

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO
PROFISSIONAL

THOMAS STEDILE RIBEIRO

AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES EM MOLDES DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO

CAXIAS DO SUL

2024

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO
PROFISSIONAL

THOMAS STEDILE RIBEIRO

AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES EM MOLDES DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração de projeto e fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Costa

CAXIAS DO SUL

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

R484a Ribeiro, Thomas Stedile

Avaliação das deformações em moldes de injeção de alumínio [recurso eletrônico] / Thomas Stedile Ribeiro. – 2024.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2024.

Orientação: Carlos Alberto Costa.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Engenharia mecânica. 2. Alumínio - Moldes. 3. Moldagem (Fundição).
4. Análise estrutural (Engenharia). 5. Deformações (Mecânica). I. Costa, Carlos Alberto, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 621

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Ana Guimarães Pereira - CRB 10/1460

THOMAS STEDILE RIBEIRO

AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES EM MOLDES DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração de projeto e fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Costa

Banca Examinadora

Prof. Dr. Carlos Alberto Costa
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Viecelli
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Carlos Maurício Sacchelli
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

RESUMO

A simulação do processo de injeção de alumínio já faz parte do fluxo de projeto de matrizarías. Análises estruturais do molde de injeção de alumínio, porém, são menos comuns. O conhecimento dos carregamentos sofridos pelo molde e seus efeitos na deformação dos componentes é importante para a segurança da operação, para a qualidade da peça produzida e para possíveis economias de material. Porém, para manter competitividade com outras matrizarías, o método de análise estrutural deve ser preciso, rápido e de fácil uso. Tendo em mente este requisito, com o objetivo de aumentar o entendimento sobre as deformações sofridas por um molde de injeção de alumínio durante o ciclo, foram selecionados três métodos de estudo a serem avaliados. O Método dos Elementos Finitos, o Método da Aproximação Externa por Elementos Finitos e o Método Analítico. Estes três métodos foram utilizados para calcular as deformações sofridas pelos componentes estruturais de um molde pequeno. Foram elaborados dois conjuntos de experimentos. Na Etapa 1, foram simulados moldes sob carregamentos puramente mecânicos, puramente térmicos e combinados, para entender qual a contribuição de cada tipo de carregamento na deformação dos componentes. Comparando os resultados obtidos com os três casos de carregamento, obteve-se que no lado fixo do molde, os carregamentos térmicos tiveram maior efeito, enquanto no lado móvel as solicitações mecânicas são a principal fonte das deformações. Na Etapa 2, modificações nas espessuras de fundo dos componentes estruturais foram aplicadas ao modelo original, de modo a entender o efeito dessas dimensões nas deformações do molde. Como resultado, se encontrou que os componentes do lado móvel são mais sensíveis a mudanças de espessura de fundo de seus componentes do que os do lado fixo, demonstrando aumentos nos deslocamentos medidos de até 118% em componentes do lado móvel, mas de apenas 31% no lado fixo. Por fim, comparando os três métodos nos experimentos das duas etapas, se concluiu que o método analítico carece precisão, apresenta deformações consistentemente menores do que os outros métodos, além de ser pouco sensível às mudanças dimensionais da Etapa 2. O Método da Aproximação Externa por Elementos Finitos mostra ter potencial de implementação em ferramentarias, com resultados precisos em comparação com os resultados obtidos pelo MEF, fácil uso e rapidez na resolução.

Palavras-chave: injeção de alumínio; molde; análise estrutural; deformações; simulação

ABSTRACT

Simulation of the high pressure die casting process is already part of the design flow in die shops. Structural analysis of the die casting die, however, is less common. Knowledge of the loads applied on the mold and their effects on the deformation of the components is important for the safety of the operation, the quality of the part produced and possible material savings. However, in order to remain competitive with other shops, the structural analysis method must be accurate, fast and easy to use. With this requirement in mind, in order to increase understanding of the deformations suffered by a die casting die during the cycle, three study methods were selected to be evaluated. The Finite Element Method, the External Approximations by Finite Element Method and the Analytical Method. These three methods were used to calculate the deformations suffered by the structural components of a small die. Two sets of experiments were carried out. In Stage 1, dies were simulated under purely mechanical, purely thermal and combined loading, in order to understand the contribution of each type of loading to the deformation of the components. By comparing the results using the three load cases, it was found that thermal loads had the greatest effect on the fixed side of the mold, while mechanical loads were the main source of deformation on the moving side. In Stage 2, modifications to the bottom thicknesses of the structural components were applied to the original model in order to understand the effect of these dimensions on the die's deformations. As a result, it was found that the components on the moving side are more sensitive to changes in the bottom thickness of their components than those on the fixed side, showing increases in deformation of up to 118% in the moving side, while the fixed side had no more than 31%. Finally, comparing the three methods in the two stages' experiments, it was concluded that the analytical method lacks precision, has consistently lower deformations than the other methods, and is not very sensitive to the dimensional changes of Stage 2. The External Approximations by Finite Element Method shows potential for implementation in tool shops, with accurate results in comparison with those obtained by FEM, ease of use and solving speed.

Keywords: High pressure die casting; mold; structural analysis; deformations; simulation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema com principais componentes da injetora de câmara fria.	19
Figura 2 – Representação do ciclo de injeção de alumínio sob alta pressão.	20
Figura 3 – Exemplo da divisão dos componentes do molde de injeção de alumínio.	23
Figura 4 – Temperatura medida na superfície da cavidade de um molde de injeção de alumínio durante os primeiros 30 ciclos.	27
Figura 5 – Ilustração dos efeitos sequenciais das solicitações nas deformações do molde.	29
Figura 6 – Solicitações consideradas na avaliação estrutural de um molde.	32
Figura 7 - Sistema molde/injetora modelado como um conjunto de molas.	33
Figura 8 - Exemplo da aplicação do método proposto por Menges et al (2001), com o desmembramento de geometrias complexas em elementos característicos.	35
Figura 9 - Representação da métrica de Aspect Ratio para elementos hexaédricos e tetraédricos, com elementos com AR próximos de 1 (a) e próximos de 14 (b)	38
Figura 10 - Delineamento da Pesquisa.	41
Figura 11 - Modelo CAD do molde de estudo.	43
Figura 12 - Componentes da máquina de injeção presentes no modelo.	44
Figura 13 - Componentes do molde presentes no modelo geométrico.	44
Figura 14 - Componentes cujos estados de temperaturas foram obtidos através de simulação do ciclo de injeção no MAGMASOFT.	45
Figura 15 - Componentes dos conjuntos do lado fixo e lado móvel, com dimensões utilizadas nos cálculos de deformação. Os componentes são: a) Bloco da cavidade b) Suporte fixo c) Placa fixa da máquina injetora d) Bloco do macho e) Suporte inferior f) Calço g) Pilares	52
Figura 16 - Organização dos experimentos, divididos por Etapas e Métodos, e os softwares utilizados.	55
Figura 17 - Espessuras alteradas nos experimentos realizados. t1, t2, t3 e t4 são as espessuras de fundo do suporte superior, do bloco da cavidade, do bloco do macho e do suporte inferior, respectivamente.	56
Figura 18 - Geometria original à esquerda e indicação dos pontos de maior e menor deslocamento na geometria deformada à direita.	57
Figura 19 - Espessuras alteradas nos experimentos realizados. t1, t2, t3 e t4 são as espessuras de fundo do suporte superior, do bloco da cavidade, do bloco do macho e do suporte inferior, respectivamente.	58
Figura 20 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MEF 1.1 (solicitações puramente mecânicas). A representação da malha se encontra em seu estado não deformado.	60
Figura 21 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MEF 1.1 (solicitações puramente mecânicas). A representação da malha se encontra em seu estado deformado com uma escala de aumento de 200 vezes.	60

Figura 22 - Visualização deformada e em corte dos componentes estruturais do molde em uma escala de aumento de 200 vezes para o experimento MEF 1.1. São estes componentes: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.....	61
Figura 23 - Visualização do perfil de temperaturas dos blocos da cavidade (à esquerda) e do macho (à direita), conforme utilizado nas simulações.	61
Figura 24 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MEF 1.2 (solicitações puramente térmicas). A representação da malha se encontra em seu estado não deformado.	62
Figura 25 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MEF 1.2 (solicitações puramente térmicas). A representação da malha se encontra em seu estado deformado com uma escala de aumento de 100 vezes.....	62
Figura 26 - Visualização deformada dos componentes estruturais do molde em uma escala de aumento de 100 vezes para o experimento MEF 1.2. São estes componentes: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.	63
Figura 27 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MEF 1.3 (solicitações mecânicas e térmicas). A representação da malha se encontra em seu estado não deformado.	63
Figura 28 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MEF 1.3 (solicitações mecânicas e térmicas). A representação da malha se encontra em seu estado deformado com escala de aumento de 100 vezes.....	64
Figura 29 - Visualização deformada dos componentes estruturais do molde em uma escala de aumento de 200 vezes para o experimento MEF 1.3. São estes componentes: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.	64
Figura 30 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MAEEF 1.1 (apenas solicitações mecânicas). A representação do modelo se encontra em seu estado não deformado.	65
Figura 31 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MAEEF 1.1 (apenas solicitações mecânicas). A representação do modelo se encontra em seu estado deformado.	66
Figura 32 - Visualização deformada dos componentes estruturais do molde para o experimento MAEEF 1.1. São estes componentes: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.	66
Figura 33 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MAEEF 1.2 (solicitações mecânicas e térmicas). A representação do modelo se encontra em seu estado não deformado.....	67
Figura 34 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MAEEF 1.2 (solicitações mecânicas e térmicas). A representação do modelo se encontra em seu estado deformado.	67
Figura 35 - Visualização deformada dos componentes estruturais do molde para o experimento MAEEF 1.2. São estes componentes: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.	68
Figura 36 - Resultado das simulações MEF 2.1 e MEF 2.2. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.	71

Figura 37 - Resultado das simulações MEF 2.3 e MEF 2.4. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.	72
Figura 38 - Resultado das simulações MEF 2.5 e MEF 2.6. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suport e inferior.	73
Figura 39 - Resultado das simulações MEF 2.7 e MEF 2.8. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.	74
Figura 40 - Resultado das simulações MAEEF 2.1 e MAEEF 2.2. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.....	75
Figura 41 - Resultado das simulações MAEEF 2.3 e MAEEF 2.4. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.....	76
Figura 42 - Resultado das simulações MAEEF 2.5 e MAEEF 2.6. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.....	77
Figura 43 - Resultado das simulações MAEEF 2.7 e MAEEF 2.8. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho.	78
Figura 44 - Forma da deformação do suporte inferior obtida nos experimentos da Etapa 1: a) MEF 1.1 b) MEF 1.2 c) MEF 1.3 d) MAEEF 1.1 e) MAEEF 1.2.	81
Figura 45 - Forma da deformação do bloco da cavidade obtida nos experimentos da Etapa 1: a) MEF 1.1 b) MEF 1.2 c) MEF 1.3 d) MAEEF 1.1 e) MAEEF 1.2.	82
Figura 46 - Forma da deformação do bloco do macho obtida nos experimentos da Etapa 1: a) MEF 1.1 b) MEF 1.2 c) MEF 1.3 d) MAEEF 1.1 e) MAEEF 1.2.	83
Figura 47 - Diagrama de deslocamento por distância do topo do bloco do macho, seguindo uma linha vertical no centro da face do fundo do mesmo. Corresponde ao experimento MAEEF 1.2.....	84
Figura 48 - Forma da deformação do suporte inferior obtida nos experimentos da Etapa 1: a) MEF 1.1 b) MEF 1.2 c) MEF 1.3 d) MAEEF 1.1 e) MAEEF 1.2.	85
Figura 49 - Forma da deformação do suporte superior dos experimentos MEF 2.2 e MEF 2.3.	87
Figura 50 - Forma da deformação do bloco do macho e do suporte inferior no experimento MEF 2.3.....	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Equações de tensão e deslocamento para elementos característicos.	34
Quadro 2 - Constantes do cálculo de tensão e deslocamento para placas apoiadas em todos os lados, com base na razão entre seus lados.	35
Quadro 3 - Critérios de qualidade de malha.	38
Quadro 4 - Vantagens do MAEEF em relação ao MEF tradicional.	39
Quadro 5 - Parâmetros de injeção utilizados neste trabalho.	46
Quadro 6 - Testes iniciais de tamanho de malha e uso/remoção de furos para a malha de elementos finitos, apenas com os efeitos mecânicos aplicados nos blocos do macho e cavidade.	48
Quadro 7 - Tamanho médio do elemento da malha de elementos finitos, por componente. ...	49
Quadro 8 - Planejamento dos experimentos da Etapa 1.	55
Quadro 9 - Planejamento dos experimentos da Etapa 2.	57
Quadro 10 - Valores das espessuras correspondentes à Figura 19 para cada experimento.	58
Quadro 11 - Deslocamentos dos componentes do molde obtidas nos experimentos da Etapa 1, com o Método dos Elementos Finitos.	59
Quadro 12 - Deslocamentos dos componentes do molde obtidas nos experimentos da Etapa 1, com o Método da Aproximação Externa dos Elementos Finitos.	65
Quadro 13 - Descolamentos dos componentes do molde obtidas nos experimentos da Etapa 1, com o Método Analítico.	69
Quadro 14 - Deslocamentos dos componentes do molde obtidas nos experimentos da Etapa 2, com o Método dos Elementos Finitos.	70
Quadro 15 - Deslocamentos dos componentes do molde obtidas nos experimentos da Etapa 2, com o Método da Aproximação Externa por Elementos Finitos.	74
Quadro 16 - Deslocamentos dos componentes do molde obtidas nos experimentos da Etapa 2, com o método analítico de Menges.	78
Quadro 17 - Resumo dos deslocamentos dos experimentos da Etapa 1.	86
Quadro 18 - Comparação entre os métodos de estudo.	91

LISTA DE SÍMBOLOS

P_e	Pressão específica
F_{inj}	Força de injeção
A_{pist}	Área do pistão
F_A	Força de abertura
A_{pro}	Área projetada
F_F	Força de fechamento
ε_T	Expansão térmica
α	Coefficiente de expansão térmica
ΔT	Variación da temperatura
ν	Coefficiente de Poisson
σ_T	Tensão térmica
E	Módulo de elasticidade
E_c	Energia cinética
m_p	Massa do pistão
v_p	Velocidade do pistão
τ	Trabalho realizado
s_p	Posição do pistão
F_{imp}	Força de impacto
P_{imp}	Pressão de impacto
σ	Tensão
ε	Deformação
f	Deflexão
y_f	Deslocamento máximo do lado fixo
L	Comprimento do maior lado dos suportes

s	Espessura combinada do bloco e suporte
y_m	Deslocamento máximo do lado móvel
h	Altura do pilar
A	Área combinada da seção dos pilares

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. CONTEXTO GERAL	14
1.2. JUSTIFICATIVA	15
1.3. OBJETIVO GERAL	17
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. INJEÇÃO DE ALUMÍNIO SOB ALTA PRESSÃO	19
2.2. ARQUITETURA CONSTRUTIVA DO MOLDE	23
2.3. EFEITOS DA TEMPERATURA NO MOLDE	27
2.4. AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS SOLICITAÇÕES NO MOLDE	29
2.5. RESISTÊNCIA MECÂNICA DA FERRAMENTA	32
2.6. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	35
2.6.1. Método dos Elementos Finitos - MEF	36
2.6.2. Método da Aproximação Externa por Elementos Finitos - MAEEF	38
3. MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	40
3.1. DELINEAMENTO DA PESQUISA	41
3.2. ESTUDO EXPLORATÓRIO	41
3.3. CRIAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL	42
3.4. ETAPAS DE SIMULAÇÃO	47
3.4.1. Método dos Elementos Finitos - MEF	47
3.4.2. Método da Aproximação Externa por Elementos Finitos - MAEEF	50
3.4.3. Método analítico - An	51
3.5. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	54
4. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS	58
4.1. EXPERIMENTOS DA ETAPA 1	59
4.1.1. Método dos Elementos Finitos	59
4.1.2. Métodos da Aproximação Externa por Elementos Finitos	65
4.1.3. Método de Analítico	68
4.2. EXPERIMENTOS DA ETAPA 2	69
4.2.1. Método dos Elementos Finitos	69
4.2.2. Métodos da Aproximação Externa por Elementos Finitos	74
4.3. MÉTODO ANALÍTICO	78
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	80

5.1. EFEITOS MECÂNICOS E TÉRMICOS.....	80
5.1.1. Suporte superior.....	80
5.1.2. Bloco da Cavidade	81
5.1.3. Bloco do Macho	83
5.1.4. Suporte Inferior.....	85
5.2. MODIFICAÇÕES NA GEOMETRIA	86
5.3. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ANÁLISE.....	89
6. CONCLUSÃO	92

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO GERAL

A indústria automotiva é de grande importância para o mercado de trabalho brasileiro. Só em 2021, aproximadamente 2,25 milhões de automóveis foram produzidos em território nacional, empregando mais de 100 mil brasileiros (ANFAVEA, 2022). Como parte importante desta cadeia, a demanda por peças em alumínio produzidas por fundição sob alta pressão mostra tendência de crescimento, acompanhando o aumento no uso de alumínio em veículos automotores. Em 2016, nos EUA, estima-se que a quantidade média de alumínio por veículo produzido era de cerca de 186 kg, o que aumentou para 208 kg em 2020, com previsão de chegar até 233 kg em 2026. Estima-se que aproximadamente 56% destes seja obtido através da fundição sob alta pressão (ABRAHAM *et al.*, 2020). Esse aumento em demanda apresenta para as matrizarias um incentivo para melhorar a eficiência e vida útil de seus moldes cada vez mais.

O processo de fundição de alumínio sob alta pressão se apresenta como um meio de produção em larga escala de peças em alumínio com boa precisão dimensional. Em comparação com outros processos de manufatura, a precisão na fundição de alumínio sob alta pressão é suficiente para reduzir, ou mesmo eliminar, custos de usinagem nas peças injetadas (NADCA, 2021). Nesse processo, o molde utilizado é submetido a um ciclo severo em termos de solicitações, que começa com alumínio fundido a uma temperatura normalmente entre 600 e 700 °C sendo empurrado por um pistão para dentro da cavidade, com velocidades típicas entre 30 e 60 m/s. Isso resulta em um tempo de preenchimento da cavidade entre 50 e 100 ms, em média. Este tempo curto possibilita um preenchimento de geometrias complexas de cavidade antes do início da solidificação do metal. Uma vez preenchido, a solidificação se dá início, e com ela a contração do metal que é adicionalmente pressurizado por uma pressão de recalque tipicamente de até 120 MPa, evitando porosidades e promovendo uma boa compactação (BONOLLO; GRAMEGNA; TIMELLI, 2015).

Essas condições de trabalho do molde para injeção de alumínio exigem um projeto criterioso de seus componentes. O molde deve ser capaz de ser submetido ao maior número de ciclos possível sem sacrificar a eficiência e a qualidade das peças produzidas. Dito isso, segundo Müller *et al* (2018), atualmente não existe um padrão oficial para componentes individuais do molde. Os avanços no projeto de moldes dentro das ferramentarias se dão através da experiência acumulada de seus projetistas, bem como da aplicação de métodos de otimização e cálculos numéricos. Entre as ferramentas de auxílio ao projeto de moldes, as ferramentas *CAE* se

destacam pela capacidade de prever e minimizar defeitos a partir da simulação do processo de injeção, fazendo com que tais ferramentas sejam extensivamente utilizadas na indústria de moldes para injeção de alumínio (KHAN; SHEIKH, 2018).

Enquanto que o processo de injeção de é usualmente modelado e simulado por meio de ferramentas *CAE* no dia-a-dia das ferramentarias, em relação ao projeto estrutural dos moldes observa-se um menor conhecimento e utilização destes tipos de ferramentas. Schöngrundner *et al* (2012) identifica, por exemplo, que apesar do longo histórico de projetos auxiliados por simulação para otimização estrutural, cálculos para otimização estrutural dos suportes de moldes de injeção de alumínio não são facilmente encontrados na literatura. Nogowizin (2019) concorda que o projeto mecânico de moldes de injeção é negligenciado em comparação com os cálculos térmicos. Segundo Müller *et al* (2018), as próprias cargas operacionais sob o molde durante o processo de injeção de alumínio não são suficientemente entendidas, e estimativas de seu efeito do ponto de vista estrutural não costumam fazer parte do fluxo de projeto do molde. Grande parte do projeto de moldes continua sendo baseado na experiência do projetista e em “regras de ouro”, às vezes por falta de outras ferramentas disponíveis para o projetista (AHUETT-GARZA; HEDGE; MILLER, 1995).

A simulação estrutural de componentes do molde para injeção de alumínio pode, portanto, representar uma oportunidade de contribuição científica na forma do entendimento dos efeitos das solicitações aplicadas aos moldes de injeção de alumínio em sua estrutura. Também se identifica uma oportunidade de alcançar maior competitividade para empresas que façam uso da simulação estrutural, pois a otimização da estrutura do molde representa uma potencial redução do volume de seus componentes. Um menor volume dos componentes implica em economia de material, redução de massa e melhor controle térmico do molde em operação (MÜLLER *et al.*, 2018). Por fim, o uso de simulação para a análise estrutural dos componentes do molde é uma forma de afirmar a segurança do molde já na etapa de projetos, possivelmente evitando danos e modificações ao molde após a fabricação (JEONG *et al*, 2016).

1.2. JUSTIFICATIVA

Durante o processo de injeção de alumínio, o molde é sujeito a diversos esforços com diferentes magnitudes e tempos de aplicação. Predizer o comportamento estrutural do molde pode ser um desafio quando se leva em consideração que escalas de tempo e de tamanhos têm variações muito grandes em diferentes etapas do ciclo, onde, por exemplo, o tempo de enchimento é na ordem de milissegundos, o tempo de solidificação na ordem de segundos, o

tempo de ciclo na ordem de minutos e o tempo de operação do processo na ordem de horas. (MILLER *et al.*, 1998). Além disso, como já dito, as cargas operacionais do processo de injeção não são suficientemente entendidas, o que pode levar a superdimensionamentos do projeto como forma de evitar problemas de operação (MÜLLER *et al.*, 2018).

Segundo Ragab *et al* (2002), um melhor entendimento da distribuição de tensões e deformações na superfície da cavidade pode levar a capacidade de utilizar-se tolerâncias menores, a um melhor projeto do molde e a maior produtividade. Da mesma forma, Ahuett-Garza, Hedge e Miller (1995) afirmam que os mecanismos resultantes dos deslocamentos sejam entendidos, um maior controle do processo é possível. Além disso, estimativas precisas de tais deformações durante o fluxo de projeto permitem que ações corretivas sejam realizadas antes da fabricação.

Apesar das questões levantadas previamente, investigações mais detalhadas sobre a resposta dos componentes do molde em relação às solicitações aplicadas podem ser de grande importância tanto para a integridade do molde, que pode não resistir aos esforços aplicados (JEONG *et al.*, 2016), quanto para a qualidade da peça injetada, que pode sofrer distorções e defeitos dimensionais como resultado de deformações do molde durante o ciclo (MILLER, 2004). Segundo Chayapathi, Kesavan e Miller (2000), as solicitações de temperatura e pressão causam deformações nos componentes do molde, as quais podem resultar em mal funcionamento e rebarbas.

Por outro lado, evitar estes problemas através da utilização de componentes mais robustos do que o necessário tende a produzir moldes com maior quantidade de material, o que por sua vez resulta em moldes mais pesados, maior investimento na produção da ferramenta, maior custo energético durante a operação e mesmo durante tratamento térmico dos componentes (MÜLLER *et al.*, 2018).

Por conta do aumento do tempo de projeto, é comum matrizes limitarem a quantidade de simulações realizadas como auxílio no projeto dos moldes (ANGLADA *et al.*, 2018). Por este motivo, análises estruturais acabam se limitando a situações em que ocorreram falhas prematuras no molde, como meio de encontrar a causa do problema. Nogowizin (2019) afirma que uma comparação entre softwares e métodos de análise estrutural do molde de injeção de alumínio poderia prover informações importantes sobre possibilidades no evento de falhas mecânicas do molde.

Mesmo na academia, poucos trabalhos exploram os esforços mecânicos gerados durante o ciclo de injeção de alumínio e sua influência na estrutura do molde e em suas deformações (MÜLLER *et al.*, 2018; KABIRI-BAMORADIAN, 2009; MILLER *et al.*, 2009). Por outro lado, trabalhos abordando este tema aplicados a moldes de injeção de polímeros podem ser encontrados (MENGES *et al.*, 2001; NETO, 2001; PEREIRA, 2017). Apesar da similaridade dos processos, as particularidades do molde de injeção de alumínio em relação ao de polímero são suficientes para justificar um estudo separado.

Este trabalho percebe como demanda nas matrizarias um entendimento maior dos efeitos das deformações dos moldes frente aos esforços aos quais estão submetidos, e parte do pressuposto de que conhecimento sobre o processo e valor para a indústria podem ser obtidos a partir da análise estrutural dos moldes de injeção de alumínio utilizando simulações computacionais. O estudo é feito como parte do projeto Rota 2030 - especificamente de sua linha IV: Ferramentarias Brasileiras Mais Competitivas, Eixo II: Melhoria no projeto de ferramentas de injeção de alumínio - e busca entender as deformações do molde durante o ciclo de injeção de alumínio. Este estudo conta com a parceria da empresa Gama Matrizes, em particular, a qual compartilhou modelos de moldes, informações, parâmetros e conhecimentos de modo geral indispensáveis para a produção deste trabalho.

1.3. OBJETIVO GERAL

Avaliar métodos de análise - computacionais e analítico - das deformações em moldes de injeção de alumínio sob pressão, considerando os efeitos de carregamentos mecânicos, térmicos e termomecânicos, além dos efeitos das dimensões de componentes estruturais.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar solicitações que atuam no molde durante o ciclo de injeção.
- Criar um modelo de estudo com a representação das solicitações atuantes no ciclo de injeção.
- Criar modelos computacionais de simulação para os métodos de estudo com os parâmetros identificados nos objetivos anteriores.
- Avaliar efeitos de carregamentos mecânicos e térmicos utilizando os métodos de estudo.
- Avaliar efeitos de mudanças dimensionais em componentes estruturais do molde utilizando os métodos de estudo.

- Indicar método para uso em ferramentarias.

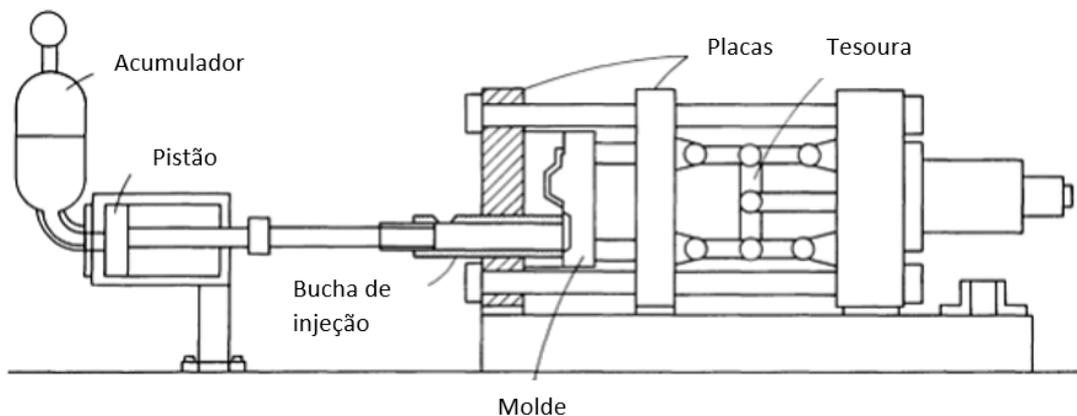
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. INJEÇÃO DE ALUMÍNIO SOB ALTA PRESSÃO

Dentre os diferentes processos de fundição, a fundição sob alta pressão é caracterizada pelo uso de um molde permanente, ao qual o metal fundido é forçado a altas pressões e velocidades, normalmente através do uso de um pistão. O enchimento do molde é realizado a altas velocidades, e subsequente ao mesmo uma alta pressão é aplicada durante a solidificação para evitar gases aprisionados e promover um preenchimento mais completo da cavidade (Miller, 2004). O processo pode ser subdividido em fundição sob pressão em câmara quente ou câmara fria. Segundo Miller (2004), o processo em câmara quente é comumente utilizado com ligas de menor ponto de fusão, como zinco, chumbo ou magnésio, enquanto a câmara fria é utilizada com ligas de maior temperatura de fusão, como alumínio e cobre. Como este trabalho tem foco na injeção de alumínio, será considerada a fundição sob pressão em câmara fria, somente.

Na fundição sob pressão em câmara fria, o reservatório do metal fundido fica separado do atuador que realiza a injeção durante a maior parte do ciclo. No momento da injeção, o metal fundido deve ser depositado na bucha de injeção, e imediatamente forçado pelo pistão para dentro do molde. A relativamente pequena exposição do pistão com o metal fundido permite o uso de ligas com maior temperatura de fusão, como o alumínio (ASM INTERNATIONAL, 1998). Na Figura 1 se encontra um esquema das principais partes de uma injetora de câmara fria.

Figura 1 - Esquema com principais componentes da injetora de câmara fria.



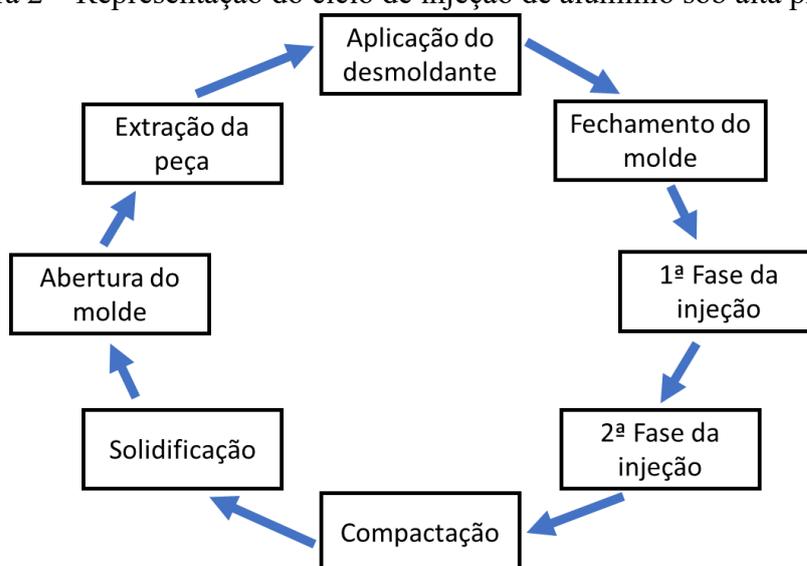
Fonte: Traduzido de ASM International (1998, p. 614)

A fundição a alta pressão apresenta diversas vantagens em relação a outros processos de fundição. Peças próximas da forma final são feitas com alta produtividade, o que compensa o investimento relativamente alto quando grandes quantidades são exigidas (NEFF *et al*, 2017). Porém o investimento inicial é relativamente alto, onde segundo Miller (2011), o preço do molde varia entre 50.000 e 1.000.000 de dólares. E apesar da produtividade que a fundição sob pressão é capaz de alcançar, Bonollo *et al* (2015) advertem que a taxa de peças rejeitadas é bastante grande, não sendo incomum encontrar 5% a 10% de peças rejeitadas por diversos defeitos resultantes do processo de fundição sob pressão.

O processo de injeção de alumínio tem boa compatibilidade com automatização, com injetoras sendo capazes de produzir centenas de peças diariamente. Porém, é importante um bom conhecimento do ciclo individual para a otimização da integridade da ferramenta, da qualidade da peça e do tempo de ciclo. O ciclo pode ser dividido em cinco etapas principais: fechamento do molde, injeção, solidificação, extração da peça e aplicação do desmoldante. A Figura 2, representa o ciclo com as etapas citadas.

De acordo com Herman (1992), o molde de injeção deve ser capaz de cumprir quatro funções básicas: segurar o metal fundido no formato desejado; prover maneiras de levar o metal fundido até o local onde assumirá o formato desejado; remover calor do metal fundido para solidificá-lo; e permitir a remoção da peça solidificada. De maneira simples, pode-se dizer que em um ciclo do processo de fundição, o objetivo principal é substituir o ar contido no molde por metal líquido (FONSECA, 2001).

Figura 2 – Representação do ciclo de injeção de alumínio sob alta pressão.



Fonte: o autor (2024)

O molde de injeção de alumínio é dividido em duas partes por uma linha de partição. As partes são comumente denominadas lado fixo e lado móvel. O lado fixo permanece conectado à bucha de injeção através da placa fixa da injetora. O lado móvel, conectado à placa móvel da injetora, realiza os movimentos de separação e fechamento.

No fechamento, as duas partes do molde são prensadas uma à outra de modo que o macho e a cavidade formem a geometria da peça a ser produzida. A força de fechamento deve ser suficiente para impedir que a pressão aplicada ao macho e cavidade durante a injeção cause a separação das duas partes, e sob essa força, os componentes do molde deformam elasticamente (NOGOWIZIN, 2011). A força de fechamento deve, portanto, garantir a estanqueidade da cavidade durante todas as etapas da injeção. Assim a força a ser utilizada depende da força de abertura, dada pela multiplicação da pressão específica e da área projetada da cavidade. A pressão específica, por sua vez, é a pressão obtida dividindo a força da injeção, que é um parâmetro da máquina, pela área do pistão de injeção. As relações da pressão específica, força de abertura e força de fechamento se encontram nas Equações 1, 2 e 3.

$$P_e = F_{inj}/A_{pist} \quad (1)$$

$$F_A = P_e * A_{pro} \quad (2)$$

$$F_F = 1,1 * F_A \quad (3)$$

Onde P_e é a pressão específica em Pa, F_{inj} a força de injeção em N, A_{pist} a área do pistão em m^2 , F_A a força de abertura em N, A_{pro} a área projetada da cavidade em m^2 e F_F a força de fechamento em N.

Com o molde fechado, o metal fundido, a cerca de $700^\circ C$, é dosado e inserido na bucha de injeção. O alumínio deve normalmente ocupar entre 30 e 40% do volume da bucha. A injeção do alumínio fundido no molde é então realizada pelo pistão em três etapas (OLIVEIRA, 2021):

1ª Fase da Injeção: O pistão se move com velocidades de 0,1 a 0,2 m/s, evitando a formação de ondas na bucha de injeção e permitindo a expulsão do ar da cavidade antes da entrada do metal líquido na mesma. Normalmente vai de o início da injeção até o metal chegar aos *gates*, ou seja, o limite entre o canal de injeção e a cavidade.

2ª Fase da Injeção: A velocidade do pistão aumenta para 3 a 6 m/s, normalmente. No início desta fase o metal deve estar sendo inserido na cavidade, e a maior velocidade propicia um preenchimento rápido e completo antes que o metal esfrie até sua temperatura *solidus*

(NOGOWIZIN, 2011). Ajuda a evitar problemas como juntas frias e falhas de preenchimento. A fase termina quando o molde estiver completamente preenchido.

Compactação: Nesta fase, o molde já está preenchido, portanto o pistão já não se desloca. Porém, o mesmo começa a aplicar uma pressão maior para compensar a tendência do metal de contrair durante a solidificação. Sem a pressão de compactação, a contração do metal causaria a formação de porosidades conhecidas como rechupes. A compactação, portanto, força alumínio extra a ocupar tais vacâncias na peça durante a solidificação. A pressão comumente varia entre 400 e 1200 bar.

A etapa de compactação, durante a qual a solidificação acontece, é o momento em que o molde é exposto às maiores solicitações durante o ciclo. Simultaneamente o molde está exposto à força de fechamento vinda da injetora, à pressão de compactação que atua em toda a superfície da cavidade, e às tensões causadas pelo gradiente térmico gerado pela condução e dissipação de calor heterogênea em diferentes partes do molde.

Nesta etapa, as solicitações submetidas ao molde tendem a causar deformações elásticas em seus componentes, o que pode afetar o processo de injeção e a qualidade da parte injetada. Segundo Ahuett-Garza, Hedge e Miller (1995), tais deformações podem causar problemas como: variação dimensional na cavidade; rebarbas; dificuldades com a ejeção da peça; carregamentos desbalanceados na estrutura da máquina de injeção; alumínio fundido espirrando para fora da cavidade. Da mesma forma, Miller *et al* (2000) adiciona que tensões indevidas nas barras da máquina de injeção e peças que não atingem as tolerâncias dimensionais requeridas também são potenciais problemas causados pelas deformações.

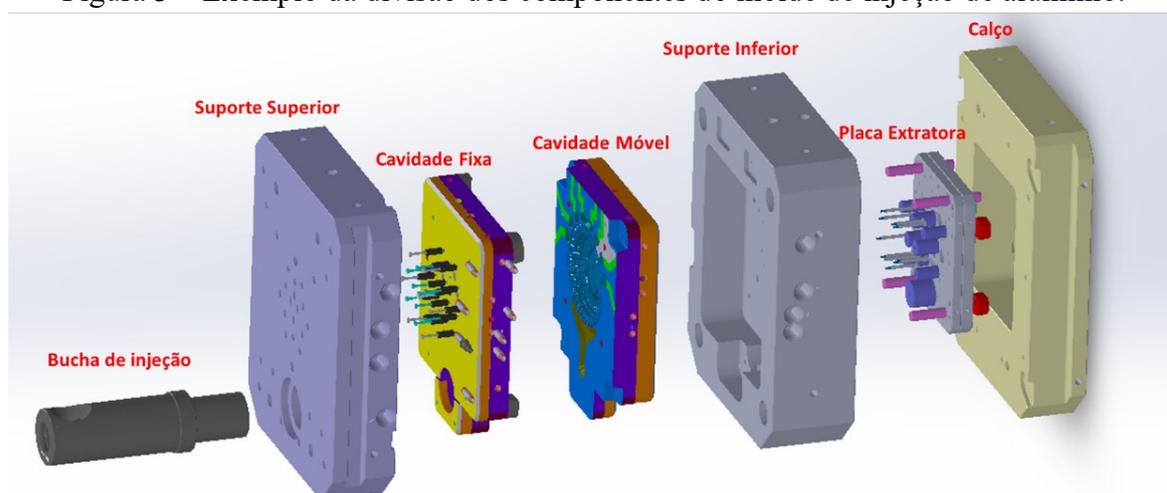
Após o alumínio ter solidificado completamente, o molde é aberto e a peça é removida através da ação da placa e dos pinos de extração, componentes do lado móvel do molde. Com o recuo da cavidade, a placa extratora apresenta um movimento relativo à cavidade no sentido inverso, propiciando que os pinos extratores empurrem a peça para fora da cavidade.

Com o molde aberto e a peça removida, é aplicado à superfície do macho e cavidade um desmoldante, que tem funções refrigerantes, protetivas e lubrificantes. Como refrigerante ele retira calor do molde para colocá-lo em uma temperatura adequada para o início do próximo ciclo mais rapidamente, reduzindo o tempo de ciclo. Como proteção, o desmoldante forma uma camada fina que protege a superfície da cavidade de ações abrasivas do alumínio fundido durante a injeção. Por fim, como lubrificante, o desmoldante dificulta a solda do alumínio na cavidade, facilitando a remoção da peça no final do ciclo e evitando danos ao molde e à peça.

2.2. ARQUITETURA CONSTRUTIVA DO MOLDE

A composição tradicional do molde de injeção de alumínio pode ser considerada como tendo seis partes principais, conforme exemplificado na Figura 3. A divisão das partes principais do molde, bem como a nomenclatura adotada por esse trabalho, foi baseada na observação de práticas de uso em ferramentarias (PETRINI; ZAGO; BOFF, 2017). São elas: a bucha de injeção; o suporte inferior, o suporte superior, a cavidade fixa, a cavidade móvel e a placa extratora. Outros componentes do molde, não menos importantes para seu funcionamento, podem ser considerados como parte das porções citadas e serão explicadas a seguir, nesta seção.

Figura 3 – Exemplo da divisão dos componentes do molde de injeção de alumínio.



Fonte: o autor (2024)

A bucha de injeção faz a conexão entre a injetora e o molde. A bucha recebe a dosagem de alumínio fundido e, com o uso do pistão de injeção, empurra o alumínio para dentro do molde. Apesar de não sofrer efeito de grandes cargas durante sua operação, segundo Andressen (2005) normalmente a bucha é feita de aço tipo SAE H13 ou DIN.2367, conforme descritos na norma NADCA (2016), pois a mesma tem o primeiro contato com o alumínio fundido no início do ciclo, em sua maior temperatura, e é resfriado com o uso de desmoldantes no final do ciclo, alcançando grande variação térmica que exige o uso de um material que seja capaz de suportá-la.

Em contraste, os suportes inferior e posterior sofrem ações relativamente pequenas em comparação com outras partes do molde, principalmente de caráter térmico. Os mesmos têm o objetivo principal de conter os blocos do macho e cavidade, além de possivelmente outros componentes do molde (ANDRESSEN, 2005). Segundo Schöngrundner *et al* (2012), os

suportes são submetidos somente à ação de um estado não-homogêneo de temperaturas e a um carregamento mecânico cíclico composto pela força de fechamento e pela pressão específica. Simulações realizadas por Müller *et al* (2018) indicam que os carregamentos mecânicos têm maiores efeitos nas deformações durante a fase de compactação do que o gradiente térmico no componente.

Apesar de os suportes aparentemente fazerem parte do plano de fechamento onde é feito o contato das duas metades do molde, normalmente existe uma folga de aproximadamente 0,5 mm entre os dois suportes que evita o contato direto. O bloco do macho é feito de modo a se sobressair de 0,2 a 0,5 mm em relação ao suporte inferior (NOGOWIZIN, 2011). Com isso, a força de fechamento não é transmitida diretamente para os suportes, sendo os blocos do macho e cavidade os responsáveis pela realização da junção das duas metades do molde.

De mesmo modo, a pressão específica é aplicada diretamente na cavidade. A maior parte da força mecânica sofrida pelos suportes é, portanto, transmitida através dos blocos do macho e cavidade. Similarmente, o alumínio fundido faz contato direto apenas com a bucha de injeção e o canal de injeção contido nos blocos do macho e cavidade e no contra-pistão. O calor proveniente do alumínio fundido é transmitido por tais componentes e mesmo removido pelos canais de refrigeração antes de chegar aos suportes, reduzindo bastante o efeito da temperatura do fundido nos suportes. Com isso, o gradiente de temperaturas nos suportes tem como fontes o pré-aquecimento da ferramenta antes dos primeiros ciclos e o aquecimento gerado por circuitos internos de óleo que buscam manter o molde em sua temperatura de trabalho durante sua utilização.

Levando em consideração que tanto o efeito termomecânico quanto o puramente mecânico são diminuídos nos suportes em relação a outras partes do molde, e buscando economia na produção do molde, utiliza-se aços como o P-20, SAE 1045 ou o SAE 4140 (ANDRESSEN, 2005). Em contrapartida, apesar das cargas relativamente menores, Schöngrundner *et al* (2012) observam que os suportes são tradicionalmente produzidos com grande massa e rigidez, o que pode levar não somente a maiores custos de material, mas também a maiores cargas no suporte devido às maiores restrições.

O bloco do macho e cavidade cumpre a principal função do molde, de imprimir a forma desejada ao metal fundido, para que a peça seja produzida conforme projetada. Pode ser considerado o principal componente do molde, e também é o que sofre as maiores solicitações. Em sua cavidade, as pressões vindas do alumínio fundido atuam diretamente, enquanto em sua superfície de partição a força de fechamento é aplicada para evitar abertura do molde e evitar

vazamentos e rebarbas excessivas. A maior parte da troca de calor durante o ciclo ocorre no bloco do macho e cavidade. A superfície da cavidade tem contato direto com o alumínio fundido, com temperatura de aproximadamente 700°C no momento do primeiro contato. O alumínio então é mantido dentro da cavidade durante sua solidificação, onde efetua trocas térmicas com os canais de refrigeração e com o próprio material da cavidade. No final do ciclo, a superfície do bloco é refrigerada até a temperatura de trabalho, usualmente entre 200 e 260 °C, com o uso de desmoldantes (NOGOWIZIN, 2019).

Alguns subsistemas fazem parte do bloco do macho e cavidade. Como já mencionado, os canais de refrigeração estão presentes no bloco, projetados de modo a permitir um fluxo de fluido refrigerante, normalmente óleo aquecido ou água, na proximidade de pontos quentes da cavidade sem comprometer a integridade estrutural do bloco. Também usinado no bloco da cavidade está o canal de injeção, separado da área do produto pelos *gates*. O canal de injeção e os *gates* são projetados primariamente para levar o material fundido até a cavidade de modo eficiente e pouco turbulento, minimizando assim defeitos de preenchimento e porosidades na peça. Por fim, ligado a área do produto na cavidade estão as bolsas de ar. As mesmas devem ser posicionadas próximas às últimas porções da cavidade a serem preenchidas por alumínio durante o preenchimento, para assim receberem o ar expulso da cavidade bem como o alumínio fundido de menor qualidade que constitui a frente do fluxo. A pressão de intensificação durante a solidificação também é exercida nas paredes do canal de injeção e das bolsas de ar, portanto sua área projetada deve ser considerada no cálculo da força de abertura do molde.

Ainda em conjunto com o bloco da cavidade, insertos e posições podem ser utilizados para conferir geometrias complexas à peça e facilitar a manutenção de partes da cavidade sujeitas a desgastes maiores. Além destes, insertos móveis conhecidos como gavetas são utilizados para formar partes da peça que não podem ser formados utilizando moldes de apenas duas partes (HERMAN, 1992). Os insertos móveis, como o nome indica, utilizam mecanismos para se movimentar durante a abertura e fechamento do molde em uma direção perpendicular ao movimento do lado móvel.

Os mecanismos de movimentação mais comuns são a coluna inclinada e o cilindro hidráulico. A coluna inclinada é fixada em um dos lados do molde, fazendo com que o movimento relativo entre os moldes durante o afastamento também cause o afastamento da gaveta em uma direção perpendicular. Já o cilindro hidráulico é um atuador linear fixado à parte externa do molde, que atua normalmente de forma sincronizada com a abertura e fechamento

do molde, porém é capaz de atuar de forma independente caso necessário (ANDRESSEN, 2005).

Durante a injeção, para evitar deslocamentos indesejados das gavetas, normalmente é utilizada uma cunha embutida no molde. Com o molde fechado, a cunha se aloja na gaveta impedindo seu deslocamento. Como consequência disso, a maior parte da força gerada pela pressão incidente na superfície da gaveta que compõe parte da cavidade é transferida para a cunha. A face da cunha que recebe o contato com a gaveta é angulada em relação a direção de abertura do molde, fazendo com que a força seja distribuída, com uma componente paralela a direção de abertura do molde, e uma perpendicular à mesma. A decomposição desta força faz com que a presença de gavetas em um determinado molde influencie a força de abertura, e consequentemente a de fechamento. Segundo Andressen (2005), recomenda-se que se utilize o mesmo material do bloco da cavidade para a gaveta, enquanto para a cunha o aço SAE 6150 é indicado.

No lado móvel do molde, entre a base do suporte inferior e a placa da injetora, se localiza a placa extratora, a qual carrega os pinos extratores utilizados na extração da peça durante a abertura do molde. Enquanto o molde está fechado, a placa extratora se encontra em sua posição mais afastada do suporte inferior. Seus pinos, da mesma forma, estão em sua posição mais retraída, sem penetrar a cavidade, mas com suas pontas fazendo parte da superfície da mesma. Durante a abertura do molde, quando o lado móvel do molde se movimenta para se afastar do lado fixo, a placa extratora atinge seu fim de curso antes do resto do molde. Assim, existe um movimento relativo da placa e dos pinos extratores em relação à superfície da cavidade, fazendo com que os pinos penetrem a mesma e empurrem a peça para fora, realizando assim a extração.

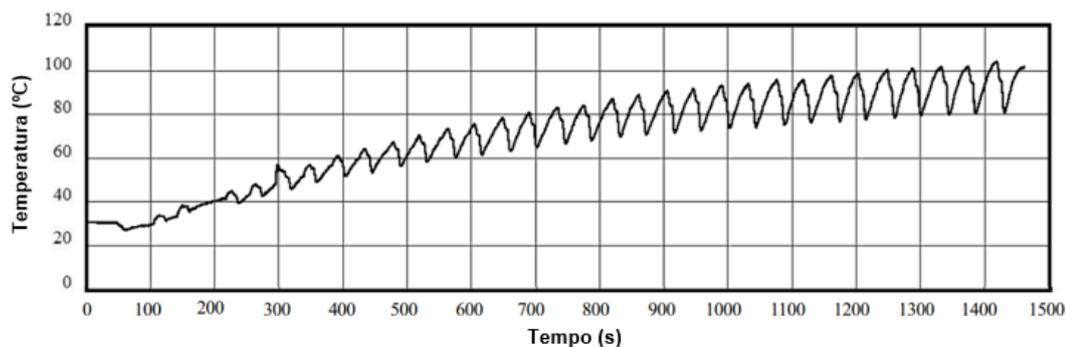
De um ponto de vista estrutural, a placa extratora sofre solicitações relativamente menores durante a injeção, já que a área dos pinos em que a pressão é exercida é bastante limitada. Assim, a placa pode ser feita de um aço mais econômico como o SAE 1020 (ANDRESSEN, 2005). Os pinos extratores, tendo uma área de seção pequena em relação ao comprimento e sendo, mesmo que parcialmente, expostos à pressão da injeção, precisam ser mais resistentes. O aço indicado para os mesmos por Andressen (2005) é o AISI H13, assim como o bloco da cavidade e as gavetas. É importante notar que este mecanismo exige a existência de um vão entre o fundo do suporte inferior e a placa extratora. Mesmo com a presença de colunas de carga entre o suporte inferior e a placa da injetora, a presença deste vão caracteriza uma condição de carregamento que propicia o surgimento de deflexões.

Distintamente do fundo do suporte superior, que é diretamente apoiado na placa da injetora e não apresenta esta condição de carregamento

2.3. EFEITOS DA TEMPERATURA NO MOLDE

Durante o ciclo de injeção de alumínio, o molde passa por uma série de mudanças de temperatura. Antes do primeiro ciclo, o molde se encontra em temperatura ambiente. O molde então é aquecido à temperatura de trabalho, seja através de um pré-aquecimento ou de um número de ciclos iniciais. Figura 4, adaptada de Yamagata *et al* (2013), mostra o comportamento da temperatura na superfície da cavidade em função do tempo durante 30 ciclos consecutivos. É possível notar o aumento gradual da temperatura máxima e mínima do molde com o passar do tempo, até chegar na faixa de temperaturas de trabalho do molde. Até chegar a uma temperatura adequada, a grande diferença de temperatura entre o molde e o alumínio fundido faz com que o alumínio solidifique prematuramente na cavidade, antes de acontecer o preenchimento completo (ANGLADA *et al*, 2018). As primeiras peças produzidas normalmente são, portanto, descartadas.

Figura 4 – Temperatura medida na superfície da cavidade de um molde de injeção de alumínio durante os primeiros 30 ciclos.



Fonte: adaptado de Yamagata *et al* (2013).

Os mecanismos de troca de calor diferem em cada etapa do ciclo. Durante o enchimento do molde, enquanto o alumínio fundido é forçado para dentro da cavidade, o mesmo começa imediatamente a perder calor para o molde. Ahuett-Garza e Miller (2003) reportam que uma quantidade significativa de alumínio solidifica antes de a cavidade estar completamente preenchida, formando uma camada de alumínio sólido entre a interface peça-cavidade e o centro da parede da peça. Neste momento, o calor latente é transferido do alumínio, que se encontra em sua temperatura de mudança de fase (normalmente entre 560 e 590°C) (HERMAN, 1992), para o molde em temperatura média menor (tipicamente entre 200 e 250°C). O tempo de enchimento depende da espessura média da peça, mas normalmente é pequeno, entre 20 ms

para pequenas peças (menos de 500 g) e 250 ms para grandes peças (mais de 5 kg) (FUOCO, 2006). A troca de calor nesta etapa é limitada pelo tempo.

Na próxima etapa, a solidificação e conseqüente resfriamento da peça, ocorre quando a maior parte do calor é removido do alumínio para o molde. O calor é conduzido pelo molde, e parte dele é removido através dos canais de refrigeração. O projeto eficiente dos canais de refrigeração auxilia a evitar grandes gradientes de temperatura no molde. Porém, as condições de projeto nem sempre possibilitam uma distribuição recomendada de canais de refrigeração, sendo comum moldes alcançarem temperaturas maiores do que o indicado, ou distribuições de temperaturas desbalanceadas. O resultado é o aumento dos efeitos de fadiga térmica e de tensões causadas pelos diferentes níveis de expansão térmica em variadas partes do molde. A deformação térmica ε_t em mm é dependente de um gradiente térmico ΔT em °C aplicado ao material, de um comprimento inicial L_0 em mm e ao coeficiente de expansão térmica α do material em °C⁻¹, conforme a Equação 4 (EBNER et al, 2008).

$$\varepsilon_T = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (4)$$

A expansão acontece primeiro na superfície da cavidade em contato com o alumínio fundido. Neste momento, porém, outras partes do molde se encontram em temperaturas menores e apresentam menor expansão, restringindo a expansão térmica da superfície e gerando tensões. Essas tensões térmicas σ_T , durante a etapa de injeção e solidificação, são compressivas. As mesmas podem ser calculadas. Considerando um carregamento biaxial e que o calor fica confinado apenas à região da superfície, tem-se a Equação 5, que é a tensão térmica máxima para dado gradiente térmico e material. A Equação 6 leva em consideração a condução de calor da superfície para dentro da cavidade, apresentando então uma mudança gradual de temperatura neste sentido (EBNER *et al*, 2008; OSBORNE, 1995).

$$\sigma_T = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{1 - 2\nu} \quad (5)$$

$$\sigma_T = \frac{E \cdot (\alpha \cdot \Delta T - \varepsilon_T)}{1 - \nu} \quad (6)$$

Onde E é o módulo elástico do material em MPa e ν o seu módulo de Poisson. Após a solidificação e remoção da peça, durante a aplicação do desmoldante o molde é resfriado para sua temperatura inicial de ciclo. Neste momento, os mesmos mecanismos de geração de tensão térmica se aplicam, porém como uma tensão de tração.

As diferenças de temperaturas no molde, durante o ciclo, não são apenas entre superfície e camadas inferiores do molde. Dependendo da geometria da peça e das condições de operação

da injeção, regiões inteiras do molde podem estar a temperaturas diferentes em dado momento. Nesse caso, o mesmo mecanismo causador das tensões superficiais explicado acima também é fonte de tensões em outras porções do molde.

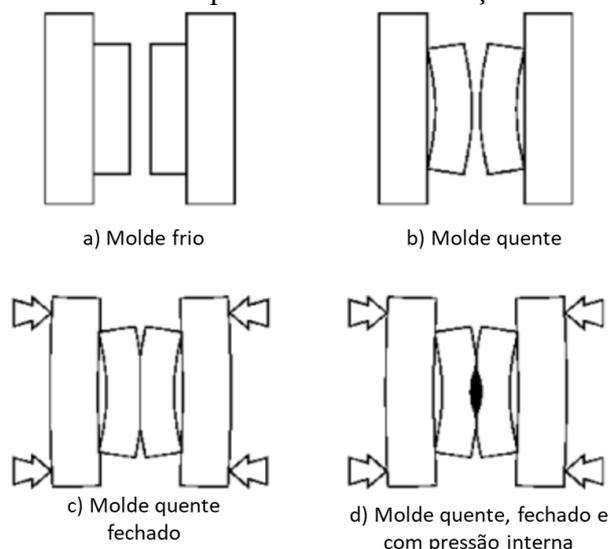
Enquanto uma parte mais aquecida do material tenta se expandir, partes com temperaturas menores agem como restrições a essa expansão, se traduzindo em tensões termomecânicas no molde (ANGLADA *et al*, 2018). Segundo Regab *et al* (2002), pelo fato de as propriedades mecânicas da ferramenta serem funções da temperatura, a análise estrutural é dependente do histórico de temperaturas do componente.

2.4. AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS SOLICITAÇÕES NO MOLDE

Como já mencionado, o molde de injeção de alumínio sofre diversas solicitações diferentes durante seu ciclo, entre pressão de injeção, força de fechamento, tensões térmicas, sujeitando os componentes estruturais do molde a um alto esforço mecânico (NOGOWIZIN, 2019). Mas para avaliar a resistência estrutural do molde em relação a tais esforços, é válido o fazer considerando apenas o instante de maiores solicitações. Ahuett-Garza, Hedge e Miller (1995) identificam que, enquanto é claro que os mecanismos de deformação do molde são dominados pelo efeito da temperatura, o pico dos deslocamentos é proporcional à pressão aplicada.

Barone e Caulk (1999) explicam que as deformações no molde são causadas pela expansão térmica heterogênea dos seus componentes e pelas tensões causadas pelo fechamento do molde e pelas pressões internas da cavidade. Figura 5 demonstra os efeitos das solicitações nas deformações do molde.

Figura 5 – Ilustração dos efeitos sequenciais das solicitações nas deformações do molde.



Com as solicitações aplicadas, o resultado é um molde maior e um pouco distorcido em relação a sua forma original, tornando imperfeito o encaixe na superfície de partição. Isso pode significar um selamento imperfeito, permitindo a formação de rebarbas, ou até a aplicação das pressões em do processo em áreas relativamente pequenas, trazendo o risco de deformações plásticas na superfície de partição (BARONE; CAULK, 1999).

Ao se falar do instante de maiores solicitações, duas são as situações. Como já explicado nas seções anteriores, a primeira situação ocorre durante a solidificação do alumínio, onde é aplicada uma pressão de intensificação, cerca de três vezes maior do que a pressão durante o preenchimento (ANDRESEN, 2005). Ao mesmo tempo, a força de fechamento está atuando, e o desequilíbrio térmico no molde gera a tensão térmica. Este período de solidificação constitui, portanto, o primeiro candidato a ser considerado. Isso é corroborado por Ahuett-Garza, Hedge e Miller (2002), cujas simulações demonstram que o momento de maior separação das cavidades causada pela deformação do molde é durante a pressão de intensificação. Barone e Caulk (1999) também afirmam que este é o instante em que as distorções no molde afetam as dimensões da peça produzida.

A segunda situação ocorre um pouco antes, no instante em que o preenchimento da cavidade é concluído. Segundo Andressen (2005), um pico de pressão de impacto acontece com a súbita desaceleração do pistão e do alumínio líquido, causada pelo preenchimento completo da cavidade. Essa pressão atua por aproximadamente 0,25 milésimos de segundo, e em alguns casos pode ser maior do que a pressão de intensificação. Nogowizin (2011) concorda que a força explosiva gerada pela súbita desaceleração do fundido pode ser suficiente para causar espirros de metal para fora do molde. Deste modo, para avaliar cada molde é preciso calcular qual dos dois instantes mencionados é o que traz as maiores solicitações. O primeiro instante, durante a solidificação, pode ser estimado com precisão suficiente através do cálculo da pressão específica, conforme explicado na seção 2.1 e equacionado na Equação 1, considerando a força de injeção obtida com a pressão de intensificação. Para calcular o segundo instante, no final do preenchimento, pode-se trabalhar com a energia aplicada ao fundido através do pistão. O pistão em movimento apresenta uma energia cinética E_c em kJ determinada pela Equação 7, a qual é transferida para o fundido ao final do movimento.

$$E_c = \frac{m_p \cdot v_p^2}{2} \quad (7)$$

Onde m_p é a massa do sistema do pistão (incluindo pistão, êmbolo, óleo hidráulico, e haste) em kg e v_p é a velocidade de injeção em m/s.

Pelo teorema do trabalho-energia cinética, conhecendo as velocidades de primeira e segunda fase no sistema do pistão pode-se calcular a quantidade de trabalho realizada sobre o mesmo a partir da Equação 8, onde τ em kJ é o trabalho realizado. Com isso, conhecendo o deslocamento do pistão, através da Equação 9, onde s_p denota a posição do pistão, é possível estimar a força de impacto F_{imp} sendo transmitida pelo pistão ao fundido durante o preenchimento, em kN.

$$\tau = E_{c2} - E_{c1} \quad (8)$$

$$F_{imp} = \frac{\tau}{s_{p2} - s_{p1}} \quad (9)$$

Segundo Osborne (1995), a força de impacto está relacionada com a desaceleração súbita da massa do metal injetado, do pistão e do fluido hidráulico do cilindro. Assumindo uma velocidade constante, esta desaceleração é uma função da velocidade e da distância percorrida pelo pistão durante o preenchimento. Pode-se então calcular a força de impacto com a Equação 10.

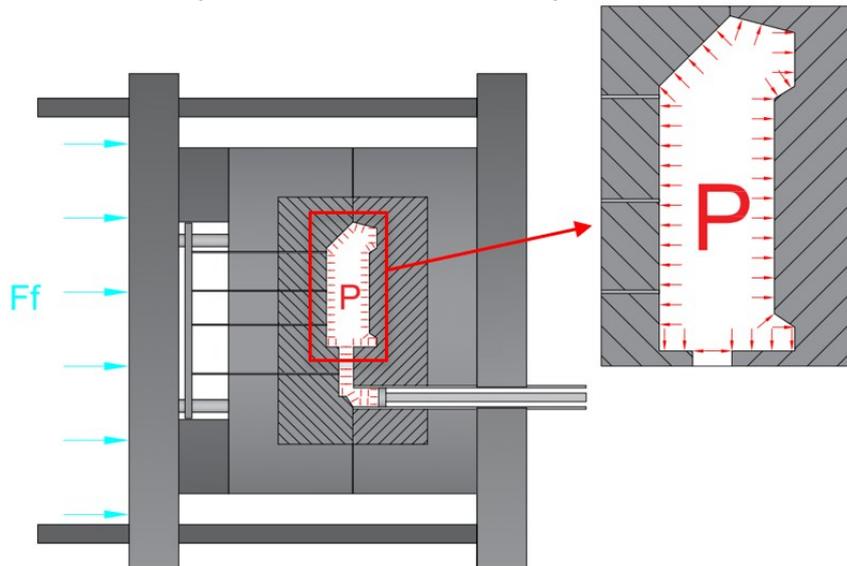
$$F_{imp} = v_p^2 \frac{m_p}{2(s_{p2} - s_{p1})} \quad (10)$$

De maneira conservadora, considera-se que a força aplicada ao fundido é transmitida à superfície da cavidade durante o choque entre os dois. Pode-se chamar esta força de força de impacto. Utilizando a força de impacto no lugar da força de injeção na Equação 1, obtem-se a pressão de impacto, conforme demonstrado na Equação 11. Caso a pressão de impacto seja maior do que a pressão específica, é aconselhável que a mesma seja utilizada para a determinação da força de fechamento e para a análise estrutural do molde, de maneira geral.

A Figura 6 exemplifica as solicitações consideradas na avaliação estrutural de um molde, conforme discutido neste capítulo.

$$P_{imp} = F_{imp}/A_{pist} \quad (11)$$

Figura 6 – Solicitações consideradas na avaliação estrutural de um molde.



Fonte: o autor (2024)

Levando em consideração essas solicitações, além da natureza cíclica do processo de injeção de alumínio, é importante que o projeto dos moldes de injeção de alumínio seja feito levando em consideração os efeitos das solicitações. Segundo Miller *et al.* (2000), o principal fator que influencia os deslocamentos na ferramenta é a rigidez da máquina de injeção. Apesar disso, o autor também afirma que um projeto adequado do molde é capaz de reduzir as deformações. Nesse sentido, é interessante estabelecer critérios de avaliação estrutural para o molde que permitam ao projetista conhecer os limites permissíveis do molde e ajustar parâmetros e dimensões de acordo. Um dos principais critérios identificado na literatura é o da resistência mecânica da ferramenta (NETO, 2021; MENGES, 2001).

2.5. RESISTÊNCIA MECÂNICA DA FERRAMENTA

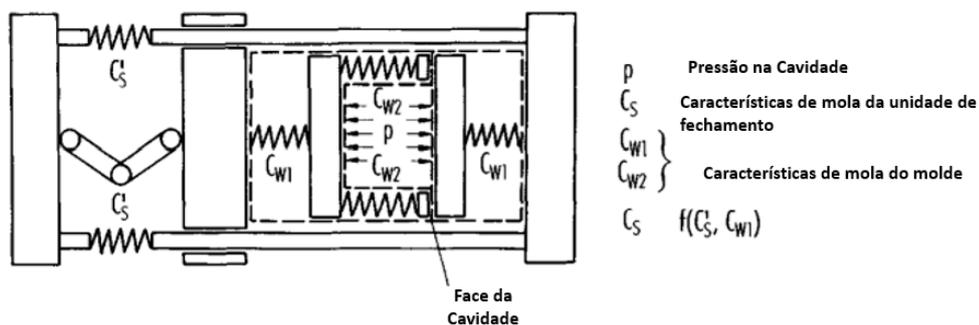
Primeiramente, para o bom funcionamento da ferramenta, ela não pode ser submetida a deformações plásticas. Não é admissível que a forma da cavidade mude permanentemente, já que a mudança dimensional seria transmitida para a peça produzida. Moldes de injeção de polímeros possuem critérios de deformação máxima nas paredes da cavidade definidos, sendo de 0,1 a 0,2 mm para a maioria dos plásticos (NETO, 2001). Não se encontra na literatura um limite definido para a deformação de moldes de injeção de alumínio. Neste caso, é razoável determinar que qualquer deformação permissível no molde estará dentro de seu limite elástico, e assim sujeita a lei de Hooke, conforme a Equação 12:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (12)$$

Onde σ é a tensão aplicada em MPa e E o módulo de elasticidade do material em MPa. Conhecendo o limite elástico do material, pode-se obter diretamente a sua deformação máxima permissível, ou seja, o limite máximo que as dimensões do molde podem mudar antes de correr o risco de causar deformações permanentes. Pode-se estabelecer, assim, esta deformação máxima como um critério de avaliação das deformações do molde. No entanto, é importante lembrar que deformações elásticas também afetam a operação da injeção de alumínio e a qualidade da peça injetada (AHUETT-GARZA, HEDGE E MILLER, 1995). Mesmo dentro do limite aceitável, procura-se minimizar as deformações elásticas quando possível. Ahuett-Garza, Hedge e Miller (1995) reconhecem como um padrão que a espessura da rebarba - função direta da deformação do molde - deve ser menor do que 0,254 mm para um processo “limpo”.

Para a utilização do critério proposto, é necessário calcular as deformações sofridas pelo molde, dadas as solicitações já descritas. Para tanto, sabendo que as tensões estarão limitadas a uma magnitude em que o molde apresente um comportamento elástico, os componentes do molde podem ser representados por molas onde sua constante elástica equivale ao módulo de elasticidade. Menges *et al* (2001) utilizam desta ideia para modelar cada componente individual do sistema como uma mola, e o sistema completo como um conjunto de molas. Assim, cada “mola” pode ser somada para calcular a deformação geral. Segundo Ragab *et al* (2002), um modelo representativo da máquina de injeção deve estar incluído em modelos analíticos de moldes de injeção. A Figura 7, representa o modelo proposto por Menges *et al* (2001).

Figura 7 - Sistema molde/injetora modelado como um conjunto de molas.



Fonte: adaptado de Menges *et al* (2001).

Através desta analogia, é possível decompor a forma complexa do molde em um conjunto de formas simples que possibilitam o cálculo analítico das deformações nos componentes. Os deslocamentos individuais podem então ser somados através do método da superposição, o qual só pode ser aplicado se a flexão do componente não introduzir variações na ação das forças exteriores (NETO, 2001). Novamente, devido aos pequenos deslocamentos

permissíveis, esta é uma simplificação que normalmente poderá ser feita para moldes de injeção de alumínio.

O Quadro 1 apresenta algumas das geometrias e condições de contorno conhecidas da resistência dos materiais clássicas, com suas respectivas equações para tensões e deslocamentos. No Quadro 2, as constantes utilizadas no cálculo da placa apoiada em todos os lados. Outros autores, como Nogowizin (2019), também simplificam alguns componentes do molde como vigas simples, porém apenas para casos específicos.

Quadro 1 – Equações de tensão e deslocamento para elementos característicos.

Elemento característico	Figura	Tensão	Deslocamento
Placa com todos os lados apoiados		$\sigma_{máx} = \frac{\beta q b^2}{t^2}$ Ver Tabela 2	$y_{máx} = \frac{-\alpha q b^4}{Et^3}$ Ver Tabela 2
Vaso de pressão de parede grossa sem fundo - pressão externa		$\sigma_1 = 0$ $\sigma_2 = \frac{-qa^2(b^2 + r^2)}{r^2(a^2 - b^2)}$ $\sigma_3 = \frac{-qa^2(r^2 - b^2)}{r^2(a^2 - b^2)}$	$\Delta a = \frac{-qa}{E} \left(\frac{a^2 + b^2}{a^2 - b^2} - \nu \right)$ $\Delta b = \frac{-q}{E} \frac{2a^2 b}{a^2 - b^2}$
Vaso de pressão de parede grossa sem fundo - pressão interna		$\sigma_1 = 0$ $\sigma_2 = \frac{qb^2(a^2 + x^2)}{x^2(a^2 - b^2)}$ $\sigma_3 = \frac{-qb^2(a^2 - x^2)}{x^2(a^2 - b^2)}$	$\Delta a = \frac{q}{E} \frac{2ab^2}{a^2 - b^2}$ $\Delta b = \frac{qb}{E} \left(\frac{a^2 + b^2}{a^2 - b^2} + \nu \right)$
Viga apoiada		$\sigma_{máx} = \frac{wL^2}{8} \frac{z}{I}$	$y_{máx} = \frac{-5wL^4}{384EI}$
Viga engastada		$\sigma_{máx} = \frac{-wL^2}{2} \frac{z}{I}$	$y_{máx} = \frac{-wL^4}{8EI}$
Viga biengastada		$\sigma_{máx} = \frac{-wL^2}{12} \frac{z}{I}$	$y_{máx} = \frac{-wL^4}{384EI}$

Fonte: adaptado de Neto (2001).

Quadro 2 - Constantes do cálculo de tensão e deslocamento para placas apoiadas em todos os lados, com base na razão entre seus lados.

a/b	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0	4,0	5,0	∞
β	0,2874	0,3762	0,4530	0,5172	0,5688	0,6102	0,7134	0,7410	0,7476	0,7500
α	0,0444	0,0616	0,0770	0,0906	0,1017	0,1110	0,1335	0,1400	0,1417	0,1421

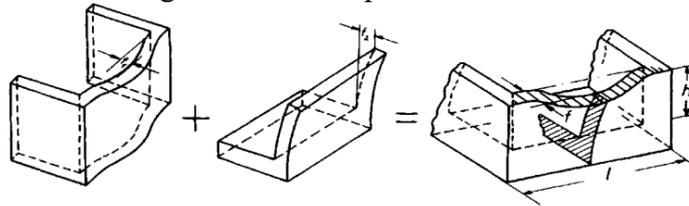
Fonte: adaptado de Neto (2001).

Desta forma, é possível estimar os deslocamentos em diversas geometrias aplicando o princípio da superposição proposto por Menges *et al* (2001), desmembrando o componente em geometrias mais simples e bem descritas na literatura, e somando suas deflexões de acordo com a Equação 13.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \dots + \frac{1}{f_i} \quad (13)$$

Onde f é a deflexão total e o subscrito se refere à deflexão de cada um dos i casos de carregamento. A Figura 8, adaptada de Menges *et al* (2001), exemplifica o procedimento.

Figura 8 - Exemplo da aplicação do método proposto por Menges *et al* (2001), com o desmembramento de geometrias complexas em elementos característicos.



Fonte: adaptado de Menges *et al* (2001).

2.6. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Métodos analíticos de solução de problemas físicos são limitados pelo número de cálculos necessários para chegar a um resultado, necessitando muitas vezes de um número grande de simplificações para serem eficientes. Frente a alguns projetos de engenharia, como no caso dos moldes de injeção de alumínio, métodos de tentativa e erro eram muito utilizados em conjunto com alguns cálculos manuais, limitando muito a efetividade e eficiência do projeto (JEONG *et al*, 2016). Atualmente, a capacidade computacional de computadores evoluiu juntamente com técnicas de cálculo numérico que fazem bom uso desta capacidade crescente para chegar a resultados mais precisos e mais rápidos.

Diversos softwares e técnicas são utilizadas para simular o processo de injeção de alumínio, melhorando o tempo de ciclo e minimizando defeitos nas peças produzidas (KHAN; SHEIKH, 2018). Na indústria de injeção de alumínio e mesmo na academia, o uso de simulação

computacional para análise estrutural dos moldes de injeção é menos difundido, porém ainda é utilizado.

Através de parceria com a NADCA, Miller (1998, 2004, 2011) produziu uma série de pesquisas voltadas para a análise estrutural de moldes de injeção de alumínio, com foco no uso de simulação computacional para a predição de distorções na peça decorrentes de deformações no molde através do Método dos Elementos Finitos. Em sua essência, métodos de simulação computacional fazem uso do poder de processamento de computadores para a resolução de problemas físicos através de métodos de cálculo numérico como o Método das Diferenças Finitas, Método dos Volumes Finitos, Método dos Elementos Discretos, Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método da Aproximação Externa por Elementos Finitos (MAEEF), entre outros. Neste trabalho, apenas o MEF e o MAEEF serão utilizados.

2.6.1. Método dos Elementos Finitos - MEF

A análise de uma região contínua de um sólido pode se tornar complexa dependendo de sua geometria. Como forma de contornar este problema, o MEF propõe a transformação deste objeto contínuo em um número finito de elementos mais simples e discretos, chamados de elementos finitos. Nestes elementos, as propriedades dos materiais e relações governantes são aplicadas, de forma que, através da vinculação dos elementos uns com os outros, o resultante é um conjunto de equações que propicia uma aproximação do comportamento do contínuo (CHANDRUPATLA; BELEGUNDU, 2015). Os elementos, juntos, formam uma malha de elementos finitos, e a conexão entre os elementos e o local onde as relações e propriedade é aplicada é chamado de nó. Um elemento tridimensional é composto por um conjunto de nós que o dá a sua geometria.

Para o caso de avaliação estrutural, é calculado nos nós o deslocamento nodal de acordo com seus graus de liberdade, que juntos descrevem o deslocamento do elemento. As equações utilizadas para obter os deslocamentos são expressões para a obtenção da energia nos nós, as quais devem ser minimizadas. Entre os nós, o deslocamento interno do elemento é obtido através de funções de interpolação (TSCHIPTSCHIN, 2005).

A constituição da malha de elementos finitos normalmente é dependente da geometria do objeto, dos graus de liberdade necessários para a avaliação da estrutura, da precisão requerida e do tempo computacional que se está disposto a dispender. Via de regra, utiliza-se preferencialmente o elemento que mais se encaixa na geometria e que tenha o menor número de nós e graus de liberdade possível sem comprometer a qualidade da avaliação. Pois um maior

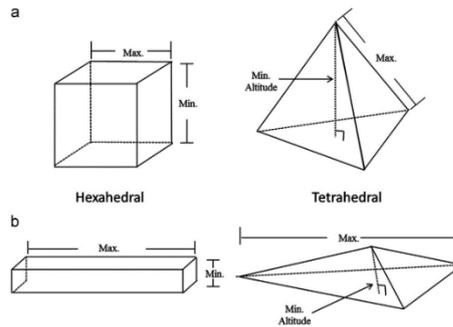
número de nós implica em mais equações a serem resolvidas, e maior capacidade computacional exigida (NOGOWIZIN, 2019).

Burkhart *et al* (2013) afirmam que a precisão e eficiência da simulação computacional se correlacionam fortemente com a qualidade da malha de elementos finitos utilizada. Existem alguns fatores que afetam esta qualidade, talvez o mais comum seja o nível de refino da malha, sendo que uma malha mais refinada terá mais elementos, dado um determinado volume, do que uma menos refinada. Geralmente, existe um consenso de que há um ponto ótimo de densidade de elementos em uma malha em que se consegue o resultado mais preciso com o menor número de elementos (BURKHART *et al*, 2013).

Ahuett-Garza, Hedge e Miller (1995) apontam como fatores importantes a serem considerados pelo projetista: o grau de precisão necessária na representação das geometrias do modelo para minimizar o número de elementos necessários sem comprometer o resultado; a seleção apropriada dos tipos de elementos para representar as interfaces entre diferentes componentes; a seleção apropriada de parâmetros de simulação. Sobre a escolha do elemento, Chayapathi, Kesavan e Miller (2000) explicam que elementos tetraédricos de 4 nós tendem a causar problemas de convergência e são apenas utilizáveis em casos específicos e com malhas muito finas. Os mesmos recomendam o uso de elementos de segunda ordem, como o tetraédrico de 10 nós.

Algumas métricas utilizadas para a avaliação da qualidade da malha estão relacionadas com relações geométricas dos seus elementos. Por exemplo, a razão de aspecto, mais conhecida na literatura por *Aspect Ratio* (AR), é uma medição simples que quantifica a forma de cada elemento da malha. Para elementos hexaédricos, o AR é a razão entre a aresta ou diagonal mais longa pela mais curta, e os valores aceitáveis ficam entre 1 e 3, segundo Burkhart *et al* (2013). Para elementos tetraédricos, a razão é entre a maior aresta e a altura mínima do menor lado, com os valores aceitáveis ficando entre 1 e 4. A Figura 9 demonstra esta métrica para ambos os tipos de elementos. Mesmo se não for possível evitar elementos fora destes valores, é recomendado que o número de elementos com AR maior que 3 não passe de 5% (BURKHART *et al*, 2013).

Figura 9 - Representação da métrica de Aspect Ratio para elementos hexaédricos e tetraédricos, com elementos com AR próximos de 1 (a) e próximos de 14 (b)



Fonte: adaptado de Burkhart *et al* (2013).

Outros critérios de qualidade de malha estão descritos no Quadro 3, conforme disponível na seção de ajuda do SimLab (2023). Estes critérios são específicos para elementos triangulares planos (*Skew 2D*) e para elementos tetraédricos (*Tet Collapse*, *Skew 3D* e *Volume*).

Quadro 3 - Critérios de qualidade de malha.

Critério	Descrição
<i>Skew 2D</i>	O ângulo <i>skew</i> é a diferença entre 90 graus e o menor de três ângulos α_1 , α_2 e α_3 . Estes ângulos são definidos o menor dos ângulos criados quando uma linha desenhada de um nó do triângulo até o ponto médio do lado oposto intercepta a linha que conecta os pontos médios dos dois lados adjacentes.
<i>Tet Collapse</i>	É o mínimo de $h/(1,24\sqrt{A})$, onde h é a distância perpendicular de um nó do tetraedro até a face oposta, e A é a área da face oposta.
<i>Skew 3D</i>	É a razão entre o volume do elemento tetraédrico e o volume de um elemento equilátero com o mesmo circunraio.
Volume	Volume do elemento Tetraédrico

Fonte: adaptado de SimLab (2023)

2.6.2. Método da Aproximação Externa por Elementos Finitos -MAEEF

O MAEEF pode ser considerado uma generalização do MEF tradicional, em que os “elementos finitos” utilizados podem ter formas completamente arbitrárias, e as funções base podem ser de classes arbitrárias e são independentes da forma do elemento (SIMSOLID, 2015). Segundo a SimSolid (2015), com a capacidade de utilizar formas arbitrárias como elementos finitos elimina-se o processo de geração e refino de malha, bem como subprocessos ligados a esse fim, como a simplificação e remoção de atributos do modelo. Como discutido no subcapítulo anterior, no MEF a qualidade da malha tem influência na precisão e eficiência da análise, e a não utilização de uma malha definida, além de economizar tempo considerável no pré-processamento, remove esta possível fonte de erro humano. Outra característica do MAEEF é a separação entre geometria e funções base, de modo que a forma do elemento não tem influência na escolha das funções, e vice-versa. As funções base para dado elemento são geradas a partir de funções base genéricas durante o processamento.

O Quadro 4 mostra o que é apresentado como a maior vantagem do MAEEF segundo Goelke (2021), que é a economia de tempo na realização das simulações, tanto no pré-processamento quanto no processamento, com o uso do software SimSolid.

Quadro 4 - Vantagens do MAEEF em relação ao MEF tradicional.

MEF Tradicional		SimSolid	
Tarefa	Tempo	Tarefa	Tempo
Simplificação da geometria – remoção de pequenos recursos	Horas	Não necessário – SimSolid utiliza montagens CAD completas	0
Substituição de geometrias – Conversão de sólidos para superfícies, vigas, etc	Horas	Não aplicável – SimSolid utiliza geometrias multiescala de maneira eficiente	0
Limpeza da geometria – verificação de alinhamentos e remoção de folgas	Horas	Não necessário – SimSolid tolera folgas e sobreposições	0
Malhas – Sensibilidade à qualidade da geometria	Horas	Não aplicável – SimSolid não utiliza malhas de elementos finitos	0
Geração de malha – Complexo para geometrias multiescala	Horas	Não aplicável – SimSolid não utiliza malhas de elementos finitos	0
Validação da malha – <i>Aspect Ratio, skew, warp, etc</i>	Horas	Não aplicável – SimSolid não utiliza malhas de elementos finitos	0
Conexões da montagem – difícil visualização e diagnóstico de problemas	Horas	Conexões da montagem – Automático e robusto, simples de ajustar manualmente	Segundos a minutos
Solução – Necessita computador potente, bastante RAM e tempo computacional	Horas	Solução – Solucionador adaptivo multi-passagem, feito em computador padrão	Segundos a minutos
Convergência de soluções – Não é prático para grandes montagens	NA	Convergência de soluções – Sempre é feita, incluída na solução	Incluída
Análise local/global automática – Não é prático para grandes montagens	NA	Análise local/global automática – Feito parte por parte	Segundos a minutos
Tempo exigido pelo MEF tradicional Fluxo de trabalho complexo	Horas a dias	Tempo exigido pelo SimSolid Fluxo de trabalho simples	Minutos

Fonte: adaptado de Goelke (2021)

3. MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Este capítulo apresenta o método para avaliar deformações no molde de injeção de alumínio decorrentes das solicitações aplicadas ao mesmo durante o ciclo de injeção. Foi feita uma análise qualitativa da influência da espessura de fundo dos suportes superior e inferior, e dos blocos do macho e cavidade na integridade estrutural do molde. Para isso, são utilizadas ferramentas de análise estrutural baseadas nos métodos de Elementos Finitos tradicionais e de Aproximação Externa por Elementos Finitos, assim como cálculos analíticos.

Esta pesquisa é de natureza aplicada, pois segundo Prodanov e Freitas (2013), uma pesquisa é de natureza aplicada quando “Procura produzir conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos.”. O foco desta pesquisa é produzir conhecimentos para aplicação prática ao projeto de moldes de injeção de alumínio.

Foi utilizada uma abordagem experimental, na qual, conforme explanado por Prodanov e Freitas (2013), determinou-se a deformação em um molde de injeção de alumínio como objeto de estudo, e foram identificadas as variáveis e formas de controle para a observação dos efeitos destas variáveis. Para tanto, são utilizados modelos computacionais de simulação baseados na representação do molde e suas condições de contorno, conforme investigadas na revisão bibliográfica.

A escolha do uso de simulações dos sistemas físicos envolvidos no ciclo de injeção de alumínio como meio de realizar os experimentos se deu pela impossibilidade prática e econômica de realizar os experimentos propostos em um modelo real alterado fisicamente para operar sobre diferentes condições. Como alternativa, foi preferível a construção de um modelo representativo do sistema para utilizar como objeto de estudo no lugar do sistema real (GAVIRA, 2003).

Portanto, para a execução deste trabalho, utilizaram-se modelos CAD 3D de um molde real que foi o estudo de caso. O modelo foi disponibilizado pela ferramentaria Gama Indústria de Matrizes Ltda, que também disponibilizou os parâmetros do processo de injeção para os quais os moldes foram projetados. Tais parâmetros foram utilizados na análise estrutural do molde estudado.

Para a simulação estrutural com o Método dos Elementos Finitos (MEF), foram utilizados o software SimLab para a geração da malha de elementos finitos e pré-processamento, e o OptiStruct para a resolução e pós processamento da simulação. Os dados de temperatura utilizados foram obtidos através de uma simulação de processo utilizando o

software MAGMASOFT, e importados para o SimLab através do MAGMALink. De forma comparativa, o software SimSolid foi utilizado para a simulação através do Método de Aproximação Externa por Elementos Finitos (MAEEF). Os softwares OptiStruct, SimLab e SimSolid são propriedade da Altair Engineering Inc. Os softwares MAGMASOFT e MAGMALink são propriedade da MAGMA Foundry Technologies Inc.

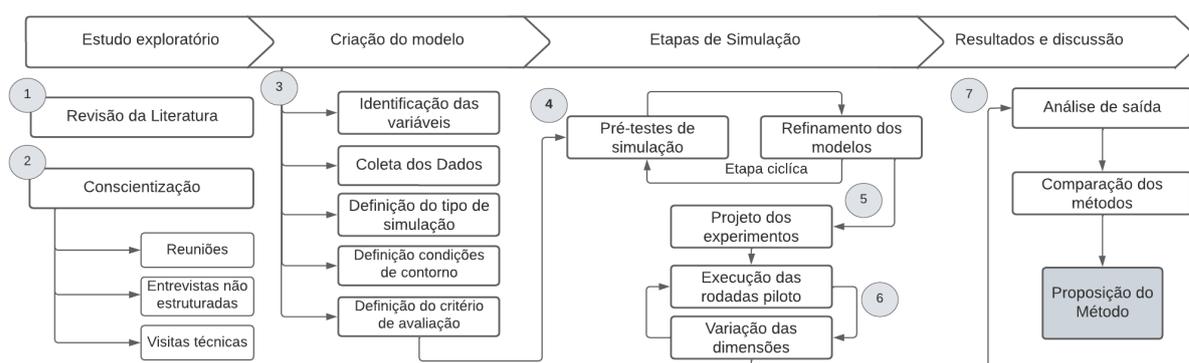
3.1. DELINEAMENTO DA PESQUISA

Este trabalho de pesquisa seguiu quatro etapas. A primeira etapa foi o estudo exploratório, quando buscaram-se informações sobre o tema com o fim de aumentar o conhecimento do mestrando sobre o projeto e processo de moldes de injeção de alumínio, bem como para servir como base para as próximas etapas do trabalho.

A segunda etapa foi a criação do modelo de estudo, em que foram buscadas informações de forma mais objetiva com o fim específico de criar o modelo do molde que seria utilizado nas simulações. A terceira etapa foi a simulação, em que os experimentos propostos foram realizados virtualmente utilizando o modelo criado na etapa anterior.

Finalmente, na quarta etapa, resultados e discussão, os resultados dos experimentos foram analisados, e os métodos utilizados foram comparados entre si e com outros resultados encontrados na literatura. A Figura 10 resume as etapas e subetapas da pesquisa, as quais serão detalhadas nas próximas seções.

Figura 10 - Delineamento da Pesquisa.



Fonte: o autor (2024)

3.2. ESTUDO EXPLORATÓRIO

Através da revisão da literatura, inicialmente buscou-se o estado da arte em relação ao projeto de moldes de injeção de alumínio e ao seu ciclo de utilização. Procurou-se capturar os principais conceitos e variáveis, bem como a relação entre esses elementos e sua influência.

Utilizou-se como base de dados o Portal de Periódicos da Capes, a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações, a Scopus e o repositório da NADCA, entre outras fontes incidentais. A lista de palavras-chave utilizadas na pesquisa inclui, mas não é limitada por: *HPDC, High Pressure Die Casting, mold, structural, optimization, simulation, deformation, strain, displacement, design*. A revisão da literatura começou na etapa do Estudo Exploratório, mas persistiu até o final deste trabalho.

Além da revisão da literatura, foi buscada uma maior compreensão da realidade sobre o tema através de reuniões técnicas e entrevistas não estruturadas com diretores, engenheiros e colaboradores da empresa Gama Indústria de Matrizes Ltda, que possui atuação focada no desenvolvimento de moldes para injeção de alumínio sob pressão. Buscou-se absorver conhecimento técnico sobre o dia a dia da matrizaria de moldes de injeção de alumínio, com foco no fluxo de projeto, simulação e montagem de novos moldes.

Contribuindo para o processo de embasamento sobre o assunto, visitas técnicas foram realizadas a empresas do ramo. Visitou-se a Ferramentaria JN de Joinville, a IMM Indústria de Moldes e Matrizes de Joinville, a fundição da Wetzell S/A de Joinville, a fundição da Tramontina Eletrik S/A de Carlos Barbosa, os setores de matrizaria e fundição da STIHL Ferramentas Motorizadas Ltda. de São Leopoldo e o Instituto Senai de Inovação de São Leopoldo.

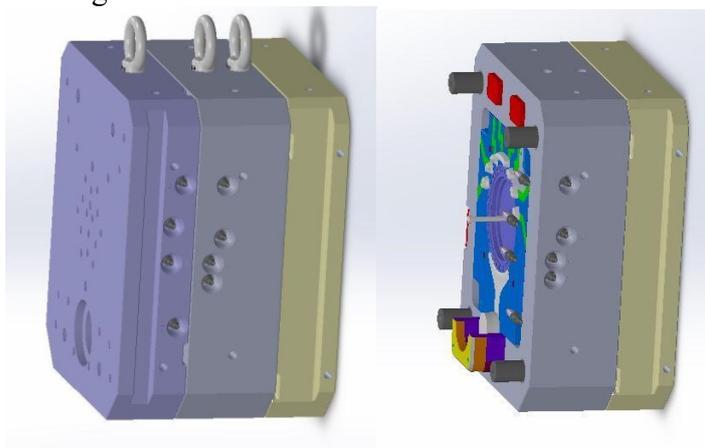
Também se participou de workshops, palestras, encontros e reuniões sobre o assunto com parceiros do projeto. Por fim, conversas foram realizadas com as equipes da Altair e da MAGMA Engenharia do Brasil Ltda. para buscar um melhor entendimento sobre moldes de injeção de alumínio no contexto de simulações computacionais.

3.3. CRIAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL

Com base na revisão realizada na etapa anterior foram definidas as variáveis que influenciam nas deformações dos componentes de moldes de injeção de alumínio. São elas: geometria e dimensões dos componentes do molde; força de fechamento; pressão de intensificação; e estado de temperaturas (AHUETT-GARZA; HEDGE; MILLER, 1995). Estas variáveis devem, portanto, estar presentes no modelo utilizado nas simulações. Enquanto o atrito na superfície de fechamento pode ter algum efeito nas deformações, sua contribuição é muito pequena em comparação com as variáveis citadas, sendo, então, desconsiderada (BARONE; CAULK, 1999).

A geometria utilizada foi concedida pela Gama Indústria de Matrizes Ltda. O molde, foi selecionado por ser considerado pela empresa mais simples, com apenas uma cavidade e sem gavetas, diminuindo o grau de complexidade da análise. O molde foi modelado na ferramenta SolidWorks® e os arquivos foram exportados em formato Parasolid (.x_t). Além do modelo geométrico do molde, o arquivo incluía o modelo das placas da máquina injetora utilizada. Como já mencionado, os parâmetros do processo de injeção também foram disponibilizados pela empresa. Na Figura 11 se encontra o modelo CAD utilizado.

Figura 11 - Modelo CAD do molde de estudo.



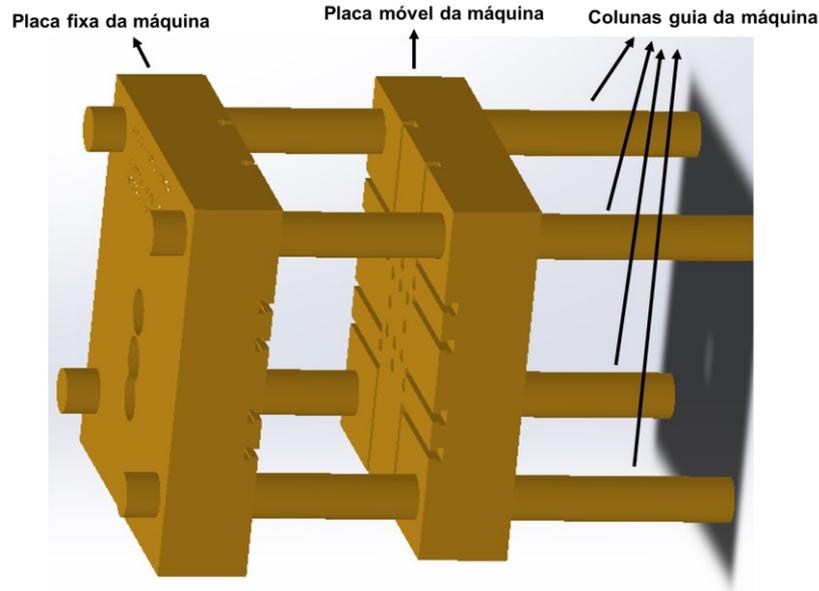
Fonte: Gama Indústria de Matrizes (2023)

Uma simplificação aplicada ao modelo, levando em consideração que se trata de uma análise estrutural, foi a remoção de componentes do modelo com baixo impacto na integridade estrutural do conjunto. Isso é importante para reduzir a complexidade do modelo e, conseqüentemente, o tempo computacional para a solução das simulações e possíveis fontes de erros. Após a simplificação, o modelo manteve os seguintes componentes:

- Placas da máquina
- Colunas guia da máquina
- Suporte superior
- Suporte inferior
- Calço
- Bloco do macho
- Bloco da cavidade
- Pilares
- Reforços do fechamento
- Contrapistão
- Conjunto da coluna principal

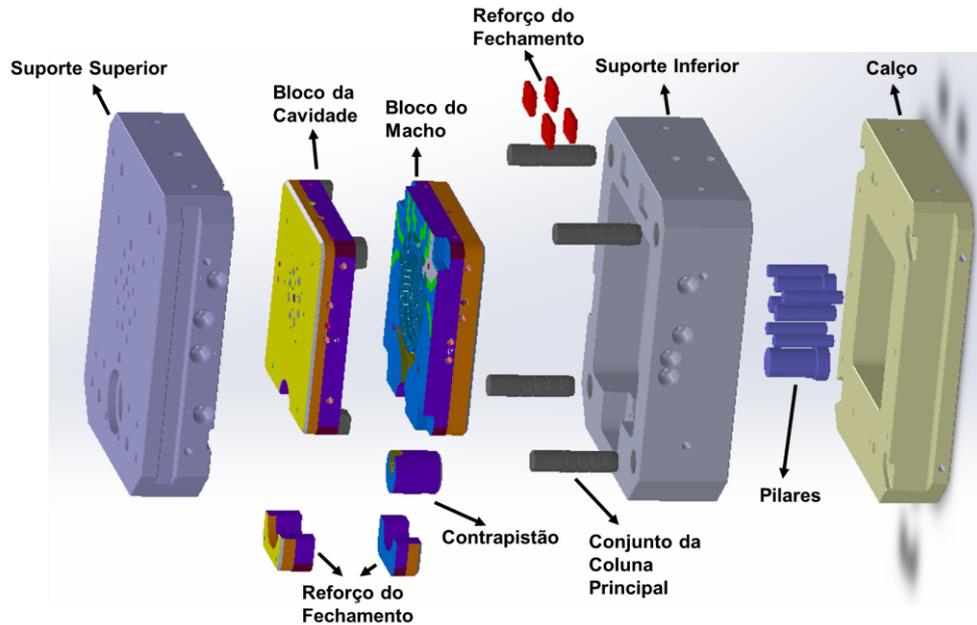
As Figuras 12 e 13 mostram os componentes listados no modelo geométrico.

Figura 12 - Componentes da máquina de injeção presentes no modelo.



Fonte: o autor (2024)

Figura 13 - Componentes do molde presentes no modelo geométrico.



Fonte: o autor (2024)

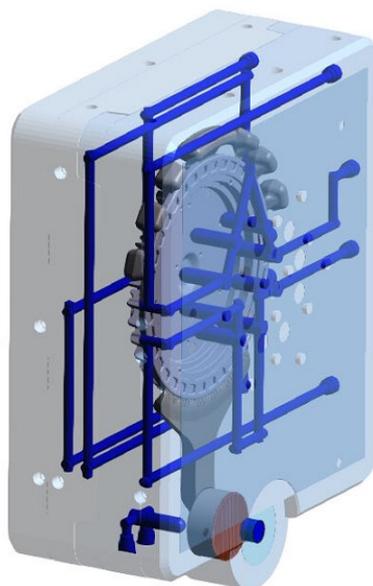
Foi atribuído, aos blocos do macho e da cavidade e ao contra pistão, o material AISI H13 e ao restante o aço AISI P20. Levando em consideração que o modelo assume deformações dentro do limite elástico, as propriedades mais relevantes para as simulações são o módulo de elasticidade e o coeficiente de expansão térmica. O H13, conforme consultado no MATWEB (2023), possui um módulo de elasticidade de 210 GPa e um coeficiente de expansão térmica de $12,4 \mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ para uma faixa de temperaturas de 25 a 540°C . O aço P20 apresenta um módulo

de elasticidade de 190 a 210 GPa e um coeficiente de expansão térmica de $12,8 \mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ para uma faixa de temperaturas de 20 a 425°C (AZO Materials, 2023).

O estado de temperaturas utilizado nas simulações foi obtido através da simulação do processo, realizada pela Gama Indústria de Matrizes Ltda., utilizando o MAGMASOFT. Através de uma simulação completa do ciclo de injeção, o estado (ou distribuição) de temperaturas nos blocos do macho e cavidade foram obtidos para diversos instantes da injeção do ciclo de injeção. Esse conjunto de pontos de temperaturas foi exportado por meio do MAGMALink, no instante de tempo que apresenta as maiores solicitações no molde, para uma malha de elementos finitos.

Na Figura 14 são apresentados os componentes cujo estado de temperaturas foi obtido através do MAGMASOFT e exportado utilizando MAGMALink, o bloco do macho, o bloco da cavidade e o contrapistão. Os demais componentes tiveram seu estado de temperaturas simplificado para a temperatura de trabalho do molde de 180°C . Essa é uma simplificação importante, mas justificada pelo fato de os gradientes térmicos mais intensos estarem normalmente localizados nos componentes em contato direto com o alumínio, não nos suportes.

Figura 14 - Componentes cujos estados de temperaturas foram obtidos através de simulação do ciclo de injeção no MAGMASOFT.



Fonte: MAGMASOFT (2023)

O instante de tempo utilizado neste trabalho foi o final da solidificação do alumínio dentro da cavidade, logo antes do *gate* ser bloqueado por alumínio solidificado. Para o molde estudado, o momento do ciclo em que o molde está exposto às suas maiores solicitações é o instante em que a pressão de intensificação ainda está sendo aplicada, porém grande parte do

calor do alumínio fundido já foi transferido para o molde, trazendo um gradiente térmico mais agressivo para os componentes.

Para o molde estudado, a pressão de intensificação é maior do que a pressão de impacto trazida pela desaceleração súbita do alumínio fundido ao final do preenchimento. Desta maneira, a combinação da pressão de intensificação, da força de fechamento e da deformação causada pelo gradiente de temperaturas se apresenta como o momento em que o molde sofre as maiores solicitações.

A pressão e força de fechamento utilizadas nas simulações foram fornecidas pela empresa Gama Indústria de Matrizes Ltda. Estes e outros parâmetros são utilizados no fluxo de projeto do molde da matrizaria, e são essenciais para a simulação do processo no MAGMASOFT. A pressão específica de intensificação utilizada foi de 600 bar (ou 60 MPa), e a força de fechamento foi de 431 toneladas (ou de aproximadamente $4,31 \cdot 10^6$ N). No Quadro 5 são apresentados os parâmetros utilizados.

Quadro 5 - Parâmetros de injeção utilizados neste trabalho.

Parâmetro	Valor
Pressão específica	600 bar (60 MPa)
Área projetada	652 cm ²
Força de fechamento	431 Ton. (4310 kN)
Tempo de enchimento	56,29 ms

Fonte: adaptado de Gama Indústria de Matrizes Ltda. (2023)

Uma vez que o modelo inicial, as solicitações e as condições de contorno foram estabelecidas, três métodos de análise diferentes foram definidos por esse trabalho, chamamos de MEF, MAEEF e o método analítico (MENGES, 2001). O modelo conceitual foi adaptado para as particularidades de cada método, conforme detalhado nas próximas sessões

Devido ao amplo uso do MEF para cálculos estruturais tanto na literatura quanto na indústria, utiliza-se os resultados obtidos através deste como termo de comparação. Ou seja, os deslocamentos obtidos através do cálculo analítico e do MAEEF são comparados com os resultados obtidos através do MEF. Caso as deformações encontradas sejam coerentes com as obtidas por MEF, entende-se que os dois métodos demonstram ser adequados. O modelamento em MEF para moldes de injeção de alumínio é descrito em detalhes por Kabiri-Bamoradian (2010).

3.4. ETAPAS DE SIMULAÇÃO

Uma vez que o modelo conceitual foi adaptado para os três métodos utilizados, um ciclo de pré-teste de simulação e refinamento dos modelos de estudo foi realizado. Para cada método a simulação foi realizada e baseada em erros, tempo computacional e resultados, o modelo de estudo foi modificado e atualizado para produzir melhores resultados. O pré-processamento de cada método se encontra detalhado nas próximas seções, separando por método.

3.4.1. Método dos Elementos Finitos - MEF

O pré-processamento para o MEF foi realizado no software SimLab, da Altair. A partir da geometria, a discretização do modelo foi realizada em duas partes: malha superficial e malha tridimensional.

Na discretização da superfície dos componentes em uma malha de elementos finitos, utilizou-se elementos do tipo TRI-3, ou seja, triângulos com três nós. Estes elementos apresentam baixa precisão quando utilizados para a simulação, dado o baixo número de nós. Porém, como aqui foram utilizados apenas em uma etapa intermediária entre a geometria e a malha tridimensional, a precisão na solução não necessita consideração.

A função desta etapa é transformar o modelo geométrico em um modelo de elementos finitos de casca que pode ser simplificado com maior facilidade com as ferramentas do software. Além disso, a discretização da superfície permite que o modelo posteriormente seja adaptado para uma malha tridimensional. Uma das vantagens da malha de elementos triangulares em relação a elementos quadráticos é a facilidade de ajustá-la a geometrias complexas utilizando ferramentas automáticas.

3.4.1.1. Testes iniciais

Após a criação da malha de superfície, algumas simplificações foram feitas para reduzir o tempo computacional da simulação. Detalhes não importantes para a análise estrutural foram removidos, bem como a maior parte dos furos presentes nos componentes. É importante notar que os furos, como concentradores de tensão, podem ter uma influência significativa no resultado da simulação. Por este motivo, foram realizadas simulações teste com e sem furos para malhas com diferentes tamanhos médios de elementos. Nestas simulações foram comparados os deslocamentos mínimo e máximo na área central do modelo (blocos do macho e cavidade) e o tempo computacional. Apenas a pressão de intensificação e a força de

fechamento foram aplicados, e apenas o macho e a cavidade foram utilizados. O Quadro 6 apresenta as variações nas simulações, e os resultados encontrados.

Quadro 6 - Testes iniciais de tamanho de malha e uso/remoção de furos para a malha de elementos finitos, apenas com os efeitos mecânicos aplicados nos blocos do macho e cavidade.

Teste de malha #	Tamanho médio do elemento [mm]	Furos	Deslocamento mínimo/máximo [mm]	Tempo de simulação
Teste 1	5	Sim	0,51/0,70	1440 min
Teste 2	15	Sim	0,53/0,65	15 min
Teste 3	10	Sim	0,53/0,66	44 min
Teste 4	10	Não	0,51/0,63	30 min
Teste 5	10 e 7	Sim	0,54/0,66	60 min
Teste 6	10 e 7	Não	0,52/0,63	44 min

Fonte: o autor (2024)

É possível notar que os modelos sem furos, comparados com malhas do mesmo tamanho médio, apresentam deslocamentos menores e menor tempo computacional. Isso é esperado, pois a remoção dos furos significa a remoção de concentradores de tensão e a adição de massa aos componentes. Também significa a redução da complexidade da malha. A redução dos deslocamentos neste caso foi de aproximadamente 4%, e a redução de tempo foi entre 26 e 32%.

A combinação de tamanho médio de elementos e simplificação também levou em consideração a maior quantidade de erros encontrados em simulações em que os furos não são removidos, bem como a necessidade de maior refino dos elementos próximos aos mesmos. Decidiu-se que, dado à diferença relativamente pequena nas deformações encontradas, a remoção dos furos é justificada pela maior facilidade e consistência na realização das múltiplas simulações planejadas.

3.4.1.2. Simulação do modelo completo

Novas simulações-teste foram realizadas, desta vez com o modelo completo, para identificar um tamanho médio de elementos para cada componente, levando em consideração tempo computacional e qualidade de malha de acordo com a ferramenta de verificação de qualidade do SimLab. Os valores utilizados se encontram no Quadro 7.

Quadro 7 - Tamanho médio do elemento da malha de elementos finitos, por componente.

Componentes	Tamanho médio do elemento
Placas e colunas guia da máquina	25 mm
Suportes, calço e reforços do fechamento	20 mm
Blocos do macho e cavidade e pilares	15 mm
Macho e Cavidade	5 mm

Fonte: o autor (2024)

As superfícies do macho e cavidade que fazem interface com o alumínio, por possuírem geometrias mais complexas, exigem uma malha mais refinada. Os outros componentes, porém, com a remoção dos furos, não exigem um nível de refino tão elevado, permitindo a utilização de elementos maiores, reduzindo o tempo computacional da simulação.

A qualidade da malha foi testada através da ferramenta automática do software de teste de qualidade, que compara índices de qualidade de malha com critérios pré-definidos. Os índices *Aspect Ratio* e *Skew* foram os utilizados para os elementos bi-dimensionais, e para os tri-dimensionais foram utilizados Tet Collapse, Skew, Aspect Ratio e Volume, todos explicados na seção 2.6.1.

Após discretizado o domínio, foram adicionados os contatos entre os componentes. No SimLab o reconhecimento de contatos é uma operação automática, que identifica superfícies que se tocam com uma tolerância selecionada. A tolerância utilizada neste trabalho foi de 0,1 mm. Todos os contatos do modelo, com exceção de quatro, foram configurados como *Slide*, ou seja, é considerado que a superfície de um componente pode deslizar sobre a superfície do outro. Os quatro contatos que não são *Slide* são entre a placa fixa e a coluna guia da máquina. Estes foram configurados como *Stick*, não permitindo movimento relativo entre as superfícies. Para restringir o movimento do modelo no espaço, os finais de cada coluna guia foram considerados como engastados.

As conexões realizadas por parafusos e fixadores foram representadas utilizando conectores virtuais MPC. Estes conectores restringem movimentos entre os nós dependentes e independentes, evitando deslocamentos relativos entre eles, mas permitindo deslocamentos globais.

Como mencionado anteriormente, os esforços mecânicos utilizados são uma pressão de intensificação de 60 MPa, aplicado às superfícies do macho e cavidade em contato com o metal

fundido, e uma força de fechamento de 4310 kN distribuída entre quatro áreas da superfície da placa móvel, representando os locais de aplicação desta força em máquinas de injeção.

Adicionalmente, foi sobreposto a esta malha os resultados de temperaturas obtidos na simulação do MAGMASOFT através do MAGMALink. Esta sobreposição atribui valores de temperatura aos nós da malha de elementos finitos, e estes valores podem ser então importados diretamente ao SimLab como arquivos .csv. Para os componentes cuja temperatura não foi obtida em simulação do MAGMASOFT, foi atribuída uma temperatura de trabalho de 180 °C. Isso é possível pois o gradiente de temperaturas que tende a causar maiores deformações se concentra nos componentes que fazem contato diretamente com o alumínio fundido. Os suportes, calços e componentes da máquina não sofrem variações tão intensas de temperaturas, sendo neste trabalho simplificados para uma temperatura de trabalho constante.

3.4.2. Método da Aproximação Externa por Elementos Finitos - MAEEF

O pré-processamento e simulação do modelo pelo MAEEF é feito no software SimSolid. O modelo CAD fornecido pela Gama Indústria de Matrizes Ltda foi importado diretamente para o programa. Grandes simplificações do modelo, como a remoção dos furos, não foram necessárias, pois não apresentaram diminuições consideráveis no tempo de simulação e não foi demonstrado maior consistência de resultado com tais simplificações.

O SimSolid realiza uma identificação de contatos automática, com base em valores de tolerância dados para separações e penetrações, e o nível de resolução das conexões. As conexões geradas pela identificação automática foram revisadas e ajustadas de acordo com a necessidade. Quatro tipos de conexões foram utilizadas neste modelo: *Separating*, *Separating/closing*, *Sliding* e *Bonded*. Destas, as conexões *Separating* e *Separating/closing* foram as mais utilizadas. Utilizou-se quando há contato com possibilidade de separação devido a deslocamentos, ou quando há uma possibilidade de contato causado pelos deslocamentos.

Sliding representa um deslizamento sem fricção, e foi utilizado em superfícies em que se espera movimento relativo paralelo entre elas. Não considerar a fricção é uma simplificação que ajuda na obtenção de resultados mais consistentes e evitar erros durante a simulação. Por fim, contatos do tipo *Bonded* representam conexões físicas sem movimento relativo entre duas superfícies. Foi utilizado para representar a ação de parafusos e fixadores, além de fixar a placa fixa às colunas guia da máquina.

Uma vez ajustadas as conexões do modelo, foi realizada uma análise estrutural não linear, na qual a não-linearidade vem dos contatos do tipo *Separating* e *Separating/closing*. O

nível de refinamento foi ajustado para ‘aumentado’ apenas nas superfícies da cavidade e do macho, e foi utilizado o nível ‘padrão’ para o resto do modelo. O aumento no refino das superfícies de geometria mais complexa do modelo demonstrou prover resultados mais consistentes nos testes realizados, enquanto não houve muita diferença com o mesmo nível de refino em outros componentes.

As solicitações mecânicas aplicadas são as mesmas utilizadas no SimLab: uma pressão de intensificação de 60 MPa aplicada na superfície do macho e cavidade, e uma força de fechamento de 4310 kN distribuída entre quatro áreas da superfície da placa móvel. As pontas das quatro colunas guia da máquina foram consideradas como engastadas.

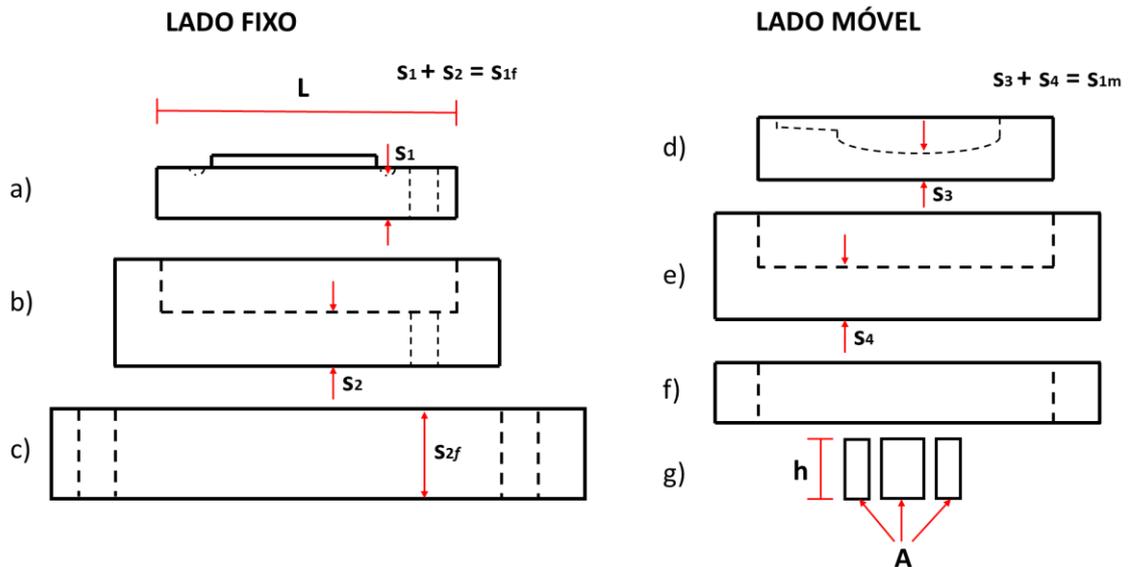
O perfil de temperaturas não pode ser importado diretamente através do MAGMAlink, pois o método não faz uso de malha com nós. Desta forma, as temperaturas foram inseridas manualmente nas superfícies dos blocos do macho e cavidade e, a partir destas, foi realizada uma análise térmica, simulando a transmissão da temperatura internamente e para os outros componentes. Os resultados da análise térmica foram ligados à análise estrutural, representando a solicitação termomecânica causada pelo gradiente térmico.

3.4.3. Método analítico - An

Por fim, utilizou-se o método analítico descrito por Menges *et al.* (2001) e explicado na seção 2.4.1. Os pares de componentes do lado fixo e lado móvel foram simplificados em formas características, cujos deslocamentos são facilmente obtidos através de equações descritas na literatura. Uma vez calculados os deslocamentos de cada forma simplificada, utilizou-se o princípio da sobreposição para calcular o deslocamento equivalente. Este método exige grandes simplificações e não leva em consideração muitas complexidades geométricas do molde. Além disso, o método não contabiliza o efeito da temperatura nas deformações do molde.

Diferentemente dos outros métodos utilizados, as deformações encontradas não são correspondentes a apenas um componente do molde, mas sim a um conjunto de componentes. O molde foi dividido em dois conjuntos para este fim: conjunto do lado fixo, e conjunto do lado móvel. No conjunto do lado fixo estão o bloco da cavidade, o suporte superior e a placa fixa da máquina injetora. No conjunto do lado móvel, o bloco do macho, o suporte inferior, o calço e os pilares. A Figura 15 ilustra os componentes contidos em cada conjunto.

Figura 15 - Componentes dos conjuntos do lado fixo e lado móvel, com dimensões utilizadas nos cálculos de deformação. Os componentes são: a) Bloco da cavidade b) Suporte fixo c) Placa fixa da máquina injetora d) Bloco do macho e) Suporte inferior f) Calço g) Pilares



Fonte: o autor (2024)

Para o conjunto do lado fixo, o cálculo foi realizado considerando o bloco do macho e o suporte superior como um único componente com a espessura combinada de ambos. Esta escolha foi realizada pois o bloco do macho é firmemente conectado ao suporte superior com o uso de parafusos e conectores, fazendo com que exista pouco movimento relativo entre os dois (MENGES *et al*, 2001). Para fins de simplificação de cálculo, esta união foi considerada como uma viga bi-engastada devido às condições de restrição de movimento e rotação nas extremidades proporcionada pelas braçadeiras que fixam o suporte superior à placa fixa da máquina injetora. Nestas condições, a Equação 13 foi utilizada para o cálculo da máxima deformação nestes componentes (NETO, 2000).

$$y_{1f} = \frac{12PL^4}{384Es_{1f}^3} + \frac{2,66PL^2}{8Es_{1f}} * 1,2 \quad (13)$$

Onde y_1 é o deslocamento máximo em mm destes componentes, o sufixo f denota o lado fixo, P é a pressão em MPa aplicada na cavidade, L é o comprimento em mm do maior lado dos suportes, E é o módulo de Young em MPa e s_1 é a espessura em mm combinada do bloco da cavidade e do suporte superior. Utilizou-se a menor espessura de fundo em todos os componentes.

A deformação destes componentes é, porém, afetada pela sua conexão com a placa fixa da máquina injetora. Na analogia das molas proposta por Menges *et al.* (2001), pode-se considerar que a placa fixa da máquina injetora atua em paralelo com o bloco da cavidade e o

suporte superior. Calcula-se, portanto, a deformação sofrida pela placa fixa da máquina injetora com a Equação 14 (NETO, 2001).

$$y_{2f} = \frac{12PL^4}{1138Es_{2f}^3} + \frac{2,66PL^2}{16Es_{2f}} * 1,2 \quad (14)$$

Onde y_2 é o deslocamento máximo em mm da placa fixa da máquina injetora, s_2 é sua espessura em mm e L é o maior comprimento em mm entre duas barras guia da máquina injetora.

O efeito combinado destas duas deformações é calculado através do princípio da superposição, levando em consideração que todas as deformações são consideradas elásticas (MENGES *et al*, 2001; NETO, 2001). O cálculo do deslocamento total é dado pela Equação 15 (NETO, 2001).

$$y_f = \left(\frac{1}{y_{1f}} + \frac{1}{y_{2f}} \right)^{-1} \quad (15)$$

De forma similar, o conjunto do lado móvel combina o bloco do macho e o suporte inferior como um só componente para fins de cálculo das deformações, e os representa como uma placa apoiada pelos quatro lados, de modo a representar o efeito do suporte ser suportado nos quatro lados pelo calço. Utiliza-se a Equação 16, que é igual a Equação 14, porém aplicada aos componentes do lado móvel (NETO, 2001).

$$y_{1m} = \frac{12PL^4}{1138Es_{1m}^3} + \frac{2,66PL^2}{16Es_{1m}} * 1,2 \quad (16)$$

Onde o sufixo m representa os componentes do lado móvel.

O lado móvel difere do fixo em que a deformação do fundo dos seus componentes não é diretamente afetada pela placa móvel da máquina injetora devido à presença do vão atrás do suporte inferior. Em seu lugar, pilares são posicionados para mitigar os efeitos da pressão nas deformações dos componentes do lado móvel. Estes pilares estão sob compressão e, através da analogia das molas, podem ser consideradas como molas em paralelo com o bloco do macho e suporte inferior. A deformação destes pilares é calculada através da Equação 17 (MENGES, 2001).

$$y_{2m} = \frac{Fh}{2AE} \quad (17)$$

Onde F é a força causada pela pressão aplicada na cavidade (Equação 2), A é a área combinada das seções dos pilares e h é sua altura. Esta também é uma simplificação, já que não leva em consideração o posicionamento destes pilares.

Com os deslocamentos calculados, utiliza-se a Equação 18 para calcular o máximo deslocamento total destes componentes dada a influência de uns sobre os outros.

$$y_m = \left(\frac{1}{y_{m1}} + \frac{1}{y_{m2}} \right)^{-1} \quad (18)$$

3.5. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Após realizadas as simulações-teste, foi elaborado o planejamento dos experimentos. As simulações realizadas contribuíram para a elucidação das seguintes questões:

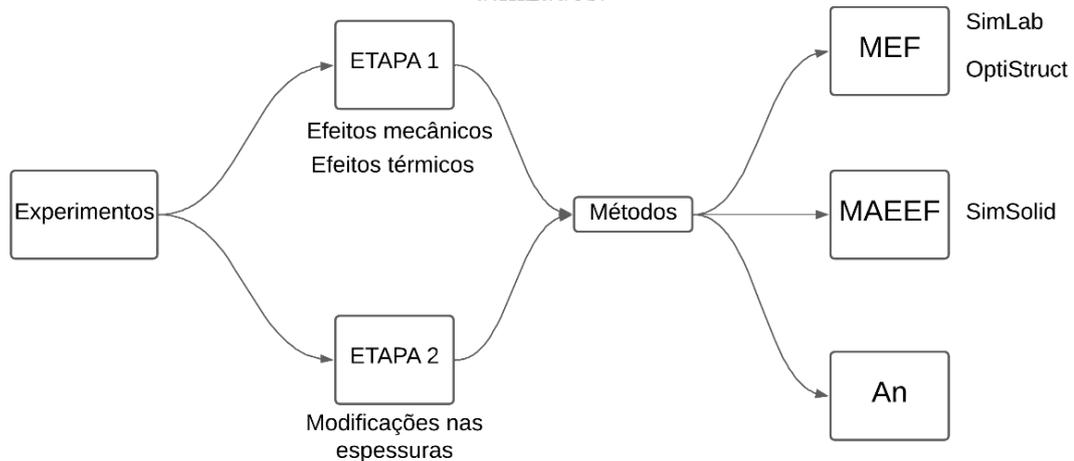
- a) Qual é o grau de influência dos esforços mecânicos comparado aos esforços térmicos nas deformações dos componentes do molde?
- b) Como os métodos utilizados se comparam uns aos outros em relação aos resultados encontrados pelas análises estruturais?
- c) Quanto alterações nas espessuras de determinados componentes influenciam nas deformações dos mesmos, e de outros componentes do molde?

Baseando-se nestas perguntas, foi planejado um conjunto de análises utilizando os três métodos de análise citados na seção 3.4, conforme demonstrado na Figura 16, dividido em duas etapas:

Etapa 1 – consiste em utilizar o modelo original do molde, sem alterações em suas dimensões, para realizar simulações que contemplam apenas os esforços mecânicos, apenas os esforços térmicos ou uma combinação de ambos. Responde às perguntas a) e b);

Etapa 2 – utiliza modelos do molde com modificações nas espessuras de fundo de componentes estruturais, buscando entender sua influência nas deformações do molde. Responde à pergunta c).

Figura 16 - Organização dos experimentos, divididos por Etapas e Métodos, e os softwares utilizados.



Fonte: o autor (2024)

Com relação a Etapa 1 se pode comparar qualitativamente o grau da influência dos esforços aplicados ao molde. Também foi possível uma comparação inicial dos resultados obtidos através dos três métodos. O Quadro 8 descreve as análises realizadas nesta primeira etapa.

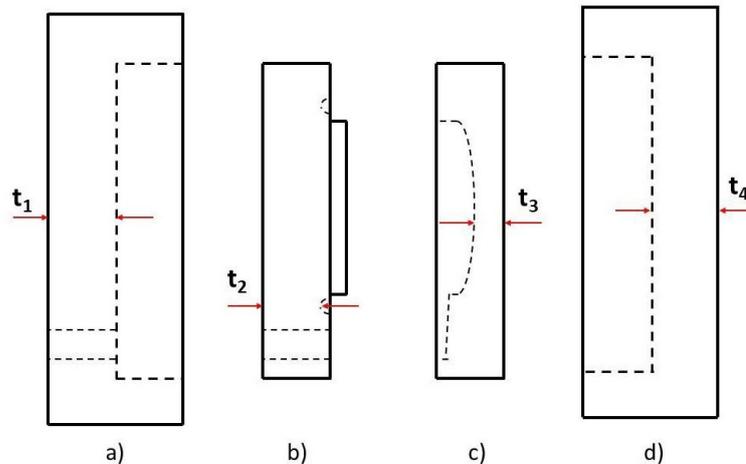
Quadro 8 - Planejamento dos experimentos da Etapa 1.

Tipo de Análise	MEF	MAEEF	Analítico
Mecânico	MEF 1.1	MAEEF 1.1	An 1.1
Térmico	MEF 1.2	-	-
Termomecânico	MEF 1.3	MAEEF 1.2	-

Fonte: o autor (2024)

Se utilizaram análises que combinam os esforços térmicos aos mecânicos, referidas aqui como análises termomecânicas, para os métodos computacionais, e análises puramente mecânicas para o método analítico. O modelo foi alterado com a redução das espessuras do fundo de caixa de alguns componentes, nominalmente o suporte inferior, o suporte superior, o bloco do macho e o bloco da cavidade. Estas alterações compreendem duas reduções de espessuras para cada suporte, e uma alteração em cada bloco, totalizando três configurações para cada suporte e duas configurações para cada bloco, incluindo as dimensões originais. A Figura 17 mostra as espessuras alteradas em cada componente.

Figura 17 - Espessuras alteradas nos experimentos realizados. t_1 , t_2 , t_3 e t_4 são as espessuras de fundo do suporte superior, do bloco da cavidade, do bloco do macho e do suporte inferior, respectivamente.



Fonte: o autor (2024)

Para os suportes superior e inferior Figura 17 a) e d) respectivamente, a espessura variada é a espessura de fundo de caixa. Para os blocos do macho e cavidade Figura 17 b) e c), a espessura variada corresponde à menor distância perpendicular entre a superfície que tem contato com o alumínio e a superfície oposta, que faz contato com os suportes.

Importante ressaltar, quanto a nomenclatura dos componentes, optou-se por utilizar os nomes conforme dispostos no modelo CAD fornecido pela Gama Matriz. Entende-se que, usualmente, macho se refere ao inserto que confere a geometria interna da peça injetada, que normalmente fica no lado móvel do molde. Enquanto isso, se chama de cavidade a superfície que confere a geometria externa da peça, que fica geralmente no lado fixo do molde. No molde de estudo utilizado, particularmente, a parte que confere a geometria interna do molde fica no lado fixo, e vice-versa. Escolheu-se então seguir o padrão de: cavidade no lado fixo, macho no lado móvel, pois este padrão concorda com os nomes dos componentes nos arquivos CAD.

Para cada método de análise, uma análise estrutural foi realizada contemplando a alteração de um único componente. Além disso, análises foram realizadas com as alterações combinadas do suporte inferior e do bloco do macho. Estas foram as únicas combinações realizadas pois entende-se que, devido a presença de um vão no lado móvel do molde, as deformações nestes componentes tendem a ser maiores, sendo, portanto, de interesse avaliar com mais atenção a redução da espessura dos componentes do lado móvel. No Quadro 9 se encontra o planejamento dos experimentos da Etapa 2, onde a primeira coluna apresenta o número do experimento e a segunda coluna a alteração nas dimensões do molde, conforme Figura 17.

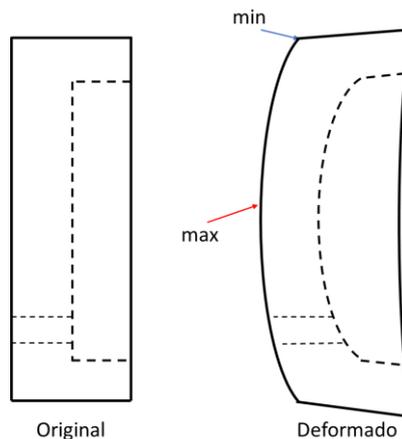
Quadro 9 - Planejamento dos experimentos da Etapa 2.

Experimento	Alteração	MEF	MAEEF	Análítico
Ref	Original	MEF 1.3	MAEEF 1.2	An 1.1
1	$t_1 = 60$ mm	MEF 2.1	MAEEF 2.1	An 2.1
2	$t_1 = 40$ mm	MEF 2.2	MAEEF 2.2	An 2.2
3	$t_4 = 75$ mm	MEF 2.3	MAEEF 2.3	An 2.3
4	$t_4 = 50$ mm	MEF 2.4	MAEEF 2.4	An 2.4
5	$t_3 = 44$ mm	MEF 2.5	MAEEF 2.5	An 2.5
6	$t_2 = 48$ mm	MEF 2.6	MAEEF 2.6	An 2.6
7	$t_4 = 75$ mm e $t_3 = 44$ mm	MEF 2.7	MAEEF 2.7	An 2.7
8	$t_4 = 50$ mm e $t_3 = 44$ mm	MEF 2.8	MAEEF 2.8	An 2.8

Fonte: o autor (2024)

Em cada experimento, os resultados utilizados para comparação são a diferença entre o maior e o menor deslocamentos horizontais obtidos na face do fundo dos suportes superior e inferior, e dos blocos do macho e cavidade. Os deslocamentos são medidos apenas na direção de abertura do molde, sendo o sentido lado móvel ao lado fixo considerado um deslocamento positivo, e o sentido inverso é considerado negativo. A obtenção dos valores comparados é demonstrada na Figura 18.

Figura 18 - Geometria original à esquerda e indicação dos pontos de maior e menor deslocamento na geometria deformada à direita.



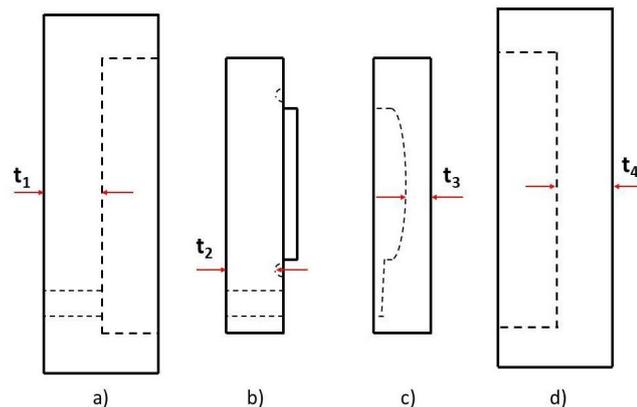
Fonte: o autor (2024)

4. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Esta seção apresenta os resultados dos experimentos descritos nas Seções 3.4 e 3.5. A denominação dos experimentos segue o seguinte padrão: [Método] [Etapa].[Número do experimento]. Desta forma, o experimento MEF 1.2 se refere ao segundo experimento realizado utilizando o Método dos Elementos Finitos na Etapa 1, enquanto o MAEEF 2.6 se refere ao sexto experimento realizado utilizando o Método da Aproximação Externa por Elementos Finitos na Etapa 2. Experimentos com o mesmo número e etapa sempre utilizam a mesma geometria dos componentes.

É conveniente utilizar novamente a Figura 17, aqui denominada Figura 19, em conjunto com o Quadro 10, para demonstrar as diferenças geométricas entre cada experimento.

Figura 19 - Espessuras alteradas nos experimentos realizados. t_1 , t_2 , t_3 e t_4 são as espessuras de fundo do suporte superior, do bloco da cavidade, do bloco do macho e do suporte inferior, respectivamente.



Fonte: o autor (2024)

(continua)

Quadro 10 - Valores das espessuras correspondentes à Figura 19 para cada experimento.

Etapa.Experimento	t_1 [mm]	t_2 [mm]	t_3 [mm]	t_4 [mm]
1.1	80,00	78,20	64,54	100,25
1.2	80,00	78,20	64,54	100,25
1.3	80,00	78,20	64,54	100,25
2.1	60,00(*)	78,20	64,54	100,25
2.2	40,00(*)	78,20	64,54	100,25
2.3	80,00	78,20	64,54	75,00(*)
2.4	80,00	78,20	64,54	50,00(*)
2.5	80,00	78,20	44,00(*)	100,25
2.6	80,00	48,00(*)	64,54	100,25

(conclusão)

2.7	80,00	78,20	44,00(*)	75,00(*)
2.8	80,00	78,20	44,00(*)	50,00(*)

Fonte: o autor (2024)

* Espessura modificada

4.1. EXPERIMENTOS DA ETAPA 1

Os experimentos da Etapa 1 buscam a comparação entre os três métodos de análise empregados (MEF, MAEEF e Método Analítico) nas condições geométricas e de contorno do molde original, conforme cedidas pela Gama Indústria de Matrizes Ltda. Também se buscou o entendimento do efeito das solicitações mecânicas e térmicas, separadamente e em conjunto, nas deformações dos moldes de injeção.

Os valores utilizados para as comparações vêm da diferença entre o maior e menor deslocamento sofrido pelos seguintes componentes: suporte superior, suporte inferior, bloco da cavidade e bloco do macho. Estruturalmente, estes são os componentes do molde onde espera-se mais significativas deformações.

4.1.1. Método dos Elementos Finitos

Conforme descrito na Seção 3.5, a Etapa 1 dos experimentos consistiu na avaliação dos efeitos térmicos e mecânicos, separadamente e também juntos, assim como uma comparação inicial entre os métodos de análise propostos.

Quadro 11 - Deslocamentos dos componentes do molde obtidas nos experimentos da Etapa 1, com o Método dos Elementos Finitos.

Experimento	Suporte Superior [mm]	Bloco Cavidade [mm]	Bloco Macho [mm]	Suporte Inferior [mm]
MEF 1.1	0,221	0,174	0,170	0,164
MEF 1.2	0,240	0,086	0,185	0,301
MEF 1.3	0,117	0,055	0,162	0,173

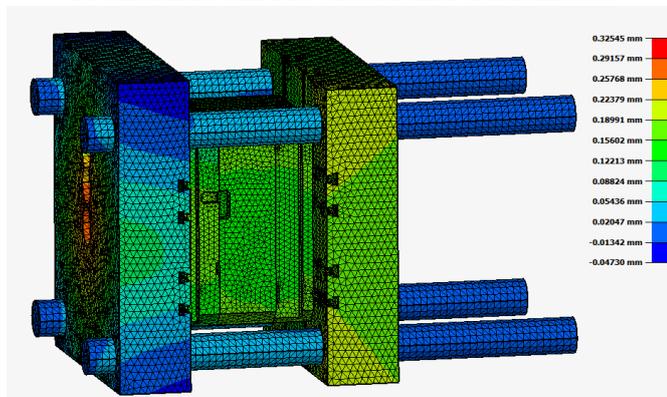
Fonte: o autor (2024)

MEF 1.1 se refere à simulação contendo apenas solicitações mecânicas, MEF 1.2 se refere à simulação contendo apenas solicitações térmicas, e por fim MEF 1.3 contém solicitações térmicas e mecânicas atuando em conjunto.

A simulação mecânica realizada para o experimento MEF 1.1 utilizou 547273 elementos tetraédricos de dez nós e foi realizada em aproximadamente 6 horas e 10 minutos.

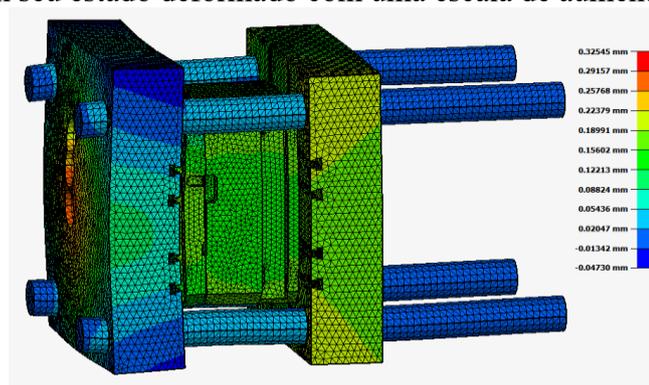
Os valores mínimo e máximo de deslocamentos no eixo normal à superfície de fechamento são de $-0,047$ mm e $0,325$ mm, respectivamente. Os deslocamentos dos componentes estudados, calculados de acordo com o descrito na Seção 3.5, se encontram no Quadro 11. A Figura 20 mostra a malha não deformada do modelo completo com os resultados, e a Figura 21 mostra a mesma malha, porém com a deformação aplicada em uma escala de aumento de 200 vezes. Todas as figuras deste capítulo que apresentam os resultados das simulações de deformação têm como padrão uma deformação positiva para esquerda, em cores quentes, e uma deformação negativa para a direita, em cores frias.

Figura 20 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MEF 1.1 (solicitações puramente mecânicas). A representação da malha se encontra em seu estado não deformado.



Fonte: o autor (2024)

Figura 21 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MEF 1.1 (solicitações puramente mecânicas). A representação da malha se encontra em seu estado deformado com uma escala de aumento de 200 vezes.



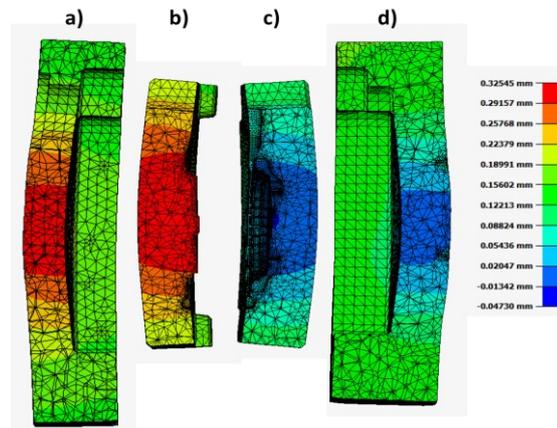
Fonte: o autor (2024)

A Figura 22 apresenta os componentes cujas deformações foram avaliadas - suporte superior, bloco da cavidade, bloco do macho e suporte inferior - deformados em uma escala de aumento de 200 vezes, para melhor visualização de como a deformação ocorre nestes componentes. Se trata de uma vista lateral em corte, utilizando como plano de corte o plano que

divide o menor lado das placas ao meio, possibilitando a visualização da parte central dos componentes.

A forma da deformação ocorrida no MEF 1.1 é condizente com a aplicação da pressão de intensificação na cavidade. Os componentes dos dois lados do molde sofrem flexão no sentido de abertura do molde.

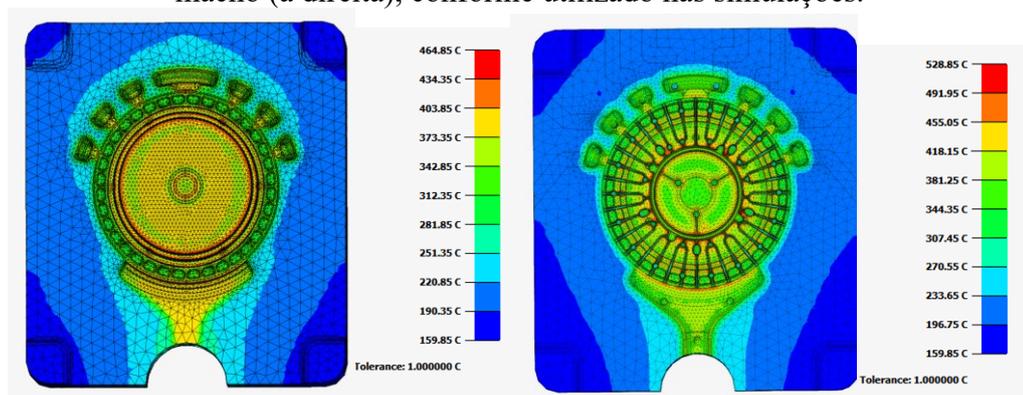
Figura 22 - Visualização deformada e em corte dos componentes estruturais do molde em uma escala de aumento de 200 vezes para o experimento MEF 1.1. São estes componentes: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.



Fonte: o autor (2024)

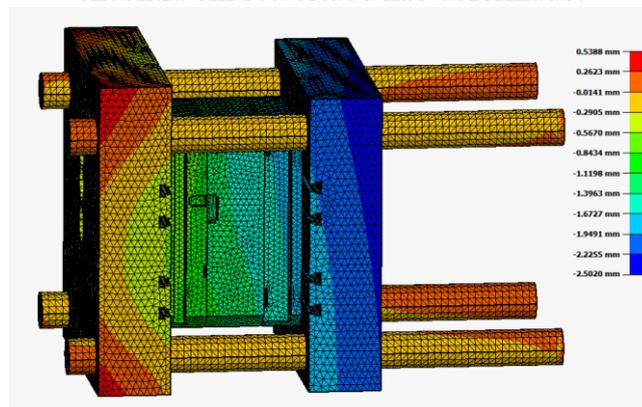
A simulação térmica do experimento MEF 1.2 utilizou o mesmo número de elementos tetraédricos de dez nós, 547273 elementos. A simulação foi completada em 2 horas e 52 minutos. Os deslocamentos mínimos e máximos encontrados são de -2,502 mm e 0,539 mm, respectivamente. A Figura 23 mostra os perfis de temperaturas aplicados aos blocos do macho e cavidade. As Figuras 24 e 25 mostram a malha do modelo completo com os resultados, respectivamente sem as deformações aplicadas e com as deformações aplicadas em uma escala de aumento de 100 vezes.

Figura 23 - Visualização do perfil de temperaturas dos blocos da cavidade (à esquerda) e do macho (à direita), conforme utilizado nas simulações.



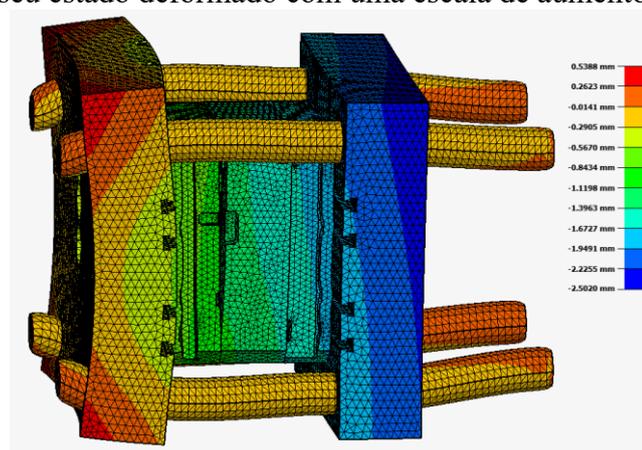
Fonte: o autor (2024)

Figura 24 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MEF 1.2 (solicitações puramente térmicas). A representação da malha se encontra em seu estado não deformado.



Fonte: o autor (2024)

Figura 25 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MEF 1.2 (solicitações puramente térmicas). A representação da malha se encontra em seu estado deformado com uma escala de aumento de 100 vezes.



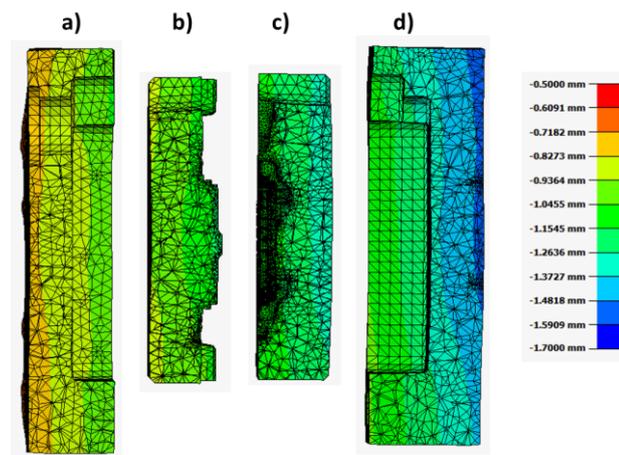
Fonte: o autor (2024)

A Figura 26 mostra a deformação dos quatro componentes na simulação térmica, com uma escala de aumento de 100 vezes. Se utiliza uma vista lateral em corte, utilizando como plano de corte o plano que divide o menor lado das placas ao meio, possibilitando a visualização da parte central dos componentes.

Em comparação com MEF 1.1, o modo de deformação muda. Sem pressões sendo aplicadas no sentido de abertura do molde, a deformação nos dois lados é dada pela expansão térmica restrita por conexões e pela distribuição não homogênea de temperatura. No lado fixo, mais restrito pela ligação direta do suporte superior com a placa fixa da máquina injetora, os componentes tendem a flexionar no sentido contrário ao de abertura do molde. Além da restrição causada pelas braçadeiras, a superfície da cavidade adquire uma temperatura maior do que o fundo do bloco da cavidade, fazendo com que se expanda mais. Isso contribui para a formação da flexão direcionada no sentido contrário ao da abertura do molde.

Os componentes do lado móvel têm sua expansão menos restrita devido à presença do calço entre o suporte inferior e a placa móvel da máquina. Isso reduz o efeito da temperatura nas deformações dos componentes. Porém, a diferença de temperatura entre a superfície da cavidade e o fundo do bloco ainda tende a causar flexão no sentido contrário ao de abertura do molde. Na simulação MEF 1.2, os valores de deformação do lado móvel são distorcidos pela rotação dos componentes, tornando o efeito menos observável.

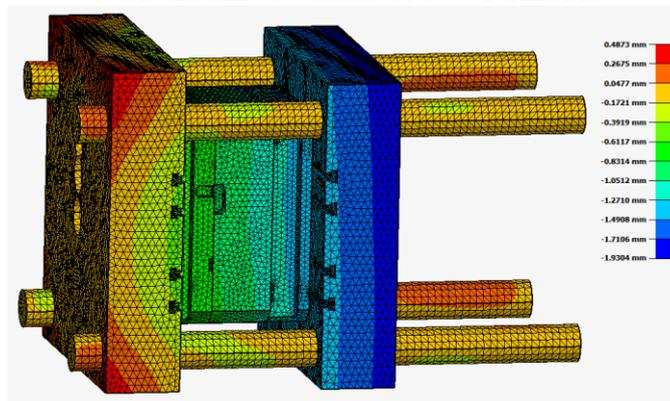
Figura 26 - Visualização deformada dos componentes estruturais do molde em uma escala de aumento de 100 vezes para o experimento MEF 1.2. São estes componentes: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.



Fonte: o autor (2024)

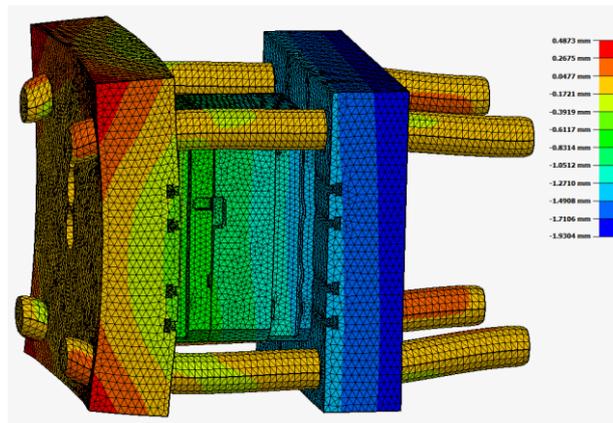
A simulação termomecânica, MEF 1.3 utilizou os mesmos elementos - 547273 elementos tetraédricos de dez nós - e durou 28 horas e 25 minutos. Os deslocamentos encontrados ficaram entre -1,930 mm e 0,487 mm. As malhas do modelo completo em estado não deformado e deformado com escala de aumento de 100 vezes se encontram nas Figuras 27 e 28, respectivamente.

Figura 27 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MEF 1.3 (solicitações mecânicas e térmicas). A representação da malha se encontra em seu estado não deformado.



Fonte: o autor (2024)

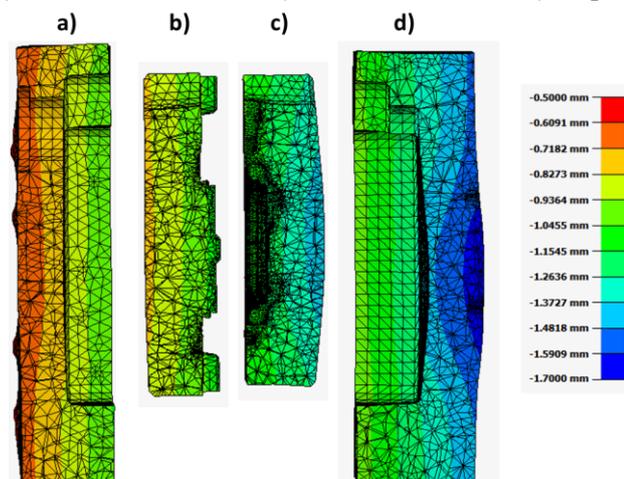
Figura 28 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MEF 1.3 (solicitações mecânicas e térmicas). A representação da malha se encontra em seu estado deformado com escala de aumento de 100 vezes.



Fonte: o autor (2024)

As deformações dos quatro componentes na simulação termomecânica podem ser visualizadas na Figura 29, utilizando uma escala de aumento de 200 vezes. A ação conjunta das solicitações mecânicas e térmicas atua, majoritariamente, em sentidos opostos, apresentando deformações reduzidas em comparação com as simulações com os efeitos mecânicos e térmicos isolados. Isso é demonstrável principalmente nos componentes do lado fixo, nos quais a temperatura tem um efeito maior. Nos componentes do lado móvel, a deformação causada pela pressão na cavidade ainda se mostra predominante.

Figura 29 - Visualização deformada dos componentes estruturais do molde em uma escala de aumento de 200 vezes para o experimento MEF 1.3. São estes componentes: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.



Fonte: o autor (2024)

4.1.2. Métodos da Aproximação Externa por Elementos Finitos

O Quadro 12 apresenta os resultados obtidos para os experimentos da Etapa 1 que utilizam o MAEEF. MAEEF 1.1 foi realizado apenas com solicitações mecânicas, enquanto MAEEF 1.2 considerou também os efeitos da temperatura. A primeira simulação completa do modelo foi feita em aproximadamente 40 minutos. Subsequentes simulações em modelos modificados são realizadas em tempos entre 5 e 10 minutos. Isso é possível pois o SimSolid tenta aplicar propriedades de material, conexões e dados de definição de análise às variações do modelo designado como “*Baseline design study*”, encurtando o processo de resolução (SIMSOLID, 2015).

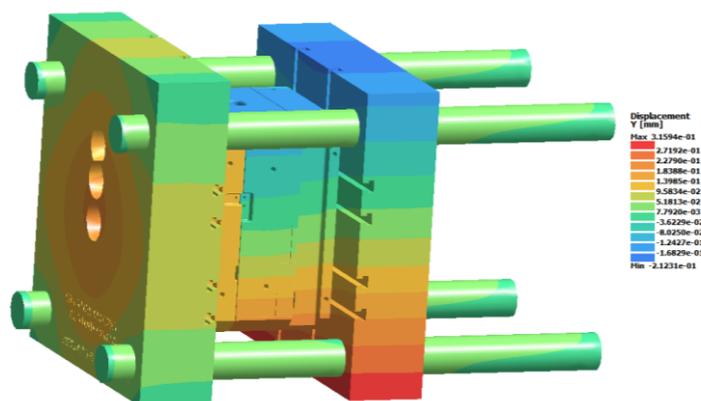
Quadro 12 - Deslocamentos dos componentes do molde obtidas nos experimentos da Etapa 1, com o Método da Aproximação Externa dos Elementos Finitos.

Experimento	Suporte Superior [mm]	Bloco Cavidade [mm]	Bloco Macho [mm]	Suporte Inferior [mm]
MAEEF 1.1	0,180	0,165	0,280	0,353
MAEEF 1.2	0,192	0,099	0,304	0,504

Fonte: o autor (2024)

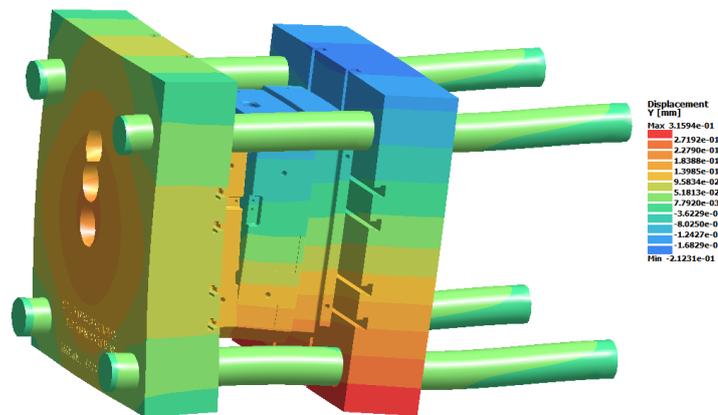
As Figuras 30 e 31 mostram o modelo completo e suas deformações para a aplicação da força de fechamento e da pressão de intensificação, respectivamente e sua forma não deformada e na sua forma deformada, conforme simulados no SimSolid. A versão utilizada do software, de 2021, não permite escolher o fator de escala utilizando números, apenas deslizando um *slider*. Por este motivo, a exata escala de aumento utilizada não é conhecida. Em versões mais recentes do software, é possível escolher a escala utilizando números.

Figura 30 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MAEEF 1.1 (apenas solicitações mecânicas). A representação do modelo se encontra em seu estado não deformado.



Fonte: o autor (2024)

Figura 31 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MAEEF 1.1 (apenas solicitações mecânicas). A representação do modelo se encontra em seu estado deformado.

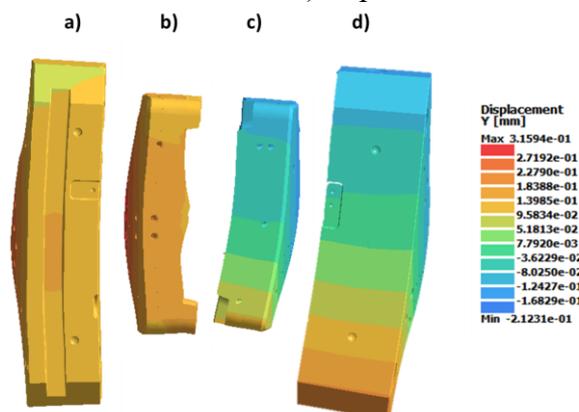


Fonte: o autor (2024)

É possível perceber que o resultado da simulação previu uma separação desigual entre as partes superior e inferior do molde, fazendo com que exista uma rotação sendo aplicada aos componentes do lado móvel. Esta rotação interfere na medição da deformação, trazendo um valor maior do que o real. Isso pode ser mais bem visualizado na Figura 32, onde estão representados os quatro componentes estudados em sua forma deformada.

Apesar da rotação dos componentes influenciar nos valores de deformação, é possível notar que a forma desta deformação segue o mesmo princípio da encontrada no MEF 1.1. A solicitação mais relevante, na ausência dos efeitos térmicos, é a pressão interna que flexiona os componentes no sentido da abertura, o que é visível na Figura 32.

Figura 32 - Visualização deformada dos componentes estruturais do molde para o experimento MAEEF 1.1. São estes componentes: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.



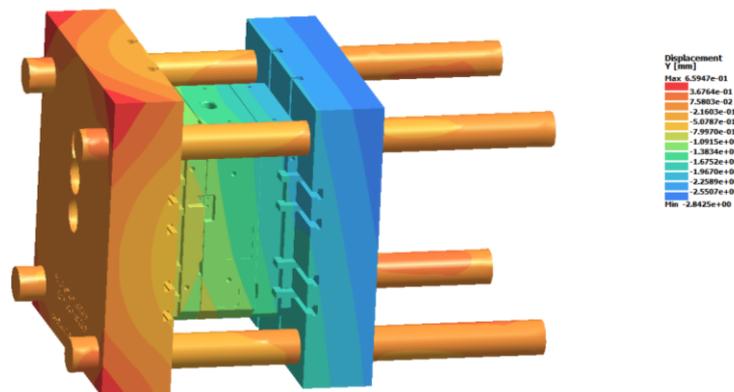
Fonte: o autor (2024)

A visualização dos resultados do experimento MAEEF 1.2 se encontra nas Figuras 33, 34 e 35. Nelas estão, respectivamente, o modelo não deformado, o modelo deformado e os

quatro componentes estruturais deformados. Este experimento considerou tanto solicitações mecânicas quanto térmicas.

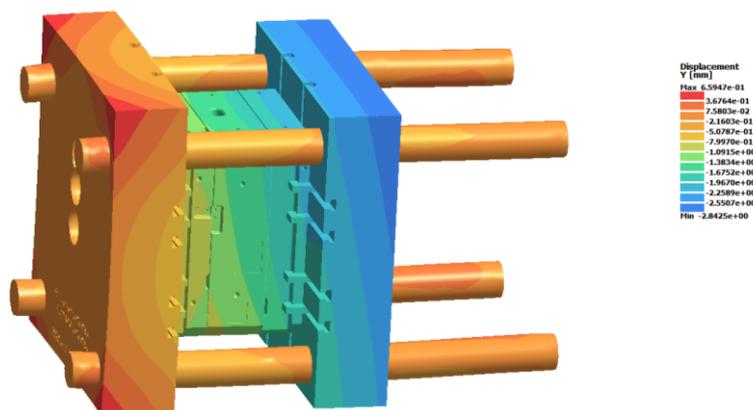
Os valores de deslocamento encontrados para o lado fixo do molde no MAEEF 1.2 mostram um aumento de 7% para o suporte superior e uma diminuição de 40% para o bloco da cavidade, em relação com MAEEF 1.1. É importante notar que a forma da deformação muda para estes componentes. Ambos deixam de apresentar flexão no sentido de abertura do molde, concentrada em uma pequena área central. O suporte inferior demonstra uma maior deformação nas áreas conectadas à placa fixa da injetora por braçadeiras, enquanto o bloco da cavidade apresenta uma flexão, menor em valor, no sentido contrário ao de abertura do molde. Isso é condizente com o resultado encontrado em MEF 1.3.

Figura 33 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MAEEF 1.2 (solicitações mecânicas e térmicas). A representação do modelo se encontra em seu estado não deformado.



Fonte: o autor (2024)

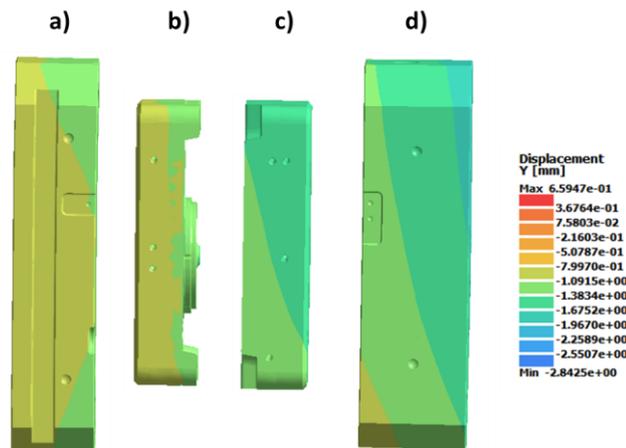
Figura 34 - Visualização dos resultados da análise de deformações com o modelo completo para o experimento MAEEF 1.2 (solicitações mecânicas e térmicas). A representação do modelo se encontra em seu estado deformado.



Fonte: o autor (2024)

Novamente, a rotação do componente influencia a análise no lado móvel do molde. Porém, visualmente já é possível notar através da Figura 35 que a influência da pressão interna no modo de deformação dos componentes do lado fixo é bastante reduzida, mesmo que ainda predominante.

Figura 35 - Visualização deformada dos componentes estruturais do molde para o experimento MAEEF 1.2. São estes componentes: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.



Fonte: o autor (2024)

4.1.3. Método Analítico - An

O procedimento para o cálculo analítico das maiores deformações em cada componente estudado se encontra na Seção 3.4.3. Este método não calcula separadamente a deformação dos conjuntos de suporte mais bloco de macho ou cavidade. Em vez disso, são calculados como sendo um único componente cuja espessura é a soma das espessuras de cada componente individual. Substituindo as variáveis das Equações 13, 14 e 15, obtemos o maior deslocamento para o lado fixo do molde, conforme demonstrado nas Equações 19, 20 e 21.

$$y_{1f} = \frac{12 * 60 * (754)^4}{384 * 210000 * (t_1 + t_2)^3} + \frac{2,66 * 60 * (754)^2}{8 * 210000 * (t_1 + t_2)} * 1,2 \quad (19)$$

Para o experimento MAEEF 1.1, em que t_1 é 80 mm e t_2 é 78,2 mm, y_{1f} é 1,138.

$$y_{2f} = \frac{12 * 60 + (754)^4}{1138 * 210000 * (265)^3} + \frac{2,66 * 60 * (754)^2}{16 * 210000 * 265} * 1,2 = 0,175 \quad (20)$$

$$y_f = \left(\frac{1}{1,138} + \frac{1}{0,175} \right)^{-1} = 0,151 \quad (21)$$

Da mesma forma, a deformação do lado móvel é calculada substituindo os valores das Equações 16, 17 e 18, conforme demonstrado nas Equações 22, 23 e 24.

$$y_{1m} = \frac{12 * 60 * (754)^4}{1138 * 210000 * (t_3 + t_4)^3} + \frac{2,66 * 60 * (754)^2}{16 * 210000 * (t_3 + t_4)} * 1,2 \quad (22)$$

Para o experimento MAEEF 1.1, em que t_3 é 64,54 mm e t_4 é 100,25 mm, y_{1m} é 0,414.

$$y_{2m} = \frac{3912000 * 139}{2 * 8427 * 210000} = 0,154 \quad (23)$$

$$y_m = \left(\frac{1}{0,414} + \frac{1}{0,154} \right)^{-1} = 0,112 \quad (24)$$

A Quadro 13 contém os deslocamentos calculados para o experimento An 1.1, o qual leva em consideração apenas os esforços mecânicos. Os valores encontrados são condizentes em comparação com os de MEF 1.1, porém menos conservadores.

Quadro 13 - Descolamentos dos componentes do molde obtidas nos experimentos da Etapa 1, com o Método Analítico.

Experimento	Suporte Superior [mm]	Bloco Cavidade [mm]	Bloco Macho [mm]	Suporte Inferior [mm]
An 1.1	0,151		0,112	

Fonte: o autor (2024)

4.2. EXPERIMENTOS DA ETAPA 2

Os experimentos da Etapa 2 foram realizados com o objetivo de estudar os efeitos de mudanças na espessura de fundo de quatro componentes do molde: suporte superior, suporte inferior, bloco da cavidade e bloco do macho. Além disso, os experimentos também fornecem mais dados para a comparação dos três métodos de avaliação de deformações estudados neste trabalho (MEF, MAEEF e Método Analítico).

4.2.1. Método dos Elementos Finitos

O Quadro 14 contém os deslocamentos encontrados através das simulações com o MEF para os suportes e blocos do macho e cavidade. As espessuras de fundo dos componentes de cada experimento se encontram no Quadro 10. Nos quadros com os resultados da etapa 2, para conveniência também foi adicionada uma linha com os resultados dos deslocamentos do molde em suas dimensões originais. Este resultado vem de experimentos da Etapa 1, e serve de referência.

Quadro 14 - Deslocamentos dos componentes do molde obtidas nos experimentos da Etapa 2, com o Método dos Elementos Finitos.

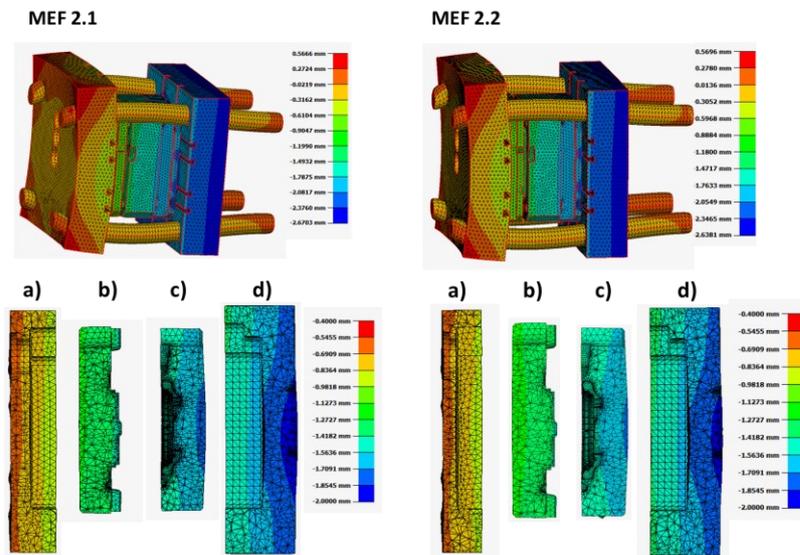
Experimento	Suporte Superior [mm]	Bloco Cavidade [mm]	Bloco Macho [mm]	Suporte Inferior [mm]
MEF 1.3 (Ref)	0,117	0,055	0,162	0,173
MEF 2.1	0,143	0,036	0,154	0,172
MEF 2.2	0,155	0,054	0,151	0,173
MEF 2.3	0,154	0,042	0,081	0,440
MEF 2.4	0,153	0,043	0,333	0,369
MEF 2.5	0,150	0,033	0,186	0,231
MEF 2.6	0,141	0,054	0,145	0,157
MEF 2.7	0,149	0,041	0,314	0,454
MEF 2.8	0,149	0,040	0,330	0,378

Fonte: o autor (2024)

Conforme a espessura do fundo do suporte superior é reduzida nos experimentos MEF 2.1 e MEF 2.2, a deformação no componente aumenta sem influenciar significativamente as deformações nos outros componentes. Em comparação com o molde em suas dimensões originais, o deslocamento medido no suporte superior em MEF 2.1 sofre um aumento de 22%, e MEF 2.2 de 32%. Esta deformação ocorre devido ao deslocamento do suporte ser restrito na posição em que as braçadeiras o conectam à placa da máquina injetora. Com a expansão térmica do componente, esta restrição faz com que a parte central do suporte superior se afaste da placa da máquina injetora, no sentido contrário à pressão aplicada na cavidade, enquanto a periferia do suporte se mantém em contato com a placa através das braçadeiras. A simulação indica que a redução da espessura de fundo do suporte superior tende a aumentar este efeito.

A Figura 36 apresenta a visualização dos resultados dos experimentos MEF 2.1 (à esquerda) e MEF 2.2 (à direita).

Figura 36 - Resultado das simulações MEF 2.1 e MEF 2.2. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.



Fonte: o autor (2024)

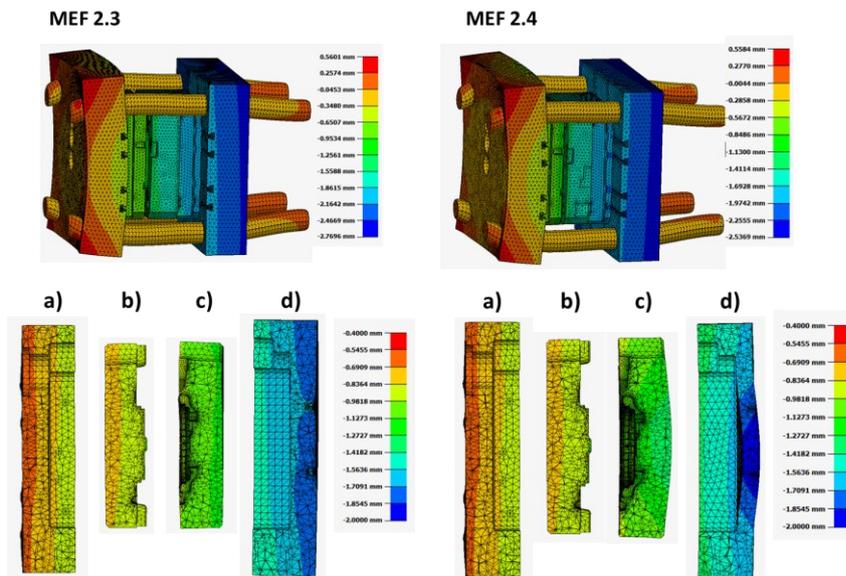
Já nos experimentos MEF 2.3 e MEF 2.4, nos quais reduziu-se a espessura do suporte inferior, o efeito foi mais acentuado. Nestes dois experimentos, foi medido um aumento no deslocamento do suporte inferior de 154% e de 113% respectivamente. No lado móvel do molde, o suporte não é preso diretamente a uma placa da máquina injetora. Em vez disso, ele é parafusado a um calço do mesmo material, e que possui o mesmo coeficiente de dilatação térmica. Isso faz com que a restrição à expansão térmica seja menos significativa, diminuindo o efeito da temperatura na deformação do componente.

Além disso, a presença do vão entre o suporte inferior e a placa móvel da máquina injetora facilita a deformação causada pela pressão na cavidade, no sentido de abertura do molde. O bloco do macho é empurrado na direção do suporte inferior, o qual flexiona frente à força localizada. A redução da espessura do suporte influencia diretamente no valor de sua deformação.

No MEF 2.4, o deslocamento do bloco do macho aumenta 105%, o que é facilmente explicado pela redução significativa da espessura do suporte que resistiria a esta deformação. Porém, no MEF 2.3 foi calculada uma redução nos deslocamentos de 50%. Este resultado é contra intuitivo, porém pode ser explicado pela rotação do componente causada por um provável desbalanceamento nos carregamentos aplicados. A rotação do componente interfere na medição dos deslocamentos, reduzindo a diferença entre o maior e o menor deslocamento na face do fundo do componente. É possível visualizar a rotação na placa móvel da máquina

injetora na Figura 37, que apresenta à esquerda os resultados do MEF 2.3 e à direita do MEF 2.4.

Figura 37 - Resultado das simulações MEF 2.3 e MEF 2.4. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.



Fonte: o autor (2024)

Os experimentos MEF 2.5 e MEF 2.6 reduziram, respectivamente, as espessuras do bloco do macho e do bloco da cavidade. Ambos componentes são submetidos diretamente tanto à pressão de intensificação quanto aos efeitos da distribuição não homogênea de temperatura. O material do qual estes são compostos, H13, é mais resistente do que o material dos suportes, P20. Porém o módulo de elasticidade e o coeficiente de dilatação térmica são similares nos dois materiais, sendo estes os principais fatores do material ligados à deformação elástica neste estudo.

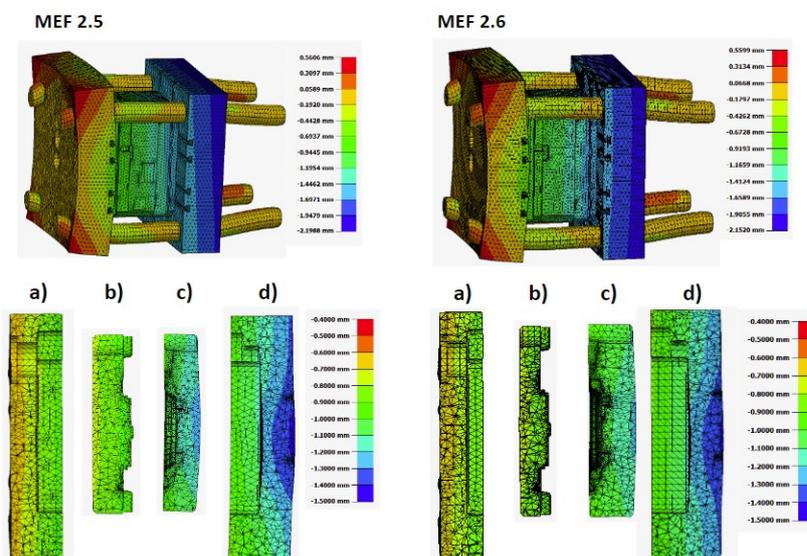
Os valores de deslocamentos medidos no MEF 2.5 indicam que a variação da espessura do bloco do macho pode ter influência na sua própria deformação, bem como na deformação do suporte inferior. Em relação ao molde original, a simulação deste experimento encontrou um aumento de 15% nos deslocamentos do bloco do macho, e de 33% nos deslocamentos do suporte inferior. O impacto da redução da espessura do bloco do macho parece ser significativamente menor do que o impacto da redução da espessura do suporte inferior, testado nos experimentos MEF 2.3 e 2.4.

Já os valores de deslocamentos medidos no MEF 2.6 demonstram que as deformações do lado fixo não são significativamente afetadas pela redução da espessura do bloco da cavidade. No lado móvel, porém, foi medida uma redução nos deslocamentos do bloco do

macho e no suporte inferior, ambas em 10%. Isso pode indicar que o contato do bloco do macho com um bloco da cavidade mais flexível durante o fechamento permite que o bloco da cavidade amortecia parte da força de reação ao fechamento que seria aplicada ao lado móvel, reduzindo a deformação sofrida. Porém, a diferença não é grande suficiente para afirmar que isso realmente aconteça.

A Figura 38 mostra os resultados das simulações referentes ao MEF 2.5 e MEF 2.6.

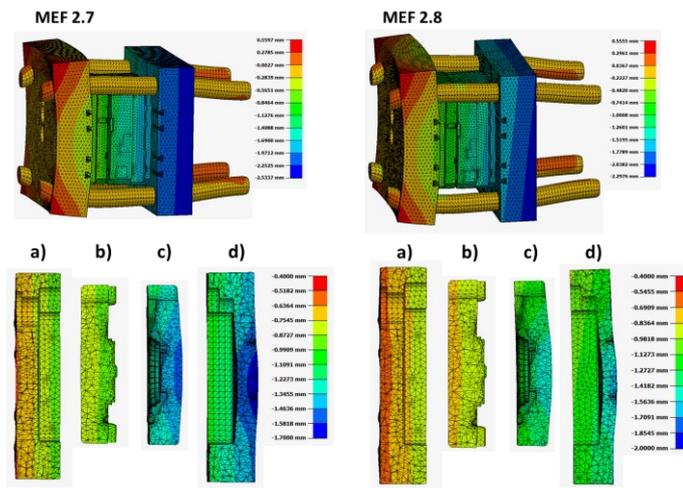
Figura 38 - Resultado das simulações MEF 2.5 e MEF 2.6. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suport e inferior.



Fonte: o autor (2024)

Por fim, os experimentos MEF 2.7 e MEF 2.8 combinaram as reduções na espessura de fundo do suporte inferior do MEF 2.3 e do MEF 2.4 com a redução da espessura do bloco do macho do MEF 2.5. Como esperado, ambos experimentos demonstraram aumento significativo na deformação do bloco do macho e do suporte inferior. MEF 2.7 também demonstrou um aumento inesperado na deformação dos componentes do lado fixo do molde, explicado apenas por alguma instabilidade no resultado da simulação. A visualização dos resultados destes experimentos se encontra na Figura 39.

Figura 39 - Resultado das simulações MEF 2.7 e MEF 2.8. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.



Fonte: o autor (2024)

4.2.2. Métodos da Aproximação Externa por Elementos Finitos

O Quadro 15 apresenta os valores de deslocamentos calculados para as simulações realizadas no SimSolid durante a Etapa 2. De modo geral, os resultados se assemelham aos encontrados através do Método dos Elementos Finitos. Em alguns casos demonstra valores que divergem significativamente, os quais podem ser explicados pelas limitações do método de medição, que mede apenas o maior e menor deslocamentos globais na superfície, sendo sensível à influência da rotação dos componentes no valor medido.

Quadro 15 - Deslocamentos dos componentes do molde obtidas nos experimentos da Etapa 2, com o Método da Aproximação Externa por Elementos Finitos.

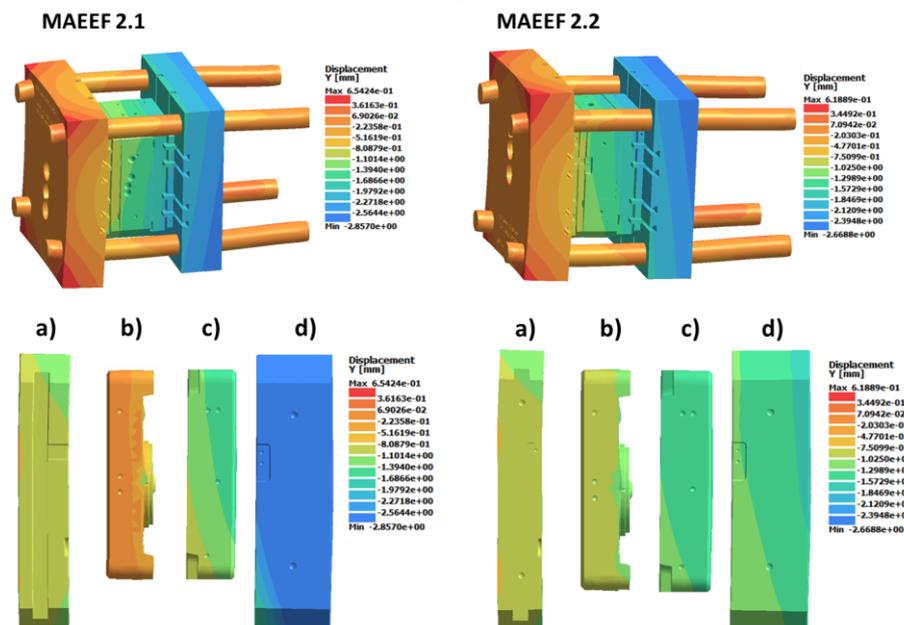
Experimento	Suporte Superior [mm]	Bloco Cavidade [mm]	Bloco Macho [mm]	Suporte Inferior [mm]
MAEEF 1.2 (Ref)	0,192	0,099	0,304	0,504
MAEEF 2.1	0,237	0,118	0,256	0,423
MAEEF 2.2	0,336	0,113	0,241	0,414
MAEEF 2.3	0,088	0,068	0,211	0,298
MAEEF 2.4	0,148	0,066	0,260	0,343
MAEEF 2.5	0,184	0,099	0,178	0,329
MAEEF 2.6	0,187	0,080	0,126	0,189
MAEEF 2.7	0,302	0,128	0,257	0,375
MAEEF 2.8	0,134	0,066	0,231	0,301

Fonte: o autor (2024)

Os experimentos MAEEF 2.1 e 2.2 demonstram resultados condizentes com o esperado para a deformação do suporte superior. Conforme a espessura de fundo do componente diminui, maior a diferença entre o deslocamento da parte do suporte que é conectada à placa fixa da máquina em relação a parte central, que tende a flexionar para se afastar da placa, no sentido contrário à abertura do molde.

Os valores de deslocamentos são significativamente maiores do que os encontrados em MEF 2.1 e 2.2. Isso pode ser explicado pelo menor grau de simplificação do modelo utilizado no MAEEF em comparação com o modelo MEF, que requer simplificações na geometria para a criação de uma malha consistente. A Figura 40 demonstra visualmente estes resultados.

Figura 40 - Resultado das simulações MAEEF 2.1 e MAEEF 2.2. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.

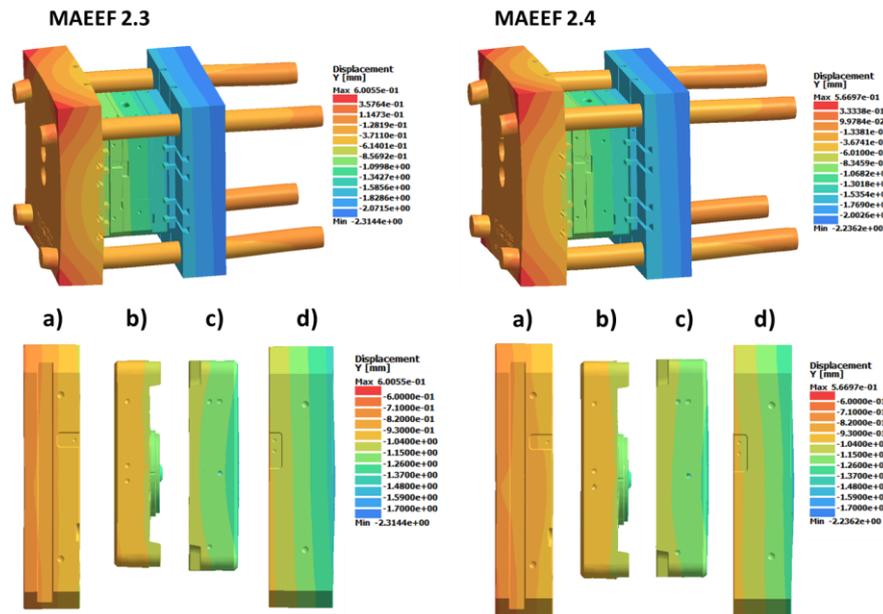


Fonte: o autor (2024)

Os resultados das simulações MAEEF 2.3 e MAEEF 2.4 também estão de acordo com as expectativas. A redução na espessura do suporte inferior causou um aumento na deformação tanto do suporte quanto do bloco do macho. As reduções na deformação dos componentes do lado fixo não são previstas, mas podem ser atribuídas a instabilidades na simulação, ou a parte da energia da força de fechamento a ser transmitida ao lado fixo através do contato dos blocos do macho e cavidade ser dissipada pela maior deformação nos componentes do lado móvel.

Na Figura 41 se encontra a representação visual dos resultados das simulações destes dois experimentos.

Figura 41 - Resultado das simulações MAEEF 2.3 e MAEEF 2.4. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.

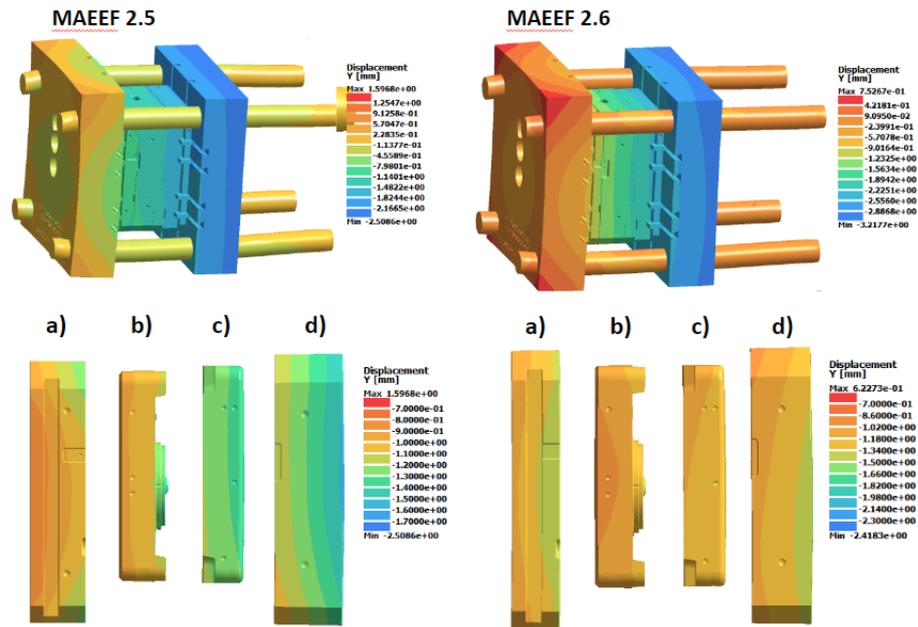


Fonte: o autor (2024)

O impacto da redução da espessura do bloco do macho no experimento MAEEF 2.5 em 20 mm parece ser similar ao impacto da redução da espessura do suporte inferior no MAEEF 2.3 em 25 mm. Houve um aumento menor da deformação do bloco do macho, porém a deformação do suporte inferior foi maior.

No experimento MAEEF 2.6, a redução da espessura do bloco da cavidade não demonstrou impactos significativos nos valores de deformações dos componentes do lado fixo. Porém, a forma da deformação do bloco da cavidade parece ter mudado, conforme visualizado no lado direito da Figura 42, ocorrendo uma flexão do bloco no sentido de abertura do molde. A diminuição da espessura do bloco parece ter o tornado mais suscetível à ação da pressão interna. Do lado móvel, as deformações reduziram consideravelmente, e isto pode ser atribuído ao mesmo fenômeno explicado para o MEF 2.6, em que uma porção maior da energia da força de fechamento é dissipada na deformação do bloco da cavidade mais flexível.

Figura 42 - Resultado das simulações MAEEF 2.5 e MAEEF 2.6. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho d) Suporte inferior.

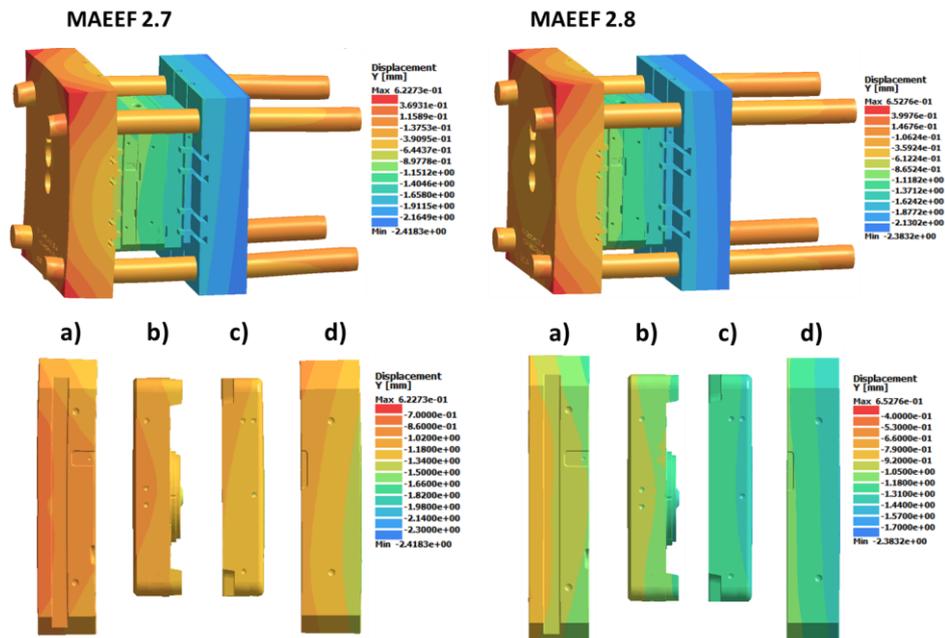


Fonte: o autor (2024)

Os experimentos MAEEF 2.7 e MAEEF 2.8 combinam as modificações do MAEEF 2.3 e do MAEEF 2.4 com a modificação do MAEEF 2.5. Enquanto MAEEF 2.7 apresenta resultados de deslocamentos significativamente maiores do que MAEEF 2.3 e MAEEF 2.4 para o lado móvel, o mesmo não ocorre em MAEEF 2.8, em que a redução da espessura de fundo do suporte inferior é maior. Parte disso pode ser explicado pela rotação dos componentes do lado móvel visualizada no lado esquerdo da Figura 43, para o experimento MAEEF 2.7.

As simulações MAEEF 2.3, MAEEF 2.4 e MAEEF 2.8 não demonstraram rotação considerável em seus componentes. Nessas condições, a redução da espessura do bloco do macho suportado por um suporte inferior já “fino” não parece ter impacto significativo na deformação destes mesmos componentes, indicando talvez que a espessura do suporte tem mais importância do que a espessura do bloco do macho na redução das espessuras. Esta mesma conclusão foi feita para o experimento MEF 2.8 comparado com o MEF 2.4, corroborando a veracidade do resultado.

Figura 43 - Resultado das simulações MAEEF 2.7 e MAEEF 2.8. Os componentes na representados separadamente são: a) Suporte superior b) Bloco da cavidade c) Bloco do macho.



Fonte: o autor (2024)

4.2.3. Método Analítico

Os resultados do cálculo pelo Método Analítico foram obtidos através das Equações de 19 a 24, substituindo os valores de t_1 , t_2 , t_3 , e t_4 para cada experimento conforme a Quadro 16.

Quadro 16 - Deslocamentos dos componentes do molde obtidas nos experimentos da Etapa 2, com o método analítico de Menges.

Experimento	Suporte Superior [mm]	Bloco Cavidade [mm]	Bloco Macho [mm]	Suporte Inferior [mm]
An 1.1 (Ref)	0,15	0,15	0,11	0,11
An 2.1	0,16	0,16	0,11	0,11
An 2.2	0,16	0,16	0,11	0,11
An 2.3	0,15	0,15	0,12	0,12
An 2.4	0,15	0,15	0,13	0,13
An 2.5	0,15	0,15	0,12	0,12
An 2.6	0,16	0,16	0,11	0,11
An 2.7	0,15	0,15	0,13	0,13
An 2.8	0,15	0,15	0,14	0,14

Fonte: o autor (2024)

Em comparação com os outros métodos, os deslocamentos calculados pelo método analítico estão na mesma ordem de grandeza das encontradas nas simulações. Isso indica a possibilidade de o método ser viável. Porém, os fatos de não levar em consideração efeitos térmicos e de ser pouco responsivo à variações de espessura dos componentes em comparação com os outros métodos faz com que o Método Analítico seja menos confiável.

Além disso, os resultados obtidos são, na sua maioria, menos conservadores do que os obtidos por simulação, significando que o método analítico prevê deformações menores do que o MEF e o MAEEF nas mesmas condições. Isso é perigoso do ponto de vista de projeto, já que poderia levar o projetista a subdimensionar o componente se baseando nesses resultados.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A discussão dos resultados é feita em três partes. Primeiro é discutido o efeito das solicitações mecânicas, térmicas e termomecânicas nos modelos de estudo sobre as deformações do molde, e realizada uma comparação entre estas solicitações. Em um segundo momento, se discute as modificações nas espessuras de fundo dos componentes estruturais e os seus efeitos nas deformações do molde. Por fim, são comparados os métodos de análise utilizados, levando em consideração a precisão dos resultados, a velocidade da análise e a facilidade de uso.

5.1. EFEITOS MECÂNICOS E TÉRMICOS

Através dos experimentos da Etapa 1, principalmente os que utilizam o MEF e o MAEEF, é possível comparar tanto os valores como as formas das deformações causadas por solicitações mecânicas (MEF 1.1 e MAEEF 1.1), térmicas (MEF 1.2) e termomecânicas (MEF 1.3 e MAEEF 1.2). É conveniente separar esta comparação por componente, pois as solicitações influenciam as deformações de cada parte do molde de maneira diferente.

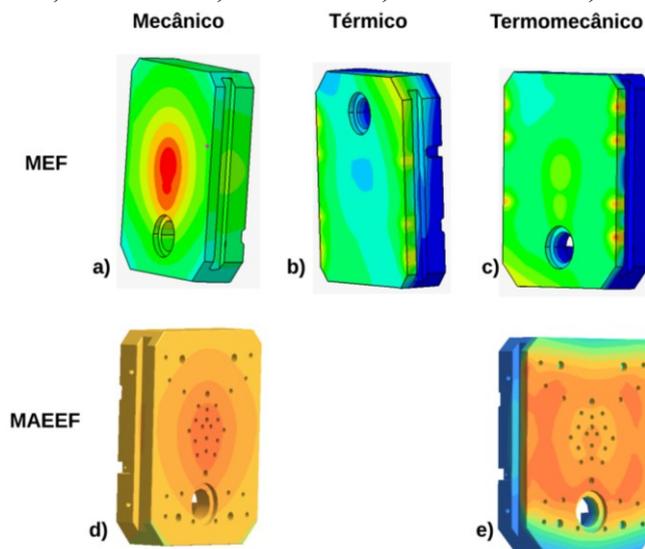
5.1.1. Suporte superior

Comparando os valores das deformações dos experimentos MEF 1.1, MEF 1.2 e MEF 1.3, os dois primeiros apresentaram resultados próximos, com uma diferença menor do que 10%, i.e. 0,221 mm para o MEF 1.1 e 0,240 mm para o MEF 1.2. O terceiro, porém, demonstrou deslocamentos que são aproximadamente metade, em comparação, de 0,117 mm. Por outro lado, MAEEF 1.1 e MAEEF 1.2 apresentaram uma diferença de apenas aproximadamente 7%, com 0,180 mm para MAEEF 1.1 e 0,192 mm para MAEEF 1.2, indo contra a grande diferença de 48% entre os valores de MEF 1.1 e MEF 1.3. Para entender estes valores, é conveniente uma comparação visual da forma tomada por estas deformações, que pode ser visualizada na Figura 44.

Para esforços puramente mecânicos, ou seja, apenas a pressão de intensificação e a força de fechamento sendo aplicadas ao molde, tanto o MEF 1.1 quanto o MAEEF 1.1 demonstram deformar com a mesma forma, como pode ser visto na Figura 44, itens a) e d). O suporte superior flexiona no sentido de abertura do molde, o que é condizente com a direção da pressão de intensificação que empurra o bloco da cavidade contra o suporte superior. A deformação se concentra na área central do suporte, onde a cavidade está.

Em uma situação em que somente os efeitos da temperatura são aplicados, o perfil das deformações se torna diferente. Como demonstrado em MEF 1.2, a flexão ocorre no sentido contrário à abertura do molde. Além disso, a deformação é apenas parcialmente centralizada no suporte. As laterais do componente, conectadas à placa fixa da injetora por braçadeiras, mantêm sua posição enquanto o resto do suporte se afasta da placa. Isso ocorre, pois, a conexão entre o suporte e a placa limita a expansão térmica do suporte, o que causa a flexão.

Figura 44 - Forma da deformação do suporte inferior obtida nos experimentos da Etapa 1: a) MEF 1.1 b) MEF 1.2 c) MEF 1.3 d) MAEEF 1.1 e) MAEEF 1.2.



Fonte: o autor (2024)

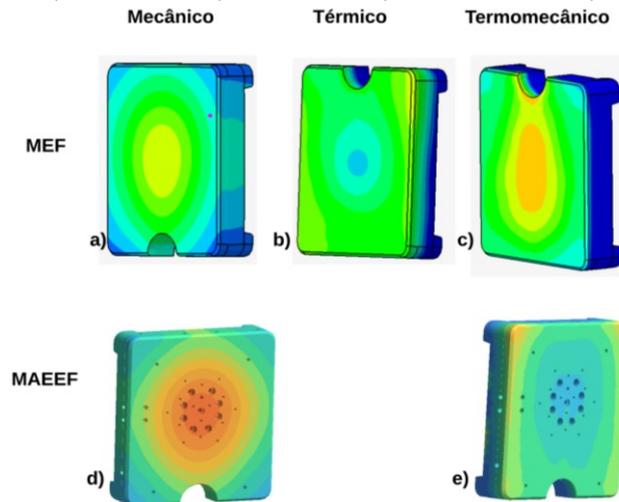
Por fim, ao aplicar tanto os carregamentos térmicos quanto os mecânicos simultaneamente, a deformação do componente apresenta uma forma combinada, conforme demonstrado em MEF 1.3 e MAEEF 1.2, na Figura 44, itens c) e e). No centro do suporte, é possível notar que existe uma flexão no sentido da abertura do molde, porém esta é menor do que a flexão presente na condição de esforços puramente mecânicos. Da mesma forma, as laterais do molde também apresentam uma deformação no sentido de abertura do molde em relação às partes do componente que não estão conectadas à placa fixa da injetora. Em relação ao centro do suporte, esta deformação é menor pois ambas ocorrem no mesmo sentido. Sobre isto, pode-se concluir que a ação conjunta dos efeitos térmicos e mecânicos no suporte superior tem o efeito de mitigar um ao outro, e que a forma da deformação é uma combinação da forma tomada sob efeito separado dos carregamentos mecânico e térmico.

5.1.2. Bloco da Cavidade

Em questão de valores, tanto os experimentos MEF quanto MAEEF demonstram que as maiores deformações neste componente acontecem sob ação de carregamentos puramente

mecânicos. MEF 1.1 apresenta deslocamento de 0,174 mm, que é mais de 300% maior do que a deformação de 0,055 mm medida no MEF 1.2. Já o deslocamento de 0,165 mm de MAEEF 1.1 é 67% maior do que o deslocamento de MAEEF 1.2, de 0,099 mm. A Figura 45 compara os diferentes experimentos da Etapa 1, auxiliando no entendimento dos valores de deslocamentos encontrados.

Figura 45 - Forma da deformação do bloco da cavidade obtida nos experimentos da Etapa 1: a) MEF 1.1 b) MEF 1.2 c) MEF 1.3 d) MAEEF 1.1 e) MAEEF 1.2.



Fonte: o autor (2024)

A forma da deformação do bloco da cavidade nos experimentos MEF 1.1 e MEF 1.3 (Figura 45, itens a) e c)), apresenta flexão no sentido de abertura do molde, enquanto MEF 1.2 (Figura 45, item b)) apresenta flexão no sentido contrário. Isso indica que o efeito das solicitações mecânicas na deformação deste componente é maior do que o efeito das solicitações térmicas. Porém, a diferença nos valores destas deformações demonstra que a ação da expansão térmica e subsequente tensão trazida pela restrição desta expansão tende a agir no sentido contrário da deformação causada pela pressão interna na cavidade.

Os resultados dos experimentos MAEEF 1.1 e MAEEF 1.2 (Figura 45, itens d) e e)), porém, não corroboram esta análise. Na simulação realizada no SimSolid, a flexão apresentada pelo bloco da cavidade sujeito a ação combinada dos carregamentos térmicos e mecânicos tem sentido contrário ao do experimento MEF 1.3, ou seja, ocorre no sentido contrário de fechamento do molde. Isso indica que, para o molde estudado, o efeito da solicitação térmica é maior do que o efeito da solicitação mecânica na deformação deste componente.

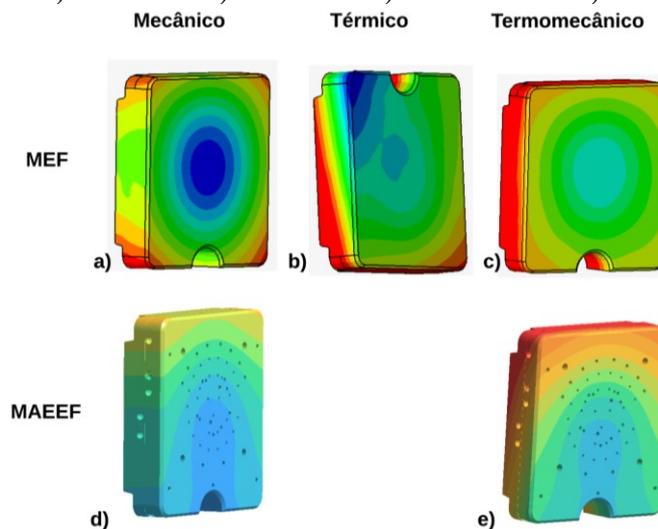
A diferença de resultados do MAEEF 1.2 em relação ao MEF 1.3 pode ser atribuída à diferença de simplificações entre os dois métodos. A forma de importação do perfil de temperaturas do componente é mais precisa no MEF, porém é limitada aos blocos do macho e

cavidade, enquanto a outros componentes foi atribuída uma temperatura única e constante. Em contrapartida, no MAEEF a inserção dos dados de temperatura é manual e sujeita a erros, porém é simulada a transferência de calor dos blocos do macho e cavidade para outros componentes do molde, formando um gradiente térmico mais natural, mesmo que impreciso. Este gradiente de temperaturas pode aumentar as restrições à expansão térmica, de modo que a expansão é heterogênea entre componentes, e mesmo para um único componente. Entende-se que isso pode reforçar o efeito do carregamento térmico na deformação do componente, o tornando mais relevante do que o efeito do carregamento mecânico, como demonstrado no MAEEF 1.2. Além disso, as simulações feitas no SimSolid não envolveram a remoção dos furos devido ao pré-processamento simplificado do MAEEF, o que pode contribuir para diferenças de resultados entre os dois métodos.

5.1.3. Bloco do Macho

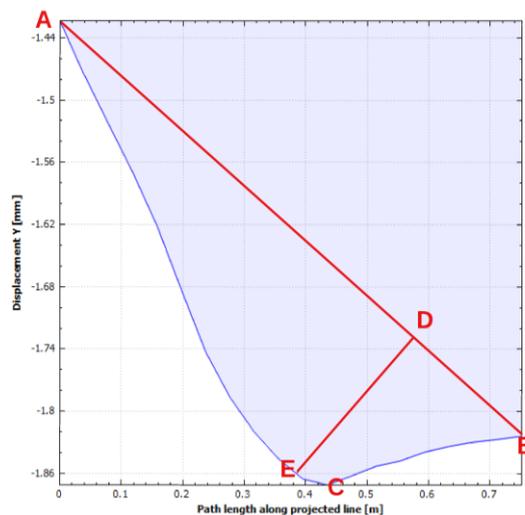
Para o bloco do macho, os deslocamentos encontrados nos experimentos MEF 1.1, MEF 1.2 e MEF 1.3 ficam dentro de uma diferença de 15%, sendo elas 0,170, 0,185 e 0,162 mm respectivamente. As diferenças também são pequenas entre MAEEF 1.1 e MAEEF 1.2, com deslocamentos de 0,280 e 0,304 mm respectivamente. Porém, comparando os experimentos MEF e MAEEF, maiores deslocamentos foram medidos nos experimentos feitos com MAEEF. A Figura 46 mostra a forma da deformação do bloco do macho nas simulações da Etapa 1. Todos os experimentos da Etapa 1 mostram o bloco do macho sendo submetido a uma flexão no sentido de abertura do molde.

Figura 46 - Forma da deformação do bloco do macho obtida nos experimentos da Etapa 1: a) MEF 1.1 b) MEF 1.2 c) MEF 1.3 d) MAEEF 1.1 e) MAEEF 1.2.



É possível notar que em três experimentos, MEF 1.2, MAEEF 1.1 e MAEEF 1.2, (Figura 46, itens b), d) e e)) o bloco do macho foi submetido a rotações que distorcem o valor real da deformação. É possível afirmar que os valores encontrados para este componente nos Quadros 11 e 12 são superestimados. A Figura 47 demonstra a razão pelo qual isso acontece. Trata-se de um diagrama com os deslocamentos da face do fundo do bloco do macho na direção de abertura do molde em função da distância do topo, seguindo uma linha vertical no centro da face. Este diagrama corresponde ao perfil de deformações do bloco do macho no experimento MAEEF 1.2.

Figura 47 - Diagrama de deslocamento por distância do topo do bloco do macho, seguindo uma linha vertical no centro da face do fundo do mesmo. Corresponde ao experimento MAEEF 1.2.



Fonte: o autor (2024)

Os pontos A e B representam respectivamente a extremidade superior e inferior do bloco do macho. Em um componente não rotacionado, espera-se que estes dois pontos estejam quase alinhados, ou seja, com valores similares de deslocamento. A linha traçada entre os dois seria quase horizontal. Na configuração rotacionada, o deslocamento medido se dá pelo ponto de maior deslocamento (ponto A) menos o ponto de menor deslocamento (ponto C). Se o componente não estivesse rotacionado, o deslocamento medido seria a maior distância ortogonal à linha AB em relação à curva de deslocamentos. Esta distância está representada no diagrama pela linha DE, que é demonstravelmente menor do que a diferença do ponto A e do ponto C.

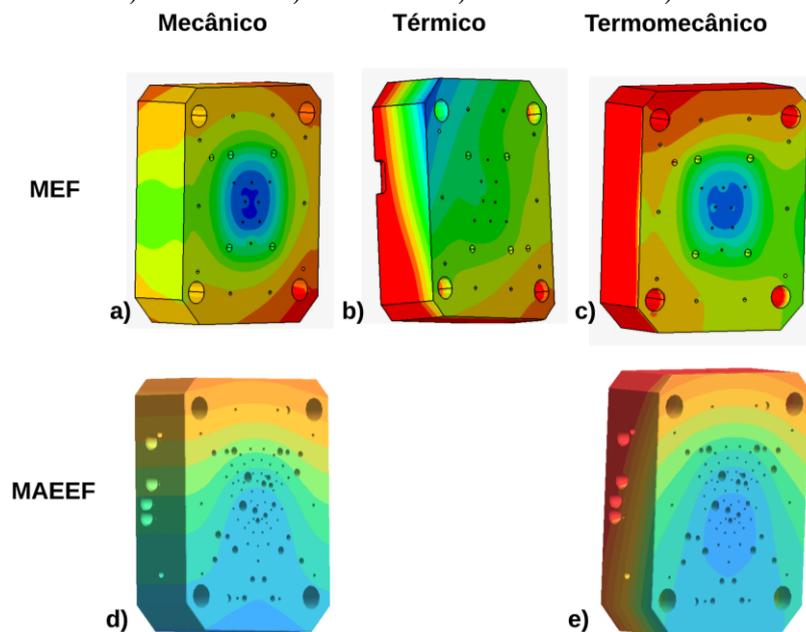
A distorção nos valores de deformações causada pela rotação do componente na simulação é um problema presente em parte considerável dos experimentos. Enquanto análises qualitativas utilizando os valores e imagens em conjunto ainda é possível, este problema faz

com que o modo de medição utilizado neste trabalho não seja confiável para comparação direta dos valores com um critério de aceitação.

5.1.4. Suporte Inferior

O problema da rotação do componente ocorre, inclusive, com o suporte inferior em todos os experimentos da etapa 1. O efeito é mais proeminente nos experimentos MEF 1.2, MAEEF 1.1 e MAEEF 1.2. No deslocamento medido deste componente, MEF 1.1 e MEF 1.3 trazem valores similares, enquanto nos três experimentos em que a rotação teve grande efeito, as deformações foram muito maiores. A Figura 48 auxilia na interpretação dos resultados.

Figura 48 - Forma da deformação do suporte inferior obtida nos experimentos da Etapa 1: a) MEF 1.1 b) MEF 1.2 c) MEF 1.3 d) MAEEF 1.1 e) MAEEF 1.2.



Fonte: o autor (2024)

Apesar do efeito da rotação dos componentes, é possível notar que, similar aos resultados do bloco do macho, todos os suportes inferiores da Etapa 1 apresentam deformações na forma de flexão no sentido de abertura do molde. Este resultado é explicado pela menor restrição imposta à expansão térmica no lado móvel do molde, tornando menos relevante o efeito da temperatura na forma da deformação destes componentes. Isso também é demonstrado claramente pelos valores medidos das deformações do bloco do macho nos experimentos MEF 1.1 e MEF 1.3. Os deslocamentos em ambos experimentos são próximos em valor, respectivamente 0,164 mm e 0,173 mm, quanto em forma, indicando que a adição da temperatura no MEF 1.3 não trouxe efeitos significativos na deformação deste componente.

De modo geral, os resultados da Etapa 1 concordam com parte dos resultados obtidos por Müller *et al.* (2018), que simula utilizando o MEF as deformações em uma placa lisa que compõe seu modelo de estudo quando exposta, separadamente, a solicitações puramente mecânicas, puramente térmicas e combinadas. O sentido da deformação puramente mecânica é inverso ao da puramente térmica, enquanto a deformação termomecânica apresenta uma forma que combina os outros dois casos, com uma ênfase maior no efeito das pressões.

De mesmo modo, as formas de deformação encontradas correspondem vagamente a como Barone e Caulk (1999) demonstram. Seu trabalho, porém, utiliza distorções nas dimensões do produto fundido para representar as deformações na cavidade, enquanto este foca diretamente nas deformações dos componentes estruturais do molde, mostrando com mais detalhes que forma as deformações tomam frente aos diferentes tipos de carregamento. No Quadro 17 estão resumidos os resultados encontrados nos experimentos da Etapa 1.

Quadro 17 - Resumo dos deslocamentos dos experimentos da Etapa 1.

Componente	MEF 1.1 [mm]	MEF 1.2 [mm]	MEF 1.3 [mm]	MAEEF 1.1 [mm]	MAEEF 1.2 [mm]	An 1.1 [mm]
Suporte superior	0,221	0,240	0,117	0,180	0,192	0,151
Bloco da cavidade	0,174	0,086	0,055	0,165	0,099	0,151
Bloco do macho	0,170	0,185	0,162	0,280	0,304	0,112
Suporte Superior	0,164	0,301	0,173	0,353	0,504	0,112

Fonte: o autor (2024)

5.2. MODIFICAÇÕES NA GEOMETRIA

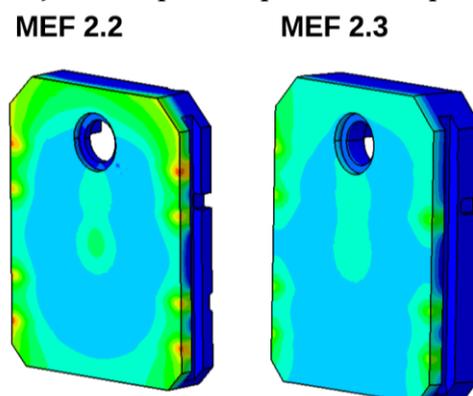
A discussão dos efeitos das modificações na geometria dos componentes estruturais foi baseada nos resultados dos experimentos da Etapa 2 que possui como objetivo avaliar o grau da influência da variação das dimensões e como essas afetam as deformações. É razoável supor que a redução da espessura de fundo dos suportes superior e inferior e dos blocos do macho e cavidade resulte em maiores deformações nos componentes. Este subcapítulo foca nos resultados obtidos através do MEF por ser um método mais tradicional. Alguns comentários são feitos em relação aos experimentos que utilizam o MAEEF.

Em valor medido, em todos os experimentos MEF da Etapa 2, a diferença na deformação do suporte superior foi pequena, inclusive nos experimentos MEF 2.1 e MEF 2.2 onde a espessura do fundo deste componente foi reduzida. O maior deslocamento encontrado para o suporte superior, de 0,155 mm no MEF 2.2, foi apenas aproximadamente 10% maior do

que o menor deslocamento encontrado, de 0,141 mm no MEF 2.6. Isso indica que as deformações deste componente não são sensíveis a mudanças de geometria da estrutura do molde. Isso pode ser explicado pelo fato de o suporte superior ser diretamente conectado e suportado pela placa fixa da injetora, que tende a ser muito mais rígida que os componentes do molde.

Quanto a forma da deformação, ela se mantém constante para o suporte inferior em todos os experimentos com MEF da Etapa 2. Isso é exemplificado na Figura 49, com resultados da MEF 2.2 e MEF 2.3, respectivamente. O experimento com maior redução na espessura do suporte superior e um com redução apenas no suporte inferior. Ambos apresentam uma combinação de flexão no sentido contrário ao de abertura do molde, causada pela temperatura, e no centro uma flexão menor no sentido de abertura do molde, causada pela pressão interna. Isso também ocorre no suporte superior para todos os outros experimentos da Etapa 2.

Figura 49 - Forma da deformação do suporte superior dos experimentos MEF 2.2 e MEF 2.3.



Fonte: o autor (2024)

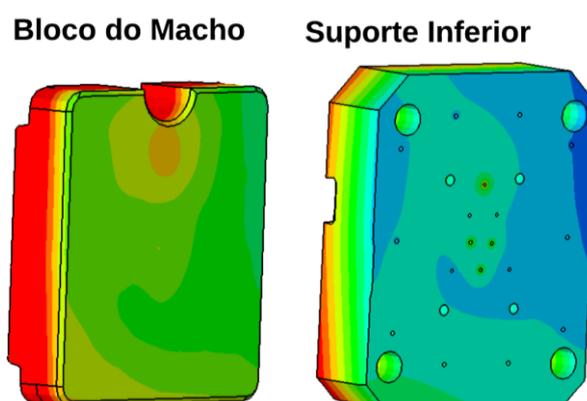
Para o bloco da cavidade, as maiores deformações medidas coincidem com o experimento em que houve a maior redução de espessura no lado móvel (MEF 2.2), e com o experimento em que foi reduzida a espessura do bloco da cavidade (MEF 2.6). Isso indica que há alguma sensibilidade deste componente em relação às modificações de geometria. O maior deslocamento medido para este componente é aproximadamente 65% maior do que o menor deslocamento medido, em todos os experimentos da Etapa 2. Dito isso, mesmo o maior deslocamento do bloco da cavidade é menor do que o menor deslocamento nos outros três componentes, em todos os experimentos.

Assim como o suporte superior, o bloco da cavidade apresenta o mesmo tipo de deformação em todos os experimentos da Etapa 2, com uma flexão central no sentido de abertura do molde.

É conveniente discutir os componentes do lado móvel como um par, pois o comportamento do bloco do macho e do suporte inferior se mostrou similar em cada experimento da segunda etapa. À primeira vista, analisando os valores de deslocamentos medidos, estes dois componentes parecem ser os mais sensíveis a mudanças de espessura, mesmo levando em consideração as rotações sofridas em alguns experimentos. Em quatro experimentos foi reduzida a espessura do fundo de componentes do lado móvel: MEF 2.3, MEF 2.4, MEF 2.7 e MEF 2.8. Em todos estes experimentos foram medidas diferenças significativas nas deformações em relação aos outros experimentos, sendo que o maior deslocamento encontrado no suporte inferior é aproximadamente 190% maior do que o menor deslocamento, ou 140% maior se ignorar resultados de componentes com maiores deslocamentos. Para o bloco do macho, a diferença é de 130%.

Quanto a forma da deformação, de modo geral todos os experimentos resultaram em deformações condizentes com o efeito da pressão interna atuando na cavidade: uma flexão no sentido de abertura do molde. A exceção ocorreu no experimento MEF 2.3, em que houve uma redução menor na espessura do suporte inferior. A deformação do bloco do macho e do suporte inferior, neste experimento, se deu na forma de uma flexão não centralizada no sentido contrário ao de abertura do molde, como mostrado na Figura 50. Este resultado só pode ser atribuído a uma instabilidade na simulação, principalmente tendo em vista que o experimento MAEEF 2.3 mostra uma flexão no sentido de abertura do molde, como esperado.

Figura 50 - Forma da deformação do bloco do macho e do suporte inferior no experimento MEF 2.3.



Fonte: o autor (2024)

Em resumo, os componentes do lado fixo se mostraram pouco sensíveis à mudança nas espessuras de fundo dos componentes estruturais. Para o suporte superior, a diferença de deslocamento entre experimentos foi menor que 10%. Para o bloco da cavidade, o deslocamento medido foi consideravelmente menor do que nos outros componentes, nunca

passando de 0,055 mm, enquanto o menor deslocamento medido nos outros componentes foi de 0,141 mm para o suporte superior no MEF 2.6.

Segundo Chayapathi, Kesavan e Miller (2000), a espessura da placa da máquina no lado fixo tem grande influência nas deformações dos componentes do molde. Sua pesquisa indica que uma combinação de placa espessa com molde fino tende a apresentar melhores resultados em relação às deformações do que outras combinações. Isso pode ser atribuído ao fato de que componentes do molde com maior espessura podem representar restrições à expansão térmica, exacerbando a deformação causada pela mesma. Estes resultados são corroborados pela pesquisa de Miller *et al* (2000), que indica que moldes menores e mais finos tendem a apresentar menores deformações quando comparados com moldes maiores e mais rígidos.

Por outro lado, os componentes do lado móvel apresentaram grandes aumentos nas suas deformações conforme a espessura dos componentes deste lado foi reduzida. Com a exceção do bloco do macho e do suporte inferior no experimento MEF 2.3, a forma da deformação de cada componente se manteve similar em todos os experimentos da Etapa 2.

Apesar de moldes com menor espessura de fundo aparentemente propiciarem maiores deformações, é importante ressaltar que os mesmos também tendem a apresentar menos rebarbas (MILLER *et al*, 2000). O molde mais fino apresenta uma flexibilidade maior em relação às cargas mecânicas, fazendo com que estas pressões não causem grandes separações no plano de partição do molde. Portanto, apesar das deformações do molde estarem ligadas a criação de rebarbas, a relação não é necessariamente diretamente proporcional. Miller *et al* (2000) também sugere que quanto mais espesso o suporte atrás dos blocos da cavidade, menores é a separação da linha de partição.

5.3. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ANÁLISE

Esta seção compara os métodos MEF, MAEEF e Analítico em termos de precisão, velocidade e facilidade de uso. Para isso, o MEF, devido a sua maior precisão, foi utilizado como termo de comparação. O Método dos Elementos Finitos é tradicional em seu uso para simulações estruturais, e seus resultados são relativamente confiáveis. Comparado com este, o método analítico apresenta valores da mesma ordem dos obtidos com o MEF. Porém, não só os valores de deslocamentos encontrados são pouco sensíveis a mudanças de espessura, eles também são menos conservadores do que os encontrados por simulação. Isso torna o método menos confiável para ser utilizado no fluxo de projeto, já que os deslocamentos calculados provavelmente serão menores do que os reais.

Quanto aos experimentos com o MAEEF, os valores de deslocamentos encontrados são menos estáveis do que os obtidos por MEF, no sentido em que há diferenças consideráveis nos resultados de dois experimentos consecutivos, mesmo quando as modificações na geometria não explicam essas diferenças. Isso, porém, pode ser atribuído ao método de medição dos deslocamentos que não leva em consideração a rotação do componente. Nas simulações feitas no SimSolid, componentes rotacionados foram mais comuns do que nas simulações realizadas no SimLab. Apesar disso, a forma das deformações se manteve condizente com a esperada frente às solicitações aplicadas. A maioria dos experimentos MAEEF apresentou formas de deformação similares aos experimentos MEF correspondentes, com a exceção de resultados como o do bloco da cavidade no MAEEF 1.2, conforme mostrado na Seção 5.1. Isso não necessariamente significa que o resultado deste experimento esteja errado. Algumas divergências no modelo como a presença de furos e diferentes tipos de contato podem ter causado esta diferença de resultado, e este trabalho não apresenta argumentos conclusivos sobre qual é mais correto. Além disso, o método MAEEF tendeu a apresentar resultados mais conservadores, o que é um fator positivo do ponto de vista de segurança.

No quesito velocidade de solução, o resultado é claro. O método analítico dá o resultado em segundos, enquanto o MAEEF o faz entre 5 minutos e 1 hora, dependendo se é a primeira análise para o modelo estudado, ou se já foram realizadas algumas iterações. O MEF é o que ocupa maior tempo computacional, levando de 2 a 30 horas para alcançar a solução com os recursos computacionais disponíveis na workstation utilizada neste trabalho.

Por fim, a facilidade de uso segue a mesma ordem da questão da velocidade. O método analítico é mais fácil de ser utilizado, podendo ser colocado em uso com pouco treinamento, uma vez que esteja disponível, por exemplo, em uma planilha de cálculo. O MAEEF requer tempo de treinamento para a utilização do software SimSolid, porém é bastante intuitivo, e necessita pouco pré-processamento em comparação com o MEF. Dito isso, a versão utilizada do software apresentou alguns problemas de fechamento repentino ao tentar solucionar simulações com erros ao invés de mostrar ao usuário a fonte do erro para mais fácil correção, o que é um ponto negativo do ponto de vista da facilidade de uso. Além disso, não há opção de exportar diretamente os dados de temperatura vindo de outro software, precisando inserir manualmente.

O MEF utilizado através do software SimLab tem uma curva de aprendizado mais complexa, e requer uma quantidade relativamente grande de pré-processamento, com geração, ajuste e refino de malha sendo processos complexos que utilizam um tempo considerável do

projetista. Porém, sendo um método mais tradicional, a comunicação com outros programas é facilitada, exemplificado pela capacidade de importar o estado de temperaturas obtido pela simulação do ciclo de injeção realizada no MAGMASOFT.

Levando em consideração estes três fatores, com as informações disponíveis após a realização dos experimentos, o MAEEF mostra ter o potencial para ser aplicado no fluxo de projeto de moldes, do ponto de vista estrutural. Sua relativa facilidade de uso combinada com a velocidade de solução fazem deste uma boa escolha, desde que seus resultados se mostrem consistentes e precisos.

O MEF já é utilizado hoje na indústria de moldes de injeção de alumínio em processos de análise de falhas. Porém, o mesmo não é tipicamente utilizado no fluxo de projeto devido, principalmente, ao tempo investido no pré-processamento e na simulação ser proibitivo para a competitividade da ferramentaria.

Já o método analítico, apesar de ser, dentre os três, de mais fácil utilização e de mais rápida resolução, é pouco preciso e confiável em comparação. O fato de ser pouco sensível às dimensões dos componentes estruturais e menos conservador que os outros métodos torna difícil justificar seu uso no fluxo de projeto. No Quadro 18 se encontra um resumo comparativo dos três métodos de estudo em relação aos requisitos mencionados.

Quadro 18 - Comparação entre os métodos de estudo.

Método	Precisão	Tempo	Facilidade de uso
MEF	Alta	2 a 30 horas	Complexo
MAEEF	Alta	5 min a 1 hora	Médio
Analítico	Baixa	Segundos	Fácil

Fonte: o autor (2024)

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi feita a utilização comparativa entre três métodos de estudo diferentes para a análise das deformações em um molde de injeção de alumínio. O Método dos Elementos Finitos é um método tradicional e confiável, porém seu pré-processamento é extensivo e sua solução computacionalmente custosa. Em termos de tempo computacional, as simulações iniciais através do MEF tomaram cerca de 8 vezes mais tempo que as simulações iniciais por MAEEF. As simulações subsequentes apresentaram uma diferença ainda maior, sendo aproximadamente 50 vezes mais rápidas com MAEEF. O Método da Aproximação Externa por Elementos Finitos requer menos pré-processamento e dá resultados rapidamente, porém é menos conhecido e não existem estudos do seu uso em moldes de injeção de alumínio. O método analítico utiliza grandes simplificações para permitir o uso de equações estabelecidas, juntamente com o princípio da superposição, e obter resultados facilmente. Isso foi feito com três objetivos que são descritos a seguir.

No primeiro objetivo buscou-se um maior entendimento sobre os efeitos da atuação dos carregamentos mecânicos, térmicos e termomecânicos no molde. Os três métodos de estudo foram utilizados na Etapa 1 dos experimentos, realizando análises apenas com os esforços mecânicos aplicados (pressão de intensificação e força de fechamento), apenas com os esforços térmicos (deformações causadas pelo perfil térmico não homogêneo nos componentes) e com a combinação dos dois primeiros. Os resultados descritos nas Seções 4 e 5 demonstram que os esforços mecânicos e térmicos atuam com deformações em sentidos opostos reduzindo seus efeitos quando combinadas. No entanto, as deformações causadas por cada tipo de carregamento não se cancelam uma à outra. Em vez disso, as formas da deformação apresentam características dos dois tipos de carregamento. Isso é visível, principalmente, nos perfis de deformação dos componentes do lado fixo do molde, como na Figura 44. Os efeitos da temperatura nas deformações foram mais presentes nos componentes com movimento mais restrito por conexões com a máquina. No caso estudado, isso significa que os componentes do lado fixo, principalmente o suporte superior, tem sua deformação devido, principalmente, aos efeitos térmicos. Já no lado móvel, as deformações principais são causadas pelo carregamento mecânico da pressão de intensificação na superfície da cavidade.

No segundo objetivo, experimentos foram feitos na Etapa 2 com variações das espessuras de fundo dos suportes e blocos do macho e cavidade com o objetivo de entender a influência destas dimensões nas deformações do molde. A forma da deformação parece não mudar muito com a mudança da espessura, mantendo as características das deformações do

molde original. Porém o grau de deformação tende a aumentar, principalmente a proveniente dos esforços mecânicos. O lado fixo do molde é diretamente suportado pela placa fixa da máquina, fazendo com que reduções na espessura normalmente tenham pouco efeito nas deformações. Já o lado móvel, devido a presença da placa e dos pinos extratores, apresenta um vão entre o suporte inferior e a placa móvel da máquina injetora. Este vão permite maiores deformações, mesmo com o uso de pilares para o apoio do suporte. Os resultados parecem confirmar isso, já que a redução nas espessuras dos componentes do lado móvel induz um aumento considerável nas deformações destes componentes.

No terceiro objetivo, com os resultados das Etapas 1 e 2, foi avaliada a viabilidade de cada método de estudo para uso durante o fluxo de projeto de moldes de injeção de alumínio, tendo em mente a necessidade de um método preciso, rápido e de fácil uso. Começando pelo MEF, os resultados consistentes e a tradição do método indicam que o mesmo apresenta uma boa precisão. Porém, o extenso e relativamente complexo pré-processamento, assim como o grande custo computacional na solução tornam o método proibitivo nos quesitos velocidade e facilidade de uso. Por outro lado, o MAEEF também apresentou resultados relativamente consistentes, mesmo que menos do que o MEF, e ainda mais conservadores que este. Além disso, se mostrou sensível às mudanças de espessura dos componentes, e é mais intuitivo no uso e rápido na resolução. Os resultados deste trabalho não são conclusivos para apontar se o método é completamente adequado para a análise estrutural de moldes de injeção de alumínio, porém tendem a indicar uma resposta positiva. Por fim, o método analítico, apesar de ser o mais rápido e de fácil uso, comparativamente, não se mostra adequado no quesito precisão, aqui avaliada em comparação ao MEF. Apesar de alcançar valores da mesma ordem dos outros métodos, não só é pouco sensível a mudanças dimensionais dos componentes (apresentou um aumento máximo dos deslocamentos de 54%, quando no MEF o aumento foi de 118%), como também é pouco conservador, apresentando resultados de deformação tipicamente menores do que os outros métodos.

Do ponto de vista da execução deste trabalho, o maior desafio foi a tradução dos princípios e efeitos que afetam o molde de injeção de alumínio em modelos conceituais e computacionais. Cada um dos três métodos de estudo apresenta particularidades e limitações que exigem diferentes simplificações. Além disso, não foi trivial entender as causas dos erros ocorridos nas simulações, e uma porção significativa do tempo dedicado a este trabalho foi direcionada a realização de testes para encontrar os parâmetros que trazem os resultados mais consistentes.

No fim, considerando a facilidade de uso e os requisitos de uma matrizaria, é da opinião do autor que o MAEEF se apresenta como o método com maior potencial de integração ao fluxo de projeto de moldes de injeção. Seus resultados conservadores, facilidade de uso e rapidez de resolução potencialmente permite a integração do método mantendo competitividade. É importante, porém, que mais estudos sejam realizados com o intuito de expandir os conhecimentos adquiridos com esta pesquisa. Os resultados deste trabalho são indicativos, porém não conclusivos. Além disso, ao longo do trabalho manteve-se o foco e escopo iniciais, no entanto diferentes oportunidades de pesquisa foram identificadas. Portanto, faz-se algumas sugestões de trabalhos futuros.

- **Aplicação dos métodos estudados a diferentes perfis de moldes:** moldes de injeção de alumínio são diversos em geometria, tamanho e complexidade. Os resultados obtidos neste trabalho não necessariamente se aplicam a outros moldes. Sugere-se repetir estes experimentos em moldes com mais cavidades, com gavetas, maiores, menores, com maiores pressões... a expansão deste estudo para mais moldes permitiria saber o que é característica geral do processo, ou específica do modelo utilizado.
- **Diferentes métodos de medição de deformação:** o método de medição utilizado possui a vantagem de lidar apenas com superfícies planas e ser capaz de ignorar os deslocamentos causados pela expansão térmica. Contudo, existem desvantagens. A rotação dos componentes distorce o valor de deformação medido. Além disso, não é calculada a deformação no que se pode argumentar ser a superfície mais importante do molde, a cavidade. Outros métodos de medição podem ser capazes de ignorar o efeito da rotação, bem como avaliar a distorção da peça causada pela deformação da cavidade.
- **Instrumentação de moldes:** os resultados obtidos através do MEF, neste trabalho, são utilizados como referência por conta de ser um método extensivamente estudado, de modo a ser tradicionalmente confiável. Porém, mesmo para o MEF simplificações precisam ser feitas e erros de modelagem, pré-processamento e convergência podem ocorrer. É comum haver divergências significativas entre o simulado e o real. Seria pertinente, portanto, a instrumentação de um molde real, em uso, e a comparação das deformações assim medidas com as obtidas pelas simulações neste trabalho.
- **Inserção dos métodos de estudo no fluxo de projeto:** neste trabalho, os métodos de estudo foram julgados supondo seu uso dentro do fluxo de projeto de uma ferramentaria. Porém, a interação entre diferentes etapas do projeto é omitida, isolando especificamente a avaliação estrutural do molde. Sugere-se um estudo da aplicação dos

métodos, em especial o MAEEF, dentro da ferramentaria, seguindo o fluxo de projeto desde a concepção do molde até a fabricação, para entender como e quanto a análise estrutural pode apoiar este processo.

- **Estudo das deformações como um processo dinâmico:** uma das simplificações feitas foi a consideração das cargas aplicadas ao molde como estáticas, utilizando apenas o instante de tempo em que a pressão de intensificação é aplicada. Contudo, a variação dos carregamentos em um curto espaço de tempo é uma condição inerente do processo de injeção de alumínio, e isso pode ter efeitos nas deformações do molde que são ignorados neste trabalho. Por exemplo, a ordem da aplicação dos carregamentos influencia na forma da deformação dos componentes. Além disso, a fadiga mecânica pode ser um fator importante, com o potencial de causar falhas catastróficas no molde. Por isso, sugere-se que um estudo das deformações do molde seja realizado considerando esta característica dinâmica do processo.
- **Estudo de método analítico direcionado para moldes de injeção de alumínio:** Esta pesquisa utilizou um método analítico baseado no que foi proposto por Menges (2001) em seu livro. Este método, porém, foi apresentado para utilização em moldes de injeção de polímeros. Um estudo de um método analítico mais direcionado para a injeção de alumínio pode trazer resultados mais condizentes com a realidade do processo.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, A.; SCHULTZ, R.; RAKOTO, B.; MURPHY, J.; LING, L.; MERTA, M.; DUDLEY, J. **2020 NORTH AMERICA LIGHT VEHICLE ALUMINUM CONTENT AND OUTLOOK**. 2020. Disponível em: www.duckerfrontier.com.
- ALTAIR. **SimLab**. Altair Engineering Inc., 2023. Seção de Ajuda.
- AHUETT-GARZA, H.; MILLER, R. A. The effects of heat released during fill on the deflections of die casting dies. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 142, n. 3, p. 648–658, 2003.
- AHUETT-GARZA, H.; HEGDE, K.; MILLER, R. A. Computer Simulation of Die Casting Die Deflections. **Die Casting Engineer**. Columbus. p. 18-25, 1995
- ANDRESSEN, B. **Die Casting Engineering - A Hydraulic, Thermal and Mechanical Process**. 1st. ed. New York: Marcel Dekker, 2005.
- ANFAVEA, **Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores**, 2022. Disponível em <https://anfavea.com.br>. Acesso em 27 de Maio de 2022
- ANGLADA, E. *et al.* Prediction and validation of shape distortions in the simulation of high pressure die casting. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 33, p. 228–237, 2018.
- ASM INTERNATIONAL, **ASM Handbook: Casting**. Russel Township, Ohio, USA: ASM International, 1998. 15 v.
- AZO MATERIALS. **H13 Tool Steel - Chromium Hot-Work Steels**, ©2000-2024. The leading online publication for the Materials Science community. Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9107>. Acesso em: 28 fev. 2024
- BARONE, M. R.; CAULK, D. Analysis of thermo-mechanical distortion in die casting. **NADCA**, USA, v. 99, n. 31, p. 1–9, 1999.
- BONOLLO, F.; GRAMEGNA, N.; TIMELLI, G. High-pressure die-casting: Contradictions and challenges. **JOM**, v. 67, n. 5, p. 901–908, 2015.
- BURKHART, T. A.; ANDREWS, D. M.; DUNNING, C. E. Finite element modeling mesh quality, energy balance and validation methods: A review with recommendations associated with the modeling of bone tissue. **Journal of Biomechanics**, v. 46, p. 1477-1488, 2013.
- CHANDRUPATIA, T. R.; BELEGUNDU, A. D. **Elementos Finitos**; 4ª ed, Ed. Pearson, 2015.
- CHAYAPATHI, A.; KESAVAN, V.; MILLER, R. A. The effects of structural die and machine variables on die deflection. **Die Casting Engineer**, v. 44, n. 3, p. 60–68, 2000.
- EBNER, R; MARSONER, S; SILLER, I; ECKER, W. Thermal fatigue behaviour of hot-work tool steels: heat check nucleation and growth, p 182-194 , **J. Microstructure and Materials Properties**, Vol. 3, Nos. 2/3, 2008;

FONSECA, M. T. **Teoria Fundamental do Processo de fundição Sob Pressão**. 1. ed. Belo Horizonte: SENAI, 2001. v. 1000. 87p

FUOCO, R. **Fundição Sob Pressão de Ligas Al-Si**. Apresentação de Slides. Curso de Fundição sob Pressão, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2006.

GAVIRA, M. O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GOELKE, M. *Simulation Revolution with Altair SimSolid*. 1st. ed. Troy: Altair, 2021. H13 Tool Steel - Chromium Hot-Work Steels. **AZO Materials**, 2013. Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9107>. Acesso em: 28 fev. 2024.

HERMAN, E. A. **Designing die casting dies**. North American Die Casting Association, Rosemont, USA, 1992.

JEONG, S. *il et al.* Mold structure design and casting simulation of the high-pressure die casting for aluminum automotive clutch housing manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 84, n. 5–8, p. 1561–1572, 2016.

KABIRI-BAMORADIAN, K. **Die and Die Casting Machine Force and Deflection Predicitons: Correlations for Predicting Tie Bar Forces and Parting Plane Separation**. Columbus, 2009.

KABIRI-BAMORADIAN, K. **Die and Die Casting Machine Computer Simulations: Modeling , Meshing , Boundary Conditions , and Analysis Procedures**. Columbus, 2010.

KHAN, M. A. A.; SHEIKH, A. K. A comparative study of simulation software for modelling metal casting processes. **International Journal of Simulation Modelling**. v. 17, n. 2, p. 197–209, 2018.

MATWEB, LCC. **MatWeb Material Property Data**, ©1996-2024. Data sheets for over 175,000 metals, plastics, ceramics, and composites. Disponível em: <https://www.matweb.com>. Acesso em: 28 fev. 2024

MENGES, G.; MICHAELI, W.; MOHREN, P. **How to make injection molds**. 3rd. ed. Cincinnati: Hanser, 2001.

MILLER, R. A. *et al.* **Die Casting Die Deflections: Prediction and Attenuation**. Columbus: 1998.

MILLER, R. A. *et al.* **Modeling the Distortion and Mechanical Performances of Dies**. NADCA. USA, 2000.

MILLER, R. A. **Modeling the Mechanical Performance of Die Casting Dies**. Columbus: 2004.

MILLER, R. A.; KABIRI-BAMORADIAN, K.; GARZA, A. Finite Element Modeling of Casting Distortion in Die Casting. 2009, Las Vegas. **113th Metalcasting Congress**. Las Vegas: NADCA, 2009.

MILLER, R. A. **Mechanical Performance of Dies**. Columbus: 2011.

MORESCO, R. L. **Um Modelo Computacional Para o Estudo da Fadiga**. 2018. Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

MÜLLER, S. *et al.* An Initial Study of a Lightweight Die Casting Die Using a Modular Design Approach. **International Journal of Metalcasting**, v. 12, n. 4, p. 870–883, 2018.

NADCA. **Special Quality Die Steel & Heat Treatment Acceptance Criteria for Die Casting Dies**. Arlington Heights: North American Die Casting Association, 2016.

NADCA. **NADCA Product Specification Standards for Die Castings**. 11th. ed. Arlington Heights: North American Die Casting Association, 2021.

NEFF, D. **Aluminum casting technology**. 3 ed. Schaumburg: AFS. 2017

NETO, A. R. **Proposta de Procedimento para o Dimensionamento Mecânico de Moldes de Injeção**. Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

NOGOWIZIB, B. **Konstruktion und Fertigung der Druckgießformen**. German: Schiele & Schön, 2019. 546 p.

NOGOWIZIB, B. **Theorie und Praxis des Druckgusses**. German: Schiele & Schön, 2010. 997 p.

OLIVEIRA, L. B. **Estudo para o aumento da vida útil de molde de fundição sob pressão de alumínio**. Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2021.

OSBORNE, M. A. **Analysis Of The Effects Of Die Casting Process Control On Casting Dimensional Variability**. 1995. - The Ohio State University, Ann Arbor, 1995.

PEREIRA, P. F. V. **Dimensionamento Estrutural de Moldes de Injeção**. 2017. Mestrado - Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2017.

PETRINI, C.; BOFF, L. **Lista de Materiais 08/12/2017** (Arquivos Internos). Gama Matrizas, 2017.

PROVDANOV, C. C.; FREITAS, E. C. DE. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. 277 p. *E-book*.

RAGAB, A.; KABIRI-BAMORADIAN, K.; MILLER, R. A. Modeling part distortion and stresses in die casting. **Die Casting Engineer**, v. 46, n. 2, p. 41–48, 2002.

SCHÖNGRUNDNER, R. *et al.* Development of a Simulation Aided Design Strategy for Casting Die Frames. 2012, Leoben. 9th **International Tooling Conference: Developing The World Of Tooling**. Leoben: 2012.

SIMSOLID. SIMSOLID Technology Overview. Whitepaper, 2015.

TSCIPTSCHIN, A. P. **Análise pelo Método dos Elementos Finitos**. Apresentação de Slides. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em <http://www.pmt.usp.br/pmt2501/Elementos%20finitos.pdf>. Acesso em 29 de Janeiro de 2023.

YAMAGATA, H. *et al.* Deflection Simulation of a Die Installed in a High-Pressure Die-Casting Machine. **Japanese Mechanical Engineers Society**, v. 79, n. 806, 2013.