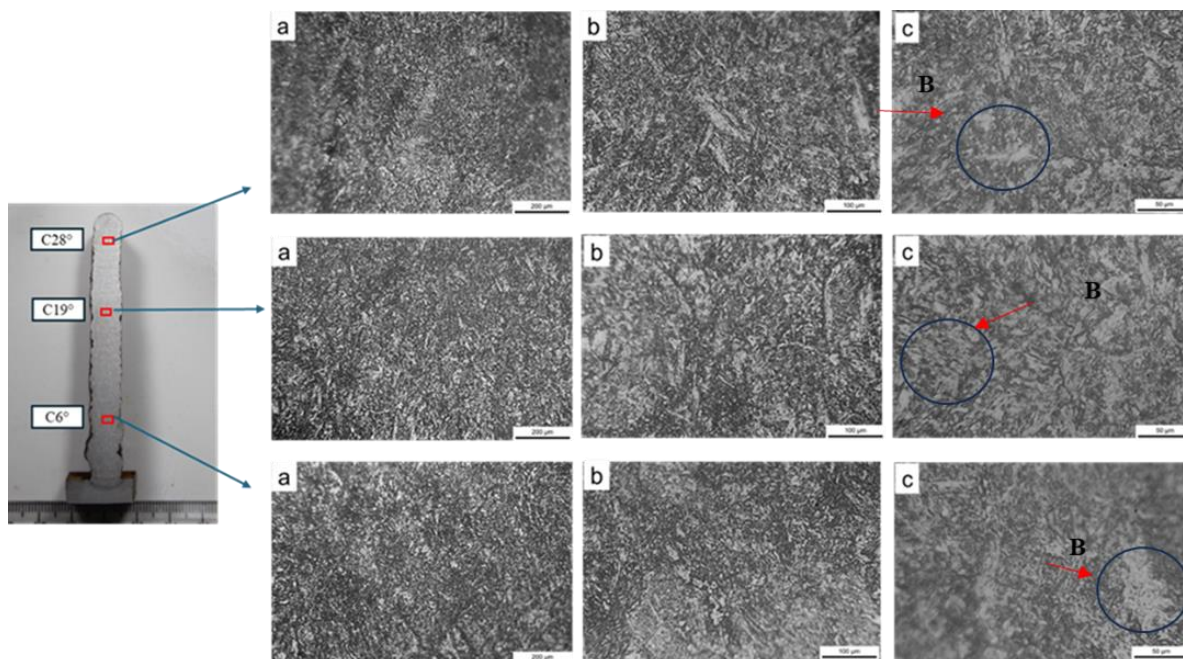


A presença significativa de bainita também foi observada no CP8, resfriado em água, conforme a **Figura 48**, com alta energia de deposição. As camadas 6ª e 19ª apresentam as maiores frações desse constituinte, enquanto a 28ª exibe quantidades menores. A 19ª camada, além de conter mais bainita, apresenta estrutura mais definida.

A microestrutura dos corpos de prova resfriados em água apresenta maior fração volumétrica de ferrita bainita em comparação com os resfriados ao ar.

Os CP1 e CP4, resfriados ao ar, exibiram características semelhantes às dos CP2, CP3 e CP10. Da mesma forma, os CP5 e CP8, resfriados em água, apresentaram microestruturas similares às dos CP6, CP7 e CP9. As microestruturas completas dos CPs podem ser encontradas no **APÊNDICE P**.

Figura 46: Micrografia do CP8 com ampliação a) 100x, b) 200x e c) 400x



5.5. ENERGIA ABSORVIDA (J)

Os resultados do ensaio de Charpy para as 10 amostras, cada uma com 9 corpos de prova, a estratégia implementada de análise envolveu a seleção dos dados de energia de impacto de cada corpo de prova com base na similaridade dos valores obtidos.

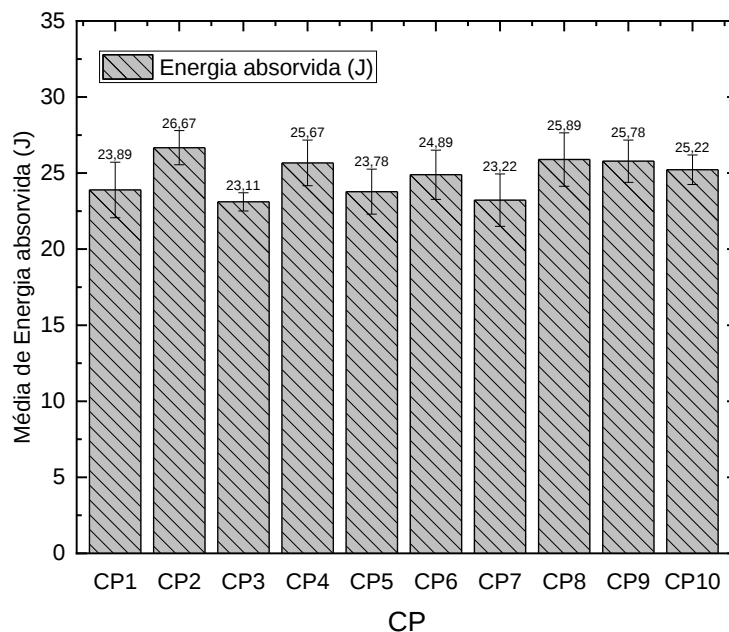
Isso foi realizado através da divisão dos valores de energia de cada corpo de prova em três subgrupos semelhantes, agrupando-os com base em sua proximidade. Posteriormente, calculou-se as médias e os desvios padrão para cada subgrupo em cada amostra. Os resultados dessa análise estão apresentados na **Tabela 23**.

Tabela 21: Dados coletados da energia de impacto por amostra e subgrupo.

CP	Subgrupos	Ensaio			Média	Desvio	Média geral	Desvio geral
CP1	CP1.1	22	22	22	22,0	±0,00	23,89	±1,83
	CP1.2	23	24	24	23,7	±0,58		
	CP1.3	25	26	27	26,0	±1,00		
CP2	CP2.1	25	26	26	25,7	±0,58	26,67	±1,12
	CP2.2	26	27	27	26,7	±0,58		
	CP2.3	27	27	29	27,7	±1,15		
CP3	CP3.1	22	23	23	22,7	±0,58	23,11	±0,60
	CP3.2	23	23	23	23,0	±0,00		
	CP3.3	23	24	24	23,7	±0,58		
CP4	CP4.1	23	24	25	24,0	±1,00	25,67	±1,50
	CP4.2	25	26	27	26,0	±1,00		
	CP4.3	27	27	27	27,0	±0,00		
CP5	CP5.1	21	23	23	22,3	±1,15	23,78	±1,48
	CP5.2	23	24	24	23,7	±0,58		
	CP5.3	25	25	26	25,3	±0,58		
CP6	CP6.1	22	23	24	23,0	±1,00	24,89	±1,62
	CP6.2	25	25	26	25,3	±0,58		
	CP6.3	26	26	27	26,3	±0,58		
CP7	CP7.1	20	21	23	21,3	±1,53	23,22	±1,72
	CP7.2	23	24	24	23,7	±0,58		
	CP7.3	24	25	25	24,7	±0,58		
CP8	CP8.1	23	24	25	24,0	±1,00	25,89	±1,76
	CP8.2	25	26	27	26,0	±1,00		
	CP8.3	27	28	28	27,7	±0,58		
CP9	CP9.1	24	24	25	24	±0,58	25,78	±1,39
	CP9.2	25	26	26	26	±0,58		
	CP9.3	27	27	28	27	±0,58		
CP10	CP10.1	24	24	25	24	±0,58	25,22	±0,97
	CP10.2	25	25	25	25	±0,00		
	CP10.3	26	26	27	26	±0,58		

Foi realizada assim uma média dos subgrupos para representar cada amostra, como mostrado na **Figura 49**. Essa metodologia possibilitou uma investigação detalhada da distribuição da energia absorvida pelos corpos de prova, fornecendo informações sobre seu comportamento diante ao impacto.

Figura 47: Média total da energia absorvida os CPs.



No **APÊNDICE O** estão os testes de normalidade de todos os dados coletados, sendo normais para posteriores análises.

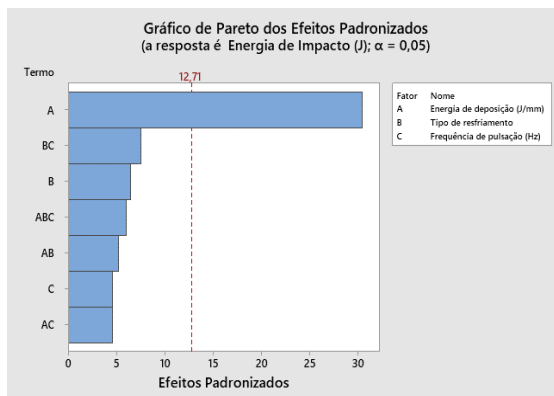
Assim, realizou-se uma análise de variância com nível de significância $\alpha = 0,05$ e nível de confiança de 95%. Além disso, a análise de regressão indicou um excelente ajuste do modelo aos dados descrito na **Tabela 24**.

Tabela 22: Sumário do modelo para energia de impacto.

S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)
0,107517	99,92%	99,27%	73,55%

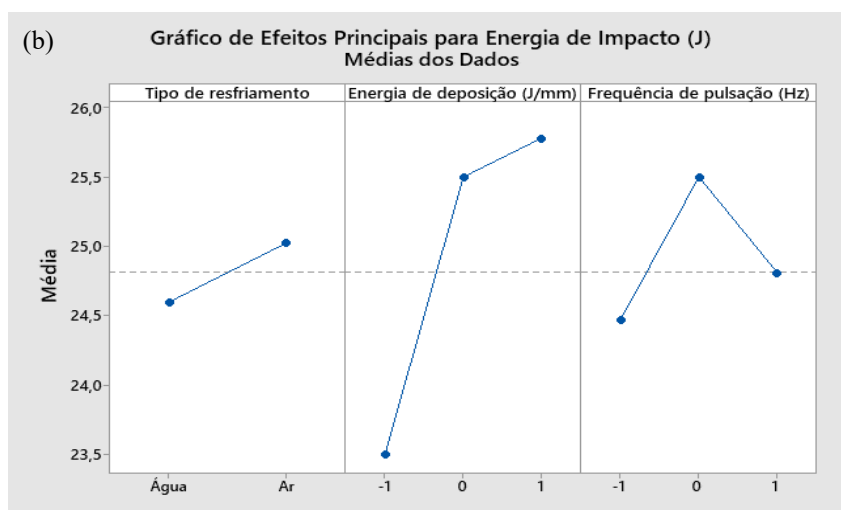
Os resultados indicaram que o fator A (energia de deposição) foi o único fator significativamente influente, ultrapassando a linha de referência de 12,7 de significância em relação aos demais fatores e interações. como mostrado na **Figura 50** com valor de $P = 0,041 < 0,05$ em relação aos demais fatores.

Figura 48: (a) Gráfico de Pareto para a energia de impacto de



A energia de deposição apresentou a maior significância, sendo comprovado pela **Figura 51** que mostra os efeitos principais individuais. que mostra a inclinação da reta saindo de amostras com valores médios altos de energia de impacto indo para valores médios mais baixos, pode -se afirmar que o fator correspondente está associado a um aumento na tenacidade ao impacto. Essas a variação desse fator resulta em um aumento na energia absorvida pelos corpos de prova durante o teste de impacto de Charpy.

Figura 49: Gráfico dos efeitos para a energia de impacto de Charpy.



Essa tendência indica que o fator analisado tem um efeito sobre a tenacidade ao impacto. Isso pode significar que aumentar a energia de deposição leva a uma boa resistência do material à fratura sob impacto, sugerindo que o material se torna mais resistente a impactos conforme a energia de deposição aumenta.

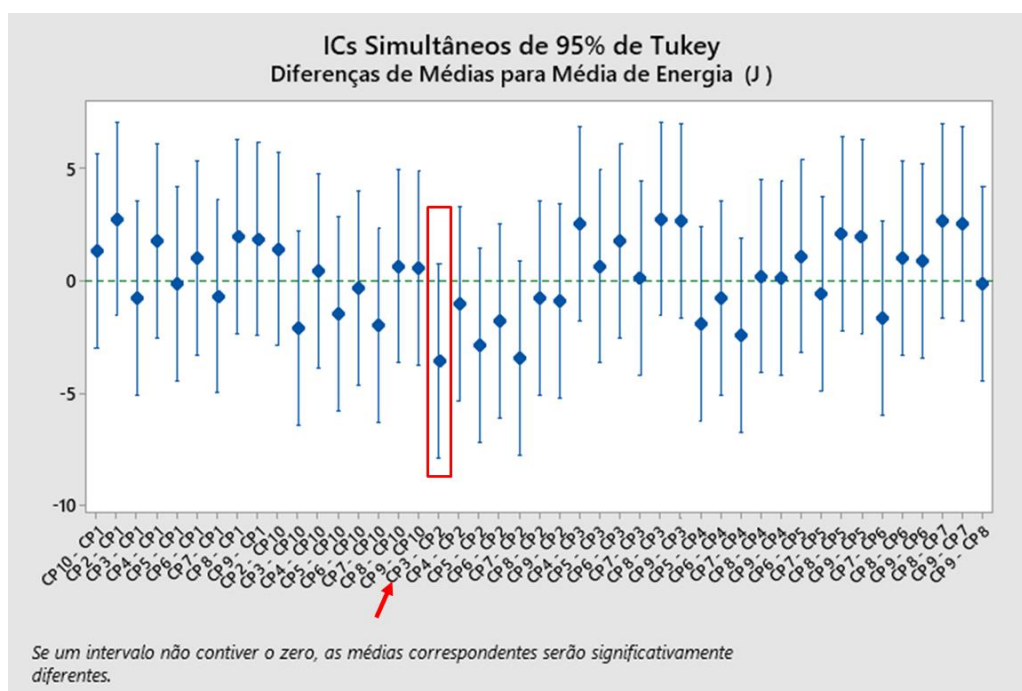
Foi realizando o teste de Tukey, realizado, comparando o menor e maior valor, identificou que todos os grupos não são significativamente diferentes.

No entanto, a diferença entre o menor e o maior valor não é considerada significativa, pois eles pertencem ao mesmo agrupamento, como descrito na **Tabela 25** e **Figura 52**. Por exemplo, o CP2 (26,67 J) apresenta aproximadamente 15,39% mais energia absorvida do que o CP3 (23,11 J), com uma diferença de 3,56 J.

Tabela 23: Agrupamento usando Método de Tukey e 95% de confiança com as médias geral por CP.

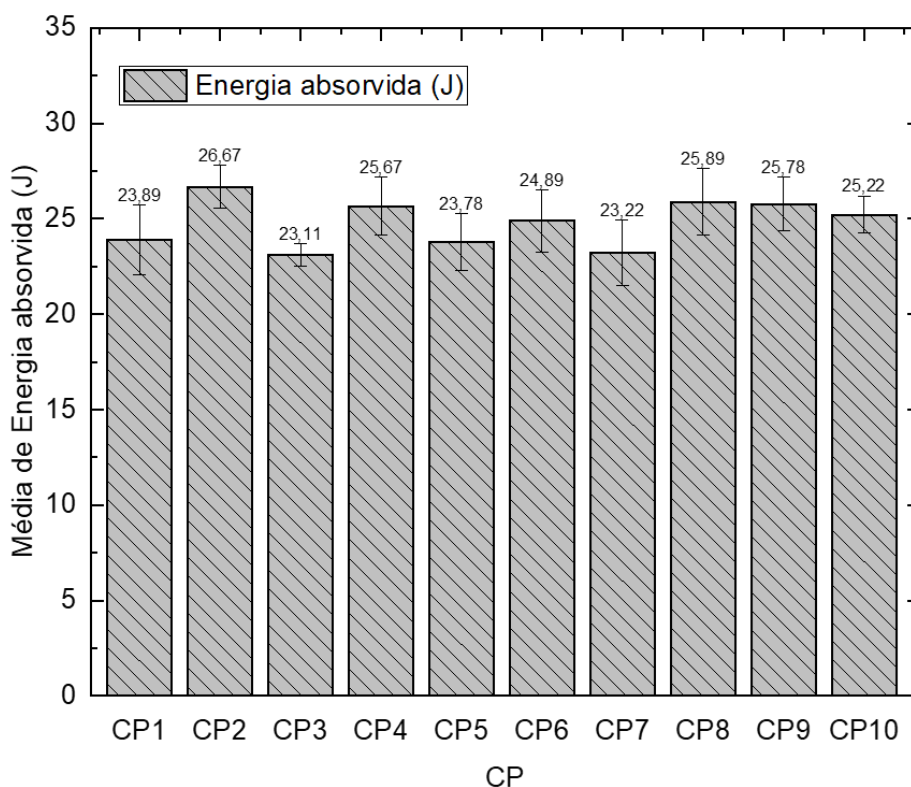
Subgrupo	N	Média	Agrupamento
CP2	3	26,667	A
CP8	3	25,89	A
CP9	3	25,778	A
CP4	3	25,667	A
CP10	3	25,222	A
CP6	3	24,889	A
CP1	3	23,89	A
CP5	3	23,778	A
CP7	3	23,222	A
CP3	3	23,111	A

Figura 50: Diferença de médias para usando Teste Tukey CP3-CP2.



Realizando uma análise estatística clássica, pode-se verificar na **Figura 54** que a maioria dos CP's com os maiores valores de energia absorvida, localizados acima de 24,5 J, correspondem às amostras de alta energia de deposição. Esse padrão indica uma possível relação entre a energia de deposição e a capacidade de absorção de energia dos CPs, sugerindo que parâmetros elevados nesse aspecto podem contribuir para um melhor desempenho mecânico.

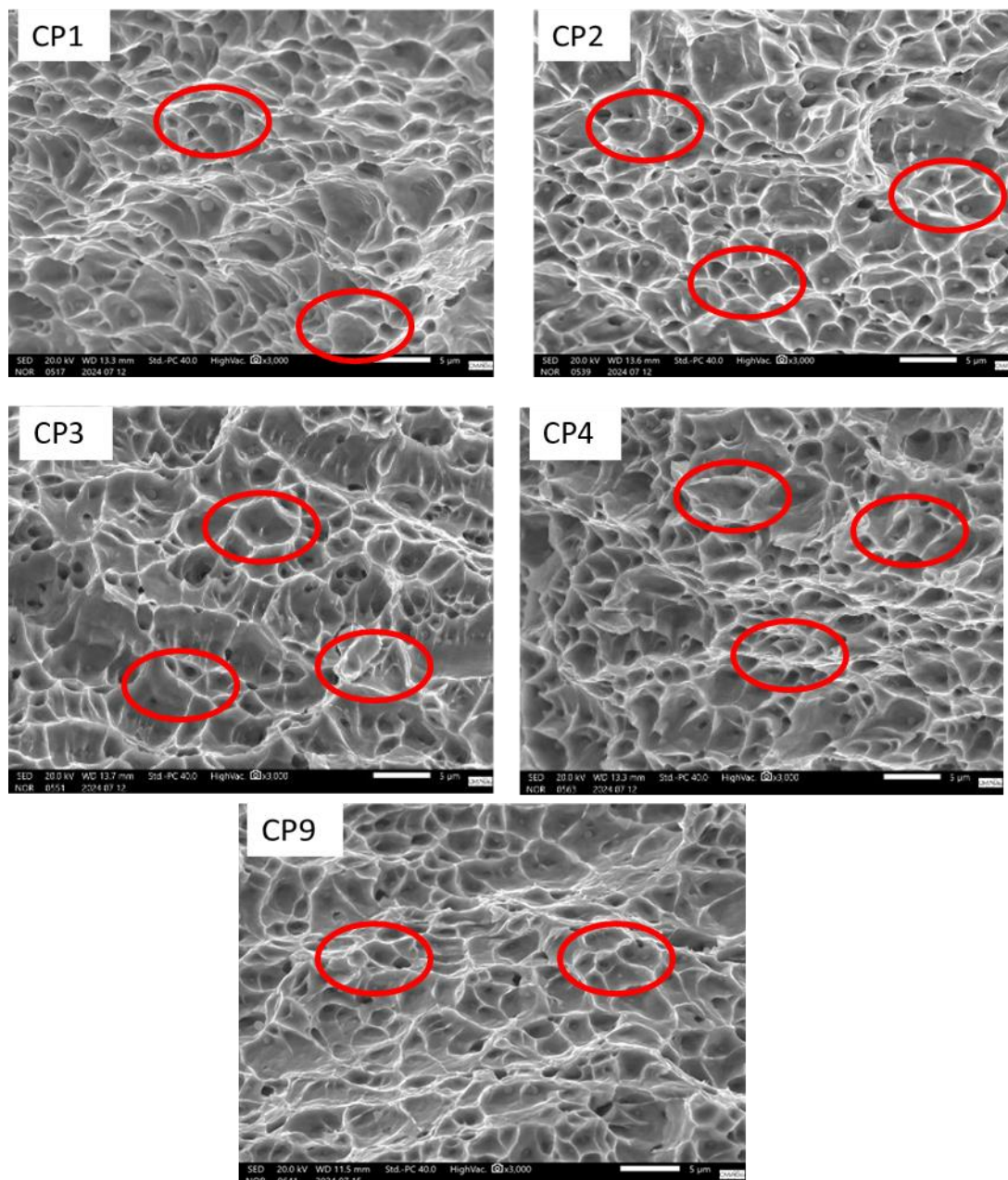
Figura 51: Médias de Energia absorvida no ensaio de Charpy V para os CPS.



5.6. FRACTOGRAFIAS

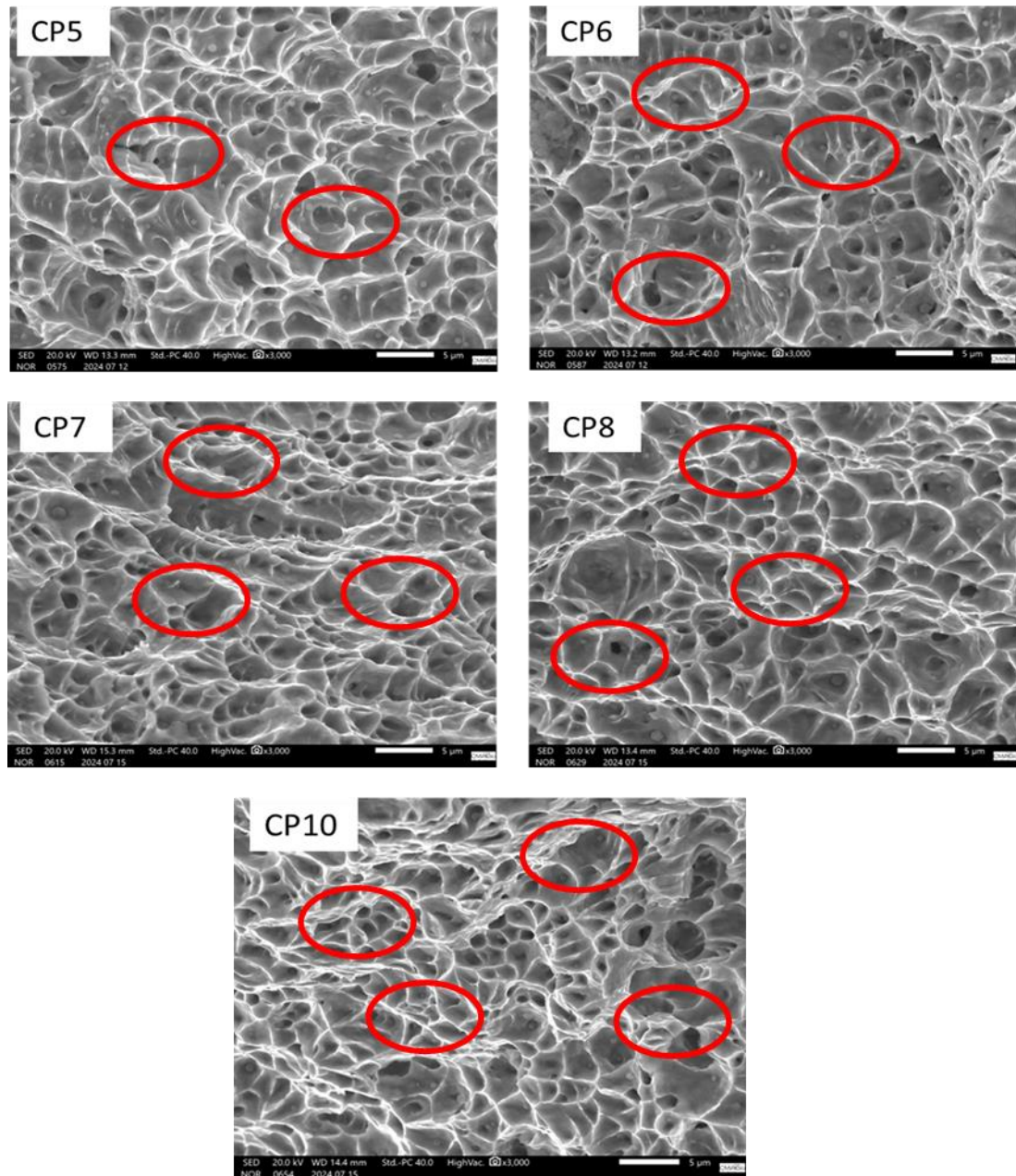
A **Figura 55** mostra o comportamento dos CPs após o ensaio de impacto, apresentando que os corpos de prova com baixa, alta e média energia de deposição, resfriados em água, possuem características de fratura dúctil, identificadas pela presença de *dimples*.

Figura 52: Análise fractográfica da superfície de fratura do corpo de provas resfriado ao ar para o ensaio de Charpy V para o CP1, CP2, CP3, CP4 e CP9.



Esses *dimples* representam cavidades ou microvincos na superfície de fratura, típicos de um mecanismo de fratura dúctil. Sua presença indica que o material absorveu energia antes da ruptura, sofrendo deformação plástica significativa além disso, os CPs resfriados em água, tanto de alta quanto de baixa energia de deposição, também apresentam comportamento de fratura dúctil, conforme ilustrado na **Figura 56**.

Figura 53: Análise fractográfica da superfície de fratura do corpo de prova resfriado a água para o ensaio de Charpy V para o CP5, CP6, CP7, CP8 e CP10.



5.7. MICRODUREZAS VICKERS HV0,5

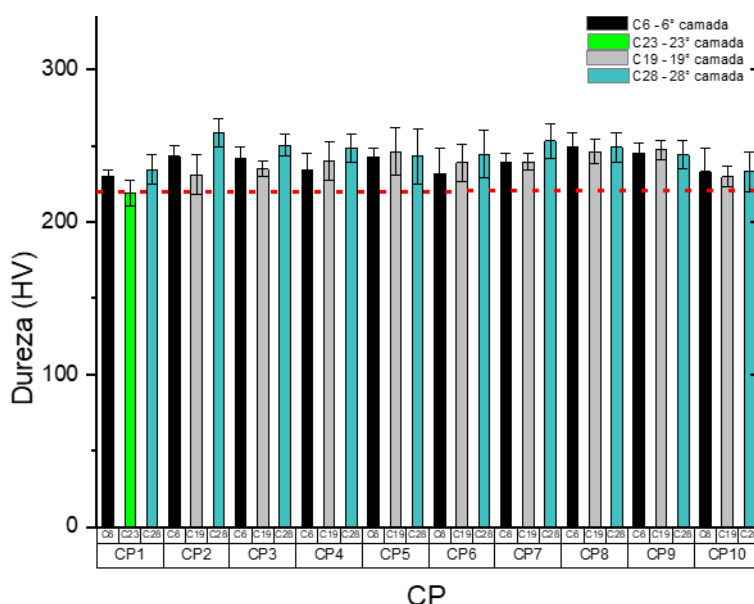
Através do ensaio de microdureza Vickers, foi possível realizar uma análise detalhada das camadas ao longo da deposição para todos os parâmetros estudados. As camadas analisadas foram as de 6°, 23° e 28° de cada amostra coletando 5 pontos de dureza cada, com uma força de 0,5 kgf afim de apresentar se houve uma diferença significativa. Os resultados obtidos no ensaio estão apresentados na **Tabela 26**.

Tabela 24: Dados coletados de microdureza.

CP	Camada	P1	P2	P3	P4	P5	Média	Desvio Padrão
CP1	6°	231,7	233,5	224,5	228,1	233,5	230,26	± 3,90
	19°	217,8	233,5	239,2	243,1	237,3	299,70	± 5,04
	28°	217,8	233,5	239,2	243,1	237,3	237,3	± 9,79
CP2	6°	253,2	239,2	247,1	237,3	239,2	243,2	± 6,75
	19°	221,2	212,8	243,1	239,2	237,3	230,72	± 13,04
	28°	266,3	251,1	268,5	259,6	247,1	258,52	± 9,31
CP3	6°	233,5	237,3	237,3	249,9	249,2	241,64	± 7,57
	19°	241,1	237,3	228,1	235,4	231,7	234,72	± 5,02
	28°	253,2	257,5	241,1	255,3	245,1	250,44	± 7,01
CP4	6°	228,1	222,8	229,9	241,1	249,1	234,02	± 10,67
	19°	261,8	237,3	231,7	233,5	233,5	239,16	± 12,60
	28°	235,4	257,5	253,2	243,1	253,2	248,88	± 9,03
CP5	6°	251,1	243,1	237,3	245,1	235,4	242,4	± 6,29
	19°	237,3	229,9	270,8	249,1	243,1	246,84	± 15,56
	28°	219,4	249,9	264,0	228,1	253,2	242,92	± 18,52
CP6	6°	239,2	235,4	243,1	201,9	239,2	231,76	± 16,91
	19°	228,1	239,2	228,1	241,1	257,5	238,8	± 12,08
	28°	270,8	237,3	235,4	233,5	245,1	244,42	± 15,39
CP7	6°	239,2	247,1	231,7	241,1	237,3	239,76	± 5,61
	19°	243,1	241,1	231,7	235,4	245,1	239,72	± 5,57
	28°	268,5	255,3	257,5	241,1	243,1	253,1	± 11,24
CP8	6°	243,1	257,5	259,6	237,3	247,1	248,92	± 9,49
	19°	247,1	235,4	245,1	257,5	245,1	245,04	± 7,86
	28°	243,1	257,5	259,6	237,3	247,1	248,92	± 9,49
CP9	6°	253,2	243,1	239,2	239,2	251,1	245,76	± 6,62
	19°	247,1	253,2	237,3	245,1	253,2	247,18	± 6,60
	28°	243,1	259,6	235,4	239,2	243,1	244,08	± 9,25
CP10	6°	247,1	251,1	229,9	218	217,7	232,96	± 15,77
	19°	235,4	222,8	237,3	229,9	222,8	229,64	± 6,81
	28°	228,1	257,1	231,7	255,3	239,2	242,92	± 13,34

Nota-se na **Figura 57** os resultados dos valores médios de dureza Vickers (HV0,5), onde grande parte dos CPs apresentaram valores de dureza superiores a 230 HV0,5. O valor mínimo de dureza registrado foi 218,56 HV0,5 (19° camada do CP1), enquanto o valor máximo foi 258,52 HV0,5 (28° camada do CP2), representando uma diferença de 18,29%.

Figura 54: Valores médios de microdureza para os CPs.



5.7.1. Análise de Microdureza Vickers HV0,5 das camadas por CP

Para a análise estatística, primeiramente foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) para todos os dados, disponível no **APÊNDICE R**.

A fim de identificar se as médias dos valores de microdureza nas diferentes camadas, para cada CP, apresentam diferenças significativas, foi realizada uma análise de variância (ANOVA). O índice de confiança foi estabelecido em 95% e, para avaliar as diferenças entre as camadas, foi aplicado o teste de Tukey.

Com isso, foi possível determinar se as variações nas camadas influenciam significativamente os valores de microdureza, proporcionando uma análise detalhada sobre a dados obtidos. Observa-se que houve alteração significativa de dureza na comparação entre as médias de microdureza das camadas do CP2, CP3 e CP7. As demais

análises dos CP estão detalhadas no **APÊNDICE S**, onde é apresentado o Teste de Tukey para as comparações entre as camadas.

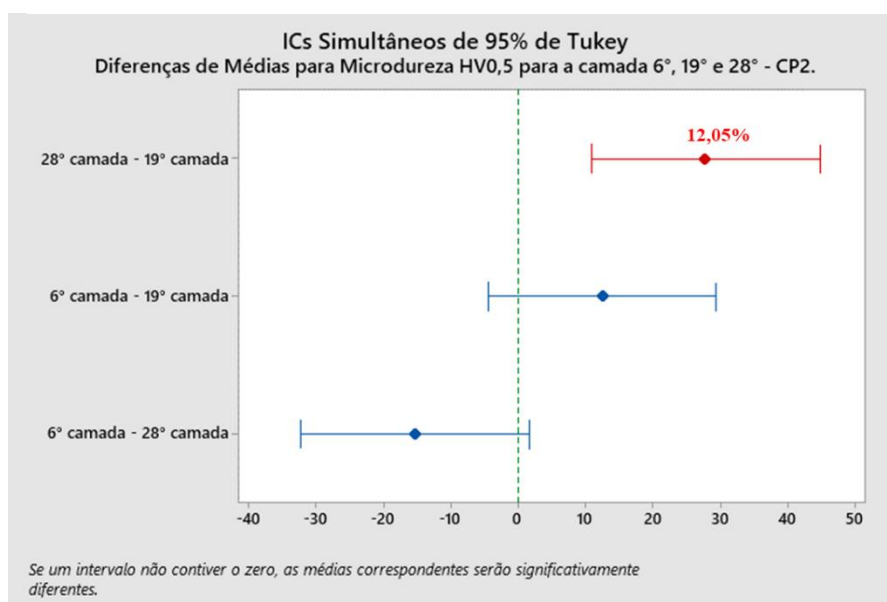
Ao analisar a média de microdureza do CP2, verificou uma diferença também significativa observada entre as camadas de 28° e 19°, com uma diferença média de 27,80 e valor-p de 0,002 ($p < 0,05$), de acordo com a **Tabela 27**.

Tabela 25: Testes Simultâneos de Tukey para as Diferenças de Médias para o CP2.

Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95%	Valor-T	Valor-P Ajustado
28° camada - 19° camada	27,80	6,35	(10,88; 44,72)	4,38	0,002
6° camada - 19° camada	12,48	6,35	(-4,44; 29,40)	1,97	0,163
6° camada - 28° camada	-15,32	6,35	(-32,24; 1,60)	-2,41	0,078

A 28° camada é aproximadamente 13,47% maior do que a 19° para o CP2. A diferença de microdureza de 12,05% entre elas. A 28° tem uma altura de 67,5 mm, enquanto a 19° tem 46,1 mm, resultando em uma diferença de 21,4 mm. Através da **Figura 58** é confirma que a grupo de médias das camadas 28° e 19° foram os únicos aonde o intervalo de confiança não conteve o zero.

Figura 55: Teste de Tukey. diferença de médias das camadas do CP2.



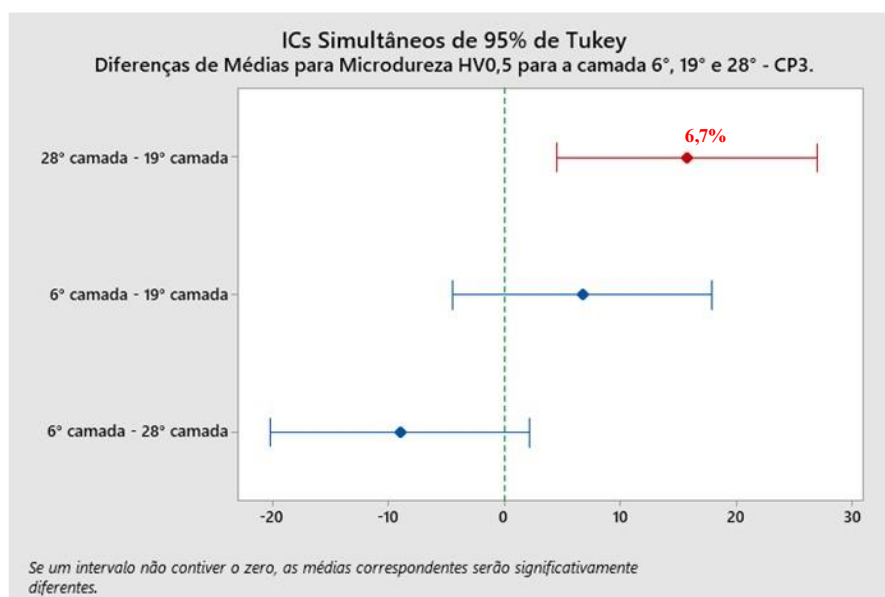
Além disso, o CP3 (baixa energia de deposição, alta frequência de pulsação e resfriada ao ar) apresentou uma diferença significativa entre as camadas 28° e 19°. A diferença média entre essas camadas foi de 15,72, com um valor-p de 0,007, indicando serem diferentes ($p > 0,05$) como na **Tabela 28**.

Tabela 26: Testes Simultâneos de Tukey para as Diferenças de Médias para o CP3.

Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95%	Valor-T	Valor-P Ajustado
28° camada - 19° camada	15,72	4,19	(4,55; 26,89)	3,75	0,007
6° camada - 19° camada	6,72	4,19	(-4,45; 17,89)	1,60	0,282
6° camada - 28° camada	-9,00	4,19	(-20,17; 2,17)	-2,15	0,122

A 28° camada tem uma microdureza 6,7% maior que a 19° camada. A altura de deposição da 28° é 51 mm e da 19° é 34,5 mm, resultando em uma diferença de 16,5 mm. Nota-se que a média da dureza da 6° camada é 3,59% menor do que a média da 28° camada à medida que 22 camadas são depositadas, mas mesmo assim não são diferentes, como mostra a **Figura 59**.

Figura 56: Teste de Tukey de diferença de médias das camadas do CP3.



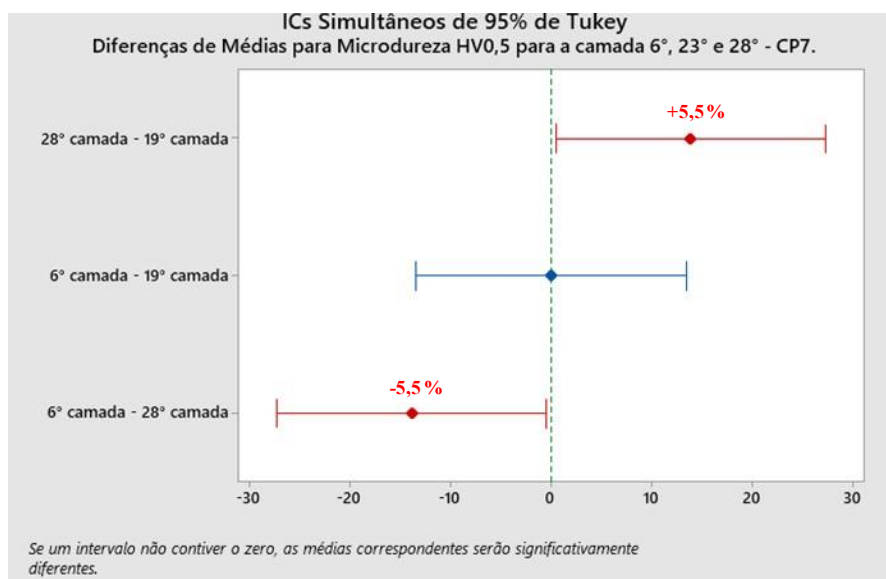
Por fim, o CP7 (baixa energia de deposição, alta frequência de pulsação e resfriada a água) foi o que teve mais grupos de camadas significativas diferentes com valor de $p > 0,05$, segundo a **Tabela 29**, as camadas 6° e 28° tiveram uma diferença de -13,82, em termos percentuais, a 6° camada tem uma microdureza aproximadamente 5,5% menor do que a 28° camada, enquanto a 28° camada apresenta uma microdureza aproximadamente 5,8% maior do que a 19° camada.

Tabela 27: Testes Simultâneos de Tukey para as diferenças de médias para o CP7.

Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95%	Valor-T	Valor-P Ajustado
28° camada - 19° camada	13,82	5,02	(0,44; 27,20)	2,75	0,043
6° camada - 19° camada	0,00	5,02	(-13,38; 13,38)	0,00	1,000
6° camada - 28° camada	-13,82	5,02	(-27,20; 0,44)	-2,75	0,043

Em relação à altura é possível na **Figura 60** observar os grupos de médias que são significativamente diferentes.

Figura 57: Teste de Tukey de diferença de médias das camadas do CP7.



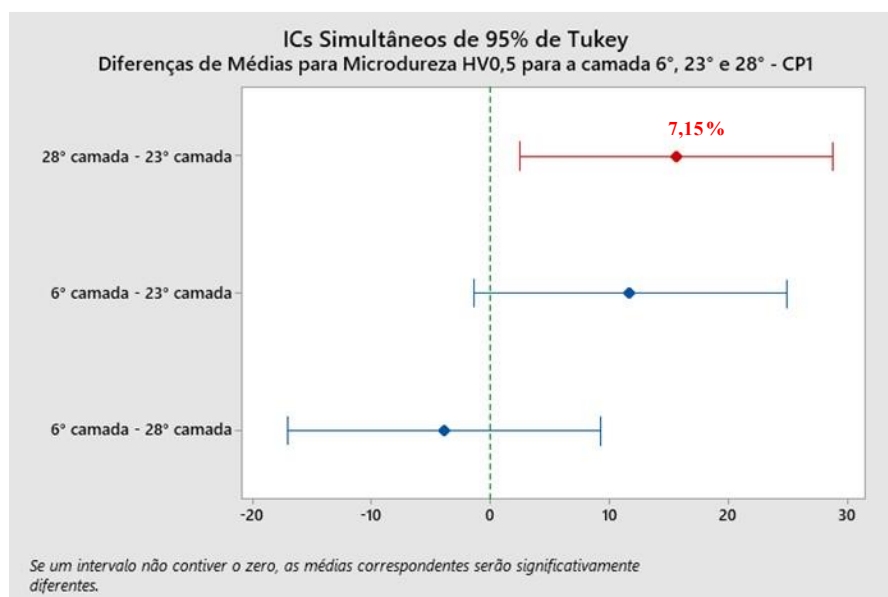
Quando realiza uma análise relacionando o ciclo térmico do CP1 para a taxa de resfriamento T2 para a camada 23° em relação a 6° e 28° camada, existe diferença na média de microdureza entre elas. Segundo os dados apresentados na **Tabela 30**, no CP1 (energia de deposição baixa, alta frequência de pulsação e resfriada ao ar) houve uma diferença significativa entre as camadas de 28° e 23°, com uma diferença média de 15,62 e valor-p de 0,020, indicando significância ($p > 0,05$) entre esses grupos de médias.

Tabela 28: Testes Simultâneos de Tukey para as diferenças de médias para o CP1.

Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95%	Valor-T	Valor-P Ajustado
28° camada - 23° camada	15,62	4,92	(2,49; 28,75)	3,17	0,020
6° camada - 23° camada	11,70	4,92	(-1,43; 24,83)	2,38	0,083
6° camada - 28° camada	-3,92	4,92	(-17,05; 9,21)	-0,80	0,712

Nota-se que a microdureza da 28° camada é 7,15 % maior que a da camada da 23°. A camada 28° tem 51 mm de altura, enquanto a camada de 23° tem 41 mm, o que representa um aumento de 24,39% na altura. A **Figura 61** ilustra que, o intervalo de confiança para a diferença entre esse grupo, reforçando a significância dessa diferença.

Figura 58: Teste de Tukey. Diferença de médias das camadas do CP1.

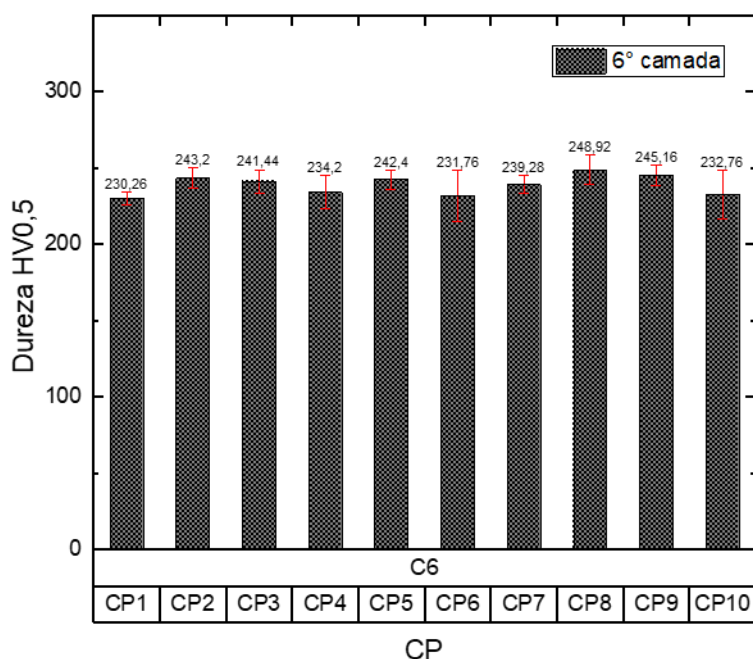


5.7.2. . Análise de Microdureza Vickers HV0,5 das 6°, 19°, 23° e 28° camadas.

Foi utilizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) para todos os dados, conforme apresentado no **APÊNDICE S**, antes da realização da análise One-Way ANOVA. Quando necessário, aplicou-se o teste post hoc de Tukey. O nível de significância adotado foi de $p \leq 0,05$.

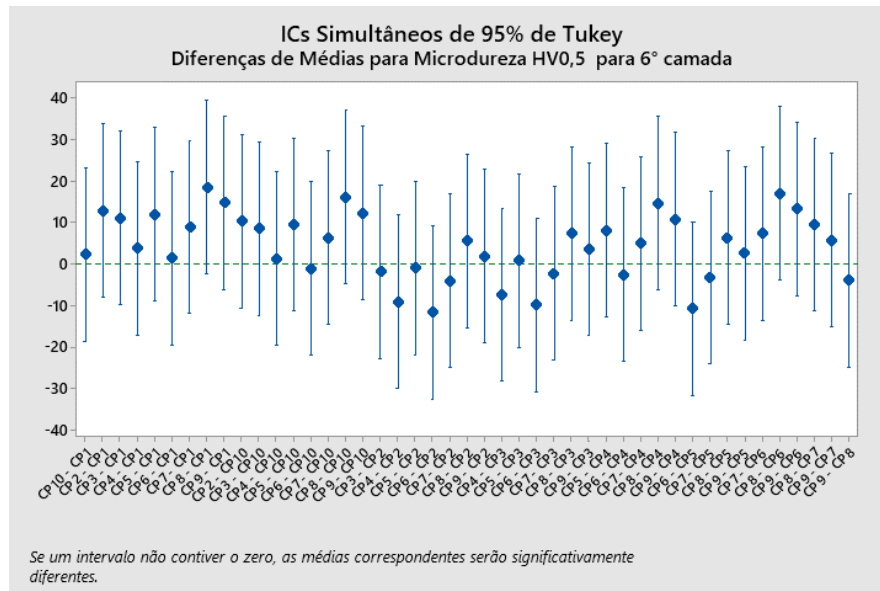
Na **Figura 62**, são apresentadas as medições de dureza para todas as 6° camadas dos corpos de prova.

Figura 59: Médias de microdureza das 6° camadas.



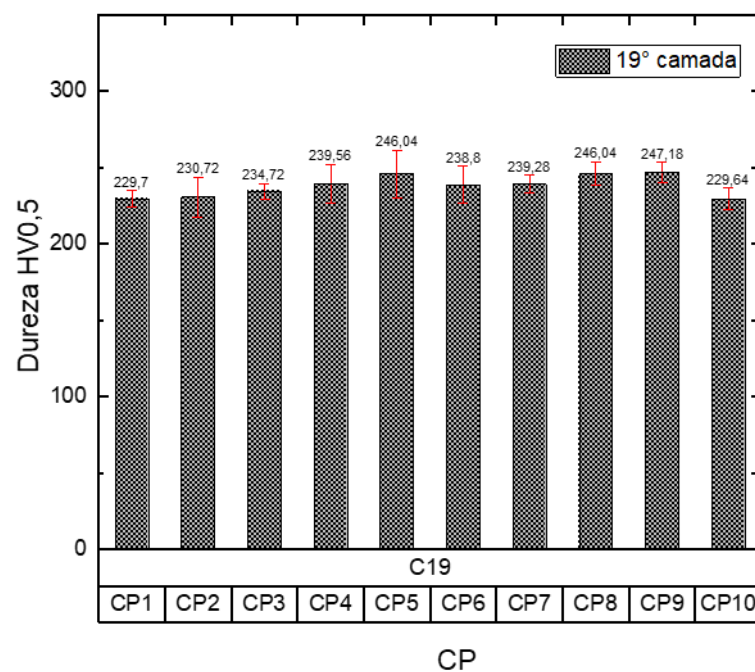
Ao comparar essas camadas entre si, utilizando o teste de Tukey, segundo a **Figura 63**, verificou-se que os intervalos de confiança de 95% se sobrepõem, indicando que não há diferença estatisticamente significativa entre as 6° camada dos CPs.

Figura 60 :Teste de Tukey de diferença de médias da 6° camada dos CPs.



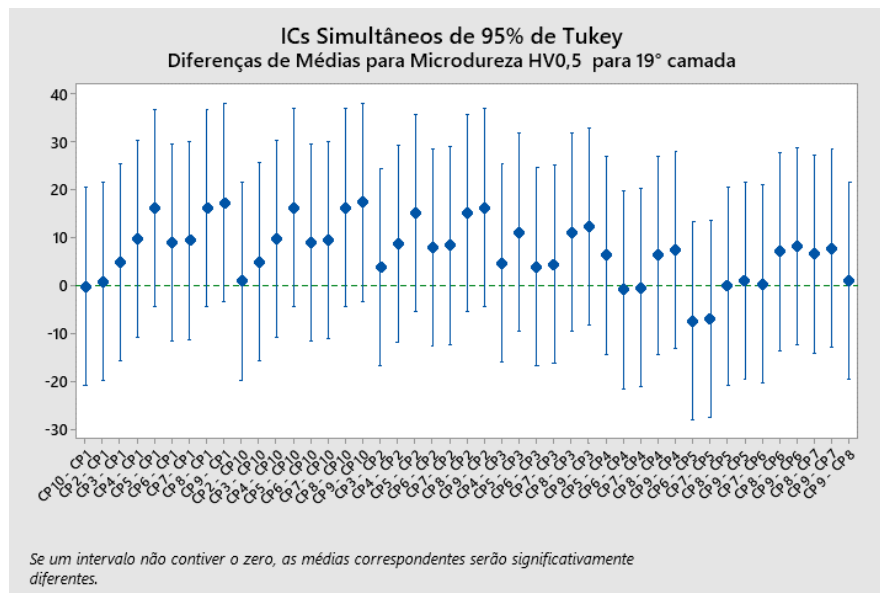
Na **Figura 64** abaixo, são apresentados os valores de microdureza HV0,5 obtidos para as camadas 19°.

Figura 61: Médias de microdureza das camadas 19°.



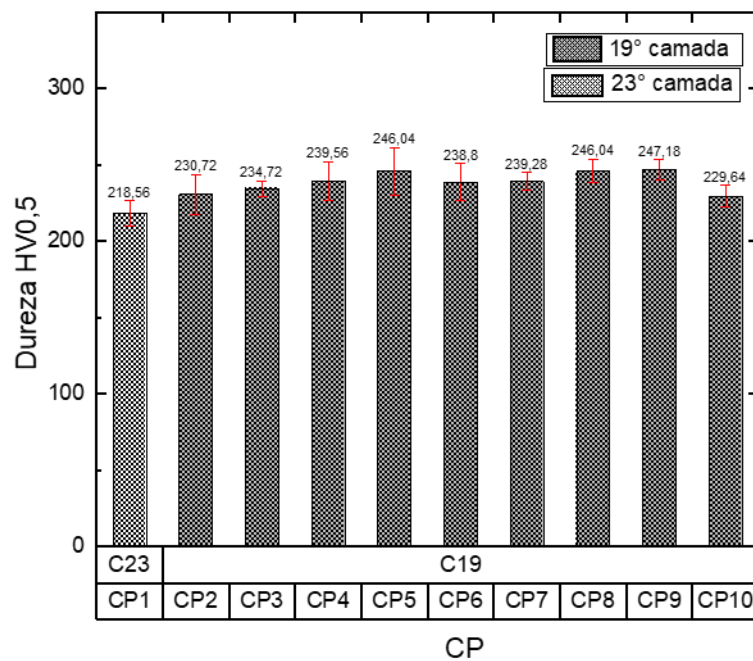
Analisando a partir do teste utilizando o teste de Tukey, **Figura 65**, observa também que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias de microdureza.

Figura 62: Teste de Tukey de diferença de médias da 19ª camada dos CPs.



Ao analisar a microdureza em relação aos ciclos térmicos estudados, considerou-se a 23ª camada do T2 no CP1 para avaliar a taxa de resfriamento, comparando sua microdureza com a da 19ª camada para os demais CPs. Observa-se, na **Figura 66**, os valores médios de microdureza Vickers HV0,5 das camadas 19ª e 23ª.

Figura 63: Médias de microdureza das camadas 19ª e 23ª.



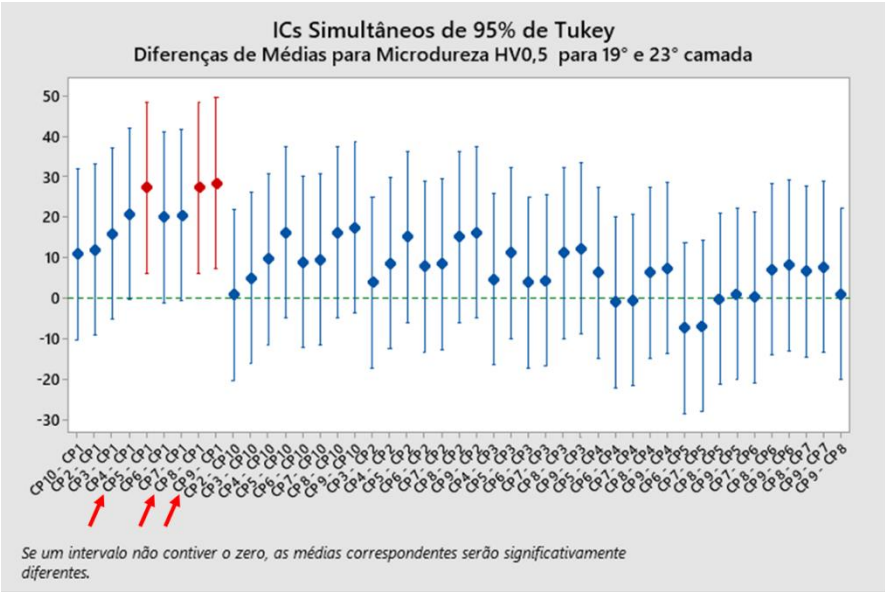
No entanto, com base na **Tabela 31** e **Figura 67**, as diferenças nas médias de microdureza entre as camadas de 19° e 23° são estatisticamente significativas. Isso é confirmado pelos valores-P ajustados, todos inferiores a 0,05, conforme mostrado nas análises de Tukey. Apresentando uma diferença significativa, especialmente no CP1, onde a 23ª camada foi analisada no contexto do ciclo térmico em relação às demais.

Tabela 29: Testes Simultâneos de Tukey para as diferenças de médias para o CP3.

CP	Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95%	Valor-T	Valor-P Ajustado
CP5-CP1	28° camada - 23° camada	27,48	6,31	(6,37; 48,59)	4,35	0,003
CP8-CP1	19° camada - 23° camada	27,48	6,31	(6,37; 48,59)	4,35	0,003
CP9-CP1	19° camada - 23° camada	28,62	6,21	(7,51; 49,73)	4,53	0,002

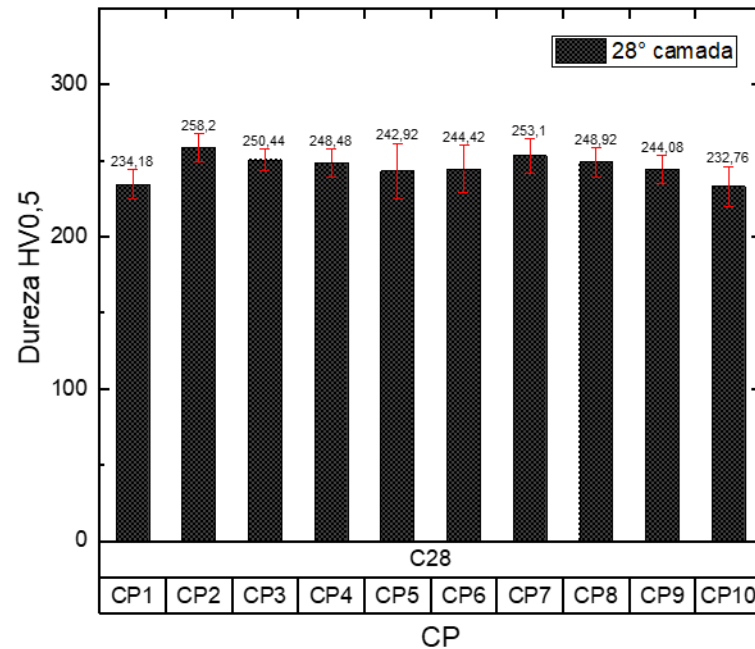
Aas diferenças de microdureza entre a 19° camada e a 23° camada são significativas, com um aumento de aproximadamente 12,6% na comparação com CP5 e CP8, e 13,1% com CP9, indicando que a 19° camada apresenta uma microdureza superior em relação à 23° camada.

Figura 64: Teste de Tukey de diferença de médias das camadas 19° e 23° dos CPs.



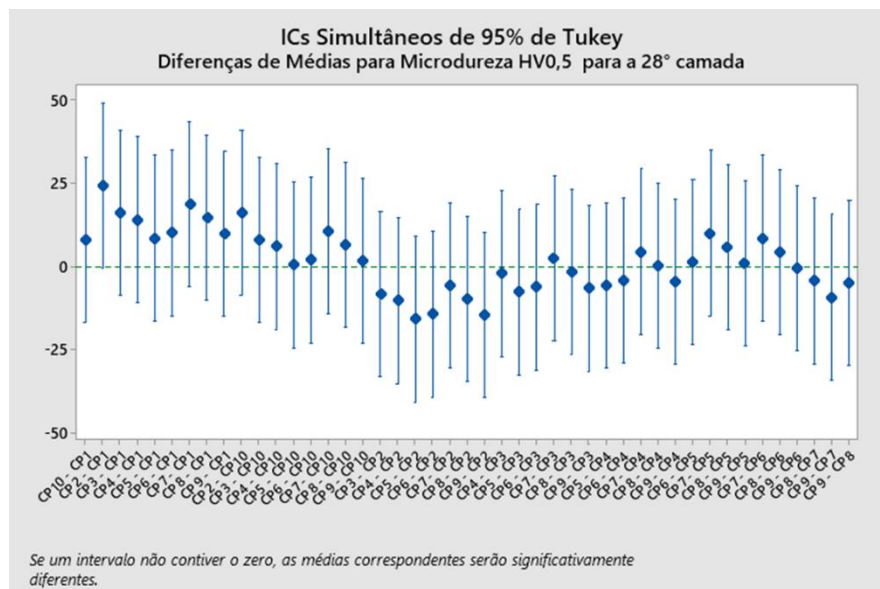
Por fim, na **Figura 68**, são descritos os valores de microdureza Vickers obtidos para as camadas 28°.

Figura 65:: Médias de microdureza das camadas 28°.



Utilizando o teste de Tukey, **Figura 69**, verificou-se que os intervalos de confiança de 95% indicando que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias de microdureza das 28° camadas.

Figura 66: Teste de Tukey de diferença de médias das camadas 28° dos CPs.



6. CONCLUSÕES

Com base aos materiais e métodos utilizados a esse trabalho pode concluir que:

- A energia de deposição é o fator mais significativo na largura e altura das camadas depositadas, seguido pelo tipo de resfriamento. A frequência de pulsação tem um efeito significativo menor em relação aos outros fatores mencionados.

- No ciclo térmico T1, o tipo de resfriamento foi o principal fator influente. Os corpos de prova (CPs) resfriados com água apresentaram taxas de resfriamento significativamente mais altas em comparação com os resfriados ao ar.

- No ciclo térmico T2, a energia de deposição foi o principal fator na taxa de resfriamento.

- No ciclo térmico T3, tanto a energia de deposição quanto o tipo de resfriamento influenciam a taxa de resfriamento.

- Todos os corpos de prova apresentaram maior fração de bainita em suas microestruturas.

- Não teve diferença de microdureza, pois devido o consumível utilizado e diante a taxa de resfriamento analisado não teve transformações de fases.

- Embora a energia de deposição se apresentou como um dos fatores de maior influência no processo, no entanto não foi capaz ter uma diferença significativa na energia absorvida, uma vez que as médias obtidas não apresentaram variações relevantes entre CPs.

Trabalhos Futuros

- Investigar o uso de maior vazão durante o processo de deposição, aliado a um sistema de resfriamento acelerado, para avaliar o impacto no desempenho das propriedades mecânicas e microestruturais.
- Considerando que a frequência de pulsação não apresentou efeitos significativos nas respostas analisadas, futuros estudos podem explorar a variação dos parâmetros de frequência de pulsos, assim como os valores de corrente base e pico, para entender melhor suas influências nas propriedades do material.
- Durante o ensaio de impacto de Charpy, os corpos de prova devem ser retirados dos níveis de base, meio e topo das camadas, relacionadas aos ciclos térmicos que ocorrem durante o processo de deposição nesses níveis. Esse procedimento possibilitará associar a energia absorvida nessas regiões aos respectivos ciclos térmicos experimentados em cada camada. Além disso, é importante correlacionar as fractografias e as microdurezas para entender as influências das variações térmicas e microestruturais nas propriedades mecânicas do material.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, Fernando Elias Silvestre et al. Aplicação das variantes MAG pulsado e MAG pulsado térmico com arame maciço em soldas de revestimento do tipo " lining". 2005.
- AHSAN, Md RU et al. Heat-treatment effects on a bimetallic additively-manufactured structure (BAMS) of the low-carbon steel and austenitic-stainless steel. **Additive Manufacturing**, v. 32, p. 101036, 2020.
- ALBERTI, Eduardo André; SILVA, Leandro João da; D'OLIVEIRA, Ana Sofia. Additive Manufacturing: the role of welding in this window of opportunity. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, p. 190-198, 2014.
- ALCAIDE, Eduard; WILTGEN, Filipe. Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro. 2018.
- ALDALUR, Eider et al. High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 58, p. 615-626, 2020.
- ANDRADE, Augusto Fernandes Cordeiro de. **Influência da corrente de pulso, do tempo de pulso e diâmetro de gota sobre a estabilidade da transferência metálica no processo mig-p**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- ASTM, Iso. ASTM52900-15 standard terminology for additive manufacturing—general principles—terminology. **ASTM International, West Conshohocken, PA**, v. 3, n. 4, p. 5, 2015.
- BABU, Aravind et al. Local control of microstructure and mechanical properties of high-strength steel in electric arc-based additive manufacturing. **journal of materials research and technology**, v. 26, p. 1508-1526, 2023.
- BAN, Huiyong; SHI, Gang. A review of research on high-strength steel structures. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings**, v. 171, n. 8, p. 625-641, 2018.
- BAUM, Ludwig; FICHTER, Volkmar; FISCHER, Hans. **Der Schutzgas-Schweisser: Leitfaden für Ausbildung und Praxis. 2. MIG-/MAG-Schweißen: Leitfaden für Ausbildung und Praxis**. Dt. Verlag für Schweißtechnik, DVS-Verlag, 1999.
- BERMAN, Barry. 3-D printing: The new industrial revolution. **Business horizons**, v. 55, n. 2, p. 155-162, 2012.

CAO, Wenquan et al. **Ultrahigh Charpy impact toughness (~ 450J) achieved in high strength ferrite/martensite laminated steels**. Scientific reports, v. 7, n. 1, p. 41459, 2017.

CUNNINGHAM, C. R. et al. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive. 2018.

CHUA, Chee Kai; LEONG, Kah Fai; LIM, Chu Sing. **Rapid prototyping: principles and applications (with companion CD-ROM)**. World Scientific Publishing Company, 2010.

DA SILVA, Ezio Fernandes et al. Influência do Processo MIG/MAG na Qualidade da Energia Elétrica Fornecida pelas Concessionárias. In: **Conference: XXXVII Congresso Nacional de Soldagem-Consolda**. 2011.

DA SILVA, Ezio F. et al. Power quality analysis of gas metal arc welding process operating under different drop transfer modes. In: **XI Brazilian power electronics conference. IEEE**, 2011. p. 129-135.

DEBROY, Tarasankar et al. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, v. 92, p. 112-224, 2018.

DING, Donghong et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, p. 465-481, 2015.

DING, Donghong et al. Wire arc additive manufacturing of Ti6AL4V using active interpass cooling. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 35, n. 7, p. 845-851, 2020.

DING, J. et al. Development of a laminar flow local shielding device for wire+ arc additive manufacture. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 226, p. 99-105, 2015.

DORNELLES, Júlia Moraes et al. Análise da influência da frequência de alimentação dinâmica de arame na soldagem com processo plasma de aço inoxidável 309L aplicada à manufatura aditiva. 2022.

DUTTA, Bhaskar; FROES, Francis H. Sam. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys. In: **Titanium powder metallurgy**. Butterworth-Heinemann, 2015.p. 447-468.

ESAB. Apostila de soldagem MIG/MAG. 2005.

FELICE, Igor Oliveira et al. Avaliação geométrica, térmica e de porosidade de pré-formas em manufatura aditiva por deposição a arco com resfriamento ativo por quase-imersão. 2020.

FISCHER, A. Estudo da Influência dos Parâmetros no Processo de Soldagem GMAW-Arco Pulsado. Belo Horizonte: 2011.

FISCHER, Hans. Der Schutzgas-Schweisser: Leitfaden für Ausbildung und Praxis. 2. MIG-/MAG-Schweißen: Leitfaden für Ausbildung und Praxis. Dt. Verlag für Schweißtechnik, DVS-Verlag, 1999.

FRONIUS. Cold Metal Transfer / A Tecnologia. Folheto, Edição PB, v.02, Março, 2017

FRAZIER, William E. Metal additive manufacturing: a review. **Journal of Materials Engineering and performance**, v. 23, p. 1917-1928, 2014.

GOMES, João Francisco Bueno; WILTGEN, Filipe. Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas. **Revista Tecnologia**, v. 41, n. 1, 2020.

GUO, Nannan; LEU, Ming C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. **Frontiers of mechanical engineering**, v. 8, p. 215-243, 2013.

HIRTLE, Markus et al. Investigation of microstructure and hardness of a rib geometry produced by metal forming and wire-arc additive manufacturing. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, 2018. p. 02005.

JACOBS, Trent. 3D printing in the oil field kicks into production mode. **Journal of Petroleum Technology**, v. 68, n. 08, p. 30-35, 2016.

JOHNSON, N.; SANDERS, P. High strength low alloy (Hsla) aluminum. **International Journal of Metalcasting**, v. 6, n. 1, p. 61, 2012.

KEELER, Stuart; KIMCHI, Menachem; MOONEY, Peter J. Advanced high-strength steels application guidelines version 5.0. **World Auto Steel**, v. 276, 2014.

LESNEWICH, Alexander. Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding. **Welding journal**, v. 37, p. 418-425, 1958.

LIMA, Jefferson Segundo de. Análise e seleção de parâmetros para manufatura aditiva por deposição a arco do aço AISI 316LSI utilizando a técnica de curto circuito controlado. 2023.

MAI, Dinh Si et al. Effects of cooling conditions on the shape, microstructures, and material properties of SS308L thin walls built by wire arc additive manufacturing. **Materials Letters**, v. 280, p. 128580, 2020.

MACHADO, I. Soldagem e Técnicas Conexas-Processos: Livro. **Porto Alegre**, 1996.

MANZ, A.F. Ways to limit spatter, reducing spatter will help you increase productivity, reduce expenses, and stay safer. **Welding Journal**, 89, no9 S, 2010, p. 86-7, **American Welding Society**.

MATLOCK, David K. et al. Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: an overview. **Jestech**, v. 15, n. 1, p. 1-12, 2012.

MATEO, Antonio et al. Influence of laser cutting on the fatigue limit of two high strength steels. **Materials Testing**, v. 57, n. 2, p. 136-140, 2015.

MIKI, C.; HOMMA, K.; TOMINAGA, T. High strength and high-performance steels and their use in bridge structures. **Journal of constructional steel research**, v. 58, n. 1, p. 3-20, 2002.

MODENESI, Paulo J. et al. Effect of flux density and the presence of additives in ATIG welding of austenitic stainless steel. **Welding International**, v. 29, n. 6, p. 425-432, 2015.

MOHEBBI, Mohammad Sadegh; KÜHL, Michael; PLOSHIKHIN, Vasily. A thermo-capillary-gravity model for geometrical analysis of single-bead wire and arc additive manufacturing (WAAM). **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 109, p. 877-891, 2020.

NORRISH, John; POLDEN, Joseph; RICHARDSON, Ian. A review of wire arc additive manufacturing: development, principles, process physics, implementation and current status. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 54, n. 47, p. 473001, 2021.

OLIVEIRA, Catarina Claudino Fernandes de. Análise da microestrutura de peças impressas de arame ER70S-6 obtidas através de manufatura aditiva por deposição a arco via processo GMAW-CMT. 2022.

OLIVEIRA, Rmulo Pacheco de et al. A influencia do reaquecimento de camadas na microestrutura e na dureza de produtos de aço fabricados com manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), comprando dois tipos de resfriamento: a ar e agua, 2022.

RODRIGUES, Tiago A. et al. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). **Materials**, v. 12, n. 7, p. 1121, 2019.

RODRIGUES, Vinícius Picanço et al. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, v. 12, n. 3, p. 1-1, 2017.

ROJAS, P., Martinez, C., & Vera, R. (2014). **Toughness of SAE 1020 Steel with and without Galvanization Exposed to Different Corrosive Environments in Chile.** **International Journal of Electrochemical Science**, 9(6):2848-2858

ROSA, Alisson Fernandes da et al. Estudo do processo TIG com estratégias inovadoras de inserção de arame para aplicação em soldagem orbital. 2019.

ROSLI, Nor Ana et al. Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 11, p. 2127-2145, 2021.

SCHEIBNER, P. Ergebnisse aus Untersuchungen zur Spritzerbildung beim MAG-Schweißen. 1980.

SCHOINOCHORITIS, Babis; CHANTZIS, Dimitrios; SALONITIS, Konstantinos. Simulation of metallic powder bed additive manufacturing processes with the finite element method: A critical review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 231, n. 1, p. 96-117, 2017.

SCOTTI, Américo et al. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. 2008.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir; LUCAS, William. Interchangeable metal transfer phenomenon in GMA welding: features, mechanisms, classification. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, n. 11, p. 2488-2496, 2014.

Smith, A.: CO2 Welding of Steel. Cambridge, U.K.: **The Welding Institute**, 1966, 21-25. [60]

SUDNIK, Wladislav (Ed.). **Arc welding**. BoD–Books on Demand, 2011.

TONG, Lewei et al. Low temperature impact toughness of high strength structural steel. **Thin-Walled Structures**, v. 132, p. 410-420, 2018.

VASCONCELO, Caio Matheus Araujo de. Simulacao fisica da soldagem de manutencao em aços de alta resistencia e baixa liga utilizado na industria naval. 2022.

VIMAL, K. E. K.; SRINIVAS, M. Naveen; RAJAK, Sonu. Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 41, p. 1139-1145, 2021.

WAQAS, Ali et al. **Analysis of ductile fracture obtained by charpy impact test of a steel structure created by robot-assisted GMAW-based additive manufacturing**. **Metals**, v. 9, n. 11, p. 1208, 2019.

WATERMAN, Norman A.; DICKENS, Philip. Rapid product development in the USA, Europe and Japan. **World Class Design to Manufacture**, v. 1, n. 3, p. 27-36, 1994.

WILL, Cristhian Ramos. Comportamento à corrosão de juntas de superduplex UNS S32760 soldadas por GMAW pulsado com diferentes misturas gasosas. 2009.

WILLIAMS, S. W. et al. Wire b Arc Additive Manufacturing. **Materials Science and Technology**, v. 32, n. 7, p. 641, 2016.

WILTGEN, Filipe. A manufatura avançada precisa de uma engenharia avançada. **Revista Tecnologia**, v. 41, n. 2, 2020.

WILTGEN, Filipe. Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro. 2018.

WU, Bintao et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. **Journal of manufacturing processes**, v. 35, p. 127-139, 2018.

WU, Bintao et al. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 250, p. 304-312, 2017.

WU, Bintao et al. Mitigation of thermal distortion in wire arc additively manufactured Ti6Al4V part using active interpass cooling. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 24, n. 5, p. 484-494, 2019.

WU, Bintao 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, 2018.

YAKOUT, Mostafa; ELBESTAWI, M. A.; VELDHUIS, Stephen C. A review of metal additive manufacturing technologies. **Solid State Phenomena**, v. 278, p. 1-14, 2018.

ZHAI, Peizhuo et al. Comparative study of droplet transfer modes on appearance, microstructure, and mechanical properties of weld during pulsed GMAW. **Metals**, v. 10, n. 5, p. 611, 2020.

ZHANG, Qi et al. A metallurgical phase transformation framework applied to SLM additive manufacturing processes. **Materials & Design**, v. 166, p. 107618, 2019

APÊNDICES

APÊNDICE A: TABELAS DAS DIMENSÕES GEOMÉTRICAS (ALTURA E LARGURA) DOS CPS.

CP1			
Camada	Altura (mm)	Altura por camada(mm)	Largura (mm)
1	2,2	2,2	5,5
2	3,8	1,6	6,57
3	5,8	2	6,5
4	7,5	1,7	6,2
5	9	1,5	7,5
6	10,8	1,8	7,43
7	12	1,2	6,4
8	13,4	1,4	6,67
9	15,8	2,4	6,67
10	17,5	1,7	7,17
11	19,8	2,3	6,9
12	21	1,2	7
13	23,2	2,2	7,07
14	25	1,8	7,43
15	27	2,0	7,6
16	29	2,0	7,23
17	30,4	1,4	6,9
18	32,6	2,2	6,33
19	34,5	1,9	7,5
20	36	1,5	6,67
21	37,5	1,5	7,33
22	39,8	2,3	7,67
23	41	1,2	7,67
24	43	2,0	7,73
25	45,5	2,5	7,43
26	47	1,5	7,33
27	49,8	2,8	6,23
28	51	1,2	6,23
29	52,5	1,5	7,00
30	57	4,5	7,1

CP2			
Camada	Altura (mm)	Altura por camada(mm)	Largura (mm)
1	2,8	2,8	8,83
2	5,5	2,7	9,43
3	7,5	2	10,2
4	10	2,5	10,83
5	12,5	2,5	10,67
6	14,5	2	10,47
7	17	2,5	10,6
8	20	3	9,33
9	22,3	2,3	10,17
10	24	1,7	9,93
11	25,5	1,5	9,6
12	29,5	4	8,93
13	31,8	2,3	10,57
14	34,2	2,4	9,1
15	36,8	2,6	10,33
16	39,3	2,5	9,3
17	42	2,7	9,4
18	44,8	2,8	9,1
19	46,1	1,3	9,6
20	49	2,9	10
21	51,3	2,3	9,77
22	53,5	2,2	9,67
23	55,3	1,8	9,33
24	58,5	3,2	9,17
25	61	2,5	8,83
26	63,5	2,5	9,77
27	65,3	1,8	9,17
28	67,5	2,2	10
29	70	2,5	9,77
30	73	3	9,5

CP3			
Camada	Altura (mm)	Altura por camada (mm)	Largura (mm)
1	2,5	2,5	5,7
2	4	1,5	5,77
3	6	2	6,6
4	7,5	1,5	7,43
5	9,8	2,3	6,27
6	11	1,2	7,97
7	13,6	2,6	6,9
8	14,4	0,8	8
9	16	1,6	6,93
10	18,3	2,3	7,27
11	19,7	1,4	5,77
12	21,5	1,8	6,6
13	23,5	2	7,4
14	26	2,5	7,3
15	27,3	1,3	7,77
16	28,5	1,2	7,47
17	30	1,5	7,3
18	32	2	7,27
19	34,5	2,5	5,77
20	36,6	2,1	6,77
21	38	1,4	6,93
22	39,2	1,2	6,67
23	41,6	2,4	6,6
24	43,5	1,9	6,67
25	45,3	1,8	7,07
26	46,6	1,3	6,7
27	48	1,4	6,6
28	51	3	7,63
29	51,5	0,5	7,6
30	53	1,5	7,23

CP4			
Camada	Altura (mm)	Altura por camada (mm)	Largura (mm)
1	3	3	9,77
2	5,5	2,5	9,5
3	8,2	2,7	8,9
4	10,7	2,5	9,03
5	13	2,3	9,17
6	14,7	1,7	9,33
7	17	2,3	9,83
8	19,2	2,2	10
9	21	1,8	9,67
10	23,7	2,7	10,17
11	26	2,3	9,33
12	28	2	9,83
13	30,5	2,5	9,83
14	33	2,5	10,33
15	35	2	9,07
16	37,5	2,5	9,4
17	39,8	2,3	9,63
18	42	2,2	9,87
19	44,5	2,5	10,5
20	46,5	2	9,67
21	48,6	2,1	9,73
22	50,8	2,2	9,33
23	53	2,2	10
24	55,5	2,5	10
25	57,5	2	9,5
26	59,5	2	10
27	61,2	1,7	9,5
28	64	2,8	10,17
29	66,5	2,5	10,17
30	68	1,5	10

CP5			
Camada	Altura (mm)	Altura por camada (mm)	Largura (mm)
1	2,5	2,5	5,27
2	4,2	1,7	5,93
3	6	1,8	6,43
4	8	2	7,1
5	9	1	7,13
6	11,2	2,2	7,23
7	12,7	1,5	6,73
8	14,5	1,8	7,23
9	16,2	1,7	6,93
10	17,5	1,3	6,83
11	19,8	2,3	7,43
12	21,8	2	7,17
13	23,4	1,6	6,73
14	24,8	1,4	6,9
15	27	2,2	5,5
16	28	1	6,33
17	30	2	7,17
18	32	2	7,27
19	33,5	1,5	6,67
20	36	2,5	6,77
21	37,5	1,5	6,17
22	39	1,5	7,17
23	41	2	5,93
24	42,2	1,2	7,43
25	44,7	2,5	6,53
26	46,5	1,8	6,83
27	48,2	1,7	7,53
28	49,8	1,6	7,5
29	51,3	1,5	7,4
30	53	1,7	7,67

CP6			
Camada	Altura (mm)	Altura por camada (mm)	Largura (mm)
1	3	3	9,83
2	5	2	9,6
3	7,3	2,3	10
4	9,5	2,2	10,47
5	12	2,5	11,07
6	13,2	1,2	10,4
7	16,2	3	10,33
8	18,4	2,2	10
9	21	2,6	10,37
10	23,4	2,4	10
11	25,6	2,2	10,03
12	28	2,4	9,83
13	30	2	10,03
14	32,6	2,6	9,47
15	34,2	1,6	10,17
16	37	2,8	9,83
17	39,3	2,3	10
18	42	2,7	9,87
19	43,9	1,9	9,77
20	46	2,1	9,73
21	48,6	2,6	9,83
22	50,6	2	10
23	52,7	2,1	9,6
24	55,5	2,8	10
25	57	1,5	9,33
26	59,7	2,7	9,6
27	61,8	2,1	8,67
28	64	2,2	9,17
29	67	3	9,83
30	69	2	10,13

CP7			
Camada	Altura (mm)	Altura por camada (mm)	Largura (mm)
1	2,8	2,8	5,7
2	4,3	1,5	6,17
3	6	1,7	7,33
4	8	2	7
5	9	1	7,47
6	11	2	6,6
7	12,6	1,6	6,9
8	14	1,4	6,17
9	16	2	7,37
10	17	1	7,1
11	18,3	1,3	7,03
12	21	2,7	7
13	22,5	1,5	7,6
14	24,7	2,2	7,33
15	25,8	1,1	6,3
16	27,5	1,7	7
17	29,4	1,9	6,17
18	31,8	2,4	7
19	32,7	0,9	6,17
20	34,5	1,8	6,6
21	35,7	1,2	5,83
22	37,8	2,1	7,1
23	39	1,2	7,13
24	41,1	2,1	6,67
25	42,8	1,7	7,33
26	45	2,2	7,13
27	46,1	1,1	6,57
28	49	2,9	7
29	50,2	1,2	6,7
30	51,2	1	6,83

CP8			
Camada	Altura (mm)	Altura por camada (mm)	Largura (mm)
1	2,5	2,5	9,57
2	5	2,5	9,23
3	7,1	2,1	9,83
4	9,1	2	10,07
5	11,7	2,6	10,23
6	13,7	2	10,33
7	15,3	1,6	10,93
8	18,6	3,3	10,33
9	21	2,4	10,5
10	22,6	1,6	10,27
11	25	2,4	11,03
12	26,7	1,7	9,83
13	30,6	3,9	10,83
14	31,7	1,1	10,17
15	35	3,3	10,47
16	37	2	9,37
17	39,5	2,5	9,97
18	41,6	2,1	10
19	43,1	1,5	10,37
20	44,2	1,1	10,27
21	48	3,8	10,27
22	50,5	2,5	9,97
23	52,5	2	10,13
24	55,5	3	9,67
25	56,7	1,2	10,27
26	57,5	0,8	11,37
27	61,2	3,7	10,23
28	64	2,8	9,67
29	66	2	9,67
30	68,5	2,5	9,73

CP9			
Camada	Altura (mm)	Altura por camada (mm)	Largura (mm)
1	2,7	2,7	7,07
2	4,1	1,4	7,93
3	6,4	2,3	7,67
4	8,5	2,1	7,5
5	10,5	2	8,23
6	12,6	2,1	7,77
7	14,7	2,1	8,43
8	16,2	1,5	8,6
9	18,2	2	7,6
10	20,2	2	7,9
11	22,7	2,5	8,3
12	24,8	2,1	7,43
13	27	2,2	7,3
14	28,6	1,6	8,2
15	30,8	2,2	7,77
16	33	2,2	8,47
17	35,1	2,1	8,17
18	37,3	2,2	7,33
19	39	1,7	8,13
20	41,3	2,3	7,83
21	43,8	2,5	7,73
22	44,6	0,8	7,63
23	46,3	1,7	7,67
24	49,8	3,5	7,3
25	50,8	1	7,37
26	53,9	3,1	8
27	55	1,1	7,43
28	57	2	7,47
29	59	2	7,27
30	61,1	2,1	8,03

C10			
Camada	Altura (mm)	Altura por camada (mm)	Largura (mm)
1	2,5	2,5	7,03
2	5	2,5	7,2
3	6,5	1,5	6,87
4	8,5	2	8,17
5	10,5	2	7,43
6	12,3	1,8	7,03
7	14,5	2,2	7,8
8	16,5	2	7,33
9	18,1	1,6	7,47
10	20	1,9	7,93
11	22,2	2,2	8,37
12	23,8	1,6	7,17
13	25,3	1,5	7,03
14	27,3	2	8
15	29,7	2,4	7,53
16	31,5	1,8	7,93
17	33,7	2,2	7,43
18	35	1,3	8,07
19	37	2	7
20	39,8	2,8	8
21	41,7	1,9	7,8
22	43,1	1,4	7,53
23	45	1,9	7,9
24	47,2	2,2	8,87
25	49,3	2,1	7,43
26	51,1	1,8	7,77
27	54	2,9	7,7
28	55,8	1,8	8,03
29	57,1	1,3	7,8
30	59	1,9	8

APÊNDICE B: TABELAS DAS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO DOS CPS.

CP1		
Camada	Potência instantânea (W)	Energia de deposição (J/mm)
1	4286,5	428,65
2	4075,17	407,52
3	4060,71	406,07
4	4149,06	414,91
5	3885,62	388,56
6	3871,27	387,13
7	4088,94	408,89
8	3885,63	388,56
9	3910,26	391,03
10	3944,28	394,43
11	3967,17	396,72
12	4055,43	405,54
13	3986,41	398,64
14	4060,95	406,10
15	4024,28	402,43
16	4087,35	408,74
17	4141,94	414,19
18	4082,37	408,24
19	4068,34	406,83
20	4082,8	408,28
21	4142,55	414,26
22	4058,33	405,83
23	4171,22	417,12
24	3947,04	394,70
25	4105,09	410,51
26	4647,01	464,70
27	3996,41	399,64
28	4105,09	410,51
29	3983,85	398,39
30	3959,58	395,96

CP2		
Camada	Potência instantânea (W)	Energia de deposição (J/mm)
1	4606,03	921,21
2	4488,61	897,72
3	4309,78	861,96
4	4111,58	822,32
5	4194,94	838,99
6	4082,29	816,46
7	4181,82	836,36
8	4086,53	817,31
9	4157,75	831,55
10	4123,26	824,65
11	4281,92	856,38
12	4049,55	809,91
13	4320,58	864,12
14	-	-
15	4201,02	840,20
16	4107,96	821,59
17	4147,38	829,48
18	4187,79	837,56
19	4256,46	851,29
20	4238,95	847,79
21	4403,25	880,65
22	4259,72	851,94
23	4197,17	839,43
24	4103,66	820,73
25	4176,35	835,27
26	4026,11	805,22
27	4230,46	846,09
28	4244,36	848,87
29	4174,93	834,99
30	4042,26	808,45

CP3		
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

CP4		
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

CP5		
Camada	Potência instantânea (W)	Energia de deposição (J/mm)
1	4219,73	421,97
2	4211,02	421,10
3	4420,09	442,01
4	4252,1	425,21
5	4256,23	425,62
6	4089,38	408,94
7	4065,08	406,51
8	4118,89	411,89
9	4317,39	431,74
10	4513,34	451,33
11	4233,65	423,37
12	4639,29	463,93
13	4408,46	440,85
14	4199,53	419,95
15	4234	423,40
16	4467,95	446,80
17	4409,59	440,96
18	4241,45	424,15
19	4186,47	418,65
20	4482,94	448,29
21	4337,45	433,75
22	4382,17	438,22
23	4277,86	427,79
24	4465,09	446,51
25	4239,1	423,91
26	4300,9	430,09
27	4350,93	435,09
28	4441,92	444,19
29	4427,38	442,74
30	4300,36	430,04

CP6		
Camada	Potência instantânea (W)	Energia de deposição (J/mm)
1	5857,65	1171,53
2	5672,82	1134,56
3	4766,79	953,36
4	4988,83	997,77
5	4644,03	928,81
6	4663,02	932,60
7	4573,8	914,76
8	4354,39	870,88
9	4604,07	920,81
10	4521,23	904,25
11	4685,71	937,14
12	4562,76	912,55
13	4577,91	915,58
14	4629,85	925,97
15	4665,39	933,08
16	4631,57	926,31
17	4250,7	850,14
18	4484,57	896,91
19	4674,14	934,83
20	4691,95	938,39
21	4553,93	910,79
22	4592,72	918,54
23	4587,68	917,54
24	4711,48	942,30
25	4494,44	898,89
26	4702,28	940,46
27	4671,05	934,21
28	4572,58	914,52
29	4590,93	918,19
30	4695,1	939,02

CP7		
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

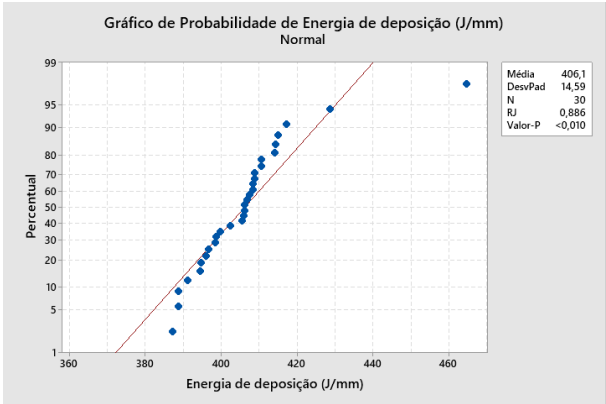
CP8		
Camada	Potência instantânea (W)	Energia de deposição (J/mm)
1	4844,04	968,81
2	5121,51	1024,30
3	4873,5	974,70
4	4600,45	920,09
5	4664,01	932,80
6	4306,23	861,25
7	4611,3	922,26
8	4347,01	869,40
9	4612,03	922,41
10	4493,78	898,76
11	4545,25	909,05
12	4595,4	919,08
13	4615,76	923,15
14	4664,56	932,91
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

CP9		
Camada	Potência instantânea (W)	Energia de deposição (J/mm)
1	4499,77	599,97
2	4609,72	614,63
3	4502,72	600,36
4	3900,11	520,01
5	4069,1	542,55
6	4005,58	534,08
7	4141,69	552,23
8	4068,18	542,42
9	4179,29	557,24
10	4151,65	553,55
11	4038,78	538,50
12	4012,71	535,03
13	4203,24	560,43
14	4201,06	560,14
15	4397,37	586,32
16	3996,26	532,83
17	3979,53	530,60
18	4066,17	542,16
19	4078,67	543,82
20	3827,1	510,28
21	4292,16	572,29
22	4228,72	563,83
23	4547,59	606,35
24	4654,52	620,60
25	4245,09	566,01
26	4397,64	586,35
27	4316,44	575,53
28	4287,72	571,70
29	4155,8	554,11
30	4270,65	569,42

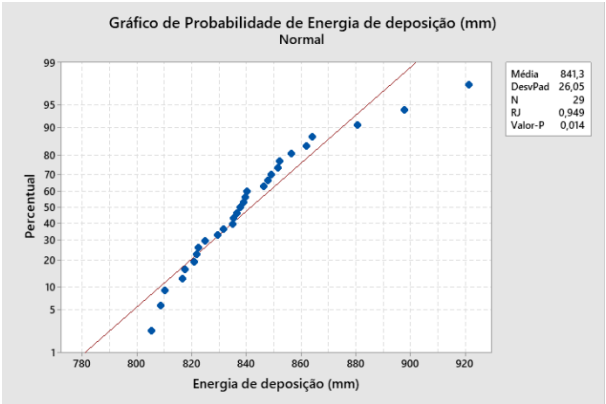
CP10		
Camada	Potência instantânea (W)	Energia de deposição (J/mm)
1	4479,51	597,27
2	-	-
3	4481,42	597,52
4	4276,78	570,24
5	4285,76	571,43
6	4220,9	562,79
7	4254,42	567,26
8	4343,77	579,17
9	4542,03	605,60
10	4337	578,27
11	4656,77	620,90
12	4490,64	598,75
13	4566,86	608,91
14	4516,5	602,20
15	4318,33	575,78
16	4512,07	601,61
17	4358,08	581,08
18	4337,89	578,39
19	4349,4	579,92
20	4286,62	571,55
21	4278,85	570,51
22	4506,95	600,93
23	4305,2	574,03
24	4401,96	586,93
25	4308,01	574,40
26	4331,94	577,59
27	4324,78	576,64
28	4439,66	591,95
29	4396,7	586,23
30	4519,91	602,65

APÊNDICE C: GRÁFICOS DOS TESTES DE NORMALIDADE PARA ENERGIA DE DEPOSIÇÃO DOS CPS.

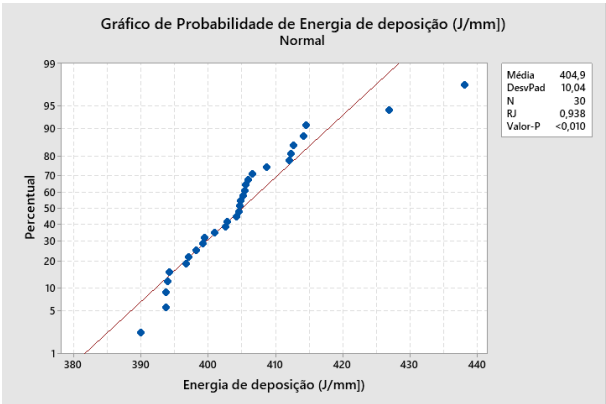
CP1



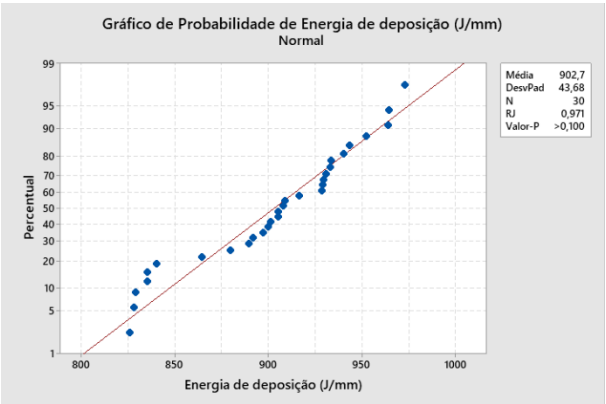
CP2



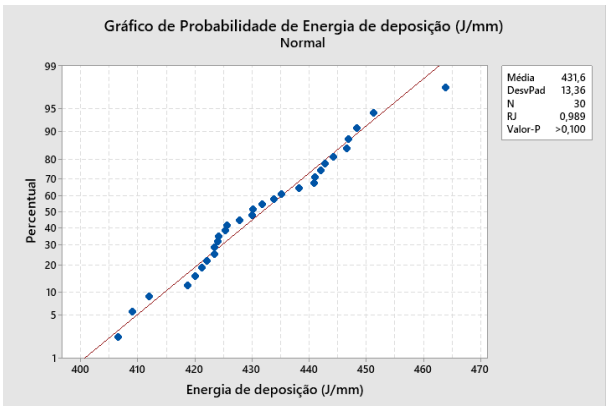
CP3



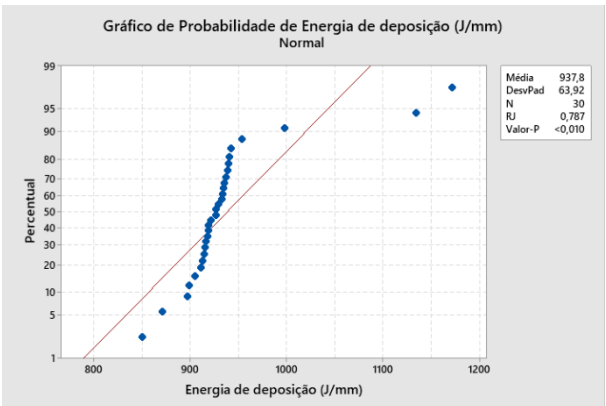
CP4



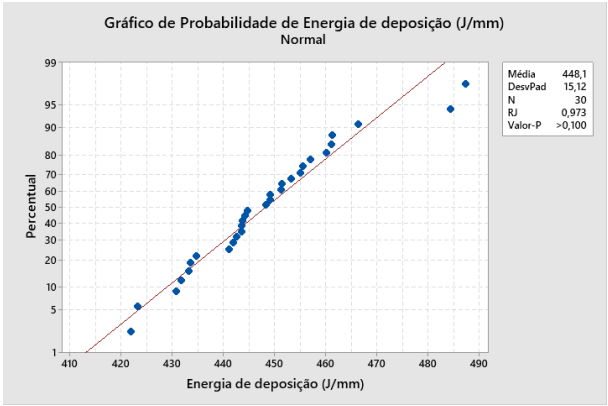
CP5



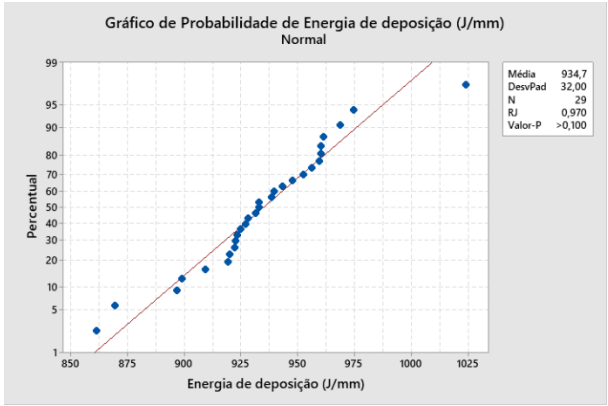
CP6



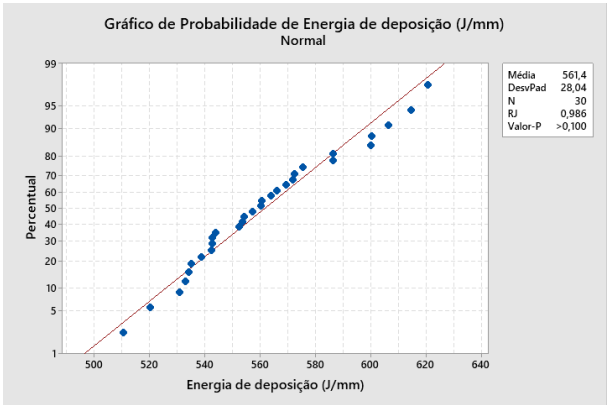
CP7



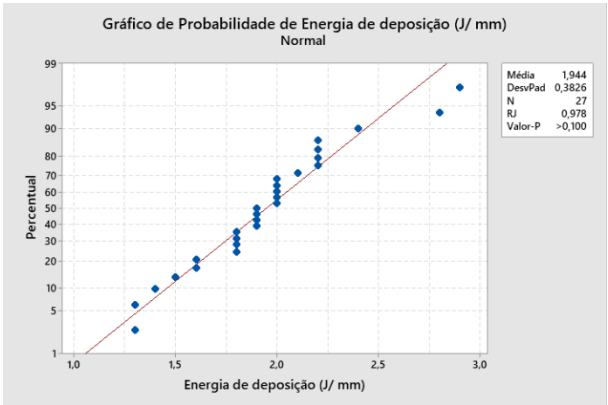
CP8



CP9

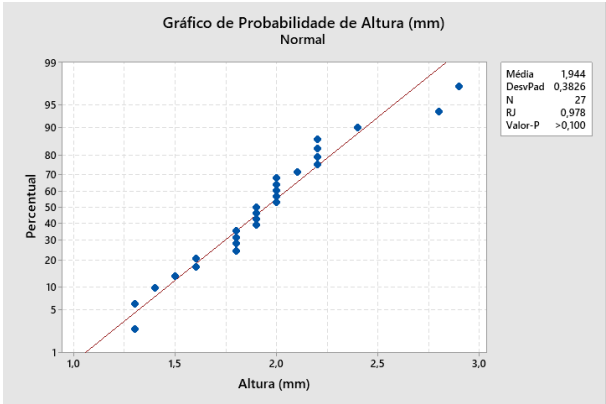


CP10

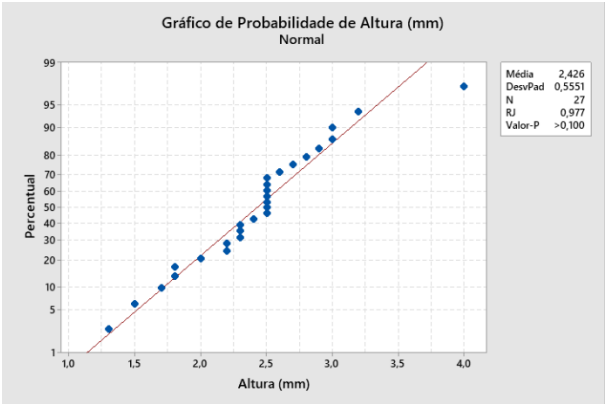


APÊNDICE D: GRÁFICOS DOS TESTES DE NORMALIDADE PARA ALTURA DOS CPS.

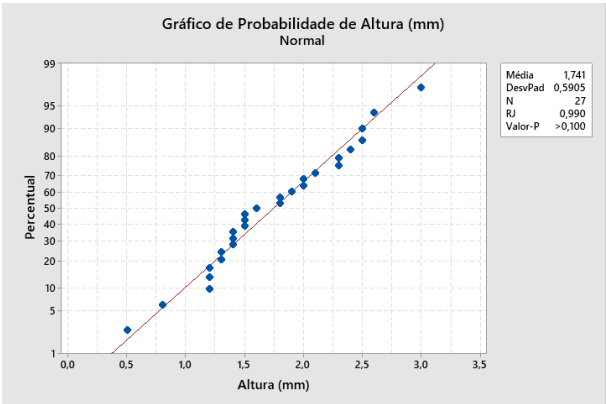
CP1



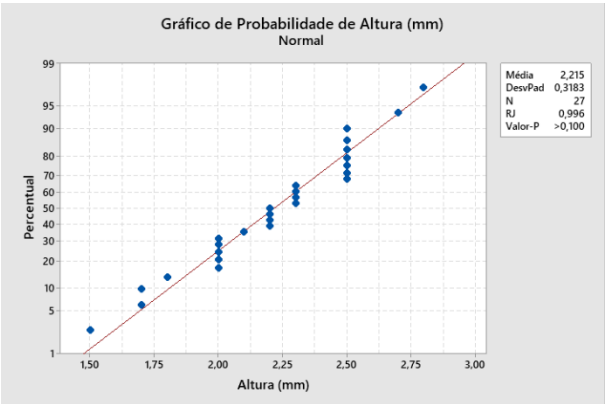
CP2



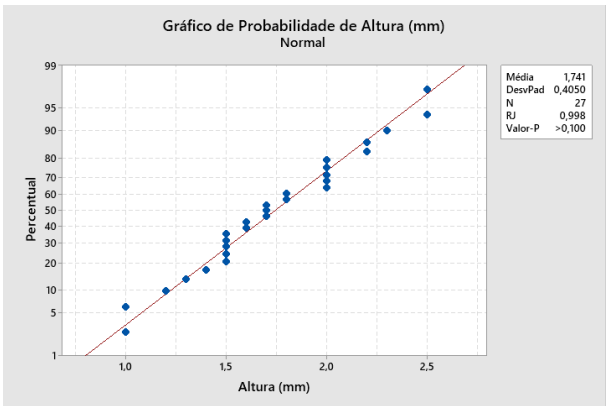
CP3



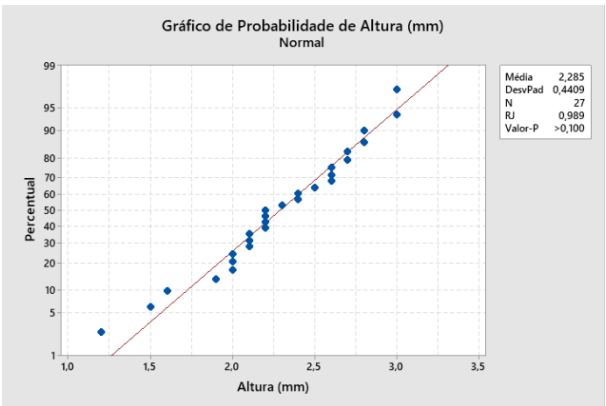
CP4



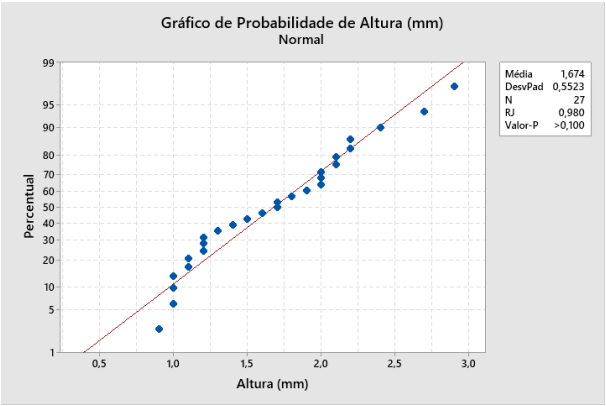
CP5



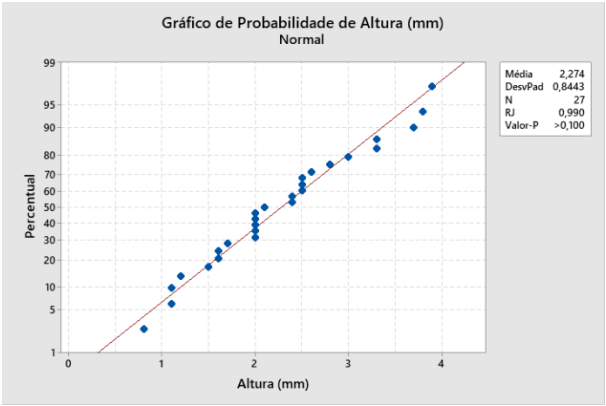
CP6



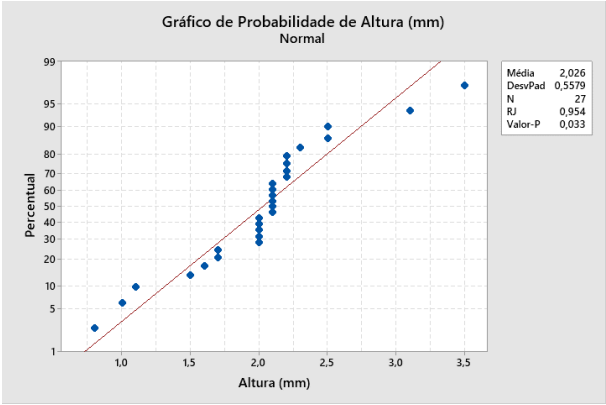
CP7



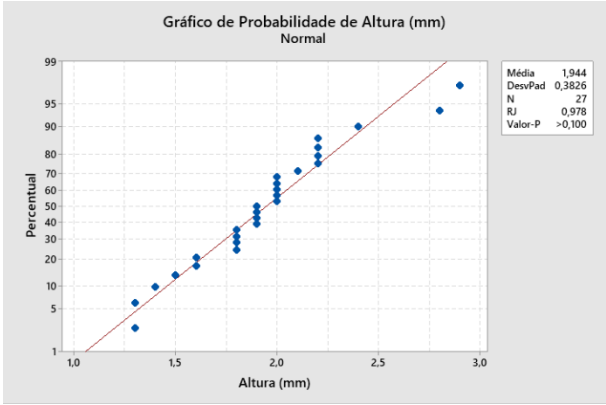
CP8



CP9

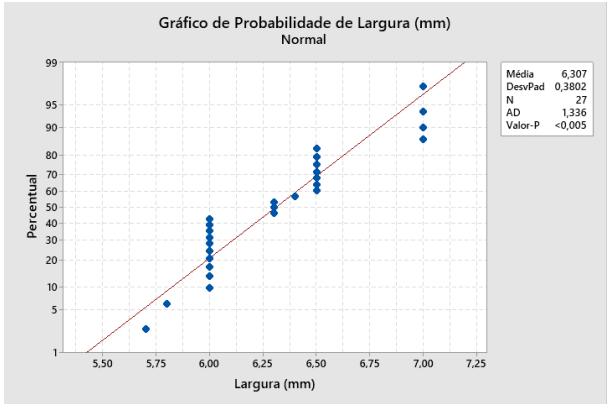


CP10

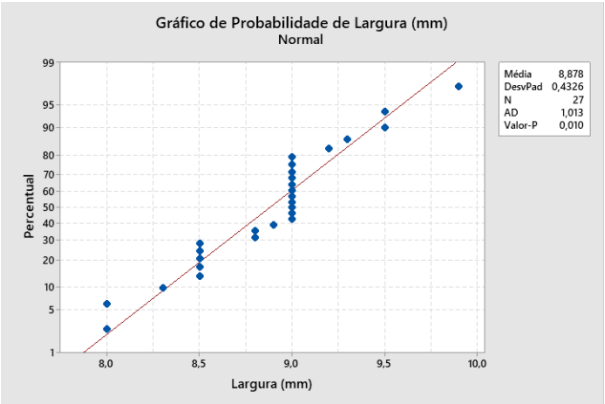


APÊNDICE E: GRÁFICOS DOS TESTES DE NORMALIDADE PARA LARGURA DOS CPS.

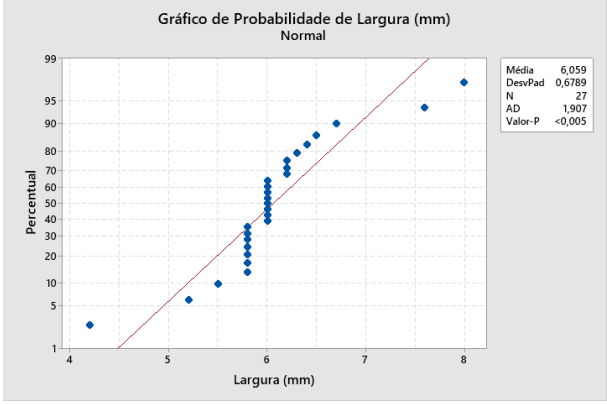
CP1



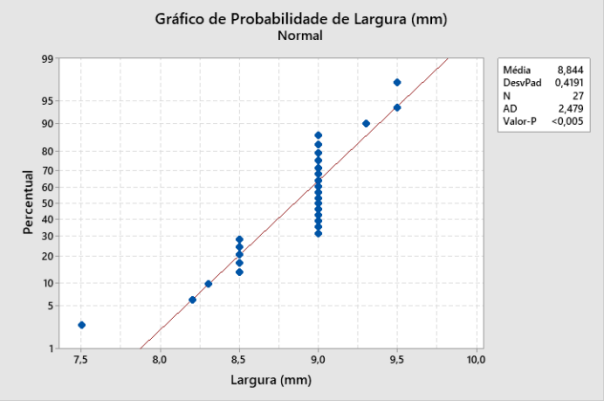
CP2



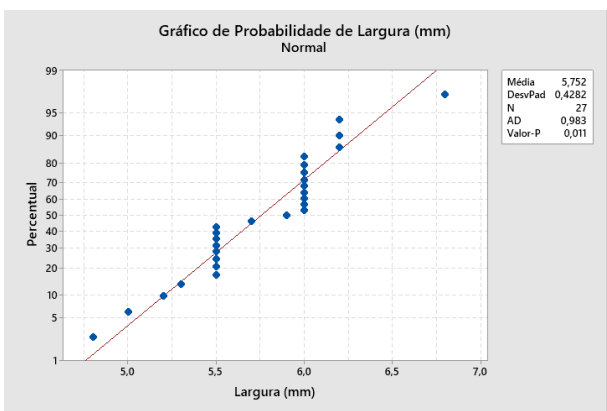
CP3



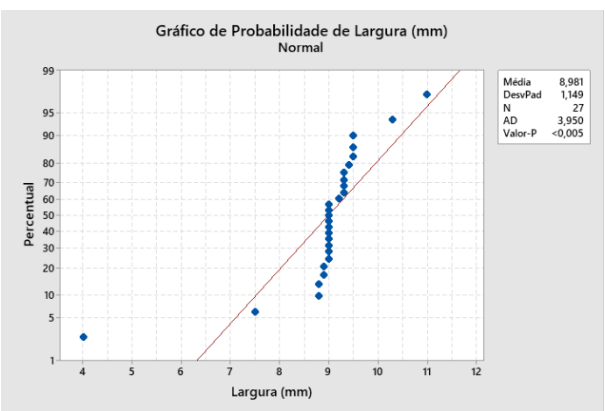
CP4



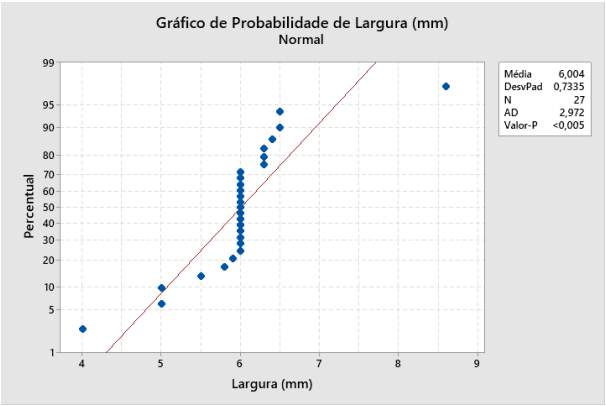
CP5



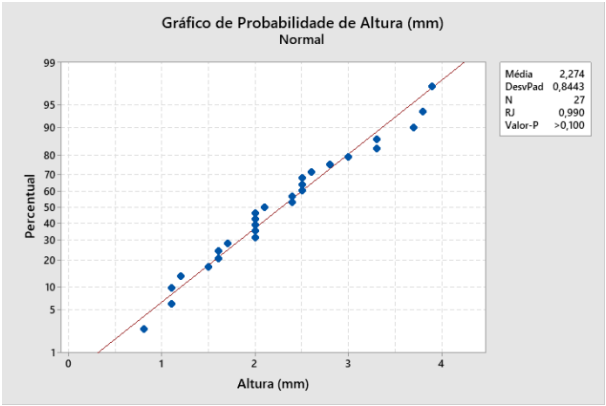
CP6



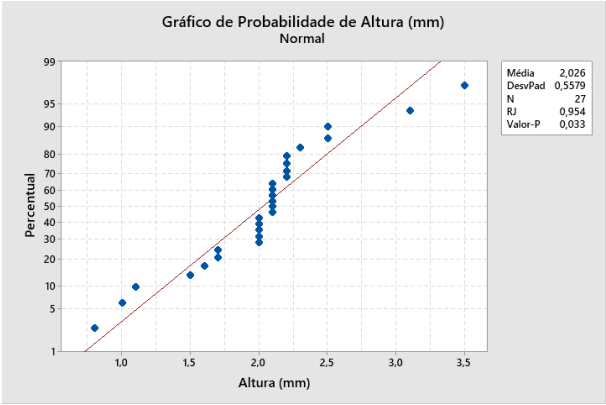
CP7



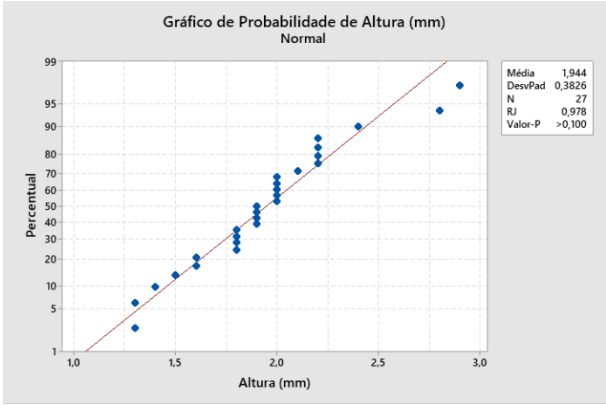
CP8



CP9



CP10



APÊNDICE F: REGRESSÃO FATORIAL: ALTURA MÉDIA (MM) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	
Constante		
Energia de deposição (J/mm)	0,53750	
Tipo de resfriamento	0,08000	
Frequência de pulsação (Hz)	0,11750	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	-0,03750	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,00250	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,07250	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,02750	
Pt Ct		
Termo	Coef	
Constante	2,03125	
Energia de deposição (J/mm)	0,26875	
Tipo de resfriamento	0,04000	
Frequência de pulsação (Hz)	0,05875	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	-0,01875	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,00125	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,03625	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,01375	
Pt Ct	-0,04625	
Termo	EP de Coef	
Constante	0,00280	
Energia de deposição (J/mm)	0,00280	
Tipo de resfriamento	0,00250	
Frequência de pulsação (Hz)	0,00280	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,00280	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,00280	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,00280	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,00280	
Pt Ct	0,00625	
Termo	IC de 95%	
Constante	(1,99574; 2,06676)	
Energia de deposição (J/mm)	(0,23324; 0,30426)	
Tipo de resfriamento	(0,00823; 0,07177)	
Frequência de pulsação (Hz)	(0,02324; 0,09426)	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	(-0,05426; 0,01676)	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	(-0,03426; 0,03676)	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	(0,00074; 0,07176)	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	(-0,02176; 0,04926)	
Pt Ct	(-0,12566; 0,03316)	
Termo	Valor-T	
Constante	726,72	
Energia de deposição (J/mm)	96,15	
Tipo de resfriamento	16,00	
Frequência de pulsação (Hz)	21,02	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	-6,71	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,45	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	12,97	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	4,92	
Pt Ct	-7,40	
Termo	Valor-P	VIF
Constante	0,001	
Energia de deposição (J/mm)	0,007	1,00
Tipo de resfriamento	0,040	1,00
Frequência de pulsação (Hz)	0,030	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,094	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,732	1,00
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,049	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,128	1,00

Pt Ct

0,086 1,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
0,0079057	99,99%	99,91%	0,0203125	96,82%	*	-68,42

Análise de Variância

Fonte	GL
Modelo	8
Linear	3
Energia de deposição (J/mm)	1
Tipo de resfriamento	1
Frequência de pulsação (Hz)	1
Interações de 2 fatores	3
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	1
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	1
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1
Interações de 3 fatores	1
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1
Curvatura	1
Erro	1
Total	9
Fonte	SQ Seq
Modelo	0,639698
Linear	0,621425
Energia de deposição (J/mm)	0,577813
Tipo de resfriamento	0,016000
Frequência de pulsação (Hz)	0,027613
Interações de 2 fatores	0,013337
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,002812
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,000013
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,010512
Interações de 3 fatores	0,001513
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,001513
Curvatura	0,003423
Erro	0,000062
Total	0,639760
Fonte	Contribuição
Modelo	99,99%
Linear	97,13%
Energia de deposição (J/mm)	90,32%
Tipo de resfriamento	2,50%
Frequência de pulsação (Hz)	4,32%
Interações de 2 fatores	2,08%
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,44%
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,00%
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1,64%
Interações de 3 fatores	0,24%
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,24%
Curvatura	0,53%
Erro	0,01%
Total	100,00%
Fonte	SQ (Aj.)
Modelo	0,639698
Linear	0,621425
Energia de deposição (J/mm)	0,577813
Tipo de resfriamento	0,016000
Frequência de pulsação (Hz)	0,027613
Interações de 2 fatores	0,013337
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,002812
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,000013
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,010513
Interações de 3 fatores	0,001513
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,001513
Curvatura	0,003423
Erro	0,000062
Total	
Fonte	QM (Aj.)
Modelo	0,079962

Linear	0,207142
Energia de deposição (J/mm)	0,577813
Tipo de resfriamento	0,016000
Frequência de pulsação (Hz)	0,027613
Interações de 2 fatores	0,004446
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,002812
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,000013
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,010513
Interações de 3 fatores	0,001513
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,001513
Curvatura	0,003423
Erro	0,000062

Total

Fonte	Valor F
Modelo	1279,40
Linear	3314,27
Energia de deposição (J/mm)	9245,00
Tipo de resfriamento	256,00
Frequência de pulsação (Hz)	441,80
Interações de 2 fatores	71,13
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	45,00
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,20
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	168,20
Interações de 3 fatores	24,20
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	24,20
Curvatura	54,76

Erro

Total

Fonte	Valor-P
Modelo	0,022
Linear	0,013
Energia de deposição (J/mm)	0,007
Tipo de resfriamento	0,040
Frequência de pulsação (Hz)	0,030
Interações de 2 fatores	0,087
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,094
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,732
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,049
Interações de 3 fatores	0,128
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,128
Curvatura	0,086

Erro

Total

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Altura média (mm)} = & 2,03125 + 0,26875 \text{ Energia de deposição (J/mm)} \\
 & + 0,04000 \text{ Tipo de resfriamento} + 0,05875 \text{ Frequência de pulsação (Hz)} \\
 & - 0,01875 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento} \\
 & + 0,00125 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)} \\
 & + 0,03625 \text{ Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)} \\
 & + 0,01375 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de} \\
 & \text{pulsação (Hz)} - 0,04625 \text{ Pt Ct}
 \end{aligned}$$

APÊNDICE G: REGRESSÃO FATORIAL: LARGURA MÉDIA (MM) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	
Constante		
Energia de deposição (J/mm)	2,95500	
Tipo de resfriamento	0,02400	
Frequência de pulsação (Hz)	-0,07500	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	-0,36500	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	-0,06000	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,11500	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,03000	
Pt Ct		
Termo	Coef	
Constante	7,53500	
Energia de deposição (J/mm)	1,47750	
Tipo de resfriamento	0,01200	
Frequência de pulsação (Hz)	-0,03750	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	-0,18250	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	-0,03000	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,05750	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,01500	
Pt Ct	-0,6050	
Termo	EP de Coef	
Constante	0,00671	
Energia de deposição (J/mm)	0,00671	
Tipo de resfriamento	0,00600	
Frequência de pulsação (Hz)	0,00671	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,00671	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,00671	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,00671	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,00671	
Pt Ct	0,0150	
Termo	IC de 95%	
Constante	(7,44976; 7,62024)	
Energia de deposição (J/mm)	(1,39226; 1,56274)	
Tipo de resfriamento	(-0,06424; 0,08824)	
Frequência de pulsação (Hz)	(-0,12274; 0,04774)	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	(-0,26774; -0,09726)	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	(-0,11524; 0,05524)	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	(-0,02774; 0,14274)	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	(-0,07024; 0,10024)	
Pt Ct	(-0,7956; -0,4144)	
Termo	Valor-T	
Constante	1123,25	
Energia de deposição (J/mm)	220,25	
Tipo de resfriamento	2,00	
Frequência de pulsação (Hz)	-5,59	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	-27,21	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	-4,47	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	8,57	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	2,24	
Pt Ct	-40,33	
Termo	Valor-P	VIF
Constante	0,001	
Energia de deposição (J/mm)	0,003	1,00
Tipo de resfriamento	0,295	1,00
Frequência de pulsação (Hz)	0,113	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,023	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,140	1,00
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,074	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,268	1,00

Pt Ct

0,016 1,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
0,0189737	100,00%	99,98%	0,117	99,36%	*	-50,92

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq
Modelo	8	18,3643
Linear	3	17,4767
Energia de deposição (J/mm)	1	17,4641
Tipo de resfriamento	1	0,0014
Frequência de pulsação (Hz)	1	0,0113
Interações de 2 fatores	3	0,3001
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	1	0,2665
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	1	0,0072
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1	0,0265
Interações de 3 fatores	1	0,0018
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1	0,0018
Curvatura	1	0,5856
Erro	1	0,0004
Total	9	18,3646
Fonte	Contribuição	
Modelo	100,00%	
Linear	95,17%	
Energia de deposição (J/mm)	95,10%	
Tipo de resfriamento	0,01%	
Frequência de pulsação (Hz)	0,06%	
Interações de 2 fatores	1,63%	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	1,45%	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,04%	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,14%	
Interações de 3 fatores	0,01%	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,01%	
Curvatura	3,19%	
Erro	0,00%	
Total	100,00%	
Fonte	SQ (Aj.)	
Modelo	18,3643	
Linear	17,4767	
Energia de deposição (J/mm)	17,4641	
Tipo de resfriamento	0,0014	
Frequência de pulsação (Hz)	0,0113	
Interações de 2 fatores	0,3001	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,2665	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,0072	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,0265	
Interações de 3 fatores	0,0018	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,0018	
Curvatura	0,5856	
Erro	0,0004	
Total		
Fonte	QM (Aj.)	
Modelo	2,2955	
Linear	5,8256	
Energia de deposição (J/mm)	17,4641	
Tipo de resfriamento	0,0014	
Frequência de pulsação (Hz)	0,0113	
Interações de 2 fatores	0,1000	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,2665	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,0072	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,0265	
Interações de 3 fatores	0,0018	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,0018	
Curvatura	0,5856	
Erro	0,0004	
Total		
Fonte	Valor F	
Modelo	6376,49	

Linear	16182,17
Energia de deposição (J/mm)	48511,25
Tipo de resfriamento	4,00
Frequência de pulsação (Hz)	31,25
Interações de 2 fatores	277,87
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	740,14
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	20,00
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	73,47
Interações de 3 fatores	5,00
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	5,00
Curvatura	1626,78
Erro	
Total	
Fonte	Valor-P
Modelo	0,010
Linear	0,006
Energia de deposição (J/mm)	0,003
Tipo de resfriamento	0,295
Frequência de pulsação (Hz)	0,113
Interações de 2 fatores	0,044
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,023
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,140
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,074
Interações de 3 fatores	0,268
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,268
Curvatura	0,016
Erro	
Total	

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Largura média (mm)} = & 7,53500 + 1,47750 \text{ Energia de deposição (J/mm)} \\
 & + 0,01200 \text{ Tipo de resfriamento} - 0,03750 \text{ Frequência de pulsação (Hz)} \\
 & - 0,18250 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento} \\
 & - 0,03000 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)} \\
 & + 0,05750 \text{ Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)} \\
 & + 0,01500 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de} \\
 & \text{pulsação (Hz)} - 0,6050 \text{ Pt Ct}
 \end{aligned}$$

APÊNDICE H: TABELAS DOS DADOS TRATADOS DAS TAXAS DE RESFRIAMENTOS T1, T2 E T3.

T1							
CP	Temperatura de pico (°C)	Temperatura 324°C	Tempo (s)	Temperatura 200°C	Tempo (s)	Taxa de resfriamento (°C/s)	Diferença (s)
CP1	416,7	324	19,30	200	36,90	7,05	17,60
CP2	397,2	324	28,50	200	156,80	0,97	128,30
CP3	377,1	324	17,40	200	62,70	2,74	45,30
CP4	351,4	324	26,40	200	146,50	1,03	120,10
CP5	389,95	324	21,00	200	27,90	17,97	6,90
CP6	493,16	324	49,80	200	62,00	10,16	12,20
CP7	324,82	324	18,84	200	28,20	13,25	9,36
CP8	338,47	324	28,70	200	38,70	12,40	10,00
CP9	351,1	324	42,50	200	93,10	2,45	50,60
CP10	576,58	324	20,07	200	26,70	18,70	6,63
T2							
CP	Temperatura de pico (°C)	Temperatura 324°C	Tempo (s)	Temperatura 200°C	Tempo (s)	Taxa de resfriamento (°C/s)	Diferença (s)
CP1	C23 - 386	324,05	50,77	200,91	100,75	2,5	49,98
CP2	550,6	324,1	110,06	200	202,77	1,3	92,71
CP3	619	324,07	47,06	200	82,62	3,5	35,56
CP4	548,3	324,01	119,04	200,06	215,39	1,3	96,35
CP5	364,5	324,08	40,92	200,19	73,83	3,8	32,91
CP6	479,2	324,07	92,97	200	141,82	2,5	48,85
CP7	418,6	324,09	35,47	218	68,93	3,2	33,46
CP8	434,1	324,9	20,34	200,79	107,54	1,4	87,2
CP9	469,3	324,65	20,17	200,77	136,42	1,1	116,25
CP10	531,7	324,02	70,88	200,18	107,87	3,3	36,99

T3							
CP	Temperatura de pico (°C)	Temperatura 324°C	Tempo (s)	Temperatura 200°C	Tempo (s)	Taxa de resfriamento (°C/s)	Diferença (s)
CP1*	-	-	-	-	-	-	-
CP2	740	324,07	100,07	200	194,21	1,3	94,14
CP3	489	324,06	61,93	200,18	126,52	1,9	64,59
CP4	643	324,04	109,23	200	217,77	1,1	108,54
CP5	602	324,01	60,39	200,06	107,76	2,6	47,37
CP6	520	324,12	92,1	200	166,13	1,7	74,03
CP7	487	324,12	50,46	200,96	95,15	2,8	44,69
CP8	456	324,02	93,08	200,89	167,37	1,7	74,29
CP9	563	324,01	80,53	200,96	165,82	1,4	85,29
CP10	496	324,07	71,5	200,98	130,43	2,1	58,93

Nota: * dado não coletado.

APÊNDICE I: REGRESSÃO FATORIAL: TAXA DE RESFRIAMENTO T1 (°C/S) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef
Constante		8,15
Energia de deposição (J/mm)	-4,10	-2,05
Tipo de resfriamento	-11,66	-5,83
Frequência de pulsação (Hz)	1,65	0,83
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,20	0,10
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	-2,85	-1,42
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,45	0,23
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,65	0,32
Pt Ct		2,40

Termo	EP de Coef	IC de 95%
Constante	1,30	(-8,33; 24,63)
Energia de deposição (J/mm)	1,30	(-18,53; 14,43)
Tipo de resfriamento	1,16	(-20,57; 8,91)
Frequência de pulsação (Hz)	1,30	(-15,65; 17,30)
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	1,30	(-16,38; 16,58)
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	1,30	(-17,90; 15,05)
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1,30	(-16,25; 16,70)
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1,30	(-16,15; 16,80)
Pt Ct	2,90	(-34,45; 39,25)

Termo	Valor-T
Constante	6,28
Energia de deposição (J/mm)	-1,58
Tipo de resfriamento	-5,03
Frequência de pulsação (Hz)	0,64
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,08
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	-1,10
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,17
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,25
Pt Ct	0,83

Termo	Valor-P	VIF
Constante	0,100	
Energia de deposição (J/mm)	0,359	1,00
Tipo de resfriamento	0,125	1,00
Frequência de pulsação (Hz)	0,639	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,951	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,470	1,00
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,891	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,844	1,00
Pt Ct	0,560	1,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
3,66824	96,79%	71,11%	4373,2	0,00%	*	54,37

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq
Modelo	8	405,745
Linear	3	378,954
Energia de deposição (J/mm)	1	33,620
Tipo de resfriamento	1	339,889
Frequência de pulsação (Hz)	1	5,445
Interações de 2 fatores	3	16,730
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	1	0,080
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	1	16,245
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1	0,405
Interações de 3 fatores	1	0,845
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1	0,845
Curvatura	1	9,216

Erro	1	13,456
Total	9	419,201
Fonte	Contribuição	
Modelo		96,79%
Linear		90,40%
Energia de deposição (J/mm)		8,02%
Tipo de resfriamento		81,08%
Frequência de pulsação (Hz)		1,30%
Interações de 2 fatores		3,99%
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento		0,02%
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)		3,88%
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)		0,10%
Interações de 3 fatores		0,20%
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)		0,20%
Curvatura		2,20%
Erro		3,21%
Total		100,00%
Fonte	SQ (Aj.)	
Modelo		405,745
Linear		378,954
Energia de deposição (J/mm)		33,620
Tipo de resfriamento		339,889
Frequência de pulsação (Hz)		5,445
Interações de 2 fatores		16,730
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento		0,080
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)		16,245
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)		0,405
Interações de 3 fatores		0,845
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)		0,845
Curvatura		9,216
Erro		13,456
Total		
Fonte	QM (Aj.)	
Modelo		50,718
Linear		126,318
Energia de deposição (J/mm)		33,620
Tipo de resfriamento		339,889
Frequência de pulsação (Hz)		5,445
Interações de 2 fatores		5,577
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento		0,080
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)		16,245
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)		0,405
Interações de 3 fatores		0,845
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)		0,845
Curvatura		9,216
Erro		13,456
Total		
Fonte	Valor F	
Modelo		3,77
Linear		9,39
Energia de deposição (J/mm)		2,50
Tipo de resfriamento		25,26
Frequência de pulsação (Hz)		0,40
Interações de 2 fatores		0,41
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento		0,01
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)		1,21
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)		0,03
Interações de 3 fatores		0,06
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)		0,06
Curvatura		0,68
Erro		
Total		
Fonte	Valor-P	
Modelo		0,380
Linear		0,234
Energia de deposição (J/mm)		0,359
Tipo de resfriamento		0,125
Frequência de pulsação (Hz)		0,639

Interações de 2 fatores	0,782
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,951
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,470
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,891
Interações de 3 fatores	0,844
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,844
Curvatura	0,560
Erro	
Total	

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Taxa de resfriamento T1 (}^{\circ}\text{C/s)} &= 8,15 - 2,05 \text{ Energia de deposição (J/mm)} \\
 &- 5,83 \text{ Tipo de resfriamento} \\
 &+ 0,83 \text{ Frequência de pulsação (Hz)} \\
 &+ 0,10 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento} \\
 &- 1,42 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)} \\
 &+ 0,23 \text{ Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)} \\
 &+ 0,32 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)} + 2,40 \text{ Pt Ct}
 \end{aligned}$$

APÊNDICE J: REGRESSÃO FATORIAL: TAXA DE RESFRIAMENTO T1 (°C/S) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL

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	IC de 95%			
Constante		8,630	0,808	(6,720; 10,540)	10,68	0,000	
Energia de deposição (J/mm)	-4,100	-2,050	0,903	(-4,186; 0,086)	-2,27	0,058	1,00
Tipo de resfriamento	-11,660	-5,830	0,808	(-7,740; -3,920)	-7,22	0,000	1,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
2,55488	89,10%	85,99%	88,8160	78,81%	59,57	52,78

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F
Modelo	2	373,509	89,10%	373,509	186,754	28,61
Linear	2	373,509	89,10%	373,509	186,754	28,61
Energia de deposição (J/mm)	1	33,620	8,02%	33,620	33,620	5,15
Tipo de resfriamento	1	339,889	81,08%	339,889	339,889	52,07
Erro	7	45,692	10,90%	45,692	6,527	
Curvatura	1	9,216	2,20%	9,216	9,216	1,52
Falta de ajuste	6	36,476	8,70%	36,476	6,079	*
Total	9	419,201	100,00%			
Fonte	Valor-P					
Modelo	0,000					
Linear	0,000					
Energia de deposição (J/mm)	0,058					
Tipo de resfriamento	0,000					
Erro						
Curvatura	0,264					
Falta de ajuste	*					
Total						

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Taxa de resfriamento T1 (°C/s) = 8,630 - 2,050 Energia de deposição (J/mm)
- 5,830 Tipo de resfriamento

APÊNDICE L: REGRESSÃO FATORIAL: TAXA DE RESFRIAMENTO T2 (°C/S) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL

Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef
Constante		2,438
Energia de deposição (J/mm)	-1,625	-0,813
Tipo de resfriamento	-0,900	-0,450
Frequência de pulsação (Hz)	0,175	0,087
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	-0,075	-0,037
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,375	0,188
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	-0,675	-0,337
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,125	0,062
Pt Ct		-0,237
Termo	EP de	Coef
Constante		0,363
Energia de deposição (J/mm)		0,363
Tipo de resfriamento		0,325
Frequência de pulsação (Hz)		0,363
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento		0,363
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)		0,363
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)		0,363
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)		0,363
Pt Ct		0,813
Termo	IC de 95%	
Constante	(-2,179; 7,054)	
Energia de deposição (J/mm)	(-5,429; 3,804)	
Tipo de resfriamento	(-4,580; 3,680)	
Frequência de pulsação (Hz)	(-4,529; 4,704)	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	(-4,654; 4,579)	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	(-4,429; 4,804)	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	(-4,954; 4,279)	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	(-4,554; 4,679)	
Pt Ct	(-10,561; 10,086)	
Termo	Valor-T	
Constante	6,71	
Energia de deposição (J/mm)	-2,24	
Tipo de resfriamento	-1,38	
Frequência de pulsação (Hz)	0,24	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	-0,10	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,52	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	-0,93	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,17	
Pt Ct	-0,29	
Termo	Valor-P	VIF
Constante	0,094	
Energia de deposição (J/mm)	0,268	1,00
Tipo de resfriamento	0,398	1,00
Frequência de pulsação (Hz)	0,850	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,935	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,697	1,00
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,523	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,892	1,00
Pt Ct	0,819	1,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
1,02774	89,17%	2,49%	343,281	0,00%	*	28,93

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq
Modelo	8	8,69275

Linear	3	7,36750
Energia de deposição (J/mm)	1	5,28125
Tipo de resfriamento	1	2,02500
Frequência de pulsação (Hz)	1	0,06125
Interações de 2 fatores	3	1,20375
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	1	0,01125
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	1	0,28125
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1	0,91125
Interações de 3 fatores	1	0,03125
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1	0,03125
Curvatura	1	0,09025
Erro	1	1,05625
Total	9	9,74900
Fonte	Contribuição	
Modelo	89,17%	
Linear	75,57%	
Energia de deposição (J/mm)	54,17%	
Tipo de resfriamento	20,77%	
Frequência de pulsação (Hz)	0,63%	
Interações de 2 fatores	12,35%	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,12%	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	2,88%	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	9,35%	
Interações de 3 fatores	0,32%	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,32%	
Curvatura	0,93%	
Erro	10,83%	
Total	100,00%	
Fonte	SQ (Aj.)	
Modelo	8,69275	
Linear	7,36750	
Energia de deposição (J/mm)	5,28125	
Tipo de resfriamento	2,02500	
Frequência de pulsação (Hz)	0,06125	
Interações de 2 fatores	1,20375	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,01125	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,28125	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,91125	
Interações de 3 fatores	0,03125	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,03125	
Curvatura	0,09025	
Erro	1,05625	
Total		
Fonte	QM (Aj.)	
Modelo	1,08659	
Linear	2,45583	
Energia de deposição (J/mm)	5,28125	
Tipo de resfriamento	2,02500	
Frequência de pulsação (Hz)	0,06125	
Interações de 2 fatores	0,40125	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,01125	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,28125	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,91125	
Interações de 3 fatores	0,03125	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,03125	
Curvatura	0,09025	
Erro	1,05625	
Total		
Fonte	Valor F	
Modelo	1,03	
Linear	2,33	
Energia de deposição (J/mm)	5,00	
Tipo de resfriamento	1,92	
Frequência de pulsação (Hz)	0,06	
Interações de 2 fatores	0,38	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,01	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,27	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,86	

Interações de 3 fatores	0,03
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,03
Curvatura	0,09

Erro

Total

Fonte	Valor-P
Modelo	0,647
Linear	0,441
Energia de deposição (J/mm)	0,268
Tipo de resfriamento	0,398
Frequência de pulsação (Hz)	0,850
Interações de 2 fatores	0,797
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,935
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,697
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,523
Interações de 3 fatores	0,892
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,892
Curvatura	0,819
Erro	
Total	

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Taxa de resfriamento T2 (}^{\circ}\text{C/s)} &= 2,438 - 0,813 \text{ Energia de deposição (J/mm)} \\
 &\quad - 0,450 \text{ Tipo de resfriamento} \\
 &\quad + 0,087 \text{ Frequência de pulsação (Hz)} \\
 &\quad - 0,037 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento} \\
 &\quad + 0,188 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)} \\
 &\quad - 0,337 \text{ Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)} \\
 &\quad + 0,062 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)} - 0,237 \text{ Pt Ct}
 \end{aligned}$$

APÊNDICE M: REGRESSÃO FATORIAL: TAXA DE RESFRIAMENTO T2 (°C/S) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL

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	IC de 95%			
Constante		2,390	0,187	(1,948; 2,832)	12,79	0,000	
Energia de deposição (J/mm)	-1,625	-0,813	0,209	(-1,306; -0,319)	-3,89	0,006	1,00
Tipo de resfriamento	-0,900	-0,450	0,187	(-0,892; -0,008)	-2,41	0,047	1,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AIcC	BIC
0,590732	74,94%	67,78%	4,78138	50,96%	30,28	23,49

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F
Modelo	2	7,30625	74,94%	7,30625	3,65312	10,47
Linear	2	7,30625	74,94%	7,30625	3,65312	10,47
Energia de deposição (J/mm)	1	5,28125	54,17%	5,28125	5,28125	15,13
Tipo de resfriamento	1	2,02500	20,77%	2,02500	2,02500	5,80
Erro	7	2,44275	25,06%	2,44275	0,34896	
Curvatura	1	0,09025	0,93%	0,09025	0,09025	0,23
Falta de ajuste	6	2,35250	24,13%	2,35250	0,39208	*
Total	9	9,74900	100,00%			

Fonte	Valor-P
Modelo	0,008
Linear	0,008
Energia de deposição (J/mm)	0,006
Tipo de resfriamento	0,047
Erro	
Curvatura	0,648
Falta de ajuste	*
Total	

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Taxa de resfriamento T2 (°C/s) = 2,390 - 0,813 Energia de deposição (J/mm)
- 0,450 Tipo de resfriamento

APÊNDICE N: REGRESSÃO FATORIAL: TAXA DE RESFRIAMENTO T3 (°C/S) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL

Método

Linhas não usadas 1

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito
Constante	
Energia de deposição (J/mm)	-0,8000
Tipo de resfriamento	-0,7000
Frequência de pulsação (Hz)	-0,05000
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,2000
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,15000
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,05000
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,05000
Pt Ct	

Termo	Coef	EP de Coef
Constante	1,850	*
Energia de deposição (J/mm)	-0,4000	*
Tipo de resfriamento	-0,3500	*
Frequência de pulsação (Hz)	-0,02500	*
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,1000	*
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,07500	*
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,02500	*
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,02500	*
Pt Ct	-0,1000	*

Termo	IC de 95%	Valor-T
Constante	(*, *)	*
Energia de deposição (J/mm)	(*, *)	*
Tipo de resfriamento	(*, *)	*
Frequência de pulsação (Hz)	(*, *)	*
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	(*, *)	*
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	(*, *)	*
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	(*, *)	*
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	(*, *)	*
Pt Ct	(*, *)	*

Termo	Valor-P	VIF
Constante	*	
Energia de deposição (J/mm)	* 5,17	
Tipo de resfriamento	* 4,44	
Frequência de pulsação (Hz)	* 5,17	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	* 5,17	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	* 5,17	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	* 5,17	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	* 5,17	
Pt Ct	* 1,94	

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
*	100,00%	*	*	*	*	*

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq
Modelo	8	2,64222
Linear	3	2,53490
Energia de deposição (J/mm)	1	1,62367
Tipo de resfriamento	1	0,91055
Frequência de pulsação (Hz)	1	0,00068
Interações de 2 fatores	3	0,08646

Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	1	0,04344
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	1	0,03922
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1	0,00381
Interações de 3 fatores	1	0,01286
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1	0,01286
Curvatura	1	0,00800
Erro	0	*
Total	8	2,64222
Fonte	Contribuição	
Modelo	100,00%	
Linear	95,94%	
Energia de deposição (J/mm)	61,45%	
Tipo de resfriamento	34,46%	
Frequência de pulsação (Hz)	0,03%	
Interações de 2 fatores	3,27%	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	1,64%	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	1,48%	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,14%	
Interações de 3 fatores	0,49%	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,49%	
Curvatura	0,30%	
Erro	*	
Total	100,00%	
Fonte	SQ (Aj.)	
Modelo	2,64222	
Linear	2,50833	
Energia de deposição (J/mm)	0,21333	
Tipo de resfriamento	0,24500	
Frequência de pulsação (Hz)	0,00083	
Interações de 2 fatores	0,07375	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,01333	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,00750	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,00083	
Interações de 3 fatores	0,00083	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,00083	
Curvatura	0,00800	
Erro	*	
Total		
Fonte	QM (Aj.)	
Modelo	0,330278	
Linear	0,836111	
Energia de deposição (J/mm)	0,213333	
Tipo de resfriamento	0,245000	
Frequência de pulsação (Hz)	0,000833	
Interações de 2 fatores	0,024583	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,013333	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,007500	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,000833	
Interações de 3 fatores	0,000833	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,000833	
Curvatura	0,008000	
Erro	*	
Total		
Fonte	Valor F	
Modelo	*	
Linear	*	
Energia de deposição (J/mm)	*	
Tipo de resfriamento	*	
Frequência de pulsação (Hz)	*	
Interações de 2 fatores	*	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	*	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	*	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	*	
Interações de 3 fatores	*	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	*	
Curvatura	*	
Erro		
Total		

Fonte	Valor-P
Modelo	*
Linear	*
Energia de deposição (J/mm)	*
Tipo de resfriamento	*
Frequência de pulsação (Hz)	*
Interações de 2 fatores	*
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	*
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	*
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	*
Interações de 3 fatores	*
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	*
Curvatura	*
Erro	
Total	

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Taxa de resfriamento T3 (}^{\circ}\text{C/s)} = & 1,850 - 0,4000 \text{ Energia de deposição (J/mm)} \\
 & - 0,3500 \text{ Tipo de resfriamento} \\
 & - 0,02500 \text{ Frequência de pulsação (Hz)} \\
 & + 0,1000 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento} \\
 & + 0,07500 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação} \\
 & \text{(Hz)} \\
 & + 0,02500 \text{ Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)} \\
 & + 0,02500 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*F} \\
 & \text{requência de pulsação (Hz)} - 0,1000 \text{ Pt Ct}
 \end{aligned}$$

APÊNDICE N: REGRESSÃO FATORIAL: TAXA DE RESFRIAMENTO T3 (°C/S) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL

* NOTA * Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 1

Seleção Stepwise de Termos

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

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	IC de 95%
Constante		1,8445	0,0390	(1,7443; 1,9448)
Energia de deposição (J/mm)	-0,8364	-0,4182	0,0444	(-0,5324; -0,3039)
Tipo de resfriamento	-0,6709	-0,3355	0,0390	(-0,4357; -0,2352)
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,1636	0,0818	0,0444	(-0,0324; 0,1961)
Termo	Valor-T	Valor-P	VIF	
Constante	47,29	0,000		
Energia de deposição (J/mm)	-9,41	0,000	1,06	
Tipo de resfriamento	-8,60	0,000	1,05	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	1,84	0,125	1,06	

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
0,113458	97,56%	96,10%	0,266127	89,93%	11,08	-7,94

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)
Modelo	3	2,57786	97,56%	2,57786
Linear	2	2,53422	95,91%	2,51548
Energia de deposição (J/mm)	1	1,62367	61,45%	1,13993
Tipo de resfriamento	1	0,91055	34,46%	0,95217
Interações de 2 fatores	1	0,04364	1,65%	0,04364
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	1	0,04364	1,65%	0,04364
Erro	5	0,06436	2,44%	0,06436
Curvatura	1	0,02341	0,89%	0,02341
Falta de ajuste	4	0,04095	1,55%	0,04095
Total	8	2,64222	100,00%	
Fonte	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	
Modelo	0,85929	66,75	0,000	
Linear	1,25774	97,71	0,000	
Energia de deposição (J/mm)	1,13993	88,55	0,000	
Tipo de resfriamento	0,95217	73,97	0,000	
Interações de 2 fatores	0,04364	3,39	0,125	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,04364	3,39	0,125	
Erro	0,01287			
Curvatura	0,02341	2,29	0,205	
Falta de ajuste	0,01024	*	*	
Total				

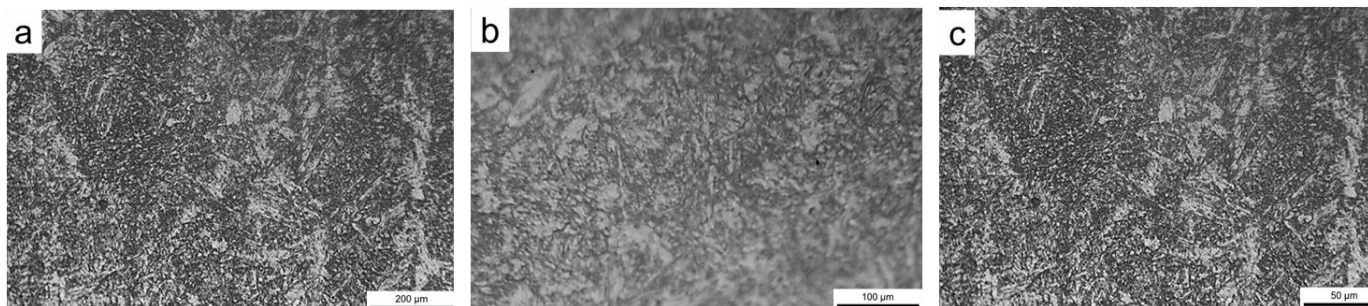
Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Taxa de resfriamento T3 (°C/s) = 1,8445 - 0,4182 Energia de deposição (J/mm)
 - 0,3355 Tipo de resfriamento
 + 0,0818 Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento

APÊNDICE P: FIGURAS DAS MICROESTRUTURAS DAS CAMADAS °6, 19°, 23° E 28° DOS CPS.

Micrografia do CP1 a) 100x, b) 200x e c) 400x, com reagente Nital 2 %.

6° camada



23°

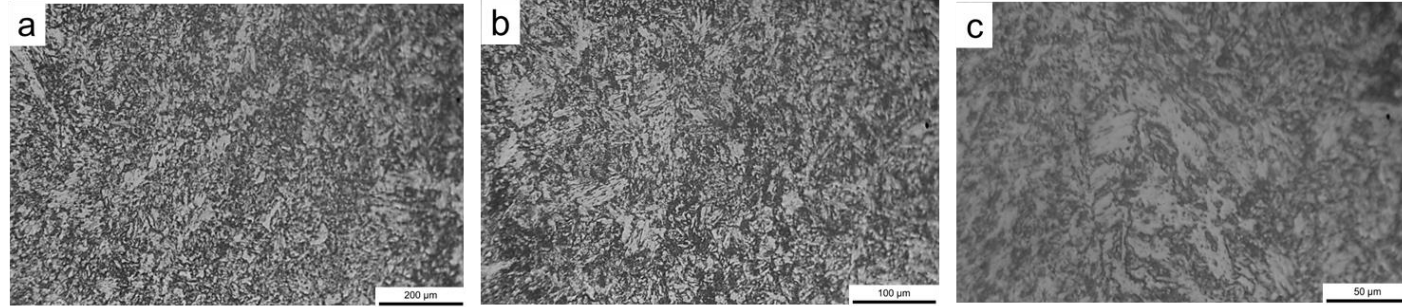


28°

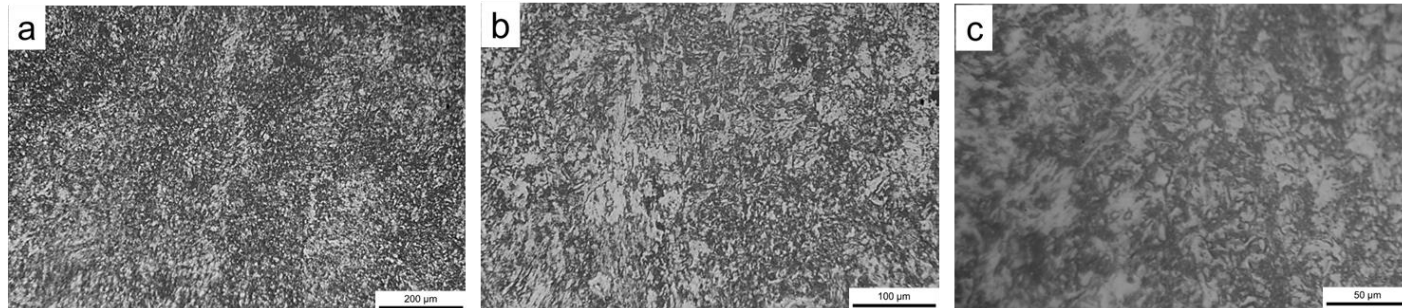


Micrografia do CP2 a) 100x, b) 200x e c) 400x, com reagente Nital 2 %.

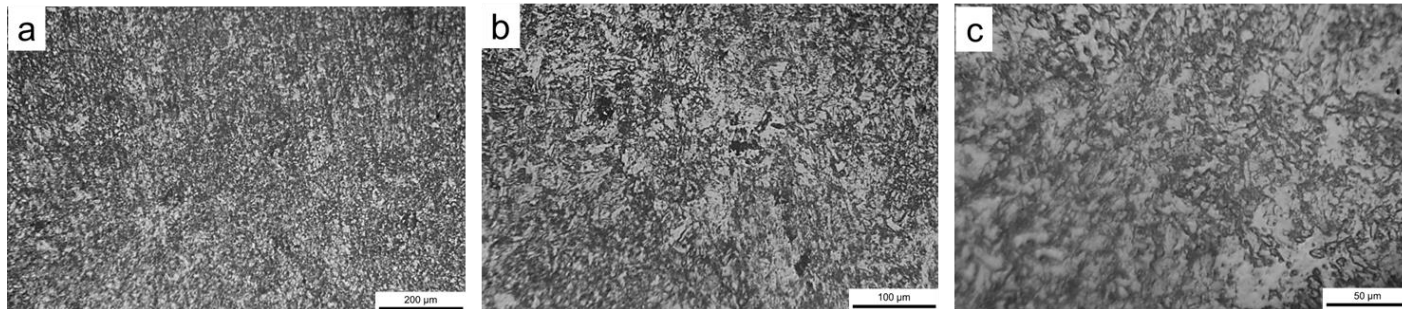
6° camada



19° camada

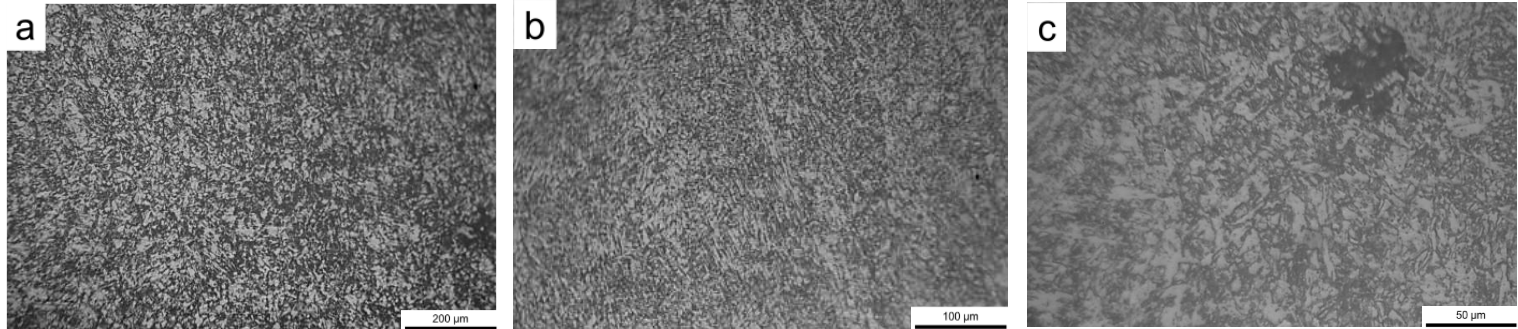


28° camada

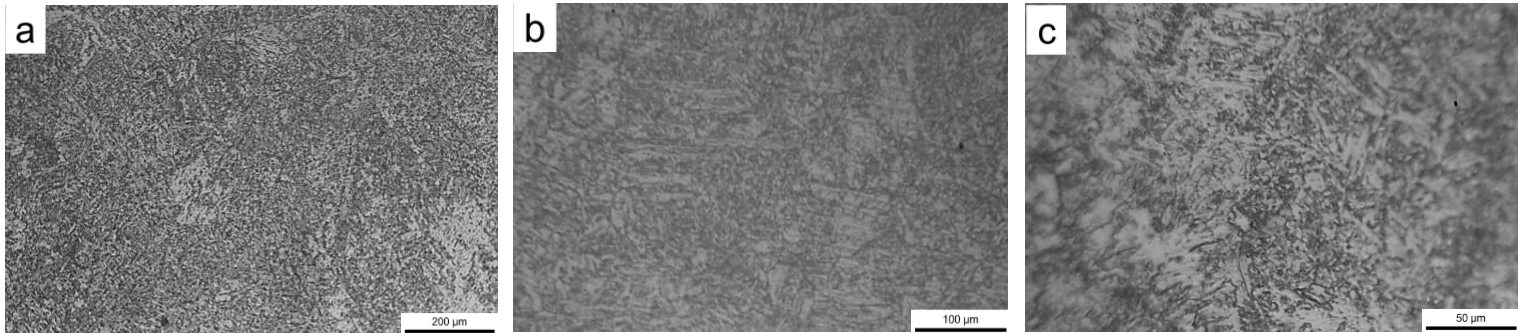


Micrografia do CP3 a) 100x, b) 200x e c) 400x, com reagente Nital 2 %.

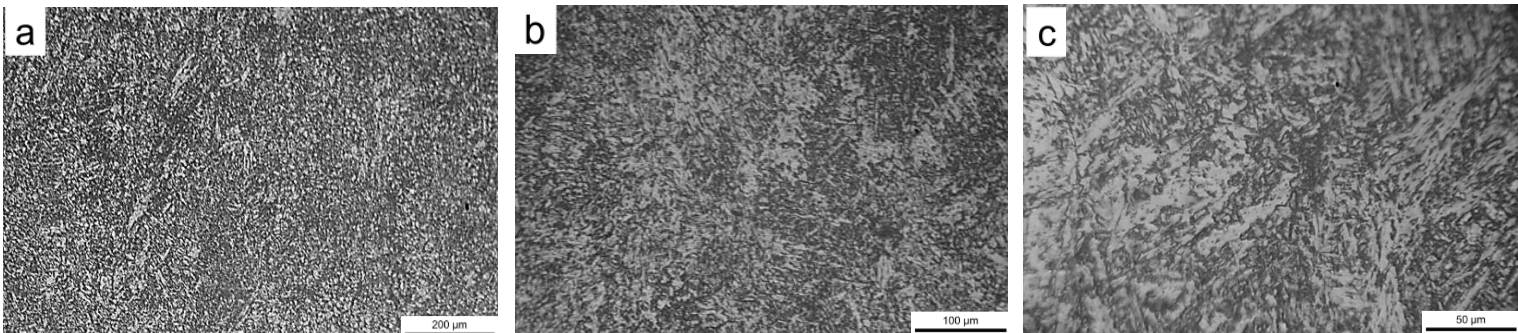
6° camada



19° camada

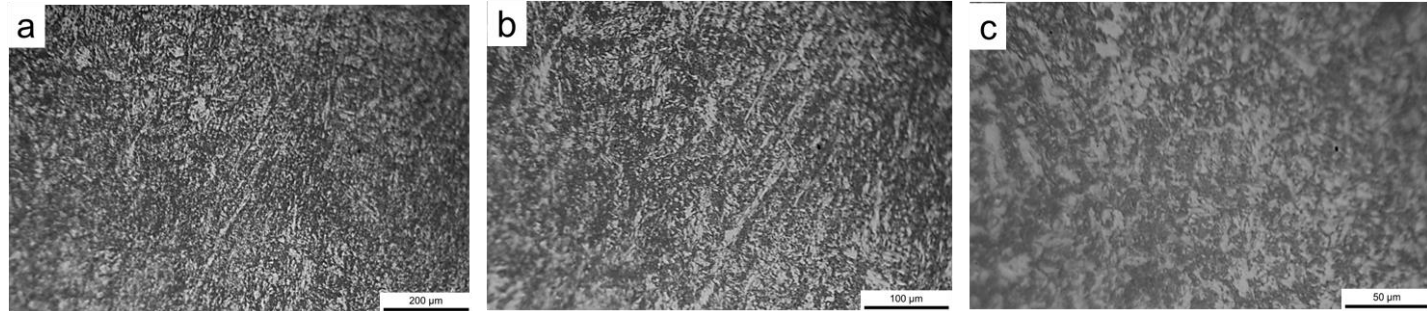


28° camada

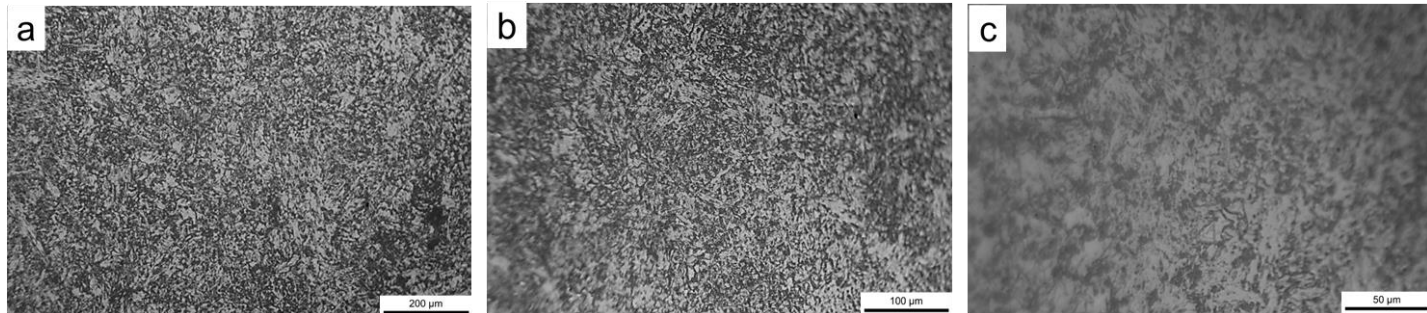


Micrografia do CP4 a) 100x, b) 200x e c) 400x, com reagente Nital 2 %.

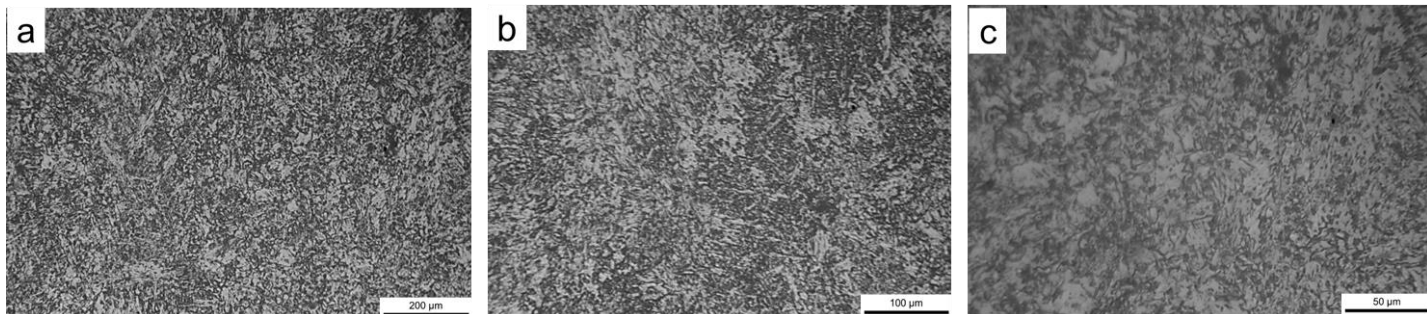
6° camada



19° camada

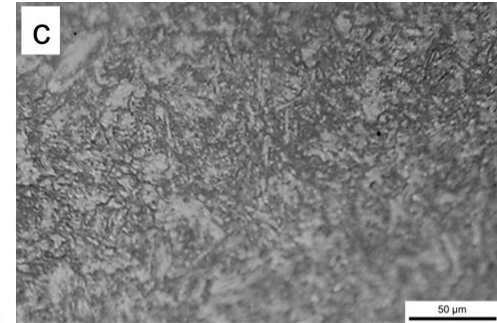
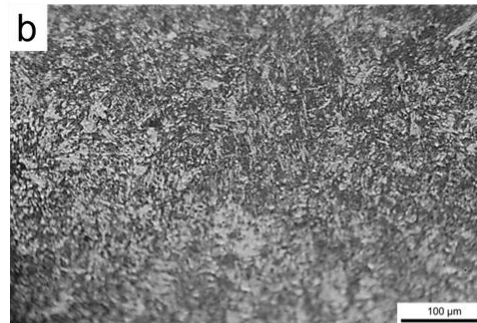
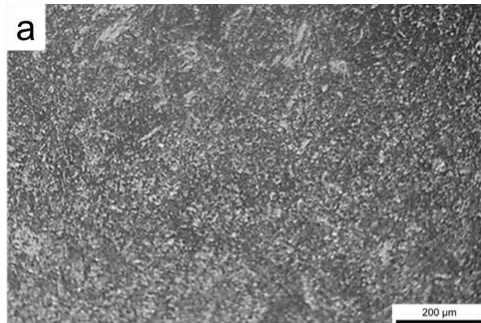


28° camada

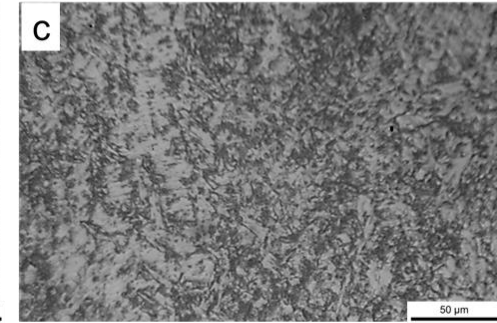
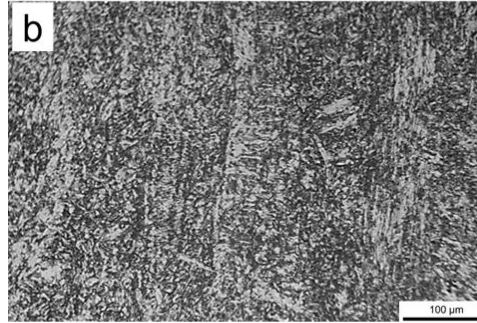
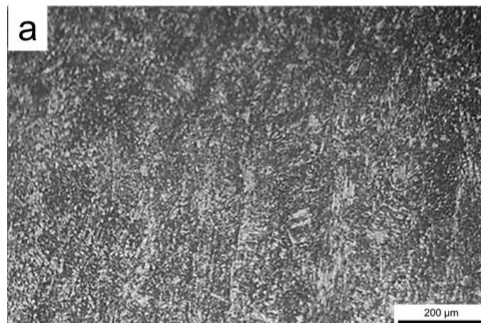


Micrografia do CP5 a) 100x, b) 200x e c) 400x, com reagente Nital 2 %.

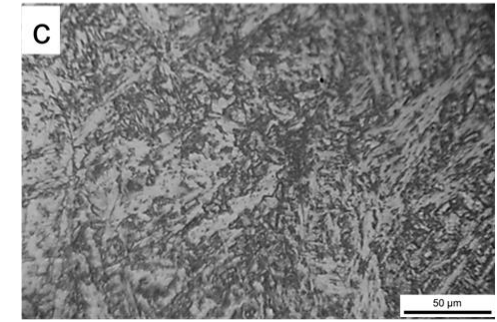
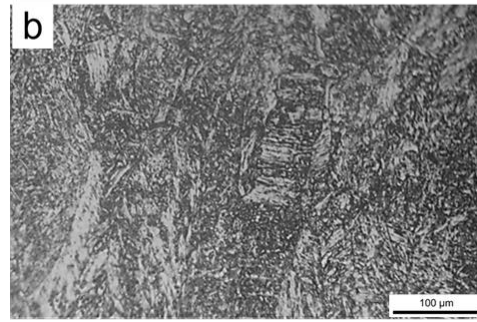
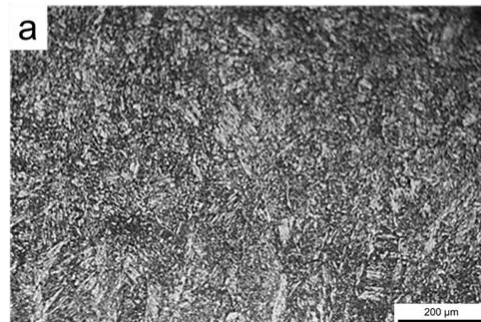
6° camada



19° camada

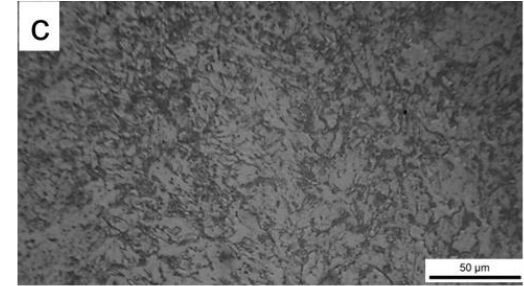
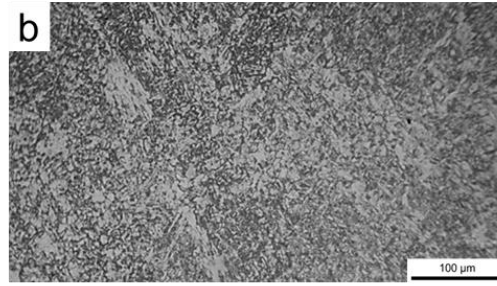
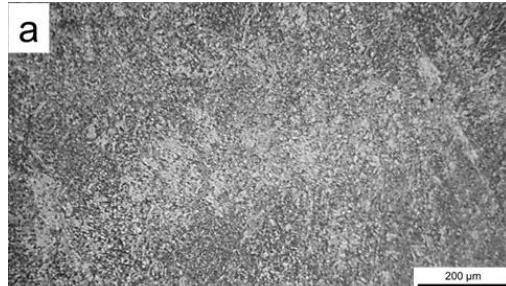


28° camada

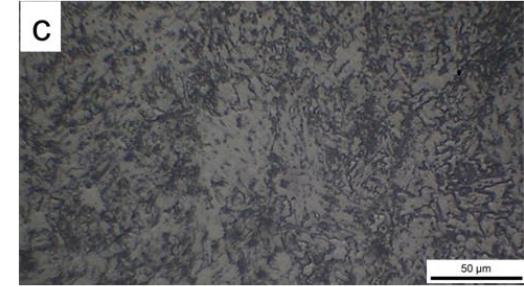
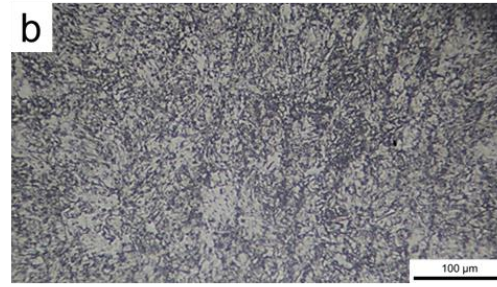


Micrografia do CP6 a) 100x, b) 200x e c) 400x, com reagente

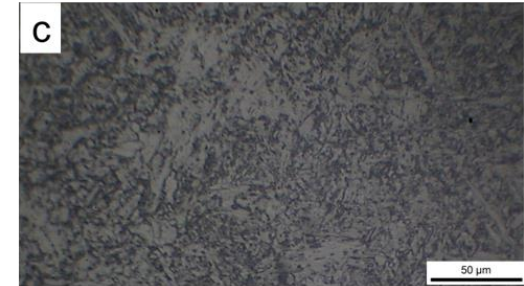
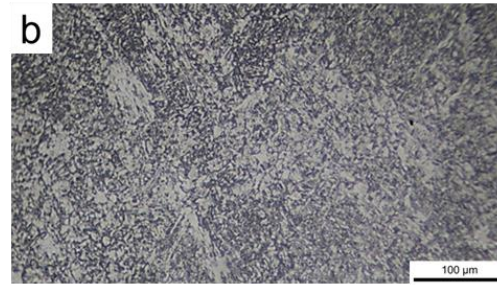
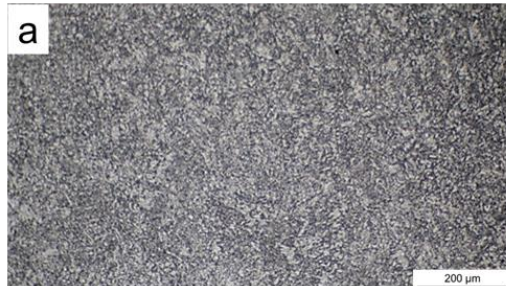
6° camada



19° camada

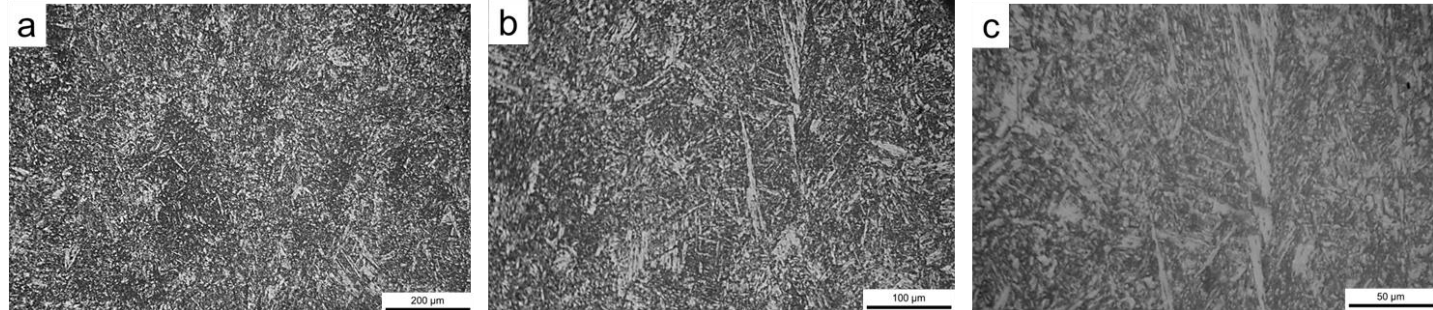


28° camada

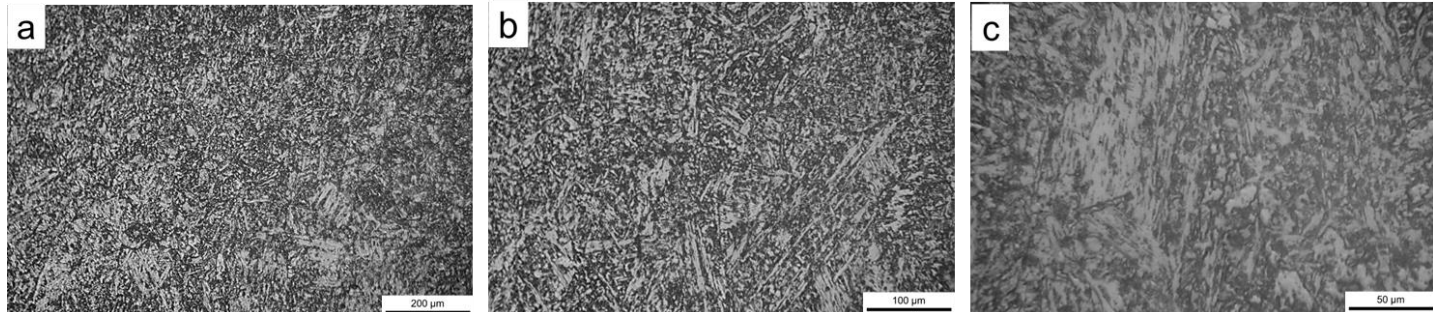


Micrografia do CP7 a) 100x, b) 200x e c) 400x, com reagente Nital 2 %.

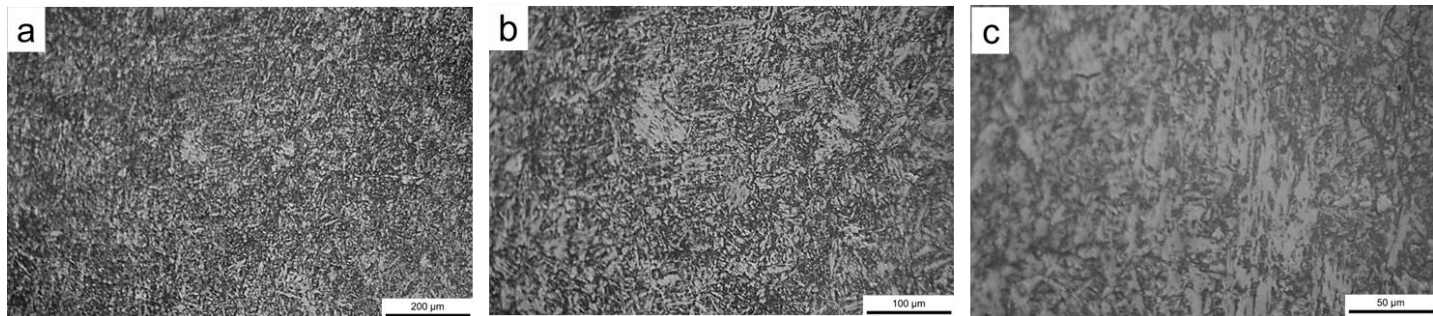
6° camada



19° camada

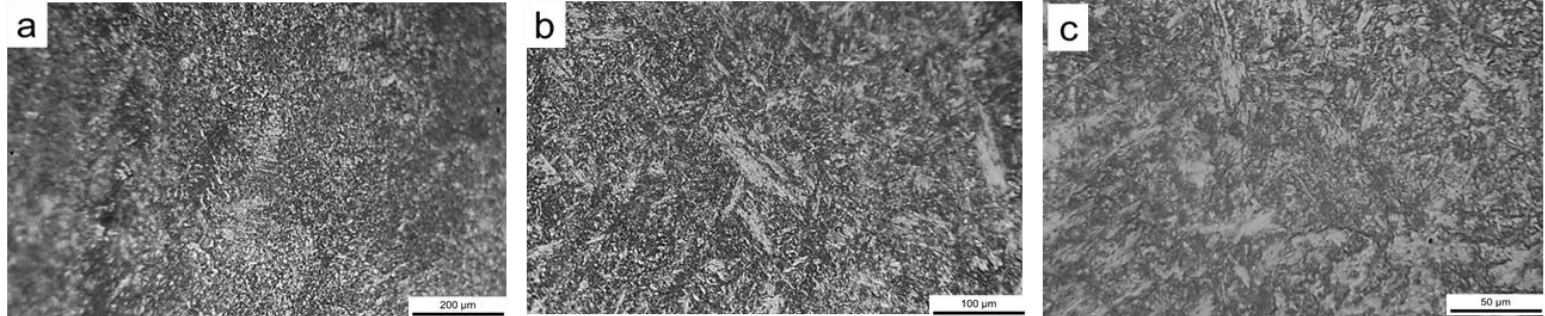


28° camada

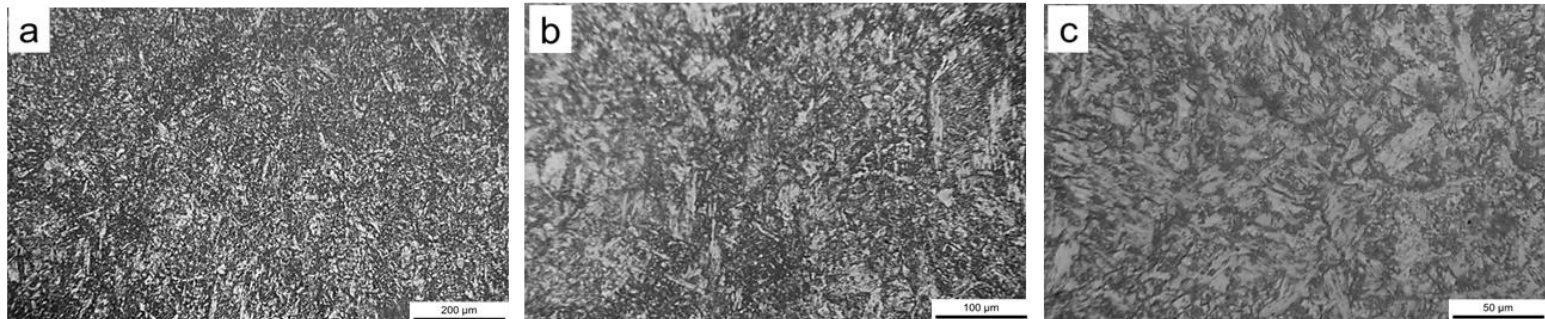


Micrografia do CP8 a) 100x, b) 200x e c) 400x, com reagente Nital 2 %.

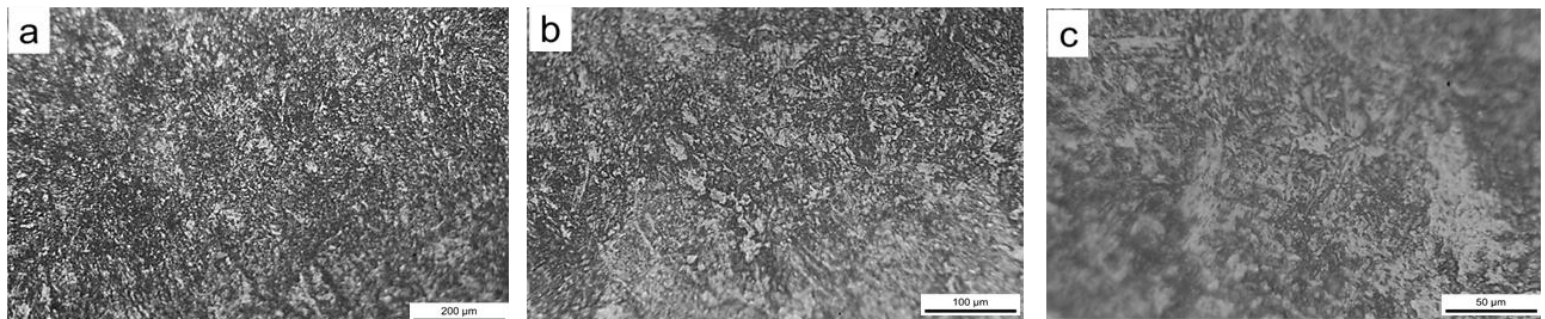
6° camada



19° camada

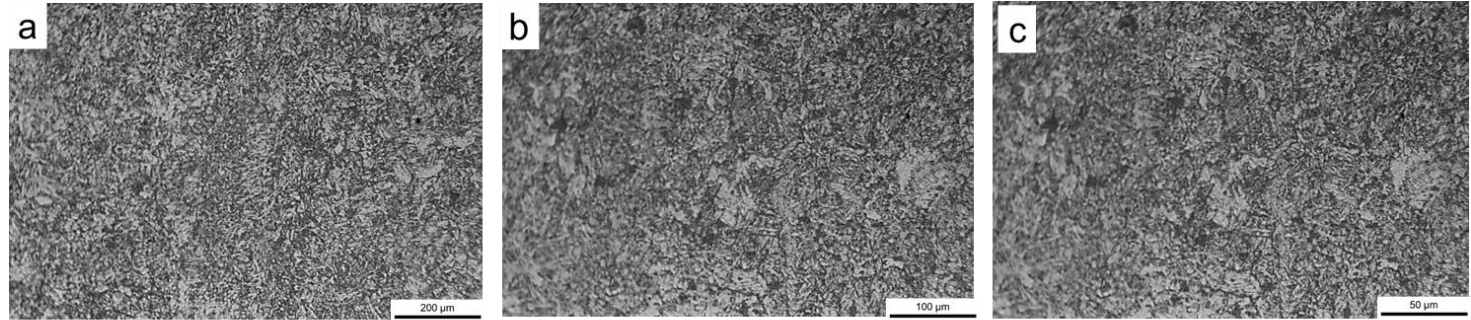


28° camada

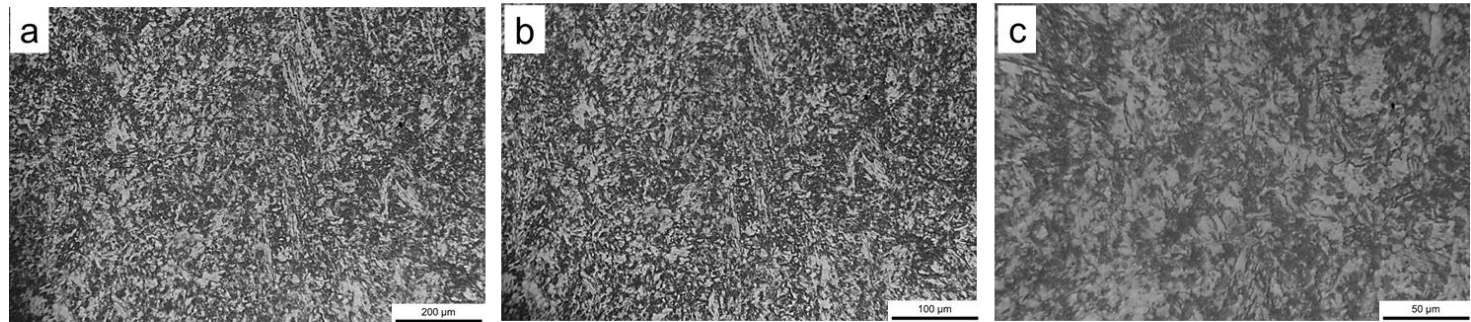


Micrografia do CP9 a) 100x, b) 200x e c) 400x, com reagente Nital 2 %.

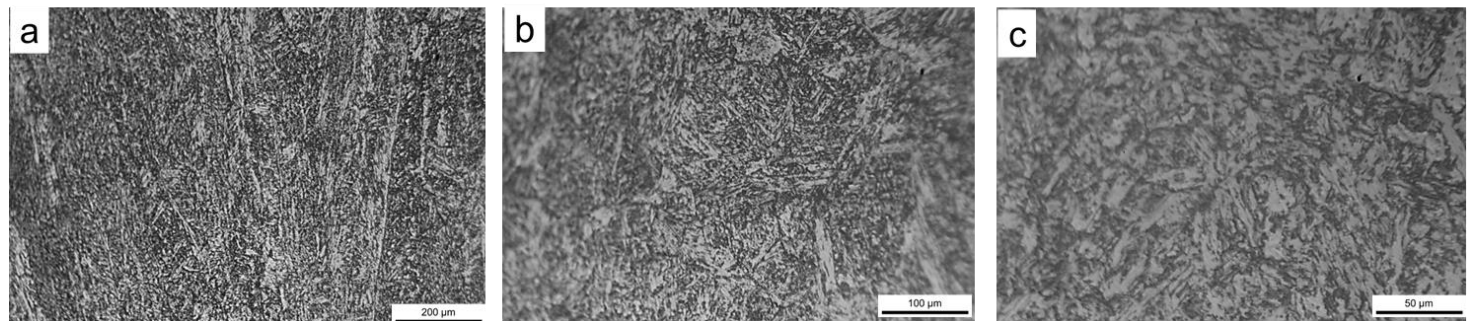
6° camada



19° camada

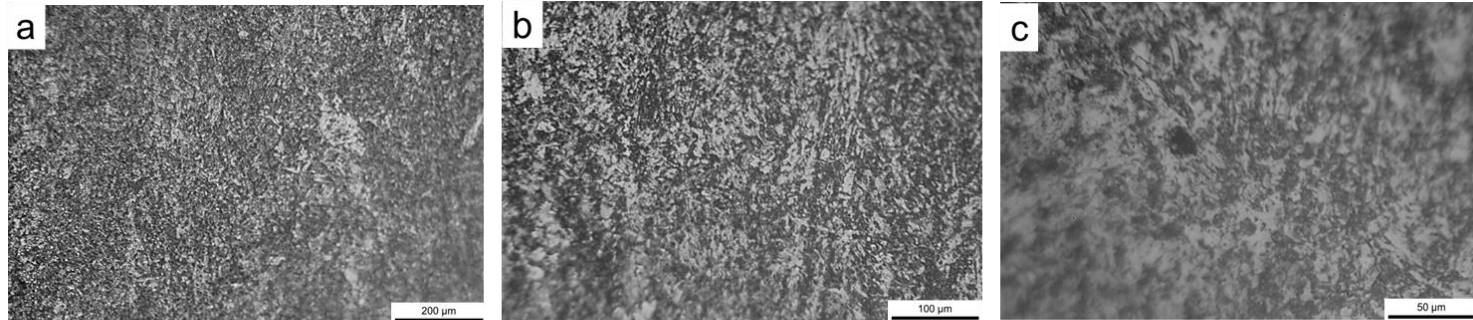


28° camada

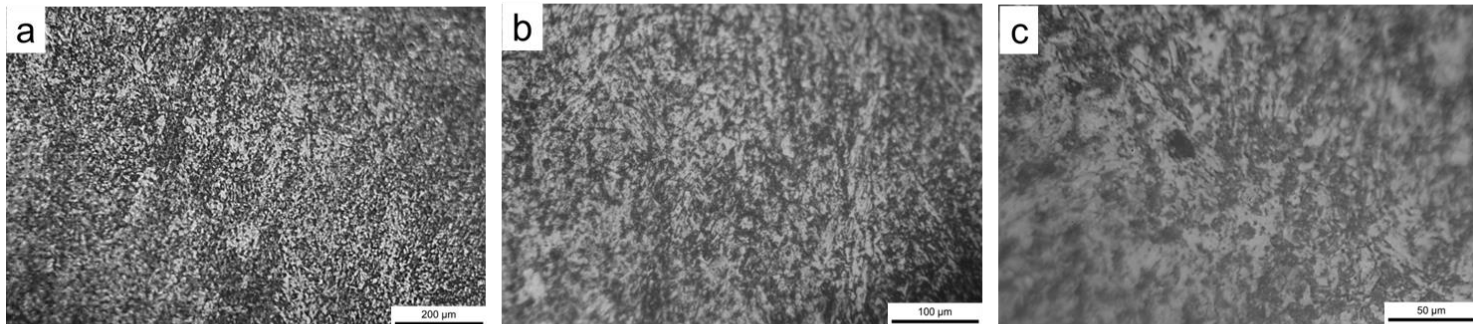


Micrografia do CP10 a) 100x, b) 200x e c) 400x, com reagente Nital 2 %.

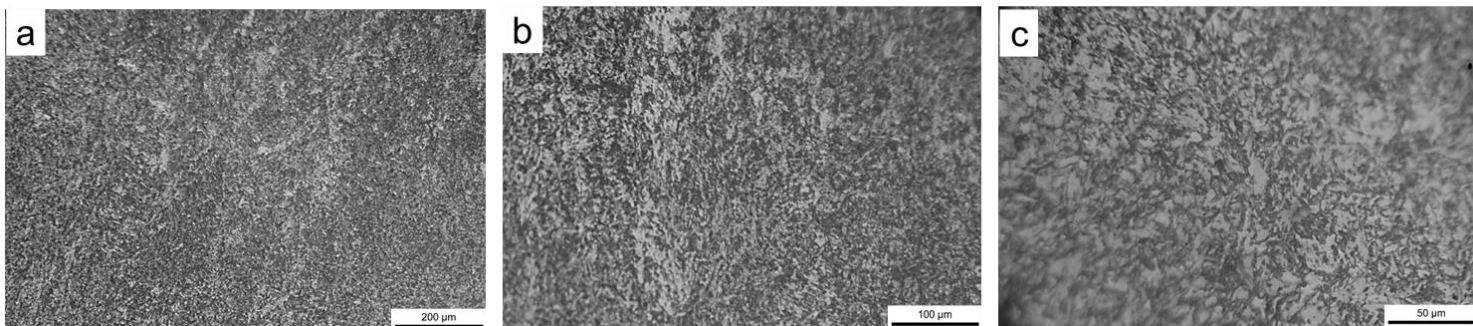
6° camada



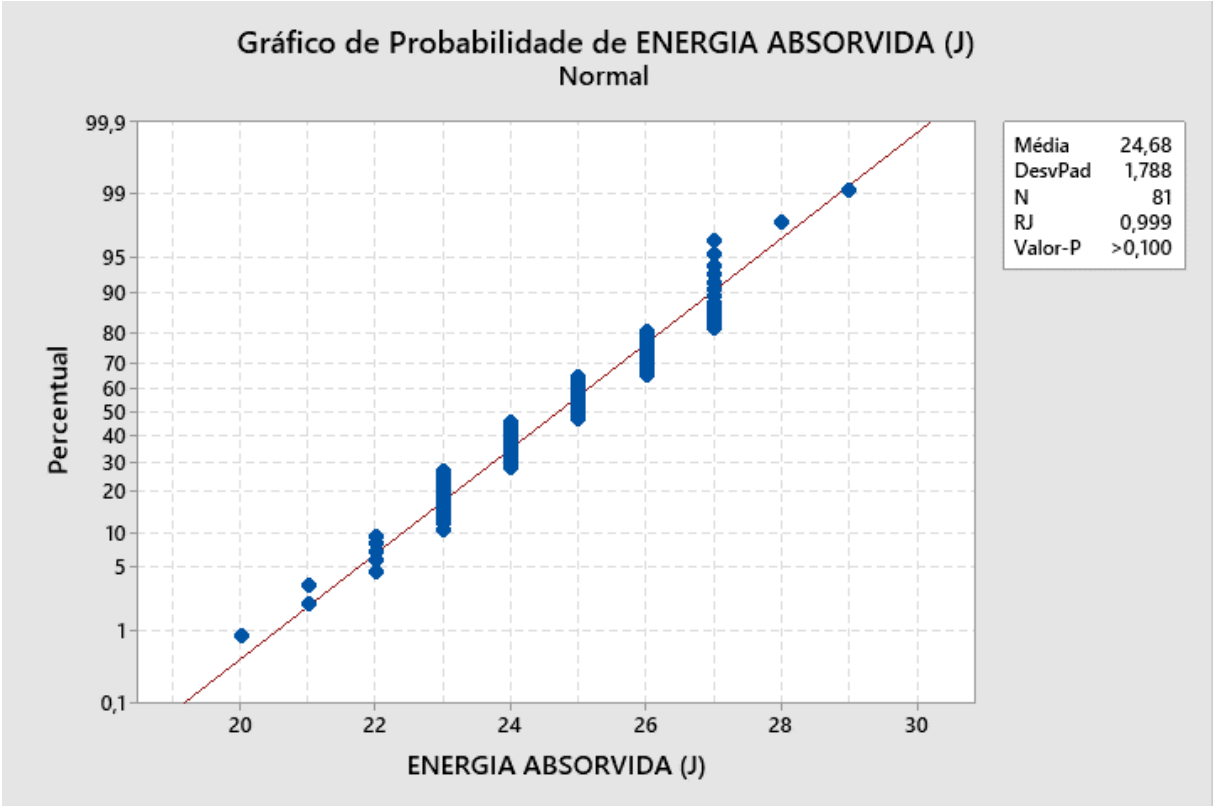
19° camada



28° camada



APÊNDICE O: GRÁFICOS DOS TESTES DE NORMALIDADE PARA OS DADOS DE ENERGIA ABSORVIDA (J)



APÊNDICE Q: REGRESSÃO FATORIAL: ENERGIA DE IMPACTO (J) VERSUS ENERGIA DE DEPOSIÇÃO (J/MM); TIPO DE RESFRIAMENTO; FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO (HZ); PTCENTRAL

Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	
Constante		
Energia de deposição (J/mm)	2,2775	
Tipo de resfriamento	0,4260	
Frequência de pulsação (Hz)	0,3375	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,3875	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	-0,3375	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,5575	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,4425	
Pt Ct		
Termo	Coef	
Constante	24,6412	
Energia de deposição (J/mm)	1,1388	
Tipo de resfriamento	0,2130	
Frequência de pulsação (Hz)	0,1688	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,1938	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	-0,1688	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,2787	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,2213	
Pt Ct	0,8587	
Termo	EP de Coef	
Constante	0,0375	
Energia de deposição (J/mm)	0,0375	
Tipo de resfriamento	0,0335	
Frequência de pulsação (Hz)	0,0375	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,0375	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,0375	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,0375	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,0375	
Pt Ct	0,0838	
Termo	IC de 95%	
Constante	(24,1654; 25,1171)	
Energia de deposição (J/mm)	(0,6629; 1,6146)	
Tipo de resfriamento	(-0,2127; 0,6387)	
Frequência de pulsação (Hz)	(-0,3071; 0,6446)	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	(-0,2821; 0,6696)	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	(-0,6446; 0,3071)	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	(-0,1971; 0,7546)	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	(-0,2546; 0,6971)	
Pt Ct	(-0,2054; 1,9229)	
Termo	Valor-T	
Constante	657,90	
Energia de deposição (J/mm)	30,40	
Tipo de resfriamento	6,36	
Frequência de pulsação (Hz)	4,51	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	5,17	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	-4,51	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	7,44	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	5,91	
Pt Ct	10,25	
Termo	Valor-P	VIF
Constante	0,001	
Energia de deposição (J/mm)	0,021	1,00
Tipo de resfriamento	0,099	1,00
Frequência de pulsação (Hz)	0,139	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,122	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,139	1,00
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,085	1,00
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,107	1,00
Pt Ct	0,062	1,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
0,105936	99,92%	99,27%	3,64731	73,55%	*	-16,52

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq
Modelo	8	13,7768
Linear	3	11,0555
Energia de deposição (J/mm)	1	10,3740
Tipo de resfriamento	1	0,4537
Frequência de pulsação (Hz)	1	0,2278
Interações de 2 fatores	3	1,1497
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	1	0,3003
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	1	0,2278
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1	0,6216
Interações de 3 fatores	1	0,3916
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	1	0,3916
Curvatura	1	1,1799
Erro	1	0,0112
Total	9	13,7880
Fonte	Contribuição	
Modelo	99,92%	
Linear	80,18%	
Energia de deposição (J/mm)	75,24%	
Tipo de resfriamento	3,29%	
Frequência de pulsação (Hz)	1,65%	
Interações de 2 fatores	8,34%	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	2,18%	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	1,65%	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	4,51%	
Interações de 3 fatores	2,84%	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	2,84%	
Curvatura	8,56%	
Erro	0,08%	
Total	100,00%	
Fonte	SQ (Aj.)	
Modelo	13,7768	
Linear	11,0555	
Energia de deposição (J/mm)	10,3740	
Tipo de resfriamento	0,4537	
Frequência de pulsação (Hz)	0,2278	
Interações de 2 fatores	1,1497	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,3003	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,2278	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,6216	
Interações de 3 fatores	0,3916	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,3916	
Curvatura	1,1799	
Erro	0,0112	
Total		
Fonte	QM (Aj.)	
Modelo	1,7221	
Linear	3,6852	
Energia de deposição (J/mm)	10,3740	
Tipo de resfriamento	0,4537	
Frequência de pulsação (Hz)	0,2278	
Interações de 2 fatores	0,3832	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,3003	
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,2278	
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,6216	
Interações de 3 fatores	0,3916	
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,3916	
Curvatura	1,1799	
Erro	0,0112	
Total		
Fonte	Valor F	
Modelo	153,45	
Linear	328,37	

Energia de deposição (J/mm)	924,39
Tipo de resfriamento	40,43
Frequência de pulsação (Hz)	20,30
Interações de 2 fatores	34,15
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	26,76
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	20,30
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	55,39
Interações de 3 fatores	34,90
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	34,90
Curvatura	105,14

Erro

Total

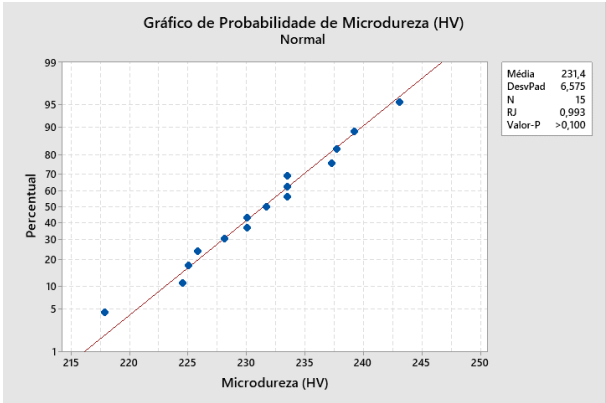
Fonte	Valor-P
Modelo	0,062
Linear	0,041
Energia de deposição (J/mm)	0,021
Tipo de resfriamento	0,099
Frequência de pulsação (Hz)	0,139
Interações de 2 fatores	0,125
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento	0,122
Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)	0,139
Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,085
Interações de 3 fatores	0,107
Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)	0,107
Curvatura	0,062
Erro	
Total	

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

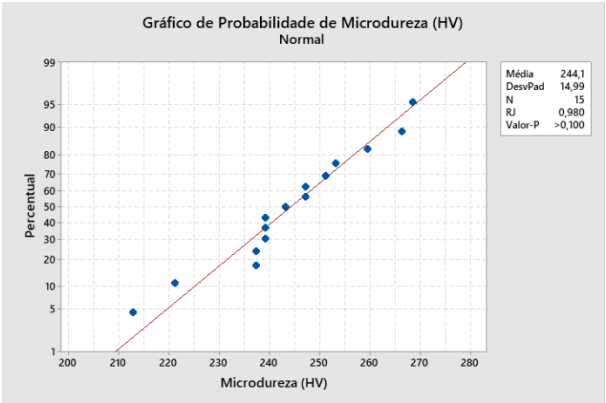
$$\begin{aligned}
 \text{Energia de Impacto (J)} = & 24,6412 + 1,1388 \text{ Energia de deposição (J/mm)} \\
 & + 0,2130 \text{ Tipo de resfriamento} + 0,1688 \text{ Frequência de pulsação (Hz)} \\
 & + 0,1938 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento} \\
 & - 0,1688 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Frequência de pulsação (Hz)} \\
 & + 0,2787 \text{ Tipo de resfriamento*Frequência de pulsação (Hz)} \\
 & + 0,2213 \text{ Energia de deposição (J/mm)*Tipo de resfriamento*Frequência} \\
 & \text{de pulsação (Hz)} + 0,8587 \text{ Pt Ct}
 \end{aligned}$$

APÊNDICE R: GRÁFICOS DOS TESTES DE NORMALIDADE PARA OS DADOS DE MICRODUREZA VICKERS 0,5 POR CP.

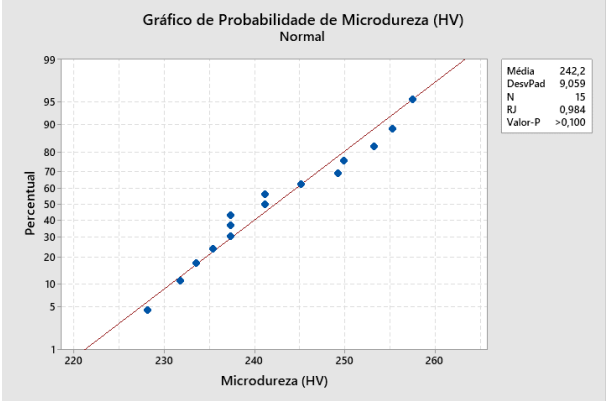
CP1-19°



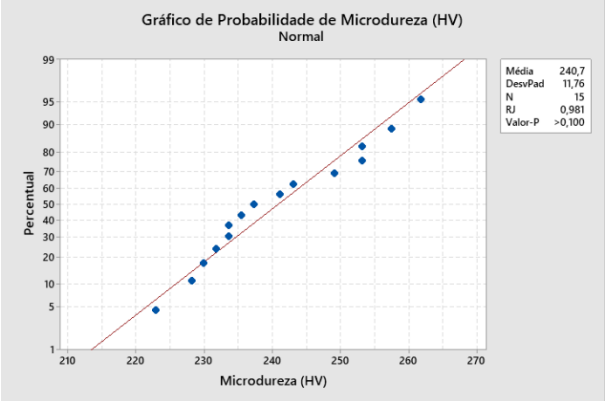
CP2



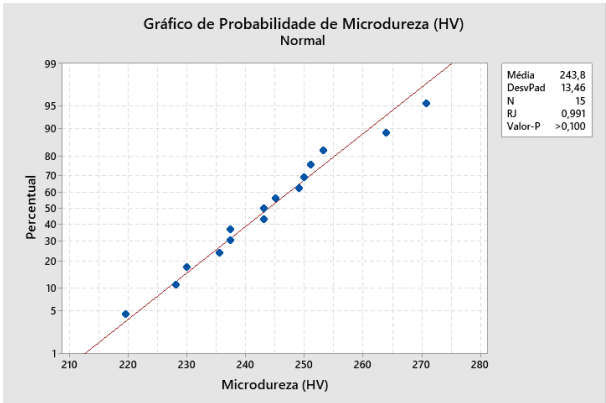
CP3



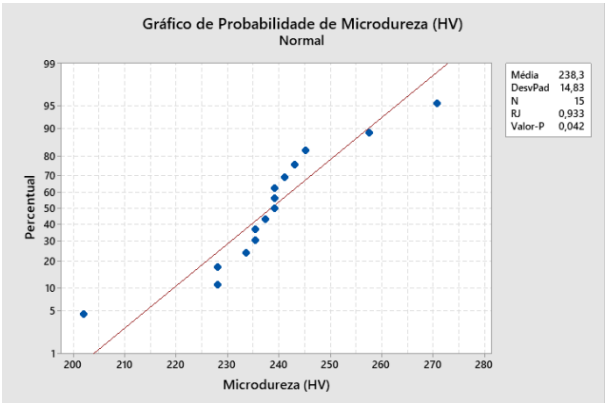
CP4



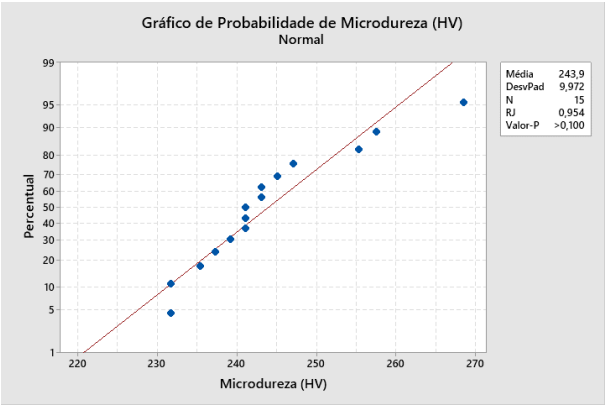
CP5



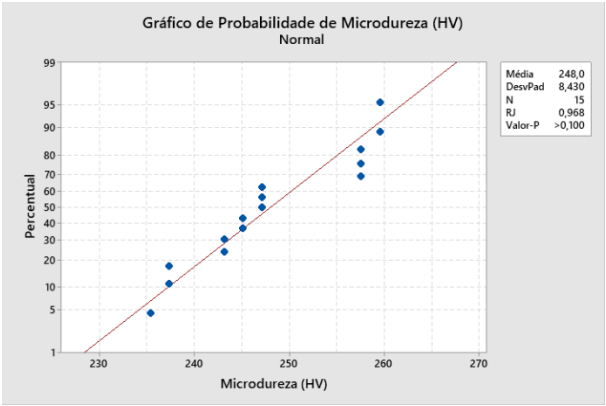
CP6



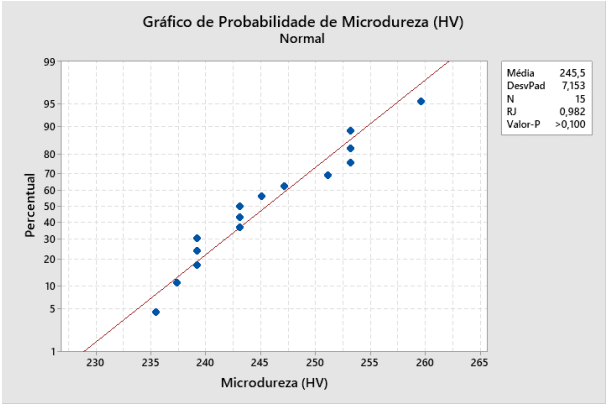
CP7



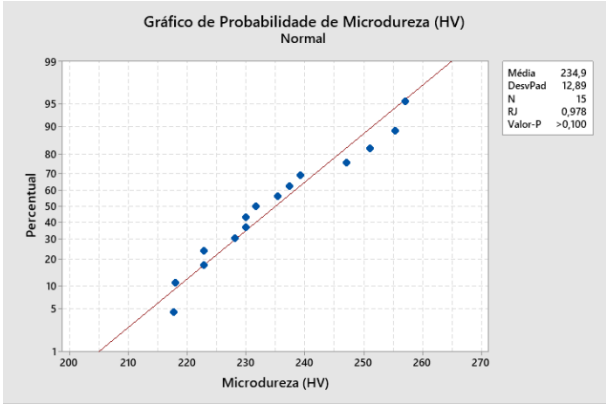
CP8



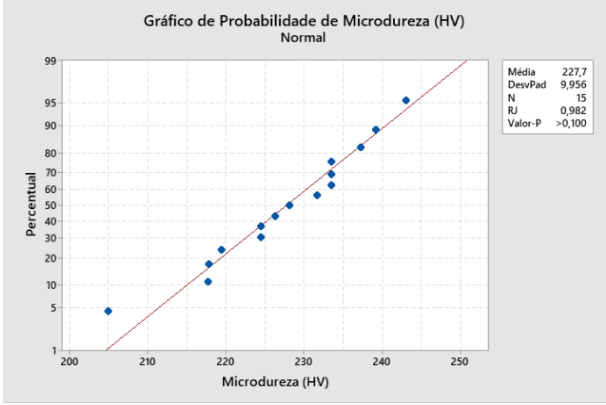
CP9



CP10

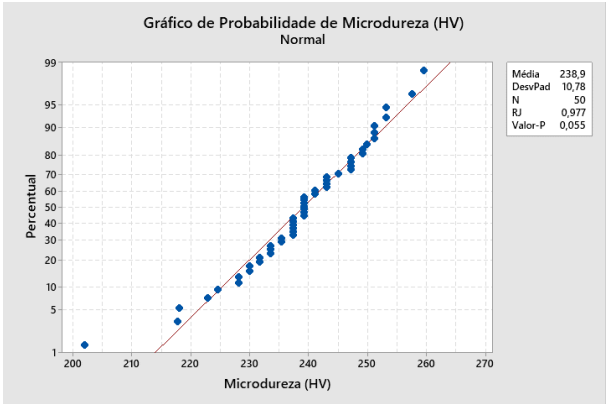


CP1-23°

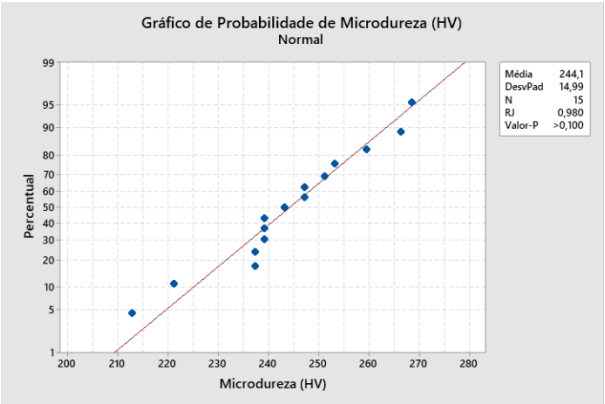


APÊNDICE S: GRÁFICOS DOS TESTE DE NORMALIDADE PARA OS DADOS DE MICRODUREZA VICKERS 0,5 PARA 6°, 19°, 23° E 28° CAMADA.

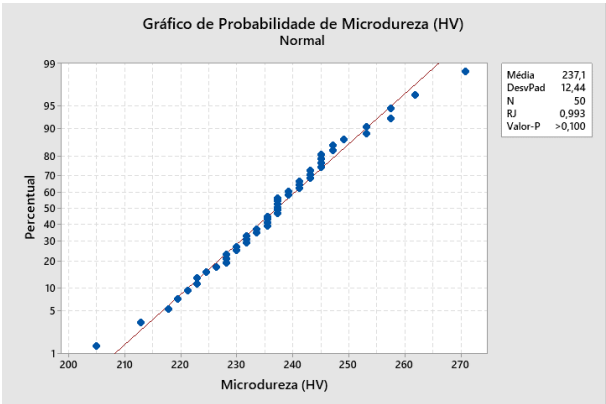
6° camada



19° camada



19° - 23° camada



28° camada

