

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA EM
SISTEMAS PRODUTIVOS

MARCO AURÉLIO FERIOTTI

INOVAÇÃO NA INDÚSTRIA DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO: APLICAÇÃO DA
MANUFATURA HÍBRIDA DE METAIS PARA APRIMORAMENTO DE MOLDES DE
BAQUELITE

São Paulo

Março/2024

MARCO AURÉLIO FERIOTTI

INOVAÇÃO NA INDÚSTRIA DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO: APLICAÇÃO DA
MANUFATURA HÍBRIDA DE METAIS PARA APRIMORAMENTO DE MOLDES DE
BAQUELITE

Dissertação apresentada como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, sob a orientação do Prof. Dr. Alexandre Formigoni.

Área de Concentração: Sistemas Produtivos

São Paulo

Março/2024

F356i Feriotti, Marco Aurélio
Inovação na indústria de moldagem por injeção: aplicação da manufatura híbrida de metais para aprimoramento de moldes de baquelite / Marco Aurélio Feriotti . – São Paulo: CPS, 2024. 124 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Formigoni
Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2024.

1. Manufatura aditiva de metais. 2. Manufatura híbrida de metais. 3. Termofixo baquelite. 4. Molde para injeção de baquelite. 5. Sistemas produtivos. I. Formigoni, Alexandre. II. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. III. Título.


MARCO AURÉLIO FERIOTTI

INOVAÇÃO NA INDÚSTRIA DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO: APLICAÇÃO DA
MANUFATURA HÍBRIDA DE METAIS PARA APRIMORAMENTO DE MOLDES DE
BAQUELITE




Prof. Dr. Alexandre Formigoni

Orientador – CEETEPS



Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho

Examinador Externo – EESC-USP

Documento assinado digitalmente
 **ROSINEI BATISTA RIBEIRO**
Data: 19/04/2024 11:20:59-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro

Examinador Interno - CEETEPS

São Paulo, 21 de março de 2024

Dedico esta dissertação à minha esposa, Rosana A. M. Feriotti, e aos meus filhos, Fernando Augusto Feriotti e Breno Henrique Feriotti, pelo apoio incondicional e incentivo que foram fundamentais para o meu sucesso acadêmico. Durante os momentos de ausência, compreenderam e me encorajaram, criando um ambiente acolhedor e compreensivo que impulsionou minha motivação e perseverança.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente expresso minha gratidão a Deus por me capacitar, encorajar a superar as dificuldades no decorrer deste período de estudo, e conduzir meus passos permitindo que chegasse até aqui.

A minha esposa Rosana A. M. Feriotti, meu pilar de força e apoio incansável, e aos meus filhos, Fernando A. Feriotti e Breno H. Feriotti, minha fonte de inspiração, dedico este trabalho com amor e gratidão eternos. Que esta dissertação represente nossos laços familiares sólidos e conquistas compartilhadas.

Agradeço profundamente ao Professor Dr. Alexandre Formigoni, meu orientador, por seu incentivo, apoio e orientação valiosos ao longo do curso. Sua dedicação incansável e expertise em pesquisa contribuíram imensamente para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Seu compromisso é inestimável. Além disso, sou grato pela oportunidade de ter contribuído em artigos publicados sob sua orientação.

Gratidão à equipe gestora do programa da pós-graduação do Centro Paula Souza pelo seu comprometimento com o curso e a todos os professores que compartilharam seu conhecimento, em especial ao Professor Dr. Rosinei Batista Ribeiro pela colaboração em artigos e simpósios. Também expresso minha gratidão a todos funcionários, notadamente a Debora e a Vilma, pelo imenso apoio nos seminários e nas questões administrativas.

Minha eterna gratidão aos meus colegas doutorandos Julia, Johan, Fabio e Vincent, bem como ao Professor Dr. Reginaldo do LAPRAS EESC - USP, pelo apoio imensurável nesta jornada acadêmica. Compartilhamos desafios, conquistas e aprendizados, enriquecendo minha experiência de pesquisa. Agradeço a cada um por suas contribuições únicas ao grupo.

Ao Professor Dr. Reginaldo Teixeira Coelho, expresso profunda gratidão por abrir as portas do laboratório e proporcionar um ambiente acolhedor e inspirador. Sua orientação e experiência foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação exemplar em guiar e apoiar os estudantes deixará uma marca duradoura em nossas carreiras.

Agradeço a Danilo Ramos, diretor da Empresa BAQUELLITES LTDA, por abrir as portas para este projeto. Sua crença na proposta e a colaboração fundamental para o primeiro ensaio foram passos essenciais para o sucesso desta pesquisa. Sua visão inovadora é inspiradora, e estou profundamente grato por trabalhar com alguém tão empreendedor e visionário como você.

Este projeto representa não apenas uma pesquisa acadêmica, mas também uma demonstração prática da sinergia entre academia e indústria.

Na convivência, o tempo não importa.
Se for um minuto, uma hora, uma vida.
O que importa é o que ficou deste minuto,
desta hora, desta vida...
Lembra que o que importa
é tudo que semeares colherás.
Por isso, marca a tua passagem,
deixa algo de ti...
do teu minuto,
da tua hora,
do teu dia,
da tua vida.”

(Mario Quintana)

RESUMO

FERIOTTI, M. A. **Inovação na Indústria de Moldagem por Injeção: Aplicação da Manufatura Híbrida de Metais para Aprimoramento de Moldes de Baquelite.** 124 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2024.

A indústria de moldagem por injeção enfrenta desafios na utilização do material polimérico do tipo termofixo baquelite, aplicado em componentes eletrônicos, utensílios de cozinha e peças automotivas devido às suas propriedades mecânicas e além de ser isolante elétrico e térmico. No entanto, a rigidez e resistência mecânica do termofixo baquelite desgastam acentuadamente os moldes, resultando em excessivas rebarbas nas peças injetadas, prejudicando sua qualidade e requerendo manutenção que diminui a vida útil dos moldes, além de ser dispendiosa. Este estudo propõe a aplicação da Manufatura Híbrida de Metais (MHM), associando a Manufatura Aditiva de Metais (MAM) com a Manufatura Subtrativa (MS), ou seja, a usinagem, para melhorar a resistência ao desgaste na linha de fechamento dos moldes para injeção de baquelite. A MHM combinada cria um ambiente de manufatura conectado e eficiente, permitindo a produção de produtos mais complexos em menos tempo, se torna crucial na indústria de moldagem por injeção, uma vez que a MHM pode processar diversos metais, incluindo aços convencionalmente usados em moldes. O objetivo deste estudo é aprimorar o desempenho do molde por meio da aplicação da MHM, especialmente na área de fechamento da cavidade, visando aumentar sua vida útil no processo de injeção. A pesquisa é exploratória e qualitativa, o método *Design Science Research* (DSR) foi empregado para desenvolver conhecimento na criação do artefato, enquanto o Grupo Focal (GF) explorou percepções e opiniões para avaliação das soluções do problema em questão. Foi realizado o processo de deposição de aço M2 na cavidade do molde e testado, totalizando 40.000 ciclos de produção. Após o teste, foram realizadas análises das propriedades mecânicas, dureza e resistência ao desgaste do material. Os resultados dessas observações serão aplicados em projetos futuros de moldes. A MHM pode trazer inovação para a indústria de moldagem por injeção, aumentando a durabilidade dos moldes, reduzindo custos de manutenção e assegurando qualidade das peças injetadas, marcando um avanço eficiente e econômico.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva de Metais. Manufatura Híbrida de Metais. Termofixo Baquelite. Moldes para injeção de Baquelite. Sistemas Produtivos.

ABSTRACT

FERIOTTI, M. A. **Innovation in the Injection Molding Industry: Application of Hybrid Metal Manufacturing for Enhancement of Bakelite Molds.** 124 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2024.

The injection molding industry faces challenges in using the thermosetting polymer material bakelite, applied in electronic components, kitchen utensils, and automotive parts due to its mechanical properties as well as being an electrical and thermal insulator. However, the stiffness and mechanical strength of bakelite thermoset material significantly wear out the molds, resulting in excessive burrs on the injected parts, compromising their quality and requiring maintenance that reduces the lifespan of the molds, in addition to being costly. This study proposes the application of Hybrid Metal Manufacturing (HMM), combining Additive Metal Manufacturing (AMM) with Subtractive Manufacturing (SM), that is, machining, to improve wear resistance in the mold closing line for bakelite injection. The combined HMM creates a connected and efficient manufacturing environment, enabling the production of more complex products in less time, becoming crucial in the injection molding industry, as HMM can process various metals, including steels conventionally used in molds. The objective of this study is to enhance mold performance through the application of HMM, especially in the cavity closing area, aiming to increase its lifespan in the injection process. The research is exploratory and qualitative-quantitative, the Design Science Research (DSR) method was employed to develop knowledge in creating the artifact, while the Focus Group (FG) explored perceptions and opinions to evaluate solutions to the problem at hand. The M2 steel deposition process was carried out in the mold cavity and tested, totaling 40,000 production cycles. After testing, analyses of mechanical properties, hardness, and material wear resistance were performed. The results of these observations will be applied in future mold designs. HMM can bring innovation to the injection molding industry, increasing mold durability, reducing maintenance costs, and ensuring the quality of injected parts, marking an efficient and economic advancement.

Keywords: Metal Additive Manufacturing. Hybrid Metal Manufacturing. Thermoset Bakelite. Bakelite Injection Molds. Production Systems.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Características, vantagens e desvantagens	35
Quadro 2- Etapas envolvidas no processo de injeção de termofixos baquelite..	40
Quadro 3- Etapas da condução do GF	43
Quadro 4- Artigos produzidos	49
Quadro 5- Etapas e premissas do DSR.....	50
Quadro 6- Artigos, autores, título, congresso e simpósio	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parametrização amostra "A1" com tempo de espera.....	69
Tabela 2- Parametrização amostra "A1" sem tempo de espera.....	70
Tabela 3- Parametrização amostra "A2" com tempo de espera.....	71
Tabela 4- Parametrização amostra "A2" sem tempo de espera.....	72
Tabela 5- Parametrização amostra "A3" com tempo de espera.....	72
Tabela 6- Parametrização amostra "A3" sem tempo de espera.....	73
Tabela 7- Fatores, níveis, sequência de experimentos e resultados.....	84
Tabela 8- Tempo (t) e peso (g) da DED do pó de aço M2.....	87
Tabela 9- Comparação período de inatividade entre os processos.....	88
Tabela 10- Comparação custos de recuperação do molde.....	88
Tabela 11- Comparação custo previsto de manutenção entre os processos x peça injetada (projeção anual).....	89
Tabela 12- Projeção anual dos impactos previstos com uso da MHM.....	90
Tabela 13- Peso médio da injetada completa x N° Ciclos (Real/ Projetada).....	93
Tabela 14- Comparativo variação do volume de injeção (Real/ Projetado).....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação do processo de estereolitografia (SLA)	23
Figura 2- Representação esquemática da sinterização seletiva a laser SLM.....	24
Figura 3- Resumo histórico do desenvolvimento da MA.....	25
Figura 4- Visão esquemática do DED	27
Figura 5- Visão esquemática PBF	28
Figura 6- Representação da aplicação DED pelo processo da manufatura híbrida.....	30
Figura 7- Máquina ferramenta CNC híbrida	31
Figura 8- Ilustração da manufatura híbrida de metal.....	32
Figura 9- Representação da aplicação da manufatura híbrida no reparo de peças	32
Figura 10- Representação de aplicação MHM em molde	33
Figura 11- Representação esquemática do processo de moldagem por compactação e transferência.....	36
Figura 12- Representação esquemática do processo de moldagem por injeção	36
Figura 13- Representação da parte fixa e móvel do molde	38
Figura 14- Representação do aço AISI H-13 com dupla camada PVD.....	39
Figura 15- Fluxograma para condução do DSR	42
Figura 16- Organograma para planejamento do GF	44
Figura 17- Etapas para implementação do DoE	45
Figura 18- Fluxograma da estrutura da metodologia desenvolvidas	48
Figura 19- Protocolo da pesquisa RSL	53
Figura 20- Modelos de experimentos	58
Figura 21- Peça injetada com excesso de rebarbas.....	60
Figura 22- Criação de modelo matemático 3D CAD®	63
Figura 23- Protótipo de aço SAE 1045 com deposição de aço em pó AISI H-13.....	64
Figura 24- Dimensões da região rebaixada para deposição	66
Figura 25- Amostras com deposição materiais 1030A e 1040A	67
Figura 26- Amostras com deposição em substrato SAE 1045 com trincas	67
Figura 27- Amostras com deposição em substrato AISI H-13 com trincas e deslocamento	68
Figura 28- Amostras com deposição do aço M2 em substrato AISI H-13	69

Figura 29- Ensaio de dureza e metalográfico	70
Figura 30- Ensaio de dureza e metalográfico	70
Figura 31- Ensaio de dureza e metalográfico	71
Figura 32- Ensaio de dureza e metalográfico	72
Figura 33- Ensaio de dureza e metalográfico	73
Figura 34- Ensaio de dureza e metalográfico	73
Figura 35- Comparativo dos testes de dureza e fusão das amostras DED e Solda	74
Figura 36- Cavidades com desgastes na linha de fechamento.....	75
Figura 37- Perímetro com rebaixo para reparo Matriz e Macho	76
Figura 38- Trajetória da Deposição na região externa da Matriz	77
Figura 39- Trajetória da Deposição na região interna da Matriz.....	77
Figura 40- Trajetória da Deposição na região externa do Macho.....	78
Figura 41- Trajetória da Deposição na região interna do Macho	78
Figura 42- Região bocal próximo a geometria	79
Figura 43- Região queima identificada na lente.....	79
Figura 44- Deposição com trinca.....	80
Figura 45- Matriz concluída com DED nas cavidades	81
Figura 46- Deposição completa no Macho.....	81
Figura 47- Operação de eletro erosão no retrabalho das cavidades	82
Figura 48- Molde montado lado matriz e macho	82
Figura 49- Influência dos fatores na variável resposta Nível de Rebarbas	85
Figura 50- Média dos fatores na variável resposta Nível de Rebarbas	86
Figura 51- Trinca na cavidade	92
Figura 52- Cálculos da interpolação linear.....	92
Figura 53- Comparativo variação de peso MHM x Solda.....	94
Figura 54- Comparação das variações do volume de injeção	95
Figura 55- Comparação cavidades com desgaste x recuperadas com MHM	95
Figura 56- Comparação produtos injetados com e sem rebarba.....	96

LISTA DE SIGLAS

ASTM.....	American Society for Testing and Materials
CAD.....	Computer Aided Design
CAM.....	Computer Aided Machine
CNC.....	Comando Numérico Computadorizado
DED.....	Directed Energy Deposition
DoE.....	Design of Experiments
DSR.....	Design Science Research
EBM.....	Electron Beam Melting
FMEA.....	Failure Modes and Effects Analysis
GF.....	Grupo Focal
HRC.....	Dureza Rockwell - C
LAPRAS.....	Laboratory for Advanced Processes and Sustainability
MA.....	Manufatura Aditiva
MAM.....	Manufatura Aditiva de Metais
MHM.....	Manufatura Híbrida de Metais
MH.....	Manufatura Híbrida
MS.....	Manufatura Subtrativa
PBF.....	Powder Bed Fusion
PVD.....	Deposição Física de Vapor
RSL.....	Revisão Sistemática da Literatura
SLA.....	Stereolithography
SLM.....	Selective Laser Melting
SLS.....	Sinterização Seletiva a Laser
UV.....	Ultravioleta

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	17
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
1.1 Manufatura aditiva (MA).....	21
1.1.1 <i>História da MA.....</i>	22
1.2 Manufatura aditiva de metais (MAM).....	25
1.3 Manufatura híbrida de metais (MHM).....	29
1.3.1 <i>Conceito e origem da MHM.....</i>	29
1.3.2 <i>Características da MHM.....</i>	30
1.3.3 <i>Aplicações e oportunidades da MHM.....</i>	32
1.4 Termofixo Baquelite.....	34
1.4.1 <i>Processos de moldagem de baquelite.....</i>	35
1.5 Moldes para injeção de baquelite	37
1.6 Sistemas produtivos	39
1.7 Design Science Research (DSR)	41
1.7.1 <i>Aplicação do DSR</i>	41
1.8 Grupo Focal (GF).....	42
1.9 Design of Experiments (DoE).....	44
2 METODOLOGIA	46
2.1 Natureza e Objetivo da Pesquisa	46
2.2 Formas de Abordagem e Avaliação da Pesquisa	47
2.3 Design Science Research (DSR).....	49
2.3.1 <i>Conscientização do problema</i>	51
2.3.2 <i>Ideação.....</i>	54
2.3.3 <i>Desenvolvimento</i>	56
2.3.4 <i>Demonstração do artefato.....</i>	57
2.3.5 <i>Avaliação.....</i>	57
2.3.6 <i>Comunicação.....</i>	59
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
3.1 Identificação do problema	60
3.2 Ideação da solução	62
3.3 Desenvolvimento do artefato.....	65
3.3.1 <i>Caracterização Microestrutural Mediada pela MAM</i>	66
3.3.2 <i>Modelagem 3D.....</i>	76
3.4 Demonstração do artefato	83
3.5 Avaliação	83
3.6 Comunicação	90
CONCLUSÃO.....	97

REFERÊNCIAS	99
APÊNDICE 1	105
APÊNDICE 2	109
APÊNDICE 3	110
APÊNDICE 4	111
APÊNDICE 5	112
APÊNDICE 6	113
APÊNDICE 7	114
APÊNDICE 8	115
APÊNDICE 9	116
APÊNDICE 10	118
APÊNDICE 11	122
APÊNDICE 12	123

INTRODUÇÃO

A concepção deste projeto emerge a partir de experiências profissionais, nas quais um desafio significativo relacionado ao desgaste nos moldes para injeção de baquelite foi identificado. Tal identificação foi potencializada no curso de Manufatura Híbrida oferecido pela EESC – USP. Ao longo do curso, tornou-se evidente que a incorporação da manufatura híbrida poderia representar uma solução eficaz para os desafios de desgaste, proporcionando melhorias substanciais na eficiência e na qualidade do processo produtivo de injeção.

Este projeto foi desenvolvido em um ambiente interacadêmico, com a colaboração de dois centros acadêmicos distintos. Sua abordagem interdisciplinar envolveu diversas competências tanto da engenharia de processos quanto da engenharia de materiais, reunindo especialistas de ambas as áreas para promover uma análise abrangente e holística. Além disso, uma parceria estratégica com uma empresa do setor possibilitou a aplicação prática do projeto em um ambiente real de produção, proporcionando valiosos insights e oportunidades de validação. Essa sinergia entre a academia e o setor industrial fortaleceu o desenvolvimento do projeto, ampliando seu impacto e relevância para ambas as comunidades. Diante desse contexto, a proposta de aplicar essa tecnologia inovadora surgiu como uma estratégia para otimizar não apenas o desempenho, mas também estender a vida útil dos moldes utilizados nesse contexto específico.

O termofixo baquelite é um material que, após sua moldagem e cura, não pode ser derretido ou reformulado. Suas principais características são a resistência mecânica, isolamento elétrico e térmico. É amplamente utilizado na fabricação de componentes eletrônicos, cabos de panela, peças automotivas, etc. (Sousa; Leite; Gama, 2018).

Devido à sua rigidez e alta resistência mecânica, ele causa desgaste em moldes durante o processo de moldagem por injeção. Isso ocorre porque o termofixo baquelite oferece resistência ao corte e destacamento do molde durante o processo de extração (Stachurski; Piaskowski, 2019).

Neste sentido, a moldagem de baquelite exige um cuidado especial na escolha dos materiais e no projeto do molde, pois esses materiais passam por um processo químico durante a moldagem, o que pode causar problemas como desgaste, resultando em altos índices de manutenção que comprometem a vida útil dos moldes (Osswald; Turng; Gramann, 2007).

Na indústria de moldagem por injeção, há uma crescente adoção de tecnologias de MAM, porém, os fabricantes enfrentam o desafio de imprimir moldes de aço com propriedades mecânicas comparáveis aos moldes convencionais. Esse desafio é especialmente relevante para os moldes utilizados nos processos de injeção de baquelite, amplamente utilizado na indústria para a produção de peças com alta resistência e durabilidade (Li, Yongwei *et al.*, 2018).

A tecnologia de MA está avançando rapidamente, demonstrando um enorme potencial para diminuir a dependência de processos de fabricação convencionais que consomem muita energia e recursos (Feriotti *et al.*, 2022).

A MA desempenha um papel fundamental na Indústria 4.0, que visa criar fábricas inteligentes por meio da automação. A estratégia chave para alcançar um ambiente de manufatura interconectado, flexível e eficiente é a hibridização de processos (Feriotti; Formigoni, 2022b).

A MHM engloba processos e máquinas que combinam diferentes abordagens, como a impressão multimaterial, multiestrutura e multifuncional. A integração dessas duas tecnologias em uma cadeia de processos híbrida possui um potencial significativo para superar as técnicas tradicionais de fabricação, permitindo a produção de produtos de forma completa e física, com tempos de produção mais curtos (Feriotti; Formigoni, 2022a).

Várias pesquisas estão concentradas na integração da MA de metais com a MS, resultando na tecnologia conhecida como MHM. Essa abordagem envolve a combinação de processos aditivos, como *Directed Energy Deposition* (DED) e *Powder Bed Fusion* (PBF), com usinagem comando numérico computadorizada (CNC) em uma única máquina-ferramenta de multi-eixos (Feriotti; Formigoni, 2022b).

A tecnologia em ascensão da MHM está em constante evolução, permitindo a combinação de diversos materiais com propriedades distintas e a criação de componentes personalizados para atender a uma ampla gama de aplicações. Os processos de MHM podem ser classificados por meio de diferentes combinações de materiais metálicos. Recentemente, pesquisadores têm explorado ainda mais as possibilidades dessa tecnologia para a produção de peças altamente funcionais (Chueh *et al.*, 2020).

A tecnologia da MAM tem obtido sucesso no processamento de diversos tipos de materiais, tais como aço inoxidável, aço ferramenta, ligas de cobalto-cromo, titânio e suas ligas, ligas de alumínio, ligas de níquel, bem como metais preciosos, incluindo prata pura e ouro (Afkhami *et al.*, 2019). A MHM tem uma das suas principais aplicações na área de manutenção e reparo de componentes existentes (Sefene; Hailu; Tsegaw, 2022).

A problemática desta pesquisa emerge da necessidade de um fabricante de cabos e acessórios de baquelite para painéis melhorar a qualidade de seus produtos injetados, devido ao excesso de rebarbas geradas no processo de injeção. Essas rebarbas são resultado dos desgastes que ocorrem na linha de fechamento dos moldes.

Neste sentido, este estudo visa contribuir para a área de pesquisa sobre a aplicação da MHM, trazendo a seguinte questão de pesquisa: Como ampliar o desempenho da vida útil de moldes para injeção de Baquelite para melhoria da resistência ao desgaste das cavidades?

Esta pesquisa justifica-se pela proposta de contribuição para a área de estudo da aplicação da MHM, com foco na melhoria da resistência ao desgaste das cavidades dos moldes para injeção de Baquelite. Aumentar o desempenho da vida útil desses moldes é um objetivo relevante para reduzir os índices de manutenção e otimizar o sistema produtivo das peças injetadas garantindo a sua qualidade.

O objetivo geral é apresentar uma proposta de melhoria no projeto do molde utilizando de forma híbrida a MHM na linha de fechamento da cavidade e avaliar seu desempenho no processo produtivo de injeção. Com o intuito de alcançar esse objetivo, os seguintes objetivos específicos foram perseguidos:

- i. Pesquisar os tipos de aços atomizados e suas propriedades mecânicas.
- ii. Avaliar as estratégias de deposição de metais e os resultados obtidos.
- iii. Verificar o desempenho da aplicação dessa tecnologia num determinado período do processo produtivo de injeção.
- iv. Comparar o desempenho da solução com o sistema existente.
- v. Avaliar a viabilidade técnica e financeira do projeto de melhoria.

O resultado esperado desta pesquisa é alcançar melhorias do desempenho e aumento da vida útil dos moldes. Ao reduzir o número de intervenções e facilitar a recuperação de cavidades desgastadas, espera-se proporcionar uma notável otimização no processo produtivo de injeção. Esse aprimoramento não apenas visa a eficiência, mas

também se traduz em benefícios tangíveis, como a redução significativa nos níveis de rebarba. Essa diminuição, por sua vez, resulta na obtenção de peças injetadas de alta qualidade. Portanto, os avanços propostos não apenas promoverão a eficiência, mas também impulsionarão substancialmente a qualidade da produção na indústria de injeção de cabos.

Esta pesquisa classifica-se como natureza aplicada e exploratória. Quanto à abordagem, adota uma metodologia quali-quantitativa, utilizando o método de pesquisa DSR como procedimento técnico, que segundo Dresh (2013), diferentemente dos outros métodos, também pode resultar em soluções prescritivas. O que, certamente, é bastante significativo quando se discute uma abordagem metodológica que busca diminuir a lacuna existente entre a teoria e a prática. Além disso, o GF Exploratório foi empregado com o objetivo de alcançar melhorias rápidas e incrementais na criação de artefatos, por meio de discussões mais aprofundada e colaborativa, tornando-se essenciais para o aprimoramento do processo.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma revisão exploratória inicial foi realizada para apresentar os tópicos relacionados à pesquisa, trazendo os conceitos de Manufatura Aditiva, Manufatura Aditiva de Metais, Manufatura Híbrida de Metais, Termofixo Baquelite, Moldes para injeção de Baquelite, Sistemas Produtivos, *Design Science Research* (DSR), Grupo Focal (GF) Exploratório e *Design of Experiments* (DoE). Conforme definido pelo DSR, um método foi criado, neste caso, a aplicação da tecnologia na linha de fechamento das cavidades de um molde, que foi avaliada com base no GF. Ao realizar o experimento foi utilizado o DoE para coletar os dados de forma estruturada e sistemática.

1.1 Manufatura aditiva (MA)

A MA é o termo formalizado para o que costumava ser chamado de prototipagem rápida e popularmente conhecido como impressão 3D. O termo prototipagem rápida (PR) é usado em diversas indústrias para descrever um processo de criação rápida de um sistema ou representação de uma peça antes do lançamento final ou comercialização. Em outras palavras, o foco está em criar algo rapidamente e que a saída seja um protótipo ou modelo básico a partir do qual serão derivados modelos adicionais e, eventualmente, o produto final (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

A tecnologia da MA envolve a fabricação direta de produtos físicos a partir de modelos de desenho assistido por computador (CAD) usando um processo de fabricação em camadas. contrário ao processo em comparação com a moldagem tradicional ou remoção de material, os produtos de impressão 3D são produzidos adicionando material camada por camada, cada peça não requer ferramentas e acessórios específicos, resultando em produtos com formas ou geometrias complexas (Colosimo *et al.*, 2018).

Como um processo de fabricação inovador, a MA possui muitas promessas convincentes no campo do desenvolvimento social. Tem o potencial de otimizar o design do produto, melhorar a funcionalidade e reduzir a energia ou os recursos naturais necessários para os processos, levando a múltiplos benefícios sociais (Malshe *et al.*, 2015).

De acordo com a norma "ASTM F42 - *Additive Manufacturing*" da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), as técnicas de MA são divididas em sete categorias:

- *VAT Photopolymerisation* (Fotopolimerização)
- *Material Jetting* (Impressão por Jato de Material)
- *Binder Jetting* (Impressão 3D de Aglomerante)
- *Material Extrusion* (Deposição de Material Fundido)
- *Power Bed Fusion* (Fusão em camada de pó)
- *Sheet Lamination* (Laminação de Folhas)
- *Directed Energy Deposition* (Deposição direta de energia)

1.1.1 História da MA

Em 1981, Hideo Kodama inventou um sistema de prototipagem rápida usando foto polímeros, permitindo a construção de modelos sólidos em camadas. Em 1984, Charles Hull inventou a estereolitografia, uma técnica de impressão 3D que utiliza dados digitais para criar objetos tangíveis. A estereolitografia utiliza um material chamado foto polímero, no qual um feixe de laser UV transforma partes expostas em peças plásticas sólidas em modelos três dimensões (3D). Essa tecnologia revolucionou a prototipagem, permitindo testar projetos de forma mais econômica, sem a necessidade de processos tradicionais de fabricação (Ramya; Vanapalli, 2016; Martinelli; Mina; Moggi, 2021).

Em 1992, Charles Hull, fundador da *3D Systems*, desenvolveu a primeira máquina de estereolitografia (SLA *StereoLithoGraphy*), permitindo a produção de peças complexas em camadas (Figura 1). No mesmo ano, a *startup* DTM apresentou a primeira máquina de sinterização seletiva a laser (SLS), usando pó como material de impressão. Apesar das limitações iniciais, como deformações durante o endurecimento, essas tecnologias foram reconhecidas por seu potencial. Embora inicialmente caras para uso doméstico, as possibilidades oferecidas por essas tecnologias foram amplamente reconhecidas (Sampaio, 2017).

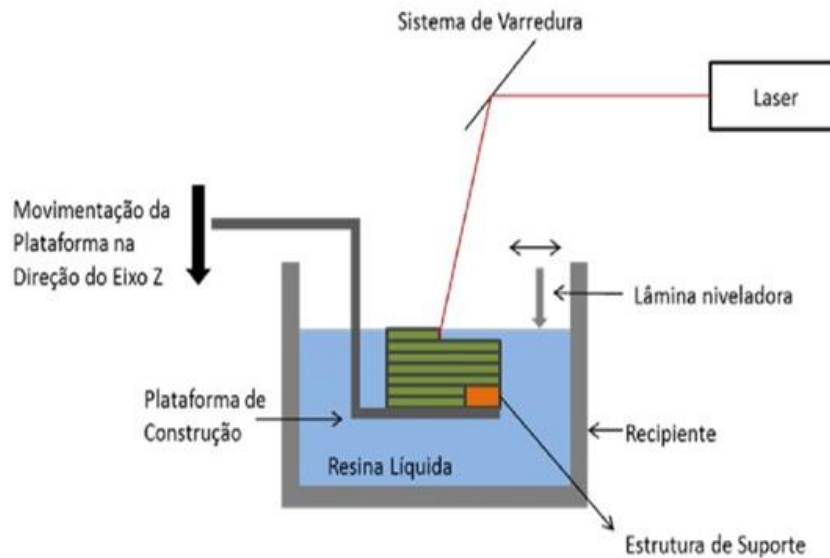


Figura 1- Representação do processo de estereolitografia (SLA)

Fonte: <https://www.researchgate.net/profile/Vinicius-Rodrigues-3>

Em 1999, ocorreu o marco histórico da implantação do primeiro órgão impresso em 3D em seres humanos. Cientistas do *Wake Forest Institute for Regenerative Medicine* imprimiram um suporte sintético de uma bexiga humana, revestido com células dos próprios pacientes. O tecido criado foi posteriormente implantado nos pacientes, apresentando uma baixa probabilidade de rejeição pelo sistema imunológico, uma vez que foi construído a partir das próprias células dos pacientes. Esse avanço representou um importante passo no campo da medicina regenerativa e abriu caminho para novas possibilidades no desenvolvimento de órgãos sob medida para pacientes (Kastner, 2018).

Na década de 2000 à 2010, a MA ganhou popularidade devido à sua capacidade de personalização de produtos. Em 2006, a *startup* de impressão 3D *Objet* (agora parte da *Stratasys*) tornou comercialmente viável a primeira máquina de sinterização seletiva a laser (SLS), conforme representação esquemática na Figura 2, que permitia a impressão em diversos materiais. Isso possibilitou a criação de objetos com diferentes propriedades, abrindo caminho para a produção de produtos mais complexos e customizados. Essa inovação impulsionou ainda mais o campo da MA e suas aplicações em diversos setores (Arrizubieta *et al.*, 2020; Martinelli; Mina; Moggi, 2021).

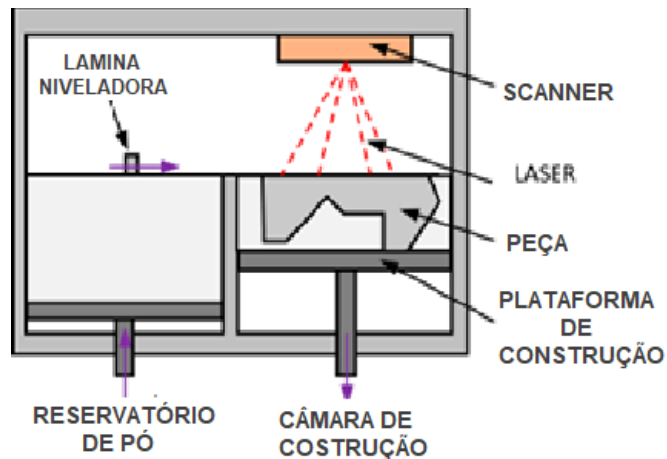


Figura 2- Representação esquemática da sinterização seletiva a laser SLM

Fonte: Arrizubieta, *et al.* (2020)

Em 2005, o Dr. Adrian Bowyer lançou o Projeto RepRap, uma iniciativa de código aberto que visava criar uma impressora 3D auto replicável. Essa iniciativa promovia a colaboração e a distribuição universal de projetos, permitindo a livre modificação e consulta dos produtos sem a necessidade de licenças comerciais. Em 2008, a impressora *Darwin* foi lançada, possibilitando que as pessoas em qualquer lugar tivessem o poder de criar por conta própria, transformando suas ideias em realidade. Esse projeto revolucionou o acesso à tecnologia e impulsionou a democratização da fabricação personalizada (Shah *et al.*, 2019).

A década de inovação resultou no surgimento de serviços de criação colaborativa, como o *Shapeways*, nos quais os consumidores fornecem *feedback* aos criadores e fabricam produtos de maneira acessível (Sampaio, 2017).

O resumo histórico do desenvolvimento da MA baseado em fases e períodos é representado na Figura 3.

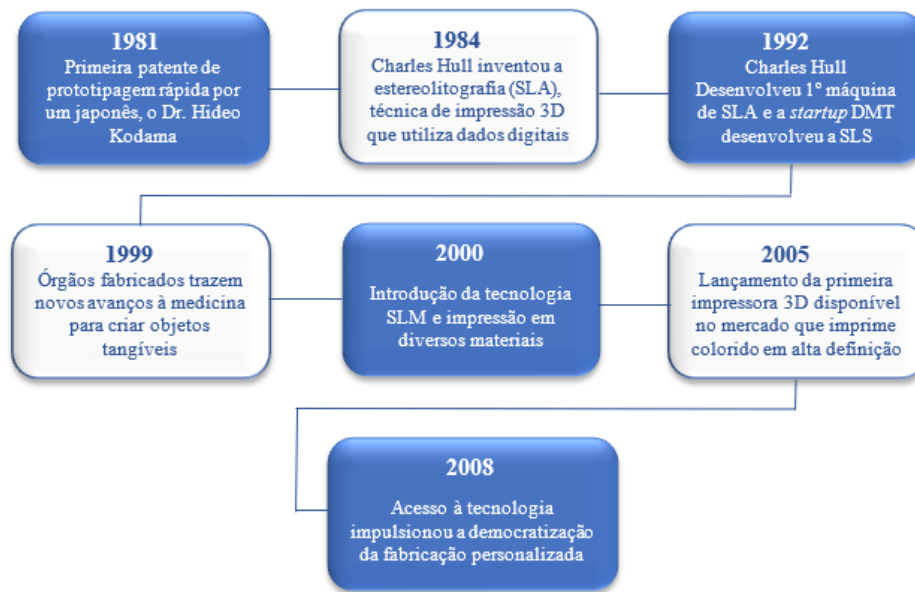


Figura 3- Resumo histórico do desenvolvimento da MA

Fonte: Autor (2023)

A evolução histórica da MA tem sido marcada por avanços significativos, desde os primeiros sistemas de prototipagem rápida até a criação de órgãos humanos impressos em 3D. A introdução de tecnologias como estereolitografia e sinterização seletiva a laser revolucionou a fabricação, permitindo a produção de peças complexas e personalizadas.

A presença dessa tecnologia nas grandes indústrias não é algo novo, entretanto, à medida que ela evolui, vai se expandindo ao longo da cadeia de suprimentos, aproximando-se cada vez mais do consumidor final. Há uma alta probabilidade de que a cadeia de suprimentos seja modificada pela MA (Feriotti *et al.*, 2021b).

Essa trajetória de inovação continua a moldar a indústria, com a busca por novas aplicações e a democratização da fabricação personalizada.

1.2 Manufatura aditiva de metais (MAM)

A MAM surgiu na década de 1990, logo após a introdução da tecnologia de Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering* - SLS) para a produção de peças plásticas. A SLS é uma técnica de MA que utiliza um laser para fundir e solidificar

camadas finas de material em pó, construindo gradualmente um objeto tridimensional (Kruth *et al.*, 2005).

A partir da técnica de SLS, foram desenvolvidas outras técnicas de MAM, como a Fusão Seletiva a Laser (*Selective Laser Melting* - SLM), que utiliza o mesmo princípio da SLS, mas funde completamente o material em pó, e a deposição de energia dirigida (*Directed Energy Deposition* - DED), que adiciona metal em estado líquido sobre uma superfície de construção (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

A MAM tem evoluído rapidamente nas últimas décadas, possibilitando a produção de peças cada vez mais complexas e com propriedades mecânicas mais avançadas. Essa tecnologia vem sendo utilizada em diversas aplicações, como na indústria aeroespacial, automotiva, médica e de joias, entre outras (DebRoy *et al.*, 2018).

Considerando o imenso potencial de aplicação da MAM, é essencial que haja qualificação e certificação adequadas para garantir a adoção bem-sucedida em diversos setores e impulsionar o avanço da padronização de forma mais rápida (Feriotti; Formigoni, 2022b).

Os processos de MAM se enquadram em duas categorias definidas pelo padrão ASTM F2792 [12] como DED e PBF. Uma distinção adicional é fornecida em função da fonte primária de calor utilizada, como o laser (L), feixe de elétrons (EB), arco de plasma (PA) e arco de metal gasoso (GMA) (Milewski, 2017).

Uma distinção adicional pode ser feita entre os processos de MAM, que começam com um modelo computacional e produzem diretamente uma peça com formato líquido, e os processos indiretos que começam com um modelo computacional, imprimem uma peça intermediária e depois requerem etapas adicionais de processamento intermediário, como fundição, sinterização em massa ou usinagem. Embora quase todas as aplicações de peças de metal fabricadas por MAM exijam algum grau de pós-processamento, tratamento térmico e acabamento, os processos em PBF, e em muitos casos os processos de DED, podem ser considerados com uso direto para metal (Gibson; Rosen; Stucker, 2015; DebRoy *et al.*, 2018).

A Figura 4 trata-se de uma visão esquemática do DED com o uso de pó como material de alimentação e fonte de energia a laser. O DED normalmente depende da alimentação de pó no caminho de fusão e na piscina de fusão criada por um feixe de laser

para depositar material camada por camada em uma peça de substrato ou placa de construção. Um gás de proteção, como argônio, é usado para proteger o metal fundido da oxidação e transportar o fluxo de pó para a piscina de fusão (DebRoy *et al.*, 2018).

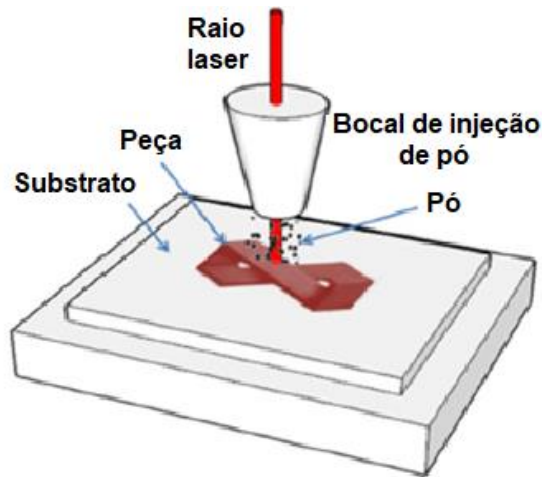


Figura 4- Visão esquemática do DED

Fonte: Debroy *et al* (2018)

Os PBF foram pioneiros na MA. A sinterização seletiva a laser, desenvolvida na Universidade do Texas em Austin, foi o primeiro processo PBF a ser comercializado. Esses processos compartilham características essenciais, como fontes térmicas para fundir as partículas de pó, controle preciso da fusão em regiões específicas de cada camada e um mecanismo para adicionar e nivelar camadas de pó, conforme esquematicamente mostrado na Figura 5. Os lasers são as fontes térmicas mais comuns utilizadas no PBF, conhecidos como máquinas de sinterização a laser (MLS). Isso inclui máquinas de sinterização a laser de polímero (SLP) e sinterização a laser de metal (SLM) (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

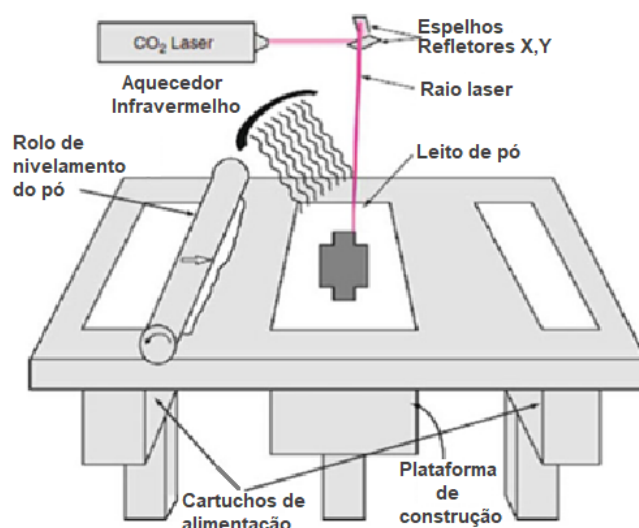


Figura 5- Visão esquemática PBF

Fonte: Gibson; Rosen; Stucker (2015)

Existem vários tipos de processos de MAM dependendo dos materiais de alimentação (pó ou arame) e das fontes de calor (laser, feixe de elétrons ou arco) utilizadas, porém, neste trabalho foi abordado o processo DED, que utiliza como fonte de calor o laser (Milewski, 2017).

A MAM apresenta certas limitações em relação aos materiais metálicos e custos, no entanto, oferece diversas vantagens em termos de liberdade geométrica, tempos de produção e redução de resíduos em comparação com os métodos tradicionais de fabricação subtrativa. Por conseguinte, a adoção de projetos de moldes híbridos pode proporcionar grandes benefícios competitivos para o setor de ferramentaria (Feriotti *et al.*, 2021a).

A MAM no Brasil surgiu na década de 2000, com a instalação de equipamentos de prototipagem rápida em instituições de pesquisa e empresas brasileiras. A partir de então, a tecnologia foi se desenvolvendo e expandindo para diversas áreas, como aeroespacial, médica, automotiva e joalheira, entre outras (Gomes; Wiltgen, 2020).

A MAM é uma tecnologia com o potencial de gerar uma mudança na concepção da manufatura e na economia mundial. No entanto, essa tecnologia ainda está em estágio inicial. Embora o número de peças fabricadas utilizando essa tecnologia esteja crescendo

a uma taxa de 25% ao ano, elas ainda representam apenas uma pequena fração da produção total mundial (Feriotti *et al.*, 2022).

1.3 Manufatura híbrida de metais (MHM)

A evolução da MAM tem sido marcada por avanços significativos ao longo dos anos. No início, as técnicas de MAM se concentravam principalmente na SLM e na EBM. Esses métodos permitiam a produção de peças metálicas sólidas, mas tinham algumas limitações em termos de tamanho, velocidade de produção e controle de qualidade.

No entanto, à medida que a tecnologia avançou, surgiu um conceito chamado MHM.

1.3.1 Conceito e origem da MHM

A MHM, que combina a adição de material com outros processos, como a usinagem em uma máquina ferramenta com comando numérico computadorizado (CNC), teve início na década de 1990. O processo foi desenvolvido em universidades e institutos de pesquisa, inicialmente para a fabricação de ferramentas e moldes, e depois para a produção de peças e componentes em diversos setores, como o aeroespacial, automotivo, médico e de defesa (Klocke *et al.*, 2017).

Um dos primeiros exemplos de MHM foi a combinação da DED com a usinagem CNC, desenvolvida pelo Dr. Ingomar Kelbassa, na Universidade de Paderborn, na Alemanha, em 1994. Desde então, diversas empresas e instituições têm explorado o potencial dessa tecnologia para a produção de peças complexas e de alto desempenho, com a utilização de diferentes processos de adição e subtração de material (Sefene; Hailu; Tsegaw, 2022).

1.3.2 Características da MHM

A manufatura híbrida combina materiais com propriedades diferentes para criar componentes personalizados para diversas aplicações. Esses processos podem ser categorizados pelo uso de diferentes combinações de materiais metálicos. Pesquisadores estão explorando o potencial dessa tecnologia para produzir peças altamente funcionais (Chueh *et al.*, 2020).

Os sistemas de fabricação híbrida estão sendo adotados na indústria como uma solução para a produção de peças altamente complexas, conforme representada na Figura 6. Esses sistemas integram processos aditivos e subtrativos em uma única plataforma, permitindo a fabricação de peças com configurações intrincadas (Cortina *et al.*, 2018).



Figura 6- Representação da aplicação DED pelo processo da manufatura híbrida
Fonte: <https://blogs.autodesk.com/advanced-manufacturing/2018/11/29/greater-fuel-efficiency-in-aerospace/>. Acesso em: 2023

A utilização combinada da MA e máquina ferramenta CNC é um exemplo de processo híbrido que desperta grande interesse (Figura 7). Isso se deve ao fato de que os sistemas MA têm a vantagem de produzir geometrias complexas a partir de materiais de difícil usinagem. No entanto, em comparação com o acabamento realizado por processos subtrativos, a qualidade da superfície resultante e a precisão dimensional costumam ser significativamente inferiores (Basinger *et al.*, 2018).



Figura 7- Máquina ferramenta CNC híbrida

Fonte: <https://www.romi.com/produtos/manufatura-hibrida-romi/>

A tecnologia é baseada na deposição do pó de aço, usando laser como fonte de energia combinada com fresagem CNC. Nesse sistema, um feixe de laser derrete o pó enquanto é injetado, formando a peça desejada. A fresagem CNC é então utilizada para usinar a peça com precisão dimensional. Essas etapas seguem caminhos de varredura específicos para criar a geometria desejada (Jackson *et al.*, 2016).

A utilização da MHM é ilustrada na Figura 8, em que a parte inferior do substrato (a) pode ser fabricada por meio de um processo subtrativo tradicional, enquanto a parte superior (b) incorpora um sistema interno de canais de refrigeração fabricado por MAM. Essa combinação de processos permite a criação de componentes complexos com funcionalidades específicas, como a melhoria do desempenho térmico por meio do sistema de refrigeração interno (Popov; Fleisher, 2020).

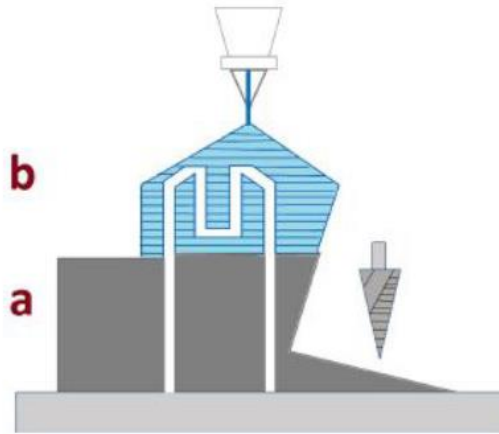


Figura 8- Ilustração da manufatura híbrida de metal

Fonte: Adaptado de Popov e Fleisher (2020).

1.3.3 Aplicações e oportunidades da MHM

A integração das duas tecnologias em uma única máquina, oferece benefícios significativos na produção de peças complexas. Esse processo tem se mostrado eficaz na remanufatura e reparo de peças existentes, como ilustrado na Figura 9 (Ruiz *et al.*, 2018).



Figura 9- Representação da aplicação da manufatura híbrida no reparo de peças

Fonte: Feriotti e Formigoni (2022)

A implementação da MHM nas empresas abrirá novas oportunidades de negócio à medida que as taxas de deposição de materiais aumentarem e os custos de produção diminuirão. Isso permitirá explorar novas aplicações e beneficiar-se das vantagens dessa tecnologia emergente (Simons, 2018).

Esta tecnologia oferece diversas oportunidades no setor de Ferramentaria. Entre os benefícios estão a redução de tempo e custos, maior flexibilidade na produção, possibilidade de design otimizado, melhorias no desempenho das ferramentas, entre outros. Essas vantagens tornam a MHM uma tecnologia promissora para impulsionar a inovação e a eficiência na indústria de ferramentaria (Garcia-Gonzalez; Jardim; Pereira, 2020).

No setor da ferramentaria, essa tecnologia viabiliza a utilização de um material de usinagem fácil para a maior parte do molde, permitindo a adição de aço de maior dureza apenas nas regiões onde é mais necessário. Isso é ilustrado na Figura 10, representando a capacidade de aplicação seletiva de diferentes materiais conforme as exigências específicas. Essa abordagem combinada resulta em moldes mais eficientes e otimizados para suas respectivas aplicações (Sefene; Hailu; Tsegaw, 2021).



Figura 10- Representação de aplicação MHM em molde

Fonte: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/use-hybrid-am-to-produce-longer-lasting-multi-material-molds->

Não há uma data precisa para o início da MHM no Brasil, mas é possível afirmar que a tecnologia começou a ser utilizada no país na década de 2000, principalmente em instituições de pesquisa e desenvolvimento, universidades e empresas do setor aeroespacial.

Um exemplo de instituição brasileira que desenvolveu pesquisas pioneiras na área da MHM é o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), que começou utilizar a tecnologia para a fabricação de componentes aeronáuticos em parceria com empresas do setor em meados de 2015 (Gonçalves, 2018).

No entanto, a tecnologia ainda é pouco difundida no país e muitas pesquisas ainda estão sendo conduzidas para aprimorar os processos e expandir as aplicações. É importante ressaltar que a MHM é uma tecnologia em constante evolução e que o seu desenvolvimento no Brasil está diretamente ligado ao investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação por parte de empresas e instituições de ensino e pesquisa (Araújo, 2021).

Há ainda lacunas e oportunidades de pesquisa que requerem informações detalhadas sobre métodos e aplicações na área. Nesse contexto, a discussão sobre a tecnologia de manufatura híbrida como campo de pesquisa tem progredido em periódicos internacionais, uma vez que a maturidade desse campo permite a reinterpretção de conceitos tradicionais de manufatura subtrativa e aditiva (Feriotti; Formigoni, 2022a).

1.4 Termofixo Baquelite

Baquelite é um termofixo, um tipo de plástico que não amolece quando exposto a altas temperaturas. Ela foi uma das primeiras resinas sintéticas desenvolvidas, sendo descoberta pelo químico americano Leo Baekeland em 1907 (Li, W. *et al.*, 2018)

É uma resina fenólica, que é produzida a partir da reação entre fenol e formaldeído. A resina resultante é então moldada e endurecida sob alta pressão e temperatura, produzindo um material duro, resistente e durável. O termofixo baquelite tem sido amplamente utilizado em diversas aplicações, especialmente em componentes elétricos e eletrônicos, devido às suas propriedades de alta resistência elétrica e isolamento térmico. No entanto, sua rigidez e fragilidade limitam seu uso em algumas aplicações, além de ser uma substância tóxica durante o processo de produção (Qiao *et al.*, 2015)

O termofixo baquelite é amplamente utilizado em aplicações nas peças elétricas e eletrônicas, tais como isoladores, capacitores e conectores (Piotrowski *et al.*, 2021). O Quadro 1, trata-se as suas principais características, vantagens e desvantagens.

Quadro 1- Características, vantagens e desvantagens

Características	É um termofixo, ou seja, após sua moldagem e cura, não pode ser derretido ou reformulado;
	É um material duro, resistente e durável;
	Tem alta resistência elétrica e isolamento térmico;
	É resistente à maioria dos produtos químicos, ácidos e solventes;
	É um material autoextinguível, ou seja, não propaga chamas;
Vantagens	Baixo custo de produção;
	Excelente estabilidade dimensional, mesmo quando exposto a altas temperaturas;
	Elevada resistência mecânica, mesmo a temperaturas elevadas;
	Resistência à maioria dos solventes, ácidos e bases.
Desvantagens	Não pode ser reciclado ou reprocessado após sua moldagem e cura;
	É um material relativamente frágil e quebradiço, com baixa resistência ao impacto;
	Baixa resistência à radiação UV e ao envelhecimento em ambiente externo;
	A resina fenólica é tóxica e prejudicial à saúde, especialmente durante a fase de produção.

Fonte: Autor (2023)

O termofixo baquelite é uma resina fenólica altamente reticulada que apresenta excelentes propriedades mecânicas, resistência ao calor e umidade, além de baixa inflamabilidade. É fabricado a partir da reação entre fenol e formaldeído na presença de um catalisador ácido. Durante o processo de cura, a resina se torna altamente reticulada, conferindo-lhe a característica termofixa. É importante selecionar o tipo correto desse material para cada aplicação específica, pois existem vários tipos disponíveis, cada um adequado para uma aplicação específica e com diferentes propriedades (Piotrowski *et al.*, 2021).

1.4.1 Processos de moldagem de baquelite

Os principais processos de moldagem do termofixo Baquelite incluem a moldagem por compactação, transferência e injeção. Na moldagem por compressão, conforme representação esquemática na Figura 11, o material Baquelite é colocado em um molde aquecido e submetido a alta pressão. O calor e a pressão promovem a cura do material, resultando na formação do produto final. No processo de moldagem por transferência, o material Baquelite é pré-aquecido em uma câmara separada antes de ser

transferido para o molde. Em seguida, o molde é fechado e a resina é forçada a entrar no molde sob alta pressão. O calor aplicado no molde promove a cura do material, (Li, W. *et al.*, 2018).



Figura 11- Representação esquemática do processo de moldagem por compactação e transferência

Fonte: Autor (2023)

Embora baquelite seja um termofixo, é possível utilizar um processo de moldagem por injeção modificado. Nesse caso, a resina é pré-aquecida e plastificada antes de ser injetada no molde aquecido. O calor promove a cura da resina, resultando em um produto final, conforme representação esquemática na Figura 12 (Yan *et al.*, 2019).

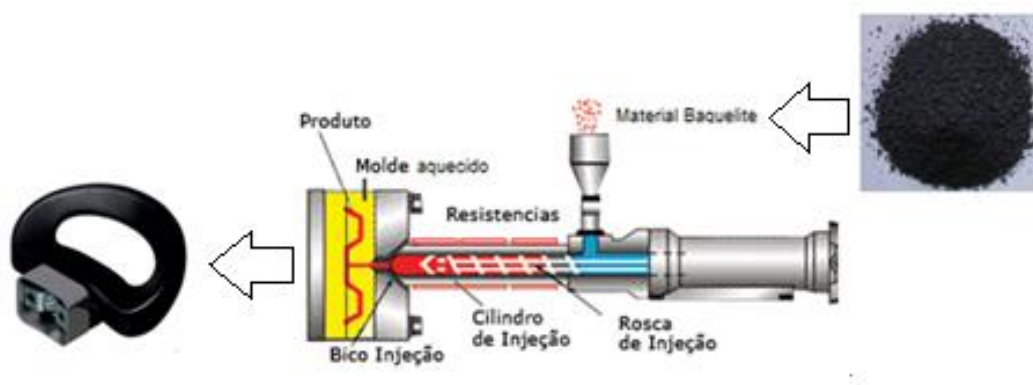


Figura 12- Representação esquemática do processo de moldagem por injeção

Fonte: Autor (2023)

Devido à sua rigidez e alta resistência mecânica, o termofixo baquelite pode ocasionar desgaste nos moldes de injeção durante o processo de moldagem. Isso ocorre devido à necessidade de aplicar alta pressão para preencher a cavidade do molde e

permitir a extração da peça, o que pode resultar em marcas de desgaste nos moldes (Sousa; Leite; Gama, 2018).

Algumas técnicas podem ser adotadas para reduzir o impacto do termofixo baquelite no desgaste dos moldes de injeção. Isso inclui a aplicação de revestimentos resistentes ao desgaste nos moldes, garantindo uma lubrificação adequada e ajustando corretamente os parâmetros de injeção. Além disso, é importante considerar a escolha do tipo de aço para o molde de injeção, a configuração e as condições do processo de injeção, bem como as propriedades específicas do material Baquelite utilizado. Esses fatores podem ter um impacto significativo na vida útil do molde e na qualidade das peças moldadas (Chen; Hu; Cheng, 2019).

1.5 Moldes para injeção de baquelite

Os moldes para injeção são ferramentas que têm o objetivo de produzir peças compactas de plásticos, sejam elas em materiais termoplásticos ou termofixos. São utilizados na produção em larga escala, a fim de garantir a repetibilidade do produto idealizado. Sua estrutura permite a construção de uma ou várias cavidades, o que definirá a quantidade de peças por hora, associado ao tempo de ciclo (Osswald; Turng; Gramann, 2007).

O molde é composto por duas metades, uma parte móvel e outra fixa, que se juntam para formar a cavidade do molde, conforme representado na Figura 13. O material é então injetado na cavidade do molde e se solidifica para formar a peça. O projeto de molde de injeção envolve a seleção de materiais adequados para a sua construção, bem como o design da cavidade, que afeta a qualidade e as propriedades da peça final. A geometria da peça, a orientação de fluxo do material, a posição dos canais de injeção e a localização dos pontos de injeção são alguns dos fatores importantes a serem considerados no projeto do molde (Osswald; Turng; Gramann, 2007).



Figura 13- Representação da parte fixa e móvel do molde

Fonte: Autor (2023)

O molde para injeção de baquelite deve ser projetado levando em consideração as características específicas desse material termofixo, ele tem uma alta viscosidade, o que pode dificultar o fluxo do material na cavidade do molde e aumentar o tempo de ciclo. Além disso, é altamente abrasivo, o que pode causar desgaste prematuro no molde e exigir um tipo de aço no seu projeto resistente ao desgaste a temperatura (Zhao; Mattner; Drummer, 2019).

Zhao, Mattner e Drummer (2019) orientam, que o molde para injeção de baquelite, deve ser feito de aço endurecido com revestimento de cromo duro para garantir a resistência ao desgaste. O molde deve ser projetado com canais de alimentação amplos e uma geometria da cavidade otimizada para garantir o preenchimento completo e uniforme da peça.

A escolha do material para fabricação do molde pode ter um impacto significativo em sua vida útil. Os materiais comumente utilizados para a fabricação de moldes incluem o aço ferramenta AISI H-13 com aplicação de dupla camada, Deposição Física de Vapor (PVD), sendo, nitreto de cromo (cinza escuro) e nitreto de titânio (dourado) micro camada cerâmica para redução do coeficiente de atrito o que geralmente os torna mais duráveis e capazes de suportar um maior número de ciclos de injeção, conforme representado na Figura 14 (Stachurski; Piaskowski, 2019).

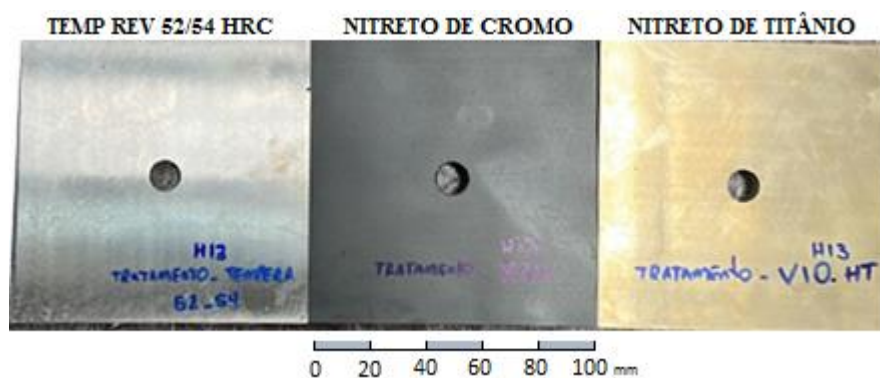


Figura 14- Representação do aço AISI H-13 com dupla camada PVD

Fonte: Autor (2023)

A escolha do aço AISI H-13 é feita devido à sua alta resistência e durabilidade, enquanto a aplicação de revestimento de PVD tem como objetivo melhorar a resistência ao desgaste. Essas seleções são feitas com o propósito de aprimorar o desempenho e qualidade dos moldes utilizados no processo de moldagem por injeção de baquelite (Martínez-Mateo *et al.*, 2011).

A prevenção ou redução dos desgastes gerados nas cavidades do molde, maximiza a vida útil do molde, minimiza os custos de manutenção, além de diminuir as interrupções do processo produtivo de injeção e garantir a qualidade do produto injetado (Osswald; Turng; Gramann, 2007).

O projeto adequado do molde de injeção para termofixos, aliado a um controle rigoroso do processo de injeção, contribui para a eficiência e eficácia do sistema produtivo como um todo.

1.6 Sistemas produtivos

Sistemas produtivos são conjuntos de atividades, processos, recursos e tecnologias organizados de forma coordenada e estruturada para transformar insumos em produtos ou serviços. Esses sistemas são projetados para maximizar a eficiência, produtividade e qualidade, a fim de atender às demandas dos consumidores e alcançar os objetivos da organização (Ohno, 1988).

Existem diferentes tipos de sistemas produtivos, que podem variar de acordo com o setor industrial, o tamanho da empresa e o tipo de produto ou serviço oferecido. Alguns exemplos comuns incluem sistemas de produção em massa, sistemas de produção enxuta e sistemas de produção sob medida (Correa; Correa, 2022).

As peças de baquelite injetadas se enquadram no tipo de sistema produtivo em massa, que segundo Slack, Chambers e Johnston (2009), trata-se de produção em larga escala, com o objetivo de atender a uma demanda massiva por produtos padronizados. Esses sistemas geralmente buscam maximizar a eficiência e reduzir os custos de produção.

Porém, para ser injetada, estas peças de baquelite necessitam de moldes de injeção que se enquadram no sistema produtivo sob medida, que segundo Martins e Laugeni (2005), são aqueles utilizados em indústrias que produzem bens personalizados de acordo com as necessidades específicas dos clientes.

No contexto do processo de injeção de termofixo baquelite, várias etapas distintas estão envolvidas, abrangendo desde o desenvolvimento do produto até a sua produção em massa e destinação final para a sua aplicação, Quadro 2.

Quadro 2- Etapas envolvidas no processo de injeção de termofixos baquelite

Etapas	Sistema Produtivo	Saídas
Desenvolvimento de produto	Design da peça, Requisitos do cliente, Características do material, Restrições do processo de injeção.	Dimensões, Geometria e outras Especificações da peça para fabricação do molde.
Projeto do Molde	Seleção do aços, Distribuição das cavidades, Canais de injeção, Sistemas de aquecimento e outros elementos necessários para moldar a peça	Eficiência do processo, Qualidade da peça, Fabricação do molde e a manutenção para garantir a vida útil do molde.
Preparação dos materiais (Baquelite)	Preparação dos materiais termofixos, Seleção dos materiais adequados e Pré-aquecimento do termofixo	Controle da qualidade e Validação dos materiais utilizados.
Processo de injeção	Preenchimento da cavidade com o material aquecido, Controle de parâmetros: temperatura, pressão e tempo de cura	Garantia da qualidade das peças e Eficiência do processo produtivo.
Acabamento e inspeção	Etapas de acabamento, como remoção de rebarbas ou outras imperfeições	Inspeção para garantir a conformidade com as especificações de qualidade
Embalagem e destinação final	Embalagem das peças e seu envio para os clientes ou para estoque	Atender a demanda da aplicação da peça.

Fonte: Autor (2023)

Portanto, no sistema produtivo, é essencial que todas essas etapas sejam coordenadas de forma eficiente e otimizada para maximizar a produtividade, a qualidade e a satisfação do cliente (Slack; Chambers; Johnston, 2009).

1.7 *Design Science Research (DSR)*

A metodologia DSR é uma abordagem inovadora e um conjunto de técnicas analíticas que permitem a realização de estudos em várias áreas (Vaishnavi; Kuechler, 2009). Seu principal objetivo é investigar o comportamento de artefatos artificiais tanto do ponto de vista acadêmico quanto no contexto organizacional (Bayazit, 2004). Assim, o DSR se estabelece como um processo rigoroso que envolve a concepção de artefatos para solucionar problemas, a avaliação do que foi projetado ou está em funcionamento, e a comunicação dos resultados obtidos (Çağdaş; Stubkjær, 2011).

1.7.1 Aplicação do DSR

O DSR é altamente recomendado para o estudo de problemas do mundo real, pois fornece suporte e ferramentas para conduzir pesquisas quando o artefato em questão é uma prescrição. Por meio da compreensão do problema, o objetivo é construir e avaliar artefatos que possam modificar as condições atuais dos cenários, visando melhorias ou resultados aceitáveis. Uma característica crucial da pesquisa que utiliza o DSR como método é direcionar-se a problemas específicos, em busca de uma solução satisfatória, mesmo que não seja necessariamente a solução ótima (Dresch; Lacerda; Antunes Jr, 2015)

O método DSR está intimamente relacionado a dois fatores essenciais para o sucesso da pesquisa: rigor e relevância. O DSR busca produzir conhecimento na forma de uma prescrição ou projeto, sendo que a prescrição oferece suporte para a solução de um problema real específico, enquanto o projeto cria um novo artefato (Dresch; Lacerda; Antunes Jr, 2015)

Na condução do DSR, é proposto um protocolo conforme representação no fluxograma apresentado na Figura 15.



Figura 15- Fluxograma para condução do DSR

Fonte: Adaptado de Dresch *et al*, (2015)

O processo se inicia com a identificação do problema e definição dos objetivos. Em seguida, desenvolve-se um artefato para solucionar o problema, a identificação de suas características e requisitos, seguidos por testes, ajustes e aprimoramentos. Realiza-se uma avaliação rigorosa para verificar sua eficácia. Comunica-se os resultados, incluindo a documentação do artefato e os procedimentos da avaliação. Por fim, reflete-se sobre a pesquisa e adquire-se aprendizado.

1.8 Grupo Focal (GF)

O GF, também conhecido como *Focus Group*, possui uma abordagem qualitativa com o propósito de obter uma compreensão das opiniões e considerações de um grupo de indivíduos em relação a uma experiência, ideia ou evento (Oliveira; Freitas, 1998). Este método pode ser descrito como uma forma de entrevista em grupo que ocorre de maneira mais aprofundada. Essas sessões são estruturadas e abrangem aspectos como a proposta,

o tamanho, os participantes e o procedimento para condução do grupo (Oliveira; Freitas, 1998).

Segundo Oliveira e Freitas (1998), uma característica distintiva do GF em relação à entrevista clássica é a possibilidade de interação entre os participantes, o que pode levar a influências mútuas nas respostas e a sua condução deve seguir as seguintes etapas, do Quadro 3.

Quadro 3- Etapas da condução do GF

Etapa	Ações
Planejamento	Propósito, participantes, conteúdo, interação, tempo, local são elementos importantes na condução de um grupo focal.
Condução	O moderador deve evitar entediar o grupo, definir claramente os objetivos, estar bem preparado e evitar assumir uma postura de poder ou influência.
Análise dos dados obtidos	É essencial realizar uma análise sistemática, concentrando-se no objetivo e propósito do grupo. O uso de citações e uma atenção cuidadosa aos significados das palavras e termos para o grupo são igualmente importantes.

Fonte: Adaptado de Oliveira e Freitas (1998)

Os Grupos Focais podem ser empregados como uma abordagem de avaliação na pesquisa em DSR, proporcionando discussões mais aprofundadas e colaborativas em relação aos artefatos desenvolvidos (Lacerda *et al.*, 2013).

Segundo Tremblay, Hevner e Berndt (2010), existem dois tipos de Grupos Focais que podem ser empregados na avaliação de artefatos desenvolvidos pela DSR: o GF Exploratório, que visa alcançar melhorias incrementais rápidas na criação de artefatos, e o GF Confirmatório, cujo objetivo é demonstrar a utilidade dos artefatos desenvolvidos em um contexto de aplicação.

O planejamento inicia-se com a reflexão sobre o propósito das reuniões e prossegue com a organização lógica e sequencial dessas ideias. É importante desenvolver um plano cronológico, conforme representado no organograma da Figura 16 (Oliveira; Freitas, 1998).

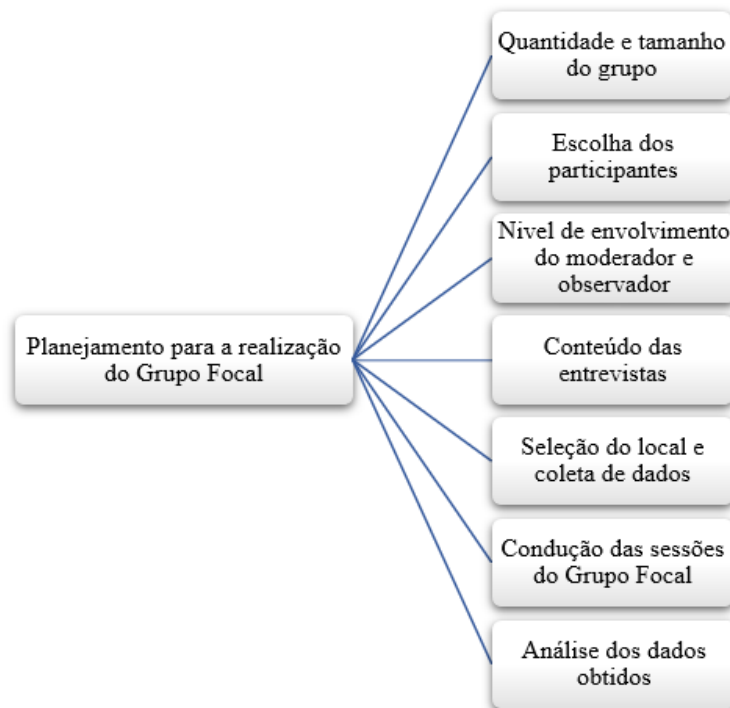


Figura 16- Organograma para planejamento do GF

Fonte: Adaptado de Oliveira e Freitas (1998)

Segundo o planejamento abordado por Oliveira e Freitas (1998), o GF Exploratório tem com o objetivo de obter uma melhor compreensão das perspectivas e avaliações de um grupo de pessoas em relação aos conhecimentos e conceitos sobre a abordagem de um determinado assunto, esse método fornece informações valiosas para realizar ajustes tanto no artefato quanto no roteiro do GF.

1.9 *Design of Experiments (DoE)*

Os métodos DoE foram desenvolvidos nos primeiros anos do século 20 e têm sido extensivamente estudados por estatísticos desde então, mas não eram fáceis de usar pelos praticantes. A abordagem de Taguchi para planejamento de experimentos é fácil de ser adotada e aplicada para usuários com conhecimento limitado de estatísticas; por isso ganhou uma grande popularidade na engenharia e comunidade científica (Karna, 2012).

O Método DoE é uma técnica estatística que permite otimizar processos e produtos, identificando os fatores que mais afetam o resultado desejado e definindo os níveis ideais desses fatores. O número de ensaios ou experimentos sugeridos para a validação do método DoE pode variar, dependendo do objetivo e do escopo do estudo, assim como das características do processo e dos recursos disponíveis (Nunes *et al.*, 2018).

A implementação bem-sucedida do DoE é composta por oito etapas, conforme resumido na Figura 17. As primeiras quatro etapas são normalmente denominadas como a fase de planejamento pré-experimental. A fase de planejamento pré-experimental é uma das fases mais importantes e críticas de uma análise DoE que compromete a validade dos resultados. Nesta fase, os estatísticos ou consultores, que projetam os experimentos em conjunto com engenheiros e experimentadores, devem preencher uma lacuna de experiência, recursos disponíveis e conhecimento (Farooq *et al.*, 2016).

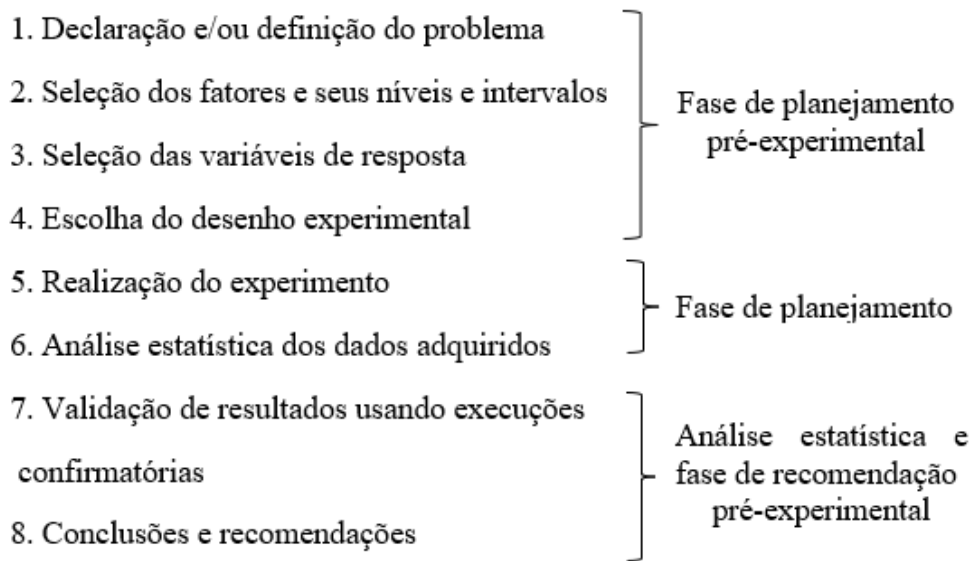


Figura 17- Etapas para implementação do DoE

Fonte: Adaptado de Farooq *et al.* (2016)

Aplicação de DoE tem mostrado resultados convincentes e encontrado com sucesso as condições operacionais que simultaneamente minimizam a variação e mantêm um valor médio do processo. Uma definição clara do problema e uma seleção correta dos níveis e intervalos dos fatores são um dos elementos-chave na sua implementação (Subulan; Cakmakci, 2012).

2 METODOLOGIA

Este capítulo descreve o procedimento metodológico do projeto, incluindo suas etapas, objetivos, ferramentas de pesquisa, métodos de coleta e análise de dados. Também destaca as fases de desenvolvimento no contexto acadêmico e empresarial.

O método pode ser descrito como um conjunto de atividades sistemáticas e racionais que guiam o processo em uma direção específica. Essas atividades têm o propósito de gerar conhecimentos válidos e verídicos, fornecendo uma base segura e econômica para as decisões tomadas tanto por cientistas quanto por pesquisadores dentro do ambiente acadêmico e empresarial (Marconi; Lakatos, 2012).

2.1 Natureza e Objetivo da Pesquisa

A pesquisa em questão é classificada como aplicada, uma vez que tem como objetivo resolver problemas práticos do mundo real, concentrando-se na aplicação dos conhecimentos adquiridos para melhorar o desempenho do processo produtivo de injeção e reduzir o desgaste em moldes de injeção para termofixos, buscando soluções efetivas e aplicáveis para questões específicas enfrentadas por empresas e organizações (Leão, 2019). Além disso, é uma pesquisa exploratória, pois tornou o problema mais explícito e levou à construção de hipóteses (Gil, 2009).

A metodologia escolhida para conduzir essa pesquisa foi o DSR, devido à sua aplicabilidade na engenharia de produção e à sua adequação ao objetivo principal do estudo, que é propor melhorias no projeto do molde, usando MHM na linha de fechamento da cavidade e avaliar seu desempenho no processo produtivo de injeção. De acordo com Simon (1996), a pesquisa em engenharia de produção não se limita à exploração e descrição de problemas, mas também envolve o estudo de projetos e a criação de artefatos, que são objetos artificiais com objetivos, funções e adaptações específicas.

Assim, a escolha da DSR como metodologia se baseia na adequação dos procedimentos ao objeto de estudo, uma vez que esta pesquisa envolve trabalho de campo,

observação e interação para gerar processos avaliados como resultado dos artefatos desenvolvidos durante a pesquisa. Em resumo, a pesquisa é aplicada e exploratória, utiliza a metodologia DSR para abordar problemas práticos e criar soluções concretas na área de engenharia de produção.

2.2 Formas de Abordagem e Avaliação da Pesquisa

Nesta pesquisa, a metodologia de GF desempenhou um papel crucial na validação e aprimoramento dos artefatos desenvolvidos. Essa abordagem permitiu uma análise mais profunda, seguindo um procedimento meticuloso de entrevistas em profundidade com participantes selecionados. As sessões estruturadas e as discussões em grupo incorporaram perspectivas diversas e fortaleceram os artefatos da pesquisa.

Além disso, o método DoE foi empregado em três etapas para avaliar o impacto da MHM na melhoria do desempenho do molde no processo produtivo de injeção. Essa abordagem envolveu planejamento pré-experimental, execução de experimentos e análise estatística dos dados, permitindo uma compreensão aprofundada dos efeitos dos fatores no processo em estudo. Segundo Myers *et al.*(2016), com o uso de experimentos planejados, coletam-se dados de forma estruturada para uma análise estatística mais robusta, o que proporciona uma compreensão aprofundada dos efeitos dos fatores no processo em estudo.

A Figura 18 apresenta o fluxograma da estrutura da metodologia desenvolvida ao longo da pesquisa.

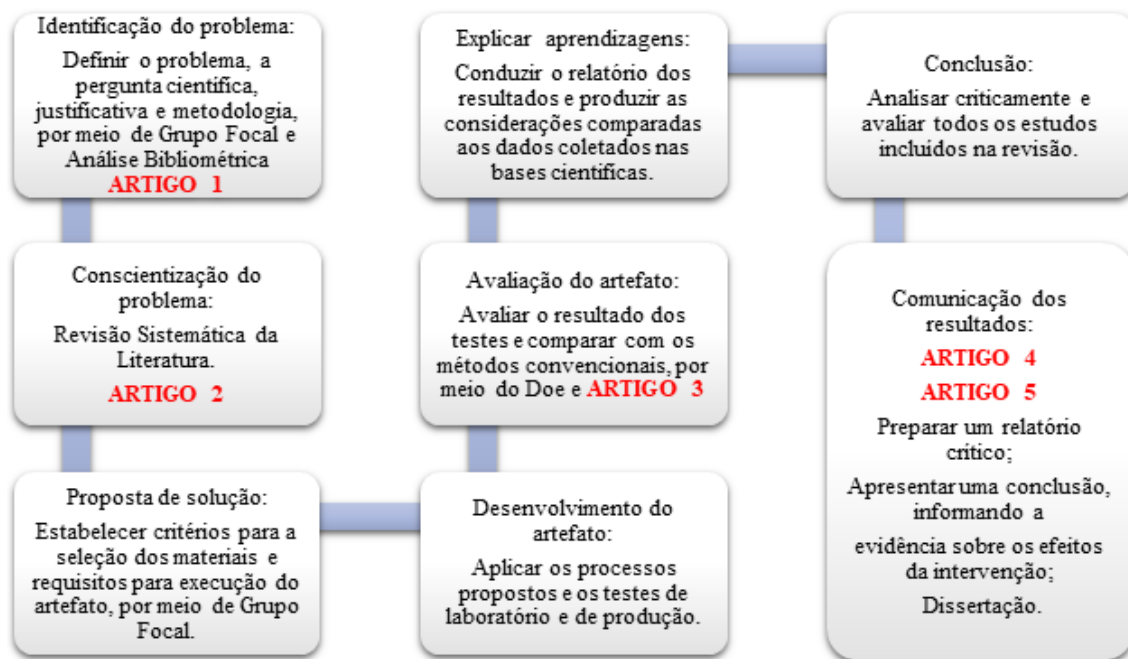


Figura 18- Fluxograma da estrutura da metodologia desenvolvidas

Fonte: Adaptado de Dresch (2015)

A pesquisa foi conduzida conforme o fluxograma. Esse enfoque orientou a identificação do problema, o desenvolvimento do artefato e soluções, enfatizando a criação, validação e avaliação sistemática, visando resolver problemas práticos e contribuir para a ciência.

No âmbito desta pesquisa, conduziu-se uma análise bibliométrica com o objetivo de mapear e avaliar criticamente a produção científica sobre a tendência da aplicabilidade da MHM. Essa análise proporcionou uma compreensão abrangente da literatura, identificando lacunas no conhecimento e áreas que demandam investigação mais aprofundada. A revisão da produção científica formou a base para a proposta de integrar a MAM de forma híbrida no projeto de recuperação do molde.

Adicionalmente, a revisão sistemática da literatura investigou a aplicabilidade da MHM, analisando características, tipos de aços e propriedades mecânicas relevantes. Essa abordagem permitiu uma análise detalhada de metodologias em estudos anteriores, estabelecendo base sólida para a pergunta de pesquisa e avaliação do estado atual na indústria de moldagem por injeção. Essa revisão desempenhou papel crucial na identificação de informações pertinentes, orientando a proposta de melhoria no processo produtivo.

Com base nas lacunas identificadas, elaborou-se um artigo científico que destaca oportunidades de melhorias no processo, abordando desafios como a integração de tecnologias inovadoras e a necessidade de capacitação profissional para a implementação eficaz na MHM em moldes de injeção.

O Quadro 4 trata-se dos artigos produzidos no decorrer do projeto, utilizados nas etapas da definição e conscientização do problema, do desenvolvimento do artefato e a sua avaliação.

Quadro 4- Artigos produzidos

Artigo	Autores/ Ano	Título	Periódico/ Simpósio
1	(FERIOTTI; FORMIGONI, 2022)	Análise Bibliométrica Sobre a Tendência da Aplicação da Manufatura Híbrida	<i>South American Development Society Journal</i>
2	(FERIOTTI; FORMIGONI, 2022)	Manufatura aditiva híbrida de metais (MAHM), aplicações e características, tipos de aços e propriedades mecânicas: Uma revisão sistemática da literatura	<i>XVII SIMPROFI - Simpósio dos Programas de Mestrado Profissional Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa</i>
3	(FERIOTTI; FORMIGONI, RIBEIRO, 2023)	Aplicação da Manufatura Híbrida de Metais no Setor de Ferramentaria: Oportunidades e Identificação de Barreiras	<i>VII SAEPRO - Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção da EEL-USP</i>

Fonte: Autor (2023)

Estes artigos contribuíram fornecendo uma base sólida, orientando melhorias na aplicação da MHM em moldes de injeção.

2.3 Design Science Research (DSR)

A aplicação do DSR na pesquisa foi conduzida em 6 etapas seguindo as premissas descritas no Quadro 5.

Quadro 5- Etapas e premissas do DSR

Etapa	Descrição
Conscientização do problema	Descrever de forma relevante e ampla o problema de pesquisa, traçando interfaces e relações com o contexto, inclusive externo
Ideação	Desenvolver uma ou mais alternativas de solução (artefatos) para o problema; evidenciar que não existe solução ótima para o problema, e o que está sendo proposto é uma solução satisfatória.
Desenvolvimento	Construir ambiente interno do artefato, algoritmos, modelos gráficos, maquetes, e o próprio artefato em estado funcional; em nível piloto
Demonstração do artefato	Analisar como o artefato se comporta no ambiente para o qual foi projetado, mostrando a relevância teórica e prática
Avaliação	Mostrar todas as etapas da pesquisa, processo de condução, justificativa das escolhas feitas, como avança o conhecimento e melhora dos sistemas organizacionais
Comunicação	Apresentar os resultados para a comunidade (o que foi feito, como foi realizado, implicações da pesquisa)

Fonte; Adaptado de Lacerda *et al.* (2013)

A aplicação do DSR foi fundamental para uma definição apropriada do problema de estudo. Neste estudo em particular, o objetivo foi aprimorar o desempenho e a vida útil dos moldes de injeção para termofixo baquelite, assim como o processo produtivo de injeção. Os resultados e o conhecimento gerado por esta investigação foram utilizados dentro desse contexto. Esses resultados e conhecimento foram aplicados para solucionar ou mitigar problemas relacionados ao custo e à qualidade das peças injetadas, como paradas excessivas para manutenção e desgaste na linha de fechamento das cavidades.

O primeiro passo envolveu a compreensão do contexto em que o problema de desgastes no molde estava inserido, a identificação da causa e a necessidade da melhoria do desempenho da sua vida útil que precisava ser atendida utilizando o método GF e a Revisão Sistemática da Literatura (RSL).

Posteriormente o método de aplicação da MHM na linha de fechamento da cavidade foi adotado com o propósito de resolver o problema identificado para alcançar os objetivos estabelecidos.

A avaliação da aplicação da MHM envolveu testes, simulações e experimentos, nos quais a metodologia DoE foi aplicada. Utilizou-se o software Minitab® e o arranjo

fatorial fracionário Taguchi, empregando matrizes ortogonais para avaliar os efeitos dos fatores e suas interações com o menor número possível de experimentos. O objetivo consistiu em analisar o desempenho do molde e verificar se houve uma solução eficaz para o problema.

Os resultados da pesquisa, a documentação completa do método desenvolvido, bem como a descrição dos procedimentos utilizados na avaliação, além das contribuições teóricas e práticas da pesquisa, foram registradas de modo que outros pesquisadores possam entender e utilizar os resultados.

Ao final, foram analisadas as limitações do estudo, as lições aprendidas e as possibilidades de melhorias futuras. Esse processo de reflexão e aprendizado contribuirá para o avanço do conhecimento na área e poderá orientar pesquisas futuras.

2.3.1 *Conscientização do problema*

Esta primeira etapa buscou assegurar uma compreensão profunda do problema, suas nuances e contexto, antes de avançar para as próximas etapas de *design*, desenvolvimento e avaliação da solução. Nesta fase uma análise bibliométrica sobre a tendência da aplicação de MHM foi elaborada, gerando o artigo 1 relatado no Quadro 4.

A próxima fase do processo envolveu uma análise minuciosa do problema, incluindo sua compreensão em profundidade, considerando o contexto, fatores externos, *stakeholders* e restrições. Isso contribuiu para uma compreensão holística antes de avançar nas próximas etapas da pesquisa.

A pesquisa adotou a técnica do GF para a coleta de dados. Foi essencial definir critérios claros para a seleção e organização dos participantes, considerando a experiência, conhecimento e perspectivas relevantes para o tópico de pesquisa, visando obter *insights* valiosos sobre o assunto em discussão.

Em consonância com esses critérios, os grupos distintos de colaboradores foram constituídos incluindo pessoas-chave da empresa BAQUELLITES LTDA, especialistas em MHM do LAPRAS - *Laboratory for Advanced Processes and Sustainability*, da

Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) e das empresas OERLIKON® e HÖGANÄS®.

Essa abordagem de formar grupos de especialistas permitiu a coleta de uma gama diversificada de perspectivas, enriquecendo as discussões e contribuindo para uma análise mais abrangente do tópico em questão.

As características da técnica de GF partiram da existência dos seguintes elementos (Berg, 2001):

- i. O objetivo ou problema de pesquisa foi claramente definido.
- ii. As características do grupo, como a homogeneidade ou heterogeneidade de seus membros e a adequação de sua composição para os propósitos da pesquisa, foram avaliadas.
- iii. A qualidade da relação entre pesquisador e grupo, confidencialidade e fala espontânea dos participantes foram consideradas na pesquisa.
- iv. O moderador preparado e bem organizado tinha clareza sobre as questões propostas para discussão.
- v. O moderador ouviu atentamente, permitindo a emergência de novos temas não previstos no planejamento inicial.
- vi. A estrutura, direcionamento e contribuição restrita do moderador para a discussão do tema evitaram opiniões e comentários substantivos.
- vii. Um observador da pesquisa auxiliou na elaboração de notas sobre a dinâmica grupal e na transcrição das falas.
- viii. As informações foram sistematicamente registradas para análise de conteúdo por qualquer interessado na elaboração de conclusões.

A técnica foi empregada com a finalidade de permitir o acesso a uma ampla variedade de tópicos, selecionados de acordo com o interesse do pesquisador. A interação grupal proporcionou aos participantes *insights* relevantes sobre os temas abordados nesta pesquisa.

A primeira fase da definição do problema, ocorreu por meio do primeiro GF (APÊNDICE 2) na empresa BAQUELLITES, nesta ocasião constatou-se que a questão predominante relacionada à qualidade das peças injetadas em baquelite reside no acúmulo

excessivo de rebarbas na linha de fechamento. Esse problema acarreta a necessidade de retrabalho e provoca perdas de matéria-prima.

O estudo que deu origem a esta pesquisa objetivou compreender de que forma os desgastes ocasionados pelo termofixo baquelite nos moldes no processo de injeção são vivenciados na prática no ambiente empresarial e como o uso da tecnologia MHM pode aprimorar a fabricação de moldes para injeção de baquelite, proporcionando melhoria no desempenho da vida útil com relação ao desgaste.

Na fase de conscientização do problema, durante o DSR, com base na problemática em questão e visando investigar a aplicabilidade da MHM, realizou-se a revisão sistemática da literatura (RSL). Essa fundamentação embasou as etapas do projeto, desde a definição do problema, auxiliando a compreender abordagens sobre o problema e as soluções propostas em estudos anteriores.

A Figura 19 trata-se do protocolo da RSL desenvolvido para orientar a pesquisa.

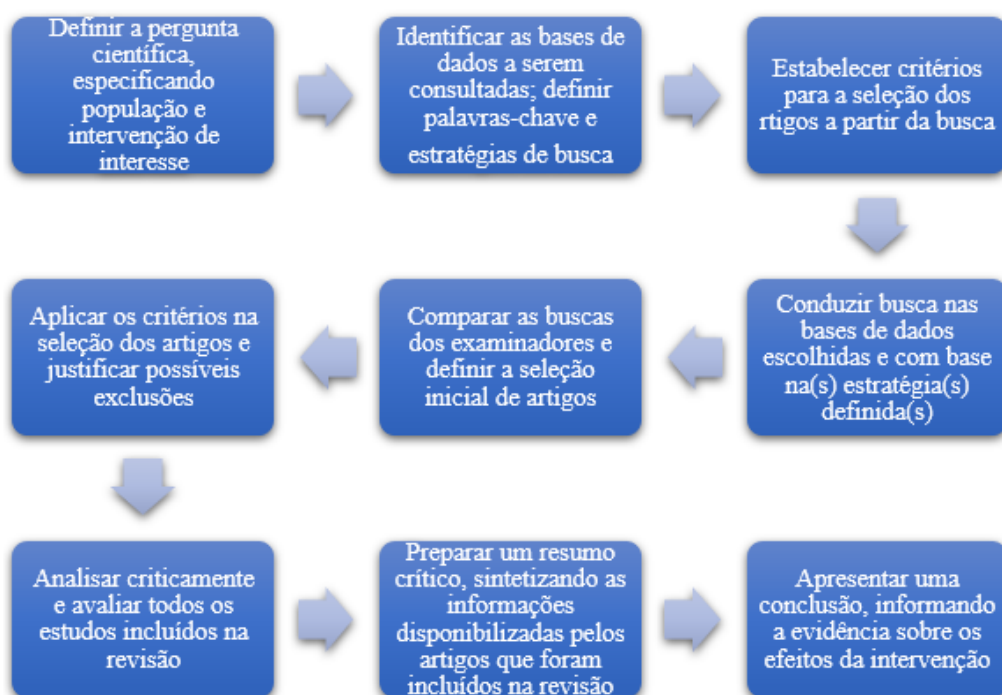


Figura 19- Protocolo da pesquisa RSL
Fonte: Adaptado de Sampaio, Mancini (2007)

Por meio de pesquisa bibliográfica, de natureza exploratória, foram adotadas como estratégia na pesquisa da literatura as palavras-chave “*Additive Manufacturing*”, “*Hybrid Additive Manufacturing*” e “*Metal Additive Manufacturing*”, a string: “*Additive Manufacturing*” OR “*Hybrid Additive Manufacturing*” OR “*Metal Additive Manufacturing*”. Com relação às bases de dados, foi utilizado para esta pesquisa as bases disponíveis no Portal de Periódicos da Capes *Web of Science* e *Scopus*.

O período de recorte foi de 2018 a 2022 e a seleção dos artigos foi feita com base no idioma inglês, considerando periódicos de acesso aberto, artigos de conferências e de revisão, nas áreas de pesquisa da engenharia de materiais, metalurgia e engenharia metalúrgica.

Por meio da RSL, emergiram lacunas no corpus de conhecimento preexistente. Este processo desempenhou um papel essencial ao estabelecer os fundamentos para a fase subsequente do estudo, na qual as perspectivas e interesses das partes envolvidas foram minuciosamente examinados e integrados.

O segundo GF (APÊNDICE 3) foi realizado no LAPRAS- *Laboratory for Advanced Processes and Sustainability* EESC-USP (São Carlos), nesta ocasião foi apresentado aos participantes o principal problema de qualidade nas peças injetadas em baquelite devido ao desgaste provocado na linha de fechamento do molde.

A partir dos achados na RSL e das discussões no GF, foram formuladas perguntas de pesquisa claras e específicas, orientando a investigação e o desenvolvimento da solução. Os objetivos da pesquisa representaram os resultados desejados. Questões de pesquisa e objetivos direcionaram as etapas subsequentes do processo de DSR, garantindo clareza e alinhamento com os propósitos da pesquisa.

2.3.2 *Ideação*

A etapa de Ideação foi imprescindível no DSR para gerar e refinar novas ideias que resolvessem o problema de pesquisa identificado. A metodologia GF Exploratório foi aplicada com o objetivo de obter uma melhor compreensão das perspectivas e avaliações de um grupo de pessoas em relação aos conhecimentos e conceitos sobre a abordagem da MHM, que desempenhou um papel crucial na avaliação da sua aplicação na linha de

fechamento das cavidades, visando alcançar melhorias no desempenho e a vida útil do molde. Esse método forneceu informações valiosas que foram utilizadas para realizar ajustes tanto no artefato quanto no roteiro do GF. Além disso, também contribuiu para o aprimoramento do roteiro e a identificação de construtos que poderão ser aplicados em outros grupos.

Nesta etapa, selecionaram-se, refinaram-se e desenvolveram-se ideias promissoras para criar soluções concretas e viáveis. Essa etapa foi central, aplicando várias abordagens de *design*, resolução de problemas e inovação, destacando sua importância na geração de *insights* e soluções criativas e eficazes.

Com o propósito de criar diversas alternativas para a solução do problema, consideraram-se as possibilidades de que essas alternativas pudessem surgir de várias fontes, como a revisão de literatura, a análise de casos similares, a criatividade dos pesquisadores e o conhecimento prático.

Além da RSL, o estudo sobre MHM, as experiências do pesquisador no setor de ferramentaria de moldes para injeção de baquelites influenciaram decisões sobre as alternativas geradas. Após gerar as alternativas, a próxima etapa utilizou-se do GF para avaliar e escolher as mais promissoras com base em critérios técnicos, eficácia, adequação ao contexto e outros fatores.

Nessa fase ocorreu o terceiro GF (APÊNDICE 4), realizado na empresa BAQUELLITES, nesta ocasião foi apresentado, in loco, aos pesquisadores doutorandos do LAPRAS, peças injetadas em baquelite com problemas de rebarbas, moldes com desgastes na linha de fechamento, o processo de manutenção para recuperação dos moldes e o processo produtivo de injeção do termofixo baquelite.

O passo seguinte foi criar um protótipo funcional para testes iniciais de DED, visando experimentar estratégias, avaliar funcionalidade e identificar melhorias. Na última etapa da ideação, avaliou-se a viabilidade técnica, econômica e operacional da solução proposta, realizando também um exame crítico da eficácia em relação aos objetivos do projeto, permitindo ajustes finais antes do desenvolvimento e implementação.

2.3.3 Desenvolvimento

A etapa de Desenvolvimento transformou ideias teóricas em um artefato concreto para solucionar o problema inicial. Com base na análise das etapas anteriores o artefato de *design* foi projetado e desenvolvido, incluindo a criação de modelos matemáticos 3D CAD.

Essa fase contou com a reunião do quarto GF (APÊNDICE 5) realizada no LAPRAS, para discussão das estratégias da DED e definição da geometria na linha de fechamento do protótipo. O próximo passo foi definir as possibilidades de tipos de aço, isso ocorreu na reunião do quinto GF (APÊNDICE 6).

Para garantir a fundamentação sólida do artefato, aplicaram-se princípios teóricos da RSL. Durante o desenvolvimento, houve ciclos de revisão, testes e refinamento para identificar falhas, ajustar funcionalidades e melhorar o desempenho.

Nesta ocasião ocorreu a reunião do sexto GF (APÊNDICE 7), realizada no formato online, utilizando a plataforma *Google Meet*, com envolvimento de pesquisadores do LAPRAS, o *stakeholders* da empresa OERLIKON®. Foi apresentado pela empresa dois tipos de aços cedidos como amostra para serem avaliados e testados.

A validação da geometria, granulometria do pó e a morfologia das amostras dos materiais Metco 1030A e 1040^a, cedidos pela OERLIKON®, foram apresentados na reunião do sétimo GF (APÊNDICE 8), realizada no formato online, utilizando a plataforma *Google Meet*.

Durante essa etapa, foram documentadas todas as decisões de *design*, processos de construção e ajustes realizados. Isso contribuiu para garantir a rastreabilidade e a compreensão do processo de desenvolvimento ao longo do tempo.

O *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA), uma ferramenta sistemática para identificar, avaliar e mitigar os riscos associados a falhas em produtos, processos ou sistemas, foi detalhado nessa etapa como prevenção de problemas antes da sua ocorrência (APÊNDICE 11).

O artefato desenvolvido foi posteriormente submetido à etapa de demonstração, enviado para a empresa BAQUELLITES, onde foi testado em cenários práticos e avaliado

quanto à sua eficácia na resolução do problema, todos os dados dos eventos, processos e experiências estão devidamente reportados nos GF anexos.

2.3.4 *Demonstração do artefato*

Nesta etapa, planejou-se cuidadosamente a estratégia de demonstração do artefato de pesquisa, selecionando métodos de teste e abordagens de validação. Todos os recursos necessários foram preparados antecipadamente, incluindo configuração de ambientes, coleta de métricas e identificação de participantes. A demonstração incluiu simulações práticas e interações com usuários ou especialistas para avaliação e *feedback*.

Durante e após a demonstração, coletaram-se dados para avaliar o desempenho do artefato, incluindo medições quantitativas, observações qualitativas e *feedback* de participantes ligados à empresa BAQUELLITES. Utilizaram-se formulários do *Google Forms* para a coleta de dados que foram analisados minuciosamente para verificar a eficácia e adequação do artefato de acordo com os critérios definidos, comparando-os com os objetivos da pesquisa para determinar seu sucesso.

Os resultados da demonstração foram comunicados de forma clara, incluindo relatórios e apresentações. Com base nesses resultados, foram feitos ajustes e melhorias no artefato, incorporando *feedback* dos usuários e otimizando funcionalidades. A documentação do artefato foi atualizada para refletir essas melhorias e garantir referências futuras.

2.3.5 *Avaliação*

A etapa de Avaliação foi fundamental para validar e aprimorar a solução proposta, assegurando sua aplicabilidade no mundo real. A avaliação do protótipo inicial buscou alinhar o artefato com metas e objetivos, utilizando a estratégia de GF para avaliar os testes de aplicação DED no protótipo. A metodologia DoE acompanhou o processo de injeção para avaliar a eficácia e eficiência do artefato em resolver o problema proposto, comparado ao processo atual com solda.

Com o objetivo de assegurar a robustez científica da pesquisa, foi desenvolvido um plano experimental abrangente. Nesse plano, delineou-se a estratégia de experimentação, considerando os parâmetros e métodos de injeção previamente definidos. Os procedimentos experimentais e as análises estatísticas foram conduzidos com o suporte do Minitab®, um *software* de estatística amplamente empregado em instituições acadêmicas e corporações.

Para conduzir os ensaios para avaliar o nível de rebarba, adotou-se um planejamento experimental fatorial completo 2^3 , no software MINITAB®, empregando três fatores com dois níveis cada um, foram realizadas oito rodadas experimentais, na Figura 20 observa-se os modelos de experimentos disponíveis.

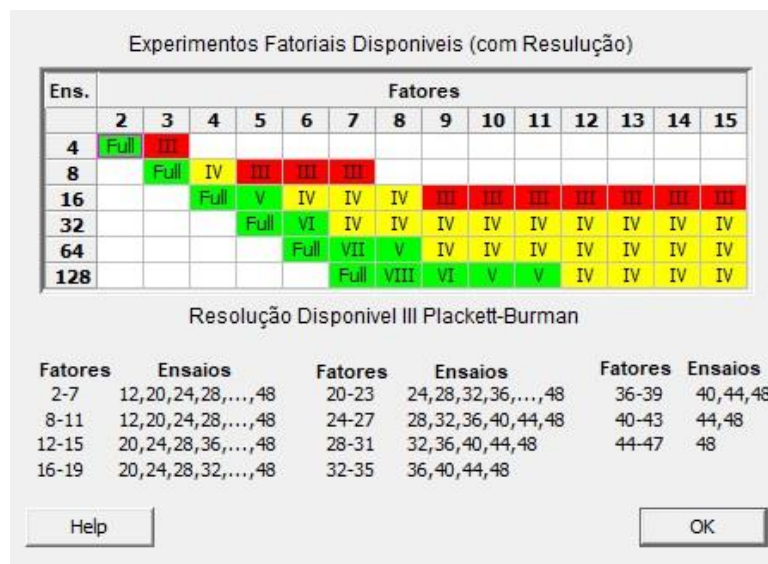


Figura 20- Modelos de experimentos

Fonte: MINITAB®

Os fatores considerados foram a pressão de injeção (130 e 155 bar), o tempo de injeção (30 e 40 segundos) e o volume de injeção (360 e 420 gramas), resultando em um total de 24 diferentes condições experimentais. As variáveis de resposta avaliadas foram os níveis de rebarba, classificados como normais com espessura até 0,1mm, aceitáveis com espessura até 0,2mm e rejeitadas com espessura acima de 0,3mm.

No caso em análise, um experimento foi realizado nas cavidades por meio da análise estatística dos dados adquiridos, com o objetivo de obter uma compreensão mais

completa das variáveis no processo de injeção de termofixo baquelite. Foi avaliado o nível de desgaste nas cavidades do molde, comparando-se as cavidades com e sem aplicação da DED, a fim de validar os resultados.

Após a coleta e análise de dados do processo produtivo de injeção, a pesquisa concentrou-se na avaliação da aceitação do artefato pela empresa BAQUELLITES e seus *stakeholders*. Isso incluiu a satisfação dos usuários e se o artefato atendeu às expectativas de melhorar o processo de injeção de baquelite, garantindo qualidade, reduzindo rebarbas e perdas de matéria-prima. A pesquisa também analisou o impacto mais amplo na sociedade e nas organizações, incluindo a redução de resíduos de rebarbas e melhorias nas estruturas organizacionais, como melhoria da vida útil dos moldes e a redução das paradas de produção.

Por meio do GF, a pesquisa investigou a implementação prática do artefato, identificando desafios e soluções, gerando a produção do artigo científico 3 intitulado “Aplicação da Manufatura Híbrida de Metais no Setor de Ferramentaria: Oportunidades e Identificação de Barreiras”, relatado no Quadro 4.

O acompanhamento da manutenção será contínuo, com foco na facilidade de atualização e adaptação. A pesquisa avaliará sua generalização em diversos contextos e contribuição para futuras pesquisas.

2.3.6 Comunicação

A fase de comunicação no DSR é fundamental para garantir que seus resultados compreendidos, adotados e aplicados de maneira eficaz, contribuindo assim para a solução dos problemas práticos identificados. Portanto, a conclusão incluiu uma formalização geral do processo e a sua comunicação ao mundo acadêmico e profissional. A pesquisa foi apresentada no formato de artigos científicos submetidos a conferências e revistas acadêmicas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresenta-se os principais resultados obtidos a partir da pesquisa realizada e as análises em profundidade, relacionando-os com a literatura existente e os objetivos da pesquisa.

3.1 Identificação do problema

A identificação do problema foi o ponto de partida crucial deste trabalho, destacando a necessidade de melhorias na manufatura de moldes para injeção. A problemática foi delineada com base nos resultados do GF conduzido na empresa BAQUELLITES, onde foram exibidas amostras injetadas evidenciando o excesso de rebarba, como ilustrado na Figura 21.



Figura 21- Peça injetada com excesso de rebarbas

Fonte: Autor (2023)

Essa ocorrência é resultante do desgaste provocado pelo termofixo baquelite, tornando o molde mais vulnerável após cerca de 80.000 ciclos de produção. A análise

aprofundada revelou desafios específicos que motivaram a busca por soluções inovadoras.

A manutenção de recuperação, no atual modelo, leva de 7 a 10 dias úteis, e após o processo, a resistência ao desgaste diminui em média 35%, encurtando os intervalos entre as paradas para recuperação e aumentando os custos de manutenção. O estoque de segurança antecipado para a parada programada do molde resolve o problema de abastecimento, mas gera custos adicionais e interfere na programação de outros produtos devido à ocupação da carga horária da máquina.

Durante a RSL destacaram-se as lacunas presentes na literatura relacionadas ao problema abordado. A análise da literatura contribuiu significativamente para a obtenção de *insights* provenientes de abordagens prévias, além de desempenhar um papel crucial na prevenção da repetição de soluções já conhecidas.

Essa RSL culminou na produção do artigo científico intitulado: “Manufatura Híbrida de Metais, aplicações e características, tipos de aços e propriedades mecânicas: Uma revisão sistemática da literatura”, ISBN 2675-8474, apresentado em outubro de 2022, no XVII SIMPROFI - Simpósio dos Programas de Mestrado Profissional Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – CEETEPS

A partir da RSL, Feriotti e Formigoni (2022b), constataram que a técnica de deposição a laser desempenha papéis cruciais na reforma, reparação e restauração, mas garantir a qualidade requer uma análise detalhada das propriedades mecânicas. A manufatura híbrida, combinando DED e usinagem subtrativa, reduz a necessidade de pós-processamento. Isso resulta na criação de ligas de pó metálico que são adequadas para diversas aplicações, diminuindo custos, especialmente em ligas como aço AISI H13 e AISI P20 frequentemente usados em projetos de moldes. Experimentos indicam que melhorar a rugosidade dos materiais produzidos por MAM pode aumentar sua resistência ao desgaste e à abrasão.

Com propósito de entender as necessidades, expectativas e perspectivas das diferentes partes interessadas, visando garantir que a solução proposta fosse relevante e atendesse às necessidades reais do ambiente em que seria implementada, utilizou-se a estratégia de GF.

Nesta ocasião os pesquisadores abordaram as aplicações da DED em pesquisas, principalmente para testar técnicas de processo e realizar ensaios laboratoriais em corpos de prova. O laboratório utiliza aços como AISI H-13 (liga para trabalho a quente) e Inconel (da família dos inoxidáveis). A MHM pode trabalhar com diferentes aços simultaneamente, permitindo misturas e avaliações de propriedades mecânicas resultantes. O aço AISI H-13, após a MHM, alcança dureza de 50-52 HRC. Desafios incluem a disponibilidade de aço atomizado com geometria esférica uniforme e falta de informação sobre a tecnologia. Vantagens incluem recuperação de geometrias danificadas e revestimentos específicos, enquanto limitações envolvem equipamentos e fornecedores de aço. Na ocasião, a equipe de doutorandos da EESC-USP planejou testar diversos aços no processo MHM e visitar a empresa BAQUELLITES para se familiarizar com o problema e entender as causas.

Compreenderam-se as necessidades, expectativas e pontos de vista das diversas partes interessadas envolvidas. Essa abordagem desempenhou um papel fundamental em assegurar que a solução proposta estivesse em sintonia com a realidade do ambiente onde seria aplicada, garantindo sua relevância e eficácia.

Com base nas etapas anteriores, foi possível formular a pergunta de pesquisa de forma clara e específica, que orientou a investigação e o desenvolvimento da solução: Como aplicar a manufatura híbrida de metais na fabricação de moldes na indústria ferramenteira?

O objetivo da pesquisa foi definido, representando os resultados desejados a serem alcançados: “Pesquisar como a MHM pode aprimorar a fabricação de moldes para injeção de baquelite, proporcionando melhoria no desempenho da vida útil com relação ao desgaste”.

3.2 Ideação da solução

A ideia da solução emergiu como uma resposta direta aos desafios identificados. A concepção inicial abordou aspectos fundamentais para desenvolver um artefato que pudesse superar as limitações existentes, promovendo eficiência e qualidade na produção de moldes para injeção.

Na etapa do desenvolvimento de conceitos, sugestões ou abordagens diferentes para abordar o problema, as ideias foram originadas de fontes de conhecimento existente RSL e conhecimento profissional do pesquisador.

Após a realização da RSL, constatou-se um crescente interesse no conhecimento aprofundado sobre a MHM no ambiente acadêmico, tornando-se de extrema importância ao longo do tempo. Essa relevância se reflete em oportunidades de pesquisa para sua adoção e inovação. Dentre as áreas de aplicação, destaca-se sua importância em reparos e remanufatura de peças, o que levou à escolha da tecnologia de manufatura híbrida como tema central deste trabalho.

A seleção das alternativas, bem como sua justificativa foi baseada em argumentos sólidos no decorrer da reunião de GF. Os pesquisadores apresentaram as diversas aplicações da MHM, incluindo a aplicação de um aço com maior dureza da linha de fechamento de moldes para garrafas de vidro. O laboratório possui dois tipos de aço, AISI H-13 e Inconel, e está explorando o desenvolvimento de ligas mais resistentes ao desgaste. O equipamento permite testes com diferentes aços simultaneamente, avaliando propriedades mecânicas resultantes. Testes de MHM utilizando o processo DED foram aplicados em aços como AISI H-13, Pm10 V, S-390, SAE 4140 e SAE 1045, visando melhorar propriedades mecânicas. A partir dos resultados obtidos, foi proposto teste de aplicação DED simulando a recuperação da linha de fechamento de uma cavidade protótipo.

A partir da alternativa proposta, o próximo passo foi a prototipação e testes via modelagem 3D. Durante esse processo, foi elaborado pelo pesquisador um modelo matemático 3D em CAD experimental para a criação de um protótipo, a Figura 22 ilustra o alojamento para deposição (a) e região com deposição (b).

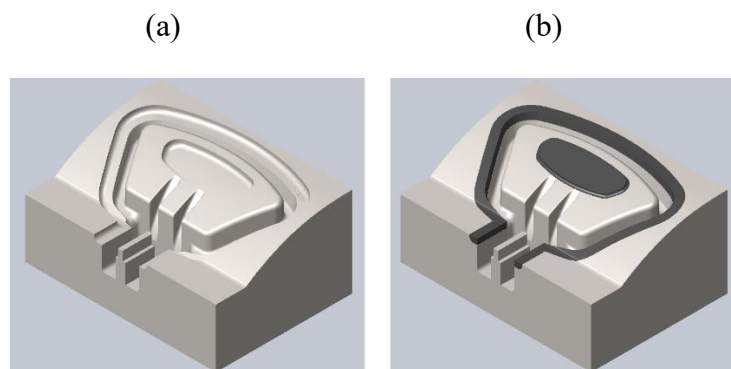


Figura 22- Criação de modelo matemático 3D CAD®

Fonte: Autor (2023)

A geometria gerada foi utilizada por um software CAM para a geração dos programas de usinagem e da MHM.

Na etapa de avaliação da viabilidade e eficácia, essa abordagem foi aplicada a um protótipo concebido para testes. Durante esse estágio, uma análise detalhada da capacidade de execução técnica e dos resultados obtidos foi realizada. Essa etapa de avaliação desempenhou um papel fundamental no processo, permitindo a identificação de possíveis problemas, aferição da praticidade da implementação e a análise crítica da eficácia da solução proposta.

Durante esta etapa foram realizados estudos de deposição de pó de aço AISI H-13 no protótipo usinado em aço SAE 1045, a Figura 23 ilustra o protótipo antes da deposição (a) e depois da deposição (b).

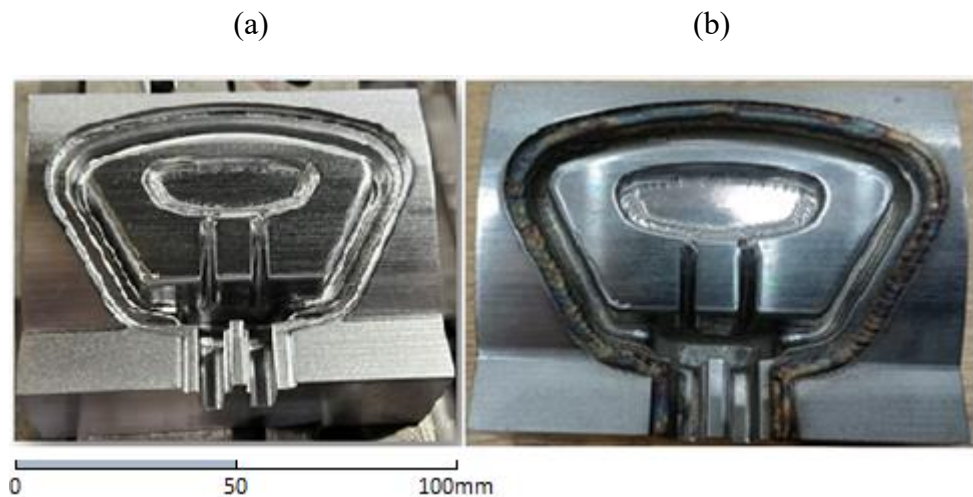


Figura 23- Protótipo de aço SAE 1045 com deposição de aço em pó AISI H-13

Fonte: Autor (2023)

A condução de testes de deposição no protótipo desempenhou um papel importante ao permitir o refinamento e experimentação das abordagens da MHM. Os conhecimentos adquiridos e as experiências obtidas durante essa fase foram diretamente incorporados ao desenvolvimento do artefato final, contribuindo para sua otimização. Essa integração entre testes, aprendizado e aplicação prática resultou em aperfeiçoamentos significativos nas estratégias de fabricação empregadas no processo de criação do artefato.

3.3 Desenvolvimento do artefato

A etapa de desenvolvimento visou criar um artefato destinado a ser testado, avaliado e implementado na prática. Por meio de GF, explorou-se sobre a deposição de diferentes tipos de aço na linha de fechamento de cavidades de um molde, a ser definido pelo *stakeholders* da empresa. Posteriormente esse molde seria integrado no processo produtivo de injeção, sendo monitorado para avaliar a vida útil com a aplicação desse processo.

Em uma sessão de GF realizada online, foram discutidos tipos de aços atomizados com características mecânicas de alta resistência ao desgaste, destacando-se o pó de aço M2. Duas empresas fornecedoras de aços atomizados, a OERLIKON® e a HÖGANÄS®, foram identificadas como opções viáveis.

Na análise realizada na RSL, evidenciou que o uso de alta energia de laser e uma estratégia de varredura com comprimento de trilha constante resultam em propriedades mecânicas favoráveis. Contudo, a adoção de baixa energia leva à formação de martensita e microestruturas homogêneas. Fatores como tensão residual, o acabamento superficial e defeitos na microestrutura impactam nas propriedades mecânicas durante o processo de deposição de metal a laser

Diante desses achados, tornou-se crucial considerar esses fatores ao definir a estratégia de varredura, os parâmetros durante a execução do processo da MHM, bem como as dimensões da região onde o material seria depositado.

Durante o processo de desenvolvimento do artefato, ajustes foram realizados com base nas falhas identificadas nos testes executados no protótipo, visando aprimorar o desempenho da aplicação da MHM no artefato.

Por meio de GF, *stakeholders* da empresa OERLIKON® sugeriram materiais com alta dureza e resistência ao desgaste por atrito. Foram solicitadas amostras pelos pesquisadores do LAPRAS para verificação da geometria, granulometria do pó e a morfologia esférica (sem arestas).

A empresa OERLIKON® forneceu amostras dos materiais Metco 1030A e Metco 1040A, com granulometria entre $-150 +53 \mu\text{m}$, apresentando características de alta dureza (63/68 HRC) e alta resistência ao desgaste por atrito. A HÖGANÄS® forneceu o aço M2, resistente ao desgaste por atrito, com dureza em torno de 62 HRC. Ambas as amostras foram submetidas a testes de deposição no substrato de aço AISI H-13 e ensaios de metalografia, microestrutura e dureza para validação do material.

A Figura 24 ilustra a região rebaixada para a deposição na linha de fechamento da cavidade foi dimensionada com base nos parâmetros testados anteriormente no protótipo.

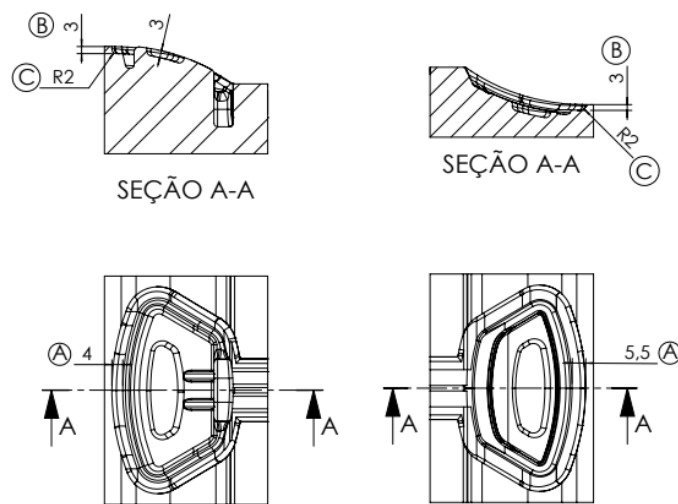


Figura 24- Dimensões da região rebaixada para deposição

Fonte: Autor (2023)

Durante o processo de desenvolvimento, a documentação detalhada de todas as decisões de *design*, procedimentos de construção e ajustes efetuados desempenhou um papel crucial na garantia da rastreabilidade e compreensão contínua do processo de desenvolvimento ao longo do período em questão.

3.3.1 Caracterização microestrutural mediada pela MHM

Durante o desenvolvimento, a caracterização da microestrutura desempenhou um papel vital, especialmente mediada pela MHM. Essa abordagem influenciou diretamente as propriedades do artefato, contribuindo para sua eficácia na aplicação prática.

Os testes de deposição utilizando materiais OERLIKON® 1030A e 1040A foram realizados em junho/2023 no laboratório do LAPRAS. As amostras de aço AISI H13 e SAE 1045 (sem tratamento térmico), fornecidas pela BAQUELLITES, foram submetidas à deposição, a Figura 25 ilustra a deposição do material 1040A (a) e do material 1030A (b).

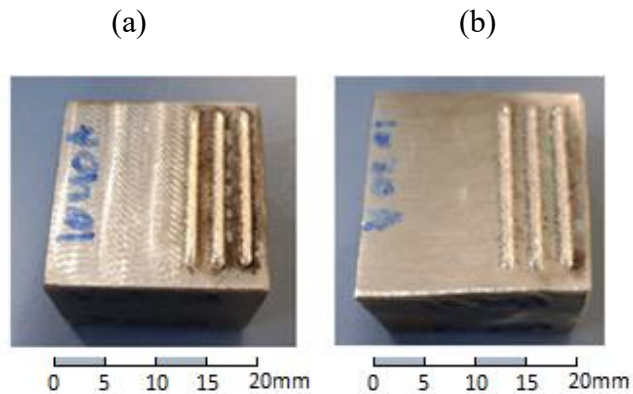


Figura 25- Amostras com deposição materiais 1030A e 1040A

Fonte: Autor (2023)

Os resultados desses testes em substrato de SAE 1045, documentados no GF Apêndice 8, indicaram que a sobreposição de 55% e o aumento da velocidade com sobreposição de 45% resultaram em trincas nas amostras depositadas em substrato de SAE 1045 (Figura 26).

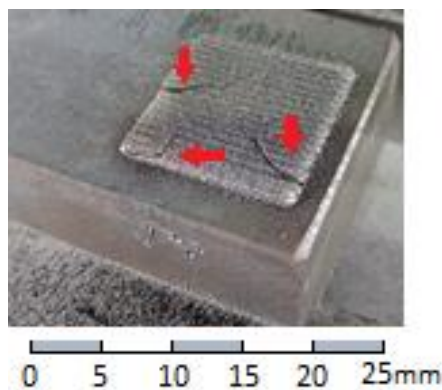


Figura 26- Amostras com deposição em substrato SAE 1045 com trincas

Fonte: Autor (2023)

Testes com segunda camada perpendicular à primeira, com sobreposição de 55%, apresentaram trincas e deslocamento da camada (Figura 27).

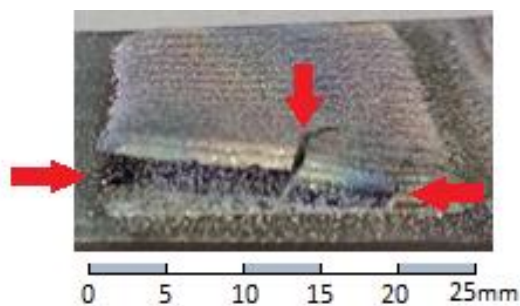
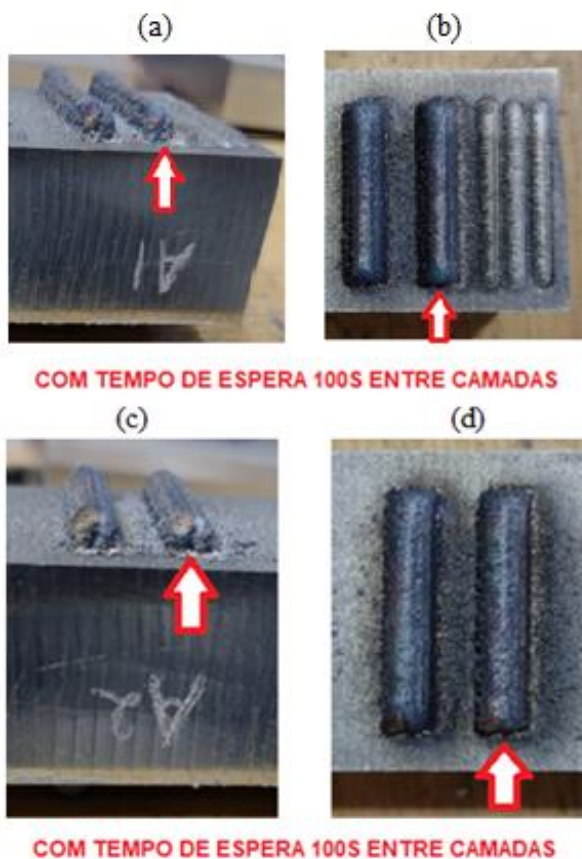


Figura 27- Amostras com deposição em substrato AISI H-13 com trincas e deslocamento

Fonte: Autor (2023)

A sugestão de realizar testes com substrato aquecido foi crucial para a decisão de não utilizar o material da OERLIKON® no projeto.

Os testes de deposição do aço M2 da HÖGANÄS® no substrato de aço AISI H13 sem tratamento térmico foram conduzidos com diferentes parametrizações (Figuras 28 a-f). Os ensaios metalográficos e de microdureza validaram o material.



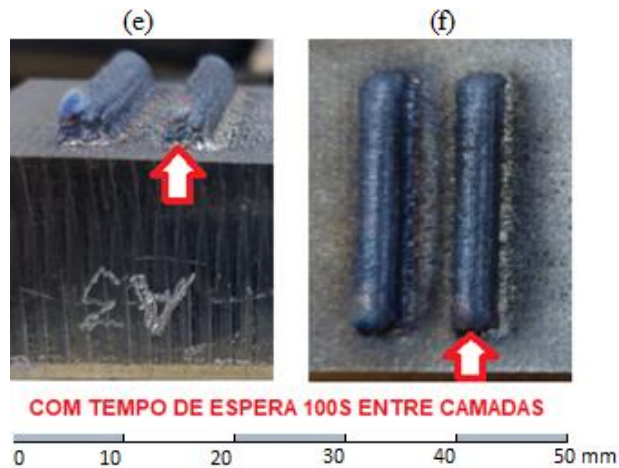


Figura 28- Amostras com deposição do aço M2 em substrato AISI H-13

Fonte: Autor (2023)

O primeiro teste de deposição, nomeado como “Amostra A1”, foi feito com os parâmetros da Tabela 1, com tempo de espera de 100 s.

Tabela 1- Parametrização amostra "A1" com tempo de espera

Descrição	Parâmetros
Potencia	750W
Massa	5,48 g/min
Velocidade	400 mm/min
Varredura X,Y	0,9mm
Nº Camadas	5
Z Médio	0,74mm
Tempo espera	100 s

Fonte: Autor (2023)

A Figura 29, trata-se do ensaio de dureza (a), foram encontradas na zona de fusão 55 HRC e no topo da deposição 62,5 HRC. No ensaio metalográfico no microscópio Confocal (b), observa-se a fusão entre a deposição e o substrato isenta de falhas e trincas.



Figura 29- Ensaio de dureza e metalográfico

Fonte: Autor (2023)

A Tabela 2 trata-se dos parâmetros do teste de deposição da “Amostra A1”, sem tempo de espera.

Tabela 2- Parametrização amostra “A1” sem tempo de espera

Descrição	Parâmetros
Potencia	750W
Massa	5,48 g/min
Velocidade	400 mm/min
Varredura X,Y	0,9mm
Nº Camadas	5
Z Médio	0,74mm
Tempo espera	0 s

Fonte: Autor (2023)

A Figura 30, trata-se do ensaio de dureza (a), foram encontradas na zona de fusão 62 HRC e no topo da deposição 62,7 HRC. No ensaio metalográfico no microscópio Confocal (b), observa-se a fusão entre a deposição e o substrato isenta de falhas e trincas.

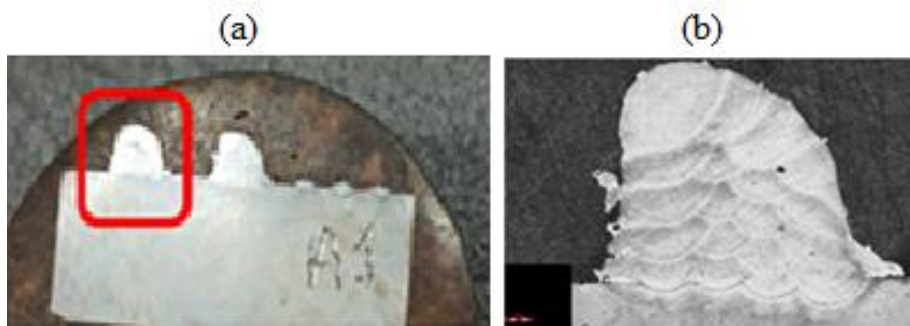


Figura 30- Ensaio de dureza e metalográfico

Fonte: Autor (2023)

O segundo teste de deposição, nomeado como “Amostra A2”, foi feito com os parâmetros da Tabela 3, com tempo de espera de 100 s.

Tabela 3- Parametrização amostra "A2" com tempo de espera

Descrição	Parâmetros
Potencia	750W
Massa	5,48 g/min
Velocidade	400 mm/min
Varredura X,Y	1,0mm
Nº Camadas	5
Z Médio	0,70mm
Tempo espera	100 s

Fonte: Autor (2023)

A Figura 31, trata-se do ensaio de dureza (a), foram encontradas na zona de fusão 60 HRC e no topo da deposição 60,3 HRC. No ensaio metalográfico no microscópio Confocal (b), observa-se a fusão entre a deposição e o substrato isenta de falhas e trincas.



Figura 31- Ensaio de dureza e metalográfico

Fonte: Autor (2023)

A Tabela 4 trata-se dos parâmetros do teste de deposição da “Amostra A2”, sem tempo de espera.

Tabela 4- Parametrização amostra "A2" sem tempo de espera

Descrição	Parâmetros
Potencia	750W
Massa	5,48 g/min
Velocidade	400 mm/min
Varredura X,Y	1,0mm
Nº Camadas	5
Z Médio	0,70mm
Tempo espera	0 s

Fonte: Autor (2023)

A Figura 32, trata-se do ensaio de dureza (a), foram encontradas na zona de fusão 59,9 HRC e no topo da deposição 60 HRC. No ensaio metalográfico no microcópio Confocal (b), observa-se a fusão entre a deposição e o substrato isenta de falhas e trincas.



Figura 32- Ensaio de dureza e metalográfico

Fonte: Autor (2023)

O terceiro teste de deposição, nomeado como “Amostra A3”, foi feito com os parâmetros da Tabela 5, com tempo de espera de 100 s.

Tabela 5- Parametrização amostra "A3" com tempo de espera

Descrição	Parâmetros
Potencia	750W
Massa	5,48 g/min
Velocidade	400 mm/min
Varredura X,Y	0,8mm
Nº Camadas	5
Z Médio	0,78mm
Tempo espera	100 s

Fonte: Autor (2023)

A Figura 33, trata-se do ensaio de dureza (a), foram encontradas na zona de fusão 60 HRC e no topo da deposição 59 HRC. No ensaio metalográfico no microscópio Confocal (b), observa-se a fusão entre a deposição e o substrato isenta de falhas e trincas.

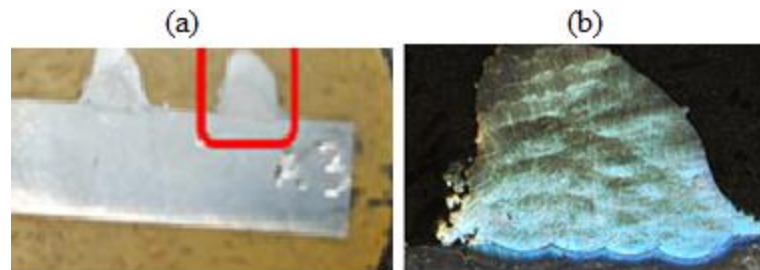


Figura 33- Ensaio de dureza e metalográfico

Fonte: Autor (2023)

A Tabela 6 trata-se dos parâmetros do teste de deposição da “Amostra A3”, sem tempo de espera.

Tabela 6- Parametrização amostra "A3" sem tempo de espera

Descrição	Parâmetros
Potencia	750W
Massa	5,48 g/min
Velocidade	400 mm/min
Varredura X,Y	0,8mm
Nº Camadas	5
Z Médio	0,78mm
Tempo espera	0 s

Fonte: Autor (2023)

A Figura 34, trata-se do ensaio de dureza (a), foram encontradas na zona de fusão 62,8 HRC e no topo da deposição 62,8 HRC. No ensaio metalográfico no microscópio Confocal (b), observa-se a fusão entre a deposição e o substrato isenta de falhas e trincas.

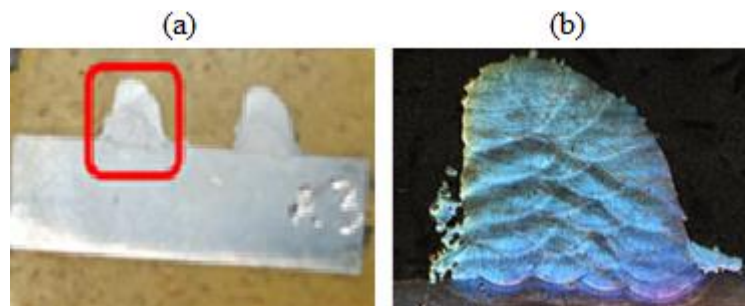


Figura 34- Ensaio de dureza e metalográfico

Fonte: Autor (2023)

Visando avaliar a dureza e a fusão do processo convencional de recuperação com solda e o processo de recuperação com DED, foi feito um teste comparativo, a Figura 35 ilustra a amostra de DED (a), (b), e a amostra com solda (c) e (d).

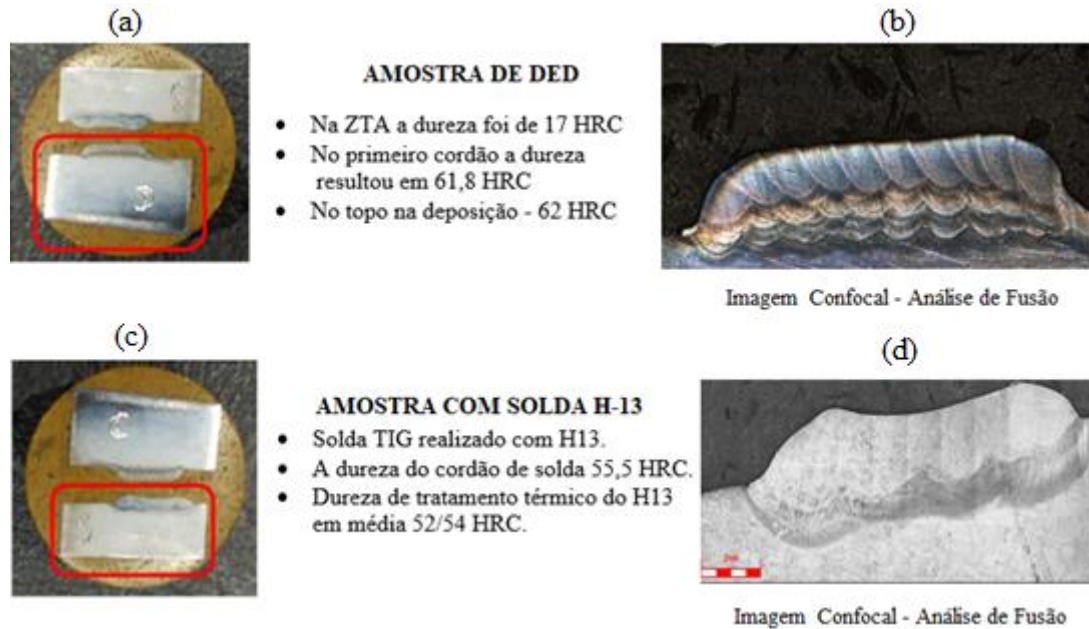


Figura 35- Comparativo dos testes de dureza e fusão das amostras DED e Solda

Fonte: Autor (2023)

Os dados coletados durante esses testes foram fundamentais para a escolha da estratégia de deposição a ser aplicada na recuperação da linha de fechamento do artefato. A estratégia escolhida foi a parametrização usada no ensaio A1, visando obter maior dureza na superfície (62,5 HRC), sem redução da dureza na interface com o substrato (55 HRC). O ensaio metalográfico não apresentou falta de fusão entre as camadas e porosidades, foi observada a melhor condição de fusão com 30% de penetração no substrato, sendo este um dos valores indicados para esta aplicação. Todos os detalhes dessas experiências estão reportados no GF (APÊNDICE 9).

A empresa BAQUELITES cedeu o macho e matriz de um molde para recuperação dos desgastes da linha de fechamento das cavidades, (Figura 36- a, b, c e d).

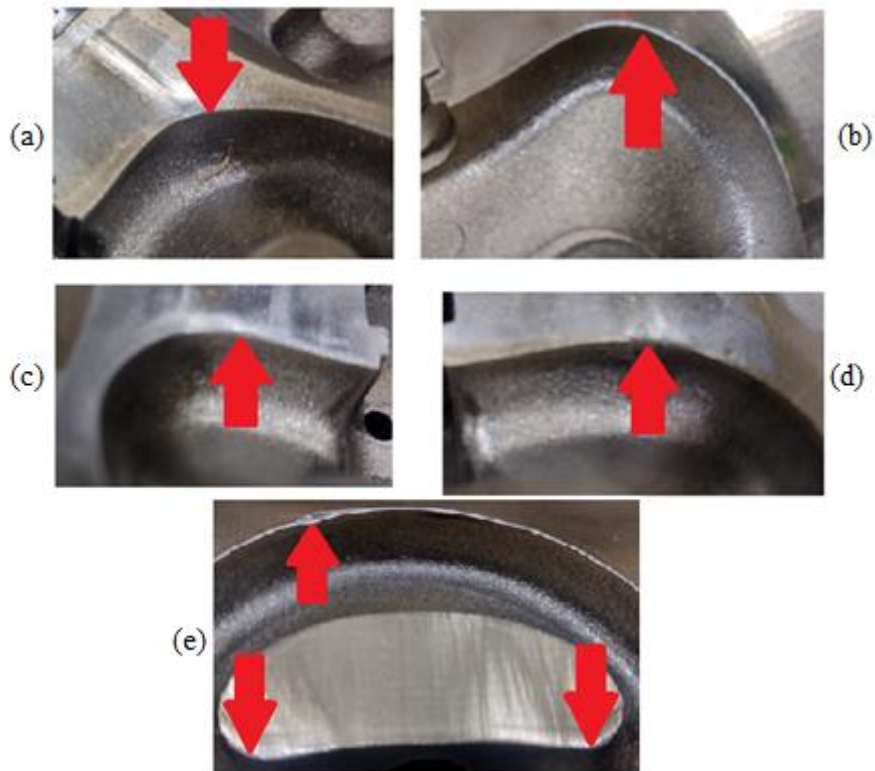


Figura 36- Cavidades com desgastes na linha de fechamento

Fonte: Autor (2023)

A opção pela trajetória de reparo de rebaixas irregulares, iniciando do lado externo para o interno, com sobreposição de 40%, baseou-se em consultas a artigos científicos por meio da RSL, orientação de especialistas em MHM e manutenção de moldes por meio do GF, além de experimentos com deposição de perímetro em corpos de prova, a Figura 37 ilustra o postigo com rebaixo para deposição lado matriz (a) e lado macho (b).

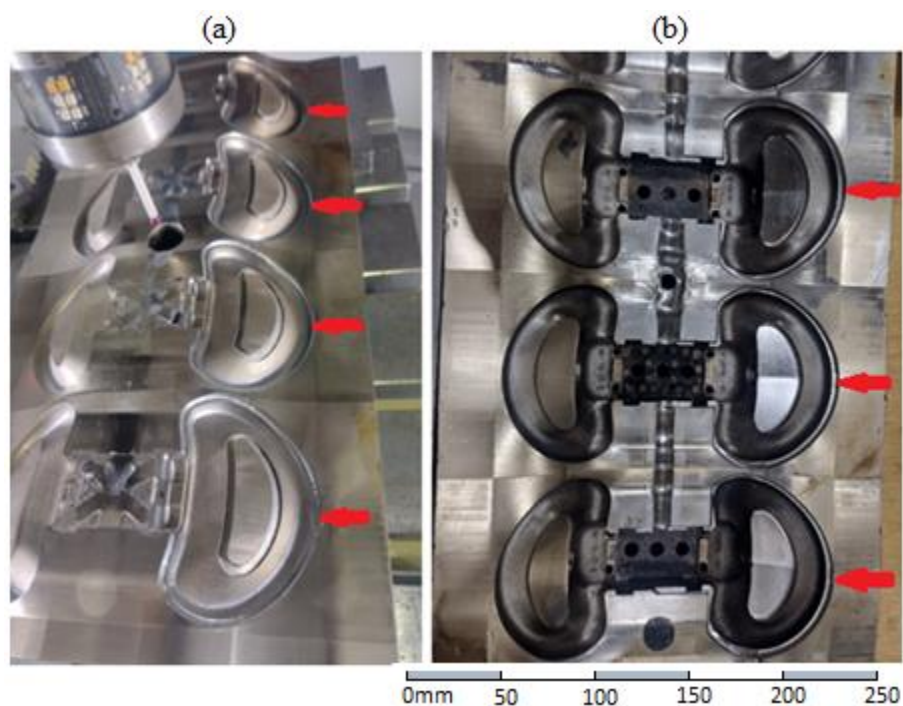


Figura 37- Perímetro com rebaixo para reparo Matriz e Macho

Fonte: Autor (2023)

A trajetória selecionada, demonstrou eficácia na recuperação das regiões críticas, proporcionando não apenas um reparo robusto, mas também uma base sólida para discussões futuras no âmbito da otimização de processos de manufatura.

3.3.2 Modelagem 3D

A modelagem 3D foi uma etapa crucial no desenvolvimento do artefato, fornecendo a base para a implementação prática. Detalhes específicos foram considerados para garantir a integridade do design e a capacidade de adaptação às demandas da manufatura de moldes.

Diante da ausência de um software dedicado à criação do código G para MHM, que tipicamente utiliza malhas refinadas provenientes de arquivos STL, optou-se pelo uso de um software CAM® para a produção de programas de usinagem CNC. Esse software gerou o código G a partir da superfície de arquivos IGES, produzindo as linhas de contorno necessárias para a obtenção das coordenadas cartesianas (X, Y, Z),

A modelagem 3D compreendeu diferentes regiões do artefato, cada uma com trajetórias específicas de deposição. A Figura 38 (a) trata-se da região externa da matriz, tendo como trajetória de deposição quatro camadas, com altura $Z = 0,7\text{mm}$, 6 linhas de sobreposição nos eixos X,Y com espaçamento $0,9\text{ mm}$ (b).

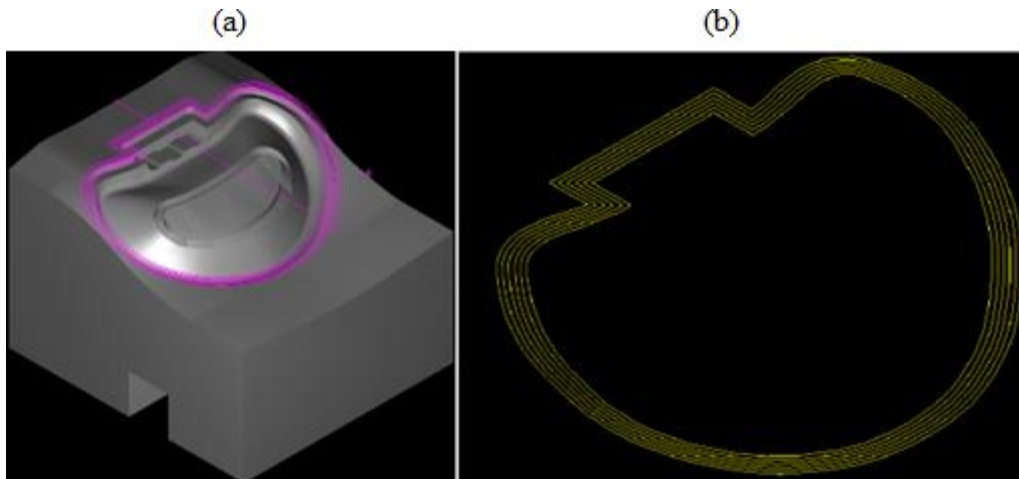


Figura 38- Trajetória da Deposição na região externa da Matriz

Fonte: Autor (2023)

Figura 39 (a) trata-se da região interna da matriz, tendo como trajetória de deposição quatro camadas, com altura $Z = 0,7\text{mm}$, 5 linhas de sobreposição nos eixos X,Y com espaçamento $0,8\text{ mm}$ (b).

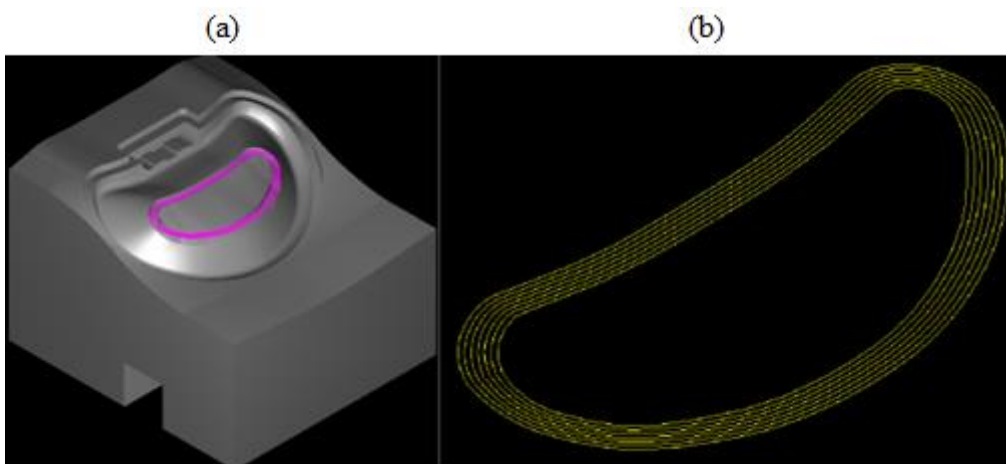


Figura 39- Trajetória da Deposição na região interna da Matriz

Fonte: Autor (2023)

Figura 40 (a) trata-se da região externa do macho, tendo como trajetória de deposição quatro camadas, com altura $Z = 0,7\text{mm}$, 5 linhas de sobreposição nos eixos X,Y com espaçamento $0,8\text{ mm}$ (b).

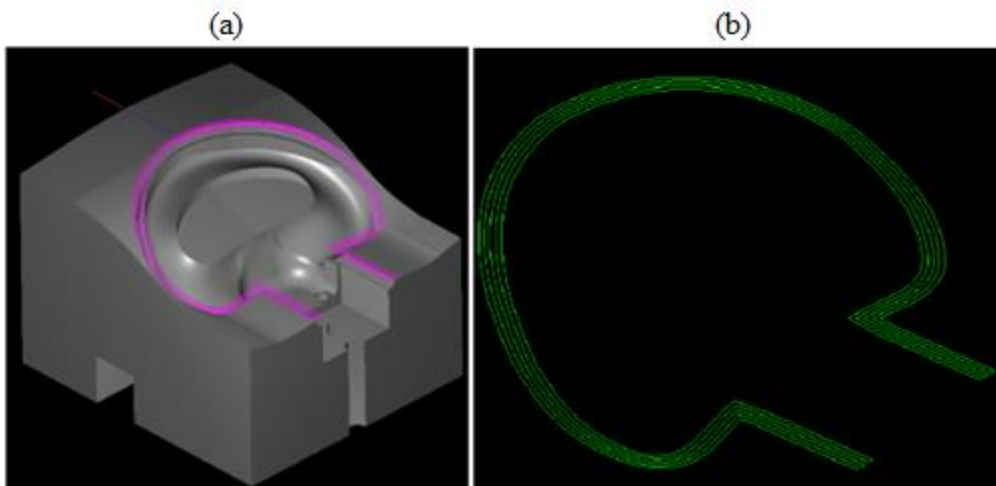


Figura 40- Trajetória da Deposição na região externa do Macho

Fonte: Autor (2023)

Figura 41 (a) trata-se da região interna do macho, tendo como trajetória de deposição 5 camadas, com altura $Z = 0,7\text{mm}$, 29 linhas de sobreposição nos eixos X,Y com espaçamento $0,5\text{ mm}$ (b).

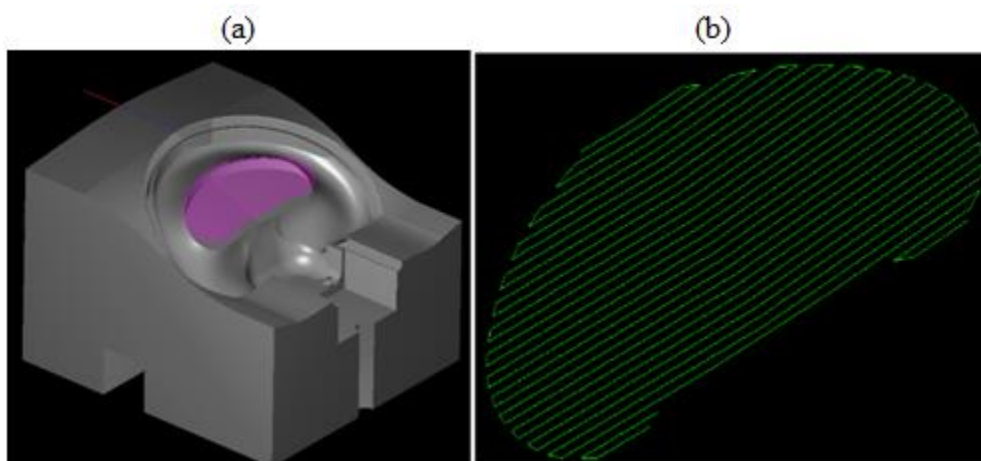


Figura 41- Trajetória da Deposição na região interna do Macho

Fonte: Autor (2023)

A MHM foi realizada de forma intercalada e não sequencial entre as cavidades, com intervalo de tempo entre 15 e 20min para evitar a trinca provocada pela concentração de calor no M2

Devido a geometria irregular no rebaixo a ser reparado, a saída do bocal de deposição fica muito perto da superfície de deposição (Figura 42), proporcionando risco de as partículas de pó entrarem no bocal e grudar na lente protetora do laser (Figura 43).



Figura 42- Região bocal próximo a geometria

Fonte: Autor (2023)



Figura 43- Região queima identificada na lente

Fonte: Autor (2023)

Foi observada uma trinca na deposição da região externa na Matriz em uma cavidade, gerada em função da queima na lente do laser ocasionada pelo respingo de alguma partícula do material quente (Figura 44).



Figura 44- Deposição com trinca

Fonte: Autor (2023)

Observou-se a necessidade de melhorias em software e estratégias de deposição durante o processo. As experiências e dados coletados foram apresentados em uma reunião do GF (Apêndice 10).

Aumentar a vazão de gás evitou respingos. A trinca foi removida manualmente, seguida por reparo de sobreposição. Deposições Zig-Zag mostraram melhores resultados, sugerindo avaliação da geometria para trajetos lineares. Intervalos de 15-20min na deposição entre as cavidades evitaram calor concentrado e apresentaram bons resultados, no macho e na matriz (Figura 45 e Figura 46).



Figura 45- Matriz concluída com DED nas cavidades

Fonte: Autor (2023)



Figura 46- Deposição completa no Macho

Fonte: Autor (2023)

Após a conclusão da aplicação DED, o artefato foi entregue à ferramentaria da BAQUELLITES que realizou o processo de recuperação com solda nas outras 4 cavidades e procedeu a usinagem de repasse de fechamento no Centro de Usinagem CNC e operação de eletro-erosão no retrabalho das cavidades ilustrado na Figura 47.



Figura 47- Operação de eletro erosão no retrabalho das cavidades

Fonte: Autor (2023)

No decorrer do processo de deposição no molde, observações apontaram a necessidade de melhorias em software e estratégias de deposição. As experiências adquiridas e os dados coletados foram reportados em reunião do GF (APÊNDICE 10).

O artefato desenvolvido foi montado no molde, a Figura 48 ilustra o lado matriz (a) e lado macho (b) e posteriormente submetido à etapa de demonstração, sendo enviado para o processo de injeção da empresa BAQUELLITES, onde foi testado em cenários práticos e avaliado quanto à sua eficácia na resolução do problema.

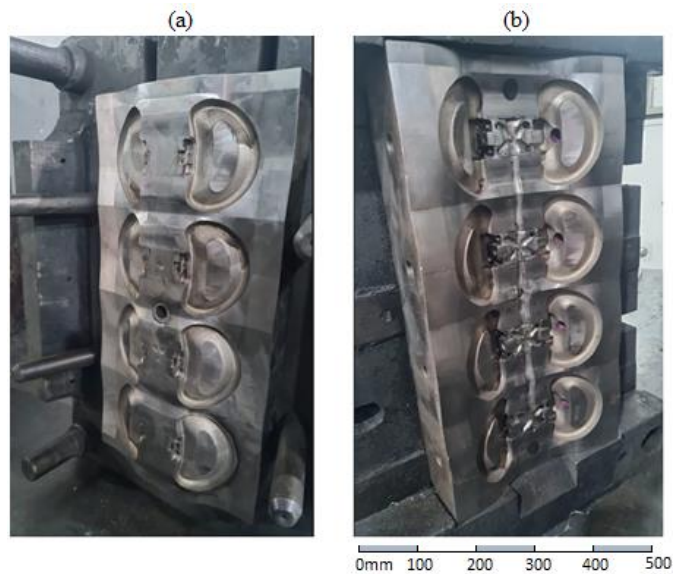


Figura 48-Molde montado lado matriz e macho

Fonte: Autor (2023)

3.4 Demonstração do artefato

A estratégia cuidadosamente planejada para a demonstração do artefato envolveu a seleção de métodos de teste, preparação de recursos e interações práticas. A execução conforme o planejado permitiu coletar dados valiosos para avaliar a eficácia e utilidade do artefato. Na primeira etapa, foi cuidadosamente planejada a estratégia para a demonstração do artefato de pesquisa em design. Isso incluiu a seleção do método de teste e a abordagem para validar a eficácia e utilidade do artefato.

Todos os recursos necessários para a demonstração foram preparados antecipadamente, envolvendo a configuração ambientes adequados, a coleta de métricas e dados relevantes para a avaliação, e a identificação dos participantes da demonstração.

A demonstração foi conduzida conforme o planejamento, incluindo simulações de situações práticas em que o artefato foi aplicado e interações com usuários ou especialistas para avaliação e *feedback*.

Durante e após a demonstração, foram coletados dados para avaliar o desempenho do artefato, englobando medições quantitativas, observações qualitativas e *feedback* dos participantes. Os dados coletados foram analisados minuciosamente para avaliar a eficácia e adequação do artefato conforme os critérios definidos, comparando-os com os objetivos da pesquisa de *design*.

Os resultados da demonstração foram comunicados de maneira clara e objetiva, por meio de relatórios, apresentações e outros meios para compartilhar as descobertas e conclusões. Com base nos resultados e análises, foram realizados ajustes e melhorias no artefato, incorporando *feedback* dos usuários e otimizando funcionalidades. A documentação do artefato foi atualizada para refletir as melhorias e os resultados da demonstração, garantindo uma documentação abrangente para referências futuras.

3.5 Avaliação

Nesta etapa, o foco foi na avaliação do artefato inicial, o protótipo. O teste da aplicação DED no protótipo ocorreu em abril de 2023, avaliando se o artefato atendia aos requisitos iniciais, como funcionalidade, usabilidade e viabilidade técnica. Um estudo

detalhado sobre a eficiência do artefato foi conduzido, utilizando a metodologia DoE e o software MINITAB® para medir a relação entre os recursos empregados e os resultados obtidos.

Após a implementação do molde no sistema produtivo de injeção, um plano de experimentos elaborado pelo software MINITAB® incluiu a análise de métricas quantitativas e qualitativas para avaliar a performance geral do artefato em relação aos padrões estabelecidos. A Tabela 7 mostra a ordem de realização das 24 condições experimentais.

Tabela 7- Fatores, níveis, sequência de experimentos e resultados

Ordem de execução	Numero de ensaios	Pressão de injeção	Tempo de injeção	Volume de injeção	Níveis de rebarba
1	24	155	40	420	0,3
2	5	130	30	420	0,2
3	18	155	30	360	0,1
4	6	155	30	420	0,3
5	20	155	40	360	0,2
6	21	130	30	420	0,2
7	23	130	40	420	0,2
8	8	155	40	420	0,3
9	9	130	30	360	0,1
10	7	130	40	420	0,2
11	10	155	30	360	0,1
12	2	155	30	360	0,1
13	14	155	30	420	0,3
14	22	155	30	420	0,3
15	4	155	40	360	0,2
16	19	130	40	360	0,1
17	11	130	40	360	0,1
18	3	130	40	360	0,1
19	17	130	30	360	0,1
20	12	155	40	360	0,2
21	15	130	40	420	0,2
22	1	130	30	360	0,1
23	13	130	30	420	0,1
24	16	155	40	420	0,3

Fonte: MINITAB®

Fonte: Autor (2023)

Os resultados dos experimentos revelaram uma variação significativa nos níveis de rebarba entre os volumes de injeção, especialmente entre 360g e 420g. O volume de

injeção de 420g resultou em uma rebarba de 0,3 mm, considerada alta e levando à classificação da peça como rejeitada. Entretanto, esses resultados não se mantiveram quando se utilizou um tempo de injeção mais curto, indicando a necessidade de investigações adicionais para compreender as interações entre esses fatores.

A Figura 49 destaca a influência dos fatores na variável resposta Nível de Rebarbas, com o fator C (Volume de injeção) sendo o mais significativo. O MINITAB® utilizou um nível de significância de 0,05, correspondendo a um grau de confiança de 95%, apresentando efeitos padronizados de 2,12.

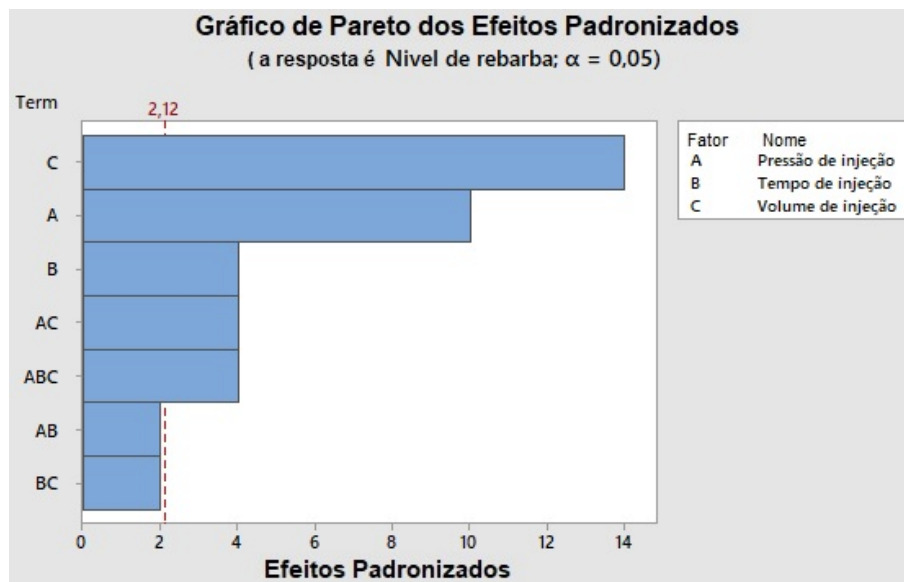


Figura 49- Influência dos fatores na variável resposta Nível de Rebarbas

Fonte: MINITAB®

O Gráfico de Efeitos Principais do MINITAB® destacou a relevância do fator "Volume de injeção" na variável resposta "Nível de Rebarbas", ilustrado na Figura 50.

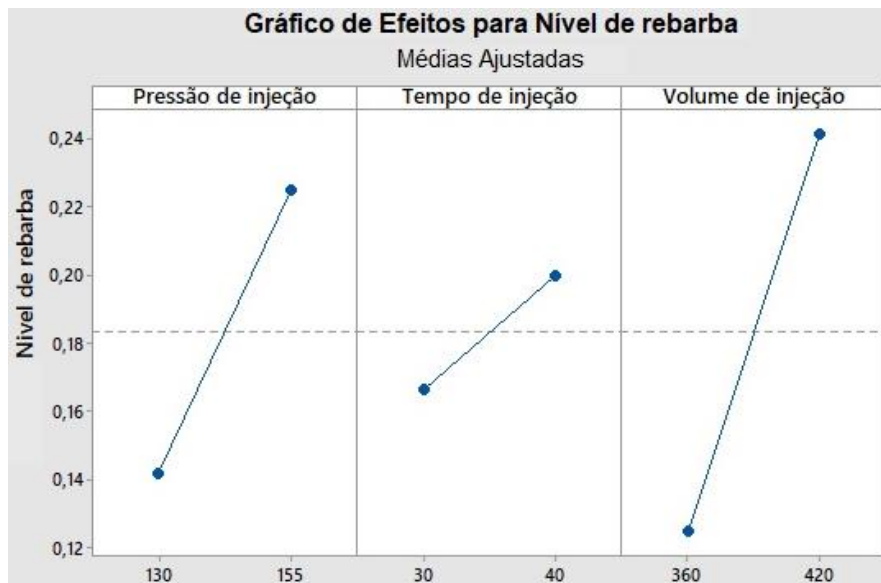


Figura 50- Média dos fatores na variável resposta Nível de Rebarbas

Fonte: MINITAB®

Para alcançar o menor nível de rebarba no produto, ajustes foram feitos no volume de injeção para 360g, na pressão de injeção para 130 bar e no tempo de injeção para 30 segundos. Observou-se que, o limite aceitável de rebarba com 0,2mm, se encontra na faixa média do volume de injeção com 390g, pressão de injeção com 142 bar e o tempo de injeção com 35 segundos, a partir desses parâmetros os níveis de rebarbas aumentam e o processo produtivo de injeção deve ser interrompido para o molde ser submetido a reparo.

A avaliação da aceitação e satisfação ocorreu por meio da análise da receptividade do artefato entre os *stakeholders* da BAQUELLITES. Foi realizada uma avaliação abrangente para compreender como o artefato foi adotado e percebido pelos usuários e partes interessadas. Essa análise incluiu a coleta de *feedback*, a realização de pesquisas utilizando formulários do *Google Forms* e a condução de entrevistas para capturar as percepções e opiniões dos envolvidos. A satisfação dos usuários com relação à melhoria do processo produtivo de injeção foi cuidadosamente examinada para garantir que suas expectativas foram atendidas de maneira positiva.

A avaliação do impacto social e organizacional envolveu a coleta de dados qualitativos e quantitativos identificando os benefícios e desafios decorrentes da

implementação da MHM. Foram realizadas análises de como as melhorias no desempenho do molde afetaram positivamente a produtividade, a qualidade do produto final e a satisfação dos funcionários envolvidos.

A avaliação considerou resultados após a aplicação DED no molde, medindo indicadores como redução do desgaste, aumento da durabilidade do molde e impacto na qualidade do produto. A análise observou a necessidade de software específico para MHM, destacando a carência atual. Os dados referentes ao tempo e volume do pó de aço M2 foram coletados para análise da viabilidade financeira da implantação, conforme Tabela 8.

Tabela 8- Tempo (t) e peso (g) da DED do pó de aço M2

Lado do Molde	nº cav	Total (t) h	g/ cav	Total kg
Matriz externo	4	00:55:40	72,5	0,290
Matriz interno	4	00:30:44	36,3	0,145
Soma (t)		01:26:24	Soma (g)	0,435
Lado do Molde	nº cav	Total (t) h	g/ cav	Total kg
Macho externo	4	00:54:40	68,9	0,276
Macho interno	4	01:11:20	90,2	0,361
Soma (t)		02:06:00	Soma (g)	0,636
Total (t) em s		03:32:24	Total Kg	1,072

Lado do Molde	Sem DED	Com DED	Peso DED
Peso Bruto Matriz (kg)	40,750	40,950	0,200
Peso Bruto Macho (kg)	39,700	39,900	0,200
Peso Total DED (kg)			0,400
Qtde de Pó Dispensado (kg)			0,672
Diferença Deposição x Real (%)			62,7%

Fonte: Autor (2023)

A comparação de custos entre métodos tradicionais e a MHM foi realizada, mostrando uma possível redução nos custos de manutenção.

Os resultados preliminares indicaram vantagens significativas na aplicação da MHM nos moldes para injeção de baquelite, reduzindo o tempo de inatividade da máquina injetora e aumentando a durabilidade dos moldes, conforme comparação demonstrada na Tabela 9.

Tabela 9- Comparação período de inatividade entre os processos

EVENTO	SOLDA	MHM	UNID
Vida útil	40.000	68.800	Nº Ciclos
Tempo parada de produção	15	8	dias
Custo Total da Manutenção	8.260,00	7.133,34	R\$
Nº Cavidades	4	4	cav.
Qtde Peças Injetadas	160.000	275.200	Pçs
Custo manutenção/pç	0,052	0,026	R\$

Fonte: Autor (2023)

. Em contraste, a MHM possibilita a rápida restauração do molde, reduzindo significativamente o tempo de inatividade da máquina injetora. Além disso, a análise do número de ciclos em relação à vida útil do molde revela que a MHM pode estender a durabilidade dos moldes, resultando em uma produção maior de peças injetadas antes da necessidade de substituição ou reparo.

A viabilidade técnica e econômica da aplicação da MHM nos moldes para injeção de baquelite, visando a melhoria do desempenho do molde e redução de custos no processo produtivo de injeção, está sendo baseada inicialmente em uma abordagem comparativa entre os métodos convencionais de recuperação de moldes e a MHM, Tabela 10.

Tabela 10- Comparação custos de recuperação do molde

RECUPERAÇÃO SOLDA 04 CAV				RECUPERAÇÃO MHM 04 CAV			
Evento	Unid	R\$	Custo R\$	Evento	Unid	R\$	Preço/pç
H-13 Arame (kg)	3,200	50,00	160,00	M2 Atomizado (kg)	1,072	445,05	477,09
Tempo Solda (h)	20,0	100,00	2.000,00	Programação DED (h)	2,0	150,00	300,00
				Tempo MHM (h)	3,35	375,00	1.256,25
PÓS PROCESSAMENTO (AJUSTE/ ACABAMENTO)				PÓS PROCESSAMENTO (AJUSTE/ ACABAMENTO)			
Evento	Hs	Custo/ h	R\$ Total	Evento	Hs	Custo/ h	R\$ Total
Custo Usinagem CNC	4,0	150,00	600,00	Custo Usinagem CNC	4,0	150,00	600,00
Custo Usin. E. Erosão	15,0	100,00	1.500,00	Custo Usin. E. Erosão	5,0	100,00	500,00
Bancada (Ajustes)	20,0	100,00	2.000,00	Bancada (Ajustes)	20,0	100,00	2.000,00
			Sub Total				5.133,34
			Aplicação PVD				2.000,00
			Custo Total				7.133,34

Fonte: Autor (2023)

Foram considerados os custos diretos e indiretos envolvidos em cada processo, bem como o tempo necessário para a conclusão de cada etapa. No entanto, no caso da MHM, o custo hora/máquina foi projetado com base no custo da máquina convencional, dada a ausência de dados e informações sobre o custo/hora da máquina híbrida, uma vez que a tecnologia ainda está em fase de desenvolvimento.

Com base nesses dados coletados e considerando a redução de intervenções e dos custos de manutenções proporcionados pela aplicação da MHM, é possível prever uma redução nos custos de manutenção rateada no custo por peça injetada, conforme projetado anualmente e demonstrado na Tabela 11.

Tabela 11- Comparação custo previsto de manutenção entre os processos x peça injetada (projeção anual)

EVENTO	SOLDA	MHM	UNID
Nº Ciclos x Hora	80	80	Ciclos/h
Turno mensal 22h x 22 dias	38.720	38.720	Ciclos/ mês
Tempo de produção estimado até a parada para manutenção	31	54	Dias/ano
Nº Intervenções x ano	12	7	Unid.
Qtde dias parado para intervenção x ano	174	53	Dias/ano
Qtde peças não produzidas x ano	306.581	93.867	Pçs/ano
Qtde Peças Injetadas x ano	1.551.979	1.764.693	Pçs/ano
Custo manutenção x ano	95.922,58	47.555,62	R\$/ano
Custo manutenção anual/pç	0,062	0,027	R\$/pç

Fonte: Autor (2023)

Essa análise financeira reforça a viabilidade econômica da adoção da MHM, destacando não apenas os benefícios técnicos, mas também os impactos positivos nos aspectos econômicos da produção. Essa perspectiva reforça a importância estratégica dessa abordagem inovadora na indústria de moldagem por injeção, oferecendo vantagens competitivas sustentáveis a longo prazo. A aplicação da MHM demonstrou ser tecnicamente viável e economicamente vantajosa, conforme evidenciado nas projeções anuais apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12- Projeção anual dos impactos previstos com uso da MHM

EVENTO	RESULTADO
Nº de intervenções anual	-42,6%
Qtde de dias parado para intervenção anual	-69,4%
Produtividade anual	13,7%
Custo anual com manutenção	-50,4%
Custo anual com manutenção/ pç	-56,4%

Fonte: Autor (2023)

A avaliação da capacidade de manutenção abordou a preservação do artefato ao longo do tempo, identificando possíveis atualizações e adaptações futuras. A extensão do artefato para diversos cenários foi explorada, analisando como os insights gerados pela pesquisa poderiam enriquecer a disciplina e fornecer soluções inovadoras para desafios em áreas relacionadas.

3.6 Comunicação

A estratégia de comunicação foi adaptada às necessidades das partes interessadas para garantir a eficaz transmissão e compreensão dos achados e resultados obtidos. Foram produzidos dois artigos científicos, submetidos a simpósio nacional e congresso internacional, Quadro 6.

Quadro 6- Artigos, autores, título, congresso e simpósio

Artigo	Autores	Título	Congresso/ Simpósio	Ano	País
4	(FERIOTTI; FORMIGONI; AZEVEDO; LÉLIS; NEVES, 2023)	Indicadores da qualidade para acompanhamento da vida útil de moldes para injeção de termofixos.	<i>XVIII SIMPROFI - Simpósio dos Programas de Mestrado Profissional Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa</i>	2023	Brasil
5	(FERIOTTI; FORMIGONI; BATISTA; LÉLIS; PIACENTE; SILVA; SARDIÑAS, 2023)	Advances in Hybrid Metal Additive Manufacturing Technology and the Challenges for Manufacturers, Software and Professionals	<i>ICEMSMCI- International Conference on Emerging Materials, Smart Manufacturing & Computational Intelligence</i>	2023	Índia

Fonte: Autor (2023)

O artigo científico 4 comunicou os métodos aplicados na avaliação, destacando indicadores de qualidade para monitorar o desgaste do molde. Estabeleceu um plano de monitoramento para garantir a qualidade e durabilidade dos moldes na injeção de termofixos. O artigo científico 5 abordou as lacunas encontradas no desenvolvimento do artefato, analisando o avanço da tecnologia MHM em nível global e identificando desafios para sua implementação na indústria.

Os critérios preestabelecidos para a avaliação dos índices de desgaste abrangem uma série de métricas, tanto quantitativas quanto qualitativas, com o propósito de alcançar uma compreensão abrangente do desempenho evolutivo do molde ao longo do tempo. Dentre os indicadores primordiais de desgaste observados, destaca-se a variação do peso das peças fabricadas.

Para quantificar o desgaste, optou-se por uma abordagem comparativa de pesos, englobando a pesagem individualizada das peças injetadas em conjunto com as respectivas rebarbas e segregando-as de acordo com o número de cavidades. Esse procedimento permitiu a distinção entre as cavidades que foram recuperadas por meio do processo de MHM e aquelas restauradas mediante a técnica convencional de soldagem. A coleta de dados foi extraída da média entre cinco pesagens de amostras, ocorreu no início do ciclo produtivo de injeção e posteriormente em intervalos de 5.000 ciclos.

Durante o acompanhamento do desempenho do molde, inicialmente foi planejado um total de 40.000 ciclos. Conforme informações obtidas na empresa BAQUELLITES, os moldes restaurados com solda a partir desse número de ciclos apresentam desgastes que comprometem a qualidade do produto, necessitando de reparo. No entanto, uma trinca inesperada surgiu em uma das cavidades restauradas com a MHM, conforme ilustrado na Figura 51, interrompendo o processo de produção por volta dos 23.000 ciclos.



Figura 51- Trinca na cavidade

Fonte: Autor (2024)

Diante dessa interrupção, levando-se em consideração que o período necessário para o reparo impactaria na conclusão desse estudo, optou-se por realizar uma simulação utilizando interpolação linear dos dados coletados até o ponto de interrupção, visando projetar principalmente o desgaste esperado até 40.000 ciclos, conforme os cálculos ilustrados na Figura 52.

$$\text{Média Projetada do peso} = \text{Peso ciclo final} + \frac{(\text{Peso ciclo final} - \text{Peso ciclo inicial})}{N^{\circ} \text{ de ciclo final}} \times (C - N^{\circ} \text{ de ciclo final})$$

Onde "C" é o N° de Ciclo Projetado

Projeção do Volume g/ cavidades MHM	Projeção do Volume g/ cavidades SOLDA
$230,1 + \frac{(230,1 - 226,4) \times (25000 - 20000)}{20000} = 231,0g$	$240,3 + \frac{(240,3 - 227,6) \times (25000 - 20000)}{20000} = 243,5g$
$230,1 + \frac{(230,1 - 226,4) \times (30000 - 20000)}{20000} = 232,0g$	$240,3 + \frac{(240,3 - 227,6) \times (30000 - 20000)}{20000} = 246,7g$
$230,1 + \frac{(230,1 - 226,4) \times (35000 - 20000)}{20000} = 232,9g$	$240,3 + \frac{(240,3 - 227,6) \times (35000 - 20000)}{20000} = 249,8g$
$230,1 + \frac{(230,1 - 226,4) \times (40000 - 20000)}{20000} = 233,8g$	$240,3 + \frac{(240,3 - 227,6) \times (40000 - 20000)}{20000} = 253,0g$

Figura 52- Cálculos da interpolação linear

Fonte: Autor (2024)

É importante ressaltar que, embora não estivesse prevista a ocorrência de outros problemas, como o surgimento de trincas nas cavidades, a identificação desta durante o processo destacou a necessidade de uma análise mais abrangente do desempenho dos moldes recuperados.

A coleta de dados extraída alcançando o limiar de 20.000 ciclos no processo de injeção, foi acrescido dos dados coletados com base nos cálculos da projeção, conforme sistematizado na Tabela 13.

Tabela 13- Peso médio da injetada completa x N° Ciclos (Real/ Projetada)

	N° Ciclos	Peso g /MHM	Peso g /SOLDA
PROJEÇÃO	40.000	233,8	253,0
	35.000	232,9	249,8
	30.000	232,0	246,7
	25.000	231,0	243,5
REAL	20.000	230,1	240,3
	15.000	228,6	234,9
	10.000	227,1	231,5
	5.000	226,4	227,6
	0	226,0	227,5

Fonte: Autor (2024)

A utilização do software MINITAB® em experimentos específicos revelou que a variação do volume de injeção figura como um dos fatores preponderantes na influência do desgaste no molde de injeção. A Figura 53 ilustra a oscilação do peso das peças ao longo de 20.000 ciclos do processo de injeção, destacando a notável disparidade no desgaste entre os métodos de reparação, comparando a MHM com o método convencional de solda.

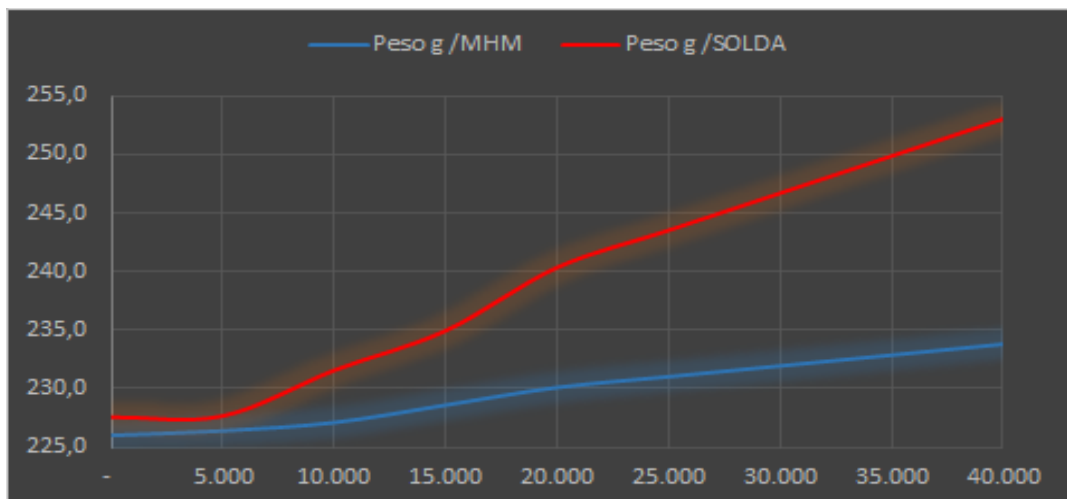


Figura 53- Comparativo variação de peso MHM x Solda

Fonte: Autor (2024)

Adicionalmente, a variação do volume de injeção foi objeto de monitoramento metuculoso, registrando flutuações ao longo do ciclo de injeção. Esses dados quantitativos, minuciosamente documentados, fornecem uma base numérica substancial para análise, conforme exposto na Tabela 14.

Tabela 14- Comparativo variação do volume de injeção (Real/ Projetado)

	Nº Ciclos	% MHM	% SOLDA
PROJEÇÃO	40.000	3,5%	11,2%
	35.000	3,0%	9,8%
	30.000	2,6%	8,4%
	25.000	2,2%	7,0%
	20.000	1,8%	5,6%
REAL	15.000	1,2%	3,3%
	10.000	0,5%	1,8%
	5.000	0,2%	0,0%
	0		

Fonte: Autor (2024)

Os dados preliminares possibilitam uma análise comparativa dos procedimentos empregados na recuperação das cavidades dos moldes. Em face desses resultados, a representação gráfica dos parâmetros quantitativos torna-se relevante, visando uma análise mais detalhada e visual das tendências observadas nos processos de reparação, conforme ilustrado na Figura 54.

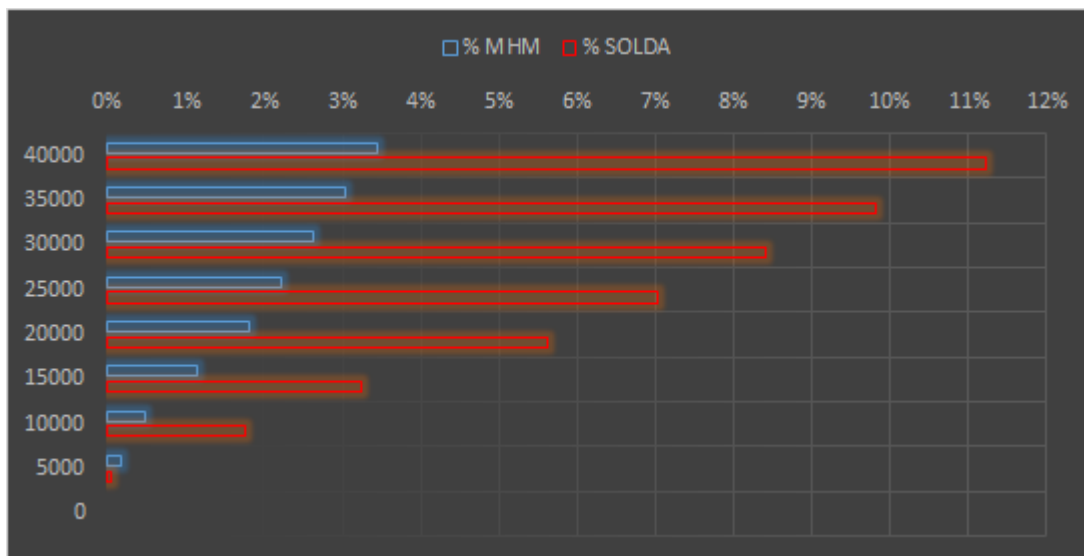


Figura 54- Comparação das variações do volume de injeção

Fonte: Autor (2024)

A análise dos dados obtidos durante o processo de injeção acrescidos com a projeção até 40.000 ciclos, revelou uma redução de aproximadamente 69% no desgaste na linha de fechamento das cavidades do molde quando utilizada a recuperação com MHM em comparação com o método de solda. Esses resultados indicam que a MHM oferece um substancial aumento da sua vida útil e redução de manutenção para sua recuperação.

A avaliação visual concentra-se na observação do índice de desgaste nas linhas de fechamento, a Figura 55 ilustra a cavidade com desgaste (a) e a cavidade recuperada com DED (b) .



Figura 55- Comparação cavidades com desgaste x recuperadas com MHM

Fonte: Autor (2024)

Imagens do produto injetado capturadas ao longo do processo permitem uma análise comparativa, enquanto a qualidade visual das peças injetadas é examinada em relação às amostras coletadas a cada 10.000 ciclos, a Figura 56 ilustra o produto com rebarba (a) e produto sem rebarba (b).



Figura 56- Comparação produtos injetados com e sem rebarba

Fonte: Autor (2024)

Esses dados, tanto qualitativos quanto quantitativos, estão sendo rigorosamente documentados e arquivados no relatório do *Google Forms* (APÊNDICE 12), constituindo uma base sólida para a análise e interpretação dos resultados. Preliminarmente, com base nos dados coletados, é possível discernir melhorias no desempenho das cavidades recuperadas com a MHM em comparação às cavidades restauradas com solda.

Este procedimento abrangente visa fornecer uma compreensão holística do desempenho do molde recuperado, permitindo uma comparação significativa entre o método tradicional de solda e a inovadora abordagem de MHM. Essas informações são cruciais para orientar futuras decisões no desenvolvimento e manutenção de moldes na indústria de moldagem por injeção.

CONCLUSÃO

A evolução da MAM para a MHM representa um avanço significativo na indústria em geral, especialmente na fabricação de moldes para injeção. Essa abordagem combina o melhor dos mundos da fabricação aditiva e tradicional, proporcionando soluções versáteis, econômicas e eficientes para a produção de peças metálicas. À medida que essa tecnologia continua a evoluir, é provável que observemos ainda mais inovações e aplicações nas indústrias atuais e futuras.

A experiência profissional acumulada ao longo de anos pelo pesquisador atuando no setor de ferramentaria representou um ativo inestimável. A habilidade de projetar e construir moldes para a injeção de baquelite, adquirida através de anos de trabalho dedicado, proporcionou uma compreensão profunda dos desafios e das nuances do processo. Isso estimulou a capacidade de identificar áreas de melhoria e desenvolver soluções inovadoras. O pesquisador pôde empregar seu conhecimento detalhado dos processos de injeção de baquelite para orientar o projeto das geometrias que foram produzidas pela MHM. Esse processo resultou em alternativas de aprimoramento nos moldes, não apenas no que se refere à resistência ao desgaste de maneira mais eficaz, mas também para aprimorar a eficiência geral do processo de injeção.

A aplicação MHM nesta pesquisa, aliada ao conhecimento técnico especializado, foi um exemplo notável de como a colaboração entre experiência prática e tecnologia de ponta pôde transformar os processos industriais. Essa abordagem holística teve o potencial de impulsionar a eficiência, a qualidade e a inovação na indústria de manufatura, abrindo caminho para avanços significativos no campo da engenharia de materiais e processos.

Este estudo sinaliza perspectivas promissoras para influenciar de forma positiva os próximos projetos no desenvolvimento de moldes, antecipando uma redução nos gastos com manutenção e uma ampliação substancial da vida útil dos moldes utilizados na indústria de moldagem por injeção de baquelite.

No entanto, inferiu-se algumas lacunas importantes no contexto deste estudo sobre MHM:

- i. Carência de Software Específico: A ausência de software especializado para a integração eficiente da impressão 3D com a usinagem pode ser uma lacuna significativa, dificultando a adoção mais ampla dessa tecnologia.
- ii. Escassez de Profissionais Capacitados: A falta de profissionais com conhecimentos e habilidades adequadas para operar máquinas de MHM pode ser uma barreira para a sua implementação eficaz.
- iii. Necessidade de Normas e Padrões: A ausência de normas e padrões consistentes para a MHM pode criar incertezas e desafios de qualidade na indústria.
- iv. Custos Elevados: Os custos associados à aquisição e manutenção de equipamentos de MHM podem ser proibitivamente altos, limitando o acesso a empresas de menor porte.
- v. Integração de Dados: A integração de dados de CAD e CAM de diferentes formatos pode apresentar desafios, afetando a eficiência do fluxo de trabalho.
- vi. Sustentabilidade: A sustentabilidade na MHM, incluindo a gestão de resíduos e o impacto ambiental, é uma área que pode necessitar de mais estudos.

Essas lacunas representam áreas de desafio e oportunidade que podem exigir pesquisa adicional, desenvolvimento tecnológico e investimento em capacitação para avançar na MHM.

Em meio a esses desafios, fica evidente que a sinergia entre a experiência prática e as inovações tecnológicas continuará a ser crucial para impulsionar o campo e superar essas barreiras. O compromisso contínuo com o aprimoramento das tecnologias e práticas existentes é fundamental para garantir o sucesso e a sustentabilidade dessa abordagem inovadora na indústria.

REFERÊNCIAS

AFKHAMI, Shahriar *et al.* Fatigue characteristics of steels manufactured by selective laser melting. **International Journal of Fatigue**, [s. l.], v. 122, p. 72–83, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014211231830745X>. Acesso em: 12 jul. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ADDITIVE MANUFACTURING STANDARDS - STANDARDS PRODUCTS - STANDARDS & PUBLICATIONS - PRODUCTS & SERVICES. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications/standards/additive-manufacturing-standards.html>. Acesso em: 29 jun. 2023.

ARAÚJO, Vinicius Cavalcante. Manufatura aditiva e suas aplicações na indústria: uma revisão de literatura. [s. l.], 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/57827>. Acesso em: 30 jun. 2023.

ARRIZUBIETA, Jon Iñaki *et al.* Study of the Environmental Implications of Using Metal Powder in Additive Manufacturing and Its Handling. **Metals**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 261, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/2/261>. Acesso em: 28 fev. 2023.

BASINGER, Katie L. *et al.* Development of a modular computer-aided process planning (CAPP) system for additive-subtractive hybrid manufacturing of pockets, holes, and flat surfaces. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 96, n. 5–8, p. 2407–2420, 2018. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-018-1674-x>. Acesso em: 12 jul. 2022.

BAYAZIT, Nigan. Investigating Design: A Review of Forty Years of Design Research. **Design Issues**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 16–29, 2004. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1511952>. Acesso em: 8 jul. 2023.

BERG, Bruce L. **Qualitative research methods for the social sciences**. 4th eded. Boston: Allyn and Bacon, 2001.

ÇAĞDAŞ, Volkan; STUBKJÆR, Erik. Design research for cadastral systems. **Computers, Environment and Urban Systems**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 77–87, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971510000670>. Acesso em: 8 jul. 2023.

CHEN, L.; HU, Z.; CHENG, C. Research on the Wear Resistance of Mold Steel for Injection Molding of Phenolic Resin. **Materials**, [s. l.], 2019.

CHUEH, Yuan-Hui *et al.* Additive manufacturing of hybrid metal/polymer objects via multiple-material laser powder bed fusion. **Additive Manufacturing**, Amsterdam, v. 36, p. 101465, 2020. Disponível em: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/824a1677-27b8-48a6-9942-376087619062-3562cdb0/relevance/1>. Acesso em: 3 maio 2022.

COLOSIMO, Bianca M. *et al.* Opportunities and challenges of quality engineering for additive manufacturing. **Journal of Quality Technology**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 233–252,

2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00224065.2018.1487726>. Acesso em: 29 jun. 2023.

CORREA, Henrique L; CORREA, Carlos A. **Administração de Produção e Operações: Manufatura e Serviços: Uma Abordagem Estratégica**. 5^aed. [S. l.]: Atlas, 2022.

CORTINA, Magdalena *et al.* Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations. **Materials**, [s. l.], v. 11, n. 12, p. 2583, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/12/2583>. Acesso em: 5 ago. 2022.

DEBROY, T. *et al.* Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, [s. l.], v. 92, p. 112–224, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517301172>. Acesso em: 20 abr. 2023.

DRESCH, Aline. **Design Science e Design Science Research como Artefatos Metodológicos para Engenharia de Produção**. 2013. [s. l.], 2013.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JR, José António. **Design Science Research: Método de Pesquisa para Avanço da Ciência e Tecnologia**. [S. l.]: Bookman Editora, 2015.

FAROOQ, Muhammad Arsalan *et al.* An innovative approach for planning and execution of pre-experimental runs for Design of Experiments. **European Research on Management and Business Economics**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 155–161, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1135252315000064>. Acesso em: 12 jul. 2023.

FERIOTTI, Marco Aurélio *et al.* Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. **Brazilian Journal of Production Engineering**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 199–218, 2021a. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/34567>. Acesso em: 12 jul. 2023.

FERIOTTI, Marco Aurélio *et al.* Manufatura Aditiva e Sustentabilidade: Estudo Exploratório para Avaliar Potenciais Impactos Ambientais. **South American Development Society Journal**, [s. l.], v. 8, n. 24, p. 148, 2022. Disponível em: <http://www.sadsj.org/index.php/revista/article/view/523>. Acesso em: 28 jun. 2023.

FERIOTTI, Marco Aurélio *et al.* Os Impactos da Impressão 3D na Fabricação de Moldes para Injeção de Termoplásticos. *In*: COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS: ENGENHARIA DE PRODUÇÃO 2. Ponta Grossa , PR: Editora Atena, 2021b. v. 12, p. 138–151.

FERIOTTI, Marco Aurélio; FORMIGONI, Alexandre. Análise Bibliométrica Sobre a Tendência da Aplicação da Manufatura Híbrida. **South American Development Society Journal**, [s. l.], v. 8, n. 24, p. 64, 2022a. Disponível em: <http://www.sadsj.org/index.php/revista/article/view/541>. Acesso em: 28 jun. 2023.

FERIOTTI, Marco Aurélio; FORMIGONI, Alexandre. MHM (MHM), aplicações e características, tipos de aços e propriedades mecânicas: Uma revisão sistemática da

literatura. In: XVII SIMPÓSIO DOS PROGRAMAS DE MESTRADO PROFISSIONAL UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA SIMPROFI, 2022b. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <http://www.pos.cps.sp.gov.br/files/artigo/file/1205/ee82f250ab9ef3dad6a73dfb0d6f1956.pdf>.

GARCIA-GONZALEZ, D; JARDIM, P. M.; PEREIRA, A. B. Hybrid additive manufacturing of metals for tool and mold production: A review of benefits, challenges and applications. **Additive Manufacturing**, [s. l.], v. 35, p. 101–388, 2020.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. New York, NY: Springer New York, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-2113-3>. Acesso em: 22 abr. 2023.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 eded. São Paulo: Atlas, 2009.

GOMES, João Francisco Bueno; WILTGEN, Filipe. Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas. **Revista Tecnologia**, [s. l.], v. 41, n. 1, 2020. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/9917>. Acesso em: 30 jun. 2023.

GONÇALVES, Fátima. **Comando da Aeronáutica desenvolve motor hipersônico com manufatura aditiva - Inovação e Processos - Indústria 4.0**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.industria40.ind.br/noticias/17527-comando-da-aeronautica-desenvolve-motor-hipersonico-com-manufatura-aditiva>. Acesso em: 30 jun. 2023.

JACKSON, Marcus A. *et al.* **A Comparison of Energy Consumption in Wire-Based and Powder-Based Additive-Subtractive Manufacturing**. (A Shih & L Wang, Org.) **44TH NORTH AMERICAN MANUFACTURING RESEARCH CONFERENCE, NAMRC 44**: Procedia Manufacturing. SARA BURGERHARTSTRAAT 25, PO BOX 211, 1000 AE AMSTERDAM, NETHERLANDSELSSEVIER SCIENCE BV, , 2016.

KARNA, Shyam Kumar. An Overview on Taguchi Method. [s. l.], 2012.

KASTNER, Guilherme Alfredo. **História e conceitos da Impressão 3D - Artigos | CIMM**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/artigos/16688-historia-e-conceitos-da-impressao-3d>. Acesso em: 29 jun. 2023.

KLOCKE, Fritz *et al.* Robust technology chain design: considering undesired interactions within the technology chain. **Production Engineering**, [s. l.], v. 11, n. 4–5, p. 575–585, 2017. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11740-017-0756-1>. Acesso em: 3 set. 2022.

KRUTH, J-P. *et al.* Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. **Rapid Prototyping Journal**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 26–36, 2005. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/13552540510573365/full/html>. Acesso em: 22 abr. 2023.

LACERDA, Daniel Pacheco *et al.* Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 741–761, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2013000400001&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 18 abr. 2023.

LEÃO, Lourdes Meireles. **Metodologia do estudo e pesquisa: Facilitando a vida dos estudantes, professores e pesquisadores**. [S. l.]: Editora Vozes, 2019.

LI, Yongwei *et al.* Application of control quality evaluation technology in complex industrial process. **International Journal of Computer Applications in Technology**, Geneva, v. 57, n. 2, p. 149–156, 2018. Disponível em: [https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/bc51f06a-0724-431e-b155-23ea718c2adb-837bcd28/relevance/1\(overlay:export/exc\)](https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/bc51f06a-0724-431e-b155-23ea718c2adb-837bcd28/relevance/1(overlay:export/exc)). Acesso em: 19 abr. 2023.

LI, W. *et al.* Synthesis and characterization of novolac-type phenolic resins for use in phenolic foam. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, [s. l.], v. 57, n. 14, p. 1452–1457, 2018.

MALSHE, Harsha *et al.* **Profile of Sustainability in Additive Manufacturing and Environmental Assessment of a Novel Stereolithography Process**. **Proceedings of the Asme 10th International Manufacturing Science and Engineering Conference** Three Park Avenue, New York, NY 10016-5990 USA Amer Soc Mechanical Engineers, , 2015.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisa; amostragens e técnicas de pesquisa; elaboração, análise e interpretação de dados. *In: TÉCNICAS DE PESQUISA: PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DE PESQUISA; AMOSTRAGENS E TÉCNICAS DE PESQUISA; ELABORAÇÃO, ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE DADOS*. [S. l.: s. n.], 2012. p. 277–277. Disponível em: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/eps-5199>. Acesso em: 29 jul. 2023.

MARTINELLI, Arianna; MINA, Andrea; MOGGI, Massimo. The enabling technologies of industry 4.0: examining the seeds of the fourth industrial revolution. **Industrial and Corporate Change**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 161–188, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/icc/dtaa060>. Acesso em: 29 jun. 2023.

MARTÍNEZ-MATEO, I. *et al.* Surface damage of mold steel and its influence on surface roughness of injection molded plastic parts. **Wear**, [s. l.], v. 271, n. 9, 18th International Conference on Wear of Materials, p. 2512–2516, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164811002766>. Acesso em: 3 maio 2023.

MARTINS, Petrônio Garcia; LAUGENI, Fernando Piero. **Administração da produção**. 3ªed. São Paulo: Saraiva, 2005.

MILEWSKI, John O. **Additive Manufacturing Metal, the Art of the Possible**. Cham: Springer International Publishing, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-58205-4_2. Acesso em: 1 mar. 2023.

MYERS, Raymond H.; MONTGOMERY, Douglas C.; ANDERSON-COOK, Christine M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2016.

NUNES, Marlon Muniz *et al.* Analysis of Quenching Parameters in AISI 4340 Steel by Using Design of Experiments. **Materials Research**, [s. l.], v. 22, n. 1, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392019000100216&lng=en&tlng=en. Acesso em: 8 jul. 2023.

OHNO, Taiichi. **Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production**. [S. l.]: CRC Press, 1988.

OLIVEIRA, Mirian; FREITAS, Henrique M. R. de. Focus Group - pesquisa qualitativa: resgatando a teoria, instrumentalizando o seu planejamento. **Revista de Administração**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 83–91, 1998.

OSSWALD, Tim; TURNG, Lih-Sheng; GRAMANN, Paul J. **Injection Molding Handbook**. [S. l.]: Hanser Publishers, 2007.

PIOTROWSKI, T. *et al.* Investigation of the properties of phenol-formaldehyde/biochar composite material. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 305, 2021.

POPOV, Vladimir V.; FLEISHER, Alexander. Hybrid additive manufacturing of steels and alloys. **Manufacturing Review**, [s. l.], v. 7, p. 6, 2020. Disponível em: <https://mfr.edp-open.org/10.1051/mfreview/2020005>. Acesso em: 3 jan. 2023.

QIAO, Wei *et al.* Synthesis and characterization of phenol-formaldehyde resin using enzymatic hydrolysis lignin. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, [s. l.], v. 21, p. 1417–1422, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226086X14003141>. Acesso em: 3 maio 2023.

RAMYA, A; VANAPALLI, Sai leela. 3D Printing Technologies in Various Applications. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**, [s. l.], v. 7, p. 396–409, 2016.

RUIZ, Jose Exequiel *et al.* Desarrollo de estrategia y sensorizacion en proceso de LMD para reparacion de geometrias tipo blisk. **Revista Iberoamericana de Ingenieria Mecanica**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 13–18, 2018.

SAMPAIO, C. **Guia Maker de impressão 3D-teoria e prática consolidadas**. [S. l.: s. n.], 2017.

SEFENE, Eyob Messele; HAILU, Yeabsra Mekdim; TSEGAW, Assefa Asmare. Metal hybrid additive manufacturing: state-of-the-art. **Progress in Additive Manufacturing**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 737–749, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00262-1>. Acesso em: 3 jan. 2023.

SEFENE, Eyob Messele; HAILU, Yeabsra Mekdim; TSEGAW, Assefa Asmare. Metal hybrid additive manufacturing: state-of-the-art. **Progress in Additive Manufacturing**,

[s. l.], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00262-1>. Acesso em: 5 ago. 2022.

SHAH, J. *et al.* Large-scale 3D printers for additive manufacturing: design considerations and challenges. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 104, n. 9, p. 3679–3693, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04074-6>. Acesso em: 29 jun. 2023.

SIMON, Herbert A. **The Sciences of the Artificial**. [S. l.]: MIT Press, 1996.

SIMONS, Magnus. Additive manufacturing—a revolution in progress? Insights from a multiple case study. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 96, n. 1, p. 735–749, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1601-1>. Acesso em: 1 mar. 2023.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 2009. v. 2

SOUSA, R. B.; LEITE, M. C. A. M.; GAMA, L. M. Synthesis and characterization of phenol-formaldehyde resin with high reactivity and low free formaldehyde content. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], 2018.

STACHURSKI, Z.; PIASKOWSKI, A. Influence of injection molding conditions on wear resistance of the cavity of the tool for the production of phenolic resins. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 136, n. 2, 2019.

SUBULAN, Kemal; CAKMAKCI, Mehmet. A feasibility study using simulation-based optimization and Taguchi experimental design method for material handling—transfer system in the automobile industry. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 59, n. 5–8, p. 433–443, 2012. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-011-3514-0>. Acesso em: 12 jul. 2023.

TREMBLAY, Monica; HEVNER, Alan; BERNDT, Donald. Focus Groups for Artifact Refinement and Evaluation in Design Research. **Communications of the Association for Information Systems**, [s. l.], v. 26, n. 1, 2010. Disponível em: <https://aisel.aisnet.org/cais/vol26/iss1/27>.

VAISHNAVI, Vijay; KUECHLER, Bill. **Design Science Research in Information Systems**. [S. l.: s. n.], 2009. Disponível em: <[http:// desrist.org/design-research-in-information-systems](http://desrist.org/design-research-in-information-systems)>. Acesso em: 8 jul. 2023.

YAN, Y. *et al.* Optimization of Injection Molding Process Parameters for Phenolic Resin Based on Taguchi Method. **MATERIALS**, [s. l.], 2019.

ZHAO, Yang; MATTNER, Tobias; DRUMMER, Dietmar. Investigation of the effects of pre-cross-linked thermoset molding compounds on weld line strength in injection molding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 105, n. 1–4, p. 1723–1733, 2019. Disponível em: [https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/bc51f06a-0724-431e-b155-23ea718c2adb-837bcd28/relevance/1\(overlay:export/exc\)](https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/bc51f06a-0724-431e-b155-23ea718c2adb-837bcd28/relevance/1(overlay:export/exc)). Acesso em: 19 abr. 2023.

APÊNDICE 1

DETALHAMENTO DO PRODUTO (CAPES)

RELATÓRIO TÉCNICO CONCLUSIVO¹

Organização: Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza (CEETEPS)

PPG: Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos

Autores:

Aluno: Marco Aurélio Feriotti

Professor Orientador: Alexandre Formigoni

Dissertação vinculada:

Inovação na Indústria de Moldagem por Injeção: Aplicação da Manufatura Híbrida de Metais para Aprimoramento de Moldes de Baquelite.

Data da defesa: 21/03/2024

Setor beneficiado com o projeto de pesquisa, realizado no âmbito do PPG:

Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos

A produção técnica é constituída pelo próprio produto?

Sim

Não. Qual o grau contribuição diretamente aplicada ao produto:

Excepcional; Incremental; Residual

Descrição do produto e finalidade:

O produto desenvolvido e a implementação de uma técnica inovadora, conhecida como MHM, na fabricação e reparação de moldes para injeção. O produto em destaque é o molde utilizado no processo de injeção de peças metálicas, um componente fundamental na indústria de injeção. Destacando suas vantagens em termos de durabilidade, eficiência e custo, visando aprimorar os processos de fabricação e manutenção de moldes para injeção.

Avanços tecnológicos / grau de novidade:

Produção com alto teor inovativo: Desenvolvimento com base em conhecimento inédito;

Produção com médio teor inovativo: Combinação de conhecimentos pré-estabelecidos;

Produção com baixo teor inovativo: Adaptação de conhecimento existente;

Produção sem inovação aparente: Produção técnica.

Conexão com a Pesquisa:

PPG: Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos Projeto de pesquisa vinculado à produção:

¹ Definição: Texto elaborado de maneira concisa, contendo informações sobre o projeto/atividade, realizada. Indica em seu conteúdo a relevância dos resultados e conclusão em termos de impacto social e/ou econômico e a aplicação do conhecimento produzido. Não se aplica a relatório de projeto de pesquisa financiados por agências de fomento.

Linha de pesquisa vinculada à produção:

() Projeto isolado, sem vínculo com o PPG

Conexão com a produção científica

a) Título: Análise Bibliométrica Sobre a Tendência da Aplicação da Manufatura Híbrida.

Periódico: South American Development Society Journal. DOI 10.24325/issn.2446-5763.v8i24p64-80.

Disponível em:

<http://www.sadsj.org/index.php/revista/article/view/541>

b) Título: MHM (MHM), aplicações e características, tipos de aços e propriedades mecânicas: Uma revisão sistemática da literatura. XVII Simpósio dos Programas de Mestrado Profissional Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa SIMPROFI.

ISBN 2675-8474. Disponível em:

<http://www.pos.cps.sp.gov.br/files/artigo/file/1205/ee82f250ab9ef3dad6a73dfb0d6f1956.pdf>

c) Título: Manufatura Aditiva e Sustentabilidade: Estudo Exploratório para Avaliar Potenciais Impactos Ambientais. Periódico: South American Development Society Journal. DOI 10.24325/issn.2446-5763.v8i24p148-166. Disponível em:

<http://www.sadsj.org/index.php/revista/article/view/523>

d) Título: Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. Periódico: Brazilian Journal of Production Engineering. DOI 10.47456/bjpe.v7i3.34567 Disponível em:

<https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/34567>

f) Título: Aplicação da Manufatura Híbrida de Metais no Setor de Ferramentaria: Oportunidades e Identificação de Barreiras. Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia

de Produção (SAEPRO) da EEL-USP. ISBN 978-85-5722-847-4. Disponível em: <https://www.even3.com.br//anais/saepro2023/636771-aplicacao-da-manufatura-hibrida-de-metais-no-setor-de-ferramentaria--oportunidades-e-identificacao-de-barreiras>.

g) Título: Indicadores da qualidade para acompanhamento da vida útil de moldes para injeção de termofixos. XVIII Simpósio dos Programas de Mestrado Profissional Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa SIMPROFI. ISBN 2675-8474. Disponível em: <http://www.pos.cps.sp.gov.br/files/artigo/file/1317/987263f2669e756ed5b2fc4ff46b29a0.pdf>

Aplicabilidade da Produção Tecnológica:

A produção tecnológica desenvolvida neste projeto refere-se à capacidade de implementar e utilizar a técnica de MHM na fabricação e reparação de moldes para injeção. Essa tecnologia tem diversas aplicações na indústria de fabricação, especialmente na produção de peças metálicas complexas e na manutenção de moldes. Portanto, a sua aplicabilidade está na sua capacidade de transformar e otimizar os processos industriais, proporcionando soluções mais eficazes e econômicas para a fabricação de moldes para injeção de baquelites.

Descrição da Abrangência realizada:

A abrangência realizada neste projeto se concentrou no desenvolvimento do projeto de pesquisa baseado no *Design Science Research* (DSR), a abrangência realizada incluiu a análise detalhada de diversos casos de estudo relacionados ao tema, a revisão da literatura existente, a coleta e análise de dados relevantes, bem como a realização de experimentos e simulações computacionais. Esses esforços permitiram uma compreensão abrangente do problema em questão e forneceram insights importantes para a formulação de hipóteses e a definição de objetivos específicos para o estudo. Ao longo do processo, foram identificadas lacunas no conhecimento existente e oportunidades para contribuições originais, orientando assim a trajetória do projeto e delineando sua abrangência de maneira clara e precisa.

Descrição da Abrangência potencial:

A abrangência potencial dessa produção tecnológica inclui sua aplicação em diversas áreas da indústria, como manufatura, engenharia de materiais e processos, especialmente

na fabricação de moldes para injeção. Além disso, essa tecnologia pode ser utilizada para melhorar a eficiência, qualidade e sustentabilidade dos processos produtivos, contribuindo para redução de custos e aumento da competitividade das empresas. A capacidade de integrar a manufatura aditiva de metais com métodos tradicionais oferece uma abordagem inovadora para a produção de peças metálicas complexas, permitindo a criação de produtos mais sofisticados e personalizados.

Descrição da Replicabilidade:

A replicabilidade da produção tecnológica desenvolvida neste projeto é alta, pois as técnicas e metodologias empregadas podem ser facilmente reproduzidas em outros contextos e aplicadas a diferentes problemas e necessidades da indústria. Os processos e procedimentos, seguindo a metodologia DSR, foram cuidadosamente documentados e testados, permitindo que outras organizações e pesquisadores adotem e adaptem essas práticas conforme apropriado. Além disso, a modularidade da abordagem permite ajustes e personalizações para atender a requisitos específicos de diferentes setores e aplicações, garantindo sua ampla replicabilidade e aplicabilidade em diversos cenários industriais.

APÊNDICE 2

Questão de pesquisa: Como aplicar a manufatura híbrida de metais na fabricação de moldes na indústria ferramenteira?

Objetivo Geral

Pesquisar como a Manufatura Aditiva Híbrida de Metais pode aprimorar a fabricação de moldes para injeção de termofixos, proporcionando melhoria no desempenho da vida útil com relação ao desgaste.

Participantes Grupo Focal

Empresa Parceira

Danião: danião@baquelites.com.br

Ricardo

Observador

Alexandre Formigoni: a_formigoni@yahoo.com.br

Moderador

Marco Aurélio Feriotti: marco.a.feriotti@gmail.com

Data: 09/08/2022

Horário início: 9h00

Horário término: 12h00

Local: JTS Baquelites (São Paulo)

Perguntas guia do tema:

1. Quais são os principais problemas de qualidade nas peças injetadas em Baquelite?

Os problemas mais recorrentes são excesso de rebarbas na linha de fechamento, isso gera retrabalho de acabamento além de perdas de matéria-prima que vazam para fora da cavidade.



2. Quais as origens dos altos índices de rebarbas na peça injetada?

O termofixo baquelite é altamente abrasivo, provoca desgastes na superfície das cavidades e na linha de fechamento do molde gerando folgas por onde o material vaza no processo de injeção.



3. A partir de quantos ciclos ou peças produzidas que o molde começa a apresentar desgaste na linha de fechamento e precisa de intervenção para ser recuperado?

Em média 80.000 ciclos.

4. Quantos dias em média a produção é interrompida para que a manutenção de recuperação seja executada?

Até 10 dias.

5. Como é feito o processo de manutenção para recuperação das cavidades do molde?

Primeiramente é aplicado solda TIG utilizando vareta de aço H-13, posteriormente tem o processo de repasse da linha de fechamento na CNC e repasse das cavidades na eletro erosão.

6. Quantos dias em média leva esse processo?

Prazo entre 7 a 10 dias.

7. Após essa recuperação, a vida útil com relação ao desgaste, suporta o mesmo número de ciclos?

Não, a cada manutenção a resistência ao desgaste vai diminuindo e o intervalo das paradas para recuperação são mais curtos, a redução do número de ciclos chega variar em média 35%.

8. Quais são os impactos durante o período de parada da produção para a intervenção de manutenção do molde?

É produzido um estoque de segurança antecipado para programar a parada do molde, e o problema de abastecimento é resolvido. No entanto, esse período em que o molde fica em produção para estoque está gerando um custo antecipado do investimento em matéria-prima e aumentando a ocupação da carga horária da máquina, o que interfere na programação de outro produto que poderia estar sendo produzido.

9. O estoque de segurança para a parada programada do molde garante o abastecimento?

Existe risco de falta de abastecimento devido a sazonalidade comercial de determinados modelos de produtos, visto que na sua maioria são de exclusividade do cliente final.

APÊNDICE 3

Questão de pesquisa: Como aplicar a manufatura híbrida de metais na fabricação de moldes na indústria ferramenteira?

Objetivo Geral

Pesquisar como a Manufatura Aditiva Híbrida de Metais pode contribuir, na fabricação de moldes para injeção de termofixos, proporcionando melhoria no desempenho da vida útil com relação ao desgaste.

Participantes Grupo Focal

Pesquisadores

Júlia Fornaziero de Almeida: julia.f.almeida@usp.br

Fábio Mariane: mariani.fabio@usp.br

Johan Sebastian Grass Nuñez: jsgrassn@usp.br

Vincent E. Wong: vwong@ufs.com

Observador

Alexandre Formigoni: a_formigoni@yahoo.com.br

Moderador

Marco Aurélio Ferriotti: marco.a.ferriotti@gmail.com

Data: 08/11/2022

Horário início: 10h00

Horário término: 12h00

Local: Núcleo de Manufatura Avançada do Instituto Fábrica do Milênio EESC-USP (São Carlos)

Perguntas guia do tema:

- Atualmente quais são as aplicações da MH nas pesquisas?
Ainda não houve nenhuma aplicação específica em algum tipo de desenvolvimento, por enquanto as aplicações estão sendo feitas em corpos de prova para testar as técnicas do processo e fazer os ensaios de laboratório (metalográficos, mecânicos, etc.)
- Quais são os tipos de materiais (aços) utilizados nessas pesquisas?
Atualmente o laboratório tem dois tipos de aço disponíveis, o H-13 (aço liga para trabalho a quente) e o Inconel (aço da família dos inoxidáveis)
- Existe algum tipo de aço ou liga sendo desenvolvido?
O equipamento pode trabalhar com até dois tipos de aço simultaneamente, sendo possível fazer a mistura na proporção desejada, portanto, alguns testes

estão sendo feitos para avaliar as características das propriedades mecânicas resultantes dos ensaios.

- Quais são as principais propriedades mecânicas do aço empregado?
No caso do aço H-13, após a aplicação ele apresenta dureza entre 50 a 52 HRC
- Quais são os principais desafios desse processo?
São poucas as opções de fornecedores do aço atomizado com a geometria esférica e gramatura uniforme necessária para uma boa aplicação com baixo índice de porosidade.
- É possível aplicar a MH em materiais (aços) de classes diferentes?

Sim, os testes feitos em laboratório demonstraram que aços de classes diferentes tem uma boa fusão e aderência no processo.

- Após o processo da MH é necessária aplicação de tratamento térmico?
O material já adere dureza durante o processo, porém, se for necessário modificar esse estado, o processo de tratamento térmico é similar ao aplicado nos aços convencionais
- Quais são as vantagens e desvantagens atualmente dessa tecnologia?

A principal vantagem é a aplicação na recuperação de geometrias danificadas de peças, moldes, etc.

Outra vantagem do processo é para aplicação de camada (revestimento) numa região específica que necessita de um determinado tipo de aço pelas suas características e propriedades mecânicas, não sendo necessária a fabricação de todo o corpo da peça no mesmo tipo de aço.

Uma desvantagem é falta de informação dessa tecnologia, isso cria barreiras para sua adesão pelas indústrias.

A limitação de fornecedores do aço atomizado também é um fator de desvantagem comercial.

Outra desvantagem é que, equipamentos de 3 eixos (X,Y,Z) não permitem aplicações em cavidades profundas com paredes perpendiculares ao piso, nesses casos a aplicação precisa ser feita num equipamento 5 eixos, esse tipo de equipamento disponível no Brasil tem limitação dimensional na área de aplicação com relação ao tamanho da peça.

Observações:

- Está em estudo a formalização de parceria entre o Núcleo de Manufatura Avançada da USP São Carlos x CPS x Empresa envolvida no projeto.
- Equipe de pesquisadores da USP São Carlos agendaram visita no dia 22/11/22 na empresa para conhecer sobre moldes de injeção de termofixo e seu processo e posteriormente visitar o CPS.
- Serão enviadas amostras de aços SAE 1045, SAE 4140, SAE 8620, SAE 8640, P20, M30 e H-13 para testes de aplicação e de laboratório para validação do processo.
- Na visita ao laboratório da USP São Carlos o Prof Reginaldo não conseguiu participar por motivos de saúde.

APÊNDICE 4

Questão de pesquisa: Como aplicar a manufatura híbrida de metais na fabricação de moldes na indústria ferramenteira?

Objetivo Geral

Pesquisar como a Manufatura Aditiva Híbrida de Metais pode contribuir, na fabricação de moldes para injeção de termofixos, proporcionando melhoria no desempenho da vida útil com relação ao desgaste.

Participantes Grupo Focal

Pesquisadores

Júlia Fomaziero de Almeida: julia.f.almeida@usp.br

Fábio Mariane: mariani.fabio@usp.br

Johan Sebastian Grass Nufres: isgrassn@usp.br

Vincent E. Wong: wong.ufs@gmail.com

Empresa Parceira

Daniilo: daniilo@baquellies.com.br

Ricardo

Observador

Alexandre Formigoni: a_formigoni@yahoo.com.br

Rosinei Batista Ribeiro (CEETEPS): rosinei1971@gmail.com

Caio

Moderador

Marco Aurélio Fenotti: marco.a.fenotti@gmail.com

Data: 29/11/2022

Horário início: 9h00

Horário término: 15h40

Local: JTS Baquellies (São Paulo)



2. Quais são os tipos de materiais (aços) disponíveis no laboratório? Atualmente o laboratório tem dois tipos de aço disponíveis, aproximadamente 5kg de aço H-13 (aço liga para trabalho a quente) e o Inconel (aço da família dos inoxidáveis).

3. Existe possibilidade de desenvolvimento de um tipo de aço ou liga com maior resistência ao desgaste comparado ao H-13?

O equipamento pode trabalhar com até dois tipos de aço simultaneamente, sendo possível fazer a mistura na proporção desejada, portanto, alguns testes serão feitos para avaliar as características das propriedades mecânicas resultantes dos ensaios.

4. É possível aplicar a MH em materiais (aços) de classes diferentes?

Sim, os testes serão feitos nas amostras de aços H-13, Pm10.V (Sinterizado), S-390 (Sinterizado), SAE 4140 e SAE 1045 fornecidos e os corpos de prova serão analisados em laboratório para avaliar suas propriedades mecânicas.

Observações:

1- Equipe de pesquisadores da USP São Carlos visitaram a ferramentaria da empresa para conhecer sobre moldes de injeção de termofixo e seus problemas recorrentes do processo de injeção, posteriormente visitaram o setor de injeção para conhecer o funcionamento e a aplicação dos moldes no processo de injeção.

2- Foram fornecidas amostras de aços SAE 1045, SAE 4140, Pm 10V, S-390 e H-13 para testes de aplicação e análises em laboratório para validação do processo e propriedades mecânicas.

3- Na reunião foi abordado onde será aplicada a MH em moldes, o primeiro teste será na recuperação da linha de fechamento da cavidade de um molde a ser definido pelo Daniilo, esse molde será colocado no processo produtivo e acompanhado para avaliar a vida útil com a aplicação desse processo.

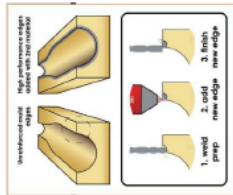
4- Numa próxima etapa será desenvolvido um produto para um novo projeto, uma das cavidades será fabricada com o processo da MH e as demais cavidades pelo método convencional, e o molde será avaliado durante o processo produtivo.

5- O Daniilo vai definir um produto para desenvolvimento e acertará com o Caio e o Rosinei os detalhes para esse desenvolvimento.

6- O Daniilo e Ricardo agendaram visita dia 30/11/22 no Núcleo de Manufatura Avançada do Instituto Fábrica do Milênio EESC-USP (São Carlos).

Perguntas guia do tema:

1. Atualmente quais são as possíveis aplicações da MH em moldes? Existe um estudo sobre aplicação da MH na recuperação da linha de fechamento de molde para fabricação de garrafa de vidro, conforme foi abaixo:



<https://www.moldmakingtechnology.com/articles/use-hybrid-am-to-produce-longer-lasting-multi-material-molds->

APÊNDICE 5

2. É possível atomizar e depositar o aço S-390? Existe equipamento no laboratório da UFSCar, porém, precisa confirmar se está em funcionamento. A Júlia tem contato com o Moisés de Lima do IPT, lá tem o equipamento de atomização de aço, ela vai conversar com ele para verificar a possibilidade de fazer esse processo.

3. É possível depositar os tipos de aços sintenzados, S-390 ou Pm10V na manufatura híbrida? Não existem experiências com esse tipo de aplicação, porém, há preocupação com a fusão dele, mas pode-se fazer testes de mistura com outro aço, por exemplo, o H13.

4. É possível depositar algum tipo de material com característica cerâmica, tipo PVD, para redução do coeficiente de atrito? O processo é feito de forma diferente, o material não passa pelo bico de deposição pois ele é de cobre e causaria desgaste. A aplicação é feita através de um processo de distribuição da camada num formato de "lama" sobre o substrato e posteriormente é feita a varredura com o laser para solidificação.

5. Existe possibilidade fazer testes de coeficiente de atrito? Sim, tem o equipamento no laboratório da USP, serão providenciadas amostras de aço H13 (tratado termicamente) sem e com cobertura de nitrato de titânio e amostras de deposições para execução dos testes e comparações.

Observações:

- 1- A Júlia iniciou a reunião com a apresentação do seu projeto de doutorado que aborda sobre as estratégias de implementação da tecnologia nas empresas (Anexo 2).
- 2- Na sequência foi apresentado o projeto de mestrado que aborda a aplicação da tecnologia nos projetos de moldes de baquelite para aumento da sua vida útil (Anexo 3).
- 3- Na reunião foi abordado sobre a deposição de mais de um tipo de aço na linha de fechamento de várias cavidades de um molde a ser definido pelo Danilo, esse molde será colocado no processo produtivo e acompanhado para avaliar a vida útil com a aplicação desse processo.
- 4- Foi conversado sobre o Acordo de Cooperação, o Prof. Reginaldo vai verificar os modelos já utilizados e se for o caso serão feitos ajustes nos modelos disponibilizados pelo Marco.
- 5- Foram definidas algumas etapas do projeto conforme quadro abaixo com os responsáveis:

Questão de pesquisa: Como aplicar a manufatura híbrida de metais na fabricação de moldes na indústria ferramenteira?

Objetivo Geral

Pesquisar como a Manufatura Aditiva Híbrida de Metais pode contribuir, na fabricação de moldes para injeção de termofixos, proporcionando melhoria no desempenho da vida útil com relação ao desgaste.

Participantes Grupo Focal

Pesquisadores

Júlia Fornaziero de Almeida: julia.f.almeida@usp.br

Fábio Mariane: mariani.fabio@usp.br

Johan Sebastian Grass Nuñez: jsgrassn@usp.br

Reginaldo Teixeira Coelho: rtcoelho@sc.usp.br

Empresa Parceira

Danilo: daniilo@baquelites.com.br

Observador

Alexandre Fomigoni: a_fomigoni@yahoo.com.br

Moderador

Marco Aurélio Feriotti: marco.a.feriotti@gmail.com

Data: 10/02/2023

Horário início: 9h45

Horário término: 13h00

Local: Núcleo de Manufatura Avançada do Instituto Fábrica do Milênio EESC-USP (São Carlos)

Perguntas guia do tema:

1. Quais foram os resultados da deposição do aço H13 nas amostras de aço fornecidas pela empresa parceira?
Os testes foram feitos nas amostras de aços H-13, Pm10 V (Sintenzado), S-390 (Sintenzado), SAE 4140 e SAE 1045 fornecidos e os corpos de prova foram analisados em laboratório para avaliar suas propriedades mecânicas, conforme relatório Anexo1.

APÊNDICE 6

- Questão de pesquisa:** Como aplicar a manufatura híbrida de metais na 2. Quais são as empresas que já estão comercializando o aço M2 Observações:
- fabricação de moldes na indústria ferramenteira?
- Objetivo Geral**
- 1- O IPT está fazendo pesquisas da aplicação desse material em matrizes de estampas fabricadas em aço D2, já estão sendo executados testes de resistência a atrito mecânico e plástico, os resultados são positivos.
- 2- A aplicação em substrato sem tratamento térmico apresenta melhor liga na zona ZTA, porém, é necessário encontrar um ponto de equilíbrio na curva de temperatura de tempera, já que existe diferentes características de temperatura e tempo de forno para tratamento de cada material.
- 3- O Moysés comentou da importância da definição da definição da rota na deposição para a obtenção de melhor fusão entre o substrato e a deposição.
- 4- Prof. Reginaldo comentou que a empresa HOGANAS é parceira nos projetos.

4. Qual é o prazo do recebimento desse material?
- Em torno de 15 a 20 dias, após o recebimento do material serão executados testes de deposição, tratamento térmico e testes no laboratório.
6. Quais são as características do aço M2, comparados ao S-390 e H13?

Composição Química	M2	S-390	H 13
Carbono (C)	0,28 - 1,05	1,84	0,40
Manganês (Mn)	0,15 - 0,40	0,30	0,40
Silício (Si)	0,20 - 0,45	0,60	1,0
Cromo (Cr)	0,20 - 0,45	4,8	5,0
Níquel (Ni)	0,30		
Molibdênio (Mo)	4,50 - 5,50	2,0	1,3
Tungstênio (W)	5,50 - 6,75	10,4	
Vanádio (V)	1,75 - 2,20	4,8	1,0
Cobre (Cu)	0,25		
Fósforo	0,03		
Enxofre (S)	0,03		
Cubalto (Co)		8,0	
Tratamento Térmico			
Temperatura Temperatura	18 450-500°C 28 850-900°C 38 1200-1250°C	1100 - 1200°C	1010 - 1030°C
Temperatura Revenimento	18 500°C 28 550°C 38 600°C 48 500°C	500-550°C	550 - 650°C
Dureza HRC	18 64 28 65 38 64 48 61	64-68	50 - 54

3. É possível entrar em contato para verificar a aquisição desse material?

O Prof. Reginaldo conhece essas empresas e já compra material em pó delas, existe uma verba destinada a pesquisa que será utilizada para a aquisição desse material.

4. Como será feita a negociação?

A Júlia vai pesquisar sobre material similar, identificar o código e passar para a Juliana do LAPPAS fazer os trâmites comerciais.

3. É possível atomizar o aço S-390 no IPT?

O aço S-390 é da classe de aços rápidos, o IPT ainda não atomizou esse tipo de material, atualmente a capacidade do equipamento está totalmente tomada e a capacidade de atomização é pequena, porém, existe aço M2, compatível ao S-390 já sendo comercializado atomizado no formato esférico para aplicação DED.

1. É possível atomizar o aço S-390 no IPT?

O aço S-390 é da classe de aços rápidos, o IPT ainda não atomizou esse tipo de material, atualmente a capacidade do equipamento está totalmente tomada e a capacidade de atomização é pequena, porém, existe aço M2, compatível ao S-390 já sendo comercializado atomizado no formato esférico para aplicação DED.

Moderador

Marco Aurélio Feriotti: marco.feriotti@gmail.com

Data: 17/02/2023

Horário início: 16h20

Horário término: 17h30

Local: Reunião online plataforma Google Meet

Perguntas guia do tema:

1. É possível atomizar o aço S-390 no IPT?

O aço S-390 é da classe de aços rápidos, o IPT ainda não atomizou esse tipo de material, atualmente a capacidade do equipamento está totalmente tomada e a capacidade de atomização é pequena, porém, existe aço M2, compatível ao S-390 já sendo comercializado atomizado no formato esférico para aplicação DED.

Pesquisadores

Júlia Fomaziero de Almeida: julia.f.almeida@usp.br

Fábio Mariane: mariam.fabio@usp.br

Reginaldo Teixeira Coelho: rcoelho@ssc.usp.br

Participantes Grupo Focal

Questão de pesquisa: Como aplicar a manufatura híbrida de metais na 2. Quais são as empresas que já estão comercializando o aço M2 Observações:

fabricação de moldes na indústria ferramenteira?

APÊNDICE 7

Questão de pesquisa: Como aplicar a manufatura híbrida de metais na fabricação de moldes na indústria ferramentaria?

Objetivo Geral

Pesquisar como a Manufatura Aditiva Híbrida de Metais pode contribuir na fabricação de moldes para injeção de termofixos, proporcionando melhoria no desempenho da vida útil em relação ao desgaste.

Participantes Grupo Focal

Pesquisadores

Júlia Fomaziero de Almeida: julia.f.almeida@usp.br
 Fábio Mariani: mariani.fabio@usp.br
 Vincent E. Wong: vwong@us.ibm.com

OERLIKON

Carlos Coimbra: Carlos.Coimbra@oerlikon.com

Moderador

Marco Aurélio Feriotti: marco.a.feriotti@gmail.com

Data: 20/03/2023

Horário início: 17h30

Horário término: 18h30

Local: Reunião online plataforma Google Meet

Perguntas guia do tema:

1. A OERLIKON produz aço M2 ou M4 atomizado? É um material de linha, porém, atualmente não tem esse material pronta entrega e para colocá-lo em processo é necessário um consumo mínimo de 2ton.

2. Quais são as opções de aços compatíveis com o aço M2 com características de resistência ao desgaste e dureza similares? Existem alguns aços da linha férrea que estão sendo aplicados nas pás de escavadeiras de mineração, tem características de alta dureza (aproximadamente 70 HRC) e alta resistência ao desgaste por atrito.

Descrição	Responsáveis	Prazo	Obs.:
Consultar sobre a geometria e granulometria do material	Carlos/ Júlia	23/03/2023	
Testes com outros materiais	Johan		Aguardando consento do cabeceiro de deposição
Definição da geometria e dimensões do alojamento necessário para a deposição DED	Marco/ Johan/ Vincent	24/03/2023	Marco vai enviar modelo geométrico 3D para modelação da região onde será feita a deposição.
Envio de disco H13 tratado termicamente C/ e sem cobertura de PVD e da esfera de baquelite	Daniilo	27 a 31/03/2023	O material já está em processo de usinagem
Deposição nos discos p/ testes a frio	Johan		
Definir responsáveis no laboratório para executar os testes de coeficiente de atrito.	Fábio		
Reunir semanalmente as segundas feiras para acompanhamento do desenvolvimento do cronograma.	Júlia		
Acordo de cooperação	Prof Reginaldo / Prof Fomigoni		

3. É possível utilizar esse material no processo de deposição DED? O Carlos vai verificar com o depto de engenharia da OERLIKON qual é a geometria e granulometria do pó, o Fábio do LAPPAS já informou por e-mail que o fabricante do equipamento que será utilizado no processo, a ROMI HYBRID indica o uso de pós atomizados com morfologia esférica (sem arestas), com granulometria: 45-153 um (micrômetros).

4. Esse material sugerido tem pronta entrega aqui no Brasil? Sim, se ele atender as especificações necessárias para deposição o prazo de entrega é imediato, só precisa definir a quantidade necessária que é possível retirá-lo de imediato.

5. Qual é o prazo do recebimento de material importado? Em torno de 20 a 40 dias.

6. Quais são as características e composição química desse aço? O Carlos vai enviar por e-mail os catálogos desse materiais.

Observações:

1- Foi feita uma breve apresentação ao Carlos sobre o Baquelite, suas características, os danos causados no molde no processo de injeção e quais são os objetivos do projeto em relação ao material que está sendo buscado para aumentar a vida útil do molde.

2- A partir dessas informações o Carlos sugeriu alguns materiais com características de alta dureza e resistência ao desgaste por atrito que podem atender as necessidades do projeto.

3- A partir da avaliação da geometria e granulometria do material serão providenciados os trmites para a compra de uma amostra para testes de deposição e de propriedades mecânicas.

4- A Júlia vai verificar com o Prof. Reginaldo e a Juliana sobre os trmites para a aquisição desse material.

5- A empresa HOGANAS não respondeu a solicitação da Júlia até esta data.

6- Foram definidas algumas etapas do projeto conforme quadro abaixo com os responsáveis.

APÊNDICE 8

Questão de pesquisa: Como aplicar a manufatura híbrida de metais na fabricação de moldes na indústria ferramenteira?

Objetivo Geral

Pesquisar como a Manufatura Aditiva Híbrida de Metais pode contribuir, na fabricação de moldes para injeção de termofixos, proporcionando melhoria no desempenho da vida útil com relação ao desgaste.

Participantes Grupo Focal

Pesquisadores

Júlia Fornaziero de Almeida: julia.f.almeida@usp.br
 Johan Sebastian Grass Nuñez: jgrassn@usp.br
 Vincent E. Wong: vwong@ufs.br
 Fábio Mariane: mariane.fabio@usp.br

Observador

Alexandre Formigoni: a_formigoni@yahoo.com.br

Moderador

Marco Aurélio Ferretti: marco.a.ferretti@gmail.com

Data: 13/06/2023

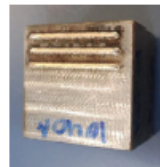
Horário início: 17h45

Horário término: 18h30

Local: Reunião online plataforma Google Meet

Assuntos abordados:

- 1- Material da HOGANAS ainda não foi entregue, Júlia vai entrar em contato para verificar o processo de logística.
- 2- Início dos testes de Deposição com material da Oerlikon começou em 13/06/23 (Johan)



3- Será feito Deposição nas amostras de aço H13 e SAE1045 (Sem Tratamento Térmico) fornecido pela Baquellites (Johan)

4- Será feito o teste metalográfico para avaliar o resultado da deposição até 16/06/23 (Johan).

5- A partir dos resultados desses testes, será avaliada a possibilidade da deposição dos materiais da OERLIKON na cavidade do molde e verificado se haverá necessidade de aquisição de uma quantidade ou se a amostra será suficiente.

6- O postigo definitivo será enviado sem tratamento térmico, que será feito posteriormente à deposição de acordo com a curva de temperatura e tempo fornecida pelo Fábio.

7- Será feito tratamento térmico nas amostras com Deposição para testes metalográficos e teste de dureza (Fábio).

8- Enviar amostra para Rosinei fazer testes de corrosão (em meio de cloreto)

9- Vicent está providenciando haste para equipamento do Teste de atrito nas placas enviadas pela Baquellites

10- Após os testes de atrito será feito teste de desgaste do pino disco pelo Fábio até a última semana de junho.

11- Johan vai fazer a Deposição materiais da OERLIKON e HOGANAS, nas placas para o Fábio fazer os testes de coeficiente de atrito dinâmico para serem comparados com os testes das placas enviadas pela Baquellites.

12- Foi combinado de os participantes do projeto entrar no FMEA que está no Drive e avaliar os possíveis ajustes.

13- Marco vai conversar com o Danilo sobre os critérios para autorização de imagens e informações para publicação de artigos.

14- Artigos:

- Caracterização das camadas produzidas pelos materiais da Oerlikon.

- Testes de desgaste, dureza,... O que for feito no projeto.
- Aplicação de Manufatura Aditiva na linha de fechamento de moldes - Publicação internacional (Verificar com Danilo o que podemos publicar)

15- Inicialmente esses dois, porém terá a publicação de doutorado da Júlia que vai alinhar melhor quando tiver avançado mais o projeto.

16- Prof. Formigoni, junto com o Prof. Rosinei, vão apresentar uma proposta reformulada do texto do Termo de Cooperação das Universidades, Júlia vai intermediar os ajustes sendo a interlocutora com o Prof. Reginaldo.

17- Foram definidas algumas etapas do projeto conforme quadro abaixo com os responsáveis:

Descrição	Responsável	Prazo	Obs.:
Compra dos materiais M2 da HOGANAS.	Prof Reginaldo/ Juliana	10/06/2023	Em andamento, ainda não chegou
Testes com materiais OERLIKON	Johan	13/06/2023	Depositar nas amostras de aço H13 e SAE 1045 para testes de tratamento térmico.
Deposição nos discos pi testes atrito	Johan/ Vicent	22/06/2023	Materiais da Oerlikon
Testes de coeficiente de atrito Teste de desgaste dinâmico	Fábio/ Juliana/Vicent	19 a 23/06/2023	Elasular testes nos materiais fornecido pelo Fábio e PVD fornecidos pela Baquellites
Testes metalográficos e dureza	Johan	15 a 16/06/2023	Corpo de prova com DED nos aços H13 e SAE 1045
Testes de corrosão	Fábio/Prof Rosinei	Após os testes de atrito	Prof. Rosinei vai usar o laboratório da USP Lorena
Reuniões semanais às terças feiras para acompanhamento do desenvolvimento do cronograma.	Júlia		
Acordo de cooperação	Prof Reginaldo / Prof Formigoni e Prof. Rosinei	A definir	Reunião via Meet

APÊNDICE 9

Questão de pesquisa: Como aplicar a manufatura híbrida de metais na fabricação de moldes na indústria ferramenteira?

Objetivo Geral

Pesquisar como a Manufatura Aditiva Híbrida de Metais pode aprimorar a fabricação de moldes para injeção de termofixos, proporcionando melhoria no desempenho da vida útil com relação ao desgaste.

Participantes Grupo Focal

Pesquisadores

Júlia Fomaziero de Almeida: julia.f.almeida@uiso.br

Johann Sebastian Grass Nuñez: jsgrassn@uiso.br

Vincent E. Wong: vwong@ufs.br

Observador

Alexandre Formigoni: a.formigoni@vivo.com.br

Moderador

Marco Aurélio Ferretti: marco.a.ferretti@gmail.com

Data: 17 à 19/07/2023

Horário início: 11h00

Horário término: 18h30

Local: Testes Deposição LAPRAS

Assuntos abordados:

- Foram feitos testes de deposição do aço M2 HOGANAS no substrato de aço H13, sem tratamento térmico.

Parâmetros:

P= 750W

m= 5,48 g/min

V= 400 mm/min

Teste de Deposição A1 x, y 0,9 (Com tempo de espera entre camadas - 100s)

z= 1
z= 1,6
z= 2,3
z= 2,85
z= 3,7

Média: 0,74

Teste de micro dureza das amostras de A2

Amostra A2 (Com tempo de espera entre camadas - 100s)



- No primeiro cordão a dureza resultou em 58,3 HBRC
- Segunda cordão no primeiro cordão 62 HBRC
- Terceira cordão no primeiro cordão 59,5 HBRC
- No topo da deposição - 60 HBRC

Figura 4

Teste de Deposição A3 x, y 0,8 (Com tempo de espera entre camadas - 100s)

z= 0,8
z= 1,6
z= 2,5
z= 3,3
z= 3,9

Média: 0,78



Figura 5



COM TEMPO DE ESPERA 100S ENTRE CAMADA

Figura 1

Teste de micro dureza das amostras de A1

Amostra A1 (Com tempo de espera entre camadas - 100s)



- No primeiro cordão a dureza resultou em 55 HBRC
- No topo da deposição - 62,5 HBRC

Figura 2

Teste de Deposição A2 x, y 1,0 (Com tempo de espera entre camadas - 100s)

z= 0,8
z= 1,35
z= 2,1
z= 2,7
z= 3,5

Média: 0,70



COM TEMPO DE ESPERA 100S ENTRE CAMADAS

Figura 3

Teste de micro dureza das amostras de A3

Amostra A3 (Caso tempo de espera entre camadas = 10h) Amostra A3 (Sem tempo de espera entre camadas)



- No gráfico existe a linha vermelha em 60,2 HRC
- No gráfico existe a linha vermelha em 62,4 HRC
- No tipo de deposição = 69 HRC
- Segunda medida no tipo 69 HRC
- No gráfico existe a linha vermelha em 62,4 HRC
- No tipo de deposição = 62,8 HRC

Figura 6

Obs.: Devido a deformação da planicidade na face de medição, o resultado análise de dureza não foi confiável, portanto, essa amostra A3 não considerada como opção no processo decisório da estratégia para a Deposição.

Teste de Deposição D x, y, 1.1 (Com varredura de laser entre camadas)

- 1º layer z= 0,9
- 2º layer laser
- 3º layer z= 1,35
- 4º layer laser
- 5º layer z= 2,0
- 6º layer laser

Média: 0,66

Teste de micro dureza da amostra de D



- No ZTA a dureza foi de 17 HRC
- Média do substrato sem tratamento térmico
- No primeiro corte a dureza resultou em 61,8 (65 HRC)
- No tipo de deposição = 63 HRC

Figura 7

Teste de Solda TIG com vareta de aço H-13 amostra S

Teste de micro dureza da amostra de S



- Solda TIG realizado com H 13
- A dureza do cordão de solda 51,5 HRC
- Dureza de tratamento térmico do H13 em média 52,54 HRC

Figura 8

2- Após a análise dos dados coletados nas medições de dureza, optou-se pela estratégia de Deposição nos postigos conforme o teste A1, com o objetivo de se obter maior dureza na superfície (62 HRC), sem redução da dureza na interface com o substrato (55 HRC).



3- Peso dos postigos (Sem Deposição):

- Parte Fixa: 40,75 kg
- Parte Móvel: 39,70 kg

4- Foram definidas algumas etapas do projeto conforme quadro abaixo com os responsáveis:

Descrição	Responsáveis	Prazo	Obs.
Compra dos materiais M4 da HOGANAS.	Prof. Reginaldo/ Juliana	07/2023	Aguardando a compra
Testes com metalografia e microestrutura amostras M2	Vicent	31/07 a 04/08/2023	
Deposição matéria M2 nos discos p/ testes a frio	Johani Vicent	31/07 a 04/08/2023	Material da HOGANAS.
Limpa tração de estera p/ teste de desgaste	Vicent/ Marco	24/07/2023	Ok
Testes de coeficiente de atrito Teste de desgaste dinâmico	Fábio/ Juliana Vicent	31/07 a 04/08/2023	Executar testes nos materiais com tratamento térmico realizados pela Esquelites.
Testes de corrosão	Fábio/ Prof. Rosinei	Após os testes de atrito	Prof. Rosinei vai usar o laboratório da USP Lorena
Usinagem, ajustes e montagem do molde da Alça A025	Danielo	31/07 a 04/08/2023	
Escaneamento das cavidades recuperadas	Prof. Formigoni/ Prof. Rosinei	07/08 a 09/08/2023	Escaneamento será feito no laboratório do SENAI Ipiranga
Teste de validação com molde em produção BAQUELITES	Danielo	10/08 a 10/10/2023	Acompanhamento do número de ciclos na produção e comparação com as cavidades recuperadas com solda
Reuniões semanais as terças feiras para acompanhamento do desenvolvimento do cronograma.	Julia		
Acordo de cooperação	Prof. Reginaldo / Prof. Formigoni e Prof. Rosinei	A definir	Reunião via Meet

APÊNDICE 10

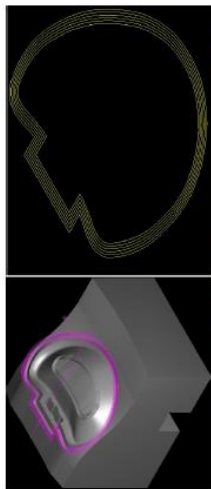


Figura 1 – Trajetória da Deposição na região externa da Matríz

- a. Foi criada de curva de borda nos cantos das superfícies dos alojamentos;
- b. Utilizando o recurso "Afastar contorno", as curvas de borda foram copiadas com espaçamento lateral de 0,8mm;
- c. O conjunto de contornos foi transladado para a superfície do fundo do alojamento para geração do trajeto da camada 1;
- d. Sucessivamente os contornos foram copiados 3 vezes no eixo Z+ com espaçamento de 0,7mm para geração das camadas 2, 3 e 4;
- e. Foi utilizado o recurso "Usinagem de contorno", os contornos foram encadeados individualmente para a geração trajeto nos eixos X, Y e Z;
- f. Após o pós-processamento para converter os trajetos em coordenadas cartesianas, os programas foram gerados camada a camada.

Questão de pesquisa: Como aplicar a manufatura híbrida de metais na fabricação de moldes na indústria ferramenteira?

Objetivo Geral

Pesquisar como a Manufatura Aditiva Híbrida de Metais pode aprimorar a fabricação de moldes para injeção de termofixos, proporcionando melhoria no desempenho da vida útil com relação ao desgaste.

Participantes Grupo Focal

Pesquisadores

Júlia Formaziero de Almeida: julia.f.almeida@usp.br

Johan Sebastian Grass Nuñez: jsgrassn@usp.br

Vincent E. Wong: vwong@ufs.com

Reginaldo Teixeira Coelho: rtcoelho@sc.usp.br

Observador

Alexandre Formigoni: a_formigoni@yahoo.com.br

Moderador

Marco Aurélio Ferrotti: marco.a.ferrotti@gmail.com

Data: 25 à 27/07/2023

Horário início: 8h00

Horário término: 12h30

Local: LAPRAS

Assuntos abordados:

- 1- Devido a geometria do rebaixo a ser reparado e pelas condições de dinâmica de máquina, foi usada uma estratégia de deposição de perímetro, começando de fora para dentro, com uma sobreposição de 40%.
- 2- Na ausência de um software específico para gerar o programa para DED, que normalmente utiliza malhas refinadas de arquivos STL para a geração das trajetórias de deposição, foi utilizado um software CAM para geração de programas de usinagem CNC.
- 3- A programação CAM para a Deposição foi gerada utilizando o software MasterCAM, utilizando recursos de programação de usinagem CNC seguindo os seguintes passos:

- a. Foi criada de curva de borda nos cantos das superfícies dos alojamentos;
- b. Utilizando o recurso "Afastar contorno", as curvas de borda foram copiadas com espaçamento lateral de 0,8mm;
- c. O conjunto de contornos foi transladado para a superfície do fundo do alojamento para geração do trajeto da camada 1;
- d. Sucessivamente os contornos foram copiados 3 vezes no eixo Z+ com espaçamento de 0,7mm para geração das camadas 2, 3 e 4;
- e. Foi utilizado o recurso "Usinagem de contorno", os contornos foram encadeados individualmente para a geração trajeto nos eixos X, Y e Z;
- f. Após o pós-processamento para converter os trajetos em coordenadas cartesianas, os programas foram gerados camada a camada.

- 4- Deposição do aço M2 HÖGANÁS no substrato H-13 tratado térmicamente com dureza 52/54 HRC.

Parâmetros:

P= 750W

m= 5,3 g/min

V= 400 mm/min

A = 10mm (altura de deposição)

- 5- Trajetória da Deposição na região externa na Matríz (Figura 1).

Nº Camadas = 4

Z = 0,7mm

X, Y = 6 linhas, espaçamento 0,9 mm

Sentido Sobreposição = Linha de contorno, da parte externa para interna

- 6- Deposição na região externa na Matríz em 04 cavidades (Figura 2 e Figura 3).

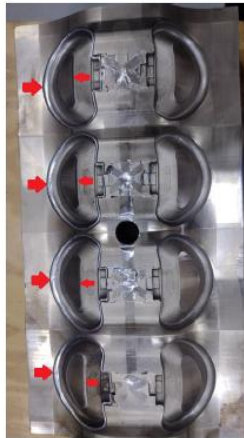


Figura 2 – Matríz com alojamento para Deposição



Figura 3 – Deposição região externa da Matríz

Continua

- Tempo total = 13' 55" /cavidade
 Tempo de Deposição = 13' 40" /cavidade
 Volume material depositado = 72,5g /cavidade
- 7- Devido a geometria irregular no rebaixo a ser reparado, a saída do bocal de deposição fica muito perto da superfície de deposição, proporcionando risco de as partículas de pó entrarem no bocal e grudar na lente protetora do laser, provocando destacamento nas camadas depositadas.
 - 8- Foi observada uma trinca na deposição da região externa na Matriz em uma cavidade, gerada em função da queima na lente do laser ocasionada pelo respingo de alguma partícula do material quente (Figura 4 e Figura 5).
 - 9- A lente teve de ser trocada, e para evitar o problema do respingo, foi aumentada a vazão de gás no nozzle, assim a velocidade de saída do gás consegue repelir o pó que tenta entrar no canal do nozzle.
 - 10- A região da trinca foi removida utilizando uma retífica manual com ponta montada, e feito um reparo de sobreposição para recuperação da região afetada.
 - 11- Início da deposição na região interna da Matriz, trajetória de Deposição:
 N° Camadas = 4
 Z = 0,7mm
 X, Y = 5 linhas, espaçamento 0,8 mm
 Sentido Sobreposição = Linha de contorno, da parte interna para externa
 - 12- Na deposição da primeira cavidade, observou-se falta de deposição no trajeto do processo (Figura 6).
 - 13- Esse problema pode ser associado pelo fato de que as coordenadas foram obtidas por meio de um programa para usinagem e a "Tesselation" entre os programas de Usinagem e AM é diferente, além de que, na literatura existe a recomendação de refinar as malhas dos arquivos STL para a geração das trajetórias de deposição.
 - 14- Outra possibilidade pode ser atribuída a um problema do software utilizado. Um dos exemplos é a qualidade da "Tesselation" de um STL gerado por software diferente. Neste caso, o programa foi gerado no software que utiliza superfícies convertidas de arquivos com extensão IGES.
 - 15- Foram feitos vários experimentos com trajetórias diferentes, aumentando o número de linhas, expandindo para a parte de fora do alojamento de deposição.
 - 16- Foi feito um desbaste na região removendo os excessos com uma retífica manual para deposição com uma nova trajetória.
 - 17- A trajetória (Figura 7) que apresentou o melhor resultado está citada abaixo:
 N° Camadas = 4
 Z = 0,7mm
 X, Y = 7 linhas, espaçamento 0,5 mm
 Sentido Sobreposição = Linha de contorno, da parte externa para interna

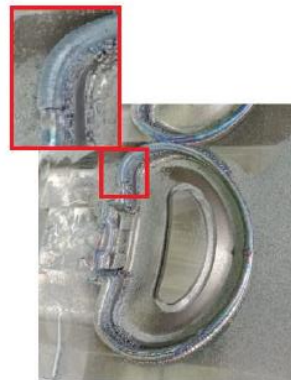


Figura 4 – Deposição com trinca



Figura 5 – Região queima identificada na lente



Figura 6 – Falta na deposição da região interna da Matriz

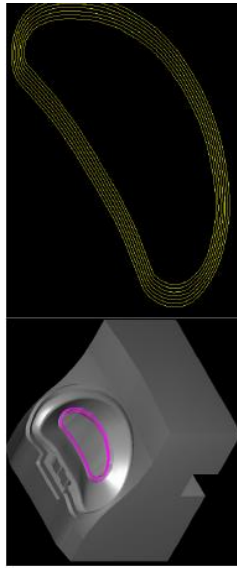


Figura 7 – Trajetória da Deposição na região interna da Matriz



Figura 8 – Deposição na região interna da Matriz

- 18- O resultado da deposição está representado na Figura 8.

Tempo total = 7' 41" /cavidade
 Tempo de Deposição = 7' 26" /cavidade
 Volume material depositado = 39,3g /cavidade

19- Foi concluída a Deposição nas cavidades da Matriz, conforme Figura 9.



Figura 9 – Matriz concluída com deposição nas cavidades

20- O processo de Deposição no Macho iniciou pela região externa, com trajetória de Deposição conforme Figura 10.

Nº Camadas = 4
 Z = 0,7mm

X, Y = 5 linhas, espaçamento 0,8 mm

Sentido Sobreposição = Linha de contorno da parte externa para interna

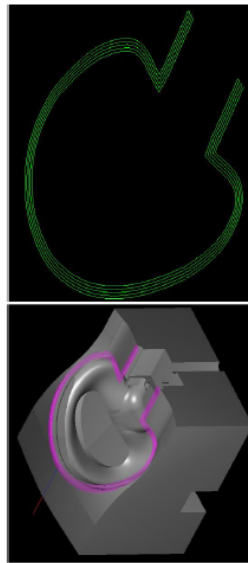


Figura 10 – Trajetória da Deposição na região externa do Macho

21- Foi feito de forma intercalada e não sequencial entre as cavidades, com intervalo de tempo entre 15 a 20min para evitar a trinca provocada pela concentração de calor no M2. (Figura 11).



Figura 11 – Deposição na região externa Macho

Tempo total = 13' 40" /cavidade
 Tempo de Deposição = 13' 25" /cavidade
 Volume material depositado = 68,9g /cavidade

22- O processo de Deposição no Macho na região interna utilizou-se trajetória em linha reta, Zig-Zag, a 0°, com sequência de baixo para cima, para garantir que os cordões fossem depositados um sobre o outro e assim, evitar falhas de fusão na deposição, conforme Figura 12.

Nº Camadas = 5

Z = 0,7mm

X, Y = 29 linhas, espaçamento 0,5 mm

Sentido Sobreposição = Linear, Zig-Zag, 0°, de baixo para cima

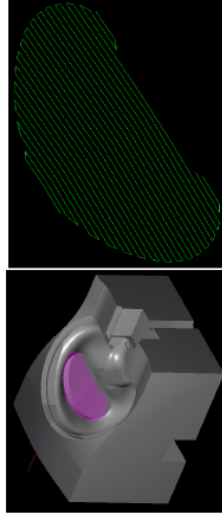


Figura 12 – Trajetória da Deposição na região interna do Macho

23- Foi feita a Deposição com intervalo de tempo e de forma intercalada da mesma forma da estratégia utilizada na região externa (Figura 13).



Figura 13 – Deposição na região interna Macho

Tempo total = 17' 50" /cavidade
 Tempo de Deposição = 17' 35" /cavidade
 Volume material depositado = 90,2g /cavidade

g. As deposições em linha, Zig-Zag a 0°, são as que demonstraram melhor resultado, portanto, é necessário se avaliar a região para criar uma geometria mais favorável para trajetos lineares;

30- Foram definidas algumas etapas do projeto conforme quadro abaixo com os responsáveis:

Descrição	Responsáveis	Prazo	Obs.:
Material M4 da HOGANÁS.	Prof. Reginaldo/ Juliana	07/2023	Recebido em 27/07/2023
Testes com metalografia e microestrutura amostras M2.	V/cent	31/07 à 04/08/2023	Ok, falta Vincent postar as imagens
Deposição matéria M2 nos discos p/ testes atrito	Johan/Vicent	31/07 à 04/08/2023	Material da HOGANÁS.
Testes de coeficiente de atrito Teste de desgaste dinâmico	Fábio/ Júlia/Vicent	31/07 a 04/08/2023	Executar testes nos materiais com tratamento térmico e PVD fornecidos pela BAQUELLITES.
Testes de corrosão	Fábio/Prof. Rosinei	Após os testes de atrito	Prof. Rosinei vai usar o laboratório da USP Lorena
Tratamento térmico, testes de dureza e metalografia amostras com Deposição M2 X H-13.	Fábio	A definir	Tratar termicamente as amostras de H-13 com deposição M2 para verificar a dureza e a microestrutura após o tratamento.
Usinagem, ajustes e montagem do molde da Alça A025	Danilo	31/07 a 11/08/2023	Postos já estão da ferramenta da BAQUELLITES
Escaneamento das cavidades recuperadas	Prof. Formigon/ Prof. Rosinei	14/08 a 15/08/2023	Escaneamento será feito no laboratório do SENAI Jorirana.
Teste de validação com molde em produção BAQUELLITES	Danilo	20/08 à 10/10/2023	Acompanhamento do número de ciclos na produção e comparação com as cavidades recuperadas com solda
Testes Deposição material M4 HOGANÁS.	Johan	A definir	Fazer testes com substrato de aços H-13 e SAE 1045
Reuniões semanais às terças feiras para acompanhamento do desenvolvimento do cronograma.	Júlia		
A cordo de cooperação	Prof. Reginaldo / Prof. Formigon e Prof. Rosinei	Á definir	Reunião via Meet

28- Imagens dos desgastes na linha de fechamento verificados nas cavidades antes da recuperação (Figura 15):

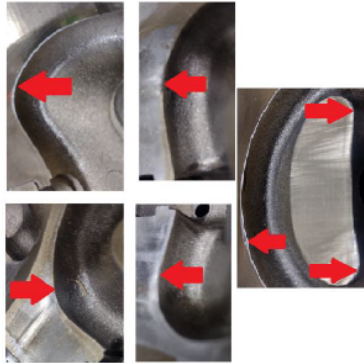


Figura 15 – Desgastes na linha de fechamento das cavidades

29- Observações feitas durante o processo de Deposição:

- Uma das barreiras observadas de grande relevância refere-se à carência de software específicos para DED. Embora seja possível utilizar software voltados para usinagem, o processo é complexo e requer alguns improvisos que exigem um nível elevado de conhecimento do programador para gerar os trajetos.
- Sobreposições em regiões já depositadas ocasionam trincas e deslocamento, assim como a concentração de calor.
- Aproximação do bocal na superfície de trajeto causam defeitos na lente do laser que prejudicam a fusão e provocam trincas na Deposição;
- A inclinação do cabeçote do laser requer compensação de 0,7mm na origem do eixo X;
- Deposição em canais não são indicadas, o resultado não é muito satisfatório.
- Para se evitar a concentração de calor num determinado ponto, as deposições foram espaçadas e com intervalos de tempo 15 a 20min;

24- A Deposição do Macho foi concluída sem nenhuma intempérie (Figura 14).

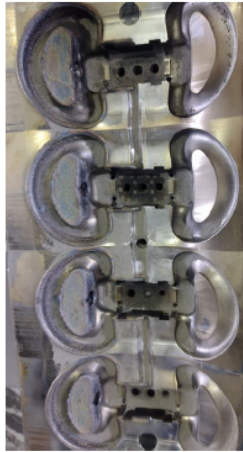


Figura 14 – Deposição completa no Macho

25- Tempo e volume da Deposição da Matriz e Macho conforme Tabela 1

Tabela de tempo (T) e volume (V) da Deposição M2 nas cavidades Matriz e Macho Alça A025

	min	s	(t) s / cav	m³ cav	Total (t) s	Total (t) h	Total (t) h	Total (t) s	Total (t) h	Total (t) s	Total (t) h	Total (t) s	Total (t) h
Matriz externo	13	55	855	4	3340	00:55:40	72,5	0,256	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174
Matriz interno	17	41	461	4	1844	01:25:44	60,3	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214
					Soma (t)	01:25:24		0,455					
Macho externo	13	40	820	4	3280	00:54:40	88,9	0,276	0,276	0,276	0,276	0,276	0,276
Macho interno	17	50	1070	4	4280	01:11:20	90,2	0,361	0,361	0,361	0,361	0,361	0,361
					Soma (t)	02:06:00		0,636					
					Soma (t) em s	05:32:24		1,072					

	Sem DED	Com DED	Peso DED	Peso DED
Peso Bruto Matriz (kg)	40,750	40,550	0,200	0,200
Peso Bruto Macho (kg)	39,700	39,500	0,200	0,200
			Total (kg)	0,400
			Óxido de Fe Depositado (kg)	0,572
			Diferença Deposição x Real (%)	62,7%


26- Macho e matriz foram entregues na ferramenta da BAQUELLITES, dia 28/07/2023, que deve começar o processo de recuperação com solda nas outras 4 cavidades e proceder o repasse de fechamento e de eletro-erosão nas cavidades.

27- Após a conclusão dos serviços de ferramentaria, macho e matriz serão escaneados e as imagens serão arquivadas. Após a verificação de indícios de desgastes durante o processo produtivo, macho e matriz serão escaneados novamente e as imagens serão comparadas para avaliação dos desgastes entre o processo de recuperação por DED e as cavidades recuperadas com solda.

APÊNDICE 11

FMEA - PROJETO DE APLICAÇÃO DED EM MOLDE DE BAQUELITE														
Funções	Modos de falha	Efeitos	Severidade (a)	Causas	Ocorrência (b)	Controles	Detecção (c)	RPN	Ações recomendadas	Status	S O D			
											5	10	15	
Quais são as entradas?	O que pode dar errado com as entradas?	Qual é o impacto no NOZ ou desgaste da peça?	Gravidade do efeito	Quais são as causas das falhas?	Frequência dos modos de falha	Como podem ser detectados (causas/modos)?	Chances de detecção	a x b x c	O que pode ser feito?	das ações	Após melhorias			
Tipos de ações	Morfologia e granulometria do grão.	Entupimento no NOZ ou desgaste da peça.	9	Grãos com arestas e granulometria de 150 µm acima.	2	Analisar a morfologia esférica no microscópio e passar os grãos na peneira granulométrica.	1	18	Verificar junto ao fornecedor o envio de amostras para verificação e validação do material.	Em andamento	9	1	1	9
	Propriedades Mecânicas	Baixa dureza e resistência ao desgaste.	8	Composição química do material inadequada para aplicação.	3	Testes de dureza e coeficiente de atrito em laboratório nos materiais depositados.	1	24	Fazer deposição em corpos de prova para validação.	Em andamento	8	2	1	16
	Geometria inadequada para 3 eixos.	Colisão do Cabeçote	9	Falha na verificação do modelo matemático CAD.	3	Software de simulação	2	64	Estudo e simulação de Geometria	Em andamento	9	2	1	18
Deposição DED	Tirica entre as camadas depositadas, ou na ZTA	Falha de aderência/posto	9	Diferença do coeficiente de atrito de fricção dos materiais.	4	Análise crítica dos parâmetros	2	72	Fazer testes de parâmetros de deposição, e analisar amostras	Implementar	9	2	1	18
	Microtrincas entre as camadas depositadas, ou na ZTA	Verificação na resistência ao desgaste	7	Diferença do coeficiente de atrito de fricção dos materiais.	4	Análise de microestrutura	2	68	Fazer testes de parâmetros de deposição, e analisar amostras	Implementar	7	2	1	14
	Falhas de geometria	Deformação da peça	7	Escolha inadequada de estratégia de deposição	4	Amostras com diferentes estratégias de deposição	2	68	Teste de deposição em postigo piloto	Implementar	7	2	1	14
Usabilidade após deposição	Dificuldade de atingir o material depositado	Quebra/desgaste de ferramenta	8	Dureza elevada do material	3	Subir a dureza real e usar ferramenta adequada	3	72	Garantir que foi medida corretamente a dureza de região depositada e utilizar ferramenta indicada	Implementar	8	2	1	16
	Área de deposição inadequada ou insuficiente	Falhas na área de deposição	7	Geometria inadequada na região de deposição	4	Análise crítica do projeto do postigo.	2	68	Teste de deposição em postigo piloto	Implementar	7	3	1	21
Testes Funcional do molde		Desgaste na linha de fechamento	8	Escolha inadequada do tipo de aço	3	Testes deposição materiais diferentes composições químicas	2	48	Fazer tratamento térmico em corpos de prova com deposição de tipos de aços diferentes e verificar a dureza.	Em andamento	8	1	1	8

APÊNDICE 12

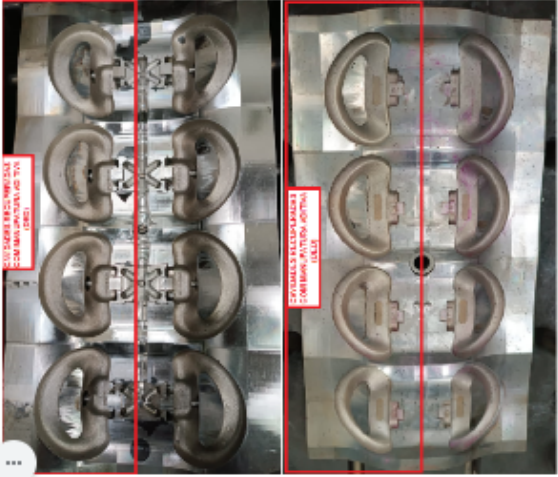
<p>Formulário de Inspeção de Avaliação - Molde Alça A025 recuperado por DED</p> <p>Este formulário tem por objetivo o acompanhamento de vida útil do molde na região de linha de fechamento durante o processo produtivo. Portanto, a precisão do seu preenchimento é de suma importância para a coleta de dados e análise comparativa do desempenho relacionado ao desgaste para a validação do projeto. A primeira injetada completa do início do processo (sem recarregos) deverá ser coletada e etiquetada devidamente identificada com a data do evento. Posteriormente a cada parada programada para avaliação as amostras também deverão ser coletadas, nas mesmas condições, com identificação do nº de ciclos e a data do evento.</p>	<p>Pressão de injeção: *</p> <p>Texto de resposta curta</p> <p>.....</p>	<p>Comente sobre os aspectos visuais do molde e das peças produzidas (Analisar e comparar o lado recuperado com solda e o lado recuperado por DED) - Indicação no Molde do lado recuperado por DED.</p>  <p>.....</p>
<p>Volume de injeção: *</p> <p>Texto de resposta curta</p> <p>.....</p>	<p>Tempo de injeção: *</p> <p>Texto de resposta curta</p> <p>.....</p>	<p>Texto de resposta longa</p> <p>.....</p>
<p>Tempo de injeção: *</p> <p>Texto de resposta curta</p> <p>.....</p>	<p>Qualidade visual das peças injetadas: *</p> <p>1 2 3 4 5</p> <p><input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/></p> <p>Totalmente Rejeitada <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Aprovada sem restrição</p>	<p>Nível de rebarbas das peças injetadas: *</p> <p>1 2 3 4 5</p> <p><input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/></p> <p>Totalmente rejeitada <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Aprovada sem restrição</p>
<p>Numero das cavidades recuperadas com Manufatura Aditiva (DED): *</p> <p><input type="radio"/> Cavidades 1, 2, 3 e 4</p> <p><input type="radio"/> Cavidades 5, 6, 7 e 8</p>	<p>Peso total da injetada completa cavidades 1, 2, 3 e 4: *</p> <p>Texto de resposta curta</p> <p>.....</p>	<p>Peso total da injetada completa cavidades 5, 6, 7 e 8: *</p> <p>Texto de resposta curta</p> <p>.....</p>
<p>Declaração de concordância da participação</p> <p><input type="checkbox"/> Declaro que entendi os objetivos de minha participação na pesquisa e concordo em participar. Registro ...</p>	<p>Responsável pela inspeção: *</p> <p>Texto de resposta curta</p> <p>.....</p>	<p>Data: *</p> <p>Mês, dia, ano</p> <p>.....</p>
<p>Responsável pela inspeção: *</p> <p>Texto de resposta curta</p> <p>.....</p>	<p>Numero de ciclos: *</p> <p>Texto de resposta curta</p> <p>.....</p>	<p>Temperatura do molde: *</p> <p>Texto de resposta curta</p> <p>.....</p>

Continua

111

Molde (Macho e Matriz) com região DED identificada

B I U ↻ 🔍



↓ Adicionar arquivo

[Ver pasta](#)

Ocorrência não prevista ou programada:
Descrever caso aconteça algo com interferência direta no decorrer do processo produtivo.
Texto de resposta curta
.....

↓ Adicionar arquivo

[Ver pasta](#)

Fotos do molde conforme imagem padrão (Macho e Matriz):

↓ Adicionar arquivo

[Ver pasta](#)

↓ Adicionar arquivo

[Ver pasta](#)

Fotos das peças injetadas (sem rebarbação):

↓ Adicionar arquivo

[Ver pasta](#)