



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
AMAZONAS
CAMPUS MANAUS-CENTRO
DEPARTAMENTO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

RENANN NASCIMENTO AMARAL

**ESTUDO DE PRÉ-AQUECIMENTO DE MOLDE DE FUNDIÇÃO DE ZAMAC
SOB PRESSÃO**

MANAUS-AM

2022

RENANN NASCIMENTO AMARAL

ESTUDO DE PRÉ-AQUECIMENTO DE MOLDE DE FUNDIÇÃO DE ZAMAC SOB PRESSÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. MSc. Sidney Assis Chagas

MANAUS-AM

2022

RENANN NASCIMENTO AMARAL

ESTUDO DE PRÉ-AQUECIMENTO DE MOLDE DE FUNDIÇÃO DE ZAMAC SOB PRESSÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. MSc. Sidney Assis Chagas

Aprovado em 05 de janeiro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

(Assinado digitalmente em 11/01/2022 20:52)
SIDNEY ASSIS CHAGAS
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
Matrícula: 1015898

Prof. MSc. SIDNEY ASSIS CHAGAS - Avaliador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM)

(Assinado digitalmente em 11/01/2022 22:34)
PLACIDO FERREIRA LIMA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
Matrícula: 981395

Prof. Esp. PLÁCIDO FERREIRA LIMA - Avaliador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM)

(Assinado digitalmente em 13/01/2022 12:35)
CRISTOVAO AMERICO FERREIRA DE CASTRO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
Matrícula: 1037557

Prof. MSc. CRISTOVÃO AMÉRICO FERREIRA DE CASTRO – Avaliador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM)

Biblioteca do IFAM- Campus Manaus Centro

A485e Amaral, Renann Nascimento.
Estudo de pré-aquecimento de molde de fundição de ZAMAC sob
pressão / Renann Nascimento Amaral. – Manaus, 2022.
51 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus*
Manaus Centro, 2022.

Orientador: Prof. Me. Sidney Assis Chagas.

1. Engenharia mecânica. 2. Moldes metálicos. 3. Fundição. I.
Chagas, Sidney Assis. (Orient.) II. Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia do Amazonas III. Título.

CDD 621

Aos meus pais, esposa e filhos que me apoiaram durante toda esta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo agradeço a Deus que é o autor da vida e em quem creio de coração que me fortalece todos os dias.

Também sou grato aos meus pais Riemann e Terezinha que nunca mediram esforços para me proporcionar as melhores condições de ensino com o objetivo de tornar esse momento uma realidade.

À minha esposa Nancy e meus filhos Beatriz e Calebe que me encorajam todos os dias a buscar novos objetivos.

Aos meus familiares e irmãos em Cristo que contribuíram principalmente com orações para que as dificuldades fossem superadas.

Aos meus professores e colegas que fizeram parte desta caminhada e, dentre os quais destaco o Prof. Sidney, o Prof. Ailton e meus colegas Ivair e Nazário.

Aos profissionais da empresa onde foi realizado pesquisas essenciais para conclusão desse trabalho.

Ao IFAM-CMC no qual tive a oportunidade de adquirir conhecimento valiosos que tem sido útil na minha carreira profissional.

RESUMO

A busca pela eficiência produtiva é uma necessidade constante para as empresas que tem o objetivo de prosseguirem com suas atividades em um mercado cada vez mais competitivo e que apresentam inovações constantes. Para isso muitas delas além de estarem atentas as inovações tecnológicas também promovem programas de melhorias internas com o intuito de obter soluções viáveis e com a certeza de retorno no investimento. Visando propor melhorias em processos industriais reais, o presente trabalho aborda o estudo da realização do pré-aquecimento de moldes metálicos em um processo de fundição sob pressão que utiliza a liga de ZAMAC como matéria-prima e tem como objetivo principal mostrar a viabilidade na implementação desse processo. A metodologia aplicada compreende a pesquisa bibliográfica e simulação da implementação desse processo em uma empresa que possui um setor de fundição que contempla as especificações necessárias. Ao final do trabalho chega-se à conclusão de que é viável a implementação do processo de pré-aquecimento de moldes no setor de fundição da empresa estudada tendo como base os resultados obtidos relacionados ao aspecto técnico e principalmente financeiro onde há um retorno do investimento em 10 meses devido ao ganho produtivo evidenciado.

Palavras-chave: Pré-aquecimento. Moldes metálicos. Fundição sob pressão. Viabilidade.

ABSTRACT

The search for productive efficiency is a constant need for companies that aim to continue their activities in an increasingly competitive market and that present constant innovations. For this, many of them, in addition to being aware of technological innovations, also promote internal improvement programs in order to obtain viable solutions and with the certainty of a return on investment. Aiming to propose improvements in real industrial processes, the present work deals with the study of the preheating of metallic molds in a pressure casting process that uses ZAMAC alloy as raw material and has as main objective to show the feasibility in the implementation of this process. The applied methodology comprises bibliographical research and simulation of the implementation of this process in a company that has a casting sector that includes the necessary specifications. At the end of the work, the conclusion is reached that it is feasible to implement the preheating process of molds in the casting sector of the studied company, based on the results obtained related to the technical and mainly financial aspects, where there is a return on investment in 10 months due to the production gain evidenced.

Keywords: Preheating. Metallic molds. Die casting. Viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do processo de fundição de areia desde a etapa de confecção dos modelos e moldes	18
Figura 2 - Peças fabricadas por meio do processo de fundição.....	19
Figura 3 – Alguns defeitos gerados no processo de fundição	20
Figura 4 – Usinagem de molde metálico	22
Figura 5 – Etapas de fundição em molde metálico.....	22
Figura 6 – Processo de fundição em baixa pressão.....	25
Figura 7 – Corte de uma matriz usada para fundição sob pressão	26
Figura 8 – Processo de fundição sob pressão em câmara fria.....	28
Figura 9 – Processo de fundição sob pressão em câmara quente.....	29
Figura 10 – Etapas do processo de preparação da fundição	37
Figura 11 – Defeitos Superficiais encontrados na cavidade do molde	39
Figura 12 – Aspecto visual da superfície da cavidade nova do molde	40
Figura 13 – Esquema do método de pré-aquecimento usado na simulação.....	41
Figura 14 – Execução da simulação na empresa.....	42
Figura 15 – Processo de fundição com inclusão do pré-aquecimento de molde.....	42
Figura 16 – Ensaio de Dureza da cavidade do molde.....	45
Figura 17 – Análise Visual da Cavidade do Molde	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção brasileira de fundidos (mil toneladas/mês).....	16
Tabela 2 – Destino da produção brasileira de fundidos em 2018 e 2019.....	17
Tabela 3 – Produção mundial de fundidos segundo ranking de 2018 da revista Modern Casting	17
Tabela 4 – Composição química das ligas de ZAMAC	31
Tabela 5 – Propriedades físicas e mecânicas das ligas de Zamac.....	32
Tabela 6 – Tempo de execução das etapas de preparação do processo de fundição na empresa estudada.....	37
Tabela 7 – Histórico de avaliação do molde na empresa.....	39
Tabela 8 – Tempo de execução das etapas de preparação do processo de fundição após inclusão do pré-aquecimento de molde	44
Tabela 9 – Resultados obtidos durante as simulações	44
Tabela 10 – Valores dos equipamentos usados no pré-aquecimento de moldes	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Aumento da temperatura durante pré-aquecimento	43
Gráfico 2 – Retorno do investimento para a empresa	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 O PROCESSO DE FUNDIÇÃO	16
2.1.1 Aspectos gerais do processo de fundição	17
2.2 MOLDES PERMANENTES	21
2.2.1 Defeitos em moldes permanentes	23
2.3 FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO	24
2.3.1 Fundição em baixa pressão	24
2.3.2 Fundição em alta pressão	25
2.4 ZAMAC	29
3 METODOLOGIA DA PESQUISA	33
3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	33
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	35
4.1 EMPRESA ESTUDADA	35
4.1.1 Processo de fundição na empresa	36
4.2 SIMULAÇÃO DE PRÉ-AQUECIMENTO DE MOLDE	38
4.2.1 Escolha do molde	38
4.2.2 Método de pré-aquecimento do molde	40
4.3 RESULTADOS OBTIDOS	43
4.4 VIABILIDADE FINANCEIRA DO PROCESSO DE PRÉ-AQUECIMENTO DE MOLDE	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

As empresas têm buscado desenvolver processos de fabricação em suas unidades fabris que estejam cada vez mais preparados para atender as demandas do mercado consumidor não somente em relação a quantidade de unidades produzidas, mas também atendendo as expectativas dos seus clientes no que diz respeito a qualidade dos produtos. Para isso é imprescindível o investimento no aprimoramento dos métodos de geração de produtos através da implementação de novas tecnologias, qualificação da mão de obra direta e indireta e controles de qualidade cada vez mais eficazes. Tais medidas apenas são viáveis quando a relação custo x benefício está de acordo com as expectativas dos investidores das empresas que buscam não somente se manter competitiva no mercado como também potencializar o maior lucro possível.

Inseridos neste contexto podemos citar as empresas que fazem uso do metal fundido como matéria prima e que tem a fundição como um dos seus processos iniciais na geração de seus produtos.

O processo de fundição é um método de fabricação de produtos onde é possível se obter peças através da solidificação de metal líquido dentro de matrizes (moldes). Dentre os diversos métodos de fundição, a fundição sob pressão é um tipo bastante utilizado nas indústrias por apresentar a possibilidade de se obter um alto volume de peças em um tempo menor e com formas complexas [GROOVER, 2014].

O processo de fundição sob pressão é altamente difundido nas indústrias do polo industrial de Manaus e, assim como outros processos de fabricação de peças é necessário que haja a definição de parâmetros para preparação do processo (setup) que permitam alinhar a produção de peças na quantidade que se deseja juntamente com a qualidade tanto das peças fabricadas quanto em relação a durabilidade dos equipamentos utilizados neste processo.

O pré-aquecimento de moldes no processo de fundição sob pressão é um tema bastante importante, pois envolve um parâmetro de setup que está relacionado com a preparação para execução da atividade produtiva e que também pode contribuir com o aumento da durabilidade do molde.

Sendo um dos tipos de metais usados na fundição sob pressão, a liga de ZAMAC é uma liga metálica composta em sua maior parte por Zinco, mas que também possui Alumínio, Magnésio e Cobre. Seu emprego nos processos de fundição é favorecido devido a características como: baixo ponto de fusão (420°C) e boa

resistência a tração, corrosão e desgaste o que proporciona maior facilidade na obtenção de peças com formatos mais complexos e com bom acabamento superficial (BRAGA, 2015).

A produção utilizando processo de fundição possui um custo bastante elevado e, por isso, reduzir as perdas se torna algo muito importante para as indústrias.

Nesse contexto apresenta-se a seguinte pergunta problema: “O uso do processo de pré-aquecimento de moldes de fundição sob pressão de ligas de ZAMAC é viável para uso em escala industrial visando obter maior produtividade de peças e durabilidade das ferramentas que possuem um alto custo?”.

Como forma de avaliação das possíveis respostas para a pergunta problema são levantadas as seguintes hipóteses:

- O pré-aquecimento de moldes contribui para a diminuição do gradiente de temperatura no início do processo de fundição que neste caso pode favorecer a durabilidade das cavidades do molde (negativo do molde onde é formado a peça) reduzindo a ação de desgaste que a liga de ZAMAC ocasiona durante o processo de fundição.
- O processo de pré-aquecimento de moldes já é utilizado por algumas indústrias que trabalham com alumínio e suas ligas trazendo benefícios quanto a produtividade e qualidade dos produtos, porém este trabalho visa identificar se esses benefícios podem ser replicados para o processo de fundição sob pressão que utilizam ligas de ZAMAC.

O objetivo geral do trabalho visa verificar a viabilidade da implementação o processo de pré-aquecimento de moldes metálicos em um processo industrial.

Partindo-se do objetivo geral do trabalho são desdobrados os seguintes objetivos específicos:

- a) Estudar referências bibliográficas que abordam os assuntos: moldes metálicos, liga de ZAMAC e fundição sob pressão;
- b) Executar uma simulação de pré-aquecimento de molde;
- c) Avaliar as consequências positivas e/ou negativas do pré-aquecimento de moldes metálicos usados em fundição sob pressão;
- d) Mostrar a viabilidade econômica de uma empresa implementar o processo de pré-aquecimento de moldes.

O desenvolvimento do presente trabalho visa contribuir cientificamente com informações técnicas (parâmetros de operação de máquinas, resultado de ensaios mecânicos, métodos de execução e outros) sobre o processo de pré-aquecimento em moldes metálicos usados para fabricação de peças através do processo de fundição da liga de ZAMAC, viabilizando o desenvolvimento de processos produtivos mais eficientes nas indústrias que fazem uso desse tipo de processo para fabricação de seus produtos com conseqüente redução nos custos operacionais e, além disso, também servir de fonte de informações para futuras pesquisas científicas que tenham relação com esse assunto.

Esta pesquisa científica está baseada em uma análise dos resultados obtidos durante uma simulação realizada em uma empresa do Polo Industrial de Manaus que faz uso do processo de fundição com liga de ZAMAC em máquinas que utilizam o molde metálico. Com o objetivo de parametrizar a simulação serão consideradas as informações coletadas em análise bibliográfica previamente realizada e informações de parâmetros do processo já utilizados pela empresa no setor de fundição.

Buscando discorrer sobre o assunto de maneira a facilitar a sua compreensão, este TCC está estruturado em cinco capítulos. O primeiro composto pela introdução no qual são descritas de forma geral as primeiras informações sobre o tema da pesquisa e sua relevância para o meio científico, o segundo traz o referencial teórico utilizado como base para se aprofundar o conhecimento sobre o tema trazendo importantes conceitos tratados por diversos autores em artigos científicos e livros amplamente utilizados no curso de graduação em engenharia mecânica. No terceiro capítulo é descrito a metodologia adotada para a realização da simulação do processo de pré-aquecimento de moldes metálicos em uma indústria do Polo Industrial de Manaus (PIM). No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos durante as simulações na empresa além da avaliação de viabilidade financeira relacionado a implementação desse processo em uma indústria tal como foi realizado e a discussão sobre os aspectos gerais que foram observados durante a pesquisa. No quinto capítulo são citadas as obras e os autores que foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os resultados da pesquisa bibliográfica realizada para melhor compreender o tema proposto partindo dos aspectos que o norteiam e apresentando conceitos importantes, tais como: fundição, liga de ZAMAC, moldes metálicos e outros. Para tanto, faz-se o uso de fontes de informações confiáveis do assunto que possuem reconhecimento tanto no meio acadêmico quanto no industrial.

2.1 O PROCESSO DE FUNDIÇÃO

O processo de fundição de metais e suas ligas passou a ser utilizado pelo homem por volta de 4.000 a.C. e ao longo dos anos vem sendo aprimorado a tal ponto que hoje encontramos diversas combinações de ligas metálicas com características específicas para cada tipo de aplicação no ramo industrial (TÂMEGA, 2017).

Segundo dados divulgados pela Associação Brasileira de Fundição (ABIFA), no ano de 2019 a produção brasileira de peças fundidas gerou um total de 2,28 milhões de toneladas e desse total o ferro fundido foi quem mais contribuiu com essa produção tendo um total de 1,84 milhão toneladas, seguido pelo aço (259,2 mil toneladas) e dos metais não ferrosos (192 mil toneladas) conforme informações descritas na Tabela 1. Desse total a maior parte dos produtos foram destinados para o mercado interno brasileiro, porém a exportação possui um valor expressivo correspondendo a 15,1% da produção desse mesmo ano (ver tabela 2).

Tabela 1 – Produção brasileira de fundidos (mil toneladas/mês)

	2019	2018	2017	2016	A/B	A/C	A/D
	(A)	(B)	(C)	(D)	(%)	(%)	(%)
Ferro	1.838	1.829	1.778	1.774	0,5	3,33	3,6
Aço	259	243	187	164	6,6	38,9	57,9
Não ferrosos	192	199	183	165	(3,7)	4,7	16,2
TOTAL	2.289	2.272	2.148	2.103	0,8	6,5	8,8
*Os dados relativos ao alumínio estão inseridos em "não ferrosos".							

Fonte: ABIF (2019)

Tabela 2 – Destino da produção brasileira de fundidos em 2018 e 2019

Mercado interno					
2019 (t)		2018 (t)		Variação (2019/2018)	
1.924.813		1.894.018		+1,6%	
Exportações (15,1% da produção total)					
2019		2018		Variação (2019/2018)	
Peso (t)	Valor (MUS\$)	Peso (t)	Valor (MUS\$)	Peso (t)	Valor (MUS\$)
364.076	728.080,4	377.548	759.598,6	(3,6%)	(4,1%)

Fonte: ABIF (2019)

A ABIF também afirma que segundo o ranking revista *Modern Casting* (data-base dezembro de 2018), o Brasil passou a ocupar a 9ª posição entre os maiores produtores de fundidos atrás da China, Índia, Estados Unidos, Japão, Alemanha, Rússia, México e Coreia (Tabela 3).

Tabela 3 – Produção mundial de fundidos segundo ranking de 2018 da revista *Modern Casting*

Colocação/país	Produção em 2018 (milhões t)	Nº de fundições
1. China	49,35	26.000
2. Índia	13,39	4.600
3. Estados Unidos	10,76	1.935
4. Japão	5,76	1.769
5. Alemanha	5,43	527
6. Rússia	4,20	1.140
7. México	2,91	800
8. Coreia	2,57	889
9. Brasil	2,28	1.024
10. Itália	2,26	1.044

Fonte: ABIF (2019)

2.1.1 Aspectos gerais do processo de fundição

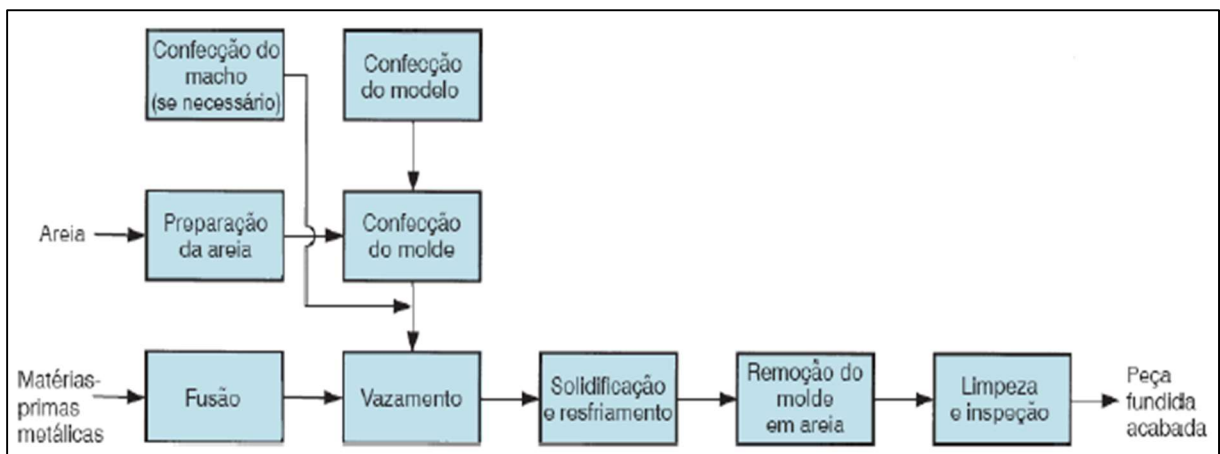
De acordo com Groover (2014), o processo de fundição consiste em aquecer um metal ou liga metálica até que o mesmo seja totalmente fundido, logo após o mesmo é vazado na cavidade de um molde que possui a forma do produto que se

deseja obter, espera-se até que o metal fique totalmente solidificado, remove-se do molde e então é realizado as fases de acabamento e inspeção de qualidade.

Dentre as principais vantagens do processo de fundição se pode destacar:

- As peças saem com geometria final do produto ou bem próxima disso;
- Pode ser aplicado a qualquer metal que possa ser fundido;
- Capacidade de fabricar produtos em série com altas taxas de produtividade;
- Produção de peças com boa precisão dimensional.

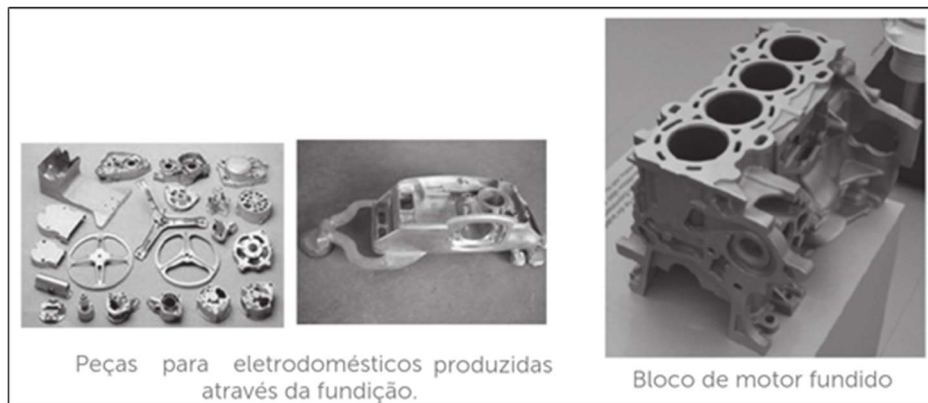
Figura 1 – Etapas do processo de fundição de areia desde a etapa de confecção dos modelos e moldes



Fonte: Groover (2014)

Tâmega (2014) também afirma que por meio desse processo é possível se obter uma grande diversidade de produtos e isso se deve fortemente a versatilidade na sua adequação tanto para a obtenção de peças grandes quanto pequenas, tais como: adornos, peças para eletrodomésticos, cabeçotes do motor de automóveis, turbinas para hidrelétricas e peças navais, conforme mostrado na figura 1.

Figura 2 - Peças fabricadas por meio do processo de fundição



Fonte: Tâmega (2017)

De acordo com Tâmega (2017), as ligas metálicas utilizadas no processo de fundição podem ser classificadas em dois grandes grupos, sendo:

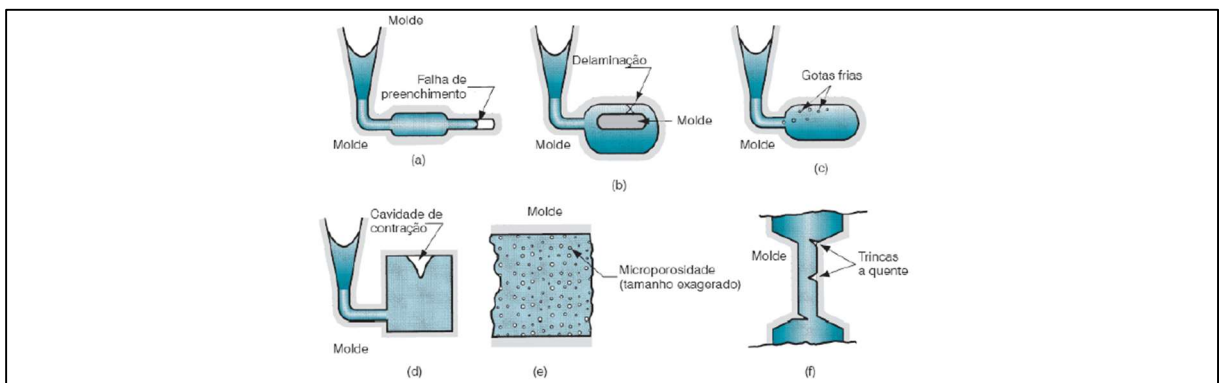
- Metais Ferrosos: são caracterizados por apresentarem ferro em sua composição química, sendo este um elemento com maior representatividade em termos de quantidade. Os principais ligas são: ferro fundido, aços carbono, aços ligados e inoxidáveis.
- Metais não ferrosos: há ausência ou quantidade muito baixa de ferro em sua composição, são exemplos dessa classe de metais o alumínio, magnésio, ligas de zinco, ligas de cobre e ligas de titânio. Em geral, esses metais apresentam características que os tornam bastante úteis na fabricação de peças diversas, tais como: boa resistência à corrosão, ao desgaste, mecânica e rigidez específica, além disso, algumas apresentam qualidades particulares como suportar elevadas temperaturas, boa condutividade elétrica, peso reduzido e grade resistência ao desgaste por atrito.

Assim como em outros processos de fabricação, a fundição quando mal executada pode apresentar peças com qualidade indesejada que contribuem para a perda das propriedades mecânicas que se deseja. Dentre os defeitos que podem ocorrer, Groover (2014) lista alguns que são mais comuns:

- Falha de preenchimento completa do molde que gera peças com formação incompleta.

- Delaminação que ocorre quando duas porções do metal não fundem devido a solidificação prematura.
- Gotas frias que resultam do respingo durante o vazamento que geram grânulos sólidos do metal que ficam presos na peça;
- Cavidade de contração que resulta da contração do metal fundido de maneira irregular na última região da peça a se solidificar.
- Microporosidades que são pequenos vazios na peça.
- Ruptura a quente ou trinca a quente.

Figura 3 – Alguns defeitos gerados no processo de fundição



Fonte: Groover (2014)

Conforme Chiaverini (1986), o processo de fundição pode ser executado de várias formas os quais possuem características específicas que os diferenciam um do outro. Essa diferenciação pode ser realizada através da forma como a etapa de moldagem é executada, podendo assim serem diferenciados da seguinte forma:

- Moldagem em molde de areia ou temporário, por gravidade que compreendem as fundições em: areia verde, areia seca, areia-cimento e areia de macho.
- Moldagem em molde metálico ou permanente que compreende as fundições por gravidade e sob pressão.
- Moldagem pelo processo de CO₂;
- Fundição por centrifugação;
- Fundição de precisão que compreende os tipos em casca e de cera perdida (de investimento).

2.2 MOLDES PERMANENTES

A alta capacidade produtiva é algo que a indústria busca a todo momento pois isso influencia diretamente nos ganhos que a empresa consegue obter. Neste contexto, o processo de fundição em molde permanente ou metálico traz benefícios, pois este molde pode ser utilizado várias vezes, proporcionando uma alta capacidade de produção de peças em menores intervalos de tempo (GROOVER, 2014).

Os moldes permanentes são compostos de duas partes metálicas que se encaixam uma na outra. Estes são fabricados em aço ou ferro fundido, pois necessitam ter alta resistência em relação a ação das propriedades químicas e físicas características dos metais fundidos que serão vazados nele. Sua estrutura principal é composta pelos canais de alimentação do metal fundido e a cavidade do molde. Além disso, normalmente esses moldes são utilizados para fundição de peças de alumínio, magnésio, zinco, ligas à base de cobre e, em alguns casos também de ferro fundido, porém este último não é tão frequente devido requerer elevada temperatura de vazamento (1.200°C à 1.500°C) o que proporciona maior desgaste do molde (GROOVER, 2014).

As peças produzidas no processo de fundição em molde permanente quando comparadas aos de molde de areia, possuem características melhores como: maior uniformidade, melhor acabamento superficial, tolerâncias mais estreitas e melhores propriedades mecânicas. (CHIAVERINI, 1986).

Durante a confecção de molde metálico é necessário alta precisão no trabalho com o aço, para isso, faz-se uso de softwares para a simulação do projeto em três dimensões com o intuito de prevenir falhas estruturais no modelo a ser produzido, depois são utilizadas máquinas-ferramenta para a usinagem do molde físico e tratamentos térmicos suas para melhorar as propriedades mecânicas, tais fatores contribuem para que o custo com a fabricação desses moldes se torne elevado, porém a capacidade de uso desses moldes por longos períodos de tempo tornam esse investimento válido (TÂMEGA, 2017).

No processo de fundição o molde metálico deve primeiramente ser aquecido para que se obtenha uma temperatura que facilite o fluxo do metal fundido nos canais de entrada e, além disso, deve-se lubrificar as cavidades com material desmoldante

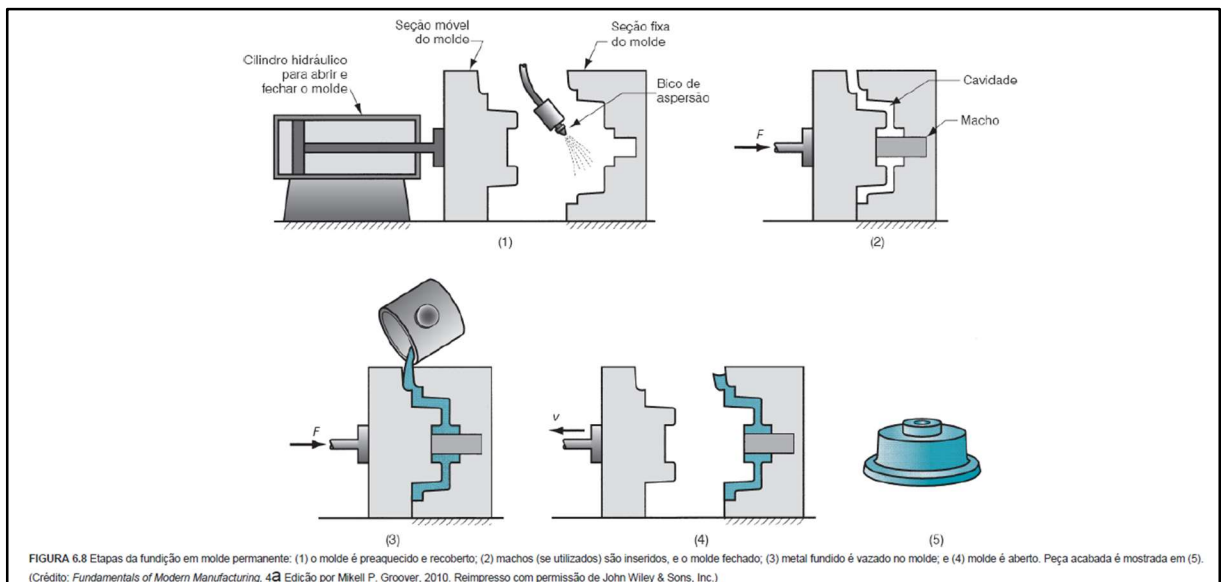
para que facilite a dissipação do calor e a remoção da peça após o término do ciclo (GROOVER, 2014).

Figura 4 – Usinagem de molde metálico



Fonte: HW Moldes (2021)

Figura 5 – Etapas de fundição em molde metálico



Fonte: Groover (2014)

Os processos de fundição que fazem uso dos moldes permanentes são:

- Lingotamento contínuo;
- Fundição em coquilha;
- Fundição por injeção (sob pressão) em câmara quente;
- Fundição por injeção (sob pressão) em câmara fria;
- Fundição por centrifugação.

2.2.1 Defeitos em moldes permanentes

De acordo com Vendramim (2008), o desgaste nas cavidades dos moldes permanentes gera perdas significativas para as indústrias que o utilizam. Tais desgastes tem como principais causas fatores relacionados ao agarramento da liga fundida, corrosão, erosão e fadiga térmica.

Em um ciclo de operação da fundição sob pressão de ligas de alumínio fundidas, a fadiga térmica pode ser observada quando os moldes ficam sujeitos a tensões cíclicas que podem gerar defeitos na sua superfície. Essas tensões ocorrem devido ao alto gradiente de temperatura entre a superfície da cavidade do molde (parte mais quente devido ao contato com o fundido) e o substrato (parte mais fria), que associado as pressões de operação de 50 a 80 Mpa podem causar trincas térmicas que deterioram o molde e geram graves defeitos na qualidade das peças produzidas. Um gradiente de temperatura de $\pm 20^{\circ}\text{C}$ pode reduzir a vida útil do molde em até 50% pois, possibilita o surgimento e propagação de trincas nos contornos de grãos que se somam à oxidação já existente (VENDRAMIM, 2008).

Ainda de acordo com Vendramim (2008), a temperatura da superfície do molde é o principal parâmetro que influencia na sua vida útil e a formação de trincas térmicas é retardada em moldes metálicos fabricados com aço que possuam elevada tensão de escoamento, tenacidade ductilidade em altas temperaturas, alta condutividades térmica e microestrutura homogênea.

Para evitar problemas de desgaste (perda de material) no molde a taxa de vazamento (vazão) do fundido deve ser controlada, pois se for lento, o metal resfria antes de encher a cavidade do molde e caso seja rápido demais pode gerar turbulência, ou seja, a entrada do material no molde se dá com fluxo irregular e isso

acarreta a formação óxidos metálicos que podem comprometer a qualidade do produto fundido e também agrava o desgaste do molde devido ao impacto gerado durante o vazamento (GROOVER, 2014).

Vendramim (2008) afirma que para se obter melhores desempenhos do molde permanentes em fundição de alumínio são necessários cuidados como:

- Mandatório um correto pré-aquecimento para iniciar a operação (em torno de 300°C).
- Aliviar tensões do molde quando concluir 5% da quantidade prevista de peças;
- Utilizar desmoldante conforme orientação do fabricante.
- Manter o molde aquecido ($\pm 150^{\circ}\text{C}$, em estufa) quando houver paradas prolongadas.
- Manutenção com solda a quente.
- Evitar alta temperatura do alumínio fundido.

2.3 FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO

A fundição sob pressão faz uso de molde permanente e se diferencia dos demais processos por haver a necessidade de se aplicar uma pressão sob o metal líquido para que o mesmo entre nas cavidades do molde metálico, também chamadas de matrizes (CHIAVERINI, 1986).

Nesse processo de fundição podemos encontrar variação na pressão de uso permitindo assim a diferenciação entre fundição em baixa pressão e em alta pressão.

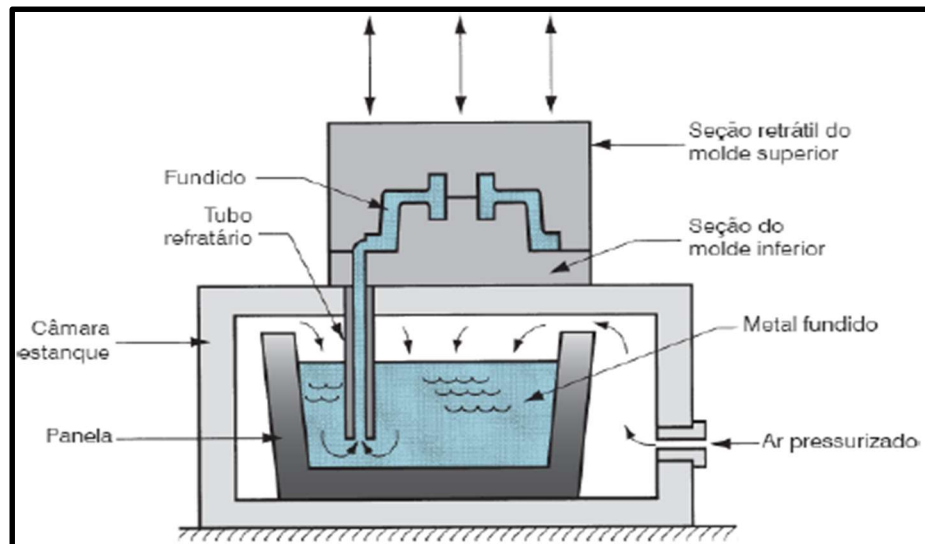
Para realização da fundição tanto em baixa quanto em altas pressões é necessário o uso de equipamentos que possibilitem realizar o fechamento e abertura das partes do molde de forma precisa de acordo com as pressões especificadas e para realizar a extração das peças.

2.3.1 Fundição em baixa pressão

O processo em baixa pressão se caracteriza pela aplicação de pressões que variam de 0,02 até 0,1 MPa para que o metal líquido, localizado em um forno abaixo do molde, possa ser levado até as cavidades do molde (TÂMEGA, 2017).

A grande vantagem da fundição em baixa pressão se dá pelo fato de que a peça fundida apresenta menos problemas com porosidade de gás e defeitos de oxidação além de ter suas propriedades mecânicas melhoradas porque nesse processo o metal fundido é retirado do centro do forno onde está mais limpo que na camada que está exposta ao ar (GROOVER, 2014).

Figura 6 – Processo de fundição em baixa pressão



Fonte: Groover(2014)

2.3.2 Fundição em alta pressão

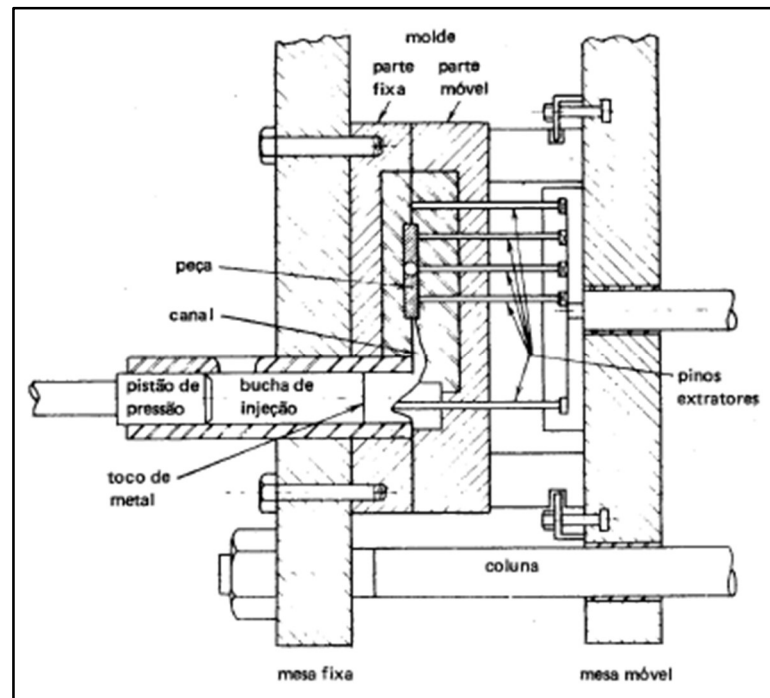
Na fundição em alta pressão é necessário o uso de pressões que variam de 7 a 350 MPa e que são mantidas até que o metal solidifique e a peça possa ser removida do molde (GROOVER, 2014).

Com a aplicação de alta pressão, a velocidade de enchimento do molde também aumenta e, por isso, através desse processo é possível se obter peças com paredes mais finas que as produzidas pelo processo por gravidade (CHIAVERINI, 1986).

Este processo de fundição sob pressão é amplamente utilizado, pois através dele é possível se obter uma alta capacidade produtiva de peças com geometria relativamente complexas utilizando um mesmo molde metálico e, por esse motivo, é necessário que os moldes utilizados sejam preservados através da busca pelo aperfeiçoamento da sua etapa de fabricação, que vai desde a etapa do planejamento

do projeto, escolha do material, tratamento térmico, tratamento superficial e condições de operação. Com isso, a existência de defeitos na estrutura do molde ocasiona perdas elevadas para a indústria visto que é necessário um alto valor de investimento para sua confecção (VENDRAMIN, 2008).

Figura 7 – Corte de uma matriz usada para fundição sob pressão



Fonte: Chiaverini (1986)

Ainda de acordo com Chiaverini (1986), as vantagens no uso desses processos são as seguintes:

- Produção de peças com geometrias mais complexas;
- Peças com paredes mais finas e tolerâncias dimensionais mais estreitas;
- Alta volume de peças produzidas;
- Peças fundidas com bom acabamento superficial o que reduz o custo com processos seguintes;
- Moldes utilizados para inúmeros ciclos de fundição com pouca variação dimensional;
- Proporcionam maiores resistências mecânicas para determinados metais quando comparadas com a fundição em areia (exemplo: alumínio).

Também conforme Chiaverini (1986), as desvantagens no uso desses processos são as seguintes:

- As dimensões das peças são limitadas geralmente com pesos inferiores a 5 kg e raramente maiores que 25 kg;
- As peças produzidas podem apresentar problemas internos com acúmulo de ar (porosidades) se o processo não for executado adequadamente;
- Possui alto custo para sua implementação, tornando-se rentável apenas para produções de grandes quantidades de peças.

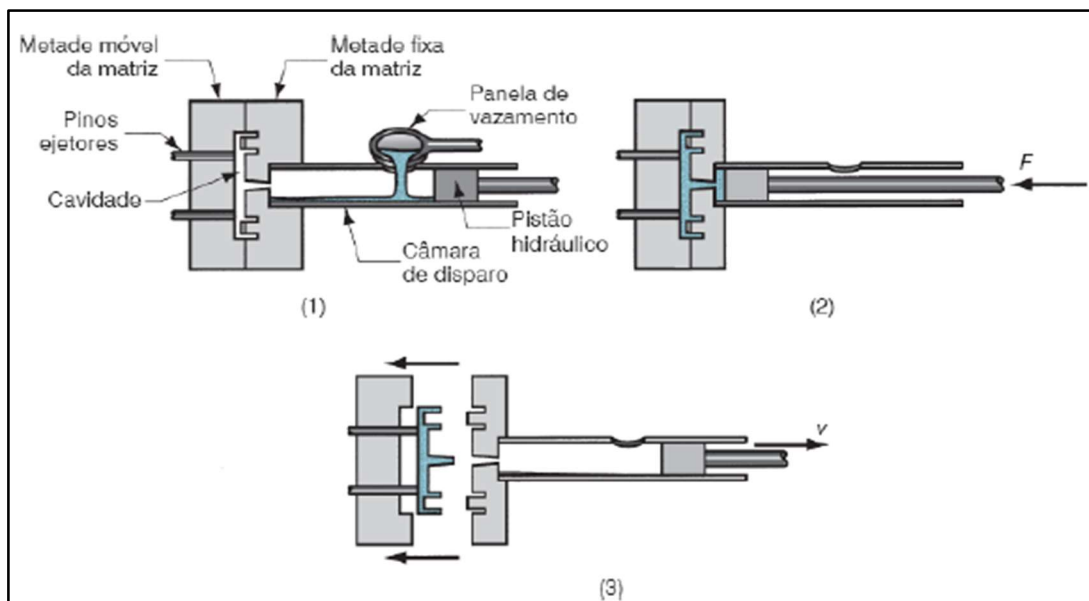
As máquinas utilizadas no processo de fundição sob pressão podem ser de dois tipos: câmara-quente e câmara-fria.

2.3.2.1 Máquinas de câmara-fria

O processo de fundição sob pressão em máquinas de câmara-fria é utilizado quando o metal fundido ocasiona danos ao sistema de bombeamento (cilindro e pistão) quando estão em contato um com o outro.

Para o uso de máquinas de câmara-fria o metal é fundido separadamente em um forno e vazado em uma câmara não aquecida da máquina, a partir daí um pistão é usado para injetar o material sob pressão dentro do molde. Nesse processo são usadas pressões de 14 a 140 MPa, podem ser produzidas peças utilizando metais tanto com alto ponto de fusão, como alumínio, latão e ligas de magnésio, quanto baixo ponto de fusão como zinco e chumbo e os ciclos de produção são mais demorados que os de máquinas de câmara-quente devido a etapa de transporte do metal líquido de uma fonte externa até a máquina, porém ainda assim permitem uma operação com alta produtividade (GROOVER, 2014).

Figura 8 – Processo de fundição sob pressão em câmara fria



Fonte: Groover (2014)

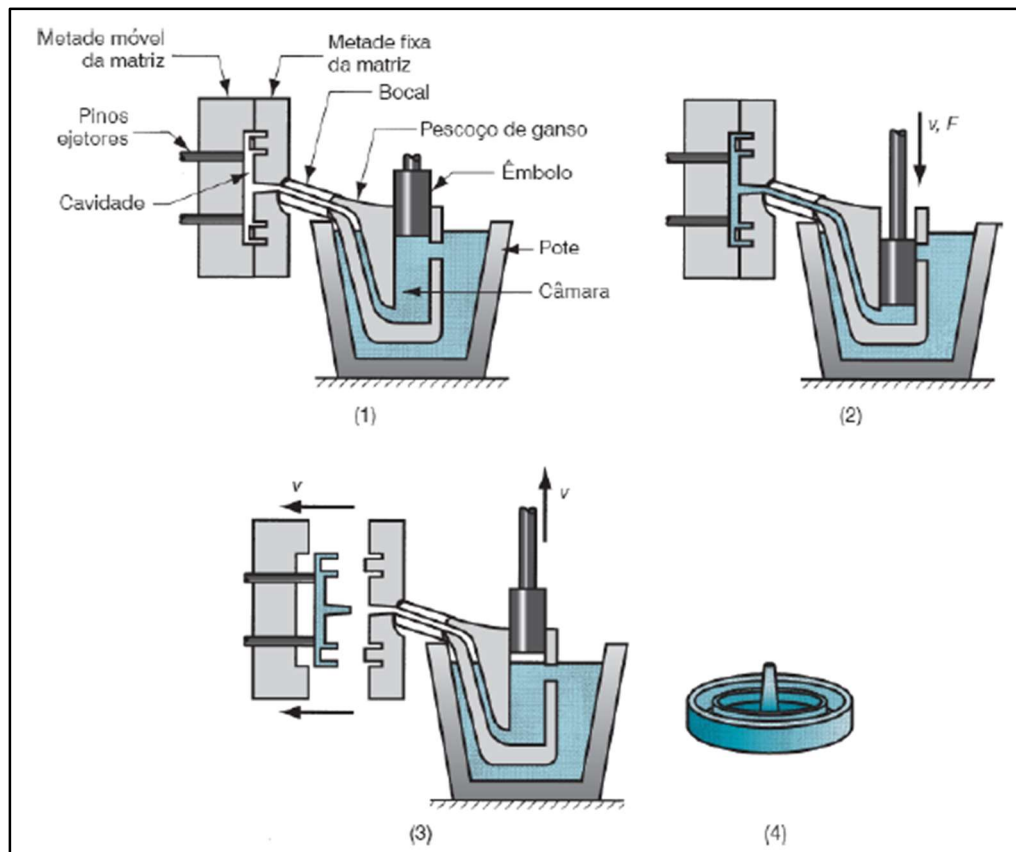
2.3.2.2 Máquinas de câmara-quente

O processo de fundição sob pressão em máquinas de câmara-quente é assim designado porque o cilindro de injeção e o pistão ficam submersos no metal fundido. No ciclo de operação, primeiramente o molde é fechado e uma bomba hidráulica ou pneumática é acionada forçando o metal fundido a escoar pela bomba de injeção, bico de injeção, canais de alimentação até chegar nas cavidades do molde para formação da peça após sua solidificação (BRAGA, 2015).

A fundição em câmara-quente é geralmente limitada ao uso de metais com baixo ponto de fusão como zinco, estanho, chumbo e magnésio, pois proporciona menor desgaste por reação química ao sistema de alimentação da máquina (cilindro e pistão) que ficam submersos no metal fundido (TÂMEGA, 2017).

As pressões aplicadas nesse processo variam de 7 a 35 MPa e podem produzir peças que pesam desde poucos gramas até peças com cerca de 25 kg com capacidade produtiva de até 500 peças por hora, estas características conferem ao processo em câmara quente um ótimo atrativo para o uso industrial (TÂMEGA, 2017).

Figura 9 – Processo de fundição sob pressão em câmara quente



Fonte: Groover (2014)

2.4 ZAMAC

O ZAMAC é uma liga metálica não-ferrosa de Zinco associado aos elementos Alumínio, Magnésio, Cobre e em pequenas proporções de outros elementos como Ferro, Chumbo e outros (SARAC, 2018).

A liga de ZAMAC tem como principais características: baixo ponto de fusão, alta resistência mecânica, boas propriedades de fundição que propiciam a obtenção de peças com formato complexo e bom acabamento superficial, além disso, apresenta boa resistência à corrosão, tração, choque e desgaste. Sua aplicação no processo de fundição a quente possibilita a obtenção de um alto volume de peças (EASTERN ALLOY INC., 2012).

Além das características já mencionadas vale destacar a que a liga de ZAMAC tem bom comportamento quando há necessidade de revestimento, tais como: cobreação, niquelação, cromação e pintura com tintas e vernizes. Cabe destacar

também que por apresentar baixo ponto de fusão de aproximadamente 385°C, o molde metálico usado na fundição de ZAMAC apresenta maior durabilidade em processos de produção seriada (ICZ, 2020).

No quadro 1 é apresentado um comparativo entre as características das ligas de zinco, na qual podemos encontrar o ZAMAC, e de alumínio usados no processo fundição sob pressão.

Quadro 1 –Características das ligas de zinco e de alumínio usadas para fundição sob pressão.

Ligas de Zinco	Ligas de Alumínio
<ul style="list-style-type: none"> - Menor calor específico permitindo maior velocidade de fundição. - Menor ponto de fusão, dando maior vida à ferramenta e menos gasto de energia. - Podem ser fundidas em máquinas de câmara quente, permitindo maior velocidade de operação. - Propriedades mecânicas mais bem adaptadas à temperatura ambiente. - Fáceis de serem conformadas plasticamente após a fundição. - Fáceis de serem conformadas revestidas por eletrodeposição com equipamentos e soluções convencionais. 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor custo de aquisição. - Menor peso por peça. - Maior resistência mecânica às temperaturas mais elevadas. - Podem ser fabricadas a partir de metal secundário (metal recuperado, sucata).

Fonte: Baldam (2014)

A norma internacional da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) B240-07 classifica as ligas de ZAMAC de acordo com o teor de cada elemento químico que a compõem, esta diferenciação pode ser vista na tabela 4.

Tabela 4 – Composição química das ligas de ZAMAC

Elementos	Zamac 2		Zamac 3		Zamac 5		Zamac 7	
	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
Al	3,9	4,3	3,9	4,3	3,9	4,3	3,9	4,3
Mg	0,025	0,05	0,03	0,06	0,03	0,06	0,010	0,020
Cu	2,7	3,3	-	0,10	0,7	1,1	-	0,10
Fe	-	0,035	-	0,035	-	0,035	-	0,75
Pb	-	0,0040	-	0,0040	-	0,0040	-	0,0030
Cd	-	0,0030	-	0,0030	-	0,0030	-	0,0020
Sn	-	0,0015	-	0,0015	-	0,0015	-	0,0010
Ni	0,0010		-		-		0,005	0,020
Zn	Restante		Restante		Restante		Restante	

Fonte: ASTM B240-07 (2007)

De acordo com a empresa Votorantim Metais (2010), o teor de cada elemento proporciona as Ligas de ZAMAC melhorias em suas propriedades mecânicas sendo:

- Alumínio: possui teor nominal de 4% e proporciona aumento da fluidez, obtenção do refino de grão desejado para melhorar as propriedades mecânicas e minimizar a formação de compostos de ferro-zinco que possibilitam maiores desgastes na máquina e ferramentas do processo de injeção.
- Cobre: utilizado com teores que variam entre 0,10% e 3,3% dependendo do tipo de liga, proporcionam maior resistência mecânica, dureza e fluência, porém quanto maior for a sua proporção, menor será a ductilidade.
- Magnésio: é usado em concentrações variáveis entre 0,01% e 0,06% e tem o objetivo de compensar o efeito das impurezas metálicas (cádmio, chumbo, latão etc.), e reduzir a corrosão intergranular. Sua presença na liga também maior dureza e redução na ductilidade.
- Outros elementos como cádmio, chumbo e latão são prejudiciais, pois, podem causar corrosão intergranular na estrutura cristalina da liga e, por este motivo devem ser evitados. Já concentrações controladas de níquel (0,02%), cromo (0,02%), silício (0,035%) e manganês (0,05%) são toleradas sem ocasionar efeito prejudicial à liga de ZAMAC.

As ligas de ZAMAC 3 e ZAMAC 5 são comumente usadas na fundição sob pressão em câmara quente e suas propriedades mecânicas e microestruturais são

influenciadas pelos parâmetros de processo, incluindo a espessura da parede da peça, velocidade de injeção, temperatura do molde e outros. A influência destes parâmetros pode ser vista na tabela 5, onde são apresentados dados obtidos em uma série de testes de fundição realizados com controles rígidos no Centro de Aplicação de Vieille-Montagne (VOTORANTIM METAIS, 2010).

Tabela 5 – Propriedades físicas e mecânicas das ligas de Zamac

Propriedade	Unidades	Zamac 3	Zamac 5	Zamac 2
Limite de escoamento	MPa	268	295	361
Limite de resistência à tração	MPa	308	331	397
Módulo de Young	GPa	96	96	96
Módulo de torção	MPa x 10 ³	33+	33+	33+
Alongamento em ruptura	%	5,8	3,4	6
Resistência ao cisalhamento	MPa	214	262	317
Limite de escoamento por compressão	MPa	414	600	641
Resistência ao impacto	Joules	46	52	38
Resistência à Fadiga (5.10 ciclos)	MPa	48	57	59
Dureza	Brinell	97	114	130
Tenacidade à fratura K _{IC}	x 10 ⁷ N.m ^{-3/2}	2,25	2,1	-
Densidade	g/cm ³	6,6	6,7	6,8
Capacidade de amortecimento a 35 MPa	%	18	-	-
Capacidade de amortecimento a 100 MPa	%	40	-	-
Coeficiente de expansão térmica	µm/m/°C	27,4	27,4	27,8
Condutividade térmica	Wm ⁻¹ °K ⁻¹	113	109	105
Condutividade elétrica	% IACS	27	26	25
Resistividade elétrica	µ ohm - cm	6,37	6,54	6,85
Intervalo de temperatura de fusão	°C	381-387	380-386	379-390
Calor específico	J/kg/°C	419	419	419
Coeficiente de atrito	-	0,07	0,08	0,08
Precisão típica em mais de 100 mm	± µ	100	100	100
Espessura de parede mínima	mm	0,4	0,4	0,4
Velocidades típicas de produção	injeções por hora	*Grande 200-500. Pequeno 400-1.000. Muito pequeno 2.000-3.000.*		
Varição de velocidade de produção	injeções por hora	200-3.600		
Ciclo de vida típico de ferramenta	injeções	750.000-2.000,000		

Fonte: Votorantim Metais (2010)

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo é apresentado a metodologia utilizada para realização desta pesquisa científica.

Esta pesquisa tem características quantitativas, pois faz uso de gráficos e tabelas baseadas nos dados coletados na empresa onde a o estudo foi realizado para que assim possam ser apresentados os resultados que servirão de base para as conclusões dos testes realizados referente ao pré-aquecimento de moldes metálicos de fundição sob pressão. Segundo Polit, Becker e Hungler (2004), a pesquisa quantitativa tem como principal fator o a ênfase nos atributos mensuráveis da experiência humana.

Nesta pesquisa também pode ser observado o estudo qualitativo onde são avaliados os resultados quanto aos padrões estabelecidos previamente. Para Gil (1999), a pesquisa qualitativa visa aprofundar o conhecimento sobre as questões do fenômeno em análise com o objetivo de entender as suas relações através do contato direto com a situação.

Quanto ao tipo de pesquisa, este trabalho tem caráter exploratório, pois tem o objetivo de abordar os aspectos que gerem maior conhecimento sobre o uso do processo de pré-aquecimento de moldes metálicos quando aplicado especificamente ao processo de fundição sob pressão de ligas de ZAMAC 3. De acordo com Gil (1999), a pesquisa exploratória tem o objetivo de proporcionar maior familiaridade com o problema, tornando-o mais claro. Seu planejamento é bastante flexível pois considera variados aspectos concernentes ao objeto de estudo.

Em relação à sua natureza, este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada porque tem como um dos seus objetivos propor soluções para o problema de desgastes superficiais da cavidade do molde metálico. Para Barros e Lehfeld (2000) a pesquisa aplicada busca gerar conhecimento para aplicação prática de seus resultados na solução problemas reais.

3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos adotados durante o desenvolvimento do trabalho têm início com a pesquisa bibliográfica realizada sobre o assunto a qual tem por finalidade trazer

maior conhecimento sobre o tema principal da pesquisa para isso são realizadas pesquisas em livros, artigos científicos, relatórios técnicos de empresas especializadas e trabalhos de conclusão de curso.

Continuando a pesquisa, será realizada a etapa de visita ao setor de fundição da empresa onde ocorrerá a simulação do processo de pré-aquecimento, sendo que primeiramente serão observadas as suas características gerais de funcionamento com o objetivo de compreender como o processo foi projetado, programar cada etapa a ser realizada durante a simulação e quais características do molde e do processo serão controladas para avaliação dos resultados. Também serão verificados os relatórios de desempenho atuais do processo de fundição da empresa com o objetivo de realizar uma análise comparativa com os resultados das simulações executadas.

Após a etapa de coleta de referências bibliográficas e informação documentada da empresa, dar-se-á início a execução das simulações seguindo paralelamente com a coleta de dados de desempenho e, por fim, analisar os resultados obtidos para definir aspectos positivos e/ou negativos decorrentes da implementação do processo de pré-aquecimento de moldes em fundições que utilizam o ZAMAC como fonte de matéria-prima.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesse capítulo são abordados os resultados dos dados coletados durante a visita técnica na empresa onde foi realizado as simulações do pré-aquecimento do molde metálico usado para fundição de peças com a liga de ZAMAC. Iniciasse com um breve relato sobre as informações gerais da empresa e culminando com os detalhes das condições de funcionamento do processo de fundição. Também são abordados os dados referentes a viabilidade da implementação desse processo de pré-aquecimento com base no valor do investimento que a empresa precisa fazer para estruturar o seu processo com o objetivo de aplicar a técnica proposta e qual o tempo de retorno desse investimento para a empresa estudada.

4.1 EMPRESA ESTUDADA

A empresa em estudo está situada na cidade de Manaus e faz parte do Polo Industrial de Manaus (PIM). É de origem japonesa e, por isso, tem grande influência desta cultura na sua filosofia de negócio, atualmente a empresa conta com um quadro de funcionários com pouco mais de 250 funcionários, possui certificação pela *International Organization for Standardization* (ISO)¹ referente as normas ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015 e, além disso, atualmente busca a certificação pela *International Automotive Task Force* (IATF)² para a norma IATF 16949:2016. Seus produtos são fornecidos em sua maioria para uma grande fabricante de motocicletas, porém também têm como clientes outras empresas no Brasil, Indonésia e Japão.

A prática da filosofia *Kaizen*³ (melhoria contínua) está inserida no cotidiano da empresa através de programas que envolvem todos os funcionários e buscam o desenvolvimento das atividades tanto administrativas quanto produtiva, as sugestões de melhorias levantada pelos funcionários são avaliadas visando gerar benefícios não somente para empresa, mas também para os funcionários.

¹ A International Organization for Standardization (ISO) é uma organização que tem o propósito de formular normas que possam ser utilizadas em vários países do mundo que são associados. As normas mais conhecidas são a ISO 9001 e ISO 14001.

² A norma IATF 16949 promove especificações técnicas para o gerenciamento de qualidade do setor automotivo.

³ *Kaizen* é uma metodologia que busca a prática da melhoria contínua em todos os aspectos refletindo na produtividade e qualidade de uma empresa (FERREIRA, 2002).

Para fabricação dos produtos que serão vendidos ao cliente, a empresa adquire parte dos componentes de empresas fornecedoras tanto nacionais quanto internacionais, além disso, os demais componentes são fabricados internamente visto que na sua planta fabril há os processos de injeção plástica, usinagem, fundição, galvanoplastia, pintura e o setor de montagem onde ocorre o processamento desses componentes que após montados, passam por rigorosos processos de inspeção das características visuais e funcionais de acordo com os padrões de qualidade especificados pelo cliente.

4.1.1 Processo de fundição na empresa

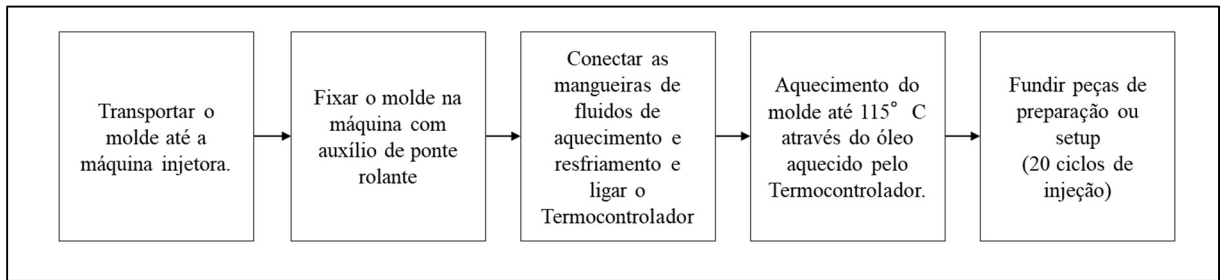
O setor de fundição da empresa dispõe atualmente de um total de 10 máquinas injetoras que são responsáveis em fabricar milhares peças mensalmente. As peças são fabricadas através processo de fundição sob pressão tanto em câmara quente quanto em câmara fria com tonelagens que variam entre 6 e 250.

A liga de ZAMAC 3 corresponde a principal matéria-prima utilizada pela empresa que é comprada na forma de lingote e passa pelo processo de derretimento em um forno com temperatura de 450°C antes de serem alimentadas nas injetoras de fundição sob pressão.

Os moldes utilizados pela empresa são todos do tipo permanente ou metálico que utilizam em sua maioria o aço H13 que é um aço para trabalho a quente que, de acordo com SUZUKI (2007), possui como características: boa temperabilidade, resistência ao amolecimento pelo calor, boa usinabilidade, resistência a fratura, resistência a choques térmicos e as trincas por fadiga térmica principalmente devido sua alta tenacidade a quente.

Ao analisar o processo de preparação das máquinas injetoras para iniciar o seu ciclo produtivo, é possível observar uma igualdade de etapas em cinco máquinas com tonelagens entre 100 e 250 conforme se pode observar no fluxo descrito na figura 10.

Figura 10 – Etapas do processo de preparação da fundição



Fonte: Próprio autor (2021)

De acordo com os dados obtidos durante visita técnica realizada no processo de fundição da empresa, cada etapa de preparação do processo de fundição demanda um tempo necessário para sua realização de acordo com a tabela abaixo.

Tabela 6 – Tempo de execução das etapas de preparação do processo de fundição na empresa estudada

Preparação do processo de fundição		
Etapa	Atividade executada	Tempo (min)
1	Transportar o molde até a máquina injetora.	2
2	Fixar o molde na máquina com auxílio de ponte rolante	5
3	Conectar as mangueiras de fluidos de aquecimento e resfriamento e ligar o Termocontrolador.	2
4	Aquecimento do molde até 115°C através do óleo aquecido pelo Termocontrolador.	25,5
5	Fundir peças de preparação ou setup (20 ciclos de injeção)	8,3
TEMPO TOTAL: 42,8 minutos		

Fonte: Próprio autor (2021)

A partir da análise dos tempos da tabela 6, pode-se observar que a etapa de aquecimento do molde corresponde a 59,58% do tempo total de preparação do processo de fundição, sendo altamente necessário sua execução para que o molde possa estar na temperatura de 115°C antes de haver o contato de sua superfície com a liga de ZAMAC 3 fundido a 450°C que ocorre durante o ciclo de produção das peças de setup. É importante enfatizar que a execução da etapa de aquecimento é necessária para reduzir a probabilidade de danos na superfície do molde metálico gerado por fadiga térmica.

O processo de aquecimento é iniciado logo após o molde ser colocado na máquina injetora onde é utilizado um termocontrolador realizar o aquecimento do molde.

4.2 SIMULAÇÃO DE PRÉ-AQUECIMENTO DE MOLDE

Com o objetivo de realizar a simulação do pré-aquecimento de molde foram avaliados os parâmetros do processo fundição que a empresa já utiliza para determinar o molde a ser monitorado e o método de pré-aquecimento utilizado a fim de tornar a implementação possível caso haja viabilidade para isso.

4.2.1 Escolha do molde

O setor de fundição da empresa possui a metodologia definida de realizar avaliação periódica de seus moldes com o intuito de verificar suas condições estruturais e, para isso, ao retirar o mesmo da máquina injetora já o encaminha para o setor de ferramentaria que realiza a limpeza das partes fixas e móveis, verifica a presença de defeitos superficiais na cavidade como trincas e porosidades, e avalia a dureza conforme especificado no desenho fornecido pela engenharia.

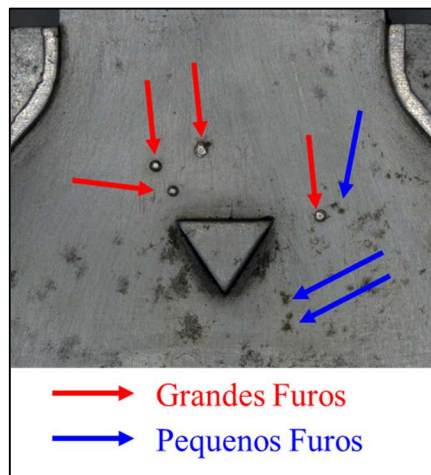
Baseado nos parâmetros acima mencionados e no histórico de avaliações do setor de ferramentaria, foi escolhido o molde com as seguintes características: cavidade com área superficial plana de 17,16cm², feito de aço H13 e dureza especificada de 50HRC mínimo, esse molde é utilizado em uma máquina injetora com 150 toneladas de pressão de fechamento em câmara quente. Conforme dados coletados na empresa, esse molde tem a característica de apresentar pequenos furos em sua superfície após a execução de 4.000 ciclos de injeções o que gera pequenas deformações na superfície da peça fundida. Quando esses furos apresentam diâmetro maior que 0,2mm o molde precisa ser reparado com solda à laser para torná-lo bom para uso. Em relação à dureza não há registro de medidas abaixo do limite mínimo especificado conforme pode ser observado no quadro abaixo.

Tabela 7 – Histórico de avaliação do molde na empresa

Resultado da Avaliação do Molde								
Quantidade de ciclos de injeção	0	4.000	12.000	24.000	36.000	48.000	72.000	80.000
Dureza das cavidades	60,8 HRC	60,6 HRC	60,1 HRC	59,8 HRC	59,8 HRC	59,6 HRC	59,5 HRC	59,5 HRC
Defeitos na Superfície da Cavidade	Isento de Furos	Pequenos furos	Pequenos furos	Pequenos furos	Pequenos furos	Furos maiores que 0.2mm	Pequenos furos	Furos maiores que 0.2mm
Necessidade de Recuperação	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim

Fonte: Dados da pesquisa (2021)

Figura 11 – Defeitos Superficiais encontrados na cavidade do molde



Fonte: Dados da pesquisa (2021)

Na figura 11 podemos verificar os tipos de furos encontrados na cavidade do molde após uso no processo de fundição sendo os furos grandes indicados pela seta de cor vermelha e que possuem diâmetro acima de 0,2mm. Também podem ser observados os furos pequenos indicados pelas setas azuis e que possuem diâmetro menores que 0,2mm.

Com o intuito de analisar o resultado do pré-aquecimento, a simulação foi realizada usando uma cavidade nova desse molde que não apresenta nenhum tipo de defeitos na superfície. Por motivos de confidencialidade os detalhes do molde não podem ser exibidos.

Figura 12 – Aspecto visual da superfície da cavidade nova do molde

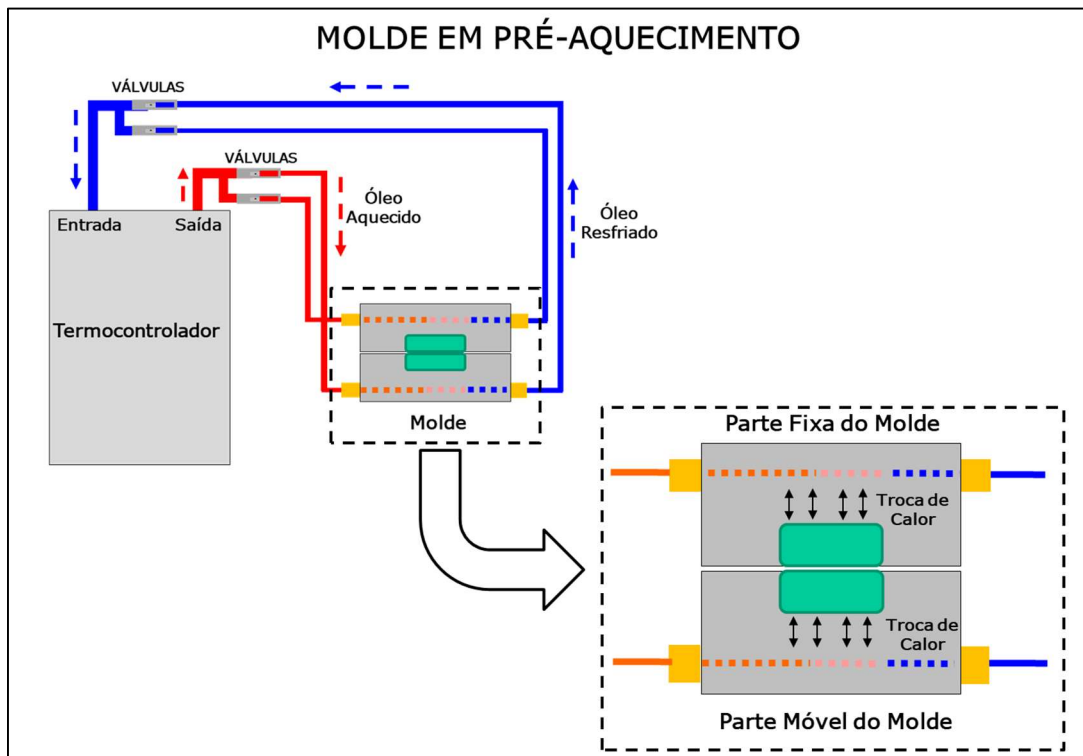


Fonte: Dados da pesquisa (2021)

4.2.2 Método de pré-aquecimento do molde

Para realização da simulação de pré-aquecimento do molde foram levantadas as necessidades dos equipamentos a serem utilizados no processo. Primeiramente foi definido como fonte de aquecimento o termocontrolador da marca Tool Temp e modelo TT288 regulado para aquecer o óleo Tool-Therm-SH-3 até a temperatura desejada. Esta força a passagem desse óleo aquecido pelos canais de circulação presentes no molde tornando possível a troca de calor por condução entre o óleo aquecido e a cavidade do molde onde será fundido o produto.

Figura 13 – Esquema do método de pré-aquecimento usado na simulação

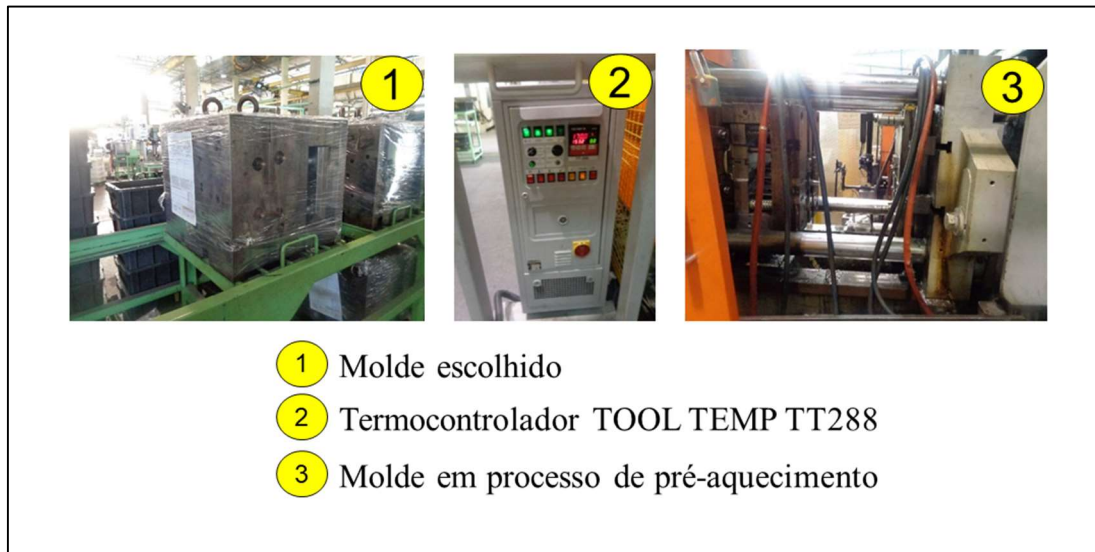


Fonte: Próprio Autor (2021)

Os parâmetros utilizados no processo foram:

- Temperatura do termocontrolador de 170°C conforme definido junto a equipe técnica da empresa para que fosse possível obter a temperatura estável de 115°C nas cavidades do molde após a passagem do óleo aquecido na área interna do molde.
- Tempo de aquecimento 60 minutos definido para que houvesse uma estabilização da temperatura de 115°C uniforme em todas as áreas da cavidade do molde.

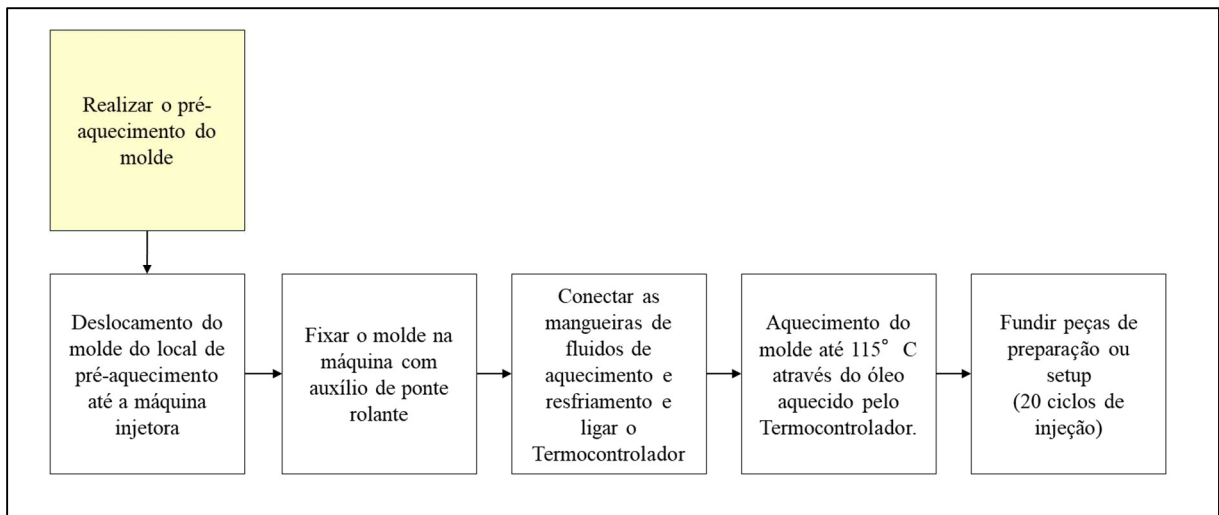
Figura 14 – Execução da simulação na empresa



Fonte: Próprio Autor (2021)

Ao adicionar o processo de pré-aquecimento o fluxo de processos de fundição da peça passou a obedecer às etapas descritas na figura 15.

Figura 15 – Processo de fundição com inclusão do pré-aquecimento de molde

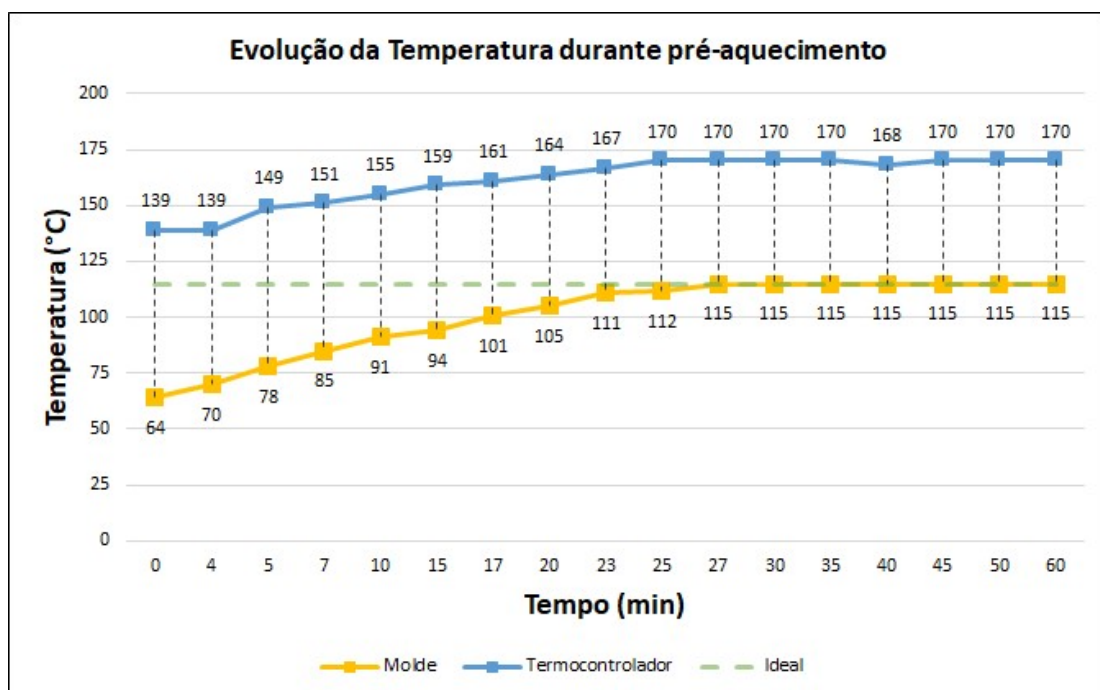


Fonte: Próprio Autor (2021)

4.3 RESULTADOS OBTIDOS

Durante a etapa de simulação primeiramente foi observado como se dava o aumento de temperatura do molde utilizando o medidor de temperatura da marca Testo modelo 925 onde foi acoplado uma sonda de imersão que foi inserida na abertura do molde que chega até o centro da cavidade onde será depositado o Zamac fundido que dará origem ao produto final após a solidificação. Os dados coletados podem ser observados no gráfico abaixo e demonstram que após 27 minutos a temperatura de operação do processo é atingida (115°C).

Gráfico 1 – Aumento da temperatura durante pré-aquecimento



Fonte: Próprio Autor (2021)

Seguindo as etapas do fluxo de processos durante a simulação também foi observado que a taxa de resfriamento do molde é de $0,41^{\circ}\text{C}/\text{min}$ porque ao ser acoplado na máquina injetora ele apresentou uma temperatura de $111,31^{\circ}\text{C}$. Esse resfriamento se deu devido a necessidade de desligar o termocontrolador usado para fazer o pré-aquecimento, transportar e acoplar o molde na máquina o que levou 9 minutos.

Tabela 8 – Tempo de execução das etapas de preparação do processo de fundição após inclusão do pré-aquecimento de molde

Preparação do processo de fundição		
Etapa	Atividade executada	Tempo (min)
1	Deslocamento do molde do local de pré-aquecimento até a máquina injetora	2
2	Fixar o molde na máquina com auxílio de ponte rolante	5
3	Conectar as mangueiras de fluidos de aquecimento e resfriamento e ligar o Termocontrolador.	2
4	Aquecimento do molde até 115°C através do óleo aquecido pelo Termocontrolador.	8,7
5	Fundir peças de preparação ou setup (20 ciclos de injeção)	8,3
TEMPO TOTAL: 26 minutos		

Fonte: Próprio autor (2021)

Além da análise de temperatura, tendo como objetivo avaliar as consequências da inclusão do processo de pré-aquecimento dos moldes, durante as simulações foram observados os resultados dos parâmetros de dureza e análise visual da superfície da cavidade do molde já que estes são os pontos de controle que a empresa utiliza para definir as condições de uso do molde. Os resultados desses parâmetros foram coletados de acordo com a programação de avaliação do setor de Ferramentaria, o qual foi feito entre 0 e 80.000 ciclos de injeção. Na tabela abaixo são apresentados estes resultados.

Tabela 9 – Resultados obtidos durante as simulações

Resultado da Avaliação do Molde com pré-aquecimento								
Quantidade de ciclos de injeção	0	4.000	12.000	24.000	36.000	48.000	72.000	80.000
Dureza das cavidades	64,0 HRC	63,6 HRC	63,5 HRC	63,2 HRC	63,1 HRC	62,9 HRC	62,7 HRC	62,3 HRC
Defeitos na Superfície da Cavidade	Isento de Furos	Pequenos Furos	Pequenos Furos	Pequenos Furos	Pequenos Furos	Pequenos Furos	Pequenos Furos	Furos maiores que 0.2mm
Necessidade de Recuperação	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim

Fonte: Dados da pesquisa (2021)

O ensaio de dureza foi realizado utilizando o durômetro da marca *Mitutoyo* e modelo da série HV-100 que mostra o resultado na escala *Vickers*, porém foi programado para converter diretamente para a escala *Rockwell C*, conforme especificado no desenho do molde. Nesse caso os resultados mostraram que no decorrer do uso houve uma redução no valor de dureza da cavidade do molde de 64 HRC para 62,3 HRC, porém ainda assim atende a dureza mínima especificada para uso do molde (50HRC).

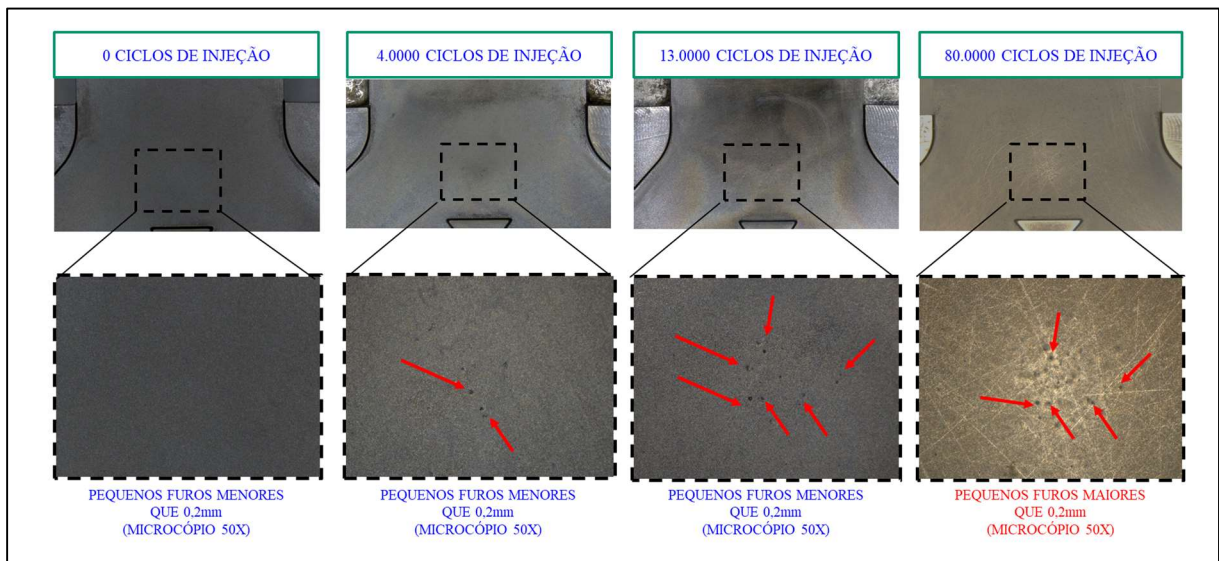
Figura 16 – Ensaio de Dureza da cavidade do molde



Fonte: Dados da pesquisa (2021)

Em relação aos defeitos na superfície da cavidade do molde os resultados indicaram que na primeira avaliação realizada após 4.000 ciclos de injeção já foi possível evidenciar pequenos furos com diâmetro variando entre 0,055mm à 0,101mm, porém o molde ainda não precisou ser reparado pela Ferramentaria. Com a continuidade da produção esses pequenos furos foram aumentando em quantidade e tamanho até os 80.000 ciclos de injeção onde já foram evidenciados diâmetros com tamanho acima 0,2mm e, conseqüentemente surgiu a necessidade de realizar a recuperação da cavidade através de lixamento e solda a laser.

Figura 17 – Análise Visual da Caverna do Molde



Fonte: Dados da pesquisa (2021)

4.4 VIABILIDADE FINANCEIRA DO PROCESSO DE PRÉ-AQUECIMENTO DE MOLDE

Dois fatores que são analisados pelas empresas para decidir sobre a implementação de novos projetos são as questões da viabilidade técnica e da financeira, nesse caso o primeiro aborda a capacidade de uma melhoria ser aplicada em seu processo sem comprometer o correto andamento na fabricação dos produtos e o segundo tem como objetivo avaliar quanto dinheiro é necessário investir no projeto até a sua conclusão e em quanto tempo será obtido o retorno desse investimento com base nas melhorias obtidas.

Em relação a análise de viabilidade técnica para implementação desse projeto na empresa estudada o resultado foi positivo visto que foi possível realizar as simulações, porém para análise da viabilidade financeira foi realizada avaliação dos custos com equipamentos e acessórios que precisariam ser adquiridos junto a fornecedores onde foi obtido o valor total necessário de investimento de R\$69.876,00. A relação de equipamento e custos são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Valores dos equipamentos usados no pré-aquecimento de moldes

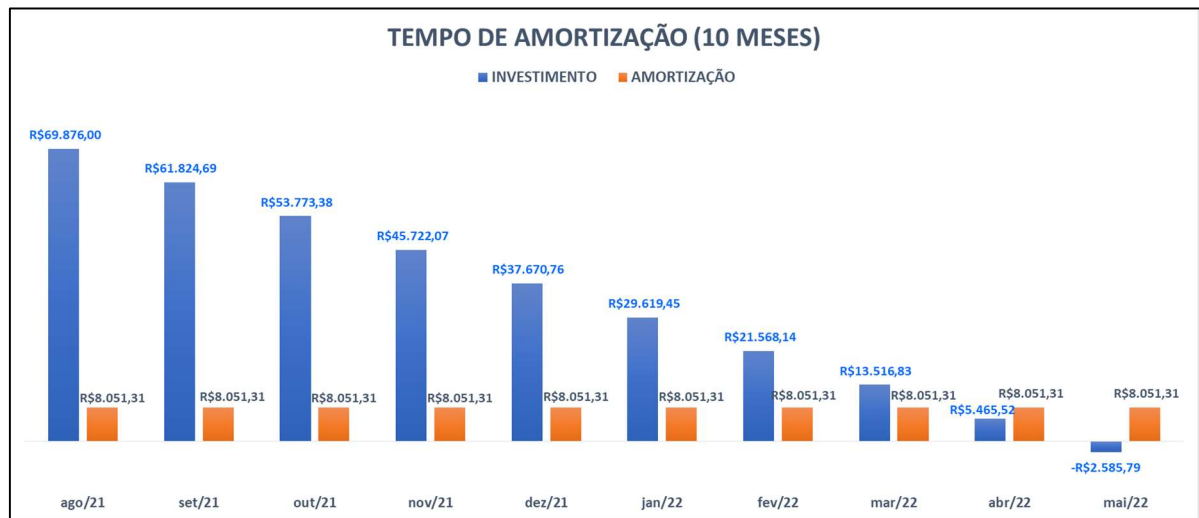
Itens	Quantidade	Custo (R\$)
Termocontrolador	1	R\$66.300,00
Mangueiras de 4 metros	8	R\$3.076,00
Base metálica para apoio dos moldes	1	R\$500,00

Fonte: Dados da pesquisa (2021)

A forma usada pela empresa para analisar o retorno desse investimento foi baseado nas condições do planejamento de produção do setor de fundição que atualmente possuem 5 injetoras que utilizam termocontroladores de temperatura que garantem o bom funcionamento dos moldes e a qualidade das peças injetadas, porém, diariamente há perda produtiva no momento das trocas de moldes devido ao tempo de estabilização da temperatura do molde. Nesse caso ao adquirir um novo termocontrolador para atuar de imediato na preparação dos moldes, onde os mesmos serão pré-aquecidos antes de serem trocados nas injetoras, haverá redução de 40% no tempo total de setup passando de 42,8 minutos para aproximadamente 26 minutos.

Os dados coletados na empresa mostram que mensalmente são previstas em média nas 5 injetoras um total de 45 trocas de moldes em condições normais conforme o plano de produção e, por causa disso, é evidenciado perda no valor de R\$10.000,07/mês calculada com base nos produtos que poderiam ser fabricados nesse tempo. Porém com a implantação do pré-aquecimento de moldes esses custos têm uma redução para R\$1949,76/mês visto que haverá um aumento da capacidade produtiva da máquina com a redução do tempo de setup e consequentemente traria o retorno do investimento em 10 meses, conforme pode ser visto no gráfico do tempo de amortização abaixo.

Gráfico 2 – Retorno do investimento para a empresa



Fonte: Dados da pesquisa (2021)

Portanto baseado nos estudos realizados a empresa concluiu que a implementação do processo de pré-aquecimento de molde é viável financeiramente porque o há garantia do retorno do investimento em menos de 1 ano.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A alta concorrência entre as empresas traz à tona uma corrida diária em busca de melhores resultados técnicos e financeiros com o objetivo de tornar o negócio cada vez mais saudável e autossustentável. Para isso, são buscadas soluções que tragam benefícios imediatos ou à longo prazo e que se estendem por toda a cadeia produtiva de uma empresa desde os processos mais simples até aos processos mais complexos.

Baseado no fato acima citado, o presente trabalho analisou um problema evidenciado em empresas que utilizam o processo de fundição da liga ZAMAC 3 como base para fabricação dos seus produtos e, através da realização de simulações em uma empresa foi possível obter resultados quanto as consequências do pré-aquecimento de moldes metálicos que são usados nesse tipo de processo. Tais resultados mostram primeiramente que a inclusão desse processo na etapa de preparação da fundição é possível tecnicamente baseado no método que foi utilizado para realização dessas simulações com o uso de equipamentos disponíveis para compra no mercado desse segmento industrial.

Com relação a parte de durabilidade é possível afirmar que a inclusão do pré-aquecimento não contribuiu de maneira altamente significativa quanto a maior resistência do molde a defeitos na superfície da cavidade onde é formada a peça, pois após a primeira avaliação após 4.000 ciclos de injeção já foi possível observar pequenos furos na superfície semelhantes ao que acontece sem inclusão dessa etapa no processo. Contudo é importante salientar que a necessidade de reparos nessa cavidade, conforme os padrões da empresa estudada, acabou sendo postergado em comparação ao histórico obtido nas pesquisas documentais.

Quanto ao impacto na dureza do aço do molde, foi observado através dos ensaios realizados que apesar de haver uma queda em torno de 1,7HRC após 80.000 ciclos de injeção ainda assim a inclusão do pré-aquecimento é possível porque o molde foi projetado com dureza bem acima do limite mínimo tolerado.

Outro aspecto observado no decorrer desse trabalho foi a questão da viabilidade econômica para implementação desse projeto na empresa estudada. O investimento necessário para a implementação do método proposto é alto, pois conforme estudo realizado para compra dos equipamentos esse valor ultrapassou os

R\$69.000,00, no entanto, ao realizar o estudo do retorno desse investimento, a implementação desse projeto se apresentou altamente viável porque proporciona um aumento na capacidade de produção do setor de fundição através da redução do tempo de setup na máquina injetora que fazem uso de termocontroladores. Baseado nesse estudo foi possível observar que o retorno desse investimento acontece em 10 meses e portanto é aceitável para os padrões da empresa.

Portanto baseado nos resultados obtidos nesse trabalho é possível concluir que é completamente viável se implementar o processo de pré-aquecimento de moldes metálicos em um processo industrial que utilize a liga de ZAMAC 3 fundida, porque não impacta nas características técnicas do processo e proporciona um bom retorno econômico.

Buscando complementar os resultados abordados neste trabalho se indica como tema de trabalho futuro: o estudo de tratamentos térmicos que proporcionem redução no desgaste em moldes metálicos.

REFERÊNCIAS

BALDAM, Roquemar de Lima; VIEIRA, Estéfano Aparecido. **Fundição: Processos e Tecnologias Correlatas**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2014.

BARROS, A.J.S.; LEHFELD, N.A.S. **Fundamentos de Metodologia: Um guia para a iniciação científica**. 2 ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

BORGES, Gleison Coelho. **A viabilidade técnica e econômica da utilização da liga de Zamac reciclada em uma indústria do Polo Industrial de Manaus**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Manaus:2021.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

FERREIRA, Ademir Antonio.; REIS, Ana Carla Fonseca.; PEREIRA, Maria Isabel. **Gestão Empresarial: de Taylor aos nossos dias – Evolução e Tendência da Moderna Administração de Empresas**. 1 ed. São Paulo: Pioneira, 1997.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

GROOVER, MikellP. **Introdução aos processos de fabricação**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. Tradução Anna Carla Araujo; tradução e revista técnica André Ribeiro de Oliveira [et.al.]

SARAC, Patrícia Bordon. **As ligas de zinco-alumínio – Propriedades e aplicações. Fundição e Matérias-Primas**. São Paulo, 2018.

SOARES, Osvaldo Junior Alves. **Melhorias de Produto/Processo pela Utilização de Ligas de ZAMAC**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2008.

SUZUKI, Luciane Yumi, **Propriedades superficiais do aço H13 após tratamento duplex (Nitretação e TiAlN) para moldes de injeção de alumínio**, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba: 2007.

TAMEGA, Fábio. **Fundição de Processos Siderúrgicos**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A. 2017.

VENDRAMIM, João Carmo. **Considerações sobre a vida útil de moldes para fundição de alumínio sob pressão. Informe tecnicolsoflama, 2008**. Disponível em: <https://http://www.isoflama.com.br/assets/pdf/artigos/1468269984.pdf>. Acesso em: 05/06/21.

VOTORANTIM METAIS. **Manual de Fundição sob Pressão**. Disponível em: <https://issuu.com/prodweb/docs/manual-de-fundicao-sob-pressao>. Acesso em: 01/07/21.