

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Marcelo Lopes

**MANUFATURA ADITIVA APLICADA EM CINTOS DE SEGURANÇA
PARA MELHORIA NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**

Taubaté – SP

2022

Marcelo Lopes

MANUFATURA ADITIVA APLICADA EM CINTOS DE SEGURANÇA PARA MELHORIA NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Dissertação apresentada para obtenção do
Título de Mestre pelo curso de Mestrado do
Departamento de Engenharia da Universidade
de Taubaté.

Área de Concentração: Energia & Materiais

Orientador: Prof. Dr. Luis Filipe de Faria Pereira
Wiltgen Barbosa

Taubaté – SP

2022

MARCELO LOPES

**MANUFATURA ADITIVA APLICADA EM CINTOS DE SEGURANÇA PARA
MELHORIA NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo curso de Mestrado do Departamento de Engenharia da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Energia & Materiais

Data: 27 de junho de 2022

Resultado: **"APROVADO"**.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa

Presidente da Banca Examinadora e Orientador da Universidade de Taubaté

Assinatura:



Prof. Dr. José Rubens de Camargo

Membro Interno da Banca Examinadora da Universidade de Taubaté

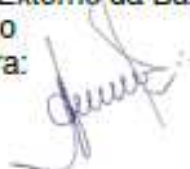
Assinatura:



Prof. Dr. Roque Antônio de Moura

Membro Externo da Banca Examinadora da Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo

Assinatura:



Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi
Universidade de Taubaté - Unitau

L864m Lopes, Marcelo
 Manufatura aditiva aplicada em cintos de segurança para melhoria na indústria automobilística / Marcelo Lopes. -- 2022.
 195 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté, Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação, Taubaté, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Manufatura aditiva. 2. Segurança veicular. 3. Simulação computacional. 4. Protótipos. 5. Moldes. I. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. Mestrado em Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD – 363.125

Ficha catalográfica elaborada por **Shirlei Righeti – CRB-8/6995**

Dedico a minha esposa Tereza, filhas Maitê e Milena e meu netinho Samuel pelo apoio ilimitado que me deram. A todos os professores da UNITAU que influenciaram na minha trajetória.

AGRADECIMENTOS

Não chegaria a presente dissertação de mestrado sem o precioso apoio de várias pessoas, em especial do meu orientador, Prof. Dr. Filipe Wiltgen, por todo seu empenho, paciência e sabedoria, com que sempre me orientou nesta pesquisa e pelo ensinamento transmitido.

Por último e não menos importante agradeço a todos os meus colegas do Mestrado em Engenharia que infelizmente devido a pandemia que vivemos não tivemos muito contato presencial ao Marcos Aurélio Alves e Jose Celso Mazarin cujo cooperação e amizade permaneceram presentes em todos os momentos.

“Não encontro defeitos. Encontro soluções. Qualquer um sabe queixar-se.”

Henry Ford

RESUMO

O desenvolvimento de um produto de segurança veicular do tipo cinto de segurança deve atender diferentes e severos padrões para cada fase do projeto, desde a definição de requisitos básicos e específicos, construção de protótipos de cada fase, análise de funcionamento e montagens até a realização de ensaios para testes. A competitividade na indústria automobilística mundial, tem estimulado o desenvolvimento e a utilização de novas técnicas as quais ainda estão em consolidação e adaptação na indústria o que permite a pesquisa científica aplicada ser inovadora neste seguimento. Nesse sentido, o objetivo dessa pesquisa de mestrado visa apresentar a aplicação de manufatura aditiva no projeto e teste de um sistema de segurança veicular do tipo cinto de segurança na indústria automotiva para tornar o processo mais ágil e eficiente que as metodologias atuais. É explorada a tecnologia de manufatura aditiva disponível atualmente, com suas características contemplando os tipos de matérias-primas, técnicas, propriedades destinadas a construção das peças, assim como a própria fabricação. É discutido um estudo de caso relacionado a elaboração de uma peça para uso em um molde mecânico híbrido via simulação computacional do molde para avaliação dos respectivos parâmetros aplicados na manufatura formativa para produzir peças industriais injetadas. As perspectivas da utilização da MA no desenvolvimento de sistemas veiculares de cintos de segurança são promissoras e são apresentados no decorrer desta pesquisa. Os resultados positivos em produzir pequenos lotes de peças com o uso moldes mecânicos híbridos que utilizam MA com tecnologia de jateamento de materiais permitem observar que o amadurecimento em técnicas, máquinas e materiais da manufatura aditiva, devem revolucionar o desenvolvimento de produtos na indústria de segurança veicular permitindo muitos avanços na indústria mundial com a possibilidade de inovação de novos produtos.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, Moldes, Protótipos, Simulação Computacional, Segurança Veicular.

ABSTRACT

The development of a vehicle safety product must meet different and strict standards for each phase of the project, from the definition of basic and specific requirements, construction of prototypes for each phase, analysis of operation and assemblies to carrying out tests for validation. Competitiveness in the world automobile industry has stimulated development and use of new techniques which are still being consolidated and adapted in industry, which allows applied scientific research to be innovative in this area. In this sense, objective of this master's research aims to present application of different additive manufacturing technologies to design and test a vehicle safety system in a more agile and efficient way than current methodologies. The additive manufacturing technology currently available is explored, with its characteristics contemplating the types of raw materials, techniques, properties for construction parts, as well as manufacture itself. A case study related to elaboration of a part for use in a hybrid mechanical mold via computer simulation mold to evaluate respective parameters applied in formative manufacturing to produce injected industrial parts is discussed. Prospects are promising and are presented throughout this research. The results analyzed allow us to observe that maturation in additive manufacturing techniques, machines and materials should revolutionize development of products in vehicle safety industry, allowing for many advances in world industry over near future.

Keywords: Additive Manufacturing, Molds; Prototype, Computer Simulation, Vehicle Safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático das fases de desenvolvimento desta dissertação de mestrado.	25
Figura 2 - Processos de Manufatura (Subtrativa, Formativa, Aditiva e Combinada). 29	
Figura 3 - Otimização na topologia da peça com redução de 58% da massa.	31
Figura 4 - Degraus gerados devido a espessura de camada e geometria.	32
Figura 5 - Fluxo do processo de MA.	32
Figura 6- Estado físico e formato da Matéria-prima para as categorias de MA.	36
Figura 7 - Técnica de Jateamento de Material para fabricação em 3D.	37
Figura 8 - Esquema do processo FDM.	39
Figura 9 - Esquema representativo dos filamentos cilíndricos e dos vazios, inerentes do processo de FDM.	39
Figura 10- Esquema do processo DMSL.	41
Figura 11 - Deslocamento do condutor do veículo em colisão frontal a ~50km/h.	45
Figura 12 - Uso do cinto de segurança do tipo 3 pontos.	46
Figura 13 - Utilização do cinto de segurança do tipo diagonal dois pontos.	47
Figura 14 - utilização do cinto de segurança do tipo dois pontos ou pélvico.	47
Figura 15 - Subsistemas que compõem um cinto de segurança de 3 pontos.	50
Figura 16 - Pré-tensionadores que aumentam a eficiência do cinto de segurança. ...	51
Figura 17 - Gráfico de força aplicada no tórax em retratores com e sem limitador de carga.	52
Figura 18 - Fases do Desenvolvimento de um sistema de segurança veicular.	53
Figura 19 - Fluxograma do processo de desenvolvimento de protótipos.	57
Figura 20- Projeto desenhado em CAD (A) e o protótipo construído via MA (B).	58
Figura 21 - Principais componentes de um molde de injeção de duas cavidades. ...	61
Figura 22 - Fluxo para projetar e construir o molde mecânico.	63
Figura 23 - Figura em corte de uma máquina injetora.	66
Figura 24 - Principais parâmetros no processo de fabricação de polímeros.	66
Figura 25 - Tempos em percentual de cada uma das etapas de um ciclo de injeção.	67
Figura 26- Conceito de fabricação de um molde mecânico do tipo híbrido.	70

Figura 27 - Canais de refrigeração conformados construídos com MA.	71
Figura 28 - Simulação de temperatura em canais de refrigeração conformado.....	74
Figura 29 - Canais de refrigeração em série e paralelo.....	75
Figura 30- Ilustração de um escoamento laminar (esquerda) e turbulento (direita). .	76
Figura 31 - Fluxo de tempo para produzir uma única iteração.....	77
Figura 32 - Fluxo de construção de matrizes para moldes mecânicos híbridos via manufatura aditiva.....	78
Figura 33 - Angulo de saída para facilitar a extração da peça.....	80
Figura 34 - Modelo V do projeto do molde mecânico para o Estudo de Caso.	82
Figura 35 - Detalhe da peça do estudo de caso (Tampa do fecho).	82
Figura 36- Requisitos da Tampa do fecho.....	83
Figura 37 - Análise crítica da geometria da peça em estudo.	84
Figura 38 - Efeito da temperatura sobre a pressão.	85
Figura 39 - Orientação para a fabricação nas matrizes híbridas.	86
Figura 40 - Ilustração do molde mecânico híbrido montado em corte.	87
Figura 41 – Cavidades moldantes de resina alojada no porta-postiço de aço.	89
Figura 42 - Ponto de injeção e canais de refrigeração para circulação de água fria.	90
Figura 43 – Gráfico do ciclo de manufatura formativa com as fases do processo. ...	91
Figura 44 - (A) análise da uniformidade da espessura e (B) detalhe da peça.	92
Figura 45 - Análise de preenchimento da peça.	94
Figura 46- Regiões para a saída de ar estão mostradas com setas vermelhas.	95
Figura 47 - Simulação da pressão de injeção nas áreas da peça durante o ciclo de injeção.	95
Figura 48 - Simulação da temperatura de injeção nas áreas da peça durante o ciclo de injeção.	96
Figura 49 - Deformação na região da matriz apresentado nas simulações.	96
Figura 50 - Inserto (postiço de aço) inserido na matriz em resina no local da falha das torres.....	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Características de Manufatura Aditiva e suas técnicas (Norma ISO/ASTM 52900).....	35
Quadro 2- Vantagens e limitações do processo de FDM.	40
Quadro 3 - Vantagens e limitações do processo DMLS para construção de moldes.	42
Quadro 4 - Classificação dos polímeros por grau de dificuldade de processamento.	78
Quadro 5 - Dados técnicos do polímero polipropileno.	85
Quadro 6 - Propriedades físicas do Digital ABS aplicado no molde mecânico híbrido.	86
Quadro 7- Dados do polímero disponível na biblioteca de materiais do programa de simulação.....	93

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Distribuição das referências bibliográficas ao longo do tempo.....	26
Gráfico 2- Distribuição das referências bibliográficas referente ao tipo de documento.	26
Gráfico 3 - Distribuição das referências bibliográficas por área de conhecimento. ...	27

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	<i>Anti-lock Braking System</i>
ABS	<i>Acrilonitrila Butadieno Estireno</i>
APQP	Planejamento Avançado da Qualidade do Produto
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BJ	<i>Binder Jetting</i> - Jateamento De Aglutinante
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i> - Sinterização Direta de Metal por Laser
DED	<i>Direct Energy Deposition</i> - Deposição Direta De Energia
DT&E	<i>Development Test & Evaluation</i>
EBM	<i>Electron beam melting</i> - Fusão Por Feixe Elétrico
ESR	Engenharia de Sistemas & Requisitos
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> - Modelagem por Fusão e Deposição
FFF	<i>Fused filament fabrication</i> - Fabricação com Filamento Fundido
IF	Índice de Fluidez
IJP	<i>Ink Jet Print</i> - Impressão a Jato de Tinta
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LOM	Laminated Object Manufacturing - Manufatura Laminar de Objetos
MA	Manufatura Aditiva
ME	<i>Material Extrusion</i> - Extrusão Material
MH	Manufatura Híbrida
MJ	<i>Material Jetting</i> - Jateamento De Material
NPJ	<i>Nano Particle Jetting</i> – Jato de Nano Partículas
ONU	Organização das Nações Unidas
OT&E	<i>Operational Test & Evaluation</i>
PA	Poliamida
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i> - Fusão de Lâminas de Pó
PC	Polycarbonato
PLA	Ácido Polilático
PP	Polipropileno
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
RM	<i>Rapid Manufacturing</i> – Manufatura Rápida

RP	<i>Rapid Prototyping – Prototipagem Rápida</i>
RT	<i>Rapid Tooling - Ferramental Rápido</i>
RTD&E	<i>Research, Development, Testing, and Evaluation</i>
SFF	<i>Solid Freeform Fabrication - Fabricação de forma livre</i>
SL	<i>Sheet lamination - Laminação de Folha</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting - Fusão A Laser Seletiva</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering - Sinterização Seletiva a Laser</i>
STL	<i>Stereolithography</i>
TRL	<i>Technology Readiness Level</i>
UV	Ultravioleta
VP	Vat Photopolymerization - Fotopolimerização em Tinta
WHO	World Health Organization – Organização Mundial da Saúde

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivo Geral da Pesquisa.....	20
1.2 Motivação e Justificativa	21
1.3 Delimitação da Pesquisa.....	21
1.4 Estrutura e Organização da Dissertação	22
1.5 Metodologia Aplicada.....	23
1.6 Levantamento e Estudo Bibliográfico	25
1.7 Artigos e Congressos.....	27
2 MANUFATURA ADITIVA - TECNOLOGIA EM CONSTANTE EVOLUÇÃO	29
2.1 Processo da Manufatura Aditiva.....	32
2.2 Nomenclatura e Categoria da Manufatura Aditiva	34
2.3 Jateamento de Material (JM).....	36
2.4 Extrusão de Material (EM).....	37
2.5 Fusão em Leito de Pó (FLP ou PBF).....	40
3 SISTEMAS DO TIPO CINTO DE SEGURANÇA	44
3.1 Tipos de Cintos de Segurança	46
3.2 Projeto e Requisitos de Cintos de Segurança de Três Pontos	48
4 DESENVOLVIMENTO DE CINTOS DE SEGURANÇA COM MANUFATURA ADITIVA.....	53
4.1 Fases de Desenvolvimento de Sistemas de Segurança Veicular	53
4.2 Construção de Protótipos de Desenvolvimento Técnico	54
5 MOLDES MECÂNICOS CONSTRUÍDOS VIA MANUFATURA SUBTRATIVA... 60	
5.1 Fluxo de Construção de Moldes Mecânicos	63

5.2	Processo de Injeção em Moldes Mecânicos.....	65
6	MOLDES MECÂNICOS HÍBRIDOS CONSTRUÍDOS VIA MANUFATURA ADITIVA E MANUFATURA SUBTRATIVA	69
6.1	Tipos de Moldes Mecânicos Híbridos.....	71
6.2	Simulação Computacional em Moldes Mecânicos.....	72
6.3	Processo de Construção de Moldes Mecânicos Híbridos.....	76
7	ESTUDO DE CASO.....	81
7.1	Projeto de Molde Mecânico Híbrido Aplicado ao Desenvolvimento de Sistema de Segurança Veicular	84
7.2	Simulação Computacional do Projeto de Molde Mecânico Híbrido.....	90
8	RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÃO	98
9	CONCLUSÃO.....	100
10	PERSPECTIVAS PARA FUTURAS PESQUISAS.....	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	APÊNDICE A.....	114
	APÊNDICE B.....	134
	APÊNDICE C.....	139
	APÊNDICE D.....	151
	APÊNDICE E.....	157
	APÊNDICE F	170

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas cinco décadas a eficácia das tecnologias de segurança veicular colaborou para salvar centenas de vida (KAHANE, 2015) a segurança no trânsito apresentou uma melhora, porém, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) a taxa de mortalidade em relação ao tamanho da população continuou constante.

Os acidentes de trânsito são responsáveis pela oitava causa de morte no mundo, alcançando a ~1,35 milhões (2016), sendo que a morte em países em desenvolvimento é cerca de três vezes maior que nos países desenvolvidos isso se deve a legislação mais severas, rodovias seguras e veículos com maiores sistemas de segurança veicular (WHO, 2018).

Diante disso a Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa (ECE) desenvolveu um conjunto de convenções sobre segurança no trânsito, incluindo os padrões de requisitos de desempenho para construção de veículos (UNECE, 2020; BICALHO; SOUZA; GOMES, 2018) para torná-los mais seguros.

Estradas mais seguras, políticas educativas e ações punitivas mais severas impostas pela legislação de trânsito para combater acidentes no trânsito causadas por velocidade excessiva, embriagues do motorista e negligência na direção, são iniciativas que colaboraram para a queda no número vítimas fatais no trânsito (ABREU; SOUZA; MATHIAS, 2018; KAHANE, 2015, WHO, 2018).

No que tange a segurança do veículo é cada vez mais evidente a importância na evolução tecnológica da segurança veicular para a prevenção de acidentes e contribuindo para reduções drástica no número de mortes e lesões graves resultantes do acidente de trânsito (KAHANE, 2015).

Sistemas de suspensão como controle eletrônico de estabilidade, freios ABS que impedem o travamento das rodas em frenagens são sistemas de segurança veicular que evitam que uma colisão aconteça ou reduza a gravidade das lesões (WHO, 2018).

Os avanços tecnológicos nos veículos automotivos devem sempre proporcionar maior segurança aos ocupantes e pedestres. Estes fatores impactam na tecnologia e na complexidade dos veículos, obrigando aos fabricantes inovarem seus novos projetos.

De acordo com a *Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA, 2020), entidade dos Estados Unidos, a utilização correta do cinto de segurança é o maior responsável

pela segurança do condutor e passageiro dos veículos (ZUCHOWSKI; JACKOWSKI, 2011; KAHANE, 2015; WILHELM; GARCIA, 2018).

O cinto de segurança é um item fundamental para a segurança dos ocupantes do veículo, se trata de um sistema de segurança passivo (sua atuação na proteção é durante e após o acidente) que tem como principal objetivo a retenção do usuário do veículo em uma desaceleração além de absorver parte da energia remanescente do impacto (ROMARO, 2005), protegendo os ocupantes, em caso de colisão, de possíveis impactos no interior do veículo, ou mesmo o arremesso para fora, além disso reduz os riscos de ferimentos na cabeça, na coluna e no pescoço.

A sua evolução técnica é fundamental para atender os requisitos impostos pelo fabricante do veículo e o *Latin NCAP*, entidade independente e sem fins lucrativos, que realiza ensaios de *crash test* com os veículos comercializados na América Latina e Caribe para classificar os níveis de segurança, e assim, servir de parâmetro de escolha por veículos mais seguros pelo consumidor final (DOMINGUES, 2016).

O processo de desenvolvimento de produtos de um sistema de segurança veicular do tipo cinto de segurança recebe uma especial atenção por itens responsáveis em salvar vidas. Seus exigentes requisitos aumentam a qualidade e robustez dos seus produtos, porém, com recurso de tempo e custo elevados.

Existem tecnologias que evoluíram e são ferramentas presentes no desenvolvimento destes itens, como no caso da simulação computacional de impacto de veículos, que tem como objetivo melhorar o desempenho na absorção de energia da estrutura do veículo (MATSUMOTO, 2010) e que auxilia nas análises dinâmicas dos acontecimentos.

Ao final destes estudos de simulação computacional, iniciam-se as fases que exigem protótipos com diferentes exigências. O desenvolvimento de um cinto de segurança é uma das fases que exigem maior demanda de tempo e de custo. O requisito que causa maior impacto é o processo de testes por ter como premissa de utilizar peças com as características idênticas ao do processo produtivo (AIAG – *Automotive Industry Action Group*, 2008).

Cintos de segurança são compostos de peças produzidas por processos de estampagem, acabamento superficiais e estruturais em metais, tecelagem e injeção de polímeros.

O caminho crítico para o desenvolvimento são as peças produzidas em polímeros que na fase final do projeto devem ser injetadas para a teste do cinto de segurança, e para isso é necessário sempre a construção de moldes de injeção.

A construção tradicional, via manufatura subtrativa, de um molde é uma construção metálica complexa, de aços especiais, canais de refrigeração internos para circulação de fluido refrigerante e dispositivos de ejeção da peça pronta, essa usinagem é toda realizada em máquinas operatrizes de alto custo e com profissionais qualificados (ALBA *et al.*, 2020; ASNAFI *et al.*, 2020; BARETA, 2007; DE BLASIO, 2007; DOMINGUES, 2015; HARADA, 2004; MARQUES *et al.*, 2015; MIRANDA, 2017).

Esta pesquisa propõe a aplicação de diferentes técnicas de Manufatura Aditiva (MA) para contribuir com esse desenvolvimento. Esta tecnologia proporciona a fabricação de peças complexas sem a necessidade de outras máquinas, com a vantagem de redução do número de etapas e processos na fabricação de um objeto e a economia de material (ALCALDE; WILTGEN, 2018; WILTGEN, 2019, WILTGEN, 2020, WILTGEN, 2021; GIORDANO; ZANCUL; RODRIGUES, 2016; LIU; SHIN, 2019; ORLOV *et al.*, 2018).

A construção do protótipo funcionais ou do meio produtivo (moldes híbridos) via MA em diferentes fases do projeto impõe uma agilidade e eficiência ao projeto. Estão presentes desde o início do desenvolvimento até seu lançamento e a sua utilização diminui as incertezas, auxilia nas mudanças de fases e valida o processo produtivo. Assim diferentes protótipos são aplicados para diferentes fases do projeto (SILVA, 2013; ALCALDE; WILTGEN, 2018, WILTGEN, 2019).

A evolução da MA produziu algumas vertentes tecnológica que foram subdivididas em sete categorias, definidas pela norma ISO/ASTM 52900, para facilitar a sua nomenclatura e padronização.

Essa variedade de tecnologias se intensifica a diferentes tipos de máquinas que possibilitam a produção de peças com melhor precisão geométrica e a aplicação de matéria-prima de resinas, cerâmicas ou metais nobres (WILTGEN, 2018; GOMES; WILTGEN, 2020; SANTANA, 2019; YAKOUTA; ELBESTAWI; VELDHUIS, 2018). Cada uma dessas tecnologias possui vantagens e desvantagens, que como em qualquer tipo de manufatura não é completa em todas as características (ABDULHAMEED *et al.*, 2019). O conhecimento de cada uma destas tecnologias é fundamental para a sua aplicação ao processo de desenvolvimento de um produto e considerando que cada fase existe diferentes requisitos (ROCHA, 2009; SILVA, 2013)

que devem ser avaliados para a aplicação da tecnologia de MA correta que satisfaça o custo e a técnica.

Embora as suas vantagens sejam muitas, existem alguns paradigmas para a aplicação desta tecnologia na indústria automotiva, devido ao termo “prototipagem rápida” utilizado no início de sua aplicação nos anos 80, para definir o processo de construção de um protótipo, porém, com o desenvolvimento da tecnologia este termo se tornou ultrapassado, afinal a tecnologia possui recursos que não se limitam apenas a esta finalidade (WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2021).

Muitas vezes o sucesso de um produto está ligado a velocidade e o custo de seu processo de desenvolvimento, é nesse fato que está a importância da abordagem desta pesquisa no uso correto da tecnologia da MA pode impactar na viabilidade comercial do projeto e na qualidade dos resultados dos ensaios realizados.

Esta dissertação irá se limitar aos estudos de um seguimento de autopeça do setor de segurança veicular, ou seja, que fornecem peças direto para uma montadora, contudo a pesquisa pode colaborar para discussões do assunto em diferentes áreas de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), bem como, metodologias de desenvolvimento para outras espécies de peças em diferentes linhas industriais.

1.1 Objetivo Geral da Pesquisa

O objetivo geral dessa pesquisa é identificar as tecnologias de MA em conjunto com a manufatura subtrativa para a produção e desenvolvimento de moldes mecânicos híbridos, a fim de agilizar o processo de desenvolvimento de produtos do setor automotivo industrial voltado para sistemas de segurança veicular, neste caso específico em cintos de segurança veiculares.

Os objetivos específicos são: aplicar MA na fabricação de moldes híbridos, realizar estudo de simulação computacional para avaliar o comportamento em injeção de polímeros (tempo, temperatura e pressão) e testar o projeto do molde híbrido para construir protótipos físicos dos produtos em cintos de segurança veiculares, identificar e analisar os resultados e realizar comparações de vantagens e desvantagens na utilização da MA.

1.2 Motivação e Justificativa

O cenário do mercado de autopeças do seguimento de segurança veicular se caracteriza pela redução do ciclo de vida de produtos, devido a evolução tecnológica e consumidores cada vez mais exigente preocupados com a segurança nos veículos. Para que a indústria se torne tecnicamente competitiva necessita desenvolver produtos em uma agilidade cada vez maior (KAHANE, 2015).

O setor de autopeças utiliza métodos tradicionais de desenvolvimento, as quais quase nunca contemplam inovação. A relevância desta pesquisa vem do fato de aplicar a inovação nos processos de transformação de peças na forma de protótipos funcionais.

A utilização de tecnologias de MA viabiliza a construção rápida de peças protótipos para a realização dos ensaios com técnicas de Engenharia de Sistemas & Requisitos (ESR), e com isso é possível acelerar o processo de desenvolvimento inventivo e alcançar mais rapidamente a maturidade tecnológica (WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021A) de peças no setor automobilístico de segurança veicular.

É neste sentido que esta pesquisa científica pretende contribuir com a indústria, uma vez que tem como uma de suas metas a redução de custo e prazo de desenvolvimento de um produto com a aplicação via a MA.

1.3 Delimitação da Pesquisa

A MA possui sete categorias tecnológicas (YAKOUTA; ELBESTAWI; VELDHUIS, 2018), nessa pesquisa as tecnologias que serão abordadas são as de Jateamento de Materiais (JM) e a Sinterização Direta a Laser de Metal (SDLM ou DMLS), pois são as mais indicadas para a construção de protótipos de moldes híbridos principal tópico desta pesquisa.

O estudo de caso desta dissertação limita-se a aplicação de MA para a construção de moldes híbridos para produzir peças protótipos de um seguimento de segurança veicular do tipo cinto de segurança, ou seja, que fornecem peças direto para uma montadora, porém, isso não impede que a pesquisa colabore para discussões do assunto em diferentes áreas de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para diferentes tipos de peças na indústria.

A tecnologia adotada no estudo de caso será o de Jateamento de Materiais (JM) com a aplicação de resina de alta resistência, sendo que a aplicação de matéria-prima

em metais é uma oportunidade para futuros estudos que poderão ser realizados posteriormente como a continuação natural desta pesquisa.

1.4 Estrutura e Organização da Dissertação

Esta dissertação de pesquisa em mestrado é dividida em dez capítulos. A seguir serão descritos o conteúdo de cada capítulo da pesquisa.

O primeiro capítulo, Capítulo 1 apresenta uma introdução do assunto da pesquisa descrevendo o objetivo da pesquisa, a motivação e as justificativas. Estabelece também, os limites da pesquisa situando o contexto em que a pesquisa foi aplicada. Apresenta a base do referencial bibliográfico, distribuído por tipos de referências bibliográficas utilizadas ao longo do tempo e por área de conhecimento.

No Capítulo 2 apresenta um entendimento aprofundado a respeito das técnicas de manufatura aditiva com suas características, tipos de matérias-primas, técnicas, propriedades disponíveis. É exibido de forma detalhada o fluxo de processo da produção de uma peça via manufatura aditiva. Fornecendo uma visão clara das tecnologias aplicadas e fornece conhecimento às referências feitas ao longo da pesquisa.

No Capítulo 3 apresenta as tecnologias aplicadas em sistemas de segurança veicular do tipo de cinto de segurança e os padrões de requisitos e de ensaios exigidos em uma homologação governamental (ABNT NBR 7337, 2014). Embora não haja a preocupação de aprofundar todos os requisitos de cintos de segurança, são mostrados os principais requisitos de eficiência via utilização da manufatura aditiva.

O Capítulo 4 descreve a metodologia utilizada para o desenvolvimento de um cinto de segurança, as fases do projeto com seus requisitos e como algumas tecnologias de manufatura aditiva colaboram para o desenvolvimento consistente.

O Capítulo 5 apresenta uma descrição técnica de molde mecânico de injeção em plástico (termoplástico) e todas as suas principais características. É realizada uma abordagem sobre o fluxo de produção de um molde mecânico apresentando a complexidade técnica e construtiva dos moldes convencionais via manufatura subtrativa que demanda altos investimentos e tempo, a importância dos sistemas de refrigeração do molde que é responsável pela qualidade da peça e produtividade do molde.

No Capítulo 6 é apresentado o desenvolvimento de moldes mecânicos híbridos com manufatura aditiva. Observa-se as fases de desenvolvimento com a construção dos moldes protótipos, assim como, uma comparação entre o desenvolvimento de um projeto de molde mecânico híbrido e molde mecânico convencional via manufatura subtrativa. É discutida a importância da análise dos resultados das simulações computacionais principalmente para os parâmetros de temperatura e pressão.

No Capítulo 7 é apresentado um projeto de molde mecânico híbrido para a construção de um pequeno lote de peças para a teste de um sistema do cinto de segurança através de um estudo de simulação computacional, assim como, dos testes para verificar a viabilidade desta tecnologia.

No Capítulo 8 destaca os principais resultados da pesquisa apontando os requisitos necessários no desenvolvimento de um sistema de segurança veicular do tipo cinto de segurança utilizando a tecnologia de manufatura aditiva. São observadas as vantagens e desvantagens do uso desta tecnologia.

No Capítulo 9 e 10 são apresentadas as conclusões e recomendações para continuidade desta pesquisa.

Nos Apêndices, é possível consultar todo o material de apoio e artigos publicados em congressos e revistas, assim como, os artigos em análise para publicação em revistas.

1.5 Metodologia Aplicada

Por ser um tipo de pesquisa que busca soluções para um problema existente é considerada de natureza de pesquisa aplicada (SILVEIRA, 2009). Sendo que a obtenção dos dados foi através de pesquisa bibliográfica em artigos publicados em periódicos científicos, dissertações e teses, além de estudo de caso.

Os recursos aplicados para realização deste estudo de caso multidisciplinar abrangem:

- *Programas de computação gráfica CAD NX R11.0 Siemens para o projeto de moldes híbridos;*
- *Programas de simulação de injeção Moldex3D R.16 para análise dos parâmetros de injeção em moldes de resina;*
- *Impressora 3D Profissional Stratasys Connex3 Objet260;*

- *Apoio de profissionais de cada área de atuação.*

A pesquisa foi organizada e realizada em 3 fases correspondentes as ações que foram executadas:

- *Fase 1: Desenvolvimento Teórico-Conceitual;*
- *Fase 2: Desenvolvimento de um Estudo de Caso;*
- *Fase 3: Resultado e Conclusão.*

Na **Fase 1** é executado um referencial teórico com um processo de busca, em artigos publicados em periódicos científicos, livros de referência, dissertações e teses, análise e discussões sobre um tema, ou seja, uma fundamentação teórica sobre:

- *Manufatura Aditiva: É explorado as principais tecnologias em manufatura aditiva disponíveis, com a compreensão dos tipos de matérias-primas, técnicas, propriedades disponíveis apresentando suas vantagens e desvantagens quando aplicadas em desenvolvimentos de produto automotivos. A aplicação de manufatura híbrida, que é a união de manufatura subtrativa com a aditiva para a construção de moldes de injeção de polímeros quando requer a fabricação de apenas um pequeno lote de peças e assim evitar o alto custo e tempo na construção de um molde tradicional;*
- *Segurança Veicular: apresentando conceitos de cintos de segurança, seus requisitos legais e específicos. As dificuldades impostas em testes com sua metodologia tradicional que envolve a construção de molde protótipos. É dado ênfase em estruturas e construção dos moldes;*
- *Moldes Mecânicos para Injeção de Polímeros: apresentando suas principais características construtivas via manufatura subtrativa e aditiva;*
- *Simulação Computacional: aplicados em moldes convencionais (construídos com manufatura subtrativa) e moldes híbridos.*

Na **Fase 2**, foi realizado um estudo de caso para uma avaliação da tecnologia no contexto do problema. Sendo projetado um molde mecânico híbrido, analisado via simulação computacional para averiguar os principais pontos críticos da matriz do

molde mecânico para viabilizar a construção do molde mecânico real físico em impressora 3D utilizando como matéria-prima resina de alta resistência mecânica.

Observa-se que o molde mecânico híbrido pode ser considerado complexo em sua construção, portanto, para orientação da pesquisa foram considerados os principais fatores e etapas que influenciam o projeto.

Na **Fase 3** foram avaliados se os requisitos para o desenvolvimento das peças protótipos atendem as fases do projeto. Os resultados são avaliados e discutidos no Capítulo 8. Na Figura 1, é possível observar de forma esquemática todas as três fases do projeto do desenvolvimento da pesquisa aplicada no desenvolvimento desta dissertação.

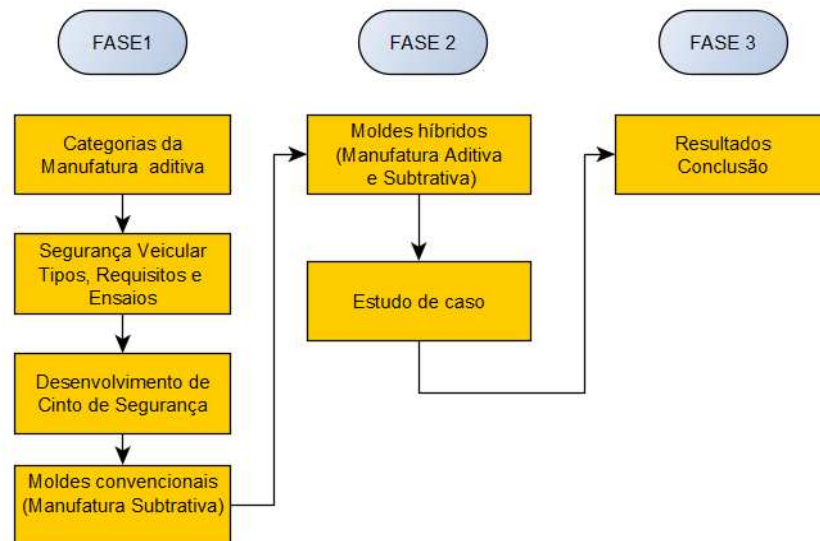


Figura 1 - Diagrama esquemático das fases de desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

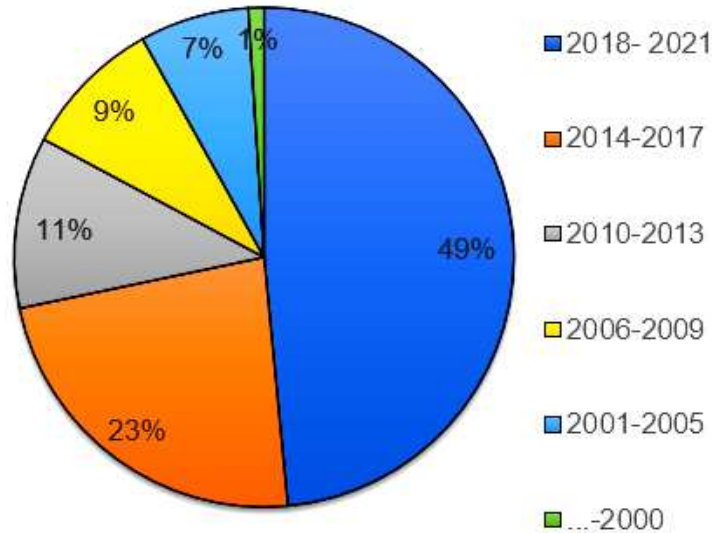
Fonte: Próprio Autor (2021).

1.6 Levantamento e Estudo Bibliográfico

Para dar embasamento teórico e científico a esta dissertação foi realizada uma pesquisa bibliográfica baseada no estudo de diferentes documentos, datas de publicação e áreas de pesquisa, assim é possível sustentar a pesquisa em um material diversificado. Foi observado um crescente aumento por ano, do número de publicações de artigos científicos que tem como o tema assuntos relacionados com este tema.

No Gráfico 1 pode ser visto a composição da porcentagem referente as publicações utilizadas na pesquisa com relação ao ano de publicação.

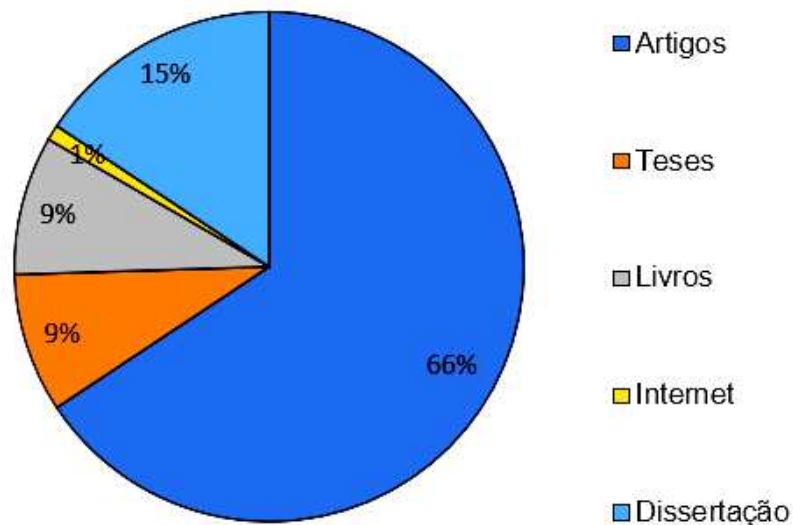
Gráfico 1- Distribuição das referências bibliográficas aplicadas na dissertação ao longo do tempo.



Fonte: Próprio Autor (2021).

A distribuição das referências bibliográficas dessa dissertação de mestrado por tipo de documento utilizado pode ser vista no Gráfico 2.

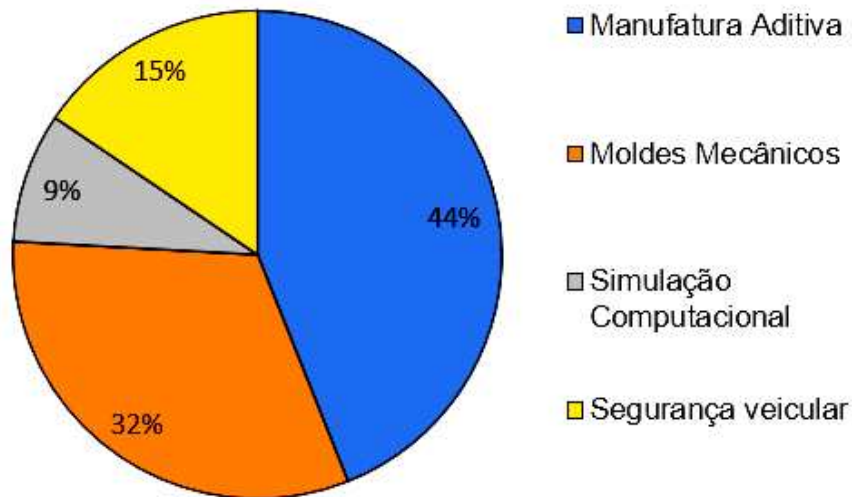
Gráfico 2- Distribuição das referências bibliográficas referente ao tipo de documento.



Fonte: Próprio Autor (2021).

A distribuição dos assuntos referentes a dissertação de mestrado pode ser vista no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Distribuição das referências bibliográficas por área de conhecimento.



Fonte: Próprio Autor (2021).

1.7 Artigos e Congressos

Durante o desenvolvimento dessa pesquisa surgiu a oportunidade de escrever três artigos, participar de três congressos e publicar um capítulo em dois livros de engenharia, com temas relacionado a manufatura aditiva, segurança veicular e moldes híbridos. Estes artigos estão anexados nos Apêndices A até F.

No **Apêndice A**, tem-se um artigo que trata da aplicação da manufatura subtrativa e aditiva para a construção de moldes híbridos para produção de peças via manufatura formativa, que foi enviada para a revista RETEC – Revista de Tecnologia (ISSN 1806-0323). O nome da pesquisa é:

MANUFATURA ADITIVA E SUBTRATIVA NA CONSTRUÇÃO DE MOLDES MECÂNICOS HÍBRIDOS PARA APLICAÇÃO EM MANUFATURA FORMATIVA.

No **Apêndice B**, esta pesquisa aborda a aplicação de manufatura aditiva na construção de moldes mecânicos de injeção termoplásticos, foi apresentada no IX Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento (CICTED) realizado na UNITAU 2020. O nome da pesquisa apresentada é:

MANUFATURA ADITIVA EM MOLDES MECÂNICOS.

No **Apêndice C**, tem-se um artigo que apresenta a aplicação de manufatura aditiva para a construção de protótipos funcionais para desenvolver e validar sistemas de segurança veicular, escrito para a revista ENGENHARIA E TECNOLOGIA – ISSN 2176-7270. O nome da pesquisa é:

CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPOS EXPERIMENTAIS VIA MANUFATURA ADITIVA – INOVAÇÃO EM SISTEMAS DE SEGURANÇA VEICULAR.

No **Apêndice D**, esta pesquisa apresenta as vantagens da aplicação da manufatura aditiva no desenvolvimento de cintos de segurança, foi apresentada no X Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento (CICTED) realizado na UNITAU 2021. O nome da pesquisa apresentada é:

MANUFATURA ADITIVA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA DE SEGURANÇA VEICULAR.

No **Apêndice E**, esta pesquisa apresenta a análise de diferentes tecnologias de manufatura aditiva considerando matérias-primas de polímeros de alta resistência e metálicos para a construção das peças ou meio produtivo para produzi-las., foi apresentada no XLI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - ENEGEP 2021. O nome da pesquisa apresentada é:

MANUFATURA ADITIVA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA VOLTADA PARA SISTEMAS DE SEGURANÇA VEICULAR (DOI: 10.14488/enegep2021_tn_stp_358_1847_41924).

No **Apêndice F**, esta pesquisa apresenta a importância em aplicar simulação computacional de injeção em moldes híbridos de alta produtividade, foi escrito para a REVISTA MUNDI ENGENHARIA, TECNOLOGIA E GESTÃO. O nome da pesquisa é:

A IMPORTÂNCIA DAS SIMULAÇÕES NA MANUFATURA ADITIVA DE MOLDES MECÂNICOS.

Livro no formato e-book publicado pela Editora Kreatik sob o título de “Coletânea Especial de Engenharia de Produção 2”, cadastrado na Agência Brasileira do ISBN sob o código 978-65-993959-5-6.

Livro no formato e-book publicado pela Editora Uniesmero sob o título de “Engenharia: Construção de Conhecimento”.

2 MANUFATURA ADITIVA - TECNOLOGIA EM CONSTANTE EVOLUÇÃO

O processo de manufatura aditiva (MA) é um conjunto de tecnologias que produz peças tridimensionais inserindo gradualmente pequenas camadas de material definidos por um modelo digital projetado em CAD que contém as informações da geometria da peça, esta tecnologia permite a construção de uma peça com uma geometria complexa que é difícil ou impossível de ser fabricada pelos métodos tradicionais (ALCALDE; WILTGEN, 2018; WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021; ABDULHAMEED *et al.*, 2019; ASTM, 2013; KELLENS *et al.*, 2017; LIU; SHIN, 2019; ORLOV *et al.*, 2018; YAKOUTA; ELBESTAWI; VELDHUIS, 2018).

Nas últimas décadas a indústria passou por uma evolução em todos os setores e o seguimento da manufatura não foi diferente. A geração de novas tecnologias passou a ser classificada em quatro processos de fabricação fundamentais, como mostrado na Figura 2. As tradicionais manufaturas subtrativa e formativa, e a mais recente a MA e combinada (subtrativo e aditivo) (WILTGEN, 2019; ZIVANOVIC *et al.*, 2019).

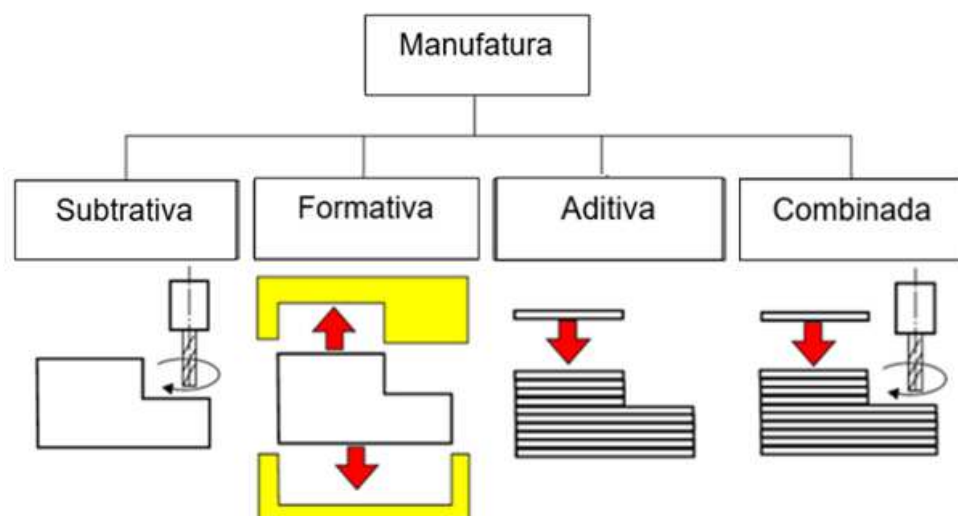


Figura 2 - Processos de Manufatura (Subtrativa, Formativa, Aditiva e Combinada).

Fonte: Adaptado de WILTGEN (2019).

Na manufatura subtrativa a peça é construída com a remoção de material a partir de um bloco sólido. São os processos tradicionais e consolidados como o de fresamento, torneamento, a retificação, a eletroerosão entre outros, possui alta precisão geométrica, e ótimo acabamento superficial, porém, este resultado depende tanto do nível tecnológico da máquina de usinagem quanto da qualificação profissional

do operador e tem um agravante de gerar desperdício com a remoção da matéria-prima excedente para a fabricação da peça

A manufatura formativa é utilizada quase sempre para a produção em alta escala, possui bom acabamento, precisão (MIRANDA, 2017) e baixo custo de produção. São os processos de fundição, injeção, forjamento e outros processos. Para conformar as peças é necessário alto investimento em moldes no qual se introduz, a matéria-prima previamente aquecida até atingir o estado fundido, que com o resfriamento a peça é finalizada (HARADA, 2004).

A tecnologia mais recente e inovadora é a manufatura aditiva que começou a se consolidar na década de 80, tem como característica a união de materiais, geralmente camada sobre camada para construir os objetos complexos, ao contrário da manufatura subtrativa que o objeto é feito removendo material. Inicialmente desenvolvida para a fabricação de protótipos físicos, a MA tem evoluído em precisão e em materiais que vão desde resinas a metais nobres (ALCALDE; WILTGEN, 2018; WILTGEN, 2019; KELLENS *et al.*, 2017, LIU; SHIN, 2019; SYED *et al.*, 2018).

Os processos combinados subtrativos e aditivos começam com a deposição de material via MA próximo a geometria desejada e na sequência é finalizada com manufatura subtrativa, geralmente por fresagem (ZIVANOVIC *et al.*, 2019).

Cada um desses processos possui vantagens e desvantagens inerentes aos limites construtivos impostos pela tecnologia utilizada em cada tipo de manufatura, porém a versatilidade e as tecnologias disponíveis atualmente permitem que a MA possa ser aproveitada em diversos setores e segmentos da indústria. Pode-se listar as seguintes vantagens:

- *Sustentabilidade: redução consumo de energia e resíduos inerente a manufatura (KELLENS et al., 2017);*
- *Baixo custo: é possível a produção em baixo escala e geração de peças personalizadas com alta complexidade geométrica que representa sem dúvida um grande diferencial tecnológico (ABDULHAMEED et al., 2019; SYED et al., 2018).*
- *Melhores resultados: manufatura de peças com geometria complexa sem a necessidade de processos convencionais como injeção plástica ou de fundição (manufatura formativa) que dependem da conformação de matérias em moldes*

fabricados com remoção de material via a manufatura subtrativa (SYED et al., 2018; ZIVANOVIC et al., 2019);

- *Personalização: a possibilidade de criação de produtos personalizados se torna real sem a necessidade de custos adicionais com ferramentas (SYED et al., 2018);*
- *Redução de massa do produto com a otimização na topologia da peça (GOMES; WILTGEN, 2020; KELLENS et al., 2017; ORLOV et al., 2018);*
- *Velocidade no desenvolvimento: redução do tempo de desenvolvimento de produto com a maior velocidade em construir protótipos, testá-los e possibilidade de correção rápida de defeitos das peças (IVVALA; AAHLADA; THOMAS, 2017; WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2021).*

Estes são algumas razões para a MA ser aceita como um novo processo para projetar e produzir peças de alto desempenho com aplicações nos seguimentos médicos, aeroespaciais, engenharia civil, automotivas entre outros.

No que tange manufatura avançada, existe muita preocupação com a sustentabilidade e uso adequado da matéria-prima e energia. A MA mostra um potencial de redução do consumo de energia e recursos que causam impactos negativos nas relações ambientais, em todo o ciclo do processo, ou seja, desde a produção de matéria-prima, projeto do produto, até a construção. Além disso existe a melhoria na topologia e redução de massa da peça final (Figura 3) que diminui a quantidade de material necessário em cada peça e proporciona economia de matéria-prima e energia (KELLENS et al., 2017; PALMA, et al. 2017).

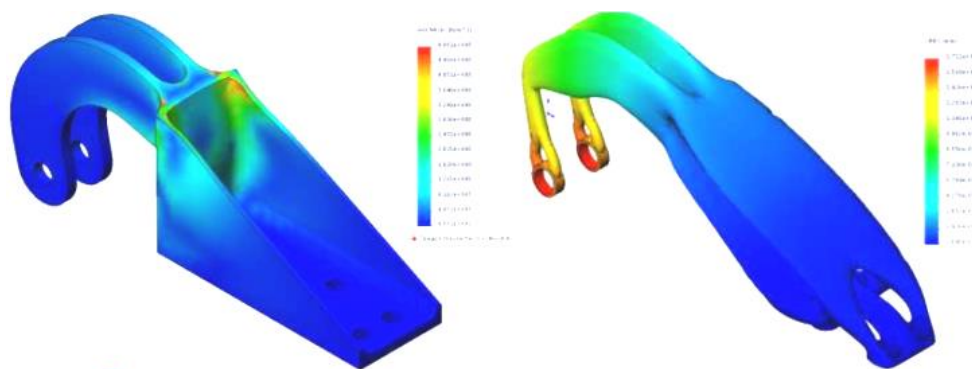


Figura 3 - Otimização na topologia da peça com redução de 58% da massa.

Fonte: Adaptado de ORLOV et al., 2018.

Mesmo com muitos benefícios, existem desafios a serem superados para cada uma das tecnologias de MA disponíveis, como por exemplo: a limitação do tamanho da peça, propriedades mecânicas anisotrópica vertical, construção de geometrias com superfícies salientes, custos elevados, baixa precisão, empenamento, desalinhamento de camadas, produção em massa, limitação na necessidade de materiais e superfície estruturada em degraus, que varia em função da espessura da camada, depósito de material e da geometria da peça, como pode ser visto na Figura 4.

Desta forma, é importante o conhecimento de cada tecnologia para que o requisito da peça a ser construída possa ser atendido (ABDULHAMEED *et al.*, 2019; FOGGIATTO, 2005; FORTULAN; LOVO, 2017; ALMEIDA, 2007; SYED *et al.*, 2018).

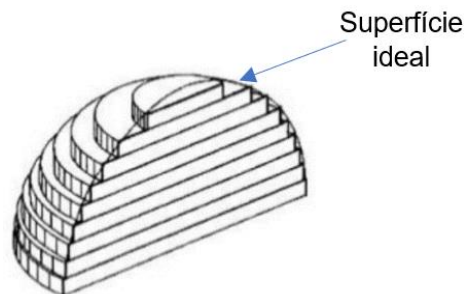


Figura 4 - Degraus gerados devido a espessura de camada e geometria.
Fonte: ALMEIDA,2007.

2.1 Processo da Manufatura Aditiva

As tecnologias da MA são distintas, possuem diferentes processo de junção e matéria-prima, porém, o fluxo do processo são todos semelhantes, como apresentado na Figura 5, pode ser dividido nas fases de modelagem digital em 3D, de manufatura e pós-processamento (FRANCO, 2019;).

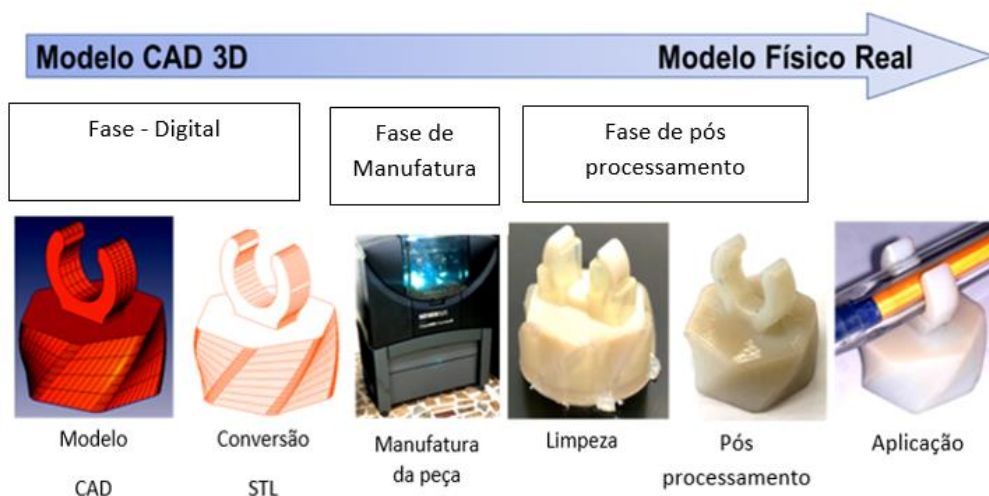


Figura 5 - Fluxo do processo de MA.
Fonte: Próprio Autor (2021).

- *Na Fase de Modelagem Digital em 3D – Todos os tipos de tecnologia de MA começam o processo a partir do desenvolvimento da ideia de um produto que se transforma em um modelo digital obtido por meio de modelação em um programa de CAD. O projetista de produto desenvolve a peça em 3D seguindo os objetivos e requisitos exigidos;*
- *Conversão para o formato STL - O formato padrão para tecnologias MA é o arquivo STL. A geometria do arquivo CAD é convertida para pequenas superfícies triangulares que se aproximam do modelo original. Quanto maior a quantidade de curvas na geometria menor deve ser o triângulo para que a peça fique com a geometria delineada e precisa, é necessário que o programa gráfico gere o arquivo com formato STL com precisão adequada;*
- *Fase de Manufatura – É realizada a preparação e configuração da máquina de MA, os parâmetros de melhor posicionamento da peça na mesa de impressão, espessura das camadas de impressão e dependendo da tecnologia que será empregada é definida também a cor da matéria-prima utilizada;*
- *Manufatura da Peça – É o momento de produção da peça, com o deslocamento no plano X-Y-Z depositando o material camada por camada. Não é necessário o acompanhamento de um operador, inclusive pode ser programado para a máquina iniciar a fabricação no horário mais adequado;*
- *Fase do Pós-Processamento - Mesmo sendo visto com um processo completo a MA impõe algumas aplicações o pós-processamento. Se deve principalmente para atender as diferentes características da peça, que pode ser exigências de complexidade geométrica, acabamento superficial diferenciado que exige projetar uma camada de material excedente para manter o dimensional, tratamento térmico, revestimento, usinagem entre outros;*
- *Aplicação da Peça – O campo de aplicação da peça produzida em MA é extenso e crescente. A construção de moldes mecânicos em manufatura formativa permite projetar canais de refrigeração mais eficientes o que reduz o ciclo do processo aumentando a produtividade. Na área médica pode ser aplicado na construção de próteses e implantes personalizados. No seguimento aeroespacial a aplicação é ampla, por exemplo a construção de peças do motor melhora a eficiência do combustível com a utilização de peças mais leves.*

2.2 Nomenclatura e Categoria da Manufatura Aditiva

O desenvolvimento das tecnologias em MA tem proporcionado a construção de novas tecnologias de máquinas para produzir peças com maior precisão e diferentes tipos de materiais (ALCALDE; WILTGEN, 2018; WILTGEN, 2019; GOMES; WILTGEN, 2020).

As terminologias como impressão 3D (3DP), prototipagem rápida (PR), manufatura rápida (MR) e a fabricação de forma livre (FFL ou SFF) pode ser usada para descrever o processo, porém, MA manufatura aditiva é o nome tecnicamente mais adequado (ABDULHAMEED *et al.*, 2019).

Todos as tecnologias de MA têm em comum o recurso de produzir peças com geometrias complexas, sem a necessidade de aplicar o uso de moldes, ou seja, constroem-se os objetos de forma livre, o que fez surgir a terminologia de FFL (*SFF - Solid Freeform Fabrication*).

O termo Prototipagem Rápida (PR) foi utilizado para definir o processo de construção de um protótipo, porém, com o desenvolvimento da tecnologia este termo se tornou ultrapassado, afinal a tecnologia passa a possuir recursos que não se limitava a esta finalidade (WILTGEN, 2019).

Quando aplicado para fabricar diretamente parte de moldes para moldagem por injeção então o processo é denominado ferramental rápido. São moldes mecânicos como protótipos utilizados na fabricação de pequenos lotes de peças para testes. (FOGGIATTO, 2005; JUNIOR; JUNIOR; SANT'ANNA, 2015; TUTESKI; KOČOV, 2018; UDROIU; BRAGA, 2017).

Com o objetivo de padronizar a nomenclatura e técnicas da MA, em 2009 foi criado o comitê F42 da *ASTM (American Society for Testing and Materials)* e substituída em 2015 pela norma *ASTM F2792-12^a*. No mesmo ano, foi publicada a primeira norma *ISO* para MA, a *ISO/ASTM 52900* expandindo a padronização da MA.

A MA foi subdividida em sete categorias, cuja as diferenças das categorias são na forma como as camadas são depositadas e os tipos de materiais utilizados. Por exemplo, fusão em leito de pó; depósito de energia direcionada; foto polimerização em cubas; extrusão de material; jateamento de material; jateamento de aglutinante e laminação de folhas (YAKOUTA; ELBESTAWI; VELDHUIS, 2018).

No Quadro 1 podem ser observadas as categorias de MA e os processos disponíveis para cada uma destas categorias.

Quadro 1- Características de Manufatura Aditiva e suas técnicas (Norma ISO/ASTM 52900).

Categoria	Sigla	Processos
Fusão em leito de pó	PBF	- Sinterização Seletiva a Lase (SLS) - Sinterização Seletiva a Calor (SHS) - Fusão Seletiva a Laser (SLM) - Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS) - Fusão por Feixo de Elétrons (EBM)
Deposito de energia direcion	DED	-Deposito de laser (LD) -Modelagem de Rede Projetada a Laser (LENS)
Fotopolimerização em cubas	VP	- Estereolitografia (SLA) - Processamento Digital de Luz (DLP)
Extrusão de material	ME	- Modelagem por Deposição Fundida (FDM) - Fabricação de Filamento Fundido (FFF) - Modelagem por Camada Fundida (FLM)
Jateamento de material	MJ	- PolyJet (IJP) - InVision 3D Systems (UP)
Jateamento de aglutinante	BJ	- Jateamento de Aglutinante (BJ)
Laminação de folhas	SL	- Manufatura por Objetos Laminados (LOM) - Manufatura Aditiva Ultrasônica (UAM)

Fonte: Adaptado de (SANTANA, 2019; GOMES; WILTGEN, 2020; SYED *et al.*, 2018).

As diferentes tecnologias em MA possuem diferentes vantagens e desvantagens. Nenhuma dessas tecnologias é completa em todas as características (ABDULHAMEED *et al.*, 2019), porém a versatilidade e as tecnologias disponíveis permitem que a MA possa ser aproveitada em diversos setores da indústria.

O conhecimento das tecnologias de MA disponíveis juntamente com os materiais da matéria-prima, processos, propriedades mecânicas e desempenho são desejáveis, quando se avalia as características da peça ou produto em desenvolvimento (JUNIOR *et al.*, 2015).

O princípio da MA é transformar as matérias-primas em peças, portanto, os materiais ocupam um papel importante, as categorias da MA. Na Figura 6 estão relacionadas a alguns tipos de matéria-prima, formato e estado físico.

Metal							
Cerâmica							
Polímero							
Categorias	Fotopolimerização em cubas	Jateamento de aglutinante	Jateamento de material	Fusão em leito de pó	Deposito de energia	Extrusão de material	Laminação de folhas
	VP	BJ	MJ	PBF	DED	ME	SL
Princípio	Polimerização	Jateamento		Fundição e Solidificação			União
Formato			Pó	Filamento		Laminas	
Estado físico	Líquido			Sólido			

Figura 6- Estado físico e formato da Matéria-prima para as categorias de MA.

Fonte: Adaptado de SYED *et al.*, 2018.

Nesta pesquisa é dada a ênfase nas categorias e processos de MA que melhor se adequam ao processo de desenvolvimento de um sistema de segurança veicular.

2.3 Jateamento de Material (JM)

A técnica de Jateamento de Material (JM) utiliza materiais poliméricos e/ou termoplásticos de impressão 3D do tipo foto curáveis.

O processo de produção consiste na aplicação da matéria-prima de construção sobre a mesa da máquina através de uma cabeça de impressão com múltiplos bicos.

A solidificação é feita simultaneamente por uma luz ultravioleta e a menor espessura da camada pode ser de ~0,16 mm, o que proporciona superfícies lisas com precisão geométricas de ~0,1 mm.

As camadas são processadas movendo a mesa na direção do eixo Z. As peças precisam de suporte durante o processo de manufatura que são gerados simultaneamente por um segundo conjunto de bicos, os suportes são sólidos e são removidos facilmente através de lavagem com água, sem deixar resíduos (RAMYA; VANAPALLI, 2016; TUTESKI; KOČOV, 2018; UDROIU; BRAGA, 2017). O desenho esquemático do processo é apresentado na Figura 7.

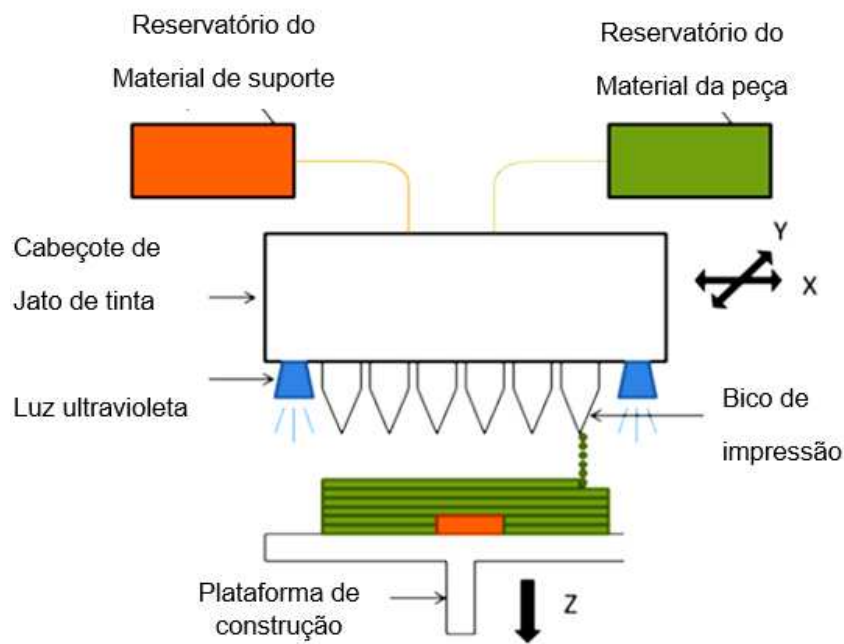


Figura 7 - Técnica de Jateamento de Material para fabricação em 3D.

Fonte: GIORDANO *et al.*, 2017.

Este processo pode fabricar protótipos de modelos para as mais variadas aplicações, chamado também de Prototipagem Rápida (WILTGEN, 2019). Também pode ser aplicada para fabricar diretamente para moldes mecânicos de injeção em polímeros (GIORDANO *et al.*, 2017; TUTESKI; KOČOV, 2018; UDROIU; BRAGA, 2017).

Moldes mecânicos protótipos construídos com esta tecnologia são aplicados para produzir protótipos funcionais para teste de desempenho de peças plásticas, é uma técnica de produção viável para baixa produção. A velocidade de desenvolvimento de um produto aumenta consideravelmente. Isso é possível porque o molde mecânico protótipo pode ser fabricado em ~2 dias enquanto os moldes mecânicos convencionais podem levar alguns meses para serem fabricados (TUTESKI; KOČOV, 2018; UDROIU; BRAGA, 2017).

2.4 Extrusão de Material (EM)

São os tipos mais comuns de máquinas de MA, chamadas de impressoras 3D, utilizam as técnicas estereolitografia (SL) e modelagem por fusão e deposição (MFD ou FDM). As impressoras pessoais que estão se difundindo no mercado utilizam a técnica

FDM por ser a mais simples e de menor custo. São utilizados matéria-prima de polímeros com baixo ponto de fusão (entre ~70 e ~270 °C), os mais adequados para este processo incluem o PP (Polipropileno), ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PLA (Ácido Polilático), PC (Policarbonato) e PA (Poliamida).

O ABS é a matéria-prima mais empregada devido a facilidade de extrusão a altas temperaturas e as boas propriedades mecânicas que proporciona às peças manufaturadas (resistência ao impacto e resistência química) com um baixo custo (ARAÚJO, 2019).

A tecnologia surgiu com problemas relacionados a baixa resistência e qualidade no acabamento superficial, construía apenas protótipos não funcionais, porém, com a sua evolução tecnológica e desenvolvimento de novos materiais possibilitou a construção de protótipos funcionais de boa qualidade.

A técnica FDM é um processo por extrusão que utiliza um cordão ou fio na forma rolo de filamento de material por uma cabeça de extrusão (ALCALDE; WILTGEN, 2018; FOGGIATTO, 2005).

O filamento de material termoplástico fica depositado na máquina em uma bobina, é direcionado para o cabeçote de extrusão da máquina, extrudado e aquecido até tornar-se pastoso para se aderir, sendo depositado na base de construção.

Assim se deslocam nas direções X e Y para conformar a área da sessão da peça e quando a camada estiver completa, a base da mesa desloca-se na direção Z, para inserir a próxima camada em altura. O processo se repete até a construção final da peça, como pode ser observado na Figura 8.

Para partes suspensas da peça em construção utiliza um segundo bico de extrusão para o material de suporte que são eliminadas posteriormente (DOMINGUES, 2015; FOGGIATTO, 2005. IVVALA; AAHLADA; THOMAS, 2017; RAMYA; VANAPALLI, 2016).

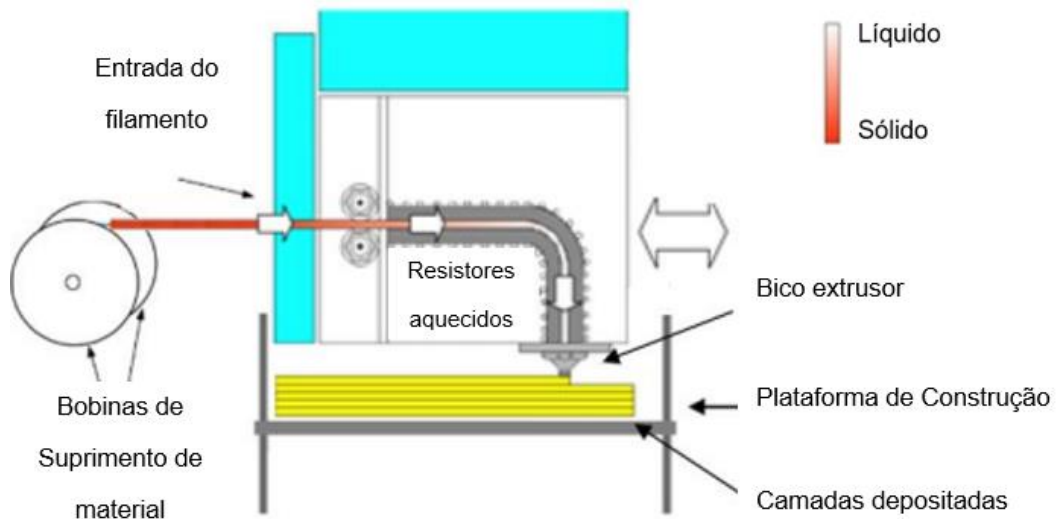


Figura 8 - Esquema do processo FDM.

Fonte: FOGGIATTO, 2005.

Os filamentos de polímeros que constroem a peça possuem forma cilíndrica com altura do fatiamento da peça de $\sim 0,12$ até $\sim 0,36$ mm. Devido ao seu formato cilíndrico formam-se vazios dentro dos contornos que pode representar um problema de costura nas paredes impressas, como pode ser visto na Figura 9 (DOMINGUES, 2015; FOGGIATTO, 2005).

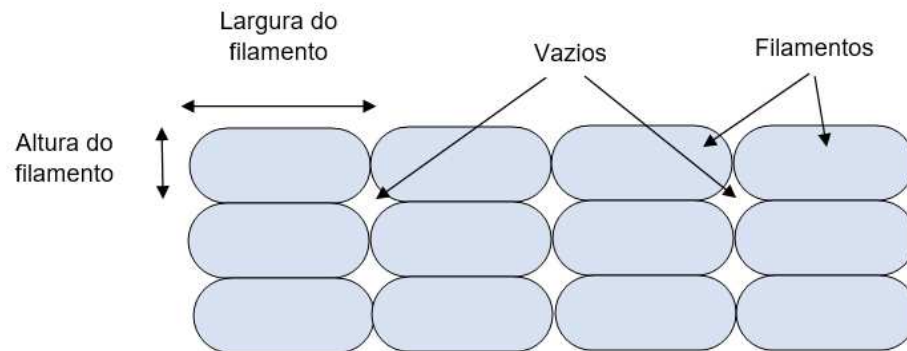


Figura 9 - Esquema representativo dos filamentos cilíndricos e dos vazios, inerentes do processo de FDM.

Fonte: Adaptado DOMINGUES, 2015.

Cada tipo de matéria-prima disponível possui uma característica para atender a aplicação de maneira mais adequada. Com o FDM é possível manufaturar protótipos funcionais com alto desempenho e termoplásticos com excelente mecânica, qualidades térmicas e químicas (IVVALA; AAHLADA; THOMAS, 2017). No Quadro 2 podem ser observadas as vantagens e desvantagens da técnica FDM.

Quadro 2- Vantagens e limitações do processo de FDM.

Vantagens	Desvantagens
<i>Tecnologia simples de baixo custo</i>	<i>Pouca variedade de materiais de construção</i>
<i>Resistente ao calor, produtos químicos e ambientes húmidos</i>	<i>Necessidade de suporte de construção e da sua remoção</i>
<i>Construção de peças com geometrias complexas</i>	<i>Peças com baixa resistência mecânica na direção Z (anisotrópica vertical)</i>
<i>Produção de peças bio-compatíveis</i>	<i>Velocidade do processo lenta</i>
<i>Não necessita de pós-cura</i>	<i>Processo com pouca precisão</i>
<i>Não utiliza laser</i>	

Fonte: Adaptado de DOMINGUES, 2015.

Em desenvolvimento de produtos de sistemas de segurança veicular do tipo cinto de segurança é aplicado para a construção de protótipos que tem como principal função definir e analisar o conceito da peça. Nesta fase os protótipos não necessitam de sofisticação final, porém os recursos da MA proporcionam a percepção real permitindo avaliar o conceito. A técnica de FDM possui como principal vantagem seu atraente custo-benefício (DOMINGUES, 2015; IVVALA; AAHLADA; THOMAS, 2017).

2.5 Fusão em Leito de Pó (FLP ou PBF)

Para peças produzidas em metal aplica-se matéria-prima com formato de pó, arame ou folhas, sempre com o auxílio de uma fonte de energia de laser, feixe de elétrons, arco elétrico ou ultrassom vibração camada por camada. Com essa diversidade de matéria-prima e processos de união resulta algumas diferenças metalúrgicas, tais como: porosidade, acabamento superficial com rugosidade, anisotropia mecânica, tensão residual e defeitos particularmente aqueles componentes que requerem exposição à fadiga de alta temperatura (GOMES; WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021B).

Em aplicações para Ferramental Rápido (FR), a sinterização direta a laser de metal (DMLS) é uma das técnicas de MA que se destaca, pois constrói as peças diretamente de pós de metal ou ligas, similar ao processo de Sinterização Seletiva a Laser (SSL ou SLS). Surgiu em 1994 e foi a primeira tecnologia a produzir peças de metal em um único processo, é completamente fundido pela varredura de um laser de

alta potência para construir a peça com propriedades do material original (RAMYA; VANAPALLI, 2016).

Os parâmetros no processo DMLS influenciam diretamente a qualidade da peça em construção, portanto, o seu domínio é fundamental para a construção de peças metálicas de boa qualidade (GOMES; WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021B).

O processo DMLS pode ser realizado por dois métodos, que diferem na maneira como cada camada de pó é aplicada.

No método de deposição de pó, o pó metálico fica alojado em um funil que derrete o pó e deposita a camada fina na plataforma de construção, e no método de leito de pó, o pistão do distribuidor alimenta o suprimento de pó, que em seguida é recoberto com outra camada de pó, na sequência uma fonte de calor (feixe de laser) móvel de alta energia é utilizada para fundir o pó em nova camada, com muita precisão nos pontos definidos conforme o desenho em CAD.

Em ambos os métodos, quando uma camada é finalizada, o procedimento se repete até que a última camada seja construída e a peça seja finalizada (DOMINGUES, 2015; GOMES; WILTGEN, 2020; ESPERTO; OSÓRIO, 2008; SU, 2013; RAMYA; VANAPALLI, 2016). Na Figura 10 pode ser visto o processo da sinterização direta a laser em metal.

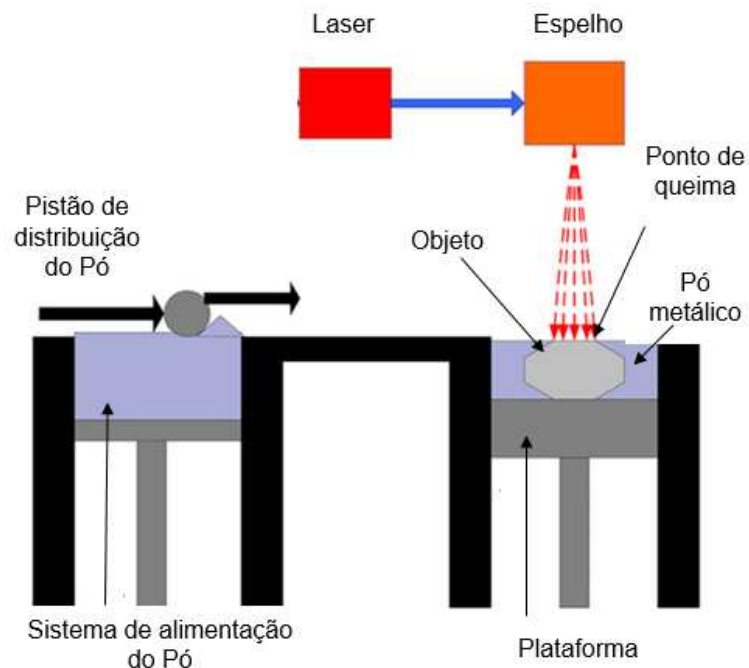


Figura 10- Esquema do processo DMLS.

Fonte: Adaptado de PANDA; SAHOO, 2019.

As peças metálicas produzidas pelo processo DMLS são resistentes e funcionais, possuem boas propriedades mecânicas em todas as direções, sendo possível fabricar peças com diversos tipos ligas metálicas, dentre eles incluem liga de aço, aço inoxidável, aço ferramenta, alumínio, bronze, cromo-cobalto e titânio, com camadas de ~40 µm de espessura e precisão ~50 µm (EOS, 2017; RAMYA; VANAPALLI, 2016).

Pelo fato de não necessitar de aglutinante de polímero, produz peças de aço com densidade de ~95%, melhor que a sinterização seletiva a laser (SLS) que possui uma densidade de ~70%, além disso o DMLS possui a vantagem, quando comparado com o SLS, de melhor resolução de detalhes devido ao uso de camadas mais finas possibilitadas pelo menor diâmetro do pó (RAMYA; VANAPALLI, 2016).

O processo causa tensões residuais térmicas que pode levar a rachaduras em nível de micrométrico que reduz a resistência e as propriedades mecânicas do componente. Estas tensões residuais térmicas podem ser minimizadas com a seleção adequada de parâmetros do processo de fabricação, ou seja, potência do laser, velocidade de varredura, tamanho do ponto do laser, a espessura da camada de construção e estratégia de varredura no processo (PANDA; SAHOO, 2019). No Quadro 3, é possível visualizar as principais vantagens em desvantagens da técnica DMLS.

Quadro 3 - Vantagens e limitações do processo DMLS para construção de moldes.

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<i>Durabilidade elevada</i>	<i>Limitação do tamanho da peça. 250 mm x 250 mm x 220 mm.</i>
<i>Processo mais rápido quando comparado com os processos convencionais</i>	<i>Elevada rugosidade que impõe polimento na superfície</i>
<i>Tolerâncias dimensionais inferiores a 0.05mm</i>	<i>Elevado custo</i>
<i>Não necessita pós-processamento</i>	<i>Presença de micro trincas</i>
<i>Boa resistência mecânica</i>	

Fonte: Adaptado DOMINGUES, 2015.

A aplicação desta tecnologia em fabricação das matrizes de moldes, é uma aplicação que está em forte ascensão industrial, pois pode aumentar a produtividade dos moldes mecânicos, e na qualidade final das peças produzidas via manufatura

formativa. Devido a maior eficiência que ocorre na troca térmica obtida pela construção de canais de resfriamento com geometrias mais eficientes.

A impressão 3D de moldes mecânicos em metal parece muito promissor para iniciar uma grande mudança na indústria automotiva (GOMES; WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021B; ARORA, 2019; ASNAFI *et al.*, 2020; CHUNG, 2019; GRIES *et al.*, 2021; HATOS, 2018; JUNIOR, 2019; SILVA, 2009; SOUZA; MARQUES, 2014; TUTESKI; KOČOV, 2018).

3 SISTEMAS DE CINTO DE SEGURANÇA VEICULAR

Mesmo com a taxa global de mortes por acidentes automobilísticos tenha reduzido, ainda assim cerca de ~1,35 milhões de pessoas são mortas por ano em acidentes de trânsito, de acordo com o banco de dados da Organização Mundial da Saúde (NISHIDA *et al.*, 2021). Existe um esforço mundial em reduzir as lesões derivadas de acidentes de trânsito aperfeiçoando os sistemas de segurança veiculares.

A engenharia automotiva classifica em dois tipos as soluções tecnológicas em relação a segurança veicular, a segurança passiva e a segurança ativa.

A segurança ativa atua na prevenção de um acidente, deve evitar o acidente, tais como os sistemas de frenagem *ABS* (*ABS - Anti-lock Braking System*), que impede que as rodas travem, e assim, o pneu não derrape sobre a pista.

A segurança passiva, atua na proteção do passageiro ou motorista no momento do acidente. São os sistemas cintos de segurança, airbag, reforços nos elementos estruturais da carroceria, entre outros (SILVA, 2018).

Os dispositivos de segurança tipo passiva atuam no momento da colisão ou desaceleração abrupta do veículo (SILVA, 2018;), são projetados para atuar, sem a necessidade da intervenção dos ocupantes, reduzindo as lesões causadas nos acidentes.

O cinto de segurança se enquadra na categoria de segurança passiva e de acordo com a *NHTSA* (*NHTSA - Highway Traffic Safety Administration*) (NHTSA, 2020). A utilização correta do cinto de segurança é o maior responsável pela segurança do ocupante do veículo em um acidente (KAHANE, 2015; WILHELM; GARCIA, 2018).

O uso do cinto de segurança não impede que o acidente ocorra, o principal objetivo do cinto de segurança veicular é reduzir a movimentação dos passageiros, e gerenciar a energia dos ocupantes em caso de colisão contribuindo para reduzir os riscos de ferimentos na cabeça, rosto, pescoço, membros inferiores e na coluna (ZUCHOWSKI; JACKOWSKI, 2011). Atualmente é item obrigatório em todos os veículos motorizado, exceto nas motocicletas.

A principal propriedade física considerada em um projeto de cinto de segurança é a inércia. Em seu conceito diz que se um corpo está em movimento dinâmico, permanece neste estado no sentido reto, se não for submetido a nenhuma ação, ou seja, a 1ª lei de Newton ou Princípio da Inércia.

Desta forma, quanto maior a desaceleração do veículo e massa do ocupante, maior é a força imposta ao cinto de segurança para reter o ocupante.

A Cinemática do Trauma em um acidente automotivo representa três colisões: a colisão do veículo com o obstáculo, a pessoa com o interior do automóvel e a colisão dos órgãos com as paredes internas do nosso corpo. Assim pode-se concluir que em um acidente em alta velocidade o cinto de segurança colabora para evitar lesões, porém, em altas desacelerações o cadarço do cinto de segurança causa compressão no tórax, há relatos clínicos de lesões resultantes dos cintos de segurança durante os acidentes (HÅLAND, 2006; NISHIDA *et al.*, 2021).

Na Figura 11 é apresentada a posição do motorista do veículo durante um acidente a ~50km/h por ~120ms com as seguintes configurações: a não utilização cinto de segurança (a), com uso do cinto de segurança convencional (b) e com cinto de segurança com sistema de pretensão (c).

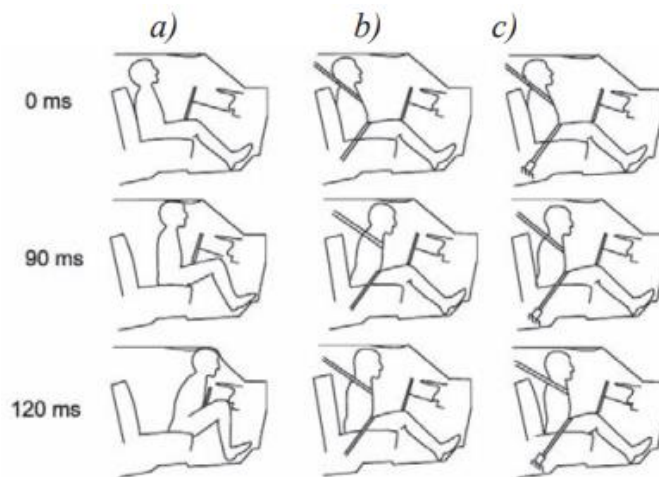


Figura 11 - Deslocamento do condutor do veículo em colisão frontal a ~50km/h.

Fonte: ZUCHOWSKI; JACKOWSKI, 2011.

O motorista sem usar o cinto de segurança colide com todo o corpo no interior do veículo, usualmente sofre uma grave lesão (Figura 11a). O motorista utilizando o cinto de segurança está seguro com aparente eficiência em seu assento (Figura 11b). A eficiência ideal do cinto de segurança está condicionada pela aderência do cadarço ao corpo do usuário, uma folga entre o cadarço e o ocupante propicia um deslocamento adicional do corpo, e este evento pode ser eliminado por pré-tensores presentes no cinto de segurança (Figura 11c).

3.1 Tipos de Cintos de Segurança

Dentre todos os sistemas de segurança veicular, o cinto de segurança é considerado o que possui maior participação na redução de lesão no caso de um acidente (*NHTSA - National Highway Traffic Safety Administration*). Diminui de forma significativa o risco de morte, independentemente do tipo de colisão (frontal, lateral, traseira), da velocidade e do tipo de veículo (HÅLAND, 2006; ZUCHOWSKI; JACKOWSKI, 2011).

Os modelos de cintos de segurança veicular são regulamentados no Brasil pela resolução 518/15 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), que regulamenta todos os equipamentos de segurança dos veículos no Brasil. Os tipos de cintos de segurança presentes nos veículos comerciais nacionais são:

- *O Cinto de Três Pontos - possui três pontos fixadas à estrutura de ancoragem no veículo (Figura 12), proporciona maior segurança ao usuário, isso se deve porque a carga do impacto imposta em um momento de colisão é distribuída pela estrutura do corpo do ocupante. O uso correto é o cadarço passando pelo ombro e se estende pela região torácica e ao mesmo tempo se apoia na região de articulação pélvica, o uso de maneira inadequada como o cadarço passando abaixo do braço, sobre a barriga, banco reclinado ou com qualquer dispositivo que deixe o cadarço com folga compromete a eficiência da retenção do ocupante e provocara lesões.*



Figura 12 - Uso do cinto de segurança do tipo 3 pontos.

Fonte: Próprio Autor.

- *O Cinto Diagonal: é um tipo de cinto de segurança que o caderço reveste o ombro e a região torácica (Figura13). Restringe o deslocamento do usuário, porém, pode ocorrer o efeito “submarino” que é quando o corpo passa por baixo do caderço. Esse efeito pode causar graves lesões na coluna e pescoço.*



Figura 13 - Utilização do cinto de segurança do tipo diagonal dois pontos.

Fonte: Próprio Autor.

- *Cinto de Dois Pontos ou Pélvico: é um tipo de cinto de segurança que geralmente fica instalado no banco traseiro na posição central, o caderço reveste a região pélvica na articulação dos quadris (Figura 14). Em caso de desaceleração reterá o usuário na região dos quadris, porém o corpo pode se dobrar e a cabeça se desloca, que pode causar lesões no pescoço, coluna e tórax.*

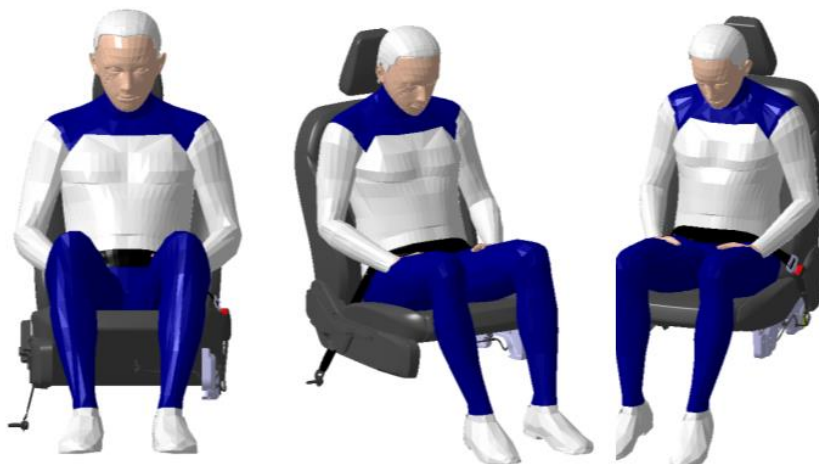


Figura 14 - utilização do cinto de segurança do tipo dois pontos ou pélvico.

Fonte: Próprio Autor.

Não são projetados para crianças menores de dez anos, que devem ser transportadas sempre no assento traseiro em cadeira apropriadas que são fixadas por sistemas chamado de ISOFIX, possuem 3 pontos de ancoragem que se fixam em pontos específicos no automóvel, tornando a cadeira parte integrante do veículo e possibilita uma maior segurança para menores de idade (CAMPOS, 2014).

Este sistema reduz, entre ~90% e ~95%, a ocorrência de morte ou ferimentos graves em crianças (FERNANDES, 2015). O Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), como órgão normativo e consultivo máximo do Sistema Nacional de Trânsito, conforme a Resolução nº 518/2015, o uso do ISOFIX tornou-se obrigatório desde 2018 para os novos veículos fabricados e para os modelos existentes, a obrigatoriedade começou a ser válida no ano de 2020.

De acordo com o CONTRAN, o cinto de segurança de três pontos se tornou obrigatório em todos os assentos de automóveis, camionetas, caminhonetes e utilitários no ano de 2018 para os projetos de veículos novos no ano de 2020 para todos os veículos em produção.

3.2 Projeto e Requisitos de Cintos de Segurança de Três Pontos

O cinto de segurança de três pontos está em uso nos veículos há mais de 60 anos. Em 1959 a Volvo foi a primeira fabricante de automóveis do mundo a utilizar cintos de segurança de três pontos estáticos para ocupantes dos bancos dianteiros. Surgiram os airbags frontais e laterais que aumentam mais ainda a proteção dos ocupantes dos veículos, porém, complementam a ação do cinto de segurança e não os substituem (HÅLAND, 2006).

O projeto dos cintos de segurança continua sendo o principal sistema de proteção, devem funcionar de maneira cadenciada com outros subsistemas, como o airbag, do veículo aumentando sua eficácia estão sendo aplicados (ZUCHOWSKI; JACKOWSKI, 2011), proporcionar conforto e com um desenho discretos tanto quanto possível para estar em harmonia com o interior do veículo.

É dimensionado para funcionar para uma gama completa de tamanhos de ocupantes dos veículos e capaz de prender uma cadeira de criança em todas as posições apropriadas em países no qual são exigidos por lei.

O sistema de cinto de segurança deve resistir a temperaturas extremas, corrosão, umidade, poeira e luz solar, na faixa de temperatura de -20 a +85°C (GMW - 14831).

Os cintos de segurança devem atender aos requisitos legais de diferentes países no qual são comercializados, além disso existem os requisitos específicos definidos por cada montadora de veículos. Atualmente, os requisitos legais e métodos de ensaios em cintos de segurança em veículos automotores comercializados no Brasil são definidos pela norma ABNT NBR 7337:2014.

Na Figura 15 é possível observar as partes que compõe o sistema de cinto de segurança veicular. São subdivididos nos seguintes subsistemas:

- *Retrator que é o local que armazena o cadarço e bloqueia em caso de acidente, deve resistir a tração estática uma força superior a ~14.7kN, podem ser do tipo com limitadores de carga (ou seja, com gerenciamento de energia sobre o ocupante) e com pretensão (que elimina as folgas com o usuário no momento do impacto);*
- *O cadarço, que recobre o usuário devendo resistir a cargas impostas no momento do acidente, não deve ser danificado após ensaio de ~75.000 ciclos de extração e retração e manter a resistência de, no mínimo, ~80% da resistência original após o teste;*
- *Lingueta que é o elemento que o ocupante engata no fecho, portanto, deve ser sempre de fácil acesso e com facilidade de manuseio, ao engatar no fecho deve fornecer um clique audível para que o usuário tenha uma perfeita percepção que esta alojado corretamente. Deve deslizar livremente pelo cadarço, sem provocar desgaste e nunca deve girar no cadarço para que ele não fique torcido em condição de uso;*
- *Terminal é uma peça metálica que está fixado na carroceria do veículo através de parafusos e em sua outra extremidade o cadarço do cinto de segurança fica costurado;*
- *Fecho é o sistema que o usuário introduz a lingueta manualmente para se utilizar o cinto de segurança. É um dos três pontos de ancoragem do cinto de segurança, fica fixado no banco ou carroceria do veículo e deve ser localizado de tal maneira que o usuário tenha um fácil acesso. Possui um mecanismo*

complexo, que deve atender altas resistências ($\sim 18kN$) de tração, para suportar a solicitação do impacto, mas também suaves forças de uso, requeridas no engate e desengate da lingueta que é de $\sim 5N$ até $\sim 25N$ para que qualquer usuário tenha condições de utilizá-lo. Alguns veículos são projetados para detectar, de maneira sonora ou luminosa, a presença da lingueta no fecho para alertar o usuário a ausência do uso do cinto de segurança.

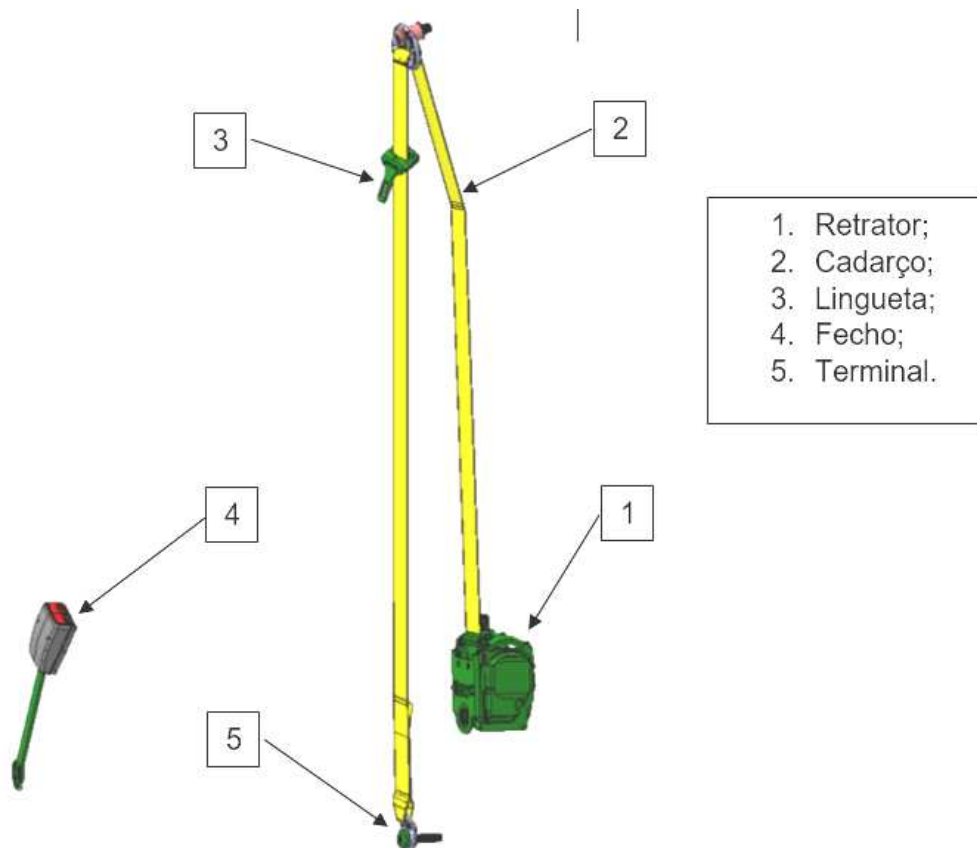


Figura 15 - Subsistemas que compõem um cinto de segurança de 3 pontos.

Fonte: Próprio Autor.

O desempenho ideal do cinto de segurança está condicionado pela ausência de folgas entre o cadaço do cinto de segurança e o corpo do usuário via o sistema Retrator (ZUCHOWSKI; JACKOWSKI, 2011).

O Retrator é um subsistema do cinto de segurança veicular que possui as principais características que definem o desempenho de um cinto de segurança veicular. Esse componente acomoda o cadaço do cinto de segurança, oferece determinado grau de liberdade ao passageiro, além de extrair e recolher o cadaço em função da movimentação do passageiro e bloqueia o deslocamento do mesmo em

colisões que provocam a desaceleração $>0,45G$ e pode atuar, adicionalmente, para gerenciar as cargas de tensão do cadoarço sobre o tórax do condutor em uma situação de colisão reduzindo a compressão torácica.

O retratores do tipo pré-tensionador (Figura 16) possui a característica de, no momento do impacto, recolher o cadoarço em $\sim 150\text{mm}$ e eliminar as folgas que possa haver entre o corpo humano e o encosto do assento do veículo durante o tempo de $\sim 15\text{ms}$. Com a finalidade de reduzir a carga dinâmica que atua sobre o passageiro preso pelo cinto de segurança reduzindo o deslocamento e posicionando-o para a abertura do *airbag* (HÅLAND, 2006). Existem projetos de veículos que além de pré-tensionadores no retrator, incluem nas ancoragens para eliminar o deslocamento pélvico e reduzir as lesões dos membros inferiores.

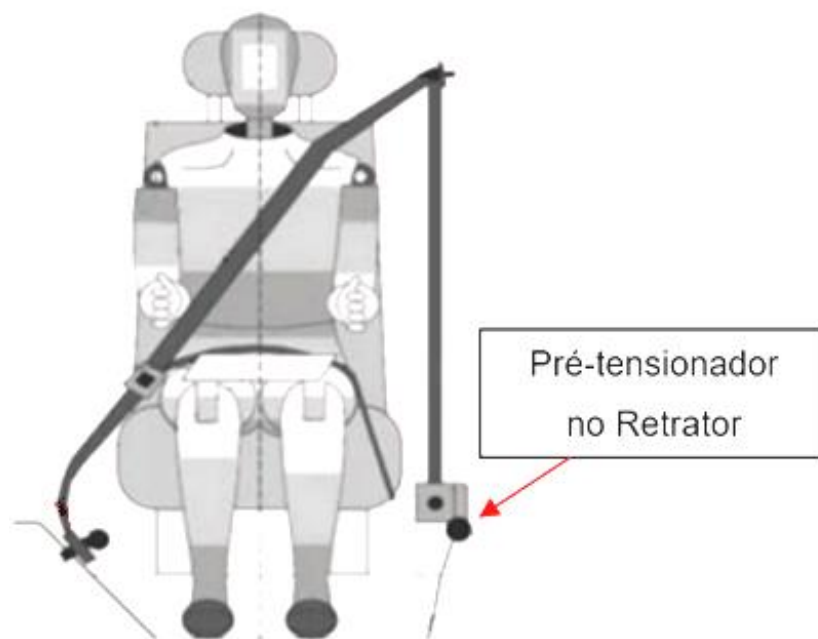


Figura 16 - Pré-tensionadores que aumentam a eficiência do cinto de segurança.

Fonte: Adaptado ZUCHOWSKI; JACKOWSKI, 2011.

Existem os retratores do tipo limitadores de carga, que são aplicados na posição dianteira do veículo, possuem um sistema que gerencia a carga imposta no tórax do usuário no momento da desaceleração. Este recurso mantém a carga no tórax em um patamar predeterminado, assim reduz o pico de força e a compressão torácica (BICALHO; SOUZA; GOMES, 2018).

O valor da carga é relacionado com a capacidade de deformação que a carroceria do veículo consegue absorver.

Na Figura 17 observa-se a carga é aplicada ao tórax, para um retrator sem limitador de carga chega a atingir ~9.000N, e como este recurso que reduz a carga para ~4.000N.

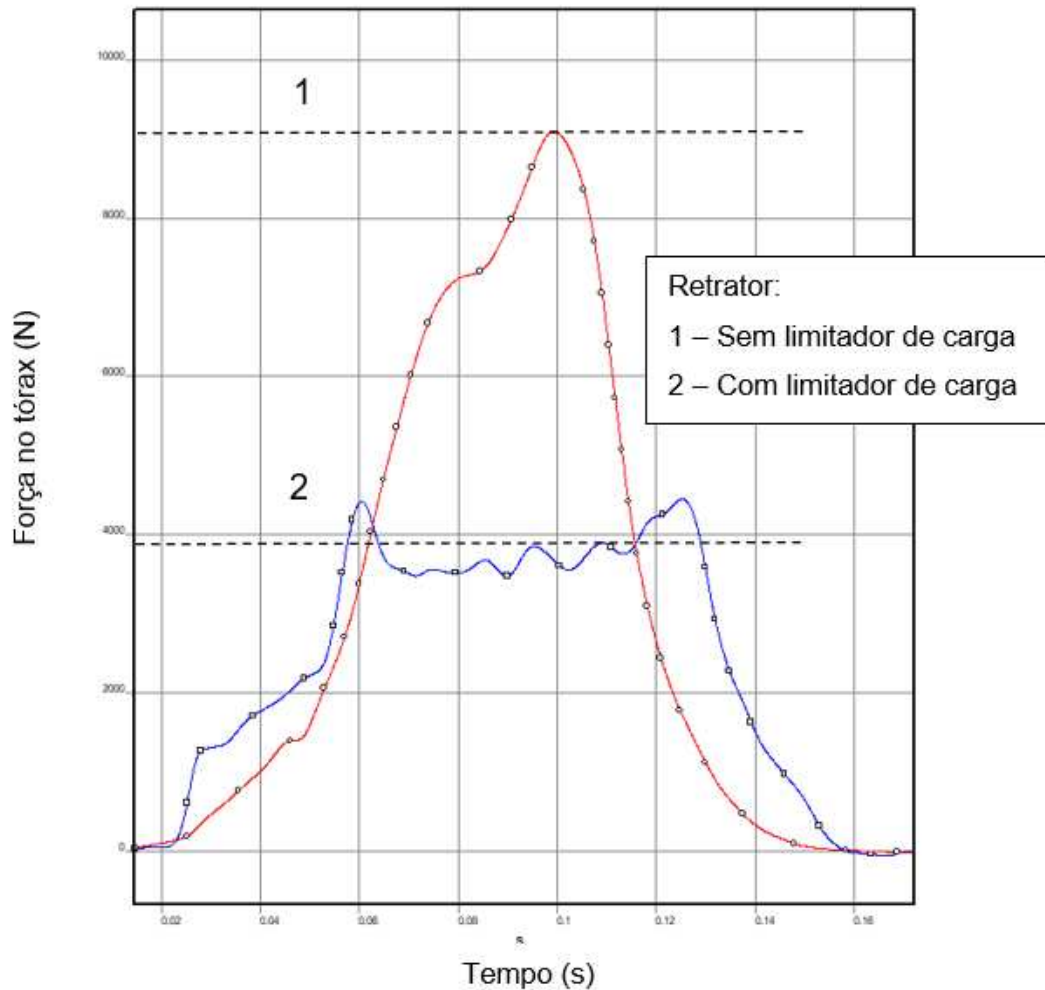


Figura 17 - Gráfico de força aplicada no tórax em retratores com e sem limitador de carga.

Fonte: Próprio Autor.

Em caso de um acidente, o sistema deve atuar em frações de segundo e seu funcionamento depende de diferentes componentes com diferentes tipos de matérias-primas para manter a integridade do passageiro no veículo.

4 DESENVOLVIMENTO DE CINTOS DE SEGURANÇA COM MANUFATURA ADITIVA

O desenvolvimento de sistemas de segurança veicular do tipo cinto de segurança deve atender severos requisitos para cada fase do projeto. Construção de protótipos para testes e análise de montagens, avaliação das propriedades físicas e realização de ensaios de teste.

Neste capítulo é dada uma abordagem nas fases do projeto de desenvolvimento de um sistema de cinto de segurança veicular para apresentar uma correlação entre os requisitos de cada fase com a tecnologia de MA que pode ser empregada.

4.1 Fases de Desenvolvimento de Sistemas de Segurança Veicular

Para diferentes seguimentos da indústria existem uma variedade de metodologias para o gerenciamento do desenvolvimento de um produto. Em setores de autopeças o APQP (Planejamento Avançado da Qualidade do Produto) é o mais usual, é referência de gestão da pesquisa e desenvolvimento de produto (TOLEDO *et al.*, 2008).

A sua função é definir uma sequência lógica as atividades que devem ser cumpridas em determinadas fases do processo de desenvolvimento do produto aplicando as ferramentas e técnicas descritas no tempo correto. O APQP não elimina os cronogramas de planejamento de projeto, complementa-os informando as atividades e processo a ser executada em cada fase para alinhar as informações entre fornecedor e cliente, como pode ser visto na Figura 18

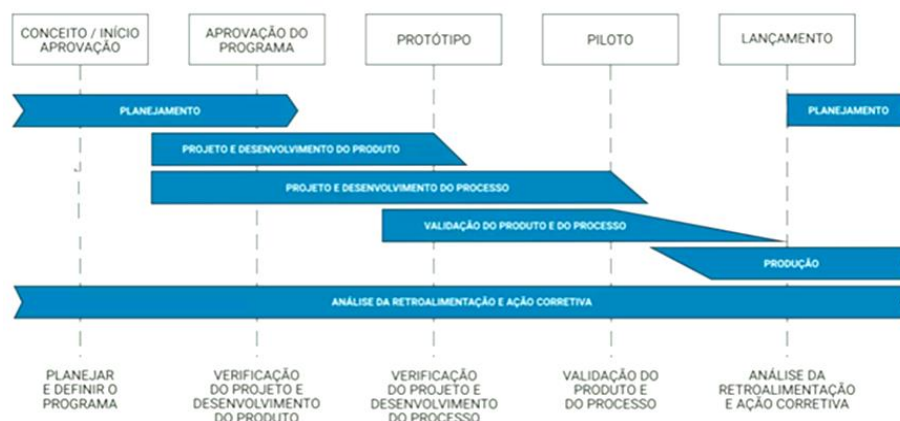


Figura 18 - Fases do Desenvolvimento de um sistema de segurança veicular.
Fonte: AIAG - Automotive Industry Action Group (2008).

A primeira fase é o de planejamento no qual são realizados estudos do projeto de novo produto.

Na segunda fase tem-se a conclusão do projeto do produto. As principais etapas que devem ser concluídas são: revisão e verificação de projeto do produto, especificações de materiais, potenciais modo de falha e planos de controle para construção dos protótipos do produto.

Na terceira fase conclui-se o planejamento do processo de fabricação que produzirá o produto. O objetivo é executar estudos do processo de produção para atender as especificações, qualidade e custos. O processo deve ser capacidade produtiva em atender a demanda do cliente.

A quarta fase é uma fase de teste do produto e de todo o processo de fabricação. É certificada a eficiência e a confiabilidade do projeto e do processo produtivo.

Na quinta e última fase é a produção e entrega do produto em escala produtiva.

Mesmo com a aplicação desta metodologia consolidada, qualquer tipo de projeto de inovação está exposto a incertezas e riscos (JALONEN, 2012). Para reduzir os possíveis riscos nas diferentes fases no processo de MA são realizadas construções de protótipo físico real que permitem análises das características de cada peça (WILTGEN, 2019), em muitos casos representando o produto final tornando o processo de desenvolvimento mais ágil e assertivo reduzindo significativamente as incertezas e viabilidade.

4.2 Construção de Protótipos de Desenvolvimento Técnico

Um protótipo é a denominação dada a uma peça em desenvolvimento que possui determinadas características para atender a uma determinada fase do processo de desenvolvimento. Assim sendo, pode ser aplicado para estudos de forma, avaliação funcional, análise dos processos de fabricação, o que de fato é fundamental, pois permite uma avaliação adequada antes do processo de manufatura contínuo e definitivo (WILTGEN, 2019; ALCALDE; WILTGEN, 2018).

Durante o processo de desenvolvimento de uma peça são gerados diversos protótipos, os quais são exaustivamente testados e aprimorados, até que finalmente atendam todos os requisitos impostos pelo projeto para que possam ser desenvolvidos como um produto.

Com a evolução da MA nos últimos anos tornou capaz a utilização de diferentes tecnologias o que possibilita encurtar a construção de protótipos físicos reais, e a união da MA com as técnicas de Engenharia de Sistemas & Requisitos (ESR) na análise do problema (Domínio do Problema), permite o desenvolvimento baseado na maturidade tecnológica (*TRL – Technology Readiness Level*) e no desenvolvimento de diversas opções técnicas (Domínio da Solução) que podem ser construídas na forma de protótipos físicos reais e devidamente experimentadas e testadas (DoD, 2001; INCOSE, 2015; WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2020A, WILTGEN, 2020B, WILTGEN, 2021A; WILTGEN, 2021B).

A prototipagem rápida acelera o desenvolvimento de projetos, quase sempre é baseado na confecção de peças em material similar ou o mesmo material no qual será desenvolvido o projeto. É, sem dúvida, uma fase importante e imprescindível no desenvolvimento de novos produtos e técnicas na indústria e na academia. Não é diferente na indústria automotiva no desenvolvimento de sistemas de segurança veicular. Identificar problemas em protótipos é muito importante no processo de desenvolvimento de uma peça e possibilita a correção das peças com baixo custo se comparado com a necessidade de modificação de uma peça em fase de produção (WILTGEN, 2019).

Para decidir o tipo de tecnologia de MA que deve ser utilizada para a construção do protótipo deve considerar os objetivos, características e requisitos do produto a ser prototipado. Os critérios mais relevantes são (JUNIOR *et al.*, 2015):

- *Propósito: é a razão pela qual o protótipo deve ser construído, no caso de se submeter a muitos ensaios a tecnologia da MA deve atender as características mecânica do produto, porém se o objetivo é avaliação estética, deve considerar as diferentes tecnologias de MA em função da variação do acabamento superficial;*
- *Material: a variedade de tecnologias de MA é capaz de produzir uma quantidade de diferentes polímeros, metais e cerâmicas para a construção do protótipo;*
- *Dimensão: é um aspecto que considera a geometria do protótipo a ser construído. Algumas tecnologias de MA possuem restrição de tamanho da mesa da máquina além disso o impacto em custo e tempo de fabricação;*

- *Custo de Fabricação: o recurso financeiro para a confecção de um protótipo de desenvolvimento é um aspecto fundamental para a decisão da tecnologia a ser adotada para a construção do protótipo;*
- *Prazo de Fabricação: é um fator que considera o tempo necessário para a construção do protótipo;*
- *Detalhamento: existem protótipos que são complexos com muitos detalhes geométricos e para isso é necessário avaliar as tecnologia e processos de prototipagem com potencial para atender este requisito;*
- *Acabamento Superficial: é um fator que deve ser considerado em caso para avaliação estética, deve considerar as diferentes tecnologias de MA pois o acabamento superficial.*

Durante o desenvolvimento de uma peça existe diferentes fases com diferentes necessidades de protótipo, existe a etapa que é exclusivamente mental, porém a validação do conceito é exclusivamente física e a aplicação da tecnologia de MA para a construção de protótipos é fundamental (WILTGEN, 2019; AMORIM, 2013).

Na fase 2 e 3 do APQP existe a etapa de geração de ideias e definição da necessidade que o novo produto deve atender, inicia-se o projeto em CAD (*Computer Aided Design*), que é elaborado a modelagem do projeto, as quais passam por diversas avaliações e simulações, como interferências mecânicas, estudo de cadeia de tolerâncias por exemplo.

Na sequência são realizados os estudos de CAE (*Computer Aided Engineering*), que são as análises de elementos finitos com o carregamento das propriedades físicas da peça em desenvolvimento e das solicitações de cargas baseadas nos requisitos de sua aplicação, nesta etapa são construídos os protótipos digitais em 3D (SILVA, 2013; SOUZA; MOREIRA; PAULA, 2019).

Com a finalização e aprovação do protótipo digital em 3D, inicia-se a construção do protótipo físico real para complementar as limitações das análises obtida por simulações computacionais e as diversas variáveis ambientais que são imprevisíveis e só podem ser medidas e confirmadas em uma peça física. Além disso podem ser realizadas montagens e manuseios ergonômicos (WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021A).

E por fim existem tipos de peças que devido a sua aplicação e seu plano de ensaios para os testes (WILTGEN, 2020) é necessário a produção de pequenos lotes

com suas características físicas de projeto (técnica de processo e tipos de matéria-prima), são os protótipos finais, que pode se encontrar na fase 4 do APQP.

Uma das possibilidades para obter as peças protótipos é a construção de um molde híbrido, agiliza todo o processo e reduz drasticamente o custo do projeto. Esta pesquisa enfatiza esta fase do projeto, que é o momento de construir um projeto robusto para que as peças de protótipo funcional possuam uma qualidade geométrica adequada.

Na Figura 19 é possível observar o fluxograma do processo de desenvolvimento de uma peça com ênfase da aplicação dos diferentes tipos de protótipos para cada fase do APQP.

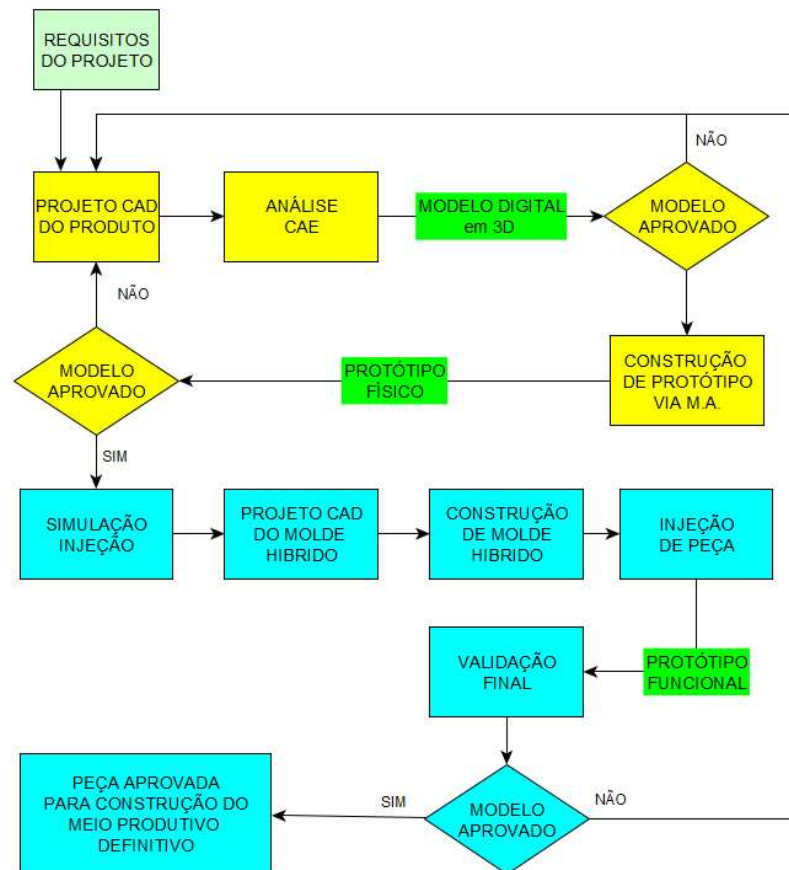


Figura 19 - Fluxograma do processo de desenvolvimento de protótipos.

Fonte: Próprio Autor.

Com a aplicação cada vez mais comum da MA para a construção de protótipos é possível materializar as ideias candidatas a soluções para o entendimento dos clientes, proporcionando análise dos protótipos.

Para o desenvolvimento de um protótipo voltado a análise de conceitos a técnica de Modelagem por Deposição Fundida (FDM - *Fused Deposition Modeling*) é recomendada, por se tratar do método de menor custo e maior facilidade operacional.

Existem alguns desafios com relação ao acabamento superficial das peças produzidas, é possível perceber a existência de marcas dos filamentos depositados ou marcas dos degraus de deposição, isso se deve a qualidade na resolução da fabricação com relação ao tamanho de cada camada de impressão 3D, e a forma geométrica escolhida para a fabricação da peça (ARAÚJO, 2019).

Busca-se a construção de um protótipo com as características geométricas e de material similar ao produto, em cintos de segurança veicular existem várias peças produzidas em polímeros e uma tecnologia de MA que pode atender esse desenvolvimento é a técnica de impressão 3D por Jateamento de Material (JM).

A aplicação da tecnologia de manufatura por Jateamento de Material (JM) se mostra eficiente em projetos que exigem avaliação funcional da peça. Na Figura 20 é possível observar o desenvolvimento de um retrator de cinto de segurança, na Figura 21A modelo em CAD 3D e na Figura 20B protótipo produzido em resina.

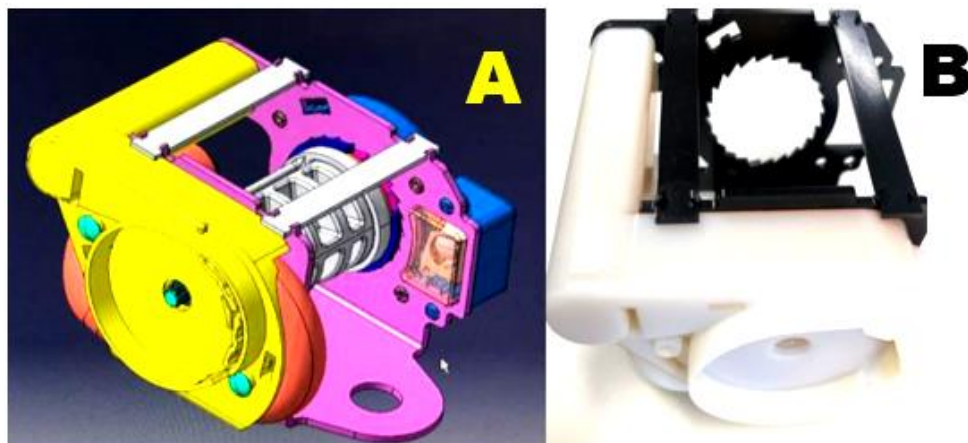


Figura 20- Projeto desenhado em CAD (A) e o protótipo construído via MA (B).
Fonte: Próprio Autor.

Protótipos construídos via MA por JM possibilita a avaliação funcional da peça. Entretanto, não é possível realizar as avaliações mecânicas e térmicas.

Para o desenvolvimento de peças de sistemas segurança veicular do tipo cinto de segurança é imperativo a construção de protótipos funcionais com as características idênticas da peça original, é parte fundamental para a análise de tensões e fadigas mecânicas que podem surgir em ensaios e testes realizados em ambiente controlado realizado em laboratório (*DT&E – Development Test & Evaluation*) e em ambiente relevante realizado em campo (*OT&E – Operational Test & Evaluation*) como parte integrante do procedimento de testes (*RTD&E – Research, Development, Testing, and Evaluation*) (WILTGEN, 2021A).

As principais matérias-primas aplicadas no sistema de cintos de segurança são de chapas de metais, tecidos e polímeros que se transformam em peças com processos de estamparia, tratamento térmico, tecelagem e injeção. Diante desta diversidade, os componentes que possuem maior dificuldade em produzir protótipos são os de polímeros em decorrência da complexidade do processo produtivo e os meios de produção que são as injetoras e os moldes mecânicos.

5 MOLDES MECÂNICOS CONSTRUÍDOS VIA MANUFATURA SUBTRATIVA

A injeção de polímeros é um dos processos de fabricação mais tradicionais para produzir peças de plástico simples ou complexas e sempre idênticas, que está presente na indústria de transformação a muito tempo. Suas principais características são, a velocidade de produção, aliada a possibilidade de construção de peças relativamente complexas com boa precisão e acabamento superficial, além do baixo custo quando destinado para a produção em grande escala (HARADA; UEKI, 2012).

Os polímeros são aplicados como matéria-prima deste processo e com o crescentes número de pesquisas realizadas, possibilitou a evolução de suas propriedades mecânicas proporcionando o aumento de sua aplicação em vários seguimentos com a substituição de peças metálicas que possuem maiores densidades e processo de produção mais custoso, desta maneira, a manufatura formativa está numa crescente e importante forma de produção mundial de peças (ALBA *et al.*, 2020; MARQUES *et al.*, 2015; SILVA, 2009; TUTESKI; KOČOV, 2018).

O molde mecânico é o principal sistema do processo de injeção e as suas características influenciam na produtividade e qualidade da peça manufaturada. Para cada tipo de peça a ser injetada é necessário a construção de um novo molde mecânico que se destacam como uma importante ferramenta no processo de fabricação (BARETA, 2007; DOMINGUES, 2015; HARADA, 2004; MARQUES *et al.*, 2015).

A complexidade em projetar e construir um molde é enorme, se trata de uma ferramenta que tem objetivo de produzir a peça desejada através da injeção de material fundido que preenche as suas cavidades, as quais possuem a geometria do componente injetado (DE BLASIO, 2007; HARADA, 2004).

Devido ao seu alto custo de construção, geralmente, os moldes mecânicos são aplicados na produção em larga escala para amortizar o investimento, podem ser projetados com múltiplas cavidades para ser extremamente produtivos, pois quanto mais cavidades maior a quantidade de peças produzidas por ciclo e com isso, aumenta a sua produtividade e conseqüentemente diminui o custo da peça produzida.

Os moldes mecânicos possuem características comuns que servem como referência para projeto, conforme pode ser visto na Figura 21.

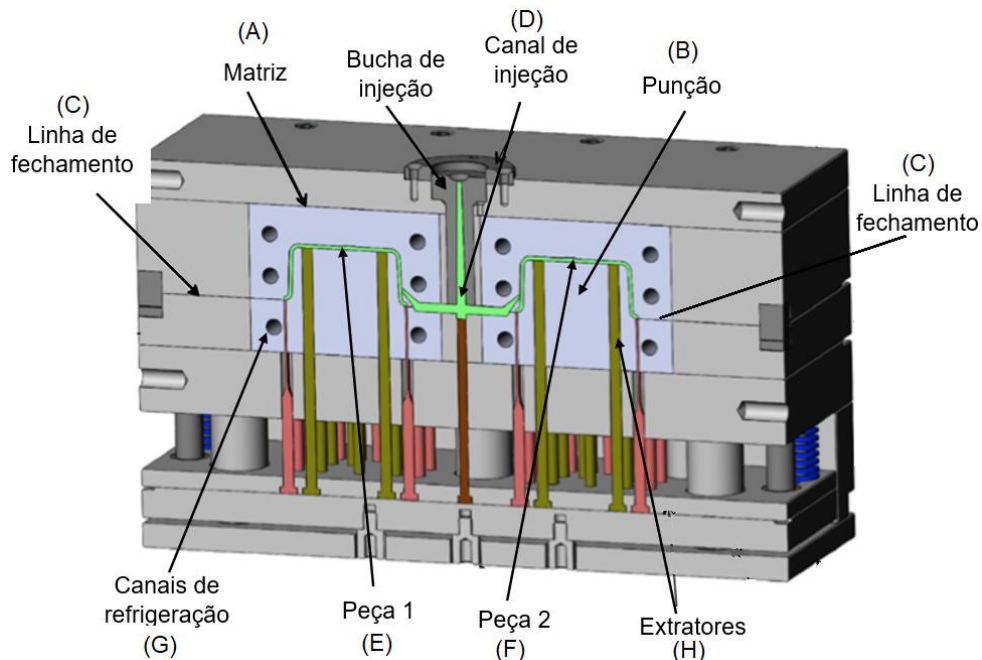


Figura 21 - Principais componentes de um molde de injeção de duas cavidades.

Fonte: Adaptado de Rasmussen, 2020.

Os projetos de moldes mecânicos de injeção plástica proporciona uma liberdade em sua concepção, assim permite que o projetista decida qual melhor conceito será aplicado considerando facilidade de construção, usinagem e produtividade. Porém, ao desenvolver um projeto existem características que o engenheiro projetista deve ter em mente ao projetar um molde de injeção:

- *O número de cavidades está relacionado com a capacidade de produção, o item E e F mostra o detalhe de duas cavidades do molde, é a região que possui a geometria que forma o produto, porém, não tem a forma idêntica a peça pois ao final do resfriamento a peça sofre uma redução volumétrica devido a contração no resfriamento da peça;*
- *A parte côncava que possui o formato externo do produto e é denominada de Matriz (A) e a convexa que possui o formato interno do produto, é o Punção (B). Geralmente a Matriz é a metade superior do molde, que fica de frente para o ponto de injeção da unidade de injeção. São as regiões mais solicitada do molde por receberem diretamente o polímero fundido em alta pressão, temperatura e atrito do material, por essa razão é fundamental a escolha adequada do material na sua fabricação (ASHOKKUMAR, 2020; HARADA, 2004);*

- *A face de união das duas metades da cavidade separa a punção e a matriz é chamada de linha de Fechamento (C). A posição e geometria da linha de fechamento está relacionado com o desenho da peça a ser produzida, sendo mais comum estar presente no contorno da peça para facilitar a extração. O contato entre as duas metades do molde deve ser perfeito e uniforme, caso contrário, devido à pressão de injeção do plástico fundido ocorre vazamento pelas imperfeições causando rebarbas no produto injetado (ASHOKKUMAR, 2020; HARADA, 2004);*
- *Outra característica importante do molde de injeção é o sistema de alimentação de material, que é o caminho que percorre o polímero fundido da injetora até que se adentre nas cavidades do molde. É formado pelo canal de injeção (D) que distribui o material para as cavidades, geralmente possui a geometria cilíndrica que se altera em sua extremidade que é o ponto de entrada do material na cavidade (ASHOKKUMAR, 2020);*
- *Em razão do preenchimento das cavidades do molde com polímero fundido a temperatura do molde fica elevada, sendo necessário a construção de canais de refrigeração (G) na região interna do molde para circular líquido refrigerante resfriando as peças mais rapidamente para a sua solidificação e extração do molde. Portanto, para aumentar a produtividade é necessário ter uma geometria de canais de refrigeração bem projetado (GRIES et al., 2021; HATOS; KOCSIS; HARGITAI; 2018; JUNIOR; COSTA, 2019; VOJNOVÁ, 2016; PARK; DANG, 2017; MIRANDA, 2017);*
- *Durante o resfriamento da peça injetada possui a redução volumétrica no tamanho devido a contração do material necessitando do mecanismo de extração (H e B), para possibilitar a ejeção do molde (ASHOKKUMAR, 2020; HARADA, 2004).*

A localização do ponto de injeção deve ser bem definida para que a cavidade possa ser completamente preenchida de maneira uniforme, sem que seja necessária a intervenção em temperatura e pressão desnecessariamente.

5.1 Fluxo de Construção de Moldes Mecânicos

O fluxo para projetar e construir um molde mecânico segue as etapas que podem ser vistas na Figura 22.

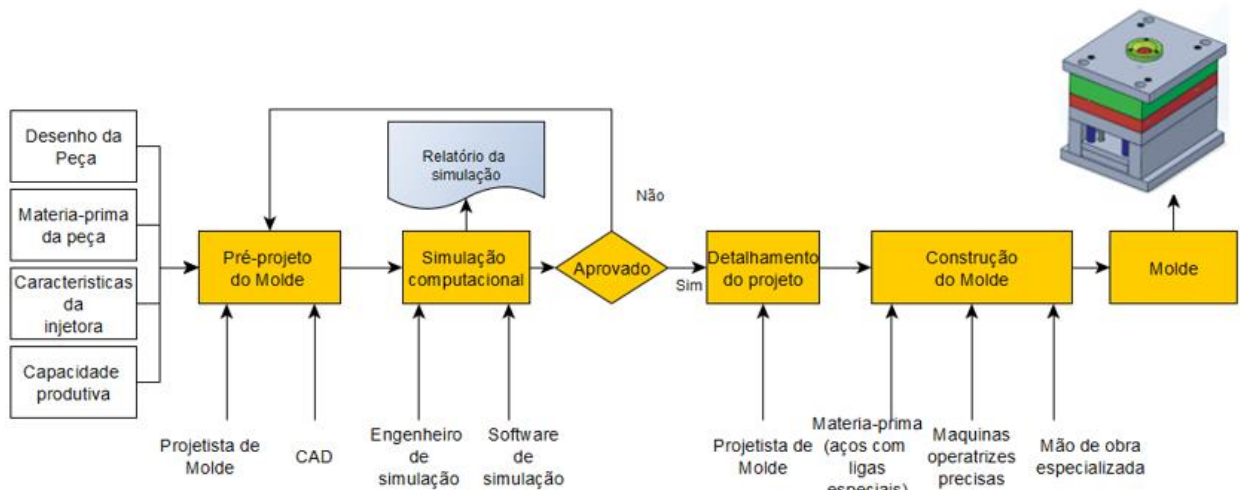


Figura 22 - Fluxo para projetar e construir o molde mecânico.
Fonte: Próprio Autor.

A primeira etapa consiste na construção do pré-projeto do molde, para execução desta atividade é fundamental que os dados de entrada sejam bem definidos, os principais são (ASHOKKUMAR, 2020):

- *O desenho do produto para projetar as cavidades;*
- *A matéria-prima que a peça será produzida;*
- *O acabamento superficial da peça;*
- *A capacidade produtiva desejada do molde para atender a demanda;*
- *As principais características da máquina injetora que deve ser capaz de fundir o polímero em um tempo adequado para preencher as cavidades do molde.*

Logo após finalizado o pré-projeto é recomendado a utilização de ferramentas computacionais de simulação de injeção, existem algumas soluções que contém ferramentas tipo CAE disponíveis que são capazes de realizar a simulação numérica do processo de injeção de termoplásticos, e assim, proporcionar melhores resultados.

As simulações economizam tempo e custo de fabricação identificando possíveis problemas e imperfeições que surgem durante o processo de simulações. Na ausência deste estudo, as falhas do molde são detectadas somente após a finalização da

construção do molde no momento de testá-lo, as falhas mais comuns são produzir peças com bolhas de ar em seu interior, preenchimento incompleto das cavidades, deformações geométricas devido a uma refrigeração inadequada das cavidades e a presença de tensões na peça (DE BLASIO, 2007; GRIES *et al.*, 2021; HARADA, 2004; LOPES; WILTGEN, 2021).

A construção dos moldes mecânicos de forma tradicional é executada por empresas com denominação de Ferramentarias. São equipadas com máquinas operatrizes de manufatura subtrativa de alta tecnologia com alta precisão geométrica e operadas por profissionais técnico, estes recursos impactam diretamente no alto custo do molde.

A matéria-prima aplicada na construção de um molde mecânico é um fator importante para a vida útil e desempenho do molde mecânico. A matéria-prima escolhida é baseada nas características relevantes para cada projeto. As principais propriedades mecânicas a serem observadas são (BARETA, 2007):

- *Facilidade de usinagem para não impactar no tempo de construção e aplicação de ferramentas de usinagem de maior custo;*
- *Capacidade de receber tratamento térmico e atender uma dureza requerida;*
- *Durante o processo de injeção são impostas forças de pressão de injeção e força de fechamento do molde em vários ciclos, portanto, a matéria-prima deve resistir a essas forças;*
- *Boa condutividade térmica uma troca de calor eficiente entre os canais de refrigeração e as matrizes devido ao aquecimento provocada pelo polímero fundido preenchendo as cavidades;*
- *Resistencia a corrosão;*
- *Possuir uma capacidade de não se deformar e trincar para atender a capacidade produtiva desejada;*
- *Estabilidade dimensional.*

O aço liga AISI P20 é um aço amplamente empregado na construção de moldes mecânicos, apresenta bons resultados em relação a resistência ao impacto do material

injetado e propriedades mecânicas, sua composição principal é cromo-níquel-molibdênio (CrNiMo) (CORAZZA, 2012; MIRANDA, 2017).

Um dos maiores desafios construtivos de moldes mecânicos convencionais são os canais de refrigeração, é vital para o bom desempenho do molde mecânico, porém, canais de refrigeração fabricados via manufatura subtrativa nem sempre são eficientes por não resfriar o molde adequadamente e conseqüentemente a peça de forma uniforme. Isso se deve apenas pelas inúmeras limitações que a manufatura subtrativa possui (BROTAN; BERG; SORBY, 2016; DIMLA *et al.*, 2018; FENG; KAMAT; PEI, 2021; SHAYFULL *et al.*, 2013).

5.2 Processo de Injeção em Moldes Mecânicos

O processo de injeção é classificado como manufatura formativa, este método de produção de peças não é simples, sua viabilidade técnica só é possível com uma interação correta entre a máquina injetora, o molde mecânico e a matéria-prima da peça.

A principal propriedade física dos polímeros que proporciona a sua aplicação no processo é a transformação o estado físico de sólido para viscoso quando aquecidos. Ao se resfriar voltam ao estado físico sólido que permitem fabricar complexas formas geométricas, porém, para cada tipo de polímero se comporta de forma diferente (HARADA, 2004; JUNIOR, 2019).

Cada peça produzida por este processo segue uma sequência de etapas chamada de ciclo de injeção que acontece no interior da máquina injetora. Na Figura 23, pode ser observado o seguinte: o polímero que se encontra na forma de grãos sólidos é inserido na injetora através do funil, e por meio de aquecimento gerado por resistências elétricas o material vai se fundindo ao se deslocar pelo canhão, até atingir o estado viscoso.

Ao chegar no final do percurso do canhão da máquina o polímero fundido é inserido na cavidade do molde e mantido sob pressão para eliminar os vazios da cavidade e garantir o dimensional da peça, o molde é resfriado por um sistema de refrigeração até que a peça se resfrie e solidifique, e por fim, o molde abre e a peça é extraída do molde, assim o processo inicia outro ciclo de maneira automatizada e continua (ALBA *et al.*, 2020; ASNAFI *et al.*, 2020; BARETA, 2007; DE BLASIO, 2007;

DOMINGUES, 2015; HARADA, 2004; FRANCELINO *et al.*, 2019; LOPES; WILTGEN, 2021; MARQUES *et al.*, 2015).

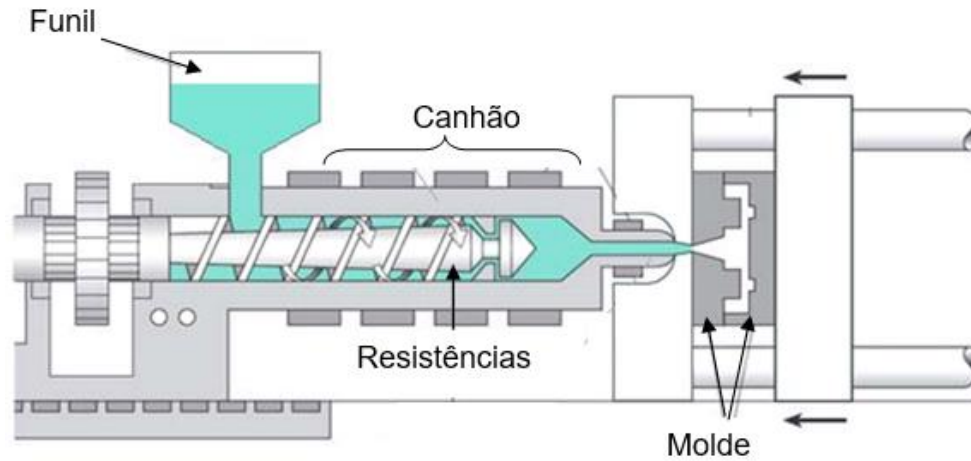


Figura 23 - Figura em corte de uma máquina injetora.

Fonte: Adaptada de FER-PLASTIC (2016).

No decorrer do ciclo completo de fabricação, como pode ser visto na Figura 24, os principais parâmetros são a temperatura de plastificação do polímero, a pressão de injeção do material fundido na cavidade do molde, temperatura de resfriamento do molde e o tempo de duração de cada um destes parâmetros. Esses parâmetros devem ser bem controlados para que a qualidade da peça produzida fique de acordo com o especificado, a fase mais crítica para a vida útil do molde híbrido é o instante do aumento da pressão e temperatura que ocorre na fase de compressão.

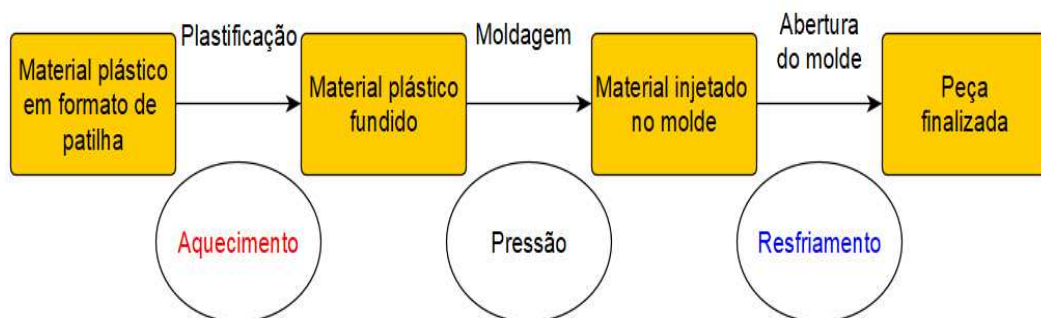


Figura 24 - Principais parâmetros no processo de fabricação de polímeros.

Fonte: Próprio Autor.

Considerando que o tempo das etapas é um dos principais parâmetros no ciclo de injeção, na Figura 25 pode ser visto o tempo aproximado para cada uma das etapas do ciclo de injeção (ASHOKKUMAR, 2020; DE BLASIO, 2017; MIRANDA, 2017).

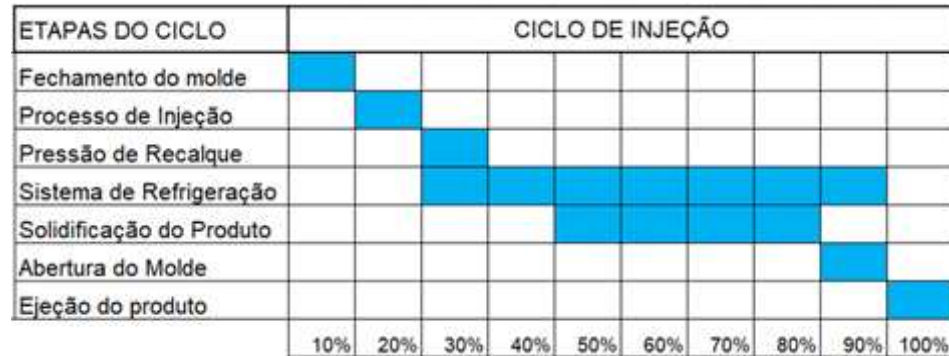


Figura 25 - Tempos em percentual de cada uma das etapas de um ciclo de injeção.

Fonte: Adaptada de MIRANDA, 2017.

Os parâmetros de injeção não são constantes, variam em função da geometria da peça, o projeto do molde, tipo de máquina injetora e matéria-prima utilizada (BARETA, 2007; MIRANDA, 2017).

As principais variáveis dos de processo são:

- *Velocidade de injeção: é a velocidade que o material fundido preenche a peça;*
- *Taxa de resfriamento: é o tempo de resfriamento da matéria-prima;*
- *Pressão de recalque: é a pressão aplicada após o preenchimento da cavidade, durante a resfriamento e solidificação da peça, contribui para manter a geometria da peça precisa;*
- *Temperatura da matéria-prima fundida: é a temperatura de injeção da matéria-prima;*
- *Temperatura de injeção: é a temperatura que a matéria-prima a ser injetada se encontra no início do processo de injeção;*
- *Pressão de injeção: a pressão que o material fundido recebe durante o preenchimento das cavidades do mole;*
- *Temperatura do molde: é a temperatura das paredes do molde durante a injeção;*
- *Tempo de resfriamento: tempo necessário para resfriar a peça para ser possível extrai-la do molde;*

- *Força de fechamento: é a força que a injetora exerce sobre as partes do molde para manter o molde fechado.*

As peças injetadas possuem qualidade física e geométrica somente quando todos estes parâmetros estão corretamente definidos, cada um deles são responsáveis por um diferente modo de falha quando aplicado inadequadamente, isso torna um processo de injeção extremamente complexo.

Mediante o exposto, a complexidade exigida no processo de injeção proporciona ao molde mecânicos uma alta dificuldade construtiva quando aplicado somente recursos da manufatura subtrativa, porém, incorporando a manufatura aditiva é possível incorporar vantagens técnicas e econômicas. Moldes mecânicos no qual são utilizadas as manufaturas aditiva e subtrativa são classificados como moldes híbridos.

6 MOLDES MECÂNICOS HÍBRIDOS CONSTRUÍDOS VIA MANUFATURA ADITIVA E MANUFATURA SUBTRATIVA

O processo tradicional para a manufatura de peças em polímeros fabricados via manufatura formativa utiliza moldes mecânicos de injeção produzidos em metais usinados por manufatura subtrativa.

O fluxo no desenvolvimento de um novo produto quase sempre segue “projetar, construir e testar”. Técnicas consagradas em desenvolvimento em engenharia.

Em desenvolvimento de novos produtos sempre precisa de protótipos (WILTGEN, 2019). Em sistemas de cinto de segurança veiculares não é diferente.

Um sistema de cinto de segurança veicular é constituído por diversos componentes em polímero necessitando de diversos moldes mecânicos para a produção das peças via manufatura formativa.

Para um molde protótipo de única cavidade, fabricado via manufatura subtrativa, possui elevado custo em tempo e financeiro.

Com o propósito de reduzir custos de moldes mecânicos a união das manufaturas aditiva e subtrativa tem se mostrado inovadora e eficaz. O desenvolvimento de moldes mecânicos com diferentes opções construtivas, são os chamados de moldes mecânicos híbridos.

A parte do molde mecânico que demanda maior cuidado na construção é a cavidade moldante (matriz e punção), que passam a ser produzidas via MA, podendo ser empregado diferentes técnicas e matérias-primas de resinas ou ligas metálicas. A escolha desta tecnologia depende do objetivo do molde mecânico a ser fabricado (LOPES; WILTGEN, 2021; WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2021A; ALCALDE; WILTGEN 2019; GOMES; WILTGEN, 2020).

Na Figura 26 é possível ver o conceito de fabricação de um molde mecânico híbrido para a aplicação em manufatura formativa. O porta molde é construído com o método de MS e as cavidades moldantes são fabricadas em MA.

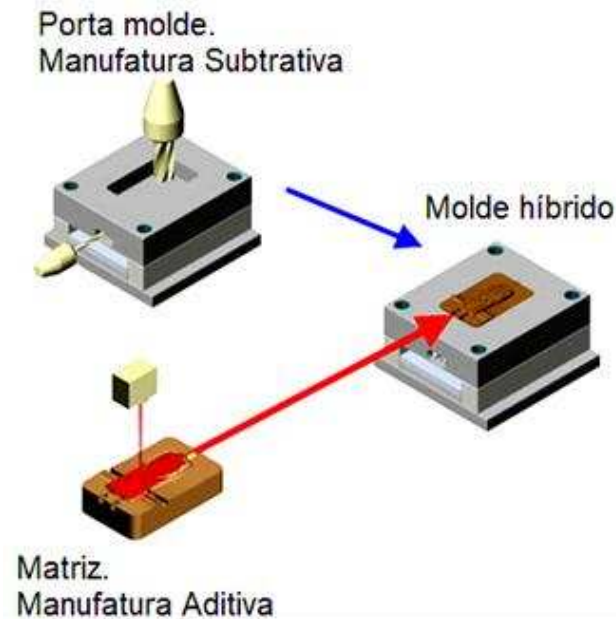


Figura 26- Conceito de fabricação de um molde mecânico do tipo híbrido.

Fonte: Adaptado de Martinho, 2010 e Domingues, 2015.

A construção de moldes mecânicos híbridos é uma técnica relevante na indústria que produz peças em polímeros, pois proporciona benefícios em relação ao uso exclusivo da manufatura subtrativa convencional (FOGGIATTO, 2005; TUTESKI; KOČOV, 2018; UDROIU; BRAGA, 2017). Este método oferece vantagens significativas, tais como:

- *Menor custo em tempo de fabricação;*
- *Menor custo financeiro de fabricação;*
- *Velocidade em modificar o molde mecânico devido a reprovações em testes;*
- *Disponibilidade de peças para validações e pré-série;*
- *Redução no tempo de projeto do molde mecânico;*
- *Construção de moldes mecânicos mais eficientes.*

A técnica de unir a manufatura aditiva com a manufatura subtrativa, e assim aproveitar o melhor das duas técnicas no desenvolvimento de moldes mecânicos híbridos é a base desta pesquisa científica, atendendo a necessidade de produção de pequenos lotes de peças e reduzindo significativamente os prazos no desenvolvimento dos projetos.

6.1 Tipos de Moldes Mecânicos Híbridos

Os tipos de moldes mecânicos híbridos estão condicionados ao seu objetivo. A aplicação de diferentes tecnologias de MA e matéria-prima influencia diretamente na vida útil e o custo do molde mecânico, portanto em caso de um protótipo de molde mecânico híbrido para atender a fabricação de poucas peças, deve ser utilizada MA em resinas. Entretanto, se forem fabricadas muitas peças, ou seja, alta produção, devem ser utilizadas a MA em metais.

Para moldes mecânicos híbridos as tecnologias que mais se destacam são: Sinterização Seletiva a Laser (SSL ou SLS) e a Sinterização de Metal por Laser (SML ou DMLS) (GOMES; WILTGEN, 2020; HATOS, 2018; RAMYA; VANAPALLI, 2016).

A tecnologia DMLS é um tipo de MA que fabrica as peças em metal (aço Maraging MS1® e aço inoxidável EOS CX®) e são recomendados para aplicações em moldes mecânicos que necessitam de dureza ~57 HRC, e com acabamento superficial de 0,8 μm Ra (ASHOKKUMAR, 2020; EOS - *Electro Optical Systems*, 2017).

Moldes mecânicos híbridos construídos em metal tem como principal diferencial a facilidade e velocidade em construir cavidades com geometria complexas, e que proporcionam o aumento de produtividade devido a construção de canais de refrigeração eficientes, os chamados de canais conformados (ramificados e capilares), que acompanham o formato da peça a ser fabricada, conforme pode ser visto na Figura 27 (ALCALDE; WILTGEN, 2019; TUTESKI; KOČOV, 2018; WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2021A).

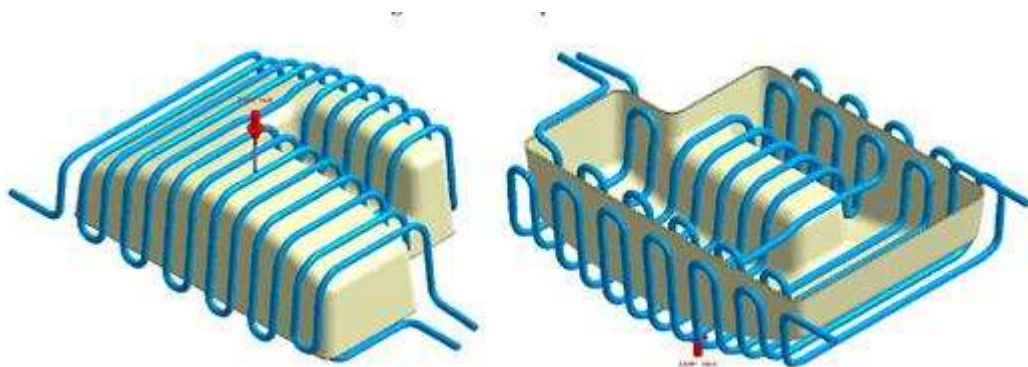


Figura 27 - Canais de refrigeração conformados construídos com MA.

Fonte: Adaptada de ALBA *et al*, 2020.

Em MS não é possível construir canais que acompanhem o formato das cavidades dos moldes mecânicos. Para tanto são usinados furos lineares para refrigeração devido a limitação construtiva. A necessidade de utilizar tampões torna a

troca de calor ineficiente, é podem causar nas peças injetadas tensões mecânicas, e trincas devido o resfriamento da peça de forma desigual.

No método Jateamento de Material (JM) existem limitações que podem ser avaliadas em simulações computacionais.

6.2 Simulação Computacional em Moldes Mecânicos

Programas de simulação computacional de moldes mecânicos é um recurso eficaz na análise dos complexos fenômenos físicos presentes na manufatura formativa.

O objetivo da realização de simulações é a possibilidade de prever falhas e erros de projeto na fase inicial, em uma etapa que impacta pouco no investimento do projeto.

Os programas de simulação não eliminam a necessidade de análise do projeto de moldes mecânicos, materiais ou processo, porém auxiliam na verificação dos projetos, proporcionando maior flexibilidade e assertividade (FERNANDINHO, 2017; NISHIMOTO, 2001).

A simulação computacional é uma realidade quase uma necessidade no setor de autopeças. Similar ao que ocorre com o uso do programa de CAD. A possibilidade da análise digital do processo de injeção é muito importante nesse caso, é sempre indicada para qualquer molde mecânico (LOPES; WILTGEN, 2021).

A ausência da análise de simulação computacional deixa o molde mecânico vulnerável a falhas e erros de projeto que podem vir a ser detectadas somente após a finalização da construção do molde mecânico, ou pior durante a injeção de peças (DE BLASIO, 2007). As falhas nas peças decorrentes de erros de projeto podem ser:

- *Estruturais, com de presença de bolhas de ar no interior da peça produzida e matéria-prima degradada tornando a peça fragilizada;*
- *Geométrica, com a presença de deformação em função da refrigeração inadequada e preenchimento incompleto da peça;*
- *Funcional, que ocasiona a presença de rebarbas.*

Sendo que qualquer uma dessas falhas impactam em modificações de projeto ou mesmo a perda da eficiência do processo de injeção (HARADA, 2004; MANRICH, 2013).

A análise da simulação de injeção exige dados precisos, em especial as propriedades reológicas, térmicas, temperaturas, pressões e condições de resfriamento do polímero a ser verificado. Os programas de simulação possuem um amplo banco de dados das características da matéria-prima necessários para uma boa simulação (NISHIMOTO, 2001).

Baseado no estudo de simulação é possível modificar o projeto digital do molde mecânico (desenho em CAD) ou mesmo, a própria peça, processo produtivo, agregando velocidade ao desenvolvimento do molde mecânico.

Geralmente o processo de simulação segue em três etapas. A primeira etapa é a análise do sistema de injeção que verifica o preenchimento da cavidade e a compactação do material para determinar a melhor estratégia de injeção. A segunda etapa é a avaliação dos sistemas de arrefecimento para determinar a eficiência do sistema de refrigeração do molde mecânico, no qual são obtidos a temperatura, pressão e turbulência do líquido refrigerante, temperatura do molde mecânico e material fundido. A terceira etapa é referente a geometria que pode ser comprometida devido a empenamento da peça. Esta última etapa é praticamente a validação de todas as etapas anteriores. A reprovação da peça por empenamento representa em refazer todas as etapas até atingir o requisito geométrico (FERNANDINHO, 2017).

As informações extraídas nas simulações, são imprescindíveis para a eficiência no processo de fabricação de moldes mecânicos reais, possibilitando que alternativas de melhoria no projeto do molde mecânico ou do produto sejam executadas acelerando os níveis de maturidade tecnológica (TRL - *Technology Readiness Level*) permitindo que um produto seja desenvolvido e comercializado mais rapidamente (WILTGEN, 2021A; WILTGEN, 2021B).

Os protótipos de moldes mecânicos híbridos necessitam de simulações com diferentes objetivos em relação aos moldes mecânicos convencionais. As cavidades moldantes são construídas em resinas como matéria-prima, os programas computacionais de simulação são utilizados como ferramenta de análise do comportamento do processo de injeção das peças para verificar os pontos críticos das cavidades. O foco da análise está na vida útil da matriz, pois existem limitações técnicas provocadas pelos parâmetros do processo de injeção (temperatura, pressão e tempo) que podem comprometer as características geométricas dos moldes mecânicos (LOPES; WILTGEN, 2021; TUTESKI; KOČOV, 2018; VIETEN *et al.*, 2021).

Em moldes mecânicos híbridos que utilizam MA em metais o objetivo é produtividade. Podem ser projetados canais de refrigeração conformados, com uma variedade geométrica que somente a MA permite tornando a refrigeração eficiente.

Em um ciclo de injeção a fase de refrigeração é a que consome maior tempo e a possibilidade de maximizar a cadência produtiva das máquinas de injeção é sempre um objetivo a ser alcançado, ou seja, produzir no menor tempo com qualidade (FERNANDINHO, 2017, TUTESKI; KOČOV, 2018;).

A refrigeração eficiente também contribui com a qualidade das peças, pois mantem a temperatura homogênea em toda a matriz eliminando diferentes pontos quentes na matriz que causam tensões residuais e empenamento, assim proporciona uma melhor qualidade geométrica da peça (ASHOKKUMAR, 2020; GRIES *et al.*, 2021; HATOS; KOCSIS; HARGITAI; 2018; JUNIOR; COSTA, 2019; VOJNOVÁ, 2016; PARK; DANG, 2017; MIRANDA, 2017).

Os canais de resfriamento conformados em MA permitem o acompanhando a cavidade da matriz com geometrias complexas, desprezando a limitação construtiva da MS como pode ser visto na Figura 28 (GRIES *et al.*, 2021; SHINDE, 2017; SHAYFULL *et al.*, 2013).

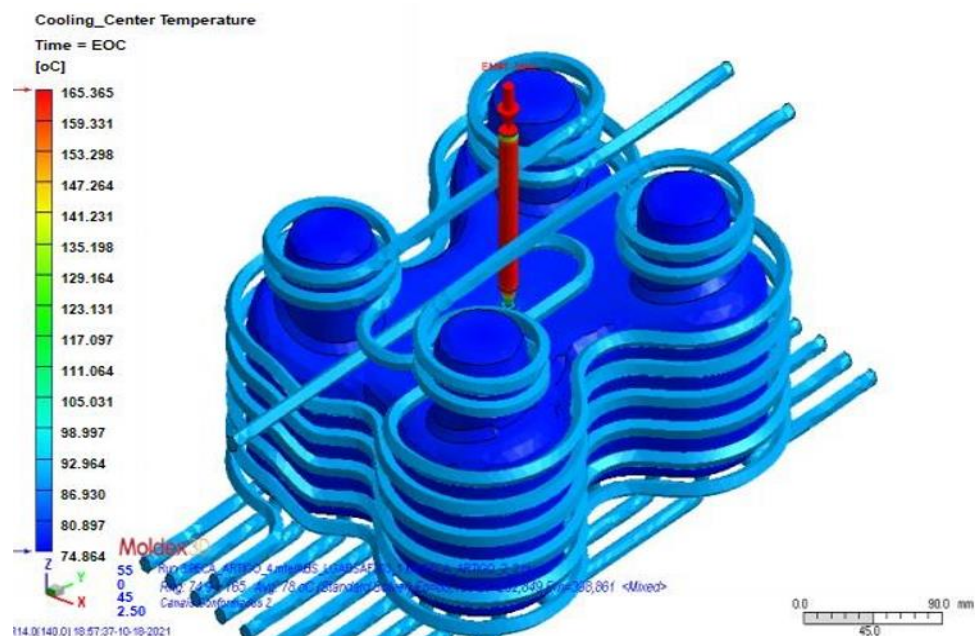


Figura 28 - Simulação de temperatura em canais de refrigeração conformado.

Fonte: LOPES *et al.*, 2021.

O circuito de refrigeração conformado é classificado de acordo com o tipo de conexão entre cada canal, são dos tipos de série ou paralelos, possuirão inúmeras configurações e cada uma apresentará suas particularidades (FENG, 2021).

Canais de resfriamento em série estão conectados em um único circuito da entrada do refrigerante até a saída, é o mais comum (MARQUES *et al.*, 2015). As simulações computacionais são colocadas à prova, um canal de refrigeração em série (Figura 29 - SÉRIE) pode ser muito extenso, quando simulado, pode apresentar problemas como: o aumento da temperatura ao longo da cavidade, podem exigir uma pressão excessiva para garantir a circulação do fluido em todo o circuito, ou mesmo, a refrigeração se restringir ao início. Nesse caso seria interessante construir diversos circuitos em paralelo (Figura 29 - PARALELO) para reduzir a pressão de injeção e melhorar a distribuição do calor (FERNANDINHO, 2017; PARK; DANG, 2012).

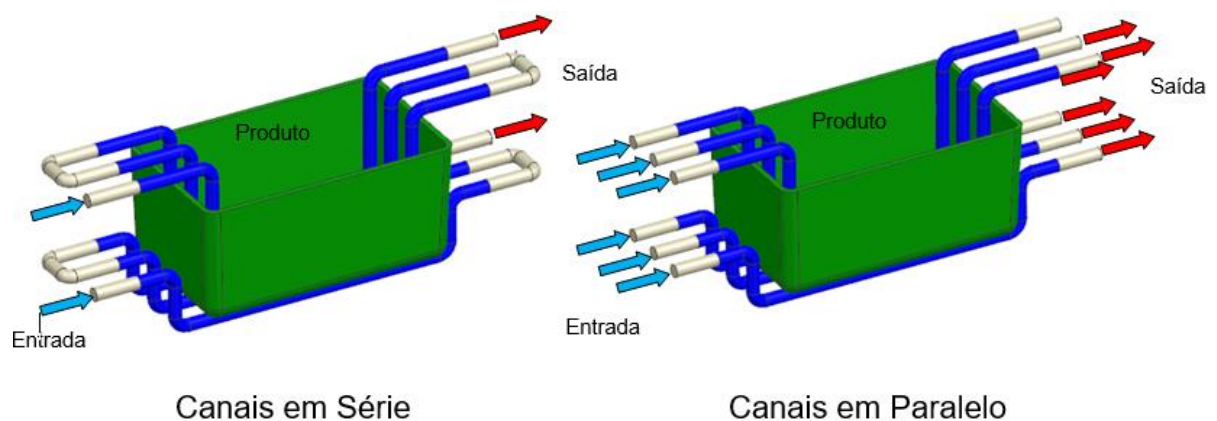


Figura 29 - Canais de refrigeração em série e paralelo.

Fonte: Adaptada de SHINDE, 2017.

A análise permite verificar o número de Reynolds em cada circuito de refrigeração e verificar qual o regime do fluido. A turbulência do líquido refrigerante, é a condição ideal devendo ser da ordem de ~ 10.000 Reynolds. A transferência de calor é maior quando o regime passa de laminar para turbulento, sendo que o regime turbulento aumenta a eficiência do sistema de refrigeração. Na Figura 30 pode ser visto as características dos regimes laminar e turbulento.

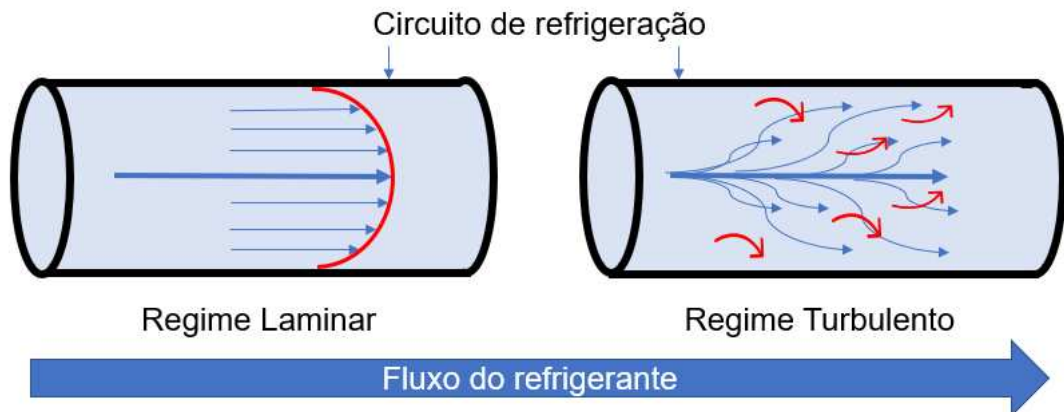


Figura 30- Ilustração de um escoamento laminar (esquerda) e turbulento (direita).

Fonte: Adaptada de FERNANDINHO, 2017.

A flexibilidade que a MA apresenta para o desenvolvimento dos moldes mecânicos híbridos e seus canais de refrigeração geram inúmeras opções de construção, isso faz do processo de simulação computacional importante tornando possível analisar o tipo de construção mais adequada para o produto desejado.

6.3 Processo de Construção de Moldes Mecânicos Híbridos

Os protótipos de moldes mecânicos geralmente são construídos com o objetivo de produzir peças em uma condição idêntica as peças de produção. Construindo esses protótipos de moldes mecânicos em MA evita-se os custos que podem ocorrer nos estágios iniciais do desenvolvimento dos moldes mecânicos.

Para agilizar a construção dos protótipos de moldes mecânicos utiliza-se o método de manufatura subtrativa para a construção do molde mecânico completo, porém as cavidades devem ser de alumínio no lugar de aço para facilitar a usinagem. Mesmo construídos com uma única cavidade, os moldes mecânicos convencionais, tem um tempo de construção que estão relacionados com a complexidade do produto, podendo levar de ~5 a ~12 semanas considerando todas as etapas de construção. Assim sendo, no caso de três reprovações, durante os testes dos produtos o tempo total pode chegar a ~36 semanas (ASHOKKUMAR, 2020).

A Figura 31 é possível ver o tempo de construção de um molde protótipo via manufatura subtrativa com uma única iteração.

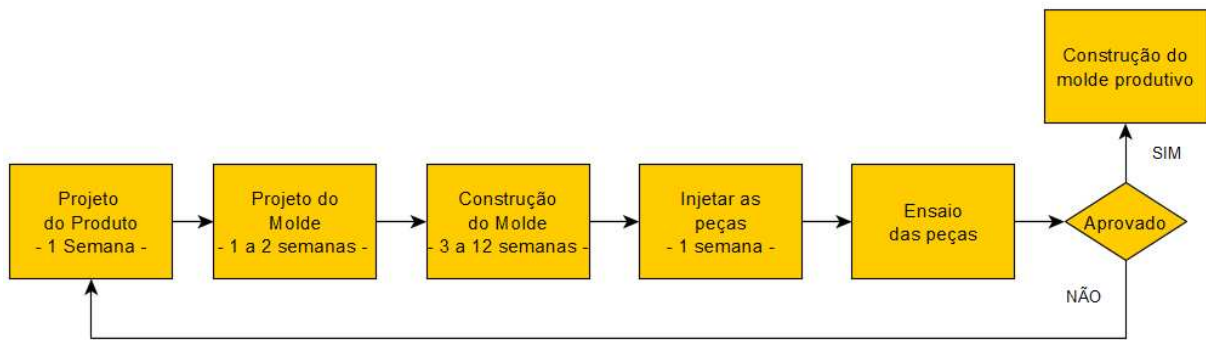


Figura 31 - Fluxo de tempo para produzir uma única iteração.

Fonte: Adaptado de ASHOKKUMAR, 2020.

O processo de desenvolvimento de um produto é iterativo, para cada reprovação nos ensaios de testes necessitam de intervenções no protótipo do molde mecânico até atingir os requisitos desejados no produto em desenvolvimento (GODEC, 2020).

Comparando o tempo do fluxo de construção dos dois métodos, nas fases de projeto, a demora do molde mecânico híbrido é menor, tempo ganho devido a irrelevância da análise do método construtivo do molde com a aplicação da MA, porém, o tempo de construção do molde mecânico é reduzido drasticamente, e assim, reduz o intervalo de teste introduzindo o produto rapidamente para o mercado.

Para implementar a MA na construção do protótipo do molde mecânico híbrido é importante entender os fatores que podem limitar o processo. Outro fator importante é a matéria-prima utilizada na fabricação do produto, considerando que cada tipo de polímero possui propriedades térmicas e mecânicas distintas. Um molde mecânico deve ser capaz de suportar as propriedades do material fundido injetado, caso contrário, o número de peças a ser produzidas é afetado.

No Quadro 4 é possível notar alguns tipos de polímeros que podem ser injetados em moldes mecânicos híbridos separados em grupos de acordo com a dificuldade de processamento. Os polímeros da classe A e B são menos agressivos, o C é pouco mais crítico e os grupos D são os polímeros com carga que são os mais agressivos.

Quadro 4 - Classificação dos polímeros por grau de dificuldade de processamento.

Grupo	Sigla	Nome
A	PE	<i>Polietileno</i>
	PP	<i>Polipropileno</i>
	PS	<i>Poliestireno</i>
	ABS	<i>Acrilonitrila butadieno estireno</i>
	TPE	<i>Elastômero termoplástico</i>
B	PP + G	<i>Polipropileno preenchido com fibra de vidro</i>
	POM	<i>Acetal</i>
	PC + ABS	<i>Mistura de policarbonato-ABS</i>
C	PC	<i>Policarbonato</i>
	POM + G	<i>Acetal preenchido com fibra de vidro</i>
	PA	<i>Poliamida</i>
D	PC + G	<i>Policarbonato cheio de fibra de vidro</i>
	PA + G	<i>Poliamida preenchida com fibra de vidro</i>
	PPO	<i>Óxido de polifenileno</i>
	PPS	<i>Sulfeto de polifenileno</i>

Fonte: Adaptado de GODEC, 2020.

A tecnologia de MA considerada nesta pesquisa para o molde híbrido protótipo é a de jateamento de material (JM). Na Figura 32 é possível observar o fluxo de construção da matriz, que pode ser executado em até dois dias.

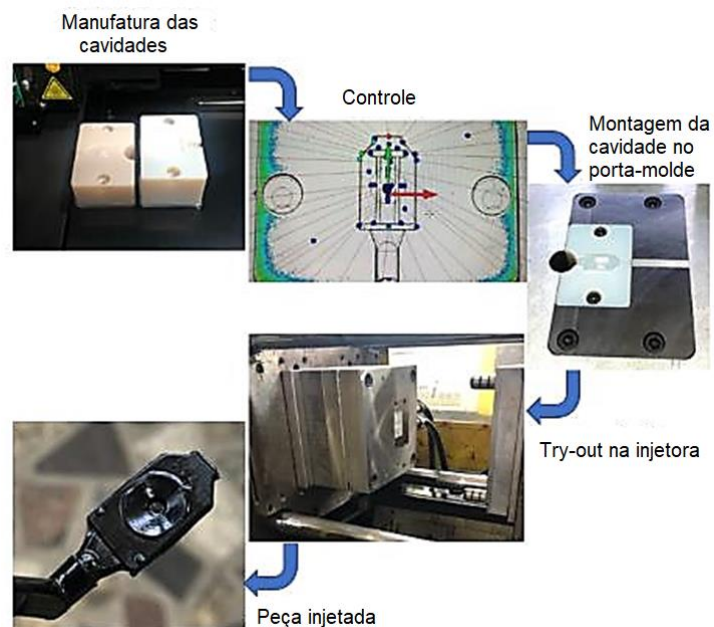


Figura 32 - Fluxo de construção de matrizes para moldes mecânicos híbridos via manufatura aditiva.

Fonte: LOPES; WILTGEN, 2021.

O material para a MA tem o nome de digital ABS, surge da união de duas resinas (RGD-515 e RGD-531) que possuem em suas composições, monômero acrílico, oligômero de uretano, monômero de metacrilato, acrilato de isobornilo, acrilato, acrilato de epóxi e foto iniciador e após a fabricação, a peça possuirá propriedades semelhantes ao polímero do tipo ABS (ABS - Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno) (STRATASYS, 2018).

Após sua mistura, e durante a sua fabricação possibilita construir camadas com espessuras de até 30 μm (trinta micrometros). O uso de matéria-prima em forma líquida, permite obter camadas com pequena rugosidade superficial na cavidade do molde mecânico. Desta forma, a necessidade de tratamento superficial adicional nessas peças é mínima (GODEC, 2020).

Este material possui facilidade de usinagem o que possibilita a construção furos para a sua fixação no porta-molde, alta propriedade mecânica e térmicas, que o tornam adequado para fazer protótipos rápidos de inserções de molde (KUMAR, 2018).

Em comparação com moldes mecânicos fabricados totalmente em aço, possuem menor resistência mecânica, estabilidade e condutividade térmica, causando uma menor durabilidade, com isso é fundamental adotar algumas técnicas no projeto do molde mecânico.

A geometria da peça injetada deve ser previamente analisada antes do projeto, pois o processo de manufatura formativa impõe um conjunto de regras para possibilitar ou produzir peças com qualidade, em se tratando de moldes mecânicos híbridos estas regras se tornam mais severas, dentre essas características geométricas destacam-se:

- *Ângulo de saída: é o nome dado ao ângulo formado entre a face da cavidade da peça e o eixo de abertura do molde mecânico (Figura 33), são necessários em peças produzidas por injeção e deve ser considerado no projeto do produto, a ausência do ângulo de saída dificulta a extração da peça devido ao atrito entre o produto injetado e a face da matriz.*

O ângulo de saída reduz o esforço de extração que pode danificar a matriz impressa em 3D e aumenta sua vida útil, evita que a peça fique riscada ao ser destacada do molde e minimiza a distorção de sua geometria, quanto maior o ângulo de saída menor será a força de extração (JÚNIOR, 2003). Em moldes mecânicos convencionais são recomendados, porém, em moldes mecânicos

com matrizes de resina são primordiais que tenham ao menos um ângulo mínimo de 5° (GODEC, 2020; STRATASYS, 2014);

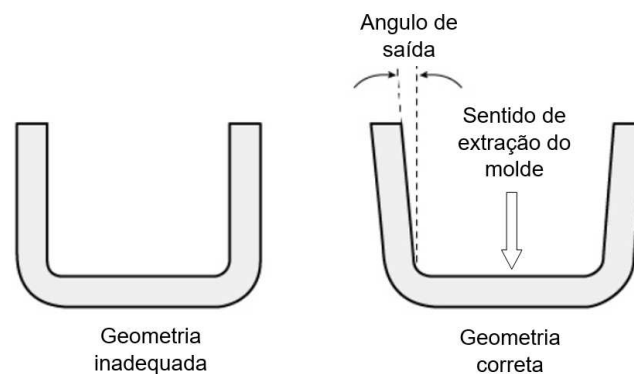


Figura 33 - Ângulo de saída para facilitar a extração da peça.
Fonte: Próprio Autor

- *Espessuras constantes: se possível o desenho do produto deve possuir a espessura constante. Isso colabora para o preenchimento da cavidade e diminui a perda de calor uniforme durante a injeção, evitando falhas de empenamento (DE BLASIO, 2007);*
- *Eliminação ou redução de gavetas: a necessidade de gavetas surge quando existe uma geometria que a extração é negativa, além de aumentar a complexidade do molde mecânico, pode dificultar a construção de matrizes em manufatura aditiva, o uso de elementos móveis, as conhecidas gavetas, pode causar rebarbas devido o atrito com a matriz (VIETEN et al., 2021);*
- *Ressaltos na matriz: durante a injeção a cavidade da matriz é submetida a pressão do polímero fundido, portanto se houver a necessidade de ressaltos, a relação de espessura com altura desse ressalto deve ter uma proporção mínima para resistir a deflexão ou ruptura por cisalhamento (JÚNIOR, 2003);*
- *Sem Revestimentos: A utilização de revestimentos com de nitreto de titânio para aumentar a resistência mecânica nas matrizes produzidas com a manufatura aditiva não são recomendadas devido ao aumento da temperatura durante ao processo de injeção, o que compromete a durabilidade da matriz e pode alterar a dimensão da peça (MARIN et al, 2016).*

A utilização de MA na construção de protótipos de moldes mecânicos híbridos possui muitas vantagens, porém o seu sucesso depende diretamente do projeto. E o devido estudo da técnica deve ser explorado antes da confecção do molde mecânico híbrido.

7 ESTUDO DE CASO

O objetivo deste estudo de caso é apresentar as técnicas utilizadas no processo de injeção em moldes mecânicos híbridos com matriz e punção construídos em resina, destacando a influência das variáveis geométricas e os parâmetros de processo na qualidade da peça moldada.

A pesquisa apresenta as simulações computacionais no qual é possível observar os pontos que podem limitar a produtividade do molde mecânico híbrido em MA.

Foi considerada a construção de um projeto de molde mecânico híbrido e seus testes através da simulação de injeção para análise de possíveis falhas na produção das peças para um lote de ~20 peças.

Os programas computacionais utilizados nas simulações computacionais foram o *CAD NX R11.0* da empresa Siemens para elaboração do modelo digital da peça, e o programa *Moldex3D R16* desenvolvido pela empresa *CoreTech System Co.* utilizando um computador de 64-bit, *Intel Core i-77700HQ* de 2,8 GHz.

A condução do projeto é realizada em Engenharia de Sistemas & Requisitos com a aplicação da técnica modelo em V (WILTGEN, 2020B). No qual é possível notar claramente a importância de considerar as atividades de testes e análises de forma cadenciada durante a elaboração do projeto, ao invés de testá-lo somente no momento da injeção do polímero.

O modelo V descreve o caminho de verificação, teste e validação do produto, de maneira sequencial de execução de atividades, sendo que cada fase deve ser finalizada antes de iniciar a próxima e os testes do produto estão previstos em paralelo com a fase de desenvolvimento.

Na Figura 34 pode ser visto o modelo em V para a execução deste projeto. Na coluna da esquerda estão as características dos requisitos a serem obtidos baseado na aplicação da peça e o processo de produção da mesma e na coluna da direita um plano de teste do sistema (*DVP - Development Verification Plan*). O plano de teste deve focar em atingir a aplicabilidade especificada no levantamento dos requisitos. Entender a aplicação e o processo de produção são fundamentais ao projeto.

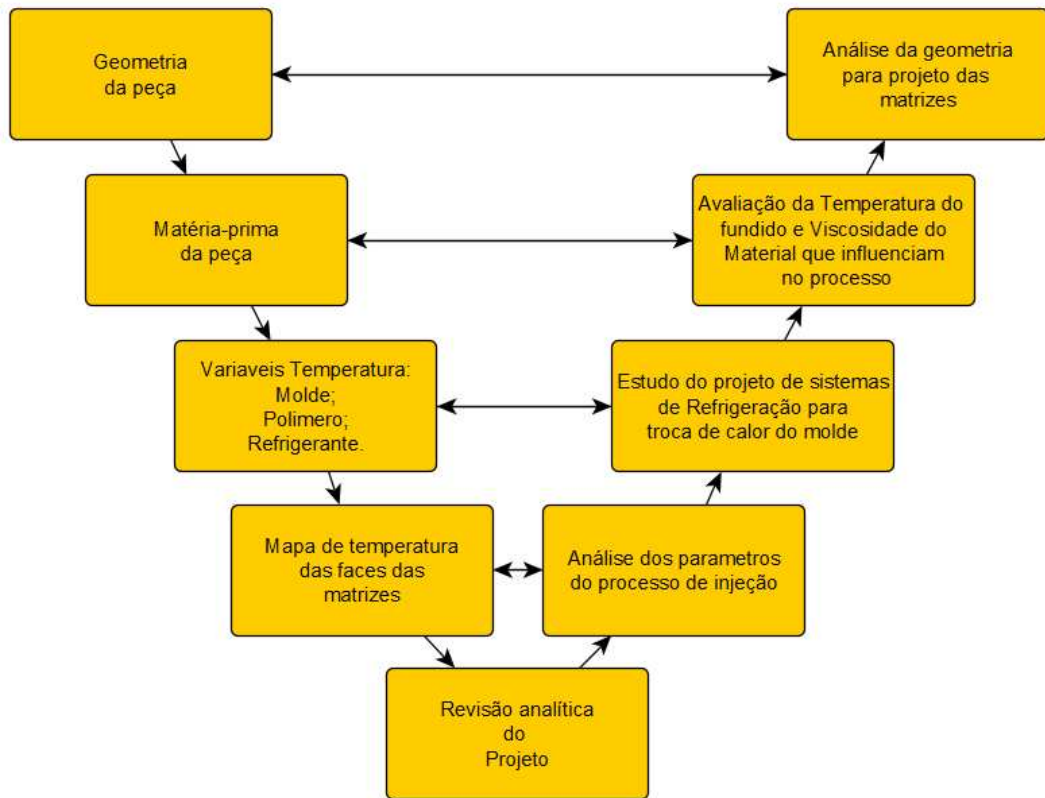


Figura 34 - Modelo V do projeto do molde mecânico para o Estudo de Caso.

Fonte: Próprio Autor (2021)

A peça utilizada nesse estudo de caso é a Tampa Superior do Fecho do cinto de segurança, conforme pode ser visto na Figura 35. A necessidade de modificá-la é devido a uma alteração estética e não funcional.

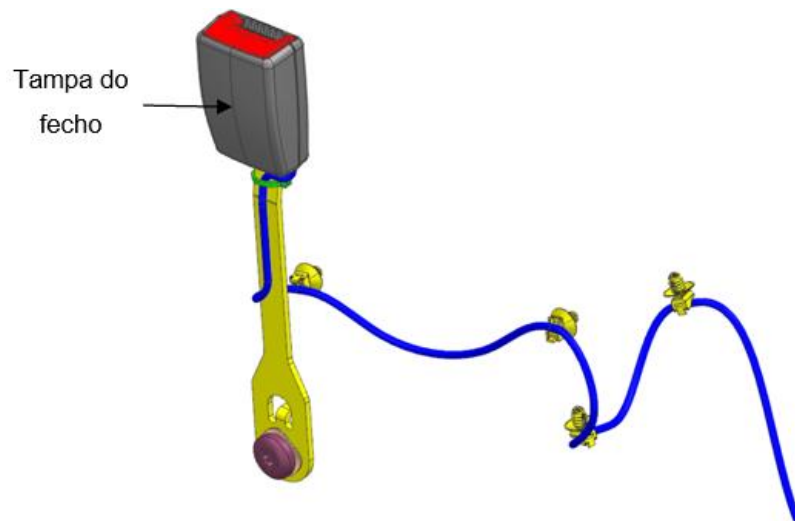


Figura 35 - Detalhe da peça do estudo de caso (Tampa do fecho).

Fonte: Próprio Autor (2021)

Como é uma peça que será manuseada pelo passageiro do veículo, são necessários muitos testes ergonômicos para que as curvaturas do desenho da peça possam ser confortáveis no manuseio do usuário.

Na Figura 36 pode-se observar em detalhes a peça deste fecho do cinto de segurança.

A função primária da Tampa Superior do Fecho é impedir o acesso ao mecanismo que acopla a lingueta (D), seja pelo usuário ou por peças durante uma colisão do veículo, além de não prejudicar o acesso ao acionamento da tecla para liberar o cinto de segurança (C). Em seu plano de validação possui os requisitos legais e específicos de cada cliente, que indica o método e o teste que a peça será submetida, são ensaios de ciclagem mecânica e térmica, resistência a impacto dinâmico (B) e resistência estática de retenção com a tampa inferior.

A perfeita união entre a tampa superior e inferior é um dos requisitos que serão observados, pois a tampa não deve se soltar (B) em uma colisão e em ensaios de tração. A união destas peças é obtida no processo de solda por ultrassom e a qualidade desta junção está na geometria da região de encontro das peças (A), juntamente com os parâmetros da máquina de solda, que somente é possível ser definido com a peça com todas as suas características mecânicas finais.

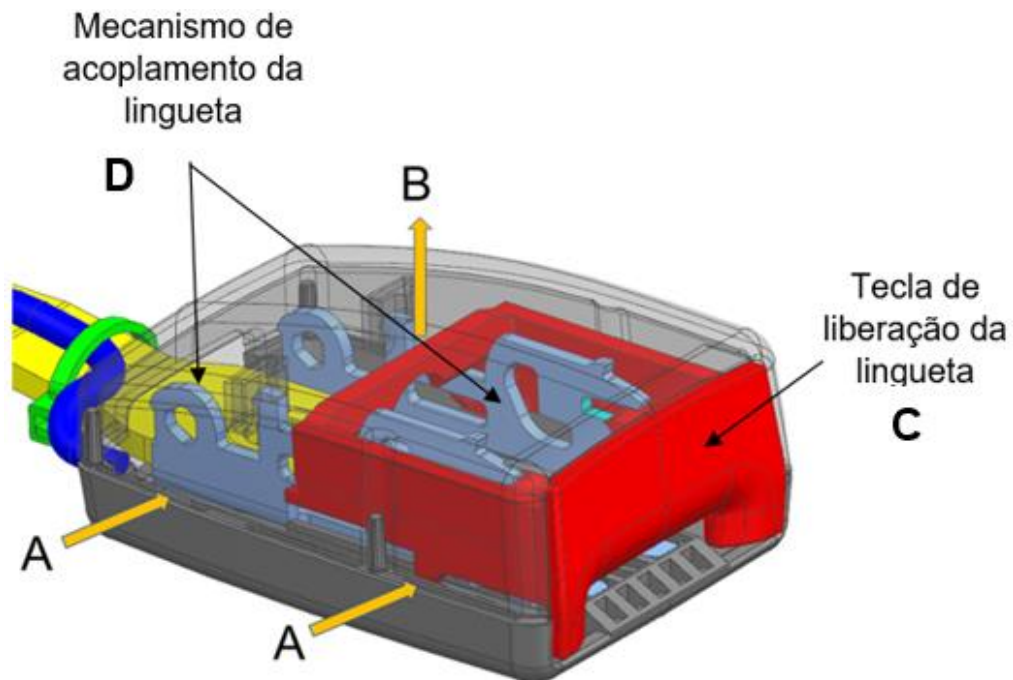


Figura 36- Requisitos da Tampa do fecho.

Fonte: Próprio Autor (2021)

Devido a sua importância é necessário a realização de testes físicos funcionais com protótipos construídos via manufatura formativa com moldes mecânicos híbridos em MA.

7.1 Projeto de Molde Mecânico Híbrido Aplicado ao Desenvolvimento de Sistema de Segurança Veicular

Um protótipo de molde mecânico híbrido tem a função de produzir poucas peças para testes idênticas ao projeto final.

Para projetar um molde mecânico deve-se considerar atentamente os requisitos do produto (geometria e a matéria-prima), e também, preservar as características funcionais e estéticas.

É importante verificar a geometria da peça, considerando os ângulos de saída, que facilitam a extração da peça no molde mecânico (JÚNIOR, 2003).

Se a peça possuir ângulos inferiores a $\sim 5^\circ$ é necessário modificar a geometria da peça com auxílio do modelo digital em CAD. Na Figura 37 pode se ver a peça utilizada nesse estudo de caso.

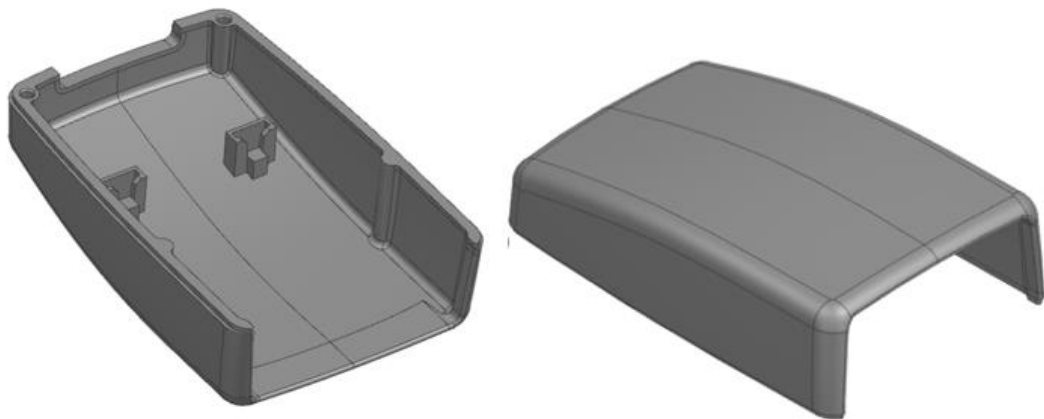


Figura 37 - Análise crítica da geometria da peça em estudo.

Fonte: Próprio Autor (2021)

Os polímeros aplicados na injeção para produzir peças possuem características que influenciam o processo de fabricação, assim como, a vida útil da matriz. O índice de fluidez, viscosidade e a temperatura de fusão são as propriedades físicas que mais impactam na fabricação e no desgaste da matriz. Se houver facilidade de preenchimento no molde mecânico, menor pressão de injeção de plástico será necessária (DE BLASIO, 2007).

Nesse estudo de caso utiliza-se uma peça produzida com polímero PP (Polipropileno). O Polipropileno é uma resina termoplástica de baixa densidade e sua aparência em estado natural é translúcida, porém, pode-se aplicar corantes, sua estrutura molecular torna fácil a fabricação em manufatura formativa em altas temperaturas (Figura 38) (SILVA, 2020; MIRANDA, 2002).

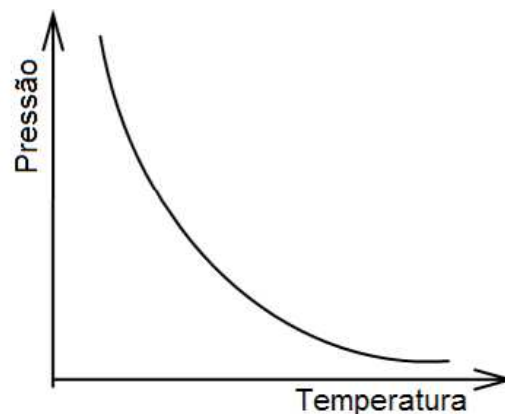


Figura 38 - Efeito da temperatura sobre a pressão.

Fonte: NISHIMOTO (2001).

As principais características do PP considerados para a simulação de injeção destas peças de teste podem ser vistos no Quadro 5 (GODEC, 2020).

Quadro 5 - Dados técnicos do polímero polipropileno.

MATERIAL	PP	UNIDADES	MÉTODO OU NORMA
<i>Temperatura de Fusão</i>	166	°C	ISO 1133
<i>Índice de Fluidez</i>	15.0	g/10min	ISO 1133
<i>Temperatura de distorção térmica (HDT)</i>	123 ± 1	°C	Norma ASTM D-648

Fonte: Adaptado de Miranda; Masson; Agnelli; Perin, 2002.

A matéria-prima aplicada para construir as cavidades do molde mecânico híbrido é o Digital ABS. No Quadro 6 pode-se observar os dados técnicos referentes a este material composto.

Quadro 6 - Propriedades físicas do Digital ABS aplicado no molde mecânico híbrido.

PROPRIEDADES	VALORES	UNIDADES
<i>Resistência à Tração</i>	55-60	MPa
<i>Módulo de Elasticidade</i>	2.600-3.000	MPa
<i>Temperatura de Flexão ao Calor (HDT)</i>	82-90	°C
<i>Izod Notched Impact</i>	90-115	J/m
<i>Dureza Mecânica Shore</i>	85-87	Scale D

Fonte: Adaptado de STRATASYS (2018).

Durante a construção do molde mecânico é importante o posicionamento da peça na mesa de impressão da máquina de MA, para melhorar a resistência mecânica, e consequentemente aumentar a vida útil do molde.

É recomendado que o sentido de fabricação da peça seja o mesmo do fluxo de injeção de plástico, ou seja, o canal de injeção deve estar posicionado sempre paralelo ao deslocamento no eixo X da cabeça de impressão 3D. Além disso, a maior dimensão da peça deve estar na direção e sentido de deslocamento da cabeça de impressão

Neste posicionamento a peça da matéria-prima fica melhor curada devido a maior exposição a luz UV, conforme pode ser visto nas setas indicativas na cor vermelha na Figura 39 (GODEC, 2020; STRATASYS, 2014).

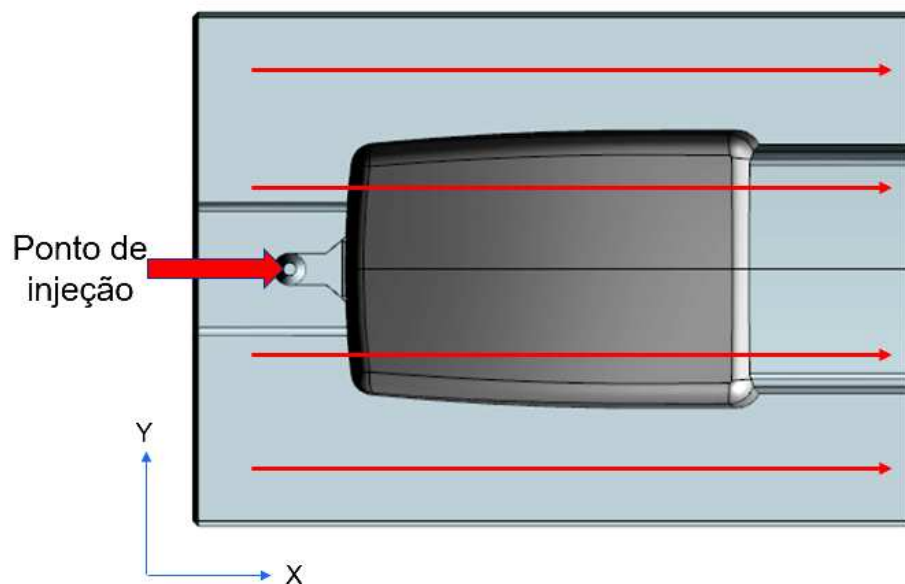


Figura 39 - Orientação para a fabricação nas matrizes híbridas. As setas na cor vermelha na figura indicam a direção de injeção do plástico. Fonte: Próprio Autor (2021).

O projeto do molde mecânico híbrido completo e montado pode ser visto em corte na Figura 40. É possível notar as principais características e as partes que compõem todo o conjunto utilizado na fabricação de peças em manufatura formativa via injeção em plástico.

Por se tratar de um protótipo de molde mecânico, o mesmo possui uma única cavidade para injetar o produto (H). É comum a aplicação de um porta-molde padrão disponível comercialmente para a construção do molde, confeccionado em aço SAE 1045. Note que os porta-postiços (G e J) alojam a matriz (B) e punção (D) de resina. O molde foi concebido de maneira que a matriz possa ser intercambiável possibilitando que o porta-molde seja utilizado para a construção de vários tipos de peças.

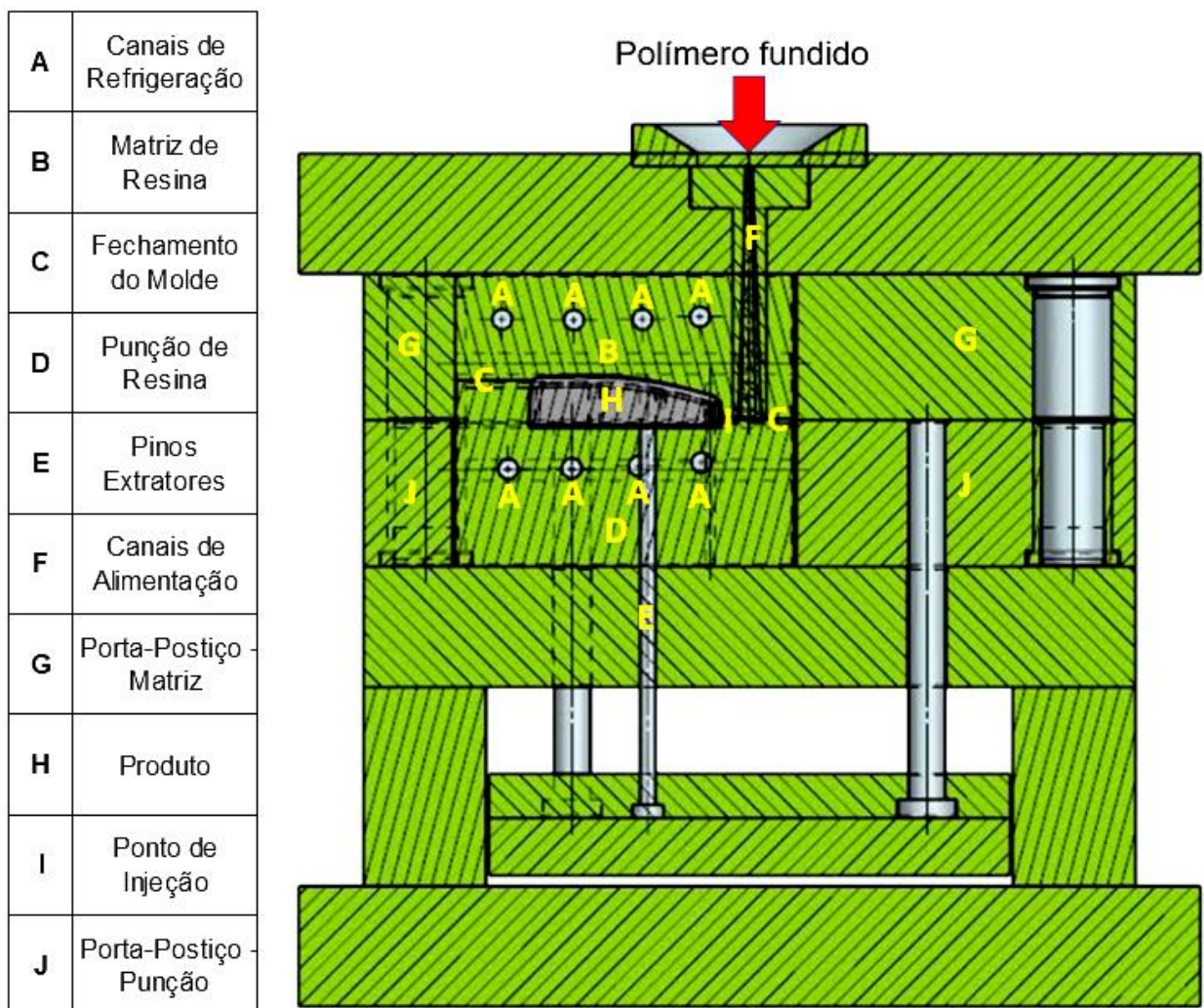


Figura 40 - Ilustração do molde mecânico híbrido montado em corte.

Fonte: Próprio Autor (2021).

Durante o processo de injeção o polímero alcança a temperatura ideal de fundição dentro do canhão da máquina injetora, percorre o canal de alimentação (F) até

chegar ao ponto de injeção (I) que é o local no qual o material é inserido para preencher a cavidade do molde.

O molde mecânico e as matrizes devem manter uma temperatura controlada, é importante a construção de canais de refrigeração (A) eficientes para uma troca de calor constante e aumentar o ciclo de injeção para que a temperatura se mantenha em patamares estabelecidos.

Para balancear a pressão de injeção do plástico durante o preenchimento das cavidades dos moldes e garantir que o mesmo se mantenha fechado é necessário manter uma pressão ou força de fechamento do molde. Essa pressão está diretamente relacionada a fluidez da matéria-prima e a temperatura do molde utilizadas e distribuídas pela área do fechamento do molde (C) (HARADA, 2004).

Foram considerados quatro extratores (E) com geometria cilíndrica para retirar as peças após o resfriamento e abertura do molde. Os extratores são posicionados na matriz de resina, e se deslocam para extrair as peças.

Conforme ilustrado na Figura 41, para suportar a pressão de injeção do plástico, as matrizes de resina devem ser alojadas no porta-postiço, que são fabricados em aço. Desta forma, as tensões não atuam diretamente sobre a matriz, e sim, diretamente na placa de aço evitando deformação prematura da linha de fechamento. Esta estratégia reduz a possibilidade de dilatação térmica da matriz devido à alta temperatura do plástico fundido durante a produção das peças.

As cavidades moldantes de resina em comparação com o aço, possuem limitações quanto a resistência térmica e mecânica que devem ser sempre consideradas no projeto.

O resfriamento uniforme da matriz proporciona uma melhor durabilidade do molde mecânico e a estabilidade geométrica do produto. Para que isso ocorra é necessário manter a temperatura o mais constante possível. O diâmetro dos canais de refrigeração deve ser fabricado entre ~8 a ~10 mm de diâmetro, e devem ser construídos diretamente na cavidade em MA.

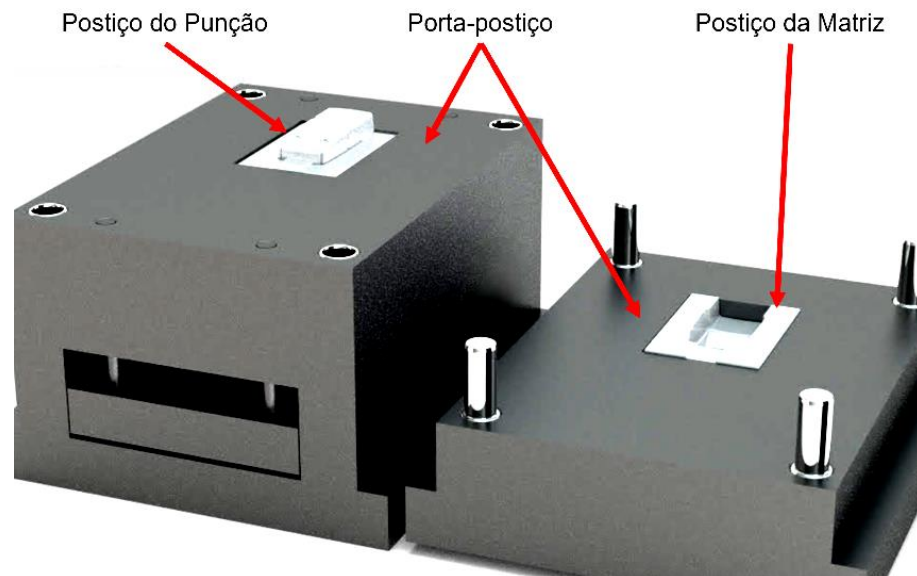


Figura 41 – Cavidades moldantes de resina alojada no porta-postiço de aço.

Fonte: Próprio Autor (2021).

As resinas aplicadas na construção das cavidades moldantes possuem o coeficiente de troca térmica que é menor do que o do aço, portanto, para compensar esta deficiência o tempo de ciclo deve ser aumentado aplicando ar comprimido diretamente na cavidade durante a etapa abertura do molde para auxiliar a extração da peça.

Na Figura 42 pode ser visto a simulação de injeção, mantendo a matriz oculta para visualizar o detalhe da punção com o preenchimento de polímero (na cor azul), do canal de injeção, ponto de injeção e produto. No punção estão os canais de refrigeração para a circulação de água fria para reduzir a temperatura do molde, porém, os canais não devem ser projetados próximos da parede da cavidade, evitando tornar frágil as paredes, e assim, não suportarem a alta temperatura e pressão.

A entrada de polímero fundido na peça (ponto de injeção), é importante no processo, sua localização e dimensão está condicionada a geometria e o volume de cada tipo de peça, quanto maior o volume, maior deve ser a área de entrada do material fundido na cavidade. A viscosidade da matéria-prima também influencia na sua geometria, quanto menor for a entrada na peça, menor será a marca deixada na peça pronta (MANRICH, 2013; MIRANDA; NOGUEIRA, 2017). Em peças protótipos para testes a marca na peça é irrelevante, pois isso não compromete a funcionalidade apenas a estética.

Em moldes mecânicos híbridos construídos em resina, é recomendado pontos de injeção com o formato do tipo leque com a área cerca de duas vezes maior que o utilizado em moldes mecânicos fabricados em MS e espessura igual ao da parede da peça a fim de melhorar a fluidez do material de maneira uniforme, o que conseqüentemente reduz a pressão dentro da cavidade.

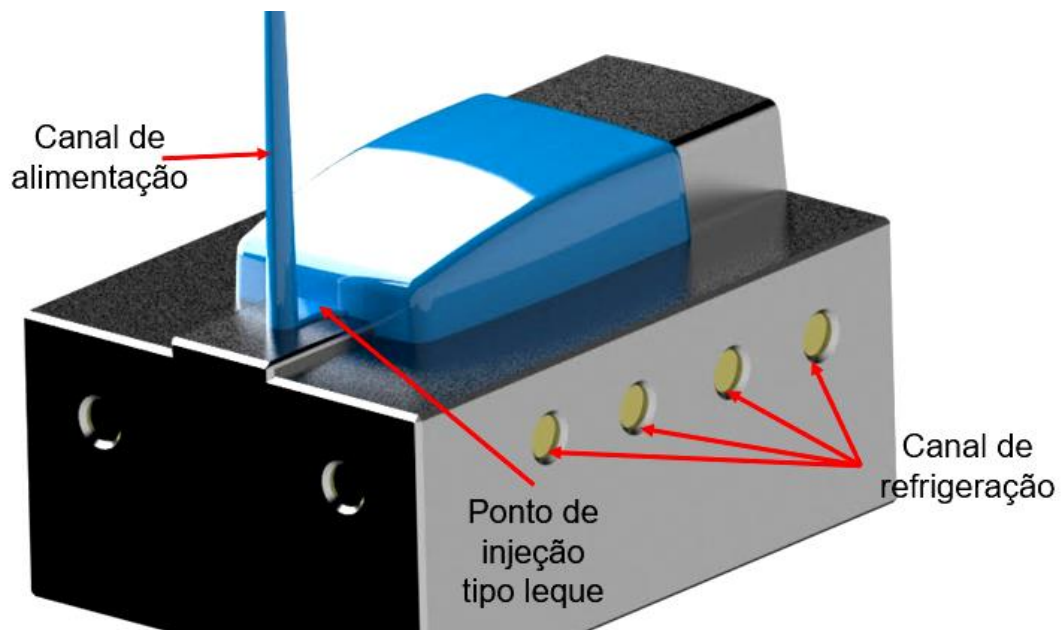


Figura 42 - Ponto de injeção e canais de refrigeração para circulação de água fria.

Fonte: Próprio Autor (2021).

A experiência de um projetista na construção de moldes mecânicos em MS não garante o sucesso do projeto de fabricação de moldes mecânicos híbridos em MA.

7.2 Simulação Computacional do Projeto de Molde Mecânico Híbrido

Existem muitas pesquisas que mostram as vantagens no uso de MA na construção de moldes mecânicos híbridos em desenvolvimento, porém, existem dificuldades técnicas para a sua implementação que devem ser cuidadosamente analisadas.

Devido a algumas limitações técnicas, o fator determinante para a escolha da MA para produzir o molde mecânico híbrido é qual o número de peças que deve ser produzida.

Para avaliar as fragilidades dos moldes mecânicos híbridos devem ser consideradas as propriedades físicas da matéria-prima utilizada na fabricação em MA.

As simulações computacionais de injeção são importantes para avaliar a deflexão na região de formação do produto.

Assim a análise que a simulação computacional fornece o comportamento térmico e físico da cavidade, auxiliando no projeto funcional de moldes mecânicos híbridos.

Polímeros com altas temperaturas de fusão e viscosidade, como o policarbonato (PC) e a poliamida (PA), necessitam de altas temperaturas e pressão para o processo.

Na simulação computacional da injeção fornece o cálculo o ciclo de injeção do molde, que está representado no gráfico de pressão, tempo e vazão conforme pode ser visto na Figura 43.

A fase de recalque, em destaque circulada na cor vermelha, é o momento crítico do processo para a resistência do molde mecânico híbrido, a vazão do polímero é reduzida devido a cavidade estar preenchida e a pressão aumenta com alta temperatura.

Para cada área da peça estes valores são diferentes a pressão de recalque tem função de compactar a peça para eliminar marcas nas peças injetadas, porém é recomendado que moldes mecânicos híbridos em resina a pressão seja a menor possível para o preenchimento da cavidade (CAVALHEIRO, 2007).

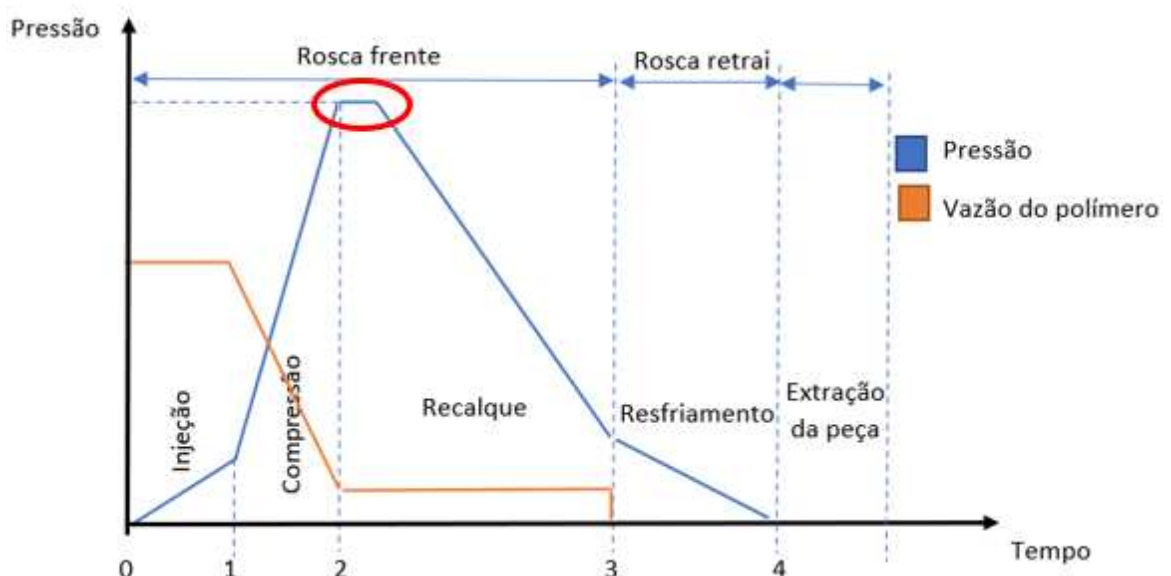


Figura 43 – Gráfico do ciclo de manufatura formativa com as fases do processo.

Fonte: LOPES; WILTGEN, 2021.

Inicialmente é avaliada a uniformidade da espessura da peça, como é observado na Figura 44, que mostra a simulação em escala de cores que mostra uma maior variação na região circulada em vermelho.

O ideal é que a peça possua a espessura mais uniforme possível, porém, em função da geometria da peça como pode ser observado na Figura 45B, existe a presença de dois furos que serão montados na contra peça que deixam a espessura menor nesta região da peça.

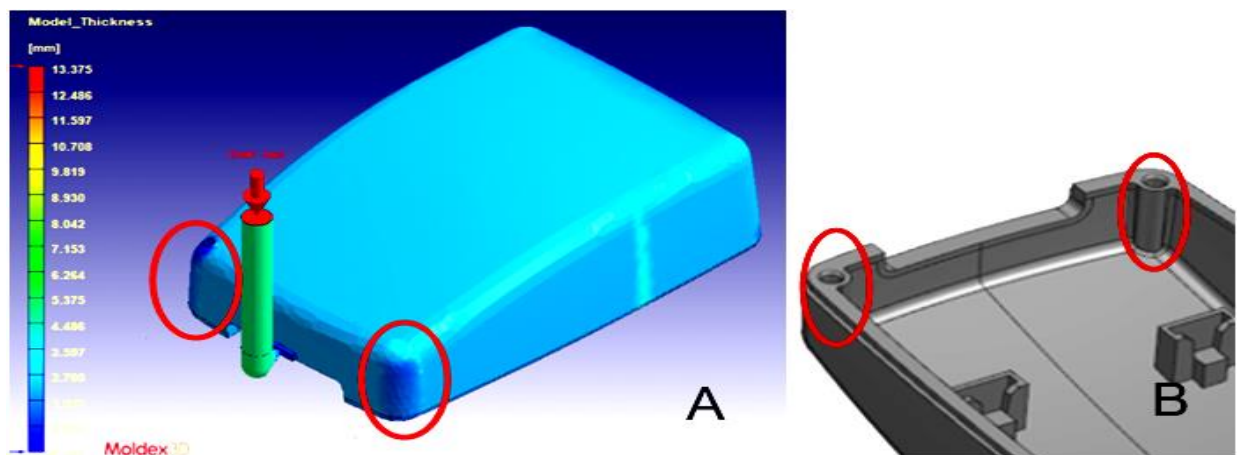


Figura 44 - (A) análise da uniformidade da espessura e (B) detalhe da peça.

Fonte: Próprio Autor (2021).

A peça possui uma espessura de $\sim 3\text{mm}$ e na região envolta pelo círculo vermelho e possui uma espessura de $\sim 1\text{mm}$, porém em uma pequena área (menor que $\sim 0,7\text{ cm}^2$). O mais adequado é avaliar a dificuldade de preenchimento da cavidade do que propriamente a espessura da peça. O problema na fabricação de peças de paredes finas está na possibilidade de a resina fundida congelar nesta região, o que obriga o aumento da pressão e temperatura de injeção (CAVALHEIRO, 2007).

Em um molde mecânico fabricado em MS esta região não representa problema, porém, em molde mecânico híbrido em MA isso pode ocasionar uma falha.

Os parâmetros a serem aplicados na simulação são para a matéria-prima do tipo *PP CP 442 XP*, conforme os parâmetros apresentados no Quadro 7.

Quadro 7- Dados do polímero disponível na biblioteca de materiais do programa de simulação.

<i>POLÍMERO</i>	<i>PP</i>
<i>Nome</i>	<i>Braskem PP CP 442 XP</i>
<i>Fabricante</i>	<i>Braskem</i>
<i>Condição do processo</i>	<i>Condição do processo</i>
<i>Temperatura de Fusão (mínimo)</i>	<i>~200 °C</i>
<i>Temperatura de Fusão (média)</i>	<i>~240 °C</i>
<i>Temperatura de Fusão (máxima)</i>	<i>~280 °C</i>
<i>Temperatura do molde (mínimo)</i>	<i>~20 °C</i>
<i>Temperatura do molde (médio)</i>	<i>~30 °C</i>
<i>Temperatura do molde (máximo)</i>	<i>~40 °C</i>

Fonte: Próprio Autor (2021).

Cada polímero possui um faixa ideal de temperatura para fabricação (temperatura de injeção). A esta temperatura o material plástico derrete de maneira homogênea e com viscosidade adequada para preencher a cavidade do molde mecânico.

As simulações foram executadas, realizando as combinações de 3 temperaturas para a matéria-prima injetada (~200°C, ~220°C e ~240°C), e 3 tempos de injeção diferentes (~3s, ~5s e ~7s). Como resultado obtém-se a pressão de injeção.

Com estes parâmetros pode-se prever que a menor pressão obtida foi com a maior temperatura do material (~240°C), isso se deve ao fato de que com o aumento da temperatura a viscosidade diminui.

Na Figura 45 pode-se observar o preenchimento gradativo da cavidade em função do tempo, até que a peça esteja totalmente formada em ~0,5 segundos.

Durante o preenchimento da cavidade, pode ocorrer o aprisionamento do ar dificultando a passagem do polímero e formando bolhas. Para resolver este problema é necessário projetar algumas saídas de ar (MIRANDA, 2017).

Na Figura 46 pode ser vista a simulação mostrando as regiões mais propensas a ocorrer bolhas. A área de saída de ar é relacionada com o volume e geometria da peça

produzida. Neste caso particular a dimensão utilizada para cada região foi $\sim 0,05\text{mm}$ de profundidade por $\sim 3\text{ mm}$ de largura.

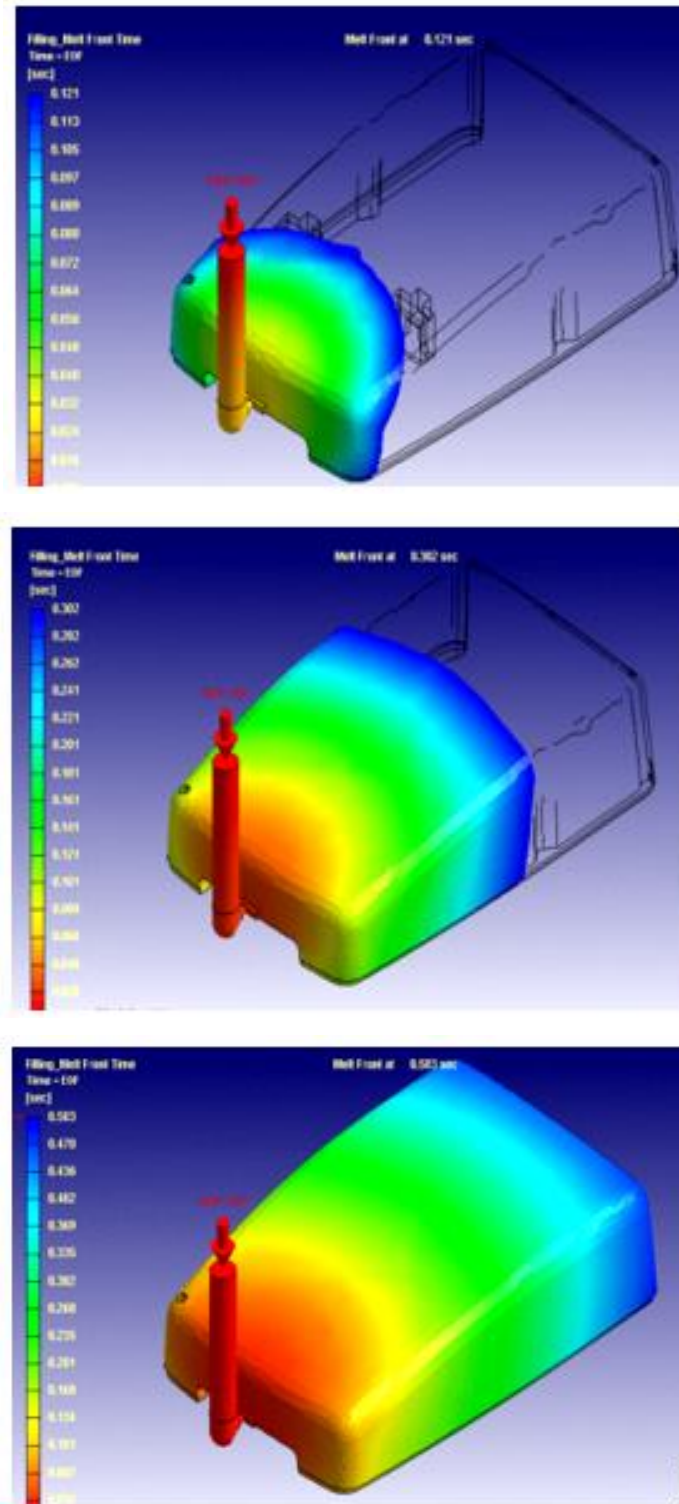


Figura 45 - Análise de preenchimento da peça.

Fonte: Próprio Autor (2021).

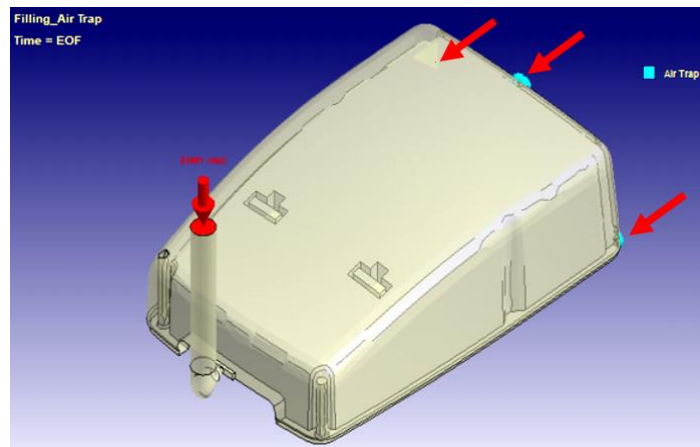


Figura 46- Regiões para a saída de ar estão mostradas com setas vermelhas.

Fonte: Próprio Autor (2021).

Em função do valor dos parâmetros de tempo de injeção, da temperatura do polímero que determina a viscosidade do material e consequentemente a pressão de injeção. Na Figura 47 pode ser vista a simulação computacional da injeção que identifica as regiões da cavidade que receberam as maiores pressões.

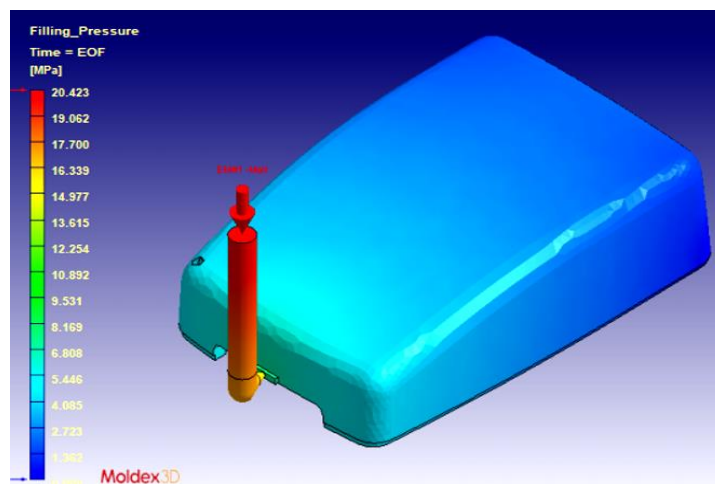


Figura 47 - Simulação da pressão de injeção nas áreas da peça durante o ciclo de injeção.

Fonte: Próprio Autor (2021).

Na Figura 48 observa-se a simulação computacional da injeção em plástico da peça em análise, é possível identificar que a temperatura se manteve constante em diferentes regiões da peça, com isso é possível prever que o tempo de injeção está adequado, pois não ocorreu resfriamento do polímero em diferentes regiões.

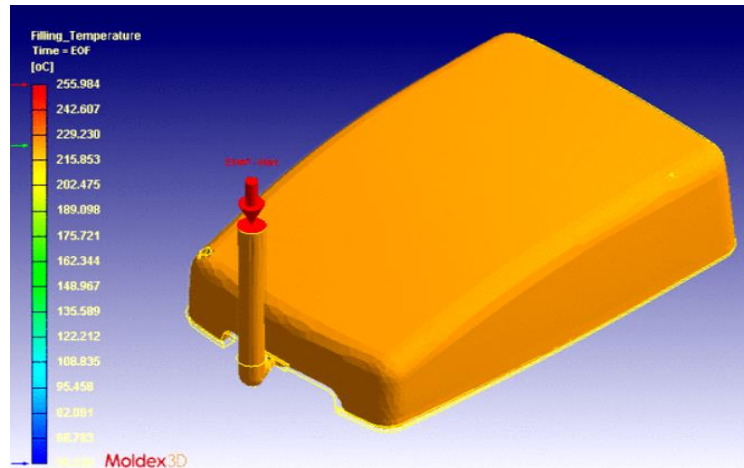


Figura 48 - Simulação da temperatura de injeção nas áreas da peça durante o ciclo de injeção.

Fonte: Próprio Autor (2021).

No final das simulações a melhor condição de preenchimento foi escolhida. A região da cavidade circulada na cor vermelha na Figura 49, deverá se deformar durante o preenchimento, sem que seja possível produzir a quantidade de peça necessárias com a geometria adequada do protótipo de teste.

A temperatura de deflexão da resina na matriz deve resistir durante o ciclo de injeção (ASHOKKUMAR, 2020). As geometrias em formato de torres cilíndricas não resistem as solicitações de pressão impostas.

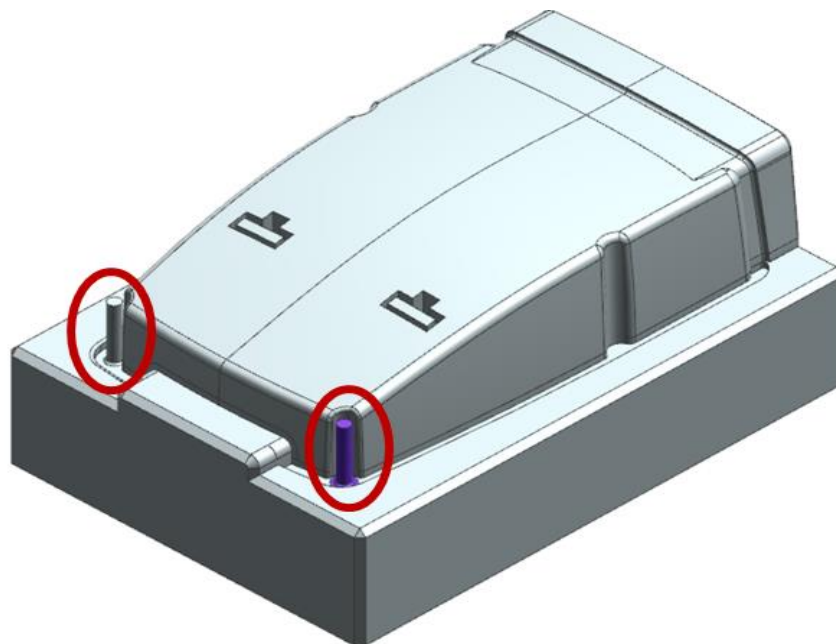


Figura 49 - Deformação na região da matriz apresentado nas simulações.

Fonte: Próprio Autor (2021).

Sabe-se que a matéria-prima utilizada na peça a ser injetada influencia diretamente na vida útil da matriz, assim como, na qualidade da peça (SILVA, 2008). Mesmo o Polipropileno possuindo uma boa fluidez e uma menor pressão de injeção ocorreu falha na simulação de injeção.

A geometria possui regiões nas torres cilíndricas, que contribuíram para a falha da matriz híbrida na simulação. Esta região não possui fluxo contínuo de polímero devido a uma redução na área de passagem do material, provocando uma velocidade maior no fluxo e aumento de pressão (JÚNIOR, 2003).

Essas torres cilíndricas formarão dois furos presentes na peça. É suscetível a deflexão devido à uma combinação de carga mecânica, térmica e pressão do durante o preenchimento do molde mecânico.

Boas práticas em manufatura formativa indicam que as nervuras e torres presentes devem ter uma relação de 3:1 (altura por largura). Uma alternativa para este caso para melhorar a resistência mecânica é a aplicação de insertos metálicos no lugar das torres em resina, conforme pode ser visto na Figura 50.

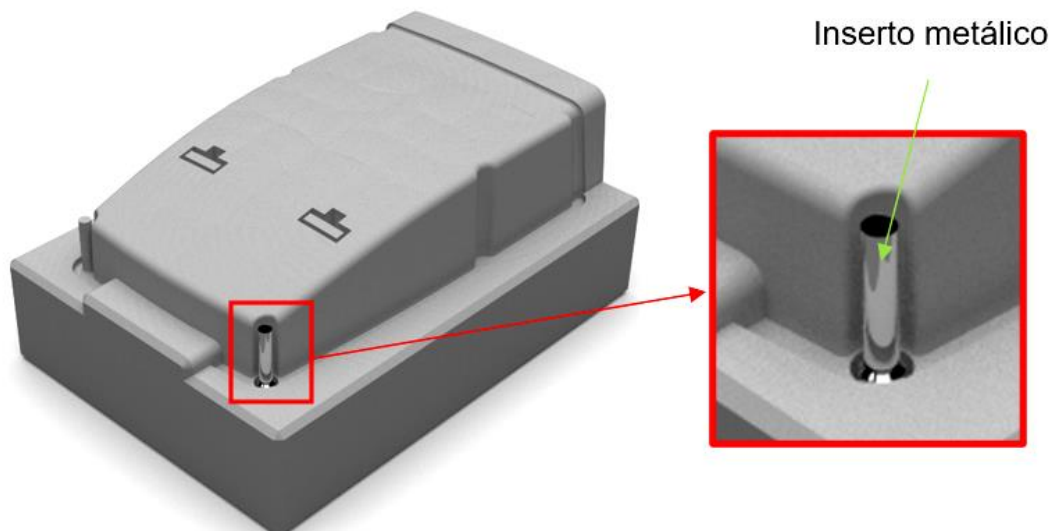


Figura 50 - Inseto (postiço de aço) inserido na matriz em resina no local da falha das torres.

Fonte: Próprio Autor (2021).

Na posição da torre, faz-se um furo com broca no qual é incorporada em seu local um eixo com cabeça torneado realizando a montagem, debaixo para cima para manter o eixo travado, assim durante o processo de injeção não ocorrerá a falha.

A estratégia de adotar insertos metálicos em regiões críticas da matriz ou punção certamente agrega custo e tempo na construção de moldes híbrido, porém, se mostra uma alternativa adequada e não compromete a viabilidade do projeto.

8 RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÃO

No estudo de caso foi apresentado um método para analisar o projeto do molde mecânico híbrido com cavidades construídas de resinas via MA aplicando simulações computacionais para identificar possíveis modos de falhas, e estimar a vida útil do molde através da variação de parâmetros de temperatura e pressão de injeção durante o tempo necessário para o preenchimento total da peça.

Desta maneira foi validado o ponto de injeção identificando a melhor posição para a sua construção, assim como, o local para a saída dos gases.

No capítulo anterior foi possível observar figuras das simulações que permitem análise dos resultados. As simulações permitiram obter o equilíbrio eficiente entre a temperatura e a viscosidade da matéria-prima fundida para operar em menores pressões de injeção.

Foram exibidas as características que cada tipo de polímero aplicado para a confecção de peças em moldes mecânicos híbridos, divididos em quatro grupos, baseados em sua facilidade no processo de injeção, são eles: os polímeros com alta temperatura de fusão, alta viscosidade, baixo índice de fluidez e com cargas em sua composição (fibra de vidro). Entretanto, apenas estas características não garantem uma produção desejada, existem características geométricas dos produtos as quais devem ser consideradas.

Mesmo encontrando o melhor equilíbrio de injeção, aplicando uma matéria-prima com facilidade de injeção (polipropileno), foram identificadas falhas que comprometeram a produção das peças. Durante o processo de injeção a matéria-prima fundida impôs valores de temperatura, pressão e tempo que causou uma deformação por flexão em uma região da matriz em forma de torre que compromete a geometria da peça injetada.

No estudo de caso aponta que determinadas características geométricas da peça a torna complexa, como por exemplo as espessuras com descontinuidade ou nervuras com ausência de ângulos de saída, áreas negativas que necessitem de partes moveis (gavetas) para formar a peça, aumentando o desafio da vida útil do molde mecânico.

Devido a falha no projeto durante a análise da simulação computacional, este estudo de caso explorou como alternativa, o uso de insertos metálicos em regiões com

problemas devido ao excesso de pressão, temperatura e tempo de exposição do processo de injeção. E assim, aumentando a vida útil da matriz ou mesmo viabilizar tecnicamente sua utilização.

A necessidade de reduzir a pressão de recalque no processo de injeção, para não comprometer a matriz de resina, pode causar deformações, como empenamentos em determinados tipos de geometrias. Estas situações podem ser identificadas nas simulações computacionais. Podendo inviabilizar a utilização de matrizes construídas em resina.

Finalmente, a simulação computacional é importante para que seja possível tomar as ações na fase de projeto do molde mecânico híbrido.

Para suprir as limitações da técnica de manufatura aditiva com tecnologia JM, pode-se aplicar MA em metais. Existe uma grande variedade de materiais metálicos disponíveis os quais podem ser aplicados para a fabricação de peças (GOMES; WILTGEN, 2020).

9 CONCLUSÃO

O avanço da tecnologia de manufatura aditiva ocupa um papel cada vez mais importante na indústria e no meio científico.

Na indústria de segurança veicular faz uso no desenvolvimento de novos produtos que exigem a construção de protótipos funcionais para a fase de maturidade tecnológica.

Com essa pesquisa foi possível aprofundar os conhecimentos sobre a necessidade de diferentes tipos de protótipos, durante as fases de desenvolvimento de um produto e os principais problemas em produzi-los. Especialmente peças que utilizam polímeros como matéria-prima.

Esta pesquisa é considerada importante para a indústria, pois o objetivo principal foi abordar a aplicação de diferentes tecnologias de manufatura aditiva nas diversas fases do desenvolvimento, desde a construção de protótipos físicos funcionais a construção de peças finais.

Independentemente do requisito imposto ao protótipo, quando comparado com as formas tradicionais de fabricação é possível prever e identificar vantagens da MA nos custos e nos prazos.

Para a completa compreensão deste tema é fundamental coletar informações de três áreas distintas. Estas três áreas são: o desenvolvimento de produtos; a manufatura aditiva; e a injeção de moldes mecânicos.

A produção de peças de polímero com características idênticas ao processo definitivo via a construção de moldes mecânicos híbridos constatou uma maior velocidade nas etapas de desenvolvimento, de análises, de verificações e de construção.

A possibilidade de modificação de forma rápida e precisa a cada protótipo reprovado da peça em desenvolvimento permitiu acelerar o desenvolvimento e sua maturidade de forma significativa.

A aplicação de tecnologias de MA reduz o tempo de espera e os investimentos relativos à latência nas tomadas de decisões. O mesmo acontece com a definição do fluxo e controle do meio produtivo, pois a avaliação do modo de falha das peças fica mais eficiente.

Para os moldes mecânicos híbridos que tem como objetivo produzir pequenos lotes de protótipos de peças foi utilizado Jateamento de Material (JM) com resina de

alta resistência. Se houver a necessidade de aumento de produtividade do molde, a técnica DMLS com matéria-prima em metal possui a capacidade de construir geometrias complexas, possibilitando a construção de novos canais de refrigeração conformados, aumentando significativamente a cadência produtiva na manufatura formativa, devido à grande redução no tempo de resfriamento do molde.

Esta pesquisa permitiu adquirir conceitos básicos que identifica as características geométricas das peças e das matérias-primas empregadas que comprometem a vida útil dos moldes mecânicos híbridos e sua viabilidade técnica.

Com base na pesquisa aqui apresentada é importante observar que existe uma tendência forte de redução nos custos e prazos das peças fabricadas via MA. Não existe um valor exato de quanto tempo e custo pode ser reduzido devido a variedade geométrica das peças a ser desenvolvidas. Entretanto, no estudo de caso apresentado na pesquisa, a opção de construir um molde mecânico híbrido via MA ao em vez de um molde mecânico em manufatura subtrativa representou uma vantagem de ~80% de redução no tempo de construção destes moldes quando comparados aos meios de fabricação tradicionais.

É possível prever que o projeto de um molde mecânico híbrido é afetado pela quantidade de parâmetros de um processo de injeção. Os quais devem ser testados via simulação computacional.

A simulação computacional em moldes mecânicos híbridos tem grande importância na da análise identificando possíveis modos de falhas durante o processo de injeção.

Dessa forma, esta pesquisa colaborou em:

- *Apresentar e testar diferentes geometrias, tecnologias e matérias-primas na manufaturas aditiva;*
- *Abordar o conceito de segurança veicular e metodologia de desenvolvimento de sistemas de segurança veiculares, principalmente em cintos de segurança;*
- *Tipos de metodologias de MA que podem ser aplicadas para desenvolver um novo produto;*
- *Vantagens na utilização de protótipos de moldes mecânicos híbridos;*
- *Compreensão de como os parâmetros de injeção influenciam na injeção de moldes mecânicos híbridos em resinas;*
- *Características construtivas de moldes mecânicos híbridos;*

- *Análises através de programas computacionais de injeção.*

No seguimento automotivo a utilização da MA encontrasse no início de suas aplicações e suas vantagens de utilização tendem a aumentar sua aplicação nos novos processos de desenvolvimento industrial.

Esta pesquisa destaca que, apesar das vantagens óbvias da MA para a construção de moldes mecânicos híbridos, as variáveis de resistência mecânica e térmica presentes durante o processo de injeção, precisam ser devidamente compreendidas para que tecnologias inovadoras de MA possam avançar na aplicação da construção de moldes mecânicos híbridos. Sendo que o estudo de caso apresentado na pesquisa aborda como fazê-lo independente da tecnologia da MA e matéria-prima empregada

Foi verificado que a aplicação de diferentes tecnologias de MA para cada fase do projeto é o método que melhor atende no aspecto técnico e econômico. Foram analisadas detalhadamente três das muitas tecnologias de MA existentes e de acordo com as suas características foram aplicadas na realização de protótipos de peças que atenda aos requisitos de cada fase do projeto em um desenvolvimento. Esta análise geral de cunho técnico foi realizada para obter uma visão mais clara sobre as tecnologias de Jateamento de Material (JM), Extrusão de Material (FDM) e Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS), que se trata de tecnologias bem distintas, que possibilita uma visão abrangente do processo de MA e todas possuem condições de atender o objetivo proposto.

Especificamente falando dos resultados, são úteis para a velocidade no desenvolvimento de produtos desde que a seleção de processos de MA e materiais sejam adequados a influência de parâmetros do processo de injeção que está intimamente relacionada a qualidade do protótipo da peça.

Esta pesquisa dá uma ideia da qualidade do protótipo da peça que pode ser produzido com o molde mecânico híbrido através do uso de simulação computacional, sendo que o estudo de caso investiga a consistência das propriedades térmicas e mecânicas das cavidades moldantes produzidos pela tecnologia de MA de Jateamento de Material em condições geométricas restritas e propõem soluções em casos de falhas de resistência da matriz, que torna a solução viável.

10 PERSPECTIVAS PARA FUTURAS PESQUISAS

Esta pesquisa investigou o desempenho de um processo de MA de jateamento de material de resina para a construção de moldes mecânicos híbridos e caracterizou o material em termos de qualidade de superfície e resistência mecânica e térmica com base no método proposta. Para futuras pesquisas é recomendada a aplicação de tecnologia de MA em metais devido a vantagens de resistência mecânica e melhor troca térmica durante o processo de injeção.

Outro importante campo de pesquisa para o avanço da tecnologia de MA é a execução de simulações computacionais mais aprofundadas, considerando as propriedades mecânicas e térmicas com canais de refrigeração de geometrias complexas que melhoram a eficiência do resfriamento do molde mecânico híbrido e diferente matérias aplicado na construção das cavidades moldantes, assim, é possível coletar dados que auxiliie na tomada de decisão de qual tecnologia adotar na construção dos moldes mecânicos híbridos.

Há uma falta considerável de dados experimentais com métodos validados para peças finais de MA, com isso, a aplicação de um método para avaliar diferentes tecnologias de MA no que tange a acurácia dimensional, valores de rugosidade e a precisão das máquinas de MA para assegurar se atende os requisitos geométricos impostos pela peça a ser desenvolvida a ser produzida no molde mecânico híbrido.

Com base nos estudos apresentados e na experiência adquirida ao longo da pesquisa é recomentado para finalizar a pesquisa a construção de moldes mecânicos híbridos para investigar as propriedades mecânicas e geométricas das peças produzidas no molde. Com uma bateria de ensaios de tração e flexão no produto, considerando que a falta de pressão em sua plenitude durante o processo de injeção pode causar problemas estruturais na peça injetada.

Baseado nas experiências obtidas no decorrer desta pesquisa, como sugestões para pesquisas futuras, tem-se:

- *A construção de moldes mecânicos híbridos em metal, a produção de protótipos de peças para a análise com diferentes parâmetros de injeção;*
- *Análise do dimensional das peças para uma análise de capacidade do processo em metal;*
- *Explorar a possibilidade de construir novos canais de refrigeração mais complexos e eficientes em moldes mecânicos utilizando da MA em metal;*

- *Aplicação de outras ligas metálicas na fabricação completa de moldes mecânicos.*

Por fim, os moldes mecânicos tracionais requerem altos investimentos e o incentivo a realização de pesquisas para aumentar a aplicação de MA direcionada para a construção de moldes mecânicos híbridos que aumente a resistência mecânica com uma melhor condutividade térmica proporcionara uma revolução na construção de moldes mecânicos e a indústria terá maior competitividade devido a possibilidades de desenvolver produtos com maior assertividade, agilidade e economia recuperando rapidamente o retorno do investimento na tecnologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULHAMEED O.; AL-AHMARI A.; AMEEN W.; MIAN S.H. *Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications*. **Advances in Mechanical Engineering**, v.11, n. 02, pp.1–27, 2019.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7337 **Veículos rodoviários automotores - Cintos de segurança - Requisitos e ensaios**, 2014. 65p.

ABREU D. R. O.; SOUZA E. M.; MATHIAS T. A. F. Impacto do Código de Trânsito Brasileiro e da Lei Seca na mortalidade por acidentes de trânsito, **Caderno Saúde Pública**, v. 34, n. 08, pp.1-13, 2018.

AIAG. Automotive Industry Action Group. **Advanced Product Quality Planning and Control Plan**, 4° ed., pp. 1-74, 2008.

ALBA, A. T.; COLMENERO, J. M. M, PERETE D. D.; DOÑATE C. M. A New Conformal Cooling Design Procedure for Injection Molding Based on Temperature Clusters and Multidimensional Discrete Models, **MDPI Polymers**, v.12, pp.1-35, 2020.

ALCALDE, E.; WILTGEN, F. Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro. **Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté**, v.24, n.02, p.1-9, 2018.

ALMEIDA W. J. **Otimização Estrutural de Protótipos Fabricados pela Tecnologia FDM Utilizando os Métodos dos Elementos Finitos**. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies**, West Conshohocken, PA, ASTM, 2013.

AMORIM A.G.G. **Processos Criativos Sistemáticos como Fator-Chave para a Diferenciação das Empresas: Abordagem do Design Thinking**. 53 f., Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.

ARAÚJO J. N. Avaliação do Desgaste de Peças Produzidas por Manufatura Aditiva FDM. **Brazilian Journal of Development**. v.5, n.12, pp.32099-32110, 2019.

ARORA, N. Design, And Manufacturing Injection Mould Conformal Cooling Channels Using Additive Manufacturing. **International Journal of Mechanical and Production Engineering**. v.7, pp.56-57, 2019.

ASHOKKUMAR A. **Enhancing injection molding process through additive manufacturing**. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2020.

ASNAFI, N.; RAJALAMPI, J.; ASPENBERG, D.; ALVEFLO, A. Production Tools Made by Additive Manufacturing Through Laser-based Powder Bed Fusion. **Berg Huettenmaenn Monatsh.** v.165, n.03. pp.125-136, 2020.

BARETA, D. R. **Estudo Comparativo e Experimental de Materiais Aplicados a Insertos Machos de Moldes de Injeção Dentro do Conceito de Molde Híbrido**, 157 f., Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007.

BICALHO A. J. C.; SOUZA J. H G.; GOMES F. S. A Engenharia Mecânica como Ferramenta de Segurança Automotiva: Um Review sobre Segurança Passiva, **Anais do Curso de Engenharia Mecânica da Uni EVANGÉLICA**. Anápolis, v.2, pp.14, 2018.

BROTAN V.; BERG O. A.; SORBY K. Additive Manufacturing for Enhanced Performance of Molds. **6th CLF - 6th CIRP Conference on Learning Factories**, Trondheim June 29-30, pp. 186-190, 2016.

CAMPOS C. I. **Mortalidade de Crianças de 0 A 14 anos em Decorência de Acidentes de Trânsito No Brasil**. 155 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

CAVALHEIRO A. Z. **Influência dos parâmetros de moldagem na estrutura e propriedades de peças de paredes espessas e finas de polipropileno isotático injetadas em moldes-protótipo Fabricados por vazamento de resina epóxi**. 246 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

CHUNG C. Y. Integrated Optimum Layout of Conformal Cooling Channels and Optimal Injection Molding Process Parameters for Optical Lenses, **Applied Sciences**, v.9, n.20, pp. 1-19, 2019.

CORAZZA E. J. **Influência do Tratamento de Nitretação em Cavidades de Aço P20 de Moldes de Injeção de Termoplástico** 112 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Joinville, 2012.

DE BLASIO, C. A. **Solução de Defeitos na Moldagem por Injeção de Termoplásticos**, 174 f, Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

DIMLA, E.; TRINIDAD, J.R.; GRANADA, A. A. G.; REYES G. Thermal Comparison of Conventional and Conformal Cooling Channel Designs for a Non-Constant Thickness Screw Cap. J. **The Korean Society for Precision Engineering**, v.35, n.01, pp.95-101, 2018.

DoD System Engineering Fundamentals (Department of Defense – DoD 22060-5565), **Defense Acquisition University Press Fort Belvoir**. 2001. 223p.

DOMINGUES M. M. **A Influência da Informação sobre Segurança na Demanda por Automóveis: O Caso Do LATIN NCAP no Brasil**. 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2016.

DOMINGUES, L. C. F. **Análise Comparativa do Uso de Tecnologias de Fabrico Rápido no Processo Produtivo de Elementos Moldantes para Moldes de Injeção de Plásticos**, 133 f., Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2015.

ESPERTO L.; OSÓRIO A. *Rapid Tooling* Sinterização Direta por Laser de Metais, **Mecânica Experimental**. v. 15, pp. 117-124, 2008.

EOS - Electro Optical Systems - **Material Data Sheet Industry Maraging Steel MS1**. pp.1-5. Munich Germany, 2017.

FENG, S.; KAMAT, A. M.; PEI, Y. T. Design and Fabrication of Conformal Cooling Channels in Molds: Review and Progress Updates. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 171, n.121082, p.1-29, 2021.

FERNANDES M. H. R. **Segurança Rodoviária Infantil: Conhecimentos E Atitudes dos Pais na Utilização do Sistema de Retenção no Recém-Nascido**.154 f., Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Saúde de Viseu, Viseu, 2015.

FERNANDINHO F. A. **Otimização da Cadeia de Desenvolvimento do Projeto de Moldes com Simulação de Injeção por Moldflow**. 83 f., Dissertação (Mestrado) -, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2017.

FRANCO D. **Impactos da Manufatura Aditiva no Modelo de Negócio**, 280 f., Tese (Doutorado) - Universidade de São Carlos, São Carlos, 2019.

FRANCELINO G.; PEDRO M. T.; OLIVEIRA D.; BATISTA S.R.E. A Importância dos Sistemas de Refrigeração em Moldes de Injeção: Análise de um Processo de Fabricação pelo Ponto de Vista Termodinâmico, **XIII Mostra Científica do CESUCA**, Cachoeirinha, 5 a 7 novembro, pp.1-13, 2019.

FOGGIATTO J. A. **Utilização do Processo de Modelagem por Fusão de Deposição (FDM) na Fabricação Rápida de Insertos para Injeção de Termoplásticos**.182 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

FORTULAN C. A.; LOVO J. F. P. Estudo de Propriedades Mecânicas e Anisotropia em Peças Fabricadas por Manufatura Aditiva Tipo FDM, **1º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**, São Carlos, 12 a 13 de setembro., pp 1-7, 2017.

GIORDANO C. M.; ZANCUL E. S.; RODRIGUES V. P. Análise dos Custos da Produção por Manufatura Aditiva em Comparação a Métodos Convencionais, **Revista Produção Online**, v. 16, n.02, pp.499-523, 2016.

GODEC D.; BRESKI T.; KSTALENIC M. Additive Manufacturing of Polymer Moulds for Small-Batch Injection Moulding, **Technical Journal**, 14, 2, pp. 218-223, 2020.

GOMES, J.; WILTGEN, F. Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais e Máquinas, **Revista Tecnologia**, v.41, n.01, pp.1-16, 2020.

GRIES, S.; MEYER, G.; WONISCH, A.; JAKOBI, R.; MITTELSTEDT, C. Towards Enhancing the Potential of Injection Molding Tools Through Optimized Close-Contour Cooling and Additive Manufacturing, **MDPI Materials**, v. 14, n.3434, p.1-18, 2021.

Guia PMBOK. Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos. **Project Management Institute**. 5° Ed. PMI. Pennsylvania, 2013. 595p.

HÅLAND, Y. The Evolution of the Three-Point Seat Belt From Yesterday to Tomorrow. **IRCOBI Conference**. Madrid, September 20-22, pp.1-13. 2006.

HARADA, J. **Moldes para Injeção de Termoplásticos: Projetos e Princípios Básicos**. São Paulo, Editora Artliber, 2004. 308 p.

HARADA, J.; UEKI, M. M. **Injeção de Termoplásticos: Produtividade com Qualidade**. São Paulo, Editora Artliber, 2012. 268 p.

HATOS I.; B KOCSIS B.; HARGITAI H. Conformal Cooling with Heat-Conducting Inserts by Direct Metal Laser Sintering. **XXIII International Conference on Manufacturing**, Hungary, June 7-8, pp. 1-8, 2018.

INCOSE **Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities (INCOSE-TP-2003-002-04)**. v.4, Wiley, 2015. 304p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/ASTM 52900. **Additive manufacturing - General principles – Terminology**. Ed. 1, v1, pp.1-10 2015. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en> Acesso em 27 junho de 2021.

IVVALA J., AAHLADA P. K., THOMAS P. A. The Changing World of Manufacturing: Additive Manufacturing in Rapid Product Development. **4th National Conference on “Recent Innovations in Mechanical Engineering”**. India, January 21, pp.186-191, 2017

JALONEN, H. The Uncertainty of Innovation: A Systematic Review of the Literature. **Journal of Management Research**, v. 4, n. 01, p.1-47, 2012.

JUNIOR, G. B. M; COSTA, C.A. Manufatura aditiva aplicada na fabricação de insertos para moldes de injeção termoplásticos. **Scientia Cum Industria**, v.7, n. 02, pp.76-82, 2019.

JUNIOR O. C.; JUNIOR A. S.; SANT’ANNA A. M. O. Método de Decisão dos Processos de Prototipagem Rápida na Concepção de Novos Produtos. **G&P - Gestão e Produção**, São Carlos, v.22, n. 02, pp.345-355, 2015.

KAHANE, C. J. Lives Saved by Vehicle Safety Technologies and Associated Federal Motor Vehicle Safety Standards, 1960 to 2012. **National Highway Traffic Safety Administration**. pp. 525, 2015.

KELLENS K.; MERTENS R.; PARASKEVAS D.; DEWULF W.; DUFLOU J. R. Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM Contribute to a

More Sustainable Way of Part Manufacturing? **The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering**. Leuven, March 8th to 10th, p.582-587, 2017.

KUMAR S.; SINGH A. K. **FDM modeled polymer tooling for plastic injection molding**. **International Journal os Advances in Materials Science and Engineering**, v.7, n. 1, pp.1-12, 2018.

LIU S., SHIN Y. C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. **Materials and Design**. v.164. pp.1-23, 2019.

LOPES, M.; WILTGEN, F. Manufatura Aditiva na Indústria Automotiva Voltada para Sistemas de Segurança Veicular. **XLI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – ENEGEP**. Foz do Iguaçu, 18-21 outubro, p.1-16, 2021.

LOPES, M.; WILTGEN, F. Manufatura Aditiva em Moldes Mecânicos. IX Congresso **Internacional de Ciência e Tecnologia (CICTED 2020)**. Taubaté, 21-23 outubro, p.1-14, 2020.

LOPES, M.; WILTGEN, F. Manufatura Aditiva na Indústria Automotiva de Segurança Veicular. **X Congresso Internacional de Ciência e Tecnologia e Desenvolvimento (CICTED 2021)**. Taubaté, 05-07 outubro, p.1-19, 2021B.

LOPES, M.; WILTGEN, F. **Coletânea Especial de Engenharia de Produção 2**. Itajubá, MG, Editora Kreatik, 2021. 183 p.

LOPES, M.; WILTGEN, F. **Engenharia: Construção de Conhecimento**. Formiga, MG. Editora Uniesmero, 2022.

MARIN F.; SANTIAGO R.A.; SIMÃO I. T.; DRECHSLER M. F.; SACCHELLI C.M. Investigação Da Influência De Moldes Híbridos Fabricados Pela Técnica De FDM Para Injeção De Peças Plásticas. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Natal, 06 a 10 de novembro, p. 01-10, 2016.

MANRICH, S. **Processamento de termoplásticos**: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes. São Paulo, Editora Artliber, 2013, 429 p.

MARQUES, S.; SOUZA, A. F.; MIRANDA, J.; YADROITSAU, I. Design of Conformal Cooling for Plastic Injection Molding by Heat Transfer Simulation. **Polímeros**. v.25, n. 6, p.564-574, 2015.

MATSUMOTO, A. T. **Estudo do Desempenho de Reforços Poliméricos em Estruturas Veiculares Submetidas a Impacto**. 149 f., Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, 2010

MIRANDA, D. A. **Estudo Experimental e de Simulação Computacional Para Análise e Melhoria da Eficiência de um Molde de Injeção de Termoplásticos**. 115 f., Dissertação (Mestrado) - Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2017.

MIRANDA D. A.; NOGUEIRA, A. L. Influência dos parâmetros de processo e da presença de saídas de gases na eficiência de moldes de injeção de peças em

poliestireno cristal. **14° Congresso brasileiro de polímeros CBPOL**. Águas de Lindoia, 22 a 26 de outubro, p. 01-06, 2017.

NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION - NHTSA -. New Jersey Avenue, SE, Washington, pp.15, 2021. Disponível em: <https://www.nhtsa.gov/risky-driving/seat-belts>. Acesso em 20 maio de 2021.

NISHIDA, N.; IZUMIYAMA, T.; ASAH, R.; JIANG, F.; OHGI, J.; YAMAGATA, H.; IMAJO, Y.; SUZUKI, H.; FUNABA, M.; SUGIMOTO, S.; FUKUSHIMA, M.; CHEN, X.; SAKAI, T. Analysis of Individual Differences in Pelvic and Spine Alignment in Seated Posture and Impact on the Seatbelt Kinematics Using Human Body Model. **Journal PLOS ONE**. v. 16, n. 07, pp. 1-12, 2021.

NISHIMOTO A. R. **Simulação Numérica da Injeção de Termoplásticos em Moldes – Estudos Comparativos de Alguns Modelos Computacionais**. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

ORLOV A. V.; MASAYLO D. V.; SUFIAROV V.S.; BORISOV E.V., POLOZOV I. A.; POPOVICH A. A. A Novel Approaches to Components Design Additive Manufacturing Process. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**. St. Petersburg, April 12-13, v.194, pp.1-6, 2018.

PALMA, J. M. B.; BUENO, U. S.; STOROLLI, W. G.; SCHIAVUZZO, P. L.; CESAR, F. I. G.; MAKIYA, I. K. Os Princípios da Indústria 4.0 e os Impactos na Sustentabilidade da Cadeia de Valor Empresarial, **6th International Workshop, Advances in Cleaner Production**. São Paulo, 24 a 26 maio, pp. 1-8, 2017.

PANDA, B. K.; SAHOO, S. Thermo-Mechanical Modeling and Validation of Stress Field During Laser Powder Bed Fusion of AlSi10mg Built Part. **Results in Physics 12 (2019)**. v.12, n. 01, pp.1372-1381, 2019.

PARK, H. S.; DANG, X. P. Development of a Smart Plastic Injection Mold with Conformal Cooling Channels. **45th SME North American Manufacturing Research Conference NAMRC**. Los Angeles, June 4-8 , v. 45, p. 48-59, 2017.

RAMYA A.; VANAPALLI, S. L. 3D Printing Technologies in Various Applications. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)**, v.7, n. 03, pp.396-409, 2016.

ROCHA, J. R. P. **A Gestão do Desenvolvimento de Produto Via APQP na Indústria Automobilística**. 120 f, 2009, Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

ROMARO, M. **Comportamento dos Cintos de Segurança Infantis em Impactos Veiculares**. 59f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2005

SANTANA, L. **Avaliação das Capacidades da Impressão 3D de Baixo Custo a Fabricação de Snap-Fits: Uma Relação de Reconhecimento Usuário-Sistema de**

Impressão. 281 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2019.

SHAYFULL, Z.; SHARIF, S.; ZAIN, A. M.; SAAD, R. M.; FAIRUZ, M. A. Milled Groove Square Shape Conformal Cooling Channels in Injection Molding Process. **Materials and Manufacturing Processes**. v.28, pp.884-889, 2013.

SHINDE, M. S.; ASHTANKA, K. M. Additive Manufacturing–Assisted Conformal Cooling Channels in Mold Manufacturing Processes. **Advances in Mechanical Engineering**. v.9. n. 5 pp.1-14, 2017.

SILVA A. J. J. Análise comparativa da curva de viscosidade e do índice de fluidez de dois grades de polipropileno utilizando reometria capilar. **Revista Sítio Novo**, Palmas, v.4, n. 03, pp. 97-108, 2020.

SILVA, S. L. **Sistemática para o Projeto do Sistema de Refrigeração de Moldes para Injeção de Polímeros**. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal De Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

SILVA G. C. **Modelo de Referência para o Processo de Desenvolvimento do Produto Automotivo e Diretrizes para a Seleção de Protótipos Virtuais e Físicos**. 230 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

SILVEIRA, D. T.; GERHARDT, T. E. **Métodos e Pesquisa**. 1ed. Porto Alegre, Editora da UFRGS, 2009. 17 p.

SYED A. M. T; KOUMOULOS, E. P.; AMIT, B.; SUSMITA, B.; O'DONOGHUE, L.; CHARITIDIS C. Additive Manufacturing: Scientific and Technological Challenges, Market Uptake and Opportunities. **Material Today**, v.21, n. 01, pp.1-18, 2018.

STRATASYS. **TECHNICAL APPLICATION GUIDE DIGITAL ABS PLUS POLYJET SIMULATED ABS PLASTIC**, Rehovot, 2018, pp. 1-2.

STRATASYS. **TECHNICAL APPLICATION GUIDE FOR INJECTION DIGITAL ABS PLUS POLYJET SIMULATED ABS PLASTIC**, Rehovot, 2014, pp. 1-30.

SOARES, E. P.; SILVA, P. M.; AGRAWAL, P.; MÉLO, T. J. A. Efeito do índice de fluidez do polipropileno nas curvas de distribuição de tempos de residência em extrusora dupla rosca corrotacional. **21º CBECIMAT– Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Cuiabá, 9 e 13 de novembro, pp. 6715 – 6722, 2014.

SOUZA, A. F.; MARQUES, S. Análise da Influência do *Conformal Cooling* em um Molde de Injeção de Plástico. **Tecnologias para Competitividade Industrial**, v.7, n. 02, pp.1-15, 2014.

SOUZA, C. H.; MOREIRA, F. C.; PAULA, M.R. Métodos Numéricos Aplicados À Engenharia: uma Abordagem Conceitual e Proposta de Empregabilidade de

Metodologia Ativa de Ensino. **XVI Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**. Resende, 30 a 31 de outubro, pp.1-17, 2019.

TOLEDO, J. C.; ALLIPRANDINI, D. H.; MARTINS, M. F.; FERRARI, F. M. Práticas de Gestão no Desenvolvimento de Produtos em Empresas de Autopeças. **Produção**, v.18, n. 02, pp.405-422, 2008.

TUTESKI, O.; KOČOV, A. Mold Design and Production by Using Additive Manufacturing - Present Status and Future Perspectives. **International scientific journal "industry 4.0"**. v.3, n. 02, pp.82-85, 2018.

UDROIU, R.; BRAGA, C. Polyjet technology applications for rapid tooling. **MATEC Web of Conferences**. Brasov, May 24-27, pp. 1-6, 2017.

UNECE. A foundational Safety System concept to make roads safer in the Decade 2021-2030. **United Nations Publications**, pp.1-70, 2020.

VIETEN, T.; STAHL, D. SCHILLING, P., CIVELEK, F.; ZIMMERMANN, A. Feasibility Study of Soft Tooling Inserts for Injection Molding with Integrated Automated Slides. **Micromachines – MDPI**, v. 12, n. 730, pp.1-13, 2021.

VOJNOVÁ, E. The Benefits of a Conforming Cooling Systems the Molds in Injection Molding Process. **International Conference on Manufacturing Engineering and Materials, ICMEM**. Slovakia, June 610, pp. 535-543, 2016.

WANG, Y.; YU, K. M.; WANG, C. C. L. Spiral and Conformal Cooling in Plastic Injection Moulding. **Computer-Aided Design**, v. 63, p.1-11, 2015.

WILHELM, F. GARCIA, R. L. Equipamentos de Segurança Veicular: Uma Análise da Legislação Brasileira. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**. v. 4, n. 02, pp.283-298, 2018.

WHO - World Health Organization. **Global Status Report on Road Safety 2018**. Switzerland, 2018. pp. 1-20.

WILTGEN, F. Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)**, São Carlos, 5 a 7 de agosto, pp.1-5, 2019.

WILTGEN, F. A Manufatura Avançada Precisa de uma Engenharia Avançada. **Revista Tecnologia**, v. 41, n. 02, pp.1-11, 2020A.

WILTGEN, F. Técnica de Ensaio de Sistemas Complexos com Metodologia de Engenharia de Sistemas & Requisitos. **Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas**, v. 4, n. 01, pp.51-60, 2020B.

WILTGEN, F. Testing Plan in Systems & Requirements Engineering for Strategic Engineering Areas. **26º International Congress of Mechanical Engineering (COBEM)**, Curitiba, 22 a 26 novembro, pp.1-10, 2021A.

WILTGEN, F., Manufatura Aditiva em Metais – Leve, Forte e Inovador. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 13, n. 02, pp.47-58, 2021B.

YAKOUTA M.; ELBESTAWI M.A.; VELDHUIS S. C. A Review of Metal Additive Manufacturing Technologies. **Trans Tech Publications**, v. 278, pp.1-14, 2018.

ZIVANOVIC S. T.; POPOVIC M. D.; VORKAPIC N. M.; PJEVIC M. D. SLAVKOVIC N. R. An Overview of Rapid Prototyping Technologies using Subtractive, Additive and Formative Processes, **FME Transactions**, v. 48, pp. 246-253, 2020.

ZUCHOWSKI A.; JACKOWSKI J. Analysis of Properties of Operation of the Supporting Equipment for the Seat Belts. **Journal of KONES Powertrain and Transport**, v. 18, n. 01, pp.698-704, 2011.

APÊNDICE A

ARTIGO: MANUFATURA ADITIVA E SUBTRATIVA NA CONSTRUÇÃO DE MOLDES MECÂNICOS HÍBRIDOS PARA APLICAÇÃO EM MANUFATURA FORMATIVA.

AUTORES: Marcelo Lopes e Filipe Wiltgen.

REVISTA: RETEC – Revista de Tecnologia.

ANO: 2022.

MANUFATURA ADITIVA E SUBTRATIVA NA CONSTRUÇÃO DE MOLDES MECÂNICOS HÍBRIDOS PARA APLICAÇÃO EM MANUFATURA FORMATIVA

Filipe Wiltgen¹ e Marcelo Lopes²

Resumo

Este artigo apresenta a pesquisa realizada na aplicação em conjunto da manufatura aditiva com a manufatura subtrativa para a construção de moldes mecânicos híbridos de injeção plástica para aplicação em manufatura formativa. A pesquisa apresenta a análise da aplicação de resinas de alta resistência para a utilização na produção de um molde mecânico híbrido e os resultados obtidos com este processo. Nesta pesquisa foram testadas duas peças diferentes (forma geométrica, tamanho e função) utilizando os moldes mecânicos híbridos. Os resultados promissores são apresentados e discutidos no decorrer deste artigo. A fusão das manufaturas permite especular que a sua utilização vai de encontro com as melhorias de custo e prazo de fabricação. A atual competitividade na indústria automobilística mundial tem estimulado o desenvolvimento e a aplicação de novas técnicas as quais estão em consolidação e adaptação na indústria o que permite a pesquisa científica aplicada ser inovadora neste seguimento. A perspectiva para a fusão das manufaturas em outras aplicações e seu amadurecimento em técnicas, máquinas e materiais, vai permitir muitos avanços na indústria no futuro próximo.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, Manufatura Subtrativa, Manufatura Formativa, Moldes Mecânicos, Protótipos.

Abstract

This paper presents research carried out in joint application of additive and subtractive manufacturing for construction of hybrid plastic injection molds for application in formative manufacturing. The research presents analysis of application in high resistance resins for use in production of a hybrid mold and result obtained with this process. In this research, two different pieces (geometric shape, size and function) were tested using hybrid molds. The promising results are presented and discussed throughout this article. The fusion of manufactures, allows speculating that their use meets cost and manufacturing term improvements. The current competitiveness in global industry has stimulated development and application of new techniques which are still being consolidated and adapted in industry, which allows applied scientific research to be innovative in this segment. The prospects for fusion manufactures in other applications and maturing techniques, machines and materials, will allow for many advances in industry in near future.

Keywords: Additive Manufacturing, Subtractive Manufacturing, Formative Manufacturing, Mechanical Molds, Prototypes.

¹ Escritor, Pesquisador e Engenheiro Eletricista (1994) pela Universidade de Taubaté (UNITAU). Mestre (1998) e Doutor (2003) em Dispositivos e Sistemas Eletrônicos, na área de Fusão Termonuclear Controlada, pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Desde 2017, é professor do programa de mestrado em engenharia e coordenador do curso de especialização em energia solar fotovoltaica da Universidade de Taubaté, e também, professor da Faculdade de Tecnologia (FATEC - Pindamonhangaba e Bauru), desde 2021 nos cursos de manutenção industrial e automação industrial no Centro Paula Souza no estado de São Paulo. LFWBarbosa@gmail.com ou Filipe.Wiltgen@unitau.br.

² Engenheiro Mecânico (2006) e Mestrando em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté (UNITAU), marcelolopes5x@gmail.com.

1. Introdução

Na indústria há sempre a necessidade de inovar e desenvolver itens novos e muitas vezes complexos, preferencialmente em menor tempo e custos possíveis. Na visão empresarial isso se traduz em propaganda e lucro tornando-se um grande diferencial competitivo industrial (BUAINAIN *et al.*, 2018; MARQUES *et al.*, 2015).

O crescimento industrial está intimamente correlacionado com a inovação e o desenvolvimento de novos produtos e processos (SENHORAS e TAKEUCHI, 2006). Essa pesquisa tem como objetivo unir a Manufatura Aditiva (MA) com a Manufatura Subtrativa (MS), e assim, aproveitar o melhor das duas técnicas no desenvolvimento de novos moldes mecânicos do tipo híbridos.

A nova técnica de MA atende a necessidade de desenvolvimento de novos produtos e reduz significativamente os prazos de fabricação e de aperfeiçoamento de projetos, diferentemente do processo tradicional que utiliza a MS utilizada para construir moldes mecânicos, no qual o custo e os prazos quase sempre são um problema competitivo (WILTGEN e GOMES, 2021).

A indústria automobilística devido aos estímulos financeiros subsidiados pelo governo federal tem proporcionado melhores desenvolvimentos científicos e tecnológicos no setor (LOPES e WILTGEN, 2021). É fato que o desenvolvimento de projetos em pesquisa aplicada é algo novo neste seguimento da indústria, no qual há uma enorme lacuna de conhecimento científico acadêmico. Isso interfere muito na evolução industrial nacional em relação a indústria internacional. O sucesso e o dinamismos obtido em processos no exterior é devido a uma grande aproximação com a pesquisa científica e acadêmica.

Ponto importante de atenção nessa pesquisa científica é a utilização da MA aplicada na construção de parte dos moldes mecânicos de injeção em plástico aliada à MS, e dessa forma, possibilitar maior agilidade na execução da fase de desenvolvimento de novos produtos, impactando diretamente na fabricação.

Essa pesquisa tem como objetivo realizar o estudo e a análise da engenharia de MA aplicada na construção de moldes mecânicos por injeção em plástico via a Manufatura Formativa (MF), ou seja, construindo protótipos utilizando a MA em conjunto com a MS, com o intuito de fabricar uma quantidade restrita de peças em MF para testes. Os testes com a fusão destas técnicas de manufatura permitem obter um novo processo de desenvolvimento de produto.

Essa pesquisa visa obter os parâmetros técnicos de análise que permitam investigar profundamente os impactos desta técnica no processo de produção utilizando os moldes mecânicos desenvolvidos com a MA e MS para a produção via MF.

A proposta da pesquisa utilizando os três tipos de manufaturas (MA, MS e MF) possui relevância científica para a evolução da engenharia de manufatura permitindo o grande aumento na flexibilidade construtiva e na redução do tempo de produção, tanto em pequena escala, quanto em larga escala industrial no futuro próximo.

2. Diferença entre os Tipos de Manufaturas

A indústria passou por uma grande evolução durante as últimas décadas, esta evolução é verificada principalmente nas novas metodologias aplicadas no processo produtivo, no desenvolvimento de novos materiais e novas técnicas, na utilização de novas tecnologias de manufatura o que culminou em novos e inovadores produtos.

Nessa pesquisa científica é dada ênfase nos processos de MA, MS e MF, ou seja, nas manufaturas existentes.

Na MS a peça é construída com a remoção de material. Nesse processo a peça é esculpida removendo o material para sua construção. A MS é conhecida por ter boa precisão geométrica e acabamento superficial, porém estes resultados dependem tanto da qualidade da máquina, quanto da experiência profissional do operador que utiliza a máquina.

A tecnologia mais recente é a MA que começou a se consolidar na década de 80 (ALCALDE; WILTGEN, 2018). A MA é um processo de fabricação que utiliza um desenho ou modelo em 3D feito digitalmente em *CAD* (*Computer Aided Design* – Desenho Assistido por Computador) no qual utiliza-se o modelo em 3D para compor a programação de fabricação no qual a matéria-prima é depositada camada por camada no eixo *Z* e a forma geométrica de cada camada nos eixos *X* e *Y*.

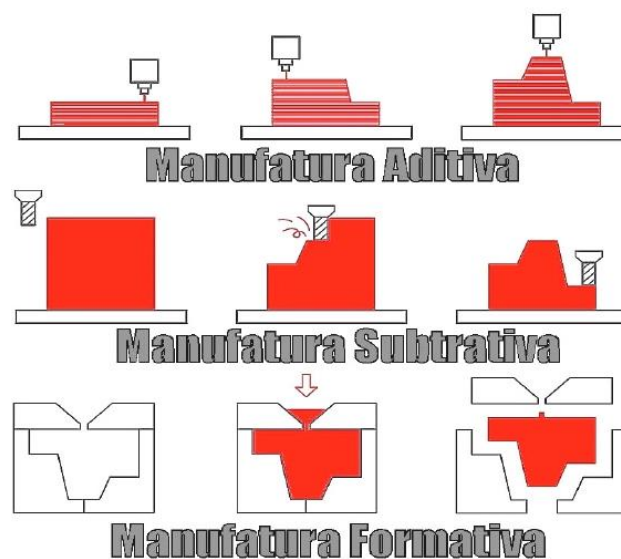
Inicialmente desenvolvida para a fabricação de protótipos físicos a MA tem evoluído em precisão e custo, assim como, nos tipos de materiais que são empregados na fabricação. A matéria-prima vai desde alimentos, plásticos e resinas até mesmo ligas metálicas nobres (WILTGEN, 2019; WILTGEN e ALCALDE, 2019; WILTGEN, 2021A; WILTGEN, 2021B). As principais vantagens em relação aos outros dois tipos de manufatura são devido ao fato de utilizar apenas a quantidade necessária de matéria-prima para a fabricação, e desta forma, não gera desperdício de materiais, não existem restrições geométricas e não necessitam de adoção de moldes (BARBOSA *et al.*, 2019).

A MF no processo de injeção de termoplástico é utilizada quase sempre para a produção em larga escala devido ao custo em diversos seguimentos industriais (MIRANDA, 2017).

Para conformar peças na forma que se deseja é necessário a utilização de um molde mecânico que por definição, diz-se que um molde é um modelo de uma cavidade com a geometria da peça no qual deve ser introduzido material na forma líquida ou semilíquida, que ao se solidificar fica com a mesma forma do molde mecânico (HARADA, 2004).

As principais diferenças nesses processos de fabricação podem ser observadas na Figura 1.

Figura 1 - Processos de manufaturas (Aditiva, Subtrativa e Formativa).
Observar em vermelho o objeto construído.



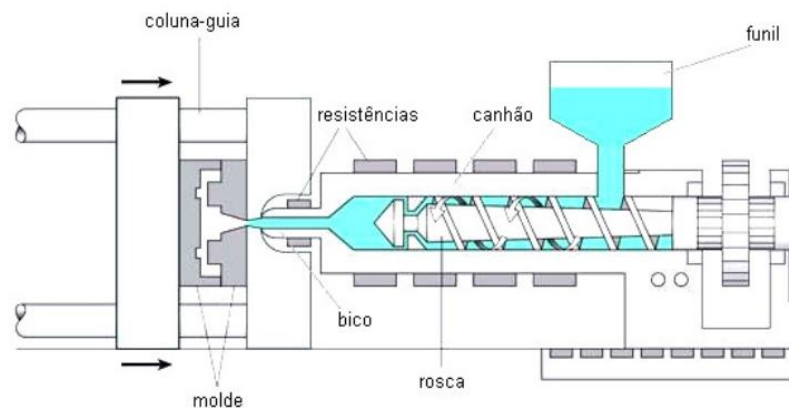
Fonte: WILTGEN (2019).

Os termoplásticos quando aquecidos se transformam no estado físico líquido (pastoso e viscoso) que possibilita o processo de conformação nas mais diversas formas geométricas. Ao resfriar voltam ao estado físico sólido podendo ser utilizado em diferentes tipos de montagens e peças. Esse processo pode ser reversível, diferente dos elementos de matéria-prima termofixos que não podem ser novamente conformados a partir de um aquecimento. Essa característica dos termoplásticos é importante para o processo de injeção via MF.

O processo de injeção consiste nas seguintes etapas: a matéria-prima (na cor azul), que se encontra na forma de grãos sólidos, é inserida na máquina injetora através do funil na qual é direcionada para o cilindro de plastificação que em seu interior possui uma rosca sem fim que conduz a matéria-prima no qual será aquecida via eletricidade.

Ao final do percurso, o polímero fundido (na cor azul) passa pelo bico injetor, penetra no molde e preenche a cavidade no interior do molde mecânico bipartido. É mantida uma pressão até que o polímero fundido seja resfriado e solidificado. Ao final desta etapa o molde mecânico se abre e a peça pronta e conformada é extraída e imediatamente se inicia um novo ciclo. Esse processo pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Processo de MF via injeção de termoplástico.



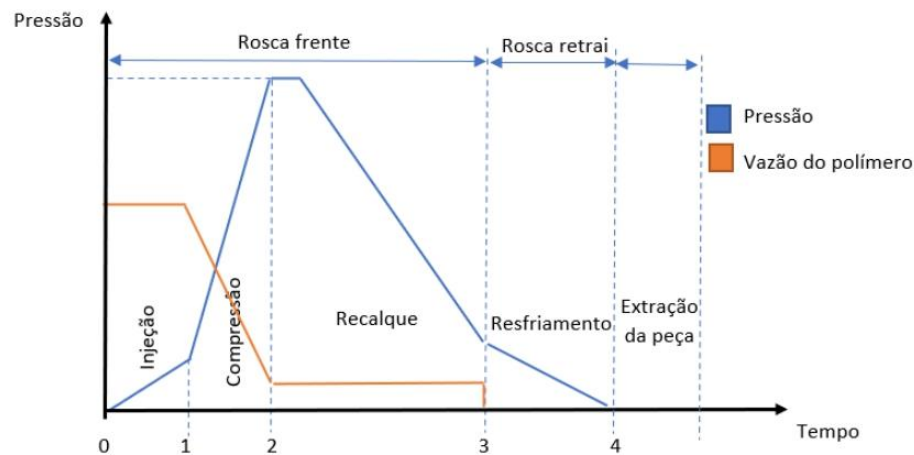
Fonte: Adaptada de LOPES e WILTGEN (2021).

Para cada peça produzida em MF, passa por um ciclo completo de fabricação no qual os parâmetros principais são a pressão de injeção e a temperatura do polímero fundido. Esses parâmetros devem ser bem controlados para que a qualidade da peça produzida no processo de MF esteja de acordo com os requisitos especificados.

Na Figura 3 pode ser observado o ciclo de produção em MF, assim com as principais fases do processo com a variação de pressão em função do tempo. Observa-se na Figura 3 que na fase inicial a rosca da injetora avança e transfere o material fundido (cor azul) para dentro da cavidade do molde mecânico até o preenchimento total da cavidade. Na sequência ocorre à fase de compressão no qual a pressão aumenta compactação da matéria-prima a fim de compensar à redução volumétrica da peça (contração do material). Em seguida o processo de recalque faz a compactação final garantindo a geometria correta da peça fabricada.

Na região em destaque (em vermelho), tem-se a fase mais crítica do processo para a resistência do molde mecânico híbrido, com o aumento da pressão e temperatura que ocorre na fase de compressão.

Figura 3 - Ciclo de manufatura formativa com suas principais fases do processo (pressão por tempo).



Fonte: Próprios Autores.

3. Moldes Mecânicos Híbridos Fabricados em Manufatura Aditiva e Subtrativa

Um molde mecânico do tipo híbrido recebe este nome quando em sua construção aplica-se dois ou mais processos distintos de manufatura, nesse caso de pesquisa as MA e a MS. A aplicação de manufaturas híbridas para a fabricação de moldes mecânicos é a parte central dessa pesquisa, porém, isso é apenas uma pequena fração das inúmeras possibilidades da junção de manufaturas (CORTINA *et al.*, 2018; WILTGEN, 2019).

Considerando que a manufatura híbrida busca maximizar as vantagens dos diferentes processos, o molde mecânico híbrido é construído com diferentes propósitos. Um propósito é o aumento da produtividade em um processo de injeção plástica com MA.

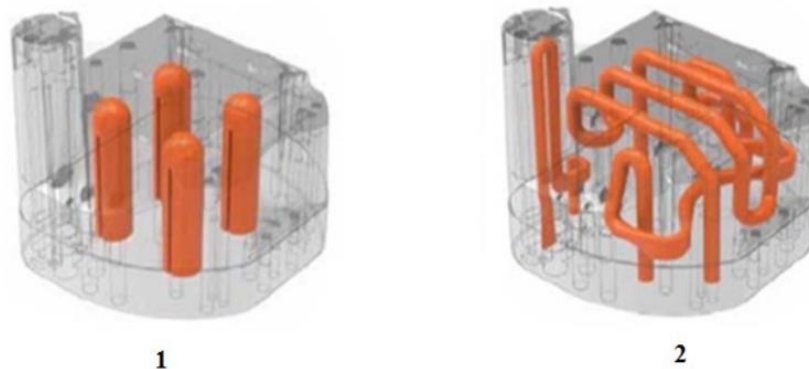
Considerando que a maior parte do tempo de fabricação em injeção plástica está no processo de refrigeração do molde mecânico, é possível construir canais de resfriamento mais eficientes em MA, e isso reduz o ciclo de injeção de plástico, e conseqüentemente o aumento da produção (TAMANINI e WILTGEN, 2021; TAMANINI e WILTGEN, 2022; LOPES *et al.*, 2022; COSTA, 2019).

Canais de refrigeração de moldes mecânicos construídos via a MS são realizados baseados apenas em furos lineares, devido a limitações da construção geométrica em MS.

Devido a isso, a refrigeração de moldes mecânicos em MS possui baixo rendimento na troca de calor e o resfriamento da peça ocorre de forma desigual. Esse problema pode ser evitado com a construção de canais de refrigeração via MA que não possui limitação de construção geométrica.

Um projeto de canais de refrigeração de moldes mecânicos mais eficientes e homogêneos faz muita diferença na fabricação da peça e conseqüentemente na produção das mesmas. Isso pode ser observado na Figura 4 com as diferenças entre canais de refrigeração (cor laranja) em MS (1) e MA (2). Os canais de refrigeração de moldes mecânicos devem ser geometricamente projetados para ficarem o mais próximo possível da forma geométrica da peça (cor cinza), obtendo desta forma um resfriamento eficiente do molde (LOPES *et al.*, 2022; ARORA, 2019; KOCHOV, 2018).

Figura 4 - Canais de resfriamento (cor laranja) construídos via manufatura subtrativa (1) e manufatura aditiva (2)



Fonte: Adaptado de KOCHOV (2018).

O bloco que suporta os moldes mecânicos deve ser construído em metal, portanto também pode vir a ser construído via a MA com a utilização de máquina de MA em metais (WILTGEN, 2021A; GOMES e WILTGEN, 2020).

Existe uma variedade de materiais metálicos disponíveis, a utilização da tecnologia no futuro próximo na construção de moldes mecânicos pode impactar muito na produtividade e na melhoria da qualidade da peça injetada (WILTGEN, 2021A; MARQUES *et al.*, 2015).

As cavidades moldantes dos moldes mecânicos híbridos nessa pesquisa foram construídas em resina de alta resistência com o uso de MA em máquinas de jateamento de material, o que proporciona melhor acabamento superficial e resistência mecânica adequada para a aplicação em questão (GRIFFIN, 2019).

4. Manufatura Aditiva no Processo de Construção em 3D e a Prototipagem

A prototipagem é uma técnica utilizada para acelerar o desenvolvimento de projetos, quase sempre é baseado na confecção de protótipos em material similar (de custo menor) ou o mesmo em materiais nobres no qual será desenvolvido o projeto real. Entretanto, quase sempre o protótipo é fabricado em uma escala diferente (reduzida) do tamanho final de projeto (WILTGEN, 2019).

Um protótipo então é a denominação dada a uma peça que está em fase de desenvolvimento. No desenvolvimento são construídos muitos tipos de protótipos, até que o projeto seja concluído. Protótipos podem ser aplicados para estudos de forma, avaliação funcional, análise dos processos de fabricação, entre outros. Em análise de fabricação é fundamental utilizar protótipos, pois permitem uma avaliação adequada antes do processo de fabricação continua definitiva. A utilização de tecnologia de prototipagem permite a agilidade necessária para garantir a inovação na indústria (WILTGEN, 2019).

Durante o processo de desenvolvimento de uma peça são gerados diversos protótipos, os quais são exaustivamente testados e aprimorados, até que finalmente atendam todos os requisitos impostos pelo projeto para que possam ser desenvolvidos como um novo produto (WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2022).

O processo completo de prototipagem inclui diversas fases de desenvolvimento, os quais tem início com o projeto em *CAD*, com protótipos digitais em 3D, que passam por diversas avaliações e simulações computacionais, como interferências mecânicas funcionais e o estudo de cadeia de tolerâncias.

No desenvolvimento de *CAE (Computer Aided Engineering)* são realizadas análises de elementos finitos, testes digitais com carregamento das propriedades físicas e com as solicitações de cargas baseadas na especificação e aplicação do produto.

Logo que os resultados com o protótipo digital, inicia-se a construção de um protótipo físico real. Isso sempre é necessário devido a limitação de informação obtida por simulações computacionais em *CAD*.

As diversas variáveis ambientais são imprevisíveis e só podem ser medidas e confirmadas em uma peça física real. Com os protótipos construídos podem ser realizadas montagens e manuseios ergonômicos o que permite um sentimento físico dos elementos desenvolvidos (LOPES e WILTGEN, 2022).

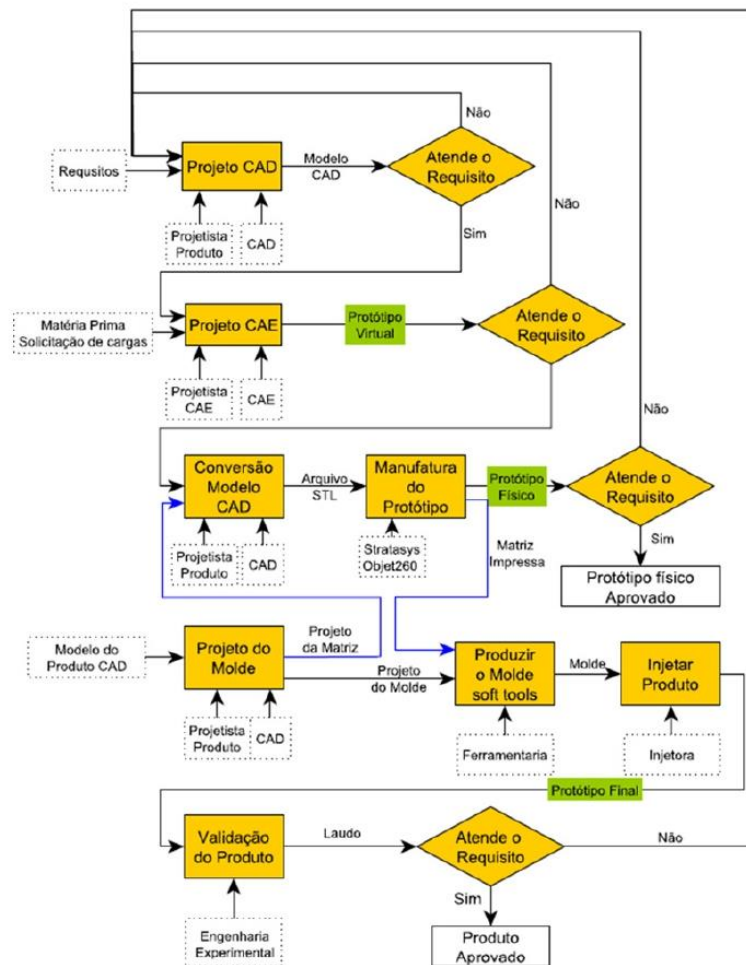
Porém, sempre existem alguns tipos de peças que devido a sua aplicação, e sua sequência de ensaios e testes (WILTGEN, 2020) será necessário a construção de pequenas

quantidades (lotes) com suas características físicas de projeto (técnica de processo e tipos de matéria-prima), estes quase sempre são chamados de protótipos finais de ensaios e testes.

Isso se faz necessário para a realização de ensaios físicos (temperatura, humidade, pressão e ciclagem mecânica) que podem influenciar o desempenho da peça. Esses ensaios quando bem-sucedidos podem alavancar o nível de maturidade tecnológica (*TRL - Technology Readiness Level*), permitindo que uma ideia se transforme em um projeto, e o projeto em um produto (WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2022).

Na Figura 5, tem-se o fluxograma sintético do processo de desenvolvimento de uma peça baseado em um modelo digital em 3D para desenvolvimento e a fabricação de protótipos.

Figura 5 - Fluxograma sintético para o desenvolvimento de protótipos.



Fonte: Próprios Autores.

A evolução das tecnologias em MA vem proporcionando a construção de novas máquinas, com possibilidade de produzir peças com maior precisão e diferentes tipos de materiais (WILTGEN, 2019; ALCALDE e WILTGEN, 2018; GOMES e WILTGEN, 2020).

O processo de MA se caracteriza pela inclusão de materiais para a fabricação de peças, as quais segundo as normas técnicas existentes, dizem ser sete os tipos de técnicas que aplicam diferentes tecnologias na construção em 3D. Estas se diferenciam em função das características dos processos, e dos tipos de matérias-primas empregadas na fabricação (GOMES e WILTGEN, 2020; SANTANA, 2019).

A tecnologia de MA mais relevante para essa pesquisa é a de jateamento de material que faz uso de matéria-prima líquida. Essa técnica consiste em uma cabeça de impressão que deposita gotas de matéria-prima no estado líquido preenchendo a área de uma camada movendo-se no plano *XY*.

A confecção de uma nova camada ocorre quando a cabeça de impressão se desloca na altura, ou seja, no eixo *Z* seguindo as informações do fatiamento da peça a ser fabricada. A solidificação da camada anteriormente depositada é realizada através da radiação de um feixe de luz ultravioleta. Logo que a luz ultravioleta ilumina a camada o material é solidificado em um processo de cura (cristalização).

Nessa técnica são utilizados dois tipos de materiais em estado líquido que quando são misturados permitem a construção da peça. Existe também, outro tipo de material menos nobre e solúvel em água destinado apenas para a fabricação de suportes removíveis e descartáveis.

Existe uma variedade de materiais disponíveis para fabricação de moldes de injeção impressos em 3D (CHEN, 2020): *PETG* (tereftalato de polietileno), *ABS* (acrilonitrila butadienoestireno), *NYLON* (conhecido como poliamida), *PP* (polipropileno) e *POM* (poliacetal).

A matéria-prima utilizada nessa pesquisa para a construção dos moldes híbridos foi o *RGD-515* e *RGD-531*. Essa matéria-prima após sua mistura e durante a sua fabricação possibilita construir camadas com espessuras de até ~30 μm (trinta micrometros), e após finalizada a construção a peça as propriedades físicas serão semelhantes à do polímero do tipo *ABS*.

5. Fabricação de Moldes Mecânicos Híbridos

A vida útil de molde mecânico fabricado via MA é determinado principalmente pela ação da temperatura e pressão impostos no processo de MF, e também, devido as características geométricas da própria peça a ser injetada (JÚNIOR, 2003; DE BLASIO, 2007; DRECHSLER *et al.*, 2016).

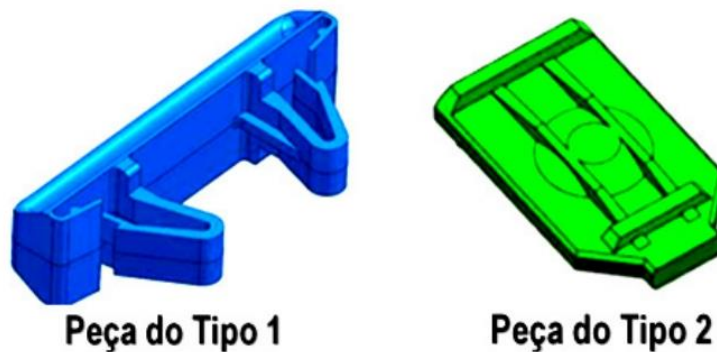
Dentre essas características geométricas importantes na fabricação de moldes mecânicos em MA, destacam-se:

- **Ângulo de Saída:** nome dado ao ângulo formado entre a face da cavidade da peça e o eixo de abertura do molde, existe restrição a geometria que possui ângulos reto. Esse esforço de extração pode danificar o molde em MA, quanto maior o ângulo de saída menor será a força de extração, recomendando-se um ângulo mínimo de $\sim 5^\circ$ para facilitar a extração das peças na cavidade do molde;
- **Espessuras Constantes:** o desenho do produto deve possuir a espessura constante. Isso colabora para o preenchimento do plástico e diminui a perda de calor uniforme durante a injeção, evitando falhas de empenamento;
- **Eliminação ou Redução de Gavetas:** a necessidade de gavetas surge quando existe uma geometria que a extração é negativa, além de aumentar a complexidade do molde, pode dificultar a construção em MA, o uso de elementos móveis, as gavetas, podem causar rebarbas devido o atrito;
- **Ressaltos nos Moldes:** durante a injeção a cavidade do molde é submetida a pressão do polímero fundido, portanto se houver a necessidade de ressaltos, a relação de espessura com altura desse ressalto deve ter uma proporção mínima para resistir a deflexão ou ruptura por cisalhamento;
- **Sem Revestimentos:** A utilização de revestimentos com de nítreto de titânio para aumentar a resistência mecânica nos moldes produzidos com MA não são recomendadas devido ao aumento da temperatura no processo de injeção, o que compromete a durabilidade do molde mecânico e pode alterar a dimensão da peça.

A matéria-prima a ser injetada tem influência direta na vida útil do molde mecânico, sendo que o índice de fluidez dos tipos de polímeros utilizados é a propriedade física que mais impacta na duração do molde. Quanto maior for seu valor, mais fácil é o preenchimento da cavidade do molde, exigindo assim uma menor pressão de injeção de plástico (DE BLASIO, 2007).

Nessa pesquisa foram produzidos dois tipos de peças, cuja geometria e matéria-prima são distintas. Na Figura 6 é possível observar os dois tipos distintos de peças.

Figura 6 - Ilustração dos tipos de peças fabricadas em plástico com moldes mecânicos híbridos.



Fonte: Próprios Autores.

A peça do tipo 1 (cor azul) foi produzida utilizando o polímero do tipo *POM* e a peça do tipo 2 (cor verde) foi produzida em poliéster do tipo elastômero.

O molde mecânico híbrido completo e montado pode ser visto em corte na Figura 7, no qual é possível notar as características e as partes que compõe todo o conjunto utilizado na fabricação de peças em MF via injeção em plástico. O porta molde utilizado nesse desenvolvimento é um item comercial, construído em aço *SAE 1045*, de fácil usinagem capaz de abrigar os moldes mecânicos fabricados em MA.

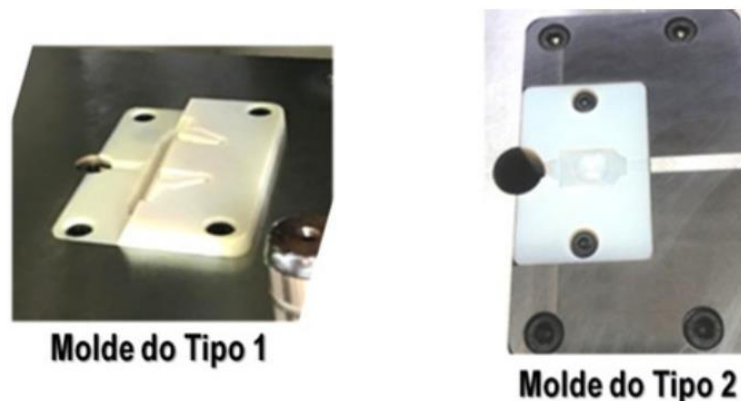
O canal de injeção de plástico que possui uma seção transversal com diâmetro entre ~5 a ~8mm, com o ponto de injeção em forma de leque e saídas de gás para facilitar o preenchimento da cavidade (NOGUEIRA e MIRANDA, 2017). Durante o processo de injeção o molde mecânico deve manter uma temperatura controlada, portanto a refrigeração do molde deve ser tal que mantenha uma troca de calor constante.

Considerando que este molde mecânico híbrido utilizado nessa pesquisa deve produzir uma quantidade reduzida de componentes para teste, o molde mecânico foi concebido de maneira que possa ser intercambiável possibilitando a utilização de um porta-molde para diferentes tipos de peças.

Para balancear a pressão de injeção do plástico durante o preenchimento das cavidades dos moldes mecânicos e garantir que o molde se mantenha fechado durante o processo é necessário manter uma pressão contrária todo o tempo de injeção garantindo o fechamento do molde.

Para suportar a pressão de injeção do plástico, os moldes mecânicos produzidos em MA são alojados em um bloco de aço produzido em MS, conforme pode ser visto na Figura 7. Assim sendo, as tensões não atuam diretamente sobre o molde em MA, e sim, na região do bloco de aço evitando deformação prematura da linha de fechamento. Esta estratégia reduz a possibilidade de dilatação térmica do molde mecânico em MA devido à alta temperatura do plástico fundido durante a produção das peças.

Figura 7 – Moldes mecânicos em MA (cor branca) instalados no bloco de aço em MS.



Fonte: Próprios Autores.

Para melhorar a resistência mecânica e consequentemente aumentar a vida útil dos moldes mecânicos em MA é sempre importante observar o sentido de fabricação em MA que deve ser o mesmo sentido do fluxo de injeção de plástico, ou seja, o canal de injeção deve estar posicionado sempre paralelo ao deslocamento (no eixo *X* da cabeça de impressão 3D).

As camadas de MA devem permitir obter uma superfície lisa na cavidade do molde a fim de favorecer o fluxo do material fundido que irá compor as peças fabricadas em MF. Programas computacionais de simulação de injeção podem ser utilizados como ferramenta de análise do comportamento da fabricação das peças principalmente para mostrar os pontos críticos de injeção nos moldes mecânicos.

A análise e estudo de preenchimento de cavidades em injeção plástica via simulação computacional (LOPES *et al.*, 2022) mostram as áreas que recebem maiores pressões e temperaturas ao longo do tempo. A simulação é uma importante ferramenta para indicar as possíveis falhas no molde durante as análises evitando que isso ocorra na fabricação.

Após a conclusão do estudo de simulação computacional, observa-se o comportamento das peças do tipo 1 na região de injeção em plástico considerada mais crítica.

Note que essa região é a que possui a maior temperatura e pressão ($\sim 110^{\circ}\text{C}$ e $\sim 40\text{Mpa}$) no início do preenchimento com plástico.

Figura 8 - Análise da simulação computacional na peça do tipo 1. As regiões destacadas com círculos (cor branca) mostram a parte mais crítica na fabricação.



Fonte: Próprios Autores.

Isso mostra como a simulação computacional é importante na fase de desenvolvimento, incluindo o início das fabricações de protótipos físicos reais que devem sempre aguardar as análises de simulação para correção e ajustes necessários nos modelos digitais em 3D.

6. Resultados dos Testes

O molde mecânico híbrido foi montado na injetora de plástico para realizar os ensaios e testes construtivos. Foram estimados os parâmetros para a construção dado que este molde mecânico híbrido é diferente dos tradicionais. Durante os ensaios de fabricação nesse caso a atenção ao processo foi maior, e foi aplicada pressão de injeção inferior a usual cerca de $\sim 20\%$ (vinte por cento) menor.

O molde mecânico híbrido funciona com sistema de refrigeração via água resfriada, sendo que a temperatura é monitorada durante o processo de fabricação devido a influência na viscosidade do material fundido nos moldes no qual a temperatura recomendada para o molde mecânico é entre ~ 45 e $\sim 50^{\circ}\text{C}$.

O ciclo de injeção em plásticos com os moldes mecânicos híbridos é maior que o tradicional construído com MS. Isso ocorre devido a abertura do molde mecânico híbrido para a verificação da temperatura, com a refrigeração forçada via ar comprimido e a aplicação de um tipo de desmoldante a base de água.

A temperatura de injeção é a temperatura que o material plástico fundido entra na cavidade do molde. Esta temperatura no caso dos testes deste molde mecânico híbrido foi mantida nos valores mínimos. Entretanto, no decorrer dos testes é importante encontrar o equilíbrio entre a temperatura no molde e da viscosidade do plástico fundido (BATISTA *et al.*, 2019). Desta forma, menor será a dificuldade de escoamento do plástico para realizar o preenchimento da cavidade, e por consequência a formação completa da peça com qualidade.

Na Figura 9 é possível notar que durante os testes, foram realizadas aproximações gradativas de preenchimento utilizando a metodologia de preenchimento incompleto, até que a peça seja totalmente formada.

Figura 9 - Teste de preenchimento incompleto da peça tipo 2 em molde mecânico híbrido.



Fonte: Próprios Autores.

Após a injeção de 5 (cinco) peças do tipo 1, o molde mecânico em MA se deformou na região mais crítica (visto no destaque na Figura 8), que impediu a continuidade dos testes. A deformação foi provocada na região que ocorreu a maior pressão e temperatura, justamente no local que existem ressaltos que não resistiram à deflexão.

Com relação a peça do tipo 2, os testes ocorreram sem problemas e foram fabricadas no total 25 (vinte e cinco) peças necessárias para o teste. As peças foram dimensionadas e comparadas com os valores de referência, além da observação de empenamento e problemas de preenchimento ou rebarbas.

Nesse tipo de peça foi percebida a formação e a presença de rebarbas na região de saída de gás. Entretanto, isso não foi considerado como um problema dado que esta região não possui funcionalidade, não interferindo na eficiência da peça do tipo 2.

O dispositivo porta moldes em aço é utilizado para alojar o molde mecânico híbrido o que permite a utilização de um único molde por vez. Desta forma é possível utilizar moldes intercambiáveis em diferentes tipos de peças utilizando o mesmo porta molde o que representou uma economia em tempo e em custo.

7. Discussão e Perspectivas Futuras

A evolução da indústria com a MA está mudando os processos produtivos. Isso fica evidenciado nessa pesquisa através da fusão de manufaturas para a construção de moldes mecânicos híbridos utilizados em injeção de plástico em MF.

O molde mecânico em MA feito de resina plástica necessita, como apresentado anteriormente, o controle da temperatura e pressão no molde mecânico híbrido para garantir uma maior vida útil e a estabilidade dimensional das peças.

Em moldes mecânicos híbridos o ciclo de produção é mais longo devido às características de baixa troca térmica. Entretanto, nessa aplicação, com pequenos lotes de peças, este efeito não foi considerado um problema.

No caso da fabricação de via a MA em metal, isso pode aumentar a produtividade dos moldes mecânicos, e a qualidade final das peças injetadas. Devido a maior eficiência que ocorre na troca térmica obtida pela construção de canais de refrigeração com geometrias eficientes. Entretanto, isso ainda não foi testado nessa pesquisa.

Com a opção de utilizar a união das manufaturas em moldes mecânicos híbridos para a construção de peças devem ser consideradas com uma boa opção na indústria.

Conforme apresentado, o estudo com peças do tipo 2 obtiveram bons resultados uma vez que as medidas de desvio padrão do processo ficaram dentro dos valores esperados. Isso corrobora com as pesquisas e demonstra que essa técnica de união de manufaturas para fabricação de moldes híbridos pode ser aplicada na produção de peças similares.

O processo tradicional de fabricação em MS utilizado em moldes mecânicos possui altos custos, e os prazos de fabricação quase sempre são fatores limitantes na produção de peças. A comparação dos custos envolvidos na fabricação de moldes mecânicos em MS exige a utilização de ferramentas e máquinas de alta precisão, e profissionais especialistas, que além de serem muito valorizados, também são raros de serem encontrados atualmente.

O molde mecânico híbrido dessa pesquisa permitiu reduzir o prazo de fabricação de forma significativa com o uso da MA. Segundo os testes realizados e apresentados nesse artigo, a fabricação foi ~11 (onze) vezes mais rápida e o custo cerca de ~5 (cinco) vezes menor quando comparados com a manufatura tradicional (MS).

Esses resultados comprovam que a utilização progressiva nas substituições de MS por MA será cada vez mais importante para a fabricação de peças na indústria do futuro.

Referências

ALCALDE E.; WILTGEN, F., Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro. **Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté (UNITAU)**. v.24(02), pp.1-9, 2018.

ARORA, N., Design and Manufacturing Injection Mould Conformal Cooling Channels using Additive Manufacturing. **International Journal of Mechanical and Production Engineering**. v.7, pp.56-57, 2019.

BATISTA, E.R.S; FRANCELINO, G.; MICAÏL, T.P.; OLIVEIRA, D., A Importância dos Sistemas de Refrigeração em Moldes de Injeção: Análise de um Processo de Fabricação pelo Ponto de vista Termodinâmico. **XIII Mostra Científica (CESUCA)**. Cachoeirinha, pp.1-13, 2019.

BARBOSA, F.A.; HELLENO, A.L.; JUNIOR, M.V.; VELÁZQUEZ, D.R.T. Vantagens e Desafios da Manufatura Híbrida - Integrando Manufatura Aditiva e Subtrativa. **XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Santos, 15 a 18 de outubro, pp.1-18, 2019.

BUAINAIN, A.M; BUENO, C.S.; SOUZA, R.F., Propriedade Intelectual, Inovação e Desenvolvimento: Desafios para o Brasil. **Associação Brasileira de Propriedade Intelectual (ABPI)**. pp.1-112, 2018.

CHEN, Y., 3D Printed Injection Mold: All You Need to Know. **3D Printing Magazine (All3DP)**. pp.1-10, 2020.

CORTINA, M.; ARRIZUBIETA, J.I.; RUIZ, J.E.; UKAR, E. Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations. **Journal Materials**. pp.1-27, 2018.

DE BLASIO, C.A., Solução de Defeitos na Moldagem por Injeção de Termoplásticos. **Dissertação (Mestrado) na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)**. 2007. 150p.

DRECHSLER, M.F.; MARIN, F.; SACCHELLI, C.M.; SANTIAGO, R.A.; SIMÃO, I.T. Investigação da Influência de Moldes Híbridos Fabricados pela Técnica de FDM para Injeção de Peças Plásticas. **22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECiMat)**. Natal, 6 a 10 de novembro, pp.05-06, 2016.

GOMES, J.; WILTGEN, F. Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais e Máquinas. **Revista Tecnologia**. v.41(01), pp.1-16, 2020.

GRIFFIN, M., 3D Printing vs Injection Molding – Know the Differences. **3D Printing Magazine (All3DP)**. pp.1-8, 2019.

HARADA, J., Moldes para Injeção de Termoplásticos: Projetos e Princípios Básicos. **Artliber**. 2004. 308p.

JÚNIOR, R.S.A., Proposta de Utilização de Ferramentas CAE no Planejamento do Processo de Moldagem por Injeção de Termoplásticos em Moldes de Estereolitografia. **Tese (Doutorado) na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)**. 2003. 176p.

LOPES, M.; WILTGEN, F., Manufatura Aditiva na Indústria Automotiva voltada para Sistemas de Segurança Veicular. **Coletânea Especial de Engenharia de Produção 2**. Ed. Kreatik, cap.13, pp.183-196, 2021.

LOPES, M.; WILTGEN, F., Construção de Protótipos Experimentais via Manufatura Aditiva - Inovação em Sistemas de Segurança Veicular. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v.14(01), pp.1-11, 2022.

LOPES, M.; TAMANINI, C.; WILTGEN, F.; CRUZ, F., A Importância das Simulações na Manufatura Aditiva de Moldes Mecânicos. **Revista Mundi**. Aguardando publicação. pp.1-24, 2022.

MARQUES, S.; SOUZA, A. F.; MIRANDA, J.; YADROITSAU, I. Design of Conformal Cooling for Plastic Injection Moulding by Heat Transfer Simulation. **Polímeros**. v.25(06), pp.564-574, 2015.

MIRANDA, D.A. Estudo Experimental e de Simulação Computacional para Análise e Melhoria da Eficiência de um Molde de Injeção de Termoplásticos. **Dissertação (Mestrado) na Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE)**. 2017. 112p.

NOGUEIRA, A.L.; MIRANDA D.A. Influência dos Parâmetros de Processo e da Presença de Saídas de Gases na Eficiência de Moldes de Injeção de Peças em Poliestireno Cristal. **14º Congresso Brasileiro de Polímeros (CBPOL)**, Águas de Lindoia, 22-26 de outubro, pp.05-07, 2017.

SANTANA, L., Avaliação das Capacidades da Impressão 3D de Baixo Custo na Fabricação de Snap. **Tese (Doutorado) na Universidade do Porto (FEUP)**. 2019. 251p.

SENHORAS, E.M.; TAKEUCHI, K.P. Gestão da Inovação no Desenvolvimento de Novos Produtos. **IV Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia (SEGeT)**. Resende, 22-24 de outubro, pp.1-15, 2006.

TAMANINI, C.; WILTGEN, F., Moldes com Múltiplos Canais Refrigeração via Manufatura Aditiva. **Workshop Engenharia Mecânica (WEN2021) Desafio da Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico na Engenharia em Tempos de Pandemia**. São Paulo, 28 de setembro. pp.1-14, 2021.

TAMANINI, C; WILTGEN, F., Canais de Refrigeração Ramificados e Capilares para Moldes Mecânicos Fabricados via Manufatura Aditiva. **XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM)**. Teresina, 07 a 11 de agosto. Aguardando publicação. pp.1-6, 2022.

WILTGEN, F., Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)**. São Carlos, 5 a 7 agosto, pp.1-5, 2019.

WILTGEN, F.; ALCALDE, E., Prototipagem Rápida Aditiva Aplicada em Dispositivos Funcionais de Auxílio Humano. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)**. São Carlos, 5 a 7 agosto, pp.1-6, 2019.

WILTGEN, F., Técnica de Ensaio de Sistemas Complexos com Metodologia de Engenharia de Sistemas & Requisitos. **Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas**. v.4(01), pp.51-60, 2020.

WILTGEN, F., Manufatura Aditiva em Metais - Leve, Forte e Inovador. **Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas**. v.13(02), pp.1-12, 2021A.

WILTGEN, F.; GOMES, J., Simulação Fluidodinâmica de Trem de Pouso de Aeronaves: Manufatura Aditiva versus Manufatura Subtrativa. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v.13(04), pp.75-84, 2021.

WILTGEN, F., Perspectivas da Manufatura Aditiva na Construção de Alimentos. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v.13(04), pp.29-45, 2021B.

WILTGEN, F., Projetos Baseados em Requisitos. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v.14(01), pp.240-251, 2022.

KOCHOV, A., Mold Design and Production by Using Additive Manufacturing (AM) - Present Status and Future Perspectives. **International Scientific Journal Industry 4.0**. v.3(02), pp.82-85, 2018.

APÊNDICE B

ARTIGO: MANUFATURA ADITIVA EM MOLDES MECÂNICOS.

AUTORES: Marcelo Lopes e Filipe Wiltgen

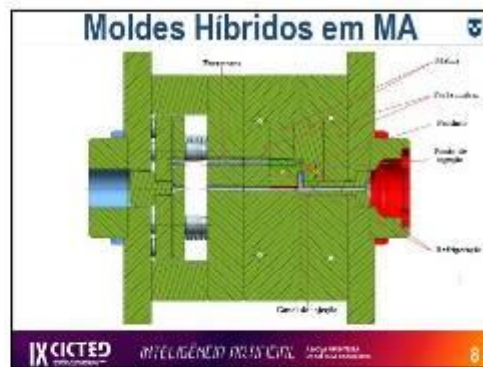
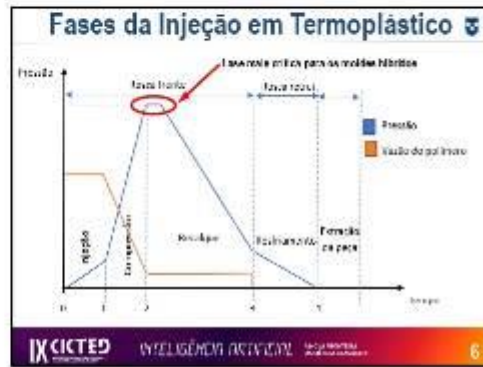
CONGRESSO: IX Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento (CICTED).

ANO: 2020.

21/03/2022



21/03/2022



21/03/2022

Moldes Híbridos em MA

Molde do Tipo 1 Molde do Tipo 2

IX CICTED INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL 9

Manufatura das Matrizes

Matriz do Molde do Tipo 1 Matriz do Molde do Tipo 2

IX CICTED INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL 10

Simulação e Análise de Temperatura e Pressão

✓ Segundo a simulação a peça do tipo 1 tem a tensão mais elevada e a pressão, quando comparada a peça do tipo 2 (vermelha), com todos os detalhes.

Peça do Tipo 1 Peça do Tipo 2

IX CICTED INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL 11

Testes dos Moldes em Manufatura Aditiva

PROPRIEDADES DE MATERIAIS	PROPRIEDADES DE FLUXO DE LÍQUIDO	PERFORMA
<ul style="list-style-type: none"> Módulo de elasticidade: 210 GPa Tensão de escoamento: 1500 MPa Tensão de ruptura: 2000 MPa Coeficiente de expansão térmica: 11,7 µm/mK Coeficiente de dilatação térmica: 11,7 µm/mK 	<ul style="list-style-type: none"> Viscosidade do material: 0,01 Pa·s Temperatura de fusão: 2000 °C 	<ul style="list-style-type: none"> Tempo de processo com pressão de 10 MPa: 10 min Tempo de processo com pressão de 20 MPa: 5 min Tempo de processo com pressão de 30 MPa: 3 min Tempo de processo com pressão de 40 MPa: 2 min Tempo de processo com pressão de 50 MPa: 1 min

IX CICTED INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL 12

21/03/2022

Conclusão

- ✓ Observa-se que o processo de manufatura subtrativa quando comparado ao processo de manufatura aditiva na fabricação de moldes mecânicos objetivo dessa pesquisa possui maior custo e maior tempo.
- ✓ Observa-se que o processo de manufatura subtrativa pode chegar a ser até 11 (onze) vezes mais demorado e com custo de até 5 (cinco) vezes maior na fabricação do molde se comparado com a manufatura aditiva. Nota-se também, a diferença de até 3 (três) vezes maior no custo e no tempo do projeto de um molde na manufatura subtrativa se comparado com a manufatura aditiva.
- ✓ Por fim, foi observada a presença de rebarbas na peça do tipo 2 (dois), na região da saída de gás. Entretanto, isso não foi considerado como um problema pois essa região da peça não é funcional. A peça do tipo 2 (dois) ficou dentro das especificações esperadas.

IX CICTED INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL COLABORAÇÃO 13

OBRIGADO(A)!

marcelo Lopes – marcelolopes5x@gmail.com
 Prof. Dr. Filipe Wilgen – fwbarbosa@gmail.com

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL
UMA REVOLUÇÃO NA MANUFATURA

IX CICTED
INTELIGÊNCIA COLABORAÇÃO

UNITAU
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

APÊNDICE C

ARTIGO: CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPOS EXPERIMENTAIS VIA MANUFATURA ADITIVA – INOVAÇÃO EM SISTEMAS DE SEGURANÇA VEICULAR.

AUTORES: Marcelo Lopes e Filipe Wiltgen.

REVISTA : ENGENHARIA E TECNOLOGIA.

ANO: 2021.

CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPOS EXPERIMENTAIS VIA MANUFATURA ADITIVA – INOVAÇÃO EM SISTEMAS DE SEGURANÇA VEICULAR

Marcelo Lopes – Universidade de Taubaté

E-mail: marcelolopes5x@gmail.com

Filipe Wiltgen – Universidade de Taubaté

E-mail: LFWBarbosa@gmail.com ou Filipe.Wiltgen@unitau.br

Resumo: Este artigo descreve a importância da fabricação de protótipos experimentais aplicando diferentes técnicas de Manufatura Aditiva (MA) para o desenvolvimento de sistemas complexos e inovadores de sistema de segurança veicular dentro dos processos de Engenharia de Sistemas & Requisitos (ESR). A indústria automotiva conhece bem a importância dada atualmente para sistemas de segurança veicular, conforme avança tecnologicamente em seus produtos e projetos de novos veículos, externamente e internamente, diversos são os sistemas que necessitam de atualizações, porém o desenvolvimento técnico é oneroso, em tempo e custo quanto aplicado processos tradicionais de construção de protótipos experimentais. Dentre os sistemas de segurança veicular, o cinto de segurança se destaca nas melhorias de funcionamento e fabricação. Nesta pesquisa é apresentado o desenvolvimento de uma nova peça para compor o sistema de cinto de segurança veicular através da construção de protótipos experimentais em MA utilizando ESR. Os resultados obtidos com a fabricação de novos protótipos experimentais, tem inovado a forma de projetar e desenvolver novos componentes na indústria de segurança veicular.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Protótipos Experimentais; Engenharia de Sistemas & Requisitos; Segurança Veicular.

CONSTRUCTION OF EXPERIMENTAL PROTOTYPES VIA ADDITIVE MANUFACTURING – INNOVATION IN VEHICLE SAFETY SYSTEMS

Abstract: This paper describes importance of manufacturing experimental prototypes applying different Additive Manufacturing (AM) techniques for development of complex and innovative vehicle safety systems within Systems & Requirements Engineering (SRE) processes. The automotive industry is well aware of importance currently given to vehicle safety systems, as technological advances in its products and new vehicle projects, externally and internally, there are several systems that need updates, but technical development is costly, in time and cost as applied traditional processes of building experimental prototypes. Among vehicle safety systems, seat belts stand out in terms of operational and manufacturing improvements. This research presents the development of a new part to compose the vehicle seat belt system through construction of experimental prototypes in MA using ESR. The results obtained with manufacture of new experimental prototypes have innovated way to design and develop new components in vehicle safety industry.

Keywords: Additive Manufacturing; Experimental Prototypes; Systems & Requirements Engineering; Vehicle Security.

1. Introdução

A inovação no desenvolvimento de novos produtos é um processo cujo objetivo é melhorar um item, quer seja com uma reformulação completa, um novo projeto diferente na essência, quer seja com a melhoria localizada de um determinado item em um sistema para melhorar sua funcionalidade, praticidade ou eficiência.

Sendo que qualquer projeto de inovação necessita de testes e análise, e quase sempre com protótipos físicos reais. Porém, a construção de protótipos físicos reais em

processos convencionais possui prazo e custos que podem vir a inviabilizar um novo projeto (OCDE, 2005).

Nesta pesquisa tem-se a Manufatura Aditiva (MA) como técnica de construção de protótipos físicos reais de forma rápida e de baixo custo (ALCALDE; WILTGEN, 2018; WILTGEN; ALCALDE, 2019; WILTGEN, 2020A; GOMES; WILTGEN, 2020; SANTANA, 2019; COMENALE; WILTGEN, 2021). Soluções inovadoras necessitam de ideias e técnicas inovadoras. Seguir os requisitos impostos a cada fase do desenvolvimento metódico e moroso dos projetos e da produção de peças de segurança automotivas não é trivial.

A evolução da MA nos últimos anos tornou capaz a utilização de diferentes tecnologias o que possibilita encurtar a construção de protótipos físicos reais, e a união da MA com as técnicas de Engenharia de Sistemas & Requisitos (ESR) na análise do problema (Domínio do Problema), permite o desenvolvimento baseado na maturidade tecnológica (*TRL – Technology Readiness Level*) e no desenvolvimento de diversas opções técnicas (Domínio da Solução) que podem ser construídas na forma de protótipos físicos reais e devidamente experimentadas e testadas (WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2020A, WILTGEN, 2020B, WILTGEN, 2021A; WILTGEN, 2021B; INCOSE, 2015; NASA, 2018; DoD, 2001; KOTONYA; SOMMERVILLE, 1998).

Sistemas de segurança veiculares precisam da realização de diversos testes de validação do produto, sendo que os ensaios e análises realizados nesta pesquisa são para a validação da ideia de um novo produto, que depois de experimentado em ensaios e devidamente analisado e verificado poderá seguir para a fabricação e testes de funcionamento em ambiente controlado, teste em laboratório (*DT&E – Developmental Test and Evaluation*) e posteriormente em ambiente relevante ou operacional, teste em campo (*OT&E – Operational Test and Evaluation*) que compõem plano de ensaios completo (*RTD&E – Research Testing Development and Evaluation*).

Nessa pesquisa foi proposto o desenvolvimento de uma peça do sistema de cinto de segurança veicular com inovação na construção, na montagem e na funcionalidade. Para o desenvolvimento foram aplicadas técnicas do domínio do problema e no domínio da solução, com objetivo claro de redução de custo e prazo de fabricação, além de obter maior eficiência operacional e de montagens. Com todas as peças fabricadas, foi possível delinear as opções para ensaios e testes que permitiram seguir o desenvolvimento baseado em ESR para obter as análises e resultados para corroborar com o projeto para a sua evolução e maturidade.

O objetivo e a relevância desta pesquisa vêm do fato de que há a necessidade de aplicar a inovação nos processos de transformação de ideias de peças na forma de protótipos funcionais de maneira ágil. A utilização de tecnologias de MA viabiliza a construção rápida de peças protótipos para a realização dos ensaios com ESR, e com isso é possível acelerar o processo de desenvolvimento inventivo, com base na inovação de componentes e de peças no setor automobilístico de segurança veicular.

No decorrer desse artigo, tem-se a aplicação da metodologia construção de protótipos utilizando a MA. O desenvolvimento do projeto de uma peça inovadora cujo objetivo principal é realizar a função o travamento do sistema de cinto de segurança veicular. Por fim, são apresentados e discutidos os resultados obtidos das análises destes testes com os protótipos referentes aos ensaios realizados durante o desenvolvimento e as perspectivas de avanços tecnológicos advindos da união da MA com ERS na construção e estruturação dos testes a serem aplicados, respectivamente. Levando a discussão dos resultados e as conclusões.

2. Inovação com Manufatura Aditiva na Indústria Automotiva

A solução técnica adotada nesta pesquisa para o dispositivo do cinto de segurança veicular em questão não apresenta problemas de desempenho técnico, e tão pouco de deficiência no processo produtivo ou mesmo problemas com o cliente final, porém, este é o sistema destinado a esta pesquisa com a intenção clara de obter inovação. O desenvolvimento de um novo produto começa com uma nova ideia ou com a identificação de uma nova oportunidade, como neste caso não existe um problema explícito de projeto a possibilidade de inovação se torna ainda mais desafiadora.

Sendo que a solução inovadora exposta aqui nesta pesquisa é considerada incremental, por se tratar de uma melhoria significativa das funções do produto existente. É fundamental que na etapa inicial do projeto se explore o entendimento e domínio do problema, assim, tem-se a obtenção de ideias criativas de forma mais robusta, as quais devem ser transformadas em projetos e protótipos cujo critérios de teste, nesta fase, muitas vezes podem ser subjetivos.

O setor de autopeças utiliza métodos tradicionais de desenvolvimento, as quais quase nunca contemplam inovação, sem atender as necessidades solicitadas pelos clientes e pelo mercado (AMORIM, 2013; BROWN, 2010; DESCONSI, 2012; ILAUBERT *et al.*, 2019; LIEDTKA, 2018; SANTOS, 2018; SIMON, 2015).

Em um processo criativo a execução de *brainstorming* para soluções é ampla em função do conhecimento tácito e técnico dos participantes e da experimentação de protótipos que quase sempre corrobora as tomadas de decisões que acarretam mudanças interessantes no projeto (LIEDTKA, 2018; MACEDO, 2015). A aplicação da MA neste processo é dinâmica, isso significa que serão necessárias muitas interações, e construções de diversos e diferentes protótipos.

Conseqüentemente a prototipagem em projetos de engenharia é sem dúvida uma fase imprescindível no desenvolvimento de novos produtos, técnicas, itens na indústria e na academia e pesquisas tecnológicas (WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2021B; AMORIM, 2013).

A MA proporciona a fabricação de peças complexas sem a necessidade de outras máquinas, com a vantagem de redução do número de etapas e de processos de fabricação e ainda economizando matéria-prima (GIORDANO, 2016).

A construção do protótipo via MA em diferentes fases do projeto impõe uma agilidade e eficiência importantes (FEOLA, 2016; JALONEN, 2012). Desta forma, diferentes protótipos são utilizados e testados até que a maturidade tecnológica de cada etapa seja satisfeita (WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2021B; ALCALDE, E.; WILTGEN, 2018).

3. Protótipos Experimentais de Cintos de Segurança Veicular Via Manufatura Aditiva

Os automóveis são projetados para ter segurança dentro e fora do veículo. Existem dois tipos de soluções com relação à segurança veicular, a segurança do tipo passiva e do tipo ativa. A segurança ativa atua na prevenção de um acidente, sistema de frenagem *ABS (Anti-lock Braking System)*, que impede que as rodas travem, e assim, o pneu não perca a aderência na pista.

Existe também, a segurança do tipo passiva que está relacionada com sistemas que atuam no momento de uma colisão, com objetivo de reduzir, ou mesmo, evitar as lesões nos ocupantes do veículo como os cintos de segurança. Os cintos de segurança, *airbags*

e elementos estruturais da carroceria reforçados, servem para obter segurança (MATSUMOTO, 2010; WILHELM, 2018).

Essa pesquisa se limita ao desenvolvimento de um conceito e validação de um componente do cinto de segurança veicular inovador. De acordo com a *Highway Traffic Safety Administration (HTSA)*, entidade dos EUA, a utilização correta do cinto de segurança é o maior responsável pela segurança do condutor e dos passageiros nos veículos (KAHANE, 2015; WILHELM, 2018), sua principal função é manter o ocupante fixo no assento durante todo o um evento de colisão.

Dentre os modelos de cintos de segurança que existem, o modelo com 3 (três) pontos de fixação é o mais amplamente utilizado em veículos de passeio. Conforme pode ser visto na Figura 1 esse item de segurança é composto de um cadarço (cinto propriamente dito) que passa pela região pélvica e torácica do corpo do ocupante do veículo, ancorado por três pontos distintos. O sistema completo é composto por quatro subsistemas chamados de retratores (1), cadarço (2), lingueta (3) e ancoragem (4).



Figura 1 – Sistemas que compõem o cinto de segurança de três pontos. Projeto do retrator desenhado em CAD (A) e o protótipo do retrator construído via Manufatura Aditiva (B).

Fonte: Próprios Autores.

Esses sistemas de segurança são os responsáveis para atender a função primária de um cinto de segurança, que é reter o usuário no momento de desaceleração do veículo, porém, o subsistema que define as principais características de um cinto de segurança é o conjunto retrator (Figura 1 nº1 – ilustrações A e B).

O retrator é o subsistema que acomoda o cadarço do cinto de segurança, oferecendo liberdade ao ocupante, extraindo e recolhendo o cadarço em função da movimentação do usuário. Este tipo de retrator atende os requisitos da norma NBR 7337 (2014) o qual é baseada na norma europeia *ECE R16* (modelo 4N) que tem como principal característica o sistema duplo de travamento automático, que é acionado em duas situações, por desaceleração do veículo e por extração do cadarço de dentro do retrator.

Isso significa que em condição de uso normal o catarço está livre para ser extraído do retrator, porém, quando ocorre uma colisão o catarço fica travado dentro do retrator impedindo sua extração, e assim, impedindo o deslocamento do usuário do assento do veículo. Na Figura 2 pode ser observado o sistema de travamento do retrator do cinto de segurança. No detalhe, com círculo na cor vermelha, indica a exata posição de travamento do sistema com o bloqueio do movimento do catarço.

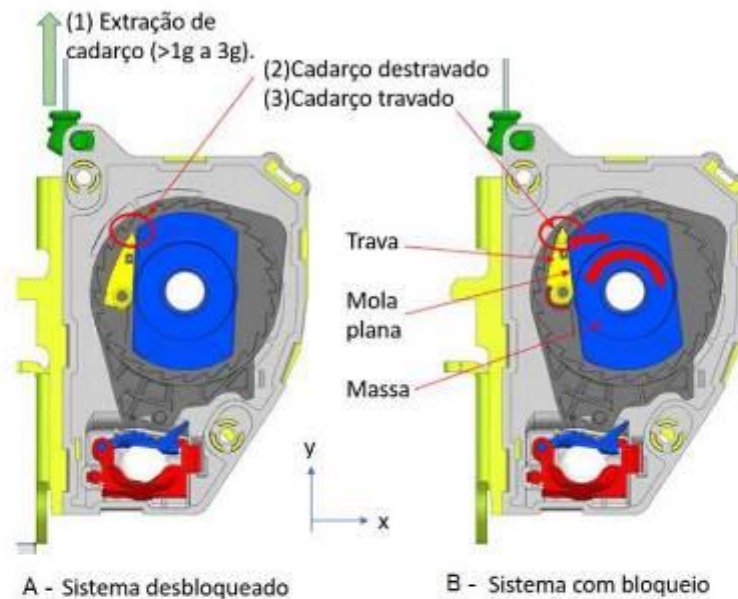


Figura 2 – Sistema de bloqueio para cintos de segurança (A – Sistema Desbloqueado e B – Sistema Bloqueado).

Fonte: Próprios Autores.

O bloqueio de travamento do catarço por desaceleração ocorre quando o veículo sofre uma colisão ou uma frenagem severa no qual os valores de aceleração ficam acima de 0,45G (G é a constante gravitacional referente a aceleração ou desaceleração). A outra forma de travamento do sistema retrator funciona quando o catarço é extraído do retrator com uma aceleração entre 1 a 3G.

O objetivo do artigo não é explorar detalhadamente o conjunto funcional do cinto de segurança, porém, para uma melhor compreensão da pesquisa é demonstrado o funcionamento básico deste sistema de bloqueio.

O acionamento de travamento por extração de catarço segue o princípio da primeira Lei de Newton, também conhecida como princípio da inércia (todo corpo permanece em seu estado de repouso até que as forças que atuam sobre ele se anulem). No sistema retrator, a peça de nome “Massa” possui liberdade de rotação em torno do eixo Z, apoiada diretamente na peça chamada de “Trava” e sob ação da peça de compressão com nome de “Mola Plana”, como podem ser observadas na Figura 2.

No centro da “Massa” existe o “Carretel” que é a peça responsável por condicionar o catarço enrolado. Quando o catarço é extraído do retrator com uma aceleração entre 1 a 3G a peça “Massa” rotaciona devido a inércia, comprimindo a peça “Mola” que faz que a peça “Trava” se desloque e se trave em um dos “dentes” no segmento dentado do retrator, bloqueando o movimento do catarço. Para melhor compreensão do

funcionamento deste sistema pode ser visto na Figura 3 uma técnica de ESR conhecida como Árvore Funcional que permite entender o funcionamento simplificado do sistema de bloqueio de cinto de segurança.

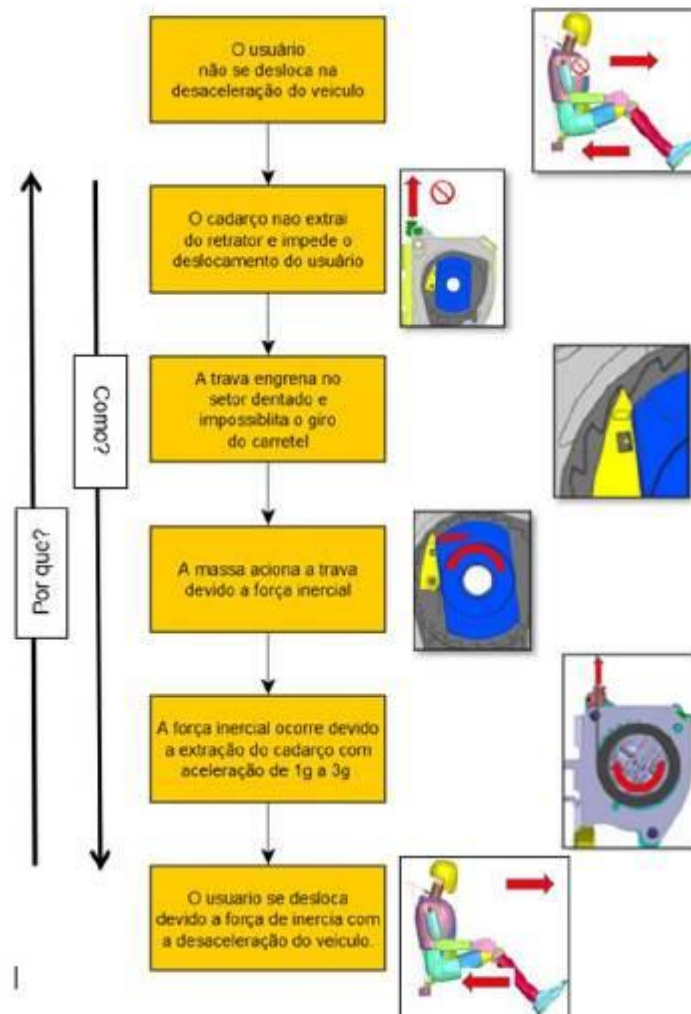


Figura 3 – Técnica de Árvore Funcional do sistema de bloqueio do cinto de segurança.

Fonte: Próprios Autores.

4. Resultados e Discussão

O sistema atual de retratores de cintos de segurança consistem em uma peça de nome “Massa” que é produzida em uma liga metálica chamada de *Zamak* (liga de Zinco (Zn), Alumínio (Al), Magnésio (Mg) e Cobre (Cu)). Existe também, nesse dispositivo, uma mola de aço em forma de lâmina, e outra peça chamada de “Trava” fabricada em polímero. Na Figura 4 podem ser apreciadas as 03 (três) propostas para melhoria do retrator do cinto de segurança:

- **Proposta 1:** Para uma melhor solução acústica a Massa (Figura 4 n°1) passa a ser produzida em polímero e a Trava está incorporada, tornando-se uma única

peça. Para isso a geometria foi modificada consideravelmente para aumentar o momento inercial. A mola (Figura 4 n°3) passa a ser helicoidal, esta geometria torna a carga de acionamento mais estável podendo garantir a sensibilidade de bloqueio próximo dos valores máximos permitidos pela norma (1 a 3G), aumentando o conforto do usuário.

- **Proposta 2:** Nesta solução, igualmente com a solução 1, a massa e a trava se tomam uma única peça construída em polímero, a mola também é helicoidal, a diferença entre elas está na geometria que favorece o momento inercial, a mola (Figura 4 n°3) além de compressão possui flexão.

- **Proposta 3:** A massa (Figura 4 n°3) é produzida em *Zamak*, e a trava é de polímero com mola helicoidal. Esta solução favorece a precisão do acionamento e o momento inercial devido ao peso específico do *Zamak*, porém, provavelmente fica em desvantagem na resposta acústica.

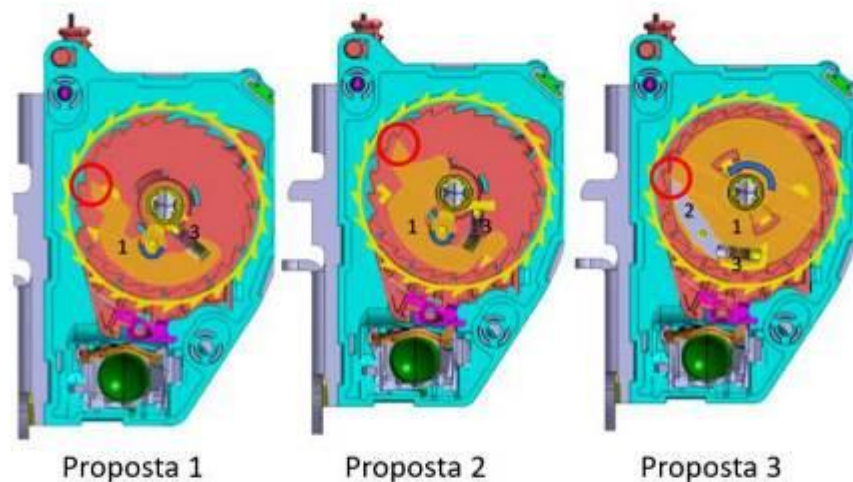


Figura 4 – Propostas de melhorias de retratores de cintos de segurança (Proposta 1, Proposta 2 e Proposta 3).

Fonte: Próprios Autores.

Quando um projeto possui muitos requisitos, a construção de protótipos funcionais para testes se torna ainda mais importantes para o desenvolvimento. A utilização de MA se mostra uma boa alternativa para a fabricação dos protótipos para a realização de ensaios físicos que podem influenciar o desempenho da peça, além disso é necessário análise dos resultados dos testes para determinar as ações futuras no desenvolvimento.

A realização de testes e ensaios em protótipos permitem verificar e alcançar níveis de maturidade tecnológica (*TRL*) os quais podem permitir que uma ideia se transforme em um produto (WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021A; WILTGEN, 2021B).

O processo de MA refere-se à construção a partir de um desenho 3D elaborado em CAD, no qual a principal diferença da manufatura subtrativa é que as peças são fabricadas com a adição de matéria-prima camada por camada, ao invés de remover a matéria-prima para produzir uma peça de interesse (WILTGEN, 2019).

Existem diferentes tecnologias na construção 3D que se diferenciam em função do processo e do tipo de matéria-prima empregada (GOMES; WILTGEN, 2020; SANTANA, 2019), possuem vantagens e desvantagens nenhuma dessas tecnologias é completa em todas as características (ABDULHAMEED *et al.*, 2019).

Para peças que necessitam ensaios com solicitação de força mecânica, como é o caso apresentado nesta pesquisa, é necessário avaliar a tecnologia de MA a ser aplicada devido a propriedade física de anisotropia que algumas tecnologias causam no material, por exemplo no processo de Modelagem por Deposição Fundida (*FDM – Fused Deposition Modeling*) possibilita o aparecimento anisotropia (ALMEIDA, 2007). A tecnologia de manufatura aditiva adotada nesta pesquisa é a de Jateamento de Material (*PolyJet*) que faz uso de matéria-prima do tipo polímero líquido e satisfaz esta propriedade física dos protótipos do projeto.

Essa técnica consiste em uma extrusora (cabeça de impressão) que deposita gotas de matéria-prima no estado líquido preenchendo a área de uma camada com espessuras de até $\sim 30 \mu\text{m}$ (trinta micrômetros) movendo-se no plano XY. O processo se repete e camada por camada até que a peça seja totalmente construída. Em cada camada é aplicado um feixe de luz ultravioleta (UV) que faz o material se solidifique pelo processo de cura (cristalização). A propriedade física da peça depois de pronta é semelhante ao polímero do tipo *ABS* (Acrilonitrila Butadieno Estireno). Na Figura 5, é possível observar os protótipos construídos para os testes físicos de desempenho de funcionamento com essa técnica.



Figura 5 – Protótipos funcionais da trava de cintos de segurança construídos via Manufatura Aditiva em Polímero.

Fonte: Próprios Autores.

A característica física e geométrica dos protótipos funcionais possibilitou a execução dos testes de avaliação do conforto acústico das propostas, além da análise ergonômica de montagem de cada peça. A aplicação de métodos de desenvolvimento com inovação possibilitou desenvolver diferentes soluções, principalmente quando aliada a MA para a fabricação dos protótipos para testes o processo se torna dinâmico e viável.

O estudo de caso apresentado nesta pesquisa contempla as principais premissas dos clientes (externos e internos), a viabilidade técnica comercial e a praticidade construtivas.

Para avaliar de forma justa as propostas de melhoria dessa pesquisa, utilizou-se uma Matriz de Posicionamento (MP), que tem por objetivo subsidiar o processo de decisão a partir do nível de atendimento dos critérios propostos nos requisitos de projeto, no qual

cada ideia é avaliada de forma objetiva observando sempre o atendimento dos requisitos de projeto (aceitos e validados), conforme pode ser visto no Quadro 1.

Quadro 1 - Matriz de Posicionamento para avaliação das três propostas de desenvolvimento testadas.

Cliente	Crítérios (necessidade)	Soluções propostas	Proposta 1	Proposta 2	Proposta 3
Cliente final	Conforto	Acionamento acima de 2g	✗	✓	✓
		Aplicação de moia helicoidal	✓	✓	✓
		Momento de inercia maior	✗	✗	✓
Cliente da fábrica	Ergonomia	Aplicação de matéria-prima com absorção de ruído	✓	✓	✗
		Restrição de grau de liberdade	✓	✓	✗
		Menor numero de peça	✓	✓	✗
		Geometria com facilidade de montagem	✓	✓	✗
			71%	86%	43%

Fonte: Próprios Autores.

Como pode ser observado no Quadro 1, a Proposta 2 foi considerada a melhor solução conforme sua viabilidade e praticidade, atendendo a maioria dos critérios e requisitos expressos pelos clientes (interno e externos) alcançando ~86% do esperado como solução de projeto.

5. Conclusão

O desenvolvimento de novos produtos incorporados com inovações na área de engenharia exige a construção de muitos protótipos e de muitos testes, o que demanda de muito tempo para sua execução e análise dos resultados.

A aplicação de técnicas de Manufatura Aditiva, permite o desenvolvimento de peças diferentes, pensadas e executadas de forma inovadora flexibilizando a construção e permitindo a criatividade em projetos.

Nessa pesquisa fica explícito o sucesso de um projeto de uma nova peça do sistema de segurança veicular que fez uso deste conceito para o desenvolvimento e manufatura.

A indústria automotiva tem muito a se beneficiar com a aplicação deste tipo de conceito de fabricação, que permite unir os esforços com criatividade e dinamismo na manufatura, construção de protótipos, testes e análises conforme a Engenharia de Sistemas & Requisitos propõe. Diferentes tecnologias de Manufatura Aditiva para a construção de protótipos experimentais com características muito próximas às peças produzidas no processo definitivo durante o desenvolvimento de novos projetos podem trazer uma oportunidade ímpar para a inovação eficaz na indústria automobilística no futuro próximo.

Referências

- ABDULHAMEED O.; AL AHMARI A.; AMEEN W.; MIAN S.H.** *Additive Manufacturing: Challenges, Trends, and Applications*. Advances in Mechanical Engineering, v.11(02), p.1-27, 2019.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.** *NBR 7337. Veículos Rodoviários Automotores - Cintos de segurança - Requisitos e Ensaios*, 2014. 65p.
- ALCALDE, E., WILTGEN, F.** *Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro*. Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté, Taubaté, v.24(2), p.1-9, 2018.
- ALMEIDA W.J.** *Otimização Estrutural de Protótipos Fabricados pela Tecnologia FDM Utilizando o Método de Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007. 110p.
- AMORIM, A. G.** *Processos Criativos Sistemáticos como Fator-Chave para a Diferenciação das Empresas: Abordagem do Design Thinking*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, 2013. 53p.
- BROWN, T.** *Design Thinking: Uma Metodologia Poderosa para Decretar o fim das Velhas Ideias*. Starlin Alta, 2010. 239p.
- COMENALE, W., WILTGEN, F.** *Automação Industrial para a Manufatura Avançada com Apoio da Engenharia de Sistemas & Requisitos*. 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), Curitiba-PR, 24-26 maio, p.1-8, 2021.
- DESCONSI, J.** *Design Thinking como um Conjunto de Procedimentos para a Geração da Inovação: Um Estudo de Caso do Projeto G3*. Dissertação Mestrado, Centro Universitário Ritter dos Reis, Porto Alegre, 2012. 126p.
- DoD System Engineering Fundamentals (Department of Defense – DoD 22060-5565)**. Defense Acquisition University Press Fort Belvoir, Virginia, 2001. 223p.
- FEOLA, J. L.** *Avaliação da Contribuição do Design Thinking para a Redução de Incertezas em Projetos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2016. 126p.
- GIORDANO C. M.; ZANCUL E. S.; RODRIGUES V. P.** *Análise dos Custos da Produção por Manufatura Aditiva em Comparação a Métodos Convencionais*. Revista Produção Online, v.16(02), p.499-523, 2016.
- GOMES, J., WILTGEN, F.** *Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais e Máquinas*. Revista Tecnologia, v.41(01), p.1-16, 2020.
- HAUBERT, B., SCIREIBER, D., PINHEIRO, C. M. P.** *Combinando o Design Thinking e a Criatividade no Processo de Inovação Aberta*. Revista Gestão e Planejamento, v.20, p.73-89, 2019.
- INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities (INCOSE-TP-2003-002-04)**. Version 4, Wiley, 2015. 304p.
- JALONEN, H.** *The Uncertainty of Innovation: A Systematic Review of the Literature*. Turku University of Applied Sciences. *Journal of Management Research*, v.4(01), p.1-53, 2012.
- KAIHANE, C. J.** *Lives Saved by Vehicle Safety Technologies and Associated Federal Motor Vehicle Safety Standards, 1960 to 2012*. National Highway Traffic Safety Administration. Washington, 2015. 525p.
- KOTONYA, G., SOMMERVILLE, J.** *Requirements Engineering: Process and Techniques*. John Wiley and Sons, 1998. 294p.
- LIEDTKA, J.** *Why Design Thinking Works*. Magazine Harvard Business Review, September–October, p.1-14, 2018.
- MATSUMOTO, A. T.** *Estudo do Desempenho de Reforços Poliméricos em Estruturas Veiculares Submetidas a Impacto*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2010. 149p.
- MACEDO, M. A., MIGUEL, P. A., FILHO, N. C.** *Caracterização do Design Thinking como um Modelo de Inovação*. Revista de Administração e Inovação, v.12(03), p.157-182, 2015.
- NASA** *NASA Systems Engineering Handbook. Revision 2 (SP-6105)*, 2018. 298p.

- OCDE** *Manual de Oslo: Diretrizes para Coleta e Interpretação de Dados para a Inovação*. Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), Paris, 2005. 184p.
- SANTANA, L.** *Avaliação das Capacidades da Impressão 3D de Baixo Custo na Fabricação de SNAP*. Tese de Doutorado, Universidade do Porto, Porto. 2019. 251p.
- SANTOS, A. P., BAIÁ, A. P.** *Inovação no Processo de Desenvolvimento de Produto através do Design Thinking*. Revista Empreender e Inovar, v.1(01), p.33-46, 2018.
- SIMON, E.** *The Application of Design Thinking in the Automotive Industry - An Exploratory Study*. Tese de Doutorado, Universität Berlin. Berlin. 2015. 133p.
- WILIGEN, F., ALCALDE, E.** *Prototipagem Rápida Aditiva Aplicada em Dispositivos Funcionais de Auxílio Humano*. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), São Carlos-SP, 5 a 7 agosto, p.1-6, 2019.
- WILIGEN, F.** *Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico*. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), São Carlos-SP, 5 a 7 agosto, p.1-5, 2019.
- WILIGEN, F.** *A Manufatura Avançada Precisa de uma Engenharia Avançada*. Revista Tecnologia, v.41(02), p.1-11, 2020A.
- WILIGEN, F.** *Técnica de Ensaios de Sistemas Complexos com Metodologia de Engenharia de Sistemas & Requisitos*. Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas, v.4(01), p.51-60, 2020B.
- WILIGEN, F.** *Manufatura Aditiva em Metais – Leve, Forte e Inovador*. Revista de Engenharia e Tecnologia, v.13(02), p.47-58, 2021A.
- WILIGEN, F.** *Testing Plan in Systems & Requirements Engineering for Strategic Engineering Areas*. 26th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Curitiba-PR, 22-26 November, p.1-10, 2021B.
- WILHELM F. GARCIA R. I.** *Equipamentos de Segurança Veicular: Uma Análise da Legislação Brasileira*. Revista Eletrônica Científica da UERGS, v.4(02), p.283-298, 2018.

APÊNDICE D

ARTIGO: MANUFATURA ADITIVA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA DE SEGURANÇA VEICULAR.

AUTORES: Marcelo Lopes e Filipe Wiltgen.

CONGRESSO: X Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento. (CICTED).

ANO: 2020.

3/21/2022



1



2



3



4

3/21/2022

INTRODUÇÃO



- Mesmo com toda a evolução tecnológica em segurança veicular, os acidentes automobilísticos continuam provocando muitas vítimas, e obrigando a indústria automotiva a melhorar continuamente a segurança.
- A utilização e a aplicação de técnicas de manufatura aditiva na construção de modelos mecânicos híbridos reduz as etapas de fabricação, reduz ciclos de fabricação formativa e reduz o impacto ambiental!
- A realização de pesquisas em técnicas que possam tornar mais ágeis os avanços na segurança de pessoas em automóveis permite diminuir o impacto de vítimas em acidentes o que trás benefícios a sociedade e de fato a transversalidade do setor automotivo.



A TRANSVERSALIDADE DA CIÊNCIA E TECNOLÓGICA E INOVAÇÃO PARA A PLACITA

5

SISTEMAS DE SEGURANÇA VEICULAR AUTOMOTIVA



A TRANSVERSALIDADE DA CIÊNCIA E TECNOLÓGICA E INOVAÇÃO PARA A PLACITA

6

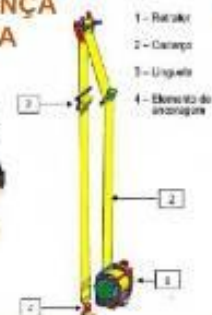
SISTEMAS DE SEGURANÇA VEICULAR AUTOMOTIVA



A TRANSVERSALIDADE DA CIÊNCIA E TECNOLÓGICA E INOVAÇÃO PARA A PLACITA

7

SISTEMAS DE SEGURANÇA VEICULAR AUTOMOTIVA



A TRANSVERSALIDADE DA CIÊNCIA E TECNOLÓGICA E INOVAÇÃO PARA A PLACITA

8

3/21/2022

SISTEMAS DE SEGURANÇA VEICULAR AUTOMOTIVA

10 Extração de gás
12 Cabeça inflando
13 Cabeça fixado

Tubo
M do pleio
Missa

Interior dobrigaseco Interior com fixação

XICTED A TRANSVERSALIDADE DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA E INOVAÇÃO PARA O PLANETA

9

TIPOS DE MANUFATURA

Manufatura Subtrativa Manufatura Aditiva Manufatura Combinada Manufatura Formativa

XICTED A TRANSVERSALIDADE DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA E INOVAÇÃO PARA O PLANETA

10

MANUFATURA ADITIVA

www.nazdar.com/en-us/News-Articles/ArtMID14187/ArticleID/389

XICTED A TRANSVERSALIDADE DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA E INOVAÇÃO PARA O PLANETA

11

MANUFATURA ADITIVA

Modelo CAD 3D Modelo Físico Real

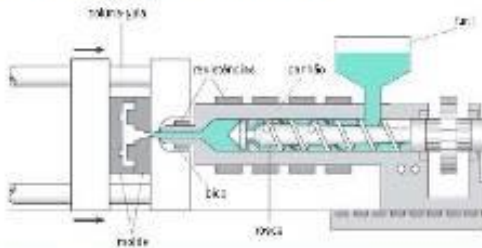
Modelo CAD Modelo STL Manufatura Aditiva Peça Fabricada Peça Pronta Peça em Uso

XICTED A TRANSVERSALIDADE DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA E INOVAÇÃO PARA O PLANETA

12

3/21/2022

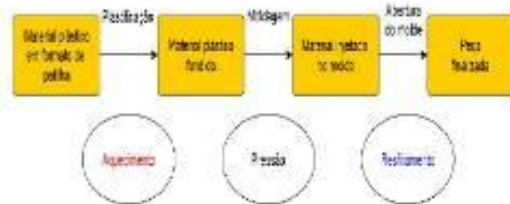
MOLDES FABRICADOS VIA MANUFATURA FORMATIVA



XICTED A TRANSFERÊNCIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA E INOVAÇÃO PARA A PLANTA

13

PROCESSO DE INJEÇÃO VIA MANUFATURA FORMATIVA



XICTED A TRANSFERÊNCIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA E INOVAÇÃO PARA A PLANTA

14



XICTED A TRANSFERÊNCIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA E INOVAÇÃO PARA A PLANTA

15

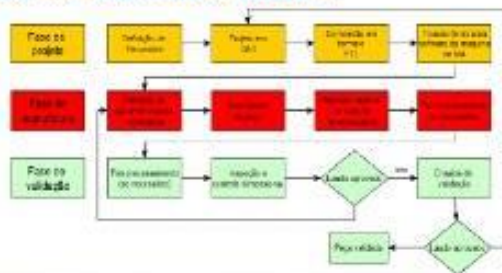
CANAIS DE REFRIGERAÇÃO EM MANUFATURA SUBTRATIVA E EM MANUFATURA ADITIVA



XICTED A TRANSFERÊNCIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA E INOVAÇÃO PARA A PLANTA

16

FLUXO DE DESENVOLVIMENTO EM MANUFATURA ADITIVA



PROTÓTIPOS DE TESTES



MOLDES FABRICADOS VIA MANUFATURA ADITIVA



DISCUSSÃO & CONCLUSÃO

- Aplicação de materiais alternativos para a construção de moldes mecânicos é uma prática cada vez mais comum.
- A utilização da tecnologia de manufatura aditiva durante o desenvolvimento de um novo produto proporciona maior agilidade e redução no custo e prazos de fabricação quando comparado com a manufatura subtrativa.
- Protótipos físicos reais que possuam as características inerentes ao regulado do projeto é fundamental e devem ser alvo de muitas pesquisas científicas.
- O uso da tecnologia manufatura aditiva com a aplicação de resina para a construção de moldes mecânicos híbridos são eficazes, porém existem limitações devido a matéria-prima. Entretanto, técnicas de manufatura aditiva em metais é uma oportunidade ímpar para pesquisas futuras.



APÊNDICE E

ARTIGO: MANUFATURA ADITIVA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA VOLTADA PARA SISTEMAS DE SEGURANÇA VEICULAR (DOI: 10.14488/enegep2021_tn_stp_358_1847_41924).

AUTORES: Marcelo Lopes e Filipe Wiltgen.

E-BOOK: Coletânea Especial de Engenharia de Produção 2 - ISBN sob o código 978-65-993959-5-6.

CONGRESSO: XLI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - ENEGEP 2021.

ANO: 2021



XLI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
 "Contribuições da Engenharia de Produção para a Gestão de Operações Energéticas Sustentáveis"
 Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, 18 a 21 de outubro de 2021.

MANUFATURA ADITIVA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA VOLTADA PARA SISTEMAS DE SEGURANÇA VEICULAR

Marcelo Lopes (Universidade de Taubaté)
marcelolopes5x@gmail.com

Filipe Wiltgen (Universidade de Taubaté)
LFWBarbosa@gmail.com ou Filipe.Wiltgen@unitau.br

Este artigo de pesquisa avalia as oportunidades em utilizar diferentes tecnologias de Manufatura Aditiva (MA) durante o desenvolvimento de um produto de segurança veicular. Projetos de segurança automotiva devem sempre atender a severos requisitos com diferentes critérios de aceitação. Com a MA é possível a construção de protótipos para testes e análises antes da construção da primeira peça real. Novas técnicas as quais ainda estão em consolidação na indústria permitem a aplicação da pesquisa científica. O artigo apresenta uma análise das diferentes tecnologias aplicadas a MA considerando os tipos de matérias-primas disponíveis de maior interesse, como polímeros de alta resistência e metais diversos aplicados diretamente na construção das peças ou em meios produtivos que permitam sua fabricação. As perspectivas de utilização da MA junto a indústria automotiva são boas, mas ainda percorrem longos e tortuosos caminhos. O conhecimento dos processos, máquinas e das técnicas em MA, tem aberto oportunidades competitivas tanto no preço, quanto e principalmente no prazo, o que permite especular que o amadurecimento da MA é sem dúvida um investimento importante no desenvolvimento de produtos da indústria automotiva. Muito em breve as indústrias deste setor serão beneficiadas com as mudanças que estão por vir.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, Segurança Veicular, Indústria Automotiva.

1. Introdução

O avanço tecnológico dos veículos vem de encontro às expectativas dos clientes, incluem avanços no conforto, motores mais potentes com menos emissão de poluentes e devido a uma exigência mundial devem proporcionar maior segurança aos ocupantes e pedestres.

Estes fatores tendem a impactar na tecnologia e na complexidade dos produtos, obrigando aos fornecedores projetar novos e inovadores produtos.

Este artigo apresenta a pesquisa de Manufatura Aditiva (MA) aplicada em peças automotivas utilizadas em sistemas de segurança veicular.

Pesquisas centradas no desenvolvimento de produtos são realizadas a muito tempo, principalmente com abordagens nos processos de gestão, metodologias com desenhos sofisticados de *CAD (Computer Aided Design)*, porém, a partir do início da década de 1980 tudo começou a mudar.

O surgimento da MA como uma opção tecnológica inovadora desperta oportunidades promissoras as quais muitas são apresentadas no decorrer do texto deste artigo. A utilização profunda da MA vai de encontro com as melhores práticas industriais voltadas para a redução de custo e prazo.

1.1. Objetivo e Justificativa

Esta pesquisa tem por objetivo estudar diferentes tecnologias de MA aplicada no desenvolvimento de um sistema de cinto de segurança veicular, identificando a realidade de custo, prazo e qualidade do produto, permitindo uma análise clara das possíveis vantagens e desvantagens da aplicação da MA.

A proposta da pesquisa possui relevância científica para a evolução da engenharia de desenvolvimento de produto permitindo o aumento da flexibilidade construtiva e na redução do tempo de produção.

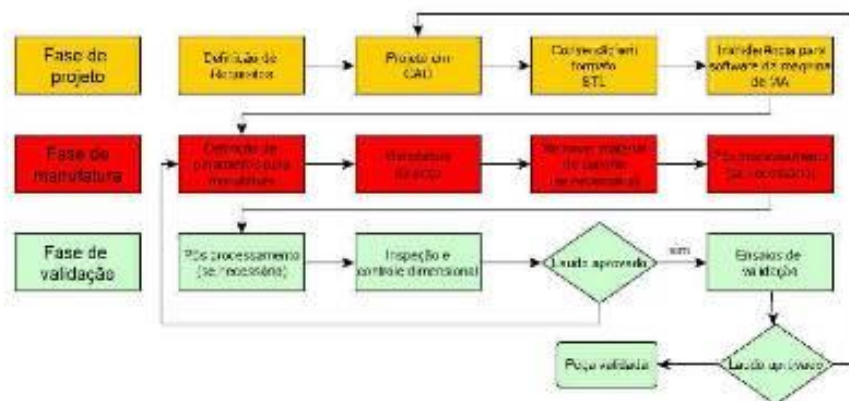
2. Manufatura Aditiva - Tecnologias e Oportunidades

A MA é totalmente diferente da manufatura formativa ou da manufatura subtrativa, pois consegue produzir peças com a geometria exata como foi projetada no *CAD*, independentemente de sua complexidade, enquanto processos como injeção plástica ou de fundição (manufatura formativa), e dependem de conformação de matérias em moldes para ser manufaturados, os quais quase que sempre são fabricados com remoção de material via a manufatura subtrativa (ZIVANOVIC *et al.*, 2019). Cada um desses processos possui

vantagens e desvantagens inerentes aos limites construtivos impostos pela tecnologia utilizada em cada tipo de manufatura, porém a versatilidade e as tecnologias disponíveis atualmente permitem que a MA possa ser aproveitada em diversos setores da indústria.

O processo da MA pode ser definido como uma técnica de mistura de materiais por ligação, solidificação ou fusão, como a resina líquida. Na MA via impressão 3D a peça é construída peça camada por camada a partir de um modelo matemático gerado por um CAD que é convertido para o formato STL que contém as informações da geometria da peça, este arquivo é processado por um algoritmos de fatiamento e enviado para a impressão 3D. Após a fabricação da peça são aplicados os processos de medição e ensaios, como pode ser visto na evolução temporal do processo de fabricação de MA na Figura 1.

Figura 1 – Fluxo de produção de uma determinada peça via Manufatura Aditiva



Fonte: Próprios Autores

Dentre as diversas aplicações de MA, a produção em baixo volume de peças, ou peças personalizadas com alta complexidade geométrica são sem dúvida um grande diferencial tecnológico (ABDULHAMEED *et al.*, 2019).

As matérias-primas aplicadas na construção de peças podem ser de materiais metálicos, cerâmicos e polímeros, porém com determinadas combinações surgem matérias-primas com diferentes características e propriedades mecânicas (GOMES; WILTGEN, 2020).

O desenvolvimento das tecnologias em MA tem proporcionado a construção de novas máquinas para produzir peças com maior precisão e diferentes tipos de materiais (WILTGEN, 2019; ALCALDE; WILTGEN, 2018; GOMES; WILTGEN, 2020).

No Quadro 1 podem ser observadas as diferentes características técnicas do processo de MA além das categorias que hoje diferenciam a tecnologia de MA.

Quadro 1 -Características de cada tipo de técnica de Manufatura Aditiva (Norma ASTM)

Categoria ASTM	Fusão em leito de pó	Deposição de energia dirigida	Fotopolimerização em cubas	Extrusão de material	Jatamento de material	Jato de aglutinante	Laminação de folhas
	PBF	DED	VP	MI	MI	ISI	SI
Desenho esquemático							
Conceito básico	A energia térmica funde uma pequena região do leito de pó de material de construção.	A energia térmica concentrada derrete os materiais durante a deposição.	O polímero líquido em uma cuba é fotopolimerizado.	O material fundido é empurrado para fora através de um bico.	Gotículas de materiais de construção são depositadas.	Jato de resina líquida é impresso em camadas finas.	Folhas de materiais são coladas.
Tecnologia	<ul style="list-style-type: none"> Fusão de feixe de elétrons (EBM); Sinterização direta a laser de metal (DMLS); Sinterização / fusão seletiva a laser (SLS / SLM). 	<ul style="list-style-type: none"> Deposição de laser (LD); Modelagem de rede projetada a laser (LENS); Feixe de elétrons; Derretimento de arco de plasma. 	<ul style="list-style-type: none"> Estereolitografia (SLA); Processamento digital de luz (DLP). 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem por deposição fundida (FDM); Fabricação de filamento fundido (FFF); Modelagem por Camada fundida (FDM). 	<ul style="list-style-type: none"> (JP) - PolyJet; (JP) - Inkjet 3D Systems. 	<ul style="list-style-type: none"> Jatamento de materiais. 	<ul style="list-style-type: none"> Fabricação de objetos laminados (LOM); Fabricação de aditivos de ultrassom (UC / UAM).
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo; Camas de pó atuas como uma estrutura de suporte integrada; Grande variedade de materiais. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto grau de controle de estruturas de grãos; Peças de alta qualidade. 	<ul style="list-style-type: none"> Peças grandes; Excelente precisão; Excelente acabamento de superfície e detalhes. 	<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo; Podem construir peças totalmente funcionais. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta precisão de deposição de gotículas; Multicor. 	<ul style="list-style-type: none"> Peças frágeis com propriedades mecânicas limitadas; Podem exigir pós processamento. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta velocidade; Baixo custo; Facilidade de manuseio de materiais.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> Relativamente lento; Limitações de tamanho; Alta potência necessária; O acabamento depende do tamanho do pó de precursor. 	<ul style="list-style-type: none"> A qualidade da superfície e a velocidade requerem um equilíbrio; Limita a metal. 	<ul style="list-style-type: none"> Limitado apenas a fotopolímeros; Baixa vida útil, propriedades mecânicas pobres do fotopolímero; Processo de construção lento. 	<ul style="list-style-type: none"> Anisotropia vertical; Superfície estruturada em degraus; Não é receptiva a detalhes finos. 	<ul style="list-style-type: none"> Necessário material de suporte; Podem ser usados fotopolímeros e resinas termofixas. 	<ul style="list-style-type: none"> Propriedades mecânicas limitadas; Podem exigir pós processamento. 	<ul style="list-style-type: none"> A resistência depende do adesivo usado; Os acabamentos podem exigir pós processamento; Uso limitado do material.
Materiais	<ul style="list-style-type: none"> Metais; Cerâmicas; Adesivos; Compósitos; Híbrido. 	<ul style="list-style-type: none"> Metais. 	<ul style="list-style-type: none"> Polímeros; Cerâmica. 	<ul style="list-style-type: none"> Polímeros; Compósitos. 	<ul style="list-style-type: none"> Polímeros; Cerâmicas; Compósitos; Híbrido; Biológicos. 	<ul style="list-style-type: none"> Polímeros; Cerâmicas; Compósitos; Metais; Híbrido. 	<ul style="list-style-type: none"> Polímeros; Metais; Cerâmicas; Híbridos.

Fonte: Adaptado de (SANTANA, 2019; GOMES; WILTGEN, 2020; SYED *et al.*, 2018)

As diferentes tecnologias em MA possuem vantagens e desvantagens como pode ser notado no Quadro 1. Nenhuma dessas tecnologias é completa em todas as características (ABDULHAMEED *et al.*, 2019).

3. Sistemas de Segurança Automotivos - Cintos de Segurança Veiculares

Os sistemas de segurança em veículos são classificados conforme os momento que ocorrem durante uma colisão, sendo que os dispositivos de segurança ativa atuam sempre para evitar que o acidente venha a ocorrer, como em um sistema de frenagem ABS (*Anti-lock Braking*

System), que impede que as rodas travem, e assim, o pneu não derrape sobre a pista.

Os dispositivos de segurança passiva atuam no momento da colisão ou desaceleração abrupta do veículo (SILVA, 2018; IKEDA, 2012), são projetados para atuar, sem a intervenção dos ocupantes, reduzindo as lesões causadas nos acidentes.

Os cintos de segurança veiculares, dispositivos de retenção infantil, *airbags* e encosto de cabeça, que atuam simultaneamente colaborando ativamente para o aumento de segurança no veículo.

Dentre todos estes sistemas de segurança veicular, o cinto de segurança é considerado o que possui maior participação na redução de lesão no caso de um acidente (*NHTSA - National Highway Traffic Safety Administration*).

O uso do cinto de segurança diminui o risco de morte dependendo do tipo de colisão (frontal, lateral, traseira), da velocidade e do tipo de veículo. O principal objetivo do cinto de segurança veicular reduz a movimentação do passageiro contribuindo para reduzir os riscos de ferimentos na cabeça, rosto, pescoço, membros inferiores e na coluna. Atualmente é item obrigatório em todos os veículos motorizados, exceto nas motocicletas.

Existem poucos modelos de cintos de segurança veicular regulamentados, sendo que com a resolução 518/15 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), regulamenta todos os equipamentos de segurança dos veículos no Brasil.

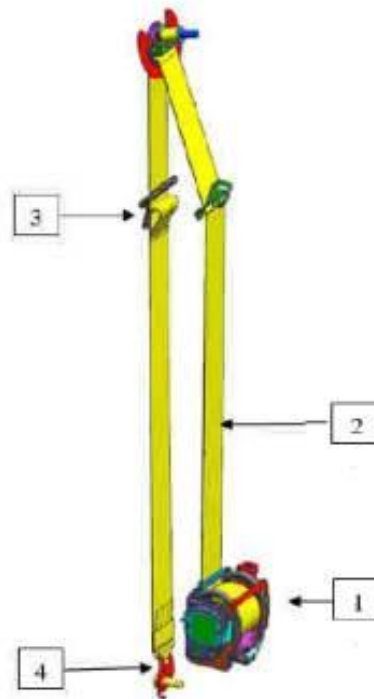
Os requisitos e métodos de ensaios em cintos de segurança em veículos automotores são definidos pela norma ABNT NBR 7337:2014.

Os componentes constituintes de um sistema de cinto de segurança veicular colaboram para atender a função primária que é reter o passageiro no momento de desaceleração do veículo, porém, é o elemento chamado de retrator que possui as principais características que definem o desempenho de um cinto de segurança veicular. Esse componente acomoda o cadarço do cinto de segurança, oferece determinado grau de liberdade ao passageiro, além de extrair e recolher o cadarço em função da movimentação do passageiro e bloqueia o deslocamento do mesmo em colisões que provocam a desaceleração ($>0,45 G$).

Existem modelos de retratores com recursos de pré-tensionador, capazes de recolher o cadarço durante o início do acidente (colisão), ajustando a distância do passageiro e o banco do veículo garantindo a retenção do passageiro nos primeiros segundos do acidente, posicionando o passageiro para a abertura do *airbag*. Na Figura 2 é possível observar as partes que compõem o sistema de cinto de segurança veicular.

Figura 2 – Exemplo de um sistema de cinto de segurança de 3 pontos.

1) Retrator, 2) Cadarço, 3) Lingueta e 4) Ancoragem



Fonte: Próprios Autores

4. Manufatura Aditiva na Fabricação de Cintos de Segurança Veiculares

A prototipagem em projetos de engenharia é sem dúvida uma fase importante e indispensável no desenvolvimento de novos produtos e técnicas da indústria e da academia (WILTGEN, 2019) e na indústria automotiva para desenvolver sistemas de segurança veicular não é diferente.

O desenvolvimento do produto, ou seja, transformar as informações adquiridas em um projeto válido, especificando dados técnicos como requisitos, matérias e a criação de um protótipo. Com a aplicação cada vez mais comum da MA para a construção de protótipos é possível materializar as ideias candidatas a soluções que auxilia para o entendimento e decisão dos clientes, proporciona aprendizagem e por vezes a validação das ideias geradas. Nesta fase, também, é o momento de analisar a viabilidade do protótipo, projetar um fluxograma dos processos do meio produtivo e analisar a possibilidades de problemas de produção.

Após as análises de requisitos e necessidades é projetado uma solução no *CAD* e construído os protótipos via *MA*, sendo a principal função é definir o conceito. Nesta fase os protótipos não necessitam ser sofisticados, porém os recursos da *MA* proporcionam a percepção real do usuário assim fica mais eficiente para avaliar o conceito.

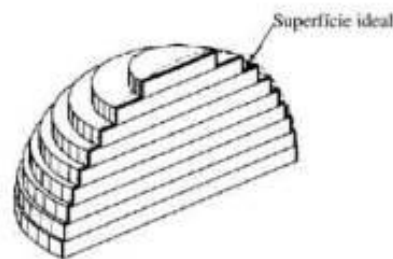
Para o desenvolvimento de um protótipo voltado a análise de conceitos a técnica de Modelagem por Deposição Fundida (*FDM - Fused Deposition Modeling*) é recomendada, por se tratar do método de menor custo e maior facilidade operacional. A técnica de *FDM* possui como principal vantagem seu atracente custo benefício.

A técnica *FDM* é um processo por extrusão que utiliza um cordão ou fio na forma rolo de filamento de material por uma cabeça de extrusão (ALCALDE; WILTGEN, 2018).

Na Figura 3 é possível perceber que existe um grande compromisso entre a qualidade na resolução da fabricação com relação ao tamanho de cada camada de impressão 3D, e também, a forma geométrica escolhida para a fabricação da peça.

Peças com curvaturas similares a da Figura 3 precisam de um fatiamento maior das camadas para melhorar a resolução e diminuir a discretização da peça garantindo uma forma geométrica final mais suavizada.

Figura 3 – Características de precisão devido a espessura da camada e da geometria da peça



Fonte: ALMEIDA, 2007

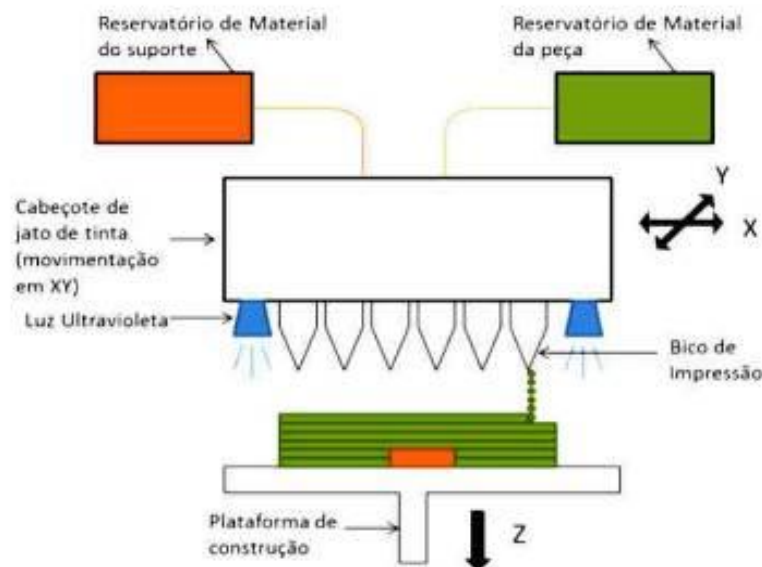
Detectar problemas em protótipos é muito importante no processo de desenvolvimento de uma peça e possibilita a correção das peças com custo muito inferior quando comparado com a necessidade de modificação de uma peça na fase de produção (WILTGEN, 2019).

A construção de um protótipo com as características geométricas e de material similar ao produto final e considerando que as peças dos atuais retratores de cintos de segurança veicular são produzidas em polímeros, uma tecnologia de *MA* que pode atender esse desenvolvimento é a técnica de impressão 3D por Jateamento de Material (*JM*).

A técnica JM utiliza materiais poliméricos e/ou termoplásticos de impressão 3D fotocurável. No qual gotículas de resina são aspergidas controladamente sobre uma mesa de impressão, ao constituir uma camada aplica-se luz ultravioleta para que o material cristalize, conforme pode ser notado na Figura 4.

Esse método de MA possui bom acabamento superficial (precisão e qualidade) (GIORDANO *et al.*, 2017).

Figura 4 – Técnica de Jateamento de Material para fabricação em 3D



Fonte: GIORDANO *et al.*, 2017

Para o desenvolvimento de peças de sistemas segurança veicular é sempre importante a construção de protótipos funcionais com as características idênticas da peça original é parte fundamental para a análise de tensões e fadigas mecânicas que podem surgir em ensaios e testes realizados em ambiente controlado (em laboratório – *DT&E – Development Test & Evaluation*) e em ambiente relevante (em campo – *OT&E – Operational Test & Evaluation*) como parte integrante do procedimento de testes (*RTD&E – Research, Development, Testing, and Evaluation*) (WILTFIN, 2021).

A aplicação da tecnologia de manufatura por Jateamento de Material (JM) se mostra eficiente em projetos que exigem avaliação funcional da peça, a Figura 5 representa o desenvolvimento de um retrator de cinto de segurança, sendo que Figura 5A apresenta o projeto em *CAD* e a Figura 5B um protótipo produzido com uma resina.

Figura 5 - Projeto desenhado em CAD (A) e o protótipo construído via Manufatura Aditiva (B)



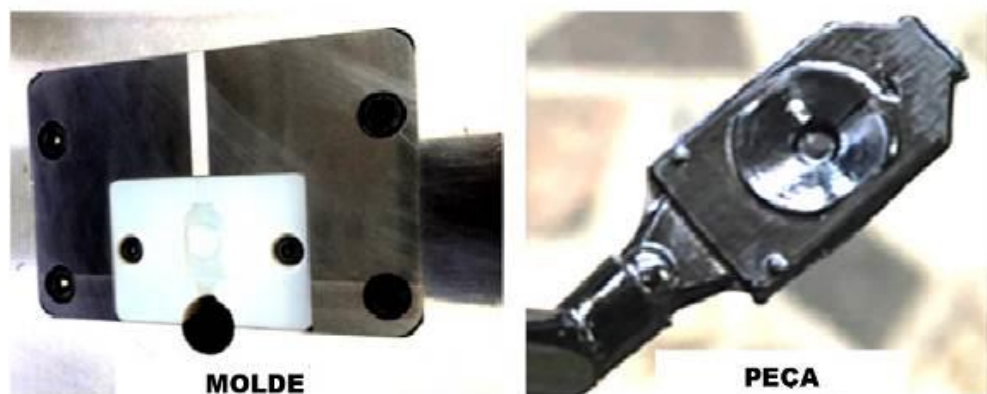
Fonte: Próprios Autores

Um método que tem se mostrado eficiente para produzir pequenos lotes de peças para a realização de testes é com o desenvolvimento de moldes híbridos. A fabricação utiliza a Manufatura Aditiva em conjunto com Manufatura Subtrativa no desenvolvimento de moldes híbridos para a utilização em Manufatura Formativa.

Os moldes híbridos são fabricados com a técnica JM utilizando o polímero do tipo *digital ABS*, que é um tipo de resina de alta resistência (GRIFFIN, 2019).

Na Figura 6 é possível verificar os testes realizados com a fabricação dos moldes híbridos em resina via impressão 3D, assim como, uma peça fabricada com esse molde via manufatura formativa para testes e metrologia.

Figura 6 - Molde híbrido com matriz fabricada via MA e a peça produzida pelo molde



Fonte: Próprios Autores

Para suprir as limitações da técnica JM, pode-se aplicar MA em metais. Existe uma grande variedade de materiais metálicos disponíveis os quais podem ser aplicados para a fabricação de peças (GOMES; WILTGEN, 2020).

A fabricação das matrizes em metal pode aumentar a produtividade dos moldes, e a qualidade final das peças injetadas via manufatura formativa. Devido à maior eficiência que ocorre na troca térmica obtida pela construção de canais de resfriamento com geometrias mais eficientes. A impressão 3D de moldes em metal parece muito promissora para iniciar uma grande mudança na indústria automotiva (ARORA, 2019).

Dentre estas técnicas a chamada de fusão em pó (*PBF – Powder Bed Fusion*) com a aplicação da tecnologia de sinterização direta a laser de metal (*DMLS – Direct Metal Laser Sintering*) é um tipo de MA que constrói peças metálicas. Na máquina 3D cada uma das camadas ultra fina do pó metálico é espalhada pela plataforma, na sequência um feixe colimado de laser funde com muita precisão o pó nos pontos definidos como o mapeamento 2D da camada a ser fabricada conforme o desenho em *CAD*. Quando uma camada é finalizada, o procedimento se repete até que a última camada seja construída e a peça seja finalizada.

As peças metálicas produzidas pelo processo *DMLS* são resistentes e funcionais, possuem boas propriedades mecânicas em todas as direções. É possível fabricar as peças com mais de 20 diferentes tipos ligas metálicas com camadas de ~40 µm de espessura e precisão ~50 µm (*EOS - Electro Optical Systems, 2017*).

5. Conclusão

O objetivo desta pesquisa é mostrar os benefícios que diferentes técnicas em MA proporcionam quando aplicadas no dia-a-dia da indústria, principalmente no desenvolvimento de novos produtos do segmento automotivo de segurança veicular.

A MA possui capacidade de agilizar significativamente a fabricação de pequenos lotes de peças destinados a realização de ensaios e testes funcionais nas fases de maturidade tecnológica de desenvolvimento. Entretanto, no seguimento automotivo a utilização da MA encontra-se no início de suas aplicações. Vantagens evidentes surgem a cada novo teste com a MA na indústria e parece que os investimentos em MA tendem a aumentar significativamente no processo de desenvolvimento de produto.

Durante a fase de validação de um protótipo de um novo produto, quando comparado com as formas tradicionais de fabricação, a decisão óbvia a favor da MA, visto os custos e os prazos reduzidos.



A possibilidade de interagir de forma rápida e precisa nas modificações em um projeto e em seus protótipos funcionais, permite acelerar o desenvolvimento e sua maturidade de forma significativa. A utilização de uma máquina em MA reduz o tempo de espera e os investimentos relativos à latência das tomadas de decisão. O mesmo acontece com a definição do fluxo e controle do meio produtivo, pois a avaliação do modo de falha das peças fica mais eficiente.

As possíveis limitações da MA podem ser superadas utilizando-a em conjunto com a manufatura subtrativa.

A opção de construir um molde híbrido em comparação com um molde convencional pode representar uma vantagem em custo e em tempo até ~80% menor na construção de moldes, sendo que este número cresce progressivamente para cada alteração do projeto devido a diversas possibilidades de melhoria.

A técnica *DMLS* quando utilizada na construção de moldes pode substituir todas as opções de fabricação de moldes metálicos muito em breve devido sua capacidade de construir geometrias complexas de canais de refrigeração mais ramificados e mais eficientes aumentando significativamente a cadência produtiva do molde na manufatura formativa, devido a grande redução no tempo de resfriamento.

Com base na pesquisa aqui apresentada neste artigo é importante salientar que existe uma tendência forte de redução nos custos e prazos das peças fabricadas via MA. A qualidade obtida nas novas peças em MA possibilita experimentar novas aplicações na indústria.

REFERÊNCIAS

- ABDULHAMEED, O.; AL-AHMARI, A.; AMEEN, W.; MIAN S.H. **Additive manufacturing: challenges, trends, and applications**. *Advances in Mechanical Engineering*, v.11(02), pp.1–27, 2019.
- ALCALDE, E.; WILTGEN, F. Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro. **Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté**, Taubaté, v.24(02), pp.1-9, 2018.
- ALMEIDA, W.J. **Otimização estrutural de protótipos fabricados pela tecnologia FDM utilizando os métodos dos elementos finitos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007. 110p.
- ARORA, N. **Design and manufacturing injection mould conformal cooling channels using additive manufacturing**. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, Universidade de Búfalo, v.7, pp.56-57, 2019.
- EOS - Electro Optical Systems -**Material Data Sheet Industry**. pp.1-5, 2017.



GIORDANO, C. M.; ZANCUL, E. S.; RODRIGUES, V. P. **Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais.** Revista Produção Online, Florianópolis, v.16(02), pp.499-523, 2016.

GRIFFIN, M. **3DPrinting vs injection molding – know the differences.** All3DP the 3D Printing Magazine, pp.1-8, 2019.

GOMES, J.; WILTGEN, F. **Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas.** Revista Tecnologia, v.41(01), pp.1-16, 2020.

IKEDA, T. **Segurança veicular dispositivos de segurança passiva – descrição e recomendações.** Engenharia de Mauá. São Caetano, 2012. 74p.

SANTANA, I. **Avaliação das capacidades da impressão 3D de baixo custo na fabricação de snap.** Tese de Doutorado, Universidade do Porto, Porto, 2019. 251p.

SYED, A. M. T.; KOUMOULOS, E. P.; AMIT, B.; SUSMITA, B.; O'DONOGHUE, L.; CHARITIDIS, C. **Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities.** Materials Today, v.21(01), pp.1-18, 2018.

SILVA, D. S. **Análise de impacto por elementos finitos sobre dispositivo estrutural de segurança veicular lateral.** Monografia. Universidade de Brasília, 2018. 174p.

WILTGEN, F. **Protótipos e prototipagem rápida aditiva sua importância no auxílio do desenvolvimento científico e tecnológico.** 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), UFSCar, São Carlos, 5 a 7 de agosto, pp. 1-5, 2019.

WILTGEN, F. **Testing plan in systems & requirements engineering for strategic engineering areas.** 26º International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Curitiba, 22 a 26 de novembro, pp.1-10, 2021.

ZIVANOVIC, S. T.; PIEVIC, M. D.; POPOVIC, M. D.; SLAVKOVIC, N. R.; VORKAPIC, N. M. **An overview of rapid prototyping technologies using subtractive, additive and formative processes.** Universidade de Belgrado, Belgrado, v.48, pp.1-8, 2019.

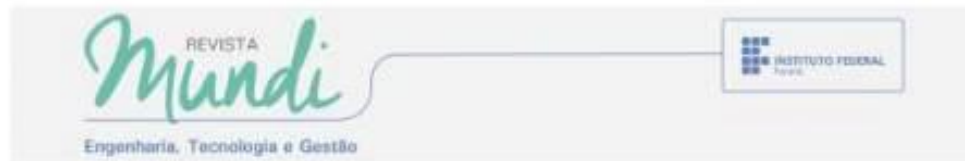
APÊNDICE F

ARTIGO: A IMPORTÂNCIA DAS SIMULAÇÕES NA MANUFATURA ADITIVA DE MOLDES MECÂNICOS.

AUTORES: Marcelo LOPES, Cleiton Tamanini, Filipe Wiltgen, Fábio Cruz

REVISTA: MUNDI ENGENHARIA, TECNOLOGIA E GESTÃO.

ANO: 2021



A IMPORTÂNCIA DAS SIMULAÇÕES NA MANUFATURA ADITIVA DE MOLDES MECÂNICOS

The Importance of Simulations in Additive Manufacturing of Mechanical Molds

Marcelo Lopes¹

Cleiton Tamanini²

Filipe Wiltgen³

Fábio Cruz⁴

Resumo: Projetos mais complexos e personalizados principalmente os produzidos via a manufatura formativa com uso de moldes mecânicos parecem ser uma alternativa importante para indústria mundial. Entretanto, para a construção destes moldes complexos é necessário a utilização da manufatura aditiva para sua construção, quer seja pela própria complexidade, quer seja pela necessidade de resfriamento adequado dos moldes. Seja qual for o motivo, a manufatura aditiva permite que projetos complexos sejam executados e fabricados de forma mais eficiente. Para viabilizar a construção de moldes mecânicos por manufatura aditiva é importante o uso de simulações computacionais no desenvolvimento dos projetos, visto que isso reduz o tempo de fabricação e na assertividade durante a realização de testes para avanço da maturidade tecnológica. Este artigo fornece uma visão sobre a utilização de simulações computacionais no desenvolvimento de moldes mecânicos em manufatura aditiva. No decorrer do artigo tem-se o processo de realização das simulações para ajudar nos protótipos físicos, a importância de uma análise detalhada dos resultados extraídos de simulações. É apresentado um estudo de caso baseado na simulação em uma peça mecânica que devido a sua complexidade, só pode ser construída via manufatura aditiva. Por fim, são apresentados e discutidos os resultados e a conclusão.

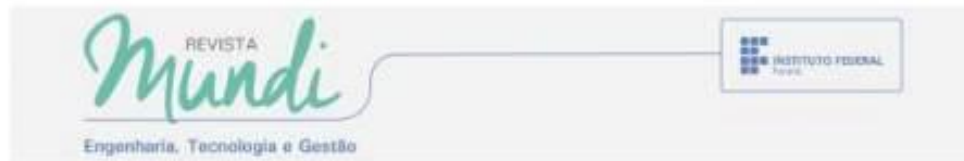
Palavras-chave: Simulação Computacional, Manufatura Aditiva, Moldes Mecânicos.

¹Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, marcelolopes5x@gmail.com.

²Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, cleitontamanini@hotmail.com.

³Engenheiro Eletricista e Professor Doutor em Engenharia de Fusão Termonuclear Controlada, Universidade de Taubaté, LFWBarbosa@gmail.com ou Filipe.Wiltgen@unitau.br.

⁴Graduando Engenharia Mecânica, Universidade Nove de Julho, fabio.sena.cruz@gmail.com.



Abstract: More complex and customized projects, mainly those produced via formative manufacturing using mechanical molds, seem to be an important alternative for the world industry. However, for construction of these complex molds, it is necessary to use additive manufacturing for their construction, either because of complexity itself, or because need for adequate cooling molds. Whatever the reason, additive manufacturing allows complex projects to be executed and manufactured. To enable construction of mechanical molds by additive manufacturing, it is important to use computer simulations in development of projects, as this reduces manufacturing time and in carrying out tests to advance technological maturity. This paper provides an insight into use of computer simulations in development of mechanical molds in additive manufacturing. Throughout paper, process of carrying out simulations is presented to help with physical prototypes, importance of a detailed analysis results extracted from simulations. A case study based on simulation in a mechanical part is presented which, due to its complexity, can only be built via additive manufacturing. Finally, results and conclusion are presented and discussed.

Keywords: Computational Simulation, Additive Manufacturing, Mechanical Molds.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de polímeros em processos de manufatura formativa produz peças de forma muito rápida, com custo muito baixo e com bom acabamento, por isso é aplicada em diversos setores industriais. A Associação Brasileira do Plástico (ABIPLAST, 2018) diz que cerca de ~33% da transformação de plástico nacional é realizada por esse método de manufatura.

A evolução das propriedades mecânicas, alta produtividade e boa qualidade superficial fazem da manufatura formativa uma importante forma de produção mundial de peças (HARADA; UEKI, 2012; MARQUES *et al.*, 2015; SILVA, 2009).

Os moldes mecânicos utilizados em manufatura formativa se destacam como uma importante ferramenta no processo de fabricação mundial (BARETA, 2007; DOMINGUES, 2015; HARADA, 2004; MARQUES *et al.*, 2015).

A evolução da Manufatura Aditiva (MA) tornou capaz a construção de moldes mecânicos mais eficientes, utilizando diversos materiais e técnicas (WILTGEN, 2019; WILTGEN 2021A; ALCALDE; WILTGEN 2019; GOMES; WILTGEN, 2020).

É possível unir as manufaturas aditiva e subtrativa para o desenvolvimento de moldes mecânicos com diferentes opções construtivas, o que inclui a fabricação de moldes híbridos, com matrizes fabricadas em resinas ou metais (LOPES; WILTGEN, 2021A; LOPES; WILTGEN, 2021B; WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2021A; ALCALDE; WILTGEN 2019; GOMES; WILTGEN, 2020). Na Figura 1 pode ser observado o processo de fabricação de um molde mecânico híbrido.

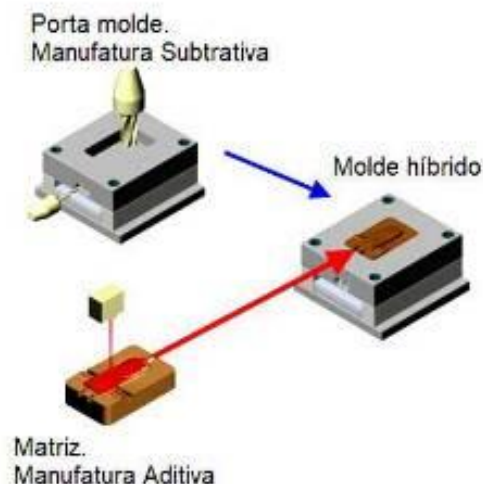
Fabricação de moldes híbridos tem se mostrado uma solução inovadora e eficiente para a construção das matrizes do molde e pode substituir a fabricação em manufatura subtrativa, chamada de convencional (DOMINGUES, 2015; MARTINHO, 2010; SHINDE; ASHTANKAR, 2017; VASCONCELOS, 2014; MIRANDA, 2017).

A simulação computacional é uma realidade presente durante a execução de todos os projetos de moldes mecânicos, assim como, em diversos outros projetos em engenharia nas mais diversas áreas.

Em MA os moldes mecânicos protótipos podem ser construídos com uma complexidade muito maior do que em manufatura subtrativa devido a limitações técnicas provocadas pelos parâmetros de temperatura, pressão e tempo. Estes parâmetros podem comprometer determinadas características geométricas dos moldes mecânicos (LOPES; WILTGEN, 2020; LOPES; WILTGEN, 2021A; LOPES; WILTGEN, 2021B; TUTESKI; KOČOV, 2018; VIETEN *et al.*, 2021).

Com a utilização da MA é possível projetar canais de refrigeração mais eficientes e com a possibilidade de construções geométricas complexas que permitem acompanhar o formato da peça a ser fabricada (ALCALDE; WILTGEN, 2019; TUTESKI; KOČOV, 2018; WILTGEN, 2019; GOMES; WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021A, TAMANINI; WILTGEN, 2021A; TAMANINI; WILTGEN, 2021B) o que conseqüentemente conduz a melhor qualidade e maior produtividade (GRIES *et al.*, 2021; HATOS; KOCSIS; HARGITAI, 2018; JUNIOR; COSTA, 2019; VOJNOVÁ, 2016; PARK; DANG, 2017; MIRANDA, 2017).

Figura 1 - Fabricação de um molde mecânico do tipo híbrido.



Fonte: Adaptado de Martinho, 2010 e Domingues, 2015.

Esta pesquisa tem como objetivo apresentar a importância das informações extraídas nas simulações computacionais em moldes mecânicos industriais, mostrando que estas informações são imprescindíveis para a eficiência no processo de fabricação de moldes em protótipos de modelos digitais em 3D, assim como, protótipos físicos reais acelerando o entendimento da informação para viabilizar alcançar elevados níveis de maturidade tecnológica (*TRL – Technology Readiness Level*) permitindo que um produto seja comercializado mais rapidamente (WILTGEN, 2021A; WILTGEN, 2021B).

A relevância desta pesquisa vem do fato de que existe a necessidade premente de inovação urgente nos processos de produção de moldes industriais, tomando-os mais rápidos de serem fabricados, mais eficientes na extração do calor e resfriamento das peças, e assim, muito mais eficientes na produtividade e redução de ciclo de fabricação em manufatura formativa. Isso tudo contribui para que a indústria seja mais eficiente, lucrativa e com menor impacto ambiental na produção.

2 PROJETOS DE MOLDES MECÂNICOS VIA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os processos industriais têm como uma de suas principais metas a redução dos custos e aumento de produtividade, uma das formas de fabricação que possui o menor custo por peça fabricada é a manufatura formativa.

A fabricação via moldes mecânicos por injeção se caracteriza pela boa velocidade de produção, aliada a possibilidade de construção de peças relativamente complexas, boa precisão e bom acabamento superficial, além do importante baixo custo para produção de peças em grande escala (ALBA *et al.*, 2020; TUTESKI; KOČOV, 2018).

O processo de manufatura formativa mais utilizado é baseado na inserção de matéria-prima do tipo polímero aquecido, que se transforma em uma massa fluida e viscosa, vindo a se solidificar novamente quando resfriada, retornando a seu estado natural (LOPES; WILTGEN, 2021A; LOPES; WILTGEN, 2021B). O fluxo deste processo pode ser descrito de maneira simplificada conforme pode ser visto na Figura 2.

Na Figura 2, a matéria-prima em estado sólido é inserida em uma máquina que a derreterá e injetará na forma fluida, ficando fundida de forma homogênea, a qual é inserida sob pressão na cavidade oca do molde mecânico e mantida na cavidade até que seja resfriada e volte a se solidificar. Após isso, molde mecânico é aberto e a peça é extraída e imediatamente se inicia um novo ciclo (ALBA *et al.*, 2020; ASNAFI *et al.*, 2020; BARETA, 2007; DE BLASIO, 2007; DOMINGUES, 2015; HARADA, 2004; MARQUES *et al.*, 2015; MIRANDA, 2017).

Figura 2 - Representação do ciclo de manufatura formativa típica.



Fonte: Próprios Autores.

Considerando que a construção de um molde mecânico industrial representa um custo de investimento consideravelmente alto no processo, seu desenvolvimento deve ser capaz de intervir em todos os eventos que possam tornar o molde mecânico inútil ou pouco eficiente. A quantidade de partes necessárias para compor um molde mecânico possui junções que quase sempre são um problema no acabamento das peças (rebarbas), a localização dos pontos de injeção deve ser bem escolhida no molde para que a cavidade oca possa ser completamente preenchida.

Outro fator de extrema importância nos moldes mecânicos são circuitos de refrigeração eficientes visando diminuir o ciclo de produção (GRIES *et al.*, 2021; HARADA; UEKI, 2012; WANG; YU; WANG, 2015; VASCONCELOS, 2014; VIETEN *et al.*, 2021; BROTON; BERG; SORBY, 2016). Isso mostra a importância da realização de ensaios e testes em modelos digitais em 3D

(simulações computacionais e desenhos dos modelos em CAD) além dos ensaios e testes físicos reais (protótipos físicos experimentais).

Geralmente moldes mecânicos são projetados com muitas cavidades, desde que adequados a capacidade da máquina responsável pela injeção (injetora). O projeto dos canais de refrigeração é vital para o desempenho do molde mecânico, canais de refrigeração fabricados via manufatura subtrativa não são eficientes e não conseguem refrigerar o molde de forma uniforme (DIMLA *et al.*, 2018; SHAYFULL *et al.*, 2013). Isso porque canais de refrigeração fabricados em manufatura subtrativa são construídos linearmente devido as limitações deste modo de fabricação (FENG; KAMAT; PEI, 2021).

A utilização de manufatura subtrativa em moldes mecânicos não alcança a eficiência dos canais de refrigeração fabricados em manufatura aditiva. Além da baixa eficiência na extração de calor, demoram muito tempo para serem fabricados, podem inviabilizar o molde, produzir peças defeituosas, incompletas, deformadas, empenadas, com tensões estruturais, entre muitos outros problemas.

Com o advento da manufatura aditiva abriram-se possibilidades para o desenvolvimento de canais de refrigeração distribuídos, capilares e ramificados ao redor das cavidades das peças no molde mecânico de forma a refrigerar a peça de uma forma mais adequada, aumentando muito a cadência de fabricação (ASNAFI *et al.*, 2020; CHUNG, 2019; GRIES *et al.*, 2021; HATOS; KOCSIS; HARGITAI; 2018; JUNIOR; COSTA, 2019; SILVA, 2009; SINGH; ARORA, 2019; SOUZA; MARQUES, 2014; ALBA *et al.*, 2020).

Na Figura 3 é possível observar uma estrutura de molde mecânico com dois diferentes circuitos de refrigeração ramificados e distribuídos acompanhando a geometria da peça.

A primeira etapa da manufatura aditiva consiste na modelagem digital em 3D do projeto. Os modelos digitais em 3D do projeto permitem correções e modificações necessárias com maior eficiência, ajudando a verificar e corrigir possíveis falhas estruturais no decorrer do desenvolvimento do projeto. Visualizar a forma geométrica da peça em diferentes posições e em três dimensões permite a compreensão volumétrica.

Figura 3 - Circuitos de refrigeração fabricados via manufatura aditiva.



Fonte: Adaptado de ALBA *et al.*, 2020.

Com os resultados obtidos das informações das simulações computacionais, é possível adaptar os modelos digitais em 3D, e novamente testar até que os resultados sejam adequados para a fabricação em manufatura aditiva (WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2021A; GOMES; WILTGEN, 2020; ALCALDE; WILTGEN, 2018; LOPES; WILTGEN, 2021A).

Estas simulações computacionais fornecem informações importantes das peças quando em uma operação de fabricação simulada, mostrando como ficam os mapas de temperatura e pressão do fluido na cavidade do modelo do molde mecânico em teste digital. Os resultados obtidos e analisados referentes ao comportamento do molde mecânico digital em teste apresenta o comportamento da peça em operação simulada e apontam as necessidades de mudanças e alterações no projeto para que os resultados sejam melhorados.

A partir desta etapa podem ser realizadas as alterações necessárias no projeto inicial, tanto na estrutura do molde mecânico quanto nos projetos de canais de refrigeração, com o objetivo de resolver problemas encontrados nas simulações computacionais, e assim, melhorar a eficiência e o desempenho.

Com o projeto revisado a partir das informações das simulações, retoma-se o processo de simulações, completando quantos ciclos forem necessários até que seja satisfeito o requisito de projeto. Esse processo economiza tempo e custo de fabricação identificando possíveis problemas e

imperfeições que surgem durante o processo de simulações (GRIES *et al.*, 2021).

A utilização de simulação representa uma evolução importante e imprescindível no processo de fabricação moderno, pois reduz a possibilidade de falhas no projeto de moldes mecânicos, o que contribui com as etapas de testes de protótipo digitais, e também, viabiliza a construção dos protótipos físicos reais o que reduz o tempo, custo e desperdícios de matéria-prima, o que acelera consideravelmente a maturidade tecnológica (*TRL*) do projeto permitindo encurtar o atendimento e a redução do ciclo produtivo, além de atender a exigências ambientais com projetos industriais mais sustentáveis (WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2021B).

3 IMPORTÂNCIA DAS SIMULAÇÕES E SUA APLICAÇÃO NA MANUFATURA ADITIVA

Em processos de manufatura subtrativa a construção de canais de refrigeração complexos é inviável, os moldes mecânicos acabam limitados a estruturas e furos lineares e muitas vezes com a necessidade de incertos de fechamento dos furos (tampões).

Em manufatura subtrativa não é possível construir canais que acompanhem o formato das cavidades dos moldes mecânicos para facilitar a troca de calor. Dado a necessidade dos tampões, quase sempre ocorrem áreas com turbulência do fluido refrigerante, o que além de atrapalhar a eficiência na troca de calor, além de produzir vibrações que podem causar falhas estruturais nos moldes mecânicos e nas peças fabricadas.

Com o uso da MA, por sua forma de construção camada por camada, existe a possibilidade de fabricar moldes complexos com canais e circuitos de refrigeração que se adaptem melhor ao formato da cavidade que se deseja resfriar, chamados de canais de refrigeração conformados (TAMANINI; WILTGEN, 2021A; TAMANINI; WILTGEN, 2021B).

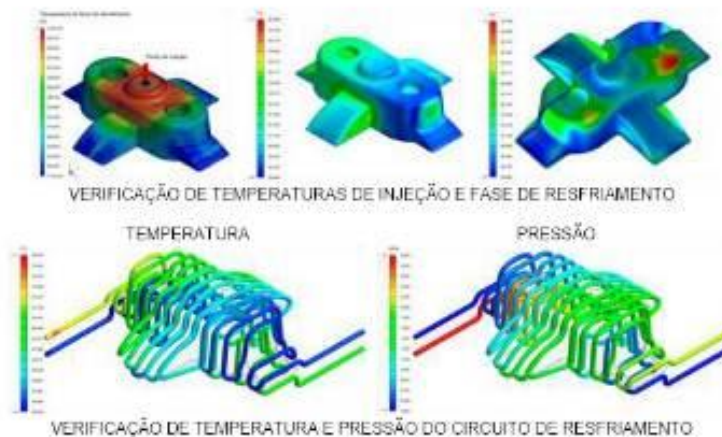
Existem basicamente duas formas de conectar canais de refrigeração, ou são conectados em série ou em paralelo. Os canais de refrigeração em

série estão conectados em um único circuito de entrada do fluido refrigerante até a saída, devido a praticidade de fabricação via manufatura subtrativa eram os mais utilizados (FENG; KAMAT; PEI, 2021, MARQUES *et al.*, 2013, 2014, 2015). Para os canais de refrigeração em paralelo, o fluido refrigerante flui através de todos os canais de forma independente podendo ser aplicado em moldes complexos evitando aquecimento excessivo do molde e deformação das peças.

Nas simulações computacionais de moldes mecânicos essas configurações são testadas a fim de verificar o comportamento térmico. Durante as análises das simulações pode ser verificada as ocorrências de pressão excessiva na circulação do fluido refrigerante, ou falhas na refrigeração quando somente uma parte da peça é resfriada (FENG; KAMAT; PEI, 2021; MARQUES, 2013, 2014, 2015; PARK; DANG, 2017).

É importante notar nas simulações (Figura 4) que as entradas de fluido de refrigeração estão representadas pela cor azul (frio) e as saídas de fluido de refrigeração na cor vermelha (quente) devido ao aumento do gradiente de temperatura na troca de calor.

Figura 4 - Simulações de temperatura e pressão em molde mecânico
SIMULAÇÃO



Fonte: Adaptado de ALBA *et al.*, 2020.

Observar que há uma melhor distribuição do calor na simulação utilizando canais de refrigeração em paralelo (FU, 2015). Adequações no

projeto com base nas informações das análises obtidas de simulações computacionais permitem a construção de um protótipo físico real em MA, para a realização de testes e a comprovação dos resultados obtidos durante as simulações computacionais (WITGEN, 2019; SHINDE; ASHTANKAR, 2017; REIS; BARREIROS; VASCO, 2018).

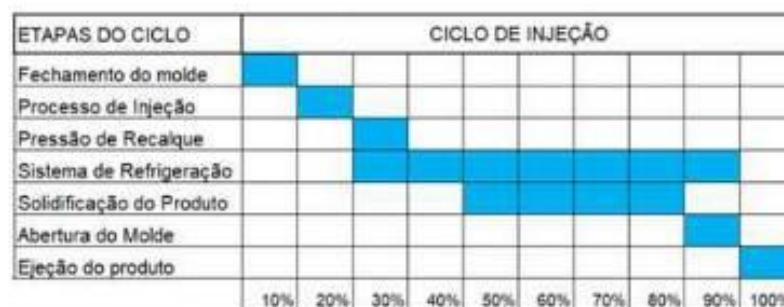
A simulação é muito importante no desenvolvimento de moldes mecânicos, mas a análise deve ser feita de forma rigorosa e criteriosa a fim de extrair o máximo de informações relevantes para o projeto.

4 INFORMAÇÕES E ANÁLISES EXTRAÍDAS DAS SIMULAÇÃO

A simulação computacional auxilia muito a fase de projeto dos moldes mecânicos, que reduz significativamente o custo de uma modificação. O principal objetivo da análise é avaliar o desempenho térmico de acordo com os requisitos no processo de injeção de plástico. As simulações térmicas consideram a atuação do fluxo do refrigerante ao longo dos canais de refrigeração e a troca térmica com a peça durante a fase de resfriamento.

Na Figura 5, é possível verificar que o tempo de resfriamento de uma peça representa mais de dois terços do ciclo de fabricação em manufatura formativa.

Figura 5 - Representação as etapas de um ciclo de injeção de plástico.



Fonte: Adaptada de MIRANDA, 2017.

Utilizar um sistema de refrigeração que possibilite resfriar a matriz de maneira uniforme e eficiente irá proporcionar um tempo menor do ciclo de

fabricação aumentando a produtividade (ALBA *et al.*, 2020; HARADA, 2004; FENG; KAMAT; PEI, 2021; MARQUES; SOUZA; SANTOS, 2013; MARQUES *et al.*, 2015; PARK; DANG, 2017).

As principais informações obtidas de uma simulação computacional são: tempo de preenchimento, pressão de injeção, empenamento, contração e temperatura. Entretanto, como esta pesquisa trata da eficiência do sistema de refrigeração, o foco das informações deve ser extraído da análise de simulação da refrigeração são:

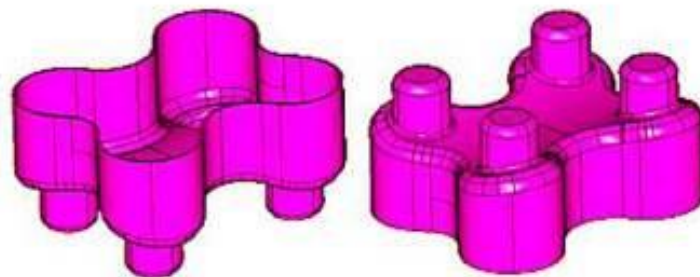
- *Em circuitos em série observa-se que o circuito solicita maior pressão devido ao longo caminho que o refrigerante possui, gerado pela geometria complexa diferente do que ocorre com circuitos em paralelo (FENG; KAMAT; PEI, 2021).*
- *O número de Reynolds determina a taxa de fluxo necessária para atingir um fluxo turbulento (4.000 ou superior) do refrigerante. Isso é ideal para resfriamento, porém, quanto maior o número de Reynolds no circuito, mais energia é necessária para bombeá-lo através do circuito. Número de Reynolds em 10.000 é o ideal para circuitos de refrigeração de moldes (MARQUES *et al.*, 2015).*
- *O refrigerante com uma temperatura mais baixa acarreta melhor transferência de calor e menos defeitos nas peças, enquanto uma menor taxa de fluxo do refrigerante aumenta a temperatura na saída do refrigerante. A temperatura do refrigerante tem relação com a vazão e pressão aplicada no circuito, sendo que a temperatura do refrigerante varia ao longo do circuito, porém não deve variar mais de $\sim 3^{\circ}\text{C}$ podendo comprometer a qualidade na fabricação (FENG; KAMAT; PEI, 2021; RAZ; ZAHALKA, 2016; WANG; YU; WANG, 2015).*
- *O preenchimento da peça é determinado pelo fluxo do material fundido que é determinado principalmente por sua viscosidade, e quanto mais o material fundido é resfriado, mais ele tende a ser viscoso e se solidificar, portanto, existe um compromisso entre o resfriamento da peça após o preenchimento completo (FENG; KAMAT; PEI, 2021).*

Durante o processo de produção, a temperatura do molde é estabilizada em um valor que deve ser homogêneo em toda matriz. Este valor está relacionado com a temperatura do material fundido e os parâmetros do refrigerante (BARETA, 2007; CORDOVA, 2018; RAZ; ZAHALKA, 2016).

5 ESTUDO DE CASO PARA SIMULAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS

O estudo de caso realizado nesta pesquisa trata da extração de informações de uma análise de simulação computacional de injeção em um molde mecânico complexo e que só pode ser construído via manufatura aditiva. A análise está limitada a transferência de calor entre o canal de refrigeração e a peça a ser fabricada que é o principal fator responsável pela produtividade. A peça em questão é apresentada na Figura 6 será utilizada na simulação computacional do estudo de caso. Esta peça possui um volume de injeção de 580cm³, espessura constante de 3mm e altas especificações geométricas (cavidade profunda, detalhes delgados e rebaxos internos) no qual um sistema de refrigeração convencional apresenta baixa eficiência (resfriamento não homogêneo) (ALBA *et al.*, 2020; COLMENERO *et al.*, 2021).

Figura 6 - Peça complexa projetada para o do estudo de caso de simulação.



Fonte: Próprios Autores.

O método adotado para demonstrar o impacto positivo da simulação de injeção é realizar a análise de diferentes circuitos de refrigeração fabricados via manufatura subtrativa (linear) e manufatura aditiva (conformado) para

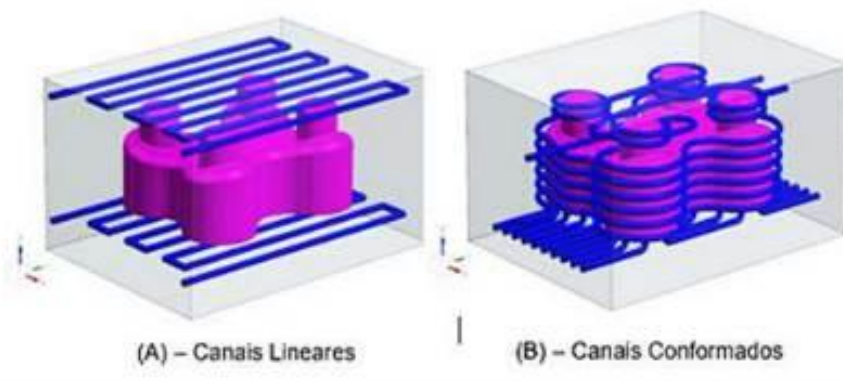
demonstrar as vantagens em adotar o uso de manufatura aditiva na construção do molde.

Nesta pesquisa foram executadas as simulações com o programa *Moldex3D*, e a modelagem tridimensional do modelo, assim como, dos projetos de circuitos de refrigeração foram desenvolvidos em um programa de CAD, ambos em um computador de 64-bit, *Intel Core i-77700HQ* de 2,8 GHz.

Neste estudo foi considerada uma análise de matrizes construídas em manufatura aditiva e manufatura subtrativa sendo que a matéria-prima para matrizes em manufatura aditiva é de metal 316L, e a de manufatura subtrativa é de metal P20. As matrizes montadas nos moldes mecânicos possuem a dimensão de 400mm(C) × 340mm(L) × 250mm(H) com uma única cavidade e canais de refrigeração de 8mm de diâmetro.

Para os canais de refrigeração lineares (Figura 7A) que são fabricados via manufatura subtrativa possuem volume de $\sim 530\text{cm}^3$. Para os canais conformados (Figura 7B), sendo que na matriz inferior foi adotado canais conformados em paralelo, e a matriz superior com canais de refrigeração em serie o volume total é de $\sim 1.180\text{cm}^3$. O refrigerante utilizado é água pura e uma entrada com temperatura de $\sim 75^\circ\text{C}$ e vazão de entrada de 8 litros/minuto.

Figura 7 - Tipos de canais de refrigeração nas simulações de estudo de caso.

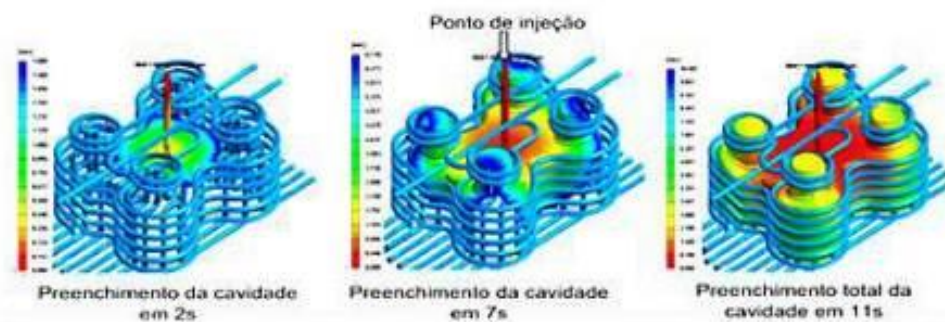


Fonte: Próprios Autores.

A injeção será posicionada no baricentro da geometria da peça para que o preenchimento da cavidade fique o mais uniforme possível. Na Figura 8 é possível observar como o preenchimento do molde ocorre de maneira uniforme

em 11s. Durante o preenchimento da cavidade a temperatura inicial do polímero fundido é de $\sim 230^{\circ}\text{C}$ que vai diminuindo em função da troca de calor,

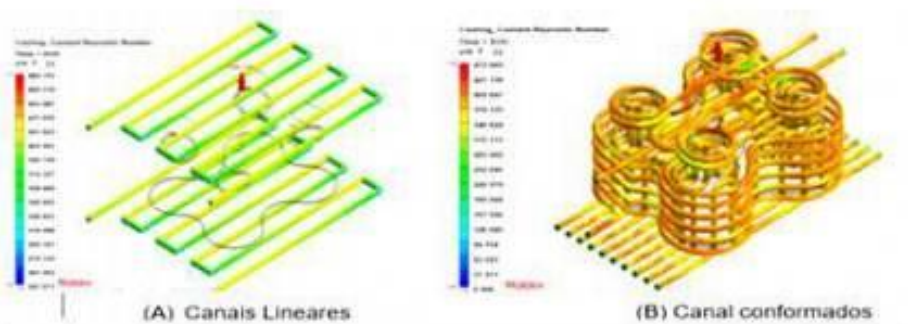
Figura 8 - Simulação do preenchimento da cavidade do molde simulado.



Fonte: Próprios Autores.

Durante as simulações avalia-se a eficiência da troca de calor do líquido refrigerante, sendo que os dados de entrada são: a geometria dos canais, o tipo do líquido refrigerante utilizado e vazão. Como resposta da análise é obtido o número de Reynolds (Figura 9), sendo que o fluxo do refrigerante deve ser em regime turbulento para melhor troca de calor (entre ~ 4.000 e ~ 10.000). Ambos os canais apresentaram eficiência na troca de calor.

Figura 9 - Simulação do fluxo do refrigerante em regime turbulento.



Fonte: Próprios Autores.

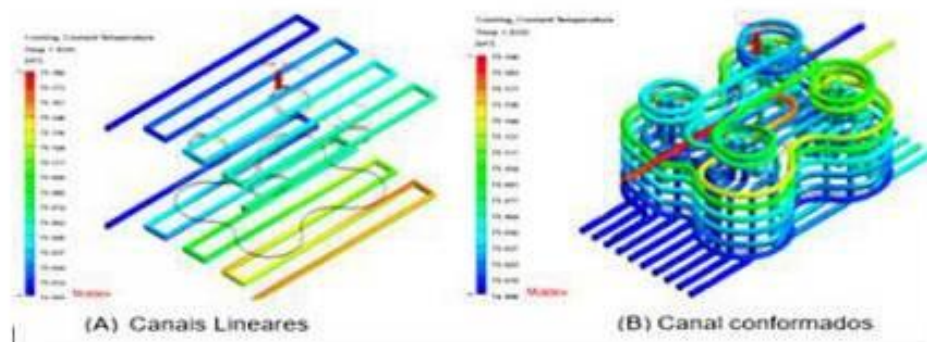
Durante a refrigeração ocorre a circulação do refrigerante internamente nos canais para a troca de calor das matrizes dos moldes mecânicos. Na simulação apresentada na Figura 10 é possível observar a variação da temperatura no percurso entre a entrada e saída do refrigerante.

A temperatura de entrada e saída do refrigerante não deve ter uma diferença superior a $\sim 5^{\circ}\text{C}$, caso isso não venha a ocorrer a temperatura do molde se elevará o que pode comprometer a qualidade da peça produzida (MARQUES *et al.*, 2015; SHAYFULL *et al.*, 2013).

Ambos os canais estão de acordo com o limite especificado. É importante observar que os circuitos com canais conformados fabricados via manufatura aditiva apresentam variações maiores de temperatura devido à maior transferência de calor e pela maior proximidade com a cavidade molde, em relação com o circuito convencional fabricado com manufatura subtrativa.

A variação de temperatura nos circuitos em série (localizado na matriz superior) ocorreu de forma linear e a temperatura no canal de saída é superior à temperatura ao longo do circuito, o mesmo não acontece em um circuito em paralelo (localizado na matriz inferior), no qual a variação de temperatura é menor devido ao menor percurso do circuito (RAZ, ZAHALKA, 2016; WANG, YU, WANG, 2015).

Figura 10 - Simulação da variação das temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) ao longo do circuito de canais de refrigeração.

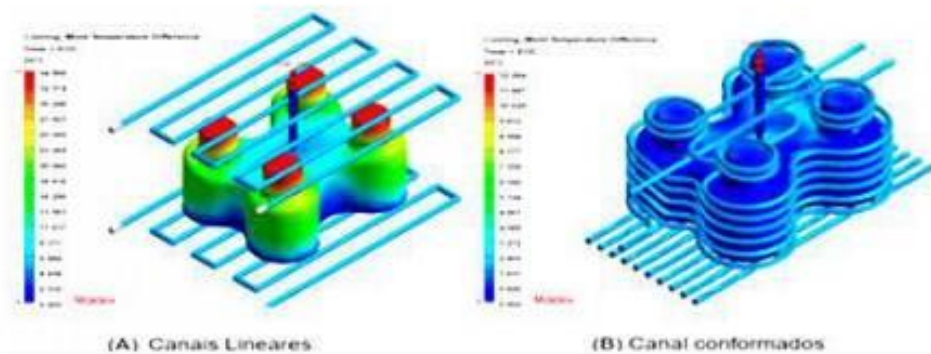


Fonte: Próprios Autores.

No final da fase de preenchimento (Figura 11), a temperatura da peça, é a resultante da temperatura total das matrizes do molde mecânico considerando a eficiência do resfriamento e o aquecimento do material fundido durante o ciclo de injeção. Isso é relevante para a análise, pois através do

mapa de temperatura das faces das matrizes é possível avaliar se as temperaturas estão uniformes.

Figura 11 - Simulação da temperatura média (°C) na superfície do molde durante a injeção.



Fonte: Próprios Autores.

Os canais de refrigeração devem ser capazes de manter a temperatura dentro do requisito de cada tipo de matéria-prima utilizado para a fabricação da peça. Se as análises das simulações mostrarem regiões com temperatura não homogêneas, isso significa que a troca de calor não está adequada.

Observa-se nas simulações deste estudo de caso que a matriz que possui a temperatura mais homogênea é a que de canais conformados fabricados via manufatura aditiva (Figura 11B). A simulação da peça com canais lineares (Figura 11A) possui concentração de calor nas regiões das torres e isso causa problema geométrico devido ao empenamento, e tensões na peça devido ao resfriamento e contração em momentos diferentes, o que leva a conclusão de que esse tipo de sistema de refrigeração não é adequado para peças complexas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As informações obtidas das análises das simulações computacionais realizadas com o modelo de peça do estudo de caso, com a utilização dos circuitos de refrigeração do tipo linear e do tipo conformado são discutidos nesse tópico para a avaliação do desempenho dos tipos de manufatura para

compreender o mais adequado para a construção de moldes mecânicos aplicados a manufatura formativa.

As simulações realizadas mostram que não houve região do molde em que o polímero fundido apresentou dificuldade de escoamento que provocaria descontinuidade no preenchimento do molde e conseqüentemente peças incompletas.

Neste estudo de caso, a temperatura de ejeção da peça foi de $\sim 92^{\circ}\text{C}$, o circuito de refrigeração linear demora cerca de $\sim 30\text{s}$, e o circuito de refrigeração conformado demora cerca de $\sim 22\text{s}$ para atingir a temperatura de ejeção, ou seja, o tempo de resfriamento do circuito conformado é $\sim 27\%$ menor em relação ao circuito linear, permitindo a extração mais rápida da peça fabricada em MA.

As simulações mostram que a variação de temperatura em diferentes regiões da peça com o circuito de refrigeração conformado (serie e paralelo) é de $\sim 3^{\circ}\text{C}$ (Figura 11B). Enquanto o circuito de refrigeração linear apresenta variação de temperatura de $\sim 30^{\circ}\text{C}$ (Figura 11A), cerca de 10 vezes maior quando comparado ao circuito de refrigeração conformado (KHAN *et al.*, 2014).

A temperatura de entrada e saída do fluido refrigerante não deve ter uma diferença menor que $\sim 5^{\circ}\text{C}$ para não comprometer a qualidade da peça produzida (MARQUES *et al.*, 2015; SHAYFULL *et al.*, 2013).

Baseado nos resultados pode-se concluir que circuitos de refrigeração conformados são mais eficientes entre os circuitos de refrigeração lineares, o que era esperado. A construção via MA proporciona uma temperatura mais homogênea na fabricação da peça, menor tempo para atingir a temperatura de extração da peça do molde, menor contração volumétrica, entre outros. Assim sendo, terá melhor qualidade e redução do tempo de ciclo de fabricação.

7 CONCLUSÃO

Devido as inúmeras configurações de circuitos de refrigeração que podem ser projetados e aplicados em um molde mecânico de injeção, as

opções inseridas nesta pesquisa tratam de alguns exemplos possíveis em simulações computacionais.

Em um processo produtivo em escala o tempo de ciclo de manufatura da peça e a eficiência de refrigeração do molde são relevantes, pois, a qualidade da peça e a produtividade dependem disso.

Conforme apresentado nesta pesquisa, o tempo de ciclo pode ser reduzido através de uma troca de calor eficiente entre o circuito de refrigeração e a peça, reduzindo o tempo de resfriamento de maneira homogênea da peça no qual a inserção de canais de refrigeração conformados nos moldes é uma oportunidade para suprir esta necessidade.

A simulação computacional de injeção contribui para projetar o molde com maior eficácia reduzindo significativamente o tempo e custo na fabricação de moldes e de peças. O ciclo total de produção de cada peça é composto pelas fases de preenchimento da cavidade do molde mecânico com o material fundido, pressão de recalque, resfriamento da peça e abertura do molde. O molde convencional (canais de refrigeração lineares) o tempo de ciclo foi de ~61s, e para o molde em MA (canais de refrigeração conformados) foi de ~53s, isso significa um aumento de produtividade do molde em ~15,5%.

O projeto de circuito de refrigeração do tipo conformado (série ou paralelo) quando comparado com canais de refrigeração lineares utilizados nesse estudo de caso, beneficia a troca térmica entre a peça plástica e o fluxo de refrigerante que atravessa os canais de refrigeração conformados em matrizes produzidas via MA, e resfriam todas as zonas reduzindo problemas de qualidade da peça, evitando empenamento e tensão residual, reduzindo o tempo de ciclo de fabricação.

Estas observações são possíveis somente com o estudo de caso e a análise da informação vinda das simulações computacionais, isso evidencia que as tecnologias de simulação quando aplicadas em moldes mecânicos fabricados via MA se mostram um caminho interessante de investigação científica a ser melhor entendido e explorado. Isso permitirá maior eficiência na fabricação em manufatura formativa e beneficiar sua utilização na indústria em um futuro próximo.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST (Associação Brasileira do Plástico), **Perfil 2018 - Indústria Brasileira de Transformação e Reciclagem de Material Plástico**. São Paulo, 2018. 47p.

ALBA, A. T.; COLMENERO, J. M. M, PERETE D. D.; DOÑATE C. M. A New Conformal Cooling Design Procedure for Injection Molding Based on Temperature Clusters and Multidimensional Discrete Models. **MDPI Polymers**, v.12, p.1-35, 2020.

ALCALDE, E.; WILTGEN, F. Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro. **Revista de Ciências Exatas Universidade de Taubaté**. v.24(02), p.12-20, 2018.

ASNAFI, N.; RAJALAMPI, J.; ASPENBERG, D.; ALVEFLO, A. Production Tools Made by Additive Manufacturing Through Laser-based Powder Bed Fusion. **Berg Huettenmaenn Monatsh**. v.165(03). p.125-136, 2020.

BARETA, D. R. **Estudo Comparativo e Experimental de Materiais Aplicados a Insertos Machos de Moldes de Injeção Dentro do Conceito de Molde Híbrido**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007. 158p.

BROTAN V.; BERG O. A.; SORBY K. Additive manufacturing for enhanced performance of molds. 6th CLF - **6th CIRP Conference on Learning Factories**. Trondheim, 29-30 June, p.186-190, 2016.

CHUNG, C. Y. Integrated Optimum Layout of Conformal Cooling Channels and Optimal Injection Molding Process Parameters for Optical Lenses. **Applied Sciences**. v.9(20), p.1-17, 2019.

COLMENERO, J. M. M.; ALBA, A. T.; REQUENA, J. C.; DOÑATE, C. M. A New Conformal Cooling System for Plastic Collimators Based on the Use of Complex Geometries and Optimization of Temperature Profiles. **MDPI Polymers**. v.13(2744), p.1-27, 2021.

CORDOVA B.A.B. **Otimização do processo de moldagem por injeção do ABS via métodos estatísticos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2018. 186p.

DE BLASIO, C.A. **Solução de Defeitos na Moldagem por Injeção de Termoplásticos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. 174p.

DIMLA, E.; TRINIDAD, J.R.; GRANADA, A. A. G.; REYES G. Thermal Comparison of Conventional and Conformal Cooling Channel Designs for a

Non-Constant Thickness Screw Cap. J. **The Korean Society for Precision Engineering**, v.35(01), p.95-10, 2018.

DOMINGUES, L. C. F. **Análise Comparativa do Uso de Tecnologias de Fabrico Rápido no Processo Produtivo de Elementos Moldantes para Moldes de Injeção de Plásticos**. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2015. 133p.

FENG, S.; KAMAT, A. M.; PEI, Y. T. Design and Fabrication of Conformal Cooling Channels in Molds: Review and Progress Updates. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.171 (121082), p.1-29, 2021.

GOMES, J.; WILTGEN, F. Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais e Máquinas. **Revista Tecnologia**, v.41(01), p.1-16, 2020.

GRIES, S.; MEYER, G.; WONISCH, A.; JAKOBI, R.; MITTELSTEDT, C. Towards Enhancing the Potential of Injection Molding Tools Through Optimized Close-Contour Cooling and Additive Manufacturing. **MDPI Materials**, v.14(3434), p.1-18, 2021.

HARADA, J. **Moldes para Injeção de Termoplásticos: Projetos e Princípios Básicos**. Artliber, 2004. 308p.

HARADA, J.; UEKI, M. M. **Injeção de Termoplásticos: Produtividade com Qualidade**. Artliber, 2012. 268p.

HATOS I.; B KOCSIS B.; HARGITAI H. Conformal Cooling with Heat-Conducting Inserts by Direct Metal Laser Sintering. **XXIII International Conference on Manufacturing**. Hungary, 7- 8 June, p.1-8. 2018.

JUNIOR, G. B. M; COSTA, C.A. Manufatura Aditiva Aplicada na Fabricação de Insertos para Moldes de Injeção Termoplásticos. **Scientia Cum Industrial**, v.7(02), p.76-82, 2019.

LOPES, M.; WILTGEN, F. Manufatura Aditiva em Moldes Mecânicos. **IX Congresso Internacional de Ciência e Tecnologia (CICTED 2020)**. Taubaté, 21-23 outubro, p.1-14, 2020.

LOPES, M.; WILTGEN, F. Manufatura Aditivava na Indústria Automotiva Voltada para Sistemas de Segurança Veicular. **XLI ENEGEP Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Foz do Iguaçu, 18-21 outubro, p.1-16, 2021A.

LOPES, M.; WILTGEN, F. Manufatura Aditiva na Indústria Automotiva de Segurança Veicular. **X Congresso Internacional de Ciência e Tecnologia e Desenvolvimento (CICTED 2021)**. Taubate, 05-07 outubro, p.1-19, 2021B.

MARTINHO, P. M. G. **Mechanical Design of hybrid Moulds - Mechanical and Thermal Performance Implications**. Tese (Doutorado), Universidade de Minho. Braga, 2010. 448p.

MARQUES, S.; SOUZA, A. F.; SANTOS, R. F. F. Efeito do Conformal Cooling em um Molde de Injeção de Plástico por Simulação de Transferência de Calor. **2º Seminário de Tecnologia, Inovação e Sustentabilidade**. p.1-17. Joinville. 27-29 novembro, 2013.

MARQUES, S.; SOUZA, A. F.; MIRANDA, J.; SANTOS, R.F.F. Evaluating the Conformal Cooling System in Molds for Plastic Injection by CAE Simulation. **9º International Conference on Industrial Tools and Material Processing Technologies**. Slovenia, 05-11 April, p.1-7. 2014.

MARQUES, S.; SOUZA, A. F.; MIRANDA, J.; YADROITSAU, I. Design of Conformal Cooling for Plastic Injection Molding by Heat Transfer Simulation. **Polímeros**. v.25(6), p.564-574, 2015.

MIRANDA, D. A. **Estudo Experimental e de Simulação Computacional Para Análise e Melhoria da Eficiência de um Molde de Injeção de Termoplásticos**. Dissertação (Mestrado), Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2017. 115p.

RAZ, K., ZAHALKA M. Analysis of Temperature Influence on Injection Molding Process. **Proceedings in Manufacturing Systems**. v.11(02), p.95-100, 2016.

SILVA, S. L. **Sistemática para o Projeto do Sistema de Refrigeração de Moldes para Injeção de Polímeros**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009. 150p.

SHINDE, M. S.; ASHTANKA, K. M. Additive Manufacturing–Assisted Conformal Cooling Channels in Mold Manufacturing Processes. **Advances in Mechanical Engineering**. v.9(5) p.1-14, 2017.

SINGH, L.; ARORA, N. Design and Manufacturing Injection Mould Conformal Cooling Channels Using Additive Manufacturing: A Review. **International Journal of Mechanical and Prod. Engineering**. v.7(03), p.2321-2071, 2019.

SOUZA, A. F., MARQUES, S. Análise da Influência do Conformal Cooling em Molde de Injeção de Plástico. **Tecnologias para Competitividade Industrial**, v.7(02), p.69-81, 2014.

SOUZA, A. F.; MARIN, F.; FONTANELLA, L.; KÄSEMODEL, R. B.; MIRANDA, J. Molde Híbrido com Canais Complexos de Refrigeração Fabricado por Manufatura Aditiva Metálica (SLM) e Usinagem. Projeto de Pesquisa em Desenvolvimento No Brasil. **Ferramental**. v.76, p.40-43, 2018.

TAMANINI, C.; WILTGEN, F. Moldes com Múltiplos Canais de Refrigeração Via Manufatura Aditiva. **Workshop da UFABC em Engenharia Mecânica**. São Bernardo do Campo, 27-29 setembro, p.1-14, 2021A.

TAMANINI, C.; WILTGEN, F. Fabricação de Moldes Mecânicos Via Manufatura Aditiva. **X Congresso Internacional de Ciência e Tecnologia (CICTED 2021)**. Taubaté, 20-22 outubro, p.1-20, 2021B.

TUTESKI O.; KOČOV A. Mold Design and Production by Using Additive Manufacturing (AM) - Present Status and Future Perspectives. **INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL "INDUSTRY 4.0"**. Skopje, 18 August, p.1-5, 2018.

VASCONCELOS, P. V. **Fabrico Rápido Indireto de ferramentas Compósitas a partir de Modelos de Prototipagem Rápida**. Tese (Doutorado), Universidade do Porto. Porto, 2014. 415p.

VIETEN, T.; STAHL, D. SCHILLING, P., CIVELEK, F.; ZIMMERMANN, A. Feasibility Study of Soft Tooling Inserts for Injection Molding with Integrated Automated Slides. **Micromachines – MDPI**. v.12(730), p.1-13, 2021.

VOJNOVÁ, E. The Benefits of a Conforming Cooling Systems the Molds in Injection Molding Process. **International Conference on Manufacturing Engineering and Materials, ICMEM**. Slovakia, 6-10 June, p.535-543, 2016.

PARK, H. S.; DANG, X. P. Development of a Smart Plastic Injection Mold with Conformal Cooling Channels. **45th SME North American Manufacturing Research Conference NAMRC**. Los Angeles, 4-8 June, v.45, p.48-59, 2017.

REIS, N.; BARREIROS, F. M.; VASCO, J.C. Conformal Cooling by SLM to Improve Injection Moulding. **Conference Polymers and Moulds Innovations**, Portugal, 22 September, p.1-7, 2018.

SHAYFULL, Z.; SHARIF, S.; ZAIN, A. M.; SAAD, R. M.; FAIRUZ, M. A. Milled Groove Square Shape Conformal Cooling Channels in Injection Molding Process. **Materials and Manufacturing Processes**. v.28, p.884-889, 2013.

WANG, Y.; YU, K. M.; WANG, C. C. L. Spiral and Conformal Cooling in Plastic Injection Moulding. **Computer-Aided Design**. v.63, p.1-11 2015.

WILTGEN, F. Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, UFSCar, São Carlos, 5 a 7 agosto, p.1-4. 2019.

WILTGEN, F. Técnica de Ensaios de Sistemas Complexos com Metodologia de Engenharia de Sistemas & Requisitos. **Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas**, v.4(01), p.51-60, 2020.

WILTGEN, F. Manufatura Aditiva em Metais - Leve, Forte e Inovador. **Revista Engenharia e Tecnologia**. v.13(02), p.1-12, 2021A.

WILTGEN, F. Testing Plan in Systems & Requirements Engineering for Strategic Engineering Areas. **26th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM)**. Curitiba, 22-26 November, p.1-8, 2021B.