

GABRIEL GRATON ORLANDO

**AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE
IMAGEM PARA MEDIÇÃO DE POROSIDADE EM
PEÇAS DE ALUMÍNIO FABRICADAS POR
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2022

GABRIEL GRATON ORLANDO

**AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE IMAGEM PARA
MEDIÇÃO DE POROSIDADE EM PEÇAS DE ALUMÍNIO
FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A
ARCO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Comissão Avaliadora do Curso de Engenharia
Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia
para obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Aeronáutica.

Orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

UBERLÂNDIA - MG

2022



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	ENGENHARIA AERONÁUTICA				
Defesa de:	PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO - FEMEC43100				
Data:	11/03/2022	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	10:00
Matrícula do Discente:	11611EAR032				
Nome do Discente:	GABRIEL GRATON ORLANDO				
Título do Trabalho:	Avaliação de Metodologias de Análise de Imagem para Medição de Porosidade em Peças de Alumínio Fabricadas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco				

Reuniu-se remotamente, por meio da Plataforma Digital Google Meet, link de acesso <meet.google.com/doz-nakg-amg>, a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica, assim composta: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis (FEMEC/UFU), orientador do(a) candidato(a), Prof. Dr. Leandro João da Silva (FEMEC/UFU) e Engenheiro MSc. Fernando Matos Scotti (Linde GmbH).

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Ruham Pablo Reis, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao(a) discente a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado, Nota: 95

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Ruham Pablo Reis, Professor(a) do Magistério Superior**, em 11/03/2022, às 10:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro João da Silva, Membro de Comissão**, em 11/03/2022, às 10:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Matos Scotti, Usuário Externo**, em 11/03/2022, às 10:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3432353** e o código CRC **CE324FF7**.

Para minha família.

AGRADECIMENTOS

Sou grato a tudo e todos que, ao longo desse percurso, contribuíram, cada qual à sua maneira, para que esse momento se tornasse realidade. De modo especial, agradeço aos meus pais por todo o suporte e apoio ao longo de minha trajetória, ao professor Ruham pela orientação e tempo disponibilizado e também à Universidade Federal de Uberlândia pelo ensino de qualidade proporcionado e toda experiência adquirida.

*Se há tantas cabeças quantas sentenças,
há tantos corações quantas paixões.*

Lev Tolstói

ORLANDO, G. G. **AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE IMAGEM PARA MEDIÇÃO DE POROSIDADE EM PEÇAS DE ALUMÍNIO FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO**. 2022. 64 f. Projeto de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeronáutica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

RESUMO

Um problema que limita a aplicação de peças de alumínio construídas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco – MADA, integrante do campo maior de Deposição com Energia Direcionada – é a formação de porosidade. Técnicas têm sido aplicadas com o objetivo de reduzir esse acúmulo de vazios, e processos para quantificar a porosidade nessas peças vem sendo aprimorados. Nesse trabalho, avaliam-se metodologias de imagem para quantificar a porosidade em superfícies de corte de pré-formas de alumínio, depositadas com a tecnologia supramencionada e diferentes parâmetros construtivos, com imagens de equipamentos óticos, com uso do software ImageJ. A partir das imagens, coletadas com um escâner e um estereoscópio, devidamente tratadas, foram desenvolvidos e descritos procedimentos para captar e quantificar a área dos poros nas superfícies de corte, verificando sua validade em relação a resultados provenientes da seleção manual dos poros, por inspeção visual, como referência. Os resultados foram satisfatórios para a maior parte dos casos analisados, sendo comparados também com um ensaio mais amplo de vazio volumétrico percentual por Gravimetria. Por fim, a análise permitiu verificar que porosidade facilmente identificada, visualmente, nas imagens, também é melhor selecionada pela metodologia automatizada, e os parâmetros construtivos com os quais uma amostra é depositada também interferem na aplicação dos procedimentos aqui descritos.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Alumínio; MADA; Porosidade; ImageJ.

ORLANDO, G. G. **EVALUATION OF METHODOLOGIES OF IMAGE ANALYSIS TO MEASURE POROSITY IN ALUMINUM PARTS BUILT BY WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING.** 2022. 64 f. Undergraduate Thesis (Bachelor's Degree in Aeronautical Engineering) – Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2022.

ABSTRACT

A problem that limits the application of Aluminum parts built by Wire and Arc Additive Manufacturing – WAAM, process part of the Directed Energy Deposition field – is the formation of porosity. Techniques have been applied aiming to reduce the accumulation of voids, and methodologies to quantify the porosity in these components have been improved. In this paper, methodologies to analyze the porosity in cross sections of preforms of Aluminum, built with the aforementioned technology and different parameters, are evaluated from images captured with optical equipment and the software ImageJ. From images obtained with a scanner and a stereoscope, properly processed, procedures to capture and quantify the area of the pores in the cross sections were described and developed, verifying the validity against results that came from a manual selection of the pores, by visual inspection, as reference. The results were satisfying for most of the samples analyzed, compared to the reference, being also compared with a volumetric-based essay of percentage of voids by Gravimetry. Finally, it was concluded from the analysis that easily identified porosity, by visual inspection, is better selected by the automated methodology, and the building parameters used to deposit a sample also interfere in the application of the procedures described.

Keywords: Additive Manufacturing; Aluminum; WAAM; Porosity; ImageJ.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Frações de materiais na composição de peso do Boeing 777.	14
Figura 2: Peça fabricada por MADA.	15
Figura 3: Exemplos de porosidade em amostras depositadas por MA.	17
Figura 4: SLA-1 da 3DSystems.	20
Figura 5: Componente de Titânio fabricado por MA para o Airbus A350 XWB.	21
Figura 6: Processos de Manufatura Aditiva de Metais comumente aplicados ao setor aeroespacial/aeronáutico (sigla em inglês entre parênteses).	21
Figura 7: Representação do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.	22
Figura 8: Representação esquemática do processo CMT.	23
Figura 9: Aplicação da técnica RAQI para reduzir os efeitos negativos do aporte térmico.	24
Figura 10: Montagem do aparato utilizado para depositar as amostras, com destaque para a cuba de água (1) característica do processo RAQI.	25
Figura 11: Representação esquemática da utilização do Princípio de Arquimedes.	26
Figura 12: Interface do software ImageJ.	27
Figura 13: Comparativo da área enquadrada em uma imagem de cada equipamento.	29
Figura 14: Pré-forma depositada e um corte de sua seção.	30
Figura 15: Influência dos parâmetros de deposição na geometria final das pré-formas.	31
Figura 16: Superfície de uma amostra, com o evidente ataque químico.	32
Figura 17: Exemplo de imagem antes (a) e após limpeza (b).	33
Figura 18: Estereoscópio do LEPU, modelo Olympus LG-PS2.	34
Figura 19: Escala sobre uma régua.	35
Figura 20: Escâner utilizado para a tomada de imagens.	37
Figura 21: Ampliação da imagem: 4800 dpi (a) e 7200 dpi (b).	38
Figura 22: Imagem escaneada da amostra EP/EN -2, LEWD 10: os poros são visíveis como pontos esbranquiçados.	38
Figura 23: Comparativo da mesma área de imagem pelo escâner (a) e pelo estereoscópio (b).	38
Figura 24: Representação da delimitação da superfície.	39
Figura 25: Exemplo de superfície antes (a) e depois (b) do tratamento inicial no Adobe Photoshop para delimitação de contorno.	40
Figura 26: Interface da ferramenta para definição de Escala.	40

Figura 27: Gradiente em tons de cinza para a análise da Figura 28.	41
Figura 28: Threshold aplicado ao gradiente de tons de cinza da Figura 27.	42
Figura 29: Etapas da metodologia automatizada no ImageJ para um trecho da seção de uma amostra escaneada.	43
Figura 30: Reflexo luminoso na superfície de uma amostra.	44
Figura 31: Interface da ferramenta de Análise de Partículas.	45
Figura 32: Trecho superficial com destaque nos poros e no reflexo luminoso à direita.	46
Figura 33: Resultado da aplicação de filtros na ferramenta de Análise de Partículas. Os particulados azuis são selecionados; mas não os pretos.	46
Figura 34: Destaque do preenchimento manual dos poros.	47
Figura 35: Resultado da aplicação de um Threshold mais restritivo em b) que em a).	48
Figura 36: Metodologia aplicada a uma imagem com poros realçados manualmente.	48
Figura 37: Detalhe dos particulados e vazios enegrecidos.	49
Figura 38: Vazios enegrecidos com perda de área.	50
Figura 39: Utilização da ferramenta Tracing para obtenção de área. Imagem ampliada.	51
Figura 40: Delimitação do contorno de superfície a partir da ferramenta Tracing.	51
Figura 41: Valores de porosidade superficial percentual obtidos para as amostras com EP/EN -2.	55
Figura 42: Valores de porosidade superficial percentual obtidos para as amostras com EP/EN +3.	55
Figura 43: Indicação de poro com diâmetro de aproximadamente 580 μm na amostra com razão EP/EN -2 e LEWD de 10 mm.	56
Figura 44: Ampliação de seção da superfície da amostra depositada com razão EP/EN +3 e resfriamento natural.	57
Figura 45: Volume percentual de vazio obtido via Gravimetria para as amostras.	57
Figura 46: Resultado do percentual de vazio para as seis amostras a partir das duas abordagens: superficial e volumétrica.	58

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1:** Área superficial das amostras a partir das imagens dos dois equipamentos.53
- Tabela 2:** Vazio superficial (%) para as amostras, com imagens dos dois equipamentos. ...53
- Tabela 3:** Área Porosa: erros relativos (%) em relação à referência estabelecida.....54

LISTA DE ABREVIATURAS

LEWD – *Layer Edge to Water Distance*

MA – Manufatura Aditiva

MADA – Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

NIAC – *Near-Immersion Active Cooling*

RAQI – Resfriamento Ativo por Quase-Imersão

WAAM – *Wire + Arc Additive Manufacturing*

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	13
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivos	16
CAPÍTULO II	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Manufatura Aditiva	18
2.2. MADA – Manufatura Aditiva por Deposição a Arco	22
2.3. CMT – Cold Metal Transfer	23
2.4. RAQI – Resfriamento Ativo por Quase Imersão	24
2.5. Porosidade em peças depositadas por WAAM	25
2.6. ImageJ	27
CAPÍTULO III	28
3. METODOLOGIAS	28
3.1. Amostras selecionadas	29
3.2. Preparação das amostras	31
3.3. Captura de imagens com o Estereoscópio	33
3.4. Captura de imagens com o Escâner Ótico	36
3.5. Tratamento para delimitação do contorno das superfícies	39
3.6. Desenvolvimento	40
3.7. Estabelecimento de uma referência a partir da captação manual de porosidade	47
3.8. Determinação da área superficial	50
CAPÍTULO IV	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
CAPÍTULO V	59
5. CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

CAPÍTULO I

Nesse capítulo, é apresentada uma breve introdução sobre a utilização de ligas de alumínio no desenvolvimento das aeronaves modernas, a importância da Manufatura Aditiva como objeto de pesquisa e sua aplicação na indústria aeronáutica; também são apresentados objetivos e motivações deste trabalho.

1. INTRODUÇÃO

O ano é 1906 e o 14-bis do brasileiro Alberto Santos Dumont decola do solo de Paris para a história.

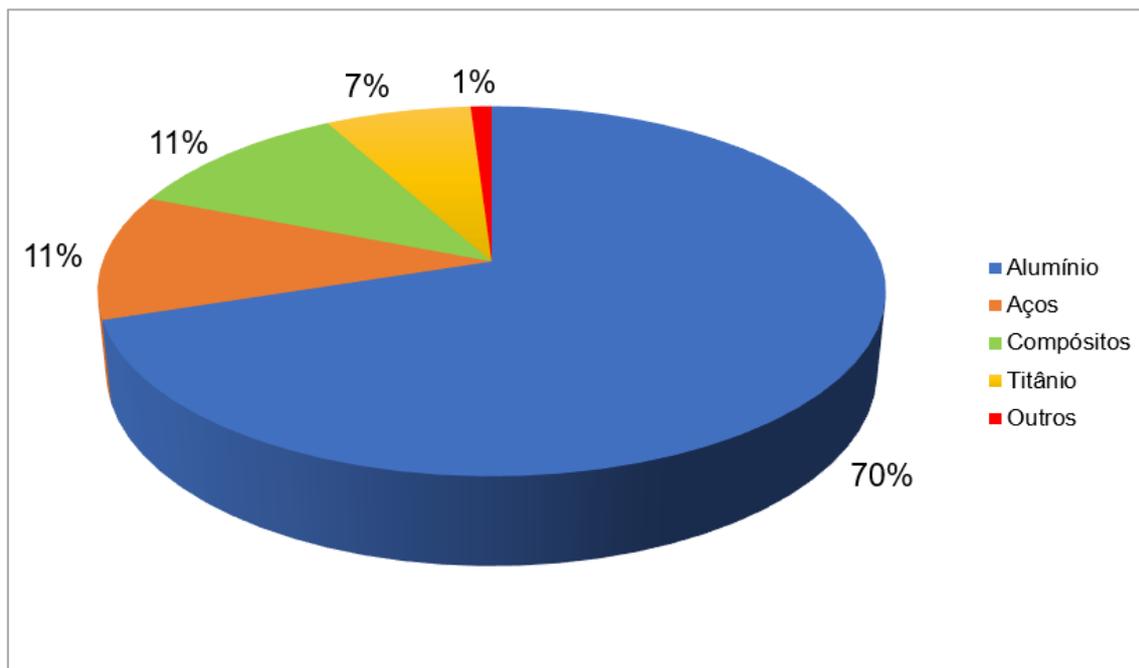
Décadas se passaram, e a aviação deixou de ser um esporte amador para se tornar uma atividade onipresente na sociedade contemporânea. Aeronaves tornaram-se meios de transporte transcontinentais, máquinas de guerra, grandes cargueiros. Foram aprimorados os controles de voo, surgiram os sistemas elétricos e aviônicos, os motores a reação. A madeira das antigas estruturas deu lugar aos metais. Levar aos céus aeronaves cada vez mais polivalentes só foi possível com uma combinação de muitos fatores, como a otimização dos efeitos das forças aerodinâmicas e da mecânica do voo e a redução do peso estrutural.

Enquanto as ciências aerodinâmicas se ocuparam em reduzir os efeitos da resistência do ar ao movimento e em garantir sustentação à aeronave, as ciências estruturais e de materiais foram as responsáveis por buscar redução de peso através de novos materiais e técnicas, garantindo ao mesmo tempo a rigidez e resistência mecânica necessárias para a segurança operacional. O alumínio, um metal abundante na crosta terrestre, com massa específica consideravelmente baixa para a classe dos metais ($2,7 \text{ g/cm}^3$, aproximadamente um terço da densidade dos aços), e possibilidade de aumento de resistência mecânica através da formação de ligas, passou a ser cada vez mais empregado na aviação. Longarinas e nervuras, painéis da fuselagem, entre outros componentes de ligas de alumínio, passaram a representar redução de peso em relação aos antigos componentes de aço. Dessa forma, unindo redução de peso e elevadas resistência mecânica e à corrosão (GIERTH et al., 2020),

o alumínio assume um papel muito importante no escopo do desenvolvimento das aeronaves modernas.

Ligas de alumínio são utilizadas extensivamente na linha de aeronaves comerciais de Boeing e Airbus. O Boeing 777, cuja produção teve início em 1993 na linha de montagem de Everett, Estados Unidos, apresenta 70% de seu peso constituído por ligas de alumínio (SMITH, 2003), com as ligas das séries 2000 e 7000 sendo empregadas, por exemplo, na fuselagem e nas caixas da asa.

Figura 1: Frações de materiais na composição de peso do Boeing 777.



Fonte: Adaptado de Smith (2013).

A aplicabilidade de peças de ligas de alumínio em aeronaves, em alguns casos integrando inteiramente o *airframe*, foi confirmada pelo elevado nível de segurança que as aeronaves continuam entregando diariamente, respeitando os mais rigorosos critérios e normas da aviação.

Os processos de fabricação dessas peças são, geralmente, comuns às demais ligas metálicas. Esforços, porém, têm sido aplicados nas últimas décadas em busca de processos de fabricação não tradicionais que pudessem oferecer respostas aos desafios de produção de peças complexas, com elevados requisitos, reduzindo o desperdício de material. Motivação adicional vem do fato dos setores aeronáutico e aeroespacial não demandarem grande volume de produção; conseqüentemente, linhas de montagem e confecção de moldes oneram demasiadamente os custos de fabricação. A Manufatura Aditiva surge então como uma opção

alternativa aos processos tradicionais, em especial para os setores mencionados. Sua importância e utilização nessas áreas são cada vez maiores.

O conceito de Manufatura Aditiva diz respeito ao método camada por camada de deposição de material na formação do todo da peça. Inicialmente um processo de fabricação baseado em materiais fotocuráveis e poliméricos, a MA mostrou-se um campo vasto para P&D, e logo passou a ser aplicável a novos materiais, inclusive metálicos.

Dentre os processos de MA que podem ser destacados, está o método chamado DED – Deposição com Energia Direcionada. Nesse processo, energia concentrada é utilizada para fundir o metal – em forma de pó ou arame – ao longo de uma direção predefinida que vai ditar o formato da peça. A energia pode ser proveniente de laser, feixe de elétrons ou arco elétrico. A fusão do material no caminho definido pelo movimento da cabeça móvel do equipamento, que pode ser CNC, ou do substrato, se assemelha bastante à formação dos cordões nos processos de soldagem. Por esse motivo, muito do *know-how* de soldagem pode ser aplicado às técnicas modernas de Manufatura Aditiva por Deposição com Energia Direcionada.

Figura 2: Peça fabricada por MA.



Fonte: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/info-centre/press/waam>

Acesso em dezembro de 2021.

Os processos DED apresentam uma crescente utilização na indústria. Dentro desse campo, uma das técnicas mais empregadas é chamada Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, MADA – *Wire + Arc Additive Manufacturing*, WAAM, em inglês – que combina energia proveniente de um arco elétrico com alimentação de material na forma de arame para

deposição da peça. Apresenta como vantagens a elevada taxa de deposição de material, reduzindo o tempo de fabricação em relação a outros processos de MA, além de ser mais barata e fácil de ser implementada. Além do *know-how* disponível, que é diretamente relacionado ao conhecimento e experiência advindos da utilização dos processos de soldagem, suas características processuais, como equipamentos, fontes de energia e materiais estão estreitamente relacionados.

Naturalmente, desvantagens também aparecem. O aporte térmico e o acúmulo de calor são especialmente problemáticos (SILVA, 2019), de modo que técnicas modernas têm sido implementadas nos últimos anos para minimizá-los. O equipamento utilizado para depositar as amostras deste trabalho, baseado no método chamado CMT – *Cold Metal Transfer – Advanced* surge como um interessante mecanismo para diminuir o aporte térmico, enquanto a técnica RAQI – Resfriamento Ativo por Quase-Imersão – também empregada, é útil para redução do acúmulo de calor.

Outro problema frequente em peças depositadas por DED é a formação de porosidade. Com origem na difusão de gases durante o processo de deposição, os vazios podem levar à falha prematura e prejudicar as propriedades mecânicas da peça (SLOTWINSKI et al., 2014). Diferentes parâmetros de construção podem interferir nos níveis de porosidade nas peças depositadas.

Representando um problema para a segurança operacional, a porosidade pode ser quantificada para verificação de critérios de qualidade, de acordo com as propriedades mecânicas requeridas na aplicação necessária. É comum a utilização tanto de técnicas baseadas no Princípio de Arquimedes (SPIERINGS et al., 2010), quanto de metodologias por imagem (GIERTH et al., 2020), conforme Figura 3; outros métodos como microscopia e tomografia computadorizada apresentam como dificuldades o custo mais elevado de implementação.

1.1. Objetivos

O trabalho desenvolvido visa avaliar metodologias de imagem para análise de porosidade em pré-formas de alumínio fabricadas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, com um equipamento CMT *Advanced* e aplicação da tecnologia Resfriamento Ativo por Quase-Imersão (RAQI). Buscar-se-á descrever essas metodologias implementadas de análise de imagem, desenvolvidas a partir de macrografias capturadas com um escâner e um estereoscópio, para identificação e seleção dos poros em superfícies de corte das amostras

supracitadas, comparando os valores de área obtidos com os retornados por uma metodologia manual de seleção de porosidade, que serve como referência, e com valores oriundos de um ensaio de gravimetria.

Figura 3: Exemplos de porosidade em amostras depositadas por MA.



Fonte: Gierth et al. (2020).

CAPÍTULO II

Nesse capítulo, é feita uma revisão bibliográfica sobre a Manufatura Aditiva, os processos mais utilizados com ligas metálicas, de acordo com a terminologia da norma ASTM/ISSO 52900, e uma descrição das características dos processos CMT e RAQI, por meio dos quais foram depositadas as pré-formas avaliadas neste trabalho. Além disso, são revistos os mecanismos de formação de porosidade e feita uma introdução ao software ImageJ.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva é um campo vasto de fabricação, capaz de produzir peças através da deposição camada por camada de material a partir de um modelo CAD 3D computadorizado. A norma ISO/ASTM 52900 (*Additive Manufacturing – General Principles – Terminológico*), ao apresentar conceitos e a terminologia da MA, foi a precursora da comunicação técnica na área, enumerando atualmente sete categorias de processos produtivos, a saber: Jato de Ligante, Deposição com Energia Direcionada, Extrusão de Material, Jateamento de Material, Fusão em Leito de Pó, Laminação de Folhas e Fotopolimerização em Cuba.

Os métodos de fabricação supracitados podem produzir peças através de uma ou mais etapas: são os chamados processos de única e múltipla etapas. Um processo de única etapa caracteriza um método de fabricação em que a pré-forma ou forma e as propriedades básicas e mecânicas do componente são formadas a partir de uma única operação, na maior parte dos casos a fusão do material. Processos de múltiplas etapas necessitam de duas ou mais operações para que as características finais de forma e propriedades sejam atingidas. Nesse caso, pode ser feito um paralelo com a Metalurgia do Pó, cujas peças formadas pelo pó compactado demandam um processo adicional de sinterização.

O produto de alguns processos de MA pode surgir como uma pré-forma, com formato similar ao requerido, mas demandando algum outro procedimento de corte ou usinagem para adequação total à geometria pré-determinada, ou mesmo como peça acabada. Com reduzido desperdício de material, é nítido que a Manufatura Aditiva difere, portanto, dos processos de fabricação tradicionais subtrativos, já estabelecidos e conceituados.

O advento das técnicas de MA modernas remonta apenas ao ano de 1987, com a comercialização da primeira máquina de estereolitografia pela 3DSystems, o equipamento chamado SLA-1 – um acrônimo para *StereoLithography Apparatus* (WOHLERS, 2016). Outras máquinas, trabalhando com o mesmo conceito de estereolitografia, foram vendidas em anos subsequentes por empresas como Sony/D-MEC e NNT DATA CMET. A estereolitografia foi de muita importância na primeira geração de máquinas de MA. A tecnologia SLA utiliza laser direcional sobre uma cuba de resina fotocurável – que, ao se solidificar, vai formando a geometria da peça, camada por camada, pelo movimento vertical da plataforma de construção.

Nos primeiros anos da década de 90, a primeira geração de máquinas de MA trabalhou com materiais poliméricos e cerâmicos: a utilização de materiais metálicos só apareceria no radar da MA em 1997, com os esforços da empresa AeroMet no desenvolvimento de uma técnica batizada de LAM – *Laser Additive Manufacturing* – que utilizava lasers de alta potência para fundir pó de titânio. O processo PBF – *Power Bed Fusion* – caracteriza um método construtivo a partir de energia concentrada capaz de fundir camadas finas de pó metálico espalhadas sobre a plataforma de construção. Nos anos seguintes, máquinas trabalhando tal conceito foram apresentadas por empresas como The Extrude Home AN Business, em 1998, e Fockele & Schwarze, em 1999 (WOHLERS, 2016).

Outras técnicas foram apresentadas e implementadas comercialmente em anos subsequentes, como o processo de Fusão por Feixe de Elétrons – *Electron Beam Melting*, EBM – pela empresa sueca Arcam. Os processos DED passaram a receber atenção especial na indústria, herdando muito, como já mencionado, do know-how de soldagem.

Figura 4: SLA-1 da 3DSystems.



Fonte: The Henry Ford.

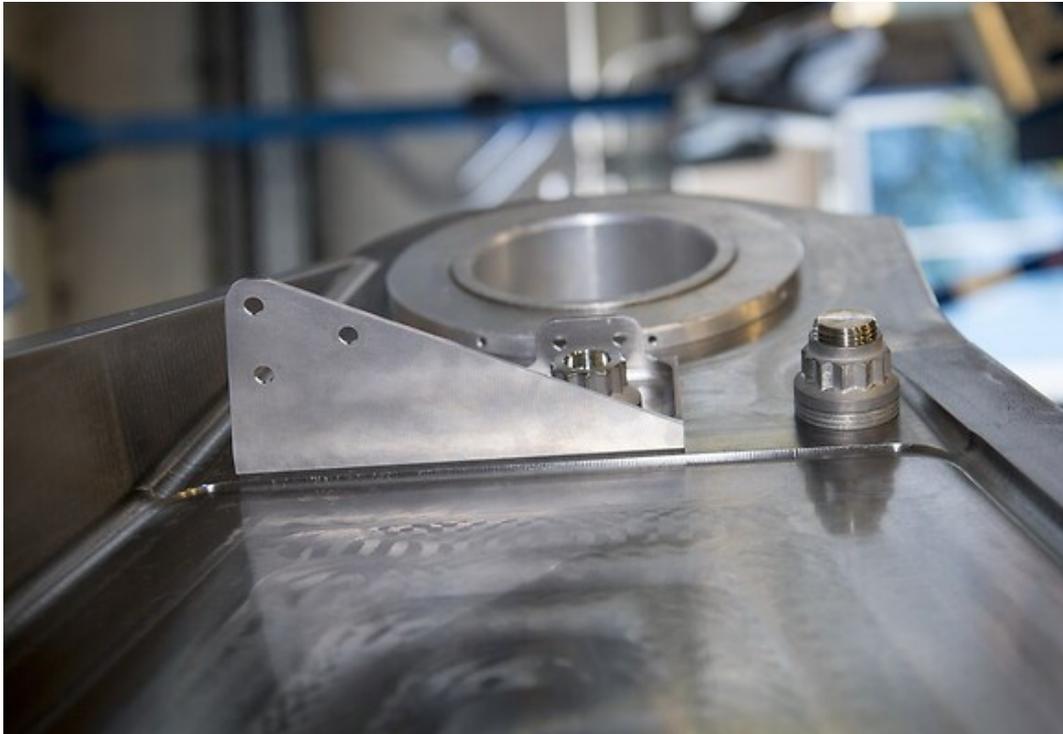
Acesso: <https://artsandculture.google.com/partner/the-henry-ford>

Os processos DED, de acordo com a norma ASTM/ISO 52900, são métodos produtivos nos quais energia concentrada é utilizada para fundir o material durante a deposição. A energia pode ser proveniente de laser, feixe de elétrons ou arco. Integra, junto com o processo PBF – Fusão em Leito de Pó – o maior conjunto de aplicações de MA com metais (THOMAS-SEALE et al., 2018).

No início uma área exclusiva de pesquisa e desenvolvimento, a MA de metais ao longo dos anos se tornou processo de fabricação certificado em áreas de grande tecnologia. Vasta aplicação da MA diz respeito a implantes e próteses médicas, construídas sob medida para cada organismo. Passou a ser empregada também na engenharia aeronáutica na produção de componentes de alumínio e titânio, satisfazendo os mais rigorosos critérios de segurança. Segundo Holmström et al., (2010), as vantagens da MA relacionadas à essas aplicações vêm da capacidade de produzir componentes de geometrias complexas, em pequenas

quantidades, sem necessidade de desenvolvimento de linhas de produção, sendo possível realizar modificações em CAD muito facilmente.

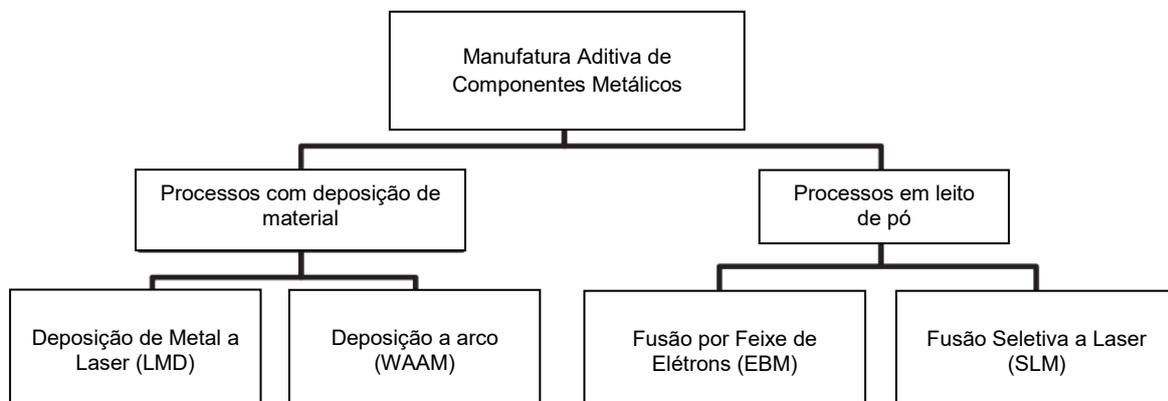
Figura 5: Componente de Titânio fabricado por MA para o Airbus A350 XWB.



Fonte: Airbus.

Acesso: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2017-09-first-titanium-3d-printed-part-installed-into-serial-production>

Figura 6: Processos de Manufatura Aditiva de Metais comumente aplicados ao setor aeroespacial/aeronáutico (siglas em inglês entre parênteses).



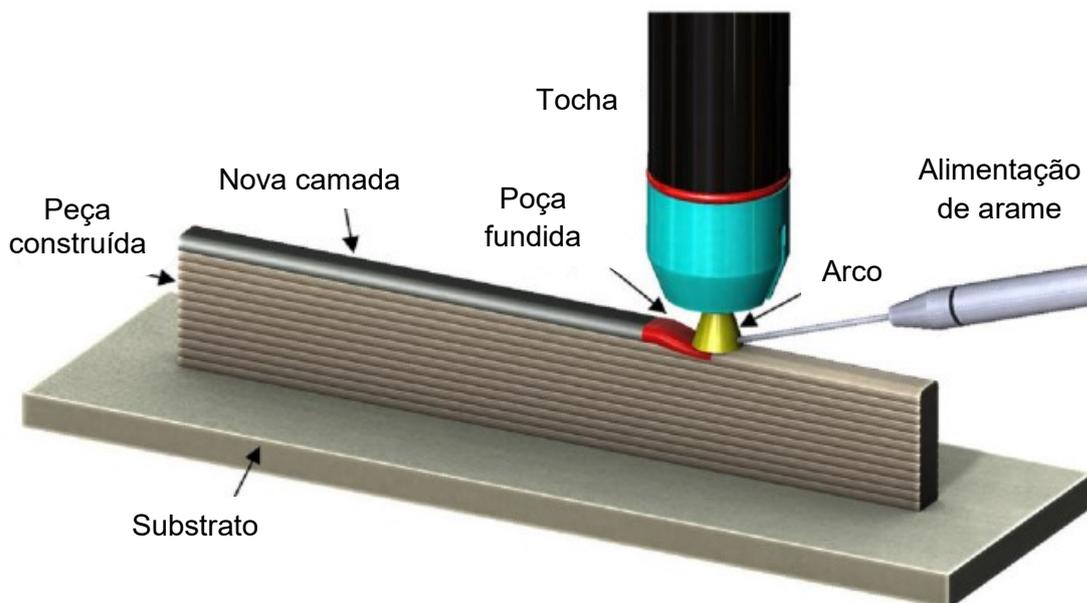
Fonte: Adaptado de Uriondo et al. (2014)

2.2. MADA – Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

O processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco – MADA – ou WAAM, em inglês: *Wire + Arc Additive Manufacturing*, ganha cada vez mais destaque no escopo da Manufatura Aditiva aplicada à indústria. Suas características garantem redução de desperdício de material, otimizando o processo ao construir pré-formas de formato similar ao produto final, demandando menos usinagem que peças feitas por processos tradicionais de fabricação (MCANDREW et al., 2018). Podem ser aplicados processos como furação e torneamento à pré-forma de modo a garantir um formato final idêntico àquele proposto pelo desenho CAD.

Dentro do campo da MA, esse processo se destaca pela elevada taxa de deposição de material, implicando em um menor tempo de fabricação comparativamente aos processos de Fusão em Leito de Pó (PBF). A alimentação por arame também oferece menos dificuldades que alimentação de material particulado, além de um custo geralmente mais baixo para ligas similares.

Figura 7: Representação do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.



Fonte: Adaptado de McAndrew et al. (2018).

A aplicabilidade do processo, porém, apresenta restrições por características intrínsecas a si. Deve-se destacar que a resolução oferecida pelos atuais equipamentos capazes de operar essa técnica é mediana, sendo comum largura de cordões na deposição

na ordem de milímetros. Entre as desvantagens, também pode-se destacar a formação de porosidade pelo aprisionamento de gases durante o processo de fabricação, o elevado aporte térmico e tensões residuais que podem resultar do elevado acúmulo de calor.

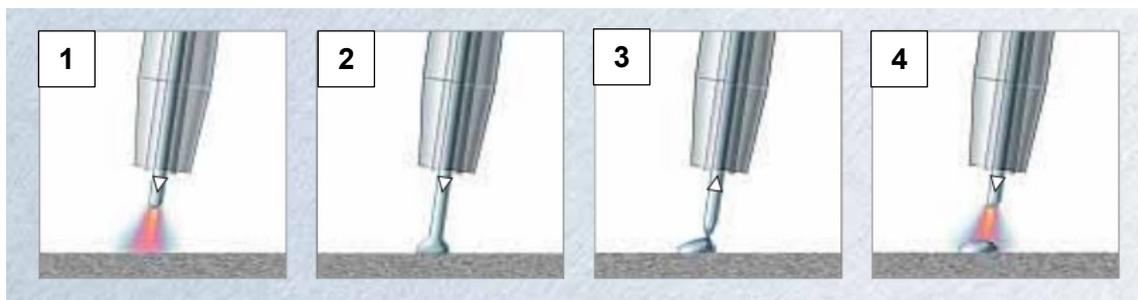
2.3. CMT – *Cold Metal Transfer*

Para reduzir os efeitos negativos do elevado aporte térmico, em anos recentes a técnica chamada CMT – *Cold Metal Transfer* – passou a ser cada vez mais empregada. Desenvolvida para aplicação em soldagem pela empresa Fronius, é um processo considerado frio em relação à soldagem MIG/MAG.

O processo CMT utiliza um controle digital para regulação do movimento do arame. O arame é alimentado até o curto circuito, quando a central eletrônica promove seu recolhimento. Isso faz com que o aporte térmico seja reduzido em relação a um processo MIG/MAG comum, pois a corrente de curto-circuito é mantida a níveis muito baixos durante a fusão do material. Isso garante outra vantagem ao processo CMT, a quantidade reduzida de respingos pela melhor soltura das gotas.

O processo todo é ilustrado na Figura 8. Durante a abertura do arco (1), o avanço do arame garante alimentação de material à poça; o arco, ao ser apagado (2), reduz a corrente elétrica e o aporte térmico. Nesse instante, o arame é retraído (3), mitigando os respingos e garantindo uma poça homogênea ao processo, reiniciado em (4).

Figura 8: Representação esquemática do processo CMT.



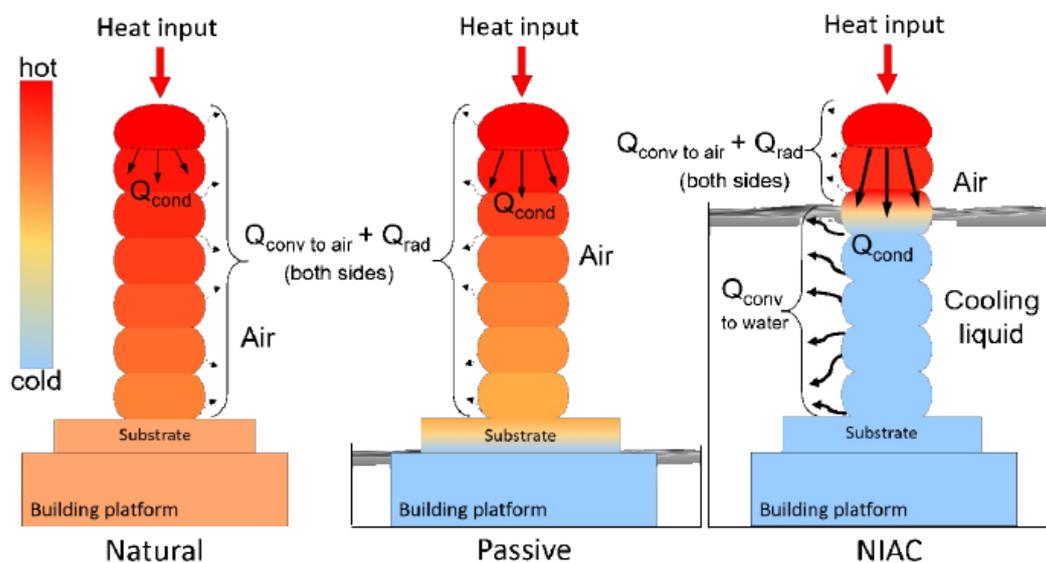
Fonte: Fronius.

A tecnologia CMT atua então como um mecanismo de gerenciamento térmico intrínseco à fabricação. O processo passou a permitir soldagem e brasagem de diferentes materiais com mais facilidade, inclusive com chapas a partir de 0,3 mm com alguns equipamentos da Fronius.

2.4. RAQI – Resfriamento Ativo por Quase Imersão

O objetivo de controlar o acúmulo de calor também leva à aplicação da técnica chamada Resfriamento Ativo por Quase-Imersão, RAQI. Seu uso no processo MADA garante um maior controle do acúmulo de calor através de transferência térmica com água contida na cuba de deposição. Nesse método, é mantida uma distância entre o nível da água e a camada depositada instantaneamente, sendo chamada *Layer Edge to Water Distance – LEWD*, mantendo a temperatura das camadas anteriores a níveis mais baixos. São obtidas grandes vantagens em relação ao resfriamento natural ambiente (SILVA, 2019).

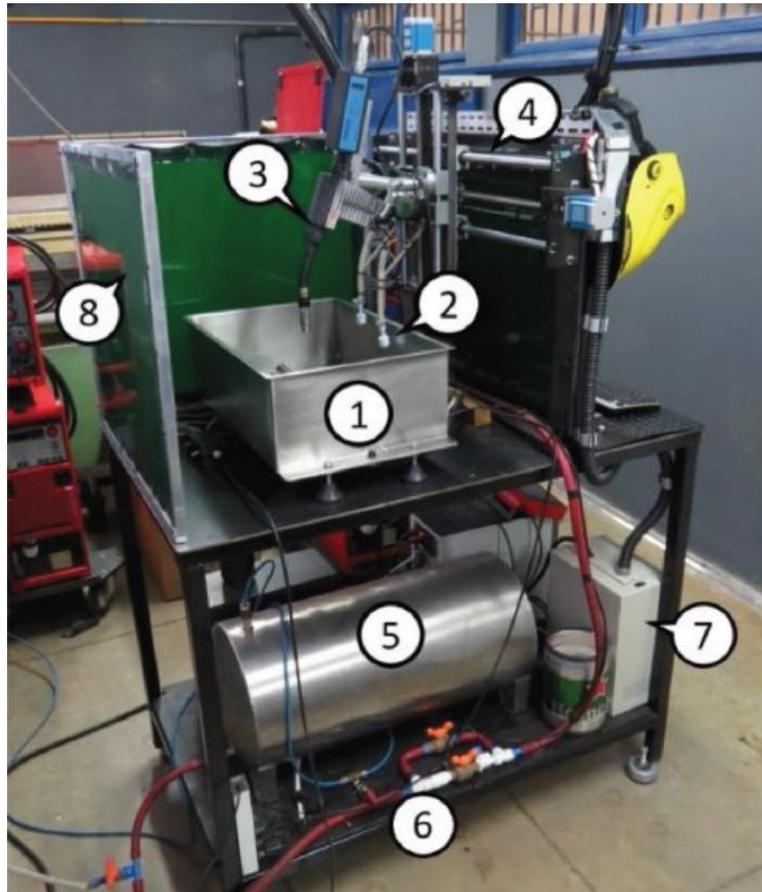
Figura 9: Aplicação da técnica RAQI para reduzir os efeitos negativos do aporte térmico.



Fonte: Silva (2019).

A Figura 10 exibe a montagem do equipamento utilizado para deposição das pré-formas. A cuba de água para aplicação do método RAQI é indicado em (1); a mangueira de água, em (2); a tocha CMT, em (3); (4) indica o cursor de deslocamento linear do equipamento; (5), o tanque de água pressurizado; em (6), é indicada a montagem das válvulas hidráulicas e pneumáticas; em (7), o controle CNC, e em (8), uma cortina de proteção. Mais informações podem ser encontradas no trabalho de Scotti et al. (2020): *Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique*.

Figura 10: Montagem do aparato utilizado para depositar as amostras, com destaque para a cuba de água (1) característica do processo RAQI.



Fonte: Scotti et al. (2020)

2.5. Porosidade em peças depositadas por MADA

A formação de porosidade é um problema em potencial em peças de alumínio depositadas por MADA, tendo consequências drásticas na vida em fadiga dos componentes e em suas propriedades mecânicas se não for controlada. Não é, porém, uma questão exclusiva da MA e dos processos DED. Zhang (1998) já mencionava o problema de formação de trincas por fadiga de alto ciclo a partir de poros em peças de alumínio fabricadas por fundição.

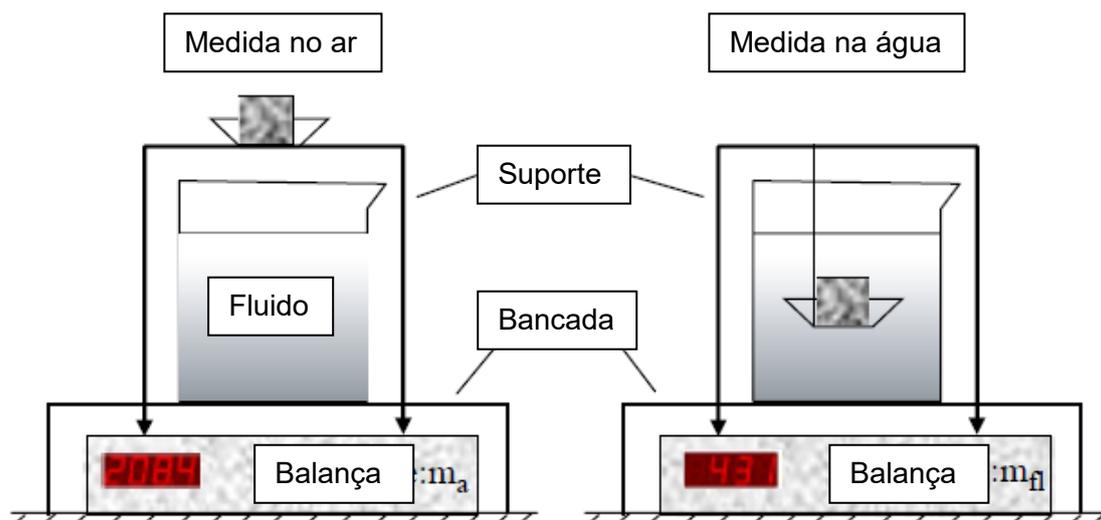
No processo MADA, a principal origem de formação dos poros está na difusão de hidrogênio, pela sua elevada solubilidade no alumínio líquido (7 ml/kg) em contraste com o alumínio sólido (0,4 ml/kg) (YOUSEFIAN, 2017). O hidrogênio atomizado, oriundo majoritariamente de camadas de óxido no arame e contaminações, é difundido na poça líquida durante a fusão do alumínio, resultando nos vazios que caracterizam a porosidade.

Como se trata de um processo de deposição de múltiplas camadas de material fundido, a formação de porosidade é acentuada em processos sem controle do acúmulo de calor, como observaram Derekar et al. (2019), sendo comum o emprego da técnica supramencionada CMT *Advanced* para reduzir o aporte térmico. A técnica RAQI também mostra potencial para mitigar esse aporte, mas deve ser empregado com cautela no que se refere à formação de porosidade, em conjunto com demais parâmetros construtivos. Como observou Silva (2019), a aplicação de uma distância LEWD inferior a 10 mm levou a maiores níveis de porosidade observados por interferência de evaporação de água da cuba de deposição.

Há várias técnicas atualmente empregadas para estimar a porosidade em peças e componentes metálicos, como a tomografia computadorizada, que apresenta, porém, custo elevado. A técnica mais comumente utilizada é a Gravimetria, valendo-se do Princípio de Arquimedes, como proposto, por exemplo, por Spierings et al. (2010). Com uma balança de precisão, a densidade do corpo imerso (ρ_c) pode ser determinada de acordo com a expressão (1), utilizada por Scotti et al. (2020)., em que ρ_f é a densidade do fluido, e m_a e m_f as massas do corpo no fluido e no ar. É um método não destrutivo e fácil de ser implementado.

$$\rho_c = \left(\frac{m_f}{m_a - m_f} \right) \rho_f \quad (1)$$

Figura 11: Representação esquemática da utilização do Princípio de Arquimedes.



Fonte: Adaptado de Spierings et al. (2011).

Métodos baseados no Princípio de Arquimedes consideram um resultado global de vazio volumétrico – integrando o todo do corpo ou pré-forma. Dessa forma, não apenas os poros são incluídos nos resultados, mas também demais vazios como os resultantes de trincas.

Metodologias de imagem, por outro lado, apresentam a possibilidade de analisar a morfologia dos poros, suas dimensões e localização, extraindo o valor de área ocupada pelos poros em uma superfície. Por demandar superfícies de corte para análise, é um processo considerado destrutivo, mais facilmente aplicado para validar técnicas e processos de fabricação que amostras isoladas em si. Equipamentos como escâneres, estereoscópios e microscópios podem ser utilizados para obtenção das imagens, a partir das quais procede-se então com a análise em diferentes softwares de imagem. Nesse escopo, é comum o uso do software ImageJ (GIERTH et al.,2020).

2.6. ImageJ

O ImageJ é um software de imagem gratuito de código aberto baseado em Java. Sua polivalência vem da possibilidade da instalação de mais de 400 plug-ins disponíveis de acordo com a aplicação necessária, sendo empregado na biologia, medicina e engenharia, por exemplo (COLLINS, 2007).

Seu uso na engenharia apresenta um vasto campo de aplicação, especialmente nas áreas de materiais. Trabalhos foram feitos, por exemplo, na área de microestrutura de metais, para avaliação de morfologia dos grãos, trincas e áreas não fundidas em MA ou soldagem. Lourenço et al. (2005) utilizaram o software para selecionar e mensurar áreas com corrosão em ligas de alumínio das séries 7000.

A interface do ImageJ é exibida na Figura 12. Em tópicos subsequentes, as funcionalidades serão apresentadas em conjunto com o desenvolvimento das metodologias.

Figura 12: Interface do software ImageJ.



Fonte: Autoral.

CAPÍTULO III

Esse capítulo é dedicado à apresentação das amostras analisadas e do preparo realizado sobre as suas superfícies, aos métodos de captura de imagem e equipamentos utilizados e à descrição das metodologias testadas, manuais e automatizadas, para seleção de porosidade nas superfícies de corte das pré-formas.

3. METODOLOGIAS

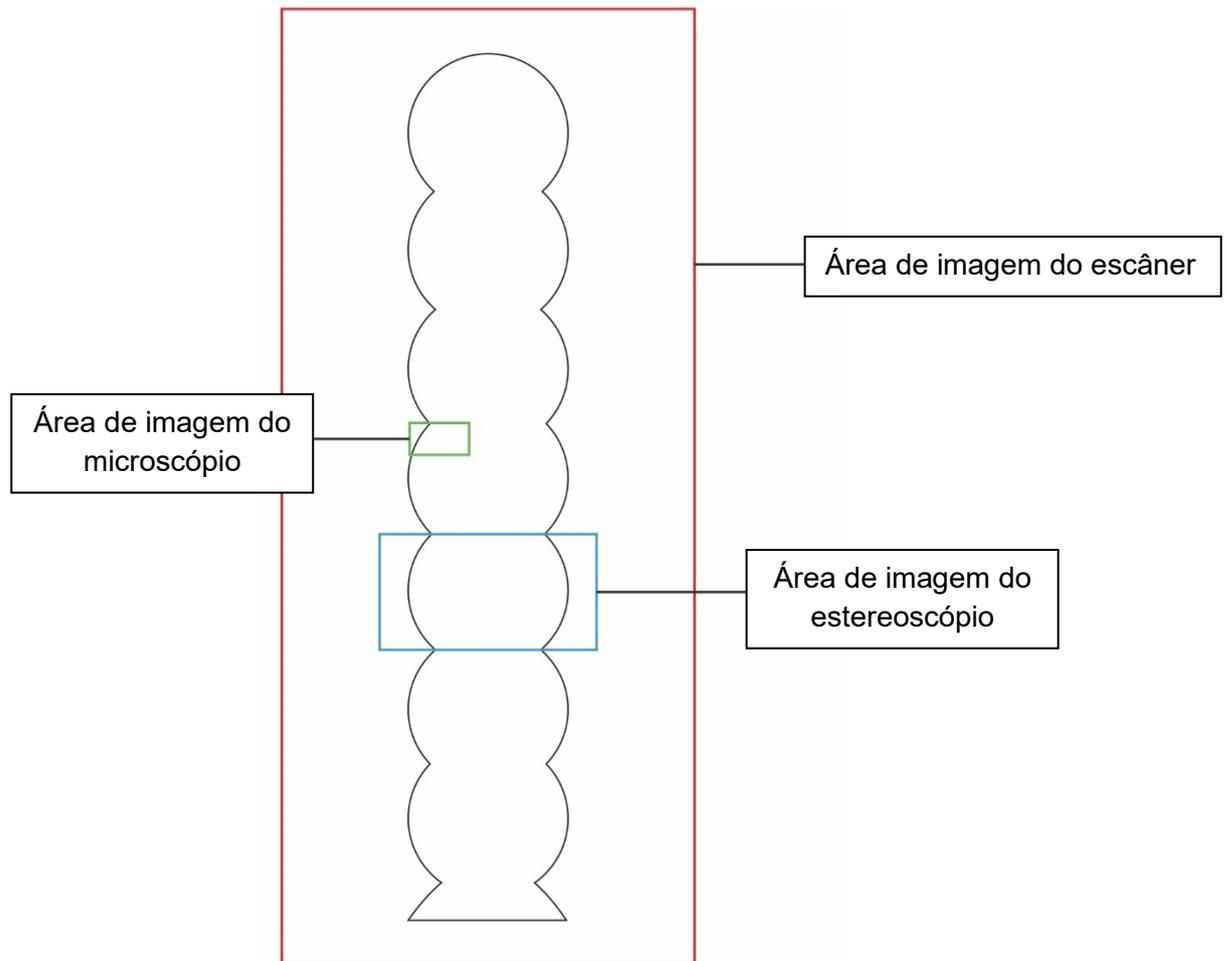
Foi supracitada a importância de se avaliar a porosidade presente em peças metálicas, especialmente, no escopo deste trabalho, as depositadas por Manufatura Aditiva, para que o percentual de vazio não se torne um fator limitante à sua aplicação. É amplamente conhecida a utilização do Princípio de Arquimedes – Gravimetria – como ferramenta para obter a densidade relativa de corpos imersos. Esse método, porém, retorna o valor de volume vazio de toda a amostra, não permitindo nenhum tipo de análise quanto à forma, dimensão e localização dos poros.

Abordagens superficiais via métodos de imagem, por outro lado, possibilitam esse tipo de análise, que pode ser útil em pesquisa de novos métodos de deposição e otimização de diferentes parâmetros construtivos existentes. Por meio de coleta de dados, estudos aplicados à fadiga podem inclusive ser relacionados à dimensão, quantidade e localização de vazios nos componentes metálicos.

Para capturar as imagens deste trabalho, foram utilizados um escâner e um estereoscópio – cuja utilização foi gentilmente cedida pelo Laboratório de Eletrônica do LAPROSOLDA e pelo Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU, respectivamente. Foi cogitada a utilização de um microscópio como terceiro instrumento para avaliação, porém a mínima ampliação fornecida pelo equipamento (50x) já se mostrava superior às necessidades de captura de macrografias. Essa ampliação geraria mais dificuldades na reconstrução das superfícies das amostras pela necessidade de sobreposição de um grande número de imagens.

A Figura 13 expõe um comparativo aproximado da área de superfície das amostras que pode ser enquadrada em uma única imagem a partir de cada um dos equipamentos.

Figura 13: Comparativo da área enquadrada em uma imagem de cada equipamento.



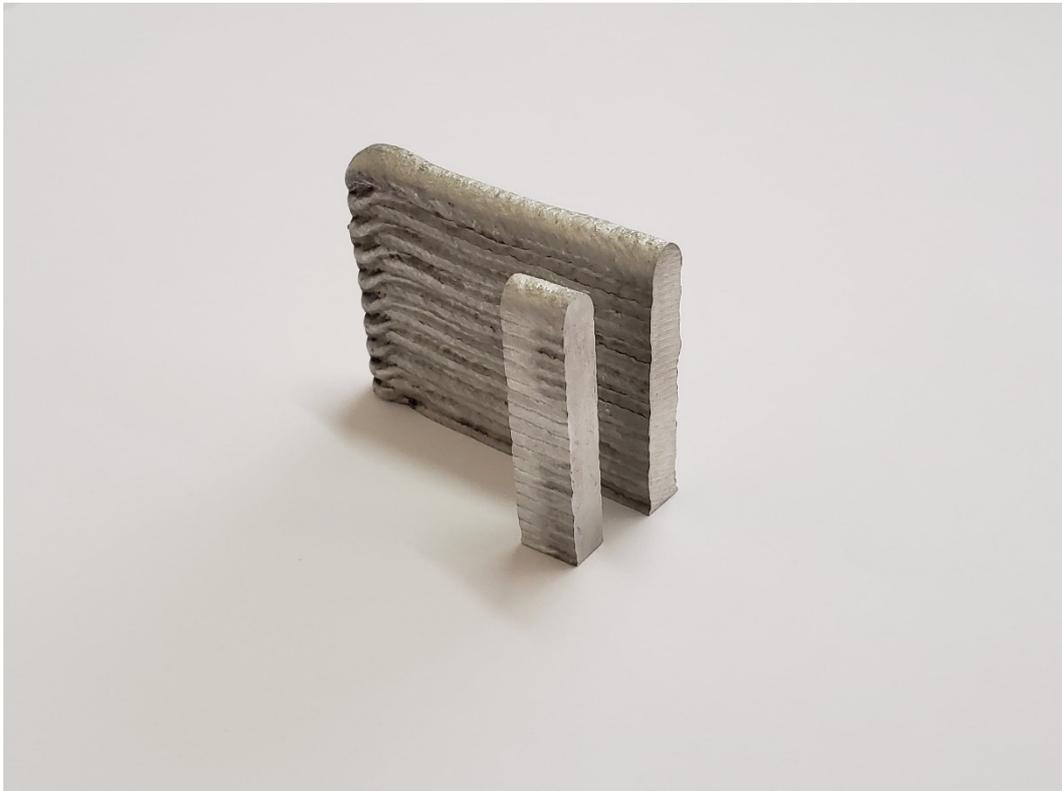
Fonte: Autoral.

Ao buscar métodos automatizados para selecionar a porosidade na superfície de corte das pré-formas, tornou-se necessário aplicar primeiramente uma metodologia para obter valores de referência padrões, a partir dos quais poderiam ser analisados os demais resultados. Tal metodologia consiste no realce manual dos poros nas superfícies das pré-formas através de um software de edição de imagens, a fim de que o ImageJ colete integralmente a área de cada partícula, em busca dos resultados mais exatos possíveis. A partir disso, obtém-se o valor numérico de área de porosidade na superfície analisada. Os valores obtidos por gravimetria não poderiam ser aplicados por referenciam o volume total das amostras.

3.1. Amostras selecionadas

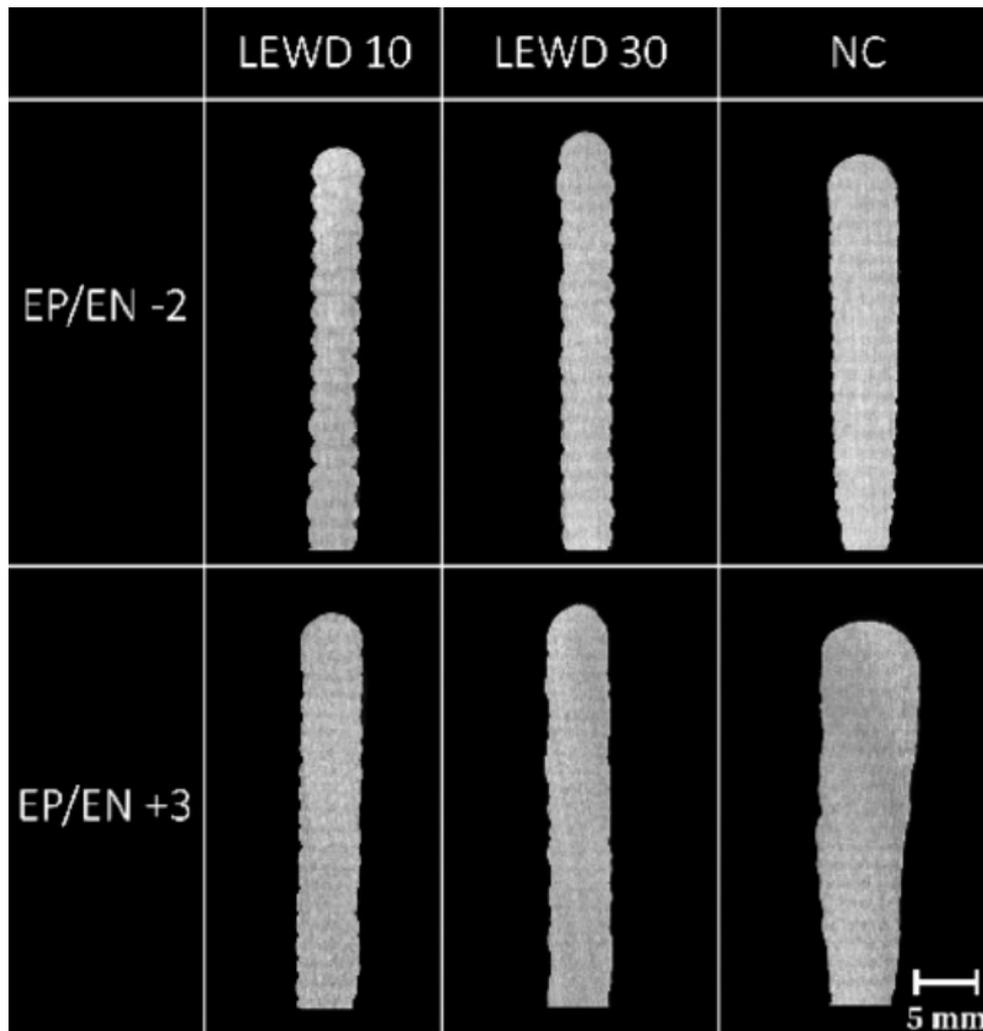
Foram selecionadas seis pré-formas depositadas por MADA com Resfriamento Ativo por Quase-Imersão em água para análise. As peças, confeccionadas para o trabalho de Scotti et al. (2020) e gentilmente cedidas para esta análise, foram depositadas com equipamento Fronius CMT *Advanced* do LAPROSOLDA. Na deposição, foi variada a razão positivo/negativo do eletrodo, relação EP/EN. Duas das amostras foram depositadas com resfriamento natural, sendo denotadas pelo sufixo NC – *Natural Cooling* – enquanto as demais foram confeccionadas com a técnica supracitada chamada RAQI – sendo variado, nesse caso, o parâmetro denominado LEWD – *Layer Edge to Water Distance*, a distância entre a lâmina de água da cuba e a camada depositada no momento. A interferência dos parâmetros mencionados na deposição das peças é nítida na Figura 15. Das seis pré-formas, foram utilizados cortes de aproximadamente 7 mm de comprimento, com duas superfícies paralelas.

Figura 14: Pré-forma depositada e um corte de sua seção.



Fonte: Autoral.

Figura 15: Influência dos parâmetros de deposição na geometria final das pré-formas.



Fonte: Adaptado de Scotti et al. (2020)

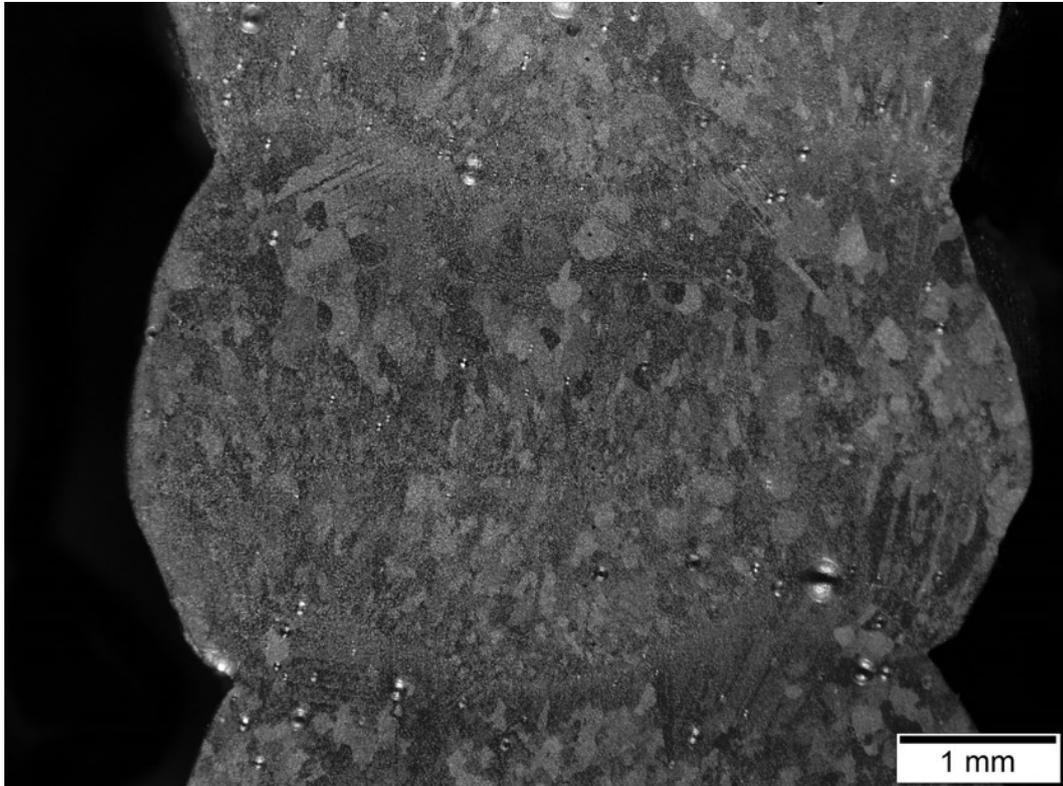
3.2. Preparação das amostras

As amostras selecionadas apresentavam sua superfície atacada quimicamente, conforme Figura 16, por necessidades anteriores de Scotti et al. (2020). Isso mostrava-se um potencial problema para identificação e captação da porosidade por um processo automatizado pelas diferentes tonalidades dos contornos dos grãos. Buscou-se então primeiramente remover o efeito do ataque químico na camada superficial de cada peça.

Com apoio do Laboratório de Metalografia do LAPROSOLDA, primeiro procedeu-se com um processo de polimento em equipamento apropriado com uso de alumina como abrasivo, a baixas velocidades. As amostras foram sequencialmente mergulhadas em água

durante o processo para remoção dos resíduos de alumina, sendo usado posteriormente um jato de ar comprimido para limpeza da superfície.

Figura 16: Superfície de uma amostra, com o evidente ataque químico.



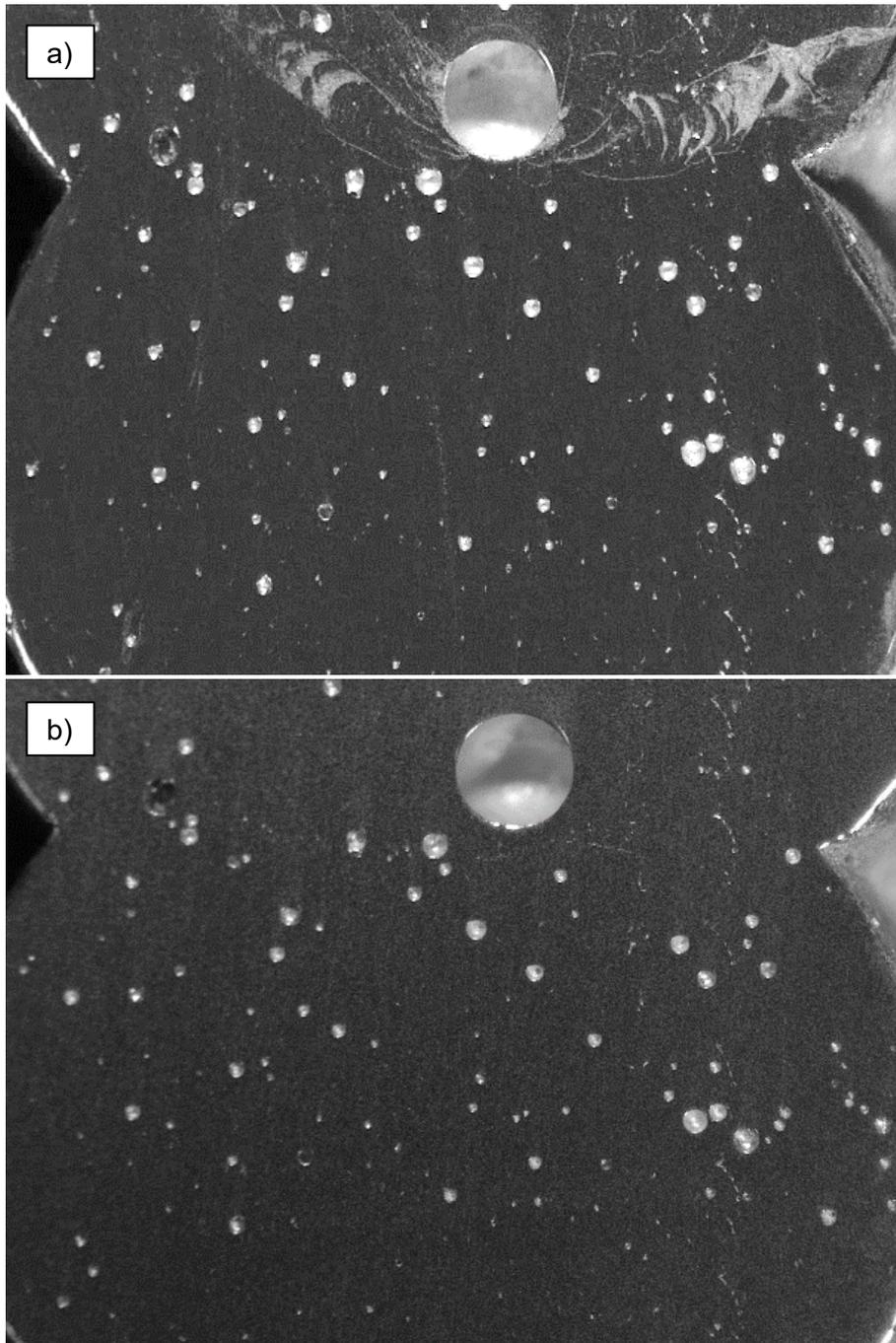
Fonte: Scotti et al. (2020)

Por inspeção visual, determinaram-se pausas no processo, quando as marcas do ataque deixavam de ser visíveis, estando a superfície visivelmente limpa e brilhante, sem riscos grosseiros. O estereoscópio do LEPU – Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – foi então utilizado para verificar a qualidade da superfície das amostras com uma ampliação mais elevada. Todo esse processo se repetiu mais de uma vez para algumas amostras, quando foram verificadas imperfeições ou manchas que poderiam dificultar a visualização dos poros. Quando manchas de água se tornaram um problema, a limpeza das amostras foi feita com aspersão de álcool etílico 80% seguido de jato de ar comprimido.

A Figura 17 (b) ilustra um exemplo de superfície devidamente polida e limpa pelo processo descrito, sem riscos aparentes, precipitados ou manchas e impressões digitais. A partir do padrão estabelecido em (b), foram desenvolvidas e aplicadas as metodologias para detecção de porosidade.

As imagens para análise foram então capturadas de acordo com os equipamentos descritos a seguir.

Figura 17: Exemplo de imagem antes (a) e após limpeza (b).



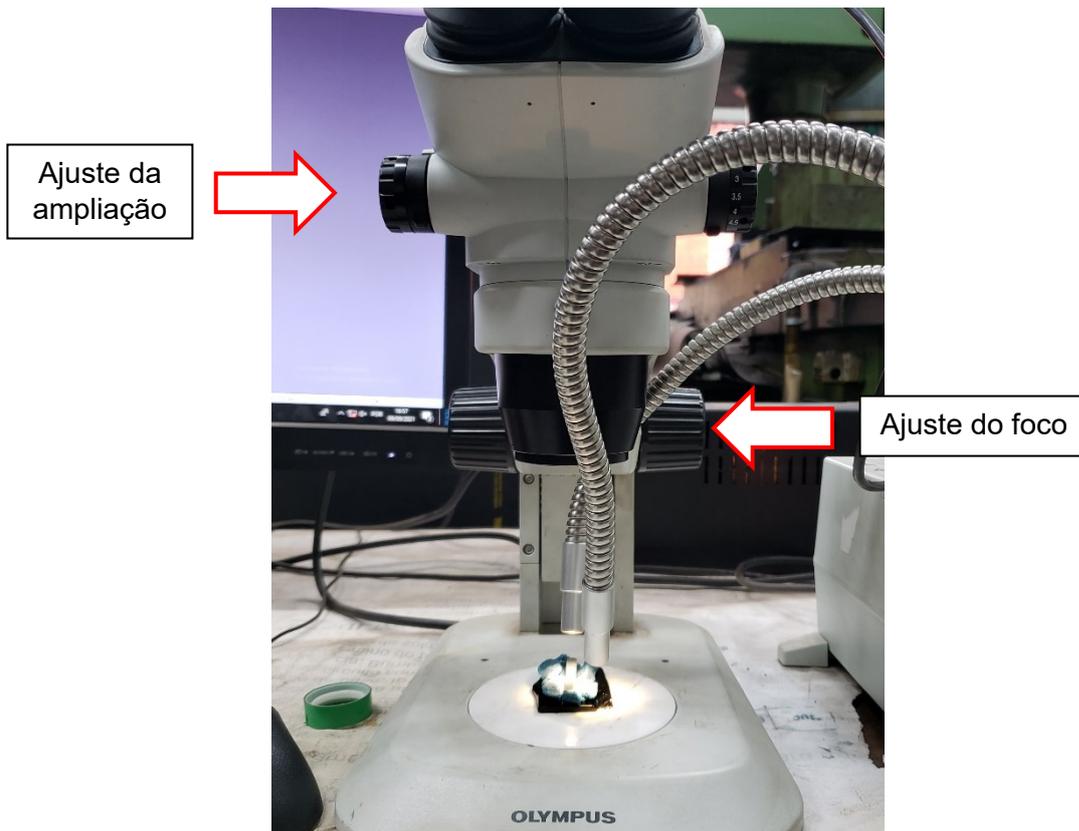
Fonte: Autoral.

3.3. Captura de imagens com o Estereoscópio

O estereoscópio, modelo Olympus LG-PS2, apresenta possibilidade de grande ampliação da imagem, sendo esse parâmetro regulado por uma manopla rotativa na lateral, indicada pela seta superior na Figura 18. A faixa de ampliação definida levou em conta a

largura de cada amostra, de modo que ela ficasse inteiramente contida em uma única imagem e não fosse necessário trabalhar imagens lado a lado para formar toda a superfície, de acordo com a representação esquemática da Figura 13. O equipamento apresenta ainda outra manopla rotativa, na parte posterior, destinada ao controle do foco. Essa manopla é indicada pela seta inferior na Figura 18.

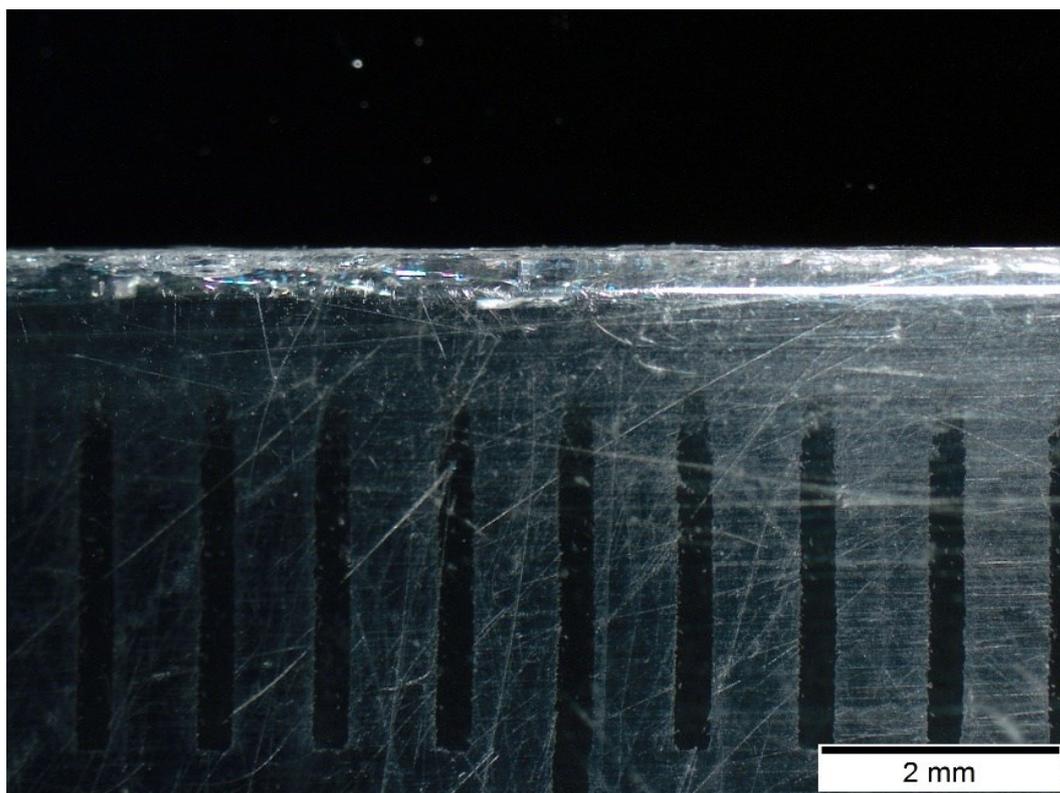
Figura 18: Estereoscópio do LEPU, modelo Olympus LG-PS2.



Fonte: Autoral.

A ampliação indicada pelo cursor na manopla rotativa deve coincidir com a selecionada no software próprio do equipamento no computador. Esse procedimento serve como calibração, e foi efetuado antes de cada tomada de imagens para garantir que a escala apresentada nas imagens, que pode ser ocultada ao registrar o arquivo, seja a mais exata possível. Com o auxílio de uma régua, pôde-se verificar, para diferentes ampliações, a boa aproximação da escala informada ao valor numerado no instrumento. A Figura 19 ilustra uma imagem captada a partir de um desses procedimentos.

Figura 19: Escala sobre uma régua.



Fonte: Autoral.

O procedimento para alocação das peças incluiu a fixação das amostras em um substrato de massa sobre uma placa de vidro para tornar o plano da superfície a ser analisada paralelo à lente do equipamento e evitar que houvesse perda de nitidez por problemas na regulagem do foco. Essa é uma questão que deve ser observada pois não é possível garantir perfeito paralelismo entre os planos da amostra, o plano de análise e a base oposta, pelas reduzidas dimensões.

A configuração de iluminação permite a utilização de duas luzes amarelas ajustáveis manualmente, com fecho de intensidade variável controlado por um *dimmer* no aparelho. O ajuste dos fechos e sua disposição foi feito durante a captura das imagens, através do modo *Live* selecionado no software do Olympus, que permite verificar a imagem em tempo real no monitor do computador.

Primeiramente, tentou-se direcionar ambas as luzes como que rente à superfície da peça, para que os poros, que nada mais são que ausência de material, ao não serem iluminados, ficassem escurecidos, em contraste com a superfície brilhante. Com um ou mesmo dois fechos de luz não foi possível obter o efeito desejado. Os poros apresentam-se com dimensões muito reduzidas, de modo que a própria planicidade da peça reduz a aplicabilidade dessa ideia. Ao aplicar um pequeno ângulo entre o fecho de luz e a superfície,

sombra passou a ser projetada, gerando alto contraste com os poros, que apresentaram, porém, distorção na geometria. A melhor combinação atingida foi iluminação direta, com intensidade mediana do fecho de luz. As conexões foram posicionadas próximas à lente do equipamento, com a luz incidindo quase verticalmente sobre as superfícies das peças.

Outra das funcionalidades do equipamento é a capacidade de variar o tempo de exposição, que pode ser alterado no software. É o tempo que o obturador da câmara passa aberto, permitindo a entrada de luz. Nos casos desse trabalho, como a peça permanece imóvel no substrato, um tempo de exposição elevado não implicaria em imagens borradas ou desfocadas, o que certamente aconteceria ao registrar algo em movimento.

A captura das imagens foi realizada por meio do comando *Snapshot* no software Olympus. Os arquivos foram salvos em formato jpeg e alta definição; para uma mesma imagem, foram salvas duas versões, com e sem a escala, para garantir valores de referência e evitar sobreposição na superfície.

É preciso mencionar que o posicionamento da peça no substrato e das luzes móveis do Estereoscópio é feito manualmente, sem nenhum auxílio eletrônico ou computadorizado. Dessa forma, a iluminação não foi exatamente a mesma para todas as imagens registradas, por maior que tenha sido o cuidado tomado. Têm-se implicações diretas, portanto, na reconstrução da superfície inteira da amostra a partir das imagens, sendo nítidos os limites entre duas imagens subsequentes.

De modo similar, o deslocamento da amostra para enquadrar a parcela desejada da superfície na lente do equipamento faz com que ocorram pequenas rotações. Para sobrepor as imagens formando o total da superfície, portanto, foram aplicadas rotações inversas nos softwares de imagem.

3.4. Captura de imagens com o Escâner Ótico

O uso do escâner como ferramenta de captura de imagem não apresentou grandes problemas inicialmente. Fácil de operar, o equipamento modelo EPSON Perfection V19 disponível no laboratório de eletrônica do LAPROSOLDA gera imagens com resolução de até 9600 dpi (*dots per inch*, pontos por polegada). As imagens foram capturadas com a superfície da peça sobre o vidro do escâner, sendo um anteparo escuro utilizado para evitar problemas por reflexão.

A primeira tomada de imagens, com resolução de 4800 e 7200 dpi da amostra com razão EP/EN -2 e LEWD de 10 mm, possibilitou a verificação de que a partir desses valores

de resolução não é obtido nenhum grande benefício prático para análise de imagem, conforme Figura 21. Assim sendo, a configuração definida foi de 4800 dpi, que retornava imagens consideravelmente mais leves que as resoluções de 7200 e 9600 dpi, em um intervalo de tempo muito menor, não apresentando prejuízo em qualidade.

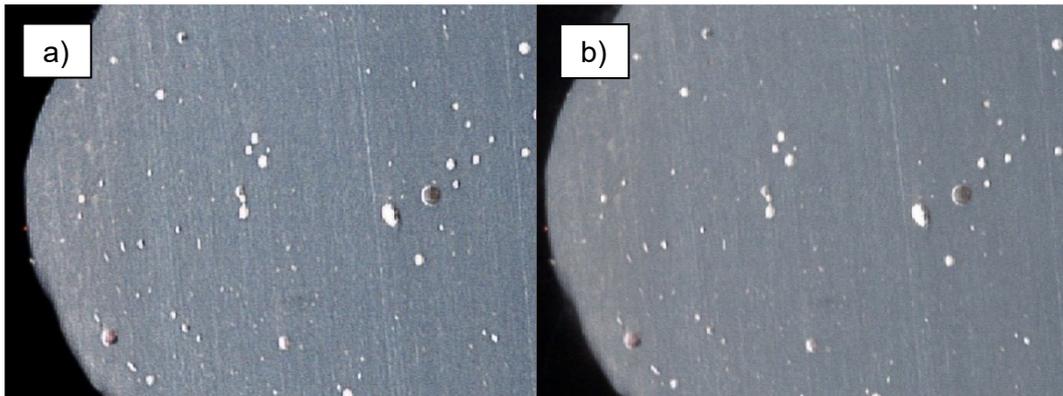
Figura 20: Escâner utilizado para a tomada de imagens.



Fonte: EPSON.

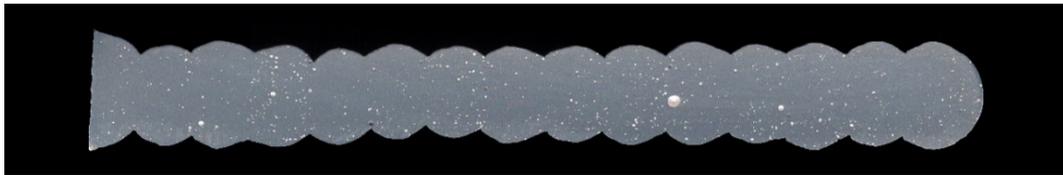
O primeiro problema dessa metodologia de captura, que é a mais simples de ser implementada, é justamente a ampliação que o equipamento pode fornecer. Por mais que possam ser geradas imagens de alta definição, a baixa ampliação faz com que a resolução não seja capaz de definir perfeitamente o contorno dos poros, tornando prejudicial a definição de sua forma. Entretanto, o escâner apresentou uma vantagem considerável sobre o estereoscópio; é possível em uma única imagem enquadrar totalmente a superfície da amostra. Outra vantagem desse equipamento sobre o estereoscópio é a uniformidade de iluminação na superfície, através da varredura do fecho de luz linearmente ao longo de toda a superfície.

Figura 21: Ampliação da imagem: 4800 dpi (a) e 7200 dpi (b).



Fonte: Autoral.

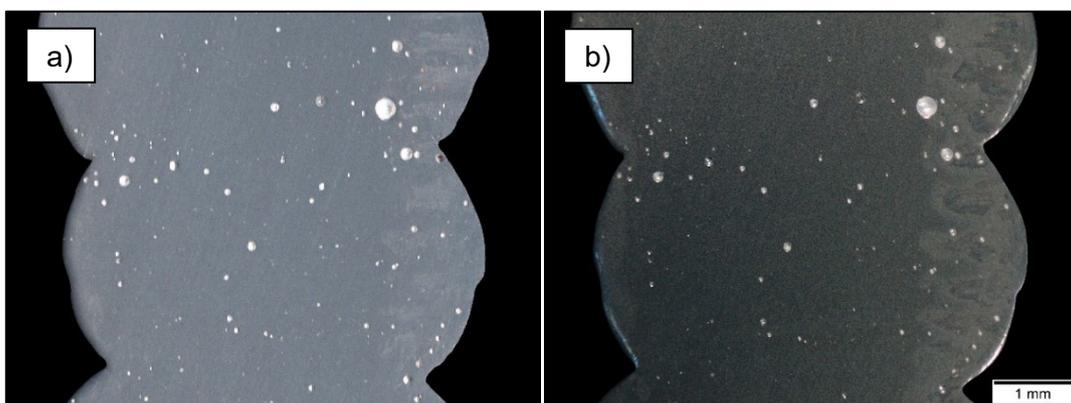
Figura 22: Imagem escaneada da amostra EP/EN -2, LEWD 10: os poros são visíveis como pontos esbranquiçados.



Fonte: Autoral.

A Figura 23 mostra um comparativo de parte da área da superfície mais próxima à base da amostra a partir de imagens dos dois equipamentos. A imagem escaneada, à esquerda, aparece mais opaca, muito embora seja possível discernir os poros tanto quanto na imagem do estereoscópio, à direita.

Figura 23: Comparativo da mesma área de imagem pelo escâner (a) e pelo estereoscópio (b).



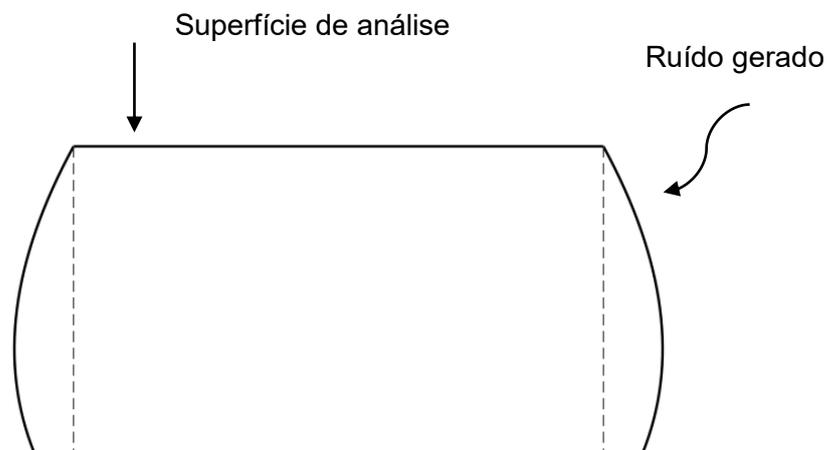
Fonte: Autoral.

3.5. Tratamento para delimitação do contorno das superfícies

As peças não apresentam duas superfícies planas perfeitamente paralelas, efeito resultante dos processos de corte e polimento. Além disso, há uma ligeira distorção ao longo da transversal em relação à direção de deposição, o que faz com que os limites das superfícies definidas pelos dois planos de corte não sejam idênticos.

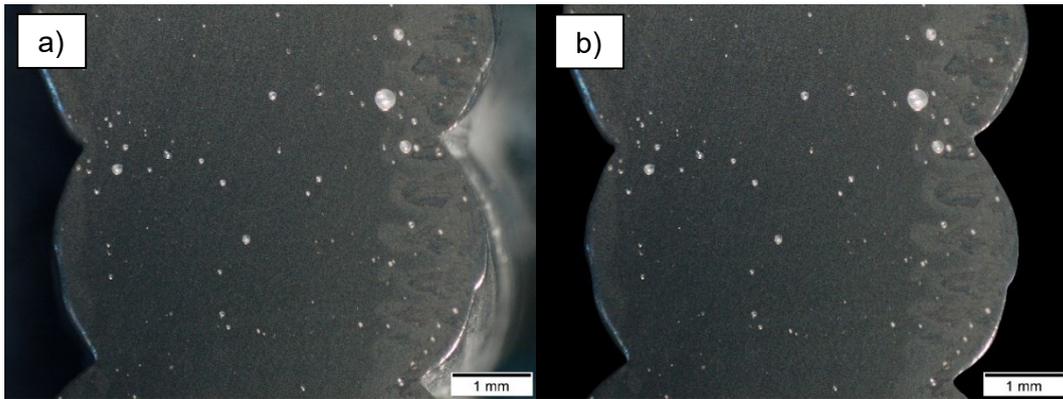
Com o uso do software Adobe Photoshop, foi feito um tratamento que consiste da seleção do contorno da superfície da amostra na imagem, de modo a remover todo o restante do plano de fundo que pudesse ser potencialmente problemático. Isso é necessário pois os efeitos acima mencionados fazem com que seja possível perceber reflexos dos lados abaulados. Esse tratamento foi adotado para prevenir ruído durante o processo de automatização no ImageJ e delimitar claramente o contorno das superfícies para posteriormente obter o valor de área.

Figura 24: Representação da delimitação da superfície.



Fonte: Autoral.

Figura 25: Exemplo de superfície antes (a) e depois (b) do tratamento inicial no Adobe Photoshop para delimitação de contorno.

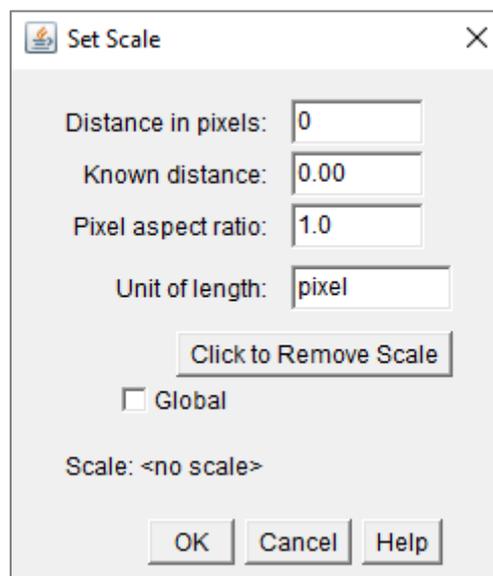


Fonte: Autoral.

3.6. Desenvolvimento

O software gratuito de código aberto ImageJ foi utilizado para avaliar a porosidade nas imagens obtidas com os equipamentos já mencionados – o escâner ótico e o estereoscópio. O programa, baseado em Java, pode ser facilmente baixado na internet e instalado em computadores Mac OS, Linux e Windows.

Figura 26: Interface da ferramenta para definição de Escala.



Fonte: Autoral.

O ImageJ oferece uma extensa gama de ferramentas para edição de imagem. Estão disponíveis ferramentas comuns como contraste, intensidade, brilho, matiz e balanço de branco, que podem ser utilizadas para pequenas correções nas imagens. Há também ferramentas para conversão entre modos de cores, definição de escala, seleção de formas geométricas e traçado livre, e uma que merece especial destaque no escopo deste trabalho, chamada *Analyze Particles*. Essa ferramenta é capaz de detectar formas e partículas a partir da diferença de cores entre pixels adjacentes ou agrupamento de pixels. Para ser utilizada, é preciso que a imagem passe por alguns ajustes.

Primeiramente a imagem, obtida por meio do escâner ou do estereoscópio, originalmente no modo RGB – *Red, Green and Blue*, o padrão de cores para monitores e a internet no geral – foi transformada em uma escala monocromática de tons de cinza em 8 bits e teve suas cores invertidas para que os poros ficassem pretos – uma exigência da ferramenta de seleção de partículas do ImageJ. Após a adequação do tipo de cor para a imagem, é necessário aplicar um filtro chamado *Threshold* – limiar, em tradução livre – que separa os pixels em apenas duas categorias de cor – branco ou preto - evidenciando a diferença de tom entre plano de fundo e partículas, superfície e poros, respectivamente.

Figura 27: Gradiente em tons de cinza para a análise da Figura 28.

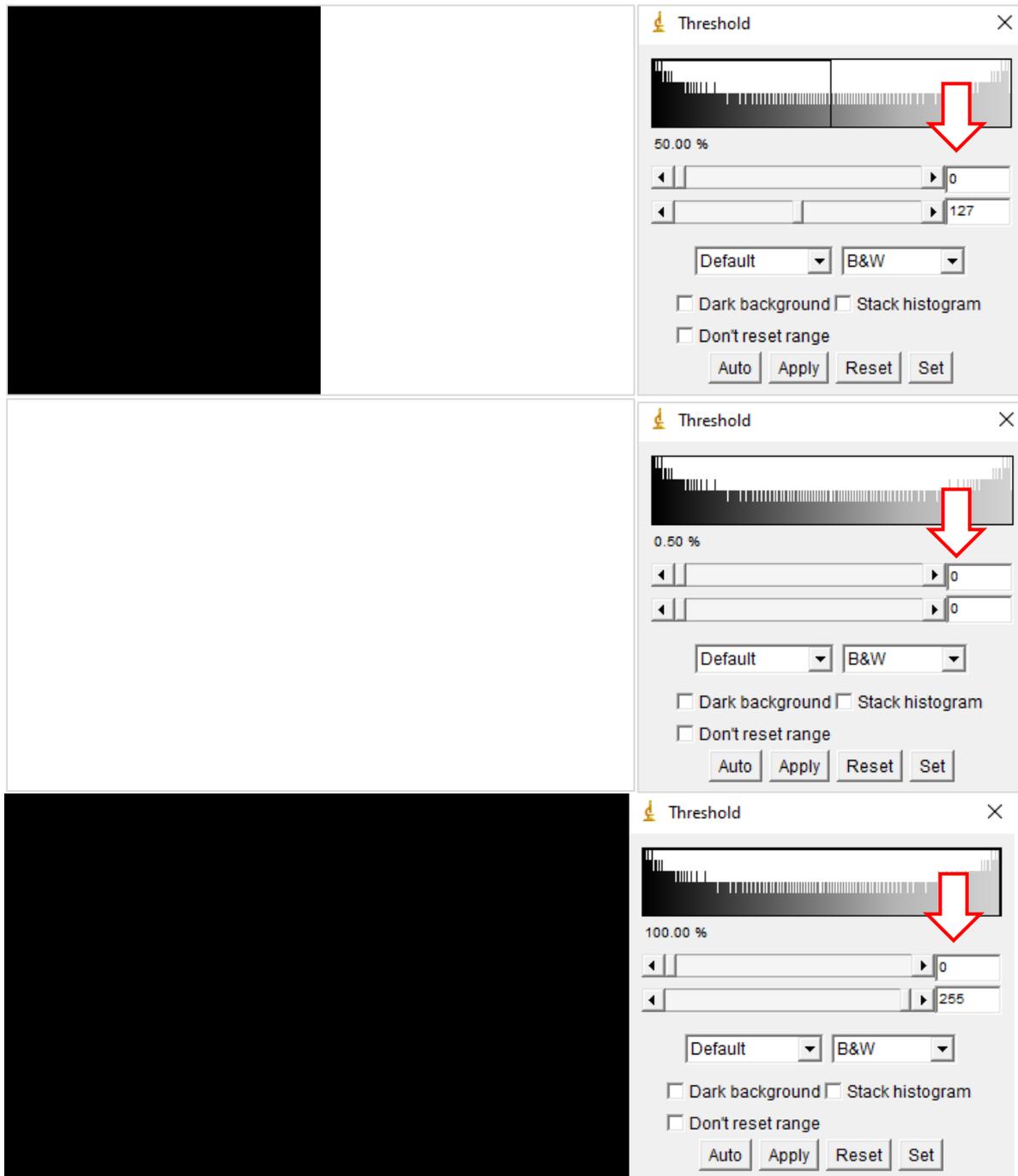


Fonte: Autoral.

O *Threshold* funciona definindo um *cutoff* de 0 a 255, com que cada pixel pode assumir um valor inferior ou superior. Cada pixel é então separado em uma classe distinta – branco ou preto, 255 ou 0 – e armazenado. Ao aplicar o *Threshold* na imagem gradiente da Figura 27, tendo como resultado o disposto na Figura 28, é possível verificar o resultado da seleção de diferentes valores de *cutoff*, indicados por setas. No escopo deste trabalho, agrupados, os pixels pretos formam partículas sobre o fundo branco. É preciso salientar que não existe uma

configuração correta desse filtro. A ferramenta deve ser trabalhada para que seja atingido o melhor resultado de acordo com cada objetivo. A seleção do Threshold neste trabalho levou em conta análise visual para verificar a relação entre as partículas destacadas na imagem e o que constituía realmente porosidade.

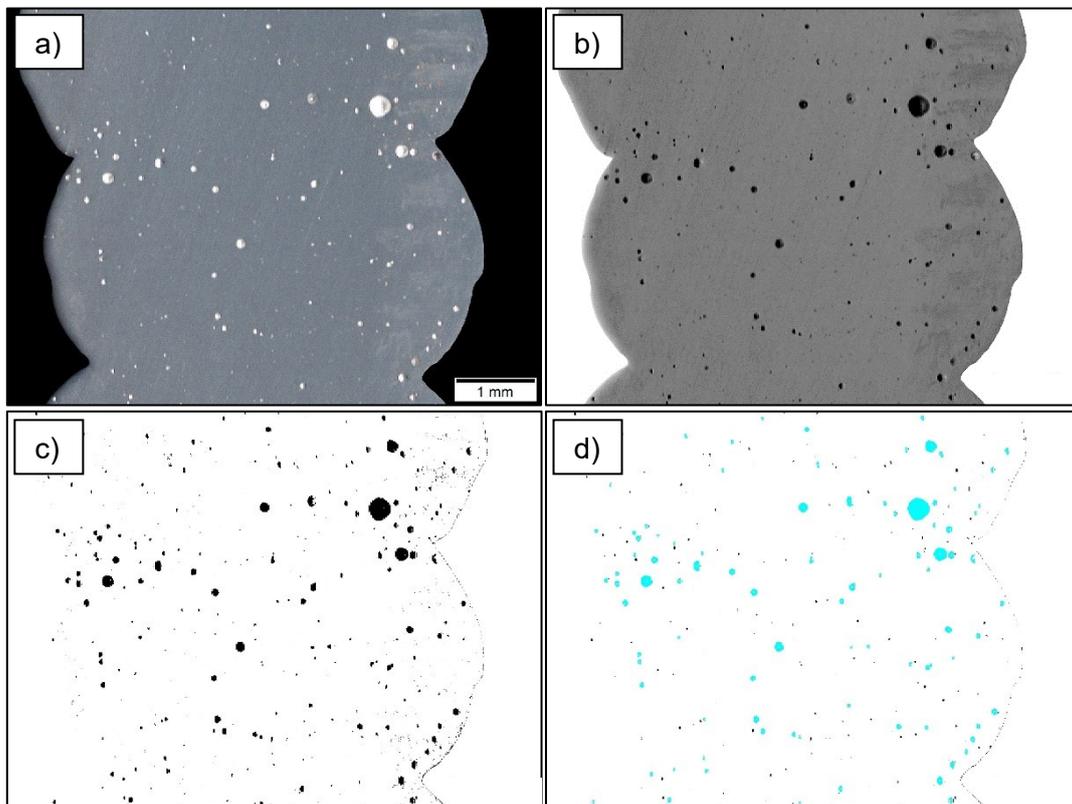
Figura 28: Threshold aplicado ao gradiente de tons de cinza da Figura 27.



Fonte: Autoral.

Após todos os procedimentos acima descritos, a ferramenta de Análise de Partículas pode ser utilizada. A Figura 29 explicita visualmente toda a metodologia supramencionada, na execução da seleção de porosidade para um trecho da superfície da amostra com razão EP/EN -2 e LEWD 10, com imagem obtida com o escâner. A imagem a) apresenta-se após a primeira edição, que remove o plano de fundo a fim de minimizar ruído; é transformada em b) numa imagem em tons de cinza, sendo aplicada a inversão de cores. A imagem, c), exibe o resultado da aplicação do filtro *Threshold*, e a d), o resultado da seleção dos poros, sobrepostos em azul a partir da imagem c), através da seleção de *Overlay Masks* na interface da ferramenta de Análise de Partículas.

Figura 29: Etapas da metodologia automatizada no ImageJ para um trecho da seção de uma amostra escaneada.



Fonte: Autoral.

As condições nas quais as imagens são obtidas interferem diretamente na configuração do *Threshold*. No estereoscópio, a iluminação é um exemplo claro. Isso porque qualquer ruído que se aproxime do tom dos poros – reflexo, manchas ou riscos – torna-se um problema. Na Figura 30, disposta abaixo, é indicada uma área da imagem com reflexo, que assume uma tonalidade mais próxima do tom dos poros que do tom da superfície metálica. Ao aplicar o *Threshold*, o reflexo será identificado como partícula divergente do plano de

fundo. Apresentar-se-ão adiante algumas ferramentas que podem minimizar esses problemas.

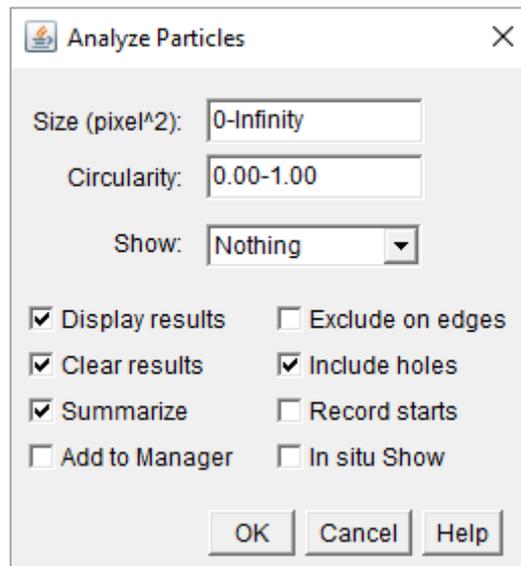
Figura 30: Reflexo luminoso na superfície de uma amostra.



Fonte: Autoral.

Uma solução empregada para não identificar esse tipo de reflexo como porosidade é definir um limite de circularidade na seleção das partículas. Poros apresentam uma morfologia circular bem característica, enquanto qualquer outra mancha na superfície, como reflexo luminoso ou riscos, dificilmente apresentará essa geometria. A interface da ferramenta Seleção de Partículas, disposta na Figura 31, apresenta um filtro capaz de estabelecer limites de circularidade, e limitar a captura de partículas com circularidade superior a 0,3 foi o suficiente para eliminar a maior parte desse tipo de ruído na Figura 30. Estabelecer um limite inferior de circularidade elevado, porém, exclui a maior parte dos poros da análise, por sombras e distorções devido à iluminação.

Figura 31: Interface da ferramenta de Análise de Partículas.



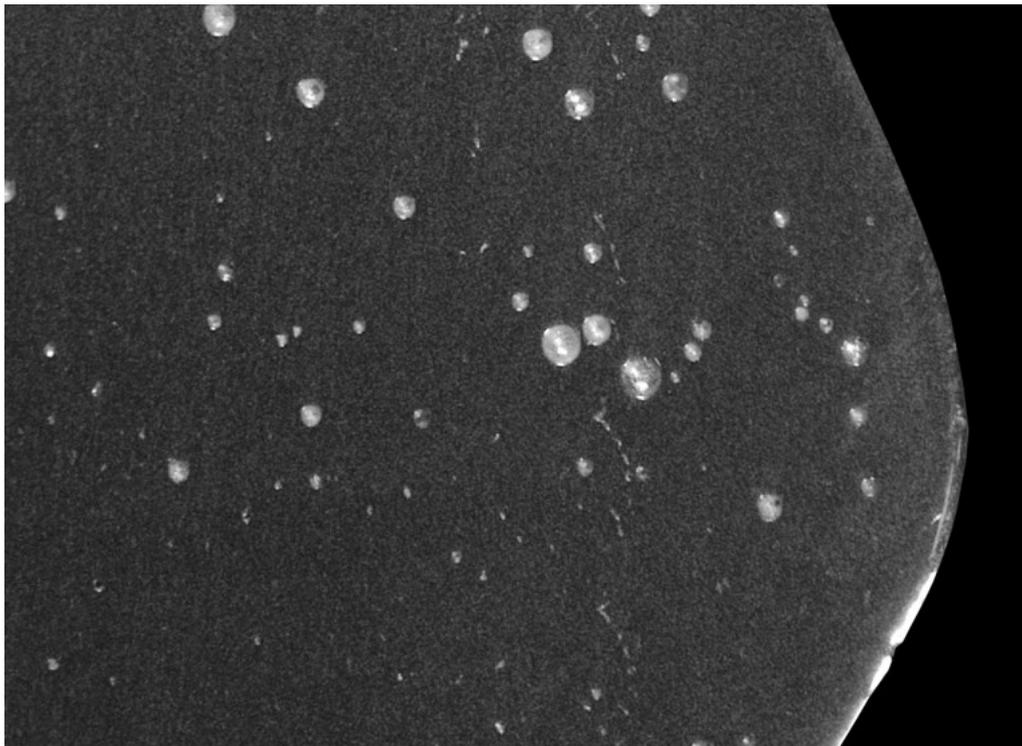
Fonte: Autoral.

Outro filtro existente nessa ferramenta é capaz de limitar a área das partículas para seleção. É possível estabelecer um valor mínimo e máximo de área para detecção de poros, de modo que formas espúrias e pequenas partículas de ruído sejam desprezadas e não incluídas nos resultados retornados.

Os dois filtros, limite de circularidade e de área, foram aplicados em conjunto na Figura 32 para gerar a Figura 33. O efeito resultante é nítido através da detecção dos poros destacados em azul, enquanto o reflexo luminoso próximo à borda direita, de cor preta, é desprezado pelo formato, não sendo selecionado como porosidade, e a maior parte do ruído particular pontual presente na imagem é desprezado pela combinação dos dois filtros.

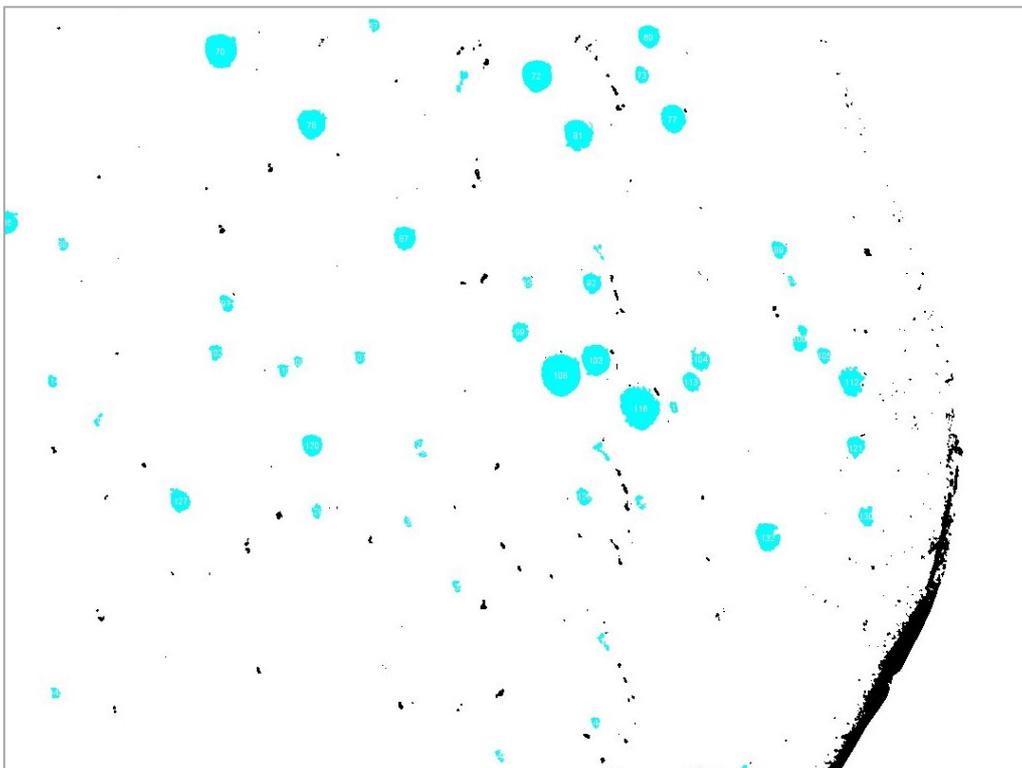
O ImageJ, ao coletar os poros, atribui a cada um uma numeração e seu equivalente valor de área, referenciado a partir da escala previamente definida, e gera um arquivo em linhas, que pode ser trabalhado em plataformas como Google Sheets ou Microsoft Excel.

Figura 32: Trecho superficial com destaque nos poros e no reflexo luminoso à direita.



Fonte: Autoral.

Figura 33: Resultado da aplicação de filtros na ferramenta de Análise de Partículas. Os particulados azuis são selecionados; mas não os pretos.



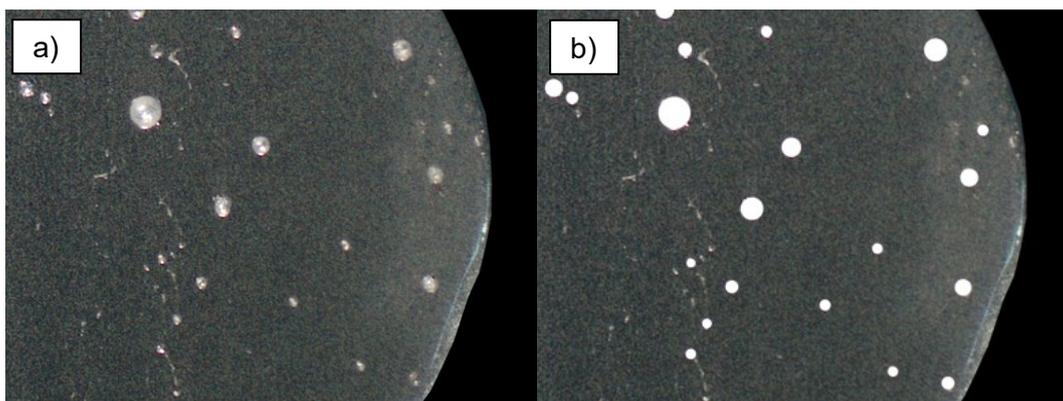
Fonte: Autoral.

3.7. Estabelecimento de uma referência a partir da captação manual de porosidade

Para validar a utilização dessa metodologia supracitada como mecanismo de seleção de porosidade, procedeu-se desenvolvendo uma comparação a partir da captação manual de poros. Para um mesmo trecho de superfície, todos os poros foram artificialmente destacados no Adobe Photoshop com uma ferramenta de seleção de contorno, imprimindo-lhes então um preenchimento uniforme, conforme Figura 34, b).

Tal procedimento teve em vista a aplicabilidade da metodologia já descrita, mas com resultados mais verossímeis pela uniformidade de cor, garantindo um Threshold sem ruído. O poro é detectado como partícula em seu todo, pois os reflexos e manchas foram suprimidos pelo preenchimento.

Figura 34: Destaque do preenchimento manual dos poros.



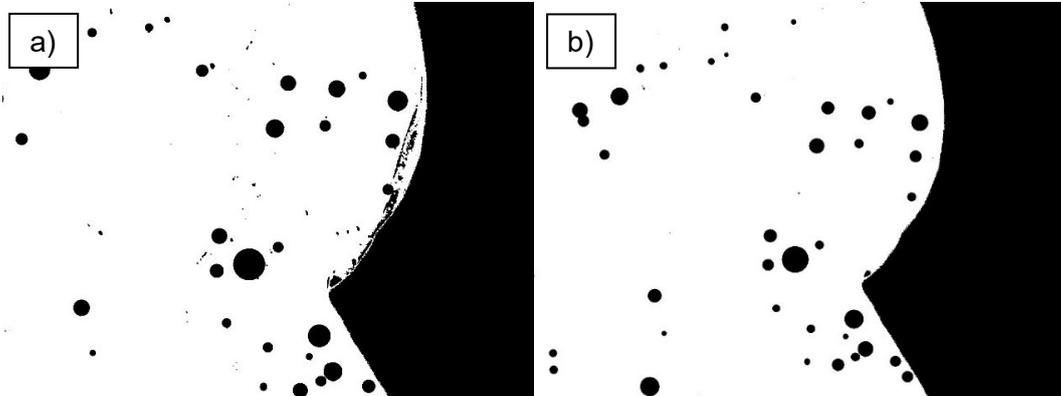
Fonte: Autoral.

De fato, foram observados resultados melhores com o filtro Threshold. Todos os poros destacados não só foram captados como também ficaram com seu formato original preservado, sem distorção. O Threshold aplicado pôde ser bem mais restritivo que no processo automatizado. A uniformidade artificial dos poros garantiu que ruído superficial e reflexo nas bordas e nos poros pudesse ser eliminado antes mesmo da aplicação da Análise de Partículas. Tal efeito deve-se à diferença entre o tom branco puro destinado aos poros em contraste com o cinzento da maior parte das manchas, de modo que um filtro elevado agrupasse quase que exclusivamente pixels brancos em uma classe.

Como exemplo, na Figura 35 é possível visualizar esse efeito: em a) o filtro Threshold é menos limitante e não elimina o particulado ruidoso; à direita, a aplicação de um filtro mais restritivo deixa apenas os poros aparentes. Na análise da Figura 36, o mesmo pode ser visto:

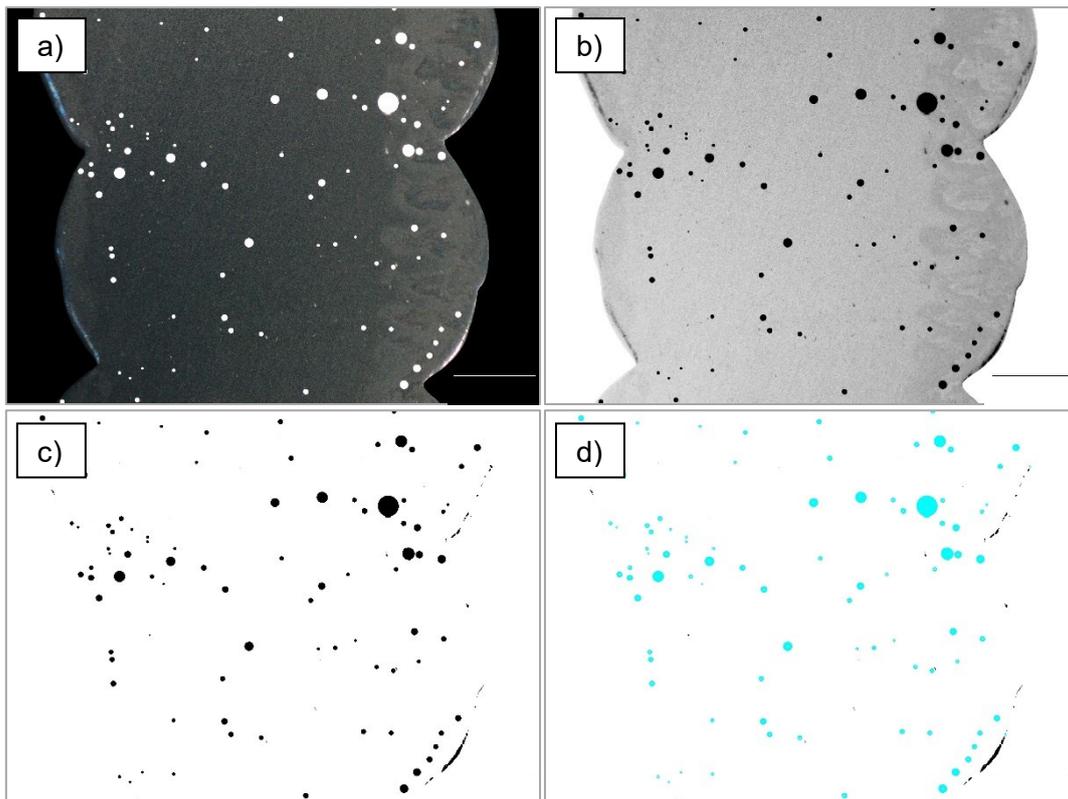
de acordo com c), o único particulado selecionado que não é porosidade é o reflexo branco próximo à margem inferior direita.

Figura 35: Resultado da aplicação de um *Threshold* mais restritivo em b) que em a).



Fonte: Autoral.

Figura 36: Metodologia aplicada a uma imagem com poros realçados manualmente.



Fonte: Autoral.

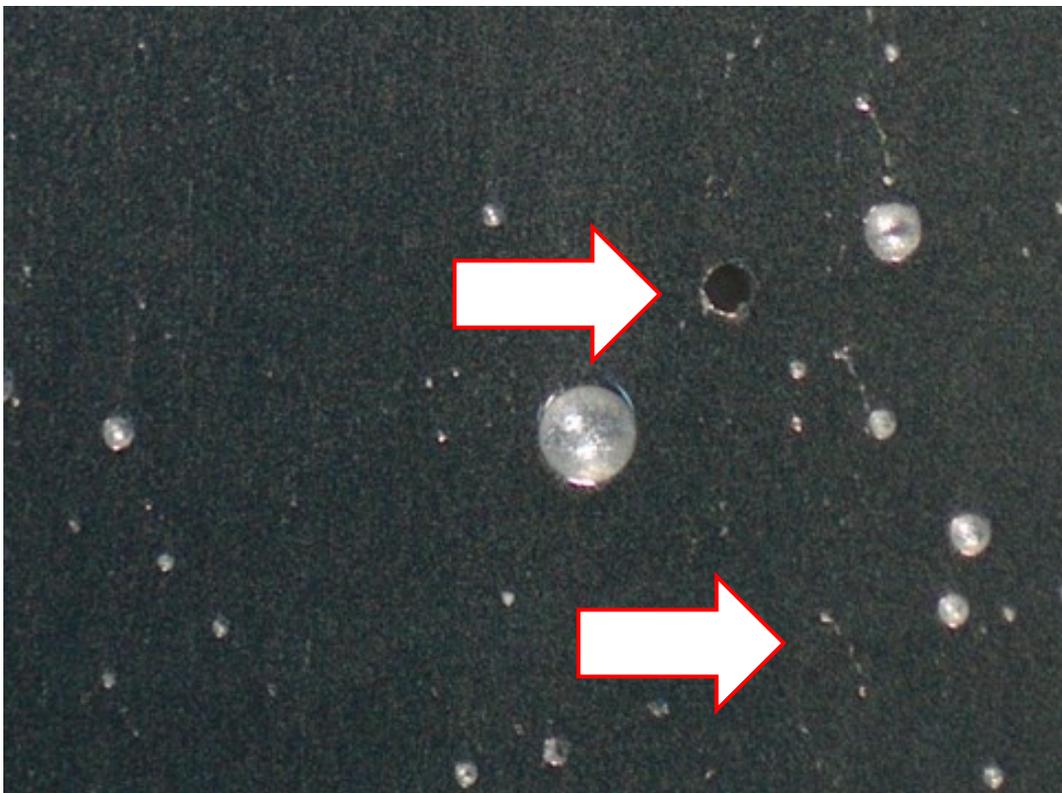
O filtro limite de circularidade também foi aplicado, justamente para eliminar o reflexo esbranquiçado. Com os poros tendo seu formato bem definido, o limite inferior de circularidade

ajustado pôde ser consideravelmente elevado. Se antes, com as imagens cruas, foram trabalhados valores mínimos em torno de 0,20 a 0,30, os poros artificialmente evidenciados permitiram a aplicação de um limite tão alto quanto 0,85. Dessa forma, todo o ruído foi eliminado, e apenas poros são agrupados em azul, conforme visto na Figura 36 d).

Dessa forma, os resultados do processo de destaque artificial dos poros puderam ser utilizados como referência para uma análise comparativa, para determinar uma medida de qualidade da metodologia automatizada desenvolvida para as imagens do escâner e do estereoscópio. Tais valores, nas posteriores análises deste trabalho, são chamados **referências**.

Com as metodologias automatizadas busca-se reduzir o tempo empregado no processo de seleção de porosidade. O realce artificial, que apresenta resultados melhores, não é prático e não pode ser implementado rapidamente, por demandar preenchimento poro a poro. Além disso, a seleção manual demanda a identificação da porosidade em si: particulados muito pequenos apresentam difícil visualização devido à resolução dos equipamentos utilizados. Não seria viável avaliar, num aparelho com maior ampliação, como um microscópio, cada particulado que gerasse dúvida quanto à sua natureza.

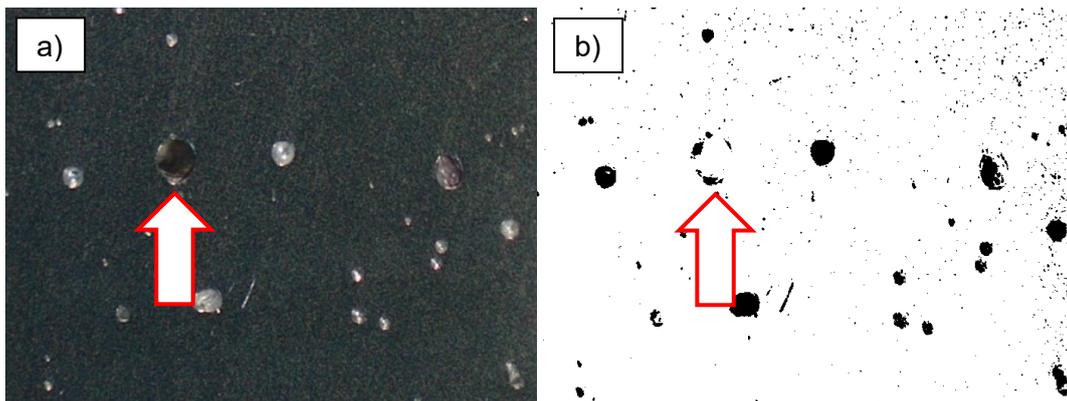
Figura 37: Detalhe dos particulados e vazios enegrecidos.



Fonte: Autoral.

Na Figura 37, é destacado um trecho de superfície que se apresenta de difícil identificação. Um exame mais detalhado no microscópio poderia revelar poros minúsculos ou mesmo alguma partícula decorrente do processo de deposição ou polimento, mas sua contribuição como área porosa seria irrisória. Dessa forma, qualquer forma que não pudesse claramente ser identificada como porosidade, devido à sua reduzida dimensão, foi desprezada. Além disso, a análise das superfícies das peças tornou clara a presença, em algumas amostras, de vazios enegrecidos, que, no processo automatizado, seriam agrupados como superfície e não particulado. Esses poros, portanto, não ofereceriam contribuição à área porosa, tendo, porém, efeitos negativos à peça de acordo com a fenomenologia. A Figura 38 exhibe o resultado da aplicação do Threshold à um desses poros escuros, em que é possível verificar nitidamente a perda de área em b) do poro indicado pela seta em a), a imagem original.

Figura 38: Vazios enegrecidos com perda de área.

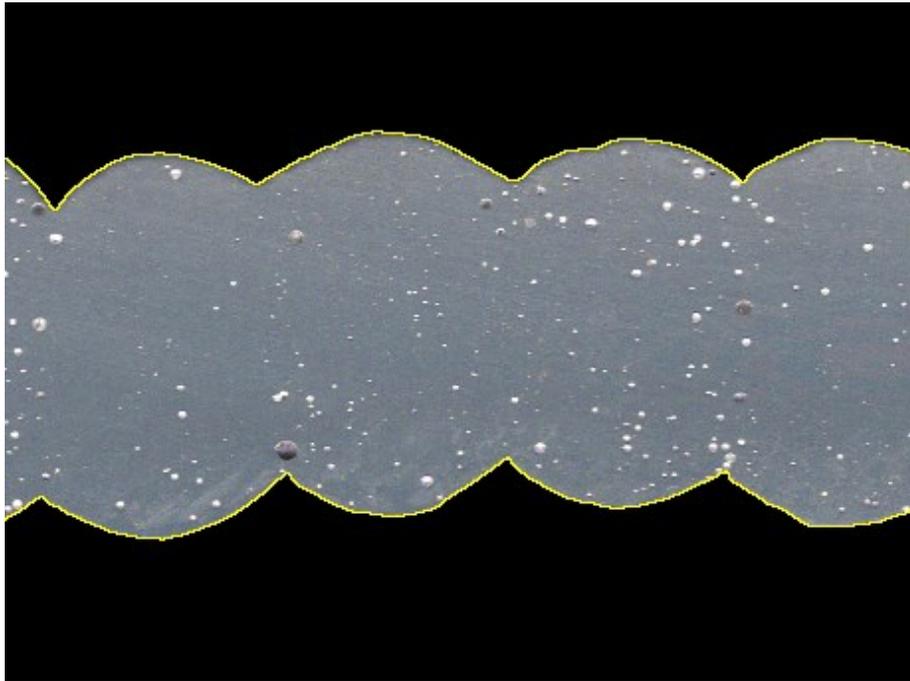


Fonte: Autoral.

3.8. Determinação da área superficial

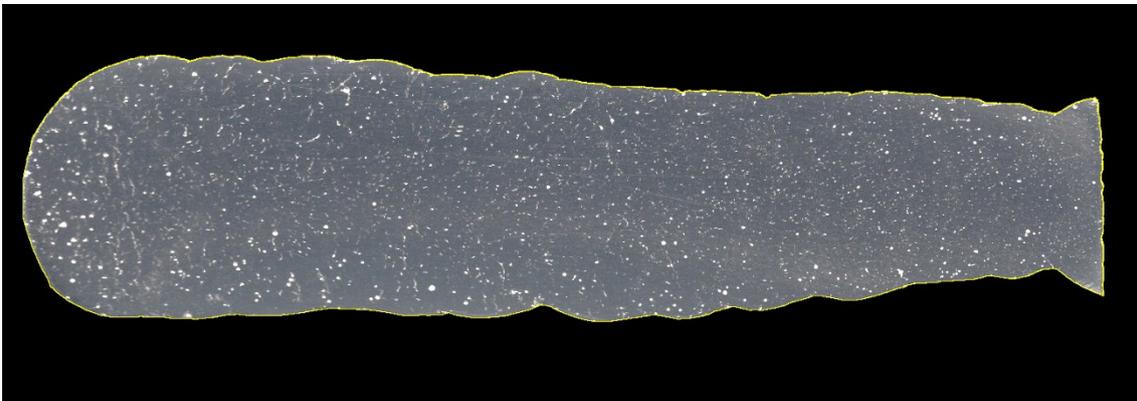
A área superficial de cada amostra foi definida com a utilização da ferramenta *Tracing* no ImageJ, que detecta o contorno de formas automaticamente por meio de algoritmo. O procedimento realizado no item 3.5, removendo o fundo e aplicando nele tom preto uniforme (0,0,0 RGB), gerou contraste com a superfície cinzenta da amostra, tornando a seleção automática do contorno extremamente precisa. O valor retornado de área foi obtido então pelos comandos *Analysis* e *Measure* a partir da escala definida. A Figura 39 exhibe uma ampliação, evidenciando o traçado amarelo que delimita a superfície da amostra; na Figura 40, enquadra-se uma amostra por inteiro.

Figura 39: Utilização da ferramenta Tracing para obtenção de área. Imagem ampliada.



Fonte: Autoral.

Figura 40: Delimitação do contorno de superfície a partir da ferramenta Tracing.



Fonte: Autoral.

CAPÍTULO IV

Nesse capítulo, são apresentados, comparados e discutidos os resultados obtidos a partir das imagens das amostras previamente expostas. São dispostos os valores obtidos de área superficial porosa das três seções de cada uma das amostras, através das metodologias previamente apresentadas, e também de volume vazio percentual obtido por Gravimetria, sendo estabelecidas comparações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram coletados através do software ImageJ, sendo gerados automaticamente arquivos csv após análise de cada imagem. Um dos arquivos, nomeado *Results*, organiza em uma planilha cada partícula detectada com seu respectivo valor de área; o segundo, nomeado *Summary*, dispõe o número total de partículas detectadas, a área total contabilizada e o valor médio de área das partículas.

Para todas as amostras analisadas, o valor de área superficial [mm²] foi obtido a partir da escala pré-definida, localizada no canto inferior direito para as imagens do estereoscópio, e referenciada pelo valor dpi para as imagens do escâner. A ferramenta de contorno automático foi utilizada no ImageJ para detectar os limites da peça, gerando o valor numérico de área a partir do comando *Measure* (Ctrl+M), conforme descrito no item 3.8.

Os valores de área superficial divergem entre as capturas pelos dois equipamentos pela necessidade de reconstrução por sobreposição com as imagens do estereoscópio. Ainda assim, estabelecendo como mais exato o valor de área obtido a partir do escâner, os erros relativos verificados para as imagens do estereoscópio foram muito baixos, sendo o máximo valor encontrado de 1,28%, conforme Tabela 1.

O valor de área particulada percentual foi obtido a partir da coleta do valor total de área das partículas pela ferramenta do ImageJ e do valor superficial total de cada amostra, descrito acima. Os valores obtidos para as seis amostras, dispostos nas Figuras 41 e 42, e também

na Tabela 2, entendidos como percentual de vazios, estão de acordo com aqueles mencionados pela literatura.

Tabela 1: Área superficial das amostras a partir das imagens dos dois equipamentos.

	Escâner [mm²]	Estereoscópio [mm²]	Erro Relativo %
EP/EN -2 LEWD 10	202,02	203,09	0,53
EP/EN -2 LEWD 30	229,50	230,75	0,54
EP/EN -2 NC	265,10	261,96	1,18
EP/EN +3 LEWD 10	249,01	250,18	0,47
EP/EN +3 LEWD 30	258,96	259,28	0,12
EP/EN +3 NC	352,711	348,2	1,28

Fonte: Autoral.

Para as amostras depositadas com EP/EN -2, a primeira observação a ser feita é referente ao elevado valor de porosidade encontrado com deposição a partir de uma distância LEWD de 10 mm. Isso vai ao encontro do proposto por Silva (2019), que versa sobre a aplicação da técnica RAQI com diferentes distâncias entre a deposição e a lâmina de água. A aplicação de uma distância pequena (10 mm), se combinada com outros parâmetros de deposição, aumenta os níveis de porosidade observados por interferência da evaporação de água da cuba. Para as três metodologias testadas (Coleta Manual, Escâner e Estereoscópio), os valores foram superiores aos identificados para as demais amostras.

Tabela 2: Vazio superficial (%) para as amostras, com imagens dos dois equipamentos.

	Referência	Escâner	Estereoscópio
EP/EN -2 LEWD 10	1,96	2,04	1,50
EP/EN -2 LEWD 30	1,14	1,27	1,09
EP/EN -2 NC	0,95	1,25	0,95
EP/EN +3 LEWD 10	1,18	1,34	1,09
EP/EN +3 LEWD 30	1,13	1,16	1,13
EP/EN +3 NC	0,61	1,12	0,68

Fonte: Autoral.

Além disso, na amostra com distância LEWD de 10 mm, foi verificada a existência de um poro destoante dos demais, com diâmetro de 580 μm , representando 6,87% da porosidade detectada em toda a superfície. Essa partícula espúria se torna ainda mais preocupante ao considerar que o diâmetro detectado, avaliado num plano, pode ser inferior ao maior diâmetro real do poro, alocado ao longo da direção de deposição em outra seção.

A metodologia implementada em imagens obtidas com o escâner mostrou uma tendência a entregar valores de porosidade maiores que as demais metodologias para todas as amostras. Isso foi verificado para os seis casos, com os erros relativos à referência de área particulada percentual variando de 3% a 84%.

A metodologia implementada a partir do Estereoscópio, porém, apresentou resultados mais próximos àqueles estabelecidos pela referência, sendo observados quatro casos com erros inferiores a 10%.

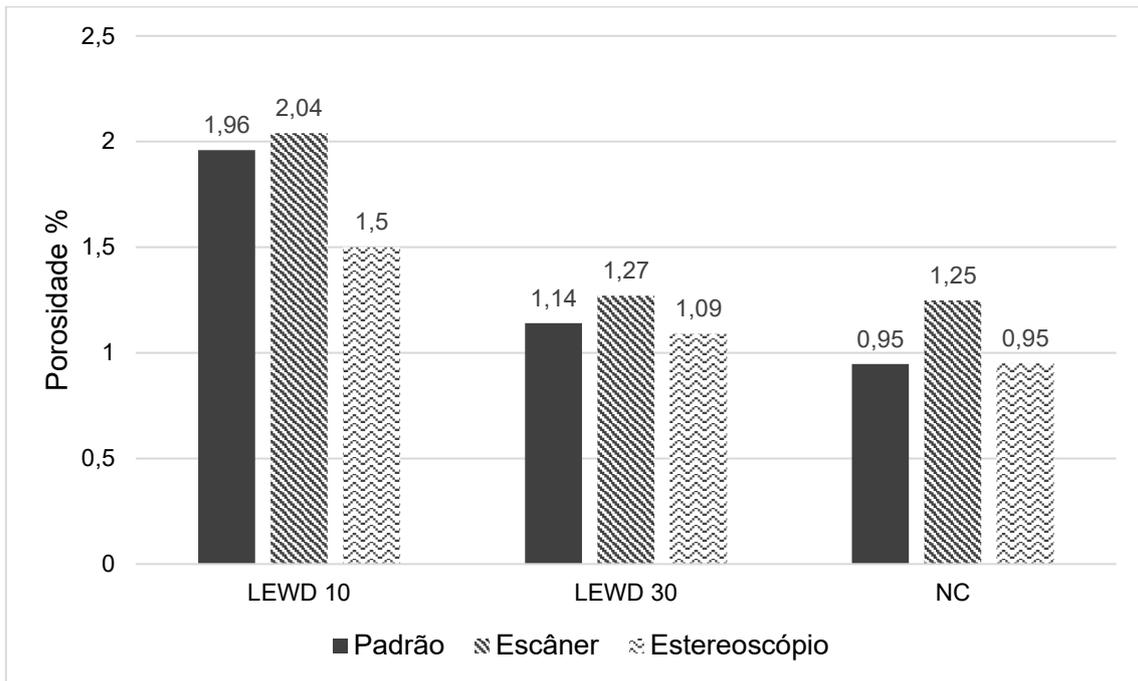
A seleção de um maior número de partículas, ruído ou manchas em sua maior parte, aparece balanceada pela perda de área pela presença de vazios enegrecidos, de tonalidade mais próxima à superfície lisa cinzenta da amostra que do tom claro normalmente relacionado aos poros. Isso faz com que a aplicação do filtro *Threshold* não seja capaz de identificar o poro na totalidade como uma partícula, conforme Figura 39. Além disso, o interior dos poros apresenta-se parcialmente ruidoso, com reflexo da iluminação das lâmpadas gerando uma não-uniformidade no preenchimento, como visto na Figura 43.

Tabela 3: Área Porosa: erros relativos (%) em relação à referência estabelecida.

	Escâner	Estereoscópio
EP/EN -2 LEWD 10	4,68	23,21
EP/EN -2 LEWD 30	11,76	3,68
EP/EN -2 NC	30,83	0,64
EP/EN +3 LEWD 10	14,04	7,13
EP/EN +3 LEWD 30	3,44	0,14
EP/EN +3 NC	83,50	12,25

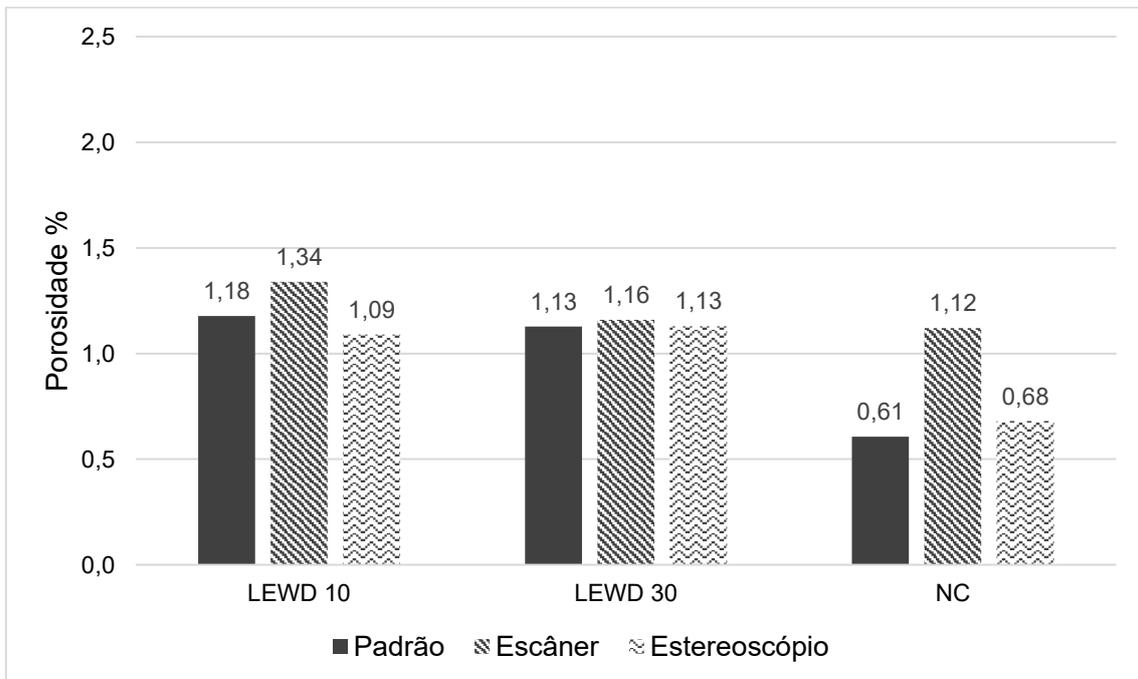
Os resultados das duas amostras depositadas sem a técnica RAQI apresentaram grandes erros para ambas as metodologias implementadas com escâner e estereoscópio. A fonte de erro muito provavelmente, neste caso, está na própria seleção manual da porosidade. A Figura 44 dispõe um trecho de superfície da amostra depositada com razão EP/EN +3 e resfriamento natural.

Figura 41: Valores de porosidade superficial percentual obtidos para as amostras com EP/EN -2.



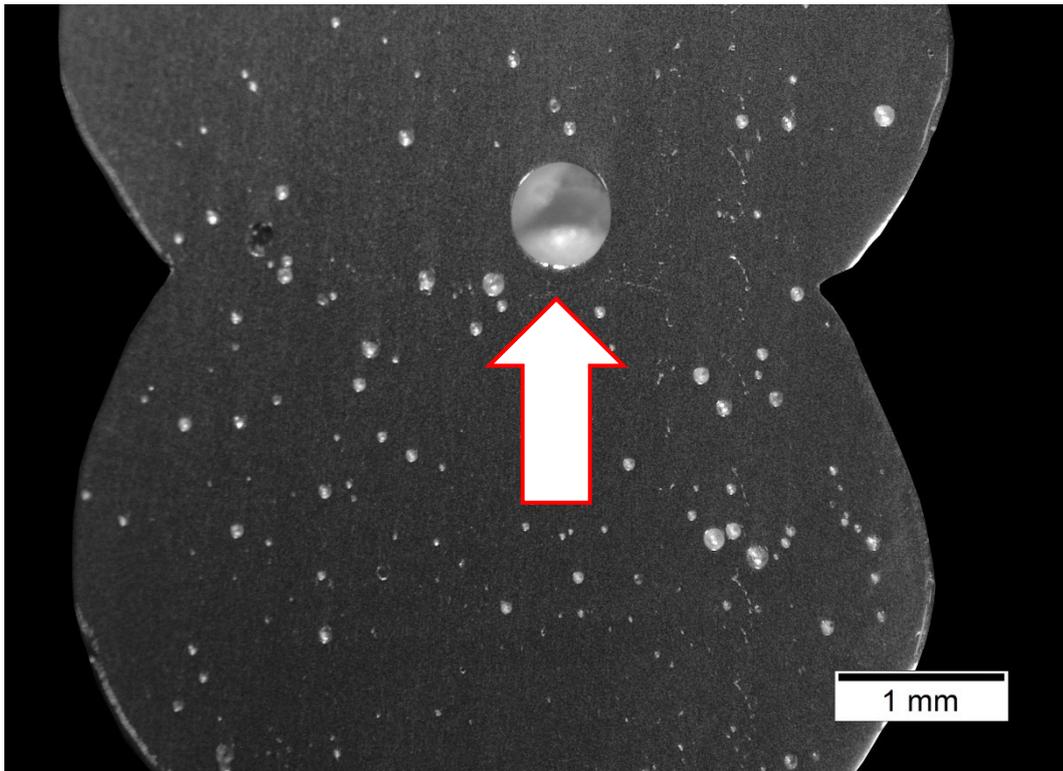
Fonte: Autoral.

Figura 42: Valores de porosidade superficial percentual obtidos para as amostras com EP/EN +3.



Fonte: Autoral.

Figura 43: Indicação de poro com diâmetro de aproximadamente 580 μm na amostra com razão EP/EN -2 e LEWD de 10 mm.

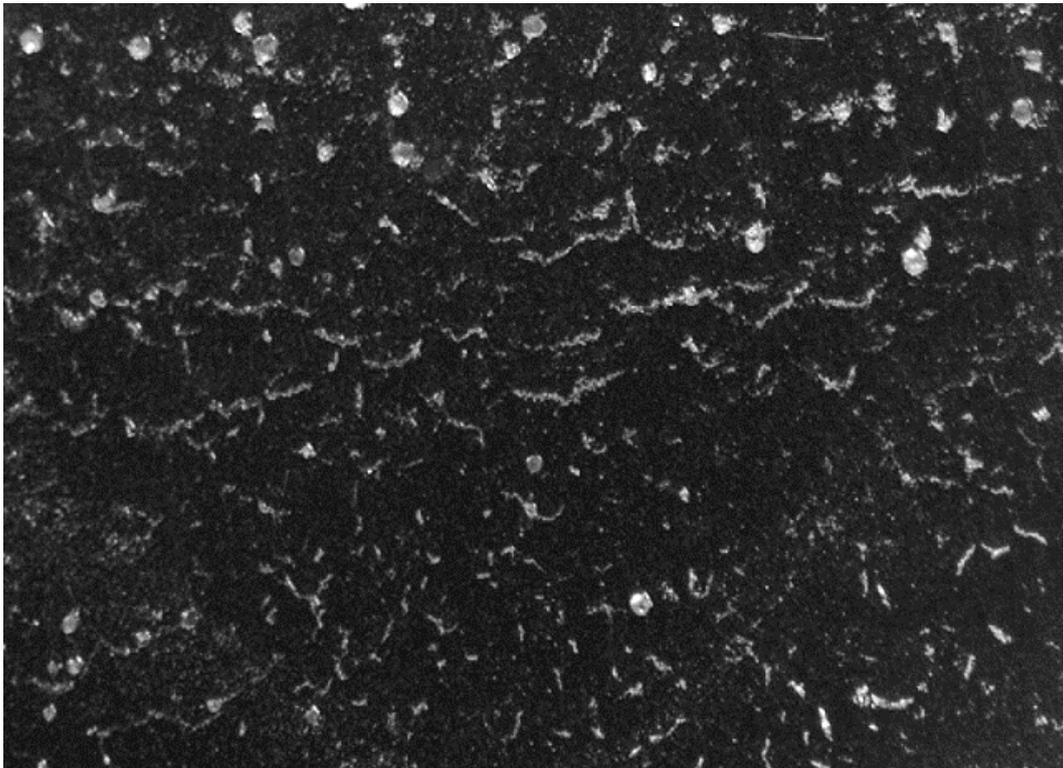


Fonte: Autoral.

Conforme tópico 3.7, o realce manual da porosidade levou em conta sua morfologia característica circular, por efeito de aprisionamento de gases como hidrogênio; também foi considerada a dimensão dos poros, sendo desprezados caso não fosse possível identificar claramente a partícula ou ela apresentasse dimensões irrisórias. É possível verificar na Figura 44, porém, a presença de formas estreitas e longilíneas, de tonalidade clara, semelhante à dos poros ao redor. Tal particulado, de origem incerta, não foi selecionado manualmente, mas provavelmente configura ausência de material, análise amparada por resultados da gravimetria, em que a amostra supracitada apresentou o segundo maior volume de vazio entre as analisadas.

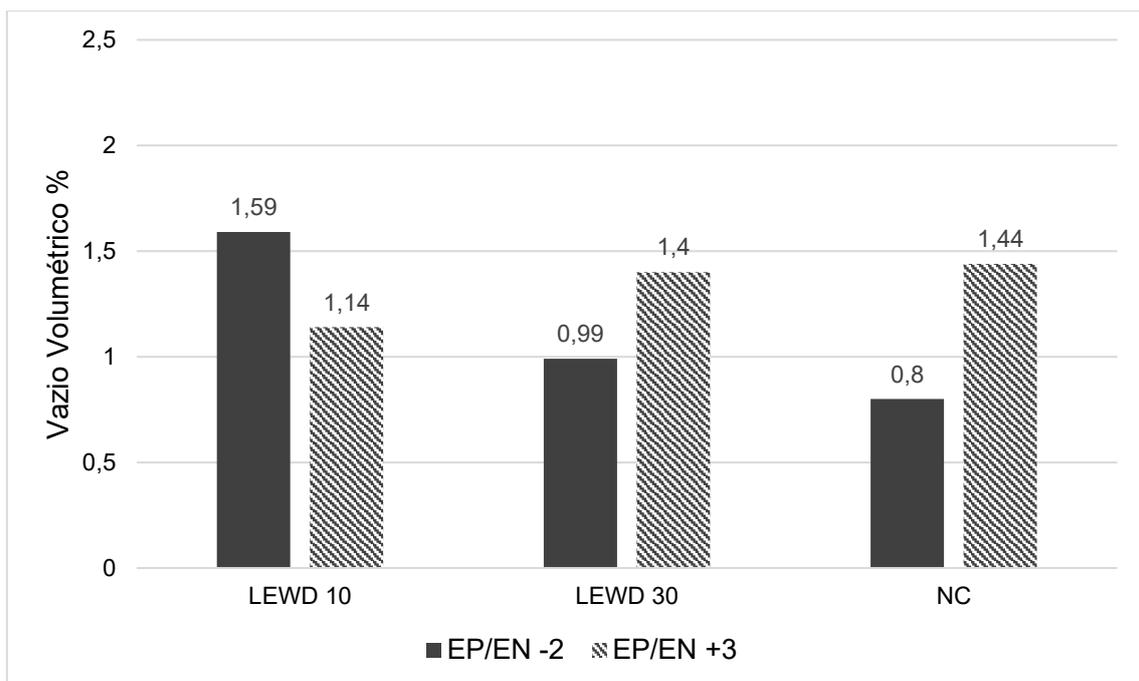
O ensaio de gravimetria realizado por Scotti et al. (2020) permitiu a obtenção do percentual volumétrico de vazios através do cálculo da densidade relativa de cada amostra. Para os corpos de prova testados, os resultados são dispostos na Figura 45.

Figura 44: Ampliação de seção da superfície da amostra depositada com razão EP/EN +3 e resfriamento natural.



Fonte: Autoral.

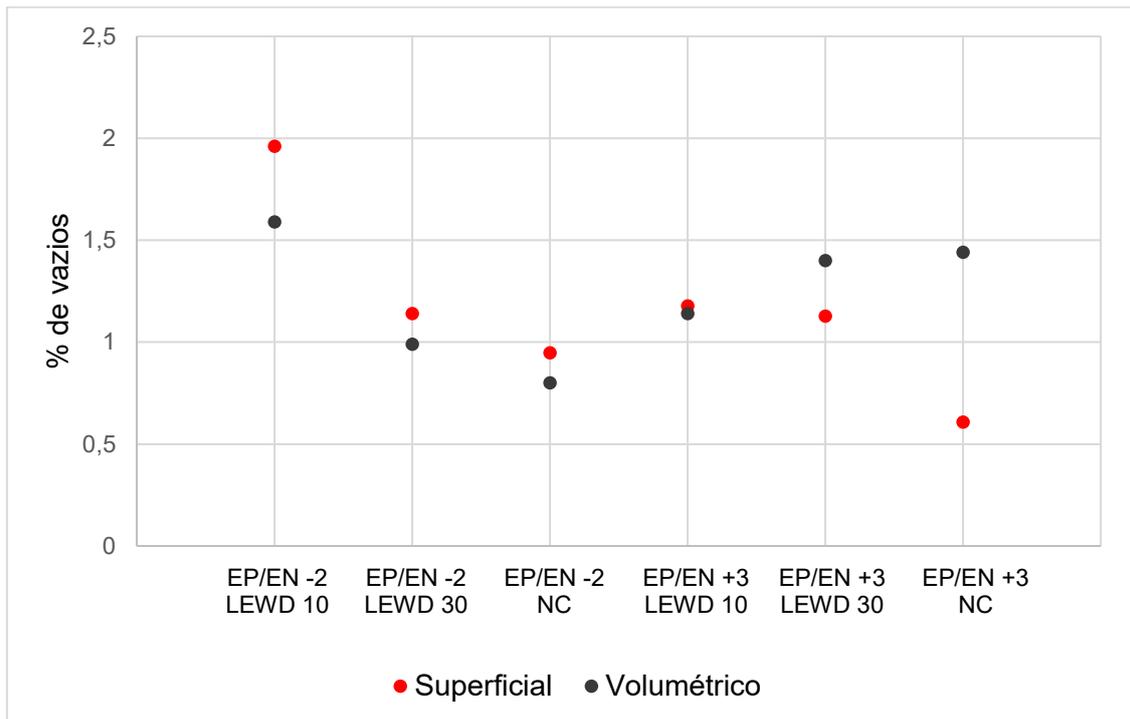
Figura 45: Volume percentual de vazio obtido via Gravimetria para as amostras.



Fonte: Autoral.

Comparar os valores da seleção manual de partículas sobre as superfícies com os resultados oriundos da gravimetria permitiu algumas inferências interessantes. Foi possível verificar proximidade entre os resultados, ocorrendo grande divergência novamente apenas para a amostra com EP/EN +3 e resfriamento natural. O comparativo é disposto na Figura 46.

Figura 46: Resultado do percentual de vazio para as seis amostras a partir das duas abordagens: superficial e volumétrica.



Fonte: Autoral.

Estudos adicionais seriam necessários, mas os resultados mostram-se promissores no indicativo de que a porosidade nas seções transversais das pré-formas pode não apresentar grandes diferenças ao longo do caminho linear de deposição. Um estudo estatístico amplo, com a aquisição de dados de um grande número de superfícies de uma mesma amostra, poderia indicar correlação entre os valores de porosidade superficial e volumétrica, a partir de diferentes quantidades de seções transversais analisadas.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento de metodologias de imagem para avaliar a porosidade em peças metálicas mostra-se um campo interessante para pesquisa, a fim de oferecer amparo ao desenvolvimento e aprimoramento de técnicas de fabricação por Manufatura Aditiva, capazes de fabricar peças funcionais que cumpram os requisitos solicitados, ofertando propriedades mecânicas similares a de peças fabricadas por processos tradicionais. Como visto ao longo deste trabalho, a porosidade constitui um fator prejudicial à peça, implicando em perda de resistência mecânica e risco de falha por fadiga, motivos pelos quais os níveis de porosidade devem ser controlados durante a deposição.

As metodologias descritas e implementadas foram capazes de retornar valores de porosidade próximos aos da literatura, comparáveis inclusive aos resultados frutos da seleção manual de porosidade, por inspeção visual, tidos como referência. Os resultados validam a aplicação de métodos de imagem para análise de porosidade a partir de arquivos dos dois equipamentos utilizados, um escâner e um estereoscópio. Dessa forma, as metodologias, se aplicadas às peças prontas ou pré-formas, de acordo com os itens anteriores, mostram-se úteis para mensurar a porosidade em superfícies de corte.

Há ressalvas que precisam ser feitas, pois a superfície de duas das amostras apresentou dificuldades não só na identificação visual dos vazios em si, mas também na implementação das metodologias automatizadas, sendo o maior erro percentual encontrado para a amostra construída com razão EP/EN +3 e resfriamento natural. Nesse sentido, peças depositadas com determinados conjuntos de parâmetros – sejam eles da aplicação de equipamentos CMT ou de métodos como o RAQI – podem não se mostrar favoráveis às metodologias de detecção de porosidade por imagem, manuais ou automatizadas.

Os métodos de imagem mostram-se então complementares aos ensaios de Gravimetria, que captam um volume global de vazios, incluindo não apenas os poros. Nesse sentido, trabalhos futuros podem incluir ensaios estatísticos mais representativos, com a

análise de um número maior de seções transversais por imagem, buscando relacionar os valores de porosidade por ambas as metodologias. A polivalência do ImageJ também abre a discussão sobre a possibilidade de captar as coordenadas das partículas detectadas, a partir de uma referência, para verificar matematicamente locais de concentração de porosidade não facilmente identificados visualmente, relacionando-os com as características de deposição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOULKHAIR, Nesma T. et al. **3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting.** Progress in Materials Science, 2019.

AGRA, Anderson Azevedo et al. **Automated procedure for coke microstructural characterization in ImageJ software aiming industrial application.** Fuel. p. 121374-121385, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121374>

ARANA, Maider et al. (2021). **Strategies to Reduce Porosity in Al-MgWAAM Parts and Their Impact on Mechanical Properties.** Metals. p. 524-555, 2021. <https://doi.org/10.3390/met11030524>

BLAKEY-MILNER, Byron. et al. **Metal additive manufacturing in aerospace: A review.** Materials & Design. p. 110008-110040, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>

COLLINS, T. J. **ImageJ for microscopy.** BioTechniques. p. 25-30, 2007. <https://doi.org/10.2144/000112517>

DEREKAR, Karan S. et al. **Effect of pulsed metal inert gas (pulsed-MIG) and cold metal transfer (CMT) techniques on hydrogen dissolution in wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminum.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. p. 311-331, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04946-2>

DOS SANTOS E SILVA, F. L. **Manufatura Aditiva de Paredes Inclínadas Utilizando o Processo CMT Advanced e Alumínio como Material de Adição.** 2019. 165f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

FELICE, I. O. **Avaliação Geométrica, Térmica e de Porosidade de Pré-formas em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco com Resfriamento Ativo por Quase-Imersão.** 2020. 150 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

FRONIUS. **CMT: Cold Metal Transfer.**

Acesso: <https://www.digitalweldingsolutions.com/CMT.pdf>

FU, Rui et al. **Hot-wire arc additive manufacturing of aluminum alloy with reduced porosity and high deposition rate.** Materials & Design, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109370>.

GIERTH, Maximilian et al. **Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminum Alloy AlMg5Mn with Energy-Reduced Gas Metal Arc Welding (GMAW).** Materials. p. 2671-2692, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13122671>

- GROVE, Clayton; JERRAM, Dougal A. **JPOR: An ImageJ macro to quantify total optical porosity from blue-stained thin sections**. Computer & Geosciences. p. 1850-1859, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.03.002>
- GU, Jianglong et al. **The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys**. Journal of Materials Processing Technology. p. 26-34, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.006>
- HEIM, K.; BERNIER, F.; PELLETIER, R. **High resolution pore size analysis in metallic powders by X-ray tomography**. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation. p. 45-52, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.csndt.2016.09.002>.
- HERDERICK, E. **Additive Manufacturing of Metals: A Review**. Materials Science and Technology, 2011.
- HOLMSTRÖM, Jan et al. **Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment**. Journal of Manufacturing Technology Management. p. 687-697, 2010. DOI: 10.1108/17410381011063996.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 52900: Additive manufacturing - General principles - Terminology**. 1 ed. 2015.
- KÖHLER, Markus; FIEBIG, Sierk; HENSEL, Jonas; DILGER, Klaus. **Wire and Arc Additive Manufacturing of Aluminum Components**. Metals. p. 608-616, 2019. <https://doi.org/10.3390/met9050608>
- LOURENÇO, J. C. et al. **Influence of process parameters on localized corrosion of AA7075 alloy during the production of aeronautic components**. Materials and Corrosion. p. 1498-1503, 2015. <https://doi.org/10.1002/maco.201508402>
- MCANDREW, Anthony R. et al. **Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire+arc additively manufactured features for microstructural refinement**. Additive Manufacturing. p. 340-349, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.006>
- MURR, L. E. et al. **Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays**. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, p. 1999–2032, 2010. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0010>
- QI, Zewu et al. **Microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured 2024 aluminum alloy components: As-deposited and post heat-treated**. Journal of Manufacturing Processes. [S.L.], p. 27-36, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.03.003>
- RODRIGUES, Tiago A. et al. **Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)**. Materials. p. 1121-1161, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12071121>
- SCOTTI, Fernando Matos et al. **Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique**. Journal of Manufacturing Processes. p. 23-35, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.007>

SILVA, L. J. **Near-immersion active cooling for wire + arc additive manufacturing: from concept to application.** 2019. 116 p. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering), Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil.

SLOTWINSKI, John A et al. **Porosity Measurements and Analysis for Metal Additive Manufacturing Process Control.** Journal of Research of The National Institute of Standards and Technology. p. 494-528, 2014. <http://doi.org/10.6028/jres.119.019>

SMITH, B. **The Boeing 777: the development of the Boeing 777 was made possible by the development of breakthrough materials that allowed reductions in structural weight while maintaining affordability.** Advanced Materials & Processes, 2003.

SPIERINGS, A. B.; SCHNEIDER, M.; EGGENBERGER, R. **Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts.** Rapid Prototyping Journal. p. 380-386, 2011. <https://doi.org/10.1108/13552541111156504>

THAPLIYAL, S. (2019). **Challenges associated with the wire arc additive manufacturing (WAAM) of Aluminum alloys.** Materials Research Express. p. 112006-112024, 2019. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4dd4>

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

URIONDO, Adrian et al. **The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. p. 2132-2147, 2015. DOI: 10.1177/0954410014568797.

WOHLERS REPORT 2016: **3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING STATE OF THE INDUSTRY: ANNUAL WORLDWIDE PROGRESS REPORT.** Fort Collins: Wohlers Associates, 2016.

YOUSEFIAN, Pedram; TIRYAKIOGLU, Murat. **Pore Formation During Solidification of Aluminum: Reconciliation of Experimental Observations, Modeling Assumptions, and Classical Nucleation Theory.** Metall Mater Trans. [S. L.], p. 563-575, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4438-6>

ZHANG, B.; POIRIER, D. R.; & CHEN, W. (1999). **Microstructural effects on high-cycle fatigue-crack initiation in A356.2 casting alloy.** Metallurgical and Materials Transactions A. p. 2659–2666, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0306-3>

ZHOU, Bo et al. **The Advancement of 7XXX Series Aluminum Alloys for Aircraft Structures: A Review.** Metals. p. 728-746, 2021. <https://doi.org/10.3390/met11050718>