



ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE MOLDES DE TERMINAIS DE CABO EM LIGAS ZAMAK

HÉLDER ALEXANDRE GONÇALVES PINTO

dezembro de 2018

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE MOLDES DE TERMINAIS DE CABO EM LIGAS ZAMAK

Helder Alexandre Gonçalves Pinto

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE MOLDES DE TERMINAIS DE CABO EM LIGAS ZAMAK

Helder Alexandre Gonçalves Pinto
1970885

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva e coorientação do Doutor Rui Pedro Cardoso da Silva Martinho, Professores Adjuntos do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP.

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica

POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

Doutora Sandra Cristina de Faria Ramos
Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor Francisco José Gomes da Silva
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Coorientador

Doutor Rui Pedro Cardoso da Silva Martinho
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor Rui Gabriel Araújo de Azevedo Silva
Professor Associado, Universidade Lusíada

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho representa o culminar de uma etapa na minha vida, contribuindo para a minha realização pessoal e profissional. No entanto, o mesmo não seria possível sem o apoio de diversas pessoas que, ao longo do tempo, me deram força e motivação para atingir este objetivo. Quero assim agradecer.

Aos meus pais por todo o apoio, dedicação, paciência, e amizade, a vós dedico este trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso, Pedro Silva, Jorge Brito, Tiago Martins, e Conceição Rosa pela amizade e apoio prestado ao longo de todo este tempo.

À empresa FicoCables, e aos colegas, Carlos Duarte e João Quadrado, pelo acolhimento e disponibilidade prestada.

Ao Doutor Rui Martinho pela disponibilidade e ajuda prestada.

Aos meus amigos.

MUITO OBRIGADO.

Quero ainda fazer um agradecimento especial ao Doutor Francisco Silva pelo seu apoio, dedicação, competência, profissionalismo e entrega....UM MUITO OBRIGADO.

PALAVRAS CHAVE

Fundição injetada, Zamak, Molde, Otimização de moldes, Injeção de Zamak, Ligas de zinco, Parâmetros de Injeção, Otimização do processo.

RESUMO

A indústria de fundição é uma das maiores indústrias mundiais com grande impacto na economia global. Os produtos fundidos podem ser encontrados em diversas aplicações, desde os componentes mais pequenos, como terminais de cabo de comando, até peças maiores, como carcaças de motores para automóveis e navios, todos produzidos por processos de fundição. O sucessivo aumento do consumo levou à necessidade de desenvolver este sector, criando uma nova variante, a fundição sob pressão ou fundição injetada.

A fundição injetada é um processo em que um molde permanente é usado e o metal derretido é injetado sob alta pressão para o seu interior, permitindo a produção cíclica de peças, e contribuindo para o aumento do fabrico e a redução do custo unitário. Esta técnica é realizada em função dos objetivos do projeto e da aplicação das peças a obter. O resultado do produto final provém da precisão do desenho dos moldes e dos parâmetros utilizados na produção, requerendo por isso um estudo aprofundado do processo, quando se pretendem obter peças isentas de imperfeições e com tolerâncias geométricas bastante exigentes.

Foi neste contexto que se desenvolveu a presente dissertação. Realizado na empresa FICOCABLES S.A, o estudo focou-se no desenvolvimento de moldes para a produção de terminais de cabo automóvel em ligas *Zamak*, cumprindo com as normas de qualidade aplicadas pelo setor. Foi aplicado o ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*), e, recorreu-se a estudos analíticos, análises micrográficas e simulações CFD (*Computer Fluid Dynamics*). Pretendeu-se, assim, ampliar o conhecimento do processo de injeção, na área do escoamento e transferência de calor dos moldes e respetivas estruturas, e também desenvolver metodologias céleres, para conceber estes componentes de um modo mais expedito. Para tal, tomaram-se como referência três terminais de controlo que foram analisados segundo a metodologia apresentada, e com base nos resultados obtidos, otimizaram-se os seus moldes, de modo a tirar conclusões sobre a viabilidade do estudo elaborado.

KEYWORDS

Die casting, Zamak, Mold, Mold optimization, Zamak injection, Zink Alloys, Metals, Injection Parameters, Process optimization.

ABSTRACT

The casting industry is one of the major global industries, with a great impact on the global economy. The casting products can be found in many applications, since the smallest components like bowden cables, end fittings to automobile and ships, motor carcass, all of them produced by foundry processes. The successive increase in consumption, led to innovations on this sector, creating a new variant, the high pressure casting, or die casting.

Die casting is a process in which a permanent mould is used and the molten metal is injected under high pressure to its interior, allowing cyclic production of parts, and contributing to increase the manufacturing effectiveness reducing the unit cost. This technique is carried out in function of the objectives of this project, and the application of the parts to be obtained. The result of the final product, comes from the precision of the molds design, and the parameters used in the production, requiring a thorough study of the process, when one wants to obtain parts free of imperfections, and with geometric tolerances quite demanding.

It was in this context, that the present dissertation was developed. Carried out in the FICOCABLES S.A company, the study focused on the development of molds, for the production of automotive cable terminals in Zamak alloys, complying with the quality standards applied by the sector, using the PDCA cycle (Plan, Do, Check, Act), and applying analytical studies, micrographic analyzes and CFD (Computer Fluid Dynamics) simulations. The aim was to increase the knowledge of the injection process, in the area of flow and heat transfer of the molds and their structures, as well as to develop rapid methodologies, to design these components in a more expeditious way. For this purpose, three control terminals were used, which were analyzed according to the presented methodology, and based on the results obtained, their molds were optimized, in order to draw conclusions about the feasibility of the performed study.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

3D	Tridimensional
Al	Alumínio
CAD	Computer Aided Design (Desenho Assistido por Computador)
CEO	ChiefExecutiveOfficer (Diretor Executivo)
CFD	Computer Fluid Dynamics (Dinâmica de Fluido Computacional)
FEM	Finite Element Method (Método de Elementos Finitos)
HC	Hidrocarbonetos
IWRC	Independent Wire Rope Core (Corda de Arame com Núcleo Independente)
NADCA	North American Die Cast Association (Associação Americana de Fundição Injetada)
Q	Caudal
Q_{entra}	Caudal que entra
Q_{sai}	Caudal que sai
TQM	Total Quality Management (Gestão de Qualidade Total)

Lista de Unidades

°C	Temperatura em grau Celsius
%IACS	Condutividade Elétrica
bar	(Unidade de medida de pressão bar)
BHN	Brinell Hardness (Dureza de Brinell)
Da	Dalton (Unidade de massa atômica)
g	Gramas
J	Joule
K	Temperatura Kelvin
m	Metro
N	Newton
Pa	Pascal
s	Segundo
W	Watt

Lista de Símbolos

°	Grau
Cd	Cádmio
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Cu	Cobre
Fe	Ferro
Hg	Mercúrio
Mg	Magnésio
Ni	Níquel
∅	Diâmetro
Pb	Chumbo
Sn	Estanho
Zn	Zinco
Ω	Ohm

GLOSSÁRIO DE TERMOS

<i>Cloud computing</i>	Processamento computacional sem recurso a um suporte físico de dados.
<i>Gromets</i>	Borracha de fixação, é um componente utilizado para impedir a passagem de humidade e resíduos da zona húmida para a zona seca do veículo
<i>Brick</i>	Tijolo (cubo)
<i>In-situ</i>	Elaborado ou produzido no local
<i>Kiretsu</i>	Princípio Japonês de rede de negócios entre empresas
<i>Mesh</i>	Malha
<i>Outsourcing</i>	Processo de subcontratação
<i>Plug</i>	Ligação elétrica
<i>Push</i>	Empurrar
<i>Software</i>	Programa de computador
<i>Stakeholders</i>	Partes interessadas numa empresa, grupo ou associação
<i>Takeovers</i>	Aquisição de empresas por parte de grupos ou pessoas individuais

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – RÉPLICA DO TRICICLO BENZ DO ANO DE 1886 [3]	9
FIGURA 2 - DIVERSIDADE DOS CORRENTES TIPOS DE AUTOMÓVEIS [3]	10
FIGURA 3 - TIPOS ALTERNATIVOS DE GRUPO DE EMPRESAS [4]	11
FIGURA 4 - EVOLUÇÃO MUNDIAL DA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO ₂ - DIÓXIDO DE CARBONO [9]	12
FIGURA 5 - FLUXO DE ATIVIDADES PARA ATINGIR O TQM [11]	13
FIGURA 6 - CABOS DE COMANDO PARA ACIONAMENTO DE PORTAS E VIDROS	14
FIGURA 7 - CABO DE COMANDO E SEUS COMPONENTES	15
FIGURA 8 - ESQUEMA DOS SISTEMAS ATUANTES, FUNCIONAMENTO MECÂNICO [15]	15
FIGURA 9 - CABOS DE COMANDO PRESENTES NUM VEÍCULO PARA ACIONAMENTO DE SISTEMAS [15]	16
FIGURA 10 - CABO DE COMANDO E SEUS COMPONENTES; CABO METÁLICO (1), TUBO ESPIRAL (2), TERMINAIS METÁLICOS ZAMAK (3), TERMINAIS DE TUBO ESPIRAL (4), ABRAÇADEIRA (5) [15].	17
FIGURA 11 - CABO DE COMANDO E SEUS COMPONENTES; CABO METÁLICO (1), TUBO ESPIRAL (2), TERMINAIS METÁLICOS ZAMAK (3), TERMINAIS DE TUBO ESPIRAL (4), ABRAÇADEIRA (5), CAIXA DE UNIÃO (6), PEÇA DE UNIÃO DE CABOS (7), <i>GROMET</i> (8), ABRAÇADEIRA COM CLIPE (9) [15].	17
FIGURA 12 - CONFIGURAÇÕES DE CONSTRUÇÃO DE CABOS METÁLICOS [20]	18
FIGURA 13 - A) FLOR EFETUADA NA EXTREMIDADE DE UM CABO METÁLICO; B) DIMENSÕES PRINCIPAIS DA FLOR [21]	18
FIGURA 14 - TIPOS DE TERMINAIS DE BLOQUEIO PRESENTES NO MERCADO [15]	19
FIGURA 15 - EXEMPLO DE UMA ZONA FUNCIONAL DE UM TERMINAL DE CABO	20
FIGURA 16 - DIVERSAS CONFIGURAÇÕES DE TERMINAIS ZAMAK; ((1) ESFÉRICOS, (2) CILÍNDRICOS, (3) FORMAS EM L, (4) MANIVELAS, (5) CILINDROS MODIFICADOS, (6) CONFIGURAÇÕES ESPECIAIS)	21
FIGURA 17 - DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO BINÁRIO ZN-AL [33]	27
FIGURA 18 - PROCESSO DE CÂMARA QUENTE [39]	31
FIGURA 19 - PROCESSO DE CÂMARA FRIA [39]	31
FIGURA 20 - DIMENSÕES INCORRETAS	37
FIGURA 21 - DIFERENÇA ENTRE AS <i>MESH</i> DE ELEMENTOS FINITOS E DIFERENÇAS FINITAS [35]	39
FIGURA 22 - MODELO DE MALHA UTILIZADA EM UM ESTUDO ELABORADO POR JOÃO FERREIRA NA UNIVERSIDADE DO MINHO [50]	40
FIGURA 23 – DESENVOLVIMENTO DAS DIFERENTES FASES DO ESTUDO	46
FIGURA 24 - EXEMPLO DE MÁQUINAS DE INJEÇÃO DE ZAMAK [21]	48
FIGURA 25 - MÁQUINA DE INJEÇÃO DE COMANDO MANUAL [14]	49
FIGURA 26 - ZONA DE TRABALHO DE UMA MÁQUINA SEM-AUTOMÁTICA	50
FIGURA 27 - PRINCIPAIS ELEMENTOS DE UMA MÁQUINA SEMI-AUTOMÁTICA	50
FIGURA 28 - DESENROLADOR DE FIO [14]	51
FIGURA 29 - SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE CABO; A) SISTEMA DE TRAÇÃO DE CABO, B) SISTEMA DE CORTE DE CABO, C E D) PINÇA DE TRANSPORTE DE CABO [14]	52
FIGURA 30 - CONJUNTO DA PANELA E CADINHO	53
FIGURA 31 - BOMBA DE INJEÇÃO	54
FIGURA 32 - VISTA DA CRUZETA, COM VISTA DA BOMBA APLICADA À CRUZETA	54

FIGURA 33 - VISTA DE CORTE DOS COMPONENTES FUNCIONAIS DE UMA BOMBA DE INJEÇÃO E RESPETIVO ÊMBOLO	55
FIGURA 34 - FUNCIONAMENTO DO ÊMBOLO NA CÂMARA DA BOMBA	55
FIGURA 35 - EXEMPLOS DE BICOS DE INJEÇÃO	56
FIGURA 36 - SECÇÕES NO INTERIOR DE UM BICO DE INJEÇÃO	57
FIGURA 37 - EXEMPLOS DE ROTURA DO BICO DE INJEÇÃO	57
FIGURA 38 - EXEMPLO DE POSTIÇOS COM RESPETIVO BICO DE INJEÇÃO ACOPLADO A) POR ROSCA B) POR CONTACTO [61]	58
FIGURA 39 - CONJUNTO DO BICO COM RESISTÊNCIAS A) CONJUNTO CÁPSULA E RESISTÊNCIA, B) CONJUNTO ACOPLADO AO BICO DE INJEÇÃO [61]	59
FIGURA 40 - ESQUEMA DE UMA RESISTÊNCIA NO INTERIOR DE UM INVÓLUCRO [16]	60
FIGURA 41 - DIVERSOS TIPOS E TAMANHOS DE MOLDES PARA INJEÇÃO; A) MOLDE PARA INJEÇÃO DE PEQUENAS PEÇAS, B) MOLDE DE GRANDES DIMENSÕES PARA OBTENÇÃO DE PEÇAS GRANDES	61
FIGURA 42 - EXEMPLO DE UM MOLDE COMPOSTO PELAS RESPETIVAS ESTRUTURAS DE ENCAIXE E INSERTOS MOLDANTES	61
FIGURA 43 – VISTAS DA ESTRUTURA DE UM MOLDE; A) CONJUNTO COMPLETO, B) ESTRUTURA SUPERIOR, C) ESTRUTURA INFERIOR	62
FIGURA 44 – VISTAS DA ESTRUTURA SUPERIOR DO MOLDE; A – ESTRUTURA SUPERIOR, B – BASE SUPERIOR DO MOLDE	62
FIGURA 45 – VISTAS DA ESTRUTURA INFERIOR DO MOLDE; A) VISTA TRASEIRA, B) VISTA FRONTAL; (A – ARO INFERIOR DO MOLDE, B - BASE INFERIOR DO MOLDE, C - ESTRUTURA INFERIOR DO MOLDE)	63
FIGURA 46 - INSERTOS MOLDANTES	64
FIGURA 47 - VISTAS DOS INSERTOS MOLDANTES COM DESCRIÇÃO DOS SEUS COMPONENTES	65
FIGURA 48 - DESCRIÇÃO DE UMA CAIXA DE REBAIXO	66
FIGURA 49 - DESCRIÇÃO DE UM SISTEMA DE EXTRAÇÃO [21]	67
FIGURA 50 - DESCRIÇÃO DO MECANISMO DE ABERTURA E FECHO DO MOLDE	68
FIGURA 51 - PORMENOR DO FUNCIONAMENTO DO MECANISMO DE FECHO	68
FIGURA 52 - PEÇA TAL COMO É EXTRAÍDA DO MOLDE	69
FIGURA 53 - MECANISMO DE CORTE DE GITO	70
FIGURA 54 – ASPETO MECÂNICO DO POSTO DE CORTE DE GITO	70
FIGURA 55 – A) LOTE DE LINGOTES DE ZAMAK 5, B) BARRA DE ZAMAK 5	73
FIGURA 56 - ARMAZENAMENTO DE LINGOTES DE ZAMAK EM ARMAZÉM	74
FIGURA 57 – ARMAZENAMENTO DE LINGOTES DE ZAMAK NA ZONA DE PRODUÇÃO	74
FIGURA 58 - LINHA DE PARTIÇÃO DOS MOLDES	76
FIGURA 59 - DESCRIÇÃO DO INSERTO SUPERIOR DO MOLDE DO TERMINAL 12232249	77
FIGURA 60 - VISTA GERAL E CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS DO MOLDE 12232249	77
FIGURA 61 - DESCRIÇÃO DO INSERTO INFERIOR DO MOLDE DO TERMINAL 12232249	78
FIGURA 62 - VISTA GERAL E CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS DO MOLDE 1224413161-005	79
FIGURA 63 - DESCRIÇÃO DO INSERTO SUPERIOR DO MOLDE DO TERMINAL 1224413161-005	79
FIGURA 64 - DESCRIÇÃO DO INSERTO SUPERIOR DO MOLDE DO TERMINAL 1224413161-005	80
FIGURA 65 - IMAGEM DESCRITIVA DO TERMINAL 12232249	82
FIGURA 66 - IMAGEM DESCRITIVA DO TERMINAL 1224413161-005	83

FIGURA 67 - A) ASPETO DA ALTERAÇÃO DO BRILHO NUM TERMINAL FUNDIDO EXIBINDO DOIS TIPOS DE COR, B) ASPETOS DA ROTURA DAS ZONAS FUNCIONAIS NOS TERMINAIS	84
FIGURA 68 - EXEMPLO DE POROSIDADES E RECHUPES OBTIDOS NAS AMOSTRAS OBTIDAS	85
FIGURA 69 - DIGRAMA P	86
FIGURA 70 - DIAGRAMA <i>ISHIKAWA</i>	87
FIGURA 71 - DIAGRAMA DE CORPO LIVRE DAS FORÇAS APLICADAS AO PISTÃO; F1-FORÇA APLICADA À MANIVELA PELA HASTE DO PISTÃO, ΣM – LOCAL DE APLICAÇÃO DO MOMENTO, F2-FORÇA EXERCIDA PELA MANIVELA NO TIRANTE DA HASTE DA BOMBA.	88
FIGURA 72 - DIAGRAMA DE FORÇAS E PRESSÕES PRODUZIDAS DURANTE O PROCESSO DE INJEÇÃO	89
FIGURA 73 - SIMULAÇÃO DA ANÁLISE DA VELOCIDADE NO CANAL DE GITAGEM DO MOLDE	90
FIGURA 74 - RELAÇÕES GEOMÉTRICAS NO MECANISMO DE TRANSFORMAÇÃO DE FORÇA	92
FIGURA 75 - RELAÇÕES GEOMÉTRICAS DOS COMPONENTES DA BOMBA DE INJEÇÃO	93
FIGURA 76 - AMOSTRA COM POLIMENTO EFETUADO E SUPERFÍCIE BRILHANTE	103
FIGURA 77 - IMAGEM AMPLIADA DE UM PLANO DE CORTE DE UM PROVETE, DESTACANDO AS POROSIDADES E OS RECHUPES	104
FIGURA 78 - PROVETE COM DISTINÇÃO DE ZONEAMENTO RELATIVAMENTE AO BRILHO	114
FIGURA 79 - ÁREAS A ANALISAR DOS PROVETES DA REFERÊNCIA 12232249	115
FIGURA 80 - ÁREAS A ANALISAR DOS PROVETES DA REFERÊNCIA 1224413161-005	115
FIGURA 81 – CONFIGURAÇÃO E DEFINIÇÃO DIMENSIONAL A ADOTAR NOS SISTEMAS DE GITAGEM	117
FIGURA 82 - FORMA E DIMENSÕES DOS ESCAPES DE GASES APLICADOS AOS MOLDES	118
FIGURA 83 – LOCALIZAÇÃO DOS ESCAPES DE GASES	129
FIGURA 84 - ANÁLISE VISUAL DOS PROVETES DO MOLDE MELHORADO	131
FIGURA 85 - ÁREAS A ANALISAR DOS PROVETES DO MOLDE DE CONTROLO	131
FIGURA 86 - ÍNDICE DE POROSIDADES OBTIDO NOS PROVETES INICIAIS	133
FIGURA 87 - ÍNDICE DE POROSIDADES OBTIDOS NOS PROVETES DO MOLDE APERFEIÇOADO	133
FIGURA 88 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA ESTRUTURA DE UM MOLDE	138
FIGURA 89 - DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS DA ESTRUTURA DOS MOLDES PARA CARACTERIZAÇÃO DOS CÁLCULOS	139
FIGURA 90 – GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DO TEMPO DE ARREFECIMENTO PARA $\lambda_{ST} = 29 \text{ W}/(\text{M}\cdot\text{K})$ E Y VARIÁVEL	142
FIGURA 91 - GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DO TEMPO DE ARREFECIMENTO PARA $\lambda_{ST} = 29 \text{ W}/(\text{M}\cdot\text{K})$ E X VARIÁVEL	142
FIGURA 92 - GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DO TEMPO DE ARREFECIMENTO PARA $\lambda_{ST} = 45 \text{ W}/(\text{M}\cdot\text{K})$ E Y VARIÁVEL	143
FIGURA 93 - GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DO TEMPO DE ARREFECIMENTO PARA $\lambda_{ST} = 45 \text{ W}/(\text{M}\cdot\text{K})$ E X VARIÁVEL	143
FIGURA 94 – DESENHOS 3D DAS PLACAS DO MOLDE 12232249 A) PLACA INFERIOR, B) PLACA SUPERIOR	148
FIGURA 95 - PLACA INFERIOR DO MOLDE 1224413161-005	148
FIGURA 96 - PLACA INFERIOR DO MOLDE 1224413161-005	148
FIGURA 97 – EXEMPLO DA ESTRUTURA INFERIOR DOS MOLDES	149
FIGURA 98 – EXEMPLO DA ESTRUTURA SUPERIOR DOS MOLDES	150
FIGURA 99 - PROCEDIMENTOS PARA OTIMIZAÇÃO DE MOLDES	151

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PROCESSO DE INJEÇÃO DE LIGAS ZAMAK NO FABRICO DE TERMINAIS DE CABO [21]	21
TABELA 2 - PROPRIEDADES FÍSICAS DO ZN [24]	22
TABELA 3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ZN [21]	23
TABELA 4 - PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS DE LIGA [28]	24
TABELA 5 - EFEITO DAS IMPUREZAS NAS LIGAS DE ZN [31]	25
TABELA 6 - INFLUÊNCIA DO CU NA DIMENSÃO DAS PEÇAS OBTIDAS NAS LIGAS ZAMAK 2,3 E 5	26
TABELA 7 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS DIFERENTES LIGAS ZAMAK [34]	28
TABELA 8 - LISTAGEM DOS DIFERENTES PROCESSOS SEGUNDO A NATUREZA DOS MATERIAIS [38]	30
TABELA 9 – DESCRIÇÃO E COMPARAÇÃO DOS PRINCIPAIS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO INJETADA [28]	32
TABELA 10 - PRIMEIRA FASE DO CICLO DE INJEÇÃO [28]	33
TABELA 11 - SEGUNDA FASE DO CICLO DE INJEÇÃO [28]	34
TABELA 12 - FINAL DO PROCESSO DO CICLO DE INJEÇÃO [28]	34
TABELA 13 – IDENTIFICAÇÃO VISUAL DE DEFEITOS DE PROTUBERÂNCIAS METÁLICAS	36
TABELA 14 – IDENTIFICAÇÃO VISUAL DE DEFEITOS DE POROSIDADES E CAVIDADES	36
TABELA 15 - IDENTIFICAÇÃO VISUAL DE DEFEITOS DE DESCONTINUIDADES	37
TABELA 16 - IDENTIFICAÇÃO VISUAL DE DEFEITOS DE PREENCHIMENTO INCOMPLETO E FORMAS OU DIMENSÕES INCORRETAS	37
TABELA 17 - IDENTIFICAÇÃO VISUAL DE DEFEITOS DE ANOMALIAS ESTRUTURAIS OU INCLUSÕES E ADERÊNCIA	38
TABELA 18 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA ZAMAK 5 [34]	71
TABELA 19 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA ZAMAK 5 [34]	72
TABELA 20 - CARACTERÍSTICAS DO MOLDE DA REFERÊNCIA 12232249	78
TABELA 21 - CARACTERÍSTICAS DO MOLDE DA REFERÊNCIA 1224413161-005	80
TABELA 22 - CARACTERÍSTICAS DO TERMINAL 12232249.	82
TABELA 23 - CARACTERÍSTICAS DO TERMINAL 1224413161-005.	83
TABELA 24 - RESULTADOS CAUSA/EFEITO DO DIAGRAMA <i>ISHIKAWA</i> [36] [38]	87
TABELA 25 - DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO 1	91
TABELA 26 - DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO 2	92
TABELA 27 - DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO 3	94
TABELA 28 - DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO 4	94
TABELA 29 - DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO 5	95
TABELA 30 - DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO 6	95
TABELA 31 - DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO 7	96
TABELA 32 - DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO 8	96
TABELA 33 - DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS E RESPETIVAS UNIDADES DA EQUAÇÃO 9	98
TABELA 34 - DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO 10	98
TABELA 35 - DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO 11	99
TABELA 36 – DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO 12	99

TABELA 37 – DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO 13	99
TABELA 38 - DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO 14	100
TABELA 39 – DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO 15	100
TABELA 40 – PARÂMETROS E VALORES UTILIZADOS NO PROGRAMA PARA TODOS OS TERMINAIS	101
TABELA 41 – PARÂMETROS E VALORES ESPECÍFICOS DE CADA REFERÊNCIA	102
TABELA 42 - ANÁLISE MACROSCÓPICA FOCOS DO ESTUDO	102
TABELA 43 – PLANOS DE CORTE NAS AMOSTRAS DE CADA REFERÊNCIA	103
TABELA 44 - SELEÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS NAS AMOSTRAS	105
TABELA 45 – VALORES DAS UNIDADES APLICADOS PARA O CÁLCULO DE F1	105
TABELA 46 - VALORES DAS UNIDADES APLICADOS PARA O CÁLCULO DE F2	106
TABELA 47 - VALORES DAS UNIDADES APLICADOS PARA O CÁLCULO DE P2	106
TABELA 48 - VALORES DAS UNIDADES APLICADOS PARA O CÁLCULO DE Q	107
TABELA 49 - VALORES DAS UNIDADES APLICADOS À EQUAÇÃO DE BERNOULLI	107
TABELA 50 - VALORES DAS UNIDADES APLICADOS PARA O CÁLCULO DE U1 E U2	107
TABELA 51 - VALORES DAS UNIDADES UTILIZADAS PARA O CÁLCULO DE HF DA BOMBA	107
TABELA 52 – VALORES APLICADOS NA OBTENÇÃO DA RELAÇÃO ϵ/D	108
TABELA 53 – VALORES APLICADOS NO CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS PARA A CÂMARA DA BOMBA	108
TABELA 54 - VALORES APLICADOS NO CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS PARA O CANAL DE ESCOAMENTO DA BOMBA	108
TABELA 55 – VALORES DOS FATORES DE FRICÇÃO F OBTIDOS PARA O CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS	108
TABELA 56 – VALORES APLICADOS À EQUAÇÃO DE PERDAS LOCALIZADAS PARA A BOMBA	109
TABELA 57 – VALORES APLICADOS NA EQUAÇÃO DE BERNOULI PARA O BICO DE INJEÇÃO	109
TABELA 58 – VALORES UTILIZADOS NO CÁLCULO DAS VELOCIDADES U1 E U2 NO BICO DE INJEÇÃO	109
TABELA 59 - VALORES UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DE HF DO BICO DE INJEÇÃO	110
TABELA 60 - VALORES APLICADOS NA OBTENÇÃO DA RELAÇÃO ϵ/D	110
TABELA 61 - VALORES APLICADOS NO CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS NO CANAL DE MAIOR DIÂMETRO	110
TABELA 62 - VALORES APLICADOS NO CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS NO CANAL DE MENOR DIÂMETRO	110
TABELA 63 - VALORES DOS FATORES DE FRICÇÃO F OBTIDOS PARA O CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS	111
TABELA 64 – VALORES APLICADOS À EQUAÇÃO DAS PERDAS LOCALIZADAS NO BICO DE INJEÇÃO	111
TABELA 65 – REFERÊNCIA 12232249, FRAÇÃO VOLÚMICA DE AR	112
TABELA 66 - REFERÊNCIA 12232249, TURBULÊNCIA	112
TABELA 67 - REFERÊNCIA 12232249, VELOCIDADE	112
TABELA 68 – REFERÊNCIA 1224413161-005, FRAÇÃO VOLÚMICA DE AR	113
TABELA 69 - REFERÊNCIA 1224413161-005, TURBULÊNCIA	113
TABELA 70 - REFERÊNCIA 1224413161-005, VELOCIDADE	113
TABELA 71 – RESULTADOS DA POROSIDADE DA REFERÊNCIA 12232249	115
TABELA 72 – RESULTADO DAS POROSIDADES DA REFERÊNCIA 1224413161-005	115
TABELA 73 - GEOMETRIAS DA SECÇÃO DE SAÍDA DO SISTEMA DE GITAGEM PARA CADA REFERÊNCIA	117

TABELA 74 - RESULTADOS DO ESCOAMENTO DOS NOVOS MOLDES.	117
TABELA 75 – APLICAÇÃO DOS NOVOS SISTEMAS DE GITAGEM	118
TABELA 76 - RESULTADOS DO ESCOAMENTO DOS NOVOS MOLDES	119
TABELA 77 – APLICAÇÃO DOS ESCAPES DE GASES NOS NOVOS <i>LAYOUTS</i> DE CADA TERMINAL	119
TABELA 78 - RESULTADOS DA FRAÇÃO VOLÚMICA DE AR DOS NOVOS MOLDES REF.12232249	120
TABELA 79 - RESULTADOS DA TURBULÊNCIA DOS NOVOS MOLDES REF.12232249	120
TABELA 80 - RESULTADOS DA VELOCIDADE DOS NOVOS MOLDES REF.12232249	120
TABELA 81 - RESULTADOS DA FRAÇÃO VOLÚMICA DE AR DOS NOVOS MOLDES REF.1224413161-005	121
TABELA 82 - RESULTADOS DA TURBULÊNCIA DOS NOVOS MOLDES REF.1224413161-005	121
TABELA 83 - RESULTADOS DA VELOCIDADE DOS NOVOS MOLDES REF.1224413161-005	121
TABELA 84 – COMPARAÇÃO DO RESULTADO DOS ESCOAMENTOS DA REFERÊNCIA 12232249	122
TABELA 85 - COMPARAÇÃO DO RESULTADO DOS ESCOAMENTOS DA REFERÊNCIA 1224413161-005	122
TABELA 86 - EXEMPLO DO ESCOAMENTO DA REFERÊNCIA 12232249 ANTES E APÓS MELHORIAS IMPLEMENTADAS	123
TABELA 87– ÁREA DE SECÇÃO DE GITAGEM PROJETADA PARA O MOLDE 12232249	128
TABELA 88 – ÁREA DE SECÇÃO DOS ESCAPES DE GASES DO NOVO PROJETO 12232249	129
TABELA 89 – VALORES DOS NOVOS PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE ANALÍTICA DO ESCOAMENTO	129
TABELA 90 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA FRAÇÃO VOLÚMICA DE AR DO MOLDE DE CONTROLO DA REF.12232352	130
TABELA 91 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA TURBULÊNCIA DO MOLDE DE CONTROLO DA REF.12232352	130
TABELA 92 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA VELOCIDADE DO MOLDE DE CONTROLO DA REF.12232352	130
TABELA 93 – RESULTADOS DAS ANÁLISES DE POROSIDADES DO MOLDE DE CONTROLO	132
TABELA 94 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS NO MOLDE DE CONTROLO	132
TABELA 95 – CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADE λ_{st} A APLICAR AO MOLDE EM ESTUDO	138
TABELA 96 – VALORES APLICADOS NA EQUAÇÃO QAB	139
TABELA 97 – VALORES APLICADOS NA EQUAÇÃO QW	139
TABELA 98 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA: $\lambda_{ST} = 29 \text{ W}/(\text{M}\cdot\text{K})$; D = 5 MM ; Y = 10 MM	140
TABELA 99 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA: $\lambda_{ST} = 29 \text{ W}/(\text{M}\cdot\text{K})$; D = 10 MM ; Y = 10 MM	140
TABELA 100 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA: $\lambda_{ST} = 29 \text{ W}/(\text{M}\cdot\text{K})$; D = 5 MM ; Y = 25 MM	140
TABELA 101 - RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA: $\lambda_{ST}=29 \text{ W}/(\text{M}\cdot\text{K})$; D = 5 MM ; Y = 30 MM	141
TABELA 102 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA : $\lambda_{ST}=45 \text{ W}/(\text{M}\cdot\text{K})$; D=10 MM ; Y=10 MM	141
TABELA 103 - VARIAÇÃO DE VALORES E SUA IMPORTÂNCIA NO ARREFECIMENTO TÉRMICO	144
TABELA 104 - PLACAS DE GITAGEM OTIMIZADAS DA REFERÊNCIA 12232249	147
TABELA 105 - COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS ESTRUTURAS ANTES E APÓS AS OTIMIZAÇÕES EFETUADAS	150
TABELA 106 - TABELA DE OBJETIVOS	158

ÍNDICE

RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE TABELAS	XXI
1. INTRODUÇÃO	3
1.1 Enquadramento	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Metodologia	4
1.4 Estrutura	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 A Indústria Automóvel	9
2.1.1 Conceitos Gerais	9
2.1.2 Cabos de Controlo para Automóveis	13
2.1.3 Cabos Metálico, suas Configurações e Aplicações	17
2.1.4 Os Terminais de Bloqueio nos Cabos de Controlo	19
2.2 Zinco e suas Ligas	22
2.2.1 Introdução	22
2.2.2 Composição, Classificação e Propriedades das Ligas de Zn	23
2.2.3 Diagrama de Fases das Ligas de Zn	26
2.2.4 As Ligas <i>Zamak</i>	27
2.3 Fundição	29
2.3.1 Introdução	29
2.3.2 Fundição e seus Processos	29
2.3.3 A Fundição Injetada	30
2.3.4 Defeitos do Processo de Fundição	35
2.4 Aplicações Informáticas de Auxílio à Otimização de Processos de Fundição	38

3	DESENVOLVIMENTO	45
3.1	Objetivos do Trabalho Prático	45
3.2	Caracterização da Empresa	47
3.3	Caracterização do Equipamento de Injeção	47
3.3.1	Máquina de <i>Zamak</i>	47
3.4	<i>Zamak</i> e Processo de Utilização e Aplicação no Fabrico de Terminais	71
3.4.1	Características do <i>Zamak 5</i> usado neste trabalho	71
3.4.2	Manutenção do <i>Zamak</i> na Fábrica	72
3.4.3	Moldes de Terminais Utilizados	75
3.4.4	Terminais Utilizados	81
3.5	Caracterização do Problema	84
3.5.1	Identificação do Problema	84
3.5.2	Problemas de Produção	85
3.6	Tempestade de Ideias (diagrama P; diagrama <i>Ishikawa</i>)	86
3.7	Estudo Analítico do Processo de Injeção	88
3.7.1	Mecanismo e Bomba	88
3.7.2	Canais de Gitagem do Molde	90
3.8	Expressões Envolvidas no Processo	91
3.8.1	Mecanismo de Atuação	91
3.8.2	Análise dos Escoamentos	93
3.8.3	Análise do Arrefecimento e Difusão Térmica	97
3.8.4	Cálculo da Geometria dos Escapes de Gases	100
3.8.5	Programas Desenvolvidos para os Cálculos	100
3.9	Procedimentos de Análise	101
3.9.1	Simulações	101
3.9.2	Análise Macroscópica dos Provetes	102
3.9.3	Análise Metalográfica dos Provetes	103
3.10	Fase Preliminar de Estudo	105
3.10.1	Resultados Analíticos do Processo de Injeção	105
3.10.2	Simulações do Enchimento dos Moldes	111
3.10.3	Análise Macrográfica	113
3.10.4	Análise da Superfície de Corte	114
3.11	Implementação de Melhorias	116
3.11.1	Gitagem	116
3.11.2	Implementação de Escapes de Gases	118

3.11.3	Simulações da Injeção do Novo <i>Layout</i>	119
3.12	Análise Crítica Global	121
4	VALIDAÇÃO DA REFERÊNCIA DE CONTROLO	127
4.1	Alterações ao Projeto	127
4.1.1	Secção de Gitagem	127
4.1.2	Escapes de Gases	128
4.2	Estudo Analítico	129
4.3	Análise do Escoamento	130
4.4	Análise Macrográfica	131
4.5	Análise à Superfície de Corte	131
4.6	Discussão dos Resultados	132
5	ESTUDO DA DIFUSÃO TÉRMICA PELA APLICAÇÃO DA TEORIA DE NATTI E GUNTER	137
5.1	Método Analítico	137
5.1.1	Descrição do Método de Análise	137
5.1.2	Parâmetros Utilizados nos Cálculos	139
5.1.3	Apresentação dos Resultados	140
5.1.4	Discussão dos Resultados	141
6	IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS	147
6.1	Guias de procedimentos para otimização de moldes	150
6.2	6.2 Futuras otizações a implementar	152
7	CONCLUSÕES	157
8	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	163
9	ANEXOS	ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.
	ANEXO I – Composição química das ligas de zinco para fundição	173
	ANEXO II – Características das ligas Zamak	174
	ANEXO III – Propriedades mecânicas das ligas de zinco	175

ANEXO IV – Defeitos presentes na fundição injetada	176
ANEXO V – Ferramentas para cálculo do número de Reynolds	183
ANEXO VI – Análise Macrográfica dos provetes	184
ANEXO VII – Análise à superfície de corte dos provetes	187
ANEXO VIII – Tabelas de Transferência de calor	196
ANEXO IX – Programa Matlab para cálculo dos parâmetros de escoamento	201
ANEXO X – Propriedades da liga de aço UDDEHOLM UNIMAX (catálogo do fornecedor)	214
ANEXO XI – Desenhos das otimizações dos moldes	215
ANEXO XII – Artigos Internacionais “Optimisation of die casting processo in <i>Zamak</i> alloys”	216

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

1.2 OBJETIVOS

1.3 METODOLOGIA

1.4 ESTRUTURA

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O setor automóvel é uma das principais indústrias de toda a economia mundial, não só pelo elevado volume de vendas que representa, mas também por todos os consórcios associados envolvidos na construção de componentes para veículos, que englobam os mais diversos setores de atividade. Um destes setores é o metalúrgico e o seu ramo de fundição, onde se encontra a Ficocables, Lda., empresa pertencente ao grupo multinacional FICOSA, com instalações em Vermoim, Maia, e onde uma grande maioria do seu volume de negócios provém do desenvolvimento e fabrico de cabos de comando, dispositivo mecânico que tem por vista promover o acionamento de determinados sistemas, e que para tal são constituídos por um conjunto de componentes, de modo a atingir a sua funcionalidade. Entre estes últimos, encontramos os terminais de bloqueio.

Os terminais de bloqueio, por sua vez, são elementos que se encontram nas extremidades dos cabos, e que são produzidos pelo processo de fundição injetada de ligas *Zamak* sobre estes últimos, após criada uma deformação nos fios do cabo. Para que estes terminais possam ser moldados, são inevitavelmente necessários moldes, componentes inerentes ao processo de fundição injetada, e que requerem um conhecimento abrangente dos fenómenos físicos e químicos de todo o processo de fundição, que inclui escoamento de fluidos, transferência de calor e massa, e estrutura cristalina.

O processo de produção de moldes na empresa, assentou desde sempre numa base empírica, suportando-se na intuição dos colaboradores envolvidos no processo, e na experiência que estes iam adquirindo ao longo do tempo, sendo que os problemas iam sendo sanados por sucessiva experimentação, sempre que estes sucediam, sem no entanto ter sido alguma vez efetuado qualquer estudo específico a todo o processo, e em particular à zona do molde. O facto do prolongado aparecimento de certas referências com defeitos, nos quais, após diversas tentativas de melhoramentos terem sido efetuadas sem resultados tangíveis, levou a que a empresa optasse por uma abordagem científica desta área, tendo proposto um estudo ao processo de injeção, com particular incidência na zona do molde, e a todos os seus componentes associados, com o objetivo de obter um conhecimento aprofundado do processo, criar diretrizes de otimização e, ao mesmo tempo, desenvolver melhoramentos aos *layouts* dos moldes existentes, onde as contínuas melhorias se tinham tornado infrutífera.

1.2 Objetivos

O desenvolvimento deste projeto teve como objetivo o estudo e otimização do processo de fundição injetada, tendo como foco principal o desenvolvimento de melhorias nos moldes de produção de terminais de bloqueio e, no seguimento do estudo, pretendeu-se ainda criar diretrizes para a otimização de futuros moldes, bem como o desenvolvimento de um programa para rápida obtenção de determinados parâmetros necessários ao cálculo e desenho, em função de outros previamente conhecidos.

A otimização dos moldes teve principal incidência na eliminação de defeitos das peças produzidas, nomeadamente porosidades gasosas e rechupes, que colocavam em causa a sua resistência mecânica e posterior funcionalidade. No entanto, devido ao desconhecimento de muitos dos parâmetros presentes no processo, bem como de muitas características dos componentes envolvidos, houve a necessidade de ultrapassar certos obstáculos que se traduzem também em objetivos, que se descrevem seguidamente:

- Estudo dos regimes de escoamento desenvolvidos pelas massas fluídicas;
- Estudo do processo de transferência de calor e arrefecimento;
- Criação de procedimentos e diretrizes para o desenvolvimento de moldes;
- Desenvolvimento de um programa e tabelas para obtenção rápida de parâmetros;
- Desenvolvimento do desenho de novos moldes;
- Validação dos melhoramentos efetuados;
- Identificação de futuras otimizações a implementar.

1.3 Metodologia

Para a execução do trabalho, seguiu-se a seguinte metodologia:

- Pesquisa bibliográfica do processo de fundição e fenómenos a ele inerentes;
- Identificação dos terminais com maior nível de defeitos;
- Identificação dos defeitos e hierarquização prioritária dos mesmos;
- Análise na frente de produção de toda a operação de fabrico de terminais;
- Recolha na frente de máquina dos valores dos parâmetros utilizados no fabrico de terminais *Zamak*;
- Estudo do processo com o objetivo de identificar os parâmetros fixos e variáveis;
- Estudo analítico de todo o ciclo de injeção, com vista a obter todas as pressões exercidas no metal, bem como a sua velocidade e temperatura de escoamento;
- Estudo analítico do processo de transferência de calor e arrefecimento em fundição injetada;
- Desenvolvimento de um programa;
- Identificação dos problemas, e razões da sua ocorrência;

- Análise dos escoamentos pelo processo de elementos finitos;
- Análise do índice de porosidade das amostras selecionadas;
- Definição dos melhoramentos a efetuar;
- Desenho de novos moldes com alterações introduzidas;
- Otimização do desenho da estrutura do molde;
- Validação efetiva dos novos desenhos;
- Otimização do desenho da estrutura do molde;
- Elaboração de guias de procedimentos para a construção de moldes otimizados;
- Redação da presente dissertação.

1.4 Estrutura

A presente dissertação é elaborada em sete fases, uma primeira referente à presente introdução. A segunda apresenta a revisão bibliográfica do conteúdo teórico das matérias a abordar, na terceira apresenta-se todo o desenvolvimento efetuado com descrição de componentes, apresentação dos problemas, cálculos, simulações efetuadas, análises elaboradas e melhorias desenvolvidas. Na quarta, é apresentada toda a análise realizada a um componente proveniente de uma das melhorias obtidas. Repetindo todos os procedimentos da terceira fase, direcionados apenas para este componente, efetuando-se também a discussão dos resultados obtidos, antes e após as otimizações realizadas.

Uma quinta fase aborda o estudo do arrefecimento baseado na teoria de arrefecimento de Natti e Gunter, com vista a obter tabelas para elaborar melhorias em estruturas de moldes, de modo a otimizar o estudo realizado na quarta fase. Uma sexta fase apresenta todas as melhorias desenvolvidas.

Na sétima e última fase, são apresentadas as conclusões obtidas na elaboração desta dissertação, quer ao nível dos objetivos atingidos na elaboração do trabalho, quer ao nível pessoal.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

2.2 ZINCO E SUAS LIGAS

2.3 FUNDIÇÃO

2.4 APLICAÇÕES INFORMÁTICAS DE AUXÍLIO À OTIMIZAÇÃO DE
PROCESSOS DE FUNDIÇÃO

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Indústria Automóvel

2.1.1 Conceitos Gerais

29 de Janeiro de 1886, é considerada a data do nascimento do automóvel, pois foi nesse dia que Karl Benz registou a primeira patente do veículo (Figura 1) [1], sem nunca ter imaginado nas grandes mudanças a nível mundial que este iria trazer, tornando a indústria automóvel extremamente importante para a economia mundial, e num motor de desenvolvimento tecnológico e social. O automóvel aparece mais de meio século após um outro tipo de veículo, que contribuiu para a revolução industrial, o comboio. Por outro lado, o aparecimento do motor de combustão interna recíproco a petróleo, patenteado pelo Dr. A.N. Otto na Alemanha, e inicialmente aplicado em máquinas fabris, contribuí de forma decisiva para o desenvolvimento do automóvel [2].

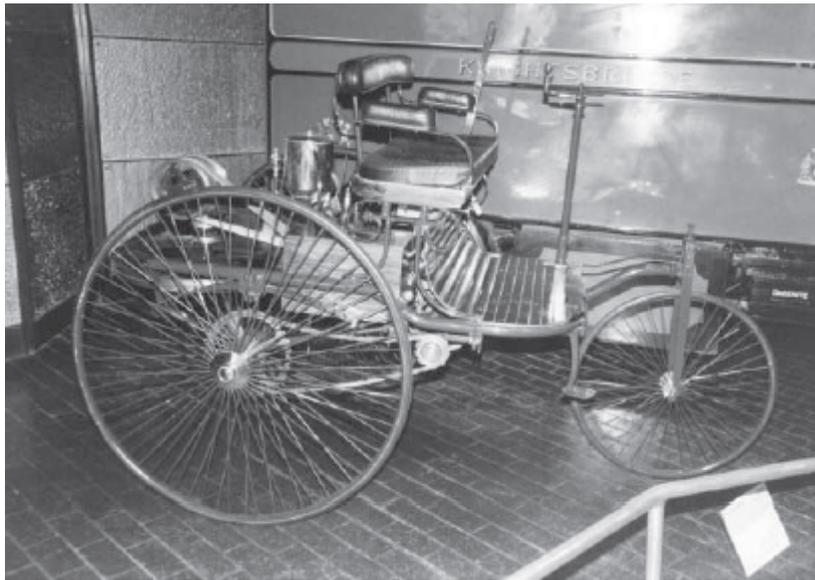


Figura 1 – Réplica do triciclo Benz do ano de 1886 [3]

Ao nível industrial, a produção dos primeiros automóveis era feita manualmente por artesões, pelos mesmos processos utilizados nas carruagens de tração animal, onde cada um dos componentes do veículo era construído e aplicado pelos mesmos. No entanto a grande revolução seria realizada em 1909 por Henry Ford, que desenvolveu a técnica da produção em massa, aplicando-a à produção automóvel, quatro anos mais tarde, em 1913, abre a unidade *Highland Park*, em Detroit [3], e introduz uma inovação industrial importante, a linha de produção móvel, hoje em dia utilizada por muitas indústrias, inclusive a aeronáutica. Com a produção em massa, os veículos inicialmente caros e destinados apenas a uma franja da população, tornaram-se acessíveis a todas as classes,

nomeadamente à classe média, daí em diante, a indústria automóvel torna-se massificada e competitiva, contribuindo para desenvolvimentos contínuos em diversas áreas, onde se destacam os sistemas de fabrico, os sistemas motrizes e o *design* (Figura 2) [4].



Figura 2 - Diversidade dos correntes tipos de automóveis [3]

A evolução do automóvel traz associada uma evolução industrial, e toda a dinâmica envolvente torna o setor automóvel mutável, dando origem à criação de subsidiárias, parcerias entre empresas [5], e contratos com fornecedores que dinamizam outras áreas de negócio como fundições, moldes, plásticos, etc, contribuindo para o seu desenvolvimento devido aos elevados padrões impostos ao nível científico, industrial e de qualidade.

A presente realidade, origina uma rápida necessidade de satisfazer as exigências sociais e dos consumidores, a baixo preço de mercado, que resulta numa mudança no setor, pelo que é uso comum a procura global de materiais *low-cost* e o uso de plataformas comuns para aumento de eficiência, redução de custos de desenvolvimento e *outsourcing* [6]. Tudo isto origina que o atual fabrico de veículos ameace o tradicional sistema Japonês *kiretsu*, sistema de grupo de companhias. Presentemente, componentes de automóveis são montados em módulos por fornecedores externos, e entregues aos fabricantes de automóveis, não sendo fora de comum a aquisição de componentes dos mesmos fornecedores e por fabricantes rivais. O sistema tradicional de integração vertical das empresas está assim a mudar para uma integração mais horizontal (Figura 3), abandonando cada vez mais a ideia de que tudo deve ser feito “em casa”, ou, por empresas do mesmo grupo *kiretsu*, dando mais ênfase ao princípio das redes globais de informação, cooperação e recursos humanos na competição empresarial [7].

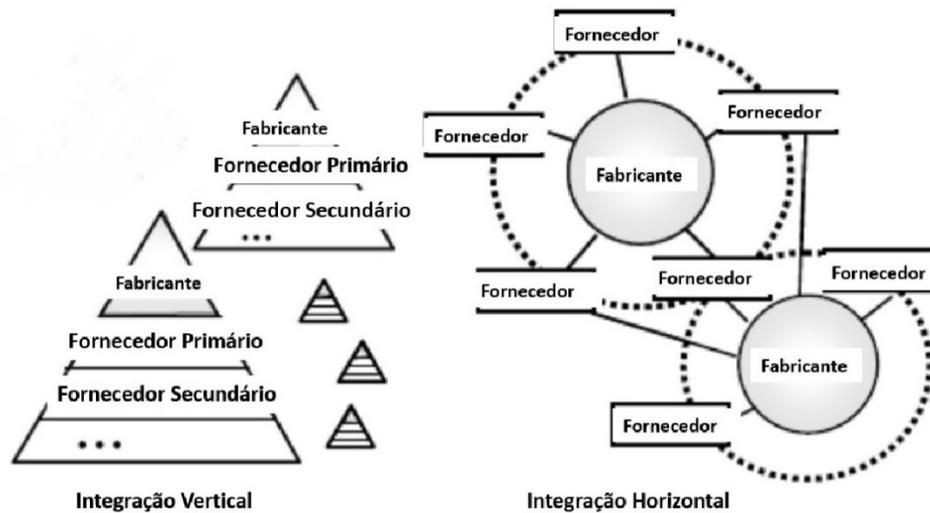


Figura 3 - Tipos alternativos de grupo de empresas [4]

Presentemente, a indústria automóvel encontra-se entre as indústrias mais exigentes, quer ao nível tecnológico, quer ao nível de produção e logística. As leis restritivas nas áreas do ambiente e segurança, impostas por diversos países a nível mundial, fez disparar a necessidade de produtos de ponta e de alta tecnologia, de modo a atingir as novas metas impostas, e colocando este setor industrial na linha da frente do desenvolvimento, dando origem a que os automóveis sejam desenvolvidos mais rapidamente, com o objetivo de atingir os requisitos sociais de redução de emissões de gases de efeitos de estufa, poluição sonora, aumento da segurança, e eficiência energética, sem detrimento das *performances* nem inflação de custos [7].

Hoje em dia, os construtores têm por objetivo, a construção de veículos desenvolvidos de maneira harmoniosa com as pessoas e a natureza, centrando os principais requisitos da indústria automóvel em questões ambientais e de segurança, associados à qualidade, *design* e liderança. Para que estes objetivos sejam cumpridos, os departamentos de engenharia necessitam de focar os seus esforços em desenvolvimento tecnológico, como reduções de monóxido de carbono (CO) e outros gases prejudiciais ao ambiente, consumos de combustível e segurança, juntamente com o melhoramento da qualidade, do conforto, da conectividade e das *performances* mecânicas de controlo. Cada um destes princípios tem a sua via de desenvolvimento, através do emprego de eletrónica, novos materiais ecológicos ou processos de fabrico, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico, percorrendo um caminho que muito provavelmente alcançará num futuro próximo, o automóvel autónomo, tirando partido das novas tecnologias, como a *internet* e *cloud computing* [8]. Mobilidade, significa diversidade de conceitos e segmentos, onde diferentes condições ecológicas, económicas ou geográficas requerem diferentes tipos de automóveis [5]. Junto, podemos ainda acrescentar a exigência de potências e binários associados a cada vez menores emissões poluentes, e que têm vindo a reduzir drasticamente nas últimas décadas, como resultado das melhorias nos processos dos motores de combustão, com hidrocarbonetos (HC) e óxidos de azoto a reduzirem para 86%, o monóxido de carbono (CO) para 84%, e o óxido de enxofre (SO) para 97%. No

entanto, os limites de emissões estão a ficar cada vez mais severos (Figura 4), referente aos objetivos dos principais países produtores de veículos para as emissões de dióxido de carbono (CO₂) [2].

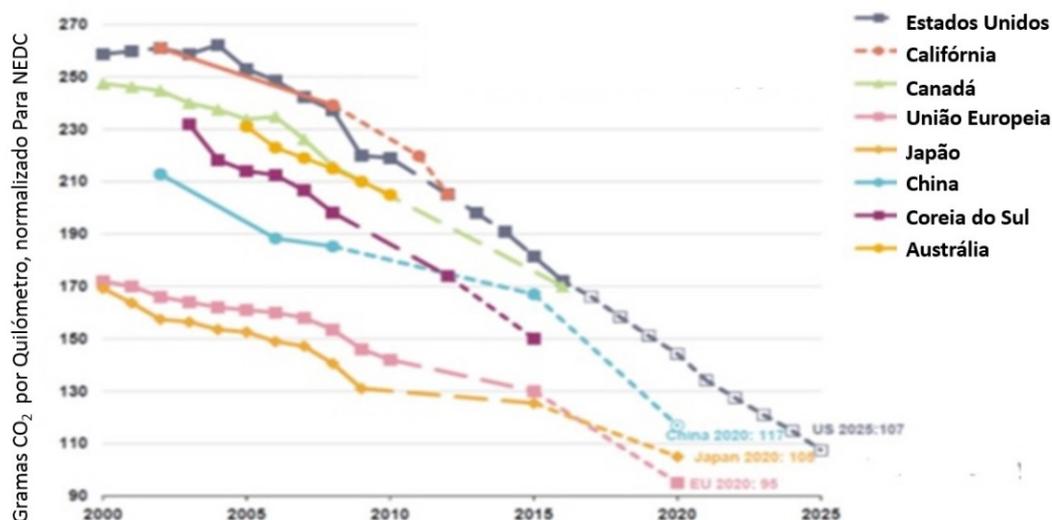


Figura 4 - Evolução mundial da redução das emissões de CO₂ - dióxido de carbono [9]

A indústria automóvel é um dos setores líderes com altos padrões de qualidade, fixando indicadores aplicáveis a outras indústrias. Os bem conhecidos princípios de manutenção criados nos anos setenta pela Denso, um fornecedor da Toyota, e aplicados mundialmente, são um exemplo dos elevados padrões de qualidade que esta indústria significa [4].

O fator chave para cumprir todos os requisitos impostos pelo setor automóvel é a qualidade. A introdução de produtos questionáveis, deve ditar uma conduta de ética e de ação responsável. Para tal, o desenvolvimento de produtos de baixa qualidade, não só traz má reputação para a empresa que os produz, como também pode, em último caso, levar a perdas monetárias e de confiança, processos judiciais e aumento de regulações governamentais [6], que podem dar origem a uma baixa de *stocks* e subsequentes *takeovers*, dissolução da empresa ou falência.

Ao setor automóvel, encontram-se associados centenas ou mesmo milhares de *stakeholders*. Cada fabricante traz ainda consigo o seu próprio fornecedor, criando uma rede interdependente, na qual a confiança é uma parte importante do funcionamento de toda esta indústria. Os fornecedores devem, por isso, cumprir os requisitos acordados, como prazos de entrega, e parâmetros de qualidade impostos pela engenharia de produto, de modo a acompanhar as escalas de montagem e construção, fazendo com que o produto entregue obedeça assim às especificações da casa mãe.

Para que tal possa ser exequível, devem ser implementados padrões de qualidade, e divulgados por todos os fornecedores, de modo a desenvolver princípios de base que se

tornem diretrizes diárias para cada estrutura empresarial, começando no CEO (*Chief Executive Officer*) até aos colaboradores de linha [10]. A necessidade de elevados padrões de qualidade, impõe às empresas a obrigatoriedade de implementação de filosofias e modelos de gestão, no qual o mais conhecido hoje em dia, é o modelo TQM (*Total Quality Management*, Figura 5), que envolve todos os indivíduos de uma organização, num esforço contínuo de melhorar a qualidade e atingir a satisfação do cliente [11].

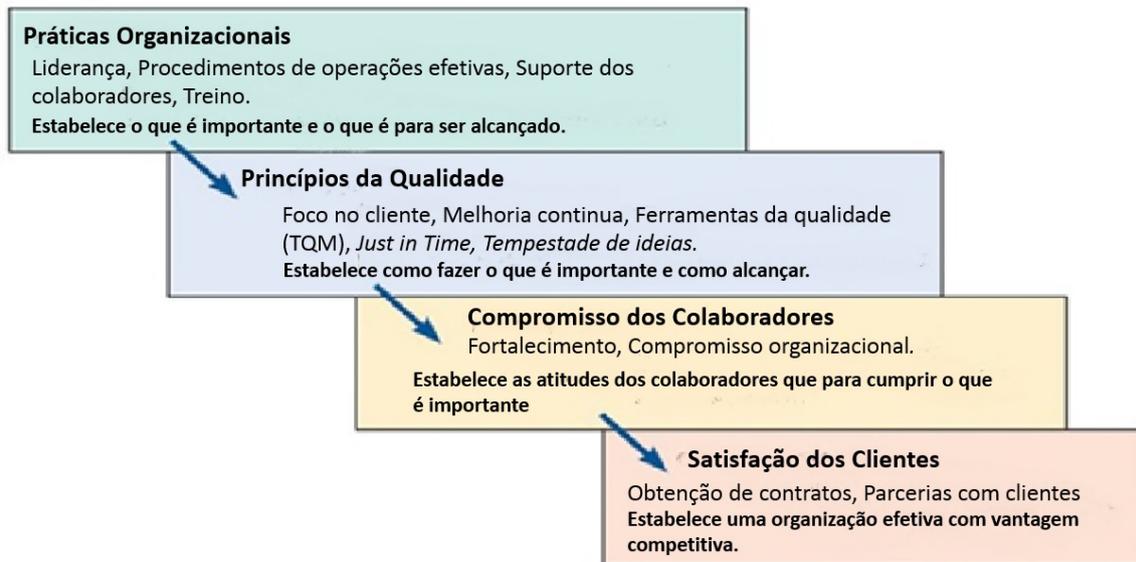


Figura 5 - Fluxo de atividades para atingir o TQM [11]

O setor automóvel encontra-se presentemente em grande mudança ao nível corporativo. As diversas marcas existentes estão a ser integradas em grupos globais, partilhando conceitos, plataformas e reduzindo os custos de produção. Entretanto, novas marcas com novos conceitos estão a aparecer no mercado, como o caso da Tesla. Ao nível tecnológico, verifica-se a transição da motorização do motor de combustão interna para o motor elétrico, e introdução de sistemas de conectividade e condução autónoma.

Empresas da área digital estão hoje em dia a entrar no setor automóvel com novos conceitos e ideias. O futuro é por isso incerto, mas promissor.

2.1.2 Cabos de Controlo para Automóveis

O funcionamento de qualquer mecanismo implica que tenha incorporado sistemas de comando mecânico. Na realidade, de nada serviria ligar um motor elétrico, se este não tivesse um meio mecânico acoplado a si, de modo a transmitir a rotação nele gerado. Nos automóveis, diversos sistemas de comando são utilizados para o acionamento dos vários sistemas de locomoção e conforto, podendo estes ser ativados por intermédio de veios, tirantes ou para o caso concreto, cabos de comando.

Cabos de comando (Figura 6) são elementos mecânicos flexíveis de transmissão de energia mecânica entre dois ou mais dispositivos, pelo princípio de movimentação de um cabo (comumente de aço) no interior de um outro de condução, e oco [12]. Cabo de comando é pois um sistema onde todos os componentes são necessários para efetuar o processo de conversão de energia mecânica (Figura 7), ou seja, a energia que pode ser transferida por intermédio de uma força, traduzindo-se em duas formas de energia, cinética relacionada com o movimento, e potencial relacionada com o armazenamento (Figura 8) [13].

Estes sistemas de comando, podem ser divididos em sistemas atuadores e sistemas recetores, o seu funcionamento, baseia-se na aplicação de uma carga atuante ao sistema de atuação, que é depois transmitida diretamente aos sistemas recetores, por intermédio de um ou mais cabos (Figura 8) [14].



Figura 6 - Cabos de comando para acionamento de portas e vidros

Os cabos de comando podem ser encontrados no acionamento de vidros, abertura de portas, regulação de assentos, e nos sistemas de aceleração, embraiagem e travagem [14]. Evidentemente, cada um destes sistemas tem um *design* e características diferentes, de acordo com o fim para o qual foi projetado, variando no formato, materiais utilizados, e no processo de fabrico, de modo a garantir o princípio fundamental de transmissão de movimento (Figura 8).

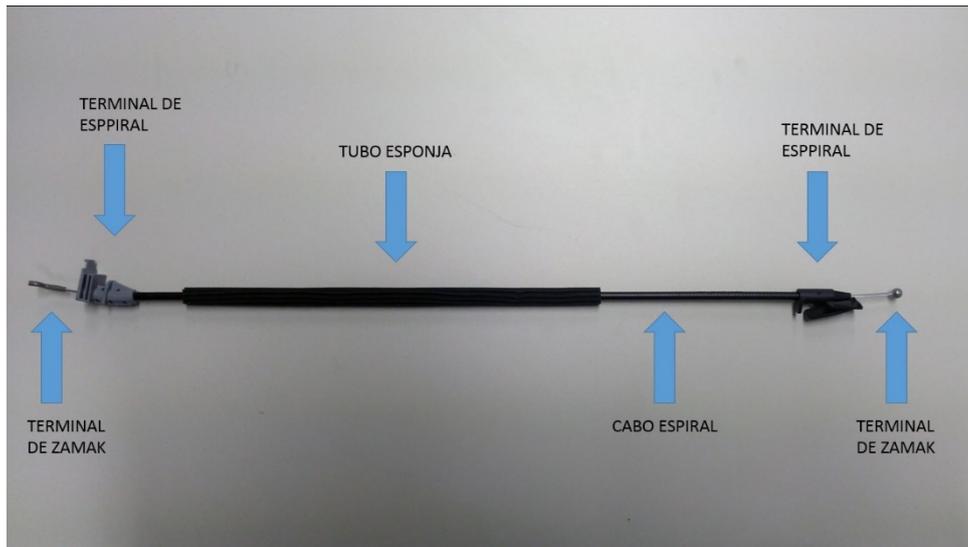


Figura 7 - Cabo de comando e seus componentes

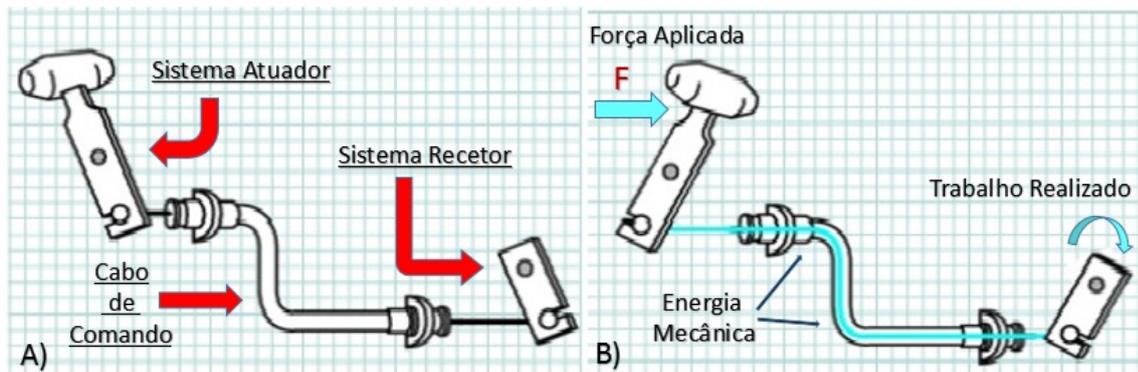


Figura 8 - Esquema dos sistemas atuantes, funcionamento mecânico [15]

O uso deste tipo de sistemas, traz associada a vantagem da adoção de diferentes *layouts*, entre o local de aplicação da força, e o local ou locais onde o efeito da mesma pretende ser sentido, podendo o caminho entre dois ou mais terminais adotar diversas configurações e não ter a necessidade de possuir um percurso exclusivamente reto, como nos elementos rígidos, recorrendo-se à sua aplicação, quando se pretende ultrapassar barreiras tais como mecanismos e peças, colocadas em locais complexos entre as extremidades dos pontos atuantes (Figura 9) [16]. Em veículos, os cabos de comando são utilizados para mecanicamente controlar atuadores, como por exemplo, o mecanismo de fecho de portas, onde grandes forças mecânicas podem ser transmitidas por intermédio dos cabos de comando [17].

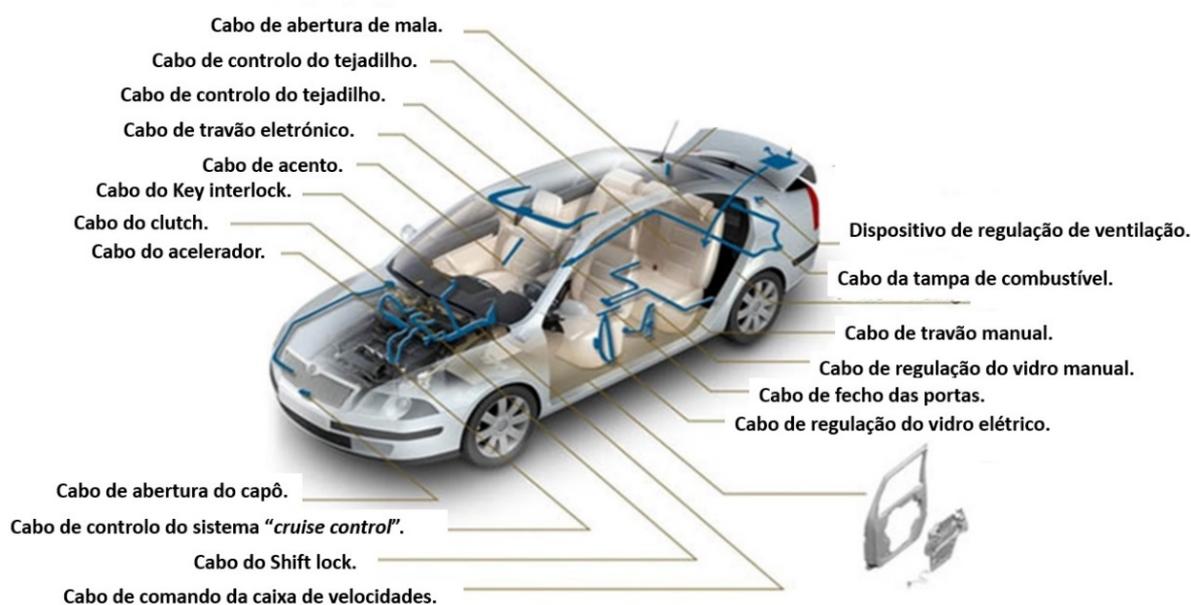


Figura 9 - Cabos de comando presentes num veículo para acionamento de sistemas [15]

O tipo de atuação dos cabos de comando divide-se em dois tipos de sistemas desenvolvidos: o sistema *Pull* inicial, e o sistema *Push-Pull*, que se descrevem seguidamente [18].

Sistema *Pull* (Puxe) – Foi o primeiro sistema a ser desenvolvido, transmitindo apenas forças de tração, sendo por isso somente aplicado quando este tipo de funcionalidade é necessária. Devido à necessidade de liberdade de percurso, são utilizados na sua construção elementos de cabos flexíveis, tanto no núcleo como na condução. Em determinadas instalações, estes cabos possuem uma mola de retorno, de maneira a manter um carregamento específico, fazendo-o retornar à sua posição original após ativação.

Sistema *Push-Pull* (Empurre/Puxe) – É o tipo de cabo que transmite forças, quer no modo de retração, quer no modo de impulsão, trabalhando por isso tanto à tração como à compressão. Os cabos de aço são construídos com um núcleo sólido, para permitir a transmissão de energia quando atua no modo de compressão, assegurando ao mesmo tempo uma ótima funcionalidade, se solicitado à tração. Apesar de possuir um núcleo rígido, a construção destes cabos é projetada usando uma vasta gama de combinações de núcleos sólidos e cordas de arame.

A existência de diversos tipos de cabos de comando, faz com que as suas características e *layouts* sejam também diversos, podendo um cabo ser constituído por vários componentes. No entanto, os desenhos mais simples resumem-se apenas a três elementos principais: o cabo metálico, que transmite as forças, um revestimento de tubo externo de condução (normalmente em espiral), que permite ao cabo metálico

movimentar-se no seu interior, e os terminais (normalmente metálicos) acoplados às extremidades deste e funcionando como atuador e recetor [19]. Os mecanismos, podem ainda ter mais ou menos elementos na sua constituição, em função do fim a que se destinam. Para o caso concreto, focamo-nos nos cabos de abertura de portas. Estes, para além dos três componentes mencionados, têm ainda terminais plásticos denominados terminais de espiral, para acoplamento à estrutura, tubo esponja para acomodação e redução de ruído, e em determinados casos *gromets*, de modo a criar uma barreira entre zonas húmidas e zonas secas (Figura 10).

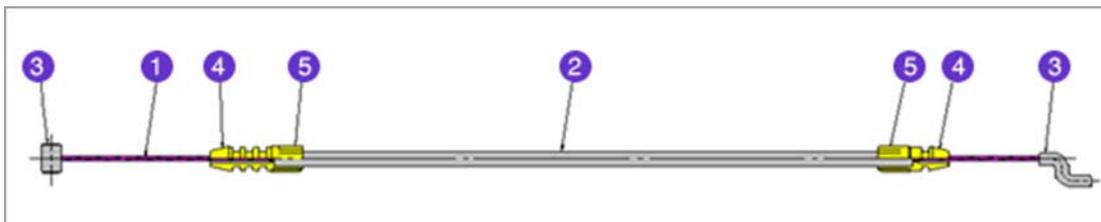


Figura 10 - Cabo de comando e seus componentes; cabo metálico (1), tubo espiral (2), terminais metálicos Zamak (3), terminais de tubo espiral (4), abraçadeira (5) [15].

Construções mais complexas são também desenvolvidas, alterando as configurações dos cabos, e conseqüentemente, o número de elementos, aumentando desta maneira o número de sistemas recetores (Figura 11).

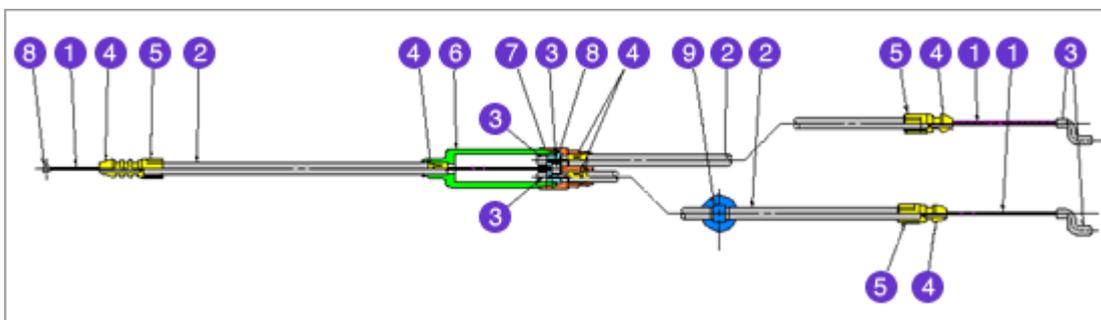


Figura 11 - Cabo de comando e seus componentes; cabo metálico (1), tubo espiral (2), terminais metálicos Zamak (3), terminais de tubo espiral (4), abraçadeira (5), caixa de união (6), peça de união de cabos (7), *gromet* (8), abraçadeira com clipe (9) [15].

2.1.3 Cabos Metálico, suas Configurações e Aplicações

Os cabos de controlo podem ser produzidos com cabos metálicos de diversas configurações de construção (Figura 12), compreendendo os diâmetros mais usuais valores entre 1,25 e 1,5 mm.

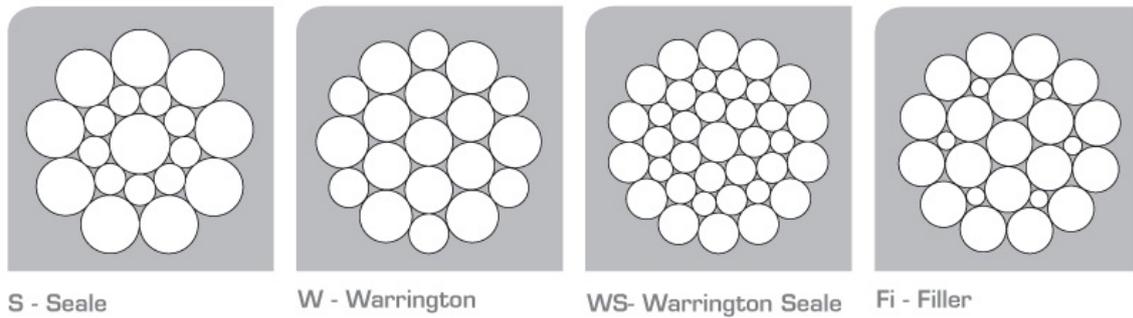


Figura 12 - Configurações de construção de cabos metálicos [20]

Na produção de terminais por fundição injetada, e para que exista coesão entre o cabo metálico e o terminal injetado, o primeiro é sujeito a um punção na sua extremidade de modo a criar uma deformação que alargue o cabo. Esta deformação, é conhecida por flor (Figura 13), e é esta mesma zona que fica no interior da peça produzida, de maneira a aumentar a área de contacto entre os dois elementos, e tornar a sua união o mais coesa possível, devendo existir uma determinada espessura, entre o ponto mais periférico do cabo e a parede do terminal, para que a resistência definida possa ser atingida [21].



Figura 13 - a) Flor efetuada na extremidade de um cabo metálico; b) Dimensões principais da flor [21]

Para que uma flor possa ser corretamente produzida, deve obedecer a parâmetros como a sua geometria, as dimensões e o seu descentramento, permitindo a geometria e as dimensões, aumentar a resistência à tração pelo do aumento da área de contacto. O descentramento, é o parâmetro que classifica o desvio da flor, assim, quanto menor esse desvio, mais perfeita é a flor, promovendo a coesão do conjunto [21].

2.1.4 Os Terminais de Bloqueio nos Cabos de Controle

Terminais de bloqueio são componentes que são acoplados às extremidades dos cabos de comando, e projetados com determinadas configurações, que permitem a sua fixação aos locais onde é desejada a transferência de energia e execução do trabalho. Estes elementos podem ser produzidos em diversos materiais, e por diversos processos de fabrico em função das solicitações a que todo o conjunto vai ser submetido. É por isso possível, encontrar um diverso leque de opções, de acordo com as exigências do projeto e opção do projetista. Face ao exposto, podemos encontrar no mercado terminais de cabos construídos em plástico, metal, alumínio, zinco, aço, etc., e com um leque de configurações tais como pernos roscados, tipos de cavilha, formas para encaixe, etc., produzidos pelos processos de estampagem, maquinagem (torneamento), forjamento ou fundição. No entanto, para o caso concreto dos cabos de comando de portas para a indústria automóvel, o material comumente utilizado no seu fabrico são as ligas Zamak, e o processo a fundição injetada, onde o material fundido é injetado diretamente sobre um cabo, eliminando assim operações como, por exemplo, a prensagem.

Também o uso das ligas utilizadas (*Zamak*), traz a vantagem da boa resistência à corrosão que estas apresentam, devido à sua composição à base de zinco e alumínio (Zn-Al), promovendo o primeiro elemento, zinco (Zn), uma boa proteção, e o segundo, alumínio (Al), a capacidade de formar uma camada superficial de óxidos, que impede a progressão da corrosão ao restante material [21].

Existem assim diversos tipos de terminais presentes no mercado, produzidos em diferentes materiais e processos (Figura 14).



Figura 14 - Tipos de terminais de bloqueio presentes no mercado [15]

As dimensões dos terminais de bloqueio, variam em função do diâmetro do cabo metálico, e das tensões de solicitação, devendo obedecer a uma espessura mínima entre o ponto mais periférico do cabo e a parede do terminal, para evitar a rotura aquando da solicitação. É também primordial para a resistência do conjunto, o conhecimento da zona funcional do terminal (Figura 15), pois é essa a zona da peça que vai ser solicitada quando as forças lhe forem impostas. É pois necessário ter um bom conhecimento do funcionamento do cabo de comando, e do limite de rotura dos seus componentes [16] [21].

No caso concreto de terminais injetados, o conhecimento das zonas funcionais, permite ao projetista um controlo do processo de injeção dessas zonas, e se necessário, trabalhar na otimização do mesmo, de maneira a permitir peças com as melhores *performances* possíveis.

Os terminais projetados, irão obter a sua configuração em função do desenho de encaixe dos atuadores, pertencendo a escolha da sua forma ao projetista, originando num vasto leque de formas e tamanhos, que para o caso em concreto se dividem em Esféricos, Cilíndricos, Formas em L, Formas em S ou manivelas e formas especiais (Figura 16). As vantagens e inconvenientes da utilização das ligas Zamak, no fabrico de terminais de cabos de comando pelo processo de fundição injetada, encontram-se descritos na Tabela 1.

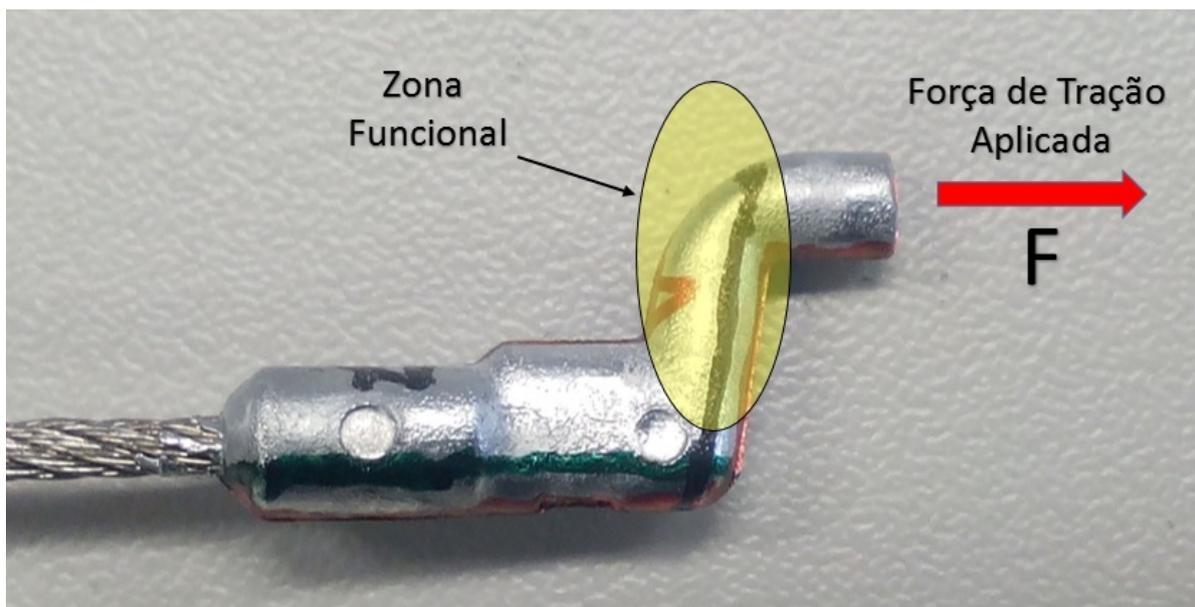


Figura 15 - Exemplo de uma zona funcional de um terminal de cabo

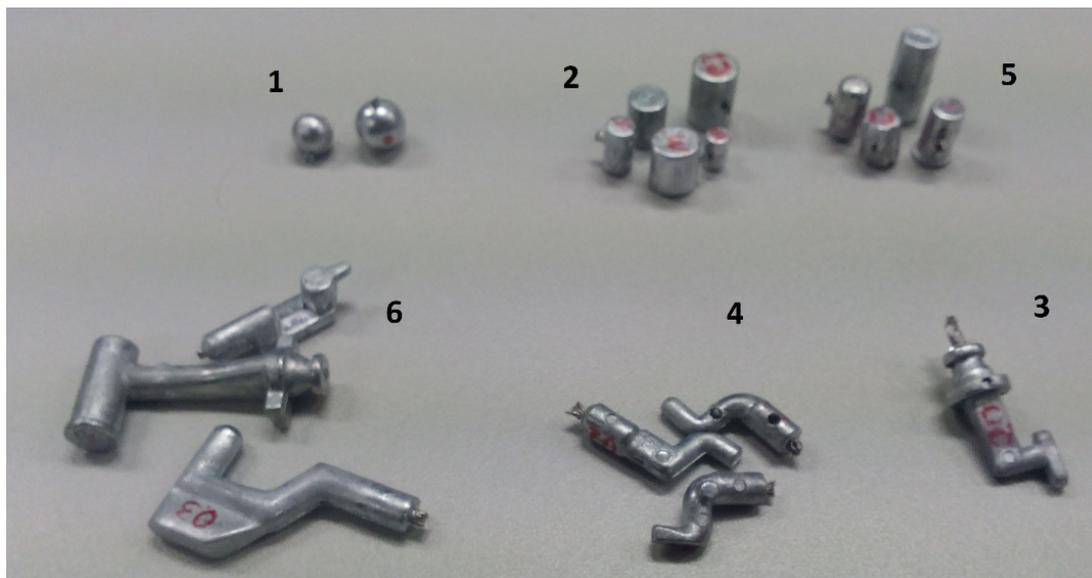


Figura 16 - Diversas configurações de terminais *Zamak*; ((1) Esféricos, (2) Cilíndricos, (3) Formas em L, (4) Manivelas, (5) Cilindros modificados, (6) Configurações especiais)

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do processo de injeção de ligas *Zamak* no fabrico de terminais de cabo [21]

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> Permitir um processo mais rápido e simples 	<ul style="list-style-type: none"> Equipamentos relativamente dispendiosos
<ul style="list-style-type: none"> Maior flexibilidade geométrica 	<ul style="list-style-type: none"> Maiores custos de energia dos equipamentos de injeção relativamente aos restantes
<ul style="list-style-type: none"> Maior resistência à corrosão 	<ul style="list-style-type: none"> Deficiências em movimentos de tração angular, (forças aplicadas que não são coincidentes com a direção do eixo do cabo (anisotropia causada pelo processo)
<ul style="list-style-type: none"> Isenção de operações de prensagem, logo ausência de variações geométricas 	<ul style="list-style-type: none"> Necessidade da flor
<ul style="list-style-type: none"> Baixa dispersão de valores de resistência à tração de uns terminais relativamente aos outros 	
<ul style="list-style-type: none"> Dimensões estáveis 	
<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo de matéria-prima 	
<ul style="list-style-type: none"> Maior produtividade 	

2.2 Zinco e suas Ligas

2.2.1 Introdução

O Zn é um material que se encontra na natureza em pequenas quantidades - 0,0076% da crosta terrestre [22], sob a forma de minerais como a galena, pirita, calcopirite, blenda (ZnS) e calamina (ZnCO₃), tem cor branca e azulada com brilho metálico, forma cristalina hexagonal compacta [23] e propriedades físicas que podem ser consultadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades físicas do Zn [24]

Propriedade	Valor	Unidade	Temperatura definida
Número Atômico	30	--	--
Massa Atômica	65,38	u	--
Densidade	7,13	kg/m ³	25°C
Ponto de Fusão	420	°C	--
Ponto de Ebulição	920	°C	--
Calor Específico	382	J/kg·K	20°C
Calor Latente de Fusão	101	kJ/kg	--
Condutibilidade Térmica	113	W/m·K	25°C
Resistividade Elétrica	58,9	nΩ·m	20°C
Condutibilidade Elétrica (volumétrica)	28	% IACS	--
Estrutura Cristalina	Hexagonal compacta (HC)		

O Zn possui uma baixa resistência mecânica, daí não ser utilizado isoladamente para fins estruturais. No entanto, adicionado a outros elementos, como por exemplo o alumínio, origina ligas com uma resistência mecânica suficientemente elevada, para determinadas aplicações específicas, a um preço razoavelmente baixo e sem perigos para o ambiente [25]. A grande facilidade de combinação que o zinco tem com outros metais, permite o seu uso no fabrico de ligas, nomeadamente latões e bronze (ligas cobre (Cu) - Zn) e as ligas *Zamak* (Zn - Al - magnésio (Mg)) [26]. O seu baixo ponto de fusão, facilita a moldagem em peças injetadas e centrifugadas, e o baixo ponto de ebulição facilita a sua extração e refinação [27]. As propriedades mecânicas do Zn podem ser consultadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do Zn [21]

Propriedade	Valor	Unidades
Densidade (25°C)	7,14	kg/m ³
Densidade em Estado Líquido	6,57	kg/m ³
Tensão de Ruptura (Peças fundidas)	10	kg/mm ²
Tensão de Ruptura (Peças Laminadas)	20	kg/mm ²
Módulo de <i>Young</i>	108	GPa
Coefficiente do <i>Poisson</i>	0,25	

Propriedades Químicas

O zinco arde com facilidade ao ar, é atacado por ácidos e bases e combina-se com a prata. É um redutor enérgico, sendo, no entanto, inalterável ao ar seco.

Em contacto com o ar húmido, o metal recobre-se duma chapa de hidrogenocarbonato, que protege o resto da massa da corrosão [28].

2.2.2 Composição, Classificação e Propriedades das Ligas de Zn

O Zn e as suas ligas são classificados industrialmente em duas categorias:

- Zn e ligas de Zn trabalhadas;
- Ligas de Zn para fundição.

Destaca-se, neste capítulo, as ligas de Zn para fundição.

Ligas de Zn para fundição

São ligas de Zn utilizadas industrialmente para a fundição, nomeadamente na fundição sob pressão, no qual se destaca a gama de ligas denominadas *Zamak*, contando a sua composição com adições de Al, Cu e Mg.

Estas ligas, são as que conferem um maior campo de aplicação entre todas as ligas não ferrosas para aquele tipo de processo, pois possuem boas propriedades físicas, mecânicas e de fundição, aliadas à capacidade de serem facilmente revestidas por eletrodeposição (cobreação, niquelagem, cromagem), ou por pinturas com tintas e vernizes. As ligas *Zamak*, são usadas na indústria da fundição injetada para a produção de grandes séries

de componentes, por possuírem um ponto de fusão relativamente baixo e uma alta fluidez, permitindo vantagens ao nível de custo relativamente a outros processos e materiais [29].

A pureza dos componentes de liga, é o fator determinante da grande estabilidade das características mecânicas e dimensionais das peças fundidas sob pressão em ligas de Zn. O Zn utilizado para a obtenção das ligas *Zamak*, deve ser de elevada pureza (pelo menos 99,99% Zn), devido à corrosão intercrystalina que provocam os elementos constituintes das impurezas. No entanto, a presença de Mg entre 0,02% e 0,06% evita este fenómeno e melhora as suas propriedades mecânicas [30]. As propriedades dos elementos das ligas podem ser consultadas na Tabela 4, e os efeitos das impurezas na Tabela 5.

Tabela 4 - Propriedades dos elementos de liga [28]

Elemento	Vantagens	Desvantagens
Al	<ul style="list-style-type: none"> • Aumenta sensivelmente a resistência à dureza, fluidez. • Diminui a ação corrosiva do Zn. 	<ul style="list-style-type: none"> • Teor > 4,5%, a liga aproxima-se do eutético (5%), reduz a resistência ao choque, torna-se frágil, podendo originar fissuras. • Perde resistência e dureza com teores < 3,5%, também afeta a sua fundibilidade.
Mg	<ul style="list-style-type: none"> • Inibe a corrosão intergranular da liga, ao originar uma redução da diferença de potencial entre o Zn e o eutético, por associação ao eutético de chumbo (Pb), cadmio (Cd) e Zinco (Zn). 	<ul style="list-style-type: none"> • Tende a provocar fragilidade a quente nas peças fundidas, quando os seus teores são > 0,06%.
Cu	<ul style="list-style-type: none"> • Aumenta a resistência à corrosão, a resistência mecânica e a dureza da liga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Teores > 1,25% origina que a liga se torne instável, suscetível de envelhecimento e reduzindo a sua resistência ao choque. • Teores > 0,6% afeta a estabilidade dimensional da peça, provocado por um fenómeno de precipitação.

Tabela 5 - Efeito das impurezas nas ligas de Zn [31]

Elemento	Desvantagens
Chumbo (Pb) Cadmio (Cd) Estanho (Sn)	<ul style="list-style-type: none"> • Originam uma produção de células eletroquímicas ativas, que provocam a corrosão intergranular, devido à maior eletronegatividade do Zn. • Originam um processo de corrosão quando em contacto com superfícies húmidas, iniciando uma reação que evolui para o interior da peça com o tempo.
Ferro (Fe)	<ul style="list-style-type: none"> • Teores > 0,1% provocam envelhecimento da liga, afetando as suas propriedades mecânicas. • Criam compostos intermetálicos Fe-Al (FeAl_3 e Fe_2Al_5), que originam segregações destes compostos, provocando pontos duros nas peças fundidas (devem ser retirados da escória do cadinho).

É no entanto possível obter um metal de elevada qualidade e adequado ao fabrico de ligas para fundição sob pressão, desde que se mantenham estas impurezas dentro dos limites especificados, pelo facto de serem metais de alta densidade e com baixo ponto de fusão, não formando por isso soluções sólidas com o Zn, mas que dão origem à formação de eutéticos com o Zn de muito baixo ponto de fusão.

As peças de Zn fundidas sob pressão, alteram a sua estrutura, começando a contrair-se logo que são retiradas do molde, atingindo dois terços da sua variação dimensional ao fim de 5 semanas. Esta contração não ultrapassa, no entanto, os 0,1%. Para tal, contribui em muito a percentagem de Cu presente na liga. Na Tabela 6 pode obter-se a relação deste elemento nas diferentes ligas [32]. Para aplicações com alta precisão dimensional, é aconselhável a liga Zamak 3, isenta de Cu.

A composição química das diferentes ligas de Zn para fundição pode ser consultada no Anexo 1.

Tabela 6 - Influência do Cu na dimensão das peças obtidas nas ligas *Zamak* 2,3 e 5

Liga	Impureza
<i>Zamak</i> 2	<ul style="list-style-type: none"> • (3% Cu) origina uma contração seguida de uma lenta dilatação, podendo atingir valores de 0,3% em simultâneo com a dilatação. • Diminuição da resiliência. • Liga pode ser estabilizada, devendo ser submetida a um aquecimento de 3 a 6 horas, com um arrefecimento normal ao ar.
<i>Zamak</i> 3	<ul style="list-style-type: none"> • Sem Cu, não tem variação dimensional.
<i>Zamak</i> 5	<ul style="list-style-type: none"> • (1% Cu) Variações muito pequenas à temperatura ambiente.

2.2.3 Diagrama de Fases das Ligas de Zn

No diagrama de equilíbrio Zn-Al (Figura 17), observam-se as transformações físico-químicas presentes na liga. De lembrar que os restantes elementos não possuem teores suficientes para provocar alterações significativas. Constata-se, através da análise do diagrama de fases [33], que:

- À medida que a liga *Zamak* arrefece (hipoeutética), verifica-se a formação de cristais primários de uma fase rica em Zn, Fase (Beta), com 98,86% Zn a 382 °C;
- A 382°C é originado um ponto eutético para 5,1% de Al;
- A uma temperatura inferior a 382°C, a fase (Beta) fica envolta por um eutético, constituído por esta fase e de uma segunda fase, Fase Alfa, que possui 22% de Al e prevalece até à temperatura de 275°C, sofrendo a esta temperatura uma reação eutectoide, transformando-se numa fase beta + alfa. A fase Alfa, é assim uma solução sólida de Zn e Al;
- À temperatura de 382°C, a solubilidade do Al é de 1,14%, sendo que para temperaturas diferentes desta a sua solubilidade diminui no Zn.

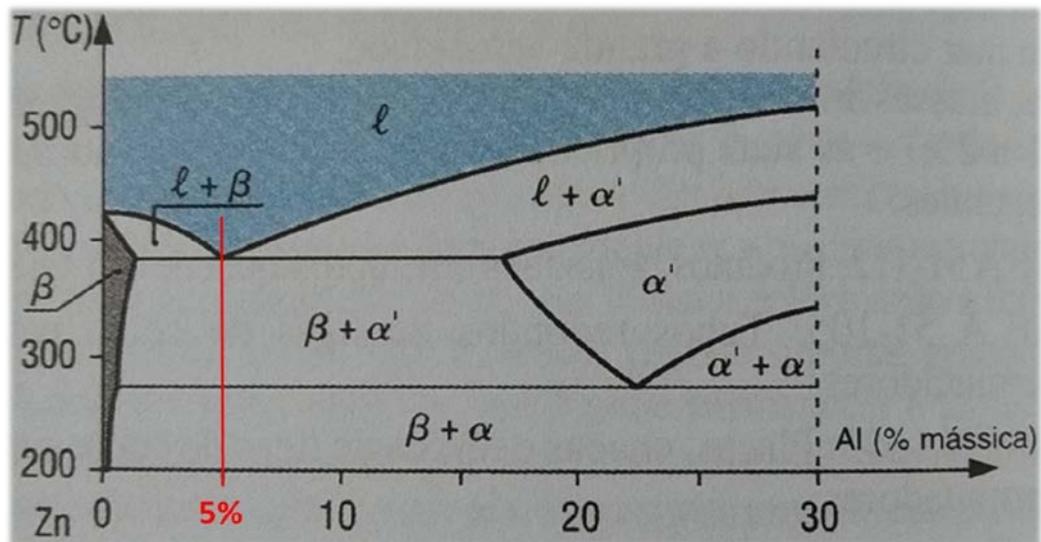


Figura 17 - Diagrama de equilíbrio binário Zn-Al [33]

Em relação às ligas de Zn utilizadas na fundição, as ligas *Zamak* 2, 3, 5 e 7 são baseadas na liga eutética com teores de alumínio perto dos 4,3%, possuindo microestruturas dendríticas e eutéticas, que solidificam em dendrites ricas em Zn. Por sua vez, as ligas que têm por base a liga hipereutética, solidificam em dendrites beta e alfa, denominando-se respectivamente para a primeira, ligas ZA-8, ZA-12, e para a segunda ligas ZA-27 [31].

2.2.4 As Ligas *Zamak*

Ligas *Zamak*, é o acrónimo dado às ligas compostas por Zn, Al, Mg e Cu, sendo na sua maioria compostas por Zn, contendo uma percentagem de Al que ronda normalmente os 4%, e percentagens reduzidas de Mg, que melhora a sua resistência mecânica, protegendo ao mesmo tempo a corrosão intergranular da liga. Estas ligas são todas aplicáveis aos processos de injeção de ciclos contínuos de câmara quente, *Hot Chamber*, permitindo velocidades elevadas de injeções [34].

Existem várias especificações normalizadas que incluem as ligas *Zamak* 2, *Zamak* 3, *Zamak* 5 e *Zamak* 7, onde, em geral, a percentagem de Al não ultrapassa os 4%, e contemplam ainda uma combinação de outros elementos, como o Mg e o Cu, que são adicionados de modo a promover as propriedades mecânicas, fundibilidade e boa estabilidade. Estas ligas são essencialmente aplicadas na fundição sob pressão [35]. Na Tabela 7 são demonstradas as diferentes valias que as ligas *Zamak* apresentam, e na tabela do Anexo 2 é apresentada a importância das diversas características destas ligas.

Tabela 7 - Vantagens e desvantagens das diferentes ligas *Zamak* [34]

Liga	Vantagens	Desvantagens
<i>Zamak 2</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Maior e melhor resistência da liga, devido à maior percentagem de Cu. 	<ul style="list-style-type: none"> • Propriedades de estabilidade dimensionais inferiores, devido à maior percentagem de Cu.
<i>Zamak 3</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Melhor combinação de propriedades mecânicas, de fundibilidade e económicas. • Produção de peças com grande detalhe. • Excelentes acabamentos superficiais, aliados a grandes índices de produção. 	<ul style="list-style-type: none"> • O compromisso entre as diferentes propriedades, implica uma redução na sua resistência mecânica.
<i>Zamak 5</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Maior e melhor resistência mecânica da liga, devido à maior percentagem de Cu. • Maior resistência à fluência 	<ul style="list-style-type: none"> • Propriedades de estabilidade dimensionais inferiores, devido à maior percentagem de Cu. • Menor ductilidade.
<i>Zamak 7</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Melhor fluidez da liga, permitindo a fundição de paredes muito finas 	

No mercado podem ser encontradas as ligas ZA-8, ZA-12 e ZA-27, com percentagens de alumínio superiores a 8%, quer em fundição sob pressão, como em fundição por gravidade [35]. A utilização de ligas *Zamak* no processo de fundição sob pressão, fica assim favorecida devido às seguintes características:

- Baixo Ponto de fusão (380°C), que confere ao molde permanente longevidade, permitindo assim produções em grandes séries de peças fundidas, além de uma elevada precisão dimensional e bom acabamento superficial;
- Grande Fluidez, que permite a obtenção de peças de formato complexo e paredes finas;
- Fácil maquinagem.

No Anexo 3, é possível consultar as propriedades mecânicas das ligas de Zn.

2.3 Fundição

2.3.1 Introdução

Por processo de fundição entende-se como a obtenção de formas geométricas pelo vazamento de metal no estado fundido, para dentro de uma cavidade feita no interior de uma moldação (conjunto de elementos em materiais apropriados que definem o molde), para após a solidificação, se obter a peça moldada [36]. O objetivo deste processo, é pois obter peças com propriedades, forma, dimensões, acabamento e tolerâncias idênticas às definidas na fase de projeto, sendo por vezes necessário, recorrer a operações de acabamento ou tratamento térmico posteriores, quando a qualidade superficial, ou propriedades intrínsecas das peças vazadas, não são suficientes para corresponder às solicitações do projeto [36]. A parte solidificada é assim conhecida como peça fundida, que é extraída do molde. A fundição é mais frequentemente aplicada na produção de peças complexas, que seriam difíceis ou mais dispendiosas de fabricar por outros métodos. A principal vantagem deste processo, é a grande cadência de produção de peças idênticas a custos reduzidos, e com níveis de precisão que não podem ser produzidos por nenhum outro método [37].

2.3.2 Fundição e seus Processos

A fundição, é um processo que vem sendo desenvolvido desde a antiguidade, e diversas técnicas têm sido desenvolvidas ao longo dos tempos. Uma classificação possível de tais processos, pode ter em consideração a natureza dos materiais utilizados no fabrico das moldações (Tabela 8), ou a sua longevidade. Significa isto que, nos processos em que por cada molde se consegue obter apenas uma única peça vazada, ele seja considerado perdido, devido à necessidade de o danificar para extrair a peça. No caso em que a moldação permite vaziar uma série de peças, sem serem alteradas significativamente as características e a forma do molde, como no caso das moldações metálicas, a moldação é considerada permanente [36].

Existem assim diversas técnicas de fundição, sendo que a escolha do melhor processo a utilizar deve ter em conta o tamanho da peça a obter, o acabamento superficial requerido, detalhes geométricos internos e externos, o número de peças a produzir e/ou custos inerentes a todo o ciclo de produção [37]. No entanto, para o nosso caso concreto, o foco de desenvolvimento irá incidir na fundição injetada de ligas *Zamak*.

Tabela 8 - Listagem dos diferentes processos segundo a natureza dos materiais [38]

Processos de moldação perdida / Modelo permanente	
Moldação em areia	Moldação em agregado refratário:
<ul style="list-style-type: none"> • Moldação em areia verde • Moldação em areia seca • Moldação com CO₂ / Silicato • Moldação em “<i>Shell-Moulding</i>” • Moldação em caixa fria • Moldação de selagem por vácuo 	<ul style="list-style-type: none"> • Moldação com cerâmica • Moldação com gesso
Processos com moldação perdida / Modelos perdidos	
<ul style="list-style-type: none"> • Fundição com moldação em areia: <ul style="list-style-type: none"> - Moldação com modelo evaporável, ou cera perdida • Fundição com moldação em agregado refratário: <ul style="list-style-type: none"> - Moldação por modelos perdidos 	
Processos com moldação permanente	
<ul style="list-style-type: none"> • Moldações metálicas: <ul style="list-style-type: none"> - Vazamento por gravidade em moldações metálicas, ou fundição em coquilha; - Vazamento sob pressão em moldação metálica, ou fundição injetada; - Vazamento sob baixa-pressão em moldações metálicas 	<ul style="list-style-type: none"> • Vazamento por centrifugação; • Vazamento em moldações metálicas com pressões contra gravíticas; • Vazamento em moldações metálicas por compressão mecânica; • Vazamento contínuo em moldações metálicas.

2.3.3 A Fundição Injetada

A fundição injetada, é caracterizada por uma fonte de energia hidráulica, que faz deslocar a grande velocidade e pressão, um metal no estado líquido, promovendo um rápido enchimento de um molde metálico. Este molde, absorve as tensões exercidas pela injeção, dissipa o calor contido no metal, e facilita a remoção da peça moldada, iniciando depois um novo ciclo. A energia hidráulica é fornecida por um sistema que permite o controlo da posição do atuador, da velocidade e da aceleração, de modo a otimizar o escoamento do metal, à medida que este vai preenchendo a cavidade do molde e solidificando. A mesma energia hidráulica, origina pressões de injeção que normalmente variam entre os 70 e os 3500 bar, o equivalente a 7 e 350 MPa, respetivamente [39].

O processo físico de injeção, resulta do fluxo de metal líquido para o interior de uma cavidade, eliminação de gases dessa cavidade, reatividade entre o metal fundido e o sistema hidráulico, e perda de calor durante a injeção, originando a possibilidade de trabalhar diversos tipos de ligas, de onde se salientam o Al, Zn, Mg, ligas à base de Cu, e em menor extensão, ligas de Pb, latão e ligas ferrosas [28].

A técnica da fundição por injeção, divide-se em dois processos principais, câmara quente e câmara fria (Figura 18 e Figura 19), cada um com um ciclo de trabalho associado, caracterizando-se pela maneira como o metal é inserido no sistema de alimentação do molde [40]. Estes dois processos principais, são apresentados em detalhe na Tabela 9.

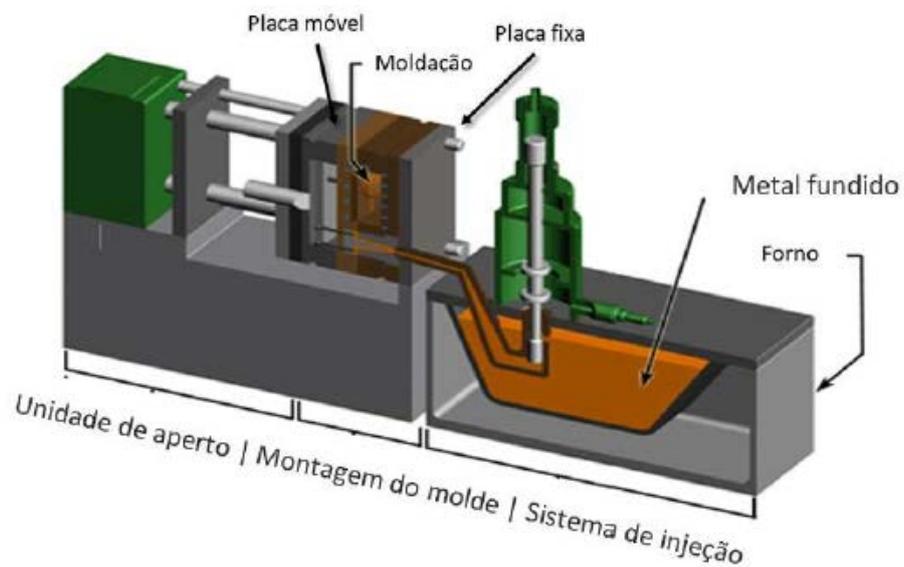


Figura 18 - Processo de câmara quente [39]

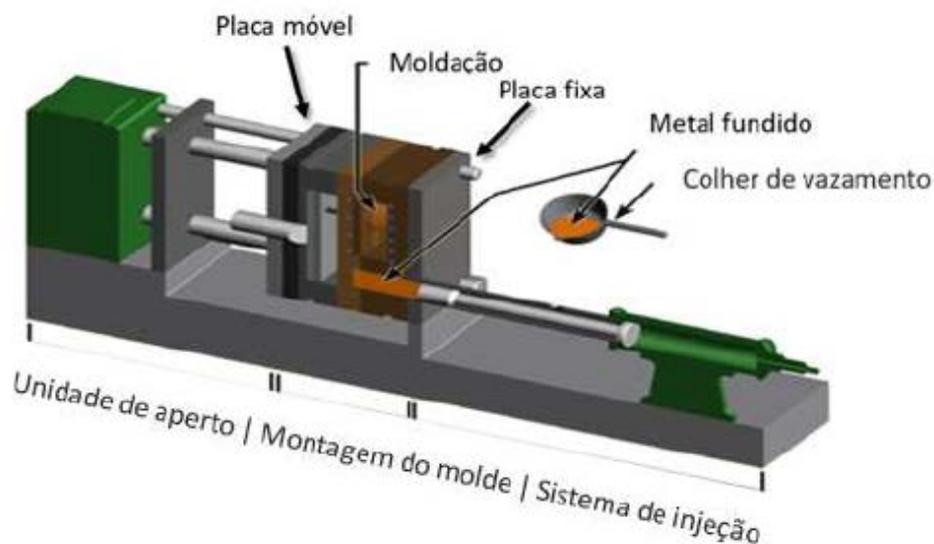


Figura 19 - Processo de câmara fria [39]

Tabela 9 – Descrição e comparação dos principais processos de fundição injetada [28]

Processo	Câmara quente	Câmara fria
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • Materiais de baixo ponto de fusão com temperaturas inferiores a 426°C, (Zn, Pb, latão, Mg); • Largamente aplicado na injeção de ligas de Mg a 648 °C, por este não ter afinidade para dissolver ferro [31]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fundição de ligas de ponto de fusão como Al, Cu e mesmo ligas ferrosas.
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Coloca um atuador hidráulico em contacto direto com o metal fundido; • Câmara de injeção e pistão submersos no metal fundido do cadinho; • Energia para a injeção do metal fornecida por uma bomba hidráulica e armazenada no acumulador que faz movimentar o pistão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Metal fundido é transferido através de uma colher, manual ou automaticamente, para dentro de um orifício de vazamento da camisa onde circula o pistão, dando origem à injeção do metal na cavidade moldante.
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Minimiza a exposição da liga líquida à turbulência, oxidação pelo ar e perdas de calor durante a transferência de energia hidráulica 	<ul style="list-style-type: none"> • Exposição do atuador ao contacto das altas temperaturas apenas por alguns segundos, devido à separação do reservatório de metal fundido do atuador, em grande parte do ciclo produtivo.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Contacto prolongado entre o metal fundido e os componentes do sistema, origina problemas dos materiais no processo produtivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • O procedimento acrescenta ainda tempo a cada ciclo, apesar da transferência automática; • Metal líquido tem de ser mantido a pelo menos 10°C acima da temperatura de injeção desejada, devido ao compromisso térmico que ocorre quando a coluna de metal é vertida ao ar [34].

Apesar da fundição sob pressão ter uma velocidade consideravelmente maior que outros processos, a sua otimização tem sido negligenciada, maioritariamente, devido à complexidade do processo e do número de variáveis que necessitam ser controladas, nomeadamente, o controlo da temperatura do molde, solidificação dos componentes, controlo de qualidade das moldações, e mais importante que isso, o desenvolvimento ou uso de um sistema integrado e coerente, capaz de lidar com a complexidade do processo [41].

Ciclo de Injeção

Nos quadros das Tabelas 10, 11 e 12 é realizada a descrição do ciclo de injeção comum a ambos os processos descritos.

Tabela 10 - Primeira fase do ciclo de injeção [28]

1ª Fase	
Início	<ul style="list-style-type: none"> Na descida do pistão, após a lubrificação e fecho da cavidade do molde, quando o metal se encontra à entrada da cavidade deste último.
Fim	<ul style="list-style-type: none"> Na chegada do metal à câmara, momentos antes do início de enchimento da cavidade.
Características	<ul style="list-style-type: none"> Aconselhável a seleção da menor velocidade possível do pistão, para minimizar as perdas de pressão (por atrito ou turbulência), e evitar que o metal se separe das paredes do molde, originando retenção de ar. Ter em atenção os fenómenos físicos: <ul style="list-style-type: none"> - Perda de pressão, resultante da energia que se opõe ao fluxo e à turbulência desenvolvida; - Velocidade, quanto menor, menores as perdas de pressão, que induzem inclusões de ar pelo desprendimento do metal com as paredes do molde.

Tabela 11 - Segunda fase do ciclo de injeção [28]

2ª Fase	
Início	<ul style="list-style-type: none"> Quando o metal se encontra à entrada da cavidade do molde
Fim	<ul style="list-style-type: none"> Quando a cavidade do molde se encontra totalmente preenchida
Características	<ul style="list-style-type: none"> Velocidade do pistão aumenta, de modo a preencher a cavidade do molde o mais rápido possível; Velocidade do metal fluido na entrada da cavidade, maior que a velocidade do pistão, devido às diferenças das secções dos gitos e do pistão; Tempo necessário para a execução deste processo, deve estar de acordo com o recomendado pelos <i>designers</i> do molde.

Tabela 12 - Final do processo do ciclo de injeção [28]

Fim do processo	
Características	<ul style="list-style-type: none"> Deve ser mantida a pressão no pistão, de modo a neutralizar a contração a que o material está sujeito durante a solidificação; Obtém-se o tempo de compressão final, somando o tempo de descida do pistão (primeira e segunda fase) ao tempo de permanência na posição de pressão sobre o metal, devendo permanecer nesse ponto, no mínimo, meio segundo.

As máquinas injetoras, por si só, não garantem a qualidade das peças produzidas. É, por isso, necessário ajustar inicialmente os parâmetros da máquina, para que a qualidade das

peças extraídas sejam conformes, regulando seguidamente o ciclo para a produção pretendida.

Arrefecimento

O arrefecimento tem início, exatamente no momento em que a injeção de metal líquido para o interior da cavidade do molde finaliza e começa a arrefecer, sendo a sua principal característica o controle de temperatura no interior do molde, como meio de regular o arrefecimento. Existem, no entanto, outros fatores indiretos que influenciam o processo, tais como as temperaturas, tanto do molde como da peça, assim, como velocidade e tempos de abertura do molde, tempo de arrefecimento e de extração da peça, e taxa de produção. Estes fatores, influenciam de um modo significativo todo o processo de arrefecimento. Também a ejeção da peça, que é facilitada pela aplicação de um lubrificante na cavidade ainda antes do seu fecho, origina um meio indireto de arrefecimento, que pode influenciar a temperatura do molde [34] [42].

O ciclo de arrefecimento envolve assim seis pontos principais a ter em conta:

- Controlo da temperatura do molde;
- Velocidade de fecho do molde;
- Período de arrefecimento;
- Velocidade de abertura do molde;
- Retardo no avanço dos extratores;
- Tempo de abertura do molde.

2.3.4 Defeitos do Processo de Fundição

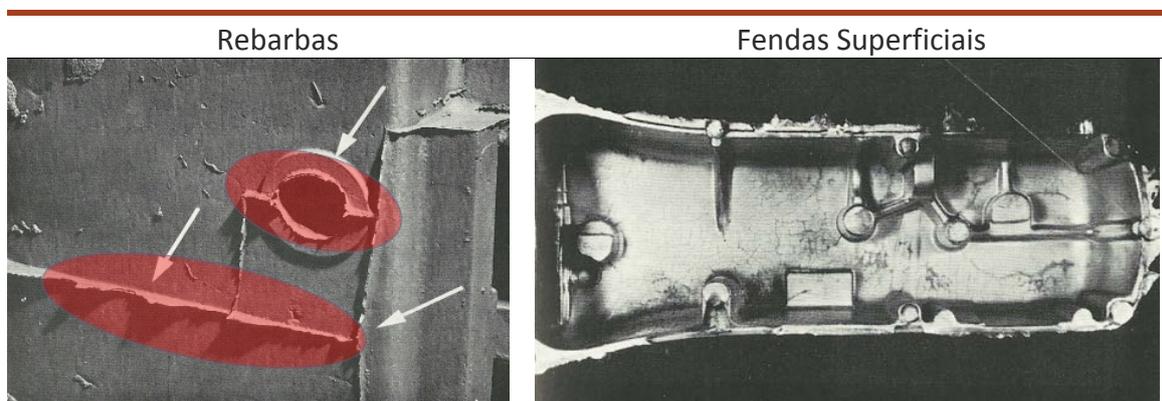
Os processos de fundição, trazem consigo associados um conjunto de defeitos, que podem ter origem nas mais diversas fases, sejam elas de projeto ou de produção, podendo estar intimamente ligadas a uma má avaliação durante a fase de conceção, definição dos parâmetros das máquinas, ou negligência durante a produção. Uma peça fundida, pode pois apresentar um leque variado de imperfeições com origem em diferentes causas [43]. No entanto, na fundição injetada, um dos defeitos mais comum é a porosidade, que origina problemas de vazamentos, defeitos superficiais e problemas de maquinagem. A porosidade na fundição sob pressão é usualmente classificada como porosidade gasosa, rechupes, ou porosidade de fluxo, todas elas relacionadas intrinsecamente com problemas do processo [44]. Mudanças rápidas na temperatura da superfície do molde, e a sua distribuição desuniforme, pode ser a causa para rachaduras térmicas, aderências e distorções térmicas do molde, assim como laminações, dimensões incorretas, rechupes e outros defeitos na peça fundida [45].

As imperfeições na fundição variam entre si, consoante o processo utilizado, seja ele areia, injeção, cera perdida, etc. Neste capítulo, faz-se referência essencialmente aos defeitos típicos da fundição injetada, que é o motivo desta dissertação, com uma descrição da sua característica, causas da ocorrência e soluções aplicáveis. Nas Tabelas 13, 14, 15, 16 e 17, encontram-se representados os diferentes defeitos que as peças podem apresentar. Uma consulta mais pormenorizada destes defeitos pode ser efetuada no Anexo 4, se necessário.

Peças obtidas pelo processo de fundição injetada, podem assim apresentar os seguintes defeitos (de acordo com o livro *International Atlas of Casting Defects* [43]):

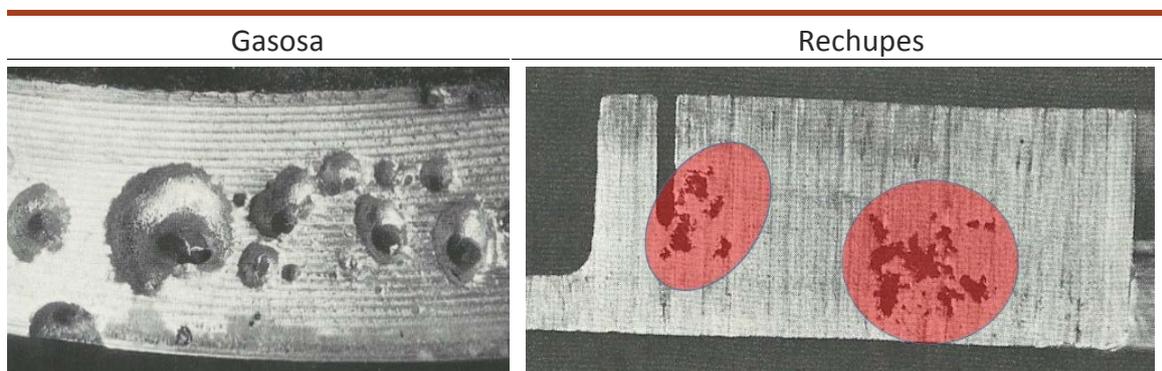
- Protuberâncias metálicas

Tabela 13 – Identificação visual de defeitos de protuberâncias metálicas



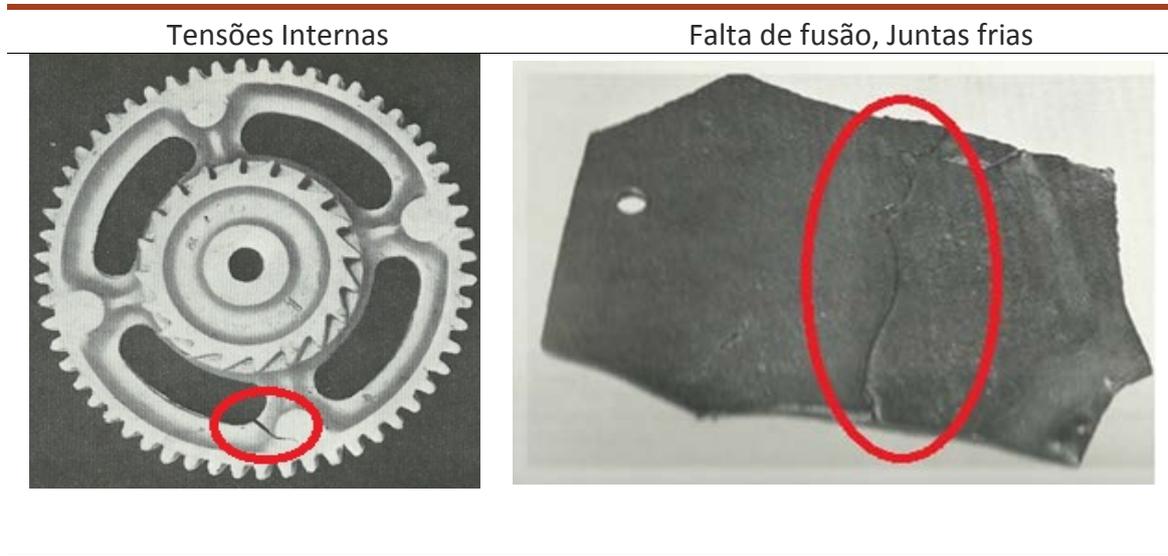
- Porosidades ou cavidades

Tabela 14 – Identificação visual de defeitos de porosidades e cavidades



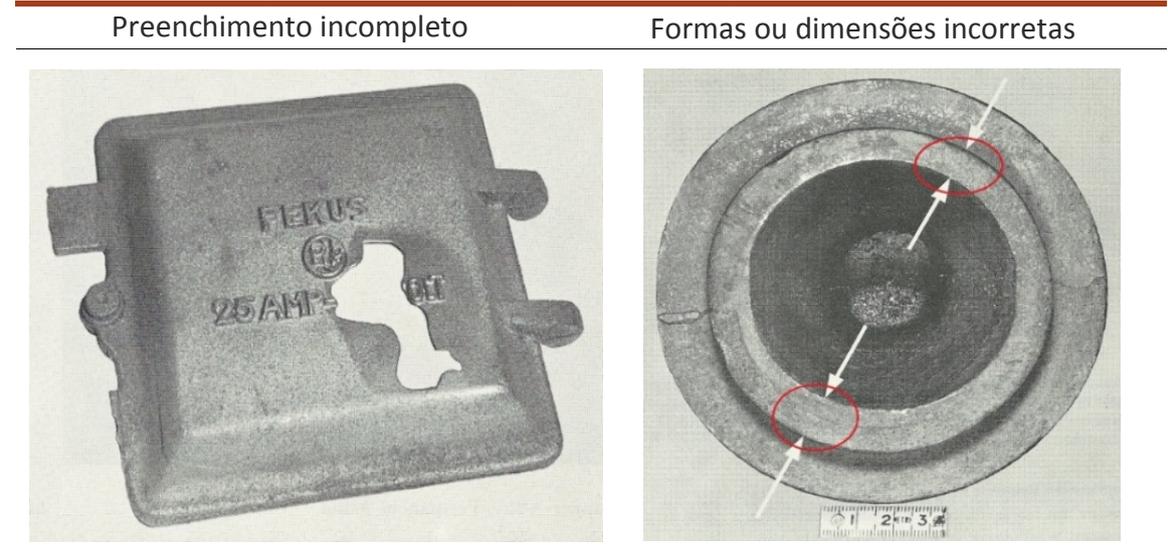
- Descontinuidades

Tabela 15 - Identificação visual de defeitos de descontinuidades



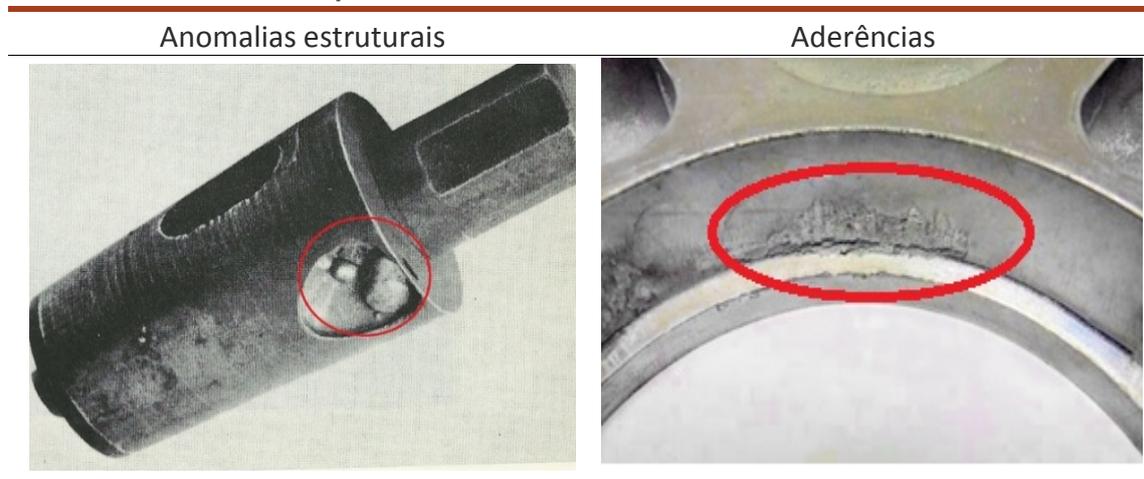
- Preenchimento incompleto e formas ou dimensões incorretas

Tabela 16 - Identificação visual de defeitos de preenchimento incompleto e formas ou dimensões incorretas



- Anomalias estruturais ou inclusões e aderências

Tabela 17 - Identificação visual de defeitos de anomalias estruturais ou inclusões e aderência



2.4 Aplicações Informáticas de Auxílio à Otimização de Processos de Fundição

A necessidade cada vez maior de produção de peças fundidas de elevada qualidade, com maior precisão dimensional, melhor acabamento superficial e integridade metalúrgica, levou ao desenvolvimento de procedimentos, de modo a eliminar potenciais defeitos de processo e seleção de parâmetros [46]. Um desses procedimentos, baseia-se em análises prévias de simulações elaboradas em plataformas digitais, e utilizando programas de simulação numérica, tornando possível a definição dos parâmetros necessários a ter em conta quando da implementação do processo [47]. Este avanço, permitiu reduzir a janela de tempo, que vai desde o desenvolvimento ao início da produção propriamente dita, bem como a redução de custos inerentes a todo o processo preliminar, que inclui associado o estudo e produção dos moldes, e a calibragem dos parâmetros das máquinas de injeção.

A indústria digital, tem vindo a produzir *software* de desenho CAD, e simuladores numéricos FEM/CFD para a indústria da fundição, trazendo valor acrescentado a esta última. É no entanto necessário, um profundo conhecimento dos programas utilizados, e da aplicação correta dos valores das propriedades do material e das condições de fronteira, assim como do equipamento, para que uma *performance* total possa ser alcançada, e uma análise concreta possa ser realizada [48].

O processo analítico de uma simulação, tem início na execução de um desenho 3D com todas as características definidas (incluindo sistema de fixação e pontos de injeção), e posterior simulação no respetivo programa de elementos finitos, onde irão ser definidas

as propriedades inerentes ao processo, destacando-se entre outras: o tempo de enchimento, velocidade de injeção do metal fundido, coeficientes de transferência de calor dos materiais e característica das malhas.

A execução da simulação, é realizada após a inserção das variáveis (iguais às aplicadas nas máquinas de injeção), devendo ser repetida as vezes que forem necessárias (inclusive, alterações ao desenho), para encontrar o compromisso ideal entre as propriedades e a localização dos componentes no molde, tais como bicos de ataque, sistemas de extração de ar, etc., de modo a obter a melhor aproximação possível ao modelo ideal, passando depois para a construção do molde físico propriamente dito [34].

Métodos Numéricos na Indústria de Fundição

Os programas de simulação numérica utilizados na indústria da fundição têm a sua base em dois métodos fundamentais: métodos de diferenças finitas e métodos de elementos finitos (FEM). Ambos os métodos são utilizados para numericamente resolver as equações diferenciais que descrevem os fenômenos físicos, incluindo, a transferência de calor, escoamento de fluidos, tensões, deslocamentos, distorções, etc. Ambas as técnicas, requerem uma análise do domínio espacial do objeto numa grelha ou nós, aplicando depois as técnicas de análise (Figura 21).

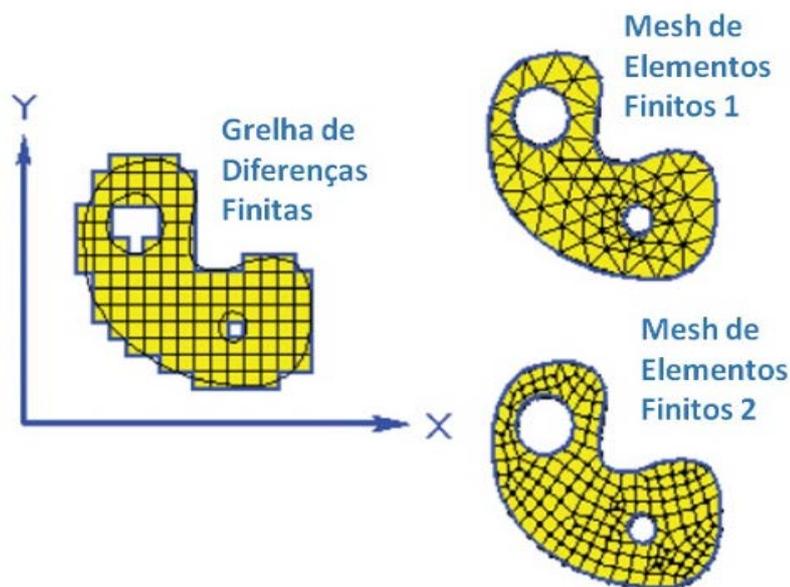


Figura 21 - Diferença entre as *mesh* de elementos finitos e diferenças finitas [35]

Os métodos de diferenças finitas, utilizam uma grelha de pontos quase uniforme, e as derivadas presentes nas equações diferenciais, são aproximadas por diferenças construídas, usando pontos da vizinhança. O problema é assim reduzido a um conjunto de equações simultâneas, que são resolvidas iterativamente. Devido à uniformidade da

malha, as grelhas das diferenças finitas podem não seguir perfeitamente a superfície do objeto, podendo ter uma aparência tipo escada.

Os métodos de elementos finitos, também descrevem o espaço numa grelha, mas não necessariamente numa maneira uniforme. Em vez disso, o domínio espacial da análise é decomposto em elementos discretos, normalmente poliedros com seis lados retangulares e oito nós laterais, ou quatro lados triangulares (elementos *brick*) e quatro nós laterais (elementos tetraedros) denominados *mesh*. As *mesh* dos elementos finitos, originam excelentes superfícies fiáveis, que geralmente contêm números mais pequenos de nós do que o método de diferenças finitas para um determinado problema [49].

Pelo princípio, ambas as técnicas podem ser utilizadas para resolver as equações diferenciais de qualquer problema comum de engenharia, embora as diferenças finitas sejam mais a opção da dinâmica de fluidos, e elementos finitos, das tensões e deflexões. Ambos os métodos têm boas *performances* na análise do fluxo de calor. Para ambos os tipos de sistemas, pode existir um vasto número de diferenças na implementação de uma solução particular [35].

A qualidade da solução, depende mais da qualidade da implementação do que propriamente do método, pelo que é importante, quando da inserção das variáveis de análise para simulação, ter um correto número de elementos de malha, de acordo com as características de processamento da máquina utilizada, com o risco de obtenção de resultados pouco fiáveis, caso o número de elementos seja demasiado pequeno. Considera-se, no entanto, que a zona mais estreita de uma peça deve, pelo menos, comportar duas malhas. A título de exemplo, apresenta-se um estudo (Figura 22) realizado pelo método de diferenças finitas elaborado na Universidade do Minho, onde o tamanho da célula foi fixado em 1,4 mm, perfazendo um total de 15 461 436 células [50].

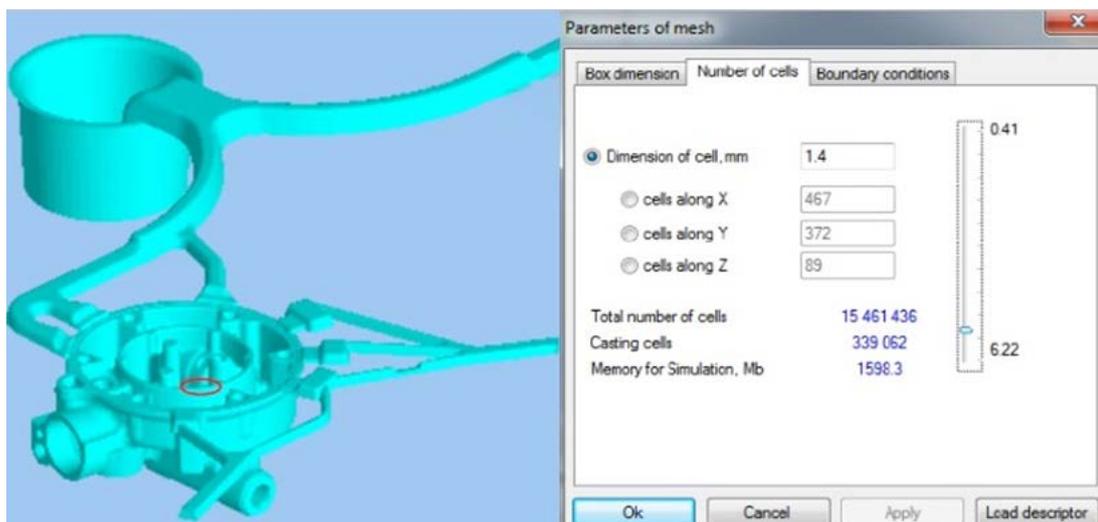


Figura 22 - Modelo de malha utilizada em um estudo elaborado por João Ferreira na Universidade do Minho [50]

Soluções Informáticas Existentes no Mercado

Existem hoje em dia no mercado, soluções informáticas com uma enorme credibilidade para a indústria da fundição, e apoiadas pelas próprias instituições que a normaliza destacam-se o *software* MAGMA® pertencente à empresa alemã Magmasoft, PROCAST® e QUICKCAST® da francesa ESI Software, e o FLOW3DCast® da norte americana FlowScience. Estes, são considerados a linha da frente do *software* para a indústria da fundição, e utilizam o método de elementos finitos (FEM) para a resolução numérica. O emprego destes programas, necessita de um vasto conhecimento da indústria em questão, bem como do próprio *software*, para que uma boa análise dos resultados seja realizada. No entanto, outras soluções existem no mercado, como é o caso do SOLIDCAST® e do FLOWCAST® da Finite Elements Solutions, empregando o primeiro o método de diferenças finitas na resolução numérica, e o segundo a equação de fluidos de *Navier-Stokes*, também conhecida como (CFD) [47]. São dois programas com uma maior facilidade de compreensão e ótimos para estudos académicos, nomeadamente na área da fundição em areia, podendo também ser aplicados na fundição injetada, com o inconveniente de um aumento do erro dos resultados obtidos, em comparação com os programas previamente mencionados.

DESENVOLVIMENTO

3.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE INJEÇÃO

3.4 ZAMAK E PROCESSO DE UTILIZAÇÃO E APLICAÇÃO NO
FABRICO DE TERMINAIS

3.5 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

3.6 TEMPESTADE DE IDEIAS (DIAGRAMA P; DIAGRAMA
ISHIKAWA)

3.7 ESTUDO ANALÍTICO DO PROCESSO DE INJEÇÃO

3.8 EXPRESSÕES ENVOLVIDAS NO PROCESSO

3.9 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

3.10 FASE PRELIMINAR DE ESTUDO

3.11 IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS

3.12 ANÁLISE CRÍTICA GLOBAL

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Objetivos do Trabalho Prático

O trabalho elaborado teve como objetivo realizar o estudo do comportamento das ligas *Zamak* no processo de fundição injetada, e também, otimizar o processo utilizado em função dos parâmetros requeridos.

Para tal ter sido possível, todos os fenômenos físicos envolvidos no processo tiveram de ser estudados, o que levou a um estudo aprofundado dos mesmos, com principal destaque para a área dos moldes, onde estes fenômenos se intensificam. O estudo, visa também o recurso a tecnologias recentes, como lupa eletrônica e *software* de elementos finitos, tentando fugir ao tradicional melhoramento empírico.

Tendo como princípio três peças problemáticas ao nível da sua produção, onde os defeitos de fundição eram considerados graves, o estudo desenvolveu-se em torno desses elementos, criando analogias e premissas comuns, de modo a serem aplicadas a todos os elementos que se queiram produzir futuramente, dentro daquele processo.

O trabalho, teve também como objetivo desenvolver e apresentar opções de melhorias à produção atual, de forma a manter ou aumentar a cadência desta, com o mínimo de peças rejeitadas, e custos reduzidos. Na Figura 23, podemos visualizar o desenvolvimento do estudo, e suas respectivas fases.



Figura 23 – Desenvolvimento das diferentes fases do estudo

3.2 Caracterização da Empresa

A empresa Ficocables, Lda. é uma empresa que atua no setor do ramo automóvel, pertencente à multinacional espanhola do mesmo setor, Ficosa International S.A., sendo a sua área de negócio o fabrico de sistemas de conforto, e cabos de comando para portas, acentos, malas, depósitos de combustível, etc.

Com atividade iniciada em 1971 num pequeno espaço em Vila Nova de Gaia, ainda com o nome de Teledinâmica, e gerida pelo engenheiro Franco Dias, contava nessa altura com apenas três funcionários. O passo para o crescimento é dado em 1972, quando a então Teledinâmica se associa à firma espanhola *Pujol y Tarrago*, então detentora maioritária do grupo Ficosa International, tendo sido esta a primeira aquisição europeia deste grupo. Fruto desta parceria, em 1980, dá-se a expansão do negócio, como o início da exportação de componentes para a italiana Fiat e outros construtores de automóveis europeus.

Com o aumento do volume de negócios, dá-se a expansão das infraestruturas e, em 1982, a empresa muda-se para as atuais instalações em Vermoim, Maia. Em 1993 a empresa muda a designação para a atual Ficocables, Lda. O fruto da sua contínua expansão tem dado origem ao contínuo aumento da sua área fabril, contando hoje com mais de 1000 colaboradores e diversas unidades subcontratadas espalhadas pelo distrito.

3.3 Caracterização do Equipamento de Injeção

O equipamento de injeção é constituído por uma máquina denominada de máquina de injeção, comumente designada por máquina de *Zamak*, sendo constituída por diferentes componentes, mecânicos, elétricos e pneumáticos, com o objetivo final de obter peças fundidas por injeção.

3.3.1 Máquina de *Zamak*

A máquina de *Zamak* (Figura 24) tem por função controlar todo o processo inerente à injeção de moldes e obtenção de peças fundidas. As máquinas *Zamak* dividem-se em três categorias, que se destacam entre si pelo nível de sofisticação e complexidade do ciclo de operação que cada uma comporta. Tem-se, assim:

- Máquinas de comando manual;
- Semi-automáticas;
- Automáticas.

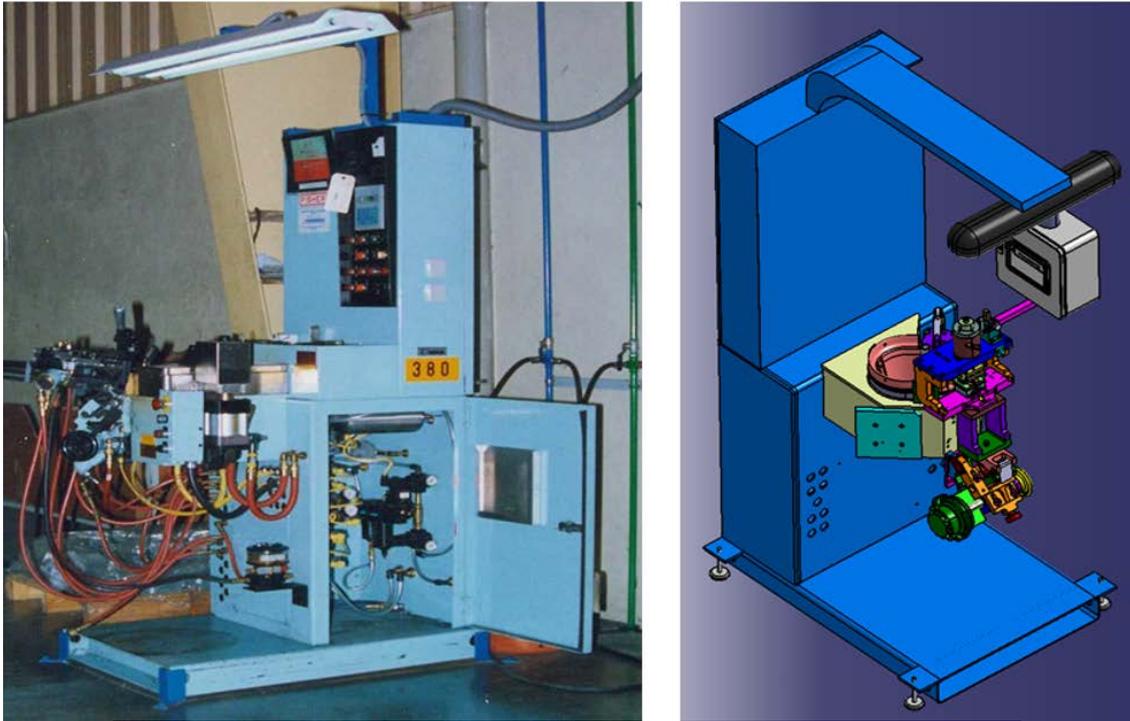


Figura 24 - Exemplo de máquinas de injeção de *Zamak* [21]

As funções como a abertura e fecho do molde, controlo do comprimento do cabo de aço, criação de flor no seu terminal, e posicionamento deste no molde, são exemplos de desenvolvimentos que as máquinas podem conter. No entanto, a sua génese primária é a injeção de metal fundido, sendo para isso, constituída pelos grupos de sistemas necessários (Figura 26), e sincronizados por intermédio de um autómato programável.

Máquinas de comando manual

É a designação dada às máquinas, onde é necessário um operador para efetuar determinadas tarefas do ciclo de produção. Este, acumula funções como efetuar a flor no terminal do cabo de aço, posicionar este no interior do molde, fecho do molde e abertura e extração do cabo com a peça já solidificada, sendo as funções de avanço e recuo do cabeçote e injeção de *Zamak*, efetuadas automaticamente pela própria máquina após o fecho manual do molde (Figura 25). A Ficocables possui vários equipamentos desta natureza.

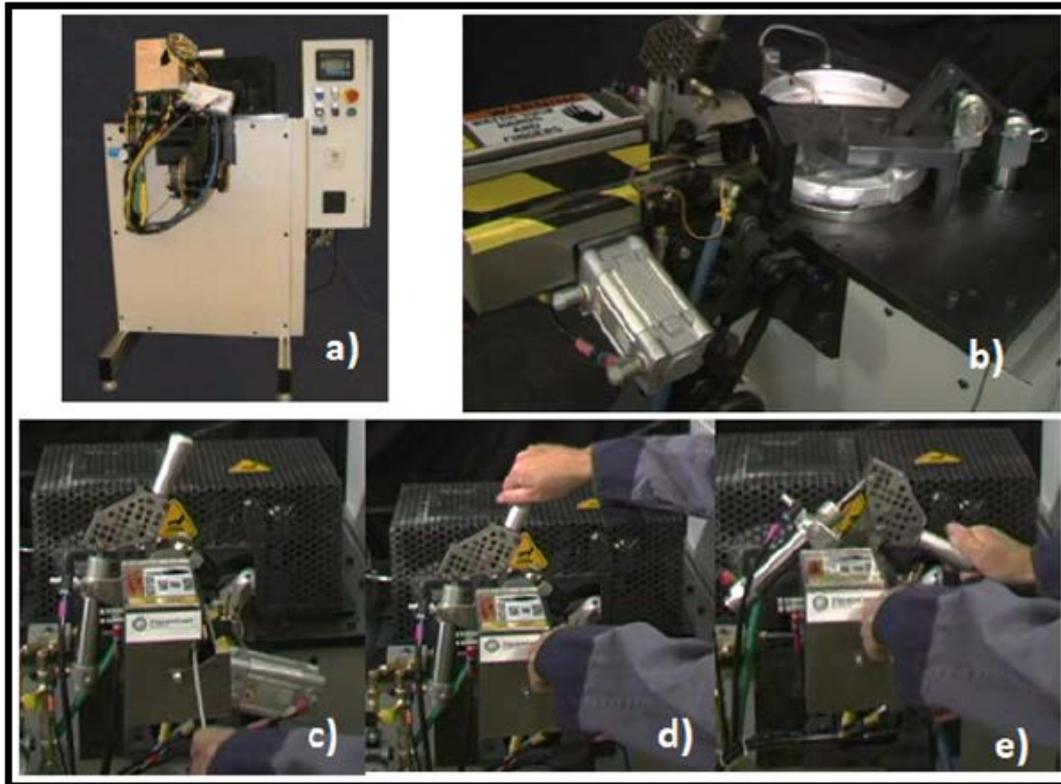


Figura 25 - Máquina de Injeção de comando manual [14]

Máquinas Semi-automáticas

As máquinas semi-automáticas, são máquinas que por intermédio de um autómato programável, comandam todo o ciclo de operações, cabendo ao operador apenas uma tarefa, o acionamento, que é efetuado no posto de fazer a flor, no momento em que o cabo (cortado previamente à medida e transportado para o local), é introduzido num orifício para o efeito. Estas unidades, controlam automaticamente não só o grupo de injeção, mas também a abertura e fecho do molde, transferência e posicionamento do cabo para o interior do molde, ejeção da peça moldada, e transferência do cabo para o mecanismo de corte de gito. Esta operação, aciona assim automaticamente todo o ciclo de fabrico, até à extração da peça final com o gito já cortado, sendo todos os parâmetros necessários ao processo, inseridos e monitorizados através do painel de controlo da máquina.

Este tipo de equipamento, conta então com um conjunto de grupos principais (Figura 26) e uma zona de trabalho específica (Figura 27).



Figura 27 - Principais elementos de uma máquina semi-automática



Figura 26 - Zona de trabalho de uma máquina semi-automática

Máquinas Automáticas

As máquinas de injeção automáticas, são máquinas que aparecem no seguimento das máquinas semi-automáticas, distinguem-se das anteriores pelo facto de controlarem todo o ciclo produtivo, não necessitando de nenhum operador para dar início ao mesmo. O operador, apenas tem por função monitorizar o funcionamento da máquina através do painel de controlo e o estado da matéria-prima (*Zamak* e cabo de aço), pelo que pode monitorizar diversos equipamentos ao mesmo tempo, intervindo apenas em caso de necessidade de abastecimento de matéria-prima, ou de alguma avaria que uma das máquinas indique.

A principal evolução destes equipamentos, relativamente aos anteriores, incide no transporte de cabo para o posto de fazer a flor, e corte do mesmo. Para o efeito, são desenvolvidos mecanismos apropriados, onde bobinas de cabo de aço são colocadas em suportes denominados desenroladores, e onde, juntamente com outros sistemas, dão origem ao posto de alimentação e corte de cabo (Figura 28 e Figura 29).



Figura 28 - Desenrolador de fio [14]

Como já mencionado, as máquinas de injeção são adaptadas e desenvolvidas em função da área onde operam. A alteração da máquina e o nível de automatização pretendido, dependem quase sempre da empresa e do seu sistema implementado, sendo que muitas vezes, as alterações destas são efetuadas pelo próprio cliente/utilizador das mesmas.

Referente à injeção propriamente dita, e de todos os sistemas referidos, os mais importantes para o desenvolvimento deste estudo serão descritos nos subcapítulos seguintes, de modo a ter uma visão global sobre o seu funcionamento e do seu impacto no produto final.

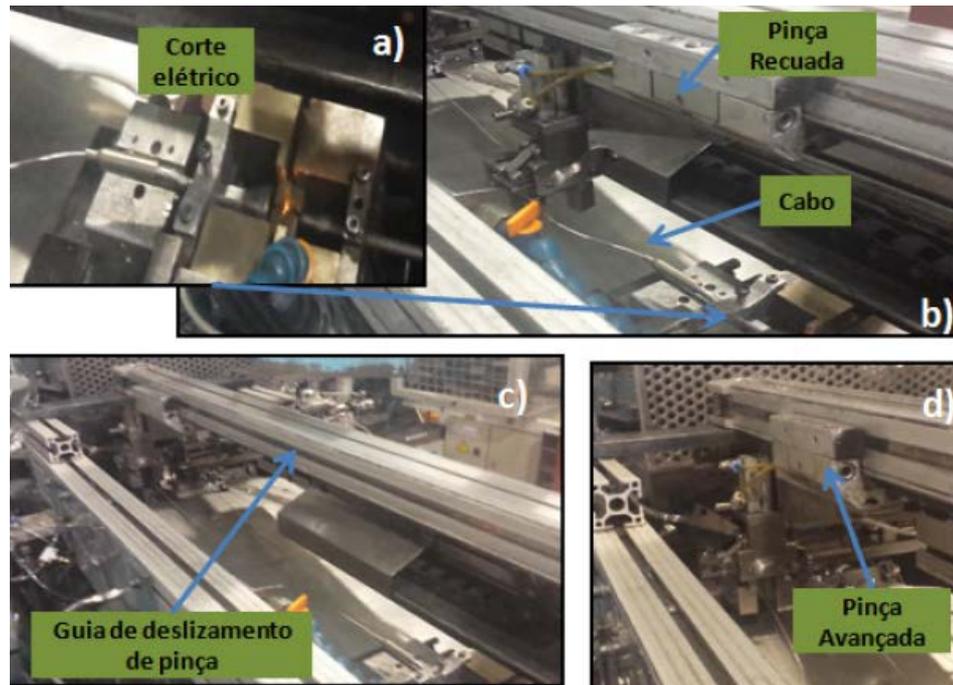


Figura 29 - Sistema de alimentação de cabo; a) Sistema de tração de cabo, b) Sistema de corte de cabo, c e d) Pinça de transporte de cabo [14]

Cadinho

O cadinho, designado também por panela (Figura 30), é um recipiente de aço onde se encontra a liga no seu estado fundido, e onde esta permanece a uma temperatura de operação constante (cerca de 430°C para o presente efeito).

O conjunto do cadinho, é formado por uma construção que contém todo um sistema de elementos individuais, conjunto da panela (Figura 30), e onde uma resistência ou conjunto de resistências de 3500 Watt, aquece, e mantém a liga fundida à temperatura de operação durante a produção. Este componente, por sua vez, trabalha intimamente ligado a um conjunto termopar (transdutor que mede a temperatura do metal fundido, e que se encontra ligado a um controlador de temperatura, por intermédio de um conector *plug*), e instalado na parte traseira do cadinho, imerso na liga fundida, através de um tubo protetor de aço, que também o fixa aquele conjunto. O cadinho, tem assim as funções de reter e aquecer a liga no seu estado de trabalho, e servir de suporte para a bomba de injeção que trabalha no seu interior, fixada a um componente estrutural acoplado à panela, denominado cruzeta.

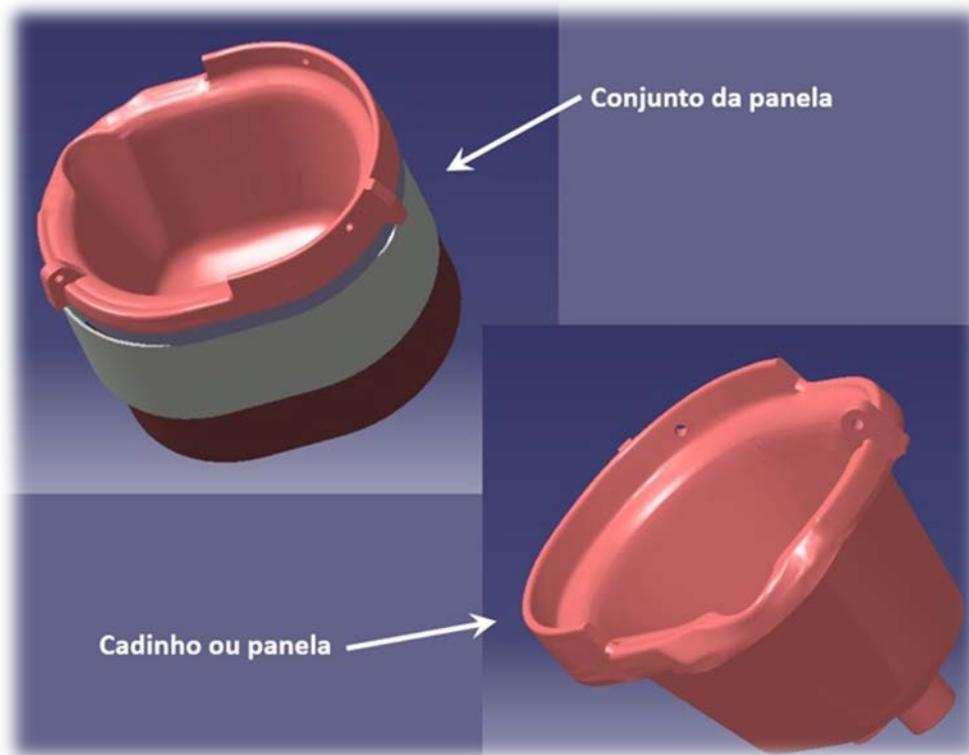


Figura 30 - Conjunto da panela e cadinho

Bomba de Injeção “Gooseneck”

A bomba de injeção (Figura 31) faz parte do sistema de injeção, podendo considerar-se como um dos principais componentes de toda a máquina, pois é através dela que o metal fundido é comprimido e injetado nas cavidades do molde. A bomba de injeção, é assim uma unidade construída em aço fundido, posicionada no interior do cadinho, e mergulhada na liga fundida, sendo fixada por aparafusamento, a uma estrutura denominada “cruzeta” (Figura 32).

O conjunto deste componente, conta com uma câmara de injeção, composta por uma camisa de injeção, com 25 mm de diâmetro interno e 75 mm de comprimento, que é cuidadosamente maquinada para uma tolerância concordante com um êmbolo de um pistão, que percorre o seu interior (Figura 33), de forma a assegurar que esta unidade consegue desenvolver uma pressão na liga adequada, durante todo o seu ciclo de operação.

Na parte traseira da câmara, encontra-se um orifício maquinado, que tem por objetivo deixar fluir o metal para dentro da cavidade, promovendo o seu preenchimento quando o êmbolo se encontra posicionado no seu ponto recolhido, sendo o metal fundido posteriormente injetado, quando o pistão é acionado e movimentado progressivamente até ao ponto parametrizado.

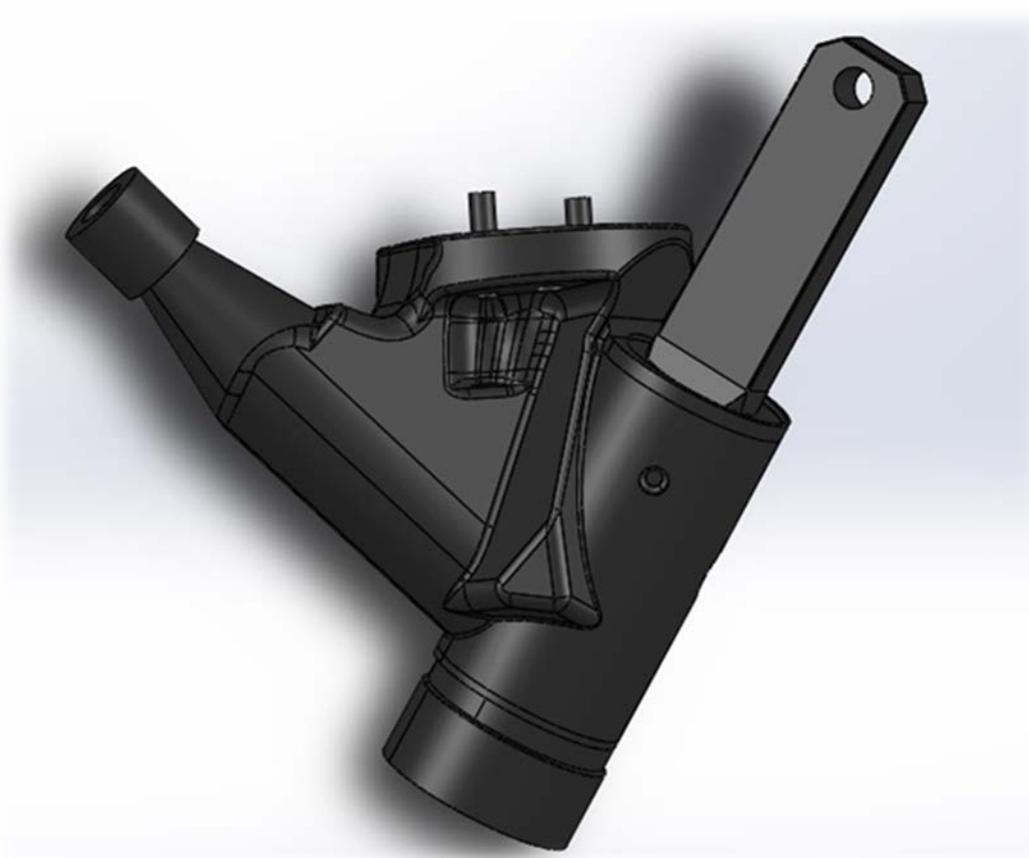


Figura 31 - Bomba de injeção

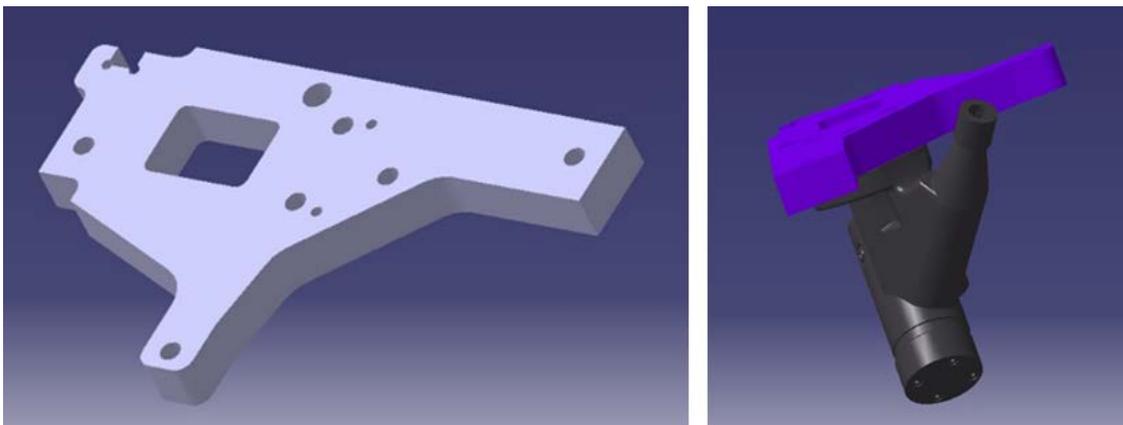


Figura 32 - Vista da cruzeta, com vista da bomba aplicada à cruzeta

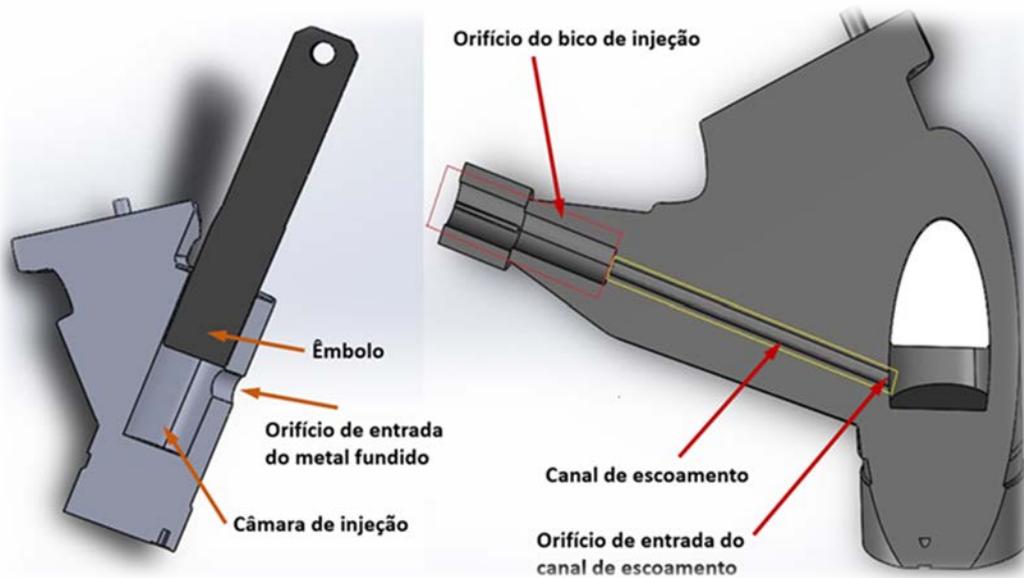


Figura 33 - Vista de corte dos componentes funcionais de uma bomba de injeção e respetivo êmbolo

O posicionamento do êmbolo no interior da bomba, é da maior importância, devendo ser garantido o seu correto alinhamento, o que acontece quando o seu topo inferior fica alinhado com o topo superior do canal que abastece a câmara de injeção da bomba (Figura 34) [16]. Assim:

- Se o pistão se encontrar abaixo do canal de abastecimento, obstrui a passagem do metal fundido, resultando em falhas de injeção;
- Se o pistão se encontrar muito acima do canal de abastecimento, irão ocorrer tempos de injeção, obtendo-se desnecessariamente ciclos operatórios mais prolongados.

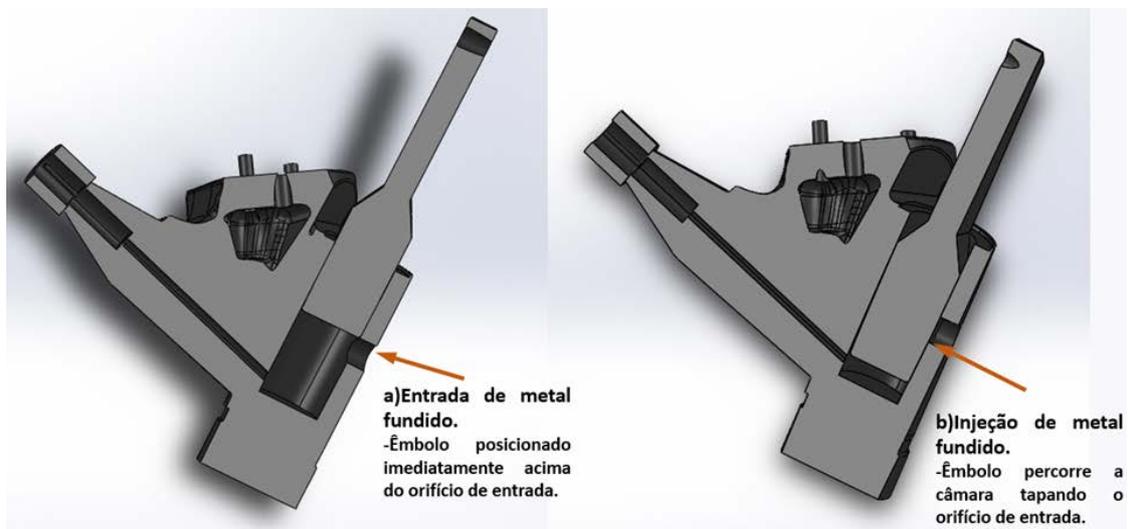


Figura 34 - Funcionamento do êmbolo na câmara da bomba

Um correto alinhamento do pistão com a camisa da bomba de injeção é essencial, de modo a obter:

- Um desgaste uniforme da camisa;
- Eliminação de fugas de *Zamak* entre o contacto camisa/pistão;
- Eliminação de falhas de injeção e compressão.

Por sua vez, a parte frontal da bomba é constituída por um canal de aço, ou canal de escoamento (Figura 33), maquinado e inclinado 37 graus por razões de adaptabilidade da bomba e funcionalidade do processo, com 4 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, este componente permite ao metal fluir através de si, quando este é último é comprimido contra o fundo da camisa. Este canal, possui ainda na sua extremidade um orifício roscado, para inserção de um bico de injeção que origina a diminuição do diâmetro do canal, que poderemos verificar mais adiante na Figura 36.

Bico de Injeção

O bico de injeção (Figura 35), é um componente característico do processo de fundição de câmara quente, em ligas de baixo ponto de fusão. É acoplado à bomba no final do canal de escoamento, sendo este o local onde se dá a transferência do metal fundido para o molde.



Figura 35 - Exemplos de bicos de injeção

Os bicos de injeção, são dispositivos que controlam a direção, e as características de fluxo das ligas fundidas durante o processo de injeção. O seu princípio baseia-se num canal tubular de secção variável ao longo do seu comprimento (Figura 35), que altera o fluxo de saída das ligas, suas velocidades, pressões e caudais. Para que o dispositivo funcione em conformidade com este princípio, a variação das secções deve ser suave, tal como a redução assinalada na Figura 36, evitando paredes ou estrangulamentos que promovam a turbulência, e o desenvolvimento de fenómenos como o aumento de pressões e criação de vórtices que aceleram o processo de rutura do componente. Também as características do próprio metal, densidade, impurezas e viscosidade, contribuem juntamente com os fenómenos descritos para acelerar a erosão interna, e consequente rutura dos próprios bicos (Figura 37).



Figura 36 - Secções no interior de um bico de injeção

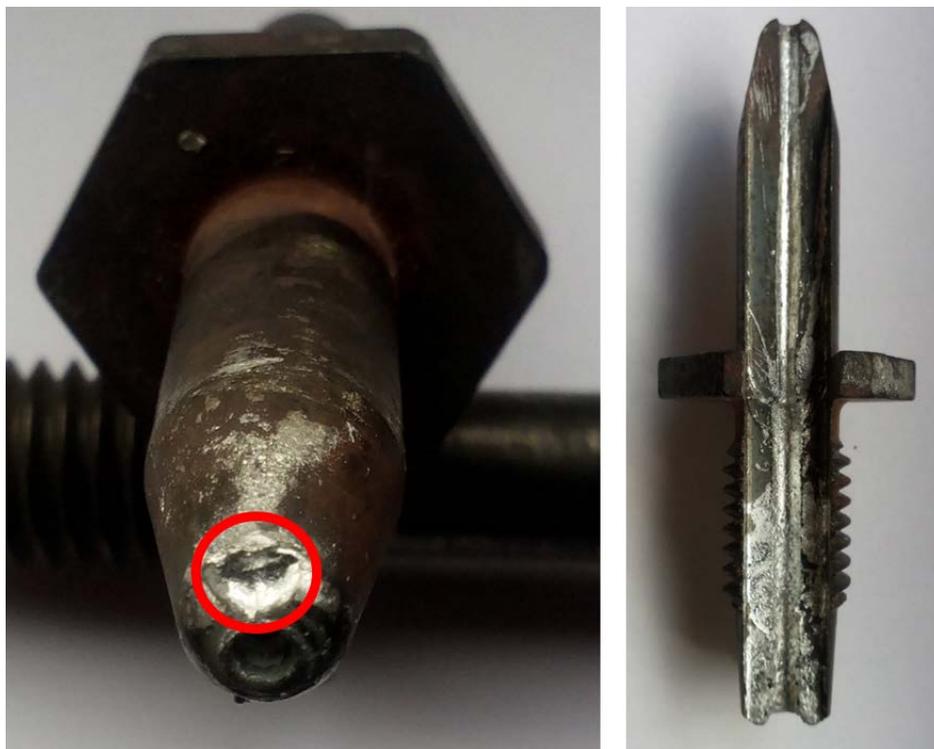


Figura 37 - Exemplos de rutura do bico de injeção

Os bicos de injeção, são produzidos em diversos tamanhos, diâmetros interiores e configurações, dependendo estas últimas do tipo de aquecimento utilizado. São fixados à extremidade do canal de escoamento da bomba, através de uma rosca existente na parte anterior do dispositivo (Figura 36 e Figura 37). No entanto, em função do processo e do equipamento, pode ser necessária a utilização de um componente intermédio, conhecido como posticho, podendo nestes casos a fixação entre os dois componentes ser efetuado, quer por via roscada, quer por via de contacto (Figura 38).

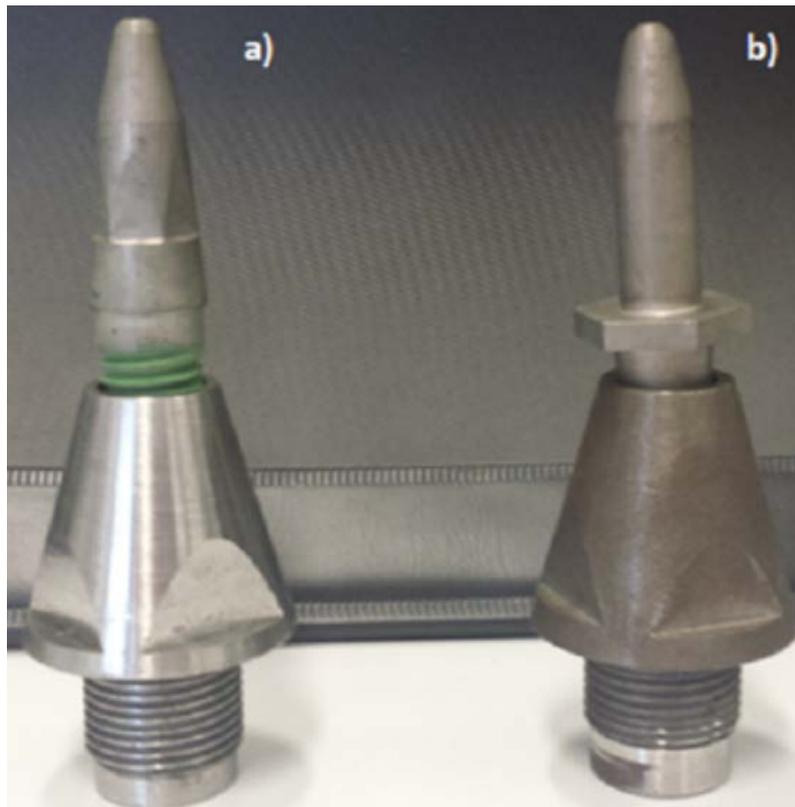


Figura 38 - Exemplo de postichos com respetivo bico de injeção acoplado
a) por rosca b) por contacto [61]

Uma outra função dos bicos de injeção, é a de conservar o mais possível a liga fundida à temperatura de trabalho. Para tal, a sua extremidade é aquecida por intermédio de uma resistência elétrica, que é acoplada ao bico de injeção, sendo para isso necessária uma configuração adequada entre as extremidades do bico e da resistência (Figura 39).

Os bicos de injeção, são fornecidos em diversos tamanhos pelos fabricantes, e a sua seleção deve ser efetuada em função das pressões parametrizadas para a injeção dos moldes. Uma vez que a pressão varia com o tamanho e a forma da peça a produzir, existem diversas opções no mercado de bicos de injeção, podendo o comprimento variar entre os 70 e 300 mm, ou superior, e o diâmetro entre 20 e 100 mm.

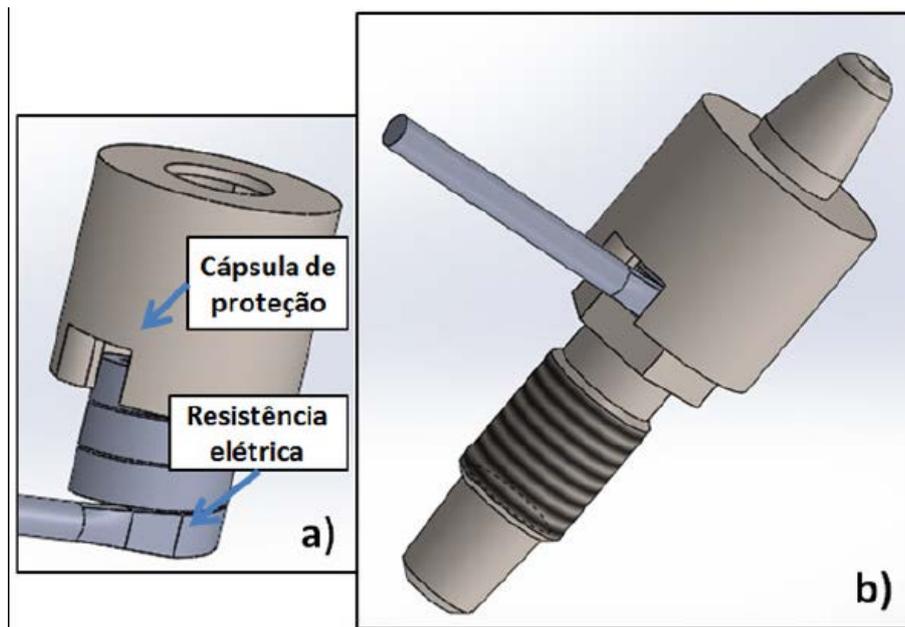


Figura 39 - Conjunto do bico com resistências a) conjunto cápsula e resistência, b) conjunto acoplado ao bico de injeção [61]

As máquinas utilizadas para injetar os moldes deste trabalho, utilizam os bicos de injeção idênticos aos apresentados na Figura 36, com 70 mm de comprimento, e diâmetro interno que passa de 4 mm na entrada, para 2 mm na saída, devido a uma redução presente no centro do componente de 1,5 mm de comprimento.

Resistência do Bico de Injeção

As resistências do bico de injeção são aplicadas a este último, de modo a prevenir as descidas de temperatura, e conseqüentes perdas de energia, que o metal fundido sofre no percurso do canal da bomba. Este fenômeno deve-se à transferência de calor que se desenvolve entre o metal fundido, e as paredes dos componentes com que este contacta. É por isso de esperar, que a temperatura da liga se encontre mais baixa que a temperatura de serviço, necessária a um correto processo de fundição. Para contrariar esta tendência, os bicos de injeção devem ser aquecidos. Recorre-se para tal a duas opções, por chama, ou como no caso em concreto, com recurso a uma resistência elétrica.

As resistências elétricas, são, assim, componentes constituídos normalmente pela própria resistência, num enrolamento em espiral, envolta interiormente por um invólucro de cobre, que contacta diretamente com o bico de injeção, e uma capsula de metal de proteção que envolve a resistência exteriormente (Figura 40).



Figura 40 - Esquema de uma resistência no interior de um invólucro [16]

As dimensões de todo o conjunto, podem variar em função de vários parâmetros, nomeadamente da dimensão do bico de injeção, e da necessidade do calor a fornecer.

No caso concreto, as resistências utilizadas são enroladas com um diâmetro interno de 10 mm (Figura 40), funcionando na gama dos 230 Volt e 150 Watt de potência. Estes parâmetros são necessários para atingir uma temperatura de trabalho na ordem dos 540°C. Para um estudo mais aprofundado, aconselha-se a leitura da tese “Otimização do processo de injeção de zamak”, elaborada por Eduardo Miguel Guimarães Ferreira Braga [16].

Molde e Estruturas de Encaixe

O molde é dos componentes mais importantes de todo o processo, pois é nele que o metal fundido toma forma, e a peça projetada é produzida. Os moldes, são amplamente utilizados nas indústrias de fundição e plásticos, na obtenção de peças com as mais diversas formas, dimensões e complexidade, e produzidas com diversos materiais. Moldes, são assim estruturas com dimensões que variam desde pequenas placas com gitos impressos, até mecanismos complexos, com elementos móveis no seu interior, para possibilitar a alimentação, refrigeração, e extração das peças fundidas (Figura 41).

O caso em estudo é referente à injeção de terminais de cabo, onde o molde é constituído por duas placas de aço (superior e inferior), denominadas insertos moldantes, e que partilham entre si a impressão da cavidade de moldação, cabendo ainda à placa inferior, comportar o sistema de gitagem (Figura 42). Estas placas, são por sua vez montadas num conjunto que acompanha os moldes, denominadas estruturas de encaixe, e que têm diversas finalidades para além da fixação das placas do molde, de modo a otimizar o ciclo operativo.



Figura 41 - Diversos tipos e tamanhos de moldes para injeção; a) Molde para injeção de pequenas peças, b) Molde de grandes dimensões para obtenção de peças grandes

Estrutura de Encaixe

As estruturas de encaixe (Figura 42), utilizadas para moldes de injeção de terminais, são do tipo encaixe rápido, e caracterizam-se por proporcionarem uma rápida montagem/desmontagem das placas de moldagem [21].

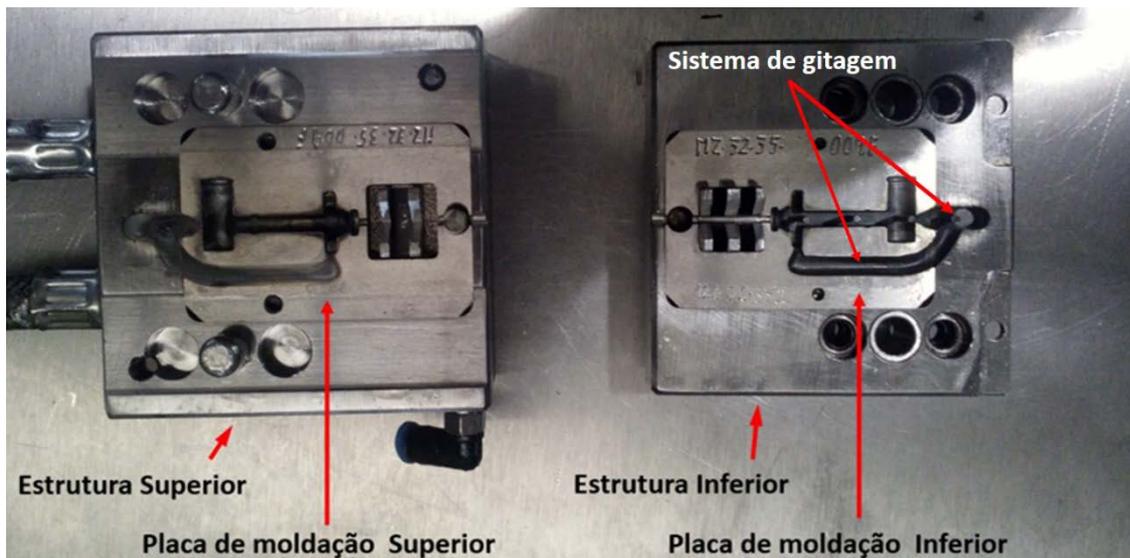


Figura 42 - Exemplo de um molde composto pelas respetivas estruturas de encaixe e insertos moldantes

Todo o conceito das estruturas de encaixe tem por base a facilidade de operação, manutenção, e a obtenção célere de peças finais conformes, neste caso, terminais de cabo. Tal como o molde, a estrutura divide-se em dois grupos, superior e inferior, para encaixe e operação das respetivas placas de moldação (Figura 43), sendo cada grupo constituído ainda por outros elementos com finalidades definidas, e que no seu todo, têm por objetivo contribuir para as seguintes funções:

- Conexão entre os moldes e o bico de injeção;

- Refrigeração dos moldes;
- Suporte dos canais de alimentação;
- Sistemas de extração;
- Segurança do processo.

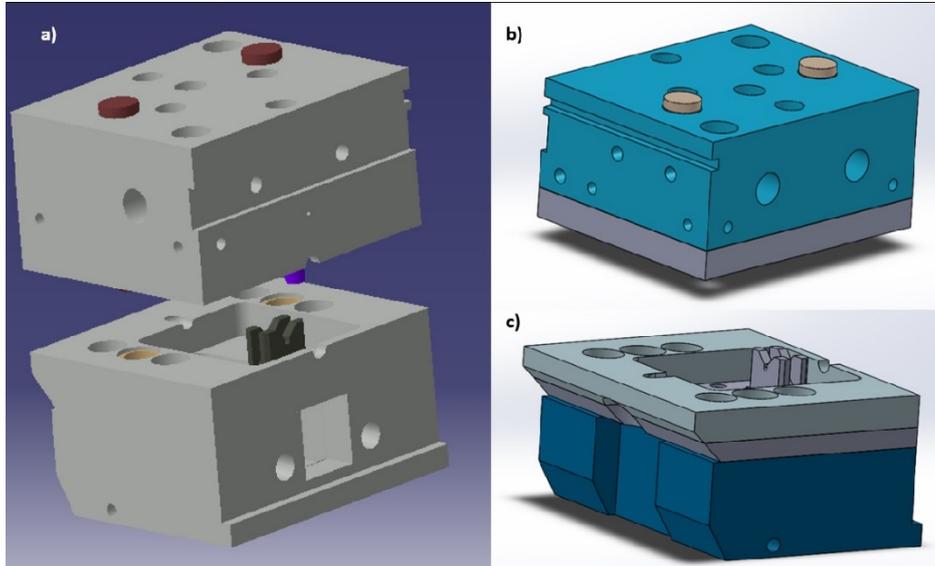


Figura 43 – Vistas da estrutura de um molde; a) Conjunto completo, b) Estrutura Superior, c) Estrutura Inferior

Os grupos indicados (Figura 44 e Figura 45) são compostos por elementos com funções definidas, para que no seu todo, a estrutura possa desempenhar eficazmente os objetivos planeados. Segue-se uma descrição detalhada dos seus elementos.

Estrutura de Encaixe Superior

A estrutura de encaixe superior, tem como principal função acomodar e fixar a placa do molde superior e efetuar a sua refrigeração, é constituída por dois componentes: estrutura superior e base superior (Figura 44).

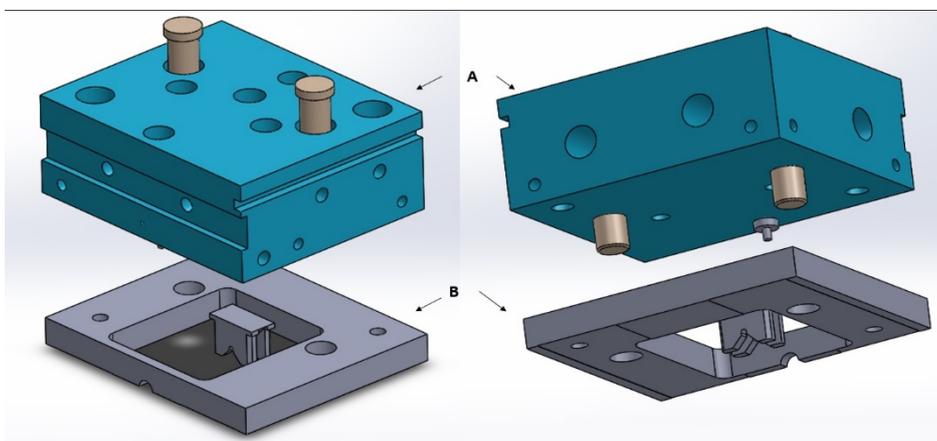


Figura 44 – Vistas da estrutura Superior do molde; A – Estrutura superior, B – Base superior do molde

Base Superior – Acomoda os canais de refrigeração de entrada e saída do líquido refrigerante, e um pressostato, para detecção de cabo no molde, que atua como sistema de segurança através da interrupção da injeção na falha do processo. Estes componentes são retificados, de modo a promover uma superfície de contacto, adequada com os inserts moldantes.

Chapa do Molde Superior – Tem como finalidade a fixação do respetivo inserto moldante à estrutura, garantindo o seu correto posicionamento, e possibilitando a utilização de placas de moldação de diferentes dimensões, apenas pela alteração deste componente.

Estrutura de Encaixe Inferior

A estrutura de encaixe inferior, tal como a estrutura de encaixe superior, tem por função acomodar o inserto moldante inferior e promover a sua refrigeração, no entanto tem ainda por função efetuar a ligação entre o molde e o bico de injeção através de um canal de refrigeração, é composta por três componentes: aro inferior do molde, base inferior do molde e estrutura inferior do molde (Figura 45).

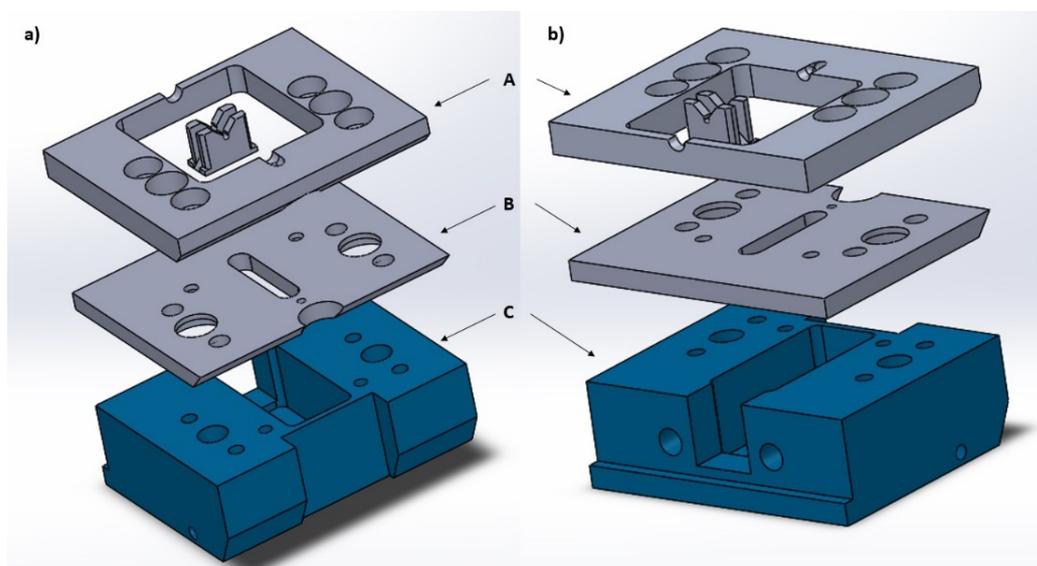


Figura 45 – Vistas da estrutura Inferior do molde; a) Vista traseira, b) Vista frontal; (A – Aro inferior do molde, B - base inferior do molde, C - estrutura inferior do molde)

Chapa do Molde Inferior – De igual modo que o seu homólogo da estrutura superior, este componente tem o objetivo de fixar o inserto moldante à estrutura inferior, e garantir o seu posicionamento, com os mesmos resultados operacionais do elemento

do grupo anterior. Tem ainda a função adicional, de assegurar o encosto do bico de injeção à estrutura, através de um orifício projetado para o efeito.

Base Inferior do Molde – Garante a correta acomodação do inserto moldante à estrutura, assegurando-se para isso a planeza e paralelismo, através da sua retificação.

Base da Estrutura – Tal como a base superior, acomoda os canais de refrigeração do grupo inferior. Além disso, possui no seu interior uma caixa para acomodar o sistema de extração. Este componente é desenhado de modo a facilitar o acoplamento do bico de injeção, e a sua montagem na máquina.

Todos estes elementos são retificadas quando produzidos, com o intuito de garantir um perfeito alinhamento do molde, e impedir o aparecimento de rebarbas na peça durante a fase de produção.

Insertos Moldantes

Os insertos moldantes (Figura 46) ou sistema de moldação, são placas produzidas de acordo com a norma da NADCA (*North American Die Casting Association*), em aço para ferramentas de alto teor de cromo e molibdénio AISI H13, encontrando-se impressa em cada uma delas a cavidade correspondente a metade da figura da peça a obter. Na placa inferior, é ainda impresso o sistema de gitagem, com dimensões que variam de acordo com o número de gitos e suas localizações, em função do projeto. Essas placas são fixadas às correspondentes estruturas, dando início ao ciclo de operação após o fecho de ambas, e com a injeção do metal fundido para o interior da sua cavidade.



Figura 46 - Insertos moldantes

A espessura de cada chapa varia em função da altura de cada peça, de acordo com as seguintes dimensões [21]:

- Peças até 12 mm de altura, espessuras de molde de 8 mm;
- Peças com altura superior a 12 mm, espessuras de molde de 10 mm.

Por sua vez, os insertos de cada molde devem obedecer às dimensões apresentadas seguidamente, uma vez que, são estas as dimensões possíveis de acomodar nas estruturas dos moldes atualmente em vigor na empresa.

- Opção 1: 38 mm X 43 mm;
- Opção 2: 38 mm X 36 mm;
- Opção 3: 38 mm X 30 mm.

Descrição das Placas de Moldantes

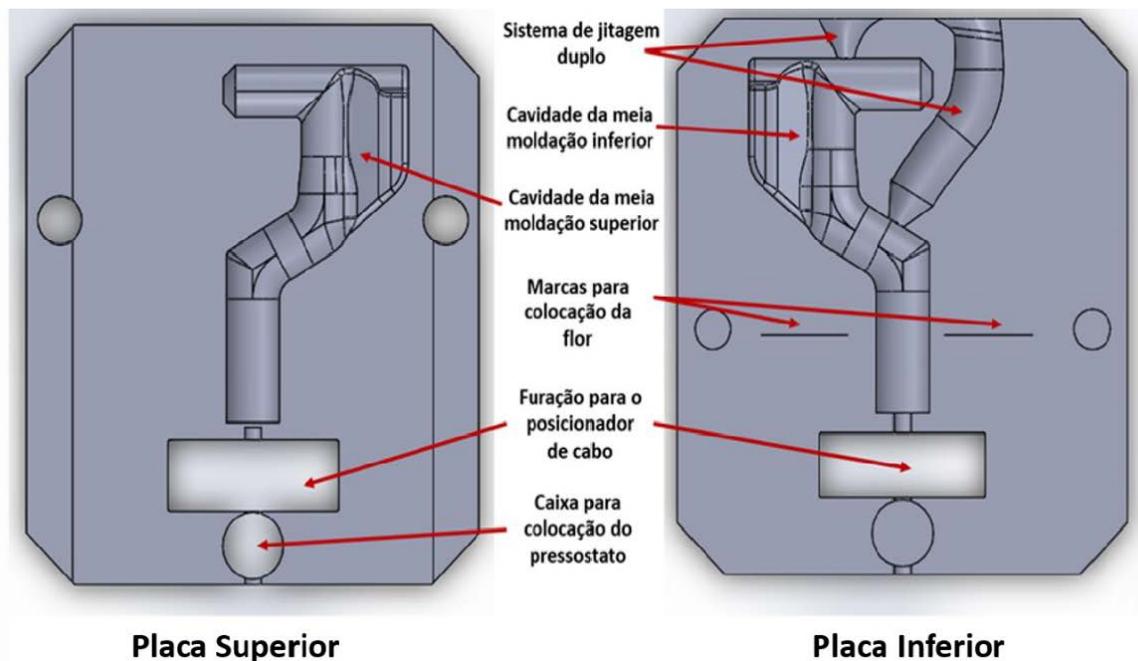


Figura 47 - Vistas dos insertos moldantes com descrição dos seus componentes

O sistema de jitage (Figura 47) é composto por canais que garantem o escoamento do metal fundido desde a saída do bico de injeção, até aos respetivos pontos de alimentação, “gitos”, originando diferentes *layouts*, em função do número de gitos, e do seu ponto de aplicação. Todo este sistema deve, por isso, ser objeto prévio de estudo, tendo em conta pressões, velocidades e dimensões, salientando-se no entanto o facto de não ser permitida a colocação de gitos em zonas funcionais (zonas da peça, que irão entrar em contacto com outros componentes, e que serão solicitadas quando do seu funcionamento), pelo facto de criarem caixas de rebaixo que promovem a

fragilidade da peça. Estas caixas são também controladas, considerando-se como tamanho *standard* as seguintes dimensões: 2.5 mm x 2.2 mm x 0.2 mm (Figura 48).

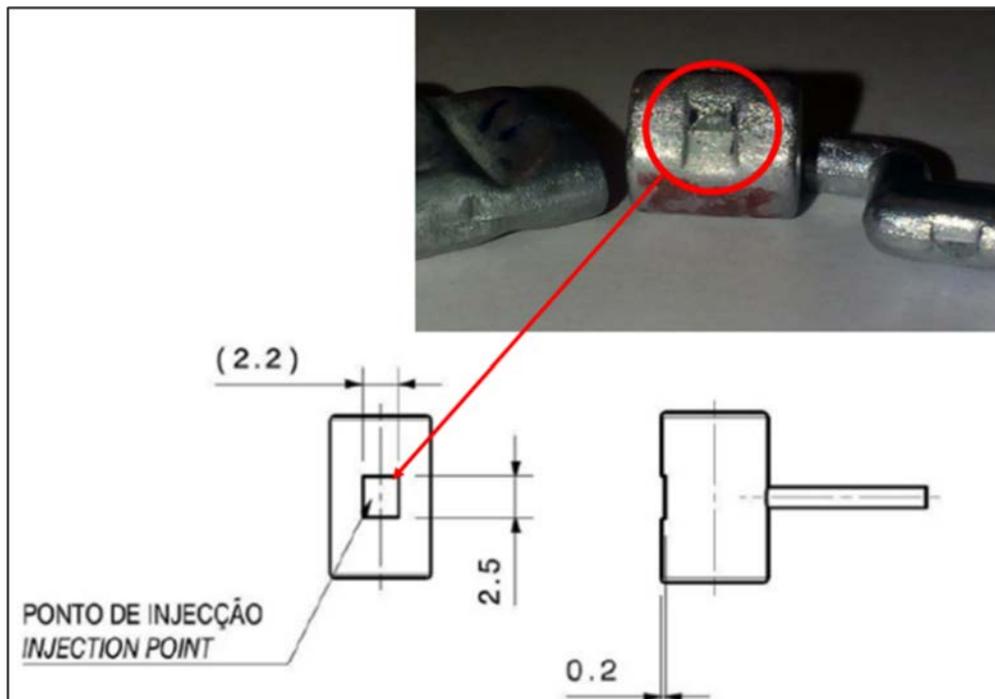


Figura 48 - Descrição de uma caixa de rebaixo

Para além das impressões das peças e dos sistemas de gitagem, ambas as placas de moldação têm numa das suas extremidades, uma furação quadrangular para inserção dos posicionadores de cabo (Figura 47), de modo a assegurar o correto posicionamento deste no interior do molde. O número de posicionadores pode variar, em função do número de cabos utilizados no fabrico da peça. Em ambas as placas, são marcadas também as referências dos terminais, e os diâmetros do cabo utilizado, enquanto no inserto inferior é ainda identificada a posição da flor, através de duas riscas em cada lado da cavidade do terminal. A fixação das placas às respetivas estruturas, é efetuada por aperto, através de um parafuso M5x35 para a parte inferior, e por meio de um parafuso M12 na parte superior [21].

Sistema de Extração

A extração dos terminais do molde (Figura 49), é realizada por intermédio de um sistema composto por pinos de extração, placa porta extratores, alavanca, mola do retorno, câmara de ar e êmbolo. De todos estes elementos, apenas os pinos de extração e a placa porta extratores trabalham na estrutura do molde, funcionando os restantes elementos em estruturas acopladas à própria máquina.

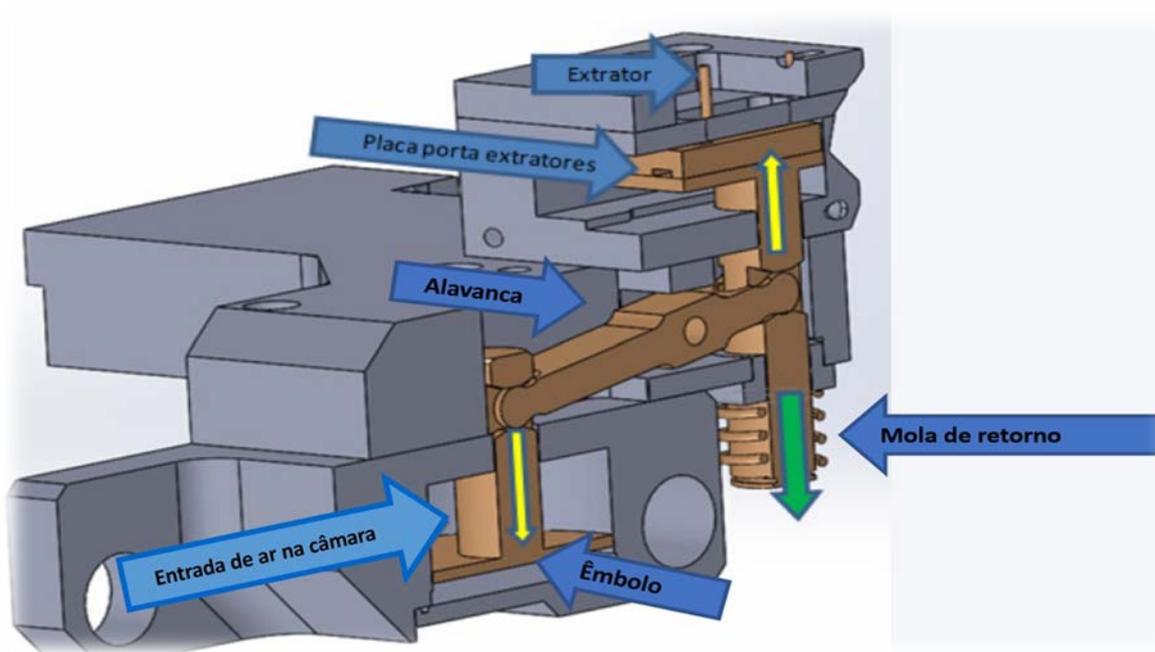


Figura 49 - Descrição de um sistema de extração [21]

Descrição do Ciclo da Extração

O sistema, é acionado pela introdução de ar na câmara, que origina a deslocação descendente do êmbolo, provocando ao mesmo tempo o movimento da alavanca. Esta, por sua vez, faz atuar a placa, porta extratores, e os pinos de extração presentes na estrutura do molde, culminando na extração da peça.

O retorno de todo o sistema à posição inicial, é efetuado no final, por intermédio de uma mola de retorno.

Mecanismo de fecho

O fecho do molde, é efetuado após o momento em que o comando da máquina recebe um sinal de que o cabo proveniente do mecanismo de fazer flor foi posicionado no molde.

A operação é realizada através de um atuador pneumático colocado horizontalmente sobre uma estrutura (Figura 50), que acomoda todos os elementos inerentes à

operação de abertura e fecho do molde, comportando inclusive a parte superior do mesmo.

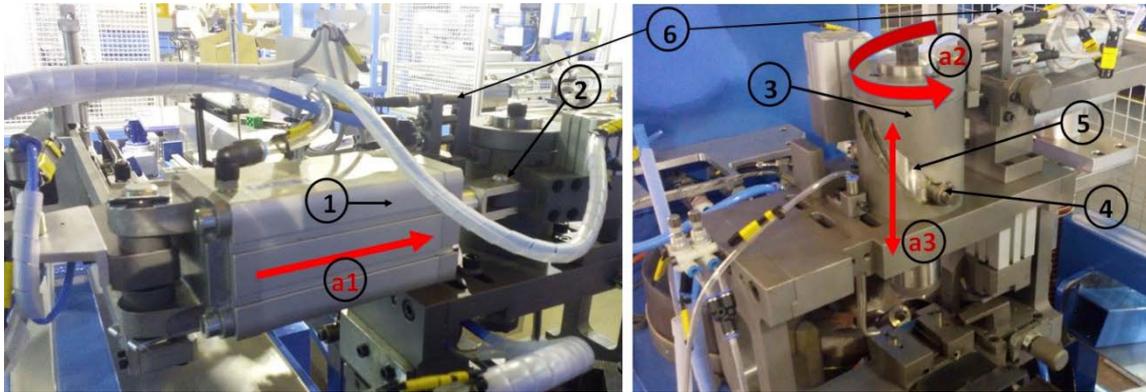


Figura 50 - Descrição do mecanismo de abertura e fecho do molde

Descrição do Mecanismo

O fecho do molde (Figura 51) tem início com o movimento linear fornecido pelo acionamento do atuador (1), encontrando-se a sua haste conectada por intermédio de uma peça (2) a um elemento cilíndrico de transmissão, com uma ranhura helicoidal (3) que transforma o movimento linear em movimento de rotação (a2), através de um pino (4). Este elemento trabalha livremente ao longo da ranhura, encontrando-se fixo a um veio (5), que percorre o interior do cilindro, tendo a função de sustentar e alinhar a estrutura superior do molde, assim como efetuar o seu movimento vertical (a3), conferindo ao mesmo tempo a força necessária ao fecho das estruturas moldantes.

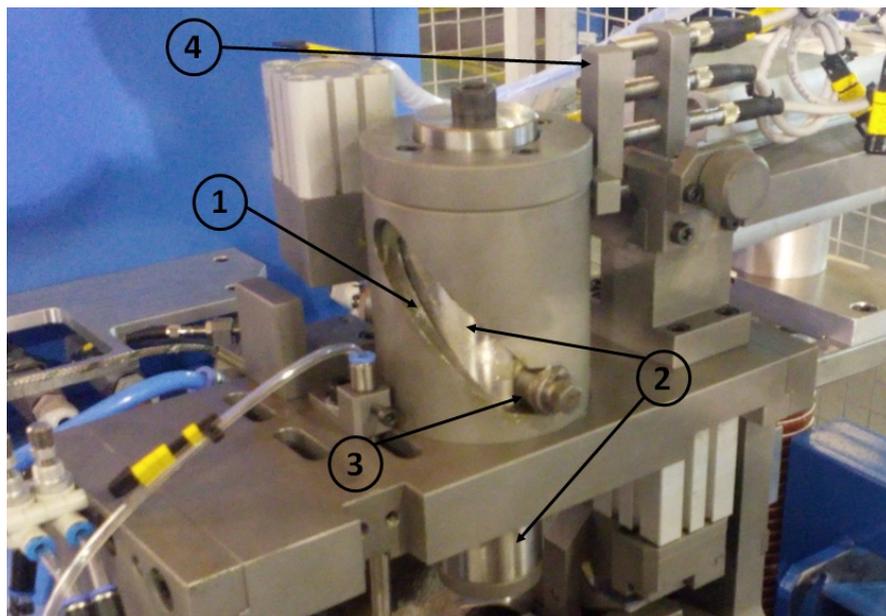
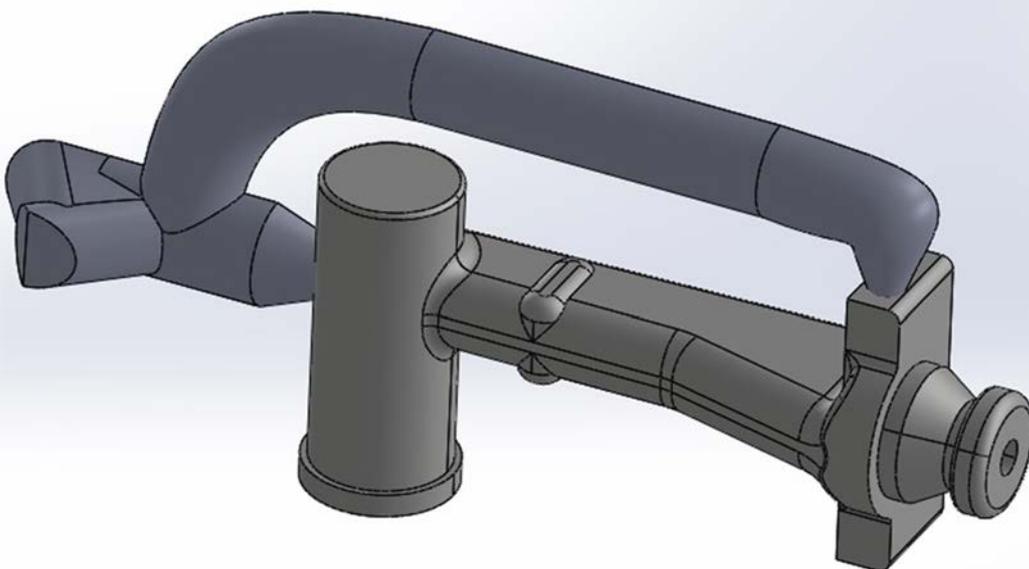


Figura 51 - Pormenor do funcionamento do mecanismo de fecho

O movimento de subida e descida, é realizado através da ranhura helicoidal (Figura 51 (1)) presente no cilindro de transmissão (Figura 51 (2)), e onde trabalha o perno fixado ao veio, por intermedio de um parafuso de fixação (Figura 51 (3)), animando o conjunto veio-molde de um movimento linear e vertical, correspondente à abertura ou fecho do molde, em função da posição do atuador e à inerente posição do perno na ranhura. O fecho do molde, é assim executado com recurso à força pneumática, por ação do atuador, de modo a evitar impactos demasiado altos, que possam danificar as estruturas do molde. O processo é efetuado em dois estágios, o primeiro com baixa pressão, para aproximação do molde superior ao inferior, e o segundo, recorrendo a alta pressão, para garantir a força necessária de fecho. O controlo destas duas pressões é efetuado por intermédio de dois sensores (Figura 51 (4)).

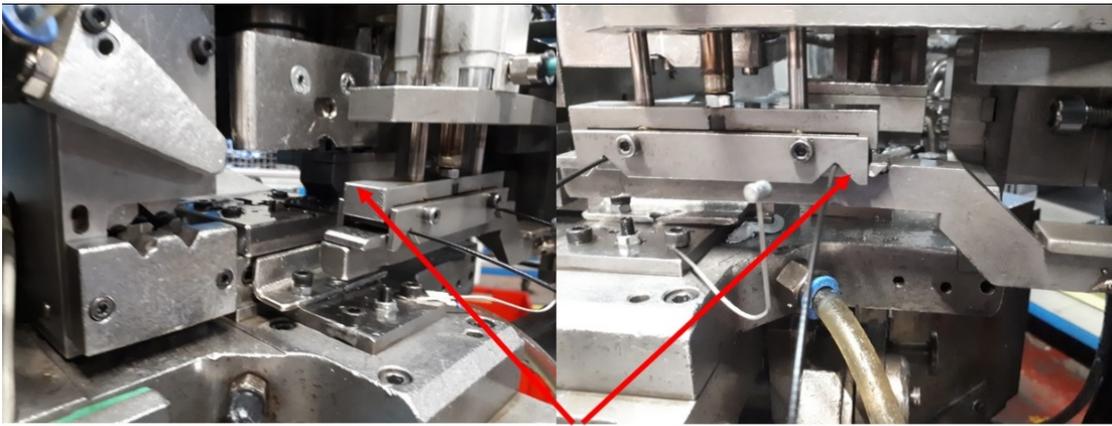
Mecanismo de Corte de Gito

O momento de extração de uma peça não implica a sua funcionalidade imediata, pois esta traz ainda associado o sistema de gitagem, que é também alimentado em cada ciclo de injeção, e que, obviamente, solidifica juntamente com o metal presente no molde (Figura 52). É, por isso, necessário remover todo este material em excesso, para que as moldações se tornem funcionais. Esta operação é realizada através de sistemas mecânicos acoplados às máquinas de *Zamak*, e que trabalham imediatamente após a extração e transferência das peças moldadas, para este mecanismo de corte de gito (Figura 53).



Volume total (Peça + gito) = 1289 mm³

Figura 52 - Peça tal como é extraída do molde



Mecanismo de corte de gito

Figura 53 - Mecanismo de corte de gito

Chegado ao posto de corte de gito (Figura 54), o terminal é colocado sobre um batente, onde um sensor, ao identificar a presença do elemento, envia um sinal de comando para avanço de um acessório denominado cortante.

O cortante, traz acoplado a si uma peça que tem por finalidade realizar o encosto ao terminal, e assegurar o seu posicionamento ao batente. O seguimento natural do processo é contínuo, e origina que o gito seja seguidamente cortado e a peça extraída.

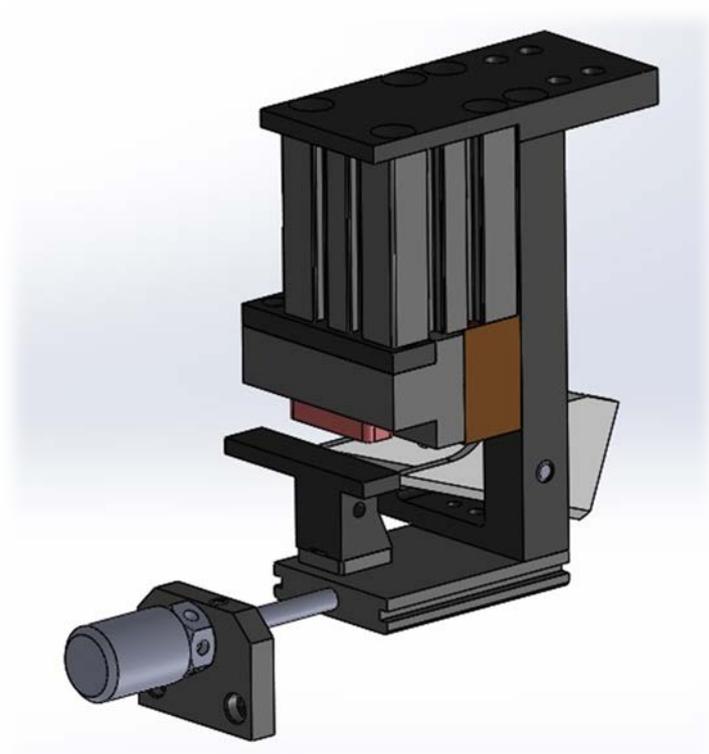


Figura 54 – Aspeto mecânico do Posto de corte de gito

3.4 *Zamak* e Processo de Utilização e Aplicação no Fabrico de Terminais

A liga utilizada pela empresa na produção de terminais de cabo injetado denomina-se *Zamak 5*, sendo esta a liga do caso em estudo.

O *Zamak 5* é uma liga zinco-alumínio, Zn-Al, hipoeutética, desenvolvida na década de 1930, para aplicação na técnica de fundição sob pressão em câmara quente [21]. Contém uma concentração alta de cobre, que lhe reforça e melhora a resistência mecânica de trabalho, em prejuízo de características dimensionais e da sua estabilidade. A liga *Zamak 5*, oferece também uma baixa ductilidade, sendo normalmente preferida sempre que estas qualidades são necessárias [34].

3.4.1 Características do *Zamak 5* usado neste trabalho

As especificações da liga *Zamak 5* segundo as normas, são as seguintes:

- ASTM B86: liga AC41A (fundição injetada);
- B240: liga AC41A (Lingote).

A liga *Zamak 5* tem uma composição química de acordo com o descrito na Tabela 18, a qual é muito idêntica às ligas da mesma família. Pela análise da tabela e teor dos seus elementos, verifica-se uma margem muito próxima destes, comparativamente com os das restantes ligas (excluindo a família das ligas ZA 8, 12, 27. No entanto, a diferença mais significativa está na percentagem de cobre nela contida, que embora não sendo a maior (uma vez que a liga *Zamak 2* contém um teor superior), está bem acima das ligas *Zamak 3* e *Zamak 7*.

Tabela 18 - Composição química da liga *Zamak 5* [34]

Elemento	Símbolo	Composição (%)
Alumínio	Al	3,700-4,300
Magnésio	Mg	0,020-0,060
Cobre	Cu	0,700-1,200
Ferro	Fe	0,050
Chumbo	Pb	0,005
Cadmio	Cd	0,004
Estanho	Sn	0,002
Níquel	Ni	-
Zinco	Zn	Balanço

O cobre confere à liga um aumento da resistência mecânica e dureza, em detrimento do envelhecimento e da estabilidade dimensional, esta última, provocada pelo fenômeno da precipitação, quando os teores se encontram acima dos 0,6%. No entanto, apesar de na liga *Zamak 5* os teores em cobre serem superiores a 1%, não se verificam grandes alterações dimensionais das peças, devendo apenas, ter este fenômeno em conta quando estamos perante peças de grandes dimensões, ou com tolerâncias dimensionais muito estreitas [34], sendo que para estes casos é recomendável o uso da liga *Zamak 3*.

Tal como as demais ligas de *Zamak*, a liga *Zamak 5* possui também uma elevada resistência à corrosão pelos agentes atmosféricos (em ambientes de humidade moderados), produtos petrolíferos, álcool, entre outros, sendo no entanto atacada por substâncias básicas fortes e ácidas. Um outro fator que contribui para a corrosão da liga, provém do contacto constante desta com o vapor de água, podendo originar um processo corrosivo a longo prazo [34]. O *Zamak 5* tem também melhor resistência à corrosão que o zinco puro [28].

Toda a composição da liga tem influência direta na sua estrutura, o que por sua vez condiciona as propriedades mecânicas da mesma. Assim, a liga *Zamak 5* apresenta uma maior resistência mecânica e dureza, como pode ser verificado na Tabela 19. Consequentemente, as resistências ao desgaste e à fluência, também são melhoradas.

Tabela 19 - Propriedades mecânicas da liga *Zamak 5* [34]

Propriedade	Valor	Unidades
Resistência à tração	328	MPa
Força de elasticidade	269	MPa
Alongamento (51 mm)	7	%
Dureza (Brinell)	91	BHN
Tensão de corte	262	MPa
Resistência à fadiga	56.5	MPa
Módulo de Young	10^7	Pa
Resistência ao impacto (T = 21°)	65	J

3.4.2 Manutenção do *Zamak* na Fábrica

Logo após a sua descarga, uma barra de *Zamak* para fundição “lingote”, segue um processo que vai desde a receção desta, até à sua introdução no cadinho para injeção. No entanto, apesar de simples, o processo segue uma ordem específica, de maneira a

cumprir as normas impostas, tentando assim, obedecer aos critérios de qualidade vigentes na empresa. Segue-se a descrição deste processo.

Receção

O *Zamak* é adquirido em forma de lingote, com 600 mm de comprimento, 400 mm de largura, 65 mm de altura (Figura 55 b)). Estas barras, chegam à fábrica em lotes de 81 lingotes (Figura 55 a)). Após encerrado o processo de receção, as paletes são descarregadas e o material armazenado. A quantidade encomendada, depende dos respetivos *stocks* e níveis de produção.



Figura 55 – a) Lote de lingotes de *Zamak* 5, b) Barra de *Zamak* 5

Armazenamento

O armazenamento, deve ser efetuado com a colocação das paletes no local apropriado para o efeito, de preferência numa zona pouco húmida e livre de substâncias contaminantes, de modo a promover a limpeza dos lingotes de *Zamak*, e a homogeneidade da liga, quando fundida (Figura 56). A contaminação da matéria-prima, deve ser evitada o mais possível, pois tem efeito direto na qualidade das peças produzidas.

No entanto, face aos enormes problemas de espaço existentes na fábrica, estes requisitos não se verificam ultimamente, sendo o local designado para o armazenamento das paletes de *Zamak*, um local húmido, e onde o contacto com os agentes atmosféricos pode, em casos extremos, existir. Junto às paletes de material, podemos ainda encontrar diversos tipos de substâncias e materiais, concluindo-se a inexistência de rigor no armazenamento da matéria-prima (Figura 57).



Figura 56 - Armazenamento de lingotes de Zamak em armazém



Figura 57 – Armazenamento de lingotes de Zamak na zona de produção

Aplicação

Após serem entregues à unidade de transformação, os lingotes são armazenados junto a esta, devendo ser colocados, em locais com características atmosféricas que se assemelhem o mais possível ao local de armazenamento inicial, ou seja, livre de humidades e substâncias, que possam contaminar ou aderir ao material, de modo a garantir as especificações de qualidade, uma vez que a contaminação da matéria-prima tem influência no produto final.

Apesar das indicações mencionadas, tal não sucede, devido à atmosfera densa e contaminada do chão de fábrica, resultante das características intrínsecas do processo, e à maneira como os lingotes são armazenados junto às máquinas, em locais de fácil contaminação, quer por agentes gordurosos, quer por eventuais agentes atmosféricos presentes na fábrica. Os lingotes ficam, portanto, em situação de espera, até à sua utilização, em função da cadência de produção das máquinas, e do consumo das barras em uso.

Salienta-se ainda, o facto de o material que se encontra nos cadinhos sofrer repetidos ciclos térmicos, passando de estados sólidos a líquidos, e vice-versa, em função dos ciclos operativos das máquinas, estando por isso sujeitos a agentes contaminantes enquanto no estado de fundido.

3.4.3 Moldes de Terminais Utilizados

Para o desenvolvimento do estudo proposto, foi decidido que o mesmo se iria incidir em dois terminais específicos, devido ao facto de os mesmos apresentarem um maior índice de problemas.

A maioria dos terminais têm dimensões e formas diferentes, mais ou menos complexas, o que contribui para a globalização da análise do problema. Salienta-se a título de curiosidade, a casualidade de todas as referências selecionadas, fazerem parte da operação de primeira injeção de cabos de comando. Ficou assim decidido analisar os terminais cuja designação dos respetivos moldes se apresenta seguidamente.

Descrição dos Moldes

Os moldes utilizados para injeção dos terminais de cabo selecionados, são constituídos por duas placas de aço AISI H13, fabricados pelo processo de maquinagem, de acordo com as características descritas, para os insertos de moldação da secção 3.3.1 – Molde e Estruturas de Encaixe (Figura 46), sendo-lhes conferido um revestimento antiaderente na fase final de produção, As duas placas, destacam-se assim por uma linha de partição ao centro do molde (Figura 58), contendo a placa inferior a meia moldação e todo o sistema de gitagem impresso, sendo por isso a única ligação existente entre o bico de injeção e a cavidade moldante.

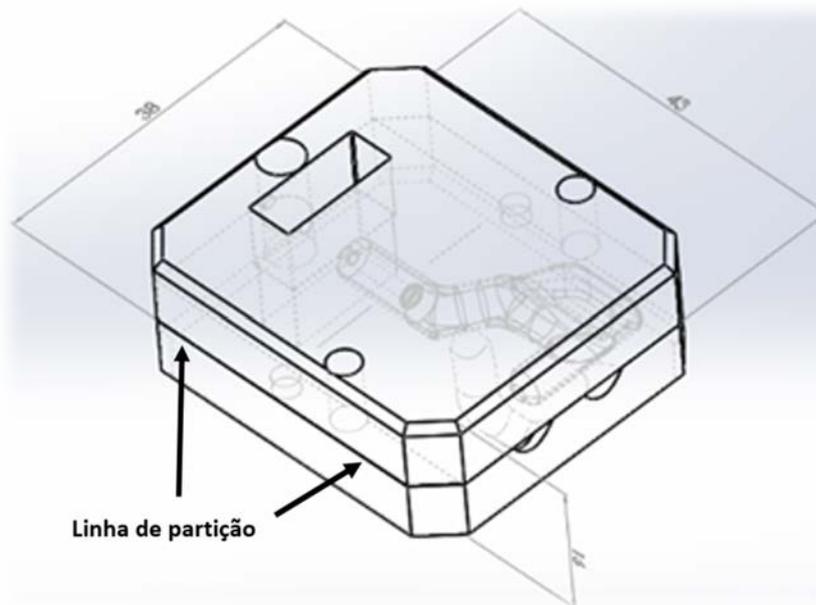


Figura 58 - Linha de partição dos moldes

Apesar de a disposição dos elementos constituintes ser idêntica, as placas dos moldes diferem entre si no que respeita às suas dimensões, mantendo no entanto uma espessura transversal a todos os insertos de 8 mm.

Para a elaboração do estudo, foram selecionados os moldes com as referências: 12232249 e 1224413161-005. Ambos obedecem à descrição efetuada na secção 3.3.1 – Molde e Estruturas de Encaixe, variando as suas dimensões, em função dos volumes das cavidades impressas, dos terminais, e do respetivo sistema de gitagem, que origina a alteração da posição, e do tamanho dos componentes constituintes do molde. É importante também assinalar que todos os moldes são desprovidos de qualquer sistema de escape de gases.

Caracterização dos Moldes

Segue-se uma caracterização pormenorizada dos moldes selecionados para o desenvolvimento do projeto, indicados pela sua referência.

Referência. 12232249

O molde desta referência (Figura 59) segue a linha de disposição dos componentes descritos na secção 3.3.1 – Molde e Estruturas de Encaixe, caracterizando-se por possuir um sistema de gitagem duplo, composto por dois canais e dois gitos (Figura 60 e Figura 61). Dimensionalmente, obedece aos valores da Tabela 20.

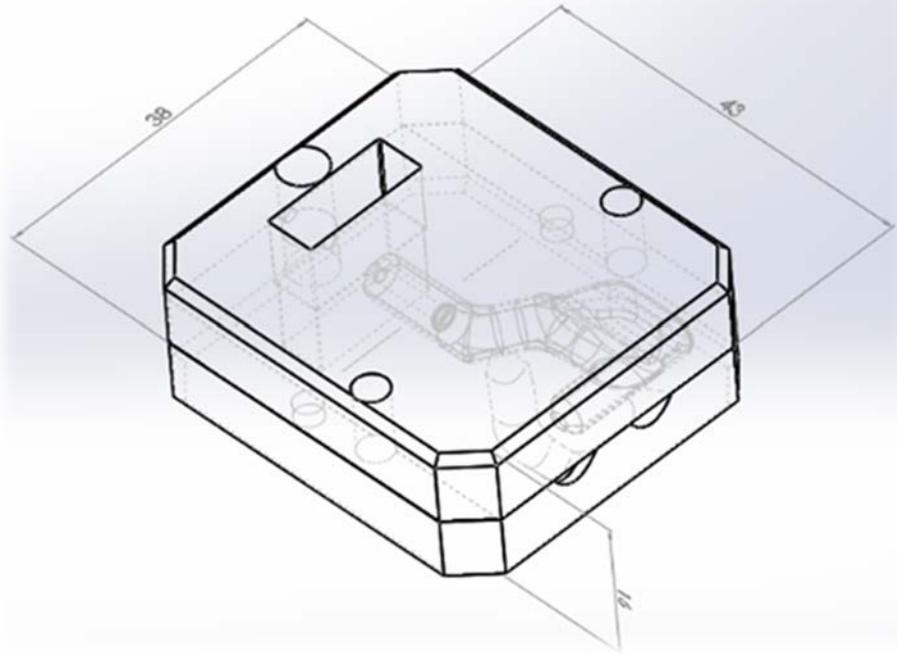


Figura 59 - Descrição do inserto superior do molde do terminal 12232249

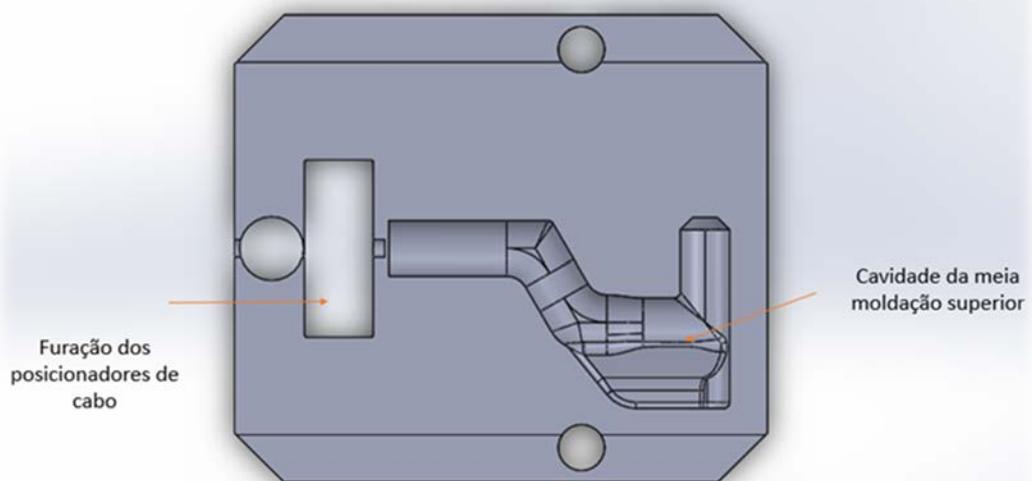


Figura 60 - Vista geral e características dimensionais do molde 12232249

Este molde é de grande importância, pelo facto de servir de base para o estudo que se vai desenvolver, aplicando-se posteriormente os resultados obtidos, ao desenvolvimento dos moldes das restantes referências.

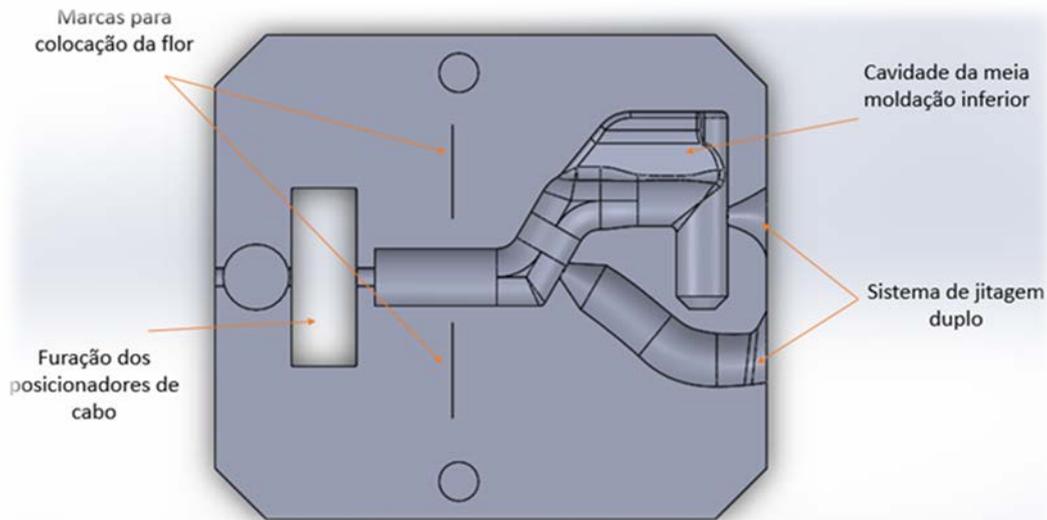


Figura 61 - Descrição do inserto inferior do molde do terminal 12232249

Tabela 20 - Características do molde da referência 12232249

Características	Valores	Unidades
Dimensões		
Comprimento:	43	mm
Largura:	28	mm
Espessura das placas:	8	mm
Volumes das cavidades		
Peça a produzir:	733,5	mm ³
Sistema de gitagem:	278,5	mm ³
Total:	1012	mm ³

Referência. 1224413161-005

O molde com a referência 1224413161-005 (Figura 62), tem a particularidade de ser o elemento com menor volume entre os elementos selecionados. Por esse motivo, o seu molde possui também um menor volume das cavidades impressas, e apenas um ponto de injeção, alimentado somente por um gito, compreendendo também menores dimensões dos insertos moldantes (Figura 63 e Figura 64).

As características gerais do molde, podem ser consultadas na Tabela 21. Na vista geral do molde (Figura 62), é de salientar a diferença relativamente à referência anterior, que era composto por um sistema de dois gitos. O pormenor das placas, pode ser consultado na secção 3.3.1.5, referente à caracterização dos moldes.

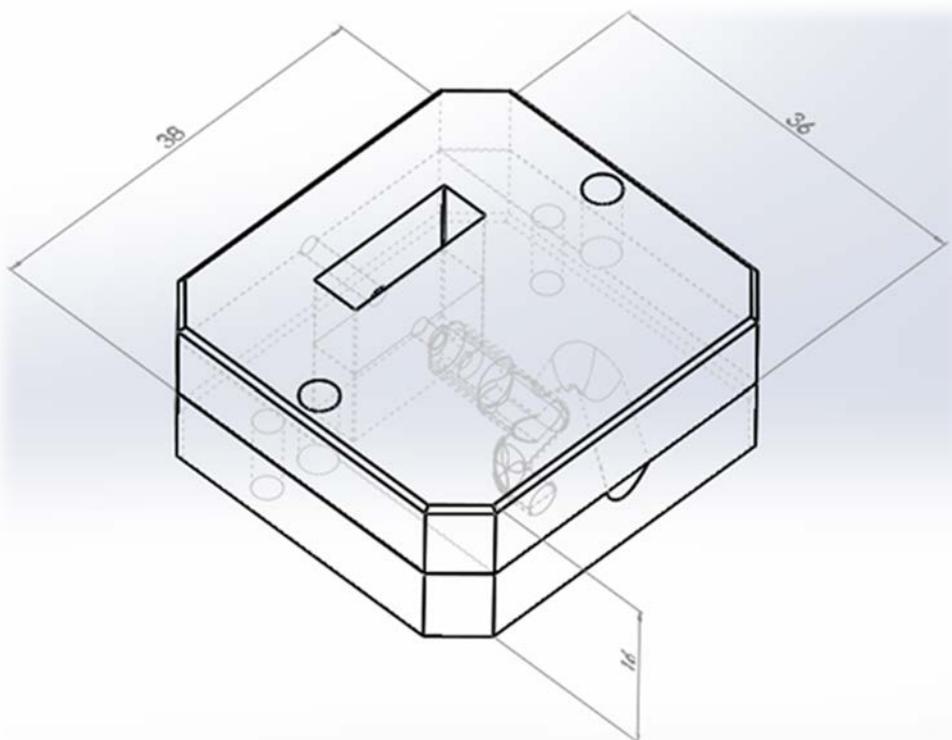


Figura 62 - Vista geral e características dimensionais do molde 1224413161-005

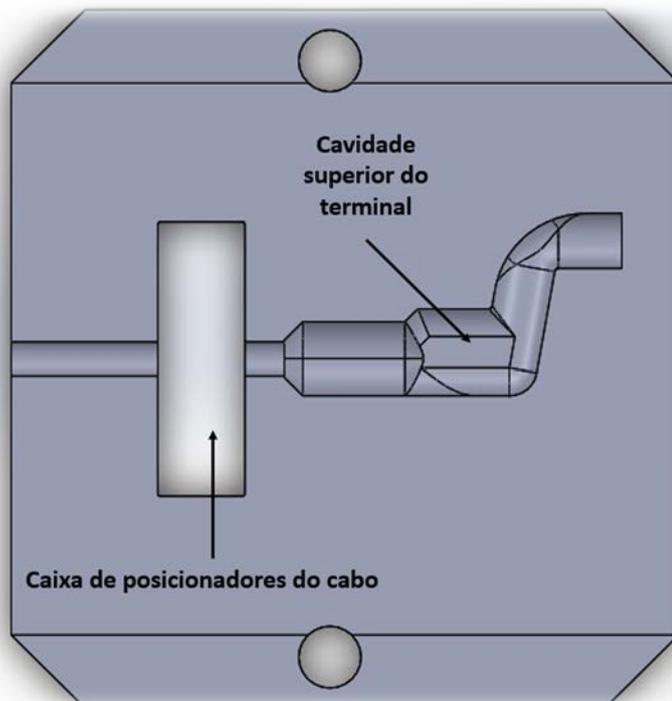


Figura 63 - Descrição do inserto superior do molde do terminal 1224413161-005

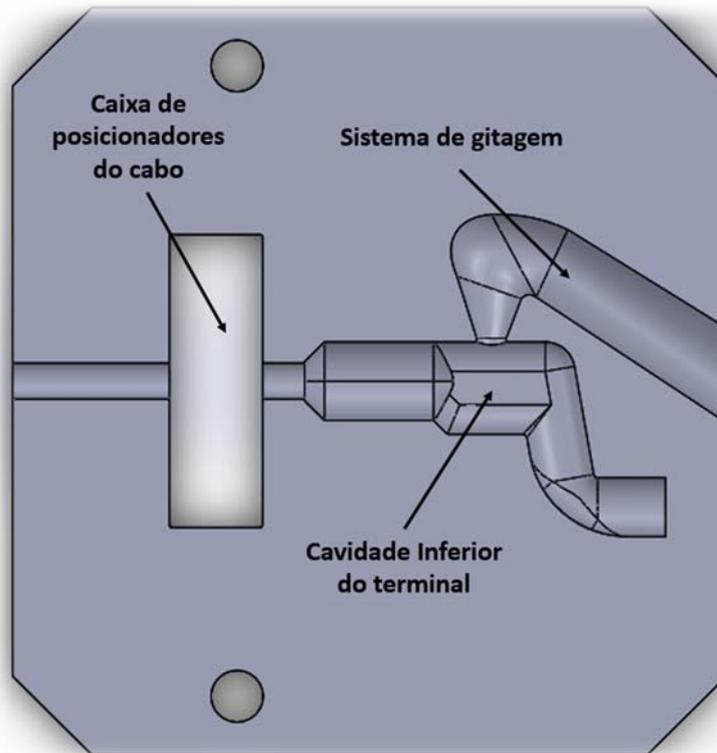


Figura 64 - Descrição do inserto superior do molde do terminal 1224413161-005

Tabela 21 - Características do molde da referência 1224413161-005

Características	Valor	Unidades
Dimensões:		
Comprimento:	36	mm
Largura:	38	mm
Espessura das placas:	8	mm
Volumes das cavidades		
Peça a produzir:	235,16	mm ³
Sistema de gitagem:	36,37	mm ³
Total:	271,53	mm ³

3.4.4 Terminais Utilizados

Como já foi mencionado no capítulo anterior, a escolha dos terminais deveu-se ao nível de problemas que estes apresentavam na produção. Defeitos como porosidades gasosas e rechupes, davam origem a peças que não garantiam as exigências do controlo de qualidade estabelecido, controlo este efetuado através de ensaios de tração onde o valor mínimo estabelecido para se considerar uma peça conforme era de 900 N. Os terminais em questão não cumpriam esse valor, entrando em rutura antes mesmo da carga mínima de 900 N inicialmente definida. A este facto, acrescenta-se ainda a complexidade das formas e os diferentes tamanhos existentes entre elas, que potenciam uma abertura do espectro dos resultados.

Descrição dos Terminais

Os terminais utilizados são terminais produzidos em liga *Zamak 5*, em diferentes configurações e diferentes tamanhos, não excedendo no entanto, o comprimento máximo de 28 mm, a largura de 15 mm e a espessura de 5 mm.

Todos os terminais foram projetados, para receber cabo com uma espessura de 1,5 mm, sendo por isso o diâmetro da flor idêntico para as três referências. Acrescenta-se ainda, que todos estes elementos são produzidos como 1ª injeção, ou seja, são os primeiros terminais a serem injetados no cabo de comando.

Caracterização dos Terminais

Segue-se uma descrição de cada referência selecionada para o estudo.

Referência. 12232249

Este terminal foi desenhado segundo uma configuração especial (Figura 65), assemelhando-se a uma manivela. Caracteriza-se por possuir uma espessa área sólida na sua zona central, de onde no seu topo se prolonga um braço de encaixe, fazendo todos estes componentes parte da sua zona funcional. Uma descrição e todas as propriedades do terminal, podem ser consultadas na Tabela 22.

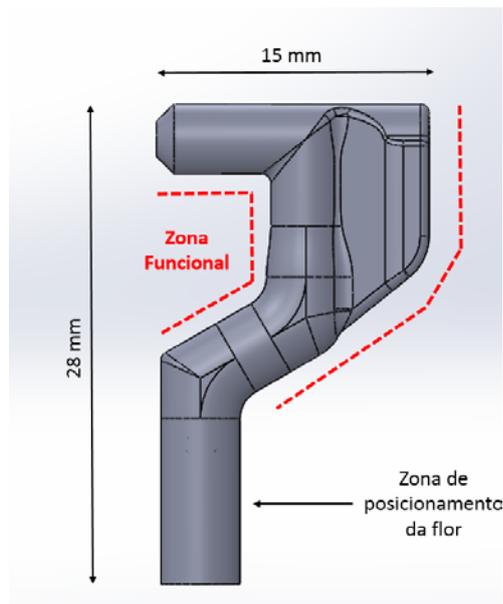


Figura 65 - Imagem descritiva do terminal 12232249

Tabela 22 - Características do terminal 12232249.

Características	Valores	Unidades
Dimensões		
Comprimento:	28	mm
Largura:	15	mm
Espessura máxima:	5	mm
Volume da peça:	733,5	mm ³
Tempo de Injeção:	0,35	s

Referência. 1224413161-005

Este terminal possui também uma configuração típica de uma manivela (Figura 66), caracterizando-se pelas suas pequenas dimensões, de onde se salienta a sua largura, que não excede o dobro da largura do cabo a que conecta. Para colmatar este facto e poder acomodar a flor, dando também um acréscimo de resistência mecânica, a zona frontal de contacto do terminal com o cabo foi alargado para 5 mm.

A zona funcional do terminal encontra-se na sua zona superior, mais precisamente no seu braço, que serve também como encaixe. As suas propriedades podem ser consultadas na Tabela 23.

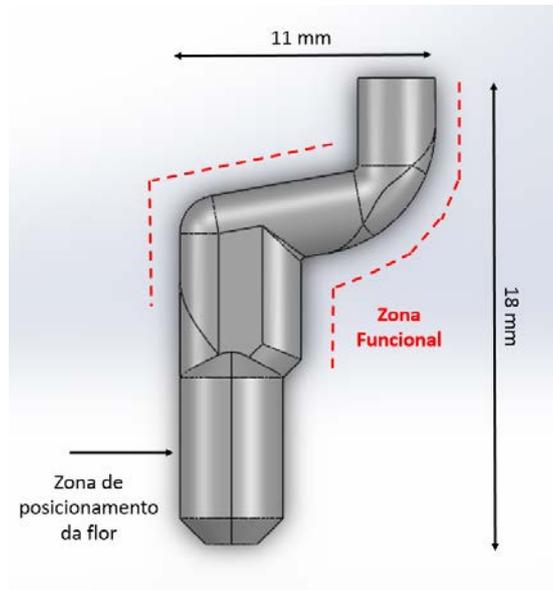


Figura 66 - Imagem descritiva do terminal 1224413161-005

Tabela 23 - Características do terminal 1224413161-005.

Características	Valores	Unidades
Dimensões		
Comprimento:	18	mm
Largura:	11	mm
Espessura máxima:	5	mm
Volume da peça:	235,16	mm ³
Tempo de injeção:	0,23	s

3.5 Caracterização do Problema

3.5.1 Identificação do Problema

A razão da escolha destes terminais, entre os diversos existentes na empresa, deveu-se ao facto do elevado número de peças não conformes, após a produção das mesmas. As peças obtidas por fundição podem apresentar um aspeto são exteriormente, sem no entanto revelar a existência de defeitos interiores, tais como cavidades ou porosidades, que promovem a diminuição da resistência das peças, o que se torna particularmente grave no caso das mesmas terem aplicações funcionais.

Foi neste contexto que durante a produção se observaram alterações ao nível do brilho, apresentando as peças um aspeto baço (Figura 67 a)), sendo um indicativo de possíveis problemas no arrefecimento da peça. A par deste problema, durante os ensaios de tração efetuados para controlo de qualidade dos terminais, observou-se que estes quebravam pelas zonas funcionais (Figura 67 b)), sem no entanto atingir a carga mínima estabelecida para poder ser considerada uma peça em boas condições. A atribuição do problema às características do material fundido, foi considerada remota, embora não totalmente colocada de parte, devido ao facto de entre os diversos tipos de terminais produzidos na fábrica, apenas estes três apresentarem falhas. Daí, se equacionar a possibilidade de ser um problema de processo, dando-se assim início à realização da análise dos problemas.

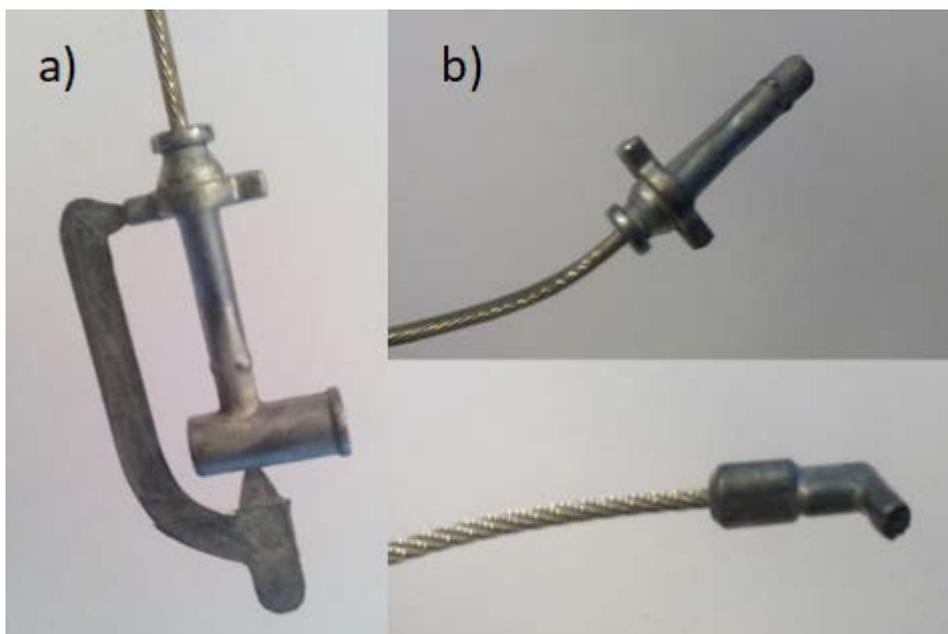


Figura 67 - a) Aspeto da alteração do brilho num terminal fundido exibindo dois tipos de cor, b) Aspectos da rotura das zonas funcionais nos terminais

3.5.2 Problemas de Produção

O facto de os terminais serem, por si só, peças funcionais, implica que é de extrema relevância a obtenção de elementos que satisfaçam inteiramente os requisitos originalmente propostos. No caso específico, pretende-se obter peças que atinjam um valor mínimo de rotura de 900 N, no entanto, a permanente evolução dos processos de fabrico executados pela empresa neste setor, baseada somente numa metodologia empírica, levou a que em determinados casos essa funcionalidade falhasse, implicando prejuízos e tentativas de resolução momentâneas e sem base científica.

Um estudo detalhado dos terminais, relativamente aos problemas identificados e descritos na secção 3.5.1, indicou falhas no processo de produção, nomeadamente durante o ciclo de injeção e extração das peças. Uma análise pormenorizada à estrutura dos provetes, revelou que os mesmos apresentavam porosidades e rechupes (Figura 68), supostamente induzidos por uma falha no processo de alimentação, ao nível das velocidades e regimes de escoamento, aliados a um *layout* deficiente dos sistemas de alimentação dos moldes.

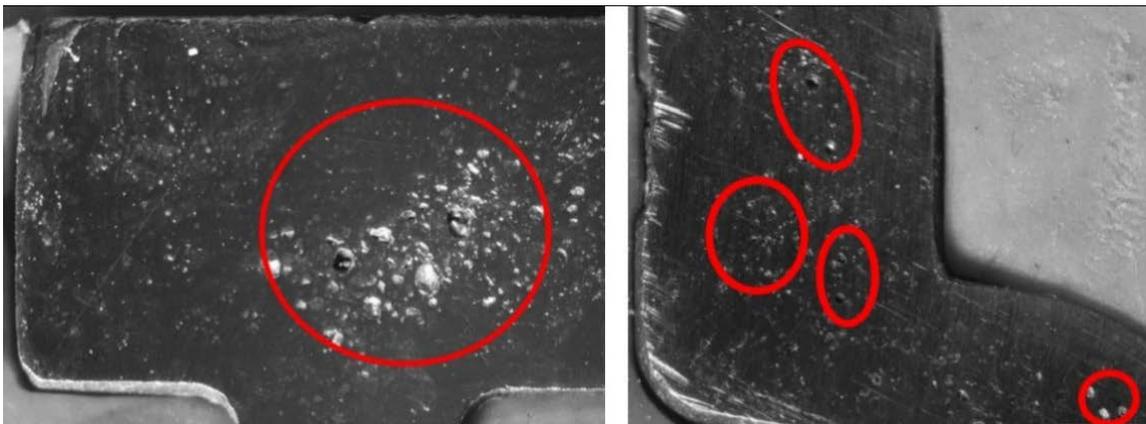


Figura 68 - Exemplo de porosidades e rechupes obtidos nas amostras obtidas

Uma causa também significativa nestes defeitos, nomeadamente ao nível dos rechupes, tem a ver com o arrefecimento do molde, uma vez que, para que uma peça seja obtida numa condição ideal, necessita de um correto tempo de arrefecimento. A falha desta janela temporal, implica uma lentidão na difusão do calor, e um estágio mais prolongado da peça a uma determinada temperatura, ou, pelo contrário, um arrefecimento instantâneo. Qualquer que seja o cenário, estas situações devem sempre ser evitadas.

A evolução e o *know how* adquiridos pela empresa, ao longo da sua atividade no processo de fundição injetada, não contemplam pormenores acerca dos fenómenos físicos presentes durante o ciclo de produção, imprescindíveis para o desenvolvimento

de melhorias. Por essa razão, todo o ciclo teve de ser analisado, de maneira a se perceber como todo o processo evolui.

3.6 Tempestade de Ideias (diagrama P; diagrama *Ishikawa*)

Os dados recolhidos, foram traduzidos segundo o seu impacto e importância de acordo com o diagrama P (Figura 69), onde podemos consultar todos os dados controláveis (no qual se pode ter alguma influência imediata), e não controláveis (onde qualquer alteração fica fora do âmbito deste estudo). Um outro diagrama causa efeito *Ishikawa* (Figura 70), fornece-nos indicações acerca dos fatores a intervir em função da sua causa, descritas na Tabela 24.

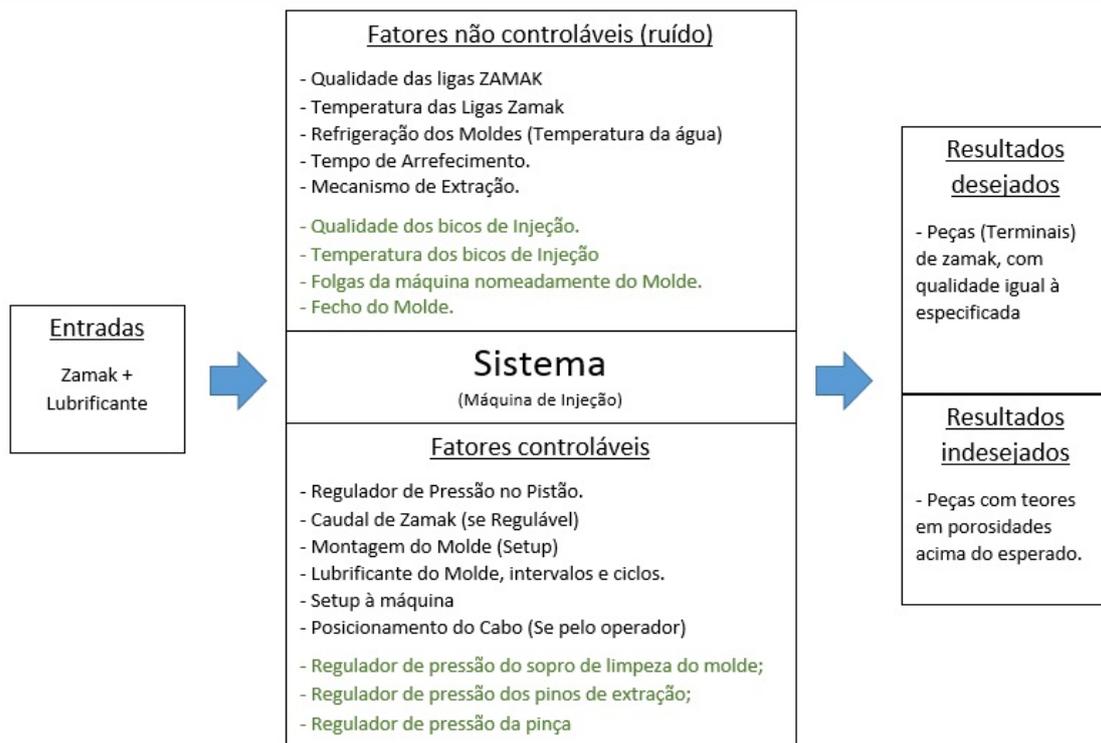


Figura 69 - Digrama P

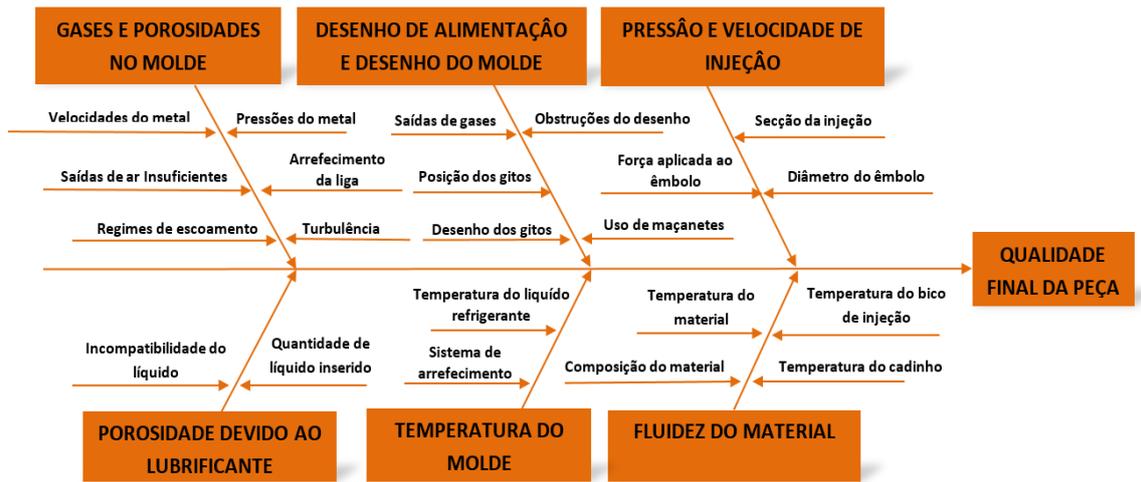


Figura 70 - Diagrama *Ishikawa*

Tabela 24 - Resultados causa/efeito do diagrama *Ishikawa* [36] [38]

Fatores	Causas
Gases e porosidades no molde	- Turbulência - Saídas de ar insuficientes - Velocidade do metal - Pressão do metal - Regime de escoamento - Arrefecimento da liga
Desenhos de alimentação e do molde	- Posição dos gitos - Desenho dos gitos - Saída de gases
Temperatura do molde	- Sistema de arrefecimento

Através da análise do diagrama P, concluiu-se que o método de estudo deveria incidir em áreas que possuíssem fatores controláveis, tais como os indicados nesse diagrama, e que não exigissem intervenções ao nível de máquinas ou instalações. Uma conclusão mais aprofundada foi entretanto obtida pela construção e discussão do diagrama *ishikawa*, onde foram definidos os fatores e as causas a aprofundar no estudo, e que se traduzem no exposto na Tabela 24, incidindo-se por isso a análise ao nível dos moldes e sua estrutura, mais concretamente nos seguintes temas:

- Regime de escoamento no molde;
- Velocidade e pressão do metal de injeção;
- Desenho dos sistemas de injeção dos moldes;
- Saídas de ar das cavidades dos moldes;
- Processo de arrefecimento do molde e das peças injetadas.

3.7 Estudo Analítico do Processo de Injeção

3.7.1 Mecanismo e Bomba

O processo de fundição injetada, tem o seu início na aplicação de uma pressão de ar comprimido de 6 bar, a um pistão com 100 mm de diâmetro, fazendo mover a sua haste que se encontra ligada a uma alavanca com um comprimento de 123 mm (Figura 71) entre componentes, e que tem a finalidade de transmitir e ampliar a força produzida no pistão de ar comprimido ao pistão da bomba de injeção, por intermédio do momento criado. A ligação entre a extremidade da alavanca e a haste do pistão não é direta, existindo entre si um tirante que liga estes dois componentes, devido a funcionalidades geométricas e de articulação. A força transmitida ao tirante, é depois transformada em pressão, e aplicada diretamente ao metal fundido existente dentro da câmara da bomba, pelo êmbolo, com o intuito de promover o fluxo, através do canal de escoamento presente na bomba.

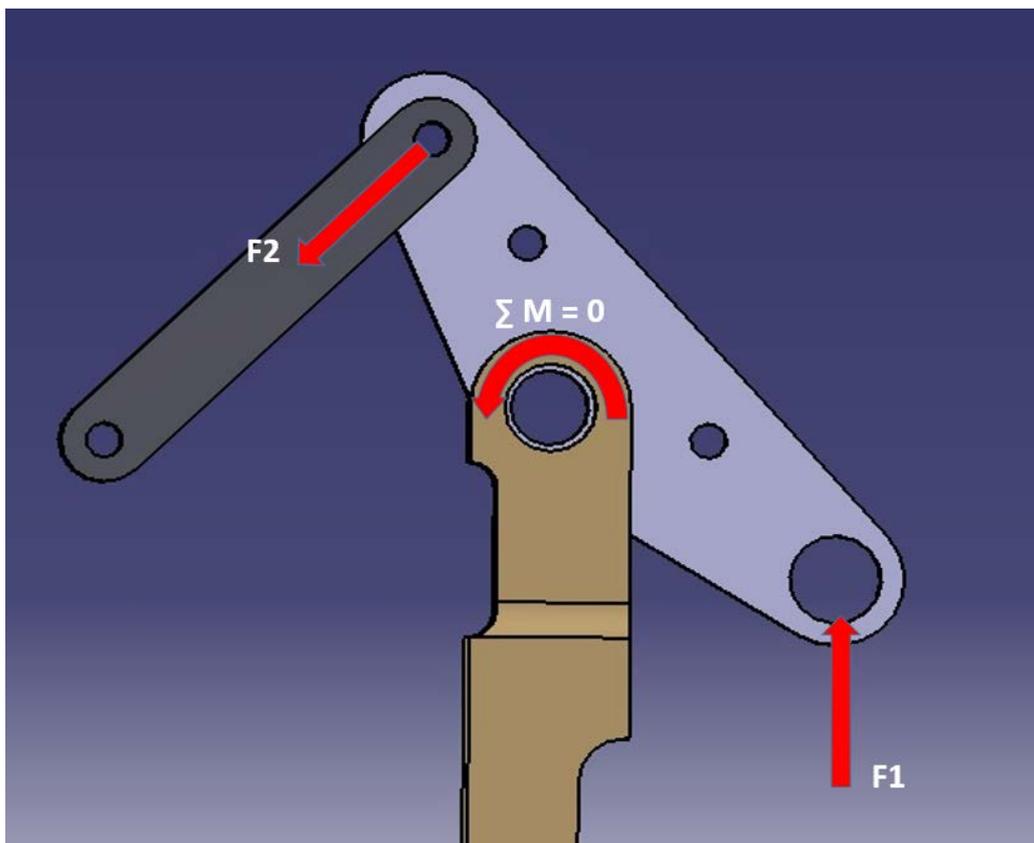


Figura 71 - Diagrama de corpo livre das forças aplicadas ao pistão; F1-Força aplicada à manivela pela haste do pistão, ΣM – Local de aplicação do momento, F2-Força exercida pela manivela no tirante da haste da bomba.

A pressão exercida ao metal líquido origina que este seja comprimido contra as paredes da câmara, o que faz aumentar a sua pressão e a sua velocidade, através dos

canais e em função da geometria destes, de modo a manter o caudal pretendido. Assim, o metal fundido a uma temperatura que deve rondar os 430°C, vai percorrer todo o canal de escoamento até atingir o bico de injeção, local onde se encontra o orifício de saída do sistema da bomba (Figura 72). Por forma a evitar a descida da temperatura do metal devido ao escoamento, é acoplado ao bico de injeção uma resistência, mantendo assim o metal o mais trabalhável possível, evitando um aumento de viscosidade, e promovendo o escoamento do fluido. Chegado ao bico de injeção, o metal fundido é conduzido diretamente ao molde, e direcionado até à cavidade da peça, por via dos canais nele impressos, estes, poderão variar em número, diâmetros e geometrias, em função dos volumes, das pressões e das velocidades pretendidas, funcionando consoante o tipo de escoamento definido no enchimento do molde.

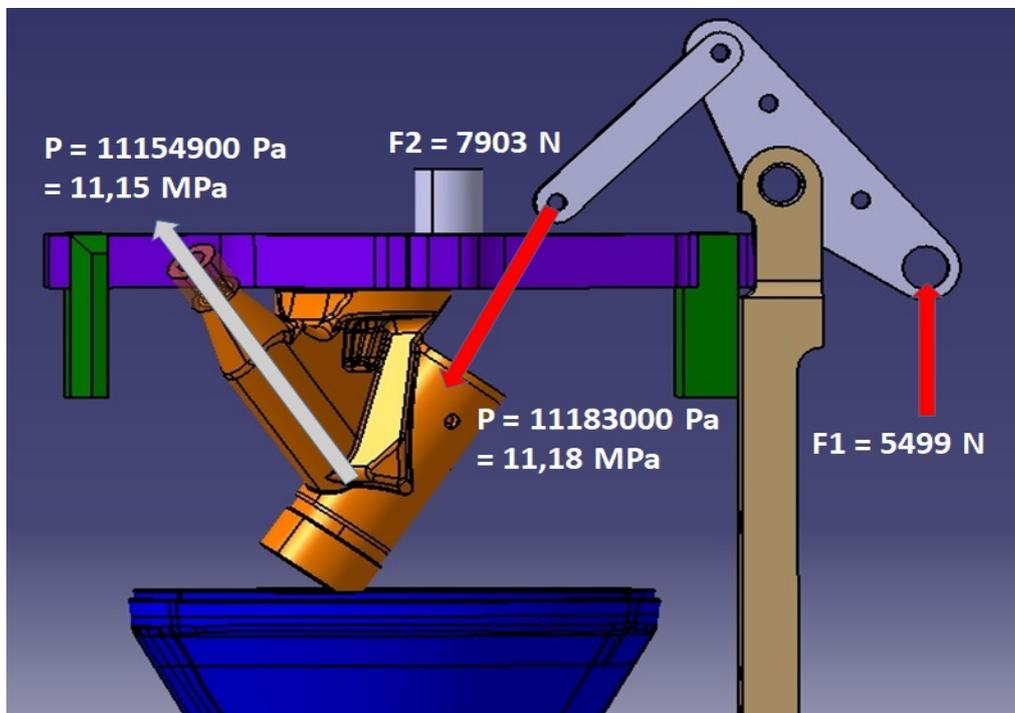


Figura 72 - Diagrama de forças e pressões produzidas durante o processo de injeção

O processo de enchimento é complexo, e requer o máximo de atenção. É por isso necessário ter em conta variáveis como o regime de enchimento, velocidades, e fluxo do fluido, de modo a evitar fenómenos que poderão colocar em causa a obtenção de peças conformes. É importante salientar, que durante todo o percurso do metal, este comporta juntamente ar e determinados gases, que devem inevitavelmente ser expelidos quando a cavidade a moldar é atingida. Daí, ser usual a criação de canais de arrefecimento nos moldes, favorecendo também o arrefecimento da moldação. Este fenómeno requer atenção e estudo, para garantir o arrefecimento do metal na janela de tempo precisa, e evitar uma gama de defeitos que advêm devido a arrefecimentos mal executados.

3.7.2 Canais de Gitagem do Molde

O fluido proveniente do bico de injeção, é inserido no molde através de um orifício criado para o efeito, na base da placa. Este orifício, direciona o metal para o seu sistema de gitagem. Devido à sua dimensão, relativamente maior do que o diâmetro de saída do bico de injeção, é originada uma diminuição de velocidade e pressão. Este fenómeno, foi criado em ambiente de simulação (Figura 73), identificando-se as diferenças de velocidades e pressões que animam o metal, devido à geometria do orifício. Salienta-se, no entanto, que independentemente da situação mais ou menos benéfica que a geometria do orifício possa apresentar, devido ao *layout* das máquinas de injeção e disposição dos seus componentes, a solução apresentada será uma das soluções mais plausíveis.

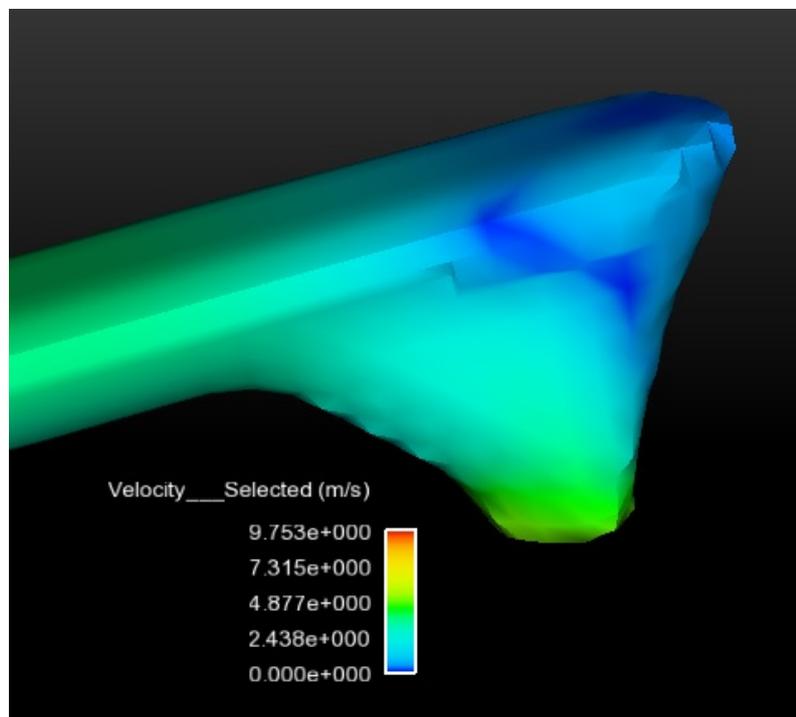


Figura 73 - Simulação da análise da velocidade no canal de gitagem do molde

Após direcionado para os canais de gitagem, o fluido evolui através destes até às cavidades da moldação. A injeção na cavidade da moldação, depende diretamente e em grande escala da geometria dos gitos, que condicionam as velocidades e pressões, determinando o regime de escoamento no interior do molde. É por isso de grande importância, o dimensionamento destes componentes. Uma vez atingida a cavidade da moldação, o metal fundido deve escoar num regime o mais próximo possível do laminar, ou seja, com um valor do número de Reynolds igual ou inferior a 1000, de modo a evitar o aprisionamento de gases no interior do metal fundido, turbulências e

colisões demasiado bruscas entre correntes de fluxo de material, que originem turbilhões e que fomentem o aparecimento de defeitos.

3.8 Expressões Envolvidas no Processo

3.8.1 Mecanismo de Atuação

A pressão inicial aplicada ao pistão de ar comprimido, traduz-se numa força, através da fórmula descrita na **Equação 1** [52], com as variáveis descritas na **Tabela 25**:

$$F = p \times A \quad (1)$$

Tabela 25 - Descrição da equação 1

Símbolo	Descrição	Unidades
F	Força Resultante	N
p	Pressão aplicada ao pistão	bar
A	Área do Pistão	m ²

Pretende-se seguidamente, conhecer a força transmitida à haste do êmbolo da bomba, por ação do momento criado pela alavanca existente, que origina um aumento da força atuante na haste oposta. Considerou-se para o efeito, que a força exercida pelo pistão é constante ao longo de todo o processo, de maneira a facilitar os cálculos. Fixou-se assim uma posição (Figura 74), e efetuaram-se os cálculos com base nessa mesma geometria. Salienta-se a importância do conhecimento prévio de todas as relações geométricas inerentes ao sistema, para o desenvolvimento dos cálculos.

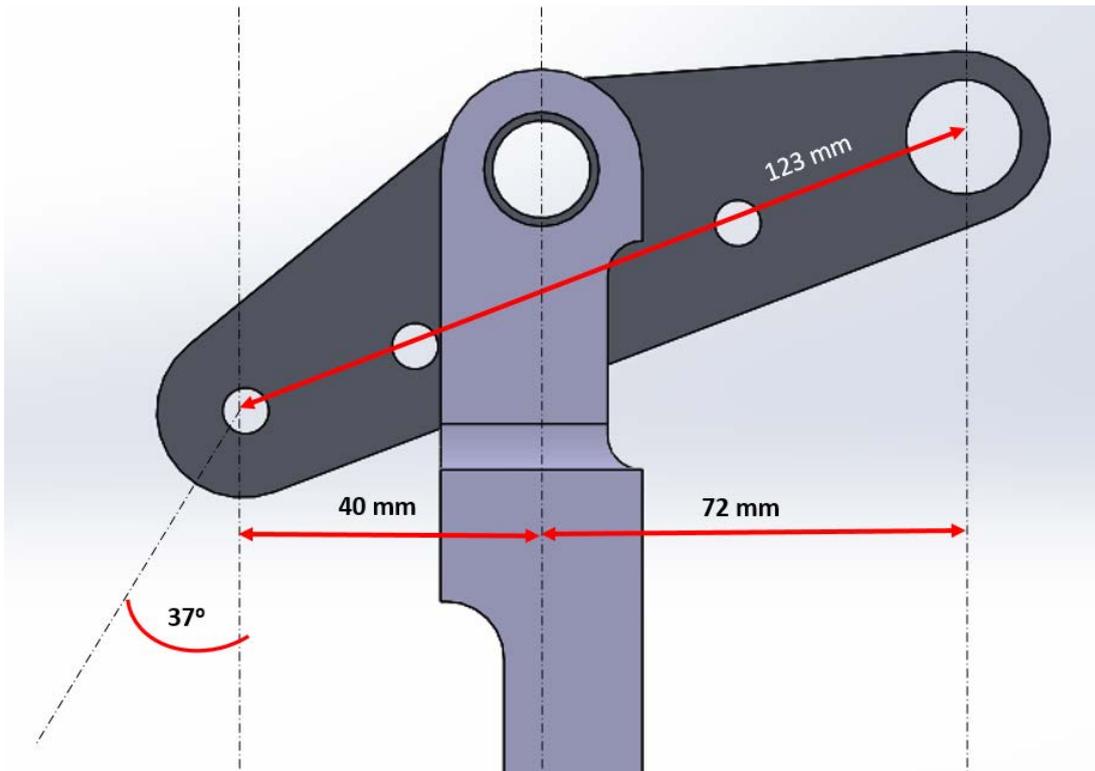


Figura 74 - Relações geométricas no mecanismo de transformação de força

A força aplicada à haste da bomba, é obtida pelo cálculo do momento no centro de rotação da manivela [53], obtendo-se assim a Equação 2, cujas variáveis são explicadas na Tabela 26:

$$Ma = \sum F \cdot d$$

$$\sum Ma = F_1 \times L_1 + F_2 \times L_2 \times \cos \alpha = 0$$

(2)

Tabela 26 - Descrição da equação 2

Símbolo	Descrição	Unidades
F_1	Força exercida pelo pistão no ponto de ligação	N
F_2	Força Resultante	N
L_1	Distância linear da força F_1 ao momento M	m
L_2	Distância Linear do momento M à força F_2	m
α	Ângulo do vetor da Força F_2 com o eixo vertical	°

Obtém-se assim $F_2 = 10672$ N no sentido descendente.

3.8.2 Análise dos Escoamentos

Bomba

A entrada do canal da bomba, é das zonas mais críticas existentes no circuito do metal fundido, devido ao estrangulamento presente no local por onde o fluido tem obrigatoriamente de passar, e que faz aumentar a velocidade e a pressão. Para uma devida análise do canal de escoamento, é necessário efetuar o seu estudo ao nível da câmara da bomba.

O primeiro passo para o cálculo geral de todo o processo de fluxo, incide no caudal necessário para realizar o enchimento da peça a produzir, sendo fundamental o conhecimento do seu volume, bem como dos gitos e de outros volumes presentes nos moldes (Figura 75). É ainda necessário definir o espaço de tempo pretendido, para que o enchimento seja realizado. Este cálculo é efetuado com base na Equação 3, Tabela 27.

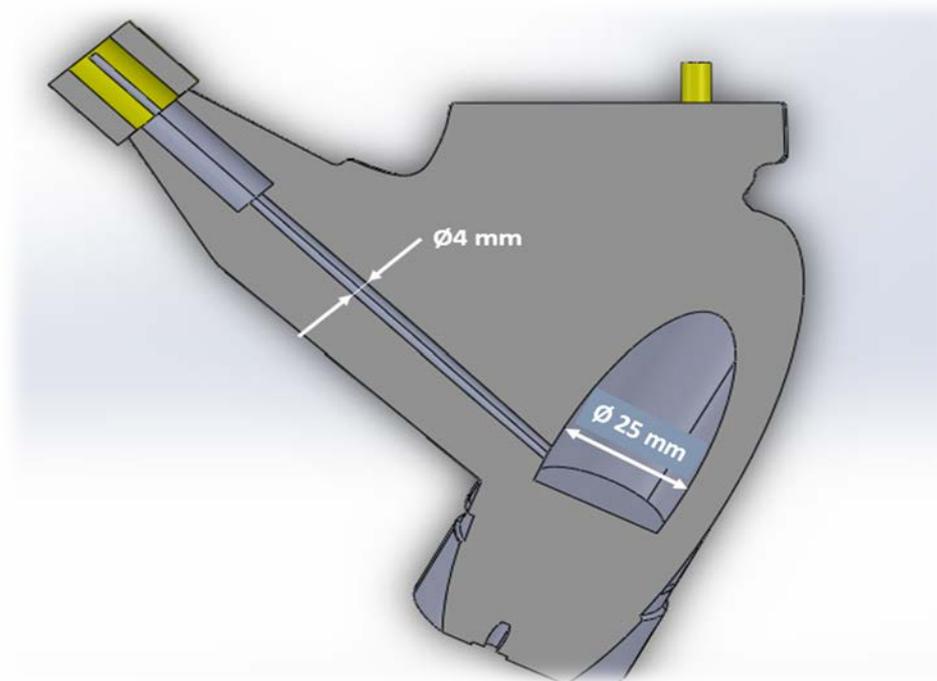


Figura 75 - Relações geométricas dos componentes da bomba de injeção

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3)$$

Tabela 27 - Descrição da equação 3

Símbolo	Descrição	Unidades
V	Volume da cavidade a preencher	m ³
t	Tempo de enchimento	s
Q	Caudal	m ³ /s

A análise do fluxo do sistema câmara-canal, foi realizada aplicando a teoria de *Bernoulli* para os escoamentos [54], e governada pela equação com o mesmo nome, Equação 4, Tabela 28. O objetivo final destes cálculos, é obter a pressão no canal de escoamento e, ao mesmo tempo, ficar com uma caracterização global de todo o sistema presente no conjunto da bomba, que inclui regimes de fluxo, perdas de carga, velocidades e pressões. Para que os cálculos possam ser efetuados, é importante ter conhecimento de todas as relações geométricas do desenho da bomba de injeção (Figura 75). Além disso, é ainda necessário efetuar cálculos auxiliares, de modo a encontrar os valores das velocidades U_1 e U_2 , pressão aplicada ao êmbolo p_1 , e das perdas de carga hf , devidas a rugosidades e estrangulamentos presentes.

- Equação de *Bernoulli*:

$$\frac{p_1}{\rho \times g} + \frac{U_1^2}{2 \times g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho \times g} + \frac{U_2^2}{2 \times g} + z_2 + hf_1 \quad (4)$$

Tabela 28 - Descrição da equação 4

Símbolo	Descrição	Unidades
p_1	Pressão aplicada pelo êmbolo	Pa
p_2	Pressão exercida	Pa
ρ	Peso volúmico do líquido (Zamak),	kg/m ³
g	Gravidade	N/m ²
U_1	Velocidade inicial na câmara da bomba (Após o êmbolo)	m/s
U_2	Velocidade final no final do canal de escoamento	m/s
hf_1	Perdas de Carga	m

- Cálculo das velocidades U_1 e U_2 , é efetuado por ação da Equação 5, variáveis descritas na Tabela 29, e aplicada aos locais em estudo, devido à variação do diâmetro destes.

$$U = \frac{Q}{A}$$

$$(U_1 = \frac{Q}{A_1}; U_2 = \frac{Q}{A_2}) \quad (5)$$

Tabela 29 - Descrição da equação 5

Símbolo	Descrição	Unidades
U	Velocidade do fluido no ponto aplicado	m/s
Q	Caudal	m ³ /s
A	Área do canal de escoamento em estudo	m ²

- Cálculo das perdas de carga hf ,

O cálculo das perdas de carga, implica um processo que inclui o conhecimento de propriedades como o Número de Reynolds, rugosidade das paredes dos canais e respectivos diâmetros. O valor é calculado através da Equação 6, Tabela 30 [55].

$$hf = \frac{U^2}{2 \times g} \times \left[f \times \frac{L}{di} + \sum K \right] \quad (6)$$

Tabela 30 - Descrição da equação 6

Símbolo	Descrição	Unidades
U	Velocidade do fluido	m/s
g	Gravidade	m/s
f	Fator de fricção de <i>Darcy</i>	adimensional
L	Comprimento do canal de escoamento	m
di	Diâmetro interno do canal	m
K	Perdas localizadas do canal	adimensional

O fator de fricção f , é obtido através da tabela do Anexo 5, sendo para isso necessário o conhecimento prévio da relação ε/D e do valor do número de Reynolds.

- Estimativa da relação ε/D para cada canal, explicada pela Equação 7, Tabela 31.

$$\frac{\varepsilon}{D} = \text{constante} \quad (7)$$

Tabela 31 - Descrição da equação 7

Símbolo	Descrição	Unidades
ε	Rugosidade do material do canal	mm
D	Diâmetro do canal	mm

- Cálculo do número de Reynolds, através da Equação 8, Tabela 32.

$$Re = \frac{\rho \times U \times D}{\mu} \quad (8)$$

Tabela 32 - Descrição da equação 8

Símbolo	Descrição	Unidades
ρ	Peso volúmico	kg/m ³
μ	Viscosidade dinâmica do metal	kg/m·s
U	Velocidade do líquido no canal em estudo	m/s
D	Diâmetro do canal	mm

Por sua vez, é necessário obter os valores de todos os constrangimentos existentes em todo o circuito. Para o caso em estudo, temos uma contração, e o seu impacto traduz-se pelo fator K obtido através dos gráficos do Anexo 5.

O tipo de fluxo presente na câmara irá ser indicado pelo número de Reynolds, uma vez que o diâmetro é fixo, tal como o peso volúmico do material e viscosidade dinâmica. Será assim a velocidade imposta pelo êmbolo, que condicionará o regime, podendo este ser laminar, turbulento, ou se encontrar numa zona de transição.

Para o estudo presente, o fluxo na câmara encontra-se no regime laminar, como poderemos verificar na secção 3.10.1. No entanto, no canal de escoamento, outros fatores condicionam o fluxo de material. Além da já mencionada contração, também o diâmetro e a rugosidade, vão condicionar diretamente aquele regime. Assim, o diâmetro reduzido vai originar um aumento de velocidade para um determinado caudal, aumentando também o valor do número de Reynolds. Já a rugosidade, apesar de ser a mesma da bomba, vai ter um maior impacto neste canal, devido à redução da secção, que afeta diretamente o fator de fricção f. Devido a estes fenómenos, obtém-

se como era de esperar uma maior velocidade e turbulência no canal de escoamento, contrariamente à câmara da bomba.

Bico de injeção

O metal líquido que flui pelo canal de escoamento da bomba, culmina no bico de injeção. O canal deste componente, é composto por uma redução que faz com que o diâmetro passe de 4 para 1,5 mm (Figura 36). Embora pouco pronunciada e de evolução suave, a diminuição do diâmetro vai originar um aumento das pressões e velocidades, que analiticamente se traduz pela Equação 3 e pela equação de *Bernoulli* (Equação 4), e respetivas equações anexas (Equações 5, 6, 7 e 8), aplicadas em locais de diferentes diâmetros. Neste componente, e tal como no canal de escoamento da bomba, os diâmetros e as rugosidades afetam diretamente os regimes de escoamento nas diferentes secções. No entanto, a influência da rugosidade é menor, devido ao tipo de material de que é constituído o elemento. Apesar deste decréscimo, o regime de escoamento aumenta significativamente, devido ao diâmetro.

A redução do diâmetro, implica um aumento de velocidade à saída do bico de injeção. A pressão, por sua vez, decresce em virtude da redução existente. Salienta-se que estas condições são aplicadas para o tipo de bico de injeção utilizado presentemente na máquina. Existem, no entanto, outros tipos de elementos, com diferentes configurações, variando por isso as características do escoamento, mas tendo em comum o princípio físico descrito.

3.8.3 Análise do Arrefecimento e Difusão Térmica

O estudo do arrefecimento e difusão térmica, tem o seu foco na zona que abrange o molde e a sua estrutura, tendo por objetivo compreender a relação existente entre o tipo e quantidade de defeitos que uma peça apresenta, em função do tempo do seu arrefecimento, após a injeção do metal na cavidade moldante. Tem-se em conta, que a possibilidade do desenvolvimento de rechupes aumenta em função do tempo a que a moldação se mantém a temperaturas acima da temperatura de solidificação.

Neste estudo, resolveu-se aplicar uma nova abordagem, baseada no conceito apresentado por *Natti S. Rao* e *Gunter Shumacher* [56] para o processo de obtenção de peças em plástico, uma vez que o processo funciona numa base idêntica, no que se refere ao arrefecimento.

Os autores fundamentam que o calor fornecido ao molde pelo material fundido, é governado pela Equação 9, Tabela 33. [56]

$$Q_w = 10^{-3} * tk * \left(\frac{1}{\lambda_{st} * Se} + \frac{1}{\alpha * 10^{-3} * 2 * \pi * R} \right)^{-1} * (T_w - T(H_2O)) \quad (9)$$

Tabela 33 - Descrição das variáveis e respectivas unidades da equação 9

Símbolo	Descrição	Unidades
Q_w	Calor transferido do metal fundido para o meio de arrefecimento	kJ/m
tk	Tempo de arrefecimento	s
λ_{st}	Condutividade térmica do material do molde	W/(m·K)
Se	Fator de forma	adm
α	Coefficiente de transferência de calor do fluido de arrefecimento	adm
R	Raio dos canais de arrefecimento	mm
T_w	Temperatura de saída do fluido de arrefecimento (água)	°C
$T(H_2O)$	Temperatura de entrada do fluido de arrefecimento (água)	°C

- O fator de forma “Se” é traduzido pela Equação 10, Tabela 34.

$$Se = \frac{2 * \pi}{\ln \left[\frac{2 * x * \sinh \left(\frac{2 * x * y}{x} \right)}{\pi * d} \right]} \quad (10)$$

Tabela 34 - Descrição da equação 10

Símbolo	Descrição	Unidades
Se	Fator de forma	adm
x	Distância entre canais de refrigeração.	mm
y	Distância da superfície de contacto da cavidade ao eixo dos canais de refrigeração.	mm
d	Diâmetro dos canais de refrigeração	mm
\sinh	Função seno hiperbólico	

- Coeficiente de transferência de calor do fluido de arrefecimento “ α ”, é obtido através da Equação 11, Tabela 35.

$$\alpha = \frac{0.031395}{d} * Re^{0.8} \quad (11)$$

Tabela 35 - Descrição da equação 11

Símbolo	Descrição	Unidades
d	Diâmetro dos canais de refrigeração	mm

- Número de Reynolds do fluido de arrefecimento (Água) “Re”, é calculado pela Equação 13, Tabela 36.

$$Re = 10^{-3} * u * \frac{d}{\nu} \quad (12)$$

Tabela 36 – Descrição da equação 12

Símbolo	Descrição	Unidades
u	Velocidade do fluido de arrefecimento	m/s
d	Diâmetro dos canais de arrefecimento	mm
ν	Viscosidade cinemática do fluido de arrefecimento	m ² /s

Por sua vez, o calor retirado ao molde é efetuado pelo líquido de refrigeração utilizado (na maioria dos casos e no presente estudo, água), e que tem por base a Equação 13, Tabela 37.

$$Q_{ab} = 10^{-3} * [(T_m - T_e) * C_{ps} + im] * \rho_m * \frac{S}{2} * x \quad (13)$$

Tabela 37 – Descrição da equação 13

Símbolo	Descrição	Unidades
Q_{ab}	Calor retirado ao molde pelo fluido de refrigeração (água)	kJ/m
T_m	Temperatura do metal no momento de injeção	°C
T_e	Temperatura de desmoldagem	°C
C_{ps}	Calor específico do metal de fundição	kJ/(kg·K)
im	Calor latente de fusão do metal de fundição	kJ/kg
ρ_m	Densidade do metal de fundição	g/cm ³
S	Espessura da cavidade da peça a moldar	mm
x	Distância entre canais de arrefecimento	mm

- O tempo de arrefecimento é obtido pela aplicação da Equação 14, Tabela 38.

$$tk = \frac{s^2}{\pi^2 * a} * \ln \left[\frac{4}{\pi} * \left(\frac{Tw - Ta}{Tw - Tb} \right) \right] \quad (14)$$

Tabela 38 - Descrição da equação 14

Símbolo	Descrição	Unidades
tk	Tempo de arrefecimento	s
Tw	Temperatura constante da placa à superfície	°C
Ta	Temperatura inicial	°C
Tb	Temperatura média da placa no tempo tk	°C
a	Difusibilidade térmica	cm ² /s
s	Espessura da placa	mm

3.8.4 Cálculo da Geometria dos Escapes de Gases

O cálculo dos escapes de gases a implementar nos moldes, segue a regra de acordo com a Equação 15, Tabela 39 [40], e onde de acordo com o autor a velocidade de ventilação Vv deve ter o valor de 0,8 vezes a velocidade do som.

$$Va = \frac{0,5 * Vc}{Cft * Vv} \quad (15)$$

Tabela 39 – Descrição da equação 15

Símbolo	Descrição	Unidades
Va	Área de ventilação	mm ²
Vc	Volume da cavidade	mm ³
Cft	Tempo de enchimento da cavidade	s
Vv	Velocidade da ventilação	mm/s

3.8.5 Programas Desenvolvidos para os Cálculos

Todos os cálculos apresentados neste capítulo, foram compilados para um programa desenvolvido em MATLAB®, com exceção dos cálculos de difusão térmica que foram desenvolvidos em folha de cálculo MS Excel®. Com esta metodologia, podemos abranger qualquer implementação ou alteração que seja necessário efetuar.

3.9 Procedimentos de Análise

3.9.1 Simulações

Software Utilizado

O escoamento no interior dos moldes, foi analisado recorrendo ao programa de simulação FLOWCast®, tendo o estudo incidido nas seguintes grandezas:

- Fração volúmica de ar;
- Turbulência;
- Velocidade.

Parâmetros Globais Aplicados

A Tabela 40, expõe os parâmetros globais aplicados, e a Tabela 41 os parâmetros específicos por referência.

Tabela 40 – Parâmetros e valores utilizados no programa para todos os terminais

Parâmetro	Unidades	Valores
Gerais		
Largura das células	m	0,0003
Metal		
Temperatura do metal	°C	430
Temperatura de referência	°C	387
Coefficiente de transferência de calor do Zamak 5	W/m/K	110
Molde		
Coefficiente de transferência de calor do molde (aço AISI H13)	W/m/K	28,6
Temperatura inicial do molde	°C	95

Tabela 41 – Parâmetros e valores específicos de cada referência

Referência	Parâmetro	Unidades	Valores
12232249	Número de células		46332
	Pressão do metal	KPa	10777,3
	Velocidade do metal	m/s	1,41
	Temperatura de referência	°C	387
	Tempo de enchimento	S	0,35
1224413161-005	Número de células		13440
	Pressão do metal	Pa	17534237
	Velocidade do metal	m/s	0,433
	Temperatura de referência	°C	387
	Tempo de enchimento	s	0,23

3.9.2 Análise Macroscópica dos Provetes

A pesquisa dos provetes tem início com uma análise macroscópica, tendo por objetivo verificar o seu aspeto superficial, de modo a observar a sua cor, brilho, e detetar eventuais defeitos superficiais. Para tal, foram obtidas três amostras de cada referência, tendo em conta as premissas da Tabela 42.

Os resultados foram depois compilados para um relatório, tal como se pode consultar no Anexo 7.

Tabela 42 - Análise Macroscópica focos do estudo

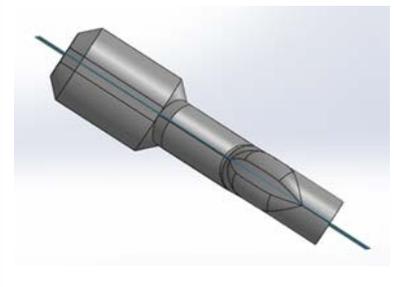
Premissas	Aspetos a análises
- Nº de amostras – 3.	- Cor
- Condições de trabalho normais e de acordo com os parâmetros das referências.	- Brilho
- Obtenção das amostras 2 horas após trabalho contínuo do molde na máquina.	- Defeitos Superficiais

3.9.3 Análise Metalográfica dos Provetes

Recolha de Amostras, Seleção dos Cortes e Preparação dos Provetes

Com as amostras recolhidas, deu-se início à análise da sua secção de corte, começando pelo corte dos provetes segundo os planos indicados nas figuras da Tabela 43, em função de cada referência.

Tabela 43 – Planos de corte nas amostras de cada referência

12232249	1224413161-005
	

A preparação dos provetes para análise decorreu após os cortes efetuados, sendo os mesmos submetidos a um polimento de diferentes granulometrias de lixa, de 500 e 1000 *mesh*, tendo-se no final, utilizado uma suspensão com pó de diamante de 3 μm de modo a conferir um aspeto brilhante à superfície do corte (Figura 76).



Figura 76 - Amostra com polimento efetuado e superfície brilhante

Procedimento de Ensaio

A análise da secção, foi executada com recurso a uma lupa metalográfica, inicialmente com uma pequena ampliação, de modo a obter imagens digitais das superfícies dos cortes, com vista a identificar os respetivos defeitos presentes, e suas áreas de ocorrência (Figura 77). Em seguida, procedeu-se a uma visualização pormenorizada com uma ampliação de x25, com o objetivo de quantificar esses defeitos, de acordo com a norma *Broose 590589-100* (2012) [57].

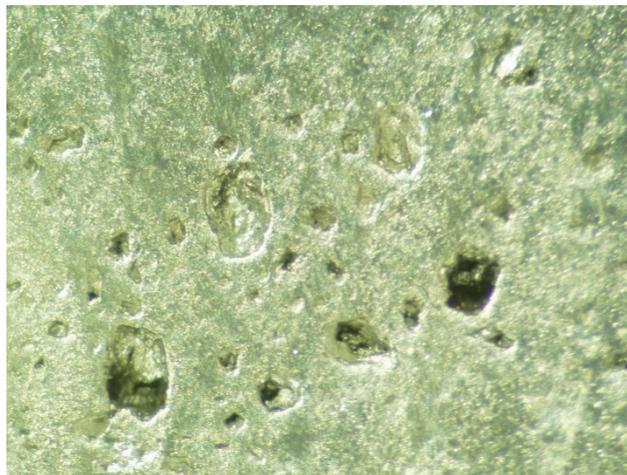


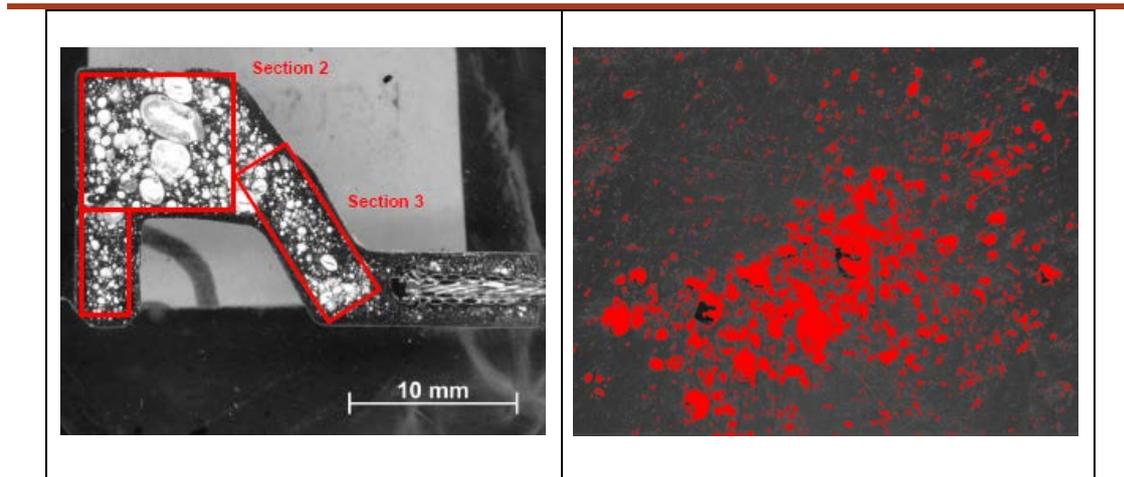
Figura 77 - Imagem ampliada de um plano de corte de um provete, destacando as porosidades e os rechupes

As imagens obtidas, foram analisadas segundo os processos seguidamente descritos:

- Análise visual – objetivo de identificar, de um modo pormenorizado, os tipos de defeitos presentes;
- Análise digital – objetivo de quantificar os defeitos presentes na estrutura.

Neste seguimento, a análise visual focou a identificação das inconformidades presentes nos terminais, e seleção das áreas a analisar, tal como apresentado na Tabela 45. Por sua vez, a quantificação dos defeitos foi realizada com recurso ao programa ImajeJ[®], com imagens dos terminais ampliadas 25x, de acordo com a norma *Broose 590589-100* (2012)[57], apresentadas também na Tabela 44.

Tabela 44 - Seleção e identificação de defeitos nas amostras



3.10 Fase Preliminar de Estudo

3.10.1 Resultados Analíticos do Processo de Injeção

Mecanismo de Atuação

Para conhecer a magnitude das forças aplicadas ao pistão da bomba, é necessário efetuar os cálculos das forças de todo o mecanismo, de acordo com o processo seguidamente descrito nesta secção. A obtenção destes valores é de extrema importância, pois é com eles que por aplicação das fórmulas da mecânica dos fluidos, se vão obter as pressões exercidas pelo êmbolo da bomba ao metal fundido, caracterizando assim todo o processo de enchimento, e obtendo-se parâmetros essenciais para o desenvolvimento de simulações.

1. Cálculo da força exercida pelo pistão, em função da pressão aplicada ao atuador, através da Equação 1 da alínea 3.8.1, onde os valores das variáveis são apresentados na Tabela 45.

- $F_1 = p_1 \times A_1 \Leftrightarrow F_1 = 3972 \text{ N}$

Tabela 45 – Valores das unidades aplicados para o cálculo de F1

Símbolo	Valor	Unidades
p	5	bar
A	0,007854	m^2

- Obtenção da força desenvolvida pela alavanca, por aplicação do somatório dos momentos no ponto de rotação da alavanca, de acordo com a Equação 2 da secção 3.8.1, com os valores apresentados na Tabela 46 e as relações geométricas presentes na Figura 74.

- $\sum M_a = F_1 \times L_1 + F_2 \times L_2 \times \cos \alpha = 0 \Leftrightarrow F_2 = -7622,8 \text{ N}$

Tabela 46 - Valores das unidades aplicados para o cálculo de F2

Símbolo	Valor	Unidades
F_1	3972	N
L_1	0,072	m
L_2	0,040	m
α	37	°

- A partir do conhecimento da força F_2 , obtém-se a pressão aplicada ao êmbolo por aplicação da Equação 1, tendo agora como incógnita a pressão no êmbolo p_2 , e os valores apresentados na Tabela 47:

- $F_2 = p_2 \times A_2 \Leftrightarrow p_2 = 10783420 \text{ Pa}$

Tabela 47 - Valores das unidades aplicados para o cálculo de p2

Símbolo	Valor	Unidades
F_2	7622,8	N
A_2	0,0007069	m^2

Escoamento na Bomba

O cálculo da análise do escoamento da bomba. é efetuado com recurso às expressões presentes na secção 3.8.2, de acordo com a seguinte metodologia:

- Cálculo dos caudais dos terminais, com recurso à Equação 3 e com os valores referenciados na Tabela 48.

- $Q = \frac{V}{t}$

Tabela 48 - Valores das unidades aplicados para o cálculo de Q

Terminal	V (m ³)	t (s)	Q (m ³ /s)
12232249	1012,0 E ⁻⁹	0,35	2,9 E ⁻⁶
1224413161-005	271,53 E ⁻⁹	0,25	1,1 E ⁻⁶

2. Cálculo da pressão à saída do canal de escoamento, com recurso à equação de *Bernoulli* (Equação 4), e respetivas equações auxiliares presentes na alínea 3.8.2 e os valores da Tabela 49.

$$\bullet \frac{p_1}{\rho \times g} + \frac{U_1^2}{2 \times g} + Z_1 = \frac{p_2}{\rho \times g} + \frac{U_2^2}{2 \times g} + Z_2 + hf_1$$

Tabela 49 - Valores das unidades aplicados à equação de Bernoulli

Terminal	p ₁ (Pa)	ρ (kg/m ³)	U ₁ (m/s)	U ₂ (m/s)	Z ₁ (m)	Z ₂ (m)	Hf ₁	p ₂ (Pa)
12232249	10783420	6600	4,102 E-3	0,230	0,075	0,04	0,0034896	10785290
1224413161-005	10783420	6600	1,556 E-3	0,087	0,075	0,04	0,0010618	10785590

- a. Cálculo das velocidades U₁ e U₂; U₁ (câmara da bomba) e U₂ (canal de escoamento da bomba), Equação 5, Tabela 50.

$$\bullet U = \frac{Q}{A}; (U_1 = \frac{Q}{A_1}; U_2 = \frac{Q}{A_2})$$

Tabela 50 - Valores das unidades aplicados para o cálculo de U1 e U2

Terminal	Q (m ³ /s)	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	U ₁ (m/s)	U ₂ (m/s)
12232249	2,9 E ⁻⁶	7,069E ⁻⁴	1,256E ⁻⁵	4,102 E ⁻³	0,230
1224413161-005	1,1 E ⁻⁶	7,069E ⁻⁴	1,256E ⁻⁵	1,556 E ⁻³	0,087

- b. Cálculo das perdas de carga hf, Equação 6, Tabela 51.

$$\bullet hf = \frac{U^2}{2 \times g} \times \left[f \times \frac{L}{di} + \sum K \right]$$

Tabela 51 - Valores das unidades utilizadas para o cálculo de hf da bomba

Terminal	U (m/s)	di (m)	L (m)	f (adm)	K (adm)	hf
12232249	0,230	0,004	0,09	0,0393	0,41	0,0034896
1224413161-005	0,087	0,004	0,09	0,1041	0,41	0,0010618

- c. Valor da relação ε/D , de acordo com a Equação 7, Tabela 52, com ε referente ao aço comercial e com um valor de 0,046.

Tabela 52 – Valores aplicados na obtenção da relação ε/D

Diâmetro Canal (mm)	ε (adm)	ε/D
25	0,046	0,00184
4	0,046	0,01150

- d. Obtenção do regime de escoamento pelo cálculo do número de *Reynolds*, em cada secção de escoamento câmara e canal de escoamento da bomba pela Equação 8, Tabelas 53 e 54.

$$\bullet \quad Re = \frac{\rho \times U \times D}{\mu}$$

Tabela 53 – Valores aplicados no cálculo do número de Reynolds para a câmara da bomba

Terminal	ρ (kg/m ³)	U (m/s)	D (m)	μ (kg/m·s)	Re
12232249	6600	4,102 E-3	0.03	0,003737	217,339
1224413161-005	6600	1,556 E-3	0.03	0,003737	82,4420

Tabela 54 - Valores aplicados no cálculo do número de Reynolds para o canal de escoamento da bomba

Terminal	ρ (kg/m ³)	U (m/s)	D (m)	μ (kg/m·s)	Re
12232249	6600	0,230	0,004	0,003737	1624,83
1224413161-005	6600	0,087	0,004	0,003737	614,610

- e. Aplicando o número de Reynolds e a relação ε/D ao diagrama de Moody do Anexo 5, obtêm-se o valor dos fatores de fricção f presentes na Tabela 55.

Tabela 55 – Valores dos fatores de fricção f obtidos para o cálculo do número de Reynolds

Terminal	ε	D (mm)	ε/D	Re	f
12232249	0,26	30	0,008667	217,339	0,2940
1224413161-005	0,26	30	0,008667	82,4420	0,7760
12232249	0,26	4	0,065000	1624,83	0,0393
1224413161-005	0,26	4	0,065000	614,610	0,1041

- f. Perdas localizadas do sistema da bomba, com os valores aplicados descritos na Tabela 56.

Tabela 56 – Valores aplicados à equação de perdas localizadas para a bomba

d (mm)	D (mm)	K
4	25	0,41

Escoamento no Bico de Injeção

O cálculo do escoamento no bico de injeção, é efetuado com recurso à equação de *Bernoulli* (Equação 4) e à equação da velocidade (Equação 5), com vista a encontrar o valor da velocidade e pressão do metal fundido à saída do bico de injeção, para aplicação nos programas de simulação, com os valores apresentados na Tabela 57.

$$\bullet \frac{p_1}{\rho \times g} + \frac{U_1^2}{2 \times g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho \times g} + \frac{U_2^2}{2 \times g} + z_2 + hf_1$$

Tabela 57 – Valores aplicados na equação de Bernoulli para o bico de injeção

Terminal	p_1 (Pa)	ρ (kg/m ³)	U_1 (m/s)	U_2 (m/s)	Z_1 (m)	Z_2 (m)	hf_1	p_2 (Pa)
12232249	10785290	6600	0,230	1,141	0	0,025	0,03468	10777300
1224413161-005	10785590	6600	0,087	0,433	0	0,025	0,01005	10782430

- a. Cálculo das velocidades U_1 (diâmetro maior) e U_2 (diâmetro menor), Equação 5, Tabela 58.

$$\bullet U = \frac{Q}{A}; (U_1 = \frac{Q}{A_1}; U_2 = \frac{Q}{A_2}), \text{ com } D_2 = 1,8\text{mm}$$

Tabela 58 – Valores utilizados no cálculo das velocidades U_1 e U_2 no bico de injeção

Terminal	Q (m ³ /s)	A_1 (m ²)	A_2 (m ²)	U_1 (m/s)	U_2 (m/s)
12232249	2,9 E-6	1,256E-5	2,54E-6	0,23	1,141
1224413161-005	1,1 E-6	1,256E-5	2,54E-6	0,087	0,433

- b. Cálculo das perdas de carga hf , Equação 6, Tabela 59.

$$\bullet hf = \frac{U^2}{2 \times g} \times \left[f \times \frac{L}{di} + \sum K \right]$$

Tabela 59 - Valores utilizados para o cálculo de hf do bico de injeção

Terminal	U (m/s)	di (m)	L (m)	f (adm)	K (adm)	hf
12232249	1,141	0,0018	0,033	0,0176	0,2	0,03468
1224413161-005	0,433	0,0018	0,033	0,0465	0,2	0,01005

- c. Valor da relação ε/D conforme a Equação 7, com ε referente ao aço comercial e com um valor de 0,046, de acordo com os dados da Tabela 60.

Tabela 60 - Valores aplicados na obtenção da relação ε/D

Diâmetro Canal (mm)	ε (adm)	ε/D
4	0,046	0,0115
2	0,046	0,0255

- d. Obtenção do regime de escoamento pelo cálculo do número de *Reynolds*, através da Equação 8 e valores aplicados de acordo com as Tabelas 61 e 62.

$$\bullet \quad Re = \frac{\rho \times U \times D}{\mu}$$

Tabela 61 - Valores aplicados no cálculo do número de Reynolds no canal de maior diâmetro

Terminal	ρ (kg/m ³)	U (m/s)	D (m)	μ (kg/m·s)	Re
12232249	6600	0,23	0,004	0,003737	1624,83
1224413161-005	6600	0,087	0,004	0,003737	614,610

Tabela 62 - Valores aplicados no cálculo do número de Reynolds no canal de menor diâmetro

Terminal	ρ (kg/m ³)	U (m/s)	D (m)	μ (kg/m·s)	Re
12232249	6600	1,141	0,0018	0,003737	3627,26
1224413161-005	6600	0,433	0,0018	0,003737	1376,51

- e. Aplicando o número de *Reynolds* e a relação ε/D ao diagrama de *Moody* do Anexo 5, obtemos o valor dos fatores de fricção f presentes na Tabela 63 para ambas as referências, e referentes aos diâmetros presentes no bico de injeção, antes e após a redução, tal como na Figura 36.

Tabela 63 - Valores dos fatores de fricção f obtidos para o cálculo do número de Reynolds

Terminal	ε	D	ε/D	Re	f
12232249	0,046	4,0	0,0115	1624,83	0,03938
1224413161-005	0,046	4,0	0,0115	614,610	0,10400
12232249	0,046	2	0,0230	3627,26	0,01760
1224413161-005	0,046	2	0,0230	1376,51	0,04650

- f. Perdas localizadas do sistema da bomba, com os valores aplicados descritos na Tabela 64.

Tabela 64 – Valores aplicados à equação das perdas localizadas no bico de injeção

L (mm)	D (mm)	A (°)	L/D	K
2	1,8	30	1,388	0,2

3.10.2 Simulações do Enchimento dos Moldes

Os resultados de todas as simulações encontram-se descritos nas Tabelas 88 e 89 da secção 3.12, tendo sido executadas com os parâmetros presentes nas Tabelas 40 e 41, e com os valores dos caudais apresentados em 3.10.1 – escoamento da bomba, que são gerais para todo o estudo.

As simulações são apresentadas de acordo com a referência da peça.

Referência 12232249

As simulações para esta referência, relativamente à fração volúmica de ar, turbulência, e velocidade, podem ser observados nas Tabelas 65, 66 e 67.

Tabela 65 – Referência 12232249, Fração volúmica de ar

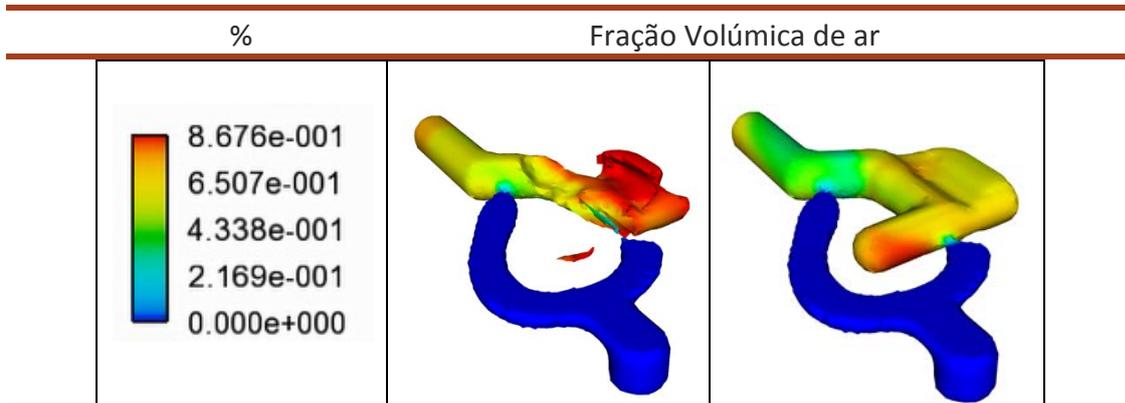


Tabela 66 - Referência 12232249, Turbulência

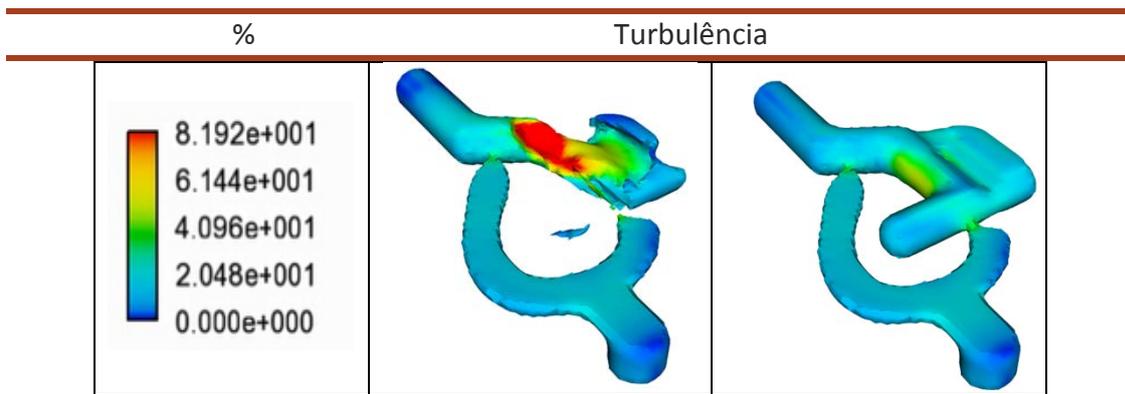
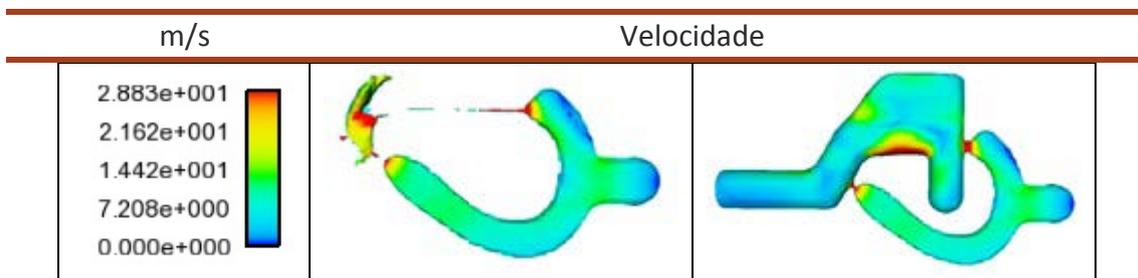


Tabela 67 - Referência 12232249, Velocidade



Referência 1224413161-005

As simulações para esta referência relativamente à fração volúmica de ar, à turbulência, e à velocidade podem ser observados nas Tabelas 68, 69 e 70.

Tabela 68 – Referência 1224413161-005, Fração volúmica de ar

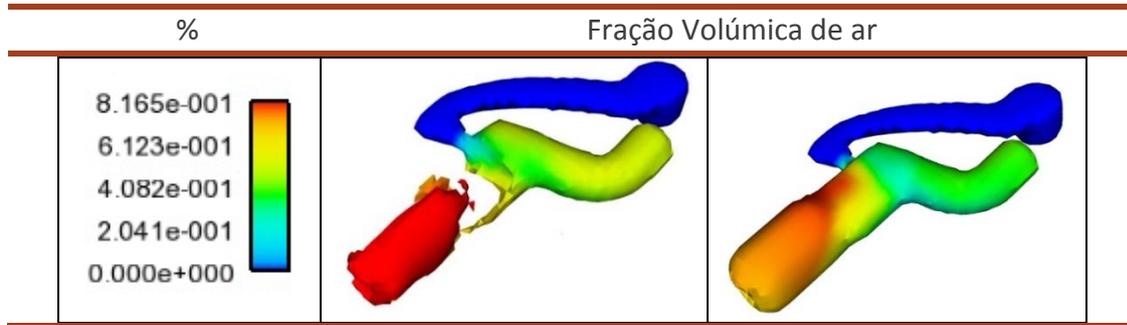


Tabela 69 - Referência 1224413161-005, Turbulência

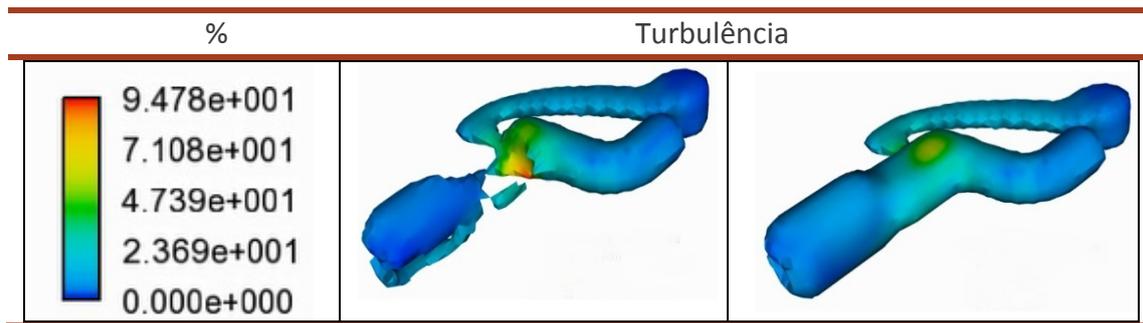
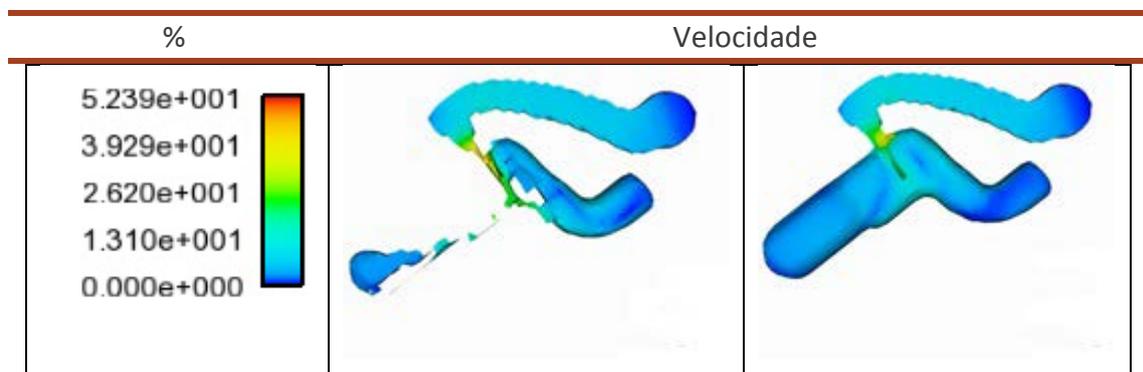


Tabela 70 - Referência 1224413161-005, Velocidade



3.10.3 Análise Macrográfica

Os terminais obtidos de todas as referências, aparentavam a olho nu uma cor cinzenta metálica, com tons que variavam entre claro e o escuro. No entanto, o seu brilho era também variável, dependendo da referência e mesmo do provete em questão, que poderia conter zonas com algum brilho e outras baças (Figura 78).

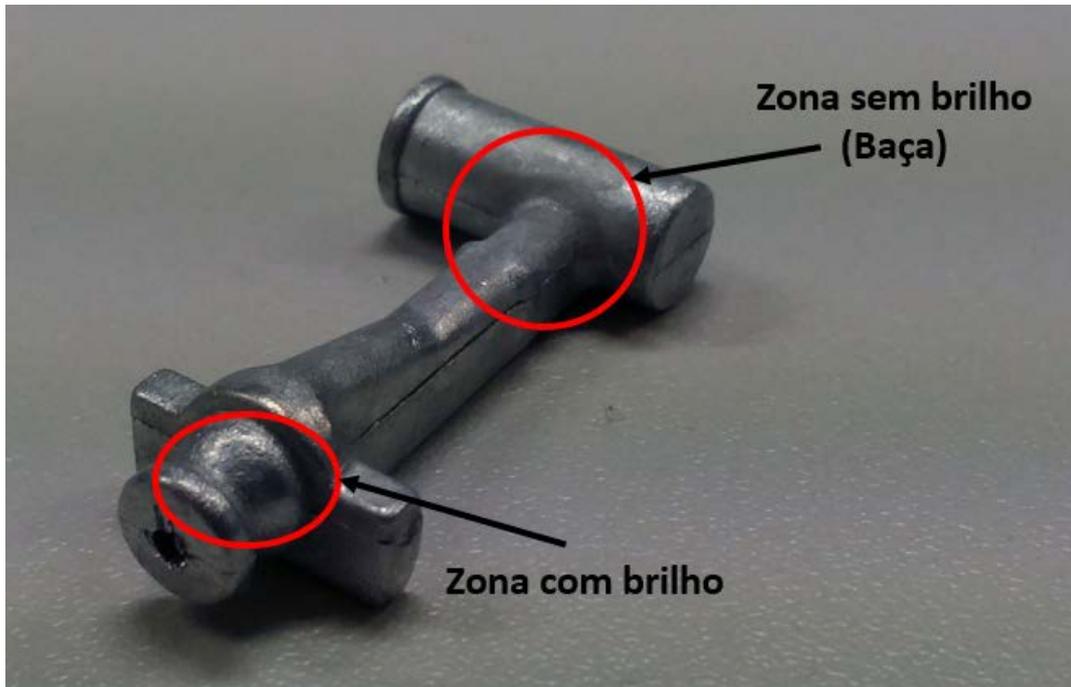


Figura 78 - Provete com distinção de zoneamento relativamente ao brilho

3.10.4 Análise da Superfície de Corte

A análise da superfície de corte foi efetuada de acordo com o procedimento indicado na secção 3.9.3, para os três provetes obtidos de cada referência. Os relatórios de todo o processo encontram-se apresentados na íntegra no Anexo 6, apresentando-se na presente alínea as secções selecionadas em cada referência nas Figuras 79 e 80, e os resultados obtidos nas Tabelas 71 e 72. Foi verificada a existência de um índice de defeitos bem acima do mínimo regulamentado pela norma nas amostras de todas as referências, sejam estes devido ao índice de porosidade, ou à área que determinados poros apresenta, carecendo por isso de uma intervenção no processo de fabrico.

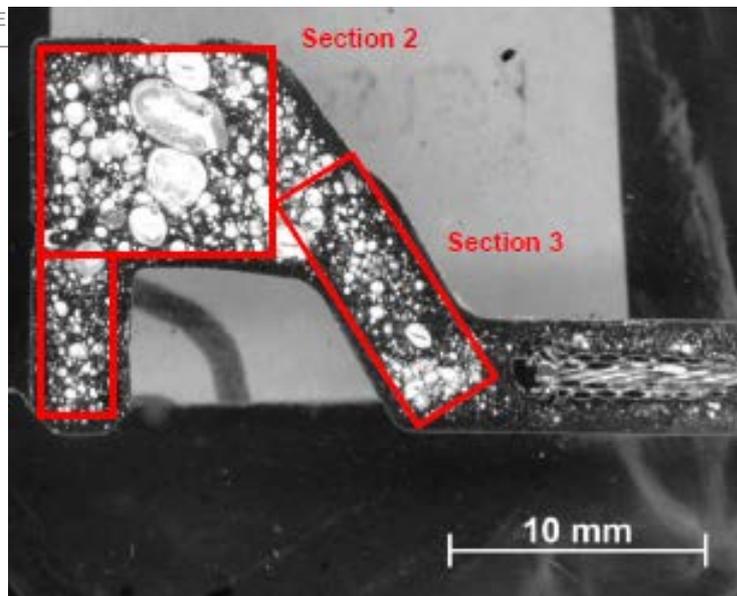


Figura 79 - Áreas a analisar dos provetes da referência 12232249

Tabela 71 – Resultados da porosidade da referência 12232249

12232249	Porosidades (%)		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Secção 1	31,7	11,3	7,70
Secção 2	62,8	8,00	17,0
Secção 3	41,2	6,30	11,7

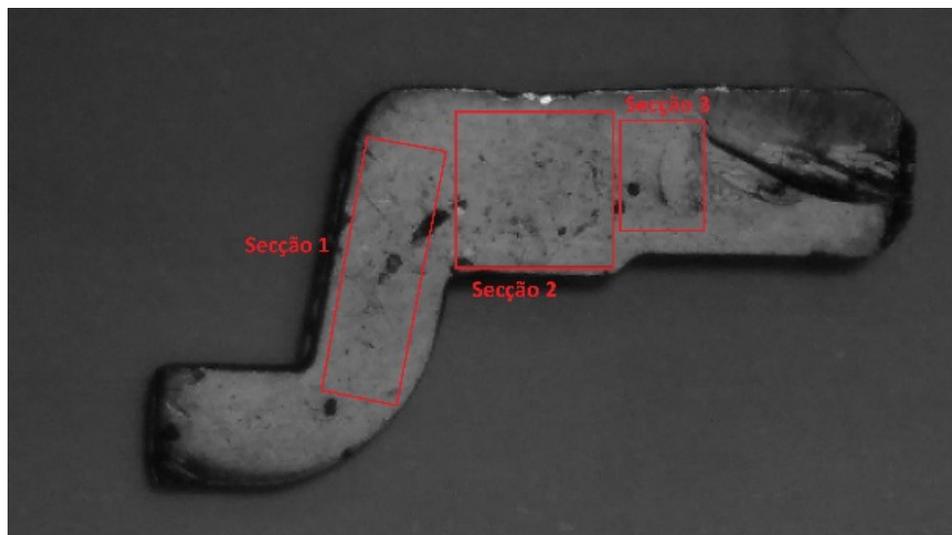


Figura 80 - Áreas a analisar dos provetes da referência 1224413161-005

Tabela 72 – Resultado das porosidades da referência 1224413161-005

1224413161-005	Porosidades (%)		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Secção 1			
Secção 2			
Secção 3			

Secção 1	5,46	4,24	4,52
Secção 2	6,84	4,15	4,26
Secção 3	5,13	11,2	7,30

3.11 Implementação de Melhorias

3.11.1 Gitagem

Analisados os regimes de escoamento e o processo de enchimento dos moldes, deu-se seguimento ao estudo, através da alteração dos sistemas de gitagem destes, que teve intervenção ao nível de:

- Alteração do número de gitos;
- Alteração da geometria de saída dos gitos.

A primeira alteração foi elaborada de modo a evitar regimes turbulentos originados pelas colisões de fluxos, diminuindo assim a entropia do escoamento, e passando este, a ser efetuado por apenas um gito, em vez dos dois iniciais. A segunda alteração, tem em conta a geometria de saída dos gitos. Para tal, foi criado um programa em Matlab®, apresentado no Anexo 9, e que devolve a geometria da saída de gitagem para um determinado escoamento, tendo por base o número de *Reynolds* ideal para determinados caudais e velocidades.

A questão da configuração, verifica restrições ao nível da espessura máxima que a saída de gitagem deve ter, devido à capacidade do mecanismo de corte de gito, desaconselhando-se por isso, espessuras superiores a 1,3 milímetros, fixando-se por isso, este valor como máximo.

Ainda relativamente à configuração, optou-se por uma geometria composta por um retângulo central, variável em largura e altura, e com duas elipses nas suas laterais, fixas em largura, de modo a suavizar o escoamento (Figura 81). Com esta construção podemos obter uma geometria variável em função do caudal pretendido, variando também o gito em função da figura a injetar.

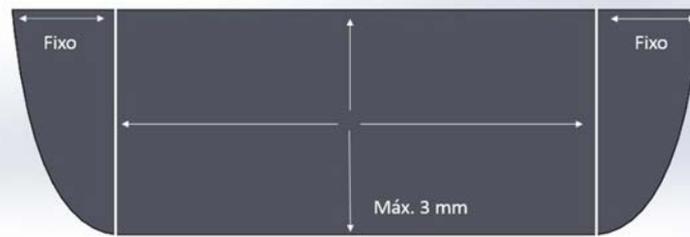


Figura 81 – Configuração e definição dimensional a adotar nos sistemas de gagem

Em relação aos moldes em estudo, os sistemas de gagem foram obtidos por intermédio do programa concebido para o efeito, resultando nas geometrias e nos valores de *Reynolds* (escoamento) e velocidades presentes nas Tabelas 73 e 74, respetivamente. Os pontos de aplicação dos novos sistemas de gagem podem ser verificados no que respeita a cada referência na Tabela 75.

Tabela 73 - Geometrias da secção de saída do sistema de gagem para cada referência

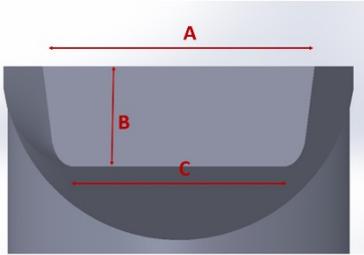
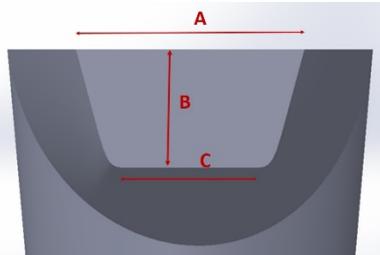
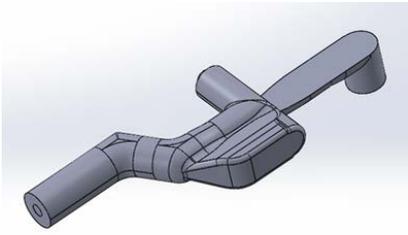
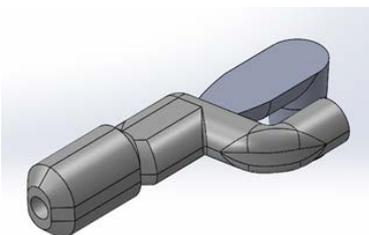
12232249	1224413161-005
	
Area = 4,30 mm ²	Area = 2,78 mm ²
Perímetro = 9,09 mm	Perímetro = 6,89 mm
A = 3,50 mm	A = 2,50 mm
B = 1,30 mm	B = 1,30 mm
C = 2,74 mm	C = 1,50 mm

Tabela 74 - Resultados do escoamento dos novos moldes.

Terminal	ρ (kg/m ³)	U (m/s)	Dh (m)	μ (kg/m·s)	Re
12232249	6600	0,67442	1,8922	0,003737	2253798
1224413161-005	6600	0,95361	1,5837	0,003737	2667205

Tabela 75 – Aplicação dos novos sistemas de gitagem

12232249	1224413161-005
	

3.11.2 Implementação de Escapes de Gases

Para colmatar o problema dos gases remanescentes que continuam aprisionados no líquido metálico, foi decidido criar canais de escape de gases no molde.

O cálculo da secção destes canais segue o modelo da Equação 15 da secção 3.8.4, tendo em conta as características dos terminais apresentadas no capítulo 3.4.3.

A profundidade dos canais varia em função do tipo de metal a injetar. No caso do zinco, esta altura não deve ser superior a $0,1016 \text{ mm}^2$ [40]. Com base nestes valores, a secção deve ter um perfil retangular (Figura 82), variando apenas a sua largura. Na Tabela 76 apresenta-se esta grandeza, tendo sido o volume dos escapes calculado através de da Equação 15, e a largura do escape por divisão do volume pela altura, $0,1016 \text{ mm}$.



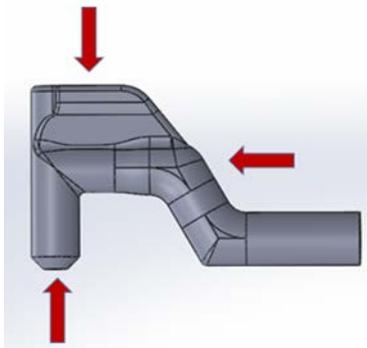
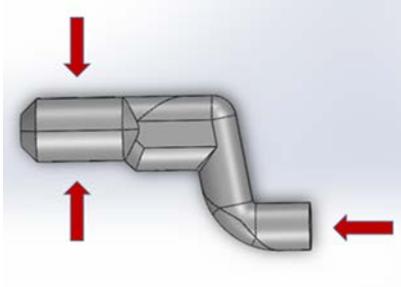
Figura 82 - Forma e dimensões dos escapes de gases aplicados aos moldes

Tabela 76 - Resultados do escoamento dos novos moldes

Terminal	Vescape (mm ²)	Lescape (mm)
12232249	0,0026	0,0255
1224413161-005	0,0013	0,0128

Por outro lado, a colocação dos sistemas de ventilação tem em conta as zonas de maior concentração de gases durante o enchimento. Com base nos ensaios da fração volúmica de ar, apresentados na secção 3.10.2, definiram-se os locais desses canais, tendo em conta as zonas que registaram maior valor quer durante o enchimento, quer no final do ensaio. As zonas seleccionadas podem ser verificadas na Tabela 77, respeitantes a cada terminal.

Tabela 77 – Aplicação dos escapes de gases nos novos *layouts* de cada terminal

12232249	1224413161-005
	

3.11.3 Simulações da Injeção do Novo *Layout*

Referência 12232249

As simulações do novo *layout* para esta referência, relativamente à fração volúmica de ar, à turbulência e à velocidade, podem ser observados nas Tabelas 78, 79 e 80.

Tabela 78 - Resultados da fração volúmica de ar dos novos moldes ref.12232249

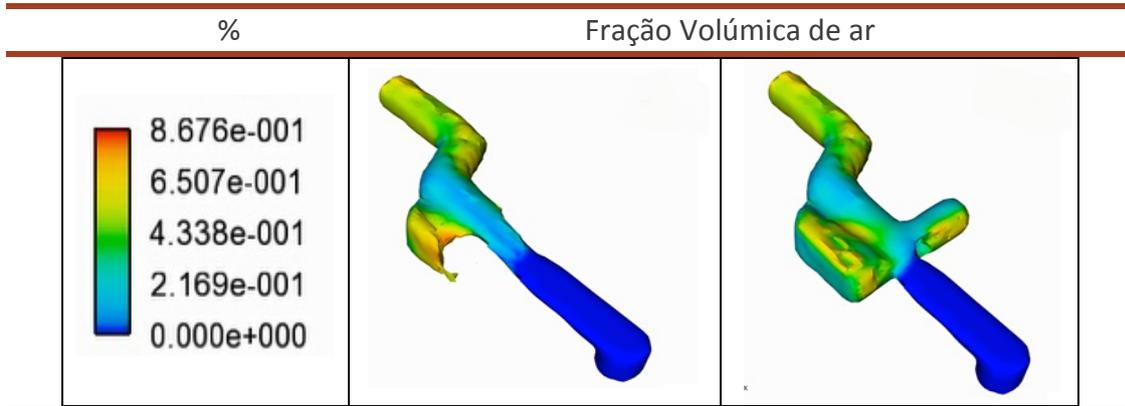


Tabela 79 - Resultados da turbulência dos novos moldes ref.12232249

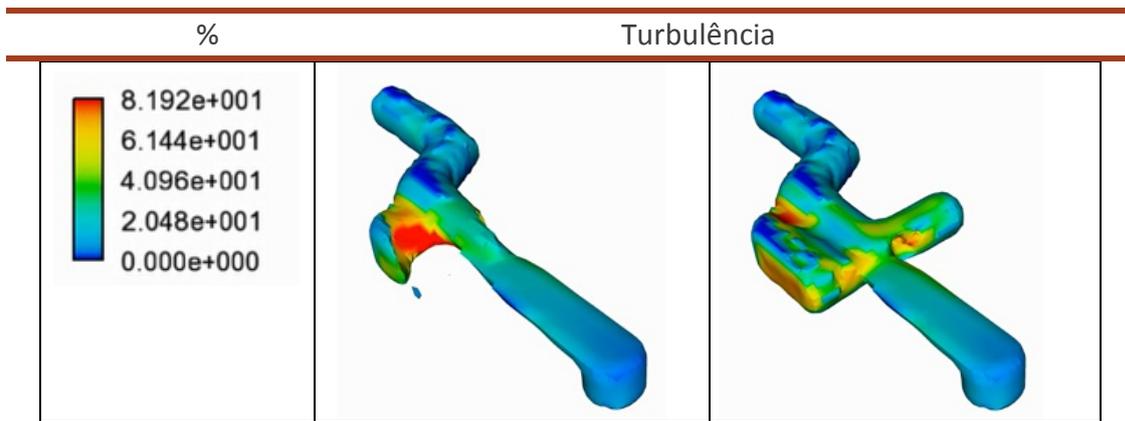
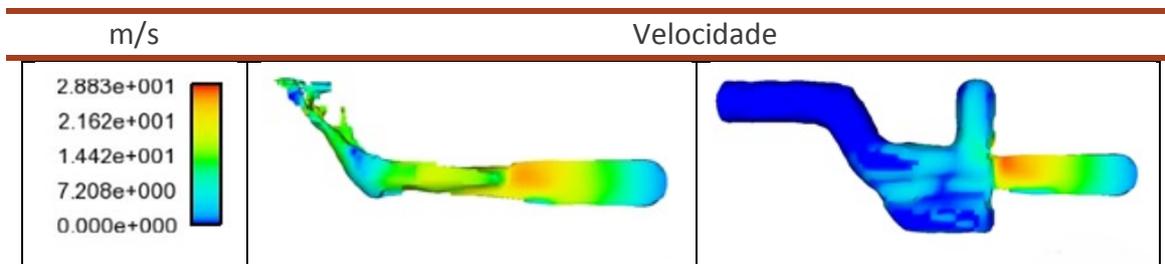


Tabela 80 - Resultados da velocidade dos novos moldes ref.12232249



Referência 1224413161-005

As simulações do novo *layout* para esta referência, relativamente à fração volúmica de ar, à turbulência, e à velocidade, podem ser observados nas Tabelas 81, 82 e 83.

Tabela 81 - Resultados da fração volúmica de ar dos novos moldes ref.1224413161-005

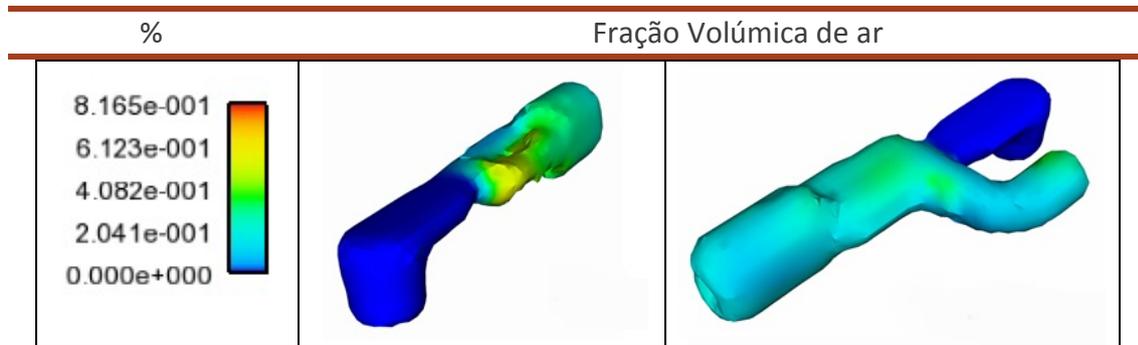


Tabela 82 - Resultados da turbulência dos novos moldes ref.1224413161-005

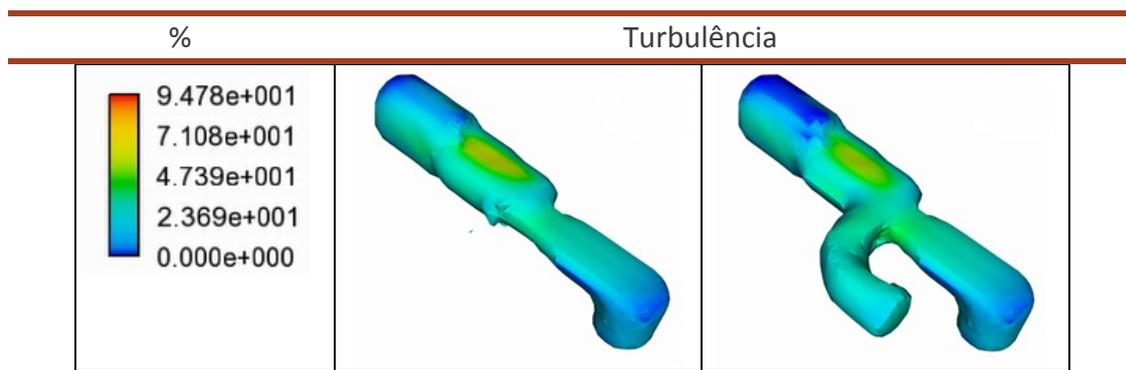
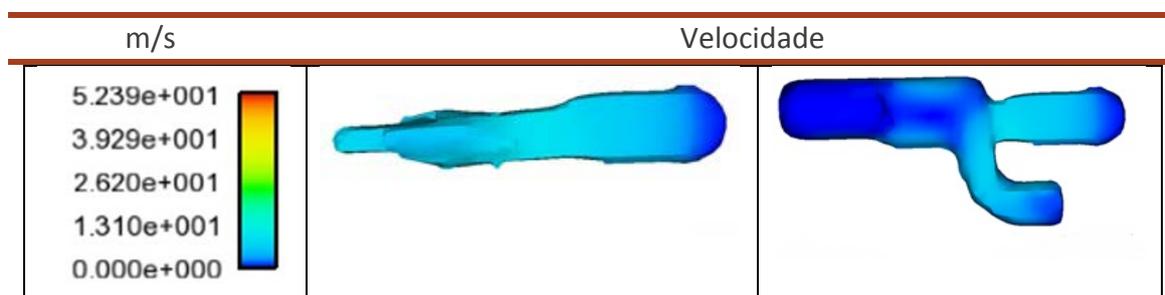


Tabela 83 - Resultados da velocidade dos novos moldes ref.1224413161-005



3.12 Análise Crítica Global

Uma análise pormenorizada aos modelos de escoamento obtidos, permite verificar melhorias após as implementações efetuadas, nomeadamente, no que respeita à quantidade de ar retido na moldação e velocidades do fluido. Por outro lado, observa-se um aumento dos valores da turbulência, como demonstrado nas Tabelas 84 e 85, referentes à comparação dos valores máximos atingidos nos ensaios, antes e após as alterações efetuadas. Sublinha-se, no entanto, que estes valores de pico apenas servem como mera orientação, uma vez que em determinados casos, um valor máximo numa zona pontual pode ser acompanhado por valores bem mais baixos na restante porção da peça, como se observa na Tabela 86, referente à referência 12232249. Torna-se portanto necessário, examinar o enchimento em todo o seu intervalo. É aconselhável uma consulta dos ensaios descritos no capítulo 3. No entanto, o padrão acima descrito é válido para os resultados das três referências, ou seja, é observada uma diminuição significativa da percentagem de ar retido, acompanhada por uma diminuição da velocidade, podendo ambos os fenómenos estar relacionados pela diminuição da percentagem de ar que é transportado em frente à massa de fluido, dando pois tempo para o ar se dissipar.

Tabela 84 – Comparação do resultado dos escoamentos da referência 12232249

12232249	Antes Implementações	Após Implementações
Fração volúmica de ar (%)	0,8876	0,6507
Turbulência (%)	61	81
Velocidade (m/s)	28,8	7,20

Tabela 85 - Comparação do resultado dos escoamentos da referência 1224413161-005

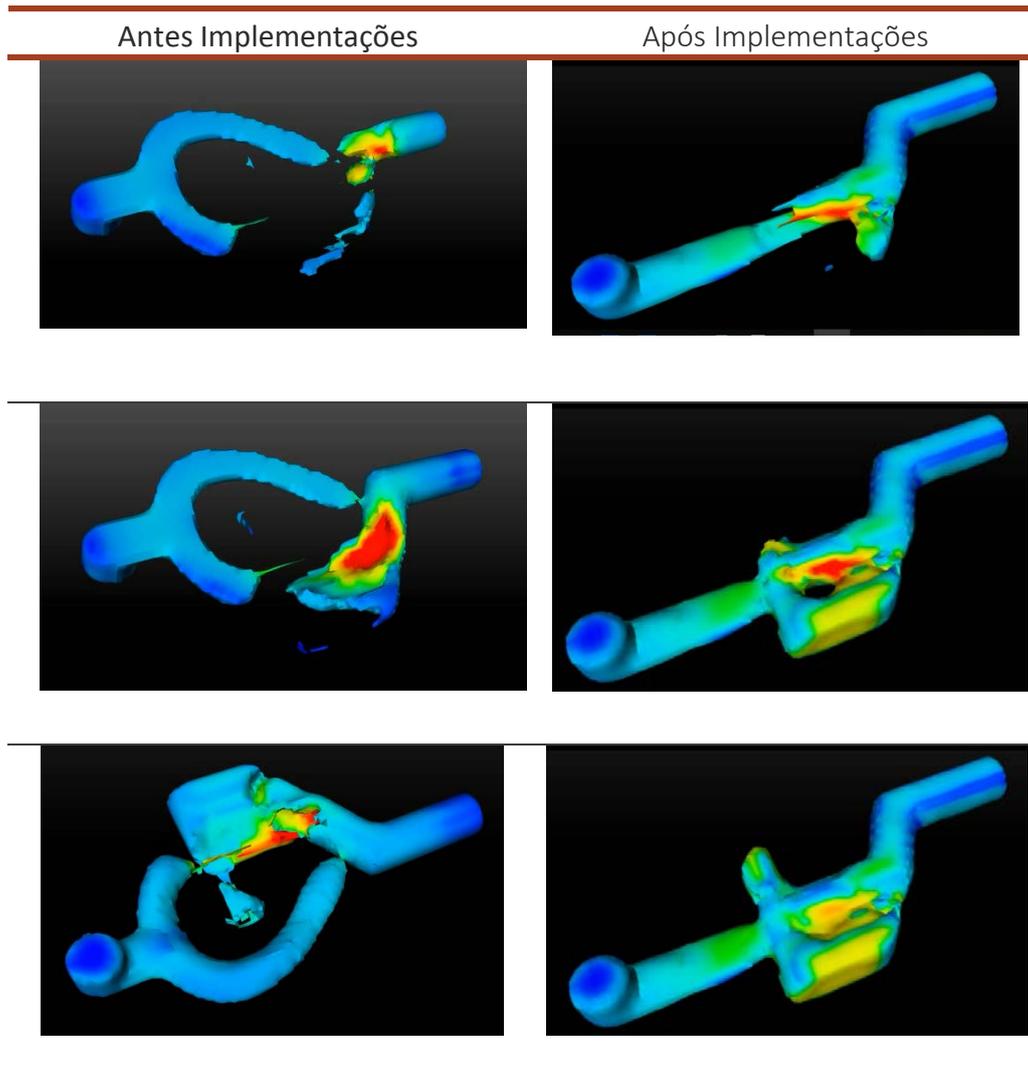
1224413161-005	Antes Implementações	Após Implementações
Fração volúmica de ar (%)	0,8165	0,4850
Turbulência (%)	71,08	60,00
Velocidade (m/s)	15	12

Relativamente ao aumento da turbulência, este aumento explica-se pelo facto de a turbulência não depender unicamente da velocidade, mas sim das características do escoamento que se encontram relacionadas com a topologia da peça, ou seja, das correntes de fluido que chocam entre si consoante o seu trajeto. Este fenómeno pode ser verificado na Tabela 90, que compara os escoamentos da referência 12232249 nas duas implementações, e onde se pode observar que os picos de turbulência máxima ocorrem com o mesmo valor, embora em zonas diferentes, consoante a localização dos gitos, sendo que no primeiro caso a sua permanência ao longo do enchimento é mais prolongado. Quanto à velocidade, apesar de ter um efeito preponderante na

turbulência, a mesma é ainda considerada bastante elevada, para que o seu contributo para o fenómeno não seja considerado importante.

Num âmbito global, e com base nos ensaios até agora efetuados, podem-se considerar positivas as alterações implementadas, prosseguindo-se com as mesmas.

Tabela 86 - Exemplo do escoamento da referência 12232249 antes e após melhorias implementadas



VALIDAÇÃO DA REFERÊNCIA DA CONTROLO

4.1 ALTERAÇÕES AO PROJETO

4.2 ESTUDO ANALÍTICO

4.3 ANÁLISE DO ESCOAMENTO

4.4 ANÁLISE MACROGRÁFICA

4.5 ANÁLISE METALOGRÁFICA

4.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4 Validação da Referência de Controlo

Com base nos estudos efetuados, a empresa decidiu prosseguir com o fabrico de um molde para ensaios, de modo a validar os resultados obtidos e, ao mesmo tempo, tentar colmatar as deficiências recorrentes que eram usuais nessa mesma referência. Por motivos orçamentais, apenas foi possível validar uma referência, recaindo a escolha para o projeto W109, com o número 12232249.

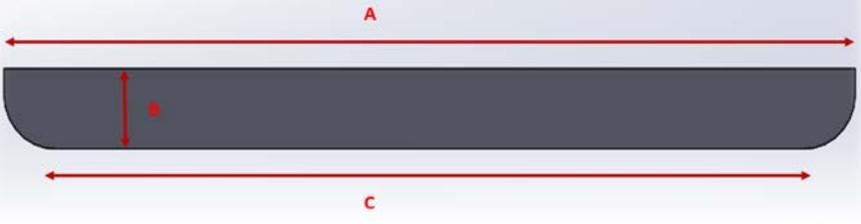
4.1 Alterações ao Projeto

Apesar de os resultados apresentados no capítulo 3, o responsável da empresa pelo projeto resolveu efetuar alterações ao desenho, tomando como valores mínimos a área da secção de gitagem, a secção dos escapes de gases, e a placa do molde onde estes serão impressos. Também ao nível do material de construção, as placas foram alteradas, tendo sido fabricadas no aço *Uddeholm Unimax*, um aço ao crómio-molibdénio-vanádio (especificações no Anexo 9), com um maior coeficiente de difusão térmica, de modo a facilitar o escoamento térmico e diminuir o número de defeitos criados pelo fenómeno “rechupes”. Nas secções seguintes, descrevem-se as alterações efetuadas a estes elementos, comparando-os com os valores tomados inicialmente como referência.

4.1.1 Secção de Gitagem

A área da secção de gitagem foi alterada de acordo com a Tabela 87, contemplando um aumento de 14% relativamente ao valor de referência da secção 3.11.1. Na mesma tabela pode-se verificar o corte da nova secção aplicada.

12232249



Area = 5,50 mm²

Perímetro = 16,99 mm

Diâmetro Hidráulico (Dh) = 1,294879 mm

A = 8 mm

B = 0,70 mm

C = 7 mm

Tabela 87– Área de secção de gitagem projetada para o molde 12232249

4.1.2 Escapes de Gases

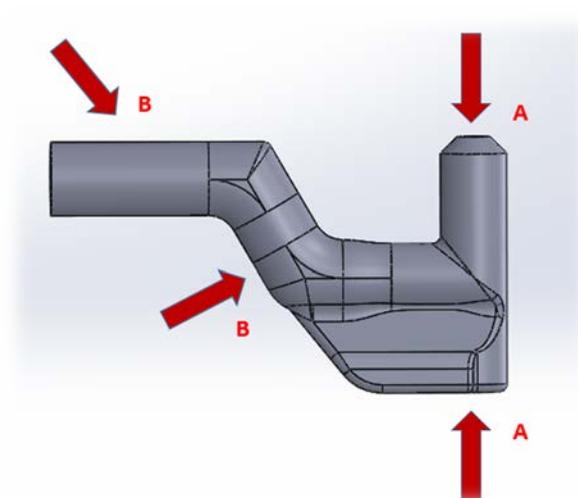
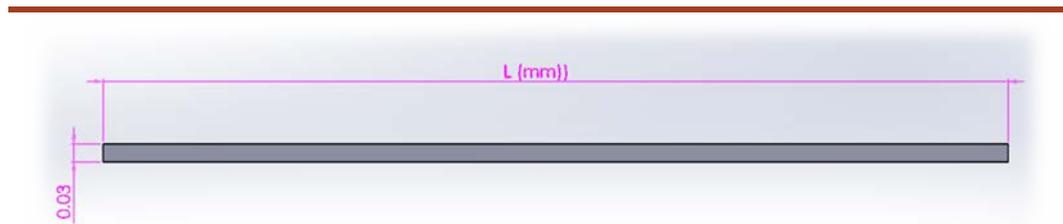


Figura 83 – Localização dos escapes de gases

Também se efetuaram alterações nas secções dos escapes de gases, aumentando o seu número para quatro canais (Figura 83), criando-se dois tipos de áreas diferentes, de acordo com a imagem e as dimensões da Tabela 88.

Tabela 88 – Área de secção dos escapes de gases do novo projeto 12232249



Tipo de Área	Vescape (mm ²)	Lescape (mm)
A	0,05	1,5
B	0,08	2,5

4.2 Estudo Analítico

O estudo analítico do escoamento do novo molde, foi executado com recurso ao programa realizado para o efeito (anexo 9), utilizando os valores apresentados na Tabela 93, e para o mesmo caudal referente a este terminal. Caracterizou-se assim a nova velocidade e escoamento, com base nas Equações 3 e 8. Os resultados obtidos são também exibidos na Tabela 89.

Tabela 89 – valores dos novos parâmetros utilizados na análise analítica do escoamento

Terminal	ρ (kg/m ³)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	Dh (m)	μ (kg/m·s)	Re
12232249	6600	2,9 E-6	0,52728	1,29488	0,003737	1205828

4.3 Análise do Escoamento

Com as novas alterações implementadas, efetuaram-se novas análises ao escoamento do novo molde, utilizando os mesmos valores das Tabelas 40 e 41 da secção 3.9.1. As simulações para a referência 12232249 relativamente à fração volúmica de ar, à turbulência e à velocidade, podem ser observados nas Tabelas 90, 91 e 92.

Tabela 90 - Resultados da simulação da fração volúmica de ar do molde de controlo da ref.12232352

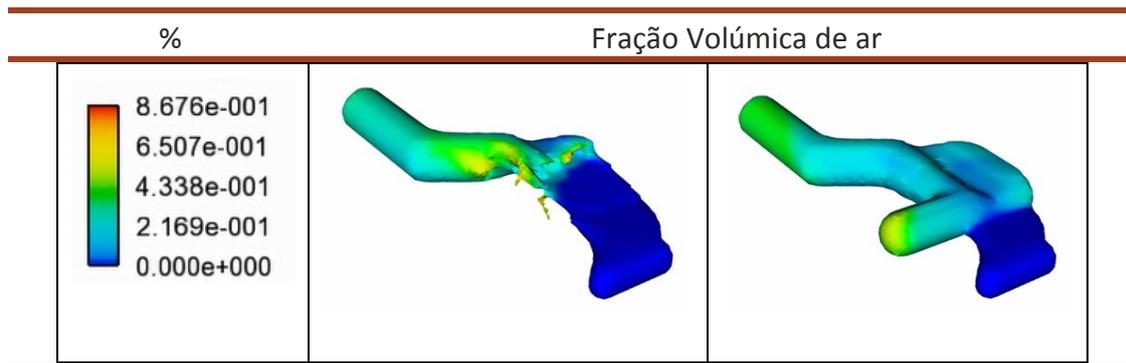


Tabela 91 - Resultados da simulação da turbulência do molde de controlo da ref.12232352

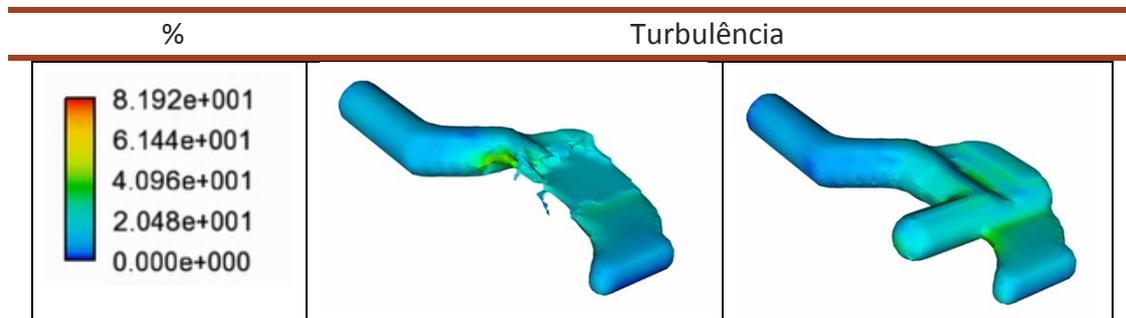
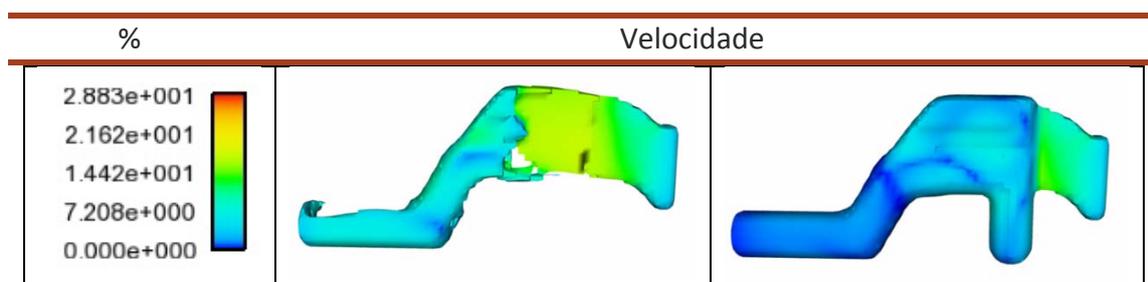


Tabela 92 - Resultados da simulação da velocidade do molde de controlo da ref.12232352



4.4 Análise Macrográfica

A análise visual a olho nu aos novos provetes (Figura 84), verificou que todas as amostras obtidas aparentavam uma cor cinza metálica com aspeto brilhante e macias ao tato, indicando por isso que as peças continham provavelmente um baixo nível de porosidades, e justificando as alterações introduzidas aos moldes.



Figura 84 - Análise visual dos provetes do molde melhorado

4.5 Análise à Superfície de Corte

Após injeção *in-situ* do novo molde, recolheram-se três amostras, tendo sido analisadas pelo mesmo processo da norma *Broose* 590589-100 (2012) [74] descrito na alínea 3.9.3 – Procedimento de Ensaio. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 85 e na Tabela 93. Para uma verificação mais aprofundada, consultar o Anexo 6.

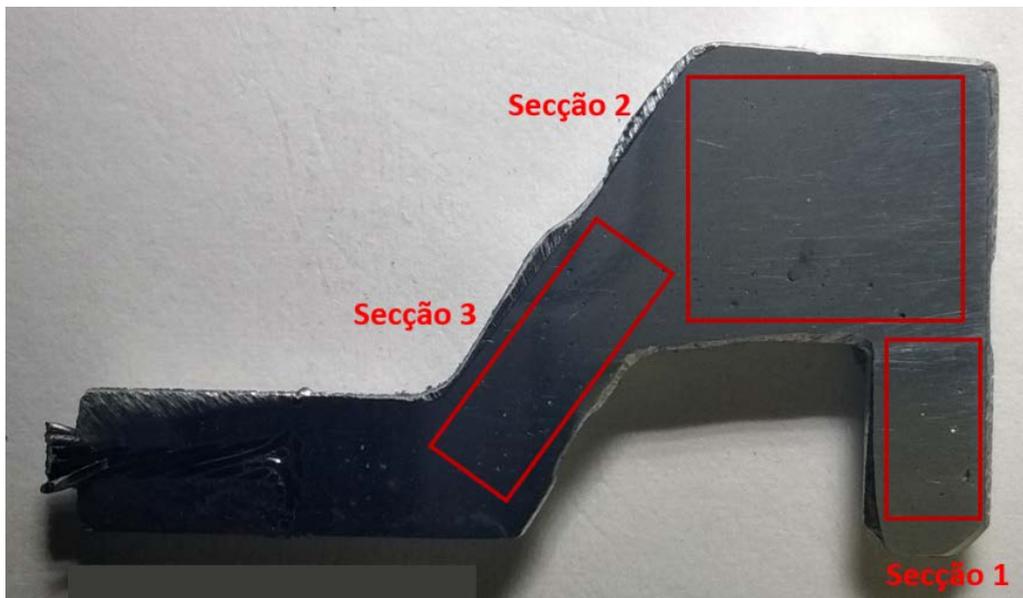


Figura 85 - Áreas a analisar dos provetes do molde de controlo

Tabela 93 – Resultados das análises de porosidades do molde de controlo

12232249 Executado	Porosidades (%)		
	Amostra	Amostra	Amostra
	1	2	3
Secção 1	8,5	3,3	4,0
Secção 2	1,7	2,8	2,3
Secção 3	4,8	5,4	5,8

4.6 Discussão dos Resultados

No que respeita aos escoamentos, verifica-se uma melhoria significativa e geral em todos os aspetos, tal como indica a Tabela 94. Tanto a percentagem de ar retido na moldação, como a turbulência e a velocidade, diminuíram significativamente, não só no valor máximo atingido, mas também ao longo de todo o enchimento, o que vem sustentar a teoria de que o índice de porosidades está interligado com a característica do escoamento. A razão para uma descida dos valores da turbulência, tem a ver com a percentagem da massa de metal injetado (Tabela 91), uma vez que a alimentação é efetuada com um maior caudal, que preenche a peça de um modo mais uniforme e sem a criação de correntes com fricções elevadas, que promovem aquele fenómeno. A diminuição da turbulência, também é ajudada pela diminuição da velocidade, que contribui para um valor do número de *Reynolds* menor, logo, um escoamento mais próximo do laminar.

Tabela 94 - Comparação de resultados no molde de controlo

12232249	Antes Implementações	Implementação Teórica	Implementação Prática
Fração volúmica de ar (%)	0,8876	0,6507	0,4338
Turbulência (%)	61	81	38
Velocidade (m/s)	28,8	7,20	7,20

Comparando os resultados obtidos, tanto dos valores finais do enchimento como dos índices de porosidades, verifica-se que se obteve uma melhoria significativa no que respeita à fração volúmica e turbulência, melhoria esta sustentada pelos índices de porosidade obtidos nas análises micrográficas e expostos em gráficos (Figura 86 e Figura 87), que indicam uma diminuição desse índice em todos os provetes, assegurando por isso, a validação dos estudos.

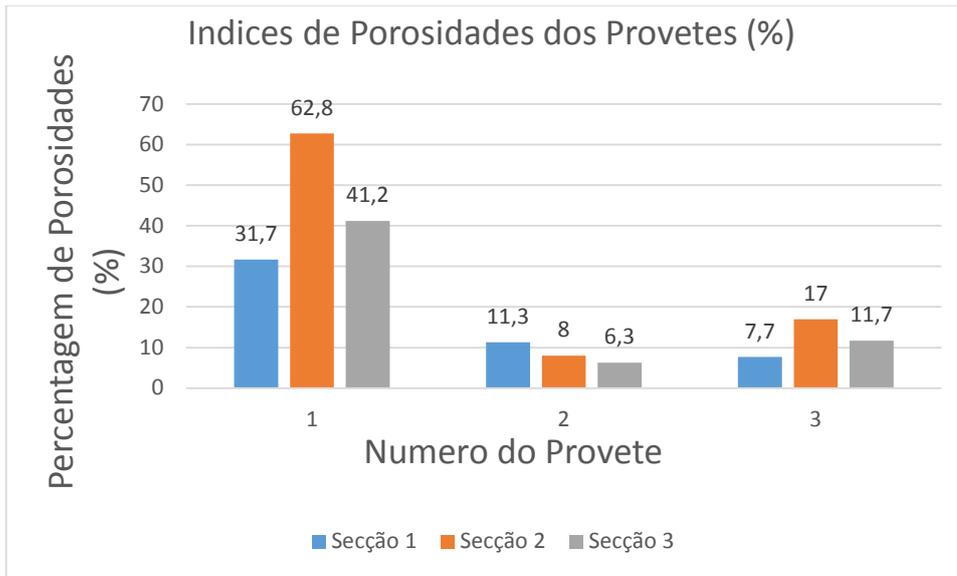


Figura 86 - Índice de porosidades obtido nos provetes iniciais

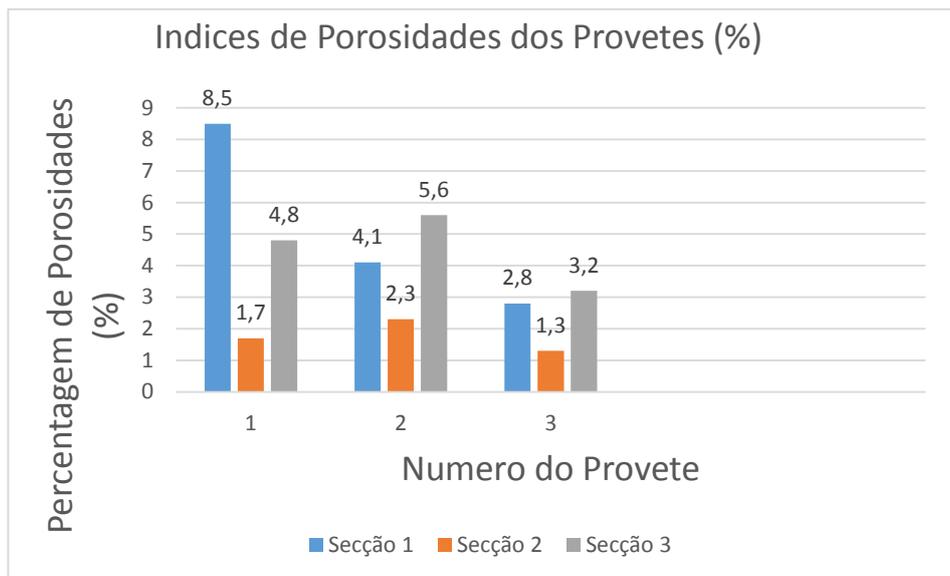


Figura 87 - Índice de porosidades obtidos nos provetes do molde aperfeiçoado

ESTUDO DA DIFUSÃO TÉRMICA PELO PROCESSO DE NATTI GUNTER

5.1. MÉTODO ANALÍTICO

5 Estudo da Difusão Térmica pela Aplicação da Teoria de Natti e Gunter

O estudo elaborado até ao momento tinha por finalidade a melhoria das peças produzidas, no que respeita às porosidades gasosas e rechupes. No entanto, apesar de o primeiro caso estar garantido, o segundo já carece de novas medidas, de modo a atingir a otimização. Para tal, recorreu-se a uma nova abordagem ao estudo térmico, tendo por base o conceito utilizado na injeção plástica por *Natti S. Rao* e *Gunter Shumacher* [56], e aplicado à injeção de metal fundido. A pesquisa baseia-se assim nas fórmulas propostas pelos dois autores, para determinar parâmetros de arrefecimento, nomeadamente a distância a que o escoamento térmico deve ser efetuado, de modo a evitar o aparecimento dos defeitos característicos deste processo.

Este capítulo, tem por finalidade aplicar as fórmulas de arrefecimento desenvolvidas por estes autores, apresentadas na secção 3.8.3, respeitante ao arrefecimento das ligas metálicas, e avaliar de que forma é que a alteração de determinadas propriedades e características dos moldes influencia este fenómeno, com vista a desenvolver novos métodos e soluções para a otimização dos mesmos.

5.1 Método Analítico

5.1.1 Descrição do Método de Análise

A teoria de Natti e Gunter tem por base as equações apresentadas na secção 3.8.3, e o princípio de que, o equilíbrio térmico que o calor inserido no molde pelo metal fundido, terá de ser igual ao que é retirado da cavidade por intermédio do fluído de refrigeração (Figura 88), de acordo com a igualdade traduzida pela Equação 16.

$$Q_{\text{entra}} = Q_{\text{sai}} \Leftrightarrow Q_{\text{ab}} = Q_{\text{w}} \quad (16)$$

Relembrando que a variável t_k apresentada na expressão Q_w , representa o tempo necessário para atingir determinada temperatura de ejeção, e que as restantes variáveis apresentadas na Tabela 95, definem as características e propriedade “ λst ” do molde, pretende-se com isto caracterizar o comportamento do arrefecimento, em função da alteração dessas variáveis e propriedade.

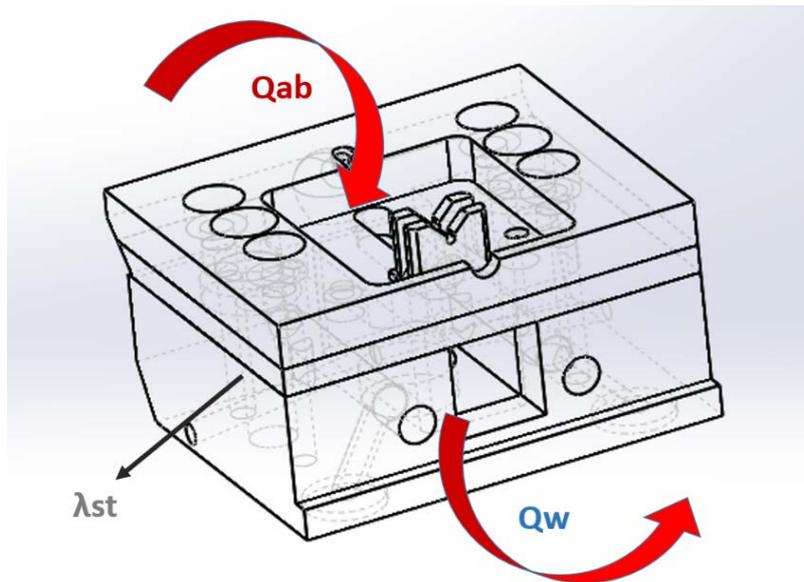


Figura 88 - Transferência de calor na estrutura de um molde

Tabela 95 – Características e propriedade λ_{st} a aplicar ao molde em estudo

Símbolo	Descrição	Unidades
λ_{st}	Condutividade térmica do material do molde	W/(m·K)
x	Distância entre canais de refrigeração	mm
y	Distância da superfície de contacto da cavidade ao eixo dos canais de refrigeração	mm
d	Diâmetro dos canais de refrigeração	mm

O princípio de desenvolvimento, tem assim por objetivo obter o tempo de arrefecimento necessário “ t_k ”, para retirar o o calor inserido pelo metal fundido “ Q_{ab} ” até à temperatura de ejeção pretendida “ T_w ”. Fazendo variar as dimensões d , x e y (Figura 89), e a condutividade térmica do material “ λ_{st} ” do molde. Uma vez que as dimensões têm impacto direto na obtenção do valor do fator de forma “ Se ”, e a condutividade térmica diretamente no calor extraído “ Q_w ”.

O valor do tempo de arrefecimento, é obtido igualando a Equação 16, e resolvendo as Equações 9 e 13 em ordem a “ t_k ”, atribuindo o fator de forma “ Se ” para uma placa. Efetuaram-se ainda estas duas operações para dois valores diferentes de λ_{st} , 29 W/(m·K) referentes ao aço Aisi H-13 e 45 W/(m·K), para um aço com melhor condutividade. Estes cálculos foram traduzidos em forma de tabelas e gráficos, podendo os primeiros serem consultados na íntegra no Anexo 7. Nas Tabelas de 104 à

108 da alínea 5.1.3, apresentam-se os resultados para uma compreensão e conclusão mais expedita.

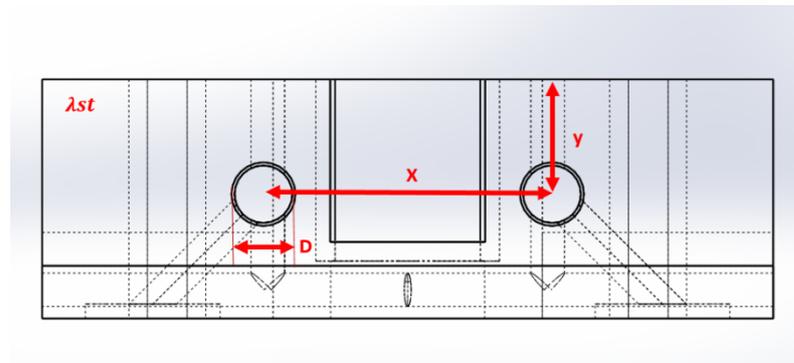


Figura 89 - Descrição das variáveis da estrutura dos moldes para caracterização dos cálculos

5.1.2 Parâmetros Utilizados nos Cálculos

Os parâmetros e os respectivos valores utilizados para efetuar os cálculos, encontram-se apresentados nas tabelas de 96 e 97.

Tabela 96 – Valores aplicados na equação Qab

Símbolo	Valor	Unidades
T_m	430	°C
T_e	120	°C
C_{ps}	0,39	kJ/(kg·K)
im	130	kJ/kg
ρ_m	6,6	g/cm ³
S	5	mm
x	25	mm

Tabela 97 – Valores aplicados na equação Qw

Símbolo	Descrição	Unidades
λ_{st}	Variável	W/(m·K)
S_e	Variável	adm
α	23324,214	(W/(m ² ·k))
R	2,5	mm
T_w	95	°C
$T(h_2o)$	17	°C

5.1.3 Apresentação dos Resultados

Os resultados obtidos no estudo em função dos valores apresentados nas tabelas 96 e 97, encontram-se apresentados nas tabelas de 98 a 102.

Tabela 98 – Resultados dos ensaios para: $\lambda_{st} = 29 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; $D = 5 \text{ mm}$; $y = 10 \text{ mm}$

$\lambda_{st} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	D (mm)	x (mm)	y (mm)	tk (s)
29	5	10	10	46,08
29	5	15	10	33,78
29	5	20	10	28,24
29	5	25	10	25,25
29	5	30	10	23,47
29	5	35	10	22,32

Tabela 99 – Resultados dos ensaios para: $\lambda_{st} = 29 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; $D = 10 \text{ mm}$; $y = 10 \text{ mm}$

$\lambda_{st} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	D (mm)	x (mm)	y (mm)	tk (s)
29	10	10	10	41,04
29	10	15	10	28,73
29	10	20	10	23,19
29	10	25	10	20,21
29	10	30	10	18,42
29	10	35	10	17,27

Tabela 100 – Resultados dos ensaios para: $\lambda_{st} = 29 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; $D = 5 \text{ mm}$; $y = 25 \text{ mm}$

$\lambda_{st} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	D (mm)	x (mm)	y (mm)	tk (s)
29	5	10	25	75,21
29	5	15	25	52,54
29	5	20	25	41,61
29	5	25	25	35,28
29	5	30	25	31,23
29	5	35	25	28,44

Tabela 101 - Resultados dos ensaios para: $\lambda_{st}=29 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; $D = 5 \text{ mm}$; $y = 30 \text{ mm}$

$\lambda_{st} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	D (mm)	x (mm)	y (mm)	tk (s)
29	5	10	30	137,6
29	5	15	30	94,79
29	5	20	30	74,01
29	5	25	30	61,91
29	5	30	30	54,08
29	5	35	30	48,67

Tabela 102 – Resultados dos ensaios para : $\lambda_{st}=45 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; $D=10 \text{ mm}$; $y=10 \text{ mm}$

$\lambda_{st} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	D (mm)	x (mm)	y (mm)	tk (s)
45	10	10	10	27,73
45	10	15	10	19,80
45	10	20	10	16,23
45	10	25	10	14,31
45	10	30	10	13,16
45	10	35	10	12,42

5.1.4 Discussão dos Resultados

Para facilitar a compreensão da leitura dos resultados, e obter conclusões de uma maneira expedita, devido ao elevado número de tabelas obtidas, resolveu-se criar gráficos de comparação dos resultados, apresentados nas tabelas do Anexo 10. Foram então criados quatro gráficos de linhas (Figuras 90, 91, 92 e 93), comparando valores que variam em função da condutibilidade térmica para $\lambda_{st} = 29 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ e $45 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, diâmetro ($d = (5 \text{ mm}; 10 \text{ mm})$), e variando consecutivamente os valores da distância entre canais de arrefecimento “x”, e distância à superfície dos moldes “y”. O objetivo foi tirar conclusões acerca do comportamento do tempo de transferência do calor introduzido nos moldes “tk”, em função destas propriedades e características. As setas a vermelho nos gráficos dão-nos a indicação da variação das linhas.

Salienta-se que o estudo efetuado teve em conta apenas dois valores de condutibilidade térmica “ λ_{st} ”, pelo facto de serem os dois aços existentes para a execução dos moldes. Também o diâmetro é limitado a apenas dois valores, devido à impossibilidade de criar canais nas estruturas, com diâmetros superiores a 10 mm.

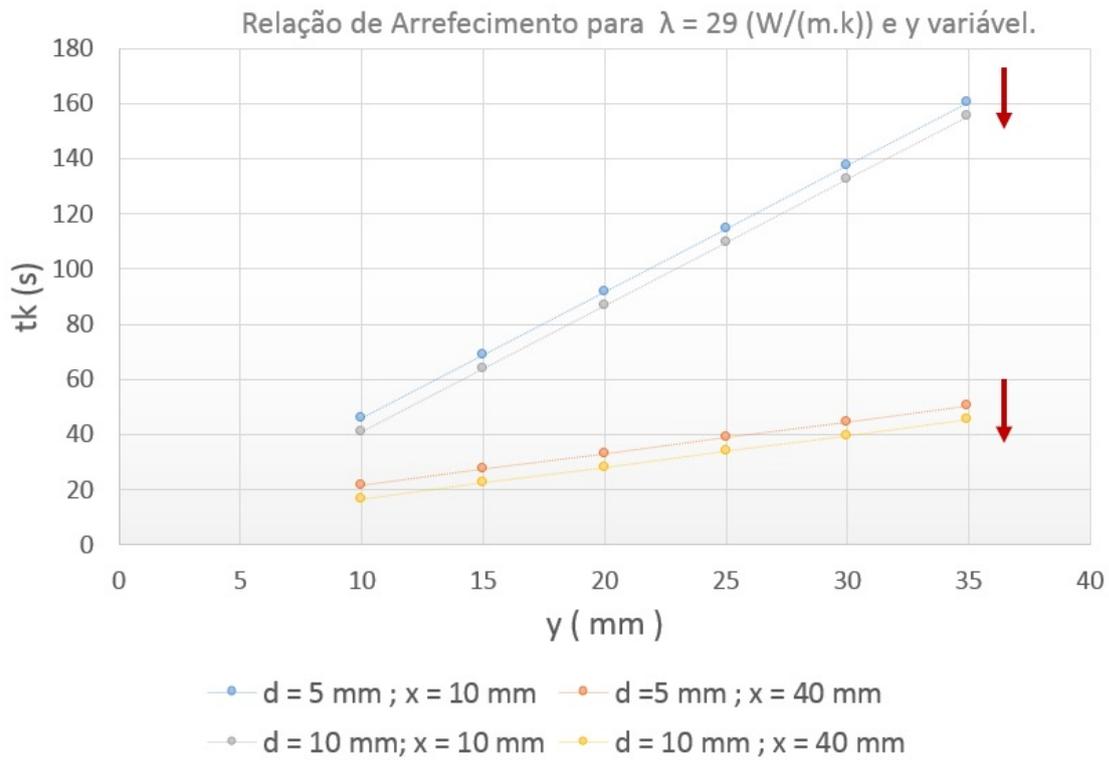


Figura 90 – Gráfico de comparação do tempo de arrefecimento para $\lambda_{st} = 29$ W/(m·K) e y variável

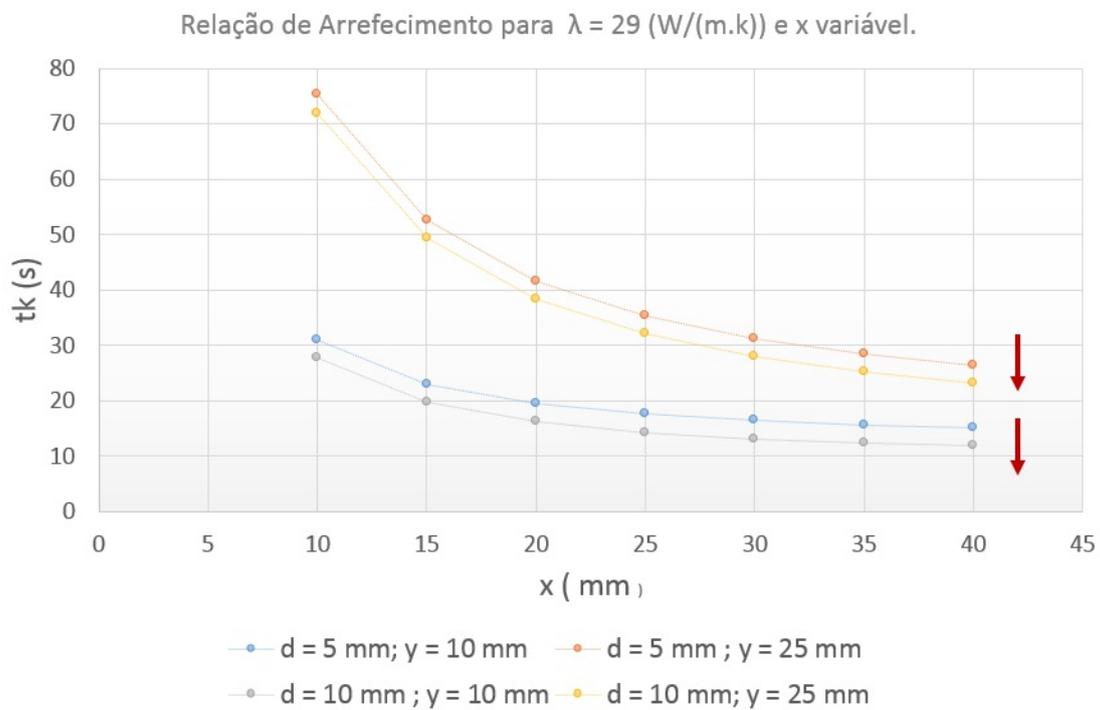


Figura 91 - Gráfico de comparação do tempo de arrefecimento para $\lambda_{st} = 29$ W/(m·K) e x variável

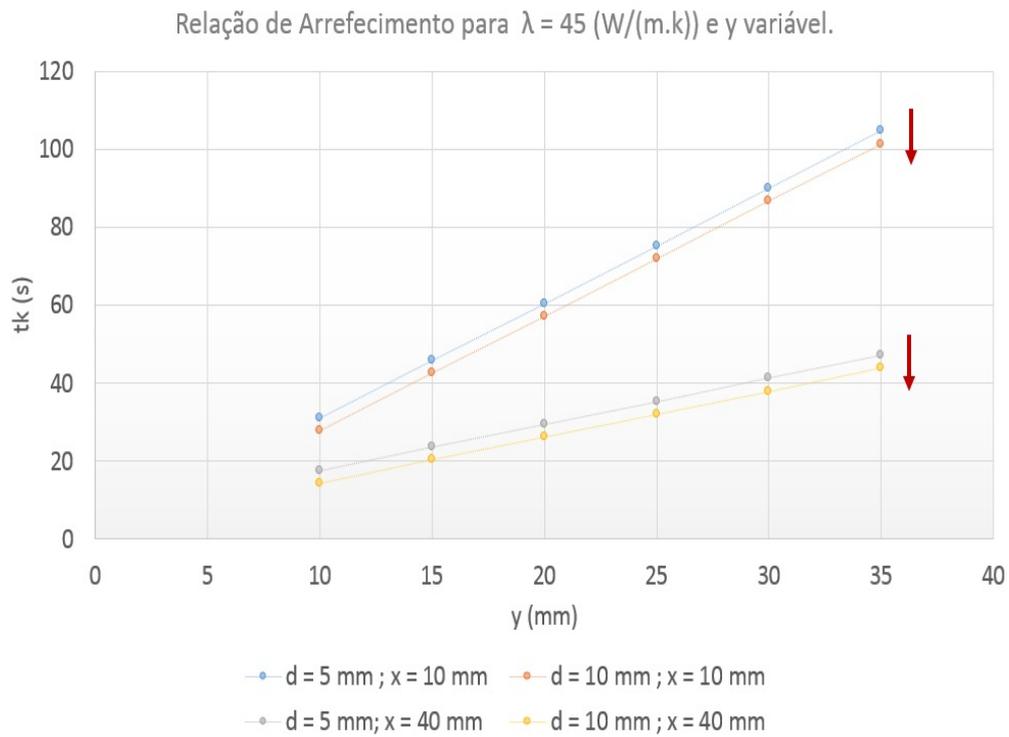


Figura 92 - Gráfico de comparação do tempo de arrefecimento para $\lambda_{st} = 45$ W/(m·K) e y variável

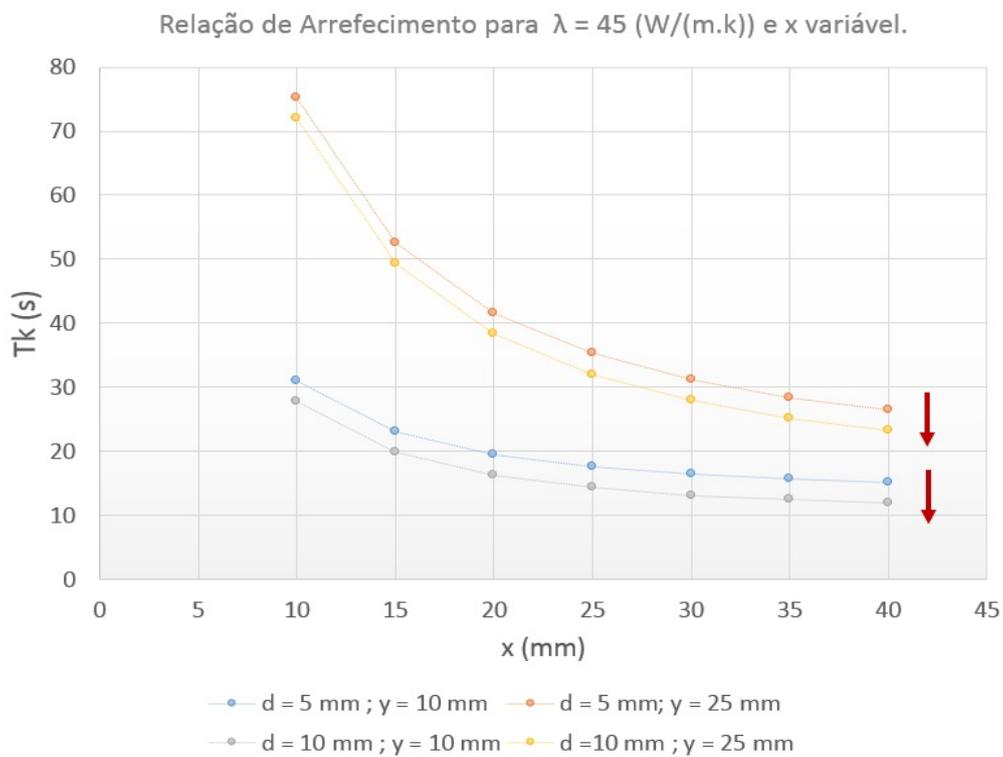


Figura 93 - Gráfico de comparação do tempo de arrefecimento para $\lambda_{st} = 45$ W/(m·K) e x variável

Da análise das tabelas e gráficos obtidos, conclui-se que a diminuição do tempo de arrefecimento de uma moldação varia em função das seguintes características:

- Aumento do diâmetro dos canais de refrigeração;
- Diminuição da distância dos canais de refrigeração à cavidade do molde;
- Aumento da distância entre os canais de refrigeração;
- Aumento da condutividade térmica do material do molde.

A comparação dos gráficos, permite também concluir que a distância entre canais de refrigeração apresenta uma tendência exponencial, diminuindo o seu impacto na descida do tempo de arrefecimento, à medida que a distância aumenta. Por outro lado, a distância dos canais de refrigeração à superfície da moldação apresenta já uma tendência linear, dando origem a um menor espaço de tempo de arrefecimento, à medida que a distância diminui.

Também a condutividade térmica tem uma importância preponderante na diminuição do tempo de arrefecimento, pela comparação entre gráficos de diferentes valores desta propriedade. Na Tabela 103, pode-se comparar a variação de valores, e a importância de cada propriedade no escoamento térmico do molde. Esta tabela foi efetuada com recurso às tabelas apresentadas no Anexo 7.

Tabela 103 - Variação de valores e sua importância no arrefecimento térmico

Propriedade	Variação do tempo de arrefecimento (%)	Importância
Condutividade térmica (λ_{st})	30-35	Alta
Diâmetro (D)	7-20	Média
Distância entre canais de refrigeração (X)	5-15	Baixa
Distância da moldação aos canais de refrigeração (Y)	20-35	Alta

Apesar das conclusões obtidas e dos valores apresentados, salienta-se que o desenvolvimento de melhorias, deve ser efetuado através da consulta das tabelas apresentadas no Anexo 7, ou pela utilização da tabela de cálculo desenvolvida para o efeito, e que devolve os valores ideais em função das características pretendidas.

Da leitura dessas mesmas tabelas, também se conclui que um estado ideal para determinada moldação, pode ser difícil ou mesmo impossível de ser obtido, tornando o desenvolvimento um compromisso em função das condições existentes.

IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS

6.1. GUIAS DE PROCEDIMENTOS PARA OTIMIZAÇÃO DE MOLDES

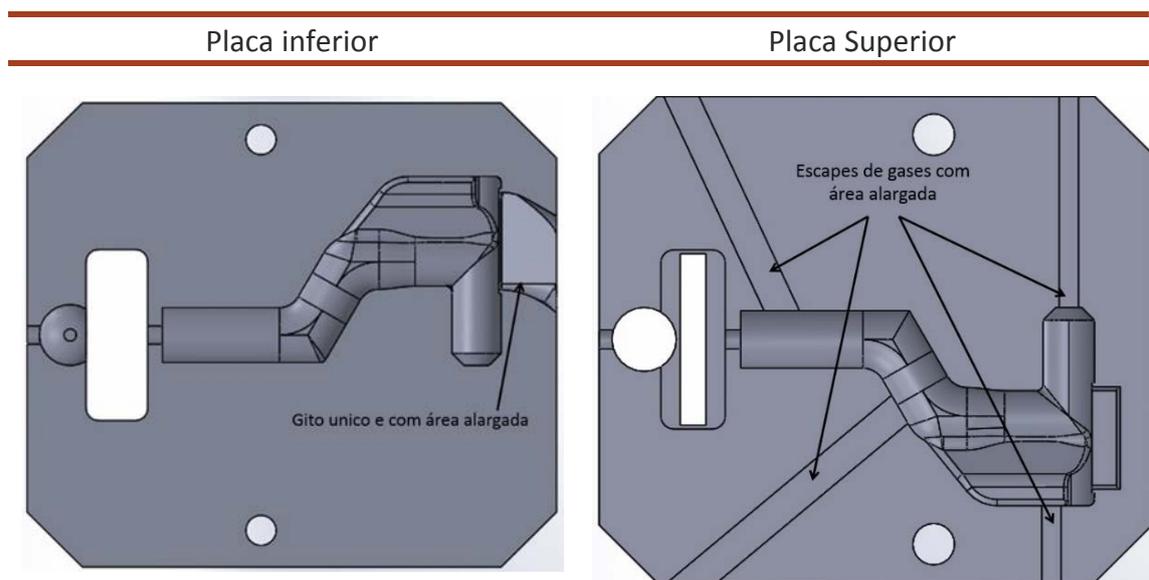
6 Implementação de Melhorias

Em função dos estudos realizados e dos resultados obtidos, concluiu-se que as melhorias a implementar passariam por efetuar alterações ao nível dos *layouts* dos moldes, nomeadamente nos seguintes pontos:

- Alteração dos pontos de injeção;
- Introdução de escapes de gases;
- Alteração de construção das placas dos moldes.

Podemos considerar estas alterações como de primordial importância, pois são de fácil implementação e de custo controlado, variando apenas no material utilizado na produção das placas. As placas dos moldes, devem assim apresentar as configurações de acordo com os desenhos apresentados na Tabela 104 e Figuras 94, 95 e 96, para cada referência. De notar que a alteração no que se refere às impressões, necessita apenas de ser efetuada na placa inferior, mantendo-se o *layout* da placa superior de acordo com o que está representado na secção 3.4.3. No entanto, para a referência de controlo, e porque a empresa assim o exigiu, os escapes de gases foram impressos na placa superior, pelo que para essa referência são apresentadas as duas metades do molde.

Tabela 104 - Placas de gitagem otimizadas da referência 12232249



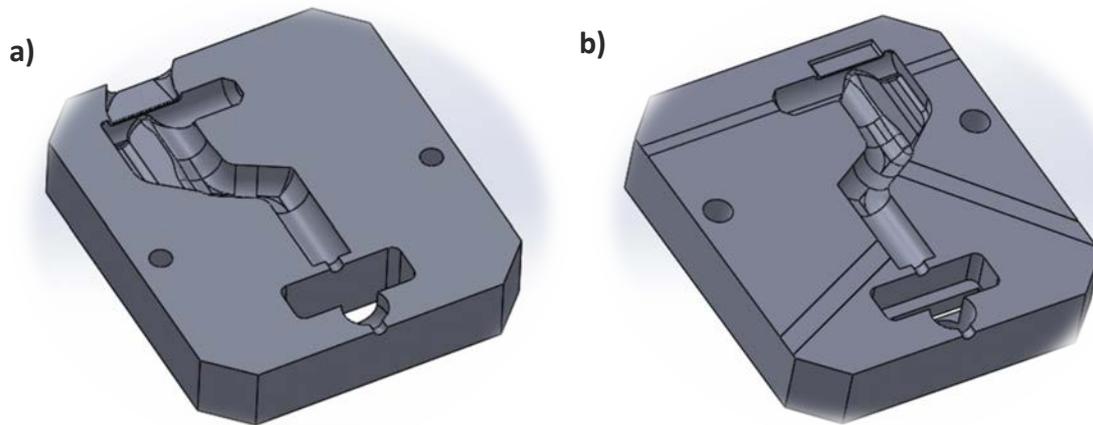


Figura 94 – Desenhos 3D das placas do molde 12232249 a) Placa Inferior, b) Placa superior

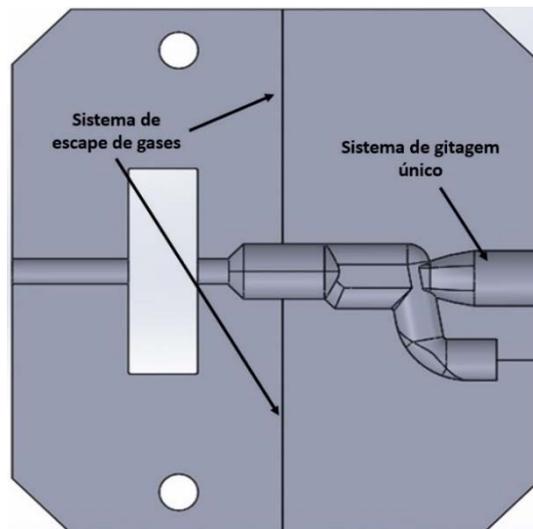


Figura 95 - Placa inferior do molde 1224413161-005

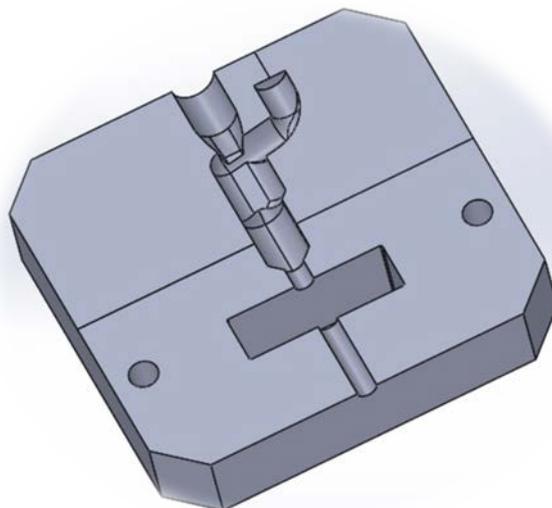


Figura 96 - Placa inferior do molde 1224413161-005

Foi também equacionado efetuar uma alteração à estrutura, tendo sido apresentada uma proposta (Figura 97 e Figura 98). Esta alteração teve em conta o processo e as máquinas utilizadas, tendo por isso a necessidade inerente de manter a maioria das características existentes nos restantes moldes. Assim, o melhoramento incidiu apenas no material de construção do molde, e nas distâncias dos canais de gitagem de ambas as estruturas constituintes, inferior e superior, tendo por base os gráficos do Capítulo 5. A nova estrutura mantém o diâmetro dos canais de gitagem em 5 mm e tem alterada a distância entre canais e a distância destes à superfície do molde. Na Tabela 105, pode-se consultar e comparar as características aplicadas aos moldes.

Deve-se frisar que um melhoramento mais aprofundado poderia ser efetuado, nomeadamente nas distâncias entre canais e seus diâmetros. No entanto, levaria a alterações nas próprias máquinas, tornando-se por isso inoportuno. Os desenhos dos moldes e das estruturas encontram-se para consulta no Anexo 11.

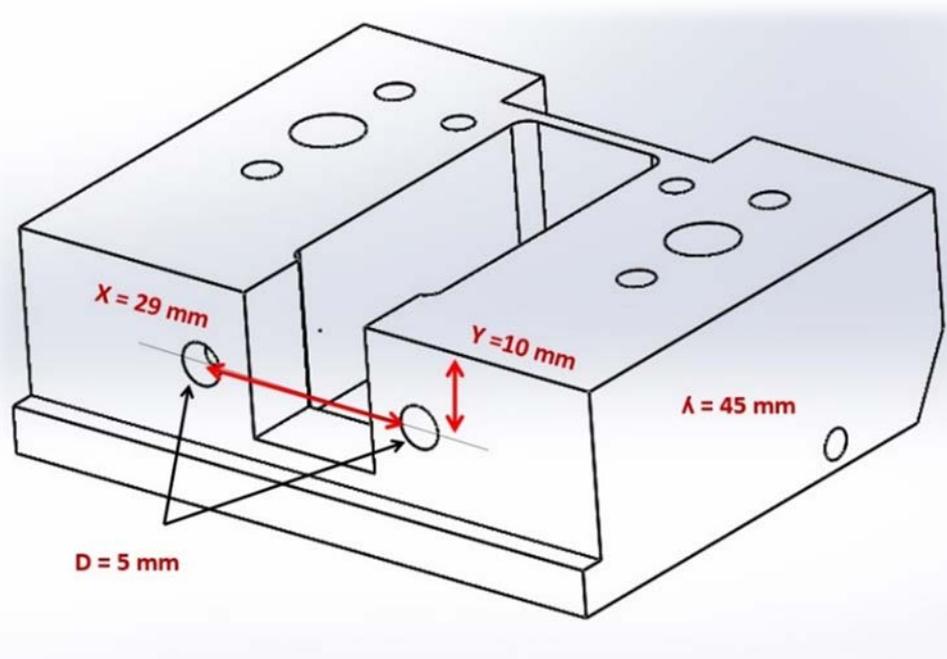


Figura 97 – Exemplo da estrutura Inferior dos moldes

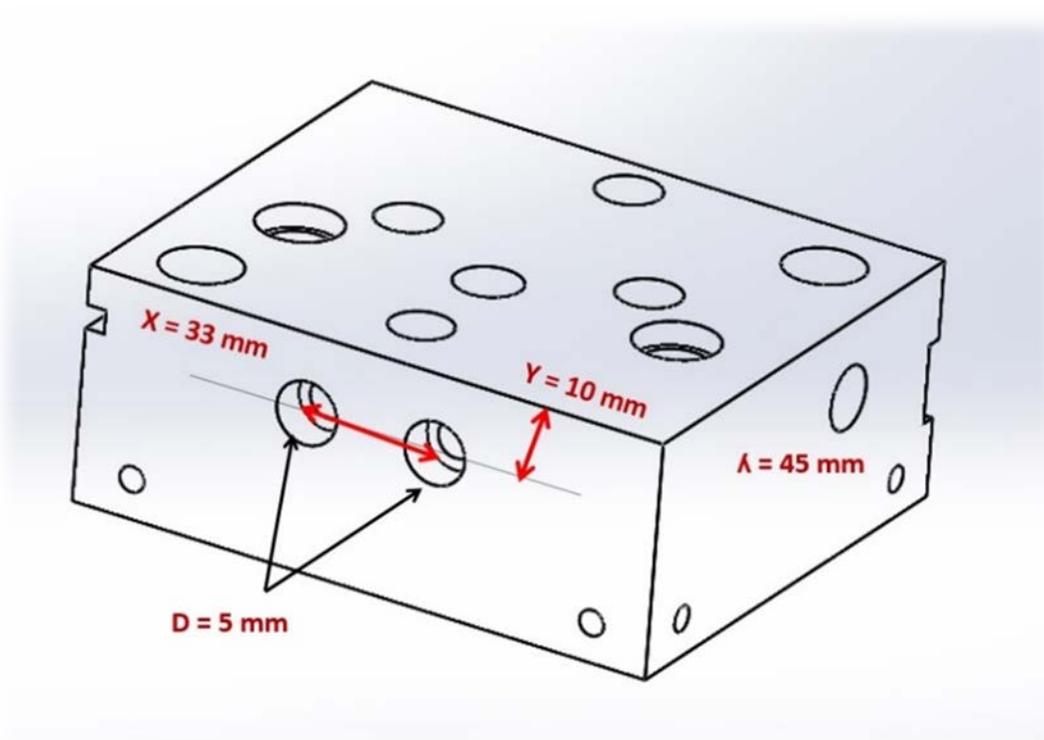


Figura 98 – exemplo da estrutura superior dos moldes

Tabela 105 - Comparação das características das estruturas antes e após as otimizações efetuadas

Características	Inicial	Alteração	Unidades
Condutividade térmica do material (λ_{st})	29	45	W/(m·K)
Diâmetro do canal de escoamento	5	5	mm
Distância à superfície do molde (y)	15	10	mm
Distância entre canais (x)	Est. Inferior	Est. Inferior	mm
	30	30	
	Est. Superior	Est. Superior	
	30	33	

6.1 Guias de procedimentos para otimização de moldes

O presente estudo teve ainda como objetivo a criação de procedimentos para a obtenção de moldes otimizados. Através dos conhecimentos obtidos neste trabalho, desenvolveram-se procedimentos de otimização que se descrevem na Figura 99:

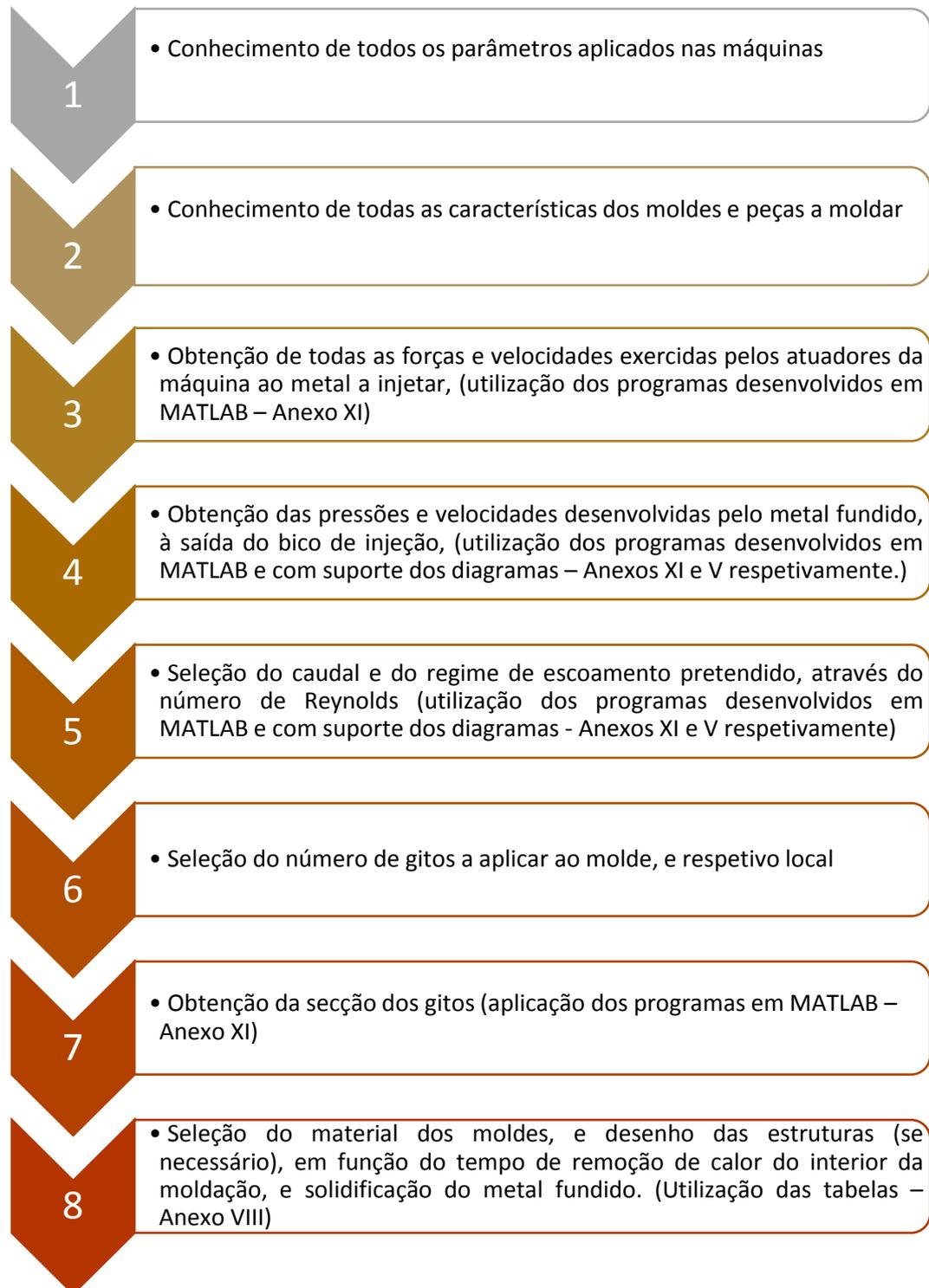


Figura 99 - Procedimentos para otimização de moldes

6.2 6.2 Futuras otimizações a implementar

Apesar das conclusões apresentadas e otimizações realizadas, o trabalho de desenvolvimento em questão não termina com esta dissertação, uma vez que o conhecimento sobre a fundição injetada, em especial de ligas Zn, está muito pouco aprofundada. A continuidade deste estudo, pode por isso prosseguir de um modo mais aprofundado, tendo início na validação das tabelas obtidas pela teoria de Natti Gunter, através do controlo das temperaturas e pressões em diversos pontos do processo, tempos de ciclo, e posterior validação da qualidade das amostras, através do índice de defeitos e resistência à tração das mesmas. Numa segunda fase, podem ser editadas novas tabelas baseadas nas apresentadas no anexo VIII, relacionando os valores destas com a qualidade das peças obtidas, de modo a se obter um conhecimento rápido e expedito para desenho de futuros molde. Aconselha-se também ainda, no âmbito deste estudo, a realizar as experiências com e sem escape de gases, de modo a quantificar o impacto na obtenção de peças sem porosidades.

Uma segunda otimização incide-se na estrutura do molde em si, alterando a sua configuração (inclusive os canais de refrigeração internos), para acomodar sensores de controlo de temperaturas e pressões, e agilizar os tempos de troca de placas moldantes.

CONCLUSÕES

7 CONCLUSÕES

O processo de fundição injetada é, por si só, um processo complexo, que envolve forças elevadas e tempos de reação bastante curtos, tornando difícil a exatidão entre a teoria dos cálculos e simulações com a realidade. Um estudo aprofundado e exato iria requerer equipamentos e sensores capazes de suportar elevadas temperaturas, bem como equipamentos de leitura sensíveis, para processar todos os dados. O estudo executado não contempla nenhum destes casos tão profundamente, tendo por base simulações prévias, e índices de porosidade de provetes antes e após os melhoramentos efetuados. No entanto, face aos requisitos pedidos, pode-se considerar os resultados bastante úteis, uma vez que foram de encontro com as discussões efetuadas previamente, no momento da apresentação do problema, e discutidas quando da realização dos diagramas *Ishikawa* e P. Para além dos resultados obtidos se encontrarem numa gama satisfatória, o ganho é muito maior, devido à incisão do estudo nos fluxos da máquina e dos moldes, tendo-se ficado a conhecer, de um modo geral, de parâmetros como, as velocidades e pressões do fluido em todo o circuito de escoamento pela análise das simulações efetuadas, assim como do seu escoamento a partir do momento em que é acionado na bomba de injeção, até à cavidade do molde, tornando-se uma mais-valia para a empresa em estudos mais aprofundados que esta pretenda elaborar.

Relativamente ao estudo, pode-se concluir que foram validados os valores obtidos nas simulações, e os resultados das porosidades analisadas. Saliencia-se a importância da utilização de escapes de gases, e na redução do regime de turbulência no momento da injeção, que contribuem para a diminuição da formação de bolsas de gases e, por consequência, para o aumento do índice de porosidade. A redução do regime de turbulência porém, pode ser efetuada de diversas maneiras, sendo a mais simples a diminuição da pressão de injeção, e a mais complexa, a alteração dos canais de escoamento e gitagem. Para o caso em questão, teve de se optar pela segunda hipótese, uma vez que a redução de pressões levaria a uma perda de produtividade, que deve ser evitada. Esta opção leva-nos, no final, a concluir a importância da aplicação de apenas um gito em vez de vários, juntamente com uma área de injeção ampla, de modo a aliviar pressões e fazer o fluxo fluir.

Juntamente com o estudo dos escoamentos, e de igual importância para o processo e progressão do trabalho, é o estudo térmico. A ausência de um programa capaz de fornecer resultados fidedignos e a incapacidade de adquirir um, levou à opção por um estudo térmico baseado numa teoria proposta por dois autores da área dos plásticos, e a aplicá-la à injeção de ligas metálicas *Zamak*. Isto porque, apesar do material de

produção ser diferente, o processo térmico tem o mesmo comportamento. O estudo realizado levou à obtenção de curvas até agora desconhecidas, que mostram o contributo das propriedades dos materiais de construção dos moldes e fluido de refrigeração e das características e posicionamento dos canais de refrigeração na capacidade de evacuação de calor das moldações, em função do tempo. Este estudo aplicado a esta área, é ainda prematuro e carece de estudos mais aprofundados. No entanto, as curvas obtidas dão já indicações dos contributos mencionados, ajudando ao desenvolvimento de estruturas de moldes, tal como foi realizado.

Apesar das melhorias apresentadas, a empresa apenas decidiu prosseguir com a implementação das atualizações a uma referência (ref. 12232249) pela alteração do material de construção das placas e *layout* do molde da Tabela 104. No entanto, em função da opção tomada de não adquirir um programa de análise de elementos finitos na área de fundição injetada, recomenda-se o aprofundamento destes estudos num futuro próximo, de modo a adquirir um conhecimento mais aprofundado com o estudo de escoamento de caudais aplicados à própria máquina, bem como do estudo térmico iniciado neste trabalho. No final, pode-se concluir que com este trabalho se alcançaram os objetivos pretendidos, aprofundando conhecimentos acerca dos fenómenos de escoamento no processo de fundição, desenvolvimento de novas técnicas na área de transferência de calor dos moldes, desenvolvimento de premissas e programas para o desenvolvimento expedito de moldes sem recurso a programas CAD/CAE. Na Tabela 106, temos uma panorâmica dos objetivos propostos e os objetivos alcançados.

Tabela 106 - Tabela de objetivos

Objetivos propostos	Objetivos atingidos	Verificação
- Estudo dos regimes de escoamento desenvolvidos pelas massas de metal fundido	Apresentados no capítulo 3, e desenvolvidos em <i>software</i> tal como apresentado no anexo IX	<input checked="" type="checkbox"/>
- Estudo do processo de transferência de calor e arrefecimento	Estudo realizado e apresentado no capítulo 5	<input checked="" type="checkbox"/>
- Criação de procedimentos e diretrizes para o desenvolvimento de moldes	Apresentados no capítulo 6.1	<input checked="" type="checkbox"/>
- Desenvolvimento de um programa e tabelas para otimização rápida de moldes	Apresentados nos anexos VIII e IX respetivamente	<input checked="" type="checkbox"/>
- Desenvolvimento do desenho de novos moldes	Apresentados no capítulo 6, e desenhos do anexo XI	<input checked="" type="checkbox"/>
- Validação dos melhoramentos efetuados	Efetuados de acordo com o exposto no capítulo 4	<input checked="" type="checkbox"/>
- Identificação de futuras otimizações a implementar	Apresentadas no capítulo 6, alínea 6.2	<input checked="" type="checkbox"/>

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

8 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] Ersoy, Bernd Heissing ; *Chassis Handbook, Meting* (2011). Munich. ISBN 978-3-8348-9789-3
- [2] Kirk Patrick, C. R. F. ; A. T. (2016). *Internal Combustion Engines Applied Thermosciences*. (J. W. and S. Ltd, Ed.) (3rd ed.). Wiley, United Kingdom. ISBN: 978-1-118-92652-9
- [3] Happian-Smith, J. (2002). *An Introduction to Modern Vehicle Design*. (J. Happian-Smith, Ed.) (First). Woburn: Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford. ISBN: 9780080523040
- [4] Hodkinson, R., & Fenton, J. (2001). *Lightweight Electric / Hybrid Vehicle Design*. Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford. ISBN: 9780080535517
- [5] Erjavec, J. (n.d.). *Automotive Technology* (5th ed.). DELMAR Cengage Learning, New York. ISBN-13: 978-1428311497
- [6] Mann, D. (1999). *Automotive Plastics and Composites* (2nd ed.). Elsevier Science Ltd. Amsterdam. ISBN: 9780080527741
- [7] Brian Cantor, Patrick Grant, C. J. (2008). *Automotive Engineering Lightweight, Functional, and Novel Materials*. (U. Alwyn Eades, Lehigh University, Bethlehem, Pa. & U. Evan Ma, Johns Hopkins University, Baltimore, Md, Eds.) (First). Taylor & Francis, Taylor & Francis Group. Filadélfia. ISBN 9780750310017
- [8] Andrzej Zak. (2016). *Autonomous veichles*. ExLi4EvA.
- [9] Luis Miranda Torres, ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto (Adaptadao).
- [10] Stevenson, W. J. (2015). *Operations Management* (12th ed.). McGraw-Hill Education. New York. ISBN-13: 978-1259580093 , ISBN-10: 1259580091
- [11] Heizer Jay, Barry Render, C. M. (2017). *Operations Management, Sustainability and Supply Chain Management* (12th ed.). Peaerson. London. ISBN-13: 978-0134163512 ISBN-10: 0134163516
- [12] Cable, P., Bratz, O. J., & Chain, A. (1962). *Push-Pull Cable*, United States Patent Office. Patented 3 015 969, Jan. 9, 1962.

- [13] Çengel, Yunus A, M. A. B. (2006). *Thermodynamics an engineering approach* (5th ed.). McGraw-Hill Companies, Inc. New York, ISBN-10: 0070606595 □ ISBN-13: 978-0070606593
- [14] Memmola, S. (1987). *Bowden Cable*, United States Patent Office. Patented 4 683 774, Aug. 4, 1987.
- [15] C. Hi-Lex, Hi-LEX Push-Pull Cables,” [Online]. Available: <http://www.hilex.co.jp/e/cable/automobile/automobile02.html> [Accessed: 17-June-2017].
- [16] Eduardo Miguel Guimarães Ferreira Braga. (2015). *Otimização do processo de injeção de zamak*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- [17] Tepzz, A. T. (2017). *BowdenCable and Method for Manufacturin of a Bowden Cable*, EUROPEAN PATENT APPLICATION, EP 3 181 923 A1, 21.06.2017 Bulletin 2017/25.
- [18] CMA – Cable Manufacturing and Assembly Co, *Design guide catalog* , Bolivar, OH ; www.cmacacle.com.
- [19] Rosa, M., & Mec, E. (2017). *Mapeamento e Otimização de Processos*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- [20] *Shaws wire roap product catalog*, Nova Zelandia, 2017.
- [21] Ficcables, 2004. Manual Técnico de Zamak. Maia.
- [22] Lagowski, J. J. (2004). *Chemistry foundations and applications*. (M. R. USA, Ed.). Thomson Gale.,vol 4, New York. ISBN-13: 978-0028657219 , ISBN-10: 0028657217
- [23] Civil, C., & Anjos, B. O. (2016). *Estudo das Propriedades do Zinco e suas Aplicações na Indústria (22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 2016)*.
- [24] James, F. S. ; W. A. (2001). *Materials Science and Engineering Handbook (3 rd)*. LLC, CRC Press. Boca Raton,Florida. ISBN-13: 978-0849326967 ISBN-10: 0849326966
- [25] Metallurgy, M., Table, P., Bonding, M., Bonding, I., Bonding, C., Bonding, S., ... Systems, C. (2008). *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. © 2008 ASM International. All Rights Reserved. Gauga County, Ohio. ISBN: 978-0-87170-867-0.
- [26] William D. Callister, J. ; D. G. R. (2012). *Fundamentals os Material Science and Engineering (4th ed.)*. John Wiley And Sons, Inc. New Jersey. ISBN-13: 978-1118061602 ISBN-10: 1118061608

- [27] Gupta, K. M. (2015). *Engineering Materials*. CRC Press, Taylor and Francis Group. Oxfordshire. ISBN 9781482257977
- [28] Seabra, A. V. de. (1995). *Metalurgia Geral, Volume II*. (L. N. de Engenharia, Ed.). Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [29] Angeles, M., Page, M., & Hartmann, S. (2017). *Material modeling, identification and finite element simulation of the thermo-mechanical behavior of a zinc die-casting alloy*. *International Journal of Plasticity*. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2017.10.010>
- [30] Office, E. P. O. (2003). **FasciculeE de Brevet Europeen - EP001029936B1 **, 99(19), 1–15.
- [31] Materials, T., & Company, I. (1992). *ASM Handbook, Volume 15 - Die Casting* (9th ed.). ASM International. Gauga County, Ohio. ISBN: 978-0-87170-711-6
- [32] Morgan, S.W.K., *Zinc and its Alloys*, McDonald and Evans, Estover, 1977. ISBN 0712109455
- [33] Maeder, J. B. ; G. (1997). *Prontuário de metalurgia, Elaboração, Estruturas-Propriedades e Normalização*. (P. Editions NATHAN, Ed.). Fundação Calouste Gulbenkian; Lisboa.
- [34] NADCA, N. A. D. C. A. (2015). *Product Specifications Standards for Die Casting* (9th ed.). Arlington Heights, Illinois. ISBN-10: 188527100X, ISBN-13: 978-1885271006
- [35] Osvaldo Junior Alves Soares, *Melhorias de Produto / Processo Pela Utilização de Ligas Zamac*; Universidade de Taubaté.
- [36] Ferreira, J. M. G. D. C. (1999). *Tecnologia da Fundição (1st ed.)* Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. ISBN: 9789723108378
- [37] Hurst, S. (1999). *Metal Casting Appropriate Technology*. Intermediate Technology Publications; London. ISBN-10: 1853391972, ISBN-13: 978-1853391972
- [38] Rowley, International C. of F. T. A. ; transl. and ed. by M. T. (1974). *International atlas of castings defects*. (A. F. Society, Ed.). American Foundrymen's Society. Illionais. ISBN-10: 0317326376, ISBN-13: 978-0317326376
- [39] Catarina, D., & Ferreira, C. (2017). *Mitigação das causas geradoras de defeitos em peças metálicas injetadas de caráter estético*. ISEP, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

- [40] **Andresen, B. (2005).** *Die Casting Engineering - A Hydraulic, Thermal, and Mechanical Process.* MARCEL DEKKER. New York. ISBN 9780824759353
- [41] **Kong, L. X., She, F. H., Gao, W. M., Nahavandi, S., & Hodgson, P. D. (2007).** *Integrated optimization system for high pressure die casting processes*, **1**, 629–634. <https://doi.org/10.1016/j.imatprotec.2007.11.250>. Elsevier, Amsterdam.
- [42] **Nataly Yuko Yoshino - Votorantim Metais, Manual de Fundição sob pressão, Coordenação técnica: Eng. Ariane Gaspari O. Souza - Votorantim Metais, Projeto gráfico: G.A. Produções e Comunicação, Revisão técnica: Prof. Jefferson, Malavazi - SENAI Nadir Dias de Figueiredo.**
- [43] **Society, A. F. (1986).** *International atlas of casting defects.* (G. B. Guy Henon, Claude Mascre, Ed.) (4th ed.), International Committee of Foundry Technical Associations. Des Plaines Illinois. ISBN: 978-0874330533
- [44] **Tian, C., Law, J., Touw, J. Van Der, Murray, M., Yao, J., Graham, D., & John, D. S. (2002).** *Effect of melt cleanliness on the formation of porosity defects in automotive aluminium high pressure die castings*, *Journal of Materials Processing Technology*, **122**, 82–93. Elsevier, Amsterdam.
- [45] **Zabala, B., Igartua, A., Scarpis, V., Timelli, G., Girot, F., & Nevshupa, R. (2018).** *Multiparametric study of Leidenfrost point and wettability of lubricants on high-pressure die-casting dies.* *International Journal of Thermal Sciences*, **125** (November 2017), 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.11.01>, Elsevier, Amsterdam.
- [46] **Hai-dong, Z., Yan-fei, B. A. I., Xiao-xian, O., & Pu-yun, D. (2010).** *Simulation of mold filling and prediction of gas entrapment on practical high pressure die castings.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **20(11)**, 2064–2070. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60418-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60418-0), Elsevier, Amsterdam.
- [47] **Miguel, R., & Teixeira, M. (2013).** *Estudo Numérico do Efeito dos Principais Parâmetros de Fundição na Formação de Rechupes em Peças Fundidas Engenharia Industrial.* Instituto Politecnico de Bragança.
- [48] **Anglada, E., Meléndez, A., Vicario, I., Arratibel, E., & Aguillo, I. (2015).** *Adjustment of a high pressure die casting simulation model against experimental data.* *Procedia Engineering*, **132**, 966–973. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.584>, Elsevier, Amsterdam.
- [49] **Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho (2012), Métodos de Elementos Finitos Ferramentas para Análise Estrutural, Publindústria edições técnica, Porto. ISBN 978-989-723-029-5**

- [50] **Ferreira, J. P. S. (2014).** *Simulação numérica e validação experimental de sistemas de enchimento em fundição.* Departamento de Engenharia Mecânica Universidade do Minho Escola de Engenharia.
- [51] **Toyota Industries Corporation [Online] :** <https://www.toyota-industries.com/>
- [52] **R.C. Hibbeler,** *Engineering Mechanics 12th Edition.pdf.* (n.d.). January 7, 2009. Pearson. London. **ISBN: 0132915545**
- [53] **Ferdinand P. Beer, E. Russel Johnston Jr.** *Mecânica Vectorial para Engenheiros - Estática.* 6th Edition, McGraw Hill. New York. **ISBN: 9788580550467**
- [54] **Frank. M. white,** *Fluid Mechanics,* 4th Edition. McGraw Hill, New York. **ISBN-13: 978-0073398273 ISBN-10: 0073398276**
- [55] **Holman, J. P., & Lloyd, J. (n.d.)** 8th Edition. Fluid Mechanics. McGraw Hill, New York.
- [56] **Natti S. Rao, Schumacher, G. (n.d.).***Design Formulas for Plastic Engineers* 2th Edition Hanser Publishers Municha • Hanser Gardner Publications, Cincinnati. **ISBN-13: 978-1569903704 ISBN-10: 1569903700**
- [57] **Norma Broose 590589-100 Barcode, T. (2012).** Norm / Standard confidential Norm / Standard.

ANEXOS

ANEXO I – Composição química das ligas de zinco para fundição

Nome Comercial	Ligas Zamak - Fundição injetada				Ligas ZA - Fundição injetada		
	No. 2	No. 3	No. 5	No. 7	ZA-8	ZA-12	ZA-27
ANSI/AA		AG-40A	AG-41A	AG-40B			
Composição Nominal	Al 4,0	Al 4,0	Al 4,0	Al 4,0	Al 8,4	Al 11,0	Al 27,0
	Mg 0,035	Mg 0,035	Mg 0,055	Mg 0,013	Mg 0,023	Mg 0,023	Mg 0,015
	Cu 3,0		Cu 1,0	Cu 0,013	Cu 1,0	Cu 0,88	Cu 2,25
Composição detalhada							
Alumínio (Al)	3,7-4,3	3,7-4,3	3,7-4,3	3,7-4,3	8,0-8,8	10,5-11,5	25,0-28,0
Magnésio (Mg)	0,02-0,06	0,02-0,06	0,02-0,06	0,005-0,020	0,01-0,03	0,01-0,03	0,01-0,02
Cobre (Cu)	2,6-3,3	0,1 max	0,7-1,2	0,1 max	0,8-1,3	0,5-1,2	2,0-2,5
Ferro (Fe) max.	0,05	0,05	0,05	0,005	0,075	0,075	0,075
Chumbo (Pb)	0,005	0,005	0,005	0,003	0,006	0,006	0,006
Cadmio (Cd)	0,004	0,004	0,004	0,002	0,003	0,003	0,003
Tin (Sn) max.	0,002	0,002	0,002	0,001	0,003	0,003	0,003
Níquel (Ni)	-	-	-	0,005-0,02	-	-	-
Zinco (Zn)	Restante	Restante	Restante	Restante	Restante	Restante	Restante

ANEXO II – Características das ligas Zamak

	Ligas Zamak - Fundição injetada				Ligas ZA - Fundição injetada		
	No2	No. 3	No. 5	No. 7	ZA-8	ZA-12	ZA-27
Resistência a fratura a quente	1	1	2	1	2	3	4
Aumento da pressão	3	1	2	1	3	3	4
Facilidade de fundição	1	1	1	1	2	3	3
Complexidade das peças	1	1	1	1	2	3	3
Precisão dimensional	1	1	1	1	2	2	3
Estabilidade dimensional	4	2	2	1	2	3	4
Resistência à corrosão	2	3	3	2	2	2	1
Resistência a defeitos a frio	2	2	2	1	2	3	4
Facilidade de maquinagem e qualidade	1	1	1	1	2	3	4
Facilidade e qualidade de polimento	2	1	1	1	2	3	4
Facilidade e qualidade de deposição eletrónica	1	1	1	1	1	2	3
Anodização	1	1	1	1	1	2	2
Camada de proteção química	1	1	1	1	2	3	3

- Escala de 1 a 5 consoante a importância, sendo 1 o menos desejável, e 5 o mais desejável.

ANEXO III – Propriedades mecânicas das ligas de zinco

Nome Comercial	Ligas Zamak -fundição injetada				Ligas ZA - fundição injetada		
	No2	No. 3	No. 5	No. 7	ZA-8	ZA-12	ZA-27
		AG-40A	AG-41A	AG-40B			
Tensão Limite Cedência (MPa)							
In Situ	359	283	328	283	372	400	426
Envelhecido	331	241	269	283	297	310	359
Yield Strength (MPa)							
In Situ	283	221	269	221	283-296	310-331	359-379
Envelhecido					224	245	322
Compressive Yield Strength (MPa)							
In Situ	641	414	600	414	252	269	358
Envelhecido	641	414	600	414	172	186	255
Alongamento							
In Situ % em (51mm)	7	10	7	13	6-10	4-7	2,0-3,5
Envelhecido % em (51mm)	2	16	13	18	20	10	3
Dureza (BHN)							
In Situ	100	82	91	80	100-106	95-105	116-122
Envelhecido	98	72	80	67	91	91	100
Tensão de corte (MPa)							
In Situ	317	214	262	214	275	296	325
Envelhecido	317	214	262	214	228	228	255
Tensão de Impacto (J)							
In Situ	47,5	58	65	58	32-48	20-37	9-16
Envelhecido							
Tensão de Fadiga (MPa)							
In Situ	58,6	47,6	56,5	47,6	103	-	145
Envelhecido	58,6	47,6	56,5	46,9	103	-	145
Modulo de Young (GPa)							
	Variável	Variável	Variável	Variável	85,5	83	77,9

ANEXO IV – Defeitos presentes na fundição injetada

De acordo com o livro *International Atlas of Casting Defects* [54]:

Protuberâncias metálicas	
a) Rebarbas	
Aparência	<ul style="list-style-type: none"> • Protuberâncias metálicas de espessura irregular, perpendiculares às faces das peças
Causas	<ul style="list-style-type: none"> • Folgas existentes entre os moldes, ou entre moldes e machos. • Rachaduras presentes nos moldes
Soluções	<ul style="list-style-type: none"> • Cuidados a ter no desenho e fabrico de moldes e machos, bem como o controlo das suas dimensões • Garantir o correto alinhamento e fechamento dos moldes, durante o processo de fabrico, e a vedação das folgas existentes
Efeitos no Processo	<ul style="list-style-type: none"> • podem acelerar o arrefecimento em zonas adjacentes à moldação e causar fendas na peça fundida
b) Fendas Superficiais	
Aparência	<ul style="list-style-type: none"> • Projeções metálicas nas superfícies das peças fundidas, replicas das fendas existentes no molde criadas pela fadiga térmica
Causas	<ul style="list-style-type: none"> • Uso extensivo dos moldes • Devido a flutuações de temperatura em determinadas zonas dos moldes e em regiões onde o metal flui a altas velocidades e que causam uma alternância sucessiva entre tensões de tração e compressão
Soluções	<ul style="list-style-type: none"> • Intervenção de melhoramento dos moldes através de uma escolha apropriada de materiais mais resistentes às temperaturas na sua construção • Desenvolvimento de sistemas de gitagem que forneçam fluxos de metal líquido menos agressivos • Seleção dos ciclos de arrefecimento do molde através de medições das temperaturas em diversos locais do mesmo • Aconselhável a execução de tratamentos superficiais de modo a melhorar a sua resistência

Descontinuidades

a) Trincas frias “Cold cracking”

Aparência	<ul style="list-style-type: none"> • Aspeto não oxidado
Causas	<ul style="list-style-type: none"> • Má extração da peça • Excesso na força de corte dos jitos • Excesso na força de fecho do molde • Alta taxa de alimentação
Soluções	<ul style="list-style-type: none"> • Aconselhável ter atenção no manuseamento e limpeza das peças obtidas • Atenção no controlo do excesso de esforços em operações de fabrico como: <ul style="list-style-type: none"> • - Taxas de alimentação de material fundido • - Velocidade de corte • - Forças de fechamento dos moldes

b) Trincas quentes “Hot cracking”

Aparência	<ul style="list-style-type: none"> • Aspeto oxidado
Causas	<ul style="list-style-type: none"> • Desmoldagem muito rápida • Excesso de temperatura durante o manuseamento
Soluções	<ul style="list-style-type: none"> • Cuidado no manuseamento das peças obtidas enquanto quentes • Suficiente refrigeração dos moldes durante o processo produtivo • Garantia de alinhamento dos moldes. Utilização de pinos de extração

Descontinuidades (cont.)

c) Tensões Internas “tearing”

Aparência	<ul style="list-style-type: none"> Descontinuidades na forma de fratura visíveis, que apresentam arestas angulares resultantes de tensões internas durante o arrefecimento, e que ocorrem em zonas finais deste
Causas	<ul style="list-style-type: none"> Roturas originadas devido ao contraste das tensões de tração instaladas com a compressão presente nas áreas de arrefecimento inicial Desenhos deficientes de peças e moldes, que originam grandes diferenças no tempo de arrefecimento Sistemas de gitagem que criam mudanças acentuadas na taxa de arrefecimento Podem também ter origem devido à ductilidade das ligas, devendo esta propriedade ser tida em conta
Soluções	<ul style="list-style-type: none"> Corretos desenhos das peças e dos moldes, com canais e gitosque produzam um arrefecimento uniforme e controlado da moldação no seu interior Correta localização dos ejetores de modo a evitar distorções da moldação Garantir o alinhamento do molde para não promover defeitos na extração Evitar a criação de zonas quentes devido ao excesso de temperatura de injeção Aberturas do molde nos tempos certos, evitando aberturas demasiado cedo, correndo o risco de danificar a peça no processo de extração

d) Falta de fusão, Juntas frias “ColdShuts”

Aparência	<ul style="list-style-type: none"> Aparência de duas linhas de metal que se juntaram mas não fundiram uma com a outra
Causas	<ul style="list-style-type: none"> Ocorrem quando a solidificação se processa muito longe nas linhas de fluxo, resultando numa fluidez insuficiente Padrões de fluxo pobre devido a uma alimentação inapropriada Pressão excessiva devido a uma ventilação inadequada Excesso de paredes finas no desenho das peças Injeções defeituosas do volume de metal, que pode resultar em arrefecimentos prematuros e perda de eficácia na intensificação da pressão de injeção
Soluções	<ul style="list-style-type: none"> Importante aumentar a temperatura de injeção e fluidez da liga Alterar a temperatura do molde para um nível superior de preferência em um modo seletivo Aumentar a taxa de alimentação do molde através da alteração do sistema de gitagem, do sistema de ventilação

Porosidades

e) Porosidades Gasosas “cavidades”

Aparência	<ul style="list-style-type: none"> • Cavidades esféricas separadas e de paredes suaves, que podem ser detetáveis a olho n, podendo se encontrar À superfície ou no interior das peças • Podem por vezes apresentar cavidades abertas que contactam profundamente com o interior da peça • Aparência brilhante ou oxidada das paredes internas das cavidades
Causas	<ul style="list-style-type: none"> • Ar aprisionado no interior da moldação devido a: <ul style="list-style-type: none"> - Ventilação inadequada do molde - Excessivo uso de lubrificante - Misturas residuais de <i>sprays</i> - Padrões de fluxo de metal pobres que previnem a ventilação • Gases dissolvidos no metal fundido
Soluções	<ul style="list-style-type: none"> • Requer normalmente investigações e estudos seguidos de ajustes de fatores metalúrgicos ou de molde • Assegurar um preenchimento mais lento das cavidades, providenciando-se uma evacuação de ar mais efetiva, acompanhada de uma redução da turbulência na câmara de injeção pelo abrandamento da taxa de injeção através das seguintes soluções: <ul style="list-style-type: none"> - Aplicação em zonas estratégicas do molde de e saídas de escapes de modo a evacuar os gases do interior do molde - Evitar sistemas de gitagem impróprios - Manter os gitos cheios, bem como aumentar a pressão estática pelo aumento da altura do corredor • Devem de ser evitadas temperaturas de fusão excessivas • Assegurar o uso cuidado de desengordurantes

f) Porosidades devido a contrações do material, rechupes

Aparência	<ul style="list-style-type: none"> • Defeitos constituídos por uma serie de cavidades interconectadas criadas por uma alimentação de metal defeituosa no final da solidificação • Contração confina-se ao centro térmico da peça, no entanto pode-se estender até à superfície devido a excessivas temperaturas do molde
Causas	<ul style="list-style-type: none"> • Desenhos deficientes das peças que contenham largas secções • Excessivos aquecimentos dos moldes • Deficiente distribuição do fluxo de metal • Inadequado arrefecimento interno
Soluções	<ul style="list-style-type: none"> • Diagnósticos difíceis devido ao largo número de fatores presentes, e por norma independentes, é aconselhável: <ul style="list-style-type: none"> - Melhoramento dos desenhos da peça sempre que tal seja possível, nomeadamente na espessura desta - Evitar ângulos de reentrada e secções massivas difíceis de

alimentar

- Modificar a temperatura do molde e do metal de maneira a reduzir o intervalo de temperatura de arrefecimento
 - Estabelecer um sistema de gitagem, enchimento e arrefecimento de acordo com as regras referentes às distâncias de alimentação
 - Ajustar o pistão da bomba de acordo com o volume de metal a ser injetado, de modo a garantir uma reserva de material para alimentar determinadas zonas do molde que tenham um arrefecimento mais lento
 - Ter em conta a desoxidação e controlo da aplicação dos desengordurantes
-

Preenchimento Incompleto

Aparência	<ul style="list-style-type: none">• Falta de porções da peça fundida, com ou sem fratura, e com variação superficial mais ou menos importante da forma padrão• Peças podem apresentar irregularidades que podem ir desde arestas arredondadas até à falta de metal em determinadas zonas
Causas	<ul style="list-style-type: none">• Falta de fluidez do metal líquido• Enchimento demasiado lento em decorrência da relação dos canais• Temperaturas demasiado baixas do molde• Ventilações deficientes
Soluções	<ul style="list-style-type: none">• Aumento da temperatura de injeção• Redimensionamento do sistemas de gitagem• Aumento da temperatura dos moldes• Dimensionamento de um sistema de gases efetivo• Deve ser assegurada a quantidade de metal fundido suficiente para que não falhe quando da injeção• Garantir um correto fecho dos moldes e selagem das cavidades

Inclusões ou anomalias estruturais

Aparência	<ul style="list-style-type: none"> • Presença de inclusões metálicas de elementos alheios à liga • Inclusões de composições químicas do metal de base • Inclusões não metálicas como escória, impurezas, óxidos, produtos reativos • Anomalias estruturais observáveis apenas por microscópio.
Causas	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminantes adicionados ao banho metálico ou a escórias presentes nas panelas
Soluções	<ul style="list-style-type: none"> • Controlo destes defeitos, passa pela inspeção da qualidade do metal fundido, sendo que o principal fator a composição da liga, os gases dissolvidos e os sólidos aprisionados (óxidos e componentes intermetálicos) • Assegurar a limpeza da liga em relação a metais e escórias alheios à sua composição • Monitorizar a temperatura do cadinho, de modo a manter dentro dos limites aceitáveis, evitando valores demasiado baixos • Impedir de entrar na panela inclusões não metálicas tais como gorduras e impurezas nomeadamente no momento de injeção, impossibilitando a sua entrada no circuito do molde

Formas ou dimensões incorretas

Aparência	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de concordância das formas geométricas, ou das suas dimensões, podendo ser mais ou menos severos
Causas	<ul style="list-style-type: none"> • Erros no cálculo da contração • Desmoldagens demasiado rápidas • Vários graus de contração entre secções da peça de diferentes espessuras, que arrefecem a taxas de arrefecimento desiguais, ou com condutividade térmica distintas
Soluções	<ul style="list-style-type: none"> • Correto desenho das peças e do sistema de extração dos moldes, de modo a evitar distorções no momento de ejeção • Aplicar tolerâncias de contração em função das espessuras das moldações e fundamentadas em experiências prévias • Importante a confirmação do alinhamento dos moldes, para não promover o desalinhamento das cavidades • Importante a confirmação que as temperaturas de arrefecimento se encontrem dentro de limites que não favoreçam o desenvolvimento de tensões que possibilitem distorções das peças

Aderência “Soldering”

Aparência	<ul style="list-style-type: none">• Aderência do metal fundido à superfície dos moldes, resultando em escorrimentos na superfície da peça quando da ejeção
Causas	<ul style="list-style-type: none">• Condição aparece, quando o choque do metal fundido causa um sobreaquecimento local do molde, no caso de este ser extremo, a corrente de metal fundido erode a superfície do molde. Fenômeno visível perto do gito de alimentação
Soluções	<ul style="list-style-type: none">• Evitar os efeitos da erosão das linhas de metal líquido pela modificação do sistema de gitagem de alimentação• Controlar a quantidade de lubrificante aplicado ao molde.• Controlar a temperatura de vazamento• Facilitar a injeção de metal pelo aumento dos ângulos de inclinação

ANEXO V – Ferramentas para cálculo do número de Reynolds

ANEXO VI – Análise Macrográfica dos provetes

Referência. 12232249

Aspetto dos provetes, Ref.12232249

Provete 1**Provete 2****Provete 3**

Resultados da análise macrográfica aos provetes, 12232249

Referência. 12232249			
Propriedades	Provete 1	Provete 2	Provete 3
Cor	Zinco metálico	Zinco metálico	Zinco metálico
Brilho	Metálico brilhante	Metálico brilhante	Metálico brilhante
Defeitos Superficiais	Sem defeitos	Sem defeitos	Sem defeitos

Referência. 1224413161-005

Aspetto dos provetes, Ref.1224413161-005

Provete 1



Provete 2



Provete 3



Resultados da análise macrográfica aos provetes, 1224413161-005

Referência. 1224413161-005			
Propriedades	Provete 1	Provete 2	Provete 3
Cor	Zinco metálico	Zinco metálico	Zinco metálico
Brilho	variável	variável	variável
Defeitos Superficiais	Sem defeitos	Sem defeitos	Sem defeitos

Referência. 12232249 otimizado

Aspeto dos provetes, Ref.12232249

Provete 1



Provete 2



Provete 3



Resultados das análises macrográficas dos provetes da ref. 12232249, do molde otimizado

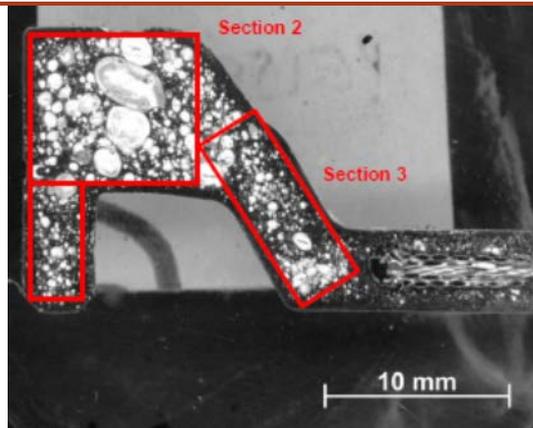
Referência			
Propriedades	Provete 1	Provete 2	Provete 3
Cor	Cinza metálico	Cinza metálico	Cinza metálico
Brilho	Brilhante	Brilhante	Brilhante
Defeitos Superficiais	Sem defeitos	Sem defeitos	Sem defeitos

ANEXO VII – Análise à superfície de corte dos provetes

Referência. 12232249

12232249

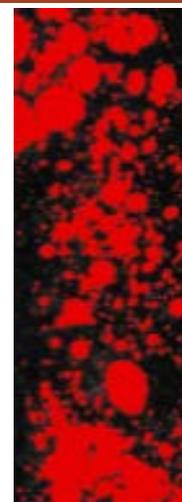
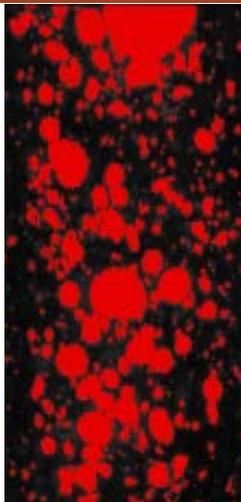
Amostra 1



Secção 1

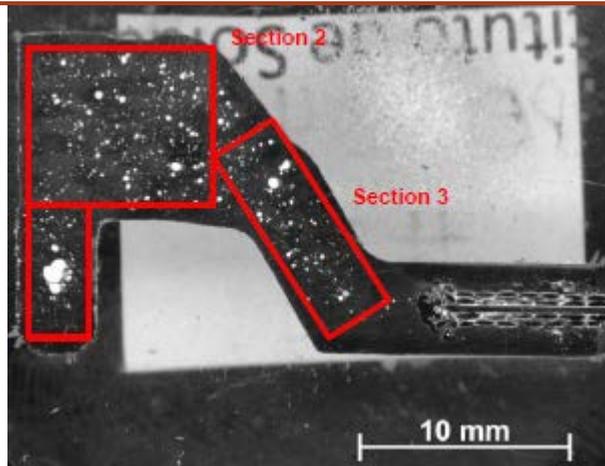
Secção 2

Secção 3



12232249

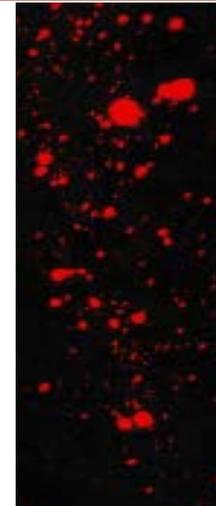
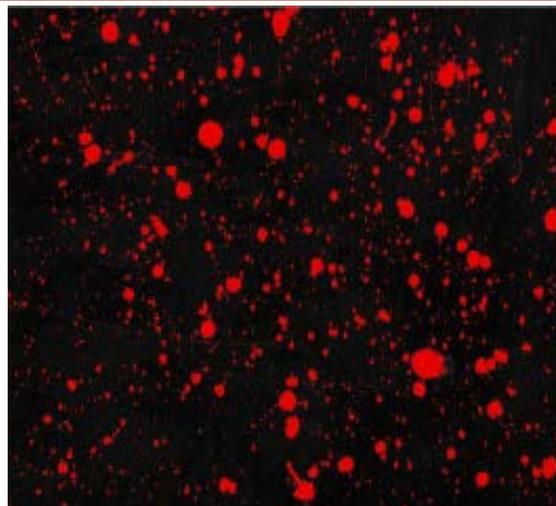
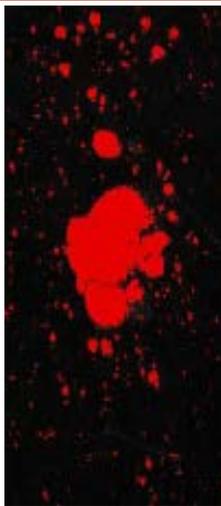
Amostra 2



Secção 1

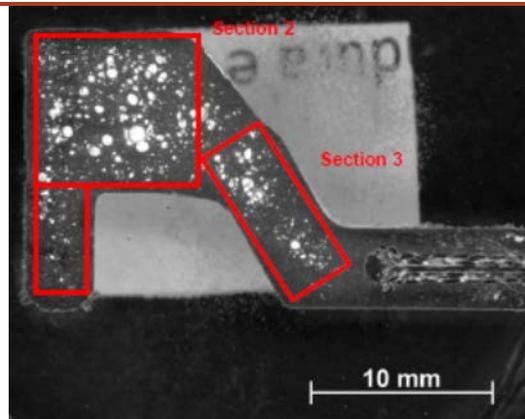
Secção 2

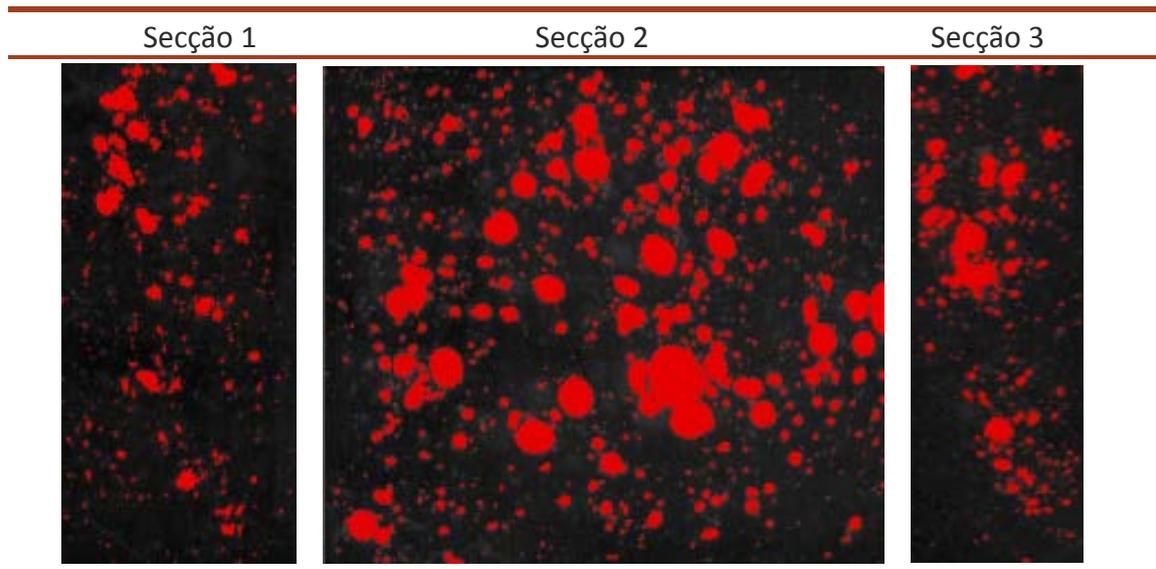
Secção 3



12232249

Amostra 3



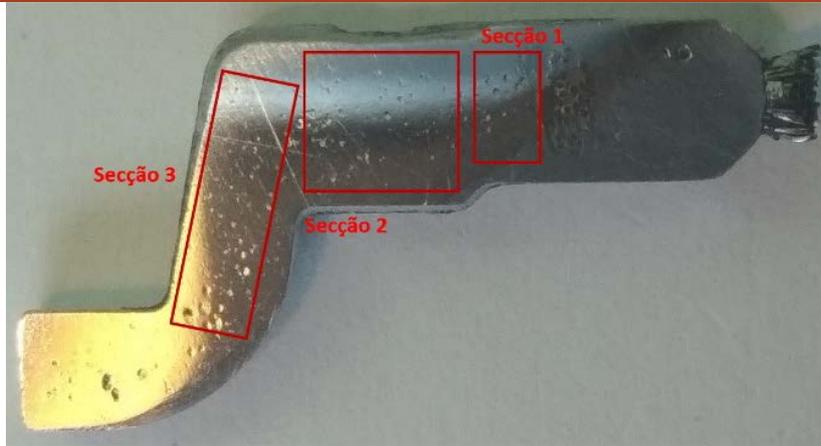


12232249	Porosidades (%)		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Secção 1	31,7	11,3	7,7
Secção 2	62,8	8,0	17,0
Secção 3	41,2	6,3	11,7

Referência. 1 -005

1224413161-005

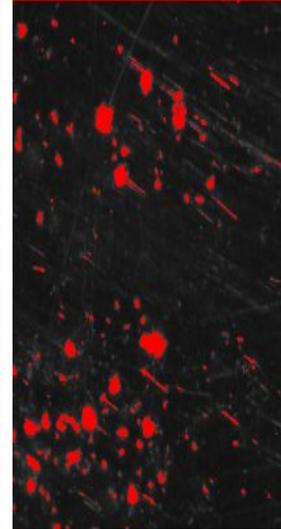
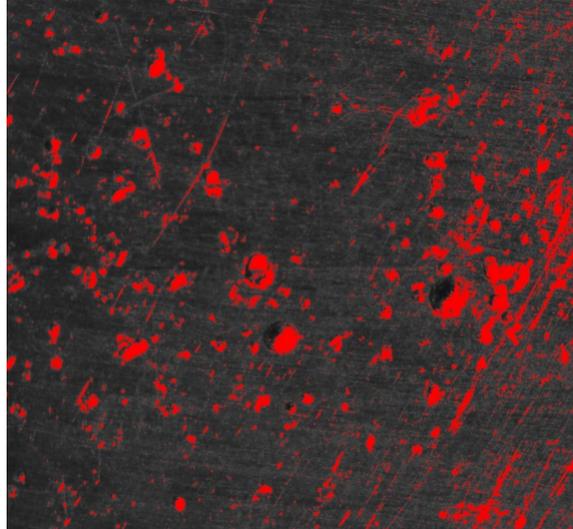
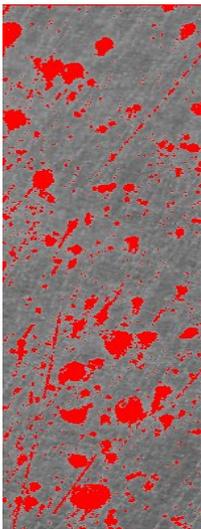
Amostra 1



Secção 1

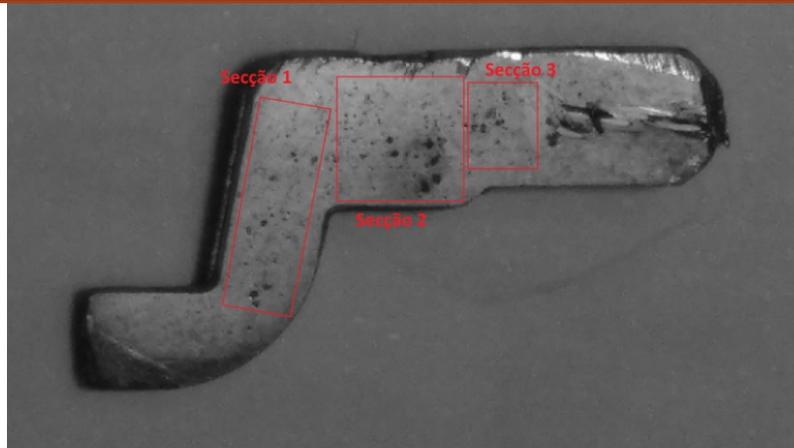
Secção 2

Secção 3



1224413161-005

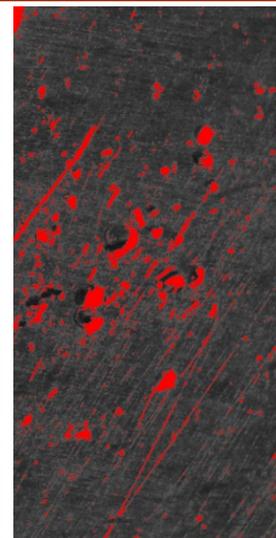
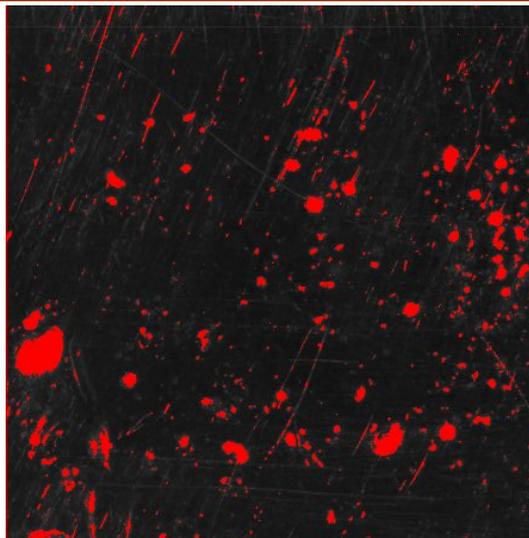
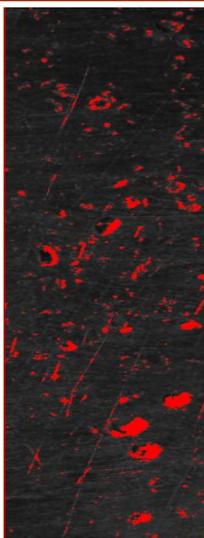
Amostra 2



Secção 1

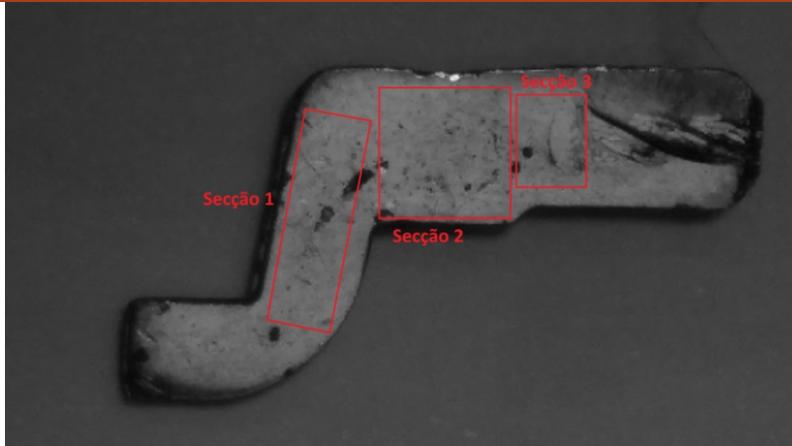
Secção 2

Secção 3



1224413161-005

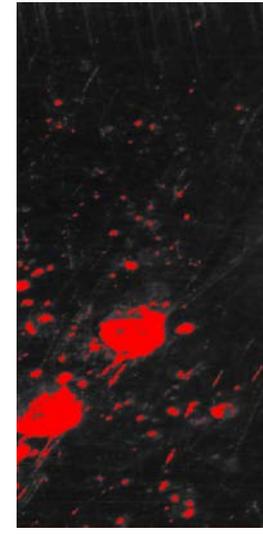
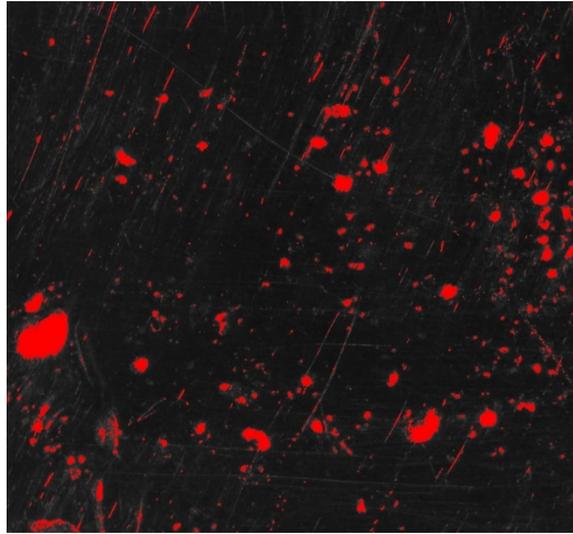
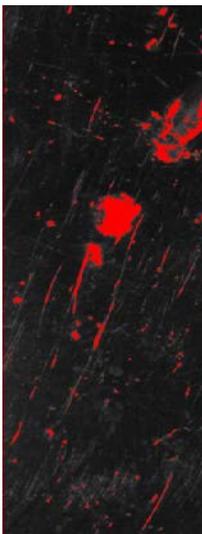
Amostra 2



Secção 1

Secção 2

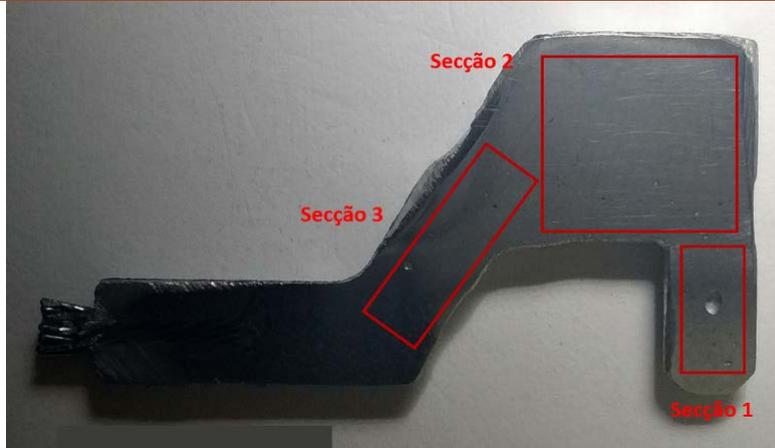
Secção 3



Referência. 12232249 (otimizado)

12232249 (otimizado)

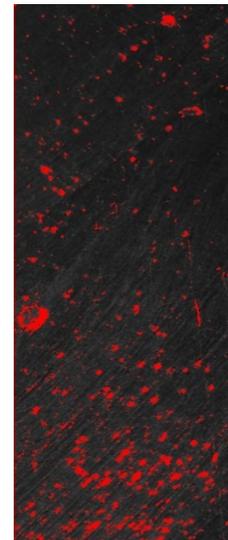
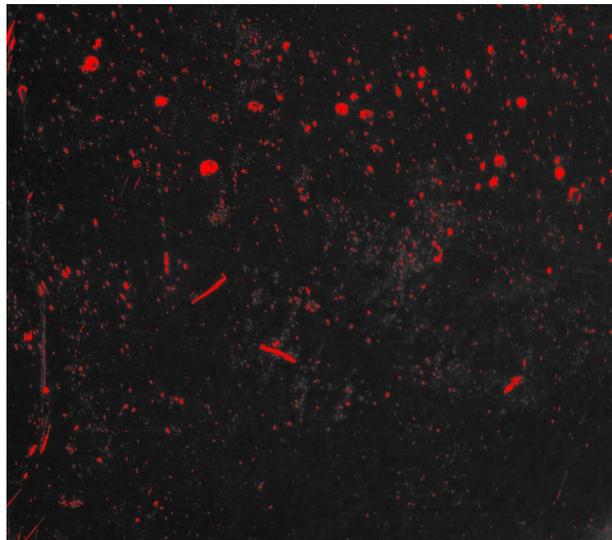
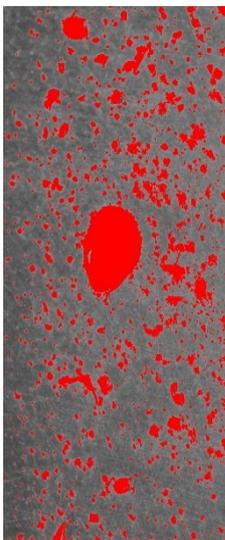
Amostra 1



Secção 1

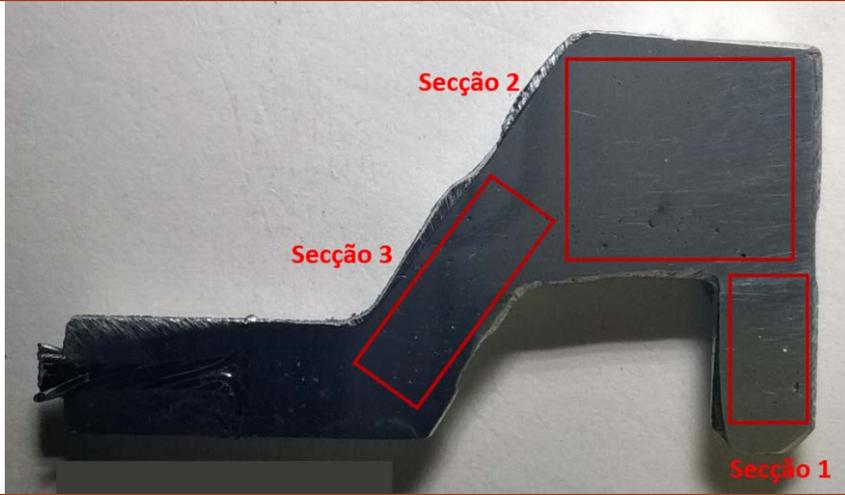
Secção 2

Secção 3



12232249 (otimizado)

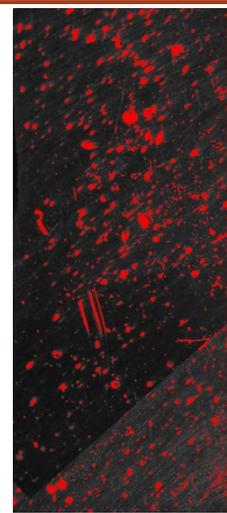
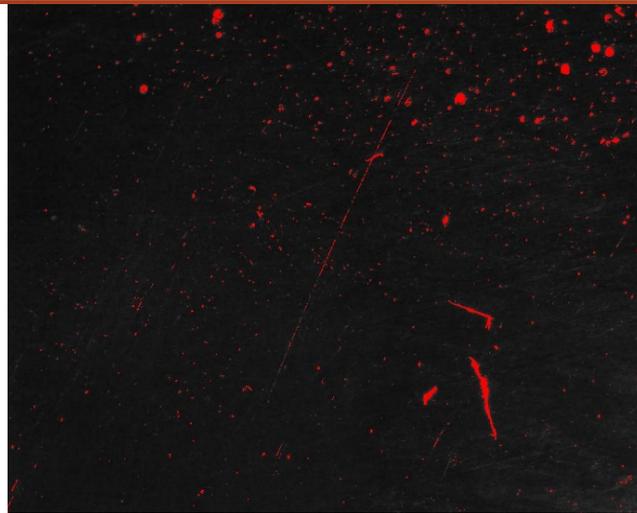
Amostra 2



Secção 1

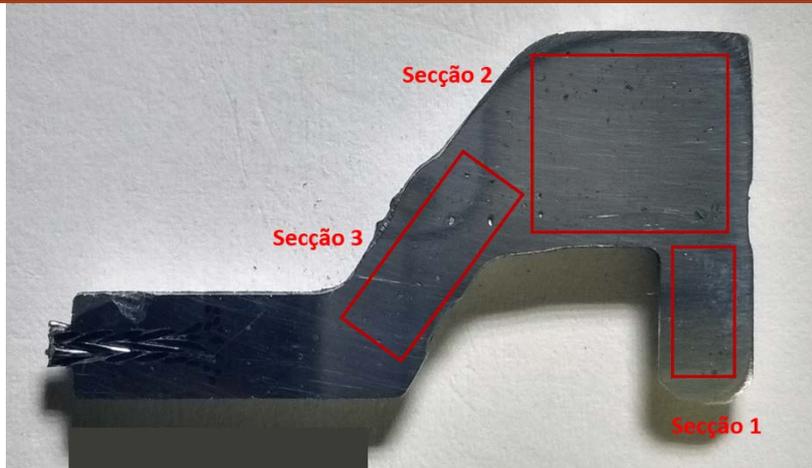
Secção 2

Secção 3



12232249 (otimizado)

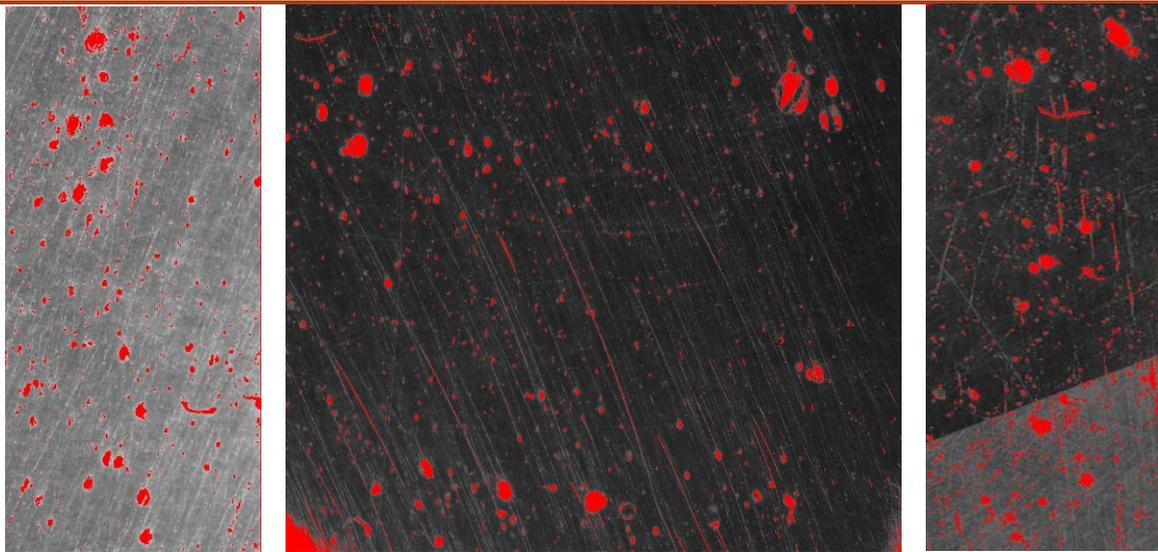
Amostra 3



Secção 1

Secção 2

Secção 3



12232249 Executado

Porosidades (%)

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Secção 1	8,5	3,3	4,0
Secção 2	1,7	2,8	2,3
Secção 3	4,8	5,4	5,8

ANEXO VIII – Tabelas de Transferência de calor

λ (W/(m.k))	d (mm)	x (mm)	y (mm)	Se	Qab (Kj/m)	tk (s)
29	5	10	10	1,077	103,496	46,087
29	5	10	15	0,700	103,496	68,965
29	5	10	20	0,519	103,496	91,842
29	5	10	25	0,412	103,496	114,719
29	5	10	30	0,342	103,496	137,596
29	5	10	35	0,292	103,496	160,473
29	5	15	10	1,517	103,496	33,787
29	5	15	15	1,007	103,496	49,040
29	5	15	20	0,754	103,496	64,291
29	5	15	25	0,603	103,496	79,543
29	5	15	30	0,502	103,496	94,794
29	5	15	35	0,430	103,496	110,046
29	5	20	10	1,858	103,496	28,244
29	5	20	15	1,268	103,496	39,696
29	5	20	20	0,963	103,496	51,135
29	5	20	25	0,776	103,496	62,574
29	5	20	30	0,650	103,496	74,012
29	5	20	35	0,559	103,496	85,451
29	5	25	10	2,115	103,496	25,259
29	5	25	15	1,484	103,496	34,454
29	5	25	20	1,144	103,496	43,609
29	5	25	25	0,931	103,496	52,760
29	5	25	30	0,785	103,496	61,911
29	5	25	35	0,678	103,496	71,062
29	5	30	10	2,305	103,496	23,473
29	5	30	15	1,659	103,496	31,197
29	5	30	20	1,299	103,496	38,834
29	5	30	25	1,068	103,496	46,462
29	5	30	30	0,907	103,496	54,088
29	5	30	35	0,788	103,496	61,713
29	5	35	10	2,446	103,496	22,325
29	5	35	15	1,801	103,496	29,031
29	5	35	20	1,431	103,496	35,596
29	5	35	25	1,188	103,496	42,137
29	5	35	30	1,016	103,496	48,674
29	5	35	35	0,887	103,496	55,210
29	5	40	10	2,553	103,496	21,545
29	5	40	15	1,915	103,496	27,520
29	5	40	20	1,542	103,496	33,292

29	5	40	25	1,292	103,496	39,022
29	5	40	30	1,113	103,496	44,743
29	5	40	35	0,977	103,496	50,463

λ (W/(m.k))	d (mm)	x (mm)	y (mm)	Se	Qab (Kj/m)	tk (s)
29	10	10	10	1,223	103,496	41,040
29	10	10	15	0,759	103,496	63,917
29	10	10	20	0,550	103,496	86,794
29	10	10	25	0,431	103,496	109,671
29	10	10	30	0,355	103,496	132,549
29	10	10	35	0,301	103,496	155,426
29	10	15	10	1,822	103,496	28,739
29	10	15	15	1,133	103,496	43,993
29	10	15	20	0,823	103,496	59,244
29	10	15	25	0,646	103,496	74,495
29	10	15	30	0,531	103,496	89,747
29	10	15	35	0,451	103,496	104,998
29	10	20	10	2,337	103,496	23,197
29	10	20	15	1,475	103,496	34,648
29	10	20	20	1,077	103,496	46,087
29	10	20	25	0,849	103,496	57,526
29	10	20	30	0,700	103,496	68,965
29	10	20	35	0,596	103,496	80,403
29	10	25	10	2,758	103,496	20,212
29	10	25	15	1,774	103,496	29,407
29	10	25	20	1,310	103,496	38,561
29	10	25	25	1,038	103,496	47,712
29	10	25	30	0,859	103,496	56,863
29	10	25	35	0,733	103,496	66,014
29	10	30	10	3,091	103,496	18,426
29	10	30	15	2,031	103,496	26,149
29	10	30	20	1,517	103,496	33,787
29	10	30	25	1,211	103,496	41,414
29	10	30	30	1,007	103,496	49,040
29	10	30	35	0,863	103,496	56,666
29	10	35	10	3,351	103,496	17,277
29	10	35	15	2,247	103,496	23,984
29	10	35	20	1,699	103,496	30,548
29	10	35	25	1,367	103,496	37,089
29	10	35	30	1,144	103,496	43,626
29	10	35	35	0,983	103,496	50,163
29	10	40	10	3,553	103,496	16,498

29	10	40	15	2,427	103,496	22,473
29	10	40	20	1,858	103,496	28,244
29	10	40	25	1,507	103,496	33,974
29	10	40	30	1,268	103,496	39,696
29	10	40	35	1,095	103,496	45,416

λ (W/(m.k))	d (mm)	x (mm)	y (mm)	Se	Qab (Kj/m)	tk (s)
45	5	10	10	1,077	103,496	30,988
45	5	10	15	0,700	103,496	45,732
45	5	10	20	0,519	103,496	60,475
45	5	10	25	0,412	103,496	75,218
45	5	10	30	0,342	103,496	89,961
45	5	10	35	0,292	103,496	104,704
45	5	15	10	1,517	103,496	23,061
45	5	15	15	1,007	103,496	32,891
45	5	15	20	0,754	103,496	42,720
45	5	15	25	0,603	103,496	52,549
45	5	15	30	0,502	103,496	62,377
45	5	15	35	0,430	103,496	72,206
45	5	20	10	1,858	103,496	19,489
45	5	20	15	1,268	103,496	26,869
45	5	20	20	0,963	103,496	34,241
45	5	20	25	0,776	103,496	41,613
45	5	20	30	0,650	103,496	48,984
45	5	20	35	0,559	103,496	56,356
45	5	25	10	2,115	103,496	17,566
45	5	25	15	1,484	103,496	23,492
45	5	25	20	1,144	103,496	29,391
45	5	25	25	0,931	103,496	35,288
45	5	25	30	0,785	103,496	41,186
45	5	25	35	0,678	103,496	47,083
45	5	30	10	2,305	103,496	16,415
45	5	30	15	1,659	103,496	21,392
45	5	30	20	1,299	103,496	26,314
45	5	30	25	1,068	103,496	31,230
45	5	30	30	0,907	103,496	36,144
45	5	30	35	0,788	103,496	41,058
45	5	35	10	2,446	103,496	15,675
45	5	35	15	1,801	103,496	19,997
45	5	35	20	1,431	103,496	24,227
45	5	35	25	1,188	103,496	28,442
45	5	35	30	1,016	103,496	32,655

45	5	35	35	0,887	103,496	36,868
45	5	40	10	2,553	103,496	15,172
45	5	40	15	1,915	103,496	19,023
45	5	40	20	1,542	103,496	22,742
45	5	40	25	1,292	103,496	26,435
45	5	40	30	1,113	103,496	30,122
45	5	40	35	0,977	103,496	33,808

λ (W/(m.k))	d (mm)	x (mm)	y (mm)	Se	Qab (Kj/m)	tk (s)
45	10	10	10	1,223	103,496	27,736
45	10	10	15	0,759	103,496	42,479
45	10	10	20	0,550	103,496	57,222
45	10	10	25	0,431	103,496	71,965
45	10	10	30	0,355	103,496	86,708
45	10	10	35	0,301	103,496	101,451
45	10	15	10	1,822	103,496	19,809
45	10	15	15	1,133	103,496	29,638
45	10	15	20	0,823	103,496	39,467
45	10	15	25	0,646	103,496	49,296
45	10	15	30	0,531	103,496	59,125
45	10	15	35	0,451	103,496	68,953
45	10	20	10	2,337	103,496	16,237
45	10	20	15	1,475	103,496	23,617
45	10	20	20	1,077	103,496	30,988
45	10	20	25	0,849	103,496	38,360
45	10	20	30	0,700	103,496	45,732
45	10	20	35	0,596	103,496	53,103
45	10	25	10	2,758	103,496	14,313
45	10	25	15	1,774	103,496	20,239
45	10	25	20	1,310	103,496	26,138
45	10	25	25	1,038	103,496	32,036
45	10	25	30	0,859	103,496	37,933
45	10	25	35	0,733	103,496	43,830
45	10	30	10	3,091	103,496	13,162
45	10	30	15	2,031	103,496	18,139
45	10	30	20	1,517	103,496	23,061
45	10	30	25	1,211	103,496	27,977
45	10	30	30	1,007	103,496	32,891
45	10	30	35	0,863	103,496	37,806
45	10	35	10	3,351	103,496	12,422
45	10	35	15	2,247	103,496	16,744
45	10	35	20	1,699	103,496	20,974

45	10	35	25	1,367	103,496	25,189
45	10	35	30	1,144	103,496	29,402
<u>45</u>	10	35	35	<u>0,983</u>	<u>103,496</u>	<u>33,615</u>
45	10	40	10	3,553	103,496	11,919
45	10	40	15	2,427	103,496	15,770
45	10	40	20	1,858	103,496	19,489
45	10	40	25	1,507	103,496	23,182
45	10	40	30	1,268	103,496	26,869
<u>45</u>	10	40	35	<u>1,095</u>	<u>103,496</u>	<u>30,555</u>

ANEXO IX – Programa Matlab para cálculo dos parâmetros de escoamento

Código MATLAB para o cálculo das pressões iniciais

```

% limpa todas as variáveis existentes %
clear all
% limpa o ecrã %
clc
% Instruções %
disp('CALCULO DE PRESSOES')
disp(' Complementos necessarios para operar com o programa : ')
disp(' - Pressao introduzida - " Pressao inicial definida na maquina para o pistao " ')
disp(' - Diagrama com dimensoes do mecanismo ')
disp(' - Cotas iniciais e finais dos pontos de aplicacao dos vectores das forças ou
pressoes ')

% limpa o ecrã %
clc
% Força Resultante do Mecanismo %
p0=input(' Pressao inicial aplicada ao pistao de acionamento "p0" [Pa] : ');
d0=input(' Diametro do pistao de acionamento [m] "d0" : ');
d1=input(' Diametro do pistao da bomoba de injeção [m] "d1" : ');
b1=input(' Braço da Aplicação do Momento a Força 0 (Força da haste do pistao de
acionamento) "b1" [m] : ');
b2=input(' Braço da Aplicação do Momento a Força 1 (Força aplicada ao pistao da
bomba de injeção) "b2" [m] : ');
F0=p0*((pi*(d0^2)/4))
a1=input(' Angulo da Força 1 com o eixo vertical "a1" [º] : ')
F1=(F0*b1/b2*cos(a1*0.017448))
z1=input(' Altura da base da bomba de injeção ao Pistao "z1" [m] : ')
L=input(' Comprimento do Canal Escoamento "L" [m] : ');
ag=input(' Angulo do Canal de Escoamento com o eixo xx "ab" [º] : ');
h1=input(' Altura da base da bomba ao centro do canal de escoamento "h1" [m] : ')
z2=h1+L*tan(ag*0.017448)
p1=(F1/((pi*d1^2)/4))
% limpa o ecrã %
clc
disp (' Pressao Inicial "p0" [Pa] : ')
disp (p0)
disp (' Força inicial "F0" [N] : ')
disp (F0)
disp (' Força 1 "F1" [N] : ')

```

```
disp (F1)
disp (' Altura da Pressao "z1" [m] : ')
disp (z1)
disp (' Altura da Pressao "z2" [m] : ')
disp (z2)
disp (' Pressao no embolo "p1" [Pa] : ')
disp (p1)
pause
```

Código MATLAB para o cálculo dos escoamentos

```
clear
clc

% Estudo do Escoamento da Bomba %
% 1 - Definicao do Material de Fundicao %

clc
disp ('Gravidade g=9.81');
disp (' Caracterizacao do Material de Fundicao ');
Ro=input ('Inserir Peso Volumico do Material [Kg/m3] : ');
W1=input ('Inserir Viscosidade Dinamica do Material [Kg/m.s] = ([Pa.s] = [N.S/m2]) : ');
pause

% 2 - Definicao dos Principais Valores Geometricos da Bomba %

clc
disp (' Caracterizacao Geometrica da Camara da bomba ');
L1=input ('Inserir Distancia do embolo ao centro do canal de escoamento [m] : ');
D1=input ('Inserir Diametro do embolo [m] : ');
disp (' Caracterizacao Geometrica do Canal de Escoamento ');
l2=input ('Inserir Comprimento do Canal de Escoamento [m] : ');
d2=input ('Inserir Diametro do Canal de Escoamento [m] : ');
Dlt=input ('Inserir Angulo do Canal de Escoamento com a ordenada xx : ');
pause

% 3 - Pressao do embolo da bomba p1 %

clc
F1=input('Inserir Forca Aplicada ao embolo da Bomba [N] : ');
A1=((3.1416*(D1^2))/4);
a2=((3.1416*(d2^2))/4);
h2=((l2*tan(Dlt*(3.1416/180)))+(d2/2))
pause
p1=F1/A1;
disp ('Area A1 [m2] = ');
disp (A1)
disp ('Area A2 [m2] = ');
disp (a2)
disp ('Pressao p1 [Pa] = ');
disp (p1)
pause
```

% 4 - Calculo das Velocidades do Material de Injecao %

```
Q=input('Inserir Caudal de Material a Injectar [m3/s] : ');
U1=(Q/A1);
U2=(Q/a2);
```

% 5 - Calculo das perdas de Carga %

```
clc
disp (' Calculo das Perdas de Carga ');
e1=input ('Valor da Rugosidade do Material de Construcão da Camara da Bomba [--] : ');
e2=input ('Valor da Rugosidade do Material de Construcão do Canal de Escoamento [--] : ');
clc
disp ('NOTA : Anotar os valores de E/D e de f da bomba e do canal de escoamento');
disp ('- Camara da Bomba');
disp ('Velocidade do Escoamento na Camara da Bomba : ');
disp (U1)
x=(e1/(D1*(10^3)));
RB=((Ro*U1*D1)/(W1));
disp ('Reynolds da Bomba ReB = ');
disp (RB);
disp ('e1/D1 = ');
disp (x);
pause
disp ('- Canal de Escoamento');
disp ('Velocidade do Escoamento no Canal de Escoamento : ');
disp (U2)
y=(e2/(d2*(10^3)));
RC=((Ro*U2*d2)/(W1));
disp ('Reynolds do Canal ReC = ');
disp (RC);
disp ('e2/d2 = ');
disp (y);
pause
```

% 5.1 - Calculo dos valores dos factores de friccao (f) %

```
disp ('Atraves do Diagrama de Moody encontrar o valor de f para a Bomba e para o Canal de escoamento');
f1=input ('Inserir f da Bomba (f1) : ');
```

```

f2=input('Inserir f do Canal de Escoamento (f2) : ');
pause
% 5.2 - Perdas localizadas devido ao constrangimento da entrada brusca na passagem
da camara da bomba para o canal de escoamento %
clc
disp('- Perdas localizadas devido ao constrangimento da entrada brusca na passagem
da camara da bomba para o canal de escoamento');
Kb=(0.42*(1-((d2^2)/(D1^2))));
disp(Kb);
disp('- Soma das perdas na Bomba ');
hf1((((U1^2)/(2*9.81))*(f1*(L1/D1)+Kb));
disp('hf1 = ');
disp(hf1);
disp('- Soma das perdas no Canal de Escoamento ');
hf2((((U2^2)/(2*9.81))*(f2*(l2/d2)));
disp('hf2 = ');
disp(hf2);
hct=L1-h2
pause

% 6 - Calculo da pressao p2 a saida do canal de escoamento %

p2((((p1/(Ro*9.81))+((U1^2)/(2*9.81))+L1)-((U2^2)/(2*9.81))-(L1-h2)-hf1-
hf2)*(Ro*9.81));
disp('Pressao na Saida do Canal de Escoamento [Pa] : ');
disp(p2)
pause

% 7 - Calculo da pressao p3 a saida do bico de injecao %

clc
L3=input('Comprimento Total do Bico de Injecao [m] : ');
D3=input('Inserir Diametro da Saida do Bico de Injecao : ');
Lb2=input('Inserir Comprimento do Diametro de entrada do Bico de Injecao : ');
Lb3=input('Inserir Comprimento do Diametro de saida do Bico de Injecao : ');
h3=L3*tan(Dlt*(3.1416/180))
A3=((3.1416*(D3^2))/4);
U3=(Q/A3)
pause
disp('Area A = ');
disp(A3);
disp('Altura Do Bico de Injecao h3 = ');

```

```

disp (h3);
disp ('Pressao a entrada do bico de injecao p = ');
disp (p2);
pause

```

% 7.1 - Calculo das perdas de Carga (Encontro dos factores de friccao (f))%

```

clc
e3=input ('Valor da Rugosidade do Material do Bico de Injecao : ');
disp ('Bico de Injecao');
x2=(e3/(d2*(10^3)));
x3=(e3/(D3*(10^3)));
disp ('NOTA : Anotar os valores de E/D e de f das zonas do Bico de Injecao');
Re3=((Ro*U3*D3)/(W1));
disp ('Reynolds a Entrada do Bico de Injecao Re = ');
disp (RC);
disp ('Reynolds a saida do Bico de Injecao Re = ');
disp (Re3);
disp ('e3/d2 = ');
disp (x2);
disp ('e3/D3 = ');
disp (x3);
disp ('Atraves do Diagrama de Moody encontrar o valor de f para a os dois Diametros
do bico de Injecao');
f3=input ('Inserir f da Seccao de Entrada do Bico : ');
f4=input ('Inserir f da Seccao de Saida do Bico : ');

```

% 7.2 - Calculo das perdas de Carga (Encontro dos Constrangimentos)%

```

clc
disp ('Perdas Localizadas devido a constrangimentos pelo diagrama 6.21 e em funcao
das variaveis presentes no mesmo');
Lk=input ('Inserir valor de L : ');
te=input ('Inserir valor de Angulo teta : ');
clc
disp (' Pelo diagrama 6.21 achar os valores para : ');
disp ('L = ');
disp (Lk);
disp ('Angulo Teta = ');
disp (te);
k3=input (' Inserir valor encontrado : ');

```

% 7.3 - Calculo dos hf dos canais do Bico de Injecao %

```
hf3=(((U2^2)/(2*9.81))*(f3*(Lb2/d2)+k3))
```

```
hf4=(((U3^2)/(2*9.81))*(f4*(Lb3/D3)))
```

```
pause
```

% 7.4 - Calculo da pressao a saida do Bico de Injecao %

```
p3 =(((p2/(Ro*9.81))+((U2^2)/(2*9.81))-((U3^2)/(2*9.81))-h3-hf3-hf4)*(Ro*9.81));
```

```
disp ('Pressao a Saida do Bico de Injecao = ');
```

```
disp (p3)
```

```
pause
```

Código MATLAB para o cálculo das pressões de Bernouli

```

% limpa todas as ariaveis existentes %
clear all

% limpa o ecran %
Clc

% Instrucoes %
disp('INSTRUÇÕES')
disp(' Complementos necessarios para operar com o programa : ')
disp(' - Diagrama de Moody          ')
disp(' - Tabela de Rugosidade dos Materiais      ')
disp(' - Diagramas de Perdas          ')
disp('          ')
disp('  PARTE I  ')
disp('          ')
disp(' Antes de iniciar necessario conhecer : ')
disp(' - Volume da peça.')
disp(' - Tempo de Enchimento.')
disp(' - Diametros de todos os canais de escoamento.')
disp(' - Pressao de Injeção.')
disp(' - Cota do ponto de pressao 1.')
disp(' - Cota do ponto de pressao 2.')
disp('          ')
disp('  PARTE II  ')
disp('          ')
disp(' - Rugosidades dos canais de escoamento " Função do material constituinte" .
')
disp(' - Diametros hidraulicos dos canais de escoamento.  ')
disp(' - Comprimentos de escoamento dos canais.  ')
pause

% --- limpa o ecran %
Clc

% Propriedades do Material %
ro=input(' Massa Volumica [Kg/m3] : ');
h=input(' Coeficiente de viscosidade [constante] : ');

% Caracteristicas do enchimento %
v1=input(' Volume a Injectar [m3] : ');
m=input(' Massa a injectar [KG] : ');

```

```

d1=input(' Diametro Inicial d1 [m] : ');
d2=input(' Diametro Final d2 [m] : ');
p1=input(' Pressao de injeção no ponto 1 [Pa] : ');
t=input(' Tempo de Enchimento [s] : ');

% Areas %
a1=((3.1416*(d1)^2)/4);
a2=((3.1416*(d2)^2)/4);

% Caudais %
q=(v1/t);

% Areas e Velocidades %
u1=(q/a1);
u2=(q/a2);

% --- limpa o ecrã %
clc
disp (' Area 1 [m2] : ')
disp (a1)
disp (' Area 2 [m2] : ')
disp (a2)
disp (' Caudal [m3/s] ')
disp (q)
disp (' Velocidade 1 [m/s] : ')
disp (u1)
disp (' Velocidade 2 [m/s] : ')
disp (u2)
pause

% Perdas - Equação de Darcy-Weisbach %
% Diametro hidraulico Conduas Circulares %

dh1=(4*(pi*((d1*1000)^2)/4))/(pi*(d1*1000))
dh2=(4*(pi*((d2*1000)^2)/4))/(pi*(d2*1000))
disp('Diametros hidraulicos para conduas circulares')
disp(' Diametro hidraulico 1 [mm] : ')
disp(dh1)
disp(' Diametro hidraulico 2 [mm] : ')
disp(dh2)

% -- 1º - Camara do pistao %
% --- limpa o ecrã %

```

```

clc
e1=input(' Rugosidade da camara do pistao (Ver tabelas de materiais) [mm] : ');
l1=input(' Comprimento do escoamento na camara do pistao [m] : ');
re1=((ro*u1*d1)/h);
n1=(e1/dh1)
disp ('Valores dos parametros de aplicação no Diagrama de Moody para Escoamento
na camara do pistao')
disp(' Nº de Reynolds : ');
disp (re1)
disp('E/Dh')
disp (n1)
disp(' INSTRUÇÃO: [Com os valores Re e E/Dh, encontrar f (coeficiente de fricção) no
diagrama de Moody (em anexo com o programa) ]');
f1=input(' Inserir valor de f (coeficiente de fricção) para pistao : ');
disp(' INSTRUÇÃO: [Encontrar os valores de k pelo diagrama de perdas e devida
equação (em anexo com o programa) ]');
k1=input(' Inserir valor de k (coeficiente de perdas) para pistao : ');
hf1((((u1)^2)/(2*9.81))*((f1)*((l1)/(d1))+k1);

% -- 2º - Tubo de alimentação %
% --- limpa o ecrã %

clc
disp ('Valores dos parametros de aplicação no Diagrama de Moody para Escoamento
no canal de alimentação')
e2=input(' Rugosidade [Ver tabelas de materiais] : ');
l2=input(' Comprimento do escoamento conduta [m] : ');
re2=((ro*u2*d2)/h);
n2=(e2/dh2);
disp(' Nº de Reynolds : ');
disp (re2)
disp('E/Dh')
disp (n2)
disp(' INSTRUÇÃO: [Com os valores Re e E/Dh, encontrar f (coeficiente de fricção) no
diagrama de Moody (em anexo com o programa) ]');
f2=input(' Inserir valor de f (coeficiente de fricção) para tubo de alimentação : ');
disp(' INSTRUÇÃO: [Encontrar os valores de k pelo diagrama de perdas e devida
equação (em anexo com o programa) ]');
k2=input(' Inserir valor de k (coeficiente de perdas) para tubo de alimentação : ');
hf2((((u1)^2)/(2*9.81))*((f1)*((l1)/(d1))+k2);

% Calculo da pressao em p2 - Equação de Bernouli %

```

```
% Calculo da altura z1 %
```

```
% --- limpa o ecrã %
```

```
clc
```

```
z1=input(' Inserir Altura de z1 [m] : ');
```

```
z2=input(' Inserir Altura de z2 [m] : ');
```

```
p2=(((p1)/(ro*9.81))+((u1)^2)/(ro*9.81))+z1-(((u2)^2)/(ro*9.81))-z2-hf1-  
hf2)/(ro*9.81);
```

```
disp(' Pressao no ponto 2 : ')
```

```
disp (p2);
```

```
pause
```

```
% -----
```

```
----- %
```

Código MATLAB para o cálculo da geometria dos gitos.

```

clear
clc

% Estudo Das Velocidades e Pressoes no Sistema de Gitagem %

disp ('Estudo Das Velocidades e Pressoes no Sistema de Gitagem');
disp (' ');
Ro=input ('Inserir Peso Volumico do Material [Kg/m3] : ');
W1=input ('Inserir Viscosidade Dinamica do Material [Kg/m.s] = ([Pa.s] = [N.S/m2]) : ');

% 1 - Estudo Das Velocidades e Pressoes no Sistema de Gitagem %
% 1.1 - Area Aproximada a um Rectangulo em Funcao da Velocidade e Regime %

Re=input ('Inserir Valor de Reynolds em funcao do Regime Pretendido : ');
U=input ('Inserir a Velocidade no Gito : ');
A=input ('Inserir Valor Maximo de Altura do Gito : ');
Dh=(Re*W1)/(U*Ro);
B=((2*Dh)/(4*A-2*Dh));
Area=A*B;
while Re > 2500,
    A=input('Inserir Area do Canal de Gitagem : ');
    P=input('Inserir Perimetro do Canal de Gitagem : ');
    Dh=((4*A)/P);
    disp ('Diameto Hidraulico : ');
    disp (DH);
    disp (' ');
    U=input ('Inserir Velocidade do material para a Seccao em Analise : ');
    ReDH=((Ro*U*Dh)/W1);
    disp (' ');
    disp ('Reynolds da Area Actual : ');
    if Re < 2200
        disp (Re);
        disp ('Escoamento Laminar')
        if Re > 2200 and Re < 400
            disp (Re);
            disp ('Regime Intermedio');
            if Re > 4000
                disp (Re);
                disp ('Regime Turbulento');
            end
        end
    end
end
end

```

```
end
%solve ((Ro*U*((4*A)/P))/W1)=0);%
%-----%
disp ('Calculo da Area de Escoamento em Funcao do Regime e Velocidade');
disp (' ');
disp ('Calculo do Valor de Reynolds para um Regime Laminar');
disp (' ');
Ro=input ('Inserir Peso Volumico do Material [Kg/m3] : ');
W1=input ('Inserir Viscosidade Dinamica do Material [Kg/m.s] = ([Pa.s] = [N.S/m2]) : ');
disp (' ');
Ro=input ('');
W1=input ('');
pause
end
```

ANEXO X – Propriedades da liga de aço UDDEHOLM UNIMAX (catálogo do fornecedor)

ANEXO XI – Desenhos das otimizações dos moldes

ANEXO XII – Artigos Internacionais “Optimisation of die casting processo in *Zamak alloys*”