

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

WILLIAM DOS SANTOS FREITAS

**REFRIGERAÇÃO CONFORMADA EM MOLDE DE INJEÇÃO SOB PRESSÃO
PARA ALUMÍNIO:
Uma revisão bibliográfica de estudos experimentais**

Betim
2024

WILLIAM DOS SANTOS FREITAS

**REFRIGERAÇÃO CONFORMADA EM MOLDE DE INJEÇÃO SOB PRESSÃO
PARA ALUMÍNIO:
Uma revisão bibliográfica de estudos experimentais**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. André Fonseca Félix

Betim

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

F862r Freitas, William dos Santos

Refrigeração conformada em molde de injeção sob pressão para alumínio: uma revisão bibliográfica de estudos experimentais / William dos Santos Freitas. – 2024.

56 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2024.

Orientador: Prof. Dr. André Fonseca Félix

1. Fundição sob pressão. 2. Refrigeração. 3. HPDC. 4. Resfriamento conformado. 5. Engenharia mecânica. I. Freitas, William dos Santos. II. Título.

CDU: 621.7

WILLIAM DOS SANTOS FREITAS

**REFRIGERAÇÃO CONFORMADA EM MOLDE DE INJEÇÃO SOB PRESSÃO
PARA ALUMÍNIO:**

Uma revisão bibliográfica de estudos experimentais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 23 de setembro de 2024 pela banca examinadora:

Prof. Dr. André Fonseca Félix – IFMG Campus Betim

Prof. Dr. Flávio Magno de Carvalho Fonseca

Prof. Me. Norimar Melo Verticchio

Dedico esse trabalho à Deus e a minha esposa, à minha filha e aos meus pais: Priscila A. G. S. Freitas, Vitória, Ladislau C. Freitas e Maria G. S. Freitas.

AGRADECIMENTOS

A Deus

Ao Professor Doutor André Félix pela orientação na elaboração deste trabalho.

Ao IFMG pelo conhecimento generosamente oferecido, pela acessibilidade e pelos relacionamentos e oportunidades possibilitados.

A minha esposa e filha, meus pais e irmã por todo o apoio.

"Se agora fores descuidado e preguiçoso, e sempre fizeres adiamentos após adiamentos, fixando um dia após o outro o dia depois do qual cuidarás de ti mesmo, não perceberás que não progrides. E permanecerás, tanto vivendo quanto morrendo, um homem comum."

Epicteto

RESUMO

A busca incessante por inovações na indústria de manufatura tem levado ao desenvolvimento de técnicas avançadas para aprimorar a eficiência térmica em processos como a moldagem por injeção de alumínio. Nesse contexto, a refrigeração conformada surge para revolucionar a eficiência do resfriamento em moldes de injeção de alumínio, proporcionando benefícios significativos para a qualidade e eficácia dos produtos em comparação com os métodos tradicionais. A refrigeração conformada se destaca por sua capacidade única de seguir a geometria específica da peça a ser moldada, adaptando-se aos contornos do molde de injeção. Desta forma, o objetivo deste estudo foi fornecer informações sobre a conexão entre a fundição de alta pressão e a *conformal cooling*, destacando as possibilidades oferecidas por essa tecnologia na produção de peças de moldes de injeção. A metodologia utilizada foi a revisão bibliográfica, a partir da seleção de estudos nas bases de dados Science Direct, Research Gate e CAPES. Os resultados apontaram para flexibilidade no layout dos canais de resfriamento conformados, maior índice de resfriamento dos moldes e menor tempo de ciclo de produção em comparação com o resfriamento convencional.

Palavras-chave: *Conformal Cooling*; Resfriamento conformal; Resfriamento conformado; Fundição sob pressão; Canais de resfriamento conformados.

ABSTRACT

The relentless pursuit of innovation in the manufacturing industry has led to the development of advanced techniques to enhance thermal efficiency in processes such as aluminum injection molding. In this context, conformal cooling merges to revolutionize the cooling efficiency in aluminum injection moldings, providing significant benefits to the quality and effectiveness of products compared to traditional methods. Conformal cooling stands out for its unique ability to follow the specific geometry of the molded piece, adapting to the contours of the injection mold. Thus, the aim of this study was to provide information on the connection between high-pressure die casting and conformal cooling, highlighting the possibilities offered by this technology in the production of injection mold components. The methodology used was a literature review, selecting studies from the ScienceDirect, ResearchGate, and CAPES databases. The results indicated flexibility in the layout of conformal cooling channels, higher cooling rates for molds, and shorter production cycle times compared to conventional cooling.

Keywords: Conformal Cooling; Conformal cooling; Conformed cooling; High-pressure die casting; Conformal cooling channels.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fases do ciclo de injeção	18
Figura 2 – Sistema de injeção em câmara quente	20
Figura 3 – Sistema de injeção em câmara fria	20
Figura 4 – Resultado da seleção de estudos	26
Figura 5 – Porosidade em peças moldadas em refrigeração convencional (a) e conformada (b)	40
Figura 6 – Padrões básicos para fluxo em canais de resfriamento	41
Figura 7 – Canais de refrigeração conformada	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação de estudos analisados.....	28
Tabela 2. Categorização dos estudos	31
Tabela 3. Comparativo entre o <i>Conformal Cooling</i> e o resfriamento convencional...33	
Tabela 4. Classificação dos estudos quanto aos principais temas abordados.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Manufatura aditiva
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC	<i>Conformal cooling</i>
CCC	Canais de resfriamento <i>Conformal cooling</i>
CFD	Computational Fluid Dynamics (Dinâmica de Fluidos Computacional)
LPBF	<i>Laser Powder Bed Fusion</i> (fusão em leito de pó por laser)
HPDC	High Pressure Die Casting (Fundição sob-pressão)
IHTC	Coeficiente de transferência de calor da interface
PMEs	Pequenas e Medias Empresas
SLM	<i>Selective Laser Melting</i> (Fusão Seletiva a Laser)
TM	Manufatura Tradicional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos específico.....	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
3.1	Máquina de injeção sob pressão	16
3.2	O processo de fundição sob-pressão (HPDC).....	18
3.3	Manufatura aditiva de metais	21
3.4	Conformal Cooling	22
3.5	Fadiga térmica de componentes.....	23
4	METODOLOGIA	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

A fundição sob pressão (*High Pressure Die Casting* - HPDC) é amplamente utilizada em setores como automotivo, aeroespacial e industrial para a fabricação de peças metálicas complexas e de alta precisão. O processo envolve a injeção de metal fundido, como o alumínio, em um molde sob alta pressão, resultando em peças de alta qualidade, com precisão dimensional e excelente acabamento superficial (SILVA; CADIOLLI, 2023). O alumínio é frequentemente escolhido por sua leveza, durabilidade e capacidade de suportar altas cargas, o que o torna ideal para aplicações que exigem resistência e baixo peso (CASAES, 2022). No entanto, o processo de fundição de alumínio apresenta desafios que requerem controle preciso de variáveis como a temperatura, pressão e velocidade de injeção, influenciando diretamente a qualidade da peça final (MORAIS et al., 2020).

Segundo Tamanini e Wiltgen (2023), a refrigeração eficaz do molde durante o processo de fundição sob pressão é essencial para garantir a qualidade do produto final, já que a solidificação do metal fundido depende do controle térmico adequado. Diferentes tipos de refrigeração são empregados nos moldes, como resfriamento em linha, circular, helicoidal, com lâminas (*baffle*), cascata (*bubbler*), ou pinos térmicos adaptados, dependendo da complexidade do molde e do componente a ser produzido (PRUST, 2018). Esses métodos tradicionais de refrigeração buscam extrair o calor do metal fundido de maneira eficiente para garantir que a peça seja solidificada de forma uniforme, evitando deformações ou defeitos (TAMANINI; WILTGEN, 2023).

Entre as técnicas de resfriamento, destaca-se a refrigeração conformal (*conformal cooling*), que vem transformando significativamente o processo de moldagem por injeção de alumínio. Essa técnica permite a criação de canais de refrigeração que seguem o contorno da geometria da peça, proporcionando uma dissipação de calor mais eficiente e uniforme em comparação com os métodos tradicionais (SOARES et al., 2023). Diferentemente dos canais perfurados convencionalmente, o *conformal cooling* é projetado de forma a otimizar o desempenho térmico do molde, minimizando os gradientes de temperatura e evitando defeitos como distorções térmicas e porosidade (LOPES et al., 2022).

O *conformal cooling*, além de acelerar o ciclo de produção, melhora a qualidade das peças e aumenta a vida útil dos moldes, uma vez que o controle térmico

mais preciso resulta em menos desgaste das ferramentas. Essa abordagem é particularmente valiosa na fundição sob pressão de alumínio, onde a velocidade de solidificação do metal impacta diretamente nas propriedades mecânicas e na integridade estrutural das peças (JARFORS et al., 2021). A técnica também oferece flexibilidade de design, permitindo a criação de canais de resfriamento adaptados à geometria complexa das peças, algo que seria inviável com métodos de perfuração tradicionais (CHOI et al., 2022).

A aplicação de *conformal cooling* é particularmente eficaz na produção de ligas de alumínio, como as das séries 6000 e 7000, amplamente utilizadas nos setores automotivo e aeroespacial devido à sua resistência mecânica, leveza e durabilidade (CARVALHO, 2021). Ao permitir uma refrigeração mais eficiente e homogênea, o *conformal cooling* contribui para a produção de peças de alta qualidade com ciclos de produção mais curtos e menos defeitos.

Além disso, a técnica tem mostrado grande potencial em processos de moldagem complexa, onde é necessário um controle rigoroso da temperatura durante a injeção de alumínio. Em comparação com os métodos de refrigeração tradicionais, o *conformal cooling* oferece melhorias significativas na uniformidade da solidificação do metal, resultando em menos retrabalho e uma maior confiabilidade das peças produzidas (MARCHIOLI et al., 2023).

O uso de técnicas avançadas de refrigeração, como o *conformal cooling*, está revolucionando o processo de fundição sob pressão de alumínio. Essa abordagem oferece uma solução inovadora para os desafios térmicos enfrentados durante a fabricação de componentes complexos, permitindo uma produção mais eficiente, com melhor controle térmico e resultados de alta qualidade. Com a evolução contínua da tecnologia de manufatura aditiva e a incorporação de *conformal cooling* nos moldes, espera-se que o setor continue a avançar, otimizando o desempenho e a produtividade em diversas aplicações industriais.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral deste trabalho é fornecer informações sobre a conexão entre a fundição de alta pressão e o resfriamento conformado, destacando as possibilidades oferecidas por essa tecnologia na produção de peças em moldes de injeção. Esta pesquisa é uma revisão bibliográfica que compila e analisa estudos existentes, proporcionando uma visão abrangente e atualizada sobre o tema.

2.2 *Objetivos específico*

- Identificar e discutir, com base na revisão bibliográfica, as aplicações práticas da técnica de resfriamento conformado em diferentes setores industriais, avaliando os benefícios proporcionados em termos de eficiência e qualidade do processo.
- Analisar, a partir de uma revisão da literatura, os desafios e limitações enfrentados na implementação da refrigeração conformada, abordando questões como viabilidade técnica, complexidade do projeto e possíveis obstáculos na adoção generalizada.
- Apresentar estudos de caso, extraídos de fontes bibliográficas, que avaliam a eficácia da associação entre resfriamento conformado e fundição de alta pressão (HPDC), destacando suas vantagens e desvantagens.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste contexto, este trabalho se propõe a explorar os conceitos fundamentais dos moldes de injeção de alumínio e do processo HPDC, com o objetivo de proporcionar uma visão geral sobre o funcionamento e as características desse processo de fabricação. Com base nessa fundamentação teórica, será possível compreender melhor as vantagens e desafios do uso de moldes de alumínio no processo HPDC, além de explorar novas possibilidades de melhoria no processo de resfriamento a partir da aplicação da técnica de *conformal cooling*.

3.1 Máquina de injeção sob pressão

O processo de moldagem por injeção é um método fundamental na indústria de manufatura, caracterizado pelo preenchimento rápido e sob pressão de uma cavidade do molde com material fundido, seguido da solidificação do produto resultante. Esse procedimento é altamente eficiente e repetitivo, sendo utilizado para a produção em larga escala de peças metálicas e componentes diversos (PEREIRA et al., 2023).

O processo de fundição sob pressão é dividido em dois tipos principais: câmara quente e câmara fria. No sistema de câmara quente, o metal líquido é mantido dentro de um reservatório aquecido, de onde é injetado diretamente no molde. Já no sistema de câmara fria, o metal líquido é transferido para uma câmara de injeção resfriada antes de ser pressionado para dentro do molde (MALAVAZI, 2005).

Esse ciclo de injeção e solidificação é repetido sucessivamente para a fabricação contínua de produtos idênticos. A rapidez de preenchimento da cavidade é importante para garantir a qualidade e uniformidade das peças produzidas. A pressão aplicada durante o processo contribui para a obtenção de peças com detalhes precisos e superfícies homogêneas. A natureza repetitiva desse método permite uma produção eficiente em termos de tempo e custo (OLIVEIRA et al., 2019).

A moldagem por injeção sob pressão envolve uma sequência ordenada de etapas, desde o fechamento do molde até a remoção da peça moldada da máquina e preparação para próximo ciclo. A primeira etapa do ciclo é o fechamento do molde, onde as duas metades do molde se unem para formar a cavidade onde o material será injetado. Após o fechamento ocorre a dosagem, onde a massa necessária de metal é depositada na câmara de injeção (FORTES, 2021).

A fase de injeção propriamente dita é o momento em que o material é forçado para dentro do molde, que é feito por meio de um pistão que aplica pressão ao metal líquido preenchendo todas as cavidades do molde. A pressão e a velocidade de injeção devem ser cuidadosamente controladas para evitar defeitos na peça final, como marcas de fluxo ou bolhas de ar (GOMES, 2018).

Após a injeção, o molde é mantido fechado por um período determinado, conhecido como tempo de resfriamento. Durante essa fase, o material solidifica e adquire a forma definitiva. Nesse momento, o controle preciso da temperatura é essencial para evitar deformações e garantir a qualidade dimensional da peça. A última etapa diz respeito à abertura do molde e a ejeção da peça moldada. O molde se separa, revelando a peça fundida. Em seguida, a peça é ejetada da máquina, podendo passar por processos adicionais, como acabamento superficial, inspeção de qualidade e embalagem (POLICENA; POSSER, 2022).

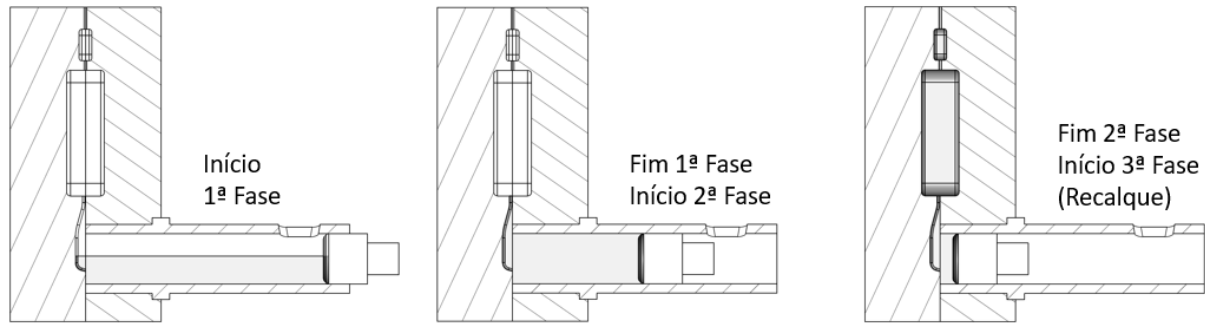
Na injeção em câmara fria, o processo é composto por três fases distintas: fase lenta, fase rápida e compactação. Na fase lenta, o objetivo principal é eliminar o ar presente na câmara de injeção e nos canais até o ponto de ataque, onde ocorre a separação entre o canal de alimentação e a cavidade da peça. Durante essa etapa, o movimento é realizado de forma controlada e gradual, evitando turbulências e a retenção de ar no metal líquido. Após a fase lenta, inicia-se a fase rápida, quando o sistema de injeção da máquina injetora é acionado com uma pressão acumulada e o metal líquido é injetado rapidamente na cavidade da peça. Essa etapa ocorre de maneira ágil, buscando preencher a cavidade em um tempo mínimo (MARCHIOLI, 2021).

A fase de compactação, também conhecida como recalque, é caracterizada por uma pressão adicional aplicada sobre o metal em processo de solidificação. Essa pressão é direcionada para uma massa sobressalente chamada de “bolacha”, localizada na parte final da câmara de injeção. A presença dessa “bolacha” permite transferir a massa e a pressão para o produto em resfriamento, reduzindo a formação de vazios decorrentes da contração durante o processo de solidificação (MARCHIOLI, 2021).

Dessa forma, a fase de compactação desempenha um papel importante na obtenção de peças com menor ocorrência de defeitos, pois a pressão exercida ajuda a garantir um preenchimento adequado da cavidade, minimizando a formação de vazios e garantindo uma maior integridade interna da peça final (MARCHIOLI, 2021).

Para melhor compreensão, Figura 1 representa esquematicamente as três fases do processo de injeção de alumínio.

Figura 1 – Fases do ciclo de injeção



Fonte: Adaptado de Marchioli (2021).

Para garantir a qualidade e eficiência desse processo, diversos cuidados devem ser observados em todas as etapas, desde o projeto do molde até a produção em larga escala. Erros no projeto podem levar a problemas durante a injeção, como rebarbas, distorções ou falhas na peça final (KAYANO, 2023). É preciso considerar também a escolha do material de moldagem, pois plásticos e metais têm características específicas que influenciam diretamente no processo, por isso é essencial selecionar materiais compatíveis com a aplicação final, considerando fatores como resistência mecânica, temperatura de fusão e durabilidade (GOMES, 2018).

Durante a etapa de preparação do material, é importante monitorar de perto as condições de fusão e homogeneização. Parâmetros como temperatura e pressão devem ser controlados adequadamente para evitar inconsistências na composição do material, o que pode resultar em peças defeituosas. Outro ponto crítico é o controle preciso da temperatura e pressão durante a injeção. Variações nesses parâmetros podem levar a problemas como bolhas, falhas de preenchimento ou deformações na peça (MARCHIOLI, 2023).

3.2 O processo de fundição sob-pressão (HPDC)

O HPDC é um processo de fundição por injeção sob pressão amplamente utilizado na fabricação de peças com geometrias complexas. Esse processo envolve o uso de um molde para injetar alumínio fundido em uma câmara de alta pressão. O

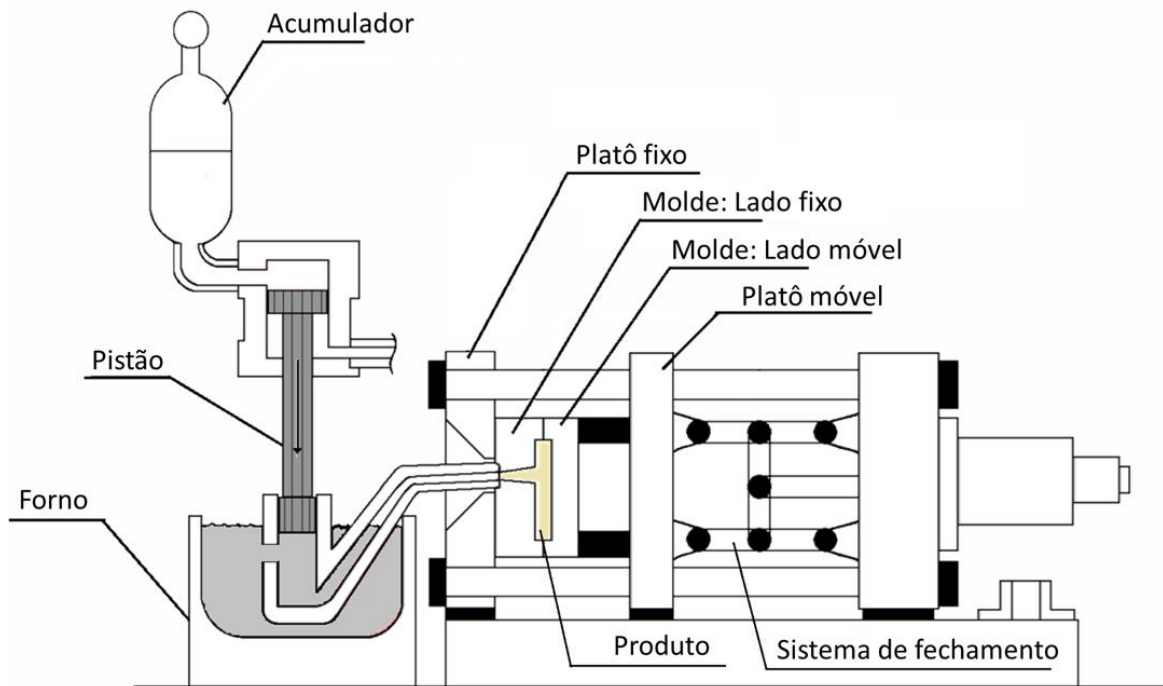
molde é composto por partes principais completamente metálicas, que são fechadas por uma máquina injetora. O alumínio fundido é então injetado no interior do molde, adquirindo a forma da cavidade interna pouco antes de se solidificar (FORTES, 2021).

É importante destacar que o processo HPDC pode ser dividido em câmara quente (Hot Chamber) e câmara fria (Cold Chamber), dependendo da temperatura de fusão da liga metálica utilizada. O processo de câmara fria é aplicado a ligas metálicas com pontos de fusão mais altos, como as ligas de alumínio. Por outro lado, o processo de câmara quente é mais utilizado para fundir metais de menor temperatura de fusão, como as ligas de zinco, estanho e chumbo (FORTES, 2021).

No processo de câmara quente, ilustrado na Figura 2, a injeção do metal na cavidade do molde é feita por meio de uma câmara de injeção submersa no metal fundido. Antes da injeção, as metades do molde são fechadas e fixadas com grandes placas. O metal é aquecido em uma panela aberta no forno antes de ser injetado na cavidade do molde com o uso de um pistão hidráulico. As pressões típicas variam entre 7MPa a 35 MPa. Após a solidificação, o pistão é recuado e a peça é ejetada pelo sistema de fechamento (ADVEKAR et al., 2015).

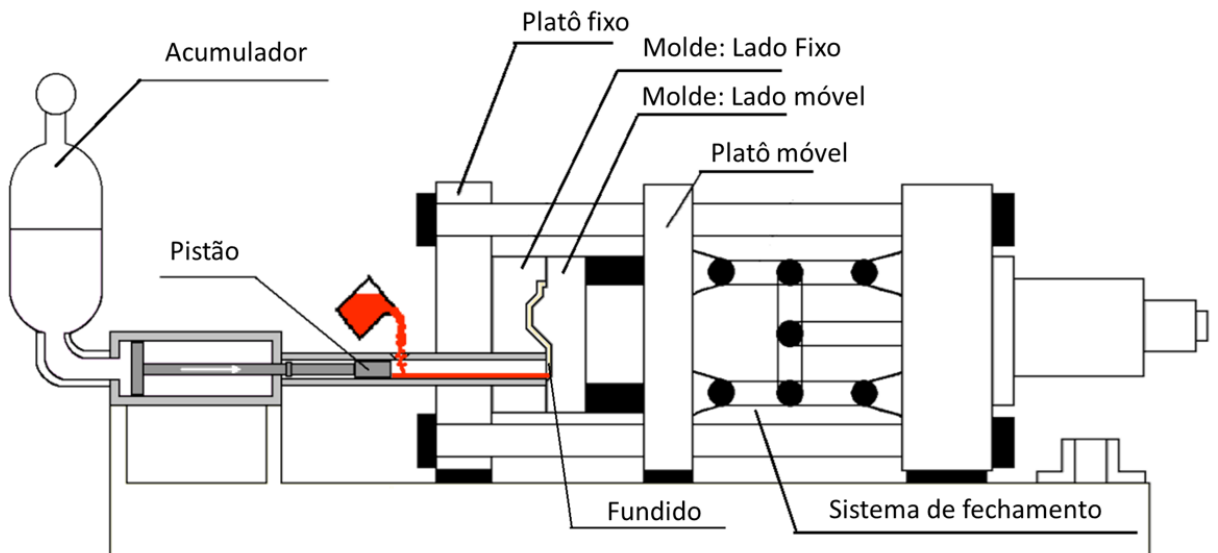
Já no processo de câmara fria, como apresentado na Figura 3, o metal líquido é vazado em um recipiente externo ao forno, chamado de câmara de injeção ou bucha de injeção. Um pistão com atuação hidráulica empurra e pressiona o metal de dentro da bucha de injeção em direção à cavidade a pressões que variam de 15MPa até 140MPa e velocidades que podem passar dos 80m/s no canal. O sistema de injeção funciona de maneira semelhante ao de uma máquina de câmara quente, mas geralmente é orientado horizontalmente e o canal residual tem menor massa relativa em comparação com a reserva de metal líquido, chamada de “bolacha” no processo de câmara quente. Após a injeção do metal líquido na cavidade do molde, o êmbolo permanece para frente, mantendo a pressão enquanto a peça solidifica. Após a solidificação, o sistema hidráulico retrai o êmbolo e a peça pode ser ejetada pela unidade de extração (ADVEKAR et al., 2015).

Figura 2 – Sistema de injeção em câmara quente



Fonte: Adaptado de Advekar et al. (2015).

Figura 3 – Sistema de injeção em câmara fria



Fonte: Adaptado de Advekar et al. (2015).

Em ambos os sistemas, a máquina injetora é um análogo de uma prensa horizontal composta por uma placa móvel, um sistema de extração, uma placa fixa e um conjunto injetor. Sendo o conjunto injetor a grande diferença entre os dois processos de câmara quente e câmara fria, onde o primeiro é mais adequado para ligas com baixo ponto de fusão, como zinco, estanho e chumbo. Já o segundo é mais

indicado para ligas com altas temperaturas de fusão, como alumínio, latão e magnésio (MARCHIOLI, 2023).

Ambos os processos apresentam vantagens e desvantagens. No processo de câmara quente, há uma menor quantidade relativa de ar após o molde fechado, menor perda de temperatura e menor massa relativa no funil de injeção em comparação com a reserva de metal líquida chamada de “bolacha” no processo de câmara fria. Já no processo de câmara fria, é possível utilizar metais de mais alto ponto de fusão (VENDRAMETTO, 2019).

O HPDC é um método econômico e eficiente para produzir componentes com baixa rugosidade superficial e alta precisão dimensional, sendo capaz de processar todas as principais peças automotivas de alumínio. As peças fabricadas por esse processo podem variar em tamanho e peso, podendo ser utilizadas em diversas aplicações, como carcaças, suportes, cabeçotes e blocos de motores, entre outros. No entanto, após a solidificação da seção de ataque já não é possível transferir pressão da reserva de metal em direção a peça, mas ainda é necessário manter o molde fechado aguardando a solidificação da massa da “bolacha”, o que passa a representar um desafio ao tempo de ciclo de moldagem (CASAES, 2022).

Um problema causado pela “bolacha” é o retardo no tempo de ciclo, uma vez que concentra grande massa e é propositalmente a última região a se solidificar. No entanto, seria interessante para ganho de produtividade um processo de resfriamento rápido da região formadora do canal e bolacha após o fechamento do canal de corte (VENDRAMETTO, 2019).

Na indústria automotiva, o processo de fundição sob pressão é utilizado, por exemplo, na fabricação de blocos de motor de combustão interna e carcaças de transmissão. Em outras áreas, esse processo participa na fabricação de produtos das mais variadas áreas, como equipamentos eletrônicos, material bélico, brinquedos, eletrodomésticos, agricultura, transporte, máquinas industriais, equipamentos de escritórios e comerciais, equipamentos para construção, entre outros (VENDRAMETTO, 2019).

3.3 *Manufatura aditiva de metais*

Na fabricação de moldes para fundição de alumínio, a manufatura aditiva surge como uma tecnologia inovadora que permite maior flexibilidade na criação de

geometrias internas complexas nas peças do molde. Isso viabiliza o desenvolvimento de canais de refrigeração conformais, que são muito mais eficientes e otimizados em comparação com os canais tradicionais, limitados a perfurações retas.

A manufatura aditiva de metais funciona por meio da construção de componentes camada por camada a partir de um modelo digital. Entre as principais tecnologias utilizadas estão a de pó soprado (*blown powder*) e a de leito de pó (*powder bed*), que incluem processos como fusão a laser e fusão por feixe de elétrons. No caso da fusão a laser, uma fina camada de pó metálico é depositada e seletivamente fundida por um feixe de laser de alta potência, permitindo a criação de geometrias complexas que seriam impossíveis de obter com métodos convencionais.

Uma das grandes vantagens da manufatura aditiva na fabricação de moldes é a capacidade de imprimir canais conformais, que seguem as superfícies internas da peça, proporcionando resfriamento mais rápido e uniforme. Isso não só melhora a qualidade do componente final como também reduz o tempo de ciclo de produção. Além disso, essa flexibilidade no design dos canais pode aumentar a durabilidade do molde, diminuindo o desgaste localizado e as tensões térmicas.

Embora a manufatura aditiva já tenha demonstrado grandes benefícios na moldagem por injeção plástica, sua aplicação em processos de fundição sob alta pressão (HPDC) ainda está sendo desenvolvida. A inclusão de canais conformais em moldes para HPDC pode melhorar significativamente a microestrutura e as propriedades mecânicas das ligas de alumínio fundidas. No entanto, pesquisas adicionais são necessárias para explorar completamente o impacto desses canais no desempenho térmico e mecânico durante o processo de fundição.

3.4 Conformal Cooling

Os canais de refrigeração são componentes essenciais nos moldes, destinados a facilitar o resfriamento dos materiais injetados. Geralmente, esses canais são formados por uma série de perfurações diretas no molde. Embora a usinagem de canais perfurados seja uma abordagem fácil e econômica, essa configuração apresenta limitações significativas em termos de eficiência de resfriamento. Os canais perfurados retos são restritos pelo formato da cavidade, a fim de evitar interferências entre ela e os canais. Devido às limitações do processo de perfuração, apenas furos

retos podem ser criados, o que impede a obtenção de um design ideal para o resfriamento mais eficiente do molde (FENG et al., 2021).

Essa limitação imposta pelas restrições de fabricação evidencia que os canais circulares perfurados retos podem não ser a solução mais adequada para garantir o resfriamento ideal. Portanto, explorar alternativas, como canais conformados, torna-se uma abordagem mais relevante para superar as limitações associadas à configuração convencional dos canais de resfriamento e melhorar a eficiência do processo de moldagem (FENG et al., 2021).

Nesse sentido, a refrigeração conformada tem se destacado pela sua abordagem na manufatura de metais, especialmente na indústria de moldes para injeção. Essa técnica utiliza geometrias complexas para otimizar o resfriamento de peças metálicas durante os processos de fabricação. Os canais, conformados de acordo com a geometria específica da peça, permitem um controle preciso da temperatura durante o processo de solidificação do metal, resultando em peças com propriedades mecânicas superiores (TAMANINI; WILTGEN, 2023). O uso da refrigeração conformada nos últimos anos vem se destacando devido ao interesse para aumentar a vida útil dos moldes, principalmente pela elevada carga térmica e pelos níveis de temperatura nos materiais do molde.

3.5 Fadiga térmica de componentes

A fadiga térmica em moldes de injeção sob pressão de alumínio constitui uma problemática significativa que afeta diretamente a durabilidade e a eficiência operacional desses moldes. Este fenômeno decorre das intensas variações de temperatura a que os moldes são submetidos durante os ciclos de injeção (CAMARGO et al., 2020).

A constante alternância entre temperaturas altas, quando o material fundido é injetado, e baixas, durante a fase de resfriamento, provoca tensões térmicas cíclicas nos componentes do molde. Essas tensões podem levar à formação de microfissuras, que podem crescer e resultar em falhas catastróficas ao longo do tempo (NUCCI, 2022).

Os moldes de injeção são geralmente fabricados com materiais metálicos de alta resistência, como aços especiais, que possuem boas propriedades mecânicas e resistência ao desgaste. No entanto, mesmo esses materiais estão sujeitos à fadiga

térmica devido às suas propriedades termomecânicas intrínsecas (MARINHO, 2022). A principal causa das tensões térmicas é a diferença de coeficiente de expansão térmica entre os materiais do molde e o material injetado. Essa discordância causa expansão e contração diferenciadas, gerando tensões internas que ao serem repetidas, podem iniciar a nucleação de trincas (SILVA JÚNIOR, 2019).

A técnica de resfriamento conformado é uma solução eficaz para a reduzir a fadiga térmica em moldes de HPDC. Esta técnica envolve o uso de canais de resfriamento que acompanham o contorno da superfície do molde, proporcionando um resfriamento mais uniforme e eficiente. A manufatura aditiva é importante na implementação desta técnica, pois permite a criação de geometrias complexas que potencializam a transferência térmica, levando a uma redução significativa dos gradientes térmicos e das tensões térmicas associadas, mitigando assim os efeitos da fadiga térmica (BRØTAN et al., 2016).

O tipo de canais de resfriamento conformados pode incorporar estruturas internas para alívio de tensões térmicas, como cavidades e diferentes configurações, que melhoram a dissipação de calor e previnem a formação de trincas. A aplicação dessa técnica não apenas prolonga a vida útil dos moldes, mas também aumenta a resistência à fadiga térmica e diminui os custos associados à manutenção e substituição dos moldes. Assim, o resfriamento conformado apresenta-se como uma abordagem robusta para melhorar a performance e a longevidade dos moldes de HPDC (BRØTAN et al., 2016).

4 METODOLOGIA

O método empregado no presente Trabalho de Conclusão de Curso foi uma revisão bibliográfica sobre o uso da tecnologia de *conformal cooling* em moldes de injeção por pressão. Para a realização desta revisão, foram consultadas bases de dados relevantes, incluindo Science Direct, Research Gate e CAPES.

A escolha das bases de dados deve-se ao fato de que elas são consideradas importantes fontes de informação nas áreas de engenharia, tecnologia e ciência. Foi utilizada uma combinação de palavras-chave em inglês e português, incluindo “HPDC”, “*Conformal Cooling*”, “*Aluminum*”, “*Mold design*”, “*Cooling system*”, “*Tooling*”, “*optimization of conformal cooling channels*”, “Resfriamento conformal”; “Resfriamento conformado”; “Fundição sob pressão” e “Canais de resfriamento conformados” para auxiliar na busca por publicações relevantes.

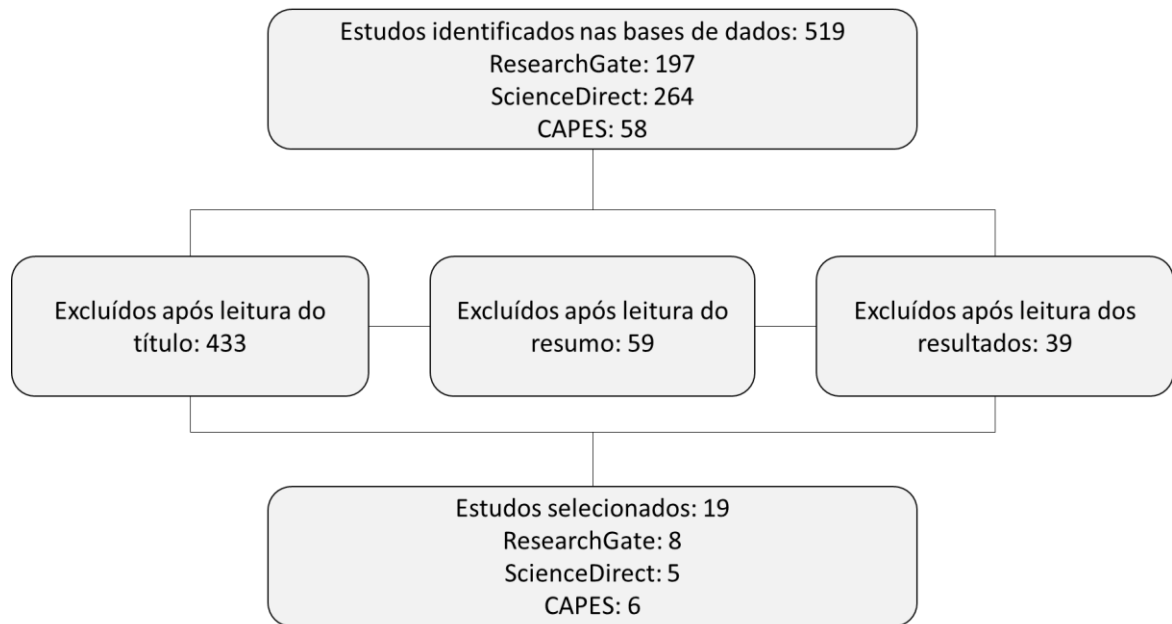
Vale ressaltar que os resultados foram filtrados a partir de critérios de inclusão e exclusão, como o recorte temporal limitado a partir de 2015 até 2024, idioma em português e inglês, o que possibilitou a obtenção de informações atualizadas e relevantes sobre o tema em questão.

Com base nessas informações, espera-se que este estudo possa contribuir para a compreensão e aplicação da tecnologia de *conformal cooling* em moldes de alumínio, proporcionando melhorias significativas no processo de manufatura e, conseqüentemente, na indústria em geral.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca por respostas para o objetivo proposto resultou na seleção de oito estudos, conforme representado no fluxograma a seguir.

Figura 4 – Resultado da seleção de estudos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os critérios de exclusão foram baseados na aderência à proposta de pesquisa sobre o uso de canais de refrigeração conformais em moldes para fundição sob pressão de alumínio, bem como na apresentação de pesquisas e resultados experimentais.

Inicialmente, foi realizada uma triagem dos títulos das publicações, excluindo-se aqueles que claramente não estavam relacionados ao tema central, como estudos focados na fabricação de insertos para moldes de injeção de plástico, outros tipos de sistemas de refrigeração ou em manufatura aditiva de componentes não vinculados à fundição sob pressão de alumínio.

Em seguida, na leitura dos resumos, foram identificados e excluídos estudos cujo foco principal era a fabricação aditiva de insertos metálicos para moldes de injeção plástica, além de pesquisas com abordagens fora do escopo deste

trabalho, como o impacto de tratamentos térmicos em componentes de moldes fabricados por métodos convencionais.

No último filtro, durante a análise dos resultados, foi realizada uma busca ativa para garantir a inclusão do maior número possível de estudos práticos sobre a fabricação aditiva de componentes de moldes com canais de refrigeração *conformal cooling*. O objetivo foi analisar os resultados e destacar as principais percepções observadas.

A seguir, os resultados desta revisão são apresentados em detalhes, com o objetivo de aprofundar a compreensão sobre o tema e suas implicações práticas. Os estudos estão organizados em categorias que incluem título, data de publicação metodologia e resultados (1).

Tabela 1. Relação de estudos analisados

Título	Ano	Metodologia	Autores
Introducing Inserts for Die Casting Manufactured by Selective Laser Sintering	2018	Entrevistas	STOLT, Roland; ANDRÉ, Samuel; ELGH, Fredrik
Investigation of transient numerical simulation of solidification and thermal behavior of metal molds with conformal cooling channels	2019	Método Experimental	IPEK, O.; BOLATTURK, A.; KAN, M.; KURTULUS, K.
Study of two alternative cooling systems of a mold insert used in die casting process of light alloy components	2019	Método Experimental	FIORENTINI, Federica; CURCIO, Pellegrino; ARMENTANI, Enrico; ROSSO, Carlo; BALDISSERA, Paolo
Design and optimization of conformal cooling channels for injection molding: a review.	2020	Método Experimental	KANBUR, Baris Burak; SUPING, Shen; DUAN, Fei
Use of Maraging Steel 1.2709 for Implementing Parts of Pressure Mold Devices with Conformal Cooling System	2020	Método Experimental	PIEKŁO, Jarosław; GARBACZ-KLEMPKA, Aldona; BURBELKO, Andriy
On the use of conformal cooling in high-pressure die-casting and semisolid casting.	2021	Método Experimental	JARFORS, A. E.; SEVASTOPOL, R.; SESHENDRA, K.; ZHANG, Q.; STEGGO, J., & STOLT, R.
Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates.	2021	Método Experimental	FENG, S.; KAMAT, A. M.; PEI, Y.
Design and simulation of conformal cooling for a die-casting mold insert	2021	Método Experimental	SHU, Lei; ZHENGWEN, Zhang; REN, Zhihao; ZHANG, Tao
Fatigue Life Prediction Methodology of Hot Work Tool Steel Dies for High-Pressure Die Casting Based on Thermal Stress Analysis	2022	Ensaio uniaxiais de tração e fadiga	Choi, Joeun and Choi, Jongrak and Lee, Kwangpyo and Hur, Nahmkeon and Kim, Naksoo

Shape Dependent Strength of Al Si9Cu3FeZn Die-Cast Alloy in Impact Zone of Conformal cooling Core.	2022	Método Experimental	PIEKŁO, J.; BURBELKO, A.; GARBACZ-KLEMPKA, A.
Investigation of effect of conformal cooling in serts in high-pressure die casting of AlSi9Cu3.	2022	Método Experimental	KARAKOC, P.; DIZDAR, K. C.; DISPINAR, D.
The design and additive manufacturing of an eco-friendly mold utilized for high productivity based on conformal cooling optimization	2022	Método Experimental	HOEGH, Woongbeom; YEON, Si Mo; KANG, Dongseok; PARK, Seonghwan; PARK, Seongjun; RYU, Kwanho; SUN, J.H.; JI, Leecheol; SON, Yong; CHOI, Kyunsuk; HA, Cheol Woo
Rapid Manufacturing of Die-casting Tools - a Case Study	2022	Método Experimental	RINGEN, Geir; WELO, Torgeir; BREIVIK, Sissel Marie
The Numerical Fatigue Life Analysis of a Conformal HPDC Mould Core Additively Manufactured from Maraging Steel	2022	Método Experimental	PIEKŁO, Jarosław; GARBACZ-KLEMPKA, Aldona; BURBELKO, Andriy
Cooling channel free surface optimisation for additively manufactured casting tools	2023	Método experimental	ZENG, T.; ABO-SERIE, E.; HENRY, M.; JEWKES, J
Understanding conformal cooling in the diecasting of aluminum alloys	2023	Método Experimental	HE, Xin; TANG, Chenglu; VIAN, Corey; WONG, Chi-Seng; JUANG, Shuei-Wan; VIAN, Wei; WANG, Xiaoming
Case Study of Large Three-Dimensional-Printed Slider with Conformal Cooling for High-Pressure Die Casting	2023	Método Experimental	ANDRONOV, V. N.; BERÁNEK, Libor; ZAJÍC, Jan; ŠOTKA, Pavel; BÖCK, Martin
The corrosion resistance of Maraging steel 1.2709 produced by L-PBF in contact with molten Al-alloys	2024	Método Experimental	MARCHINI, Luca; TONOLINI, Pietro; MONTESANO, Lorenzo; GELFI, Marcello; POLA, Annalisa

Cavitation erosion resistance of 1.2709 alloy produced via Laser-Powder Bed Fusion	2024	Método Experimental	MARCHINI, Luca; TONOLINI, Pietro; MONTESANO, Lorenzo; TOCCI, Marialaura; POLA, Annalisa; GELFI, Marcello.
--	------	---------------------	---

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 2. Categorização dos estudos

Citação	Resultados
STOLT et al., 2018	O estudo avaliou o uso de manufatura aditiva (SLM) para fabricar insertos de matriz para fundição sob pressão. Constatou-se que, embora o SLM economize tempo e material, ainda requer acabamento secundário e não reduz significativamente o custo total ou prazo de entrega. A pesquisa sugere que otimizar o design dos insertos para SLM e melhorar o design do produto pode maximizar os benefícios da tecnologia.
IPEK et al., 2019	O estudo mostrou que, após 1 segundo o canal de aleta esférica resfriou a fundição de alumínio mais rapidamente, mas, a partir de 3 segundos, não houve diferenças significativas entre os canais. A aleta esférica também apresentou a maior taxa de solidificação.
FIORENTINI et al., 2019	O estudo analisou a fadiga termomecânica de insertos de molde na fundição sob pressão. Utilizando manufatura aditiva, projetaram um sistema de <i>conformal cooling</i> que uniformizou a temperatura e reduziu picos de tensão, aumentando a vida útil do inserto e potencialmente encurtando ciclos de fundição.
KANBUR et al., 2020	Os três tipos de canais de conformal cooling (circular, serpentina e cônico) em comparação com o canal reto convencional, conseguiram diminuir significativamente o tempo de resfriamento do molde.
PIEKŁO et al., 2020	O estudo comparou canais de <i>conformal cooling</i> e tradicionais em aço <i>Maraging</i> 1.2709 usando SLM. Os canais conformais melhoraram a condução de calor, reduziram o tempo de solidificação e resfriamento, e diminuíram o tempo de ciclo da máquina de fundição.
JARFORS et al., 2021	A análise mostrou que o sistema conformal extraiu três vezes mais calor da cavidade da matriz do que a solução de resfriamento convencional.
FENG et al., 2021	Ao utilizar os canais de <i>conformal cooling</i> foi possível reduzir o tempo de ciclo de produção em comparação com o resfriamento tradicional.
SHI et al., 2021	Os canais de <i>conformal cooling</i> superam os tradicionais em eficácia e eficiência, mantendo uma temperatura média de 423,88 K contra 919 K dos tradicionais e alcançando 54,08% de eficiência, comparado a 0,45%. O resfriamento é mais uniforme com conformais.
CHOI, J. et al., 2022	A medida que a temperatura operacional aumenta, reduz-se o rendimento e a resistência à tração, o que requer o uso de um sistema de resfriamento mais eficiente.
PIEKŁO et al., 2022	A aplicação de canais de resfriamento conformados em um núcleo SLM aumentou a taxa de evacuação de calor do molde quando comparado à configuração de resfriamento tradicional.
KARAKOC et al., 2022	Observou-se que a porosidade diminuiu 43% (de 251 para 156 mm (3)) e a duração do ciclo diminuiu 4 s quando o resfriamento conformado foi utilizado.

HOEGH et al, 2022	O estudo introduziu um molde ecológico fabricado por LPBF com canais de <i>conformal cooling</i> 3D, que melhoraram a eficiência do resfriamento. Resultados mostraram uma redução de 21% no tempo de fundição, menor tamanho de grão e aumento na resistência e dureza, além de uma redução nas emissões de carbono.
RINGEN et al., 2022	O estudo mostrou que a manufatura aditiva (AM) pode reduzir custos e o tempo de colocação no mercado de 16 para 2 semanas em ferramentas de molde de alumínio para PMEs, além de melhorar a qualidade do produto e a vida útil da ferramenta, especialmente com canais de resfriamento conformais.
PIEKŁO et al., 2022	O estudo analisou a tensão e a vida em fadiga de um núcleo de molde HPDC feito de aço <i>Maraging</i> fabricado aditivamente. O canal de <i>conformal cooling</i> reduziu a temperatura média do núcleo e melhorou a vida em fadiga, embora trincas surgissem mais cedo em áreas de alta tensão.
ZENG et al., 2023	Alcançou maior tempo de vida útil da ferramenta a partir de um layout aprimorado dos tubos de resfriamento conformados.
HE et al., 2023	O estudo revelou que a formação de vapor em canais de <i>conformal cooling</i> de aço <i>Maraging</i> M300 gerou gradientes de temperatura e tensões mais altas, com máxima tensão de von Mises em 1177 MPa. Isso levou à falha do inserto, destacando a importância da modelagem precisa da mudança de fase para prever o comportamento térmico e mecânico de insertos produzidos por AM.
ANDRONOV et al., 2023	O estudo de caso sobre impressão 3D de metal para grandes componentes de fundição mostrou que o <i>conformal cooling</i> melhora a distribuição térmica e vida útil, mas os custos de produção são 150% maiores. Técnicas de otimização podem reduzir custos.
MARCHINI et al., 2024	O aço <i>Maraging</i> 1.2709 produzido por manufatura aditiva mostrou melhor resistência à corrosão em comparação com o aço forjado quando exposto a liga de alumínio fundido, devido a uma camada intermetálica estável que reduz a taxa de corrosão. O aço forjado apresentou corrosão não uniforme e uma camada intermetálica menos resistente. O aço ferramenta H11 também mostrou excelente resistência devido à sua microestrutura com carbonetos de cromo.
MARCHINI et al., 2024	O aço <i>Maraging</i> 1.2709 produzido por manufatura aditiva (AM) mostrou resistência à erosão por cavitação comparável ao aço forjado, apesar de diferenças microestruturais. Ambos os materiais tiveram taxas de desgaste semelhantes, mas o aço AM teve menor resistência à iniciação da erosão. O estudo destaca a necessidade de mais pesquisas para melhorar o desempenho dos componentes AM na resistência à erosão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Tabela 1 tem por finalidade organizar os estudos de maneira que facilite a visualização e análise dos diferentes aspectos abordados por cada artigo, bem como a identificação de padrões e lacunas na literatura existente.

Os estudos encontrados permitiram uma resposta ao objetivo proposto ao apresentar pesquisas e métodos experimentais comparativos entre processos de HPDC com resfriamento convencional e resfriamento conformal. Para começar a discussão, apresenta-se na Tabela 2, um comparativo entre o *conformal cooling* e o resfriamento convencional, com base nos achados encontrados.

Tabela 3. Comparativo entre o *Conformal Cooling* e o resfriamento convencional

Aspecto	<i>Conformal Cooling</i>	Resfriamento convencional
Definição	Um sistema de resfriamento projetado para seguir os contornos do molde para resfriamento uniforme.	Sistemas convencionais de fabricação de linhas de refrigeração por meio perfuração e uso de difusores de fluxo.
Eficiência de resfriamento	Fornecer resfriamento uniforme e eficiente devido à sua capacidade de seguir geometrias complexas.	A eficiência pode não ser tão uniforme quanto o resfriamento conformado.
Tempo de ciclo	Geralmente tempos de ciclo são mais curtos devido ao resfriamento mais eficiente.	Tempos de ciclo padrão que podem ser mais longos.
Qualidade da peça	Melhor qualidade da peça com redução de empenamento e tensões residuais.	Qualidade padrão da peça com potencial para empenamento e tensões residuais.
Flexibilidade de design	Alta flexibilidade	Flexibilidade limitada
Complexidade de fabricação	Mais complexo de fabricar	Mais fácil de fabricar
Custo	Custo inicial mais alto	Custo inicial mais baixo
Aplicação	Ideal para geometrias complexas e peças de alta precisão.	Adequado para aplicações padrão de fundição sob pressão.
Eficiência energética	Potencialmente mais eficiente em termos de energia	Eficiência energética padrão sem os benefícios do resfriamento otimizado.
Manutenção	Pode exigir manutenção mais especializada devido aos canais de resfriamento complexos.	Manutenção mais fácil com componentes padrão.

Fonte: Adaptado pelo autor (2024).

Tabela 4. Classificação dos estudos quanto aos principais temas abordados

Publicação	Abordagem do Artigo
Aplicação e Adaptação de Tecnologias de Fabricação Aditiva	
ZENG et al., 2023	Explora a utilização de manufatura aditiva (3D printing) para a criação de canais de <i>conformal cooling</i> em moldes de fundição, focando na otimização geométrica.
HOEGH et al., 2022	Discute a fabricação de moldes ecológicos (ECO) com canais de <i>conformal cooling</i> usando fusão em leito de pó a laser (LPBF) e sua aplicação na produção de pistões.
HE et al., 2023	Utiliza SLM (Selective Laser Melting) para fabricar insertos de moldes com canais de resfriamento conformal, destacando o impacto na distribuição de calor e tensão.
STOLT, J., 2018	Aborda a aplicação de SLM para fabricação de insertos de matriz em HPDC, explorando os desafios e as adaptações necessárias para integrar AM nos processos tradicionais.
PIEKŁO et al., 2020	Estuda a implementação de <i>conformal cooling</i> usando <i>Maraging Steel 1.2709</i> , produzido via SLM, com foco nas propriedades mecânicas e resistência a desgaste.
ANDRONOV et al., 2023	Examina a produção de uma grande peça (controle deslizante) usando impressão 3D em metal (L-PBF) e sua aplicação prática em fundição sob pressão de alumínio.
PIEKŁO et al., 2022	Apresenta a fabricação de núcleos de molde de pressão usando SLM, com foco na análise de vida útil de fadiga e eficiência térmica dos canais de resfriamento conformal.
Impacto na Eficiência Térmica	
ZENG et al., 2023	Descreve a otimização de canais de <i>conformal cooling</i> usando o método adjunto, resultando em uma maior uniformidade térmica e redução de gradientes de temperatura.
PIEKŁO et al., 2022	Compara núcleos de resfriamento tradicional e conformal, mostrando que o <i>conformal cooling</i> melhora a eficiência térmica e reduz a porosidade nas peças fundidas.
KARAKOC et al., 2022	Destaca a redução da porosidade e do SDAS, além da melhoria na uniformidade térmica ao utilizar <i>conformal cooling</i> em HPDC, resultando em ciclos de produção mais curtos.

KANBUR et al., 2020	Explora como o <i>conformal cooling</i> em moldes de fundição sob pressão resulta em uma taxa de resfriamento mais alta e uniforme, melhorando a eficiência térmica geral.
SHI et al., 2021	Compara canais de <i>conformal cooling</i> e tradicionais, mostrando que o conformal atinge uma eficiência de resfriamento muito superior devido à proximidade com a superfície do molde.
PIEKŁO et al., 2020	Investiga a eficiência térmica do <i>Maraging Steel 1.2709</i> com resfriamento conformal, destacando a redução no tempo de solidificação e resfriamento da liga de alumínio.
ANDRONOV et al., 2023	Relata a aplicação prática de <i>conformal cooling</i> em um controle deslizante, mostrando uma melhor distribuição de calor e uma eficiência térmica aprimorada.

Melhoria na Qualidade do Produto Final

PIEKŁO et al., 2022	Demonstra que o <i>conformal cooling</i> melhora a resistência destrutiva e reduz a porosidade dos fundidos, resultando em peças de maior qualidade em comparação com métodos tradicionais.
KARAKOC et al., 2022	Mostra como o <i>conformal cooling</i> em HPDC reduz significativamente a porosidade e o espaçamento do braço dendrítico, resultando em uma microestrutura mais uniforme e melhor qualidade.
KANBUR et al., 2020	O uso de <i>conformal cooling</i> em moldes de fundição sob pressão leva a um melhor acabamento superficial das peças fundidas e uma redução nos defeitos das peças.
FIORENTINI et al., 2019	Aborda a redução de tensões mecânicas e térmicas com o uso de resfriamento conformal, contribuindo para a produção de peças fundidas de alumínio de alta qualidade.

Aumento da Vida Útil do Molde

CHOI, J. et al, 2022	Mostra que a utilização de <i>conformal cooling</i> aumenta significativamente a vida útil das matrizes em HPDC, reduzindo a fadiga térmica e as tensões mecânicas.
FIORENTINI et al., 2019	Destaca que o <i>conformal cooling</i> contribui para uma maior durabilidade do molde, reduzindo a fadiga termomecânica e estendendo a vida útil operacional do molde.
HOEGH et al, 2022	Discute como o <i>conformal cooling</i> em moldes ECO resulta em uma menor taxa de desgaste e prolonga a vida útil dos moldes usados na produção de pistões de alumínio.

ANDRONOV et al., 2023 Relata que o uso de *conformal cooling* em uma peça grande (controle deslizante) prolongou a vida útil da ferramenta, reduzindo a necessidade de reparos frequentes.

PIEKŁO et al., 2022 Apresenta a análise de vida útil de fadiga de núcleos de moldes com resfriamento conformal, mostrando um aumento significativo na durabilidade dos moldes em comparação com métodos tradicionais.

Impacto nos Custos Operacionais

RINGEN et al., 2022 Compara os custos de produção entre manufatura aditiva e usinagem tradicional, mostrando como a redução do tempo de ciclo e a maior durabilidade do molde impactam positivamente os custos operacionais.

ANDRONOV et al., 2023 Discute a comparação de custos entre métodos convencionais e impressão 3D para produção de grandes peças com resfriamento conformal, incluindo potenciais economias a longo prazo.

Validação Experimental e Estudos de Caso

KARAKOC et al., 2022 Apresenta resultados práticos da aplicação de *conformal cooling* em moldes de HPDC, com validação experimental utilizando uma máquina HPDC de 1900 toneladas.

ANDRONOV et al., 2023 Estudo de caso prático que valida o uso de *conformal cooling* em uma peça de produção em massa (controle deslizante) em fundição sob pressão de alumínio, destacando melhorias em eficiência e qualidade.

PIEKŁO et al., 2022 O estudo utiliza simulações numéricas para prever o comportamento térmico e mecânico dos canais conformais. Além disso, ele compara esses resultados simulados com dados experimentais obtidos durante o uso real dos moldes. A validação experimental demonstra como o *conformal cooling* reduz as tensões térmicas e prolonga a vida útil do molde em aplicações práticas de fundição sob pressão.

Comparação com Outros Métodos de Resfriamento

PIEKŁO et al., 2022 Compara a eficiência e a qualidade do produto entre núcleos de resfriamento convencional e conformal, mostrando vantagens claras do *conformal cooling* em HPDC.

JARFORS et al., 2021 Avalia as diferenças em desempenho entre resfriamento convencional e conformal em fundição sob pressão e semissólida, destacando os benefícios e limitações de ambos os métodos.

KANBUR et al., 2020	Explora a diferença de desempenho entre canais de resfriamento convencionais e conformal, mostrando como o <i>conformal cooling</i> oferece uma taxa de resfriamento mais alta e uniforme.
SHI et al., 2021	Compara a eficiência térmica dos canais de <i>conformal cooling</i> com canais tradicionais em moldes de fundição, destacando a superioridade do resfriamento conformal.

Análise de Sustentabilidade e Impacto Ambiental

HOEGH et al, 2022	Analisa como o uso de moldes ecológicos (ECO) com <i>conformal cooling</i> pode reduzir o consumo de energia e o impacto ambiental na produção de peças fundidas.
RINGEN et al., 2022	aborda os custos comparando a manufatura aditiva com métodos de usinagem tradicionais no contexto de pequenas e médias empresas na indústria de fundição de alumínio. O estudo discute como a implementação de manufatura aditiva pode reduzir o tempo de colocação no mercado, melhorar a qualidade dos produtos, e, apesar dos custos iniciais mais altos, resultar em economias a longo prazo devido à maior eficiência e flexibilidade de produção.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Tabela 3 apresenta as principais abordagens de cada estudo avaliado de acordo com esse trabalho.

Choi et al. (2022), afirmam que diversas etapas, como o enchimento da câmara, solidificação, abertura e fechamento, remoção do produto e pulverização, ocorrem de forma contínua. No entanto, é preciso destacar que o procedimento de substituição da matriz demanda um tempo significativo e contribui para aumentar os custos de produção. Isso se deve ao fato de que a fabricação da matriz HPDC envolve altos custos de energia e uma considerável quantidade de mão de obra, dado que é confeccionada a partir de aço para ferramentas de trabalho a quente de alta resistência.

A previsão da vida útil à fadiga térmica é essencial para determinar o momento adequado de substituição da matriz. O dano cumulativo causado pela fadiga térmica, devido à contração e expansão das tensões térmicas, influencia diretamente a deterioração da matriz. Esse estresse térmico resulta da distribuição desigual de temperatura na matriz durante a injeção de metal fundido em alta temperatura, o desprendimento do produto e os ciclos repetidos de resfriamento rápido com refrigerante de baixa temperatura. Portanto, o uso de sistemas de resfriamento mais eficientes, como a refrigeração conformada, torna-se crucial. Esses sistemas não apenas aumentam o tempo de vida útil da matriz, mas também otimizam a produção e a qualidade dos produtos, conforme demonstrado por Choi et al. (2022).

Essa fadiga térmica nos componentes decorrente da repetição de variações de temperatura devido às tensões térmicas internas causadas pela expansão e contração diferencial dos materiais. Em ambientes industriais onde os materiais estão expostos a flutuações significativas de temperatura como os moldes de injeção, a fadiga térmica é um desafio a ser considerado (SILVA JÚNIOR, 2019).

Assim Choi et al. (2022), destacam que a previsão da vida útil dos componentes frente à fadiga térmica torna-se essencial para determinar o momento adequado para substituir uma matriz, devido à sua possível deterioração. O estresse térmico surge devido à distribuição desigual de temperatura na matriz durante a injeção de metal fundido em alta temperatura, o desprendimento do produto e os ciclos repetidos de resfriamento rápido com refrigerante de baixa temperatura. Portanto, o uso de sistemas de resfriamento mais eficientes, como a refrigeração conformada que pode aumentar o tempo de vida útil da matriz e otimizar a produção e a qualidade dos produtos.

Conforme apontam Zeng et al. (2023), o comportamento da transferência de calor nos estágios iniciais do processo de fundição de alumínio é fundamental para determinar a qualidade final da peça fundida. Em fases iniciais, quando o alumínio fundido está em contato próximo com a superfície do molde, a taxa de transferência de calor atinge seu pico mais elevado. No entanto, à medida que uma pequena região vazia se forma entre o molde e a peça fundida devido ao rápido resfriamento e encolhimento do metal, a taxa de transferência de calor diminui, impactando a resistência térmica e a taxa de solidificação. Isso resulta em variações tanto espaciais quanto temporais no coeficiente de transferência de calor da interface (IHTC) ao longo da interface molde/fundido. Estudos anteriores, apontados por esses autores, têm identificado diversas variáveis que influenciam o IHTC, como temperatura do molde, pressão de contato, especificações do material, rugosidade da superfície acabada e revestimento.

O IHTC é importante no processo de moldagem por injeção, especialmente no contexto da fadiga térmica, pois descreve a eficiência com que o calor é transferido entre o material fundido e o molde durante o ciclo de injeção. Variações no IHTC ao longo da interface molde / fundido podem causar distribuições de temperatura não uniformes, resultando em tensões térmicas cíclicas. Essas tensões, por sua vez, são um fator chave no desenvolvimento da fadiga térmica, pois podem levar à formação de microfissuras e, eventualmente, à falha do componente (MARINHO, 2022).

Fatores como temperatura do molde, pressão de contato, especificações do material, rugosidade da superfície e revestimentos influenciam diretamente o IHTC e, conseqüentemente, o comportamento térmico e a durabilidade do molde durante o processo de injeção. Compreende-se, então, que o entendimento e o controle do IHTC são fatores essenciais para reduzir os efeitos da fadiga térmica e potencializar a vida útil dos moldes (NASCIMENTO, 2022).

O estudo de Jarfors et al. (2021), destacam o efeito das variáveis velocidade e temperatura na vida útil dos moldes de injeção. Esses autores destacam que o surgimento de fissuras no canal de injeção depende tanto de um amolecimento significativo induzido por alta temperatura quanto das tensões resultantes do fluxo e solidificação do material. Observaram ainda que a velocidade de injeção mais alta resultou em uma menor vida útil da matriz e um crescimento mais acelerado de trincas no longo prazo.

Por outro lado, Jarfors et al. (2021), afirmam que uma velocidade de injeção mais baixa ocasionou um aumento significativo de trincas. Estes autores consideraram a importância do controle do choque térmico inicial como elemento chave para o manejo, evitando com isso o amolecimento da ferramenta e preservando a integridade da matriz. Vale ressaltar que o fluxo de calor inicial no processamento de fundição sob alta pressão é considerado elevado, representando um desafio distinto em comparação com o controle geral da temperatura do material.

Em um sistema de resfriamento convencional, citado por Piekło et al. (2022), a eficiência está diretamente ligada aos coeficientes de transferência de calor, à geometria do circuito de resfriamento, à área superficial externa e à distância em relação à superfície da cavidade do molde. A distribuição adequada dos canais visa eliminar ou reduzir pontos quentes no molde, assegurando uma sequência adequada de solidificação e evitando defeitos de contração.

Assim, Piekło et al. (2022) destacam que ao perfurar canais em um bloco de molde, pode resultar em distâncias inconsistentes da superfície da cavidade, provocando um campo desigual de distribuição de temperatura e resfriamento. Tal irregularidade pode levar à formação de porosidades e deformação do componente fundido. Por outro lado, o sistema de refrigeração conformada destaca-se ao adaptar o caminho dos canais ao formato da superfície a ser resfriada, uniformemente, conseguindo evitar imperfeições e garantindo a qualidade do produto na fundição sob pressão. A Figura 5 apresenta uma comparação entre peças iguais fundidas em moldes de refrigeração convencional e refrigeração conformada, onde é possível observar a presença de porosidade.

Figura 5 – Porosidade em peças moldadas em refrigeração convencional (a) e conformada (b)

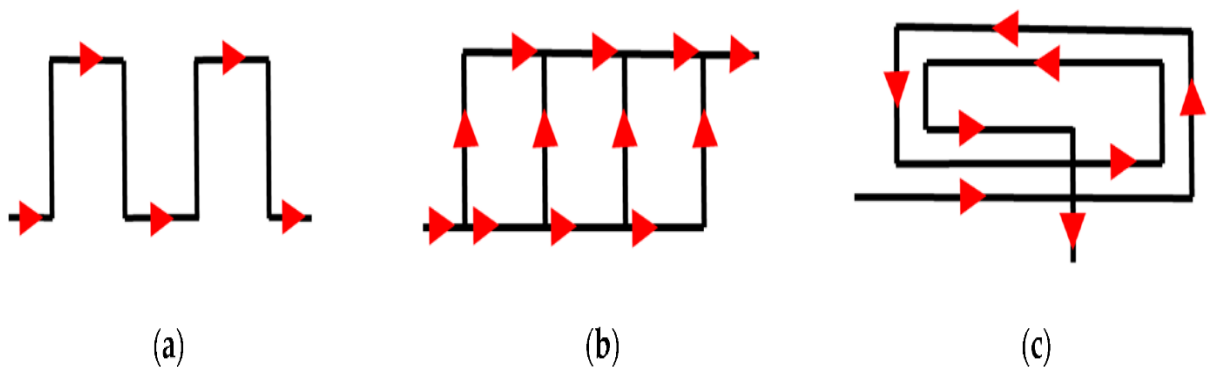


Fonte: Piekło et al. (2022).

Piekło et al. (2022) destacam ainda que a vários estudos afirmam que o design de uma refrigeração conformada resulta em uma distribuição de temperatura mais uniforme no fundido, contribuindo para a redução da temperatura média do molde. Isso, por sua vez, impacta positivamente na microestrutura da liga e evita a formação de porosidade de contração. A aplicação desses canais conformados no processo HPDC melhora a qualidade superficial dos moldes, reduzindo o volume de líquido de resfriamento pulverizado nas superfícies de formação, graças à sua maior taxa de refrigeração. A geometria conformada dos canais também elimina as conexões perpendiculares, frequentemente presentes nos canais perfurados tradicionais, resultando em uma melhoria na eficiência do resfriamento.

Segundo Piekło et al. (2022), a eliminação dessas conexões reduz quedas abruptas na pressão do líquido de resfriamento, contribuindo para um processo mais eficiente. As opções de design para canais de resfriamento, permite que os construtores se concentrem em melhorar a eficiência e a funcionalidade do sistema de resfriamento do molde. Esses autores mencionam três estratégias básicas para direcionar o fluxo do líquido de resfriamento em canais conformados: zigue-zague, paralelo e espiral, conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Padrões básicos para fluxo em canais de resfriamento



Fonte: Piekło *et al.* (2022).

Legenda: a) zigue-zague; b) paralelo e c) espiral.

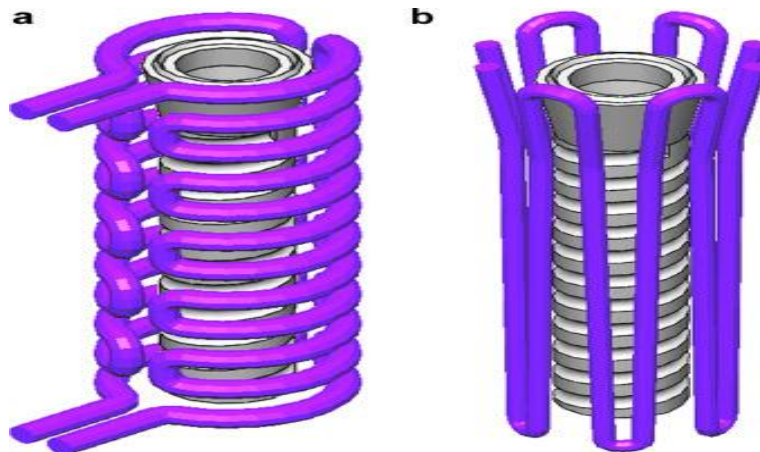
A estratégia “ziguezague” ou “serial” implica que as zonas subsequentes de um molde sejam resfriadas sequencialmente, resultando em um aumento contínuo da temperatura do líquido de refrigeração ao longo do percurso do fluxo. Esta abordagem proporciona um melhor resfriamento no lado de entrada do líquido, mas uma eficiência de resfriamento inferior no lado de descarga (Figura 6a).

Geralmente, o resfriamento serial não é a opção preferida, a menos que as peças sejam suficientemente pequenas para permitir a negligência do atraso. A construção de canais de resfriamento “paralelos” envolve o fornecimento de líquido de resfriamento à mesma temperatura de uma linha principal coletiva para vários canais de resfriamento paralelos (Figura 6b).

No entanto, essa solução apresenta uma desvantagem, pois qualquer aumento aleatório na resistência ao fluxo devido à deposição de incrustações pode dificultar as condições de resfriamento em seções específicas. O tipo espiral de canal de resfriamento (Figura 6c) é frequentemente utilizado na fabricação de peças com formas curvas ou esféricas na superfície resfriada. Nesse tipo, o fluxo de líquido de resfriamento nos canais pode ser otimizado alterando o perfil e a seção transversal do canal ao longo do seu percurso. Este estudo aplicou esse tipo de solução, demonstrando a aplicabilidade de canais conformados em situações específicas para melhorar a eficiência do resfriamento (PIEKŁO et al., 2022).

No estudo de Feng et al. (2021), são citados dois tipos de canal de resfriamento, o de espiral (A) e o de zigue-zague (b) conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Canais de refrigeração conformada



Fonte: Feng et al. (2021).

A topologia espiral na refrigeração conformada é uma das formas mais simples e comuns, pois otimiza o fluxo do líquido de resfriamento, promovendo uma distribuição mais uniforme da temperatura no molde. É importante observar que, em comparação com a configuração espiral, o formato zigue-zague apresenta curvas

mais acentuadas, o que pode resultar em uma queda de pressão mais significativa. Essas curvas pronunciadas podem aumentar a resistência ao fluxo, reduzindo a vazão e, conseqüentemente, comprometendo a eficiência do resfriamento. Além disso, os canais de refrigeração conformada podem ser classificados com base na conexão entre cada canal, sendo categorizados como série ou paralelo, semelhante aos canais de resfriamento convencionais perfurados diretamente. Por exemplo, um sistema de canais em espiral pode ser classificado como uma única espiral em conexão em série, espirais duplas (múltiplas) em conexão em série ou espirais em conexão paralela. Essa classificação proporciona flexibilidade no design, permitindo adaptações conforme as necessidades específicas do molde e do processo de fundição (FENG et al., 2021).

Karakoc et al. (2022), em seu estudo comparam os métodos de resfriamento utilizados em processos de fundição por injeção sob pressão referente ao surgimento de porosidades em ligas de alumínio. O controle da porosidade geralmente implica a implementação de técnicas de solidificação controlada, alcançada através do resfriamento do molde. Nos métodos tradicionais de resfriamento, isso é realizado por meio de canais de resfriamento retos. Contudo, essa abordagem pode ser limitada devido à geometria restrita desses canais, que podem apresentar ineficiências em certas situações. Como alternativa para essas limitações, os autores sugerem a adoção de canais de refrigeração conformada, que podem ser projetados em qualquer geometria por meio de técnicas de fabricação aditiva. A conformação personalizada desses canais oferece vantagens consideráveis, permitindo uma distribuição mais eficiente do fluxo de resfriamento e possibilitando um resfriamento mais controlado e adaptado às características específicas da peça fundida, o que contribui para a redução da porosidade.

Em um estudo de caso citado por Sebastopolev (2020), foi realizado um comparativo quanto às vantagens do sistema de resfriamento em fundição sob pressão de alta pressão. O estudo teve como objetivo principal investigar e quantificar os efeitos da refrigeração conformada na microestrutura e nas propriedades mecânicas da liga de alumínio fundido sob pressão. Foram produzidas duas ferramentas, cada uma com duas inserções de matriz com e sem canais conformados. Ambas as ferramentas foram empregadas na fundição sob pressão de liga de alumínio e as amostras resultantes foram submetidas a uma análise microestrutural detalhada, incluindo medições de espaçamento de braços, testes de tração e dureza.

A análise térmica revelou que a pastilha conformada apresentou um resfriamento mais rápido e temperatura mais baixa em comparação com a pastilha convencional. No entanto, a imagem térmica após cada disparo indicou temperaturas mais elevadas na superfície da matriz conformada. As amostras dos insertos conformados exibiram uma estrutura mais fina, sugerindo um melhor resfriamento, enquanto as amostras dos insertos convencionais apresentaram uma estrutura mais grosseira. Apesar dessas observações, os testes de resistência à tração e dureza não revelaram diferenças significativas nas propriedades mecânicas entre as amostras fundidas com pastilhas de moldes convencionais e conformados. No entanto, foi observado um desvio reduzido na dureza para as amostras fundidas com inserção conformal, indicando uma influência positiva no resfriamento. A medição da rugosidade superficial evidenciou um desgaste mínimo das pastilhas. Embora pequenas diferenças tenham sido observadas na taxa de resfriamento e no espaçamento do braço secundário, essas não resultaram em uma diferença evidente nas propriedades mecânicas da liga de alumínio (SEBASTOPOLEV, 2020).

Kanbur et al. (2020), destacam em seu estudo que a refrigeração conformada apresenta significativas vantagens em comparação com os canais convencionais, perfurados diretamente, especialmente durante o processo de moldagem por injeção. Entre as principais vantagens da refrigeração conformada, destaca-se a capacidade de seguir os contornos da geometria moldada, uma flexibilidade que os resfriamentos convencionais não conseguem proporcionar. Isso se traduz em melhorias substanciais em vários aspectos importantes do processo de injeção.

Com o uso da refrigeração conformada, otimiza-se o uso dos canais de resfriamento adaptados aos contornos da peça moldada, aumentando a eficiência do resfriamento. Com isso, o tempo total de injeção é reduzido, contribuindo para aumentar a produtividade do processo de fabricação. Essa distribuição uniforme de temperatura é projetada para alcançar uma dissipação de calor de maneira mais homogênea ao longo da peça, evitando pontos quentes indesejados. Contudo, é necessário observar questões relacionadas à tensão térmica, uma vez que a capacidade de se adaptar à geometria moldada minimiza os gradientes de temperatura e, por conseguinte, as variações de tensão, evitando-se com isso, o empenamento da peça (KANBUR et al., 2020).

O estudo conduzido por Ipek et al. (2019) foca no impacto dos canais de resfriamento especializados em moldes de metal fabricados por fusão seletiva a laser (SLM) na transferência de calor, solidificação e qualidade do produto. Utilizando uma análise numérica transitória, compararam quatro projetos de canais de resfriamento—canal padrão, canal curvo, canal de aleta esférica e canal tipo placa—em uma fundição de válvula de alumínio (Al 6061). Os resultados indicam que, um segundo após a fundição, o canal de aleta esférica apresentou o melhor desempenho em termos de resfriamento, com a menor temperatura na base da válvula. No entanto, após 3 e 5 segundos, as diferenças de desempenho entre os canais originais e o padrão foram menos significativas. A análise de solidificação revelou que o canal de aleta esférica também tinha a maior taxa de solidificação, evidenciando a importância da análise CFD para otimizar projetos de canais de resfriamento em moldes fabricados por SLM.

Fiorentini et al. (2019) investigaram a fadiga termomecânica em insertos de moldes de fundição sob pressão, abordando os problemas de rachaduras e substituição frequente devido a tensões térmicas e mecânicas. Usando análise de elementos finitos, identificaram as zonas mais afetadas e projetaram um sistema de *conformal cooling* para melhorar o desempenho dos insertos. Os resultados mostraram que o novo sistema de resfriamento proporcionou uma distribuição de temperatura mais uniforme, reduzindo picos de tensão e aumentando a vida útil do inserto, além de diminuir a distorção da peça e potencialmente os ciclos de fundição.

Hoegh et al. (2022) propuseram um molde ecológico fabricado por fusão de leito de pó a laser (LPBF) com canais de resfriamento tridimensionais (3D) do tipo superfície (CCC). A introdução de aletas de pino para induzir turbulência melhorou a eficiência de resfriamento. A aplicação industrial demonstrou uma redução de 21% no tempo de fundição por pistão e melhorias na qualidade do grão e propriedades mecânicas do produto final, além de uma redução nas emissões de carbono.

Ringen et al. (2022) exploraram a competitividade da manufatura aditiva (AM) para ferramentas de moldes de alumínio em PMEs. O estudo comparou AM com métodos tradicionais de manufatura (TM), destacando que a AM pode oferecer custos comparáveis e reduzir o tempo de colocação no mercado de 16 para 2 semanas, com vantagens adicionais na vida útil da ferramenta e qualidade da peça devido aos canais de resfriamento conformais.

He et al. (2023) utilizaram CFD e simulação estrutural para estudar a transferência de calor e distribuição de tensões em um inserto de matriz com *conformal cooling* feito de aço *Maraging* M300. Os resultados mostraram que a transformação de fase da água de resfriamento em vapor causou um gradiente de temperatura mais alto e maior estresse térmico, levando a falhas no inserto. A pesquisa sublinha a importância da modelagem precisa na previsão do comportamento térmico e mecânico de componentes de resfriamento conformal.

Marchini et al. (2024) investigaram a resistência à corrosão do aço *Maraging* 1.2709 produzido por L-PBF e forjamento convencional quando exposto à liga de alumínio AlSi7Mg. O aço AM mostrou melhor resistência à corrosão, com uma camada intermetálica mais estável. A pesquisa também comparou a resistência à erosão por cavitação entre amostras AM e forjadas, revelando que, apesar de algumas diferenças microestruturais, a resistência à erosão foi comparável.

Stolt (2018) explorou o uso de SLM para fabricar insertos de matriz para fundição sob pressão, destacando que, embora o SLM possa economizar tempo e material, os insertos ainda requerem acabamento secundário. O estudo revelou que o impacto da integração do SLM no custo geral e no prazo de entrega do sistema de matriz é limitado, enfatizando a importância de otimizar o design para aproveitar os benefícios do SLM.

Shu et al. (2021) compararam o desempenho de canais de *conformal cooling* e tradicionais em moldes de fundição sob pressão. Os canais conformais mostraram uma eficiência de resfriamento significativamente maior e uma distribuição de temperatura mais uniforme, validando sua viabilidade através de SLM e destacando suas vantagens em relação aos métodos tradicionais.

Piekło e Garbacz-Klempka (2020) avaliaram a eficiência de condução de calor de canais de *conformal cooling* e tradicionais em peças de aço *Maraging* 1.2709. Os resultados mostraram que o sistema conformal reduziu o tempo de solidificação e melhorou a resistência do material, resultando em ciclos de máquina mais rápidos e melhor desempenho geral.

Andronov et al. (2023) apresentaram um estudo de caso sobre a fabricação de um grande componente deslizante para fundição sob pressão usando L-PBF e resfriamento conformal. O estudo confirmou a viabilidade da impressão 3D em larga escala para ferramentas de fundição, embora destacasse a necessidade de otimizar o design para gerenciar custos elevados de produção.

Piekło, Garbacz-Klempka e Burbelko (2022) analisaram a vida em fadiga de um núcleo de molde HPDC feito de aço *Maraging* aditivo com resfriamento conformal. O estudo indicou que o design do canal conformal pode melhorar a vida útil da fadiga térmica, mas também destacou a necessidade de otimizar o projeto para minimizar a iniciação de trincas.

De maneira geral os estudos apresentaram como principais vantagens as reduções do volume de porosidades, redução nos tempos de ciclos de fundição e casos de maior vida útil do molde, em dois estudos são abordadas questões de custos e outros dois abordam o caráter ecológico do uso de *conformal cooling* em moldes de fundição. De maneira geral, o uso da técnica *conformal cooling* se mostra promissora, mas com aplicações específicas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste estudo, foi possível observar que a busca por processos de produção mais eficientes tem impulsionado o desenvolvimento de técnicas e equipamentos capazes de superar problemas relacionados ao tempo de vida útil dos maquinários e instrumentos, tempo de produção, qualidade dos produtos, economia energética, entre outros. A técnica de *conformal cooling*, conforme indicado pelas literaturas revisadas, mostra-se uma solução promissora para aprimorar processos industriais envolvendo moldagem por injeção e fundição sob pressão. Sua aplicação oferece benefícios significativos em termos de eficiência e qualidade do processo, como redução dos tempos de ciclo, melhoria da uniformidade de resfriamento e redução de tensões térmicas, fatores que contribuem para a diminuição de defeitos nos produtos.

No entanto, desafios e limitações ainda precisam ser superados, como a viabilidade técnica, a complexidade do projeto e os custos iniciais de desenvolvimento. É crucial reconhecer que a implementação bem-sucedida desta técnica requer investimentos em equipamentos especializados, tecnologias de manufatura aditiva, além de mais estudos e pesquisas para avaliar suas vantagens e desvantagens de forma mais abrangente.

Os estudos de caso que avaliam a eficácia da combinação entre *conformal cooling* e HPDC destacam vantagens importantes, como a melhoria no controle térmico e a redução de distorções nas peças. No entanto, também apontam desafios como a manutenção de sistemas de refrigeração complexos e a necessidade de ajustes no processo. Esses casos mostram que, embora a técnica possa oferecer melhorias substanciais, sua implementação requer uma análise cuidadosa das especificidades do projeto e uma preparação para lidar com possíveis problemas técnicos.

Flexibilidade no layout dos canais de resfriamento, maior taxa de resfriamento, menor tempo de ciclo produtivo e melhoria na produção de peças fundidas são claros benefícios. Entretanto, há escassa informação disponível sobre os tipos de aço aplicáveis, poucos resultados práticos divulgados e uma certa incoerência entre expectativas e resultados apresentados.

Autores como Andronov et al. (2023), Karakoc et al. (2022) e Piekło et al. (2022) reportam resultados perceptíveis em moldes de fundição de alumínio sob

pressão, enfrentando desafios como o deslocamento e concentração de porosidades por solidificação. Estudos de He et al. (2023) destacam riscos significativos na produção de vapor e alta nucleação de trincas devido à taxa térmica excessiva. No entanto, trabalhos como os de Choi, J. et al. (2023) demonstram ganhos expressivos na vida útil do molde e estabilidade geométrica do fundido.

Análises gerenciais, como a de Ringen et al. (2022), concluem que a fabricação de insertos com *conformal cooling* pode ser competitiva em termos de custos e tempo de entrega, desde que haja domínio interno das tecnologias de manufatura aditiva.

Finalmente, destaca-se o trabalho de Andronov et al. (2023) pela proposta inovadora de grandes posições, alcançando viabilidade econômica e técnica. Assim, conclui-se que as refrigerações tipo CC compõem uma estratégia interessante na gestão térmica dos moldes, requerendo, contudo, análises técnicas e econômicas caso a caso.

6.1 Sugestões de pesquisas futura

A técnica de refrigeração conformada *conformal cooling* tem se mostrado promissora na otimização térmica de moldes para fundição sob pressão de alumínio. No entanto, há poucas comparações detalhadas entre sistemas convencionais e conformados, e questões sobre materiais aplicados na manufatura aditiva, como composição química e tratamentos térmicos, não foram exploradas adequadamente.

Futuras pesquisas devem focar no impacto desses materiais e tratamentos sobre a resistência mecânica dos insertos aditivamente manufaturados, além de investigar os diferentes processos de manufatura aditiva e suas influências na durabilidade dos moldes, especialmente em relação à fadiga térmica. Isso ajudaria a aprimorar o desempenho e a vida útil dos moldes.

7 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, V. D. S. **Implementação da automação de parâmetros para melhoria do processo de conformação por prensagem de massa de tamponamento para furos de corrida em altos-fornos**. 2023, 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2023.

Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/18606>. Acesso em: 10/08/2024

ADVEKAR, A.; ARUNKUMAR, D. Y.; SRINATH, D. M. S. **Simulation of High Pressure Die Casting Process for Identifying and Minimising Defects**. International Journal of Engineering Research & Technology, v. 3, n.17, p. 1-9, 2015.

Disponível em: <https://www.ijert.org/simulation-of-high-pressure-die-casting-process-for-identifying-and-minimising-defects>. Acesso em: 10/08/2024

ANDRONOV, V. N.; BERÁNEK, Libor; ZAJÍC, Jan; ŠOTKA, Pavel; BÖCK, Martin. **Case Study of Large Three-Dimensional-Printed Slider with Conformal Cooling for High-Pressure Die Casting**. 2023. *3D Printing and Additive Manufacturing*, v. 10, n. 4, p. 587-608. DOI: 10.1089/3dp.2022.0225. Disponível em:

<https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/3dp.2022.0225>. Acesso em: 10/08/2024

BRØTAN, V.; BERG, Å. O.; SØRBY, K. **Additive Manufacturing for Enhanced Performance of Molds**. Procedia CIRP, v. 54, p. 186-190, 2016. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978921002262>. Acesso em: 10/08/2024

CAMARGO, S. A.; ROMEIRO, L. C.; MORAES, C. A. M. **Assessment of thermal behavior of a cooling system to reduce thermal fatigue cracks in aluminum injection molds**. *Revista Liberato*, v. 21, n. 35, p. 75–86, 2020. Disponível em:

<https://revista.liberato.com.br/index.php/revista/article/view/643>. Acesso em: 10/08/2024

CARVALHO, J. P. D. O. B. F. **Fabrico de moldes para a produção de luvas finas: novos desafios, processos e materiais**. 2021, 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Minho, 2021. Disponível em:

<https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/81111>. Acesso em: 10/08/2024

CASAES, G. A. **Análise da simulação CAE de uma peça fabricada pelo processo de injeção de alumínio sob pressão**. 2022, 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Automotiva) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, SC, 2022. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/243415>. Acesso em: 10/08/2024

CHOI, J. *et al.* **Fatigue Life Prediction Methodology of Hot Work Tool Steel Dies for High-Pressure Die Casting Based on Thermal Stress Analysis**. *Metals*, v. 12, n. 10, p. 1-18, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/10/1744>.

Acesso em: 10/08/2024

FENG, S.; KAMAT, A. M.; PEI, Y. **Design and fabrication of conformal cooling channels in molds**: Review and progress updates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 171, p. 1-28, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001793102100185X>. Acesso em: 10/08/2024

FIORENTINI, Federica; CURCIO, Pellegrino; ARMENTANI, Enrico; ROSSO, Carlo; BALDISSERA, Paolo. **Study of two alternative cooling systems of a mold insert used in die casting process of light alloy components**. 2019. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.02.050. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321620302754> Acesso em: 10/08/2024

FORTES, G. P. **Análise de peças refugadas por não conformidades no processo de injeção sob pressão**. 2021, 47f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2021. Disponível em: https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UTFPR-12_eba7699c953ad1f401e51384e29c0601. Acesso em: 10/08/2024

FRANCELINO, G. *et al.* **A importância dos sistemas de refrigeração em moldes de injeção**: análise de um processo de fabricação pelo ponto de vista termodinâmico. *Anais Da Mostra De Iniciação Científica Do Cesuca*, v. 13, p. 273-284, 2019. Disponível em <https://ojs.cesuca.edu.br/index.php/mostrac/article/view/1703>. Acesso em: 10/08/2024

FUHR, L. T. *et al.* **Influência dos defeitos de solidificação na resistência à corrosão do Zamac 5 obtido por injeção sob pressão**. *Matéria*, v. 25, p.1-12, 2020). Disponível em <https://www.scielo.br/j/rmat/a/WzDqmx4VPqg75CBsd6JNHTC/?lang=pt>. Acesso em: 10/08/2024

GOMES, A. P. A. F. **Análise do Processo de Injeção Verificando a Relação entre a Capabilidade das Variáveis e a Qualidade da Peça**. 2018, 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, 2018. Disponível em: https://oasisbr.ibict.br/vufind/Record/RCAP_774eb9f797c8b9e04a5c837734e42918. Acesso em: 10/08/2024

HE, Xin; TANG, Chenglu; VIAN, Corey; WONG, Chi-Seng; JUANG, Shuei-Wan; VIAN, Wei; WANG, Xiaoming. **Understanding conformal cooling in the diecasting of aluminum alloys**. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 1281, p. 012010, 2023. DOI: 10.1088/1757-899X/1281/1/012010. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1281/1/012010>. Acesso em: 10/08/2024

HOEGH, Woongbeom; YEON, Si Mo; KANG, Dongseok; PARK, Seonghwan; PARK, Seongjun; RYU, Kwanho; SUN, J.H.; JI, Leecheol; SON, Yong; CHOI, Kyunsuk; HA, Cheol Woo. **The design and additive manufacturing of an eco-friendly mold utilized for high productivity based on conformal cooling optimization**. 2022. *Materials and Design*, v. 222, p. 111088. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111088.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127522007109>. Acesso em: 10/08/2024

HÜBNER, G. F.; LUCIANO, M. A. **Avaliação da força de extração em moldes de injeção**. Revista Iberoamericana de Polímeros, v. 20, n. 2, p. 61-71, 2019. Disponível em: <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2019/05/2019-20-2-61-71-hubner-y-col.pdf>. Acesso em: 10/08/2024

IPEK, O.; BOLATTURK, A.; KAN, M.; KURTULUS, K. **Investigation of transient numerical simulation of solidification and thermal behavior of metal molds with conformal cooling channels**. *Scientia Iranica*, v. 26, n. 6, p. 3325-3333, 2019. Sharif University of Technology. DOI: 10.24200/sci.2018.50988.1953. Disponível em: https://scientiairanica.sharif.edu/article_20896.html. Acesso em: 10/08/2024

JARFORS, A. E.; SEVASTOPOL, R.; SESHENDRA, K.; ZHANG, Q.; STEGGO, J., & STOLT, R. **On the use of conformal cooling in high-pressure die-casting and semisolid casting**. *Technologies*, v. 9, n. 2, p. 39, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-7080/9/2/39>. Acesso em: 10/08/2024

LANZER, E. A.; STEFFANI, G.; GONÇALVES, T. P. **Previsão de custos de fabricação de moldes para injeção de termoplásticos**. *Produção em Foco*, v. 8, n. 3, p.404-423, 2018. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/423232071/Previsao-de-Custos-de-Fabricacao-de-Moldes-Para-Injecao-de-Termoplasticos>. Acesso em: 10/08/2024

LOPES, A. C. F. **Microinjeção**: casos de estudo. 2019, 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Concepção e Desenvolvimento de Produto) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Leiria, Portugal, 2019. Disponível em: <https://iconline.ipleiria.pt/handle/10400.8/4833>. Acesso em: 10/08/2024

LOPES, M.; TAMANINI, C.; WILTGEN, F.; CRUZ, F. **A Importância das Simulações na Manufatura Aditiva de Moldes Mecânicos**. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, v. 7, n.1, p. 396-424, 2022. Disponível em: <https://revistas.ifpr.edu.br/index.php/mundietg/article/view/931>. Acesso em: 10/08/2024

KANBUR, Baris Burak; SUPING, Shen; DUAN, Fei.. **Design and optimization of conformal cooling channels for injection molding: a review**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 106, p. 3253-3271, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-04697-9>. Acesso em: 10/08/2024

KARAKOC, P.; DIZDAR, K. C.; DISPINAR, D. **Investigation of effect of conformal cooling in serts in high-pressure die casting of AlSi9Cu3**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 121, n. 11-12, p. 7311-7323. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-09808-7>. Acesso em: 10/08/2024

KAYANO, A. L. M. S. **Estudo de caso: processo de injeção plástica de cilindros de seringas.** 2023, 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, SP, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/b1366a8c-ddf2-4888-96c1-925127de486f>. Acesso em: 10/08/2024

MALAVAZI, J. **Manual de Fundição sob Pressão.** Presidente Altino, SP. Votorantim Metais, 2010. Disponível em: <https://issuu.com/prodweb/docs/manual-de-fundicao-sob-pressao/18>. Acesso em: 10/08/2024

MARCHINI, Luca; TONOLINI, Pietro; MONTESANO, Lorenzo; TOCCI, Marialaura; POLA, Annalisa; GELFI, Marcello. **Cavitation erosion resistance of 1.2709 alloy produced via Laser-Powder Bed Fusion.** 2024. *Procedia Structural Integrity*, v. 53, p. 212-220. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.01.026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245232162400026X>. Acesso em: 10/08/2024

MARCHINI, Luca; TONOLINI, Pietro; MONTESANO, Lorenzo; GELFI, Marcello; POLA, Annalisa. **The corrosion resistance of Maraging steel 1.2709 produced by L-PBF in contact with molten Al-alloys.** *Procedia Structural Integrity*, v. 53, p. 203-211, 2024. ESIAM23. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.01.025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321624000258>. Acesso em: 10/08/2024

MARCHIOLI, C. A. **Influência das velocidades das fases de injeção na microestrutura e nas propriedades mecânicas de peças da liga de alumínio SAE 380 fundidas sob pressão.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. doi:10.11606/D.85.2021.tde-23122022-143704. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-23122022-143704/pt-br.php>. Acesso em: 10/08/2024

MARCHIOLI, C. A. *et al.* A. **Influência na microestrutura e propriedades mecânicas da liga de alumínio A380 fundida sob pressão pela variação nas velocidades de injeção.** *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 20, p.1-9, 2023. Disponível em: <https://tecnologiammm.com.br/article/doi/10.4322/2176-1523.20222804>. Acesso em: 10/08/2024

MARINHO, C. S. G. **Estudo da Resistência Térmica em Componentes Metálicos Fabricados por Manufatura Aditiva e Usados em Moldações Metálicas para Fundição.** 2022, 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade do Minho, Portugal, 2022. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/84192>. Acesso em: 10/08/2024

MARQUES JUNIOR, G. B.; COSTA, C. A. **Manufatura aditiva aplicada na fabricação de insertos para moldes de injeção termoplásticos.** *Scientia Cum Indústria*, v. 7, n. 2, p. 76-82, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332654478_Manufatura_aditiva_aplicad

[a na fabricacao de insertos para moldes de injecao termoplasticos](#). Acesso em: 10/08/2024

MORAIS, M. O. *et al.* **O conhecimento aliado a inovação, elementos para a melhoria de processos produtivos**: estudo de caso em uma fundição de alumínio sob pressão. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 9, p. 1-15, 2020. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/343872479> **O conhecimento aliado a inovacao elementos para a melhoria de processos produtivos estudo de caso em uma fundicao de aluminio sob pressao**. Acesso em: 10/08/2024

NASCIMENTO, T.S. **Análise de fluidez, estrutura e propriedades mecânicas de liga de alumínio Al10Si produzida em moldes de areia congelados**. 2022, 144 f. Trabalho (Especialização em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/237389>. Acesso em: 10/08/2024

NUCCI, J. E. **Uma investigação da têmpera e revenimento após nitretação no aço ferramenta AISI H13**. 2022, 273f. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-05042022-160146/pt-br.php>. Acesso em: 10/08/2024

OLIVEIRA, G. H. *et al.* **Juntas híbridas de policarbonato e alumínio 6061-t6 produzidas por sobremoldagem por injeção**: efeitos da texturização a laser do metal sobre a resistência interfacial. *Anais do 15º. Congresso Brasileiro de Polímeros*, Bento Gonçalves, RS, 2019. Disponível em: <https://e-democracia.com.br/cbpol/anais/2019/pdfs/plenary/4DYB.pdf>. Acesso em: 10/08/2024

PEREIRA, J. A. P. *et al.* **Moldes de injeção de alumínio: efeitos das propriedades térmicas do material do molde nos parâmetros de injeção e projeto do molde**. XII Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Brasília, DF, Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/370972272> **MOLDES DE INJECÃO DE ALUMINIO EFEITOS DAS PROPRIEDADES TERMICAS DO MATERIAL DO MOLDE NOS PARAMETROS DE INJECÃO E PROJETO DO MOLDE**. Acesso em: 10/08/2024

PIEKŁO, J.; BURBELKO, A.; GARBACZ-KLEMPKA, A. **Shape-Dependent Strength of Al Si9Cu3FeZn Die-Cast Alloy in Impact Zone of Conformal cooling Core**. *Material*, v. 15, n. 15, p. 1-21, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/15/5133>. Acesso em: 10/08/2024

PIEKŁO, Jarosław; GARBACZ-KLEMPKA, Aldona; BURBELKO, Andriy. **The Numerical Fatigue Life Analysis of a Conformal HPDC Mould Core Additively Manufactured from Maraging Steel**. *Materials*, v. 16, p. 365, 2022. DOI: 10.3390/ma16010365. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/1/365>. Acesso em: 10/08/2024

PIEKŁO, Jarosław; GARBACZ-KLEMPKA, Aldona; BURBELKO, Andriy. **Use of Maraging Steel 1.2709 for Implementing Parts of Pressure Mold Devices with Conformal Cooling System**. 2020. *Materials*, v. 13, n. 23, p. 5533. DOI: 10.3390/ma13235533. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33291624/>. Acesso em: 10/08/2024

POLICENA, M. R.; POSSER, J. E. A. **Estudo dos processos de rotomoldagem e injeção na fabricação de produtos poliméricos termoplásticos**. Revista Liberato, v. 23, n. 40, p. 149-164, 2022. Disponível em: <https://revista.liberato.com.br/index.php/revista/article/view/805>. Acesso em: 10/08/2024

PRUST, R. **Influência do material das placas de refrigeração do molde no tempo do ciclo de injeção para diferentes polímeros**. 2018, 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Automotiva) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, SC, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/188243>. Acesso em: 10/08/2024

RINGEN, Geir; WELO, Torgeir; BREIVIK, Sissel Marie. **Rapid Manufacturing of Die-casting Tools - a Case Study**. *Procedia CIRP*, v. 107, p. 1565-1570, 2022. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.192. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827122004760>. Acesso em: 10/08/2024

SEBASTOPOLEV, R. **Effect of conformal cooling in Additive Manufactured inserts on properties of high pressure die cast aluminum component**. 2020, 60 f. Dissertação (Mestrado em Metalurgia e Materiais Metálicos) - Universidade de Jönköping, 2020. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1499505&dswid=-2077>. Acesso em: 10/08/2024

SHU, Lei; ZHENGWEN, Zhang; REN, Zhihao; ZHANG, Tao. **Design and simulation of conformal cooling for a die-casting mold insert**. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1939, p. 012002, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1939/1/012002. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1939/1/012002>. Acesso em: 10/08/2024

SILVA, F. C.; CADIOLI, L. P. **Minimização da porosidade em peças injetadas de alumínio sob pressão**: revisão de literatura. Revista Interface Tecnológica, v. 20, n. 1, p. 566-577, 2023. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/1605>. Acesso em: 10/08/2024

SILVA JÚNIOR, R. R. **Fadiga térmica**: equipamento para ensaio e influências dos tratamentos térmicos e superficiais. 2019, 189 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-21082019-130213/publico/>. Acesso em: 10/08/2024

SOARES, A. H. P.; MARCONI, P. D. S.; CARVALHO, G. G. **Avaliação de desempenho de sistemas de refrigeração em moldes de injeção de aço e alumínio através de simulações numéricas**. XII Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Brasília, DF, Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Pedro-Marconi-3/research>. Acesso em: 10/08/2024

STOLT, Roland; ANDRÉ, Samuel; ELGH, Fredrik. **Introducing Inserts for Die Casting Manufactured by Selective Laser Sintering**. *Procedia Manufacturing*, v. 17, p. 309-316, 2018. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.051. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918311673>. Acesso em: 10/08/2024

TAMANINI, C.; WILTGEN, F. **Canais de refrigeração para moldes mecânicos via manufatura aditiva**. *Revista Ciências Exatas*, v. 29, n. 2, p. 1-8, 2023. Disponível em: <https://periodicos.unitau.br/exatas/article/view/3642>. Acesso em: 10/08/2024

VENDRAMETTO, L. F. **Monitoramento e controle de parâmetros de fundição sob pressão através de equipamento eletrônico**. 2019, 48 f. Monografia (Especialização em Automação Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/17081>. Acesso em: 10/08/2024

ZENG, T.; ABO-SERIE, E.; HENRY, M.; JEWKES, J. **Cooling channel free surface optimisation for additively manufactured casting tools**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.127, p. 1293-1315, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-11402-4>. Acesso em: 10/08/2024