

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCELO JOSÉ DE LIMA

**MANUFATURA ADITIVA LPBF EM MOLDES DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO:
PRODUTIVIDADE, AUMENTO DA VIDA ÚTIL, VIABILIDADE DO USO DA
TECNOLOGIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RIO GRANDE, RS

2025

MARCELO JOSÉ DE LIMA

**MANUFATURA ADITIVA LPBF EM MOLDES DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO:
PRODUTIVIDADE, AUMENTO DA VIDA ÚTIL, VIABILIDADE DO USO DA
TECNOLOGIA**

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Rio
Grande-FURG como requisito para obtenção
do título de “Mestre em Engenharia
Mecânica” – Área de Concentração:
Engenharia de Fabricação

RIO GRANDE, RS

2025

Ficha Catalográfica

L732m Lima, Marcelo José de.

Manufatura aditiva LPBF em moldes de injeção de alumínio:
produtividade, aumento da vida útil, viabilidade do uso da tecnologia /
Marcelo José de Lima. – 2025.

105 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande –
FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio
Grande/RS, 2025.

Orientador: Dr. Luciano Biehl.

1. Manufatura Aditiva 2. Moldes de Injeção de Alumínio 3. Canais
Conformados 4. Revestimento PVD 5. DIN 1.2709 6. Produtividade
7. Desempenho de moldes I. Biehl, Luciano II. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

BANCA EXAMINADORA



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPGEMec



Ata nº 02/2025 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e sete dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e cinco, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às dez horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **MARCELO JOSÉ DE LIMA**, nacionalidade brasileiro, dissertação ligada a linha de pesquisa de Engenharia de Soldagem e Materiais, com o seguinte título: **MANUFATURA ADITIVA LPBF EM MOLDES DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO: PRODUTIVIDADE, AUMENTO DA VIDA ÚTIL, VIABILIDADE DO USO DA TECNOLOGIA**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Luciano Volcanoglo Biehl, Jorge Luis Braz Medeiros, e o convidado José de Souza sob a presidência do Professor Luciano Volcanoglo Biehl. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Luciano Volcanoglo Biehl: APROVADO
2. Jorge Luis Braz Medeiros: APROVADO
3. José de Souza: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

Documento assinado digitalmente
LUCIANO VOLCANOGLO BIEHL
Data: 27/02/2025 12:00:22-0300
Verifique em <https://validar.br.gov.br>

1. _____
CPF: 575.195.100-00

Documento assinado digitalmente
JORGE LUIS BRAZ MEDEIROS
Data: 27/02/2025 12:11:47-0300
Verifique em <https://validar.br.gov.br>

2. _____
CPF: 588.871.210-87

Documento assinado digitalmente
JOSÉ DE SOUZA
Data: 27/02/2025 12:14:29-0300
Verifique em <https://validar.br.gov.br>

3. _____
CPF: 914.626.140-00

Documento assinado digitalmente
MARCELO JOSÉ DE LIMA
Data: 28/02/2025 10:09:21-0300
Verifique em <https://validar.br.gov.br>

Marcelo José de Lima: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho especialmente à minha amada esposa e companheira, Fernanda Biscaia Candido de Lima, por seu amor, apoio incondicional e companheirismo. Sem ela, com toda certeza, esta obra não seria possível. À minha filha, que é minha inspiração constante.

*Um agradecimento especial ao **Ilustríssimo Valter Rogério Ortiz Lopes**, cujos conselhos, incentivos e orientações tiveram um grande peso e valia tanto no início quanto na conclusão desta obra.*

Dedico, por fim, aos meus pais, por terem formado uma família formidável e me dado a base necessária para que esta jornada pudesse ser concluída.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço à minha esposa, **Fernanda Biscaia Candido de Lima**, pelo apoio, dedicação, suporte e pelos necessários "puxões de orelha" ao longo desta jornada.

Aos amigos **Valter Rogério Ortiz Lopes**, pelas palavras de incentivo, e **Moises Rodrigues Maciel**, pelos bons exemplos e conduta que até hoje são fundamentais em minha caminhada, sua profunda expertise que a mim se tornaram exemplo. Meu sincero agradecimento ao colega **Joarez Fregulia**, pela demonstração de experiência em ferramentaria, e ao colega **Rodrigo Klein**, pelo caráter incorruptível que em todos os momentos foi um suporte imprescindível. A todos os colegas e amigos que, de alguma forma, participaram desta jornada, deixo minha gratidão.

Agradeço aos professores **Luciano Biehl** e **Jorge Braz**, pelo incentivo e suporte fundamental durante este processo.

À empresa **STIHL Ferramentas Motorizadas Ltda.**, pelo suporte e amparo neste momento tão importante.

Por fim, agradeço à **FURG**, **CNPq** e **FINEP** pelo excelente programa que tornou este trabalho possível.

RESUMO

A presente dissertação "Manufatura Aditiva para a Fabricação de Componentes de Moldes de Injeção de Alumínio Sob Pressão" investiga o uso da manufatura aditiva (MA) como alternativa aos métodos convencionais na produção de componentes de moldes para injeção de alumínio. No contexto da indústria de moldes, o controle térmico eficiente é crucial para garantir a qualidade das peças e a durabilidade dos moldes. Contudo, as técnicas tradicionais de usinagem apresentam limitações, especialmente na criação de canais de refrigeração complexos, o que gera áreas quentes nos moldes, acelera o desgaste e reduz sua vida útil.

O objetivo da pesquisa é avaliar a aplicabilidade da manufatura aditiva na fabricação de componentes de moldes, com foco em melhorias no desempenho térmico e na durabilidade. A dissertação busca analisar como a MA pode superar as restrições geométricas dos canais de refrigeração convencionais, melhorar o controle térmico e aumentar a produtividade no processo de injeção de alumínio.

A metodologia adotada envolve a fabricação de componentes utilizando o aço ferramenta DIN 1.2709 por MA, comparando seu desempenho com os aços DIN 1.2344 e DIN 1.2367, comuns nos processos convencionais. Foram realizados testes experimentais para avaliar as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais em condições similares às de aplicação industrial. O estudo também incluiu a aplicação de revestimentos PVD (deposição física de vapor) nos componentes fabricados por MA, visando aumentar sua resistência ao desgaste. Por fim, foram otimizados canais de refrigeração conformados nos moldes para maximizar a eficiência na dissipação térmica.

Os principais resultados indicam que os componentes produzidos por MA, com canais de refrigeração otimizados e revestimentos PVD, apresentaram maior eficiência térmica, com redução significativa das áreas quentes e do tempo de resfriamento nos ciclos de injeção. Essa otimização contribuiu para o aumento da vida útil dos moldes e a redução da frequência de manutenção. A análise econômica realizada demonstrou que, apesar do maior custo inicial das peças produzidas por MA, os ganhos em produtividade e a maior durabilidade dos moldes resultam em economia ao longo do ciclo de vida do produto.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, Moldes de Injeção de Alumínio, Canais Conformados, Revestimento PVD, DIN 1.2709, Produtividade, Desempenho de Moldes.

ABSTRACT

The present dissertation, "Additive Manufacturing for the Production of Components for Aluminum Die Casting Molds," investigates the use of additive manufacturing (AM) as an alternative to conventional methods in the production of mold components for aluminum injection molding. In the mold industry context, efficient thermal control is crucial to ensure part quality and mold durability. However, traditional machining techniques present limitations, especially in the creation of complex cooling channels, which lead to hot spots in the molds, accelerating wear and reducing service life.

The objective of this research is to assess the applicability of additive manufacturing in producing mold components, focusing on improvements in thermal performance and durability. The dissertation aim to analyze how AM can overcome the geometric restrictions of conventional cooling channels, enhance thermal control, and increase productivity in the aluminum injection molding process.

The adopted methodology involved manufacturing components using DIN 1.2709 tool steel through AM, comparing its performance to conventional steels such as DIN 1.2344 and DIN 1.2367. Experimental tests were conducted to evaluate the thermal and mechanical properties of these materials under conditions similar to industrial applications. The study also included the application of PVD (Physical Vapor Deposition) coatings on AM-produced components to enhance their wear resistance. Finally, conformal cooling channels were optimized in the molds to maximize heat dissipation efficiency.

The main results indicate that components produced by AM, with optimized cooling channels and PVD coatings, demonstrated greater thermal efficiency, significantly reducing hot spots and cooling times during injection cycles. This optimization contributed to extending the service life of the molds and reducing maintenance frequency. The economic analysis showed that, despite the higher initial cost of AM-produced parts, productivity gains and increased mold durability result in cost savings over the product's life cycle.

Keywords: Additive Manufacturing, Aluminum Injection Molds, Conformal Channels, PVD Coating, DIN 1.2709, Productivity, Mold Performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esboço de um molde de injeção de alumínio sob pressão	21
Figura 2 - fluxo de processos de injeção de alumínio	22
Figura 3 - Desenho esquemático demonstrando a troca térmica por condução em uma cavidade de molde.	23
Figura 4 - Desenho esquemático de troca termica por convecção em uma cavidade de molde de injeção.	24
Figura 5 - Desenho esquemático de um equipamento de controle de temperatura de um molde de injeção.	25
Figura 6 - Desenho esquemático de um equipamento de controle térmico de um molde conectado no circuito de refrigeração do molde	26
Figura 7 - Desenho esquemático do sistema de pulverização de um molde de injeção de alumínio.	27
Figura 8 - Componentes produzidos por manufatura aditiva LPBF	29
Figura 9 - Simulação Térmica, componentes impressos por manufatura aditiva LPBF com canais conformal cooling	30
Figura 10 - Demonstrativo de temperatura na superfície da cavidade de um molde de injeção de alumínio durante o processo de injeção.	30
Figura 11 - Processo de obtenção de um aço ferramenta pelo processo de Eletro Slag Remelting ou ESR	32
Figura 12 - Metalografia demonstrativa de um aço DIN 1.2344 utilizado na construção de cavidades para moldes para hpdc	33
Figura 13 - exemplo de Molde de injeção de alumínio sob pressão indicado os materiais de construção de contrução das cavidades	34
Figura 14 - Desenho esquemático do processo obtenção de pó metálico por atomização do aço.	34

Figura 15 - Micrografia de aço ferramenta com agarre de alumínio, ou seja, ligação metálica entre o alumínio e o elemento ferro do substrato da cavidade	35
Figura 16 - Revestimento PVD em um componente com trincas térmicas superficiais	36
Figura 17 - Fluxograma Metodológico	39
Figura 18 - Imagem do molde de injeção de alumínio sob pressão utilizado nos experimentos de implementação de manufatura aditiva.	40
Figura 19 - Componentes impressos como recebido DIN 1.2709 produzido por LPBF em aço DIN 1.2709	41
Figura 20 - Medição de dureza do componente impresso como recebido em escala Hockwell C	42
Figura 21 - Interpretação quanto a faixa de temperatura de trabalho do componente no molde, faixa de temperatura do componente durante o processo de revestimento e a faixa de dureza final do substrato DIN 1.2709	42
Figura 22 - Inspeção de trincas por partícula magnética e por ultrassom – Componente conforme.	43
Figura 23 - Inspeção de trincas por ultrassom com equipamento GE USM 35.	43
Figura 24 - Micrografia comparativa entre os materiais DIN 1.2709 e o aço DIN 1.2344 escala de 20µm.	44
Figura 25 - Medição da composição química do substrato por espectrografia	45
Figura 26 - Processo de usinagem do postigo impresso em aço DIN 1.2709	46
Figura 27 - Processo de usinagem do componente impresso por eletroerosão por penetração e eletrodos de grafite.	47
Figura 28 - Medição do componente após usinagem por escaneamento 3D. Tolerância geral de especificação $\pm 0,2\text{mm}$	47

Figura 29 - Medição de dureza do componente impresso após usinagem em escala Hockwell C	48
Figura 30 - Componente impresso após a aplicação do PVD. Componente aprovado e apto a ser montado no molde para o início dos testes práticos.	50
Figura 31 - Medição de dureza da amostra do substrato DIN 1.2709 após os procedimentos de revestimento de nitretação e PVD.	50
Figura 32 - Desenho esquemático de teste dos postigos impressos	51
Figura 33 - Medição do fluxo de água que passa pelos canais de refrigeração dos componentes de teste do molde já montados no molde.	52
Figura 34 - Medição térmica comparativa entre os componentes impressos e convencional.	52
Figura 35 - Gráfico comparativo de temperatura entre os dois postigos de teste, postigos impressos, (Azul), e postigos convencionais, (Vermelho)	53
Figura 36 - Avaliação visual comparativa entre os componentes impresso e de série após o teste inicial de 1000 ciclos de injeção.	54
Figura 37 - Molde de injeção de alumínio com todos os periféricos confeccionados por manufatura aditiva e com os canais conformados devidamente otimizados.	55
Figura 38 – Simulação de perfil térmico do molde avaliando o ciclo de injeção para um ganho de tempo de ciclo de 18%	56
Figura 39 - Componente impresso com teste de vida após 80.000 ciclos de injeção.	57
Figura 40 - Canais de refrigeração do componente impresso avaliado por boroscopia após um lote de 80.000 ciclos de injeção.	58
Figura 41 - Componente impresso com desvio dimensional no sobremetal de impressão	60

Figura 42 - Interpretação quanto a faixa de temperatura de trabalho do componente no molde, faixa de temperatura do componente durante o processo de revestimento e a faixa de dureza final do substrato DIN 1.2709	61
Figura 43 - Componente impresso não conforme	62
Figura 44 - Inspeção de trincas por partículas magnéticas de um componente impresso com falha de impressão.	62
Figura 45 - Avaliação de macrografia do substrato evidenciando o perfil das descontinuidades apresentadas no substrato.	63
Figura 46 - Inspeção de trincas por ultrassom com equipamento GE USM 35 do componente não conforme.	63
Figura 47 - Avaliação de custos de usinagem dos diferentes aços para construção de cavidade de moldes de injeção de alumínio sob pressão.	65
Figura 48 - Custos de fabricação de um molde por etapa de fabricação	65
Figura 49 - Micrografia onde indica a formação de camada branca do substrato de DIN 1.2709 usinado por eletroerosão.	67
Figura 50 - Amostras avaliadas por micrografia para avaliação e teste de difusão da nitretação à plasma no substrato de DIN 1.2709	68
Figura 51 - Micrografia da amostra 03 submetida à difusão de nitretação à plasma.	69
Figura 52 - Comparativo de dureza do substrato durante as fases de fabricação.	70
Figura 53 - Simulação comparativa entre o componente de série e o com canais conformados.	71
Figura 54 - Avaliação visual comparativa entre os componentes impresso e de série após o teste inicial de 1000 ciclos de injeção.	72

Figura 55 - Molde com todos os componentes preparados para o teste de 30.000 ciclos	73
Figura 56 -Simulação de perfil térmico do molde.	73
Figura 57 – Avaliação de tempo de ciclo com o molde com componentes impressos produzindo um lote de 30.000 ciclos de injeção.	74
Figura 58 - Comparativo visual avaliando as condições de durabilidade dos componentes, impresso e de série após uma produção de 30.000 ciclos de injeção.	75
Figura 59 - Componente impresso com teste de vida após 80.000 ciclos de injeção.	77
Figura 60 - Canais de refrigeração do componente impresso avaliado por boroscopia após um lote de 80.000 ciclos de injeção.	78
Figura 61 - Componente com uma quebra catastrófica proveniente de um ponto de oxidação	79
Figura 62 - Gráfico de avaliação do ponto decisório entre o molde de série e o molde produzido por AM.	87
Figura 63 - Componente com falha de estratégia de impressão	101
Figura 64 - Falha de acuracidade na geometria impressa	101
Figura 65 - Porosidade no substrato impresso	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Orientações do fabricante de pó metálico quanto ao procedimento que deve ser seguido para o tratamento térmico por envelhecimento do substrato DIN1.2709	41
Tabela 2 - Informações de composição química do substrato DIN 1.2709, fornecido pelo fabricante Höganäs	45
Tabela 3 - Medição de composição química de aços para trabalho aquecido disponíveis no mercado Brasileiro.	47
Tabela 4 - Tabela indicativa de elementos de liga que influenciam a usinabilidade do aço DIN 1.2367 e DIN 1.2344	66
Tabela 5 - Demonstrativos de custos de fabricação dos componentes impressos e convencionais.	80
Tabela 6 - Demonstrativo de custos para a comparação dos custos de fabricação de um molde de injeção de alumínio com componentes convencionais versus um molde com componentes impressos.	81
Tabela 7 - Demonstrativo dos parâmetros econômicos para um processo de injeção de alumínio comparando componentes impressos e componentes de série.	82
Tabela 8 - Demonstrativo de custos comparativos entre uma produção com o molde de série e um molde com componentes impressos tendo como referencial o tempo de ciclo.	83
Tabela 9 - Demonstrativo de custos operacionais, (Custos de troca de componentes, custo de manutenção preventiva por ciclo de injeção), entre as tecnologias de manufatura aditiva e convencionais.	84
Tabela 10 - Avaliação compilada comparando os custos gerais de produção entre as tecnologias de um molde produzindo com componentes convencionais e um outro com componentes impressos e canais otimizados.	85

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Area Superficial disponível para a transferência de calor em °C
AlCrN	Alumínio Cromo Níquel
AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CO ²	Dióxido de carbono
D	Espessura do substrato sujeito a passagem do calor
DIN	Deutsches Institut für Normung
E	Módulo de elasticidade do material
ESR	Electro Slag Remelting
h	Taxa de convecção do fluido em kW/m ² *°K
HPDC	High pressure Die Casting
K	Condutividade térmica do material em kcal/segundo/°C
Kcal	Quilocaloria
kW	Kilowatts
LPBF	Laser Powder Bed Fusion
m	Metro
m/s	Metro por Segundo
m ²	Metro quadrado
NADCA	North American Die Casting Association

PVD	Physical Vapor Deposition
Q	Quantidade de calor que passa por um material em uma unidade de tempo
Qconv	Taxa de transferência de calor ao fluido kcal/s
T	Temperatura final
Tf	Temperatura do fluido passando sobre a superfície do canal de refrigeração do molde °C
Ti	Temperatura Inicial
Ts	Temperatura do canal de refrigeração em °C
A	Coeficiente de dilatação linear
σ_t	Tensão térmica

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS GERAIS.....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU ESTADO DA ARTE	21
2.1 CONTROLE TÉRMICO DO MOLDE	22
2.2 SISTEMAS DE CANAIS DE REFRIGERAÇÃO CONFORMADOS	27
2.3 SELEÇÃO E AVALIAÇÃO DE MATERIAIS	31
2.4 REVESTIMENTOS PVD	35
2.5 AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL E VIABILIDADE ECONÔMICA	36
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 MATERIAL COMO RECEBIDO.....	40
3.2 AVALIAÇÃO DE DUREZA	41
3.3 INSPEÇÃO DE TRINCAS.	43
- <i>Inspeção por partículas magnéticas</i>	43
- <i>Técnica de medição por ultrassom</i>	43
3.4 AVALIAÇÃO METALOGRÁFICA.	44
3.5 AVALIAÇÃO QUÍMICA DO SUBSTRATO.....	45
3.6 USINAGEM DOS COMPONENTES.....	46
3.7 MEDIÇÃO DE DUREZA APÓS USINAGEM.	48
3.8 REVESTIMENTOS NITRETAÇÃO E PVD.....	49
3.8.1 NITRETAÇÃO.....	49
3.8.2 APLICAÇÃO DE PVD	49
3.8.3 TESTE FINAL DE DUREZA.....	50
3.9 TESTE DE 1000 CICLOS DE INJEÇÃO.....	51
3.10 INJEÇÃO DE UM LOTE DE PRODUÇÃO DE 30.000 CICLOS	55
3.11 AVALIAÇÃO DE DURABILIDADE DO COMPONENTE IMPRESSO.....	57
3.11.1 AVALIAÇÃO DOS CANAIS CONFORMADOS QUANTO A CALCIFICAÇÃO.....	58

3.12 AVALIAÇÃO ECONÔMICA COMPARATIVA ENTRE O PROCESSO CONVENCIONAL E POR MANUFATURA ADITIVA.....	59
3.12.1 <i>Etapa 01</i> :.....	59
3.12.2 <i>Etapa 02</i> :.....	59
3.12.3 <i>Etapa 03</i> :.....	59
4.0 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	60
4.1 MATERIAL COMO RECEBIDO.....	60
4.2 INSPEÇÃO DE TRINCAS.	61
4.3 AVALIAÇÃO QUÍMICA DO SUBSTRATO.....	64
4.4 USINAGEM DOS COMPONENTES.....	64
4.5 REVESTIMENTOS NITRETAÇÃO E PVD.....	67
4.5.1 <i>NITRETAÇÃO</i>	67
4.5.2 <i>APLICAÇÃO DE PVD</i>	69
4.5.3 <i>TESTE FINAL DE DUREZA</i>	70
4.6 TESTE DE 1000 CICLOS DE INJEÇÃO.....	71
4.7 INJEÇÃO DE UM LOTE DE PRODUÇÃO DE 30.000 CICLOS	73
4.8 AVALIAÇÃO DE DURABILIDADE DO COMPONENTE IMPRESSO.....	76
4.9 AVALIAÇÃO DOS CANAIS CONFORMADOS QUANTO A CALCIFICAÇÃO.	78
4.10 AVALIAÇÃO ECONÔMICA COMPARATIVA ENTRE O PROCESSO CONVENCIONAL E POR MANUFATURA ADITIVA.....	80
5.0 CONCLUSÕES	88
5.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
6.0 REFERÊNCIAS.....	92
6.1 REFERÊNCIAS POR ESTRATO	99
6.2 REFERÊNCIAS POR QUALIS	99
6.3 REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS	100
7.0 APÊNDICE.....	101

1.0 INTRODUÇÃO

A indústria de moldes para injeção de alumínio sob pressão tem historicamente enfrentado desafios significativos relacionados à durabilidade e eficiência operacional dos moldes, bem como aos custos associados à sua fabricação e manutenção MILLIGAN, Daniel R., 2024. Entre os principais problemas observados estão o desgaste acelerado dos componentes, a formação de trincas térmicas e falhas estruturais, fatores que comprometem não apenas a integridade e a qualidade das peças moldadas, mas também a viabilidade econômica dos projetos e a produtividade global das operações. Claudio Favi et al, 2017

Essas limitações são agravadas pelas restrições inerentes aos processos convencionais de fabricação, especialmente no que diz respeito ao design dos circuitos de refrigeração, MAJERNÍK, J.; PODARIL, 2024. A geometria limitada dos canais de refrigeração obtidos por usinagem tradicional dificulta a uniformização da dissipação térmica, resultando na formação de zonas críticas de aquecimento. Este fator é amplamente reconhecido como um dos principais responsáveis pela redução da vida útil dos moldes e pela diminuição da eficiência do processo de injeção.

Nesse contexto, a manufatura aditiva, particularmente o processo de Laser Powder Bed Fusion (LPBF), tem se destacado como uma alternativa tecnológica disruptiva. A capacidade de fabricar componentes camada por camada permite a criação de geometrias complexas e internalizadas, como canais de refrigeração conformais, que não seriam viáveis por processos convencionais ANDRONOV, Vladislav et al., 2024. Essa solução possibilita um controle térmico significativamente mais eficiente, reduzindo gradientes de temperatura e minimizando a ocorrência de falhas térmicas.

A incorporação da manufatura aditiva na produção de componentes de moldes, além de otimizar o desempenho térmico, resulta em benefícios adicionais, como o aumento da durabilidade dos moldes e a consequente redução dos custos operacionais ao longo de seu ciclo de vida. Dessa forma, a MA se apresenta como uma tecnologia capaz de transformar o paradigma atual da indústria de moldes de injeção de alumínio, promovendo avanços tanto em confiabilidade quanto em produtividade.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Esta dissertação tem como objetivo principal investigar a aplicabilidade da tecnologia de manufatura aditiva LPBF (Laser Powder Bed Fusion) na produção de componentes para moldes de injeção de alumínio sob pressão, visando:

Aprimorar a produtividade no processo de injeção de alumínio sob pressão.

Aumentar a vida útil dos componentes de moldes fabricados por manufatura aditiva.

Avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso da tecnologia LPBF em escala industrial para a fabricação de componentes de moldes.

Analisar a eficiência térmica proporcionada pela aplicação de canais de refrigeração conformados otimizados.

Verificar a compatibilidade dos substratos produzidos via LPBF com tratamentos térmicos e superficiais, como nitretação e aplicação de revestimentos PVD.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.2.1 - Avaliar a viabilidade técnica do uso da tecnologia LPBF na fabricação de componentes de moldes de injeção de alumínio sob pressão, considerando o material impresso, o desempenho térmico proporcionado pelos canais conformados.

1.2.2 - Analisar o impacto da manufatura aditiva LPBF na durabilidade e vida útil dos componentes de moldes, comparando com os moldes convencionais, por meio de testes de ciclo de injeção e avaliação de desgaste e trincas nos componentes.

Investigar a eficiência dos canais de refrigeração conformados produzidos por LPBF, com foco na capacidade de remoção de calor e no impacto na performance do molde durante o processo de injeção de alumínio sob pressão.

1.2.3 - Avaliar a aplicabilidade dos revestimentos, como nitretação, e o revestimento PVD (AlCrN) em componentes fabricados por LPBF, visando aumentar a resistência à abrasão e melhorar a aderência do revestimento, com a finalidade de prolongar a vida útil dos moldes.

1.2.4 - Conduzir uma análise técnico-econômica comparativa entre a fabricação de moldes com componentes convencionais e moldes com componentes produzidos por LPBF, calculando o custo total de produção, o retorno sobre o investimento (ROI) e os benefícios econômicos a longo prazo da implementação dessa tecnologia em escala industrial.

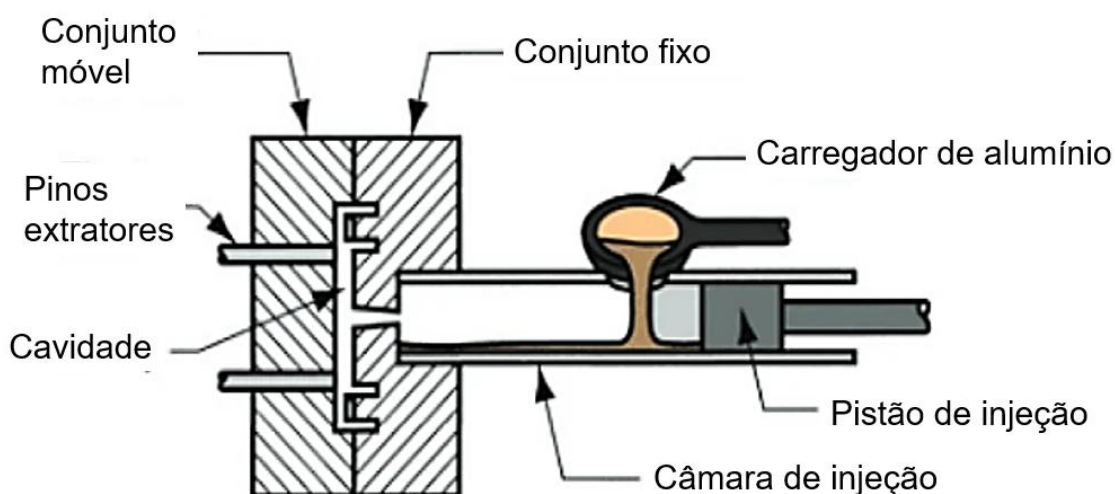
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU ESTADO DA ARTE

A Injeção de alumínio sob pressão é um processo produtivo que consiste em injetar o alumínio fundido sob pressão e alta velocidade em um molde metálico com o objetivo de se produzir peças em série. BUTLER, W. A. – 2015.

A grande vantagem de se produzir com o processo de injeção de alumínio sob pressão segundo menciona BONOLLO, et al - 2015, é a capacidade de se fabricar grandes quantidades de peças com elevada qualidade, repetibilidade e controle dimensional. Contudo, processo de injeção de alumínio sob pressão, diferentemente dos processos de injeção de plástico, possuem solicitações termomecânicas muito mais elevadas o que dificultam o controle e a acurácia dos parâmetros de processos ao longo dos lotes de produção. Neste contexto, motiva-se a evolução dos equipamentos, Máquinas injetoras, sistemas de controle de temperatura, equipamentos robóticos, a melhorarem tecnologicamente, para que o processo de injeção sob pressão se torne cada vez mais estável. BONOLLO, et al - 2015

Figura 1 - Esboço de um molde de injeção de alumínio sob pressão

Molde de Injeção de alumínio



Fonte: Boris Nogowizin – Theorie und Praxis des Guckgusses, pg 155

A figura 02 elucida o ciclo de injeção de uma peça como segue: A transferência do alumínio fundido do forno para a câmara de injeção, O pistão de injeção transporta em baixa velocidade o metal líquido até que a bucha de injeção esteja toda preenchida.

O pistão de injeção é acelerado até que a velocidade de injeção planejada que varia entre 30 – 120 m/s dependendo da aplicação e requisitos do componente a ser injetado e após todo o preenchimento da cavidade o alumínio é comprimido até uma pressão que pode variar de 400 – 1200 bar. O molde se mantém fechado, com metal sob pressão, até que o componente injetado se solidifique conforme figura 02.

- O molde se abre e o componente é extraído de dentro do molde, neste momento após a extração do componente, é aplicada uma camada de desmoldante sobre a superfície do molde e um novo ciclo se reinicia.

Figura 2 - fluxo de processos de injeção de alumínio



- Fonte: Proleantech - 2024

2.1 CONTROLE TÉRMICO DO MOLDE

O controle térmico de um molde é um conjunto entre as propriedades condutivas de calor dos materiais que o molde foi construído, com os canais de refrigeração e os fluidos refrigerantes que serão utilizados para o balanço térmico convectivo durante a produção das peças injetadas. Esta é uma etapa muito importante no projeto do molde, pois dela, depende a capacidade do molde produzir peças com um tempo de ciclo adequado e taxas de refugos dentro do orçamento planejado.

De uma forma simples podemos dizer, e comentado por YONGYOU, Cao et al – 2014, que a equação de transferência de calor por condução térmica nos indica a espessura a que é necessário estar a refrigeração do molde, tendo como referência a superfície da cavidade a que se pretende refrigerar.

Como podemos verificar na figura 03

$$Q = k * \frac{A}{D} * (T_1 - T_2)$$

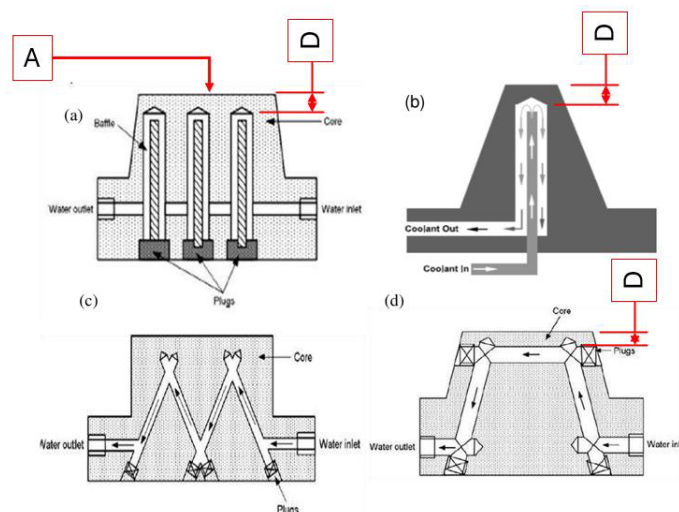
Onde temos que:

Q = Quantidade de calor que passa por um material em uma unidade de tempo

K = Condutividade térmica do material em kcal/segundo/°C

D = Espessura do substrato sujeito a passagem do calor.

Figura 3 - Desenho esquemático demonstrando a troca térmica por condução em uma cavidade de molde.



Referência: PHULL, Gurpreet Singh et al – 2018

Já a equação da transferência de calor por convecção, nos indicará qual a área necessária de circuito de refrigeração no molde para a remoção do calor necessário para a solidificação da peça, qual o fluido deverá ser utilizado e pôr fim a velocidade que o fluido deverá percorrer.

$$Q_{conv} = h * A * (T_s - T_f)$$

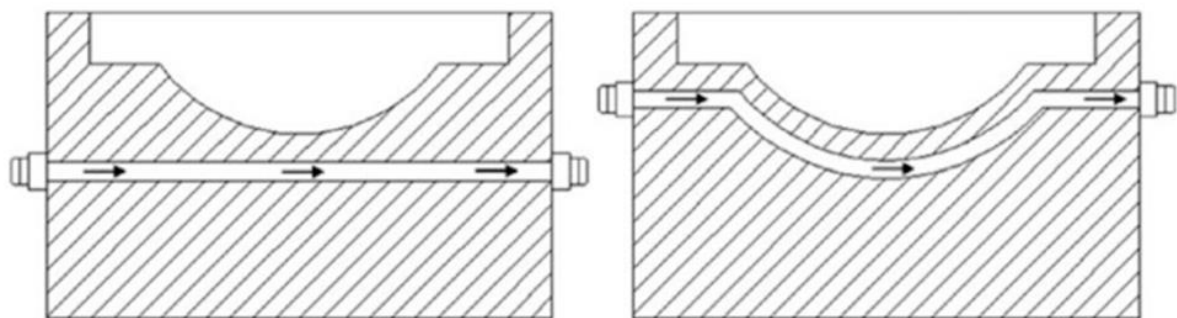
Q_{conv} = Taxa de transferência de calor ao fluido: kcal/s

A = Área superficial disponível para transferência de calor

T_s = Temperatura da superfície do canal de refrigeração em °C

T_f = Temperatura do fluido passando sobre a superfície do canal de refrigeração do molde °C

Figura 4 - Desenho esquemático de troca térmica por convecção em uma cavidade de molde de injeção.



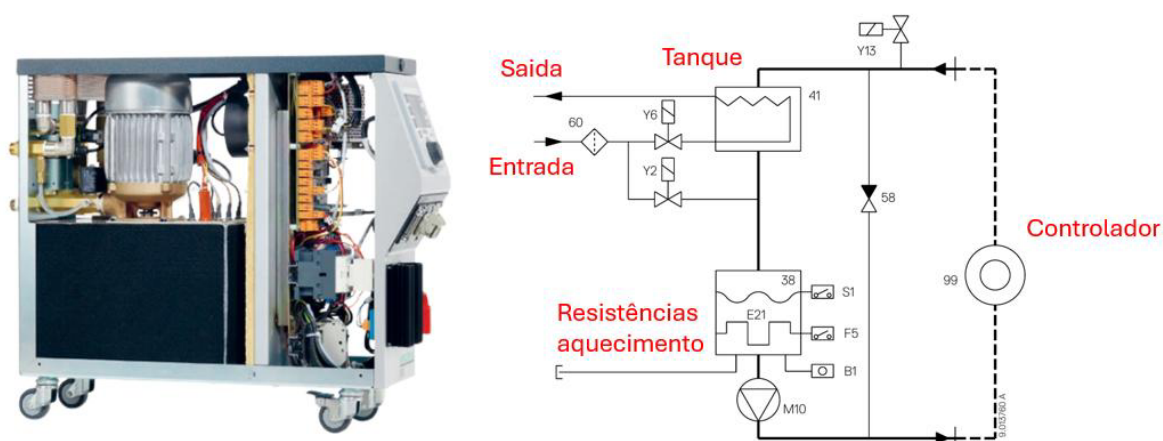
Referência: SHINDE, Mahesh S. et al - 2017

Diversos sistemas de refrigeração de moldes, como: layouts de canais de refrigeração, sistemas de insertos, cascatas, palhetas, materiais com maior condutividade térmica, estão descritos por renomados autores como HARADA – Moldes para Injeção de Termoplásticos, (Nogowizin – Konstruktion und Fertigung der

Druckgießformen - 2011), demonstrando as melhores práticas e conceitos para um sistema de refrigeração que ofereça melhor performance durante a produção.

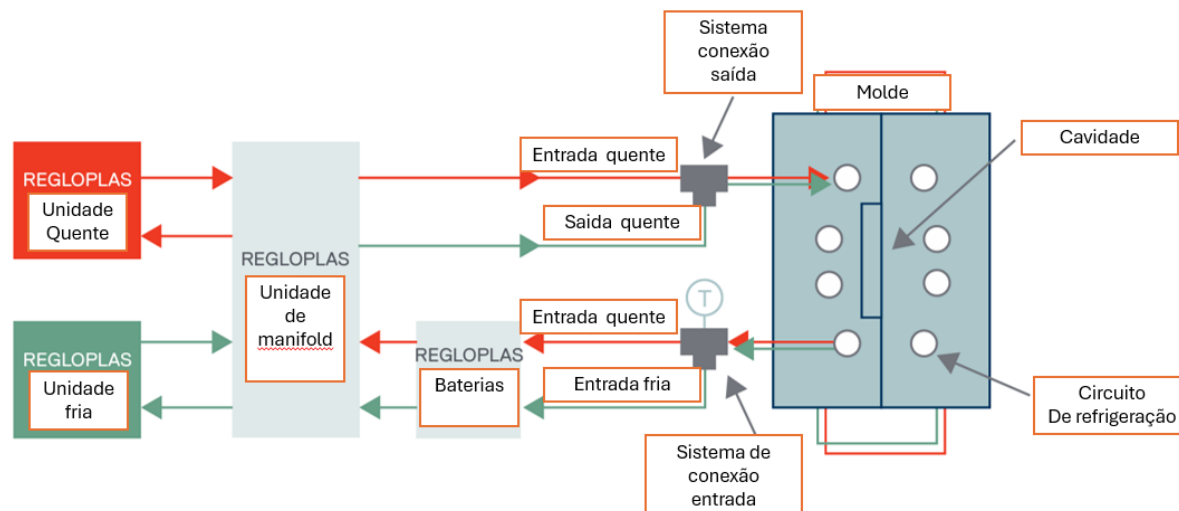
O processo de fabricação dos sistemas de arrefecimento convencional em moldes de injeção de alumínio, são implementados através de furações nas cavidades dos moldes, geralmente em regiões de maior solicitação de troca térmica, como geometrias de maior concentração massa nos produtos. O projeto é validado através da experiencia do projetista e simulações onde é possível prever os tipos de problemas tanto no injetado como no perfil térmico do molde. ERMIS – 2024, KUO, Chil-Chyuan; et al – 2024

Figura 5 - Desenho esquemático de um equipamento de controle de temperatura de um molde de injeção.



Fonte: Regloplas – 2024

Figura 6 - Desenho esquemático de um equipamento de controle térmico de um molde conectado no circuito de refrigeração do molde



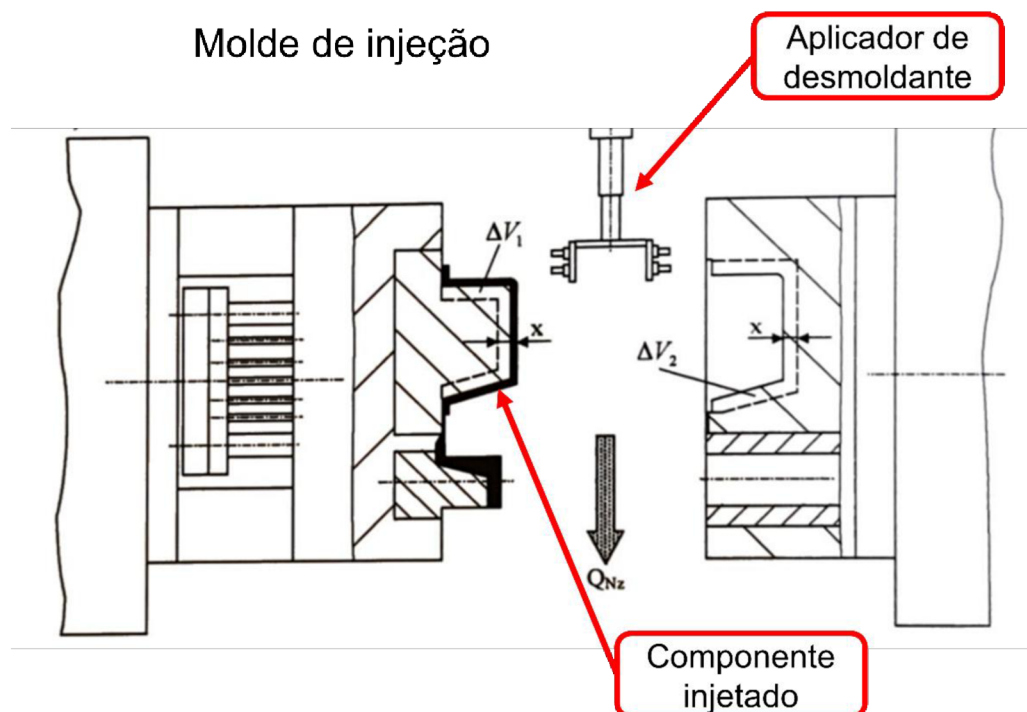
Fonte: Regloplas - 2024

O agente refrigerante é bombeado através dos canais de refrigeração do molde, transportando o calor para o mecanismo, trocador de calor, e este devolve o agente refrigerante novamente para a o reservatório.

No processo de injeção de alumínio sob pressão, diversos sistemas de arrefecimento podem ser utilizados. Existem aqueles ditos como circuito aberto, onde o fluido de arrefecimento tem seu controle de temperatura através de uma torre de resfriamento, e os de circuito fechados, com agentes refrigerantes específicos como água deionizada, óleos térmicos etc.

Os sistemas de arrefecimento convencional dos moldes, não possuem, na maioria das vezes, a capacidade de atender de forma eficaz todas as solicitações que o componente injetado necessita, sendo necessário outros métodos que ajudem a contornar essa deficiência como o aumento do tempo de ciclo de injeção, ou realizando compensação térmica por agentes externos como a aplicação localizada de desmoldante. NOGOWIZIN - 2011.

Figura 7 - Desenho esquemático do sistema de pulverização de um molde de injeção de alumínio.



Fonte: GOBBER et al - 2020

Embora estes métodos sejam largamente utilizados na indústria, é sabido que práticas como aplicação localizada de desmoldante, sistemas de refrigeração deficiente promovem um encurtamento na vida útil do molde. GOBBER, FEDERICO SIMONE et al – 2020, isso se deve pelo fato do desmoldante aplicado na cavidade provocar uma variação térmica muito abrupta em um pequeno espaço de tempo, fazendo com que as tensões internas no substrato estejam acima da resistência a tração em fadiga. BHASKAR, M. et al – 2022.

2.2 SISTEMAS DE CANAIS DE REFRIGERAÇÃO CONFORMADOS

Além do sistema convencional de refrigeração como discutido acima, atualmente muito tem-se discutido quanto a implementação dos sistemas de refrigeração com canais conformados, ou conformal cooling, em moldes de injeção de alumínio sob pressão, este sistema tem como objetivo possibilitar uma melhor efetividade no

sistema de arrefecimento do molde, fazendo com que se obtenha produtos com melhor controle dimensional, redução de tempos de ciclo bem como aumento na vida útil do componente. Os processos de fabricação de componentes de moldes por canais conformados, vem se difundindo através do processo de fabricação por manufatura aditiva. ZENG, Tongyan et al – 2023

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, tem emergido como uma tecnologia disruptiva na indústria de moldes como demonstra, ANDRONOV, VLADISLAV et al – 2024, particularmente na produção de componentes para moldes para injeção de alumínio sob pressão. A capacidade de fabricar componentes complexos com geometrias intrincadas, que seriam inviáveis ou extremamente custosas por métodos tradicionais, posiciona a manufatura aditiva como uma solução potencial para desafios críticos na fabricação de moldes. KURTULUS, KARANI et al - 2021

Esta tecnologia vem somar como um recurso importante no processo de fabricação de componentes de molde pois permite com isso uma otimização no seu sistema de controle de temperatura, possibilitando a criação de sistemas de refrigeração otimizados e mais eficientes, melhorando a performance dos moldes e a estabilidade do processo de injeção. SODE M, KAHLERT M, et al – 2023

Mesmo sendo um processo em que os canais de refrigeração possuem uma geometria mais orgânica, ou seja, com formas geométricas conformadas, o conceito de dimensionamento obedece às mesmas regras já descritas, como as de condução e convecção térmica. Porém no caso do conformal cooling o mais prudente é a utilização de simulações termo estruturais durante as etapas de validação dos conceitos do projeto dos circuitos de refrigeração, uma vez que com a utilização deste tipo de refrigeração se aumenta de forma exponencial a capacidade de remoção de calor do componente, desta forma, o projeto fica susceptível a erros por superdimensionamentos. SILVA, HUGO MIGUEL et al – 2024.

Um dos principais benefícios da manufatura aditiva na fabricação de componentes de moldes é a capacidade de criar geometrias complexas, como canais de refrigeração conformados, que seguem uma geometria específica determinada

através de cálculos e simulações e permitem um controle térmico mais eficiente. A otimização desses canais é fundamental para melhorar a qualidade do produto injetados, também, otimizar o ciclo de produção e aumentar a vida útil do molde.

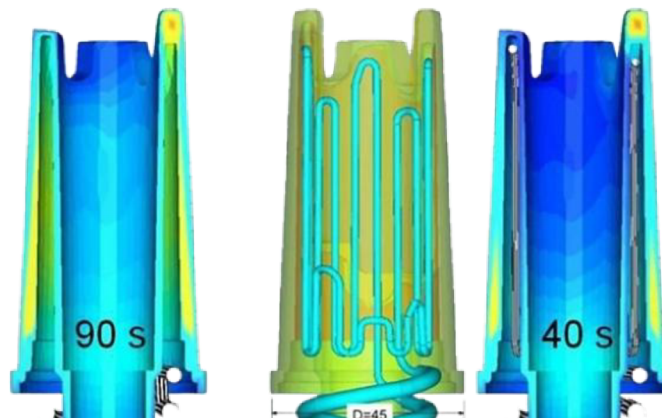
Figura 8 - Componentes produzidos por manufatura aditiva LPBF



Fonte: OERLIKON BALZERS - HRSFLOW - 2023

Estudos recentes têm utilizado simulações computacionais e testes experimentais para avaliar e validar a eficácia dos canais conformados quando implementados em moldes de injeção de alumínio, demonstrando melhorias significativas em termos de dissipação de calor e uniformidade de temperatura, durabilidade dos componentes etc. FENG, AMAR et al. – 2021

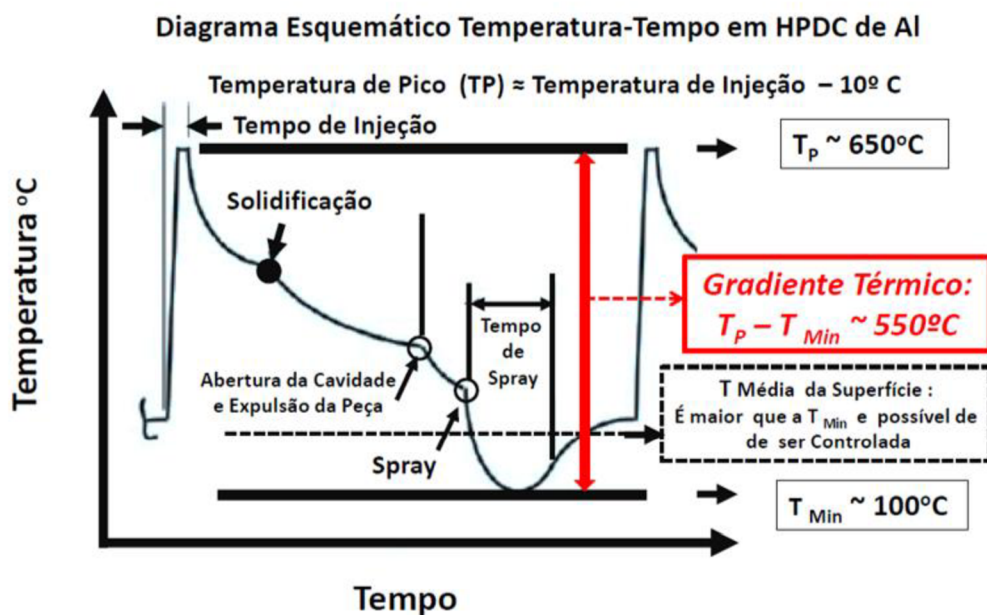
Figura 9 - Simulação Térmica, componentes impressos por manufatura aditiva LPBF com canais conformal cooling



Fonte: Plasty Gabriel s.r.o - 2024

Pois com uma capacidade de troca térmica maior, temos uma menor variação térmica no componente impresso, desta forma, é possível verificar também uma redução na tensão térmica a que o componente do molde está submetido.

Figura 10 - Demonstrativo de temperatura na superfície da cavidade de um molde de injeção de alumínio durante o processo de injeção.



Fonte: NOGOWIZIN – 2011, Theorie und Praxis des Druckgusses – pg. 690 – 2011

$$\sigma_t = \frac{E * \alpha * (T_f - T_i)}{(1 - \nu)}$$

σ_t = Tensão térmica

E = Módulo de elasticidade do material

α = Coeficiente de dilatação linear

T_f = Temperatura final

T_i = Temperatura Inicial

Nos componentes com sistemas de refrigeração conformados, é possível identificar que uma menor variação térmica no componente e isso necessariamente irá gerar uma menor tensão térmica, fazendo com que o componente tenha sua vida útil prolongada. ANDRONOV, VLADISLAV et al - 2024

2.3 SELEÇÃO E AVALIAÇÃO DE MATERIAIS

A escolha de materiais para a fabricação de componentes de moldes, como vemos na figura 10, é uma etapa crucial que impacta diretamente a durabilidade, desempenho e viabilidade econômica do ferramental. Materiais como os aços DIN 1.2367, DIN 1.2709, DIN 1.2344, DIN 1.2343 são amplamente reconhecidos na indústria de moldes devido às suas propriedades mecânicas e térmicas superiores.

A avaliação de suas propriedades mecânicas, como resistência ao desgaste, condutividade térmica e estabilidade dimensional, é essencial para determinar sua adequação na produção de componentes para moldes de injeção de alumínio sob pressão.

Os aços para trabalho a quente em específico para construção de moldes para a injeção de alumínio sob pressão são classificados quando ao seu grau de pureza homogeneidade tenacidade e composição química, conforme a Associação Norte

Americana de fundição NADCA, (North American Die casting Association). Isso implica diretamente o seu processo de fabricação como se pode observar na figura 11, pois aços com um melhor grau de pureza, promovem uma melhor vida útil dos moldes de HPDC.

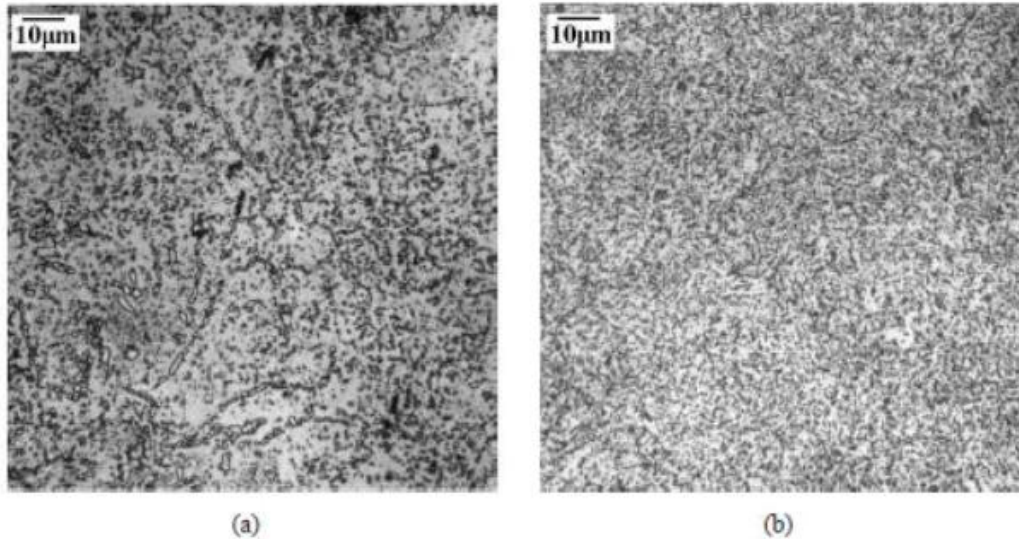
Figura 11 - Processo de obtenção de um aço ferramenta pelo processo de Electro Slag Remelting ou ESR



Fonte: Böhler Uddeholm – Grupo Voestalpine - 2024

O diagrama descreve o processamento mais conhecido para a produção de aços para trabalho a quente de alta performance, etapas importantes como o processo de refusão e homogeneização são responsáveis pela melhoria de qualidade nos aços de forma a aumentar suas propriedades mecânicas e resistência à fadiga.

Figura 12 - Metalografia demonstrativa de um aço DIN 1.2344 utilizado na construção de cavidades para moldes para hpdc



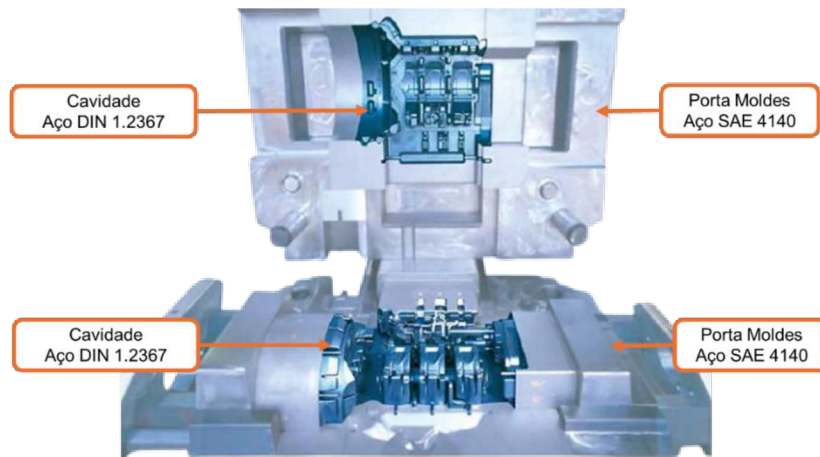
Fonte: Böhler Uddeholm – Grupo Voestalpine - 2020

Microestrutura do Aço AISI H13 ESR

- a) – Substrato sem Homogeneização
- b) – Substrato com homogeneização

Ensaio e certificações se fazem necessário para a homologação dos aços para construção dos moldes, parâmetros como micro segregações, micro inclusões, microestrutura, perfil de tratamento térmico, pois devido à alta solicitação termomecânica, os aços para trabalho a quente possuem uma degradação acentuada quando utilizados em cavidades de moldes para injeção de alumínio. SEVASTOPOLEV, RUSLAN – 2020.

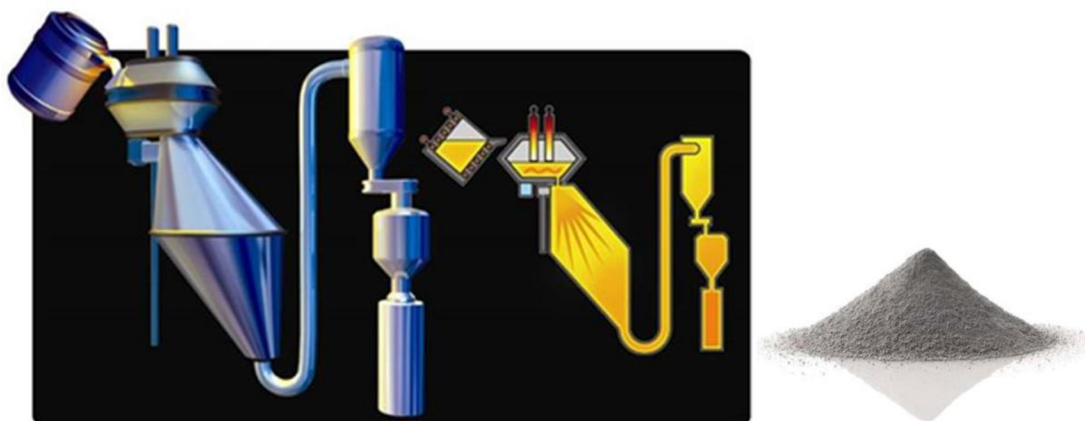
Figura 13 - exemplo de Molde de injeção de alumínio sob pressão indicado os materiais de construção de contrução das cavidades



Fonte: BÖHLER UDDEHOLM – GRUPO VOESTALPINE - 2020

O mesmo ocorre com matéria prima necessária para a construção de componentes por manufatura aditiva. Estes Obedecem aos mesmos critérios visto que o que difere são os meios de fabricação dos itens. Enquanto o aço convencional é obtido através de um lingote forjado e refundido, o pó metálico utilizado no processo de impressão é obtido através de um processo de atomização e classificação.

Figura 14 - Desenho esquemático do processo obtenção de pó metálico por atomização do aço.



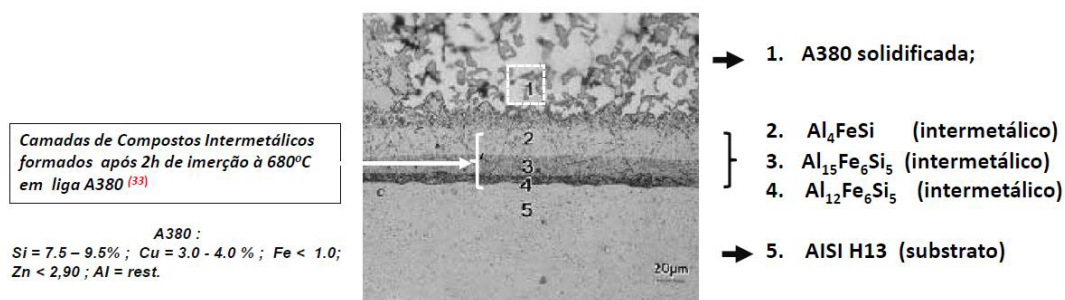
Fonte: BÖHLER UDDEHOLM – GRUPO VOESTALPINE - 2022

Nesta seleção de materiais, devemos ter como requisito específico o tipo de liga de alumínio a que se pretende injetar, ou seja, quais peças serão fabricadas, tamanho do molde, vida útil necessária, tempos de ciclos etc. São dados importantes que se necessita para que seja possível realizar o projeto obedecendo a estas condições de contorno. MAYER, ANDRE RENAN et al – 2024

2.4 REVESTIMENTOS PVD

Os revestimentos por deposição física de vapor (PVD) é uma técnica utilizada para melhorar a resistência ao desgaste nos componentes dos moldes de injeção de alumínio, pois devido à afinidade química do alumínio e o elemento ferro presente no substrato do componente do molde, como pode ser observado na figura 15, além das solicitações mecânicas, e oscilações térmicas, temos um desgaste prematuro devido a essa interação química. Com isso os revestimentos vêm com o objetivo de evitar esse contato direto do alumínio com a superfície da cavidade do molde, além de aumentar as tensões compressivas superficiais, fazendo com que o componente revestido tenha uma vida útil prolongada. SÜTŐOVÁ, ANDREA et al – 2024

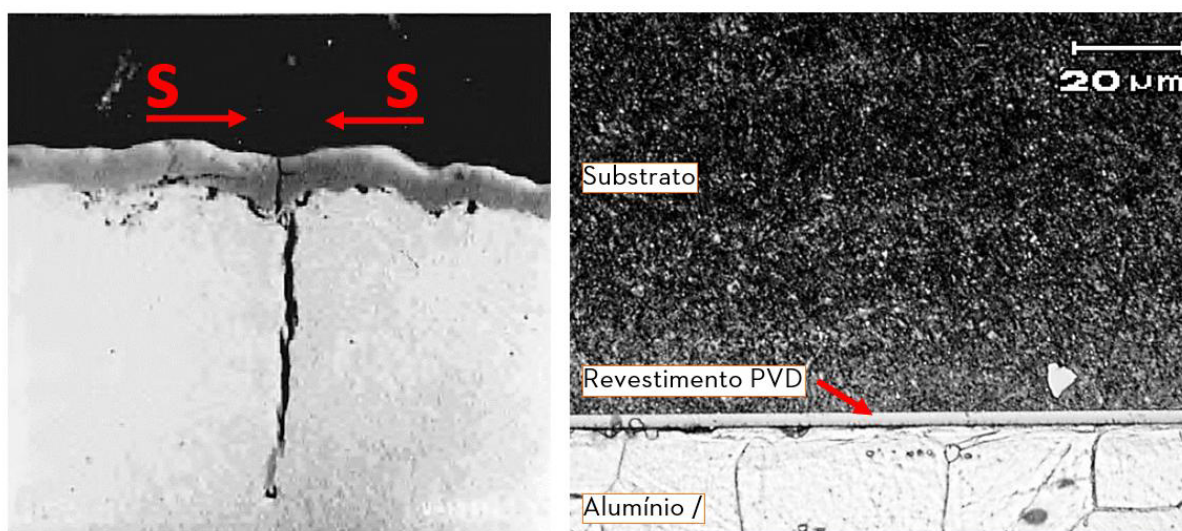
Figura 15 - Micrografia de aço ferramenta com agarre de alumínio, ou seja, ligação metálica entre o alumínio e o elemento ferro do substrato da cavidade



Fonte: SÜTŐOVÁ et al - 2024

O revestimento cerâmico aplicado pelo processo de Deposição Física de Vapor (PVD) atua como um intensificador de cargas compressivas na superfície da cavidade do molde, figura 17. Esse efeito não apenas retarda o surgimento de trincas térmicas, comuns em processos de injeção de alta pressão, mas também protege o molde contra a aderência do material injetado ao substrato. Esse revestimento forma uma barreira eficiente que reduz o desgaste por abrasão e corrosão, promovendo maior vida útil ao molde e garantindo a estabilidade dimensional das peças. Além disso, a camada de PVD contribui para uma distribuição uniforme da pressão durante a injeção, melhorando a qualidade superficial do componente final e reduzindo a necessidade de retrabalho nas peças. SÜTŐOVÁ, Andrea et al - 2024

Figura 16 - Revestimento PVD em um componente com trincas térmicas superficiais



Fonte: Oerlikon Balzers – 2024

2.5 AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL E VIABILIDADE ECONÔMICA

A longevidade e a viabilidade econômica de moldes produzidos por manufatura aditiva são aspectos críticos para sua adoção em larga escala. Comparar a vida útil, resistência ao desgaste e os custos de produção desses moldes com os fabricados por métodos tradicionais é essencial para entender os conceitos de decisões envolvidos. Estudos econômicos que consideram não apenas os custos iniciais, mas também os benefícios em termos de redução de ciclo, eficiência energética e

facilidade de manutenção, são fundamentais para fornecer uma base sólida para a implementação industrial da tecnologia.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração da manufatura aditiva na produção de moldes para injeção de alumínio sob pressão oferece promessas significativas, desde que desafios como a seleção de materiais, otimização de projetos e avaliação da vida útil sejam abordados de maneira rigorosa. A pesquisa proposta busca contribuir para esse campo ao explorar essas questões de forma abrangente, utilizando uma abordagem combinada de simulações, testes experimentais e análises econômicas.

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado em cinco etapas distintas.

3.0.1 Projeto do Molde: A primeira etapa foi desenvolvida o projeto do molde atendendo todos os requisitos necessários para que o molde fosse construído,

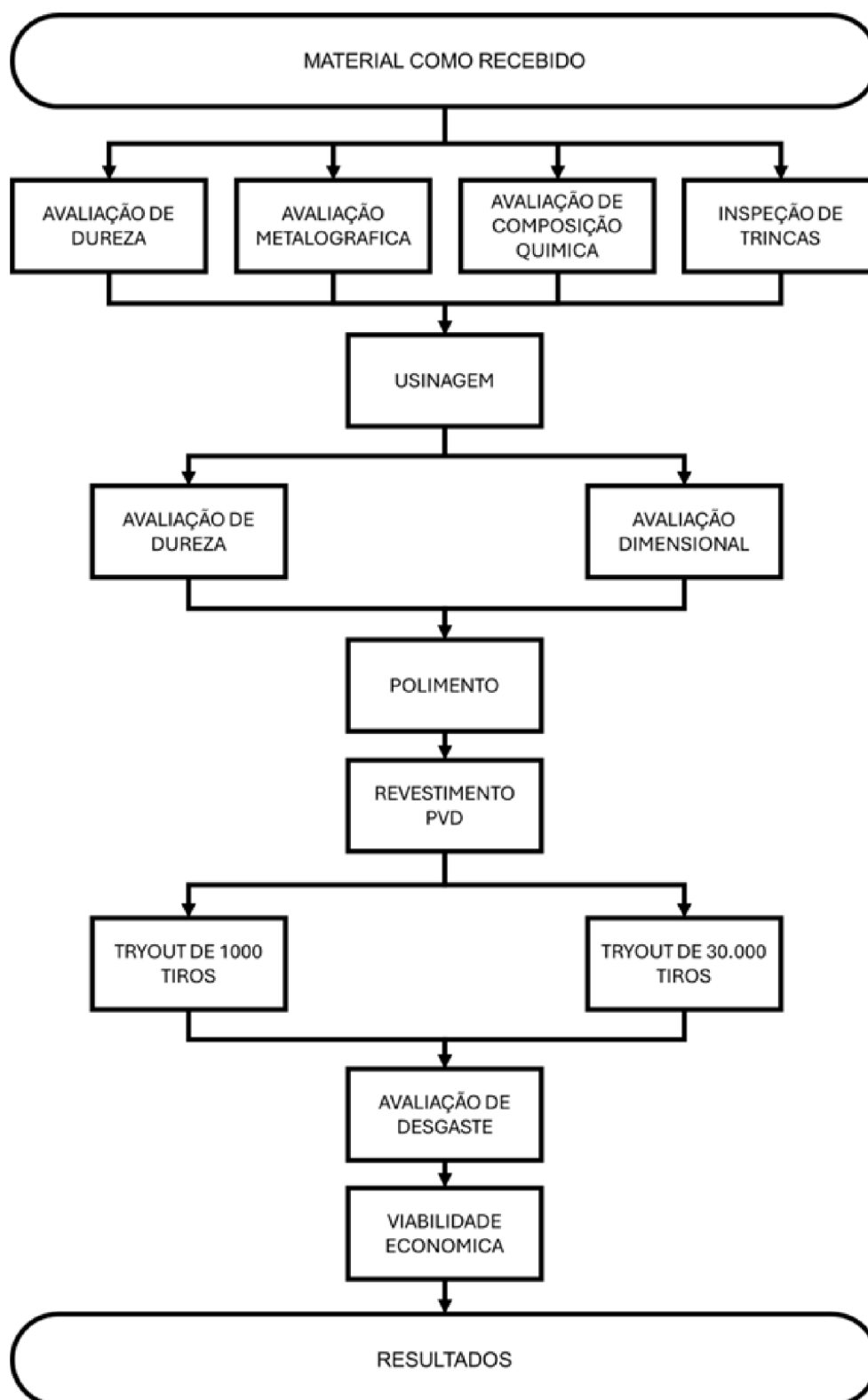
3.0.2 Escolha e definição dos materiais: A segunda etapa foi realizado a escolha do material a ser utilizado como substrato impresso, como testes de aplicação de revestimentos de nitretação e PVD,

3.0.3 Validação do material - A terceira etapa consistiu na validação do material em produção com um lote de 1000 ciclos, nesta fase, foi atentado quanto a integridade do substrato durante o teste, após a validação deste teste de 1000 ciclos de injeção, foi realizado um teste de 30.000 ciclos o que corresponde a um lote de produção normal com o objetivo de novamente verificar a resistência do substrato e o comportamento em um lote de produção.

3.0.4 Teste de vida útil: A quarta etapa foi realizado um teste de vida útil nos componentes impressos, foi realizado 3 produções com o mesmo componente sem que este sofresse qualquer recuperação ou manutenção com o objetivo de se verificar qual o limite de vida útil do substrato impresso, chegando em 80.000 ciclos de injeção.

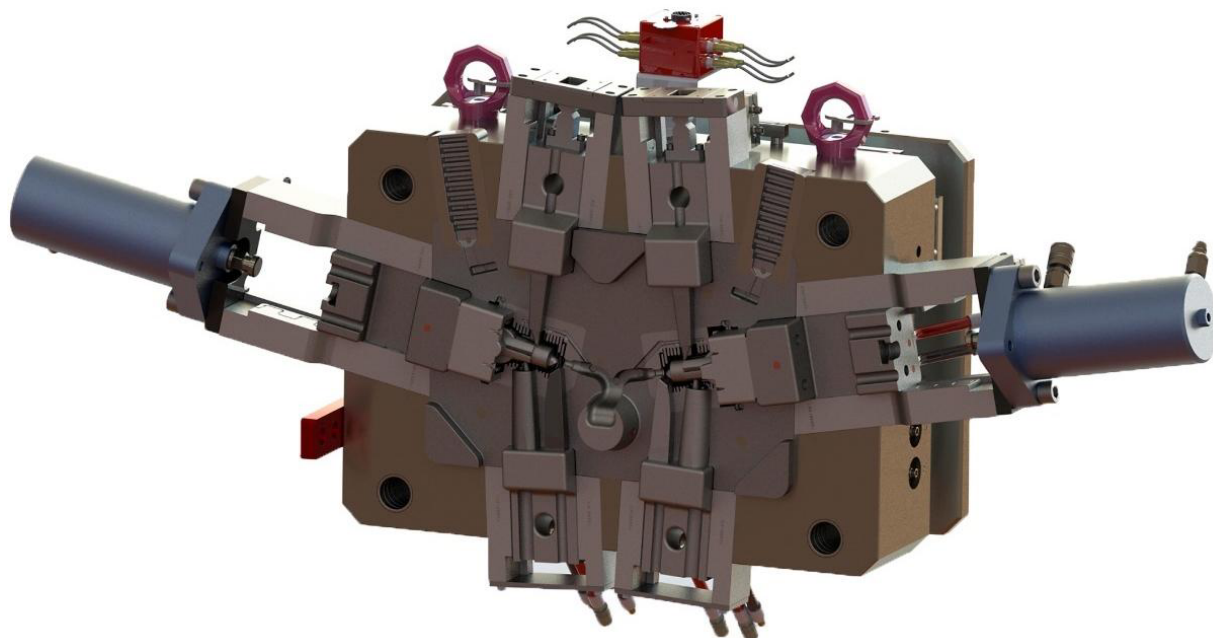
3.0.5 Estudo de viabilidade econômica: Se avaliou os custos de fabricação dos componentes impressos bem como a viabilidade econômica dos componentes do molde confeccionados por manufatura aditiva LPBF além de um comparativo econômico entre a produção pelo método convencional e por um molde com componente impresso por manufatura aditiva.

Figura 17 - Fluxograma Metodológico



Fonte: do próprio autor

Figura 18 - Imagem do molde de injeção de alumínio sob pressão utilizado nos experimentos de implementação de manufatura aditiva.



Fonte: do próprio autor

3.1 MATERIAL COMO RECEBIDO

Os componentes foram impressos em material DIN 1.2709 e em uma impressora Truprint 3000 na empresa Trumpf Laser, Ditzingen - Alemanha, para essa impressão foi considerado 3mm de sobremetal em cada face do componente impresso, para que se tivesse segurança durante a fase usinagem.

A dureza especificada do substrato impresso se definiu em 53HRC. Conforme sugestões de datasheet

Figura 19 - Componentes impressos como recebido em aço DIN 1.2709 produzido por LPBF



Fonte: Do próprio autor

3.2 AVALIAÇÃO DE DUREZA

Foi realizado a preparação de uma superfície com um processo de retífica de uma das faces do substrato para a medição de dureza para que se obtivesse uma medição mais confiável, visto que o componente como recebido estava com uma superfície disforme e com uma rugosidade elevada. $\pm 25R_z$

Tabela 1 - Orientações do fabricante de pó metálico quanto ao procedimento que deve ser seguindo para o tratamento térmico por envelhecimento do substrato DIN1.2709

Descrição	Composição	Dureza	Tratamento solubilização	Endurecimento
DIN 1.2709	18%Ni, 9%Cr, 4,8%Mo, 0,7%Ti	40 - 54 HRC	940°C, 2h, RAC	490°C, 6h: 52-54HRC 530°C, 6h: 47-51 HRC 570°C, 6h: 42-46 HRC

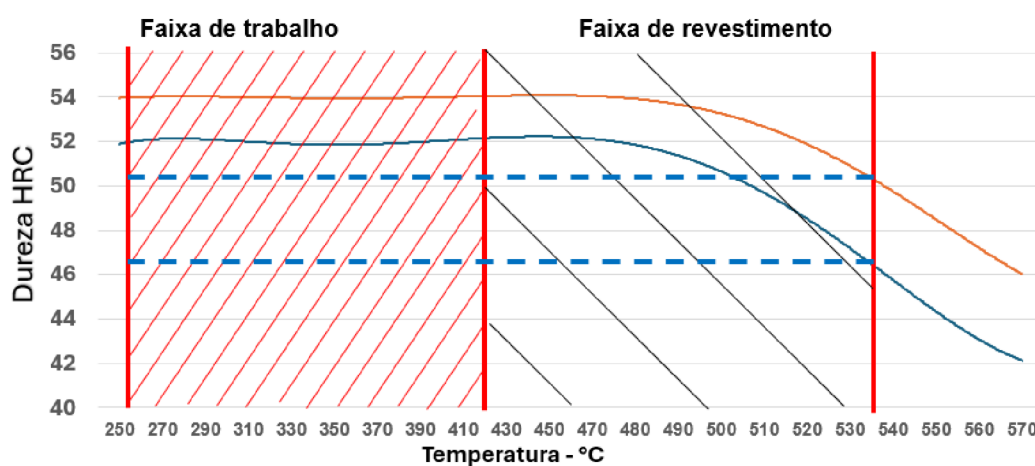
Fonte: Höganäs – 2024

Figura 20 - Medição de dureza do componente impresso como recebido em escala Hockwell C



Fonte: Do próprio Autor

Figura 21 - Interpretação quanto a faixa de temperatura de trabalho do componente no molde, faixa de temperatura do componente durante o processo de revestimento e a faixa de dureza final do substrato DIN 1.2709



Fonte: Do próprio Autor

Foi especificado a dureza de 52HRC $\pm$ 2HRC devido às faixas de temperatura que foram utilizadas para a aplicação dos revestimentos de nitretação e PVD, temperaturas estas que podem afetar a dureza do substrato.

3.3 INSPEÇÃO DE TRINCAS.

A inspeção do componente foi realizada utilizando duas técnicas distintas:

- Inspeção por partículas magnéticas, foi imprescindível pois indicou os locais com descontinuidades na superfície do substrato.

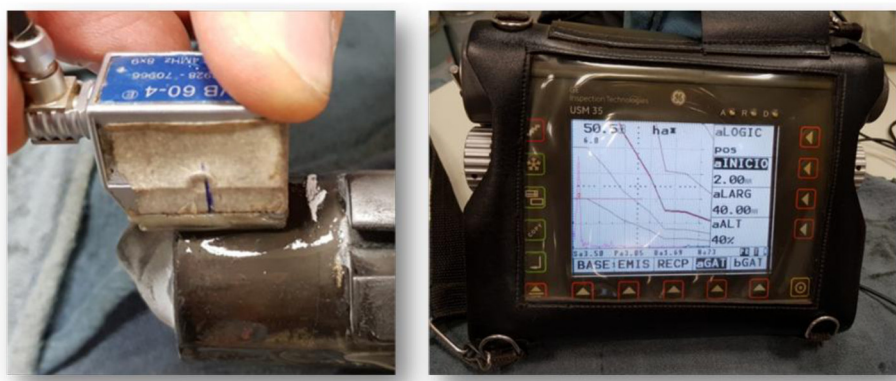
- Técnica de medição por ultrassom pode ser possível quantificar a profundidade de trincas presentes. O substrato aprovado não apresentou nenhuma descontinuidade superficial no substrato pelo processo de inspeção por partículas magnéticas conforme se pode ver na figura 23.

Figura 22 - Inspeção de trincas por partícula magnética e por ultrassom – Componente conforme.



Fonte: Do próprio autor

Figura 23 - Inspeção de trincas por ultrassom com equipamento GE USM 35.



Fonte: Do próprio autor

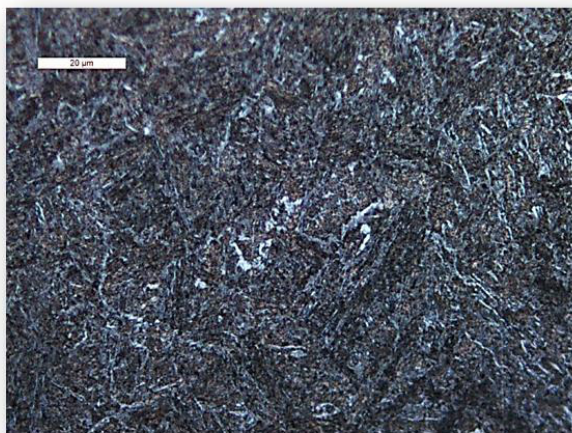
Com apresentado na figura 23, não foi identificado nenhuma trinca subsuperficial no substrato analisado. Confirmou-se um substrato de densidade acima dos 99,85% perfeito para componentes a que se destina o teste.

3.4 AVALIAÇÃO METALOGRAFICA.

A avaliação metalográfica foi realizada seguindo o procedimento sugerido por COLPAERT – Metalografia dos Produtos siderúrgicos, 2008 pg 68 – 81. Realizado o corte da amostra, preparado o embutimento em resina, realizado o polimento em lixas até grana de 1200, em seguida, o espelhamento com pasta diamantada até grana de 1µm, foi realizado o ataque com reagente kallings nº2 e avaliado em microscópio ótico.

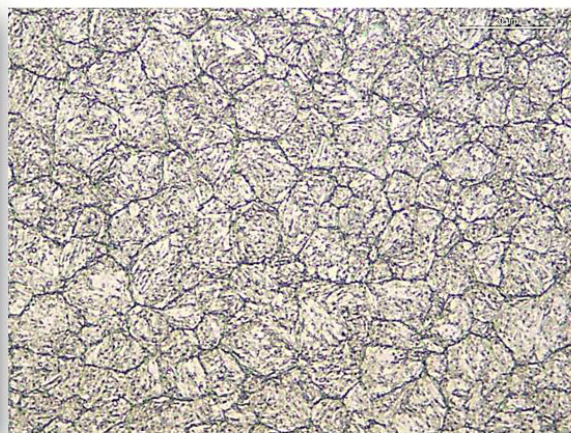
Figura 24 - Micrografia comparativa entre os materiais DIN 1.2709 e o aço DIN 1.2344 escala de 20µm.

AÇO MARAGING 18Ni



DIN 1.2709

AÇO AISI H13



DIN 1.2344

Fonte: Do próprio Autor

3.5 AVALIAÇÃO QUÍMICA DO SUBSTRATO.

Foi realizado a medição da composição química da liga do item impresso, a fim de se confirmar que o substrato avaliado se tratava mesmo de um aço DIN 1.2709.

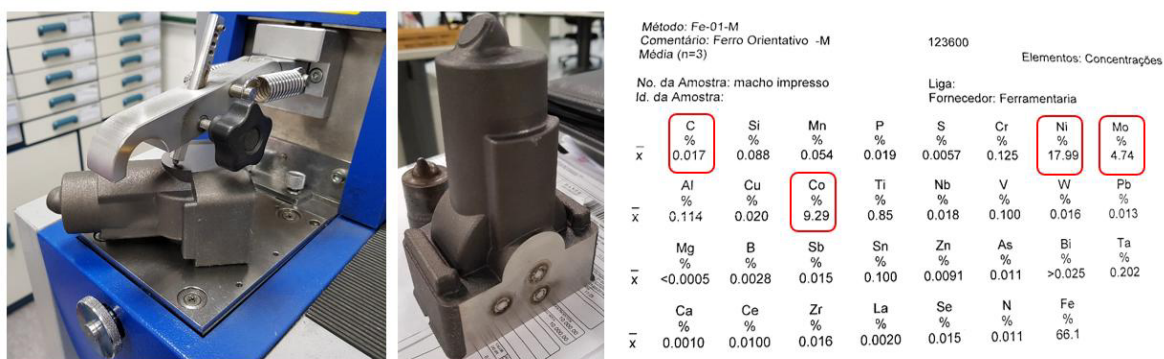
Conforme a figura 24 é possível verificar que o substrato avaliado está de acordo com a composição química padrão do aço DIN 1.2709.

Tabela 2 - Informações de composição química do substrato DIN 1.2709, fornecido pelo fabricante Höganäs

Composition (%)								
Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr,Cu	C	Mn,Si	P, S
17-19	8,5-9,5	4,5-5,2	0,6-0,8	0,05-0,15	Each <0,5	0,03	Each < 0,1	Each<0,01

Fonte: Höganäs – 2024

Figura 25 - Medição da composição química do substrato por espectrografia



Fonte: Do próprio autor

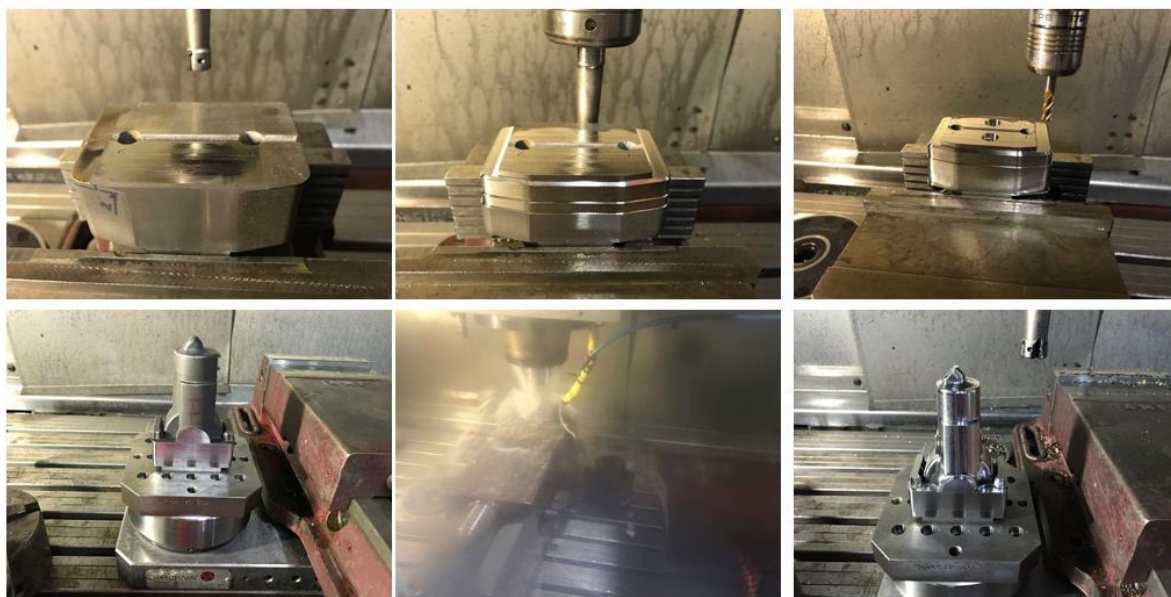
3.6 USINAGEM DOS COMPONENTES.

A usinagem dos componentes foi realizada em centro de usinagem HERMLE 5 eixos e eletroerosão por penetração em um equipamento Agie Charmilles – Form 3000.

Foi realizado uma avaliação de desgaste dos ferramentais de usinagem ou esforços de corte excessivos que impossibilitassem a produção destes componentes.

O componente inicialmente foi fixo em morsa para que se fizesse o esquadrejamento de referência e as furações para fixação em dispositivos EROWA da segunda operação em diante.

Figura 26 - Processo de usinagem do postigo impresso em aço DIN 1.2709



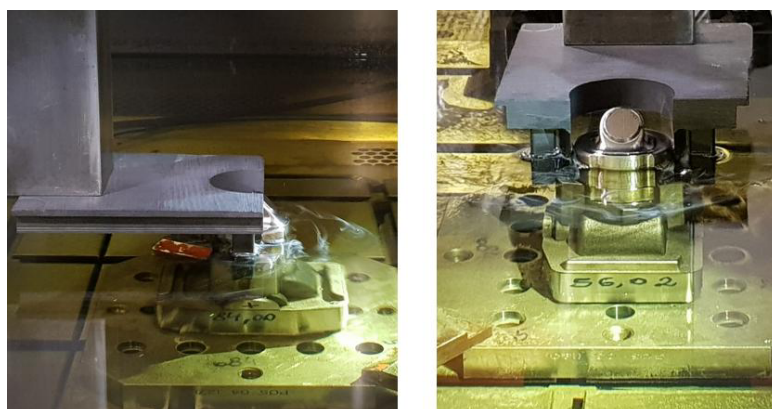
Fonte: Do próprio autor

Tabela 3 - Medição de composição química de aços para trabalho aquecido disponíveis no mercado Brasileiro.

AÇO	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%Co	%V	%Fe
DIN 1.2709	-	0,25	1,97	18,09	8,16	0,44	0,35	0,13	0,06	70,00
DIN 1.2367 - A	0,36	0,39	0,62	5,23	0,06	2,68	0,04	0,01	0,64	89,80
DIN 1.2367 - B	0,28	0,21	0,47	5,02	0,10	2,34	0,07	0,01	0,54	90,95
DIN 1.2367 - C	0,15	0,35	0,29	5,83	0,10	2,09	0,06	0,01	0,57	90,20
DIN 1.2344 - D	0,33	0,36	0,65	5,92	0,49	2,50	0,06	0,02	0,60	88,90

Fonte: Do próprio autor

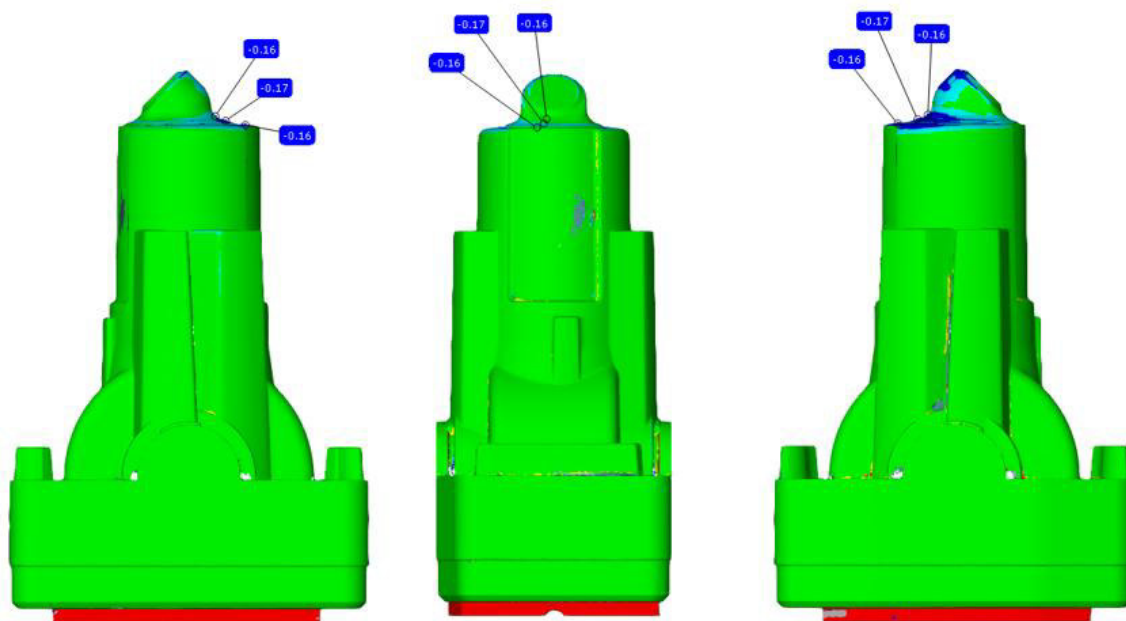
Figura 27 - Processo de usinagem do componente impresso por eletroerosão por penetração e eletrodos de grafite.



Fonte: Do próprio autor

Após a usinagem do componente foi realizado as medições para validação de conformidade dimensional antes de realizar a aplicação dos revestimentos nitretação e PVD conforme pode se observar na figura 34

Figura 28 - Medição do componente após usinagem por escaneamento 3D. Tolerância geral de especificação $\pm 0,02\text{mm}$



Fonte: Do próprio autor

Tomou-se o cuidado de deixar um sobremetal na parte inferior do substrato para a medição de dureza do substrato após o processo de aplicação de nitretação e PVD.

3.7 MEDIÇÃO DE DUREZA APÓS USINAGEM.

A fim de certificar a conformidade do substrato quanto a dureza planejada de 53HRC, uma nova medição foi realizada como visto na figura 35

Figura 29 - Medição de dureza do componente impresso após usinagem em escala Hockwell C



Fonte: Do próprio Autor

O processo de polimento é realizado no fornecedor de revestimento PVD, desta forma a especificação de solicitada para o fornecedor foi que toda a área de moldagem tivesse uma rugosidade de 3,2 RZ.

3.8 REVESTIMENTOS NITRETAÇÃO E PVD

3.8.1 NITRETAÇÃO.

Foi escolhido para o substrato o processo de revestimento Duplex, ou seja, um processo que contenha uma camada nitretada como superfície endurecida embaixo da camada depositada de PVD para que se obtivesse uma maior durabilidade do PVD no substrato conforme a orientação do fabricante de PVD, Oerlikon Balzer em seu processo BALINIT.

Foi enviado três amostras para o fornecedor Oerlikon Balzer com o objetivo de se verificar a eficácia do processo de nitretação no aço DIN 1.2709 já que não havia histórico e processo definido para a aplicação deste revestimento em componentes de HPDC confeccionado deste material no mercado brasileiro.

3.8.2 APLICAÇÃO DE PVD

Após a validação do processo de aplicação da camada nitretada no componente impresso, foi possível enviar o componente para a aplicação do revestimento PVD. A especificação da espessura da camada de PVD, CrAlNi – da empresa Oerlikon Balzer, foi de 6µm - 12µm, medido em equipamento de difração de RX e assegurado pelo fornecedor.

Figura 30 - Componente impresso após a aplicação do PVD. Componente aprovado e apto a ser montado no molde para o início dos testes práticos.



Fonte: Do próprio autor

3.8.3 TESTE FINAL DE DUREZA

Realizado um último teste de inspeção de dureza do substrato, Figura 33, antes da utilização do componente impresso no lote de produção de 1000 ciclos.

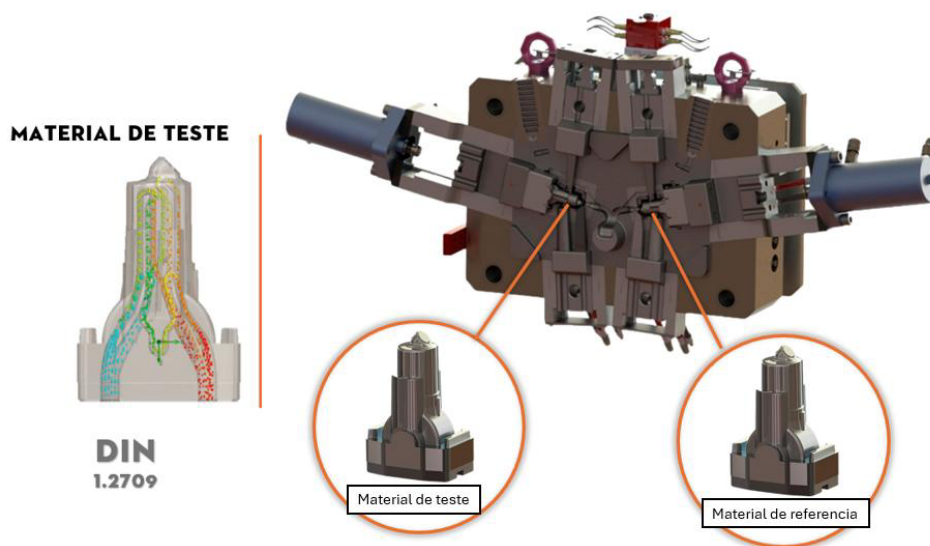
Figura 31 - Medição de dureza da amostra do substrato DIN 1.2709 após os procedimentos de revestimento de nitretação e PVD.



Fonte: Do próprio autor

3.9 TESTE DE 1000 CICLOS DE INJEÇÃO os postigos foram montados em um molde de 2 cavidades, como demonstrado na figura 34, sendo uma das cavidades a que se destinava ao teste prático de resistência do postigo impresso e a outra cavidade será a que se destinará a avaliação comparativa de resistência.

Figura 32 - Desenho esquemático de teste dos postigos impressos



Fonte: do próprio autor

O molde foi montado em uma injetora de marca IDRA com capacidade de injeção de alumínio de 560 kN de força de fechamento. Foi realizado um teste controlado de 1000 ciclos com o objetivo de se validar, conforme dito, a resistência do substrato impresso.

O fluido refrigerante utilizado durante os testes foi água deionizada com temperatura de 65°C, e pressão de 6 bar.

O processo de testes se deu primeiramente com a avaliação térmica do componente impresso com a mesma vazão de água no circuito de refrigeração entre os dois componentes conforme vemos na figura 35, verificou-se que mesmo o circuito conformado tendo uma perda de carga hidráulica maior que o do componente com circuito convencional, foi possível manter a vazão de água entre os circuitos.

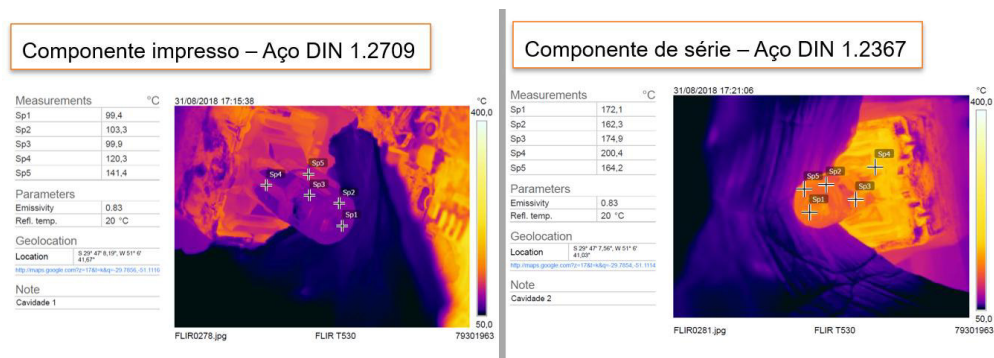
Figura 33 - Medição do fluxo de água que passa pelos canais de refrigeração dos componentes de teste do molde já montados no molde.



Fonte: Do próprio autor

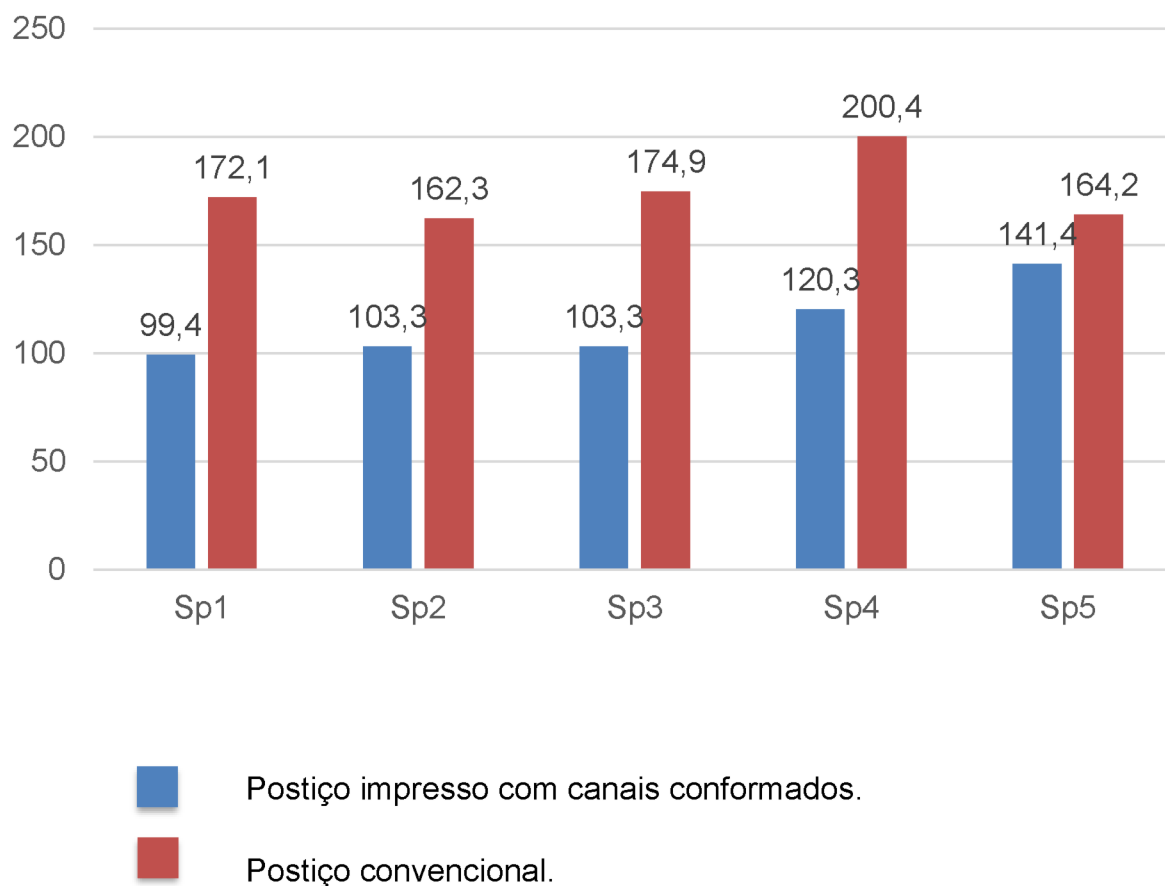
Após a estabilidade térmica do molde o que ocorreu com uma sequência de 100 ciclos de injeção, cerca de 1,5 horas produzindo sem interrupções, foi coletado a temperatura dos componentes para avaliar a diferença térmica entre os componentes.

Figura 34 - Medição térmica comparativa entre os componentes impressos e convencional.



Fonte: Do próprio Autor

Figura 35 - Gráfico comparativo de temperatura entre os dois postigos de teste, postigos impressos, (Azul), e postigos convencionais, (Vermelho)



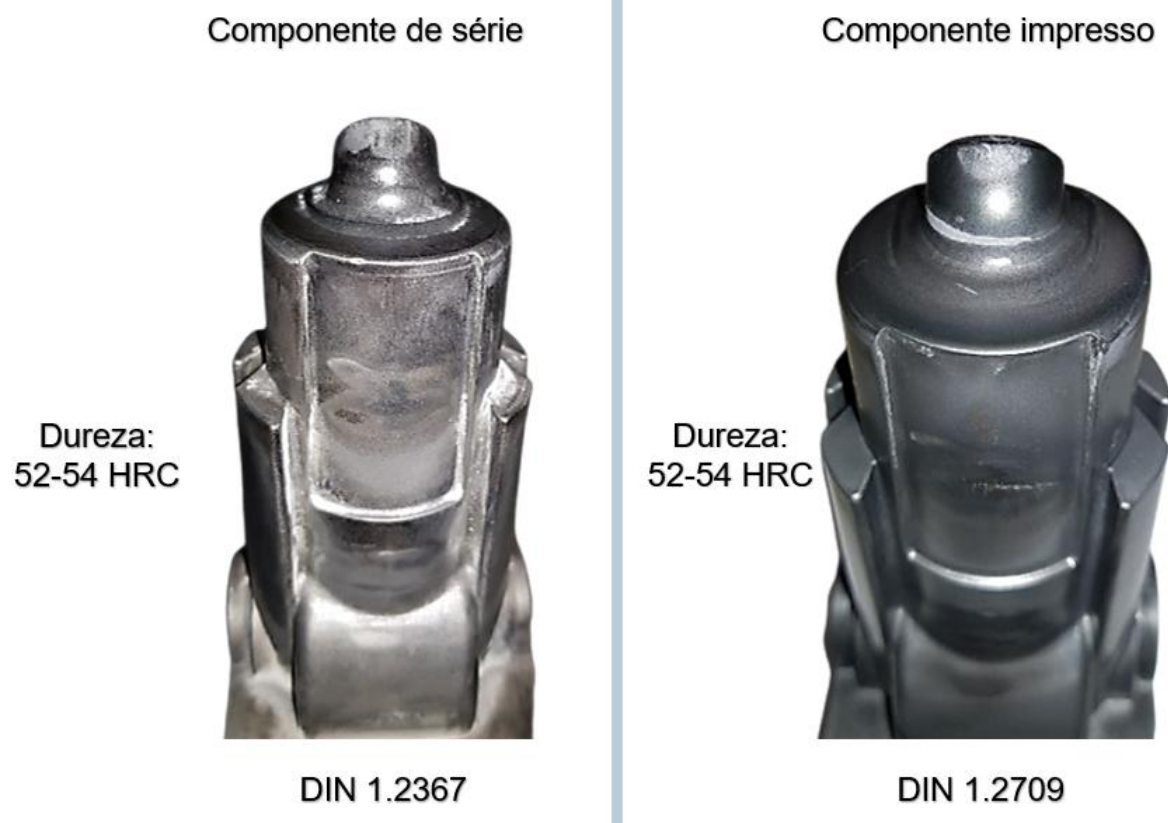
Fonte: Do próprio autor

Validado a regulagem de máquina e tendo o processo estabilizado, realizou-se o teste inicial de injeção de 1000 ciclos de injeção.

Após os testes de 1000 ciclos, foram removidos os componentes do molde, e realizado uma limpeza com pano para remoção da graxa e sujeiras presente nas superfícies do componente, e em seguida, foi disponibilizado para medição e avaliação visual.

Verificado as condições quando agarramento de material na superfície do substrato impresso de forma visual e comparado com o componente de referência confeccionado em aço DIN 1.2367.

Figura 36 - Avaliação visual comparativa entre os componentes impresso e de série após o teste inicial de 1000 ciclos de injeção.



Fonte: Do próprio autor

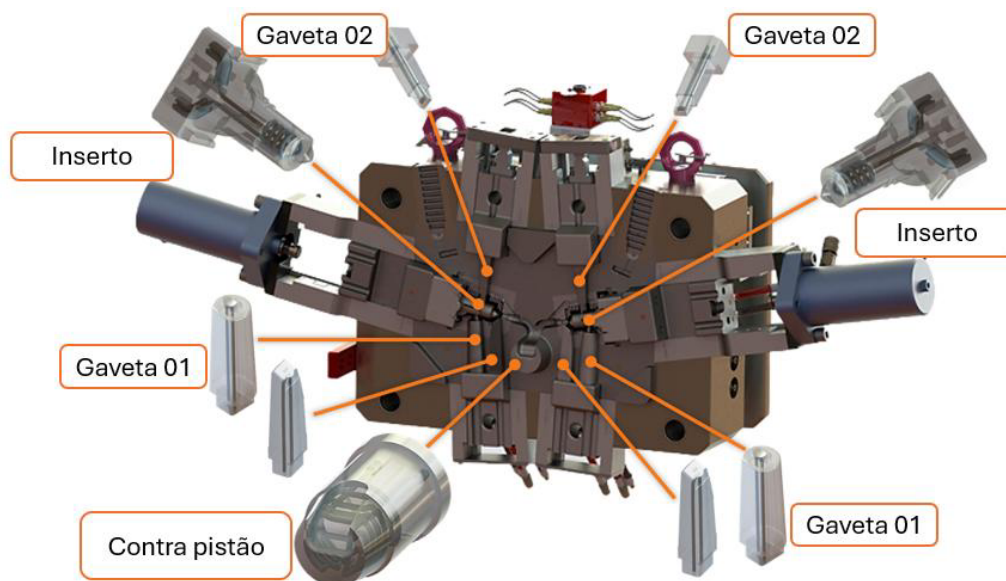
3.10 INJEÇÃO DE UM LOTE DE PRODUÇÃO DE 30.000 CICLOS

Foi produzido um lote de 30.000 ciclos de injeção o que corresponde a um lote planejado normal padrão de produção até que o molde seja enviado para a manutenção preventiva.

Foi montado no molde, além dos componentes testados, o contra pistão e gavetas, todos com canais conformados com o objetivo de ter um balanço térmico correto no molde de injeção.

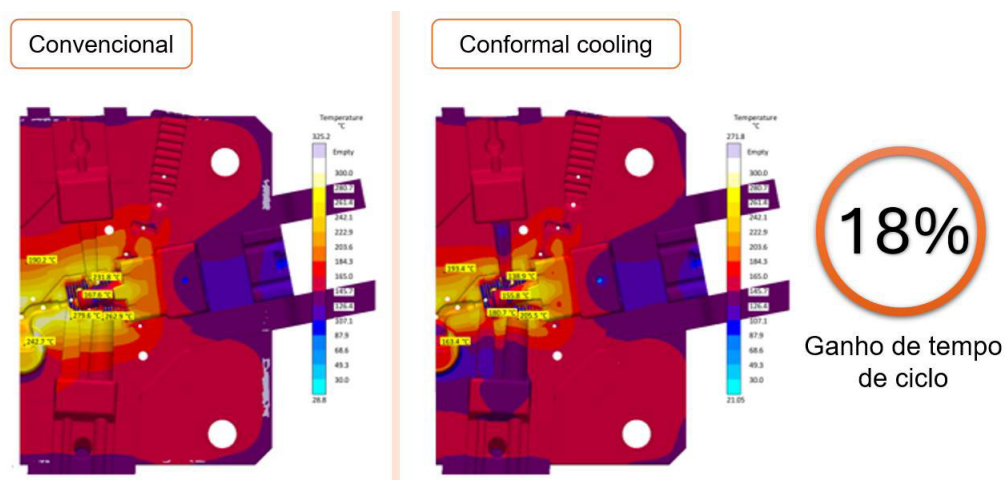
Foi planejado com auxílio de simulação de injeção - CFD, um tempo de ciclo 18% menor que o tempo de ciclo atual de referência devido a utilização dos canais conformados e melhor condição de remoção de calor do molde.

Figura 37 - Molde de injeção de alumínio com todos os periféricos confeccionados por manufatura aditiva e com os canais conformados devidamente otimizados.



Fonte: Do próprio autor

Figura 38 – Simulação de perfil térmico do molde avaliando o ciclo de injeção para um ganho de tempo de ciclo de 18%



Fonte: Do próprio autor

Após o lote de produção, realizou-se a desmontagem completa do molde para avaliação visual dos componentes. Nesta parada de produção foi realizado uma manutenção preventiva no molde a fim de corrigir deformações que ocorreram durante o lote de produção nos demais componentes.

Os componentes impressos foram inspecionados novamente com técnicas de partículas magnéticas e ultrassom com o objetivo investigativo de se avaliar a formação de trincas térmicas ou fissuras que pudessem inutilizar o componente em uma produção futura.

3.11 AVALIAÇÃO DE DURABILIDADE DO COMPONENTE IMPRESSO

Avaliação de durabilidade do componente impresso, a última etapa dos testes funcionais do substrato impresso, foi realizada fazendo vários lotes de injeção tendo como critério de avaliação: Dimensional, trincas térmicas, quebras catastróficas, deslocamento do PVD, inutilização do circuito de refrigeração.

Ao chegar em 80.000 ciclos de injeção foi decidido retirar o componente para que fosse retrabalhado a superfície devido a um pequeno desgaste inerente ao processo de injeção de alumínio.

Figura 39 - Componente impresso com teste de vida após 80.000 ciclos de injeção.

Aço DIN 1.2709
Dureza: 52-54 HRC
Revestimento: Duplex Formera
Nº ciclos: 80.000
Tempo de ciclo: 43 segundos



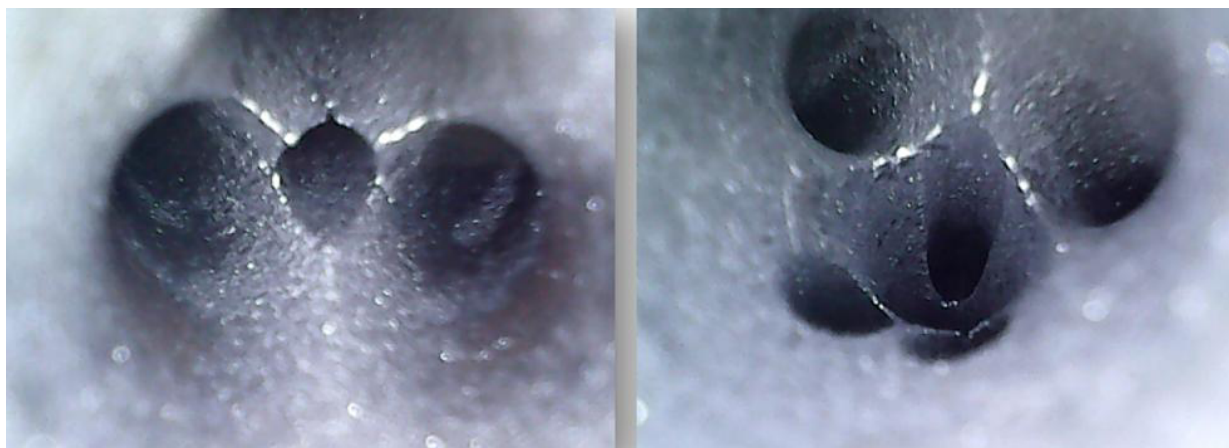
Fonte: Do próprio autor

3.11.1 AVALIAÇÃO DOS CANAIS CONFORMADOS QUANTO A CALCIFICAÇÃO.

Após os lotes de produção que somaram 80.000 ciclos de utilização do componente, foi desmontado os componentes e revisado os canais de refrigeração por boroscopia, com o objetivo de se identificar a deposição de calcificados provenientes da água.

Como informação: O circuito de refrigeração é fechado e o fluido de arrefecimento é água deionizada. Fazendo com que a formação de calcificados seja minimizado.

Figura 40 - Canais de refrigeração do componente impresso avaliado por boroscopia após um lote de 80.000 ciclos de injeção.



Fonte: Do próprio autor

3.12 AVALIAÇÃO ECONÔMICA COMPARATIVA ENTRE O PROCESSO CONVENCIONAL E POR MANUFATURA ADITIVA.

A avaliação econômica foi realizada em duas etapas,

3.12.1 Etapa 01:

Avaliado os custos de fabricação do componente e comparado com o componente de série.

3.12.2 Etapa 02:

Avaliado a contribuição ao custo do produto do injetado tendo como parâmetro a vida útil do componente impresso.

3.12.3 Etapa 03:

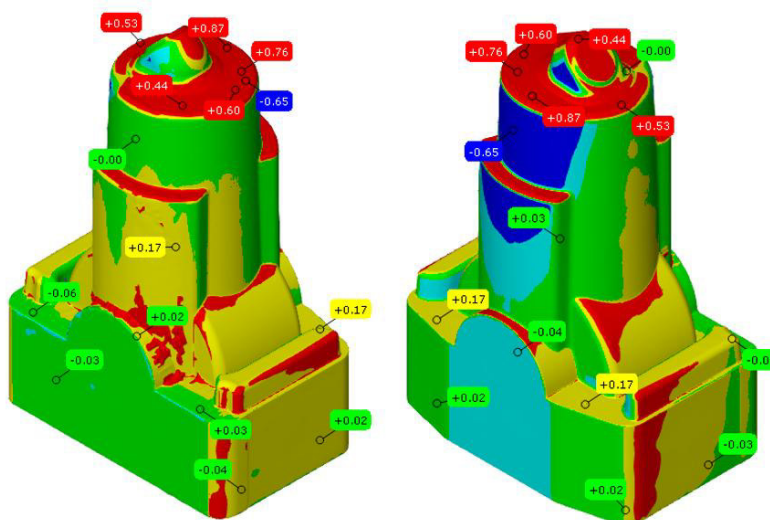
Realizado a avaliação de todo o processo de produtivo e realizado os cálculos de avaliação econômica comparativa de custos de produção entre um molde de injeção de alumínio sob pressão convencional e um molde com manufatura aditiva e canais conformados.

4.0 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

4.1 MATERIAL COMO RECEBIDO.

Tomou-se a decisão de acrescentar 3mm de sobremetal em cada face do componente impresso devido a desvios dimensionais verificados em testes preliminares, figura 42. As investigações realizadas, em conjunto com o fornecedor, indicaram uma falta de acuracidade no processo de impressão.

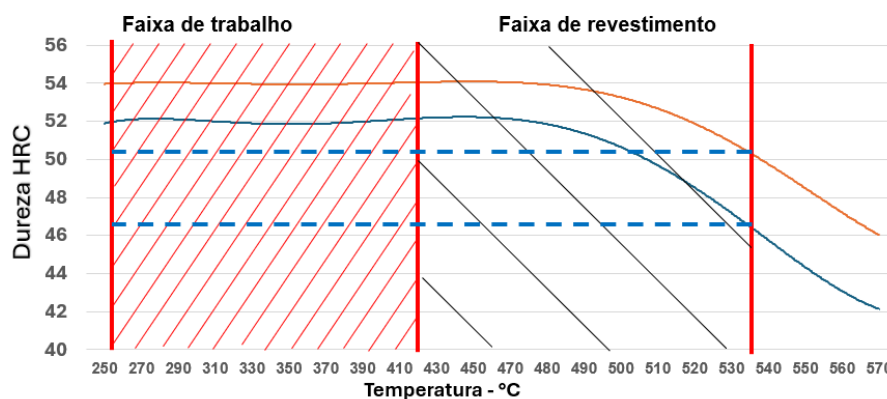
Figura 41 - Componente impresso com desvio dimensional no sobremetal de impressão



Fonte: Do próprio autor

O componente foi solicitado já com uma dureza de 53HRC, conforme discutido por STRAKOSOVA, Angelina et al – 2022, pois havia o receio de que durante os processos de revestimentos, nitretação e PVD, essa dureza pudesse ser reduzida de forma significativa visto que as faixas de endurecimento, estão próximas às temperaturas utilizadas durante o revestimento.

Figura 42 - Interpretação quanto a faixa de temperatura de trabalho do componente no molde, faixa de temperatura do componente durante o processo de revestimento e a faixa de dureza final do substrato DIN 1.2709



Fonte: Do próprio Autor

É possível verificar a corroboração dos valores sugeridos pelo fornecedor de pó metálico com as avaliações de STRAKOSOVA, Angelina et al – 2022, onde é verificado as durezas do substrato DIN 1.2709 testado o processo de envelhecimento em diferentes temperaturas.

4.2 INSPEÇÃO DE TRINCAS.

Foram identificadas diversas não conformidades durante o processo de impressão em amostras preliminares, problemas relativos a parâmetros de impressão e a qualidade do pó metálico, foram responsáveis pela produção de vários componentes não conforme. Deste a quantidade de sobremetal necessária para o acabamento e calibração dimensional até falta de integridade dos componentes como podemos ver na figura 44

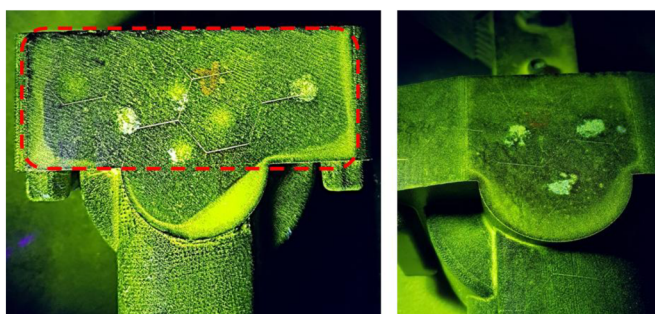
O tipo de pó metálico utilizado na produção de componentes impressos por LPBF, se reciclados e classificados de forma incorreta, influenciam na qualidade do substrato quanto a porosidades e descontinuidades. SUKAL, J.; PALOUSEK – 2018, em nossa aplicação não foi possível utilizar pó metálico reciclado. Com as técnicas atuais de classificação já está sendo possível a utilização de matéria prima com uma mescla de pó reciclável com diferentes granulometrias, com um resultado satisfatório para componentes impressos. HORN, Max et al – 2020.

Figura 43 - Componente impresso não conforme



Fonte: Do próprio autor

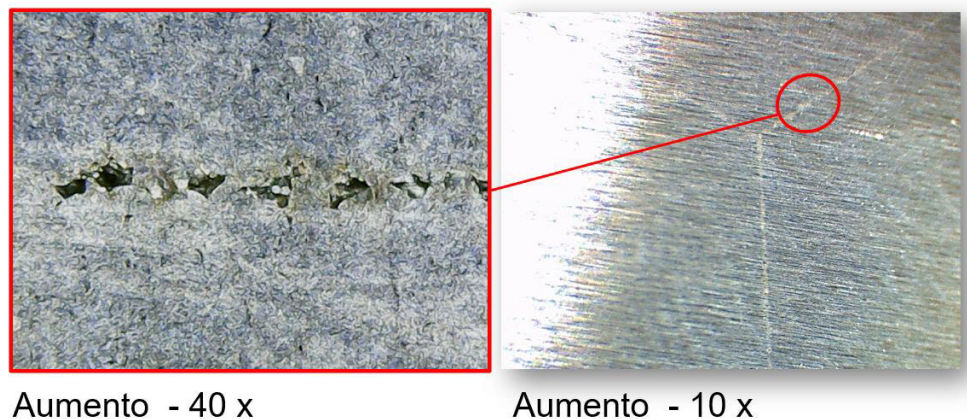
Figura 44 - Inspeção de trincas por partículas magnéticas de um componente impresso com falha de impressão.



Fonte: Do próprio autor

Conforme vemos na imagem, há a figura de hexágonos regulares na superfície do substrato, estas marcações se revelaram descontinuidades passantes em todo o substrato após as inspeções de trincas, por partículas magnéticas e ultrassom. Foi decidido com base neste resultado não utilizar o componente nestas condições devido ao risco de vazamento de água pelos canais conformados. Caso isso viesse a ocorrer, vazamento do circuito de refrigeração, durante a produção teríamos o potencial de ocorrer um grave acidente durante o processo de injeção, visto que o alumínio líquido em temperatura de 680°C durante o processo de injeção sob pressão faria com que a água proveniente do vazamento sofresse evaporação instantânea. Se considerarmos que um mol de água, (H_2O), tem 18g, e o mesmo em vapor ocupa 22,4L, poderíamos prever uma expansão volumétrica de 22,4L para cada 18g de água.

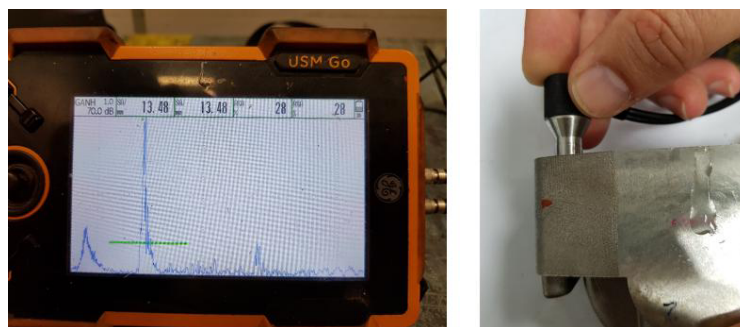
Figura 45 - Avaliação de macrografia do substrato evidenciando o perfil das descontinuidades apresentadas no substrato.



Fonte: Do próprio Autor

HORN, Max et al – 2020 aborda a influência das contaminações cruzadas do pó metálico no processo de setup de uma impressora, ou seja, durante a troca do tipo de material da impressora. Em nossas avaliações de causa raiz pelo qual o componente apresentou falhas de impressão, os fatores levantados foram: Contaminação do pó metálico, parâmetros de impressão fora do especificado para o substrato DIN 1.2709, a estratégia de impressão não foi a mais correta para o processo de impressão, como também discutido por MONKOVA, Katarina et al – 2019.

Figura 46 - Inspeção de trincas por ultrassom com equipamento GE USM 35 do componente não conforme.



Fonte: Do próprio autor

4.3 AVALIAÇÃO QUÍMICA DO SUBSTRATO.

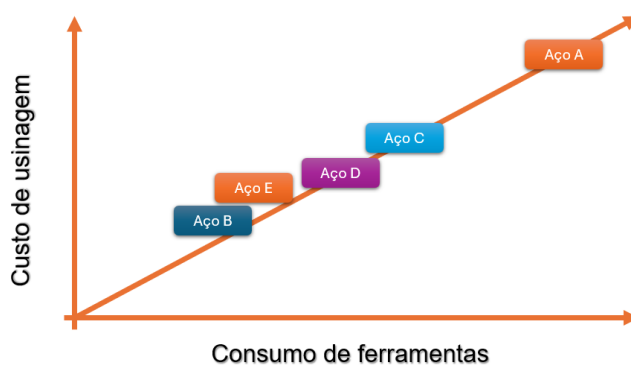
A validação da composição química do substrato se tornou mandatório, pois, HORN, Max et al – 2020, comenta a influência nociva na resistência do substrato devido a contaminantes presentes no pó metálico devido a mistura durante o processo de troca de material nas impressoras. O contato direto com a equipe da empresa Höganäs foi crucial para a validação dos elementos químicos do material impresso.

4.4 USINAGEM DOS COMPONENTES.

Testes de usinagem realizados entre materiais DIN 1.2367 fornecedor A e DIN 1.2367 fornecedor B, figura 47, mostraram uma relevante diferença na usinabilidade destes materiais, chegando a ter uma diferença de até 10 vezes no consumo de ferramentas. Quando consultado os fornecedores em seu centro de pesquisa, aço A na Suécia e aço B no Japão, explicou-se que a variação na taxa de elementos químicos eram o grande responsável por essa diferença nos resultados. Neste aposto, os fabricantes informaram que a variação nos percentuais de silício foram os grandes responsáveis pela diferença na usinabilidade. Com base neste histórico prático se fez importante a avaliação da usinabilidade do substrato impresso de DIN 1.2709. como também discutido por PIEKŁO, Jarosław – 2020, ASNAFI, Nader - 2021 e BOIVIE, K. et al – 2021.

É importante discutir o tema referente a fabricação de um molde de injeção, pois a maior participação nos custos de fabricação, é na grande maioria das vezes, do processo de usinagem, e ter um aço com uma usinabilidade ruim pode inviabilizar o projeto.

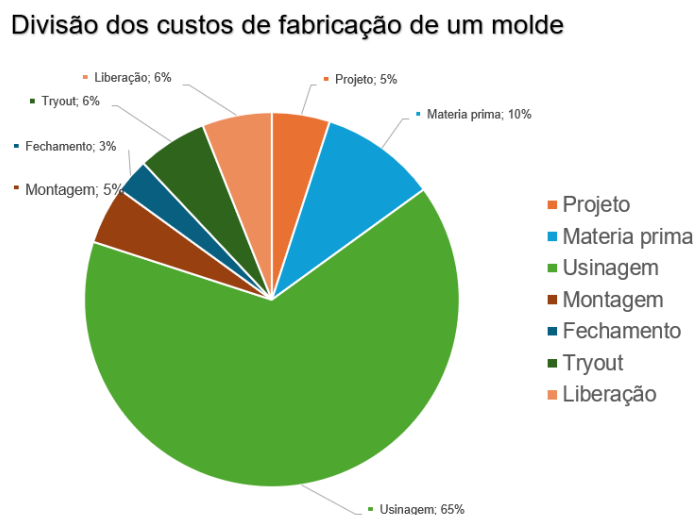
Figura 47 - Avaliação de custos de usinagem dos diferentes aços para construção de cavidade de moldes de injeção de alumínio sob pressão.



Fonte: do próprio Autor

Aço A: DIN 1.2367	Modificado NADCA - Grade C
Aço B: DIN 1.2367	NADCA – Grade C
Aço C: DIN 1.2344	Modificado NADCA – Grade B
Aço D: DIN 1.2344	NADCA – Grade A
Aço E: DIN 1.2709 Impresso	Ainda não catalogado pela NADCA.

Figura 48 - Custos de fabricação de um molde por etapa de fabricação



Fonte: Do próprio Autor

Em aços ferramenta como DIN 1.2367 e DIN 1.2344, como vemos na tabela 4, alguns elementos de liga, como teor de silício, cobalto, Vanádio, entre outros, presente na liga, são agentes que influenciam diretamente o processo de usinagem de componentes de aço ferramenta endurecidos.

Tabela 4 - Tabela indicativa de elementos de liga que influenciam a usinabilidade do aço DIN 1.2367 e DIN 1.2344

Elemento	Efeito Positivo	Efeito Negativo na Usinabilidade
Carbono (C)	Aumenta a dureza e resistência ao desgaste	Torna o material mais difícil de cortar, desgaste de ferramentas
Cromo (Cr)	Aumenta resistência à corrosão e ao desgaste	Forma carbonetos abrasivos, desgaste acelerado das ferramentas
Molibdênio (Mo)	Aumenta resistência ao calor e desgaste	Aumenta a dureza, exigindo mais força de corte
Vanádio (V)	Aumenta resistência ao desgaste com carbonetos duros	Carbonetos extremamente abrasivos, desgaste das ferramentas
Silício (Si)	Melhora resistência ao amolecimento em alta temperatura	Aumenta dureza, reduzindo a eficiência de corte
Manganês (Mn)	Melhora resistência à tração e dureza	Aumenta a abrasividade, promove desgaste das ferramentas
Níquel (Ni)	Aumenta tenacidade e resistência ao impacto	Torna o aço mais difícil de cortar

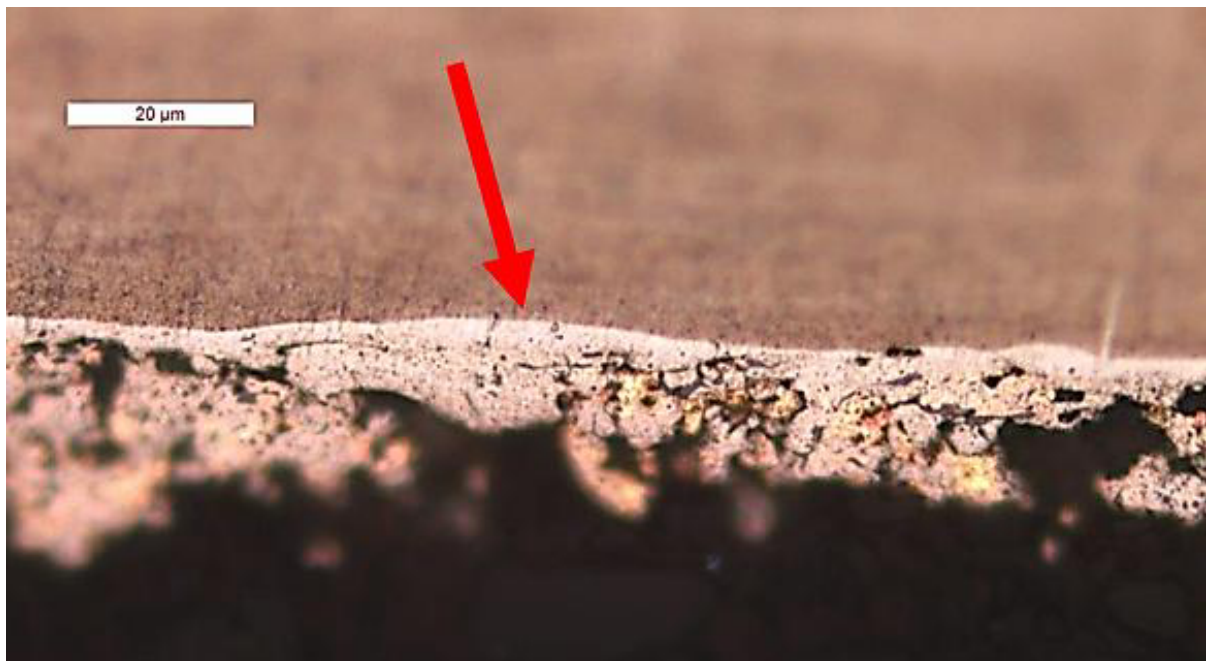
Fonte: ANTONSSON, Erik K – 2009

Embora os percentuais dos elementos químicos presentes na liga DIN 1.2709: níquel, cromo e manganês, serem superiores que a dos demais aços medidos, não foi percebido diferenças na usinabilidade do componente impresso em comparação aos aços DIN 1.2344 e DIN 1.2367.

Durante o processo de usinagem por eletroerosão, houve um consumo maior de eletrodos, chegando o consumo, em algumas regiões, até duas vezes mais desgaste de eletrodos que em aços como DIN 1.2344 e DIN 1.2367. observou-se também conforme se pode ver na figura 49 uma formação maior de camada branca o que posteriormente, foi removida por polimento manual, há uma suspeita que a quantidade de elementos de liga deste substrato, DIN 1.2709, seja o causador deste fenômeno.

MOLINETTI, Anderson et al – 2016, discute, que a influência do tipo de dielétrico utilizado no processo de eletroerosão, assim como, os parâmetros de usinagem influenciam diretamente no processo da formação de camada branca em processo de usinagem por eletroerosão.

Figura 49 - Micrografia onde indica a formação de camada branca do substrato de DIN 1.2709 usinado por eletroerosão.



Fonte: do Próprio Autor

4.5 REVESTIMENTOS NITRETAÇÃO E PVD

4.5.1 NITRETAÇÃO.

Foi escolhido do fornecedor Oerlikon Balzer o revestimento Duplex Balinit Formera, (CrAlN) para o recobrimento do inserto impresso. Este processo já é amplamente recomendado pelo fabricante para componentes fabricados de forma convencional em DIN 1.2344 e DIN 1.2367. Para moldes de injeção sob pressão, sugere-se antes do revestimento PVD ser aplicado, aplicar uma camada difundida de nitretos para aumentar a dureza superficial do componente e com isso ter uma melhor performance e vida útil do PVD, WANG, Bo – 2016.

A falta de conhecimento no processo de nitretação do material DIN 1.2709, fez com que um estudo de validação fosse necessário antes de finalmente ser aplicado o PVD no componente.

Foram enviadas três amostras para o fornecedor de nitretação à Plasma Oerlikon Balzer, Figura 50, com o objetivo de se verificar a eficácia do processo de nitretação no aço DIN 1.2709. Devido a propriedade intelectual resguardado com o fornecedor não será possível descrever esse processo neste material, ficando para um próximo artigo em parceria com o fornecedor de nitretação.

Os parâmetros de controle para a camada nitretada se estabeleceu como:

- Espessura da camada nitretada: 0,06mm – 0,1mm
- Dureza da camada nitretada: 800 – 1200 HV no primeiro ponto de medição à 0,02mm da superfície do substrato conforme Figura 30.

Figura 50 - Amostras avaliadas por micrografia para avaliação e teste de difusão da nitretação à plasma no substrato de DIN 1.2709



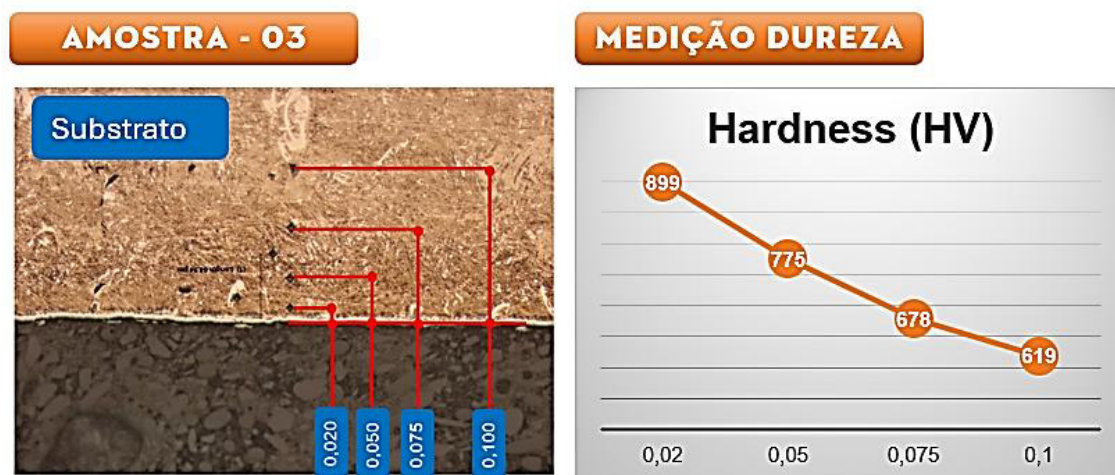
Fonte: Do próprio autor

- A amostra 01: Após o ciclo de nitretação em forno a Plasma, não se verificou camada de nitretação significativa sendo considerado uma nitretação não conforme.

- Amostra 02: Não foi possível verificar camada nitretada, somente uma formação desforme de camada branca sem adesão sob o substrato.

- Amostra 03: Foi possível verificar uma camada nitretada conforme e com as condições de controle estabelecidas.

Figura 51 - Micrografia da amostra 03 submetida à difusão de nitretação à plasma.



Fonte: Do próprio autor

A nitretação dos componentes para moldes de injeção de alumínio sob pressão é de extrema importância, pois, com o aumento gradativo da superficial em função da difusão, promove uma condição mais adequada para que o revestimento PVD seja depositado e com isso tenha uma vida útil mais duradoura. ÖZKAN, Doğuş et al – 2023, Oerlikon Balzer - 2024

4.5.2 APLICAÇÃO DE PVD

Após a validação do processo de aplicação da camada nitretada no componente impresso, foi possível enviar o componente para a aplicação do revestimento PVD. A especificação da espessura da camada de PVD CrAlN – da empresa Oerlikon Balzer, foi de 6µm - 12µm, medido em equipamento de difração de RX e assegurado pelo fornecedor.

4.5.3 TESTE FINAL DE DUREZA

A avaliação final de dureza pode-se realizar um comparativo entre as fases de fabricação do componente e julgar a influência do processo na dureza do componente.

Figura 52 - Comparativo de dureza do substrato durante as fases de fabricação.



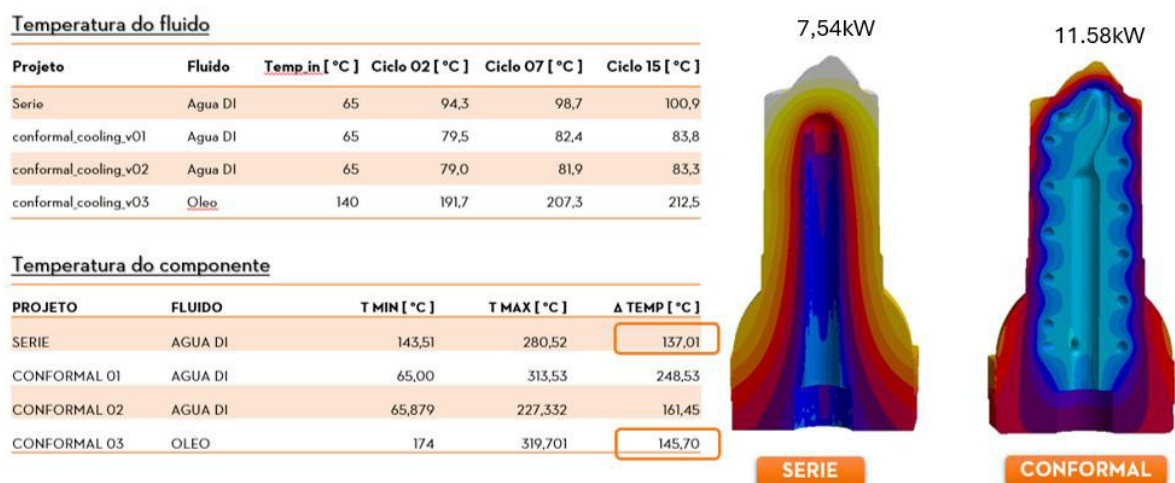
Fonte: Do próprio autor

STRAKOSOVA, Angelina et al – 2022, comenta a influência das temperaturas e tempo de exposição do substrato durante os tratamentos térmicos, uma vez que o componente foi submetido a 2 processos térmicos após o processo de envelhecimento, o primeiro durante a nitretação e o segundo durante a aplicação do PVD, foi possível concluir nesta avaliação que os processos de nitretação e aplicação de PVD não tiveram influência na dureza do substrato.

4.6 TESTE DE 1000 CICLOS DE INJEÇÃO.

O principal objetivo deste teste de 1000 ciclos de injeção seria verificar as condições do substrato resistir ao processo de injeção de alumínio, além de testar as condições de processo, pois com o aumento da área de convecção interna no componente, aumentou também de forma significativa a taxa de remoção de calor por convecção.

Figura 53 - Simulação comparativa entre o componente de série e o com canais conformados.



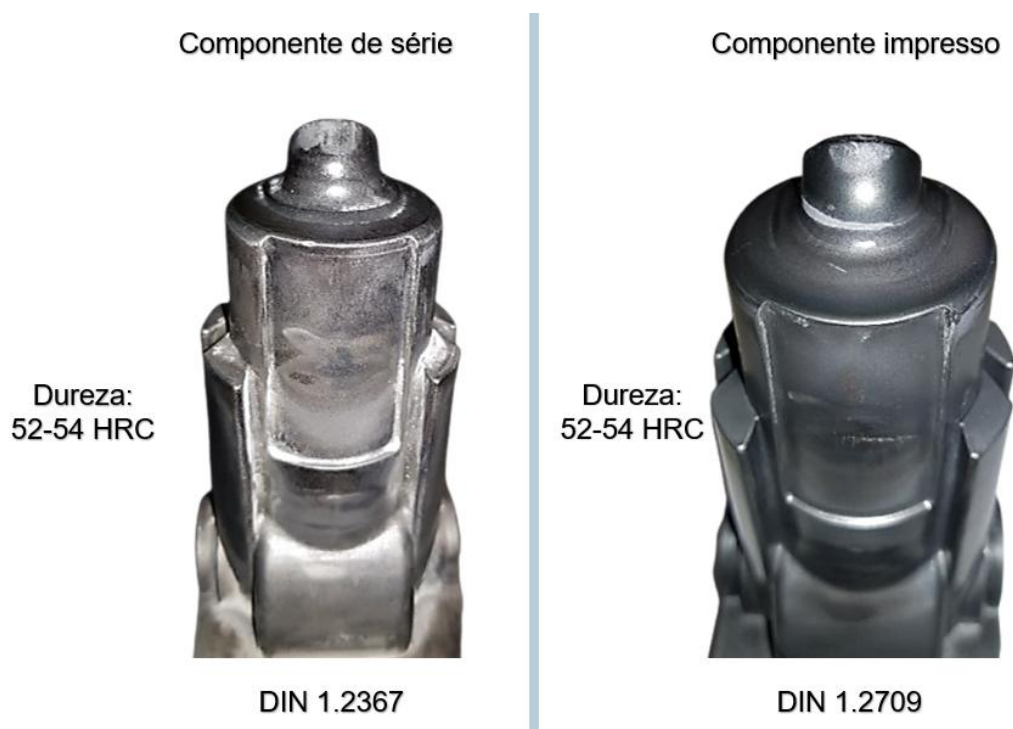
Fonte: Do próprio autor

O circuito de refrigeração conformado demonstra uma maior taxa de remoção de calor e homogeneidade térmica. O teste de 1000 ciclos validou esse fenômeno e respondeu quanto a resistência do substrato.

Foi realizada uma avaliação visual dos componentes testados, e constatou-se uma condição dimensional visivelmente superior no componente fabricado por manufatura aditiva (Figura 54). Observou-se que a adesão residual de alumínio foi maior no substrato convencional, devido à sua maior temperatura de trabalho. Um ponto relevante é que, mesmo com a temperatura de trabalho reduzida no componente impresso, não houve qualquer dificuldade na formação do filme de desmoldante. Isso ocorreu porque a temperatura da superfície do substrato permaneceu dentro do

intervalo especificado para garantir a formação adequada do filme de desmoldante, conforme descrito por GRAFF et al. - 1993, FIORESE et al. 2017 e MAYER et al. 2024.

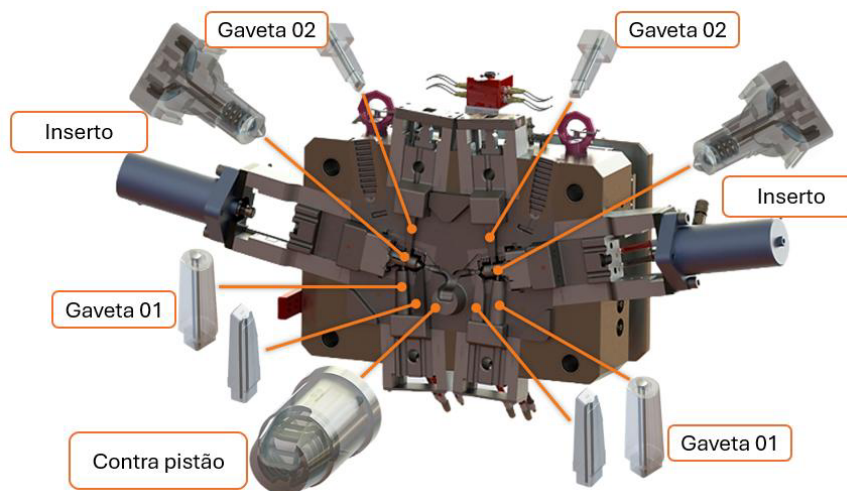
Figura 54 - Avaliação visual comparativa entre os componentes impresso e de série após o teste inicial de 1000 ciclos de injeção.



Fonte: Do próprio autor

Concluimos, com base neste teste inicial, que o componente impresso, devido às condições visuais e dimensionais observadas, apresenta potencial para suportar um lote completo de produção de 30.000 ciclos. Com esses resultados promissores, avançamos para a próxima etapa, implementando todos os componentes impressos no molde: Contra pistão, Gavetas e Postiços. Essa abordagem garantiu um equilíbrio térmico adequado, evitando discrepâncias no perfil térmico do molde. A Figura 55 ilustra o molde completo com todos os componentes impressos devidamente integrados.

Figura 55 - Molde com todos os componentes preparados para o teste de 30.000 ciclos

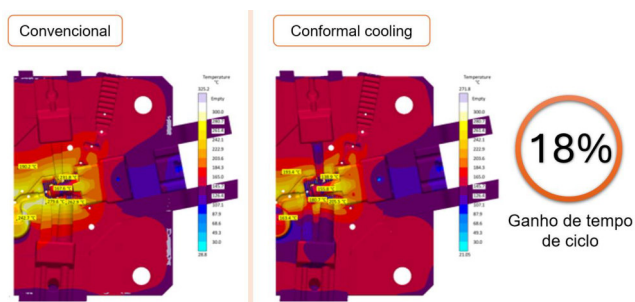


Fonte: Do próprio autor

4.7 INJEÇÃO DE UM LOTE DE PRODUÇÃO DE 30.000 CICLOS

Após validar a resistência do substrato, foram integrados ao molde todos os componentes críticos relacionados à troca de calor e ao equilíbrio térmico. O objetivo desta etapa foi avaliar o potencial da manufatura aditiva na redução do tempo de ciclo. Conforme apresentado na Figura 64, o estudo inicial, incluindo análises por DOE (Design of Experiments) para otimização do tempo de ciclo, indicou que o ganho máximo projetado era de 18%.

Figura 56 -Simulação de perfil térmico do molde.

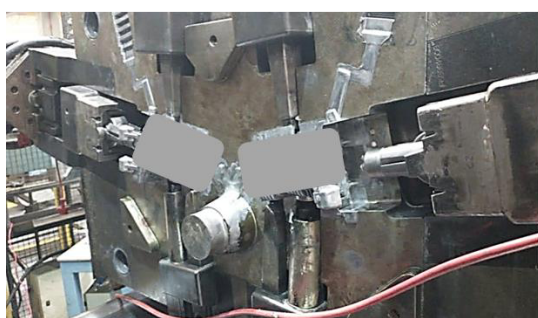
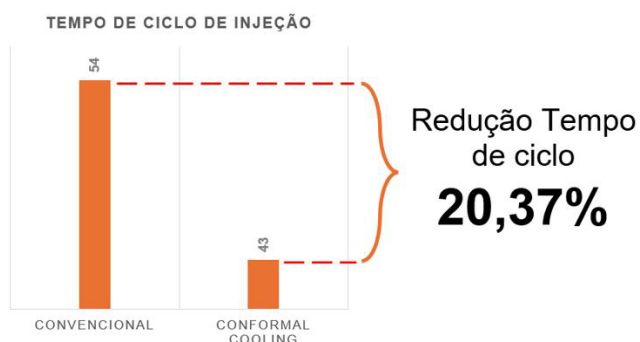


Fonte: Do próprio autor

Durante o teste de injeção com 30.000 ciclos, o tempo de ciclo foi reduzido em 20,37%, superando a projeção inicial de 18% em comparação ao processo convencional. Além disso, a estabilidade de produção atingiu 93% de eficiência global, um desempenho significativamente superior aos 65% do processo convencional. Esses resultados evidenciam que a utilização de componentes com canais de refrigeração otimizados, fabricados por manufatura aditiva, é uma solução eficaz para aumentar a produtividade na injeção de alumínio.

Adicionalmente, a aplicação da manufatura aditiva trouxe melhorias substanciais na eficiência do uso de recursos, reduzindo o consumo energético na produção de peças injetadas e contribuindo para a diminuição das emissões de CO₂, conforme destacado por WIEDENEGGER - 2021.

Figura 57 – Avaliação de tempo de ciclo com o molde com componentes impressos produzindo um lote de 30.000 ciclos de injeção.



Fonte: Do próprio autor

Após o lote de produção, o molde foi enviado para manutenção preventiva, e os componentes foram avaliados quanto a desgastes e trincas térmicas resultantes do processo produtivo. Durante as inspeções realizadas com ultrassom e partículas magnéticas, verificou-se que o substrato impresso em DIN 1.2709 não apresentou trincas térmicas nem desgastes superficiais, mesmo após 30.000 ciclos de injeção. Por outro lado, o componente de série apresentou trincas térmicas superficiais e falhas na camada externa de PVD, exigindo sua remoção e reaplicação.

Esses resultados, ilustrados na Figura 58 e apoiados pelos estudos de PIEKŁO - 2020, demonstram que o substrato impresso, combinado com canais de refrigeração

conformados, é altamente eficaz em processos de injeção de alumínio sob pressão. Essa solução contribui para o aumento da produtividade, a extensão da vida útil dos componentes e a redução de defeitos nas peças fundidas, conforme também reforçado por WIEDENEGGER – 2021.

Figura 58 - Comparativo visual avaliando as condições de durabilidade dos componentes, impresso e de série após uma produção de 30.000 ciclos de injeção.



Fonte: Do próprio autor

Além da notável melhora na integridade do substrato impresso em comparação ao componente de série, a redução do gradiente térmico no substrato resulta em uma distribuição mais uniforme das tensões térmicas durante o processo produtivo. Esse fator é um dos principais responsáveis pelo aumento da vida útil do componente, conforme indicado por NOGOWIZIN - 2011 e PIEKŁO, JAROSŁAW – 2020.

De acordo com a análise matemática das tensões térmicas, a variação térmica no substrato é uma das características mais influentes na ocorrência de fadiga térmica. Essa relação é descrita pela equação da tensão térmica:

$$\sigma_t = \frac{E \cdot \alpha \cdot (T_f - T_i)}{1 - \nu}$$

Onde:

- σ_t é a tensão térmica;
- E é o módulo de elasticidade do material;
- α é o coeficiente de dilatação térmica;
- T_f e T_i representam, respectivamente, a temperatura final e inicial;
- ν é o coeficiente de Poisson.

Essa equação reflete como a variação térmica afeta diretamente o comportamento do material sob condições cíclicas de trabalho.

4.8 AVALIAÇÃO DE DURABILIDADE DO COMPONENTE IMPRESSO

Ao atingir 80.000 ciclos de injeção, o componente impresso apresentou desgaste superficial causado pelo deslocamento do revestimento PVD. No entanto, destacou-se a ausência de trincas térmicas superficiais, que são frequentemente observadas em aços DIN 1.2367.

Com base nesse resultado, o componente foi enviado ao fornecedor de PVD para a remoção do revestimento original. Após o retorno, a geometria desgastada foi restaurada por meio de uma usinagem de calibração, e o revestimento PVD Duplex Balinit FORMERA, Oerlikon Balzer, foi reaplicado.

Embora os testes tenham sido encerrados em 80.000 ciclos, os resultados indicam um potencial promissor para que o componente alcance até 240.000 ciclos de vida útil.

Figura 59 - Componente impresso com teste de vida após 80.000 ciclos de injeção.

Aço DIN 1.2709
Dureza: 52-54 HRC
Revestimento: Duplex Formera
N° ciclos: 80.000
Tempo de ciclo: 43 segundos



Fonte: Do próprio autor

Esse resultado alcançado implica diretamente em uma redução significativa na necessidade de manutenções preventivas do molde, bem como na frequência de substituição de componentes. A maior durabilidade comprovada do componente impresso não apenas prolonga o tempo de operação do molde, mas também gera diversos benefícios adicionais, como economia de energia, redução nos custos de produção e diminuição das emissões de CO₂ associadas ao processo produtivo.

Além disso, a maior vida útil dos componentes contribui para uma operação mais sustentável, minimizando o descarte de materiais e o consumo de insumos necessários para a fabricação e manutenção. Esses fatores reforçam a eficiência e a viabilidade econômica da adoção de componentes fabricados por manufatura aditiva em processos industriais.

WIEDENEGGER, Armin – 2021

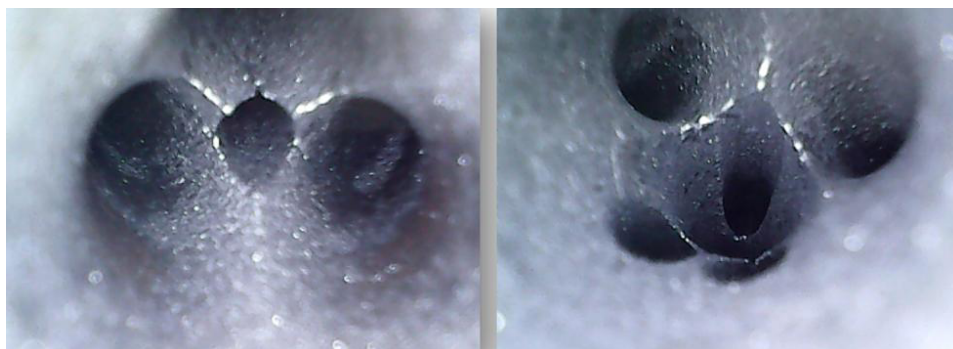
4.9 AVALIAÇÃO DOS CANAIS CONFORMADOS QUANTO A CALCIFICAÇÃO.

Uma dúvida importante sobre a possibilidade de calcificação dos canais internos de refrigeração do componente foi esclarecida. A expectativa inicial era de que o componente perdesse a capacidade de troca térmica devido à deposição de calcificados durante o processo produtivo.

Após 80.000 ciclos de utilização do componente, os canais de refrigeração foram inspecionados por meio de boroscopia, com o objetivo de verificar a presença de calcificados provenientes da água. Conforme mostrado na Figura 60, não foram encontrados sinais de calcificação, e durante o processo produtivo, não houve qualquer indicação de acúmulo de sujeira nos canais de refrigeração.

É relevante destacar que o circuito de refrigeração é fechado e utiliza água deionizada como fluido de arrefecimento, o que minimiza significativamente a formação de calcificados e garante a eficiência térmica do sistema ao longo do tempo.

Figura 60 - Canais de refrigeração do componente impresso avaliado por boroscopia após um lote de 80.000 ciclos de injeção.



Fonte: Do próprio autor

Também é possível observar a ausência total de pits ou óxidos, problemas frequentemente encontrados em materiais de série sob as mesmas condições de operação. A alta variação térmica a que o substrato de série é exposto, aliada à sua composição química e às imperfeições geradas durante o processo de fabricação (como a furação com broca), resulta em regiões de maior concentração de calor.

Essas áreas são submetidas a elevados carregamentos termomecânicos, o que favorece a formação de pits nessas zonas. Com o tempo, esses pits servem como pontos de nucleação de trincas, que, combinadas com o processo de oxidação por carregamento térmico, conduzem o componente à falha. MAYER, Andre Renan et al – 2024.

Figura 61 - Componente com uma quebra catastrófica proveniente de um ponto de oxidação



Fonte: Do próprio Autor

4.10 AVALIAÇÃO ECONÔMICA COMPARATIVA ENTRE O PROCESSO CONVENCIONAL E POR MANUFATURA ADITIVA.

As condições de contorno para os cálculos de custo do processo de manufatura foram estabelecidas com base no histórico de produção dos itens.

O componente de série possui uma vida útil máxima de 60.000 ciclos, com manutenção preventiva programada a cada 30.000 ciclos de injeção. Em contraste, o componente impresso foi projetado para alcançar até 160.000 ciclos de injeção, com um potencial de extensão para 240.000 ciclos, sendo a manutenção preventiva realizada a cada 60.000 ciclos. O limite para a vida útil do componente impresso é determinado pelo critério dimensional de reprovação.

Tabela 5 - Demonstrativos de custos de fabricação dos componentes impressos e convencionais.

Descrição	Matéria prima	Custo de Usinagem	Tratamento Térmico
Inserto de série	R\$ 1.370,51	R\$ 16.153,66	R\$ 6,70
Inserto Impresso	R\$ 17.510,11	R\$ 6.368,72	R\$ 6,70
Revestimento	Custo de fabricação	Vida útil	Custo por peça
R\$ 18.087,21	R\$ 35.618,09	60.000	R\$ 0,59
R\$ 24.441,87	R\$ 48.327,39	180.000	R\$ 0,26

Fonte: Do próprio autor

No cenário apresentado, o componente impresso, quando avaliado isoladamente, apresenta uma vantagem econômica de 55% em relação ao componente convencional.

O custo por peça do componente impresso é de R\$ 0,26, enquanto o custo do componente de série é de R\$ 0,59. Vale ressaltar que, nesta primeira avaliação, estamos considerando apenas o comparativo entre a vida útil dos componentes e seus custos de fabricação.

Além disso, foi realizada uma avaliação sobre a construção de um molde utilizando componentes impressos, comparando-o com um molde fabricado pelo processo convencional.

No segundo cenário, conforme ilustrado na Figura 62, foram considerados os componentes do molde nos cálculos de viabilidade. A referência para os cálculos foi o custo de fabricação de um molde completamente novo, e foi feita a análise da participação dos componentes impressos e de série no custo total de fabricação do molde.

Tabela 6 - Demonstrativo de custos para a comparação dos custos de fabricação de um molde de injeção de alumínio com componentes convencionais versus um molde com componentes impressos.

Descrição	Valor	Participação no custo
Custo de fabricação do molde	R\$ 667.252,22	Referência
Custo de fabricação dos itens de série	R\$ 80.071,74	12%
Custo de fabricação dos itens impresso	R\$ 129.713,64	19%

Fonte: Do próprio autor

Observa-se que os custos de fabricação de um molde de injeção de alumínio sob pressão com componentes impressos são, ao menos, 7% mais altos do que os de um molde com componentes convencionais, levando em consideração a diferença entre os custos de fabricação de ambos os tipos de componentes.

Exemplo:

Custos para um molde convencional:

$$\text{R\$ } 587.180,48 + \text{R\$ } 80.071,74 = \text{R\$ } 667.252,22$$

Custos para um molde com componentes impressos:

$$\text{R\$ } 587.180,48 + \text{R\$ } 129.713,64 = \text{R\$ } 716.894,12$$

Isso representa uma adição de 7% no custo total do molde.

A avaliação de viabilidade econômica foi baseada no aumento de produtividade, conforme demonstrado. Foi calculado, como apresentado na Tabela 7, que a vida útil total deste tipo de molde é de 400.000 ciclos de injeção.

Tabela 7 - Demonstrativo dos parâmetros econômicos para um processo de injeção de alumínio comparando componentes impressos e componentes de série.

Descrição	Valor	Detalhes
Tarifa da injetora	R\$ 679,88	Custo por hora
Produção por dia - Componente série	3192	Peças por dia
Produção por dia - Componente impresso	4008	Peças por dia
Vida útil do molde	400.000	Ciclos de injeção
Custo da máquina por dia	R\$ 16.317,12	R\$ 16.317,17
Custo por peça - componente série	R\$ 5,11	Referência
Custo por peça - Componente impresso	R\$ 4,07	20%
Custo da preventiva para componente impresso	R\$ 38.000,00	Valor por preventivas
Vida útil do componente de série	60.000	Ciclos de injeção, com uma recuperação
Vida útil do componente impresso	160.000	Ciclos de injeção, com uma recuperação
Intervalo entre preventivas com componente de série	30.000	Ciclos de injeção
Intervalo entre preventiva com componente impresso	80.000	Ciclos de injeção

Fonte: Do próprio autor

Observa-se a grande contribuição econômica que o sistema de canais conformados insere nos custos de produção, vale lembrar que estes ganhos não se refletem somente em financeiros, porém está implícito ganhos de energia, redução de CO² com argumenta WIEDENEGGER, Armin; BRUCKWILDER – 2021.

Tabela 8 - Demonstrativo de custos comparativos entre uma produção com o molde de série e um molde com componentes impressos tendo como referencial o tempo de ciclo.

Nº Ciclos	Custo de produção convencional Por tempo de ciclo	Custo de produção Impresso Por tempo de ciclo
-	R\$ -	R\$ -
1.000,00	R\$ 5.110,00	R\$ 4.070,00
2.000,00	R\$ 10.220,00	R\$ 8.140,00
3.000,00	R\$ 15.330,00	R\$ 12.210,00
4.000,00	R\$ 20.440,00	R\$ 16.280,00
5.000,00	R\$ 25.550,00	R\$ 20.350,00
6.000,00	R\$ 30.660,00	R\$ 24.420,00
7.000,00	R\$ 35.770,00	R\$ 28.490,00
8.000,00	R\$ 40.880,00	R\$ 32.560,00
9.000,00	R\$ 45.990,00	R\$ 36.630,00
10.000,00	R\$ 51.100,00	R\$ 40.700,00
20.000,00	R\$ 102.200,00	R\$ 81.400,00
30.000,00	R\$ 153.300,00	R\$ 122.100,00
40.000,00	R\$ 204.400,00	R\$ 162.800,00
50.000,00	R\$ 255.500,00	R\$ 203.500,00
60.000,00	R\$ 306.600,00	R\$ 244.200,00
70.000,00	R\$ 357.700,00	R\$ 284.900,00
80.000,00	R\$ 408.800,00	R\$ 325.600,00
90.000,00	R\$ 459.900,00	R\$ 366.300,00
100.000,00	R\$ 511.000,00	R\$ 407.000,00
200.000,00	R\$ 1.022.000,00	R\$ 814.000,00
300.000,00	R\$ 1.533.000,00	R\$ 1.221.000,00
400.000,00	R\$ 2.044.000,00	R\$ 1.628.000,00

Do próprio autor

Tabela 9 - Demonstrativo de custos operacionais, (Custos de troca de componentes, custo de manutenção preventiva por ciclo de injeção), entre as tecnologias de manufatura aditiva e convencionais.

Nº Ciclos	Custo de troca do componente convencional	Custo de troca do componente impresso	Custo preventiva Convencional	Custo preventiva Impresso
-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
1.000,00	R\$ 1.187,27	R\$ 302,23	R\$ 1.166,67	R\$ 437,50
2.000,00	R\$ 2.374,54	R\$ 604,47	R\$ 2.333,33	R\$ 875,00
3.000,00	R\$ 3.561,81	R\$ 906,70	R\$ 3.500,00	R\$ 1.312,50
4.000,00	R\$ 4.749,08	R\$ 1.208,93	R\$ 4.666,67	R\$ 1.750,00
5.000,00	R\$ 5.936,35	R\$ 1.511,17	R\$ 5.833,33	R\$ 2.187,50
6.000,00	R\$ 7.123,62	R\$ 1.813,40	R\$ 7.000,00	R\$ 2.625,00
7.000,00	R\$ 8.310,89	R\$ 2.115,64	R\$ 8.166,67	R\$ 3.062,50
8.000,00	R\$ 9.498,16	R\$ 2.417,87	R\$ 9.333,33	R\$ 3.500,00
9.000,00	R\$ 10.685,43	R\$ 2.720,10	R\$ 10.500,00	R\$ 3.937,50
10.000,00	R\$ 11.872,70	R\$ 3.022,34	R\$ 11.666,67	R\$ 4.375,00
20.000,00	R\$ 23.745,39	R\$ 6.044,67	R\$ 23.333,33	R\$ 8.750,00
30.000,00	R\$ 35.618,09	R\$ 9.067,01	R\$ 35.000,00	R\$ 13.125,00
40.000,00	R\$ 47.490,79	R\$ 12.089,35	R\$ 46.666,67	R\$ 17.500,00
50.000,00	R\$ 59.363,48	R\$ 15.111,68	R\$ 58.333,33	R\$ 21.875,00
60.000,00	R\$ 71.236,18	R\$ 18.134,02	R\$ 70.000,00	R\$ 26.250,00
70.000,00	R\$ 83.108,88	R\$ 21.156,36	R\$ 81.666,67	R\$ 30.625,00
80.000,00	R\$ 94.981,57	R\$ 24.178,70	R\$ 93.333,33	R\$ 35.000,00
90.000,00	R\$ 106.854,27	R\$ 27.201,03	R\$ 105.000,00	R\$ 39.375,00
100.000,00	R\$ 118.726,97	R\$ 30.223,37	R\$ 116.666,67	R\$ 43.750,00
200.000,00	R\$ 237.453,93	R\$ 60.446,74	R\$ 233.333,33	R\$ 87.500,00
300.000,00	R\$ 356.180,90	R\$ 90.670,11	R\$ 350.000,00	R\$ 131.250,00
400.000,00	R\$ 474.907,87	R\$ 120.893,48	R\$ 466.666,67	R\$ 175.000,00

Fonte: Do próprio autor

A redução do custo de manutenção preventiva percebida neste estudo é de 62,5%, ou seja, tem-se o custo evitado da quantidade de manutenção necessária no molde ao longo de sua vida útil, além de reduzir a quantidade de moldes necessários para a produção do item a depender de seu volume de produção.

Tabela 10 - Avaliação compilada comparando os custos gerais de produção entre as tecnologias de um molde produzindo com componentes convencionais e um outro com componentes impressos e canais otimizados.

N° Ciclos	Custo total de produção componente de série	Custo total de produção componente impresso	Saving entre as tecnologias
-	R\$ -	R\$ -	R\$ -
1.000,00	R\$ 7.463,94	R\$ 4.809,73	R\$ 2.654,20
2.000,00	R\$ 14.927,87	R\$ 9.619,47	R\$ 5.308,41
3.000,00	R\$ 22.391,81	R\$ 14.429,20	R\$ 7.962,61
4.000,00	R\$ 29.855,75	R\$ 19.238,93	R\$ 10.616,81
5.000,00	R\$ 37.319,68	R\$ 24.048,67	R\$ 13.271,01
6.000,00	R\$ 44.783,62	R\$ 28.858,40	R\$ 15.925,22
7.000,00	R\$ 52.247,55	R\$ 33.668,14	R\$ 18.579,42
8.000,00	R\$ 59.711,49	R\$ 38.477,87	R\$ 21.233,62
9.000,00	R\$ 67.175,43	R\$ 43.287,60	R\$ 23.887,82
10.000,00	R\$ 74.639,36	R\$ 48.097,34	R\$ 26.542,03
20.000,00	R\$ 149.278,73	R\$ 96.194,67	R\$ 53.084,05
30.000,00	R\$ 223.918,09	R\$ 144.292,01	R\$ 79.626,08
40.000,00	R\$ 298.557,45	R\$ 192.389,35	R\$ 106.168,11
50.000,00	R\$ 373.196,82	R\$ 240.486,68	R\$ 132.710,13
60.000,00	R\$ 447.836,18	R\$ 288.584,02	R\$ 159.252,16
70.000,00	R\$ 522.475,54	R\$ 336.681,36	R\$ 185.794,19
80.000,00	R\$ 597.114,91	R\$ 384.778,70	R\$ 212.336,21
90.000,00	R\$ 671.754,27	R\$ 432.876,03	R\$ 238.878,24
100.000,00	R\$ 746.393,63	R\$ 480.973,37	R\$ 265.420,26
200.000,00	R\$ 1.492.787,27	R\$ 961.946,74	R\$ 530.840,53
300.000,00	R\$ 2.239.180,90	R\$ 1.442.920,11	R\$ 796.260,79
400.000,00	R\$ 2.985.574,53	R\$ 1.923.893,48	R\$ 1.061.681,06

Fonte: Do próprio autor

O estudo revela que há uma economia de R\$ 1.061.681,06 ao final da vida útil de um molde utilizando componentes fabricados por manufatura aditiva e canais conformados, em comparação com um molde tradicional, que utiliza componentes convencionais e canais de refrigeração tradicionais.

Foi demonstrado que o custo de fabricação do molde de injeção de alumínio utilizado em nosso teste foi de R\$ 667.252,22. Verificamos também que o molde construído com manufatura aditiva representa um acréscimo de aproximadamente 7% no custo total do molde.

O demonstrativo de custos de produção evidenciou que a produção de peças com um molde que utiliza componentes impressos apresenta uma vantagem econômica de 55% em relação a um molde convencional. Isso significa que o custo de produção do produto é 55% menor.

A partir disso, podemos expressar a relação entre os custos das peças da seguinte forma:

$$Custo_{Peça\ MA} = Custo_{Peça\ CONV} \times (1 - 0,55) = Custo_{Peça\ CONV} \times 0,45$$

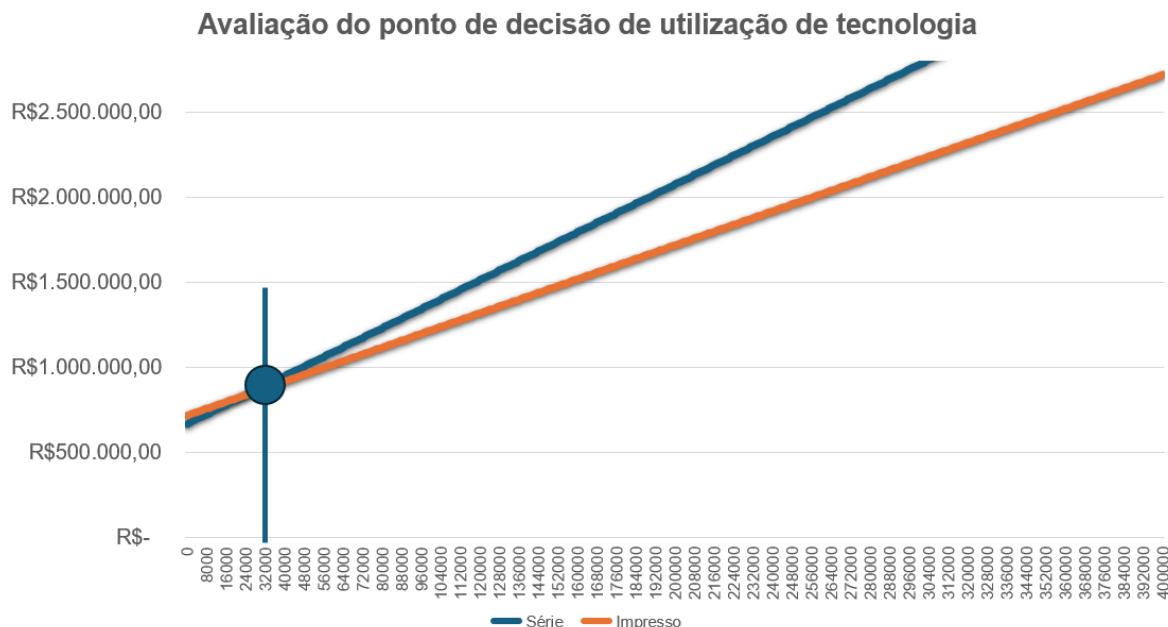
Ao igualar as equações em função da quantidade produzida, podemos determinar o número de ciclos necessários para que o molde com manufatura aditiva se torne viável economicamente.

$$Custo_{Total\ CONV} = Custo_{Molde\ CONV} + (n \times Custo_{Peça\ CONV})$$

$$Custo_{Total\ MA} = Custo_{Molde\ MA} + (n \times Custo_{Peça\ MA})$$

Concluimos que a viabilidade econômica das tecnologias de manufatura aditiva ocorre a partir de 35.000 ciclos, tornando-se mais vantajoso produzir com o molde fabricado por manufatura aditiva.

Figura 62 - Gráfico de avaliação do ponto decisório entre o molde de série e o molde produzido por AM.



Fonte: Do próprio autor

O estudo conclui que o processo de injeção de alumínio sob pressão, utilizando canais conformados produzidos por manufatura aditiva, é tecnicamente viável e apresenta viabilidade econômica, desde que a vida útil do produto a ser produzido exceda o volume mínimo indicado na janela de viabilidade econômica, ou seja, para peças de alto volume de produção. Além disso, o processo oferece vantagens significativas, como a redução de custos e aumento da produtividade, especialmente quando comparado com métodos convencionais. Esta conclusão é corroborada por SINGH, Deepika; JOSHI et al. - 2022, que também destacam os benefícios da manufatura aditiva em moldes de alta complexidade. A análise de custos realizada neste estudo revela uma economia de 55% nos custos de produção ao adotar canais conformados e manufatura aditiva em moldes de injeção de alumínio sob pressão. Tais resultados indicam um avanço considerável na eficiência do processo, com um impacto positivo na sustentabilidade econômica e ambiental, além de otimizar o desempenho dos moldes e sua vida útil.

5.0 CONCLUSÕES

O estudo apresentado demonstrou que componentes com canais de refrigeração conformados, fabricados em aço DIN 1.2709 por meio da manufatura aditiva, oferecem vantagens competitivas e técnicas em relação aos aços convencionais para trabalho a quente, como o DIN 1.2367 e o DIN 1.2344, quando aplicados em moldes de injeção de alumínio sob pressão.

Esses componentes se destacaram especialmente em termos de durabilidade, estabilidade e desempenho térmico, mantendo a dureza ao longo do processo produtivo. Testes confirmaram que o tratamento de nitretação e a aplicação de revestimentos PVD não alteram as propriedades do substrato quanto à dureza, um ponto de dúvida devido ao como esse material se comporta em determinadas faixas de temperatura no que se refere a dureza.

Isso permite que as peças atendam aos mesmos padrões de resistência mecânica exigidos para os aços convencionais para trabalho a quente. Além disso, a usinabilidade do DIN 1.2709 mostrou-se similar à dos aços tradicionais, sem comprometer a durabilidade das ferramentas de usinagem e a precisão, embora o consumo de eletrodos no processo de eletroerosão tenha sido ligeiramente superior.

Os testes também comprovaram que os componentes com canais de refrigeração conformados possuem uma durabilidade significativamente superior, alcançando até 2,6 vezes a vida útil dos aços convencionais testados no mesmo molde, como o DIN 1.2367. Essa maior durabilidade impacta diretamente na produtividade e nos custos de produção, pois resulta em uma vida útil mais longa e maior qualidade das peças injetadas. A degradação do substrato impresso se mostrou muito menor, e o controle térmico aprimorado contribui para a redução de defeitos, como trincas térmicas, agarramentos e porosidades, resultando em um processo de injeção mais estável, com menos variações e peças de qualidade superior.

Do ponto de vista econômico, a adoção de componentes produzidos por manufatura aditiva revelou-se vantajosa, com uma redução significativa nos custos operacionais — de 55% no estudo em questão. Essa economia provém não apenas da maior durabilidade dos componentes, mas também do aumento da produtividade

e da diminuição de interrupções para manutenção do molde, reduzindo os custos com manutenção preventiva e melhorando a eficiência operacional. Como resultado, o custo por peça de moldes com componentes impressos é consideravelmente mais baixo em comparação aos moldes fabricados por métodos convencionais. O estudo demonstrou que, ao longo do ciclo de vida do molde, os ganhos de produtividade e a minimização do tempo de inatividade justificam o investimento inicial mais alto em manufatura aditiva, desde que a vida do produto atenda aos requisitos da janela de viabilidade econômica.

Entretanto, é importante destacar algumas limitações e desafios do estudo. O custo inicial da manufatura aditiva continua sendo um fator relevante, especialmente em comparação com os métodos convencionais de fabricação de moldes, pois molde onde a vida do produto é pequena, não há justificativa econômica para a utilização da tecnologia.

Conclui-se, portanto, que a integração de componentes para moldes de injeção de alumínio sob pressão, com canais conformados e fabricados em aço DIN 1.2709, revestidos com PVD duplex, representa uma solução viável e estratégica para a indústria brasileira. Esta tecnologia impulsiona a competitividade do setor, ao aumentar a durabilidade dos moldes, otimizar o controle térmico e reduzir os custos operacionais. A flexibilidade da manufatura aditiva também possibilita a produção de geometrias complexas e altamente customizáveis, atendendo às necessidades específicas de cada projeto. Esses avanços consolidam a manufatura aditiva como uma alternativa técnica e economicamente viável, com potencial para transformar a produção de moldes e elevar os padrões de qualidade e eficiência no mercado, contribuindo para o desenvolvimento do setor industrial no país.

5.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros vale citar as seguintes iniciativas:

- **Produção de componentes híbridos:** A fabricação de componentes híbridos, que combina um substrato convencional produzido por usinagem com uma geometria complexa impressa com canais conformados, permite minimizar tanto o custo de produção quanto o tempo necessário para manufatura dos itens.
- **Estudos de otimização em canais conformados de refrigeração:** A configuração dos canais de refrigeração pode ser aprimorada para não apenas remover calor, mas também possibilitar aquecimento ou manutenção térmica do componente. Isso inclui a criação de circuitos mistos, com canais específicos para resfriar ou aquecer o componente, conforme as necessidades do item a ser injetado.
- **Estudos sobre sensorização térmica em componentes impressos com canais conformados:** Investigar a sensorização térmica desses componentes visando aprimorar o controle térmico em moldes de injeção sob pressão de alumínio.
- **Estudos de correlação de resultados de simulação:** Realizar estudos de correlação para melhorar a precisão das curvas dos materiais presentes em datasheets de simulação.
- **Estudos de otimização topológica de componentes impressos:** Investigar a otimização topológica desses componentes para reduzir os custos de fabricação.
- **Desenvolvimento de superfícies funcionais:** Com a manufatura aditiva, é possível criar texturas e superfícies funcionais diretamente nos moldes, o que pode melhorar a aderência do produto, reduzir a necessidade de acabamento pós-produção ou aprimorar o fluxo de material, garantindo uma injeção mais uniforme.
- **Revestimentos específicos para aumento de resistência:** A aplicação de revestimentos especiais em componentes impressos pode aumentar a resistência ao desgaste e à corrosão, além de melhorar a vida útil dos moldes. Estudar novos revestimentos, especialmente aqueles aplicados

com técnicas como deposição física de vapor (PVD), pode ser essencial para componentes de alta durabilidade.

- **Desenvolvimento de materiais otimizados para manufatura aditiva:** Explorar materiais que suportem tanto as exigências da injeção de alumínio quanto o processo de manufatura aditiva, como ligas de alta resistência e resistência térmica, é fundamental. Isso inclui a análise de ligas metálicas que podem ser impressas de forma eficiente e que suportam altas pressões e temperaturas.
- **Estudos de manutenção preditiva com sensorização embutida:** Utilizar sensores integrados nos moldes para monitorar condições como temperatura, pressão e desgaste em tempo real pode facilitar a manutenção preditiva. Isso aumenta a confiabilidade do processo e permite ações preventivas antes que ocorra uma falha crítica.
- **Integração de conformal cooling avançado:** Estudos para aprimorar o design de canais de refrigeração conformados (conformal cooling) com perfis mais complexos e específicos podem maximizar o controle térmico, reduzindo o tempo de ciclo de produção e melhorando a qualidade do produto final.

6.0 REFERÊNCIAS

ANDRONOV, Vladislav et al. Conformal cooling as a support tool for eliminating local defects in high-pressure die casting series production. *Progress in Additive Manufacturing*, p. 1-18, 2024. Scopus 81%, DOI - 10.1007/s40964-024-00721-x

ASNAFI, N. Application of laser-based powder bed fusion for direct metal tooling. *Metals*, Basel, v. 11, n. 3, p. 458, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met11030458>. Acesso em: [inserir a data de acesso]

ASNAFI, Nader. Tool and die making, surface treatment, and repair by laser-based additive processes. *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, v. 166, n. 5, p. 225-236, 2021. DOI - 10.1007/s00501-021-01113-2

BHASKAR, M.; ANAND, G.; NALLUSWAMY, Tamilselvam; SURESH, P. Die life in aluminium high-pressure die casting industries. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, [S.l.], v. 103, n. 5, p. 1143-1152, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40032-021-00784-w>. Acesso em: 02/03/2025

BOIVIE, K. et al. Development of a hybrid manufacturing cell; integration of additive manufacturing with CNC machining. 2011. Scopus 85%

BONOLLO, Franco; GRAMEGNA, Nicola; TIMELLI, Giulio. High-pressure die-casting: Contradictions and challenges. *Jom*, v. 67, p. 901-908, 2015. Scopus 96%, DOI - 10.1007/s11837-015-1333-8

BREZINOVÁ, Janette et al. Use of Duplex PVD Coatings to Increase the Life of Moulds and Cores for die Casting of Aluminium Alloys in the Automotive Industry. *Acta Mechanica Slovaca*, v. 26, n. 1, 2022, DOI - 10.3390/coatings14081043

BUTLER, W. A. Die Casting (Permanent Mold). Encyclopedia of Materials: Science and Technology, p. 2147-2152, 2001, DOI - 10.1016/B0-08-043152-6/00387-9

DAVIS, William et al. An appraisal on the sustainability payback of additively manufactured molds with conformal cooling. Procedia CIRP, v. 90, p. 516-521, 2020. Scopus 93%, DOI - 10.1016/j.procir.2020.01.064

ERMIS, KEMAL. DESIGN AND COOLING PERFORMANCE OF PLASTIC INJECTION MOLD. JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH AND APPLIED SCIENCE, V. 13, N. 1, P. 2521-2526, 2024.

FAVI, Claudio; GERMANI, Michele; MANDOLINI, Marco. Analytical cost estimation model in High Pressure Die Casting. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLEXIBLE AUTOMATION AND INTELLIGENT MANUFACTURING, 27., 2017, Modena. *Proceedings...* Modena: FAIM, 2017

FENG, Shaochuan; KAMAT, Amar M.; PEI, Yutao. Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 171, p. 121082, 2021. – Scopus 95%, DOI - 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121082

FIORESE, Elena et al. Improving die casting processes through optimization of lubrication. International Journal of Cast Metals Research, v. 30, n. 1, p. 6-12, 2017. Scopus 43%, DOI - 10.1080/13640461.2016.1162387

GOBBER, Federico Simone et al. Design of a Test Rig for the Characterization of Thermal Fatigue and Soldering Resistance of the Surfaces of Tool Steels for High-Pressure Die-Casting Dies. steel research international, v. 91, n. 5, p. 1900480, 2020. – Scopus 68%, DOI - 10.1002/srin.201900480

GRAFF, James L.; KALLIEN, Lothar H. The effect of die lubricant spray on the thermal balance of dies. In: Paper T93-083, NADCA Meeting, Cleveland. 1993.

GRUM, Janez et al. Laser shock processing as a method of decreasing fatigue of a die-casting die made of maraging steel. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, v. 3, n. 2-3, p. 271-281, 2008. – Scopus 49%, DOI - 0.1504/IJMMP.2008.018734

HORN, Max et al. Influence of metal powder cross-contaminations on part quality in laser powder bed fusion: copper alloy particles in maraging steel feedstock. *Procedia CIRP*, v. 94, p. 167-172, 2020. Scopus 96%, DOI - 10.1016/j.procir.2020.09.032

HORN, Max et al. Multi-Material additive manufacturing–recycling of binary metal powder mixtures by screening. *Procedia CIRP*, v. 93, p. 50-55, 2020. Scopus 95%, DOI - 10.1016/j.procir.2020.04.098

HSU, F. H. et al. Investigation on conformal cooling system design in injection molding. *Advances in Production Engineering & Management*, v. 8, n. 2, p. 107-115, 2013. Scopus 47%, DOI - 10.35219/awet.2021.08

KLOBČAR, Damjan; TUŠEK, Janez; TALJAT, Boštjan. Thermal fatigue of materials for die-casting tooling. *Materials Science and Engineering: A*, v. 472, n. 1-2, p. 198-207, 2008. Scopus 95%, DOI - 10.1016/j.msea.2007.03.025

KUO, Chil-Chyuan; JIANG, Zi-Fan; LEE, Jun-Hao. Effects of cooling time of molded parts on rapid injection molds with different layouts and surface roughness of conformal cooling channels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 103, p. 2169-2182, 2019. – Scopus 79%, DOI - 10.1007/s00170-019-03694-2

KURTULUS, Karani et al. An experimental investigation of the cooling and heating performance of a gravity die casting mold with conformal cooling channels. *Applied thermal engineering*, v. 194, p. 117105, 2021.

LUGSCHEIDER, E. et al. Increasing the lifetime of aluminium and magnesium pressure die casting moulds by arc ion plating PVD coatings. In: 6th International Tooling Conference, Germany. 2002.

MAJERNÍK, J.; PODARIL, M.; MAJERNIKOVA, M. Evaluation of High Pressure Die Casting Mold Temperature Relations Depending on the Location of the Tempering Channels. Archives of Foundry Engineering, p. 115-120-115-120, 2024.

MAYER, Andre Renan et al. Die soldering and corrosion failure of high temperature tool steel for high-pressure die casting Al alloy. Engineering Failure Analysis, v. 161, p. 108314, 2024. – Scopus 88%, DOI - 10.1016/j.engfailanal.2024.108314

MILLIGAN, Daniel R. Uncovering the Insulating Properties of Die Lube: The Black Magic of the High-Pressure Die Casting Industry. The University of Alabama, 2024.

MOLINETTI, Anderson et al. Surface modification of AISI H13 tool steel with silicon or manganese powders mixed to the dielectric in electrical discharge machining process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 83, p. 1057-1068, 2016. Scopus 79%, DOI - 10.1007/s00170-015-7613-1

MONKOVA, Katarina et al. Study of 3D printing direction and effects of heat treatment on mechanical properties of MS1 maraging steel. Archive of Applied Mechanics, v. 89, p. 791-804, 2019. Scopus 94%, DOI - 10.1007/s00419-018-1389-3

NUNES, V. et al. Increasing the lifespan of high-pressure die cast molds subjected to severe wear. Surface and Coatings Technology, v. 332, p. 319-331, 2017. Scopus 86%, DOI - 10.1016/j.surfcoat.2017.05.098

ÖZKAN, Doğuş et al. Effect of AISI H13 steel substrate nitriding on AlCrN, ZrN, TiSiN, and TiCrN multilayer PVD coatings wear and friction behaviors at a different temperature level. Materials, v. 16, n. 4, p. 1594, 2023. Scopus 94%, DOI - 10.3390/ma16041594

PHULL, Gurpreet Singh; KUMAR, Sanjeev; WALIA, R. S. Conformal cooling for molds produced by additive manufacturing: a review. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, v. 9, n. 1, p. 1162-1172, 2018., Scopus 61%, ISSN - 09766340

PIEKŁO, Jarosław; GARBACZ-KLEMPKA, Aldona. Use of maraging steel 1.2709 for implementing parts of pressure mold devices with conformal cooling system. *Materials*, v. 13, n. 23, p. 5533, 2020. Scopus 80%, DOI - 10.3390/ma13235533

SEVASTOPOLEV, Ruslan. Effect of conformal cooling in Additive Manufactured inserts on properties of high pressure die cast aluminum component. 2020.

SHELLABEAR, M.; NYRHILÄ, O. DMLS-Development history and state of the art. *Laser assisted netshape engineering 4*, proceedings of the 4th LANE, p. 21-24, 2004.

SHINDE, Mahesh S.; ASHTANKAR, Kishor M. Additive manufacturing–assisted conformal cooling channels in mold manufacturing processes. *Advances in mechanical engineering*, v. 9, n. 5, p. 1687814017699764, 2017. Scopus 62%, DOI - 10.1177/1687814017699764

SILVA, Hugo Miguel et al. Design optimization of conformal cooling channels for injection molds: 3D transient heat transfer analysis. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, v. 31, n. 19, p. 4610-4621, 2024. Scopus 88%, DOI - 10.1080/15376494.2023.2203686

SINGH, Deepika; JOSHI, Ketaki; PATIL, Bhushan. Comparative economic analysis of injection-moulded component with conventional and conformal cooling channels. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, v. 103, n. 3, p. 307-317, 2022. Scopus 63%, DOI - 10.1007/s40032-021-00778-5

SODE, Marco et al. Tailoring flow behavior and heat transfer in tempering channels for high-pressure die casting—analysis of potentials of commercial static mixers and prospects of additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 125, n. 11, p. 5463-5477, 2023. – Scopus 52%, DOI - 10.1007/s00170-023-10920-5

STRAKOSOVA, Angelina et al. Annealing Response of Additively Manufactured High-Strength 1.2709 Maraging Steel Depending on Elevated Temperatures. *Materials*, v. 15, n. 11, p. 3753, 2022. Scopus 36%, DOI - 10.3390/ma15113753

SUFIIAROV, V. Sh et al. The effect of layer thickness at selective laser melting. *Procedia engineering*, v. 174, p. 126-134, 2017. – Scopus 99%, DOI - 10.1016/j.proeng.2017.01.179

SUKAL, J.; PALOUSEK, DAVID; KOUTNY, DANIEL. The effect of recycling powder steel on porosity and surface roughness of slm parts. *MM Sci. J*, v. 12, p. 2643-2647, 2018. Scopus 40%, DOI - 10.17973/MMSJ.2018_12_2018110

SÜTÖOVÁ, Andrea et al. Study of PVD-Coated Inserts' Lifetime in High-Pressure Die Casting Regarding the Requirements for Surface Quality of Castings. *Coatings*, v. 14, n. 8, p. 1043, 2024. Scopus – 64%, DOI - 10.3390/coatings14081043

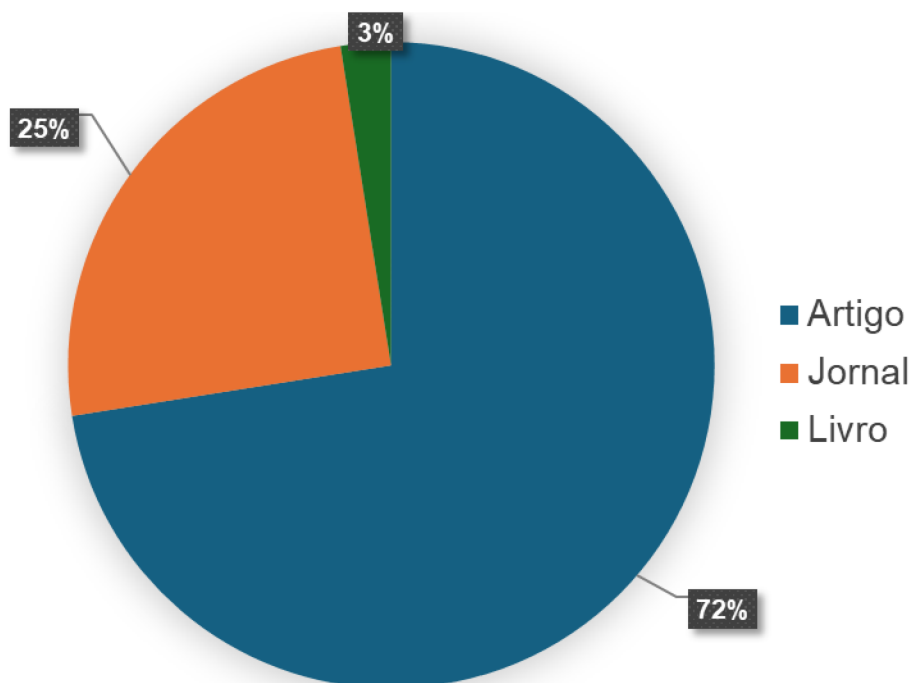
WANG, Bo. Investigation of the adhesion behavior of aluminum on various PVD coatings applied to H13 tool steel to minimize or eliminate lubrication during high pressure die casting, *An. 2016-Mines Theses & Dissertations*, 2016.

WIEDENEGGER, Armin; BRUCKWILDER, Johannes; DEUTSCH, Christoph. Ecological and Economic Benefits of Additive Manufacturing in High Pressure Die Casting. *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, v. 166, n. 5, p. 237-242, 2021.

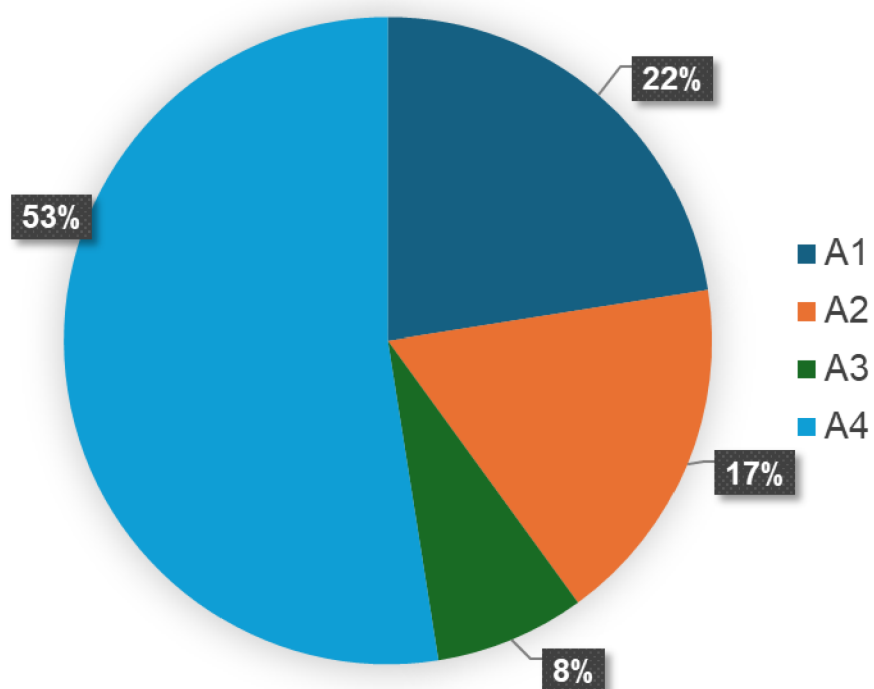
YONGYOU, Cao; ZHIPENG, Guo; SHOUMEI, Xiong. Determination of interfacial heat transfer coefficient and its application in high pressure die casting process. China Foundry, v. 11, n. 4, p. 314-321, 2014.

ZENG, Tongyan et al. Cooling channel free surface optimisation for additively manufactured casting tools. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 127, n. 3, p. 1293-1315, 2023. – 43%, DOI - 10.1007/s00170-023-11402-4

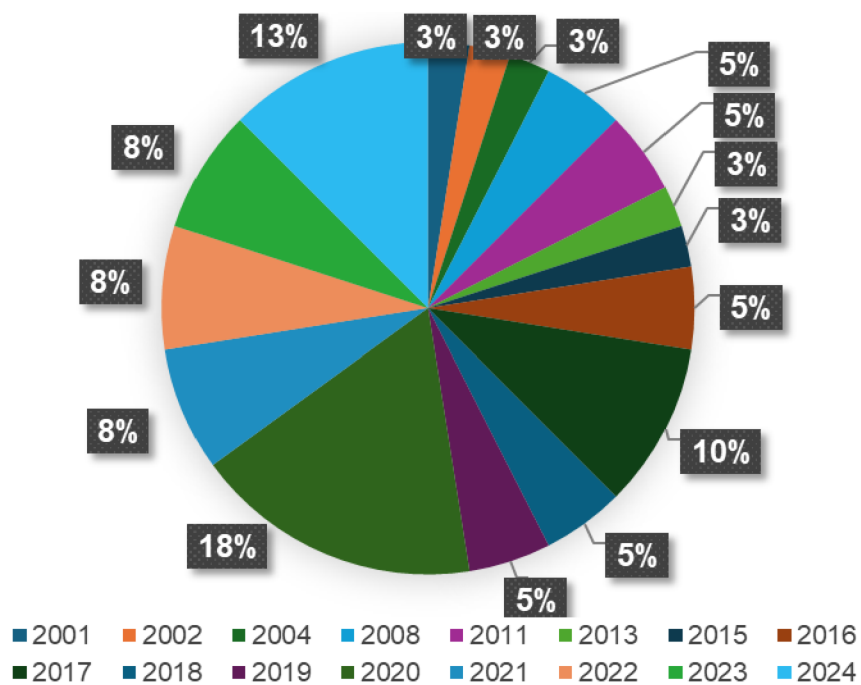
6.1 REFERÊNCIAS POR ESTRATO



6.2 REFERÊNCIAS POR QUALIS



6.3 REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS



7.0 APÊNDICE

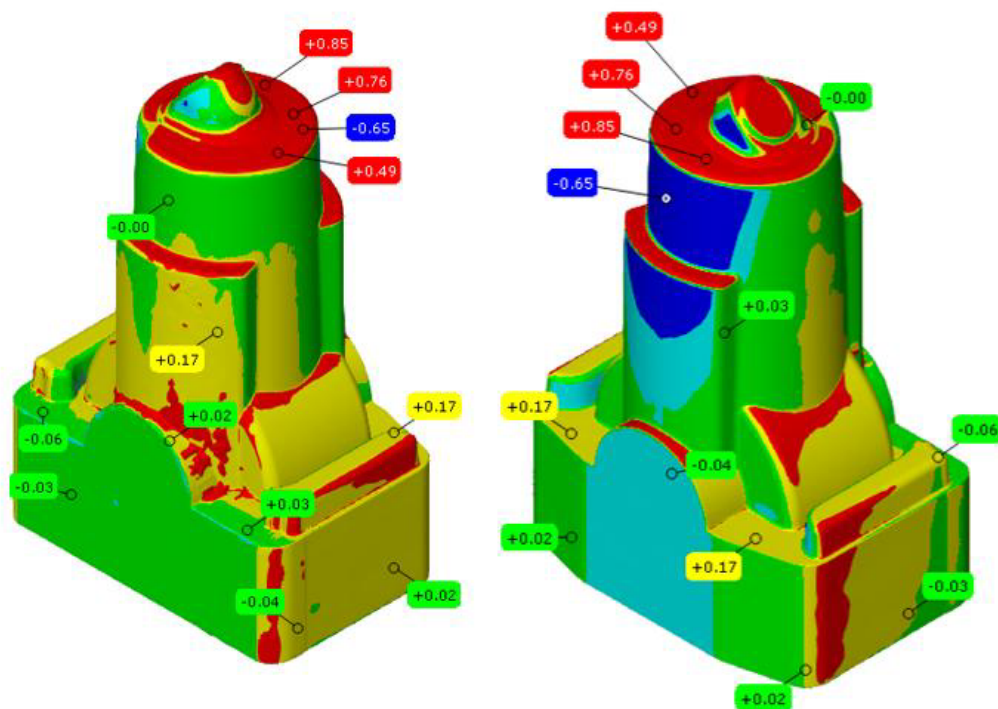
Figura 63 - Componente com falha de estratégia de impressão



Fonte: Do próprio Autor - 2024

Componente produzido com falha na estratégia de impressão, gerando descontinuidades no substrato.

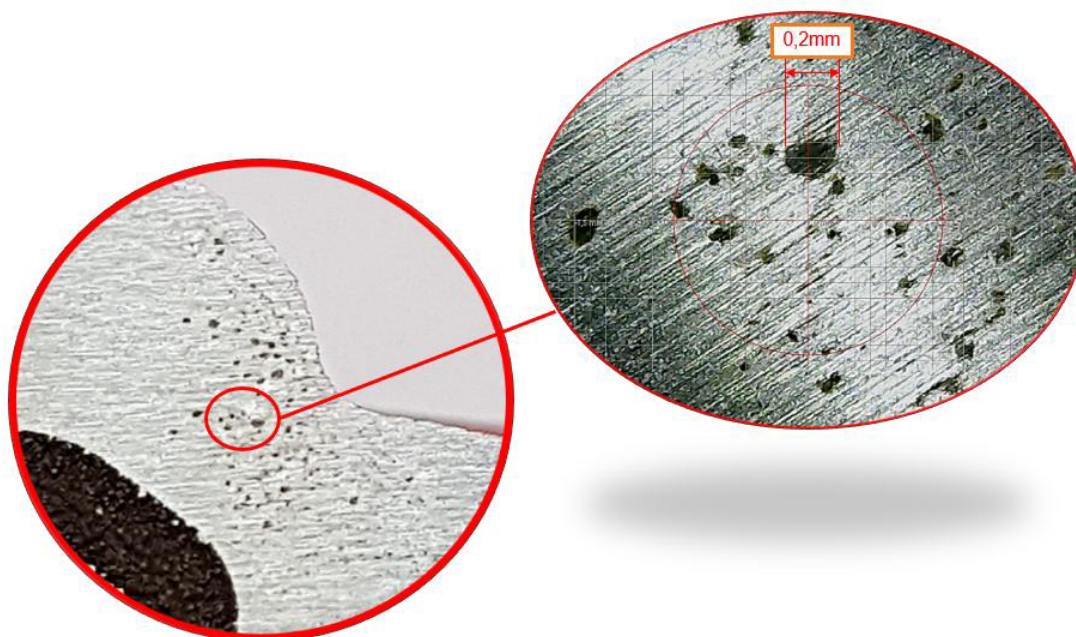
Figura 64 - Falha de acuracidade na geometria impressa



Fonte: Do próprio autor - 2024

Foi possível verificar que se deve considerar uma quantidade de sobremetal suficiente para que não falte material nos processos de usinagem. Foi percebido desvios acima de 0,8mm.

Figura 65 - Porosidade no substrato impresso



Fonte: Do próprio autor - 2024

Durante o processo de desenvolvimento, foi possível identificar a alta sensibilidade dos parâmetros de impressão para componentes fabricados com pó metálico. Cada etapa, desde a limpeza meticulosa dos equipamentos até a definição da estratégia de impressão, passando pelo processo de fatiamento e pela correta disponibilização do modelo 3D no sistema Build da impressora, desempenhou um papel crucial na obtenção de resultados consistentes. A complexidade do processo exigiu a realização de múltiplos ciclos de testes (loops) para ajustar e otimizar os parâmetros, garantindo que as condições ideais fossem estabelecidas para a impressão dos componentes. Além disso, fatores como a qualidade do pó metálico, a temperatura e a velocidade de impressão se mostraram fundamentais para alcançar a precisão e a integridade desejadas, destacando a importância da calibração e do monitoramento contínuo durante todo o processo de manufatura aditiva.