

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPE MOREIRA MENDES

ESTRATÉGIAS DE MINIMIZAÇÃO DE POROSIDADE EM PEÇAS METÁLICAS
PRODUZIDAS POR SLM/DMLS

Belo Horizonte

2026

FELIPE MOREIRA MENDES

ESTRATÉGIAS DE MINIMIZAÇÃO DE POROSIDADE EM PEÇAS METÁLICAS
PRODUZIDAS POR SLM/DMLS

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais, como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Artur Caron Mottin

Belo Horizonte

2026

M538e Mendes, Felipe Moreira
Estratégias de minimização de porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DML / Felipe Moreira Mendes. – 2026.
65 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Orientador: Artur Caron Mottin.

Banca examinadora: Artur Caron Mottin, Ivanilza Felizardo e Sandro Cardoso.

Bibliografia: f. 62-65.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Metal – Teses. 2. Manufatura aditiva – Teses. 3. Lasers – Aplicações industriais – Teses. 4. Sinterização – Teses. 5. Fusão a laser – Teses. 6. Processos de fabricação – Teses. I. Mottin, Artur Caron. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDD 621.366

FELIPE MOREIRA MENDES

ESTRATÉGIAS DE MINIMIZAÇÃO DE POROSIDADE EM PEÇAS
METÁLICAS PRODUZIDAS POR SLM/DMLS

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data de aprovação: 16/06/2026



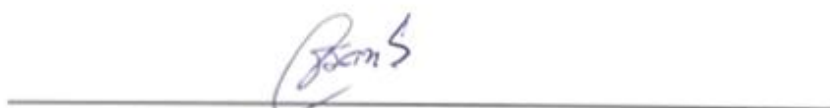
Artur Caron Mottin, Doutor, Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Ivanilza Felizardo, Doutora, Avaliadora

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Sandro Cardoso, Doutor, Avaliador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

O caminho até aqui foi longo, desafiador e cheio de aprendizados. Ao longo dessa trajetória, tive o prazer, a honra e a alegria de compartilhar momentos importantes com pessoas especiais, que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação pessoal, acadêmica e profissional.

Agradeço, primeiramente, à minha família, por todo apoio, carinho e presença constante. Vocês estiveram comigo nos momentos de felicidade, mas também nos períodos de tristeza, incerteza e insegurança quanto ao futuro. O suporte de vocês foi essencial para que eu continuasse seguindo em frente, mesmo diante das dificuldades.

Agradeço também aos meus amigos, que acompanharam minha caminhada durante a graduação, cada um contribuindo de maneira única e especial. Em particular, deixo meu agradecimento ao grupo Unidos, que teve grande importância no meu desenvolvimento, principalmente nesta reta final da faculdade, tornando essa fase mais leve, marcante e significativa.

Aos meus amigos de Pará de Minas, deixo também meu sincero agradecimento. Mesmo com a distância e com o contato físico menos frequente, vocês sempre estiveram presentes, seja virtualmente ou nos encontros de fim de semana. A amizade de vocês foi fundamental para que eu pudesse descansar, me distrair e recuperar as energias após semanas intensas de estudo e trabalho.

Agradeço também ao meu professor orientador, Artur Caron Mottin, por ter me guiado ao longo desta etapa tão importante. Sou grato pela prontidão de sempre, por toda a ajuda concedida e pelos conselhos e recomendações que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço ao CEFET-MG por ter me proporcionado, durante todo o período da graduação, um ensino de qualidade, muitos aprendizados e experiências marcantes, que levarei para sempre em minha vida pessoal, acadêmica e profissional.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa caminhada, deixo meu mais sincero obrigado.

RESUMO

A manufatura aditiva metálica tem se consolidado como uma alternativa relevante aos processos convencionais de fabricação, especialmente na produção de componentes com geometrias complexas, redução de massa e aplicação em setores de alto desempenho. Entre os processos mais utilizados, destacam-se a Fusão Seletiva a Laser (*Selective Laser Melting* — SLM) e a Sinterização Direta de Metal a Laser (*Direct Metal Laser Sintering* — DMLS), ambos pertencentes à categoria de fusão em leito de pó a laser — LPBF. Apesar das vantagens desses processos, a porosidade ainda representa uma das principais limitações para a confiabilidade e o desempenho mecânico das peças produzidas. Este trabalho tem como objetivo analisar criticamente os principais mecanismos de formação da porosidade em peças metálicas fabricadas por SLM/DMLS, bem como as estratégias utilizadas para sua minimização. A metodologia adotada baseou-se em uma Análise Crítica da literatura técnico-científica de referência, contemplando estudos sobre parâmetros de processo, características do pó metálico, atmosfera de fabricação, estabilidade do banho de fusão, estratégias de varredura, técnicas de caracterização e pós-processamentos. A análise demonstrou que a porosidade pode ser associada principalmente à falta de fusão, ao aprisionamento de gases e ao regime *keyhole*. Verificou-se que a minimização desses defeitos depende de uma abordagem integrada, envolvendo ajuste adequado dos parâmetros de processo, controle da qualidade do pó, atmosfera inerte controlada, caracterização dos defeitos e aplicação criteriosa de pós-processamentos, conforme o material, a geometria e a criticidade da aplicação final.

Palavras-chave: manufatura aditiva metálica; SLM/DMLS; LPBF; porosidade; falta de fusão; *keyhole*; parâmetros de processo; pós-processamento; mitigação de defeitos.

ABSTRACT

Metal additive manufacturing has become a relevant alternative to conventional manufacturing processes, especially for producing components with complex geometries, weight reduction, and applications in high-performance sectors. Among the most widely used processes are Selective Laser Melting (SLM) and Direct Metal Laser Sintering (DMLS), both classified as laser powder bed fusion (LPBF) technologies. Despite their advantages, porosity remains one of the main limitations to the reliability and mechanical performance of manufactured parts. This work aims to critically analyze the main mechanisms of porosity formation in metallic parts produced by SLM/DMLS, as well as the strategies used for its minimization. The adopted methodology was based on a Systematic Literature Review, covering studies related to process parameters, metal powder characteristics, manufacturing atmosphere, melt pool stability, scanning strategies, characterization techniques, and post-processing methods. The analysis showed that porosity is mainly associated with lack of fusion, gas entrapment, and the keyhole regime. It was found that minimizing these defects requires an integrated approach involving proper process parameter adjustment, powder quality control, controlled inert atmosphere, defect characterization, and the careful application of post-processing methods according to the material, geometry, and criticality of the final application.

Keywords: metal additive manufacturing; SLM/DMLS; LPBF; porosity; lack of fusion; keyhole; process parameters; post-processing; defect mitigation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Fundamentos dos Processos SLM/D	15
3.2 Propriedades Mecânicas de Peças Produzidas por SLM/DMLS	17
3.3 Defeitos e Falhas em Manufatura Aditiva Metálica	19
3.4 Mecanismos de Formação de Porosidade	20
3.5 Estratégias para Mitigação da Porosidade	23
3.6 Influência da Estratégia de Varredura a Laser na Formação de Porosidade	25
3.7 Efeito das Tensões Residuais e Distorções Geométricas na Integridade Interna das Peças	26
3.8 Técnicas de Caracterização da Porosidade em Peças Produzidas por SLM/DMLS	27
4. METODOLOGIA	30
4.1 Estratégia de Busca	30
4.2 Critérios de Inclusão e Exclusão	32
4.3 Classificação dos Estudos	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1 Comparativo dos Fatores Associados à Formação e Minimização da Porosidade	39
5.2 Discussão dos Mecanismos de Formação da Porosidade	44
5.3 Influência dos Parâmetros do Processo	46
5.4 Influência do Pó Metálico e da Atmosfera de Fabricação	48
5.5 Estratégias de Minimização da Porosidade	50

5.6 Análise Crítica das Estratégias de Mitigação	52
5.7 Síntese dos Resultados em Relação aos Objetivos do Trabalho	54
6. CONCLUSÕES	57
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva metálica tem se consolidado como uma das tecnologias de fabricação mais relevantes para a produção de componentes complexos, funcionais e de alto valor agregado. Diferentemente dos processos convencionais, baseados predominantemente na remoção, conformação ou união de material, a manufatura aditiva opera pelo princípio de construção camada a camada, permitindo a fabricação direta de peças a partir de modelos digitais tridimensionais. Essa característica amplia significativamente a liberdade de projeto, possibilitando a obtenção de geometrias complexas, estruturas internas otimizadas, redução de massa, integração de funções e diminuição do desperdício de material.

No contexto industrial, essa tecnologia tem ganhado destaque em setores que exigem elevado desempenho mecânico, redução de massa e confiabilidade, como os setores aeroespacial, biomédico, automotivo, energético e de gerenciamento térmico. Entre os processos de manufatura aditiva metálica, destacam-se a Fusão Seletiva a Laser (*Selective Laser Melting – SLM*) e a Sinterização Direta de Metal a Laser (*Direct Metal Laser Sintering – DMLS*). Ambos pertencem à categoria de fusão em leito de pó a laser (*Laser Powder Bed Fusion – LPBF*), na qual um feixe de laser de alta energia funde seletivamente regiões de uma camada de pó metálico. Após a solidificação, uma nova camada de pó é depositada, e o processo se repete até a obtenção da peça final. Embora existam diferenças comerciais e conceituais entre as nomenclaturas SLM e DMLS, neste trabalho os termos são tratados de forma integrada, pois ambos se referem a processos baseados na consolidação de pós-metálicos por ação localizada de laser.

A aplicação dos processos SLM/DMLS tem crescido devido à sua capacidade de produzir componentes metálicos com elevada complexidade geométrica e propriedades mecânicas competitivas. Apesar das vantagens tecnológicas, a fabricação de peças metálicas por SLM/DMLS ainda apresenta desafios importantes relacionados à repetibilidade, à qualificação de componentes e à ocorrência de defeitos internos. Entre esses defeitos, a porosidade é um dos mais recorrentes e críticos. A presença de poros compromete a integridade do material, reduz a área resistente efetiva, atua como concentrador de tensões e favorece a nucleação e propagação de trincas. Como consequência, propriedades como resistência à tração, ductilidade, tenacidade à fratura, resistência à fadiga e estanqueidade podem ser prejudicadas.

A criticidade da porosidade não depende apenas da quantidade total de vazios presentes na peça, mas também está relacionada à morfologia, tamanho, localização, orientação e

conectividade dos poros. Dessa forma, dois componentes com a mesma fração volumétrica de porosidade podem apresentar comportamentos mecânicos diferentes. Poros grandes, irregulares, alongados ou próximos à superfície tendem a ser mais prejudiciais do que poros pequenos, esféricos e isolados.

De modo geral, a porosidade em peças produzidas por SLM/DMLS pode ser classificada em três mecanismos principais: porosidade por falta de fusão, porosidade gasosa e porosidade associada ao regime *keyhole*. A porosidade por falta de fusão ocorre quando a energia fornecida pelo laser não é suficiente para fundir completamente as partículas de pó ou promover adequada união entre trilhas e camadas adjacentes. Esse tipo de defeito costuma apresentar geometria irregular, alongada e com extremidades agudas, podendo conter partículas parcialmente fundidas em seu interior. Por essa razão, tende a ser especialmente prejudicial em aplicações sujeitas à fadiga, impacto ou carregamentos dinâmicos. A porosidade gasosa, por sua vez, está associada ao aprisionamento de gases durante a fusão e a rápida solidificação do material. Esses gases podem ter origem no próprio pó metálico, em contaminantes superficiais, na umidade, na atmosfera de fabricação ou em gases dissolvidos no banho de fusão. Em geral, os poros gasosos apresentam forma mais esférica, sendo menos severos que os poros por falta de fusão quando pequenos, isolados e distribuídos de forma homogênea. Ainda assim, sua presença pode comprometer o desempenho da peça quando ocorre próxima à superfície, em regiões de concentração de tensões ou em componentes que exigem estanqueidade. A porosidade associada ao regime *keyhole* ocorre em condições de energia excessiva. Nesse caso, a alta potência do laser ou a baixa velocidade de varredura provocam vaporização intensa do material, formando uma cavidade profunda e instável no banho de fusão. O colapso dessa cavidade durante a solidificação pode aprisionar vazios no interior da peça.

A influência dos parâmetros de processo sobre a porosidade é um dos pontos centrais na literatura. Potência do laser, velocidade de varredura, espaçamento entre trilhas (*hatch spacing*), espessura de camada, distância entre pontos e estratégia de varredura alteram diretamente a geometria do banho de fusão, a sobreposição entre cordões, a taxa de resfriamento e a estabilidade do processo. Estudos mostram que a menor taxa de porosidade tende a ocorrer em uma condição intermediária de densidade de energia, enquanto energias muito baixas favoreceram falta de fusão e energias muito elevadas favoreceram instabilidades associadas à vaporização e ao regime *keyhole*. Esse comportamento demonstra que a simples elevação da energia aplicada não garante a redução da porosidade. Pelo contrário, a minimização dos defeitos depende da definição de uma janela adequada de processamento, na qual a energia seja

suficiente para fundir o pó e unir as camadas, mas não tão elevada a ponto de gerar evaporação excessiva, instabilidade do banho de fusão ou formação de poros do tipo *keyhole*. Assim, a densidade de energia volumétrica pode ser útil como parâmetro de comparação inicial, mas não deve ser interpretada de forma isolada.

Além dos parâmetros do laser, as características do pó metálico exercem influência direta na formação da porosidade. A morfologia das partículas, a distribuição granulométrica, a presença de partículas satelizadas, a oxidação superficial, a contaminação e a existência de poros internos no próprio pó afetam a escoabilidade, o empacotamento do leito e a uniformidade das camadas depositadas.

A atmosfera de fabricação também é um fator relevante. A presença de oxigênio residual, umidade ou contaminantes pode favorecer a formação de óxidos, inclusões e instabilidades no banho de fusão. Por isso, o uso de atmosfera inerte, geralmente com argônio ou nitrogênio, deve ser acompanhado por controle rigoroso do teor de oxigênio, da circulação do gás na câmara e da qualidade do pó utilizado. O controle inadequado desses fatores pode favorecer poros gasosos, inclusões não metálicas e alterações na molhabilidade do material fundido.

Outro aspecto importante é a influência da orientação de construção e das tensões residuais sobre o desempenho mecânico. Como as peças são construídas camada a camada, podem surgir anisotropias relacionadas à direção de fabricação, à orientação dos grãos colunares e à distribuição dos defeitos.

Um detalhe curioso demonstrado em alguns estudos utilizados como base para o presente trabalho é a comprovação que tratamentos térmicos podem melhorar a microestrutura, reduzir tensões residuais e alterar o equilíbrio entre resistência e ductilidade, mas não necessariamente eliminam a porosidade interna. Portanto, tratamentos térmicos convencionais devem ser compreendidos principalmente como estratégias de ajuste microestrutural e alívio de tensões, e não como métodos diretos de fechamento de poros. Para a redução efetiva de poros internos fechados, a prensagem isostática a quente (*Hot Isostatic Pressing* — HIP) é uma das estratégias mais utilizadas. Entretanto, defeitos grandes, conectados à superfície ou associados à falta de fusão severa podem não ser completamente eliminados. Dessa forma, o HIP deve ser visto como uma estratégia complementar, especialmente relevante para componentes críticos, mas não como substituto do controle adequado durante a fabricação.

Nos últimos anos, também tem crescido o interesse por técnicas de monitoramento em tempo real e métodos computacionais aplicados ao controle de qualidade em SLM/DMLS. Sensores ópticos, térmicos e acústicos, além de sistemas de imageamento, vêm sendo utilizados para identificar instabilidades durante a fabricação. Essas abordagens apontam para uma tendência de integração entre manufatura aditiva, ciência de dados e controle adaptativo de processo.

Também é importante reconhecer que a porosidade nem sempre é indesejada. Em aplicações como implantes biomédicos, filtros, absorvedores acústicos, estruturas leves e sistemas térmicos, a porosidade pode ser projetada intencionalmente para conferir propriedades funcionais específicas. No entanto, neste trabalho, o foco está na porosidade não intencional em peças metálicas estruturais produzidas por SLM/DMLS, uma vez que esse tipo de defeito compromete a integridade mecânica e a confiabilidade dos componentes.

Apesar dos avanços recentes, ainda existem lacunas importantes na compreensão e no controle da porosidade em SLM/DMLS. Muitos estudos analisam variáveis de forma isolada, enquanto, na prática, a formação de poros resulta da interação simultânea entre parâmetros de processo, material, atmosfera, geometria, estratégia de varredura e pós-processamento. Além disso, peças fabricadas com o mesmo valor de densidade de energia volumétrica podem apresentar níveis diferentes de porosidade, dependendo da combinação específica entre potência, velocidade, espaçamento entre trilhas e espessura de camada.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo analisar criticamente as principais estratégias de minimização da porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS, considerando a influência dos parâmetros de processo, das características do pó metálico, da atmosfera de fabricação, da estratégia de varredura, das técnicas de caracterização e dos pós-processamentos. Busca-se consolidar o conhecimento disponível na literatura, identificar os principais mecanismos de formação dos poros e discutir abordagens tecnicamente viáveis para reduzir sua ocorrência.

A relevância deste estudo está associada à crescente demanda por componentes metálicos fabricados por manufatura aditiva com desempenho confiável, especialmente em aplicações nas quais falhas por fadiga, perda de estanqueidade, redução de ductilidade ou comprometimento estrutural não são aceitáveis. Ao sistematizar os fatores que aumentam ou reduzem a porosidade e comparar as estratégias de mitigação disponíveis, este trabalho pretende contribuir para a compreensão técnica do tema e fornecer subsídios para futuras pesquisas

experimentais, otimização de processos e aplicação industrial mais segura dos processos SLM/DMLS.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar as principais estratégias de minimização da porosidade em peças metálicas produzidas pelos processos de Fusão Seletiva a Laser (SLM) e Sinterização Direta de Metal a Laser (DMLS), considerando a influência dos parâmetros de processo, das características do pó metálico, da atmosfera de fabricação, das técnicas de caracterização e dos pós-processamentos sobre a densificação, a integridade interna e o desempenho mecânico dos componentes fabricados.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar os principais mecanismos de formação de porosidade em peças metálicas fabricadas por SLM/DMLS, com base em literatura técnico-científica recente.
- Classificar os principais tipos de porosidade observados em peças produzidas por SLM/DMLS, distinguindo porosidade por falta de fusão, porosidade gasosa e porosidade associada ao regime *keyhole*.
- Analisar a influência dos principais parâmetros de processo, tais como potência do laser, velocidade de varredura, espaçamento entre trilhas, espessura de camada, distância entre os pontos e densidade de energia volumétrica, na formação, distribuição e morfologia dos poros.
- Avaliar o efeito das características do pó metálico, incluindo morfologia das partículas e distribuição granulométrica, na densificação das peças produzidas por SLM/DMLS.
- Analisar a influência da atmosfera de fabricação, especialmente o controle do teor de oxigênio, umidade, contaminantes e fluxo de gás inerte na formação de defeitos internos e na qualidade metalúrgica das peças.
- Comparar diferentes estratégias de minimização da porosidade descritas na literatura, incluindo otimização de parâmetros de processo, controle da qualidade do pó, ajuste da estratégia de varredura, revarredura a laser, monitoramento em tempo real e uso de modelos computacionais.
- Avaliar a eficácia de tratamentos de pós-processamento, como tratamentos térmicos, revarredura a laser e prensagem isostática a quente, na redução da porosidade, no alívio de tensões residuais e na melhoria das propriedades mecânicas.
- Discutir as limitações técnicas e industriais associadas às estratégias de redução da porosidade, considerando aspectos de aplicabilidade prática, custo, produtividade e repetibilidade.

- Sintetizar, a partir da literatura analisada, os fatores que mais contribuem para o aumento ou redução da porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS, relacionando-os aos objetivos de confiabilidade, desempenho mecânico e controle de qualidade dos componentes fabricados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A manufatura aditiva metálica consolidou-se como uma alternativa relevante aos processos convencionais de fabricação, principalmente pela possibilidade de produzir componentes com elevada complexidade geométrica, redução de massa, integração funcional, possibilidade de personalização e menor desperdício de matéria-prima. Diferentemente dos processos tradicionais, baseados predominantemente na remoção, conformação ou união de material, a manufatura aditiva utiliza a construção camada a camada a partir de modelos digitais tridimensionais, permitindo maior liberdade de projeto e fabricação de geometrias internas que seriam difíceis ou inviáveis por rotas convencionais. Segundo Gibson *et al.* (2015), a manufatura aditiva representa uma mudança significativa no modo de fabricação de componentes, pois permite transformar diretamente um modelo CAD (*Computer-aided Design*) em uma peça física, reduzindo etapas intermediárias de produção.

No caso dos metais, essa tecnologia tem recebido destaque em setores de alto desempenho, como aeroespacial, biomédico, automotivo, energético e de gerenciamento térmico (DebRoy *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2022). A possibilidade de fabricar componentes otimizados por topologia, implantes personalizados e estruturas reticuladas torna a manufatura aditiva metálica uma rota especialmente atrativa para aplicações em que desempenho, leveza e funcionalidade são requisitos simultâneos. Dentre os processos de manufatura aditiva metálica, destacam-se a Fusão Seletiva a Laser (*Selective Laser Melting* — SLM) e a Sinterização Direta de Metal a Laser (*Direct Metal Laser Sintering* — DMLS). Ambos são usualmente classificados dentro da família de processos de fusão em leito de pó a laser (*Laser Powder Bed Fusion* — LPBF), nos quais um feixe de laser é utilizado para fundir seletivamente regiões de um leito de pó metálico. Apesar de suas vantagens, os processos SLM/DMLS ainda apresentam desafios importantes relacionados à repetibilidade, à qualificação de componentes e à ocorrência de defeitos internos. Entre esses defeitos, a porosidade é um dos recorrentes, críticos e relevantes, pois afeta diretamente resistência mecânica, ductilidade, tenacidade à fratura, vida em fadiga, estanqueidade e confiabilidade dos componentes. De acordo com Wang *et al.* (2022), a porosidade é um dos defeitos mais universais em metais produzidos por LPBF, sendo praticamente inevitável em algum grau quando se considera a complexidade térmica e metalúrgica do processo.

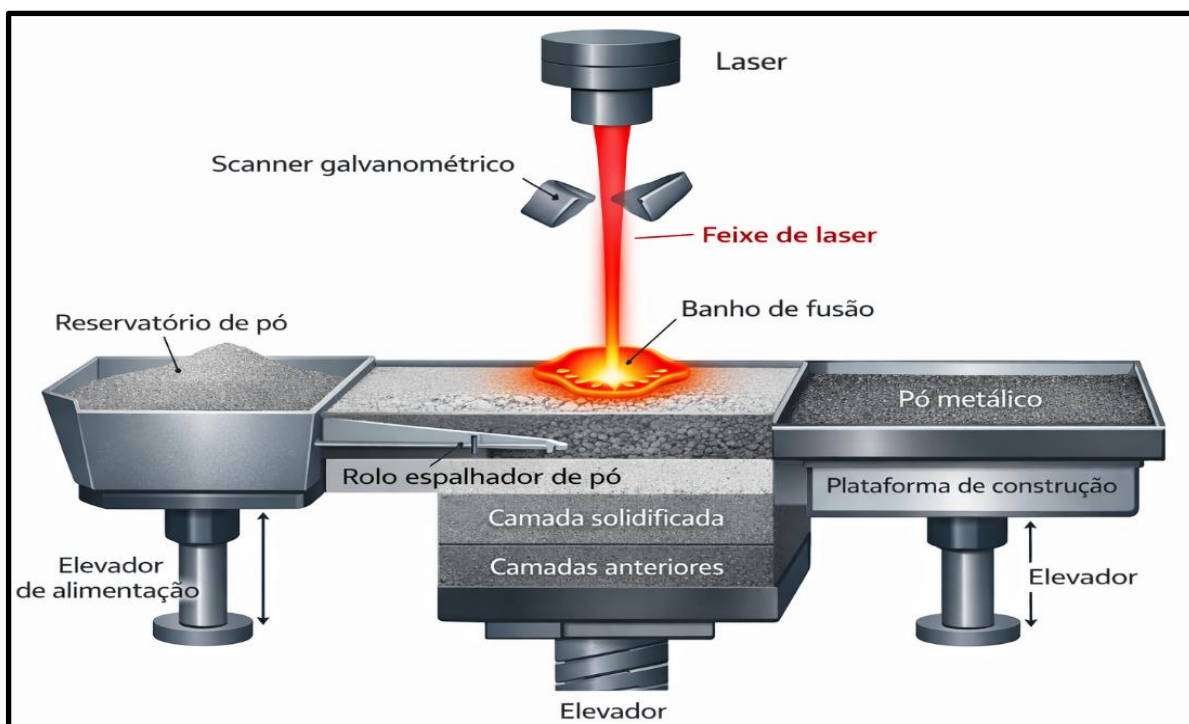
Assim, a compreensão dos mecanismos de formação da porosidade, bem como das estratégias para sua mitigação, é fundamental para a consolidação dos processos SLM/DMLS como rotas confiáveis de fabricação de componentes metálicos de alto desempenho.

3.1 Fundamentos dos Processos SLM/DMLS

Os processos SLM/DMLS baseiam-se na deposição sucessiva de finas camadas de pó metálico sobre uma plataforma de construção. Em cada camada, um feixe de laser de alta energia percorre trajetórias previamente definidas a partir do modelo digital da peça, fundindo seletivamente as regiões correspondentes à seção transversal do componente. Após a solidificação de uma camada, a plataforma é rebaixada, uma nova camada de pó é espalhada e o processo se repete até a fabricação completa da geometria desejada.

A Figura 1 apresenta um esquema representativo do processo SLM/DMLS, evidenciando os principais elementos envolvidos: reservatório de pó, sistema de espalhamento, plataforma de construção, feixe de laser e o banho de fusão formado durante a incidência do laser sobre o leito de pó.

Figura 1: Representação esquemática do processo de Fusão Seletiva a Laser (SLM/DMLS).



Fonte: Elaboração própria.

Durante o processamento, a interação entre o laser e o pó metálico gera um banho de fusão localizado, também chamado de *melt pool*. Esse banho de fusão apresenta dimensões reduzidas e é submetido a elevadas taxas de aquecimento e resfriamento, resultando em solidificação rápida e formação de microestruturas refinadas. DebRoy *et al.* (2018) destacam

que essa condição térmica intensa pode resultar em propriedades mecânicas superiores às obtidas por rotas convencionais, mas também gera elevada sensibilidade a variações de parâmetros, instabilidades térmicas e defeitos metalúrgicos.

Os principais parâmetros do processo são: potência do laser, velocidade de varredura, espaçamento entre trilhas (*hatch spacing*), espessura de camada, diâmetro do feixe, tempo de exposição, distância entre pontos e a estratégia de varredura. A combinação desses parâmetros determina o aporte energético aplicado ao material e influencia diretamente a geometria do banho de fusão, a sobreposição entre trilhas, a penetração do laser, a densificação da peça e a formação de defeitos.

Um conceito frequentemente utilizado para comparar condições de processamento é a densidade de energia volumétrica. Esse parâmetro relaciona potência do laser, velocidade de varredura, espaçamento entre trilhas e espessura de camada. Embora seja útil como referência inicial, sua aplicação deve ser feita com cautela, pois diferentes combinações entre os principais parâmetros que compõem a densidade de energia volumétrica podem gerar o mesmo valor de energia fornecida, mas produzir banhos de fusão com geometrias, temperaturas e estabilidade distintas (King *et al.*, 2015; Cherry *et al.*, 2015). No caso da liga Ti-6Al-4V produzida por LPBF, Buhairi *et al.* (2023) indicam que muitos estudos utilizam potências entre 70 e 400 W, velocidades de varredura entre 70 e 1800 mm/s, espaçamentos entre trilhas entre 50 e 140 μm e espessuras de camada entre 20 e 50 μm . A revisão aponta ainda que a faixa de densidade de energia volumétrica entre aproximadamente 55 e 65 J/mm^3 aparece associada a bons resultados de rugosidade superficial, microdureza e resistência à tração. Esse resultado é útil como referência, mas não deve ser interpretado como valor universal, pois depende de outros fatores, como: equipamento, material, geometria e combinação real dos parâmetros de processo.

Além dos parâmetros do laser, as propriedades do pó metálico também exercem influência significativa sobre o processo. Pós com morfologia esférica, boa escoabilidade, baixa contaminação superficial e distribuição granulométrica adequada tendem a formar camadas mais uniformes, favorecendo a absorção de energia e a fusão completa do material. Por outro lado, partículas irregulares, satelizadas, oxidadas ou com poros internos podem comprometer a homogeneidade do leito de pó e contribuir para a formação de defeitos (Brika *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2022).

Dessa forma, os processos SLM/DMLS devem ser compreendidos como sistemas complexos, nos quais a qualidade final da peça depende da interação entre parâmetros de

fabricação, características do pó, atmosfera de processamento, geometria da peça e estratégias de pós-processamento.

3.2 Propriedades Mecânicas de Peças Produzidas por SLM/DMLS

As propriedades mecânicas de peças metálicas produzidas por SLM/DMLS são fortemente influenciadas pela microestrutura resultante do processo, pela orientação de construção, pela presença de tensões residuais e pela ocorrência de defeitos internos. Em muitos casos, os componentes fabricados por LPBF podem apresentar elevada resistência mecânica e dureza, em razão da rápida solidificação e do refinamento microestrutural. Entretanto, a obtenção de boas propriedades mecânicas depende diretamente da integridade interna da peça.

Segundo DebRoy *et al.* (2018), as elevadas taxas de resfriamento características da manufatura aditiva metálica podem gerar microestruturas finas, com grãos colunares, elevada densidade de discordâncias e fases metaestáveis. Esses aspectos podem aumentar a resistência mecânica do material, especialmente em ligas como Ti-6Al-4V, aço inoxidável 316L, Inconel 718 e AlSi10Mg. No entanto, o desempenho mecânico final não depende apenas da microestrutura, mas também da integridade interna da peça.

No caso específico da Ti-6Al-4V produzida por DMLS, Mierzejewska (2019) observou que as amostras no estado como fabricado apresentaram resistência máxima à tração e limite de escoamento superiores aos valores mínimos indicados para aplicações biomédicas, com UTS de aproximadamente 1100 MPa e YS de aproximadamente 1065 MPa. Entretanto, o alongamento foi baixo, em torno de 4,23%, valor inferior ao requerido para implantes biomédicos. Esse comportamento foi associado à formação de uma microestrutura composta por martensita α' e grãos colunares prévios de fase β . A presença da martensita α' é típica de ligas Ti-6Al-4V produzidas por SLM/DMLS, pois as elevadas taxas de resfriamento favorecem a transformação martensítica. Essa microestrutura contribui para a alta resistência mecânica, mas reduz a ductilidade. Como resultado, a peça pode apresentar comportamento mais frágil, especialmente quando combinada com porosidade, tensões residuais e orientação de construção desfavorável.

A porosidade é um dos principais fatores que reduzem as propriedades mecânicas dos componentes produzidos por SLM/DMLS. Os poros atuam como concentradores de tensão, reduzem a área resistente efetiva e favorecem a nucleação de trincas. Esse efeito é particularmente crítico em carregamentos cíclicos, nos quais a resistência à fadiga passa a depender fortemente do tamanho, da morfologia, da localização e da distribuição dos poros.

Kan *et al.* (2022) destacam que a influência da porosidade sobre as propriedades mecânicas não pode ser avaliada apenas pela fração volumétrica total de vazios. Dois componentes com a mesma porcentagem de porosidade podem apresentar desempenhos mecânicos diferentes, caso os poros tenham morfologias, tamanhos ou localizações distintas. Poros grandes, irregulares, alongados ou próximos à superfície tendem a ser mais prejudiciais que poros pequenos, esféricos e distribuídos de forma homogênea. Wang *et al.* (2022), em revisão estatística envolvendo ligas metálicas representativas produzidas por LPBF, verificaram que a ductilidade é uma das propriedades mais sensíveis à porosidade. Os autores analisaram materiais como Ti-6Al-4V, aço inoxidável 316L, Inconel 718 e AlSi10Mg, observando que o aumento da fração de porosidade tende a reduzir a deformação na fratura de forma mais acentuada do que outras propriedades de tração. Esse comportamento ocorre porque os poros favorecem a nucleação, o crescimento e a coalescência de vazios durante a deformação plástica. Cherry *et al.* (2015), ao investigarem aço inoxidável 316L produzido por SLM, observaram que a porosidade afeta diretamente a dureza e a qualidade superficial das peças. No estudo, a redução da porosidade esteve associada ao aumento da dureza, enquanto condições de energia inadequadas levaram à formação de poros e ao aumento da rugosidade superficial. A resistência à fadiga é ainda mais sensível à presença de defeitos. Poros por falta de fusão, por apresentarem geometria irregular e orientação desfavorável entre camadas ou trilhas, podem atuar como pontos preferenciais de iniciação de trincas. Essa condição reduz significativamente a vida útil de componentes sujeitos a carregamentos alternados, especialmente em aplicações aeroespaciais, biomédicas e de energia.

Outro aspecto importante é a anisotropia mecânica. Como a fabricação ocorre camada a camada, as propriedades podem variar conforme a direção de construção. A presença de poros e falta de fusão entre camadas pode intensificar esse comportamento, tornando o desempenho na direção vertical diferente daquele observado nas direções horizontais. Assim, o controle da porosidade está diretamente relacionado não apenas à resistência global do material, mas também à previsibilidade e repetibilidade do desempenho mecânico. Mierzejewska (2019) mostrou que a orientação de construção influencia o comportamento mecânico, pois a estrutura em camadas e os grãos colunares podem gerar anisotropia. Após tratamento térmico a 850 °C por 2 horas, a microestrutura foi transformada em uma combinação de fases $\alpha + \beta$, com redução da resistência mecânica, aumento do alongamento e diminuição da anisotropia entre amostras orientadas em diferentes direções. Esse resultado é importante porque mostra que o tratamento

térmico pode melhorar o equilíbrio entre resistência e ductilidade, ainda que não elimine necessariamente a porosidade interna.

3.3 Defeitos e Falhas em Manufatura Aditiva Metálica

A ocorrência de defeitos é uma das principais limitações da manufatura aditiva metálica. Embora os processos SLM/DMLS permitam a fabricação de peças densas e complexas, a natureza térmica e dinâmica do processo favorece o surgimento de descontinuidades internas, defeitos superficiais e heterogeneidades microestruturais. Entre os defeitos mais comuns observados em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS estão a porosidade, a falta de fusão, as trincas térmicas, as inclusões, as partículas não fundidas, a rugosidade superficial elevada, o empenamento e as distorções geométricas. Esses defeitos podem surgir isoladamente ou de forma combinada, dependendo dos parâmetros de processo, da liga utilizada, da estratégia de varredura e das condições da atmosfera de fabricação.

A porosidade pode ser considerada um dos defeitos mais relevantes, pois está presente em diferentes escalas e pode afetar tanto propriedades mecânicas quanto funcionais. Em componentes estruturais, sua presença reduz resistência, ductilidade e vida em fadiga. Em componentes que exigem estanqueidade, como trocadores de calor, tubos térmicos e sistemas de condução de fluidos, poros interconectados podem comprometer o desempenho funcional. Malashin *et al.* (2024), ao estudarem tubos térmicos de AlSi10Mg produzidos por SLM, demonstraram que a permeabilidade à água está diretamente associada à interconectividade dos poros, evidenciando que a porosidade pode afetar não apenas propriedades mecânicas, mas também propriedades de transporte de fluido.

A falta de fusão ocorre quando o aporte energético é insuficiente para unir completamente partículas de pó, trilhas adjacentes ou camadas sucessivas. Esse defeito tende a apresentar morfologia irregular e pode conter partículas não fundidas em seu interior. Por sua geometria aguda, é considerado um dos defeitos mais críticos para a resistência à fadiga e à fratura.

Trincas térmicas podem ocorrer em ligas suscetíveis a elevados gradientes térmicos, tensões residuais e segregação durante a solidificação. Embora não sejam o foco principal deste trabalho, sua ocorrência está associada ao mesmo ambiente térmico que favorece a formação de poros, indicando a necessidade de controle conjunto dos parâmetros de processo.

Inclusões e óxidos também representam problemas importantes. A presença de oxigênio residual na câmara de fabricação ou de óxidos na superfície das partículas de pó pode gerar inclusões não metálicas, alterar a molhabilidade do banho de fusão e favorecer a formação de

descontinuidades. Por isso, o controle da atmosfera inerte e da qualidade do pó é fundamental para a redução dos defeitos internos.

Além dos defeitos internos, a rugosidade superficial elevada é uma característica recorrente em peças produzidas por SLM/DMLS. Ela pode estar associada à adesão de partículas parcialmente fundidas, ao efeito escada causado pela construção em camadas, ao fenômeno de *balling* (efeito indesejado no qual o metal fundido encolhe, formando pequenas esferas em vez de criar uma camada lisa e contínua) e às instabilidades do banho de fusão. Embora a rugosidade superficial seja diferente da porosidade interna, ambas podem estar relacionadas às mesmas condições de processamento e influenciar a resistência à fadiga.

3.4 Mecanismos de Formação de Porosidade

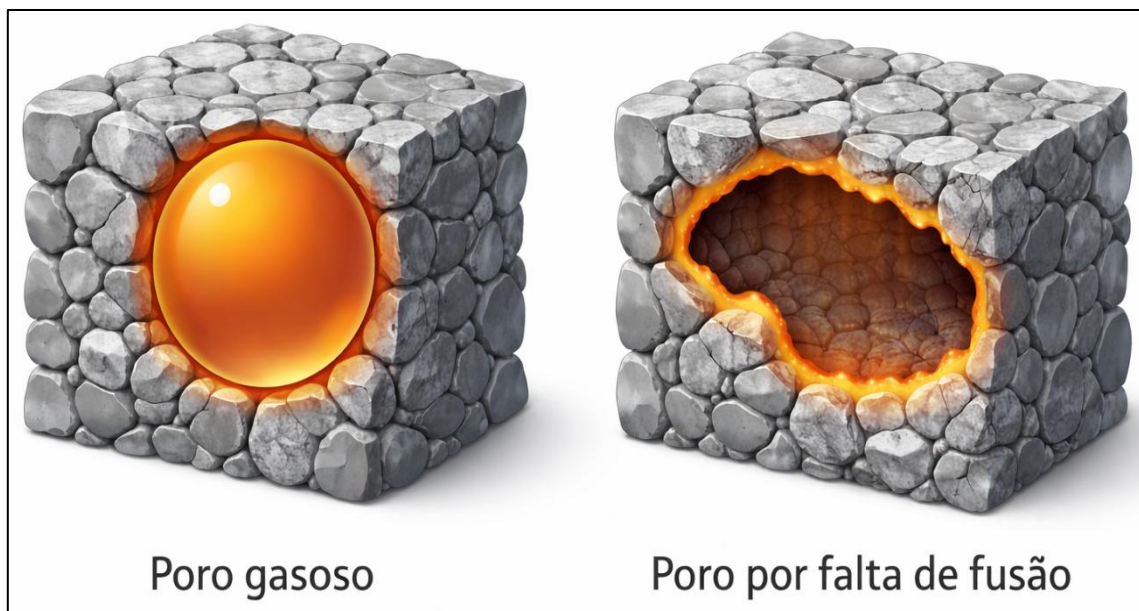
A formação de porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS está associada à interação entre aporte energético, comportamento do banho de fusão, características do pó metálico, atmosfera de fabricação e dinâmica de solidificação. De modo geral, os principais mecanismos de formação podem ser agrupados em três categorias: porosidade por falta de fusão, porosidade gasosa e porosidade por instabilidade *keyhole*.

A porosidade por falta de fusão ocorre quando a energia fornecida pelo laser não é suficiente para promover a fusão completa do pó metálico ou a união adequada entre trilhas e camadas. Essa condição pode ser causada por baixa potência do laser, velocidade de varredura elevada, espaçamento excessivo entre trilhas, espessura de camada elevada ou má distribuição do pó no leito. Como resultado, formam-se vazios irregulares, frequentemente alongados e com baixa esfericidade. Wang *et al.* (2022) destacam que a porosidade por falta de fusão pode conter partículas de pó não fundidas em seu interior, evidenciando a deficiência de energia local durante a fabricação. Esse tipo de poro é considerado particularmente prejudicial, pois suas extremidades agudas favorecem a concentração de tensões e a nucleação de trincas. Em aplicações sujeitas à fadiga, impacto ou solicitação dinâmica, esses defeitos tendem a ser mais críticos do que poros gasosos isolados e arredondados.

Buhairi *et al.* (2023) destacam que os poros gasosos são normalmente esféricos ou elípticos, enquanto os poros por falta de fusão são maiores, irregulares e apresentam pontas mais agudas. Os autores também ressaltam que os poros por falta de fusão tendem a ser mais perigosos que os poros gasosos, pois geralmente aparecem em regiões de fronteira entre camadas ou trilhas, favorecendo a concentração de tensões e a iniciação prematura de trincas.

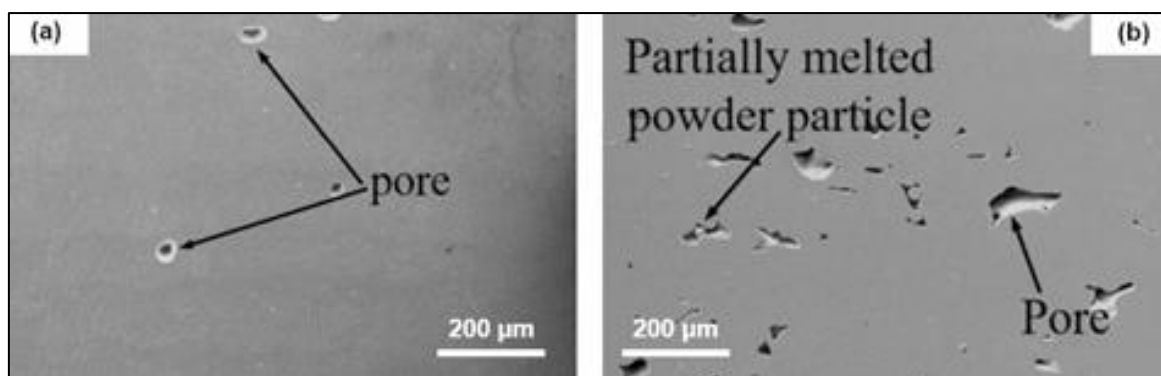
A Figura 2 apresenta uma representação esquemática das morfologias típicas de poros gasosos e poros por falta de fusão, a Figura 3 apresenta imagens reais de poros formados.

Figura 2: Imagem ilustrativa das morfologias esquemáticas de poros: poro gasoso e poro por falta de fusão.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 3: Imagem de poros formados pelo processo LPBF: a) poro gasoso; b) poro por falta de fusão;



Fonte: [Buhairi et al. \(2022\)](#).

A porosidade gasosa, por sua vez, está associada ao aprisionamento de gases durante a fusão e solidificação do material. Esses gases podem estar presentes no interior das partículas de pó, serem introduzidos durante a atomização, resultarem de umidade ou contaminações superficiais, ou ainda estarem relacionados à atmosfera de fabricação. Durante o processo

SLM/DMLS, a rápida solidificação pode impedir a saída completa dessas bolhas do banho de fusão, originando poros aproximadamente esféricos. Embora os poros gasosos sejam geralmente menos severos que os poros por falta de fusão, sua influência não deve ser desprezada. Quando localizados próximos à superfície, agrupados ou presentes em regiões de alta solicitação, também podem atuar como iniciadores de trincas. Além disso, em aplicações que envolvem estanqueidade ou transporte de fluidos, a interconectividade entre poros gasosos pode comprometer a funcionalidade da peça.

O terceiro mecanismo relevante é a porosidade associada ao regime *keyhole*. Esse fenômeno ocorre quando a densidade de energia é excessiva, provocando vaporização intensa do metal e formação de uma cavidade profunda e instável no banho de fusão. O colapso dessa cavidade durante a solidificação pode aprisionar vazios, originando poros internos geralmente arredondados, porém de maior dimensão. King *et al.* (2014) associam o regime *keyhole* à elevada pressão de recuo gerada pela vaporização do material. Nessas condições, o laser penetra profundamente no banho de fusão, formando uma cavidade estreita e instável. Caso essa cavidade não permaneça estável durante o processo, seu colapso pode aprisionar gás e formar poros internos.

A relação entre energia e porosidade não é linear. Mierzejewska (2019) observou que, em amostras de Ti6Al4V produzidas por DMLS, baixas densidades de energia, entre 33 e 71 J/mm³, resultaram em porosidades entre 9,31% e 3,37%, com poros irregulares, interconectados e associados à fusão incompleta. Com o aumento da densidade de energia para a faixa de 78 a 127 J/mm³, a porosidade foi reduzida para valores entre 0,84% e 0,16%. Acima de 127 J/mm³, a porosidade voltou a aumentar, indicando efeito de superaquecimento do material. Esse comportamento mostra que a formação de porosidade pode ocorrer tanto por insuficiência quanto por excesso de energia. Baixo aporte energético favorece a falta de fusão, enquanto aporte excessivo favorece vaporização, instabilidade *keyhole* e aprisionamento de gases. A minimização da porosidade depende, portanto, da definição de uma janela ótima de processamento, na qual a energia seja suficiente para fundir completamente o material, mas não tão elevada a ponto de gerar instabilidades.

As características do pó metálico também influenciam diretamente esses mecanismos. Pós com partículas irregulares, satelizadas, oxidadas ou com ampla distribuição granulométrica podem prejudicar o empacotamento do leito de pó, gerar vazios locais e dificultar a transferência uniforme de calor. Brika *et al.* (2020) demonstraram que a morfologia e a distribuição granulométrica do pó influenciam diretamente a escoabilidade, a densidade

aparente e as condições de manufatura em processos de fusão em leito de pó a laser. Além disso, Wang *et al.* (2022) destacam que a porosidade existente no próprio pó pode ser herdada pela peça final, caso as partículas não sejam completamente fundidas. Mesmo quando ocorre fusão, gases aprisionados no interior das partículas podem ser liberados no banho de fusão, aumentando a probabilidade de formação de poros gasosos.

A atmosfera de fabricação também deve ser considerada. A presença de oxigênio residual, umidade ou contaminantes pode favorecer a formação de óxidos e inclusões, alterar a tensão superficial do banho de fusão e comprometer a estabilidade da poça fundida. Dessa forma, o controle da atmosfera inerte, aliado ao controle da qualidade do pó, é essencial para a mitigação dos mecanismos de formação de porosidade.

3.5 Estratégias para Mitigação da Porosidade

As estratégias para mitigação da porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS podem ser agrupadas em cinco categorias principais: otimização dos parâmetros de processo, controle das características do pó metálico, controle da atmosfera de fabricação, ajuste da estratégia de varredura e aplicação de pós-processamentos.

A otimização dos parâmetros de processo é a estratégia mais direta, pois atua sobre a origem da formação dos poros. O ajuste adequado da potência do laser, velocidade de varredura, espaçamento entre trilhas e espessura de camada permite controlar a geometria do banho de fusão, a penetração do laser e a sobreposição entre trilhas. O objetivo é evitar tanto a falta de fusão quanto o regime *keyhole*. A densidade de energia volumétrica pode auxiliar na seleção inicial dos parâmetros, mas deve ser usada com cautela. Buhairi *et al.* (2023) indicam que, para Ti6Al4V produzido por LPBF, a faixa de 55 a 65 J/mm³ aparece associada a bons resultados de rugosidade superficial, microdureza e resistência mecânica. Entretanto, a própria revisão destaca que diferentes combinações de potência, velocidade, espaçamento e espessura de camada podem produzir resultados distintos mesmo com valores semelhantes de densidade de energia volumétrica. Cherry *et al.* (2015), ao estudarem aço inoxidável 316L produzido por SLM, observaram que a menor porosidade foi obtida em uma condição intermediária de densidade de energia. Em baixas energias, houve maior ocorrência de falta de fusão, enquanto em energias muito elevadas a porosidade voltou a aumentar, possivelmente devido à vaporização e instabilidades do banho de fusão. Esse comportamento reforça a importância da definição de uma janela de processamento adequada para cada material. MemaranBabakan *et al.* (2023) utilizaram métodos como RSM (*Response Surface Methodology*), redes neurais

artificiais, lógica *fuzzy* e *Adaptive Neuro-Fuzzy Interference System* (ANFIS) para prever a influência dos parâmetros de processo na porosidade de ligas AlSi10Mg produzidas por SLM. Os resultados indicaram que potência do laser e velocidade de varredura exerceram influência significativa sobre o volume de porosidade, enquanto o tamanho de ilha e o espaçamento entre trilhas apresentaram efeitos menores no conjunto analisado. Esse tipo de abordagem mostra o potencial de modelos computacionais e aprendizado de máquina para auxiliar na otimização do processo.

A revarredura a laser (*laser remelting*), também é uma estratégia relevante. Ela consiste na aplicação de uma segunda passagem do laser sobre uma camada previamente solidificada, promovendo nova fusão superficial e possível fechamento de defeitos. Essa técnica pode melhorar a densificação e reduzir poros por falta de fusão, mas também aumenta o tempo de fabricação e pode alterar a microestrutura, a rugosidade e o estado de tensões residuais da peça.

A estratégia de varredura é outra ferramenta importante na mitigação de defeitos, pois influencia a distribuição térmica e a estabilidade do banho de fusão. Padrões alternados, rotação entre camadas e estratégias em ilhas podem contribuir para a redução de gradientes térmicos, melhora da sobreposição entre trilhas e diminuição de defeitos localizados. Contudo, estratégias mal ajustadas podem gerar descontinuidades térmicas entre regiões adjacentes, favorecendo a formação de poros.

O controle do pó metálico é outra estratégia essencial. Pós com morfologia esférica, distribuição granulométrica adequada, baixa oxidação e boa escoabilidade favorecem a formação de camadas homogêneas e reduzem a ocorrência de vazios locais. O reaproveitamento de pó deve ser realizado com cautela, pois ciclos sucessivos de uso podem alterar a distribuição granulométrica, aumentar a oxidação superficial e modificar a fluidez do material.

A modificação do material por adição de partículas ou nanopartículas também vem sendo estudada. Martin *et al.* (2017) demonstraram que a adição de nanopartículas pode favorecer a nucleação heterogênea e reduzir a suscetibilidade a trincas em ligas de alumínio de alta resistência processadas por manufatura aditiva. Embora esse estudo esteja mais associado ao controle de trincas e refinamento microestrutural, ele demonstra o potencial da modificação do material como ferramenta para melhoria da qualidade metalúrgica em processos de fusão a laser.

Tratamentos térmicos de pós-processamento também podem contribuir para a melhoria das propriedades mecânicas, alívio de tensões residuais e estabilização microestrutural. No entanto, tratamentos térmicos convencionais não eliminam poros internos de forma

significativa, especialmente quando se trata de falta de fusão severa. Em alguns materiais, tratamentos em alta temperatura podem até causar crescimento de poros gasosos devido à expansão do gás aprisionado. Mierzejewska (2019) demonstrou que o tratamento térmico em Ti6Al4V produzido por DMLS alterou a microestrutura martensítica α' para uma combinação de fases $\alpha + \beta$, reduziu a resistência mecânica e aumentou o alongamento, porém a porosidade permaneceu praticamente inalterada.

A prensagem isostática a quente (*Hot Isostatic Pressing* — HIP) é uma das técnicas mais eficazes para reduzir poros internos fechados. Mishurova *et al.* (2023) demonstraram, em Ti-6Al-4V produzido por LPBF, que o HIP pode aumentar a densificação e reduzir o tamanho dos defeitos, embora sua eficiência dependa das características iniciais dos poros. Defeitos menores tendem a fechar mais rapidamente, enquanto poros maiores ou conectados à superfície podem não ser completamente eliminados.

Por fim, técnicas de monitoramento em tempo real e aprendizado de máquina representam uma tendência promissora para a mitigação da porosidade. Malashin *et al.* (2024) aplicaram métodos de reconhecimento de poros em imagens da superfície de amostras produzidas por SLM, utilizando características do tipo Haar para identificar regiões porosas. Embora o estudo tenha foco em tubos térmicos e permeabilidade, ele demonstra o potencial de métodos automatizados para controle de qualidade e otimização de parâmetros de fabricação.

3.6 Influência da Estratégia de Varredura a Laser na Formação de Porosidade

A estratégia de varredura a laser exerce influência significativa sobre a formação da porosidade em peças produzidas por SLM/DMLS. Isso ocorre porque a trajetória do laser determina a distribuição espacial e temporal do calor, a sobreposição entre trilhas, a taxa de resfriamento, a direção de solidificação e o acúmulo térmico ao longo da peça. Entre as estratégias de varredura mais comuns estão as linhas paralelas, padrões bidirecionais alternados, rotação angular entre camadas sucessivas, varredura em ilhas e padrões tipo xadrez. Cada estratégia apresenta vantagens e limitações, dependendo do material, da geometria da peça e dos requisitos de desempenho.

Em estratégias de linhas paralelas, a repetição da direção de varredura pode gerar acúmulo térmico e anisotropia microestrutural. A rotação do ângulo de varredura entre camadas sucessivas tende a distribuir melhor os gradientes térmicos, reduzindo o alinhamento de defeitos

e melhorando a homogeneidade da peça. Essa abordagem também pode reduzir a probabilidade de formação de regiões contínuas de falta de fusão entre camadas.

As estratégias em ilhas dividem a área da camada em regiões menores, que são processadas de forma sequencial ou alternada. Essa técnica pode reduzir tensões residuais e controlar melhor o acúmulo térmico local. Entretanto, se as transições entre ilhas não forem bem definidas, podem surgir descontinuidades térmicas, regiões com sobreposição insuficiente e, conseqüentemente, poros localizados.

A correta sobreposição entre trilhas é essencial para evitar falta de fusão. Quando o espaçamento entre trilhas é excessivo, formam-se regiões não fundidas entre cordões adjacentes, favorecendo a porosidade irregular. Cherry *et al.* (2015) observaram que o padrão de varredura bidirecional alternado pode favorecer a continuidade das trilhas fundidas, desde que combinado com densidade de energia adequada.

Em ligas como AlSi10Mg, a estratégia de varredura também está relacionada à formação de porosidade, rugosidade e instabilidades superficiais. Malashin *et al.* (2024) demonstraram que parâmetros como distância de hachura e distância entre pontos influenciam a permeabilidade de estruturas porosas produzidas por SLM. Embora o objetivo do estudo tenha sido controlar a porosidade em tubos térmicos, os resultados reforçam que a definição da trajetória e do espaçamento do laser influencia diretamente a conectividade dos poros.

Dessa forma, a estratégia de varredura deve ser tratada como parte integrante da otimização do processo, e não apenas como uma configuração geométrica da fabricação. Sua escolha deve considerar a necessidade de estabilidade térmica, redução de tensões residuais, controle da sobreposição entre trilhas e minimização de porosidade localizada.

3.7 Efeito das Tensões Residuais e Distorções Geométricas na Integridade Interna das Peças

As elevadas taxas de aquecimento e resfriamento presentes nos processos SLM/DMLS geram gradientes térmicos intensos, que resultam na formação de tensões residuais. Essas tensões surgem devido à contração térmica desigual entre regiões já solidificadas e regiões recentemente fundidas, podendo causar distorções geométricas, empenamento, delaminação e até trincas.

Embora as tensões residuais não sejam a causa direta mais comum da porosidade, elas influenciam a integridade interna das peças e podem intensificar os efeitos de defeitos preexistentes. Regiões com falta de fusão, poros alongados ou descontinuidades entre camadas

podem se tornar mais críticas quando submetidas a campos de tensões residuais, favorecendo abertura de defeitos e propagação de trincas. DebRoy *et al.* (2018) destacam que a interação entre microestrutura, tensões residuais e defeitos é um dos principais desafios na qualificação de componentes metálicos produzidos por manufatura aditiva. Como a peça é construída camada a camada, o histórico térmico varia ao longo da altura e da geometria, resultando em comportamento anisotrópico e heterogeneidade local.

O pré-aquecimento da plataforma de construção é uma estratégia frequentemente utilizada para reduzir gradientes térmicos e minimizar tensões residuais. Ao diminuir a diferença de temperatura entre a região fundida e o material previamente solidificado, o pré-aquecimento pode reduzir a tendência ao empenamento e melhorar a estabilidade do processo.

Tratamentos térmicos de alívio de tensões também são amplamente empregados após a fabricação. Esses tratamentos podem reduzir tensões residuais e melhorar a estabilidade dimensional da peça. No entanto, sua influência sobre a porosidade é limitada, pois não eliminam vazios internos de forma significativa. Assim, o controle das tensões residuais deve ser considerado uma estratégia complementar à prevenção da porosidade durante a fabricação. Além disso, a presença de distorções geométricas pode alterar a deposição das camadas subsequentes, prejudicar a uniformidade do leito de pó e gerar regiões com espessura local inadequada. Essa condição pode favorecer a falta de fusão em camadas posteriores, criando uma relação indireta entre distorção geométrica e formação de porosidade.

Portanto, o controle das tensões residuais e das distorções geométricas é fundamental para garantir a integridade interna das peças produzidas por SLM/DMLS, especialmente em componentes de maior volume, geometrias complexas ou aplicações críticas.

3.8 Técnicas de Caracterização da Porosidade em Peças Produzidas por SLM/DMLS

A caracterização da porosidade é essencial para avaliar a qualidade de peças produzidas por SLM/DMLS e validar estratégias de mitigação. A simples identificação da presença de poros não é suficiente; é necessário quantificar sua fração volumétrica, tamanho, forma, distribuição espacial, conectividade e localização em relação à superfície ou a regiões críticas da peça.

As técnicas de caracterização podem ser classificadas em destrutivas e não destrutivas. Entre as técnicas destrutivas, destacam-se a metalografia óptica e a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Essas técnicas permitem observar a morfologia dos poros em seções polidas,

identificar partículas não fundidas, distinguir poros gasosos de poros por falta de fusão e avaliar a presença de inclusões ou trincas. Entretanto, a metalografia e a microscopia eletrônica fornecem informações bidimensionais e dependem da região seccionada. Dessa forma, podem não representar adequadamente a distribuição tridimensional dos poros no volume da peça. Ainda assim, são métodos importantes por sua acessibilidade, resolução e capacidade de análise microestrutural detalhada.

O método de Arquimedes é amplamente utilizado para determinar a densidade relativa das amostras. Trata-se de uma técnica simples e não destrutiva, baseada na diferença entre a massa da amostra medida no ar e em um fluido. A partir da densidade medida e da densidade teórica do material, é possível estimar a porosidade total. No entanto, esse método não fornece informações sobre forma, tamanho, localização ou conectividade dos poros.

A microtomografia computadorizada por raios X (micro-CT ou XCT) é uma das técnicas mais completas para caracterização tridimensional da porosidade. Ela permite reconstruir o volume interno da peça e avaliar poros de forma não destrutiva. Wang *et al.* (2022) destacam que a tomografia possibilita medir tamanho, volume, forma, distribuição espacial e conectividade dos poros, sendo especialmente útil para estudos de fadiga, análise de defeitos críticos e validação de modelos numéricos. Apesar de suas vantagens, a tomografia possui limitações. A resolução depende do tamanho da amostra, da densidade do material e das condições do equipamento. Poros muito pequenos podem não ser detectados, especialmente em amostras maiores. Além disso, o custo e a disponibilidade do equipamento podem limitar seu uso em inspeções industriais de rotina.

Ensaio ultrassônicos também podem ser utilizados para avaliação não destrutiva de defeitos internos. Essa técnica apresenta vantagem em peças maiores, devido à maior profundidade de penetração das ondas ultrassônicas. Contudo, sua capacidade de quantificar porosidade em pequena escala ainda é limitada quando comparada à microtomografia.

Nos últimos anos, métodos de monitoramento em tempo real e análise automatizada por aprendizado de máquina vêm ganhando destaque. Malashin *et al.* (2024) utilizaram análise de imagens de microestrutura para reconhecimento automático de poros em amostras de AlSi10Mg produzidas por SLM, aplicando características do tipo Haar (padrões de formatos retangulares utilizados em visão computacional e inteligência artificial para reconhecer objetos). O estudo demonstrou que técnicas computacionais podem auxiliar na identificação e quantificação de poros superficiais, contribuindo para o controle de qualidade. Alkunte *et al.* (2025) também destacam a importância de técnicas modernas de caracterização, como XCT,

MEV e modelos baseados em aprendizado de máquina, tanto para avaliação de porosidade indesejada quanto para controle de porosidade intencional. Essa distinção é relevante, pois em algumas aplicações a porosidade pode ser projetada deliberadamente para funções específicas, enquanto em componentes estruturais ela geralmente deve ser minimizada.

Dessa forma, a caracterização adequada da porosidade em SLM/DMLS deve combinar diferentes técnicas. Métodos como Arquimedes podem fornecer uma estimativa global de densidade; MEV e metalografia permitem análise morfológica detalhada; micro-CT possibilita avaliação tridimensional; e técnicas computacionais podem contribuir para automação e análise estatística. A combinação dessas abordagens fornece uma avaliação mais completa da qualidade da peça e do impacto da porosidade sobre seu desempenho.

4. METODOLOGIA

O presente trabalho adota como metodologia uma Análise Crítica da literatura técnico-científica de referência, com o objetivo de identificar e sintetizar os principais estudos relacionados à formação, caracterização e mitigação da porosidade em peças metálicas produzidas pelos processos SLM/DMLS. A escolha por uma análise crítica justifica-se pela necessidade de reunir e comparar, os resultados disponíveis na literatura técnico-científica, permitindo avaliar os principais mecanismos de formação dos defeitos, os fatores de processo envolvidos e as estratégias mais eficazes para sua minimização.

A metodologia foi estruturada em três etapas principais: definição da estratégia de busca, aplicação dos critérios de inclusão e exclusão e classificação dos estudos selecionados. Essa organização permitiu agrupar as fontes conforme o tipo de contribuição apresentada, diferenciando estudos voltados aos mecanismos de formação da porosidade, à influência dos parâmetros de processo, à qualidade do pó metálico, às técnicas de caracterização, aos pós-processamentos e às abordagens recentes de monitoramento e aprendizado de máquina.

Não foi realizada uma meta-análise estatística, pois os estudos analisados apresentam grande variação quanto aos materiais utilizados, equipamentos, parâmetros de fabricação, métodos de medição da porosidade e condições de pós-processamento. Dessa forma, a análise foi conduzida de maneira comparativa e crítica, buscando identificar tendências recorrentes, limitações técnicas e estratégias de mitigação com maior potencial de aplicação em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS.

4.1 Estratégia de Busca

A estratégia de busca da literatura foi definida com o objetivo de identificar estudos relevantes sobre a formação e a minimização da porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS. As buscas foram realizadas em bases de dados científicas reconhecidas pela abrangência e qualidade das publicações disponíveis, incluindo Periódicos CAPES, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Web of Science*, *Scopus*, MDPI, *Nature*, *Google Scholar* e repositórios editoriais de periódicos científicos.

Foram utilizados descritores em língua inglesa, uma vez que a maior parte da produção científica relacionada à manufatura aditiva metálica é publicada nesse idioma. Entre os principais termos empregados nas buscas, destacam-se: *Selective Laser Melting*, *Direct Metal Laser Sintering*, *Laser Powder Bed Fusion*, *metal additive manufacturing*, *porosity*, *lack of fusion*, *gas porosity*, *keyhole porosity*, *process parameters*, *powder morphology*, *hatch spacing*,

scan speed, laser power, hot isostatic pressing, porosity reduction, pore characterization, X-ray computed tomography, in-situ monitoring e machine learning.

O operador booleano “AND” foi utilizado para combinar termos e ampliar ou restringir os resultados conforme a necessidade. Exemplos de combinações utilizadas incluem: *Selective Laser Melting AND porosity, Laser Powder Bed Fusion AND lack of fusion, SLM AND AlSi10Mg AND porosity, LPBF AND hot isostatic pressing, SLM AND powder morphology, metal additive manufacturing AND pore characterization e SLM AND machine learning AND pore detection.*

A busca priorizou trabalhos publicados nos últimos dez anos, com maior atenção às publicações entre 2022 e 2025, de forma a incorporar o estado mais recente do conhecimento sobre o tema. No entanto, referências clássicas e amplamente reconhecidas foram mantidas quando consideradas fundamentais para a compreensão dos processos de manufatura aditiva metálica, dos mecanismos físicos do banho de fusão e das relações entre parâmetros de processo, microestrutura e propriedades mecânicas. Dessa forma, trabalhos como os de Frazier (2014), Gibson *et al.* (2015), King *et al.* (2014; 2015), DebRoy *et al.* (2018) e Cherry *et al.* (2015) foram preservados por sua relevância conceitual e técnica.

Além das referências clássicas, foram incorporados estudos mais recentes e diretamente relacionados ao tema, como Kan *et al.* (2022), Wang *et al.* (2022), Mishurova *et al.* (2023), Malashin *et al.* (2024), Alkunte *et al.* (2025) e MemaranBabakan *et al.* (2023). Esses trabalhos foram selecionados por tratarem, respectivamente, dos efeitos da porosidade nas propriedades mecânicas, da análise estatística da porosidade em metais produzidos por LPBF, da eficiência da prensagem isostática a quente na redução de defeitos, do uso de aprendizado de máquina para reconhecimento de poros e dos modelos computacionais de previsão de porosidade.

Também foram considerados textos técnicos e publicações setoriais quando apresentaram relevância para a contextualização industrial da manufatura aditiva metálica. Nesse grupo, destaca-se McMahon (2023), utilizado para complementar a discussão sobre a aplicação da manufatura aditiva metálica no setor aeroespacial e a necessidade de controle rigoroso de defeitos em componentes de alto desempenho. A

Tabela 1, apresentada abaixo, mostra a síntese do protocolo de busca adotado na análise crítica.

Tabela 1: Síntese do protocolo de busca da Análise Crítica.

Item analisado	Procedimento adotado
Tipo de estudo	Análise Crítica da Literatura de Referência
Tema central	Formação, caracterização e minimização da porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS
Bases consultadas	Periódicos CAPES, <i>ScienceDirect</i> , <i>SpringerLink</i> , <i>Web of Science</i> , <i>Scopus</i> , MDPI, <i>Nature</i> , <i>Google Scholar</i> e repositórios editoriais
Idioma priorizado	Inglês, devido à predominância da literatura científica internacional sobre manufatura aditiva metálica
Período priorizado	Publicações dos últimos dez anos, com ênfase em estudos recentes entre 2019 e 2025
Processos considerados	SLM, DMLS e LPBF
Materiais considerados	Ti6Al4V, aço inoxidável 316L, AlSi10Mg, Inconel 718 e outras ligas metálicas aplicáveis aos processos SLM/DMLS
Termos principais	<i>SLM, DMLS, LPBF, porosity, lack of fusion, gas porosity, keyhole, process parameters, VED, HIP, micro-CT, in-situ monitoring</i>
Tipo de análise	Comparação entre mecanismos de formação, fatores de influência, técnicas de caracterização e estratégias de mitigação
Resultado esperado	Identificação dos fatores que aumentam ou reduzem a porosidade e das estratégias mais adequadas para sua minimização

Fonte: Elaboração própria.

4.2 Critérios de Inclusão e Exclusão

Após a etapa de busca, os estudos identificados foram submetidos a critérios de inclusão e exclusão previamente definidos, com o objetivo de garantir a relevância, a qualidade e a aderência das fontes ao tema do trabalho. Foram incluídos estudos experimentais, estudos numéricos, dissertações, teses e publicações técnicas que apresentassem contribuição direta para a compreensão da porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS ou processos equivalentes de LPBF.

Foram considerados elegíveis os estudos que abordassem pelo menos um dos seguintes aspectos: mecanismos de formação de porosidade; influência dos parâmetros de processo;

comportamento do banho de fusão; formação de poros por falta de fusão, poros gasosos ou poros associados ao regime *keyhole*; influência da morfologia e da distribuição granulométrica do pó metálico; efeitos da atmosfera de fabricação; técnicas de caracterização da porosidade; impacto dos poros nas propriedades mecânicas; estratégias de mitigação; tratamentos térmicos; prensagem isostática a quente; revarredura a laser; monitoramento em tempo real; e aplicação de aprendizado de máquina à detecção ou previsão de defeitos.

Também foram incluídos estudos com diferentes materiais metálicos, desde que relacionados ao processamento por SLM/DMLS ou LPBF. Entre os materiais considerados, destacam-se ligas de titânio, como Ti-6Al-4V, aços inoxidáveis, especialmente 316L, superligas de níquel, como Inconel 718, e ligas de alumínio, principalmente AlSi10Mg. Essa variedade foi adotada porque a literatura demonstra que a formação da porosidade depende fortemente do material processado, da absorção do laser, da condutividade térmica, da fluidez do banho de fusão e da tendência à oxidação ou vaporização de elementos de liga.

Foram excluídos trabalhos que tratassem exclusivamente de manufatura aditiva polimérica, processos não baseados em fusão de pó metálico por laser, salvo quando apresentavam contribuição metodológica relevante para caracterização, monitoramento ou análise de porosidade. Também foram excluídos estudos sem relação direta com porosidade, trabalhos sem descrição mínima dos parâmetros de processo ou das condições experimentais, textos sem acesso a dados essenciais e materiais com caráter predominantemente comercial, sem fundamentação técnica ou científica suficiente.

Estudos sobre porosidade intencional em manufatura aditiva foram analisados com cautela. Embora o foco deste trabalho seja a minimização da porosidade indesejada em peças metálicas estruturais, trabalhos como Alkunte *et al.* (2025) foram utilizados para diferenciar a porosidade como defeito da porosidade como recurso funcional de projeto. Essa distinção é importante porque a presença de vazios pode ser desejável em aplicações como implantes biomédicos, filtração, absorção acústica e sistemas térmicos, mas é geralmente prejudicial em componentes estruturais sujeitos a carregamentos mecânicos críticos.

A seleção das referências também considerou a atualidade das publicações. Trabalhos mais recentes foram priorizados quando apresentavam revisão ampla da literatura, métodos experimentais avançados ou discussão sobre tecnologias emergentes, como monitoramento *in situ*, tomografia computadorizada, modelagem de alta fidelidade e aprendizado de máquina. No entanto, referências clássicas foram mantidas quando necessárias para fundamentar os conceitos básicos de SLM/DMLS, interação laser-material, formação do banho de fusão e

mecanismos de defeitos. Abaixo, a Tabela 2 apresenta os principais critérios utilizados para seleção das fontes.

Tabela 2: Critérios adotados para inclusão e exclusão dos estudos analisados.

Categoria	Critério adotado
Inclusão	Estudos sobre SLM, DMLS ou LPBF aplicados a metais
Inclusão	Trabalhos que abordam porosidade, falta de fusão, poros gasosos ou regime <i>keyhole</i>
Inclusão	Estudos sobre influência de parâmetros de processo e densidade de energia volumétrica
Inclusão	Estudos sobre pó metálico, atmosfera de fabricação e estabilidade do banho de fusão
Inclusão	Trabalhos sobre caracterização por MEV, metalografia, Arquimedes, micro-CT ou técnicas não destrutivas
Inclusão	Estudos sobre HIP, tratamentos térmicos, revarredura a laser e outras estratégias de mitigação
Inclusão	Pesquisas sobre monitoramento <i>in situ</i> , aprendizado de máquina e modelos preditivos
Exclusão	Estudos exclusivamente sobre polímeros, cerâmicas ou processos não metálicos
Exclusão	Trabalhos sem relação direta com formação ou mitigação de porosidade
Exclusão	Publicações sem dados técnicos mínimos sobre processo, material ou defeito analisado
Exclusão	Textos comerciais, sem fundamentação científica ou sem contribuição técnica clara

Fonte: Elaboração própria.

4.3 Classificação dos Estudos

Os estudos selecionados foram classificados de acordo com o foco principal de investigação, permitindo uma análise estruturada e comparativa da literatura. Inicialmente, as fontes foram agrupadas conforme o tipo de abordagem adotada: estudos experimentais, estudos de revisão, estudos de caracterização, estudos sobre pós-processamentos e estudos baseados em modelagem computacional ou aprendizado de máquina.

Os estudos experimentais foram utilizados principalmente para analisar a influência direta dos parâmetros de processo sobre a formação da porosidade. Nesse grupo, destacam-se trabalhos que avaliaram potência do laser, velocidade de varredura, espaçamento entre trilhas, distância entre pontos, tempo de exposição, espessura de camada e densidade de energia. Estudos como Cherry *et al.* (2015), Malashin *et al.* (2024) e MemaranBabakan *et al.* (2023) foram relevantes para compreender como a alteração de parâmetros de fabricação afeta a densificação, a rugosidade, a permeabilidade e a quantidade de poros.

Os estudos de revisão foram utilizados para consolidar os principais mecanismos de formação de porosidade e seus impactos nas propriedades mecânicas. Kan *et al.* (2022) e Wang

et al. (2022) foram classificados nesse grupo, por apresentarem análises amplas sobre os efeitos da porosidade em ligas metálicas produzidas por LPBF, incluindo a influência da morfologia dos poros, da fração volumétrica, da distribuição espacial e da localização dos defeitos.

Os estudos sobre pós-processamento foram classificados separadamente, pois tratam de estratégias aplicadas após a fabricação da peça. Nesse grupo, Mishurova *et al.* (2023) foi utilizado como referência principal para discussão da prensagem isostática a quente, especialmente quanto à sua eficácia na redução de poros internos em Ti-6Al-4V produzido por LPBF. A análise desses estudos permitiu diferenciar estratégias preventivas, aplicadas durante a fabricação, de estratégias corretivas, aplicadas após a produção da peça.

Os estudos sobre caracterização da porosidade foram agrupados conforme a técnica utilizada. Foram considerados métodos destrutivos, como metalografia óptica e microscopia eletrônica de varredura, e métodos não destrutivos, como o método de Arquimedes, microtomografia computadorizada por raios X, ensaio ultrassônico e monitoramento em tempo real. Essa classificação permitiu comparar as vantagens e limitações de cada técnica, considerando resolução, capacidade de análise tridimensional, custo, disponibilidade e aplicabilidade industrial.

Os estudos baseados em modelagem computacional, monitoramento em tempo real e aprendizado de máquina foram classificados como abordagens complementares e emergentes. Essa categoria incluiu pesquisas voltadas à previsão de porosidade, reconhecimento automático de defeitos, análise de imagens, sensores *in situ*, modelos físico-informados e otimização de parâmetros. Esses trabalhos foram utilizados para discutir tendências futuras e possibilidades de melhoria do controle de qualidade em SLM/DMLS.

Além da classificação por tipo de estudo, as fontes também foram organizadas conforme o mecanismo de formação da porosidade. Foram consideradas três categorias principais: porosidade por falta de fusão, porosidade gasosa e porosidade associada ao regime *keyhole*. A falta de fusão foi relacionada a condições de energia insuficiente, baixa sobreposição entre trilhas, camada excessivamente espessa ou má deposição do pó. A porosidade gasosa foi associada ao aprisionamento de gases no pó, no banho de fusão ou na atmosfera de fabricação. A porosidade do tipo *keyhole* foi relacionada ao excesso de energia, vaporização intensa e instabilidade da cavidade formada no banho de fusão.

Também foi realizada uma classificação das estratégias de mitigação em três grupos: preventivas, corretivas e complementares. As estratégias preventivas incluem otimização dos parâmetros do laser, controle da qualidade do pó, controle da atmosfera de fabricação e escolha

adequada da estratégia de varredura. As estratégias corretivas incluem tratamentos térmicos, revarredura a laser e HIP. As estratégias complementares incluem caracterização avançada, monitoramento *in situ*, aprendizado de máquina e modelagem computacional. A Tabela 3, apresenta a forma como os estudos foram classificados para análise dos resultados.

Tabela 3: Classificação dos estudos utilizados.

Grupo de análise	Exemplos de enfoque	Finalidade na análise crítica
Estudos experimentais	Variação de potência, velocidade, orientação de construção e tratamento térmico	Identificar relações entre parâmetros, porosidade e propriedades mecânicas
Estudos de revisão	LPBF, SLM/DMLS, Ti6Al4V, porosidade e densidade de energia	Consolidar tendências e lacunas da literatura
Estudos de caracterização	MEV, metalografia, Arquimedes, micro-CT e ensaios não destrutivos	Comparar métodos de avaliação da porosidade
Estudos de pós-processamento	Tratamento térmico, HIP, revarredura a laser e tratamentos superficiais	Avaliar estratégias de correção ou redução de defeitos
Estudos computacionais	Modelos preditivos, aprendizado de máquina, monitoramento <i>in situ</i> e gêmeos digitais	Discutir tendências futuras e controle avançado de qualidade
Estudos sobre matéria-prima	Morfologia, granulometria, oxidação, escoabilidade e reaproveitamento do pó	Avaliar influência do pó metálico na formação dos defeitos
Estudos sobre atmosfera	Oxigênio residual, umidade, contaminantes e gás inerte	Avaliar influência do ambiente de fabricação na porosidade

Fonte: Elaboração própria.

A partir dessa classificação, os estudos foram analisados criticamente quanto à sua contribuição para os objetivos do trabalho. Para cada fonte considerada mais relevante, foram observados o material estudado, o processo de fabricação, os parâmetros avaliados, os tipos de porosidade identificados, as técnicas de caracterização utilizadas, as estratégias de mitigação propostas e as principais limitações apresentadas.

Por fim, os estudos foram avaliados quanto à aplicabilidade industrial das estratégias propostas. Para isso, foram considerados fatores como eficácia na redução da porosidade, custo, aumento do tempo de fabricação, impacto nas propriedades mecânicas, repetibilidade, necessidade de equipamentos adicionais e adequação a componentes críticos. Essa classificação permitiu construir uma discussão comparativa, relacionando cada estratégia de mitigação ao

tipo de porosidade predominante, ao mecanismo de formação e ao nível de desempenho exigido para a peça.

Essa metodologia permitiu atender aos objetivos do trabalho ao organizar a literatura de forma coerente e progressiva, partindo dos fundamentos do processo, avançando para os mecanismos de formação da porosidade e culminando na avaliação das estratégias de minimização. A partir dessa estrutura, foi possível consolidar os resultados em uma síntese comparativa, apresentada no capítulo seguinte, com foco nos fatores que aumentam ou reduzem a porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise crítica da literatura técnico-científica utilizada como referência, permitiu identificar que a porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS não está associada a uma única variável de fabricação, mas à interação entre parâmetros de processo, características do pó metálico, atmosfera de fabricação, estabilidade do banho de fusão, estratégia de varredura, geometria da peça, técnicas de caracterização e condições de pós-processamento. Essa interpretação é sustentada por DebRoy *et al.* (2018), Wang *et al.* (2022), Kan *et al.* (2022) e Buhairi *et al.* (2023), que apontam a manufatura aditiva metálica como um processo altamente sensível à interação entre variáveis térmicas, metalúrgicas, geométricas e operacionais.

A partir da comparação entre Kan *et al.* (2022) e Wang *et al.* (2022), observa-se consenso quanto ao fato de que a influência da porosidade sobre o desempenho mecânico não depende apenas da fração volumétrica total de vazios, mas também da morfologia, tamanho, localização, orientação e conectividade dos poros. Kan *et al.* (2022) destacam que poros com geometrias irregulares, grandes dimensões ou localização próxima à superfície tendem a ser mais críticos para as propriedades mecânicas. De forma complementar, Wang *et al.* (2022) demonstram, por meio de revisão e análise estatística, que a porosidade residual é recorrente em diferentes ligas metálicas processadas por LPBF, incluindo Ti-6Al-4V, aço inoxidável 316L, Inconel 718 e AlSi10Mg.

Os estudos de Wang *et al.* (2022), Buhairi *et al.* (2023), King *et al.* (2014) e Mierzejewska (2019) indicam que os principais mecanismos de formação da porosidade podem ser agrupados em três categorias: porosidade por falta de fusão, porosidade gasosa e porosidade associada ao regime *keyhole*. Wang *et al.* (2022) e Buhairi *et al.* (2023) relacionam a falta de fusão à energia insuficiente e à baixa sobreposição entre trilhas e camadas. King *et al.* (2014) associam o regime *keyhole* ao excesso de energia, à vaporização intensa e à formação de uma cavidade instável no banho de fusão. Mierzejewska (2019), por sua vez, demonstra experimentalmente que tanto energias muito baixas quanto energias elevadas podem favorecer a formação de poros, evidenciando a necessidade de uma janela intermediária de processamento.

Outro ponto recorrente nos trabalhos analisados é a utilização da densidade de energia volumétrica como parâmetro de comparação entre diferentes condições de processamento. Buhairi *et al.* (2023) apontam que a densidade de energia volumétrica é amplamente utilizada por reunir potência do laser, velocidade de varredura, espaçamento entre trilhas e espessura de

camada. Entretanto, Buhairi *et al.* (2023), Cherry *et al.* (2015) e Mierzejewska (2019) indicam que esse parâmetro deve ser utilizado com cautela, pois diferentes combinações de potência, velocidade, espaçamento e espessura podem gerar valores semelhantes de densidade de energia volumétrica, mas produzir banhos de fusão com geometrias, temperaturas, profundidades e níveis de estabilidade distintos.

Dessa forma, os resultados discutidos neste capítulo foram organizados de modo a relacionar os mecanismos de formação da porosidade aos principais fatores que contribuem para seu aumento ou redução. Também são discutidas as estratégias de mitigação propostas na literatura, com ênfase em sua eficácia, limitações e aplicabilidade industrial.

5.1 Comparativo dos Fatores Associados à Formação e Minimização da Porosidade

Considerando os resultados apresentados por Mierzejewska (2019), Cherry *et al.* (2015), Buhairi *et al.* (2023), Wang *et al.* (2022), Brika *et al.* (2020), Mishurova *et al.* (2023), Malashin *et al.* (2024) e MemaranBabakan *et al.* (2023), foi elaborada a

Tabela 4, na qual são sintetizados os principais fatores associados à formação e à minimização da porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS. A tabela compara as condições que tendem a aumentar a porosidade, as condições que favorecem sua redução, o tipo de defeito predominante e o impacto técnico de cada fator.

Tabela 4: Comparativo dos fatores associados à formação e minimização da porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS.

Fator analisado	Condição que tende a aumentar a porosidade	Condição que tende a reduzir a porosidade	Tipo de porosidade	Impacto técnico
Potência do laser	Potência insuficiente gera fusão incompleta; potência excessiva favorece vaporização intensa e instabilidade do banho de fusão.	Potência ajustada dentro da janela estável de fusão para o material e geometria da peça.	Falta de fusão ou <i>keyhole</i> .	Influencia diretamente a penetração do laser, a densificação e a estabilidade do banho de fusão.

Fator analisado	Condição que tende a aumentar a porosidade	Condição que tende a reduzir a porosidade	Tipo de porosidade	Impacto técnico
Velocidade de varredura	Velocidade muito elevada reduz o aporte térmico; velocidade muito baixa aumenta o risco de vaporização e formação de <i>keyhole</i> .	Velocidade compatível com a potência do laser, espessura de camada e espaçamento entre trilhas.	Falta de fusão ou <i>keyhole</i> .	Afeta a geometria da poça de fusão, o tempo de interação laser-material e a sobreposição entre trilhas.
Densidade de energia volumétrica	Valores baixos causam falta de fusão; valores excessivos podem causar vaporização, instabilidade e aprisionamento de gás.	Faixa intermediária definida experimentalmente para cada material, equipamento e geometria.	Falta de fusão, poros gasosos ou <i>keyhole</i> .	Útil como parâmetro auxiliar, mas insuficiente quando analisada isoladamente.
Espaçamento entre trilhas	Espaçamento elevado reduz a sobreposição entre cordões fundidos e favorece vazios entre trilhas.	Sobreposição adequada entre trilhas adjacentes.	Falta de fusão.	Pode gerar descontinuidades entre trilhas e camadas, afetando densidade e resistência mecânica.
Espessura de camada	Camadas muito espessas dificultam a fusão completa do pó e exigem maior penetração do laser.	Camadas compatíveis com o aporte energético disponível e com a resolução desejada.	Falta de fusão.	Afeta produtividade, resolução geométrica, estabilidade térmica e densificação.
Distância entre pontos	Distâncias elevadas podem reduzir a continuidade da fusão local e gerar regiões parcialmente fundidas.	Distância entre pontos compatível com o diâmetro do feixe e o tempo de exposição.	Falta de fusão ou porosidade localizada.	Influencia a continuidade do cordão fundido, especialmente em sistemas de laser pulsado ou modulado.
Tempo de exposição	Exposição insuficiente reduz a fusão; exposição excessiva pode causar superaquecimento local.	Tempo ajustado para garantir fusão sem vaporização excessiva.	Falta de fusão ou <i>keyhole</i> .	Afeta a energia depositada por ponto e a estabilidade local do banho de fusão.
Morfologia do pó	Partículas irregulares, satelizadas, oxidadas ou com poros internos prejudicam escoabilidade e empacotamento.	Pó predominantemente esférico, limpo e com boa fluidez.	Falta de fusão e porosidade gasosa.	Influencia a formação homogênea da camada de pó e a absorção de energia.

Fator analisado	Condição que tende a aumentar a porosidade	Condição que tende a reduzir a porosidade	Tipo de porosidade	Impacto técnico
Distribuição granulométrica	Distribuição inadequada reduz a densidade aparente do leito e favorece vazios locais.	Distribuição balanceada, capaz de favorecer empacotamento e espalhamento uniforme.	Falta de fusão.	Afeta a uniformidade da camada, a transferência térmica e a repetibilidade do processo.
Atmosfera de fabricação	Presença de oxigênio residual, umidade ou contaminantes favorece óxidos, inclusões e aprisionamento de gases.	Atmosfera inerte controlada, com baixo teor de oxigênio e fluxo adequado de gás.	Poros gasosos e inclusões.	Afeta a qualidade metalúrgica, a tensão superficial e a estabilidade do banho de fusão.
Estratégia de varredura	Trajетórias inadequadas podem gerar acúmulo térmico, falta de sobreposição ou descontinuidades entre regiões.	Rotação entre camadas, padrões alternados, revarredura e estratégias com boa distribuição térmica.	Falta de fusão e poros localizados.	Influencia tensões residuais, anisotropia, distribuição térmica e localização dos defeitos.
Rugosidade superficial	Superfícies muito rugosas podem indicar instabilidades de fusão, aderência de partículas e regiões parcialmente consolidadas.	Condições de processo que favorecem cordões contínuos e acabamento superficial mais uniforme.	Poros superficiais e defeitos próximos à superfície.	Afeta fadiga, corrosão, estanqueidade e desempenho funcional.
Tratamento térmico	Pode aliviar tensões, mas não elimina poros internos significativos; em alguns casos, pode favorecer crescimento de poros gasosos.	Tratamento ajustado para estabilizar a microestrutura e reduzir tensões sem prejudicar a integridade interna.	Não atua diretamente sobre todos os poros.	Deve ser visto como estratégia complementar, não como solução principal para densificação.
Prensagem Isostática a Quente	Não elimina completamente poros abertos à superfície ou defeitos severos de falta de fusão.	Reduz significativamente poros internos fechados, principalmente quando os defeitos são pequenos e isolados.	Poros internos fechados.	Eficaz para componentes críticos, porém aumenta custo, tempo de fabricação e pode alterar a microestrutura.

Fator analisado	Condição que tende a aumentar a porosidade	Condição que tende a reduzir a porosidade	Tipo de porosidade	Impacto técnico
Monitoramento em tempo real	Ausência de monitoramento dificulta a identificação de instabilidades durante a fabricação.	Sensores ópticos, térmicos ou acústicos permitem detectar desvios e apoiar controle adaptativo.	Todos os tipos, de forma preventiva.	Contribui para controle de qualidade, rastreabilidade e redução de defeitos em processo.
Aprendizado de máquina	Ausência de modelos preditivos limita a capacidade de prever defeitos a partir de múltiplas variáveis.	Modelos treinados com dados experimentais podem auxiliar na previsão e detecção de poros.	Todos os tipos, dependendo do modelo.	Promove análise automatizada, classificação de defeitos e otimização de parâmetros.

Fonte: Elaboração própria.

A avaliação comparativa apresentada na

Tabela 4, baseada nos resultados de Cherry *et al.* (2015), Mierzejewska (2019), Buhairi *et al.* (2023) e Wang *et al.* (2022), evidencia que a porosidade deve ser interpretada como resultado de uma cadeia de causas, e não como consequência isolada de um único parâmetro. Por exemplo, Wang *et al.* (2022) e Brika *et al.* (2020) indicam que uma camada de pó mal distribuída pode gerar vazios locais e reduzir a uniformidade do leito de pó. Caso o aporte energético não seja suficiente para compensar essa condição, pode ocorrer falta de fusão. Por outro lado, King *et al.* (2014) e Mierzejewska (2019) mostram que o aumento excessivo da energia pode induzir vaporização intensa e favorecer o regime *keyhole*.

Essa relação integrada explica por que não existe um valor universal de densidade de energia capaz de garantir baixa porosidade em todos os materiais e equipamentos. Buhairi *et al.* (2023) indicam que, para Ti-6Al-4V produzido por LPBF, faixas de densidade de energia volumétrica entre aproximadamente 55 e 65 J/mm³ aparecem associadas a bons resultados de rugosidade superficial, microdureza e resistência à tração. Entretanto, os próprios autores destacam que esse valor não deve ser generalizado, pois a resposta final depende do equipamento, da liga processada, da geometria, da estratégia de varredura e da combinação real dos parâmetros. De forma semelhante, Mierzejewska (2019) demonstrou que a menor porosidade em Ti-6Al-4V produzido por DMLS ocorreu em uma faixa intermediária de energia, enquanto energias insuficientes ou excessivas aumentaram a fração de poros.

A Tabela 5 apresenta uma síntese dos principais estudos utilizados na análise dos resultados, destacando o material ou processo avaliado, o principal resultado observado e a contribuição de cada referência para este trabalho.

Tabela 5: Síntese dos estudos mais relevantes utilizados.

Referência	Material / processo	Principal resultado	Contribuição para este trabalho
Mierzejewska (2019)	Ti6Al4V/DM LS	A porosidade variou de 9,31% para 0,16% conforme potência e velocidade de varredura; o tratamento térmico a 850 °C melhorou ductilidade, mas não eliminou poros.	Demonstra a influência direta da densidade de energia e diferencia tratamento térmico de densificação.
Buhairi <i>et al.</i> (2023)	Ti6Al4V/LPB F	A faixa de VED de 55–65 J/mm ³ foi associada a bons resultados de rugosidade, microdureza e resistência à tração.	Reforça o papel da VED, mas também sua limitação como critério isolado.
Kan <i>et al.</i> (2022)	Ligas metálicas/LPB F	Porosidade afeta propriedades mecânicas de acordo com tamanho, morfologia, localização e conectividade dos poros.	Fundamenta a discussão sobre criticidade dos defeitos.
Wang <i>et al.</i> (2022)	Metais/LPBF	A porosidade residual é recorrente mesmo em condições otimizadas e deve ser avaliada por métodos estatísticos e morfológicos.	Reforça que densidade relativa não é suficiente para avaliar integridade.
Mishurova <i>et al.</i> (2023)	Ti6Al4V/LPB F + HIP	A eficiência da prensagem isostática a quente depende das características iniciais dos defeitos.	Mostra que pós-processamento é complementar, não solução universal.
Malashin <i>et al.</i> (2024)	AlSi10Mg/SL M	Uso de aprendizado de máquina para reconhecimento de poros em superfícies de tubos térmicos.	Apoia a discussão sobre monitoramento e controle automatizado.
MemaranBabakan <i>et al.</i> (2023)	AlSi10Mg/SL M	Aplicou modelos computacionais para prever a influência de parâmetros de processo na porosidade.	Reforça o potencial de modelos preditivos na otimização do processo.
Brika <i>et al.</i> (2020)	Ti-6Al-4V/LPBF	A morfologia e a distribuição granulométrica do pó influenciam a escoabilidade, a densidade aparente e a manufaturabilidade.	Apoia a discussão sobre influência do pó metálico na densificação.
Cherry <i>et al.</i> (2015)	Aço inoxidável 316L/SLM	A menor porosidade foi obtida em condição intermediária de densidade de energia; baixas energias favoreceram falta de fusão e	Reforça a necessidade de janela ótima de processamento.

Referência	Material / processo	Principal resultado	Contribuição para este trabalho
		energias elevadas favoreceram instabilidades.	

Fonte: Elaboração própria.

A partir da síntese dos estudos de Mierzejewska (2019), Cherry *et al.* (2015), Brika *et al.* (2020), Wang *et al.* (2022), Buhairi *et al.* (2023) e Mishurova *et al.* (2023), observa-se que a minimização da porosidade envolve três níveis principais de atuação: prevenção durante a fabricação, caracterização adequada dos defeitos e aplicação de pós-processamento quando necessário. A abordagem preventiva é reforçada principalmente por Cherry *et al.* (2015), Mierzejewska (2019) e Buhairi *et al.* (2023), pois esses autores demonstram que a definição adequada da janela de processamento influencia diretamente a densificação da peça. Mishurova *et al.* (2023) demonstra que o pós-processamento por prensagem isostática a quente pode ser eficiente, mas sua eficácia depende das características dos defeitos previamente formados.

5.2 Discussão dos Mecanismos de Formação da Porosidade

A análise conjunta das referências de Wang *et al.* (2022), Buhairi *et al.* (2023), Kan *et al.* (2022) e Mierzejewska (2019) permite identificar que a falta de fusão como um dos defeitos mais críticos em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS. Esse tipo de defeito ocorre quando o aporte energético não é suficiente para promover a fusão completa das partículas de pó ou garantir a união adequada entre trilhas e camadas sucessivas. Entre as principais causas, Wang *et al.* (2022) e Buhairi *et al.* (2023) destacam baixa potência do laser, velocidade de varredura elevada, espaçamento excessivo entre trilhas, espessura de camada inadequada e má distribuição do pó metálico.

Morfologicamente, os poros por falta de fusão tendem a apresentar formato irregular, alongado e baixa esfericidade, podendo conter partículas parcialmente fundidas ou não fundidas em seu interior. Wang *et al.* (2022) destacam que esse tipo de defeito pode evidenciar deficiência local de energia durante o processamento. Buhairi *et al.* (2023), por sua vez, indicam que os poros por falta de fusão tendem a ser maiores, mais irregulares e mais agudos do que os poros gasosos. Essa geometria é especialmente prejudicial porque favorece a concentração de tensões e a nucleação de trincas.

Os estudos de Kan *et al.* (2022), Wang *et al.* (2022) e Buhairi *et al.* (2023) indicam consenso quanto à maior criticidade da falta de fusão em aplicações sujeitas à fadiga, impacto e tenacidade à fratura. Kan *et al.* (2022) destacam que a influência dos poros nas propriedades mecânicas depende de sua morfologia, dimensão e localização. Wang *et al.* (2022) reforçam que defeitos irregulares e próximos à superfície são especialmente prejudiciais. Buhairi *et al.* (2023) complementam que poros por falta de fusão costumam se localizar em regiões de fronteira entre trilhas e camadas, favorecendo a iniciação prematura de trincas. Dessa forma, mesmo uma quantidade relativamente pequena de porosidade por falta de fusão pode comprometer significativamente a vida em fadiga de um componente.

A porosidade gasosa, por sua vez, está associada ao aprisionamento de gases durante a fusão e solidificação do material. Wang *et al.* (2022) e Buhairi *et al.* (2023) indicam que esses gases podem estar presentes no interior das partículas de pó, ser introduzidos durante a atomização, decorrer de umidade ou contaminação superficial, ou ainda estar relacionados à atmosfera de fabricação. Durante o processamento SLM/DMLS, a rápida solidificação pode impedir a saída completa das bolhas do banho de fusão, originando poros geralmente esféricos ou elípticos.

Apesar de os poros gasosos serem frequentemente menos severos do que os poros por falta de fusão quando pequenos, isolados e distribuídos de forma homogênea, sua influência não deve ser desconsiderada. Kan *et al.* (2022) destacam que a criticidade dos poros depende de fatores como tamanho, localização e conectividade. Assim, poros gasosos próximos à superfície, agrupados ou localizados em regiões de alta solicitação também podem atuar como iniciadores de trincas. Além disso, Malashin *et al.* (2024) demonstraram, em estruturas de AlSi10Mg produzidas por SLM, que a conectividade entre poros influencia propriedades funcionais como permeabilidade, evidenciando que a porosidade pode afetar não apenas o comportamento mecânico, mas também o desempenho funcional da peça.

O terceiro mecanismo relevante é a porosidade associada ao regime *keyhole*. King *et al.* (2014) associam esse fenômeno à elevada pressão de recuo gerada pela vaporização do material, que empurra o metal líquido e favorece a formação de uma cavidade estreita e profunda no banho de fusão. Quando essa cavidade se torna instável e colapsa durante a solidificação, gases podem ser aprisionados no interior da peça, formando poros internos. Wang *et al.* (2022) também relacionam o regime *keyhole* a condições de energia excessiva e instabilidade da poça fundida.

A comparação entre Mierzejewska (2019), Cherry *et al.* (2015) e King *et al.* (2014) mostra que a relação entre energia aplicada e porosidade não é linear. Mierzejewska (2019) verificou, em Ti-6Al-4V produzido por DMLS, que baixas densidades de energia, entre 33 e 71 J/mm³, resultaram em porosidades entre 9,31% e 3,37%, associadas principalmente à falta de fusão. Em uma faixa intermediária, entre 78 e 127 J/mm³, a porosidade foi reduzida para valores entre 0,84% e 0,16%. Entretanto, acima dessa faixa, a porosidade voltou a aumentar, indicando que o excesso de energia também pode ser prejudicial. Cherry *et al.* (2015), ao estudarem aço inoxidável 316L por SLM, também observaram que condições intermediárias de energia tendem a reduzir a porosidade, enquanto energias muito baixas ou muito elevadas favorecem defeitos.

Esse comportamento reforça que a minimização da porosidade não depende simplesmente do aumento da energia aplicada. Com base em Mierzejewska (2019), Cherry *et al.* (2015), Buhairi *et al.* (2023) e King *et al.* (2014), interpreta-se que baixos níveis de energia favorecem falta de fusão, enquanto níveis excessivos favorecem vaporização, instabilidade do banho de fusão e formação de poros por *keyhole*. Portanto, a redução da porosidade exige a definição de uma janela de processamento estável, na qual o aporte energético seja suficiente para fundir o pó e unir as camadas, mas sem provocar instabilidade significativa no banho de fusão.

De forma mais ampla, DebRoy *et al.* (2018), King *et al.* (2014) e Wang *et al.* (2022) indicam que os mecanismos de formação da porosidade em SLM/DMLS estão associados à complexa interação laser-material. Fatores como tensão superficial, pressão de recuo do vapor, efeitos termocapilares, viscosidade do metal líquido, absorção de energia, solidificação rápida e fluxo do banho de fusão atuam simultaneamente. Assim, a porosidade deve ser entendida como um fenômeno térmico, metalúrgico e fluidodinâmico, exigindo análise integrada dos parâmetros de fabricação e das condições do material.

5.3 Influência dos Parâmetros do Processo

Os estudos de Cherry *et al.* (2015), Mierzejewska (2019), Buhairi *et al.* (2023), MemaranBabakan *et al.* (2023) e Wang *et al.* (2022) indicam consenso quanto ao papel central dos parâmetros de processo na formação, distribuição e morfologia dos poros em SLM/DMLS. Potência do laser, velocidade de varredura, espaçamento entre trilhas, espessura de camada, distância entre pontos, tempo de exposição e densidade de energia volumétrica influenciam

diretamente a geometria do banho de fusão, a taxa de resfriamento, a sobreposição entre trilhas e a qualidade da ligação metalúrgica entre camadas.

A potência do laser está diretamente relacionada à quantidade de energia fornecida ao material. Cherry *et al.* (2015), Mierzejewska (2019) e Wang *et al.* (2022) indicam que, quando a potência é insuficiente, a fusão do pó pode ser incompleta, favorecendo a formação de poros irregulares por falta de fusão. Por outro lado, King *et al.* (2014), Wang *et al.* (2022) e Mierzejewska (2019) indicam que potência excessiva pode provocar vaporização intensa, aumento da profundidade do banho de fusão e formação de cavidades instáveis associadas ao regime *keyhole*. Assim, a potência deve ser ajustada de forma compatível com a velocidade de varredura, a espessura de camada e a resposta térmica do material.

A velocidade de varredura controla o tempo de interação entre o feixe de laser e o material. Mierzejewska (2019), Cherry *et al.* (2015) e Buhairi *et al.* (2023) indicam que velocidades elevadas reduzem o tempo de exposição e, consequentemente, o aporte térmico local, podendo causar falta de fusão. Por outro lado, velocidades muito baixas aumentam o tempo de permanência do laser sobre o material, elevando o risco de superaquecimento, vaporização e instabilidade do banho de fusão.

Os resultados de Mierzejewska (2019) evidenciam claramente essa interação. Em amostras de Ti-6Al-4V produzidas por DMLS com potência de 190 W, a menor porosidade foi obtida a 500 mm/s, com valor de 0,16%. Com o aumento da velocidade para 1300 mm/s, a porosidade aumentou para 6,57%. Em amostras produzidas com 130 W e 1300 mm/s, a porosidade atingiu 9,31%. Esses dados indicam que velocidades elevadas, quando não compensadas por energia suficiente, favorecem fortemente a formação de porosidade por falta de fusão.

O espaçamento entre trilhas, ou *hatch spacing*, influencia a sobreposição entre cordões fundidos. Cherry *et al.* (2015), Wang *et al.* (2022) e Buhairi *et al.* (2023) indicam que espaçamentos excessivos podem impedir a sobreposição adequada entre trilhas adjacentes, formando regiões não fundidas e vazios alongados. Essa condição está diretamente relacionada à porosidade por falta de fusão. Por outro lado, espaçamentos muito reduzidos podem aumentar o acúmulo térmico, prolongar o tempo de fabricação e modificar a microestrutura local. Assim, o espaçamento entre trilhas deve ser otimizado em conjunto com potência e velocidade.

A espessura de camada também exerce influência significativa. Buhairi *et al.* (2023) indicam que, em Ti-6Al-4V produzido por LPBF, a espessura de camada é um dos parâmetros que compõem a densidade de energia volumétrica e influencia diretamente a capacidade de

fusão completa do pó. Camadas mais espessas aumentam a produtividade, mas exigem maior energia e maior profundidade de penetração para garantir fusão completa. Caso o aporte energético não seja suficiente, pode ocorrer falta de fusão entre camadas sucessivas. Camadas mais finas tendem a melhorar a resolução geométrica e a densificação, mas aumentam o tempo total de fabricação.

A distância entre pontos e o tempo de exposição são especialmente relevantes em sistemas que operam com laser pulsado ou modulado. Malashin *et al.* (2024) e MemaranBabakan *et al.* (2023) indicam que parâmetros relacionados à distância entre pontos, tempo de exposição, espaçamento entre trilhas e estratégia de varredura podem influenciar a formação de poros, a rugosidade e a conectividade entre vazios. Distâncias maiores podem reduzir a sobreposição entre pontos sucessivos, favorecendo descontinuidades locais, enquanto distâncias menores tendem a aumentar a continuidade do cordão fundido. No entanto, tempos de exposição excessivos podem provocar superaquecimento local.

A densidade de energia volumétrica é frequentemente utilizada para correlacionar potência do laser, velocidade de varredura, espaçamento entre trilhas e espessura de camada. Buhairi *et al.* (2023) indicam que, para Ti-6Al-4V produzido por LPBF, muitos estudos relatam bons resultados em faixas de densidade de energia volumétrica entre 55 e 65 J/mm³. Entretanto, Buhairi *et al.* (2023), Cherry *et al.* (2015) e Mierzejewska (2019) mostram que seu uso isolado pode levar a interpretações incompletas, pois combinações diferentes de parâmetros podem gerar a mesma densidade de energia volumétrica e ainda assim produzir microestruturas, geometrias de banho de fusão e níveis de porosidade distintos.

A partir dessa comparação, entende-se que a densidade de energia volumétrica deve ser utilizada como parâmetro auxiliar, e não como critério único de otimização. A redução efetiva da porosidade depende da análise da geometria real do banho de fusão, da estabilidade da poça fundida, da sobreposição entre trilhas, da absorção de energia e da morfologia dos defeitos resultantes. Portanto, a otimização do processo deve considerar não apenas a energia total fornecida, mas a forma como essa energia é aplicada e distribuída durante a fabricação.

5.4 Influência do Pó Metálico e da Atmosfera de Fabricação

A análise dos estudos de Brika *et al.* (2020), Wang *et al.* (2022), Buhairi *et al.* (2023) e Kan *et al.* (2022) permitiu observar que as características do pó metálico são determinantes para a qualidade das peças produzidas por SLM/DMLS. Antes mesmo da interação com o laser, a forma como o pó é espalhado sobre a plataforma de construção influencia a uniformidade da

camada, a densidade aparente do leito e a presença de vazios iniciais. Assim, a qualidade da matéria-prima está diretamente associada à tendência de formação de porosidade.

Brika *et al.* (2020) demonstram que a morfologia e a distribuição granulométrica do pó influenciam diretamente a escoabilidade, a densidade aparente e a manufaturabilidade da liga Ti-6Al-4V por LPBF. Pós com morfologia predominantemente esférica apresentam melhor fluidez e melhor empacotamento, favorecendo a formação de camadas homogêneas e reduzindo a ocorrência de regiões com baixa densidade local. Por outro lado, partículas irregulares, alongadas, satelizadas ou com alta rugosidade superficial prejudicam a fluidez do pó, dificultam o espalhamento e podem gerar descontinuidades no leito.

A distribuição granulométrica também exerce papel relevante. Brika *et al.* (2020) indicam que a distribuição do tamanho das partículas influencia a fluidez, o empacotamento e a densidade aparente do pó. Buhairi *et al.* (2023) também reforçam que a qualidade do leito de pó influencia a densificação e as propriedades finais de peças produzidas por LPBF. Dessa forma, uma distribuição muito estreita pode reduzir a capacidade de preenchimento entre partículas maiores, enquanto uma distribuição excessivamente ampla pode comprometer a uniformidade do espalhamento e favorecer segregações durante o processo. O equilíbrio entre partículas maiores e menores pode favorecer o empacotamento, desde que não prejudique a fluidez do pó.

Além disso, Wang *et al.* (2022) destacam que a presença de poros internos nas partículas de pó pode contribuir para a formação de poros gasosos na peça final. Segundo os autores, poros existentes no próprio pó podem ser herdados pela peça caso as partículas não sejam completamente fundidas. Mesmo quando ocorre fusão, gases aprisionados nas partículas podem ser liberados no banho de fusão durante o processamento, aumentando o risco de aprisionamento gasoso durante a solidificação.

O reaproveitamento de pó também deve ser tratado com cautela. Brika *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2022) indicam que alterações na morfologia, oxidação superficial, distribuição granulométrica e presença de contaminantes podem afetar a qualidade do pó e, consequentemente, a repetibilidade do processo. Embora o reaproveitamento seja uma prática comum na manufatura aditiva metálica por razões econômicas, ciclos sucessivos de uso podem comprometer a fluidez, elevar o teor de oxigênio e aumentar a probabilidade de defeitos internos.

A atmosfera de fabricação exerce influência direta na qualidade metalúrgica do processo. Wang *et al.* (2022), DebRoy *et al.* (2018) e Chen *et al.* (2024) indicam que a presença

de oxigênio residual, umidade ou contaminantes pode favorecer a formação de óxidos, inclusões e gases no banho de fusão. Esses efeitos podem alterar a tensão superficial, prejudicar a molhabilidade e aumentar a instabilidade da poça fundida. Dessa forma, a atmosfera de fabricação não deve ser tratada apenas como um ambiente de proteção, mas como uma variável ativa do processo.

O uso de gases inertes, como argônio ou nitrogênio, é prática fundamental para reduzir a oxidação durante o processamento. No entanto, Wang *et al.* (2022) e Chen *et al.* (2024) indicam que não basta apenas utilizar atmosfera inerte. É necessário controlar o teor de oxigênio residual, garantir fluxo adequado de gás na câmara e evitar zonas de recirculação que possam concentrar partículas, respingos ou vapores metálicos. O controle inadequado desses fatores pode favorecer poros gasosos, inclusões não metálicas e instabilidades no banho de fusão.

Assim, com base em Brika *et al.* (2020), Wang *et al.* (2022), Buhairi *et al.* (2023) e Chen *et al.* (2024), entende-se que a minimização da porosidade exige controle simultâneo da qualidade do pó e da atmosfera de fabricação. Enquanto o pó define a condição inicial do leito, a atmosfera influencia a estabilidade química e metalúrgica durante a fusão. A combinação de pó adequado e ambiente controlado aumenta a repetibilidade do processo e reduz a probabilidade de defeitos.

5.5 Estratégias de Minimização da Porosidade

Há concordância na literatura, especialmente em Cherry *et al.* (2015), Mierzejewska (2019), Wang *et al.* (2022), Buhairi *et al.* (2023) e MemaranBabakan *et al.* (2023), quanto ao fato de que a otimização dos parâmetros de processo é a abordagem mais importante para a minimização da porosidade, pois atua diretamente na origem dos defeitos. O ajuste adequado da potência do laser, da velocidade de varredura, do espaçamento entre trilhas, da espessura de camada, da distância entre pontos e do tempo de exposição permite reduzir tanto a falta de fusão quanto a formação de poros associados ao regime *keyhole*.

A otimização deve buscar uma janela estável de processamento, na qual ocorra fusão completa do pó, boa união entre camadas, sobreposição adequada entre trilhas e ausência de vaporização excessiva. Cherry *et al.* (2015) e Mierzejewska (2019) reforçam essa interpretação ao demonstrarem que a menor porosidade tende a ocorrer em condições intermediárias de energia, e não em valores extremos. Buhairi *et al.* (2023) complementam que, embora a densidade de energia volumétrica seja útil como referência inicial, a definição da janela de

processamento depende da combinação real entre os parâmetros e das características do material.

A revarredura a laser, ou *laser remelting*, é discutida por Wang *et al.* (2022) e por estudos sobre estratégias de mitigação em LPBF como uma técnica complementar que consiste na aplicação de uma segunda passagem do laser sobre uma camada previamente solidificada. Essa técnica pode reduzir defeitos próximos à superfície, melhorar a continuidade dos cordões fundidos e diminuir poros por falta de fusão. Entretanto, também aumenta o tempo de fabricação, o consumo energético e pode alterar a microestrutura, a rugosidade e o estado de tensões residuais da peça. Portanto, sua aplicação deve ser avaliada em função da criticidade do componente e do ganho efetivo de qualidade.

As estratégias de varredura também contribuem para a mitigação da porosidade. Cherry *et al.* (2015), Wang *et al.* (2022) e Malashin *et al.* (2024) indicam que a trajetória do laser, a rotação entre camadas, o espaçamento entre trilhas e a distribuição térmica influenciam a formação de defeitos. A rotação do ângulo de varredura entre camadas sucessivas, o uso de padrões alternados e a divisão da área de fabricação em ilhas podem favorecer uma distribuição térmica mais homogênea, reduzir gradientes de temperatura e limitar o alinhamento de defeitos. No entanto, estratégias mal ajustadas podem gerar falta de sobreposição, descontinuidades térmicas e defeitos localizados.

O controle da qualidade do pó é outra estratégia fundamental. Brika *et al.* (2020), Wang *et al.* (2022) e Buhairi *et al.* (2023) indicam que pós com morfologia esférica, baixa oxidação, boa escoabilidade e distribuição granulométrica adequada favorecem a formação de camadas uniformes e reduzem a probabilidade de falta de fusão. A seleção, o armazenamento e o reaproveitamento do pó devem ser controlados para evitar contaminações, absorção de umidade e alterações nas propriedades da matéria-prima.

Os tratamentos térmicos de pós-processamento contribuem para o alívio de tensões residuais e para a estabilização microestrutural. Entretanto, Mierzejewska (2019) demonstra que sua capacidade de eliminar poros internos é limitada. No estudo com Ti-6Al-4V produzido por DMLS, o tratamento térmico promoveu transformação da microestrutura martensítica α' para uma combinação de fases $\alpha + \beta$, reduziu a resistência mecânica e aumentou o alongamento, mas manteve a porosidade praticamente inalterada. Esse resultado evidencia que tratamentos térmicos convencionais devem ser compreendidos principalmente como estratégias de ajuste microestrutural e alívio de tensões, e não como métodos diretos de fechamento de poros.

A prensagem isostática a quente (*Hot Isostatic Pressing* — HIP) é uma das estratégias mais eficazes para reduzir poros internos fechados. Mishurova *et al.* (2023) demonstraram, em Ti-6Al-4V produzido por LPBF, que a eficiência do HIP depende das características iniciais dos defeitos. Poros menores e fechados tendem a ser reduzidos com maior facilidade, enquanto defeitos maiores, conectados à superfície ou associados à falta de fusão severa podem permanecer parcialmente abertos. Assim, apesar de sua eficácia, o HIP não deve ser tratado como solução universal. O processo envolve custo elevado, aumento do tempo de produção e possibilidade de alterações microestruturais, devendo ser aplicado principalmente em componentes críticos.

As técnicas de monitoramento em tempo real e aprendizado de máquina surgem como estratégias promissoras para prevenção e detecção de porosidade. Malashin *et al.* (2024) demonstraram a possibilidade de reconhecimento de poros em superfícies de tubos térmicos produzidos por SLM utilizando técnicas de aprendizado de máquina. MemaranBabakan *et al.* (2023), por sua vez, aplicaram modelos computacionais para prever a influência dos parâmetros de processo na porosidade de ligas AlSi10Mg produzidas por SLM. Esses estudos indicam uma tendência de integração entre manufatura aditiva, ciência de dados e controle de qualidade.

5.6 Análise Crítica das Estratégias de Mitigação

A comparação entre Cherry *et al.* (2015), Mierzejewska (2019), Wang *et al.* (2022), Buhairi *et al.* (2023), Mishurova *et al.* (2023), Malashin *et al.* (2024) e MemaranBabakan *et al.* (2023) indica que a minimização da porosidade em SLM/DMLS depende de uma abordagem integrada. Nenhuma estratégia isolada é capaz de eliminar completamente todos os tipos de porosidade em todos os materiais e condições de processo. A escolha da abordagem mais adequada depende do tipo de defeito predominante, da liga metálica utilizada, da geometria da peça, da criticidade da aplicação e dos requisitos de desempenho.

Para a porosidade por falta de fusão, Wang *et al.* (2022), Buhairi *et al.* (2023), Cherry *et al.* (2015) e Mierzejewska (2019) indicam que as ações mais eficazes são preventivas. Isso inclui aumento adequado do aporte energético, redução do espaçamento entre trilhas, ajuste da espessura de camada, melhoria da sobreposição entre cordões e controle da qualidade do leito de pó. Como esse tipo de defeito costuma apresentar geometria irregular, baixa esfericidade e, em alguns casos, conectividade com a superfície, Mishurova *et al.* (2023) indica que pós-processamentos como prensagem isostática a quente podem ter eficácia limitada. Dessa forma, a melhor estratégia para esse tipo de porosidade é evitar sua formação durante a fabricação.

Para a porosidade gasosa, Wang *et al.* (2022), Brika *et al.* (2020) e Chen *et al.* (2024) indicam que o controle do pó e da atmosfera de fabricação se torna mais relevante. É necessário reduzir contaminações, umidade, oxidação superficial e presença de gases aprisionados nas partículas. Além disso, o controle da circulação do gás inerte na câmara de fabricação contribui para remover vapores, respingos e partículas que poderiam interferir na interação laser-material. Nesse caso, a prevenção depende tanto da qualidade da matéria-prima quanto da estabilidade do ambiente de processamento.

Para a porosidade associada ao regime *keyhole*, King *et al.* (2014), Mierzejewska (2019), Cherry *et al.* (2015) e Wang *et al.* (2022) indicam que a principal estratégia é evitar excesso de energia. Isso exige ajuste da potência do laser e da velocidade de varredura, de modo a impedir vaporização intensa e colapso da cavidade de fusão. Nesses casos, simplesmente aumentar a energia para melhorar a fusão pode gerar efeito contrário, elevando a porosidade. Essa interpretação é consistente com a ideia de janela ótima de processamento, na qual a energia deve ser suficiente para fundir o material, mas não tão elevada a ponto de gerar instabilidade.

Do ponto de vista industrial, a viabilidade das estratégias também deve ser considerada. Mishurova *et al.* (2023) demonstra que a prensagem isostática a quente pode melhorar a densificação, mas envolve custo, tempo adicional e limitações relacionadas à morfologia e conectividade dos poros. Wang *et al.* (2022) e Kan *et al.* (2022) indicam que, em componentes críticos, como peças aeroespaciais, biomédicas ou sujeitas à fadiga, o controle rigoroso da porosidade é essencial para garantir confiabilidade. Por outro lado, em componentes menos críticos, a otimização dos parâmetros, o controle do pó e a inspeção adequada podem ser alternativas mais viáveis do ponto de vista técnico e econômico.

Outro ponto crítico é a caracterização dos defeitos. Wang *et al.* (2022) destacam que a avaliação da porosidade não deve se limitar à densidade relativa, pois essa medida pode ocultar informações importantes sobre morfologia, localização e conectividade dos poros. Kan *et al.* (2022) reforçam que essas características influenciam diretamente as propriedades mecânicas. Malashin *et al.* (2024), ao analisar estruturas de AlSi10Mg produzidas por SLM, demonstra que a conectividade entre poros pode influenciar propriedades funcionais, como a permeabilidade. Portanto, técnicas como microtomografia computadorizada, metalografia, microscopia eletrônica e métodos estatísticos devem ser combinadas para uma análise mais completa.

Também se observa que a escolha da estratégia de mitigação deve considerar a aplicação final da peça. Kan *et al.* (2022) e Wang *et al.* (2022) indicam que, em componentes estruturais, a prioridade é reduzir defeitos críticos que possam atuar como iniciadores de trincas. Malashin

et al. (2024) mostra que, em componentes que envolvem transporte de fluido, a conectividade entre poros torna-se um fator determinante. Alkunte *et al.* (2025) discute ainda que, em aplicações específicas, a porosidade pode ser intencional e funcional, como em implantes biomédicos, sistemas térmicos e estruturas porosas projetadas. Portanto, a porosidade deve ser avaliada de acordo com sua origem, sua morfologia e sua função no componente.

Assim, com base na comparação entre os estudos analisados, entende-se que a estratégia mais eficaz para reduzir porosidade consiste em prevenir a formação dos defeitos durante a fabricação, caracterizar adequadamente a peça após o processamento e aplicar pós-processamentos apenas quando necessário. Essa abordagem integrada permite combinar qualidade técnica, viabilidade econômica e confiabilidade estrutural.

5.7 Síntese dos Resultados em Relação aos Objetivos do Trabalho

A análise realizada permitiu atender ao objetivo geral do trabalho, uma vez que foram avaliadas as principais estratégias de minimização da porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS. Essa avaliação foi fundamentada principalmente nos trabalhos de Cherry *et al.* (2015), Mierzejewska (2019), Kan *et al.* (2022), Wang *et al.* (2022), Buhairi *et al.* (2023), Mishurova *et al.* (2023), Malashin *et al.* (2024) e MemaranBabakan *et al.* (2023), os quais permitiram discutir a influência dos parâmetros de processo, das características do pó metálico, da atmosfera de fabricação, da estratégia de varredura, das técnicas de caracterização e dos pós-processamentos sobre a densificação, a integridade interna e o desempenho mecânico dos componentes fabricados.

Em relação aos objetivos específicos, verificou-se inicialmente que os principais mecanismos de formação da porosidade são a falta de fusão, o aprisionamento de gases e a instabilidade do tipo *keyhole*. Essa classificação é sustentada por Wang *et al.* (2022), Buhairi *et al.* (2023), King *et al.* (2014) e Mierzejewska (2019). A falta de fusão está associada ao aporte energético insuficiente, à baixa sobreposição entre trilhas e à deposição inadequada do pó. A porosidade gasosa está relacionada ao aprisionamento de gases no pó, no banho de fusão ou na atmosfera de fabricação. A porosidade por *keyhole* está associada ao excesso de energia, à vaporização intensa do metal e à instabilidade da cavidade formada no banho de fusão.

Também foi possível identificar que potência do laser, velocidade de varredura, espaçamento entre trilhas, espessura de camada, distância entre pontos, tempo de exposição e densidade de energia volumétrica exercem influência direta sobre a geração, distribuição e morfologia dos poros. Essa conclusão é sustentada por Cherry *et al.* (2015), Mierzejewska

(2019), Buhairi *et al.* (2023) e MemaranBabakan *et al.* (2023). No entanto, conforme discutido por Buhairi *et al.* (2023) e evidenciado experimentalmente por Mierzejewska (2019), a densidade de energia volumétrica deve ser utilizada apenas como parâmetro auxiliar, pois não descreve completamente a dinâmica do banho de fusão nem substitui a análise individual dos parâmetros.

Quanto às características do pó metálico, constatou-se que morfologia, distribuição granulométrica, presença de partículas satelizadas, oxidação superficial, poros internos e escoabilidade influenciam diretamente a densificação da peça. Essa interpretação é baseada principalmente em Brika *et al.* (2020), Wang *et al.* (2022) e Buhairi *et al.* (2023). Pós esféricos, limpos e com distribuição granulométrica controlada favorecem a formação de camadas uniformes e reduzem a ocorrência de defeitos, especialmente os associados à falta de fusão.

A atmosfera de fabricação também se mostrou relevante, principalmente em função do teor de oxigênio residual, da presença de umidade e da possibilidade de formação de óxidos e inclusões. Wang *et al.* (2022), DebRoy *et al.* (2018) e Chen *et al.* (2024) indicam que a atmosfera influencia a qualidade metalúrgica, a estabilidade do banho de fusão e a formação de defeitos. Assim, o uso de atmosfera inerte controlada contribui para a estabilidade do processo e para a redução de poros gasosos e defeitos metalúrgicos.

Em relação às estratégias de minimização, a otimização dos parâmetros de processo foi identificada como a abordagem mais importante, pois atua diretamente na prevenção da porosidade. Essa conclusão é sustentada por Cherry *et al.* (2015), Mierzejewska (2019), Buhairi *et al.* (2023) e MemaranBabakan *et al.* (2023). Estratégias como controle da qualidade do pó, ajuste da estratégia de varredura, revarredura a laser, monitoramento em tempo real e uso de modelos computacionais também apresentam contribuição relevante para a melhoria da qualidade das peças, conforme discutido por Brika *et al.* (2020), Wang *et al.* (2022), Malashin *et al.* (2024) e MemaranBabakan *et al.* (2023).

Os tratamentos de pós-processamento, como tratamentos térmicos e prensagem isostática a quente, devem ser entendidos como estratégias complementares. Mierzejewska (2019) demonstra que o tratamento térmico contribui principalmente para o alívio de tensões residuais e para a estabilidade microestrutural, mas não elimina poros internos de forma significativa. Mishurova *et al.* (2023), por sua vez, demonstra que a prensagem isostática a quente pode reduzir poros internos fechados, mas apresenta limitações em defeitos conectados à superfície ou associados à falta de fusão severa.

Por fim, a análise crítica fundamentada nos estudos de Kan *et al.* (2022), Wang *et al.* (2022), Buhairi *et al.* (2023), Mierzejewska (2019), Mishurova *et al.* (2023) e Malashin *et al.* (2024) demonstrou que a minimização da porosidade em SLM/DMLS depende de uma abordagem integrada. A prevenção dos defeitos durante a fabricação deve ser priorizada, enquanto a caracterização e os pós-processamentos devem ser utilizados para validação e melhoria adicional da qualidade. Essa conclusão reforça que o controle da porosidade não é apenas uma questão de ajuste de parâmetros, mas de gestão completa do processo, desde a seleção do pó metálico até a inspeção final da peça.

6. CONCLUSÕES

Com base na análise crítica da literatura de referência, conclui-se que a porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS é resultado de uma interação complexa entre parâmetros de processo, características do pó metálico, atmosfera de fabricação, estabilidade do banho de fusão, estratégia de varredura, geometria da peça e condições de pós-processamento. Os principais mecanismos de formação identificados foram a porosidade por falta de fusão, a porosidade gasosa e a porosidade associada ao regime *keyhole*, cada uma com origem, morfologia e impacto mecânico específicos.

Verificou-se que a porosidade por falta de fusão está associada principalmente a condições de aporte energético insuficiente, baixa sobreposição entre trilhas, espessura de camada inadequada ou deposição irregular do pó metálico. Esse tipo de defeito apresenta geometria geralmente irregular, alongada e com baixa esfericidade, sendo especialmente prejudicial ao desempenho mecânico, pois atua como concentrador de tensões e favorece a nucleação de trincas. Conforme mostrado pelas referências utilizadas, defeitos por falta de fusão tendem a ser mais críticos que poros gasosos isolados, sobretudo em aplicações sujeitas à fadiga, impacto e solicitações dinâmicas.

A porosidade gasosa, por sua vez, está relacionada ao aprisionamento de gases durante a fusão e solidificação do material, podendo ter origem no próprio pó metálico, na atmosfera de fabricação, em contaminantes superficiais ou em gases dissolvidos no banho de fusão. Embora esses poros apresentem, em geral, morfologia mais esférica e menor severidade individual, sua presença próxima à superfície, em regiões críticas ou em agrupamentos pode comprometer a resistência à fadiga, a estanqueidade e a confiabilidade do componente.

Também se conclui que a porosidade associada ao regime *keyhole* ocorre em condições de excesso de energia, nas quais a elevada potência do laser ou a baixa velocidade de varredura promovem vaporização intensa e formação de cavidades instáveis no banho de fusão. O colapso dessas cavidades durante a solidificação pode gerar poros internos, demonstrando que a simples elevação do aporte energético não garante a redução da porosidade. Dessa forma, a minimização de defeitos depende da definição de uma janela ótima de processamento, na qual a energia aplicada seja suficiente para promover fusão completa e adequada sobreposição entre trilhas, mas sem causar vaporização excessiva ou instabilidade do banho de fusão.

Foi constatado que os parâmetros de processo exercem influência direta sobre a geração e a distribuição dos poros. Potência do laser, velocidade de varredura, espaçamento entre trilhas, espessura de camada, distância entre pontos e tempo de exposição devem ser analisados de

forma integrada, uma vez que a densidade de energia volumétrica, embora útil como parâmetro auxiliar, não descreve completamente a dinâmica do banho de fusão. Estudos demonstraram que a menor porosidade tende a ocorrer em faixas intermediárias de energia, enquanto valores muito baixos favorecem a falta de fusão e valores muito elevados favorecem a vaporização e a instabilidade.

As características do pó metálico também se mostraram determinantes para a qualidade final da peça. Pós com morfologia esférica, boa escoabilidade, distribuição granulométrica controlada, baixa oxidação e ausência de contaminações favorecem a formação de camadas uniformes e reduzem a ocorrência de regiões parcialmente fundidas. Por outro lado, partículas irregulares, satelizadas, oxidadas ou com poros internos podem prejudicar o empacotamento do leito de pó e contribuir para a formação de porosidade por falta de fusão ou por aprisionamento gasoso.

A atmosfera de fabricação exerce papel igualmente relevante. A presença de oxigênio residual, umidade ou contaminantes pode favorecer a formação de óxidos, inclusões e instabilidades no banho de fusão. Assim, o uso de atmosfera inerte deve ser acompanhado por controle rigoroso do teor de oxigênio, da circulação do gás e da limpeza do ambiente de processamento, pois esses fatores influenciam diretamente a estabilidade metalúrgica e a repetibilidade do processo.

Entre as estratégias de mitigação analisadas, a otimização dos parâmetros de processo se mostrou a abordagem mais importante, pois atua diretamente na prevenção da formação dos defeitos. Estratégias como controle da qualidade do pó, ajuste da estratégia de varredura, revarredura a laser, monitoramento em tempo real e utilização de modelos computacionais ou de aprendizado de máquina também se apresentam como alternativas relevantes para aumentar a confiabilidade do processo.

Os tratamentos de pós-processamento devem ser compreendidos como estratégias complementares. Tratamentos térmicos podem reduzir tensões residuais e promover estabilidade microestrutural, mas não eliminam poros internos de forma significativa. A prensagem isostática a quente apresenta elevada eficácia na redução de poros internos fechados, porém sua eficiência depende do tamanho, da morfologia e da conectividade inicial dos defeitos. Além disso, o HIP pode aumentar o custo, o tempo de fabricação e provocar alterações microestruturais, razão pela qual não deve ser tratado como solução universal.

Conclui-se, portanto, que não existe uma única estratégia capaz de eliminar completamente a porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS. A abordagem

mais adequada depende do material processado, da geometria da peça, da criticidade da aplicação, dos requisitos mecânicos e das condições industriais de fabricação. Para componentes críticos, especialmente nos setores aeroespacial, biomédico, energético e de gerenciamento térmico, recomenda-se a combinação entre controle rigoroso do processo, seleção adequada do pó metálico, atmosfera controlada, estratégia de varredura otimizada, caracterização detalhada dos defeitos e aplicação criteriosa de pós-processamentos.

Por fim, o presente trabalho permitiu atender ao objetivo geral proposto, ao analisar criticamente as principais estratégias de minimização da porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS. Também foram atendidos os objetivos específicos, uma vez que foram identificados os principais mecanismos de formação dos poros, analisada a influência dos parâmetros de processo, avaliado o efeito das características do pó metálico e da atmosfera de fabricação, comparadas diferentes estratégias de mitigação e discutidas suas limitações técnicas e industriais.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a realização de estudos experimentais voltados à validação prática das estratégias de minimização da porosidade identificadas na literatura. Uma possibilidade seria a fabricação de corpos de prova por SLM/DMLS com variação controlada de potência do laser, velocidade de varredura, espaçamento entre trilhas, distância entre pontos, tempo de exposição e espessura de camada, permitindo correlacionar esses parâmetros com a fração volumétrica, a morfologia, a distribuição e a conectividade dos poros.

Também se recomenda a realização de estudos específicos para diferentes ligas metálicas, como Ti-6Al-4V, aço inoxidável 316L, Inconel 718 e AlSi10Mg. Essa comparação permitiria avaliar como propriedades como condutividade térmica, absorção do laser, viscosidade do banho de fusão, composição química, tendência à oxidação e comportamento de solidificação influenciam a formação da porosidade. Essa abordagem é relevante porque a literatura demonstra que uma janela de processamento adequada para determinado material não pode ser automaticamente transferida para outra liga.

Outra possibilidade de continuidade é o uso de técnicas avançadas de caracterização tridimensional, especialmente microtomografia computadorizada por raios X. A utilização de micro-CT permitiria avaliar a porosidade interna de forma mais completa do que métodos bidimensionais convencionais, possibilitando identificar tamanho, volume, forma, localização e conectividade dos poros. Essa técnica também permitiria diferenciar com maior precisão poros gasosos, poros por falta de fusão e defeitos associados ao regime *keyhole*.

Recomenda-se, ainda, a comparação entre diferentes técnicas de caracterização da porosidade, como método de Arquimedes, metalografia óptica, microscopia eletrônica de varredura, microtomografia computadorizada e ensaios ultrassônicos. Essa comparação poderia indicar as vantagens, limitações e campos de aplicação de cada técnica, considerando fatores como custo, resolução, disponibilidade, representatividade estatística e aplicabilidade industrial.

Outra sugestão relevante é a avaliação experimental da eficiência da prensagem isostática a quente em diferentes tipos de porosidade. Estudos futuros poderiam comparar a resposta de poros gasosos, poros por falta de fusão e poros próximos à superfície antes e após o HIP, avaliando não apenas a redução da porosidade, mas também os efeitos sobre microestrutura, resistência à tração, ductilidade, dureza e vida em fadiga. Essa análise permitiria definir com maior clareza os limites de aplicação do HIP como estratégia de densificação.

Também seria importante investigar a influência do reaproveitamento do pó metálico na formação de porosidade. Como o reaproveitamento é comum em ambientes industriais, estudos futuros poderiam avaliar como ciclos sucessivos de uso alteram a morfologia das partículas, a distribuição granulométrica, o teor de oxigênio, a escoabilidade e a densidade aparente do pó. A partir desses dados, seria possível estabelecer critérios técnicos para controle e descarte de pós reutilizados.

Sugere-se também o desenvolvimento de estudos voltados ao monitoramento em tempo real do processo SLM/DMLS. Sensores ópticos, térmicos, acústicos e sistemas de imageamento podem ser utilizados para identificar instabilidades no banho de fusão durante a fabricação. A correlação entre esses sinais e os defeitos observados posteriormente por microtomografia ou microscopia permitiria desenvolver metodologias de detecção precoce da porosidade.

Outra linha promissora envolve a aplicação de aprendizado de máquina e modelos preditivos. A partir de bases de dados experimentais contendo parâmetros de processo, características do pó, dados de monitoramento e resultados de caracterização, poderiam ser desenvolvidos modelos capazes de prever a probabilidade de formação de porosidade e sugerir janelas ótimas de processamento. Estudos como os de Malashin *et al.* (2024) e MemaranBabakan *et al.* (2023) indicam que essa abordagem apresenta potencial relevante para tornar o controle de qualidade mais automatizado e eficiente.

Além disso, recomenda-se a realização de ensaios mecânicos correlacionados à caracterização dos poros, especialmente ensaios de fadiga. Como a porosidade afeta de maneira significativa a nucleação e propagação de trincas, estudos futuros poderiam avaliar a relação entre morfologia dos poros, localização dos defeitos, direção de construção e vida em fadiga. Essa abordagem permitiria estabelecer critérios mais realistas para aceitação de defeitos em componentes estruturais.

Por fim, sugere-se o desenvolvimento de uma matriz de decisão técnica para seleção de estratégias de mitigação da porosidade em peças metálicas produzidas por SLM/DMLS. Essa matriz poderia considerar critérios como tipo de porosidade predominante, material processado, criticidade da aplicação, custo, produtividade, disponibilidade de equipamentos, impacto nas propriedades mecânicas e viabilidade industrial. Tal ferramenta poderia auxiliar na escolha da estratégia mais adequada para cada aplicação, contribuindo para a transferência do conhecimento acadêmico para o ambiente industrial.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alkunte, S.; Mali, A.; Khan, A. U.; More, N.; Ingle, N.; Nalawade, S.; Sinha, N.; Gupta, M.; Shingare, K. B.; Liao, K.; Fidan, I.; **Porosity in additive manufacturing: purposeful design, applications, and characterization methods — a review.** 2025.

Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-025-16427-5>

Ball, S.; Ghayoor, M.; Pasebani, S.; Tabei, A. **Statistical Analysis of Porosity and Process Parameter Relationships in Metal Additive Manufacturing.** 2021.

Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978921000433?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=9a76da2c9b6482eb

Brika, S. E.; Letenneur, M.; Dion, C. A.; Brailovski, V.; **Influence of particle morphology and size distribution on the powder flowability and laser powder bed fusion manufacturability of Ti-6Al-4V alloy.** 2020.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860419311868?via%3Dihub>

Buhairi, M. A.; Foudzi, F. M.; Jamhari, F. I.; Sulong, A. B.; Radzuan, N. A. M.; Muhamad, N.; Mohamed, I. F.; Azman, A. H.; Harun, W. S. W.; Al-Furjan, M. S. H.; **Review on volumetric energy density: influence on morphology and mechanical properties of Ti6Al4V manufactured via laser powder bed fusion.** 2023.

Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s40964-022-00328-0>

Chen, J.; She, Y.; Du, X.; Liu Y.; **Influence of oxygen content on selective laser melting leading to the formation of spheroidization in additive manufacturing technology.** 2024.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/377528767_Influence_of_oxygen_content_on_selective_laser_melting_leading_to_the_formation_of_spheroidization_in_additive_manufacturing_technology

Cherry, J. A.; Davies, H. M.; Mehmood, S.; Lavery, N. P.; Brown, S. G. R.; Sienz, J.; **Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting.** 2014.

Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/S00170-014-6297-2>

DebRoy, T.; Wei, H. L.; Zuback, J. S.; Mukherjee, T.; Elmer, J. W.; Milewski, J. O.; Beese, A. M.; Wilson-Heid, A.; De, A.; Zhang, W. **Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties.** 2017.

Disponível em:

https://modeling.matse.psu.edu/research_files/papers/2018PMS_DebRoy.pdf

Frazier, W. E. **Metal Additive Manufacturing: A Review.** 2014.

Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>

Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B.; **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing.** 2015.

Disponível em:

http://repo.darmajaya.ac.id/3831/1/Additive%20Manufacturing%20Technologies_%203D%20Printing%2C%20Rapid%20Prototyping%2C%20and%20Direct%20Digital%20Manufacturing%20%28%20PDFDrive%20%29.pdf

Kan, W. H.; Chiu, L. N. S.; Lim, C. V. S.; Zhu, Y.; Tian, Y.; Jiang, D.; Huang, A.; **A critical review on the effects of process-induced porosity on the mechanical properties of alloys fabricated by laser powder bed fusion.** 2022.

Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-022-06990-7>

King, W. E.; Anderson, A. T.; Ferencz, R. M.; Hodge, N. E.; Kamath, C.; Khairallah, S. A.; Rubenchik, A. M.; **Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals: physics, computational, and materials challenges**. 2015.

Disponível em:

<https://pubs.aip.org/aip/apr/article-abstract/2/4/041304/123813/Laser-powder-bed-fusion-additive-manufacturing-of?redirectedFrom=fulltext>

King, W. E.; Barth, H. D.; Castillo, V. M.; Gallegos, G. F.; Gibbs, J. W.; Hahn, D. E.; Kamath, C.; Rubenchik, A. M.; **Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing**. 2014.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013614002283>

Malashin, I.; Martysyuk, D.; Tynchenko, V.; Nelyub, V.; Borodulin, A.; Gantimurov, A.; Nisan, A.; Novozhilov, N.; Zelentsov, V.; Filimonov, A.; Galinovsky, A.; **Controlled Porosity of Selective Laser Melting-Produced Thermal Pipes: Experimental Analysis and Machine Learning Approach for Pore Recognition on Pipes Surfaces**. 2024.

Disponível em:

<https://www.mdpi.com/1424-8220/24/15/4959>

Martin, J. H.; Yahata, B. D.; Hundley, J. M.; Mayer, J. A.; Schaedler, T. A.; Pollock, T. M. **3D printing of high-strength aluminium alloys**. 2017.

Disponível em:

<https://www.nature.com/articles/nature23894>

McMahon, M.; **Metal AM in the aerospace sector: from early successes to the transformation of an industry**. 2023.

Disponível em:

<https://www.metal-am.com/articles/metal-am-in-the-aerospace-sector-from-early-successes-to-the-transformation-of-an-industry/>

MemaranBabakan, A.; Davoodi, M.; Shafaie, M.; Sarparast, M.; **Investigation of process parameters effects on porosity in SLM process of AlSi10Mg alloys.** 2023.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/370893609_Investigation_of_process_parameters_effects_on_porosity_in_SLM_process_of_AlSi10Mg_alloys

Mishurova, T.; Evsevelev, S.; Piauxt, P.; King, A.; Henry, L.; Bruno, G.; **Understanding the hot isostatic pressing effectiveness of laser powder bed fusion Ti-6Al-4V by in-situ X-ray imaging and diffraction experiments.** 2023.

Disponível em:

<https://www.nature.com/articles/s41598-023-45258-1>

Wang, D.; Han, H.; Sa, B.; Li, K.; Yan, J.; Zhang, J.; Liu, J.; He, Z.; Wang, N.; Yan, M.; **A review and a statistical analysis of porosity in metals additively manufactured by laser powder bed fusion.** 2022.

Disponível em:

<https://www.ojournal.org/oea/article/doi/10.29026/oea.2022.210058>