

Estudo de moldes em alumínio fundido para o fabrico de solas para calçado

Pedro Afonso Fonseca Gomes de Campos

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Fernando Jorge Lino Alves

Orientador no INEGI: Prof. Rui Jorge de Lemos Neto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho de 2018

Figueira da Foz, Porto, Paris, Oran.

Resumo

Durante a produção de solas para calçado através do processo de moldação por compressão de borracha surgem frequentemente fraturas nas bases dos moldes, que são fabricadas numa liga de alumínio fundido. Os atrasos causados na produção de solas e os custos associados à produção de novos moldes revelam a necessidade de um estudo que leve à compreensão das causas das fraturas, com o objetivo de minimizar o número de ocorrências, sendo esse o objetivo principal da presente dissertação.

O projeto consistiu no estudo de dois moldes, um que fraturou e outro que funcionou sem qualquer tipo de adversidade. O objetivo passou por tentar compreender as diferenças entre os moldes e as limitações de cada um, bem como por encontrar métodos para aumentar as suas resistências mecânicas, nomeadamente ao nível de tratamentos térmicos.

O estudo envolveu análises microestruturais de amostras extraídas dos moldes, com o objetivo de avaliar eventuais defeitos existentes, ensaios de tração e dureza em provetes e amostras retiradas de diferentes regiões, de modo a identificar as suas propriedades mecânicas, realização de tratamentos térmicos a amostras e provetes, de forma a aferir possíveis melhorias nas propriedades mecânicas dos moldes e, por fim, simulações computacionais do processo de moldação por compressão de borracha, com o objetivo de identificar as regiões mais solicitadas e as tensões atingidas durante o processo.

Concluiu-se que os moldes têm grandes heterogeneidades a nível microestrutural e de propriedades mecânicas, bem como uma quantidade elevada de microrechupes, o que revela deficiências no processo de fundição. Através de simulações computacionais verificou-se que as tensões atingidas nas cavidades dos moldes, embora dependam da geometria da sola a produzir, são mais elevadas do que aquelas que os materiais são capazes de suportar, pelo que a liga utilizada, no estado bruto de vazamento, não é adequada para o processo. Concluiu-se ainda que a aplicação de tratamentos térmicos aos moldes aumenta consideravelmente a sua resistência mecânica, o que diminui a possibilidade de ocorrência de fraturas.

Palavras-chave: moldes para calçado, alumínio fundido, fratura de moldes

Study of cast aluminum molds for the production of shoe soles

Abstract

During the production of shoe soles through the rubber compression molding process fractures often occur in the bases of the molds made of an aluminum alloy by casting. The delays caused in the production of soles and the costs associated with the production of new molds reveal the need for a study that leads to an understanding of the causes of these fractures with the aim of minimizing the number of occurrences, with this being the main goal of this dissertation.

The project consisted of the study of two molds, one that fractured and another that operated without any type of adversity. The objective was to try to understand the differences between the molds and the limitations of each one of these, as well as to find methods to increase their mechanical resistance, namely at the level of heat treatments.

The study involved microstructural analysis of samples extracted from the molds in order to evaluate possible defects, tensile and hardness tests on specimens and samples retrieved from different regions to identify their mechanical properties, heat treatments on samples and specimens in order to assess possible improvements in the mechanical properties of the molds and, lastly, computational simulations of the rubber compression molding process in order to identify the regions of greatest stresses as well as its values reached during the process.

It was concluded that the molds have great heterogeneities at a microstructural level and regarding their mechanical properties, as well as a high amount of shrinkage defects, which reveals deficiencies in the casting process. Through computational simulations it has been found that the stresses reached in the mold cavities, while depending on the geometry of the sole to be produced, are higher than those that the materials are able to withstand, whereby the alloy used, in its original state, is not suitable for the process. It was also concluded that the application of heat treatments to the molds greatly increases their mechanical properties, which diminishes the possibility of fractures.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que tanto esta dissertação como todo o meu percurso académico fossem possíveis.

Ao Orientador da dissertação na FEUP, Professor Jorge Lino, por todas as horas dedicadas à sua orientação e discussão de ideias e resultados, bem como por todos os conselhos dados.

Ao Professor Rui Neto, Orientador no INEGI, pelos conhecimentos transmitidos, sugestões, análises de resultados e tempo despendido em prol da dissertação.

À Professora Teresa Duarte, pelo apoio prestado durante todo o meu percurso na FEUP e pelo espírito de amizade com que encara a relação Professor – Estudante.

À Procalçado, nas pessoas de:

- Dr. José Azevedo Pinto, CEO da empresa, por me ter proporcionado a oportunidade de estagiar na Procalçado e pelos vários momentos de debate;
- Eng. Miguel Araújo, por me ter esclarecido inúmeras dúvidas e feito o contacto com os fabricantes de moldes sempre que necessitei, bem como aos restantes elementos do Departamento Comercial;
- Sr. Joaquim Barros, chefe do setor de compressão de borracha, por ter disponibilizado os moldes necessários à realização deste projeto;
- Eng. Rudy Matos, pelas sugestões e trocas de ideias;
- Mestre Hugo Cardoso, pela ajuda prestada no desenho CAD das solas estudadas;
- Todos os operários, que se mostraram disponíveis para me esclarecer dúvidas acerca dos processos de fabrico de solas.

À Virtual Moldes, produtora de moldes, por me ter aberto as portas e ajudado a compreender o seu processo produtivo.

Ao Design Studio FEUP, concretamente ao Pedro José Campos e ao Eng. Luís Galamba de Carvalho, pelas sugestões e realização das simulações computacionais.

À Sra. Emília Soares, do Laboratório de Materiais do DEMec, pelo auxílio prestado na preparação de amostras para análise microestrutural.

À Sra. Armanda Marques, do Laboratório de Materialografia do INEGI, pela análise da composição química das amostras recolhidas.

Ao Laboratório de Ensaios Tecnológicos do DEMec, pelos ensaios de tração e ensaios de dureza realizados.

Às oficinas do DEMec, pela disponibilidade para maquinar amostras e provetes para os ensaios de tração.

Ao Laboratório de Desenvolvimento do Produto e Serviços do DEMec, concretamente ao Eng. Bruno Areias, pela digitalização tridimensional das solas produzidas através dos moldes estudados.

Ao INEGI, por ter posto à minha disposição os fornos necessários aos tratamentos térmicos.

Ao financiamento do Projeto NORTE-01-0145-FEDER-000022 - SciTech - Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

A todos os meus amigos, por estarem presentes tanto nos momentos de trabalho como naqueles em que os estudos foram deixados para segundo plano. Devo um agradecimento especial ao Bruno Ferreira, pela ajuda na realização dos tratamentos térmicos e pelos bons momentos passados durante as horas em que estes decorreram.

Por fim, o maior de todos os agradecimentos é dedicado à minha família, sobretudo Pai, Mãe e Irmão, por me proporcionarem uma vida repleta de oportunidades, transmitirem os valores que possuo e apoiarem nos bons e maus momentos. É sobretudo graças a vocês que termino esta etapa.



Conteúdo

1. Introdução	1
1.1. Indústria do calçado	1
1.2. Procalçado S.A.	2
1.3. Enquadramento e objetivos	3
1.4. Metodologia	3
1.5. Estrutura	4
2. Revisão bibliográfica	5
2.1. Solas para calçado	5
2.1.1. Tipos de borracha	7
2.1.2. Propriedades das borrachas	9
2.1.3. Aditivos	10
2.1.4. Vulcanização	10
2.1.5. Moldação por compressão de borracha	12
2.2. Moldes para calçado	17
2.2.1. Produção de moldes	18
2.2.2. Ligas de alumínio para fundição	20
2.2.2.1. Efeito dos elementos de liga	22
2.2.2.2. Ligas de alumínio-silício	24
2.2.3. Defeitos de fundição	25
2.2.3.1. Porosidades	25
2.2.3.2. Rechupes	26
2.2.3.3. Inclusões	26
2.2.3.4. Falta de enchimento	27
2.2.3.5. Contração no estado sólido	27
2.2.4. Tratamentos térmicos	28

2.2.4.1. Solubilização.....	30
2.2.4.2. Têmpera.....	31
2.2.4.3. Envelhecimento artificial	32
2.3. Simulações	33
2.3.1. Métodos numéricos.....	33
2.3.2. <i>Software</i> abordado.....	35
3. Trabalho experimental	37
3.1. Enquadramento – Fratura de moldes	37
3.2. Procedimento	40
3.2.1. Introdução e objetivos	40
3.2.2. Materiais.....	41
3.2.3. Métodos	44
3.2.3.1. Análise da composição química.....	44
3.2.3.2. Ensaio dilatométrico	44
3.2.3.3. Análise microestrutural.....	44
3.2.3.4. Ensaaios de dureza	46
3.2.3.5. Tratamentos térmicos	46
3.2.3.6. Ensaaios de tração	47
3.2.3.7. Simulações computacionais.....	50
3.3. Molde META 35,5.....	51
3.3.1. Composição química.....	51
3.3.2. Ensaio dilatométrico	53
3.3.3. Análise microestrutural e de dureza	54
3.3.4. Tratamentos térmicos	56
3.3.4.1. Curva de solidificação	57
3.3.4.2. Envelhecimento a 185 °C.....	58
3.3.4.3. Envelhecimento a 175 °C	60
3.3.5. Ensaaios de tração.....	62
3.4. Molde DIVA 38.....	64
3.4.1. Ensaaios de tração.....	64
3.4.1.1. Provetes no estado bruto de vazamento	64
3.4.1.2. Provetes tratados termicamente.....	65
3.4.2. Análise microestrutural e de dureza	66
3.5. Simulações computacionais	68

3.5.1. Molde META 35,5.....	70
3.5.2. Molde DIVA 38.....	73
3.5.3. Análise de amostra da zona de tensões máximas do molde META 35,5.....	75
3.6. Análise de resultados.....	77
3.6.1. Heterogeneidades dos moldes.....	77
3.6.2. Comparação entre moldes	79
3.6.3. Tratamentos térmicos	80
3.6.4. Comparação com a liga 319.0	81
3.6.5. Simulações computacionais.....	83
4. Conclusões e trabalhos futuros	87
4.1. Conclusões	87
4.2. Trabalhos futuros	88
Referências Bibliográficas.....	91
Anexo A: Provetes utilizados nos ensaios de tração.....	95
Anexo B: Malhas utilizadas para as simulações computacionais	97
Anexo C: Curvas de tensão deformação dos provetes extraídos do molde META 35,5....	98
Anexo D: Curvas de tensão-deformação dos provetes extraídos do molde DIVA 38 no estado bruto de vazamento	101
Anexo E: Curvas de tensão-deformação dos provetes extraídos do molde DIVA 38 sujeitos a um tratamento térmico T6	105

Siglas e símbolos

Siglas

APICCAPS – Associação Portuguesa dos Industriais de Calçado, Componentes, Artigos de Pele e seus Sucedâneos

CAD – *Computer Aided Design* / Desenho Assistido por Computador

CAE – *Computer Aided Engineering* / Engenharia Assistida por Computador

CR – *Chloroprene rubber* / Borracha de cloropreno

DEMec – Departamento de Engenharia Mecânica

E-SBR – *Emulsion styrene-butadiene rubber* / Borracha de butadieno estireno por emulsão

EVA – *Ethylene-vinyl acetate* / Acetato-vinilo de etileno

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

INEGI – Instituto de Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

MDF – Método das Diferenças Finitas

MDR – *Moving Die Rheometer* / Reometria de cavidade oscilante

MEF – Método dos Elementos Finitos

NBR – *Nitrile butadiene rubber* / Borracha de butadieno-acrilonitrilo

NR – *Natural rubber* / Borracha natural

ODR – *Oscillating Disc Rheometer* / Reometria de discos oscilatórios

PU – Poliuretano

PVC – Policloreto de vinilo

SA – Sociedade Anónima

SBR – *Styrene-butadiene rubber* / Borracha de butadieno estireno

S-SBR – *Solution styrene-butadiene rubber* / Borracha de butadieno estireno por solução

Símbolos

E – Módulo de Young

F – Força exercida pelo cilindro hidráulico no conjunto de moldes no processo de moldação por compressão

F* – Força exercida pelo cilindro hidráulico em cada molde no processo de moldação por compressão

P – Pressão do óleo injetado no cilindro hidráulico no processo de moldação por compressão

P* – Pressão hidrostática exercida nas cavidades dos moldes no processo de moldação por compressão

S – Área projetada total da cavidade dos moldes para moldação por compressão

S* – Área projetada da cavidade de uma sola nos moldes para moldação por compressão

Φ – Diâmetro do cilindro hidráulico utilizado no processo de moldação por compressão

σ_e – Tensão limite de elasticidade medida a 0,2 % de deformação

σ_r – Tensão de rotura

Índice de Figuras

Figura 1 – Valor das exportações na indústria do calçado entre 2010 e 2017, em milhões de euros, verificando-se uma tendência de crescimento [1]	1
Figura 2 – Logótipo da Procalçado [2].....	2
Figura 3 – Vista aérea das instalações da Procalçado em Pedroso, Vila Nova de Gaia [2].....	2
Figura 4 – Designações habitualmente utilizadas nas solas para calçado – a) planta; b) vista lateral; c) vista lateral do interior, após corte da sola; d) vista aproximada da zona da grade	6
Figura 5 – Borracha natural utilizada na Procalçado.....	7
Figura 6 – Produção mundial de borracha natural de 2000 a 2016, apresentando uma tendência de crescimento – adaptado de [9].....	7
Figura 7 – Ligações cruzadas na borracha devido à vulcanização [22]	11
Figura 8 – Curva de vulcanização genérica, indicando o binário em função do tempo – adaptado de [25].....	12
Figura 9 – Pré-formado em borracha para a produção de solas para calçado através do método de moldação por compressão.....	13
Figura 10 – Processo de moldação por compressão, com o molde aberto (a) e fechado (b) – adaptado de [28].....	13
Figura 11 – Sola com uma quantidade significativa de rebarba.....	13
Figura 12 – Máquina de moldação por compressão com 4 moldes	14
Figura 13 – Etapas da produção de uma sola através de moldação por compressão – a) colocação dos pré-formados; b) abertura do molde após compressão; c) solas separadas e rebarba cortada de forma grosseira; d) corte da rebarba com precisão; e) operações de acabamento; f) aspeto final das solas	16
Figura 14 – Processo de moldação por transferência, com o molde aberto (a) e fechado (b) – adaptado de [28].....	17
Figura 15 – Maquete de apresentação para aprovação do cliente [2]	18
Figura 16 – Etapas da produção da base de um molde para o fabrico de solas para calçado através do método de moldação por compressão – a) maquete de fundição colada a caixa de Necuron®; b) modelo em silicone da base do molde; c) modelo negativo da base do molde em gesso refratário; d) modelo em gesso refratário colocado numa caixa em aço revestida por placas de fibra cerâmica; e) alumínio líquido vazado; f) base em alumínio após solidificação e corte do gito	19
Figura 17 – Tampa da caixa onde a base em alumínio solidifica (a) e caixa com a base do molde já solidificada no seu interior, antes do corte do gito (b).....	20
Figura 18 – Base e tampa de molde para fabrico de solas para calçado através do processo de moldação por compressão [33]	20
Figura 19 – Diagrama de equilíbrio de fases das ligas de alumínio-silício [43]	24
Figura 20 – Microestrutura de peça obtida por fundição contendo porosidades [46, 47].....	25
Figura 21 – Rechupes numa pela obtida através de fundição [46]	26

Figura 22 - Fissuração devida às tensões resultantes da contração no estado sólido de uma peça obtida por fundição [45]	28
Figura 23 – Fases do tratamento térmico T6 [52].....	30
Figura 24 – Microestruturas de uma liga de alumínio-silício antes (a) e depois da solubilização (b) [56]	31
Figura 25 – Curva de envelhecimento [51]	32
Figura 26 – Comparação entre bases de moldes normais (a) e de moldes de caixa (b), com maior profundidade, onde se dá a maioria das fraturas	38
Figura 27 – Molde META disponibilizado pela Procalçado, com a região fraturada assinalada a vermelho.....	38
Figura 28 – Vista detalhada da fenda no molde META 35,5, tanto na cavidade (a), como nas zonas laterais (b e c), resultantes da sua propagação	39
Figura 29 – Parte fraturada que se separou do molde META 35,5 após aplicação de força na zona da fenda.....	39
Figura 30 – Organograma com as fases do estudo dos moldes DIVA 35,5 e META 38	41
Figura 31 – Segunda versão do molde META 35,5, com uma base nova (a), fabricada para substituir a fraturada, e a tampa original (b). A altura da base varia entre 100 mm e 103,5 mm e a altura da tampa varia entre 42,5 mm e 46 mm	42
Figura 32 – Sola META 35,5 em SBR.....	42
Figura 33 – Base (a) e tampa (b) do molde DIVA 38. A altura da base varia entre 95 mm e 115 mm e a altura da tampa varia entre 20 mm e 40 mm	43
Figura 34 – Sola DIVA 38, em SBR.....	44
Figura 35 – Molde META 35,5 com regiões de onde foram extraídas as amostras para analisar a heterogeneidade do molde assinalada a vermelho, numa vista de topo (a) e em corte (b)	45
Figura 36 – Montagem feita para facilitar a colocação dos provetes na água rapidamente e na vertical, para evitar o seu empeno	47
Figura 37 – Provetes utilizados nos ensaios de tração, que seguem a norma ISSO 6892-1 2012	48
Figura 38 – Planta (a) e vista frontal (b) do molde META 38 com indicação das regiões de onde foram retirados os provetes para os ensaios de tração	49
Figura 39 – Dilatação de uma amostra retirada do molde META 35,5 em função da temperatura, obtida através de um ensaio dilatométrico	54
Figura 40 – Microestrutura da amostra retirada de uma das partes que se separou do molde META 35, onde se observam defeitos ocupando 1,99 % da área total	55
Figura 41 – Microestrutura da amostra extraída da parte inferior do molde (a), com 1,17 % da área com defeitos, e da amostra da parte superior do molde (b), com 7,52 % da área com defeitos	55
Figura 42 – Ciclo térmico do tratamento térmico experimental a uma amostra extraída do molde META 35,5: solubilização a 490 °C durante 5 horas e envelhecimento a 180 °C durante 6 horas	57
Figura 43 – Parte do molde META 35,5 utilizada para obter a curva de arrefecimento do material	58
Figura 44 – Curva de arrefecimento do material do molde META 35,5, indicando que a primeira mudança de fase ocorre a 490 °C.....	58
Figura 45 – Curva de envelhecimento de 12h a 185 °C, que indica que o pico de endurecimento se dá para 8 horas de estágio.....	60
Figura 46 – Curva de envelhecimento de 12h a 175 °C, que indica que o pico de endurecimento se dá para 6 horas de tempo de estágio	61
Figura 47 – Microestrutura da região II (a), com 0,19 % da área com defeitos, e da região IS (b), com 0,28 % da área com defeitos.....	67

Figura 48 – Microestrutura da região 6I (a), com 1,07 % da área com defeitos, e da região 6S (b), com 1,84 % da área com defeitos	67
Figura 49 – Configuração do processo de moldação por compressão de borracha, com indicação do diâmetro do cilindro hidráulico, $\Phi = 350$ mm	68
Figura 50 – Força exercida pelo cilindro distribuída uniformemente ao longo dos moldes	69
Figura 51 – Representação da área projetada de uma situação genérica, correspondendo a $S_1+S_2+S_3$	69
Figura 52 – Modelos da sola META 35,5 (a), da base (a) e da tampa (c) do molde META 35,5 construídos no SolidWorks	70
Figura 53 – Modelo da sola META 35,5, obtido através de digitalização tridimensional, para cálculo da sua área projetada	71
Figura 54 – Vista global do lado mais solicitado do molde META 35,5 (a) e vista aproximada da zona crítica (b), com região onde as tensões foram máximas, 159,9 MPa, assinalada a branco	72
Figura 55 – Zona com maiores deformações plásticas equivalentes, cujo máximo foi 0,68 % e ocorreu na região assinalada a branco	72
Figura 56 – Modelos da sola DIVA 38 (a), da base (a) e da tampa (c) do molde DIVA 38 construídos no SolidWorks	73
Figura 57 – Vista global do lado do molde DIVA 38 onde foram atingidas tensões mais elevadas (a) e vista aproximada da zona crítica (b), com região mais solicitada, 146,2 MPa, assinalada a branco	74
Figura 58 – Região do molde DIVA 38 onde ocorreram maiores tensões plásticas equivalentes, com região onde foi atingido o máximo, 0,56 %, assinalada a branco	75
Figura 59 – Zona da fratura do molde META 35,5, estando assinalada a vermelho a região onde ocorrem as tensões mais elevadas, segundo a simulação computacional, e de onde foi extraída uma amostra para análise	76
Figura 60 – Microestrutura da amostra extraída da região onde ocorrem as tensões máximas no molde META 35,5, segundo a simulação computacional, com 2,31 % de áreas com defeitos	76
Figura 61 – Sensor de pressão FlexiForce HT201 Sensor, da Tekscan, para medir as pressões na cavidade durante o processo de moldação por compressão - adaptado de [68]	89
Figura 62 – Malhas definidas no <i>Abaqus</i> para o molde META 35,5 (a), com 143749 elementos e 230933 nós, e para o molde DIVA 38 (b), com 433277 elementos e 683562 nós	97
Figura 63 – Curva tensão-deformação do Provete 1, extraído da base do molde META 35,5 (estado bruto de vazamento). $E = 71,40$ GPa; $\sigma_e = 166,00$ MPa; $\sigma_r = 173,39$ MPa; Extensão após rotura = 0,27 %	98
Figura 64 – Curva tensão-deformação do Provete 2, extraído da base do molde META 35,5 (estado bruto de vazamento). $E = 71,48$ GPa; $\sigma_e = 167,50$ MPa; $\sigma_r = 174,77$ MPa; Extensão após rotura = 0,42 %	99
Figura 65 – Curva tensão-deformação do Provete 3, extraído da base do molde META 35,5 (tratado termicamente). $E = 80,77$ GPa; $\sigma_e = 275,00$ MPa; $\sigma_r = 275,00$ MPa; Extensão após rotura = 0,14 %	99
Figura 66 – Curva tensão-deformação do Provete 4, extraído da base do molde META 35,5 (tratado termicamente). $E = 74,60$ GPa; $\sigma_e = 281,29$ MPa; $\sigma_r = 281,29$ MPa; Extensão após rotura = 0,18 %	99
Figura 67 – Curva tensão-deformação do Provete 5, extraído da base do molde META 35,5 (tratado termicamente). $E = 74,32$ GPa; $\sigma_e = 288,81$ MPa; $\sigma_r = 288,81$ MPa; Extensão após rotura = 0,18 %	100
Figura 68 – Curva tensão-deformação do provete II, extraído da região inferior da base do molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 71,74$ GPa; $\sigma_e = 127,50$ MPa; $\sigma_r = 182,86$ MPa; Extensão após rotura = 1,05 %	101

Figura 69 – Curva tensão-deformação do provete 2I, extraído da região inferior da base do molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 68,35$ GPa; $\sigma_e = 129,50$ MPa; $\sigma_r = 181,18$ MPa; Extensão após rotura = 0,90 %	102
Figura 70 – Curva tensão-deformação do provete 5I, extraído da região inferior da base do molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 75,48$ GPa; $\sigma_e = 117,50$ MPa; $\sigma_r = 178,01$ MPa; Extensão após rotura = 1,31 %	102
Figura 71 – Curva tensão-deformação do provete 6I, extraído da região inferior da base do molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 61,09$ GPa; $\sigma_e = 116,50$ MPa; $\sigma_r = 150,14$ MPa; Extensão após rotura = 0,77 %	102
Figura 72 – Curva tensão-deformação do provete 1S, extraído da região superior da base molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 78,43$ GPa; $\sigma_e = 125,00$ MPa; $\sigma_r = 163,04$ MPa; Extensão após rotura = 0,76 %	103
Figura 73 – Curva tensão-deformação do provete 2S, extraído da região superior da base molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 80,55$ GPa; $\sigma_e = 124,50$ MPa; $\sigma_r = 164,38$ MPa; Extensão após rotura = 0,75 %	103
Figura 74 – Curva tensão-deformação do provete 5S, extraído da região superior da base molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 88,92$ GPa; $\sigma_e = 125,00$ MPa; $\sigma_r = 167,41$ MPa; Extensão após rotura = 0,91 %	103
Figura 75 – Curva tensão-deformação do provete 6S, extraído da região superior da base molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 70,83$ GPa; $\sigma_e = 125,00$ MPa; $\sigma_r = 145,48$ MPa; Extensão após rotura = 0,48 %	104
Figura 76 – Curva tensão-deformação do provete 4I, extraído da região inferior da base molde DIVA 38 (tratado termicamente). $E = 72,30$ GPa; $\sigma_e = 259,00$ MPa; $\sigma_r = 262,04$ MPa; Extensão após rotura = 0,23 %	105
Figura 77 – Curva tensão-deformação do provete 7I, extraído da região inferior da base molde DIVA 38 (tratado termicamente). $E = 76,29$ GPa; $\sigma_e = 262,25$ MPa; $\sigma_r = 262,25$ MPa; Extensão após rotura = 0,20 %	106
Figura 78 – Curva tensão-deformação do provete 8I, extraído da região inferior da base molde DIVA 38 (tratado termicamente). $E = 78,40$ GPa; $\sigma_e = 263,00$ MPa; $\sigma_r = 264,46$ MPa; Extensão após rotura = 0,22 %	106
Figura 79 – Curva tensão-deformação do provete 3S, extraído da região superior da base molde DIVA 38 (tratado termicamente). $E = 73,97$ GPa; $\sigma_e = 241,74$ MPa; $\sigma_r = 241,74$ MPa; Extensão após rotura = 0,11 %	106
Figura 80 – Curva tensão-deformação do provete 7S, extraído da região superior da base molde DIVA 38 (tratado termicamente). $E = 71,71$ GPa; $\sigma_e = 226,47$ MPa; $\sigma_r = 226,47$ MPa; Extensão após rotura = 0,10 %	107
Figura 81 – Curva tensão-deformação do provete 8S, extraído da região superior da base molde DIVA 38 (tratado termicamente). $E = 66,57$ GPa; $\sigma_e = 236,29$ MPa; $\sigma_r = 236,29$ MPa; Extensão após rotura = 0,14 %	107

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades mecânicas das borrachas utilizadas na Procalçado em solas para calçado produzidas através do método de moldação por compressão [16]	9
Tabela 2 – Propriedades físicas das borrachas utilizadas na Procalçado em solas para calçado produzidas através do método de moldação por compressão [16]	10
Tabela 3 – Designação da Aluminum Association para os principais grupos de ligas de alumínio de fundição [38, 39]	21
Tabela 4 – Contração linear até 20 °C de alguns metais no estado sólido [45].....	28
Tabela 5 – Designação da Aluminum Association e descrição dos tratamentos térmicos para ligas de alumínio [39].....	29
Tabela 6 - Vantagens e desvantagens do MDF e do MEF [58]	34
Tabela 7 – Fornos utilizados para os tratamentos térmicos com respetiva forma de aquecimento, fabricante e localização	46
Tabela 8 – Correspondência entre provetes no estado bruto de vazamento e tratados termicamente.....	50
Tabela 9 – Composição química da liga de alumínio que constitui o molde META 35,5.....	51
Tabela 10 – Composição química da liga que constitui os moldes indicada pelo fornecedor e obtida para o molde META 35,5	52
Tabela 11 – Composição química da liga 319.0, a liga com a composição química semelhante à amostra analisada, e da liga de alumínio que constitui o molde META 35,5 [16]	53
Tabela 12 – Durezas medidas nas amostras de uma parte fraturada do molde META 35,5...54	
Tabela 13 – Durezas medidas nas amostras recolhidas das zonas inferiores e superiores da região central do molde META 35,5 e suas áreas de defeitos	55
Tabela 14 – Parâmetros mais indicados para o tratamento térmico T6 da liga 319.0, segundo a Affimet [49].....	56
Tabela 15 – Durezas medidas nas várias fases do tratamento térmico experimental.....	57
Tabela 16 – Parâmetros do tratamento térmico com envelhecimento a 185 °C	59
Tabela 17 – Variação da dureza de amostras extraídas do molde META 35,5 com o tempo de envelhecimento a 185 °C, indicando que o pico de endurecimento se dá para 8 horas de estágio .59	
Tabela 18 – Parâmetros do tratamento térmico com envelhecimento a 175 °C	60
Tabela 19 – Variação da dureza de amostras extraídas do molde META 35,5 com o tempo de envelhecimento a 175 °C, indicando que o pico de endurecimento se dá para 6 horas de estágio..	61
Tabela 20 – Parâmetros do tratamento térmico utilizado para os provetes extraídos do molde META 35,5.....	62
Tabela 21 – Propriedades obtidas através de ensaios de tração a provetes retirados do molde META 35,5 no estado bruto de vazamento e tratados termicamente.....	63
Tabela 22 – Propriedades mecânicas dos provetes extraídos do molde DIVA 38 no estado bruto de vazamento	64

Tabela 23 – Parâmetros do tratamento térmico utilizado para os provetes extraídos do molde META 35,5 sujeitos a ensaio de tração	65
Tabela 24 – Propriedades mecânicas dos provetes extraídos das regiões inferiores do molde DIVA 38 sujeitos a tratamento térmico T6.....	65
Tabela 25 – Áreas de defeitos e durezas das cabeças dos provetes 1I, 1S, 6I e 6S.....	67
Tabela 26 – Áreas e pressões utilizadas na simulação do processo de moldação por compressão da sola META 35,5.....	71
Tabela 27 – Áreas e pressões utilizadas na simulação do processo de moldação por compressão da sola DIVA 38.....	74
Tabela 28 – Durezas medidas na amostra extraída da zona de tensões máximas do molde META 35,5.....	76
Tabela 29 – Áreas de defeitos e durezas médias das amostras extraídas do molde META 35,5	77
Tabela 30 – Propriedades mínimas, máximas e média obtidas através dos ensaios de tração a provetes no estado bruto de vazamento extraídos do molde META 35,5	77
Tabela 31 – Propriedades mínimas, máximas e média obtidas através dos ensaios de tração a provetes no estado bruto de vazamento extraídos do molde DIVA 38	78
Tabela 32 – Áreas de defeitos e durezas médias das cabeças dos provetes 1I, 1S, 6I e 6S e tensão de rotura desses provetes	78
Tabela 33 – Limites mínimos e máximos das propriedades medidas dos moldes META 35,5 e DIVA 38.....	80
Tabela 34 – Tratamentos térmicos efetuados e respetivos parâmetros	81
Tabela 35 – Durezas médias das amostras extraídas do molde META 35,5, no estado bruto de vazamento e após sujeitas a tratamentos térmicos T6	81
Tabela 36 – Propriedades mecânicas dos provetes no estado bruto de vazamento e após tratamento térmico	81
Tabela 37 – Propriedades mecânicas médias obtidas para os moldes estudado e tabeladas para a liga 319.0 no estado bruto de vazamento [67]	83
Tabela 38 – Propriedades mecânicas médias obtidas para os moldes estudado e tabeladas para a liga 319.0 após tratamento térmico T6 [67]	83
Tabela 39 – Tensões equivalentes máximas e deformações plásticas equivalentes máximas obtidas nos moldes META 35,5 e DIVA 38 através de simulações computacionais	84

Capítulo 1

Introdução

1.1. Indústria do calçado

A evolução da indústria do calçado em Portugal tornou-a moderna e altamente competitiva, exportando atualmente cerca de 95 % da sua produção para mais de 150 países. Segundo a APICCAPS, Associação Portuguesa dos Industriais de Calçado, Componentes, Artigos de Pele e seus Sucedâneos, este setor encontra-se em franco crescimento em Portugal, tendo desde 2010 aumentado em 23 % o número de empresas na área, fixando-se em 1526 em 2017, e em 25 % o número de trabalhadores, sendo agora mais de 40000. A grande maioria destas empresas encontra-se na região norte do país, sendo que três quartos delas estão sediadas nas regiões de Felgueiras, Guimarães e no distrito de Aveiro [1].

Relativamente às exportações, desde 2010 estas aumentaram 20 % no número de pares de solas (atualmente 83 milhões por ano) e 52 % em valor, correspondendo, em 2017, a um total de 1965 milhões de euros (figura 1). Desta forma, o balanço entre importações e exportações gerou, em 2017, um lucro de 1342 milhões de euros, valor 54 % superior ao que se verificava em 2010 [1].

Verifica-se assim que este setor tem uma grande importância para a economia portuguesa, pelo que deve ser alvo de atividades de investigação, inovação e desenvolvimento contínuo.

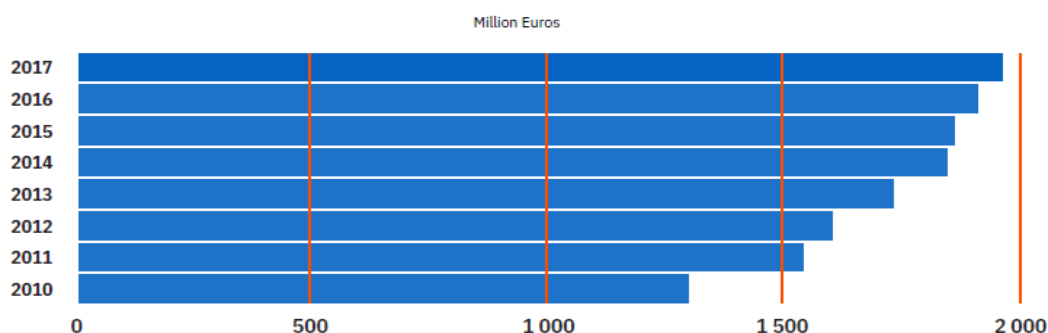


Figura 1 – Valor das exportações na indústria do calçado entre 2010 e 2017, em milhões de euros, verificando-se uma tendência de crescimento [1]

1.2. Procalçado S.A.

A Procalçado (figura 2), empresa onde foi realizado o estágio que permitiu a elaboração desta dissertação, produz essencialmente componentes para calçado. Situada em Pedroso, Vila Nova de Gaia, a empresa ocupa neste momento uma área superior a 18000 m² (figura 3) e emprega mais de 400 trabalhadores [2].



Figura 2 – Logótipo da Procalçado [2]



Figura 3 – Vista aérea das instalações da Procalçado em Pedroso, Vila Nova de Gaia [2]

Fundada em 1973, a Procalçado começou por desenvolver e comercializar unicamente componentes em borracha, tendo-se rapidamente assumido como líder do mercado português. As suas instalações foram sendo sucessivamente ampliadas e em 1990 começou a fazer venda direta ao mercado sob a marca For Ever, que atualmente tem como clientes marcas como a Armani Jeans, Ecco, Gant, Gabor e Hunter. Na primeira década do novo milénio a Procalçado alargou a gama de materiais que desenvolvia, passando também a produzir solas em materiais elastómeros termoplásticos, em 2001, e em EVA, em 2009. Neste período obteve vários prémios do Centro Tecnológico do Calçado de Portugal, maioritariamente na categoria “Materiais e componentes inovadores”. Em 2007 foi criada a Wock, uma marca própria direcionada para calçado profissional, que em 2008 começou a ser comercializada internacionalmente. De forma semelhante, em 2013 deu-se o lançamento da marca Lemon Jelly, direcionada para o segmento da moda, que desde então tem sido galardoada com inúmeros prémios atribuídos por diversas

entidades, tanto nacionais como internacionais, premiando sobretudo o carácter inovador dos produtos [2].

1.3. Enquadramento e objetivos

A presente dissertação foi realizada numa parceria entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a Procalçado S.A., no âmbito da especialização em Produção, Conceção e Fabrico do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, surgindo na sequência de uma dissertação realizada no ano letivo 2016/17, da autoria de Marco Guimarães, intitulada “Estudo do comportamento de uma sola em borracha com sistema de amortecimento” [3].

A produção de solas para calçado na Procalçado apresenta uma dificuldade recorrente: os moldes utilizados sofrem fraturas com frequência, sobretudo utilizando o processo de moldação por compressão de borracha, o que implica a sua retificação ou mesmo a necessidade de produção de novos moldes. Ambos os casos provocam uma interrupção na produção, originando assim um custo acrescido para a empresa. Nesse sentido, a Procalçado tem todo o interesse em minimizar estas ocorrências.

Esta dissertação tem como principal propósito a identificação das causas das fraturas dos moldes, bem como de soluções para as reduzir. Este é um assunto pouco estudado na indústria do calçado, o que implica que o projeto dos moldes seja feito sobretudo com base num conhecimento empírico, para além de que os materiais e qualidade de construção dos mesmos não são validados aquando da sua aquisição. Desta forma, revela-se importante uma análise profunda desta temática, que possibilitará a mudança de hábitos e procedimentos que se verifiquem inadequados. Assim, os principais objetivos da dissertação são os seguintes:

- Estudo do processo de moldação por compressão para o fabrico de solas;
- Análise do processo de fundição utilizado no fabrico dos moldes;
- Análise metalográfica e de resistência mecânica dos materiais utilizados para a conceção dos moldes utilizados na Procalçado;
- Estudo de soluções para aumentar a resistência mecânica dos moldes após o seu fabrico, nomeadamente ao nível de tratamentos térmicos;
- Análise de tensões atingidas nas cavidades dos moldes através de simulações computacionais.

1.4. Metodologia

O projeto iniciou-se com uma fase de integração na empresa, que passou por conhecer os produtos fabricados e os materiais utilizados, bem como por

compreender a fundo os vários processos produtivos. Seguiram-se reuniões com vários elementos da empresa, de forma a perceber quais os principais problemas com que se deparavam. Desta forma, foi possível identificar qual o caminho a seguir durante a realização da dissertação.

A segunda fase envolveu deslocações frequentes à FEUP e ao INEGI, visto que a empresa não dispunha do equipamento necessário para a análise dos materiais e ensaios mecânicos.

A última fase da dissertação foi dedicada à modelação CAD dos moldes em estudo e realização de simulações computacionais, o que envolveu diversas reuniões no Design Studio FEUP.

1.5. Estrutura

A presente dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos:

- Capítulo 1 – Introdução, o presente capítulo, onde é feita uma breve apresentação e enquadramento dos temas abordados na dissertação, são apresentados os seus objetivos e a metodologia seguida;
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica, uma contextualização teórica dos temas abordados no trabalho experimental, nomeadamente ao nível das solas para calçado e dos seus processos produtivos, bem como dos moldes utilizados, ligas de alumínio para fundição e seus tratamentos térmicos;
- Capítulo 3 – Trabalho Experimental, que se divide na apresentação do problema no qual o estudo incide, no procedimento utilizado durante o projeto, nas várias etapas experimentais realizadas, na apresentação dos resultados obtidos e na análise dos mesmos;
- Capítulo 4 – Conclusões e trabalhos futuros, que contém as principais conclusões obtidas durante o trabalho experimental e algumas sugestões de trabalhos que podem complementar o estudo efetuado.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1. Solas para calçado

As solas são um elemento fundamental no calçado, uma vez que fazem o contacto entre este e o piso. Desta forma, as solas devem ter características que permitam suportar o peso do utilizador, bem como o desgaste inerente à sua utilização, mantendo-se confortáveis. Em alguns tipos de calçado, como o desportivo ou de trabalho, este requisito torna-se mais exigente, visto que as solas podem estar expostas a superfícies bastante particulares ou a substâncias agressivas, no segundo caso. No calçado desportivo é necessário ainda ter em conta a prevenção de lesões. A estética das solas também é tida em conta em praticamente todos os tipos de calçado, sendo ainda mais valorizada no calçado direcionado para a moda.

Para o fabrico de solas pode ser utilizada uma variedade de materiais, sendo que atualmente os mais usuais são a borracha, tanto natural como sintética, o poliuretano (PU) e o policloreto de vinilo (PVC). Em solas mais complexas podem ser utilizadas combinações de materiais ou uma divisão em camadas [4, 5].

Na figura 4 são mostradas as designações habitualmente dadas às várias zonas e componentes das solas. Estas dividem-se em três zonas principais: a pata, o enfranque e o tacão. Nesta última existe a grade, que é utilizada com o objetivo de reduzir a quantidade de material, diminuindo os custos de produção. A margem de colagem é a zona onde vai ser feita a colagem da sola ao resto do calçado. Em alguns casos a sola é cozida ao calçado, pelo que algumas solas contêm uma linha de costura. A espessura a romper deve ser suficiente para suportar a utilização do calçado e as dificuldades inerentes ao processo de fabrico. O rasto é o desenho da parte inferior da sola, que pode ser meramente estético, mas que muitas vezes é pensado de forma a melhorar a aderência ao piso, conforme a utilização pretendida.

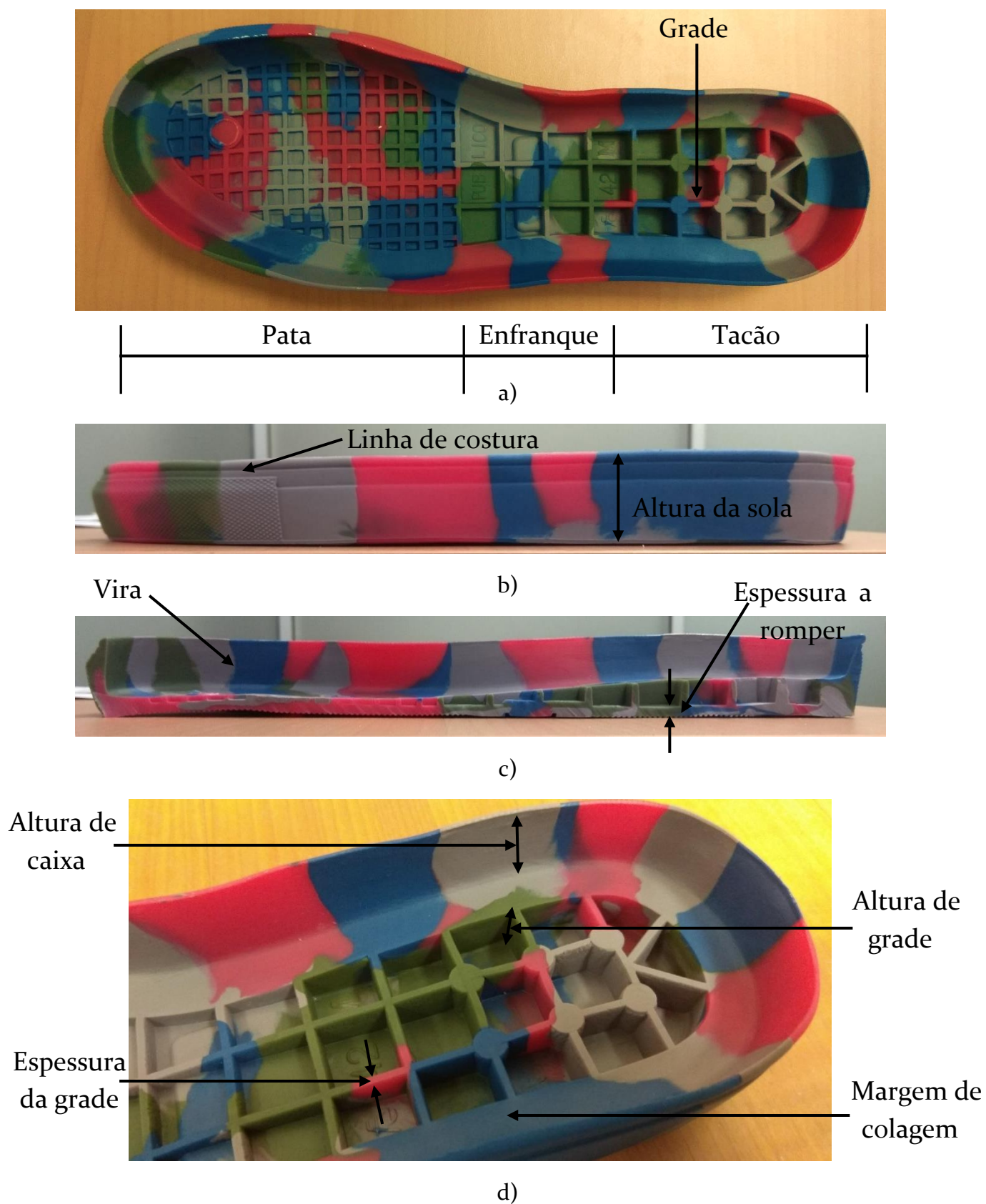


Figura 4 – Designações habitualmente utilizadas nas solas para calçado – a) planta; b) vista lateral; c) vista lateral do interior, após corte da sola; d) vista aproximada da zona da grade

2.1.1. Tipos de borracha

Grande parte das solas para calçado são produzidas em borracha, tanto natural como sintética. De seguida, apresentam-se os vários tipos de borracha utilizados na Procalçado no método de moldação por compressão.

Borracha natural

A borracha natural (figura 5), ou NR (*natural rubber*) consiste num polímero do composto orgânico isopreno (perto de 95% da sua composição), juntamente com resinas, proteínas naturais, algumas impurezas de outros compostos orgânicos e água. É produzida através da seiva extraída da *hevea brasiliensis*, árvore mais conhecida por seringueira. A produção de borracha natural tem vindo a crescer e anualmente ultrapassa as 12 milhões de toneladas (figura 6), representando cerca de 40% da produção de borracha no mundo, sendo assim o tipo de borracha mais utilizado [6-9].

As grandes vantagens da utilização da borracha natural são as suas propriedades mecânicas, como a boa resistência à tração, ao arrancamento e à flexão, elevada elasticidade e baixa histerese para pequenas deformações, resultando em pouco calor desenvolvido e boas propriedades de fluência [10].



Figura 5 – Borracha natural utilizada na Procalçado

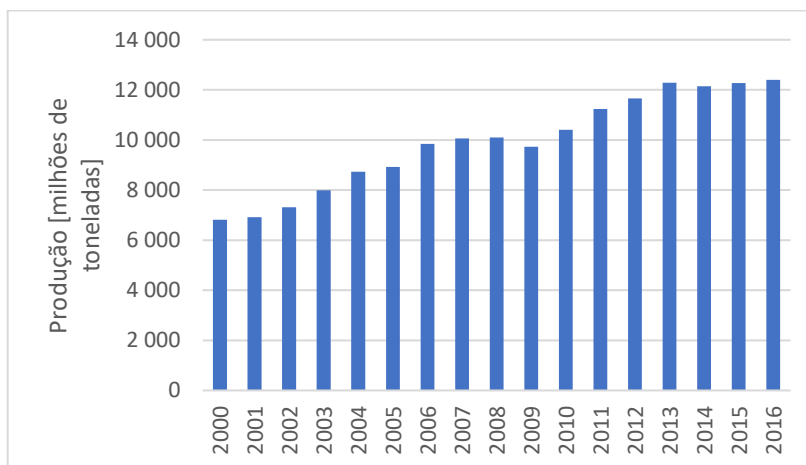


Figura 6 – Produção mundial de borracha natural de 2000 a 2016, apresentando uma tendência de crescimento – adaptado de [9]

Borracha de estireno-butadieno

A borracha de estireno-butadieno, vulgarmente conhecida como SBR (*styrene-butadiene rubber*), é a família de borrachas sintéticas derivadas do estireno e do butadieno. A sua polimerização pode ser feita por emulsão (E-SBR) ou suspensão (S-SBR), sendo que o primeiro método é o mais utilizado. Tipicamente contém cerca de 23% de estireno [11, 12].

Esta borracha é utilizada maioritariamente como um substituto da borracha natural, sendo o elastómero sintético mais utilizado mundialmente. É possível obter propriedades semelhantes às da borracha natural através da utilização de aditivos. Apesar da geração de calor da SBR ser consideravelmente superior, as suas resistências ao envelhecimento e abrasão são mais elevadas do que as da borracha natural, motivo pelo qual a SBR tem como principal aplicação pneus para automóveis, para além de solas para calçado [10, 12].

Borracha de butadieno-acrilonitrilo

A borracha de butadieno-acrilonitrilo, ou simplesmente borracha níttrica ou NBR (*nitrile-butadiene rubber*), é um copolímero de butadieno e acrilonitrilo e também ela uma borracha sintética [7, 12].

Por norma tem propriedades inferiores às da borracha natural, sendo necessário o uso de aditivos. No entanto, as suas propriedades físicas dependem bastante da percentagem de acrilonitrilo, que pode variar entre 15 % e 50 % - quanto maior for, maior será a sua fluência e resistência mecânica e a óleos, embora reduza a sua flexibilidade a baixa temperatura. A estrutura insaturada desta borracha provoca uma baixa resistência ao oxigénio e ao ozono, pelo que é usual corrigir esta desvantagem através de hidrogenação [10, 13, 14].

A NBR é bastante usada para vedantes, mangueiras para combustíveis e calçado de trabalho [12].

Borracha de cloropreno

A borracha de cloropreno, mais conhecida pelo seu nome comercial Neopreno®, atribuído pela DuPont, ou simplesmente por CR (*chloroprene rubber*), é uma borracha sintética derivada do cloropreno [15].

O Neopreno® é vastamente utilizado, pois combina as boas propriedades da borracha natural com uma resistência considerável ao ozono, à oxidação e a óleos, bem como a micro-organismos como bactérias e fungos. Tem ainda uma boa tenacidade, pelo que suporta facilmente esforços de flexão e torção [8, 10].

Para além de solas para calçado, as suas principais aplicações são cabos e mangueiras [12].

2.1.2. Propriedades das borrachas

Na tabela 1 encontram-se as principais propriedades mecânicas das borrachas apresentadas anteriormente. Verifica-se que, de uma maneira geral, a borracha natural é aquela que apresenta as melhores propriedades, com as tensões limite de elasticidade, de rotura e limite de fadiga mais elevadas, conciliadas com uma boa resistência à fissuração e extensão após rotura. Apesar disto, as borrachas sintéticas são bastante utilizadas, sobretudo devido ao seu preço bastante mais reduzido, mas também devido às suas melhores propriedades de resistência à abrasão e à oxidação [16]. Desta forma, a maioria das solas em borracha produzidas na Procalçado tem na sua composição tanto borracha natural como sintética, em percentagens que variam conforme o cliente e a utilização pretendida, de forma a obter um equilíbrio que satisfaça as necessidades. Uma das grandes vantagens destas solas é que, através de combinações de diferentes tipos de borracha e de aditivos, é possível obter produtos esteticamente idênticos, mas com propriedades mecânicas totalmente distintas.

A dureza Shore A é uma propriedade habitualmente utilizada para medir a rigidez dos polímeros. Quanto maior for a dureza Shore A menor será o coeficiente de atrito, logo menor será a aderência ao solo, o que diminui a resistência ao escorregamento, embora provoque um desgaste menor na sola. A dureza também pode ter um impacto no conforto do utilizador [10].

Na tabela 2 apresentam-se as principais propriedades físicas destas borrachas, onde se verifica que as variações entre elas são significativamente menores do que as observadas nas propriedades mecânicas.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas das borrachas utilizadas na Procalçado em solas para calçado produzidas através do método de moldação por compressão [16]

Propriedade mecânica	NR	SBR	NBR	CR
Módulo de Young [MPa]	1,2 – 2,1	2 – 10	1,8 – 2,1	1,65 – 2,1
Tensão limite de elasticidade [MPa]	21 – 28	1,4 – 3	4 – 7	12 – 24
Tensão de rotura [MPa]	21 – 28	1,4 – 3	4 – 7	12 – 24
Extensão após rotura [%]	600 – 780	400 – 600	500 – 700	750 – 950
Dureza Shore A	30 – 45	35 – 95	40 – 45	40 – 46
Tensão limite de fadiga a 10^7 ciclos [MPa]	8,4 – 11,2	0,56 – 1,2	1,6 – 2,8	4,8 – 9,6
Resistência ao corte [N/mm]	24,8 – 44		10 – 20	35 – 44

Tabela 2 – Propriedades físicas das borrachas utilizadas na Procalçado em solas para calçado produzidas através do método de moldação por compressão [16]

Propriedade física	NR	SBR	NBR	CR
Massa volúmica [kg/m ³]	930 – 970	940 – 961	950 – 1020	1230 – 1300
Temperatura mínima de serviço [°C]	-65 – -50	-50 – -40	-50 – 0	-55 – -40
Temperatura máxima de serviço [°C]	69 – 107	70 – 110	110 – 120	102 – 112
Condutividade térmica [W/m.°C]	0,13 – 0,16	0,19 – 0,25	0,135 – 0,145	0,15 – 0,2
Calor específico [kJ/kg. °C]	1,82 – 1,99	1,80 – 1,90	1,95 – 2,01	2,10 – 2,20
Coeficiente de expansão térmica [μm/m.°C]	210 – 230	220 – 225	230 – 237	202 – 245
Resistividade elétrica [μΩ.cm]	1×10 ²⁰ – 1×10 ²³	5,01×10 ²¹ – 7,94×10 ²¹	1×10 ¹⁷ – 3,16×10 ¹⁸	1×10 ¹⁷ – 1×10 ¹⁹

2.1.3. Aditivos

Antes de poder ser utilizada num processo de moldação é necessário misturar a borracha com outros elementos, para que esta adquira as propriedades necessárias ao processo, bem como as características pretendidas para cada sola. Os principais aditivos utilizados são os seguintes [8, 14, 17-20]:

- Agentes de vulcanização – permitem que a borracha solidifique adequadamente e adquira melhores propriedades mecânicas;
- Aceleradores e ativadores – aceleram o processo de vulcanização, aumentando a taxa de reticulação da estrutura da borracha;
- Reforços – melhoram as propriedades mecânicas da sola;
- Agentes de homogeneização – facilitam a mistura da borracha, de forma a que esta fique homogénea;
- Agentes anti-oxidantes – evitam a degradação da borracha através de reações de oxidação;
- Agentes anti-estáticos – reduzem a criação de cargas elétricas e aumentam a sua dissipação;
- Agentes anti-deslizamento – aumentam o coeficiente de atrito entre a sola e a superfície;
- Retardadores de chama – protegem a sola quanto às reações de oxidação e pirólise inerentes à combustão.

2.1.4. Vulcanização

Vulcanização é um processo que envolve transferência de calor, aplicação de pressão e adição de um agente de vulcanização, habitualmente enxofre, à borracha, que é fundamental para a sua conformação em processos de moldação. Tem como objetivo que a borracha adquira novamente uma forma estável, de um líquido

viscoso para um estado elástico sólido, bem como as propriedades desejadas para o produto final, através da modificação da estrutura do material, criando ligações cruzadas entre as várias moléculas da borracha (figura 7). Por norma são adicionados também catalisadores, de forma a acelerar o processo [17, 21].

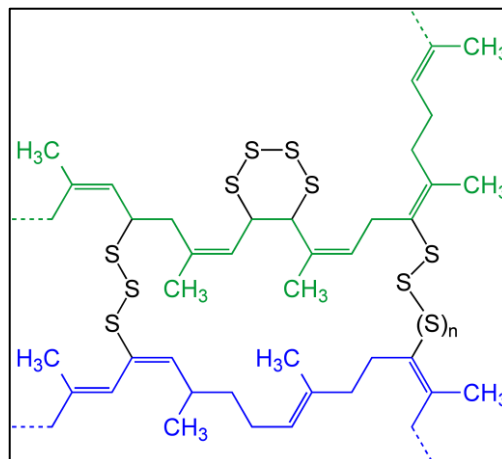


Figura 7 – Ligações cruzadas na borracha devido à vulcanização [22]

Durante a vulcanização é transferido calor para a borracha através de uma fonte externa a uma taxa controlada conforme a eficiência da fonte e as propriedades da borracha. O gradiente de temperaturas na borracha durante o processo depende da sua condutividade térmica, da temperatura da fonte de calor, do tempo de transferência de calor, do tamanho e forma do produto a vulcanizar e da sua temperatura inicial. Uma variação de temperaturas inadequada provoca um estado de cura não uniforme ao longo do material, que é precisamente o que se procura evitar. Na maioria dos processos, a vulcanização é feita através de condução, primeiramente através do molde de metal e depois da superfície interna do molde para a da borracha. Já o arrefecimento é habitualmente de natureza convectiva [23].

Na figura 8 está representada uma curva de vulcanização, obtida através da reometria de discos oscilatórios (ODR) ou de reometria de cavidade oscilante (MDR). Nestes ensaios o reómetro consiste em dois pratos aquecidos e um aparelho para registar o binário em função do tempo. A amostra é colocada numa cavidade à temperatura de vulcanização pretendida e a resistência oferecida, o binário, pela borracha a uma oscilação de um rotor biconico (ODR) ou de uma meia cavidade (MDR) é medida em função do tempo, sendo este proporcional à viscosidade da amostra [24].

Inicialmente há um aumento súbito do binário com o fecho do molde, que de seguida decresce com o início do aquecimento, o que significa uma diminuição da viscosidade. A determinada altura as ligações cruzadas começam a formar-se e a ser dominantes relativamente às cisões, sendo que aí começa a segunda fase, a vulcanização, onde o binário e a viscosidade sofrem um aumento significativo.

Quando a vulcanização fica concluída, a curva começa a estabilizar, podendo então o material ter três comportamentos, conforme as suas propriedades e as condições de vulcanização: o binário pode sofrer uma diminuição, que é o caso mais comum, continuar estável ou sofrer novo aumento [12].

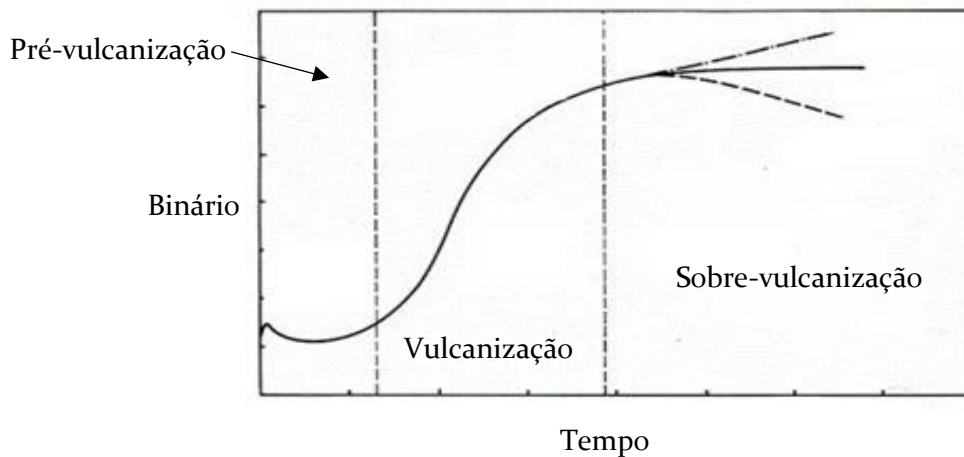


Figura 8 – Curva de vulcanização genérica, indicando o binário em função do tempo – adaptado de [25]

2.1.5. Moldação por compressão de borracha

Moldação por compressão é um dos processos de fabrico mais antigos destinado à conformação de polímeros termoendurecíveis e elastómeros, podendo também ser utilizado para alguns termoplásticos. Este processo é indicado para volumes de produção médios, sendo eficiente e económico para uma variedade de produtos [26, 27].

Na conformação de borracha, uma quantidade previamente definida de um elastómero não vulcanizado, o chamado pré-formado (figura 9), é colocada diretamente na cavidade de um molde aquecido e sujeita a uma força vertical através de uma prensa movida hidraulicamente, com o objetivo de adquirir a forma da cavidade (figura 10).

O volume do pré-formado tem que ser superior ao volume da cavidade, de forma a garantir o enchimento total, o que origina algum desperdício sob a forma de rebarba (figura 11).

A compressão pode ser feita através de duas variantes: mantendo o prato inferior fixo e movendo o prato superior para baixo ou fixando o prato superior, comprimindo contra ele o inferior [28]. Na Procalçado é utilizada a segunda variante. As forças de fecho variam, por norma, entre 1000 kN e 5000 kN, que geram pressões de 7 MPa a 25 MPa na cavidade [27].

De seguida, o molde mantém-se fechado enquanto ocorre a vulcanização. A presença de catalisadores, a temperatura elevada do molde, que geralmente varia entre 130 °C e 200 °C, e a continuidade da exerceção de pressão aceleram este

fenómeno. Temperaturas mais elevadas permitem diminuir o tempo de vulcanização, embora possam danificar o material ou provocar uma vulcanização não uniforme [27]. Na Procalçado a temperatura dos moldes ronda os 145 °C.

Depois do material ter finalizado o processo de vulcanização, o molde abre e a extração é feita manualmente por um operador, sendo por vezes auxiliado por uma pistola de ar comprimido. De seguida realizam-se operações de acabamento, finalizando o fabrico da sola.



Figura 9 – Pré-formado em borracha para a produção de solas para calçado através do método de moldação por compressão

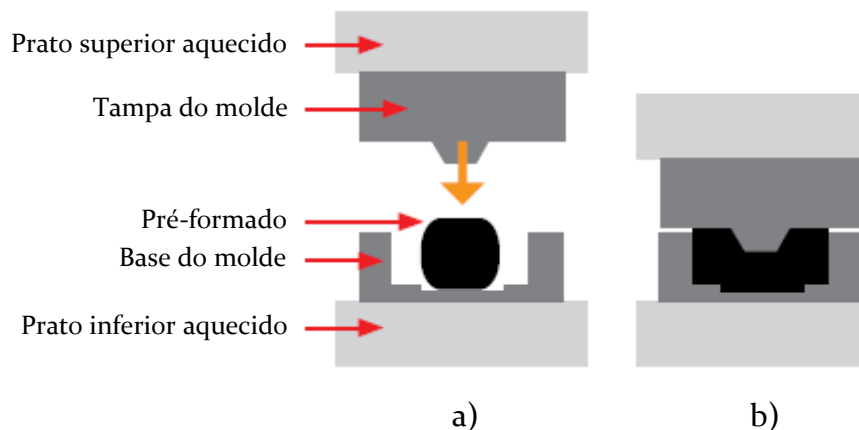


Figura 10 – Processo de moldação por compressão, com o molde aberto (a) e fechado (b) – adaptado de [28]



Figura 11 – Sola com uma quantidade significativa de rebarba

Os equipamentos necessários para o processo de moldação por compressão são a prensa hidráulica e os moldes.

A prensa hidráulica tem como objetivo fazer o fecho dos moldes. O óleo é injetado no cilindro hidráulico com uma pressão previamente definida (na Procalçado é, em média, 150 bar), provocando a aplicação de uma força numa placa rígida, que faz a transmissão aos moldes.

Os moldes são bastante simples, constituídos apenas por uma base e uma tampa, não necessitando de canais de alimentação ou de injeção, como na moldação por injeção, nem de canais de refrigeração, dada a elevada condutividade térmica do material das suas bases, o alumínio. Tal como foi referido, no caso do fabrico de solas para calçado também não é habitual existir um sistema de extração. O seu aquecimento é feito por um sistema elétrico, a vapor, a gás, a óleo ou a água quente [29]. Os materiais que constituem os moldes serão abordados com mais detalhe na secção seguinte.

Na Procalçado existem 31 máquinas para fazer moldação por compressão, sendo que na sua maioria funcionam quatro moldes em simultâneo. Na figura 12 encontra-se a montagem do processo, numa fase em que a prensa se encontra a comprimir os moldes, decorrendo, portanto, a vulcanização da borracha.

Os principais parâmetros do processo são os seguintes:

- Quantidade de material colocada na cavidade do molde;
- Temperatura do molde;
- Tempo de vulcanização;
- Pressão do óleo injetado no cilindro hidráulico.



Figura 12 – Máquina de moldação por compressão com 4 moldes

De seguida enumeram-se as principais vantagens deste processo [28, 30]:

- Capacidade de produção de peças volumosas;
- Baixo custo dos moldes;
- Troca de moldes relativamente simples e rápida;
- Dispensa a utilização de sistemas de gitagem;
- Permite fabricar produtos contendo diferentes materiais e cores;
- Facilidade operacional.

No entanto, a moldação por compressão também tem algumas limitações [28, 30]:

- Dificuldade em conhecer a quantidade exata de borracha a utilizar em cada situação;
- Elevados desperdícios de material sob a forma de rebarba;
- Tempos de vulcanização elevados, o que torna o processo moroso;
- Tempos de vulcanização variados, conforme o material e a forma do produto pretendido;
- Fabrico complexo e moroso dos pré-formados;
- Necessidade de operadores para fazer a colocação e extração do material.

Na figura 13 é representado todo o ciclo de produção de uma sola em borracha através do método de moldação por compressão na Procalçado. Tal como foi referido anteriormente, é colocada na cavidade do molde uma determinada quantidade de pré-formado (figura 13 a)). De seguida, o molde fecha e permanece nessa posição um tempo médio de 10 minutos, variando consoante o material utilizado, a sua quantidade e a forma pretendida. Durante este período dá-se a vulcanização da borracha, sendo que, após a abertura do molde, o material já se encontra suficientemente estável para poder ser extraído (figura 13 b)). Após a extração, o operador separa o par em duas solas utilizando uma tesoura, aproveitando também para cortar a rebarba de uma forma grosseira (figura 13 c)). De seguida, a rebarba é cortada com precisão (figura 13 d)) e são feitas operações de acabamento (figura 13 e)), ficando então as solas com o aspeto visível na figura 13 f)).



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 13 – Etapas da produção de uma sola através de moldação por compressão – a) colocação dos pré-formados; b) abertura do molde após compressão; c) solas separadas e rebarba cortada de forma grosseira; d) corte da rebarba com precisão; e) operações de acabamento; f) aspecto final das solas

Para além do processo clássico de moldação por compressão, existem outras variantes deste processo, nomeadamente a moldação por transferência (figura 14). Este processo é bastante semelhante ao original, com a exceção de que ao invés de o material ser pressionado na cavidade, como na moldação por compressão, é pressionado numa câmara separada, onde é pré-aquecido, passando depois por canais que o conduzem até à cavidade do molde [27].

As principais vantagens deste processo relativamente à moldação por compressão são as seguintes [27, 28]:

- Menores tempos de ciclo, devido ao pré-aquecimento do material na câmara de transferência, o que reduz o tempo de vulcanização;
- Menores distorções das peças, uma vez que o material entra na cavidade através de um canal, após ser pré-aquecido, pelo que a distribuição de temperaturas é mais uniforme;
- Permite o fabrico de peças mais complexas.

A moldação por transferência tem também algumas desvantagens relativamente ao processo original [28]:

- Custo mais elevado dos equipamentos;
- Maiores desperdícios de material;
- Dificuldade na transferência de materiais de dureza elevada.

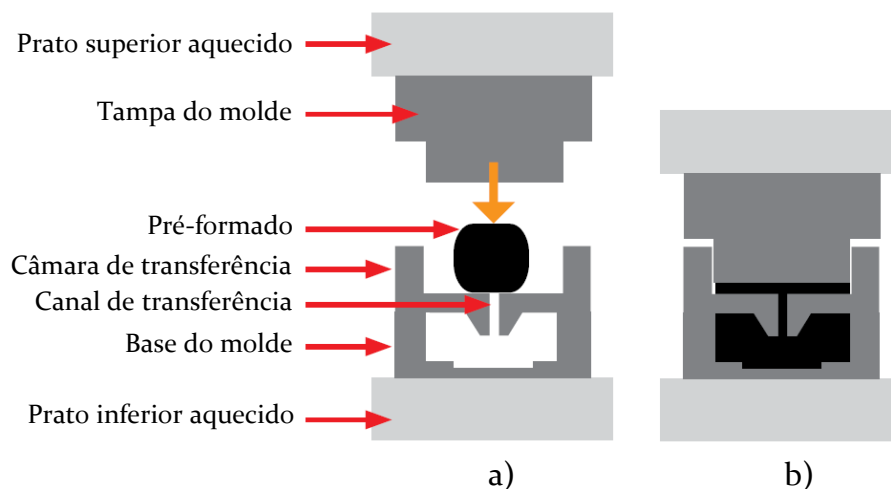


Figura 14 – Processo de moldação por transferência, com o molde aberto (a) e fechado (b) – adaptado de [28]

2.2. Moldes para calçado

Os moldes para calçado são constituídos por duas partes, uma base e uma tampa. Os materiais utilizados para os moldes variam com o processo de fabrico de solas utilizado. Na Procalçado, no processo de moldação por compressão de borracha utilizam-se bases numa liga de alumínio, obtidas por fundição, e tampas em aço, totalmente maquinadas.

2.2.1. Produção de moldes

O primeiro passo para a produção de um molde passa pelo processo criativo da sola por parte do cliente, a marca. Finalizada esta fase, o cliente entra em contacto com uma empresa fabricante de solas, como por exemplo a Procalçado, fornecendo informações como os desenhos técnicos 2D e/ou 3D, tamanhos pretendidos e especificações acerca dos materiais a utilizar.

De seguida, o fabricante de solas entra em contacto com o fabricante de moldes, que com os dados fornecidos pelo cliente produz uma maquete de apresentação (figura 15) em Necuron® (poliuretano comercializado pela Necumer), para aprovação do cliente [31]. As maquetes de apresentação não apresentam todos os elementos da sola, como a sua parte interna e a espessura a romper.



Figura 15 – Maquete de apresentação para aprovação do cliente [2]

Caso a maquete de apresentação seja aprovada, inicia-se o fabrico do molde. De seguida apresentam-se as etapas para a produção da sua base [32]:

- 1) Produção da maquete de fundição, que é semelhante à maquete de apresentação, em Necuron®, mas tem em conta o efeito de contração dos materiais;
- 2) A maquete é colada sobre uma caixa, também em Necuron®, cuja face superior tem o perfil do fecho do molde (figura 16 a));
- 3) É vazado um silicone sobre a maquete e a caixa, construindo-se assim, após a sua solidificação, um modelo em silicone da base do molde (figura 16 b));
- 4) Vazamento de gesso refratário no modelo de silicone, obtendo um modelo negativo da base do molde em gesso refratário (figura 16 c)). Este material tem condições para suportar as elevadas temperaturas do alumínio no estado líquido;
- 5) Colocação do modelo em gesso refratário numa caixa em aço revestida por placas de fibra cerâmica, que tem uma tampa com uma abertura para fazer o vazamento do alumínio (figura 16 d));

- 6) Vazamento do alumínio no estado líquido sobre o gesso refratário (figura 16 e));
- 7) Solidificação do alumínio e corte do gito, obtendo-se assim a base do molde (figura 16 f)).

Na figura 17 a) encontra-se a tampa de uma caixa em aço onde a base em alumínio solidifica e na figura 17 b) mostra-se a caixa com a base do molde já solidificada no seu interior, antes do corte do gito.

A tampa do molde é obtida totalmente por maquinagem CNC.

Na figura 18 apresenta-se a base e a tampa de um molde para fabrico de solas para calçado através do processo de moldação por compressão.

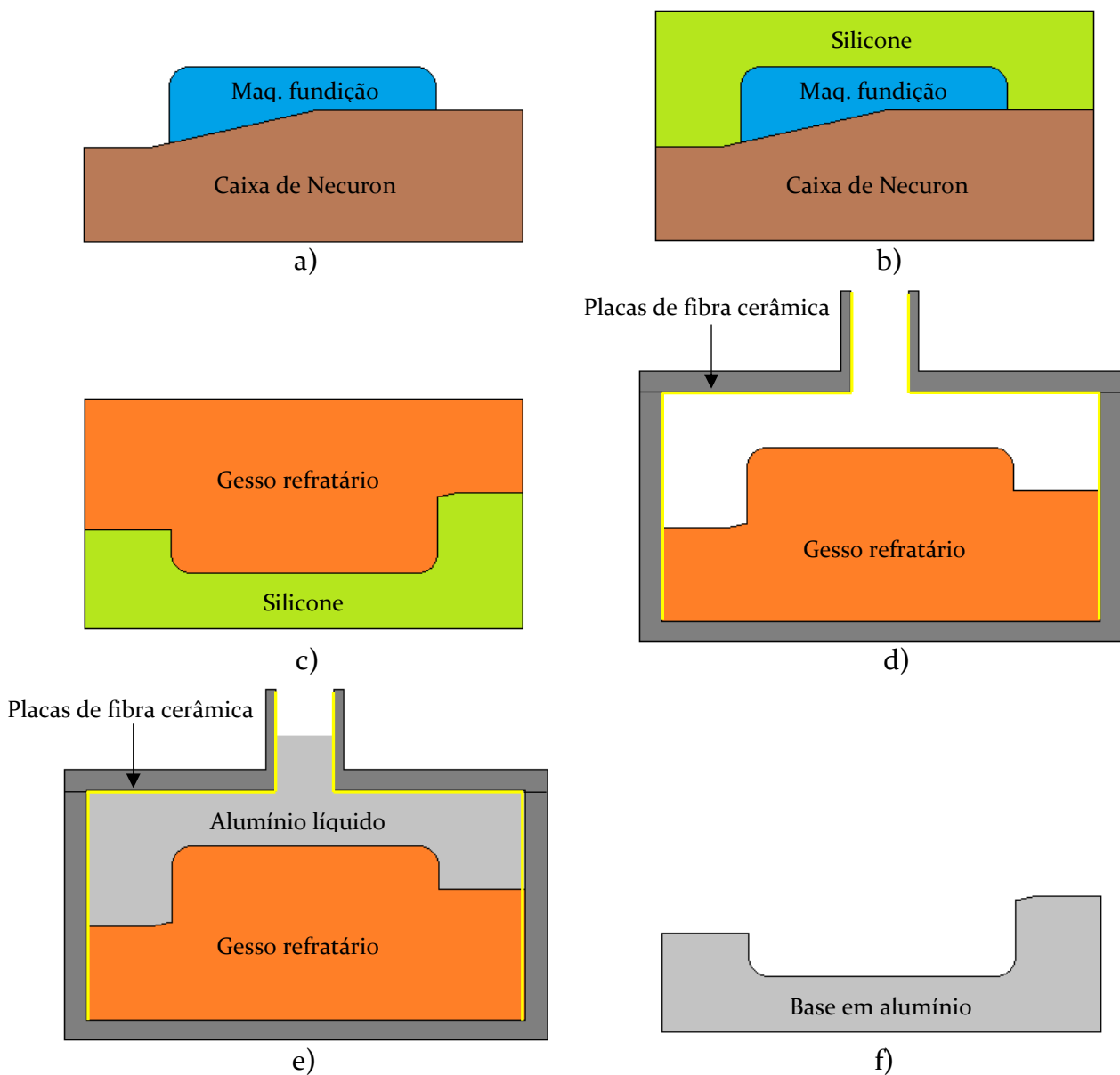


Figura 16 – Etapas da produção da base de um molde para o fabrico de solas para calçado através do método de moldação por compressão – a) maqueta de fundição colada a caixa de Necuron®; b) modelo em silicone da base do molde; c) modelo negativo da base do molde em gesso refratário; d) modelo em gesso refratário colocado numa caixa em aço revestida por placas de fibra cerâmica; e) alumínio líquido vazado; f) base em alumínio após solidificação e corte do gito



a)



b)

Figura 17 – Tampa da caixa onde a base em alumínio solidifica (a) e caixa com a base do molde já solidificada no seu interior, antes do corte do gito (b)



Figura 18 – Base e tampa de molde para fabrico de solas para calçado através do processo de moldação por compressão [33]

2.2.2. Ligas de alumínio para fundição

O alumínio no estado puro é relativamente macio e dúctil, tendo também uma resistência mecânica inferior à de outros metais, como por exemplos os aços, pelo que, apesar de apresentar uma baixa densidade, boa resistência à corrosão e excelentes propriedades de condução de calor e eletricidade, pode revelar-se inadequado para muitas aplicações. Assim, combinar o alumínio com outros elementos, os chamados elementos de liga, pode traduzir-se num melhoramento muito significativo das suas propriedades mecânicas [34, 35].

Uma das designações mais utilizadas para as ligas de alumínio é a atribuída pela Aluminum Association [36], que as divide em ligas de fundição e de conformação plástica.

No que diz respeito às ligas de fundição, são utilizados quatro dígitos, separando-se o terceiro e o quarto por um ponto. O significado dos dígitos é o seguinte [37]:

- 1º dígito – indica o principal elemento de liga que foi adicionado ao alumínio. É habitualmente utilizado para classificar a série da liga (liga 1000, 2000, 3000, etc.). Na tabela 3 estão indicadas as descrições das várias séries;
- 2º e 3º dígitos – indicam qual a liga em concreto dentro de determinada série;
- 4º dígito – indica se o material se encontra no estado pós-fundição (0) ou em lingote (1 ou 2).

As designações das ligas de alumínio podem ainda conter uma letra antes do primeiro dígito, caso se trate de uma variação dessa liga, contendo uma percentagem diferente de um determinado componente ou um limite de impureza [38].

Tabela 3 – Designação da Aluminum Association para os principais grupos de ligas de alumínio de fundição [38, 39]

Designação	Descrição
1xx.x	Alumínio 99 % puro
2xx.x	Ligas de alumínio contendo cobre como principal elemento de liga
3xx.x	Ligas de alumínio-silício contendo também magnésio ou cobre
4xx.x	Ligas binárias de alumínio-silício
5xx.x	Ligas de alumínio contendo magnésio como principal elemento de liga
6xx.x	Atualmente não utilizada
7xx.x	Ligas de alumínio contendo zinco como principal elemento de liga, contendo também cobre, magnésio, cromo ou manganês
8xx.x	Ligas de alumínio contendo estanho como principal elemento de liga
9xx.x	Outros elementos

As principais vantagens da utilização de ligas de alumínio para a produção de moldes, relativamente ao aço, são as seguintes [40, 41]:

- Baixa densidade, o que facilita o seu transporte e manuseamento;
- Elevada condutividade térmica, permitindo uma rápida dissipação de calor, evitando a utilização de canais de refrigeração;
- Excelente maquinabilidade;
- Boa resistência à corrosão;
- Matéria prima mais barata.

No entanto, também apresenta desvantagens relativamente ao aço [40, 42]:

- Menor resistência mecânica, o que diminui a sua durabilidade;
- Dificuldade em soldar, o que pode inviabilizar reparações, tornando necessária a produção de um molde novo;
- Suportam temperaturas de serviço mais baixas.

As ligas de alumínio habitualmente utilizadas na produção de moldes são ligas de conformação plástica, uma vez que os processos de fundição têm associados uma série de defeitos, o que lhes confere uma menor resistência mecânica. Assim, os moldes em alumínio são habitualmente maquinados a partir de blocos de alumínio.

No entanto, os moldes obtidos através de maquinaria têm custos e tempos de produção bastante mais elevados, o que só os torna viáveis para grandes séries. Para além disso, algumas solas para calçado possuem texturas muito complexas, por vezes até impossíveis de maquinar, razões pelas quais na indústria do calçado se recorre, por norma, à fundição para a produção de moldes.

2.2.2.1. Efeito dos elementos de liga

De seguida apresentam-se os efeitos dos principais elementos de liga presentes na liga de alumínio utilizada nas bases dos moldes estudados na parte prática da dissertação [38, 39]:

- **Chumbo (Pb)**
Utilizado em quantidades superiores a 0,1 % de forma a melhorar a maquinabilidade;
- **Cobre (Cu)**
Provoca aumentos substanciais na dureza dos materiais. Ligas que contenham quantidades de cobre entre 4 % e 5,5 % reagem de forma mais eficaz a tratamentos térmicos e apresentam boas propriedades de fundição. No entanto, a presença de cobre provoca uma diminuição na resistência à fissuração a quente;

- **Crómio (Cr)**
Habitualmente utilizado em pequenas concentrações em composições instáveis termicamente para prevenir crescimento de grão. Aumenta também a resistência à corrosão em certas ligas;
- **Ferro (Fe)**
Melhora a resistência à fissuração a quente devido à formação de fases intermetálicas e facilita a desmoldação, apesar de ter efeitos negativos na ductilidade. Ao reagir com o alumínio e outros elementos de liga provoca a formação de fases insolúveis, como FeAl_3 , FeMnAl_6 e $\alpha\text{-AlFeSi}$, que são responsáveis pelo aumento de resistência mecânica das ligas, embora provoquem uma diminuição na sua colabilidade;
- **Magnésio (Mg)**
Componente principal para o melhoramento de propriedades nas ligas de alumínio-silício tratadas termicamente. O limite de solubilidade do magnésio no alumínio é 0,7 %, pelo que quando utilizado em quantidades superiores deixa de ter um efeito endurecedor, podendo mesmo provocar um amaciamento;
- **Manganês (Mn)**
Desempenha um papel importante no encruamento e pode melhorar a resposta a acabamentos químicos e anodização;
- **Níquel (Ni)**
Habitualmente utilizado com cobre de forma a melhorar propriedades a elevada temperatura. Reduz também o coeficiente de expansão térmica;
- **Silício (Si)**
Utilizado para melhorar as características de fundição das ligas de alumínio. Provoca um grande aumento de colabilidade e de resistência à fissuração a quente. É utilizado predominantemente em ligas de alumínio para fundição, podendo atingir quantidades próximas de 25 % na sua composição. Permite também a redução de densidade e do coeficiente de expansão térmica;
- **Titânio (Ti)**
Utilizado com o objetivo de reduzir o tamanho de grão e as fissurações e de aumentar a ductilidade e a resistência à tração. No entanto, provoca também uma diminuição da condutividade térmica;

- **Zinco (Zn)**

Por si só não confere nenhum benefício à fundição de ligas de alumínio. No entanto, quando combinado com cobre ou magnésio melhora a reação a tratamentos térmicos.

2.2.2.2. Ligas de alumínio-silício

A liga de alumínio utilizada nas bases dos moldes estudados na parte experimental da dissertação tem silício como principal elemento de liga.

As ligas de alumínio-silício pertencem à classe 3xx.x ou 4xx.x da designação pela Aluminum Association, caso sejam binárias, no segundo caso, ou caso contenham percentagens elevadas de outros componentes, no primeiro, como é o caso da liga utilizada. A sua estrutura pode ser eutética, hipoeutética ou hipereutética, como mostra o seu diagrama de equilíbrio de fases (figura 19). Habitualmente os benefícios da utilização de silício como elemento de liga atingem o seu pico para concentrações de silício entre 5 % e a concentração eutética, aproximadamente 12,6 %, sendo nesta gama que se encontra a grande maioria das ligas de alumínio-silício, que são aquelas que apresentam melhores propriedades para fundição. [39, 43]

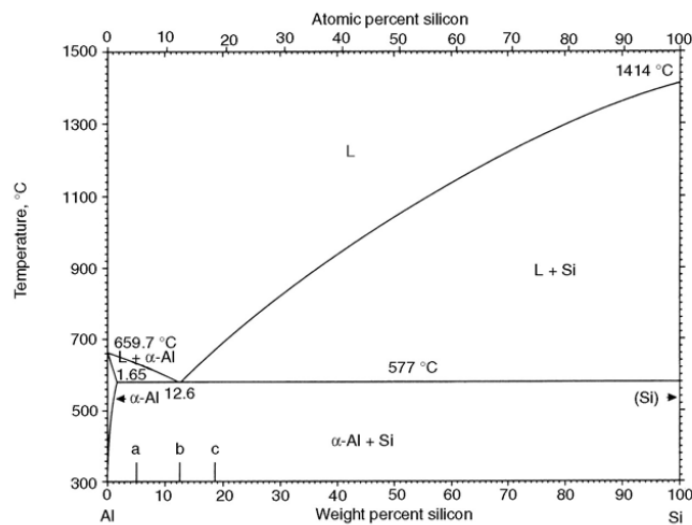


Figura 19 – Diagrama de equilíbrio de fases das ligas de alumínio-silício [43]

Tal como foi referido, as ligas de alumínio-silício caracterizam-se por uma elevada colabilidade, permitindo assim um bom enchimento do molde, mesmo em zonas de pequena espessura, sendo este o aspeto que as torna mais adequadas para fundição, e também por uma boa resistência à corrosão. A sua elevada contração na solidificação minimiza os rechupes e fissuras, sendo essa outra das principais vantagens da sua utilização [35, 38, 44].

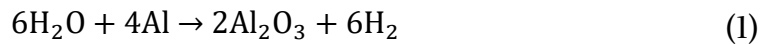
2.2.3. Defeitos de fundição

As peças obtidas através de fundição estão suscetíveis a uma quantidade de imperfeições, devido, sobretudo, ao projeto da peça e à qualidade do processo. Estas imperfeições são consideradas defeitos caso comprometam o correto cumprimento da função ou a aparência da peça [45].

De seguida apresentam-se os defeitos mais frequentes nas peças obtidas por fundição.

2.2.3.1. Porosidades

Porosidades são defeitos gasosos que podem resultar do aprisionamento de ar durante o vazamento ou do contacto entre o metal líquido e material presente na moldação, como é o caso das partículas metálicas resultantes da erosão provocada pelo metal. Podem ainda surgir da formação de precipitados durante a solidificação, associados à mudança da solubilidade do hidrogénio com a temperatura do metal. Este fenómeno é agravado na fundição de ligas de alumínio devido à afinidade entre o alumínio e o oxigénio, que leva à decomposição do vapor de água presente no ar, de acordo com a reação da expressão (1) [45, 46].



Estes defeitos apresentam, por norma, uma forma arredondada, embora em casos de porosidade intergranular exista uma tendência à formação de geometrias côncavas, devido à precipitação na interface sólido-líquido [46].

Na figura 20 encontra-se uma microestrutura de uma peça obtida por fundição contendo porosidades.

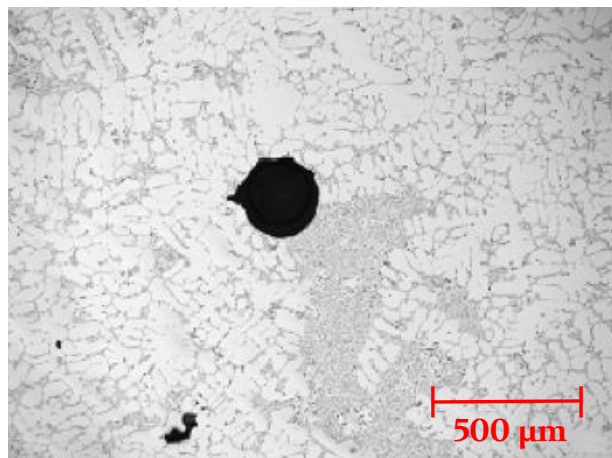


Figura 20 – Microestrutura de peça obtida por fundição contendo porosidades [46, 47]

2.2.3.2. Rechupes

Rechupes são defeitos que surgem devido a uma deficiente compensação da falta de metal no estado líquido no momento da solidificação, devido à contração do material inerente à mudança de fase, resultando em vazios nas peças. A sua ocorrência deve-se, assim, a um sistema de alimentação inadequado. As localizações mais comuns para os rechupes são as zonas mais volumosas, que solidificam em último lugar [48].

Na figura 21 encontra-se uma peça obtida através de fundição, onde se observam rechupes de dimensão considerável.

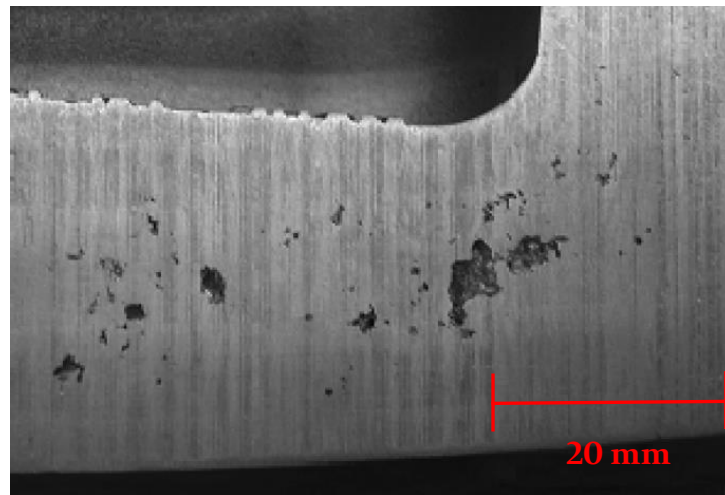


Figura 21 – Rechupes numa peça obtida através de fundição [46]

Estes defeitos podem também surgir na forma de microrechupes, frequentes em peças com grandes intervalos de solidificação, que são rechupes intergranulares que podem apresentar a forma de uma porosidade fina [48].

Para evitar a formação de rechupes e microrechupes, os alimentadores devem ser colocados próximos das últimas zonas a solidificar e deve ser garantida uma solidificação direcional da peça, conduzindo os rechupes para a sua superfície [48, 49].

A utilização cada vez mais frequente de *software* de simulação no processo de solidificação tem-se verificado bastante eficaz na redução deste tipo de defeitos.

2.2.3.3. Inclusões

As inclusões podem ser divididas em endógenas e exógenas.

As inclusões endógenas surgem devido a reações durante a fusão, envolvendo impurezas como o oxigénio, o azoto e o enxofre, que interagem com os constituintes mais reativos das ligas. São pequenas partículas que permanecem em suspensão durante o vazamento do metal ou que precipitam como consequência

de alterações na solubilidade durante o arrefecimento. Estas inclusões podem ser minimizadas através da utilização de técnicas de fusão e refinação apropriadas, ou ainda fazendo a fusão em vácuo ou em atmosferas inertes.

As inclusões exógenas têm origem na desagregação das moldações e das ferramentas que entram em contacto com o metal no estado líquido, contribuindo para o aparecimento de escórias. A turbulência no vazamento também é um fator importante para o aparecimento destas inclusões, pois provoca um maior desgaste nas moldações. As inclusões exógenas podem ser evitadas utilizando filtros na entrada do metal líquido na cavidade ou através de decantação antes do vazamento.

2.2.3.4. Falta de enchimento

Falta de enchimento é, como o nome indica, um preenchimento incompleto da cavidade do molde, acontecendo, sobretudo, em zonas das peças que apresentem espessuras finas. As principais causas deste defeito são as baixas temperaturas de vazamento e da moldação, baixa velocidade de enchimento, ar aprisionado e libertação de vapores. Existem diversas formas de evitar a falta de enchimento [48]:

- Aumentar a velocidade de enchimento, o que pode, no entanto, provocar outros defeitos, como porosidades;
- Aumentar as temperaturas de vazamento e da moldação, o que também é suscetível de causar maior quantidade de porosidades. O aumento da temperatura da moldação pode ser feito apenas nas zonas críticas, através de fontes de calor exteriores ou de um melhor isolamento nessas regiões;
- Efetuar uma boa ventilação do molde, de forma a libertar gases aprisionados.

2.2.3.5. Contração no estado sólido

Além da contração na transição do estado líquido para o sólido, que origina os rechupes, também se dá uma contração no estado sólido, devido ao arrefecimento do material desde a temperatura de *solidus* até à temperatura ambiente. Contrariamente à contração na mudança de estado, que pode ser compensada através de aumento do fluxo de metal líquido, a contração no estado sólido afeta todas as dimensões lineares da peça, tendo, portanto, que ser considerada no projeto das peças. Na tabela 4 encontra-se a contração linear até 20 °C de alguns metais no estado sólido [45].

Tabela 4 – Contração linear até 20 °C de alguns metais no estado sólido [45]

Metal	Contração linear até 20 °C [%]
Alumínio	1,9
Cobre	2,2
Ferro	2,6
Chumbo	1,0
Magnésio	2,0
Níquel	2,6
Estanho	0,5
Zinco	1,4

A contração no estado sólido inicia-se imediatamente após a formação de uma massa coerente sólida. Na prática, esta contração nunca se dá livremente, visto que o material tem que vencer a resistência oferecida pelo molde, por pressões hidrostáticas devido a líquidos residuais e por outras partes do material, devido a um arrefecimento não uniforme. Estes obstáculos provocam o surgimento de tensões internas, que podem originar fissuras (figura 22) [45].

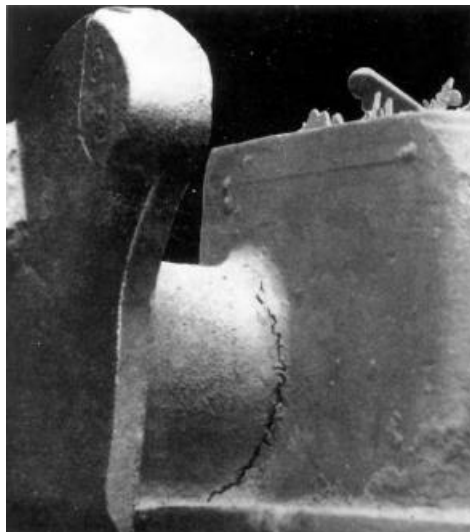


Figura 22 - Fissuração devida às tensões resultantes da contração no estado sólido de uma peça obtida por fundição [45]

2.2.4. Tratamentos térmicos

Para além de poder ser combinado com outros elementos, existem outros métodos para provocar o aumento da resistência mecânica do alumínio. Por norma, aqueles que apresentam melhores resultados quanto ao melhoramento das propriedades mecânicas das ligas de alumínio são os tratamentos térmicos que o fazem através de um processo denominado de endurecimento por precipitação.

Este processo tem como objetivo a formação de precipitados que atuem como obstáculo ao movimento das deslocações, aumentando assim a resistência mecânica do material [50, 51].

Na tabela 5 estão indicadas as designações e descrições dos vários tratamentos térmicos para ligas de alumínio pela Aluminum Association.

Tabela 5 – Designação da Aluminum Association e descrição dos tratamentos térmicos para ligas de alumínio [39]

Designação	Descrição
O	Recozimento
F	Estado bruto
W	Solubilização
T1	Arrefecimento após conformação a alta temperatura e envelhecimento natural
T2	Arrefecimento após conformação a alta temperatura, encruamento e envelhecimento natural
T3	Solubilização, encruamento e envelhecimento natural
T4	Solubilização e envelhecimento natural
T5	Arrefecimento após conformação a alta temperatura e envelhecimento artificial
T6	Solubilização e envelhecimento artificial
T7	Solubilização e estabilização ou sobre-envelhecimento
T8	Solubilização, encruamento e envelhecimento artificial
T9	Solubilização, envelhecimento artificial e encruamento
T10	Arrefecimento após conformação a alta temperatura, encruamento e envelhecimento artificial

No trabalho experimental concluiu-se que o tratamento térmico T6 era o que conduzia a um maior aumento de resistência mecânica da liga utilizada nas bases dos moldes estudados, para além de que é um tratamento utilizado frequentemente na indústria, em moldes para injeção e compressão de plásticos e borracha, tendo por isso sido o tratamento estudado.

Tal como indicado na tabela 5, o tratamento térmico T6 envolve a solubilização, seguida de envelhecimento artificial. Na figura 23 está representado o ciclo térmico deste tratamento.

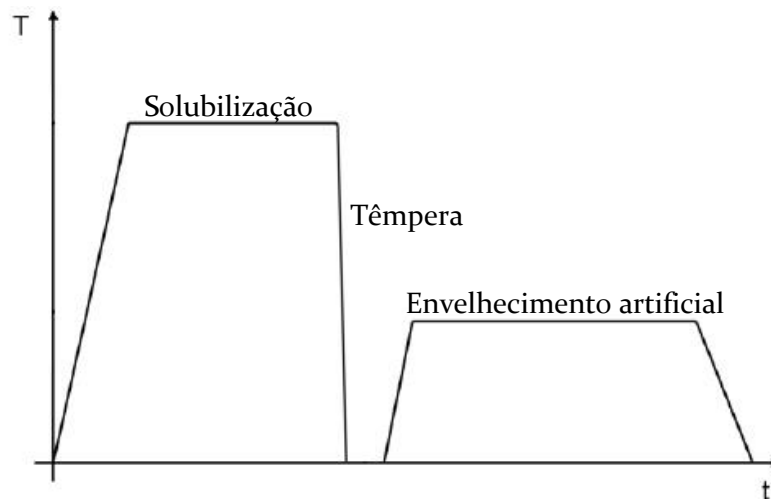


Figura 23 – Fases do tratamento térmico T6 [52]

De seguida apresentam-se as três fases do tratamento térmico T6.

2.2.4.1. Solubilização

A solubilização é a primeira fase do tratamento térmico T6 e de grande parte dos restantes tratamentos térmicos para ligas de alumínio.

Os objetivos da solubilização são [53]:

- Dissolver as partículas intermetálicas ricas em Cu e Mg formadas durante a solidificação;
- Homogeneizar os elementos de liga presentes na matriz;
- Globulizar as partículas de silício eutético.

Durante esta fase do tratamento o material é elevado e mantido a uma temperatura entre a temperatura de *solvus* e a de *solidus*, preferencialmente próxima da temperatura eutética, durante um período suficientemente longo para obter uma estrutura totalmente homogénea. Este período varia bastante conforme o tipo de liga e a forma como esta foi obtida, dado ser dependente do tamanho, distribuição e tipo de fases intermetálicas. O tempo de estágio também está relacionado com a temperatura a que é feita a solubilização, pois quanto mais elevada for a temperatura, mais rapidamente se dará a globulização. No entanto, uma temperatura excessiva poderá provocar a fusão indesejada de algumas fases, o que gera defeitos internos [39, 51, 54].

Durante a solidificação o silício assume uma estrutura acicular, sendo que as suas extremidades são zonas de concentração de tensões (figura 24 a)), o que leva a uma diminuição de ductilidade. Após a homogeneização o silício assume uma

forma globular, diminui o seu tamanho (figura 24 b)) e há uma redução nas propriedades mecânicas [53, 55].

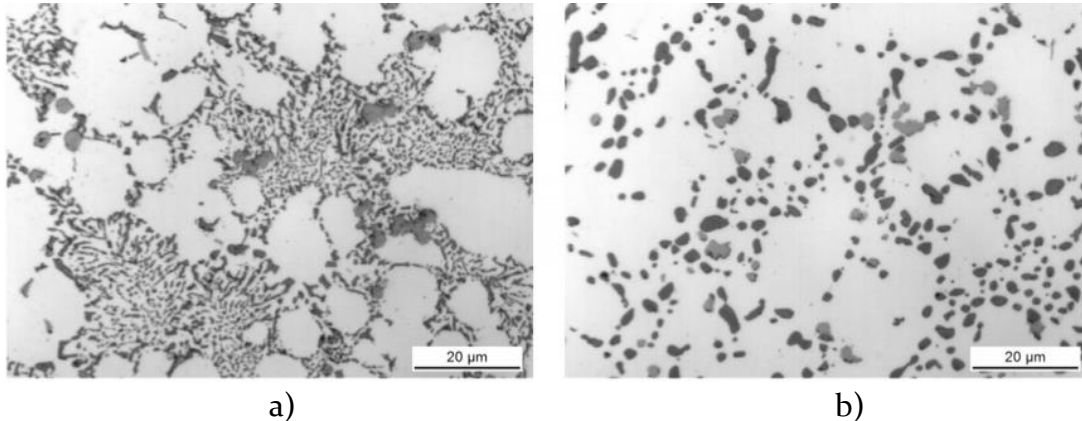


Figura 24 – Microestruturas de uma liga de alumínio-silício antes (a) e depois da solubilização (b) [56]

2.2.4.2. Têmpera

A têmpera, segunda fase do tratamento térmico T6, consiste num arrefecimento brusco do material desde a temperatura de solubilização até à temperatura ambiente, sendo habitualmente utilizada água como meio de arrefecimento. Após a têmpera, a estrutura da liga consiste numa solução sólida sobressaturada de fase α [51].

Durante a têmpera procura-se o seguinte [52]:

- Evitar a formação de precipitados;
- Reter o máximo de elementos possível na solução sólida;
- Criar falhas de empilhamento na estrutura.

A velocidade a que ocorre a têmpera é determinante para o sucesso do endurecimento da liga. Esta é crítica para temperaturas entre os 450 °C e os 200 °C, pois nesta gama de temperaturas os precipitados formam-se muito rapidamente devido à sobressaturação da matriz. Contrariamente aos precipitados que se formam durante o envelhecimento, estes são grosseiros e formam-se nas juntas de grão e deslocções, podendo originar sobre-envelhecimento localizado, aumentar a tendência à corrosão e diminuir os efeitos do envelhecimento. Para evitar este fenómeno a taxa de arrefecimento deve ser elevada, o que vai provocar uma maior retenção de elementos na solução sólida, originando uma formação de precipitados no envelhecimento mais significativa, bem como gerar uma quantidade superior de falhas de empilhamento, facilitando assim o movimento dos elementos numa fase inicial do envelhecimento [52, 57].

2.2.4.3. Envelhecimento artificial

O envelhecimento é a terceira e última fase do endurecimento por precipitação e é onde se formam os precipitados finamente dispersos que estão na origem do endurecimento. Estes impedem o movimento das deslocações, provocando o aumento das propriedades de resistência mecânica. O envelhecimento pode ser natural, ocorrendo à temperatura ambiente, ou artificial, a temperaturas que variam, por norma, entre 150 °C e 210 °C. Neste caso, a temperatura e tempo de envelhecimento vão ser decisivos na alteração das propriedades mecânicas [51, 52].

Tal como foi referido, após a têmpera a matriz encontra-se sobressaturada, o que provoca a formação de agrupamentos de átomos segregados, a que se dá o nome de zonas de *Guinier-Preston*. Com o aumento de temperatura no envelhecimento artificial, estas zonas decompõem-se e formam-se precipitados, dando origem a fases metaestáveis onde os átomos se arranjam numa estrutura tetragonal com alto grau de coerência com a matriz, o que resulta num aumento de endurecimento (figura 25, zona I). Mantendo a temperatura elevada, este atinge um máximo (figura 25, zona II) [52].

A continuação do tratamento vai provocar a dissolução destas fases e começam-se a formar precipitados nas juntas de grão e deslocações, pelo que, embora a matriz mantenha uma estrutura tetragonal, o crescimento dos precipitados provoca uma perda de coerência com a matriz, o que resulta num novo abaixamento da resistência mecânica do material (figura 25, zona III) [52].

Caso a temperatura seja mantida, ocorre, por fim, a precipitação de uma fase estável, de tamanho elevado e distribuição grosseira, logo incoerente com a matriz, pelo que as propriedades mecânicas sofrem uma deterioração ainda maior [52].

Desta forma, é possível construir a curva da variação da dureza ou de outra propriedade de resistência mecânica em função do tempo de envelhecimento a uma determinada temperatura, a chamada curva de envelhecimento, que é representada na figura 25 [51].

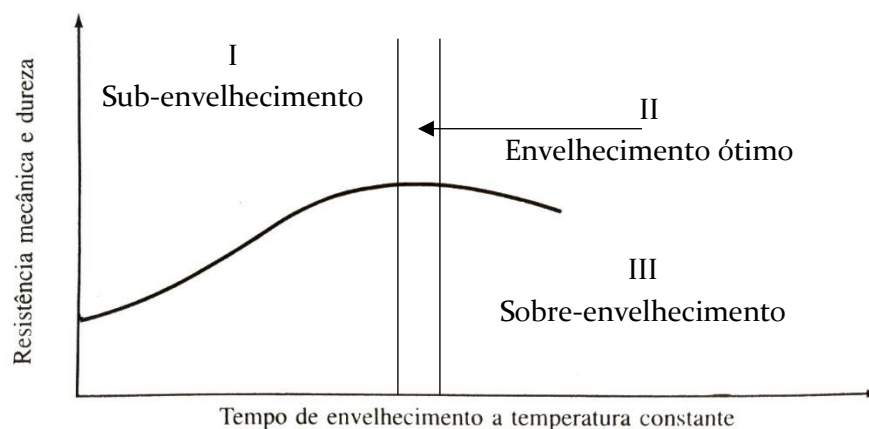


Figura 25 – Curva de envelhecimento [51]

2.3. Simulações

De uma forma geral, as simulações numéricas têm como objetivo fazer a redução de um modelo físico a um modelo matemático, de forma a prever o comportamento de um processo ou de um sistema. Para isso recorrem a *software* computacional [58].

Estão associadas às simulações uma série de vantagens [59]:

- Não têm riscos associados, possibilitando o teste de soluções num ambiente seguro;
- Permitem poupar tempo e dinheiro, dado que as simulações são, por norma, mais rápidas e baratas que testes reais;
- Grande versatilidade, permitindo a simulação de situações estáticas e dinâmicas.
- Facilidade de visualização dos resultados;
- Excelente precisão;

A principal dificuldade das simulações passa por identificar o modelo correto e as condições que representam de forma adequada a situação real.

A maior parte do *software* recorre ao Método dos Elementos Finitos, fazendo uma discretização do modelo em elementos, gerando uma malha. A definição de propriedades do modelo (como por exemplo os materiais utilizados) bem como das condições de fronteira permite ao *software* calcular a solução do problema, através da resolução de equações diferenciais. Dado que as situações reais não são discretas, a fiabilidade dos resultados depende fortemente do número de elementos utilizado, sendo que quanto maior for a sua quantidade, maior será também a precisão do modelo. No entanto, uma maior discretização do sistema implica também um esforço computacional superior [60].

Com os desenvolvimentos alcançados ao nível das simulações, estas têm-se tornado ferramentas muito poderosas, tendo por isso uma utilização cada vez mais global, sendo utilizadas atualmente nas mais diversas indústrias [60].

2.3.1. Métodos numéricos

A resolução de equações diferenciais parciais por parte do *software* de simulação é conseguida à custa de um de dois métodos: o Método das Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF) [58].

Método das Diferenças Finitas

O MDF baseia-se nas propriedades da série de Taylor e na aplicação direta da definição de derivada. A discretização neste método caracteriza-se pela definição de um espaço onde os nós da malha se distribuem em linhas que não se intercetam,

seguida do desenvolvimento de funções como expansão de séries de Taylor em redor dos valores nos nós da malha. Por fim, dá-se a substituição das equações diferenciais por aproximações de diferenças finitas das derivadas [58].

O MDF é indicado para modelos de grande dimensão, que exigem uma discretização num grande número de células, mas onde a obtenção de soluções tão específicas não é necessária [60].

Método dos Elementos Finitos

No MEF o espaço físico é transformado num espaço computacional cartesiano, fazendo a sua divisão em elementos, e a função incógnita correspondente a cada elemento é avaliada com base no valor da função nos seus nós, através de polinómios interpoladores. De seguida, a partir de uma formulação variacional integral do modelo matemático, é possível traduzir o problema físico num sistema de equações, cuja resolução permite obter a função incógnita em cada um dos nós de cada elemento, sendo então interpolada para o seu interior [58].

Na tabela 6 resumem-se as vantagens e desvantagens de cada método.

Tabela 6 - Vantagens e desvantagens do MDF e do MEF [58]

Método	Vantagens	Desvantagens
MDF	• Extremamente geral; • Usado extensivamente em mecânica dos fluidos; • Integração numérica não é necessária; • Matrizes são em banda; • Resolve não-homogeneidades; • Formulação rápida de novos problemas.	• Necessário o uso de malhas estruturadas; • Difícil de aplicar a problemas infinitos; • Obriga a malhas muito finas; • Provavelmente já atingiu as suas potencialidades máximas.
MEF	• Bastante geral e aplicado a problemas estruturais e térmicos; • Integração de funções simples; • Matrizes são em banda e geralmente simétricas; • Resolve não-homogeneidades; • Modelação de fronteiras e condições de fronteira complexas; • Não precisa de malhas estruturadas e pode misturar elementos diferentes.	• Pode precisar de malhas volumétricas; • Obriga a uma relação integral de um princípio variacional ou de uma formulação de resíduos pesados; • Complexo para problemas infinitos; • Começa a atingir as suas potencialidades máximas; • Precisão dos resultados de gradientes ligada ao refinamento da malha

2.3.2. *Software* abordado

Existe atualmente uma grande diversidade de *software* de modelação e de simulação computacional. De seguida apresenta-se o *software* abordado na parte experimental da dissertação.

- **Abaqus FEA**

O Abaqus FEA, desenvolvido pela Dassault Systèmes, baseia-se no MEF para simular desde os mais simples aos mais sofisticados problemas de engenharia, cobrindo um vasto espectro de aplicações industriais, sendo conhecido sobretudo pelas suas potencialidades a nível de análise estrutural. O Abaqus FEA permite tanto a modelação CAD no próprio *software* como a importação de modelos construídos noutro *software*, como por exemplo o SolidWorks [61].

- **ProCAST**

O ProCAST, desenvolvido pela ESI Group, é um *software* desenvolvido para a indústria da fundição, com o objetivo de aumentar o rendimento e qualidade dos processos. Baseia-se no MEF e tem capacidade para prever conceitos básicos do processo de fundição, como preenchimento, solidificação e porosidade, bem como conceitos avançados, designadamente tensões e deformações residuais [62].

- **SolidWorks**

O SolidWorks é um *software* de modelação CAD e CAE, desenvolvido pela Dassault Systèmes. Para além do desenho tridimensional, a sua principal aplicação, permite também fazer simulações numéricas de problemas de engenharia através do MEF [63].

Capítulo 3

Trabalho experimental

3.1. Enquadramento – Fratura de moldes

No fabrico de solas através do processo de moldação por compressão utilizam-se moldes que são constituídos por uma base, por norma fabricada numa liga de alumínio e produzida através de fundição, e por uma tampa, maquinada em aço. A designação de cada molde é composta por um nome, que corresponde ao modelo da sola, e por um número, correspondente ao seu tamanho.

Os moldes utilizados neste processo dividem-se em dois tipos, os moldes normais e os chamados moldes de caixa. A diferença entre eles está na profundidade da cavidade, na base, e no tamanho do macho, na tampa; assim, para solas com alturas de caixa elevadas são utilizados moldes de caixa, enquanto que para solas com alturas de caixa mais reduzidas utilizam-se moldes normais. Na figura 26 é possível ver as diferenças entre as bases de um molde normal (figura 26 a)) e de um molde de caixa (figura 26 b)).

Durante o processo de moldação por compressão de borracha, a Procalçado depara-se frequentemente com fraturas nas bases dos moldes, sendo nos moldes de caixa que se dá a sua grande maioria.

Um dos moldes que fraturou foi o molde META 35,5. Na figura 27 mostra-se este molde, disponibilizado pela Procalçado, onde está assinalada a região fraturada, a vermelho. Na figura 28 é possível observar esta região com mais detalhe, tanto na cavidade do molde (figura 28 a)), como nas regiões laterais, as zonas de propagação da fenda (figura 28 b) e c)). O material branco que se encontra na fenda é borracha que lá ficou alojada no momento da fratura. A região fraturada neste molde, desde a aresta inferior externa da cavidade até à superfície lateral exterior do molde, é semelhante em todas as ocorrências de fraturas em moldes. Foi com relativa facilidade que, forçando a zona da fenda, o molde fraturou completamente, separando-se em várias partes. Na figura 29 é apresentada uma dessas partes.

Uma primeira análise da região fraturada leva a crer que a fenda poderá ter-se iniciado na extremidade inferior externa da cavidade, pois esta é uma zona de concentração de tensões, devido à mudança de geometria.

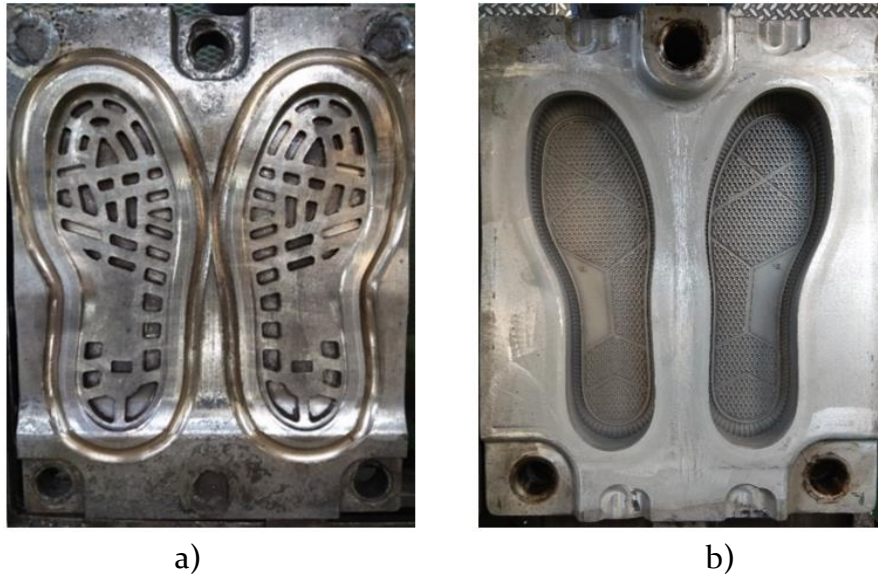


Figura 26 – Comparação entre bases de moldes normais (a) e de moldes de caixa (b), com maior profundidade, onde se dá a maioria das fraturas

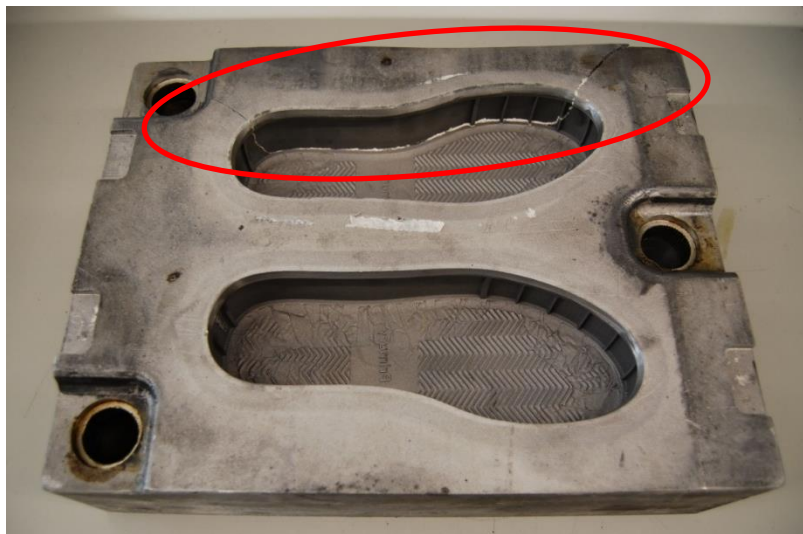


Figura 27 – Molde META disponibilizado pela Procalçado, com a região fraturada assinalada a vermelho



a)



b)



c)

Figura 28 – Vista detalhada da fenda no molde META 35,5, tanto na cavidade (a), como nas zonas laterais (b e c), resultantes da sua propagação



Figura 29 – Parte fraturada que se separou do molde META 35,5 após aplicação de força na zona da fenda

3.2. Procedimento

3.2.1. Introdução e objetivos

O trabalho experimental consistiu no estudo de dois moldes para fabrico de solas através do método de moldação por compressão: um molde de caixa que fraturou, o META 35,5, e outro que funcionou sem qualquer tipo de adversidade, o molde DIVA 38. O objetivo passou por fazer a sua caracterização de forma a compreender as suas diferenças e limitações, de modo a identificar as causas das fraturas, bem como por encontrar métodos para aumentar as suas resistências mecânicas.

Uma vez que a Procalçado disponibilizou os moldes com bastante tempo de intervalo, a sua análise não decorreu em simultâneo. Ainda assim, como os moldes foram fabricados nos mesmos materiais e o seu processo de fabrico foi idêntico, o seu estudo está interligado, pelo que as conclusões retiradas da análise do primeiro molde (META 35,5) foram aplicadas na análise do segundo (DIVA 38) tanto de forma a fazer uma análise mais completa como para otimizar recursos.

O estudo dos moldes dividiu-se em várias etapas, que podem ser consultadas no organograma da figura 30, com os seguintes objetivos:

- Análise da composição química – averiguar se o material utilizado no fabrico do molde se assemelhava a alguma liga de alumínio tabelada e se a sua composição estava de acordo com a indicada pelo fornecedor;
- Ensaio dilatométrico – obter o coeficiente de expansão térmica linear do material;
- Análise microestrutural e de dureza – avaliar o tamanho de grão e eventuais defeitos existentes em amostras de várias regiões e relacionar com a sua dureza;
- Estudo de tratamentos térmicos – efetuados a amostras e provetes extraídos dos moldes, de forma a aferir possíveis melhorias nas propriedades mecânicas;
- Ensaios de tração – realizados tanto no estado bruto de vazamento como a provetes tratados termicamente, de modo a identificar as propriedades mecânicas nos dois estados;
- Simulações computacionais – simular o processo de moldação por compressão de borracha, que envolveu a modelação CAD dos moldes em estudo, com o objetivo de identificar as regiões mais solicitadas e as tensões atingidas durante o processo.

Foi ainda feita uma visita à Virtual Ronda, a empresa produtora dos dois moldes em estudo, de forma a compreender o seu processo produtivo.

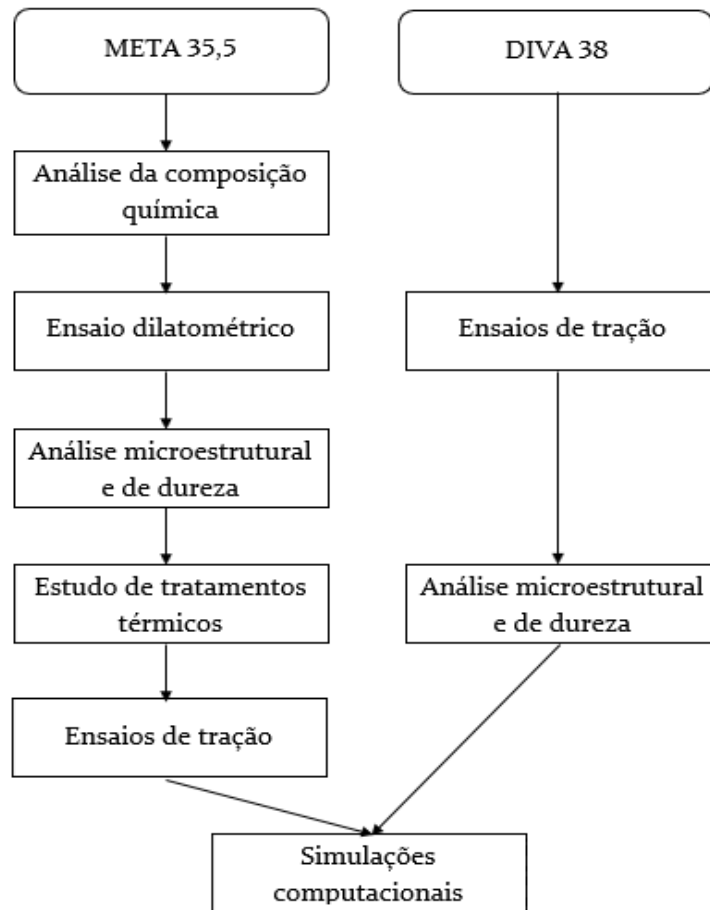


Figura 30 – Organograma com as fases do estudo dos moldes DIVA 35,5 e META 38

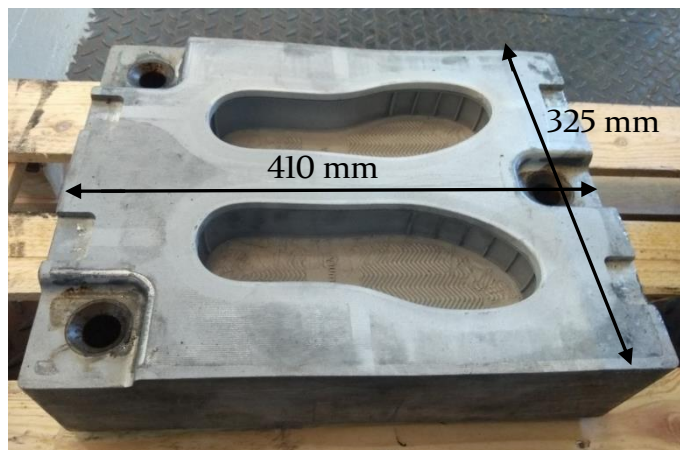
3.2.2. Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram o molde META 35,5 e o molde DIVA 38.

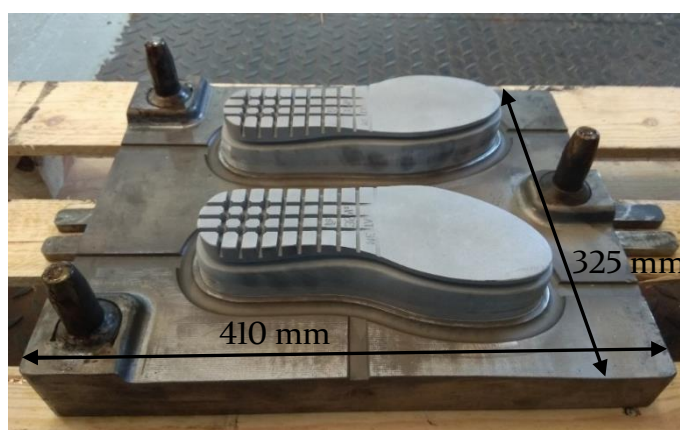
Na figura 31 mostra-se uma segunda versão do molde META 35,5, um molde de caixa, com uma base nova (figura 31 a)), numa liga de alumínio, fabricada para substituir a original, fraturada, enquanto que a tampa (figura 31 b)), em aço, é a original. Uma sola produzida através deste molde, em SBR, encontra-se na figura 32.

A base do molde tem 410 mm de comprimento e 325 mm de largura, sendo que a altura varia entre 100 mm e cerca de 103,5 mm, conforme a região. Já a tampa tem as mesmas dimensões quanto ao comprimento e à largura, mas a sua altura varia entre 46 mm e cerca de 42,5 mm.

Refira-se que, apesar de se mostrar, na figura 31, uma segunda versão da base do molde META 35,5, todo o estudo foi realizado com materiais extraídos do molde original, que fraturou.



a)



b)

Figura 31 – Segunda versão do molde META 35,5, com uma base nova (a), fabricada para substituir a fraturada, e a tampa original (b). A altura da base varia entre 100 mm e 103,5 mm e a altura da tampa varia entre 42,5 mm e 46 mm

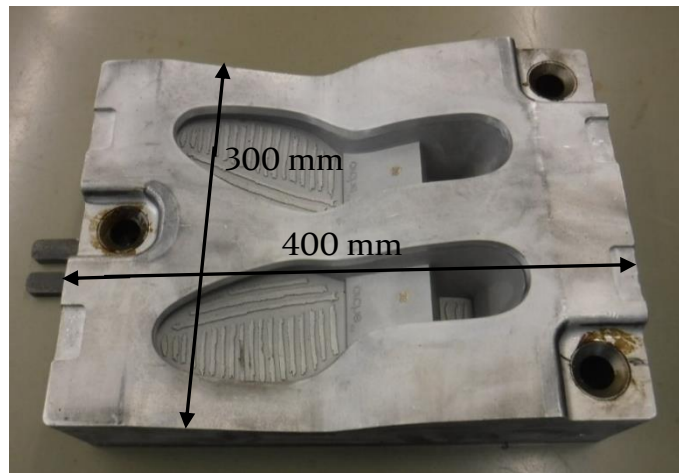


Figura 32 – Sola META 35,5 em SBR

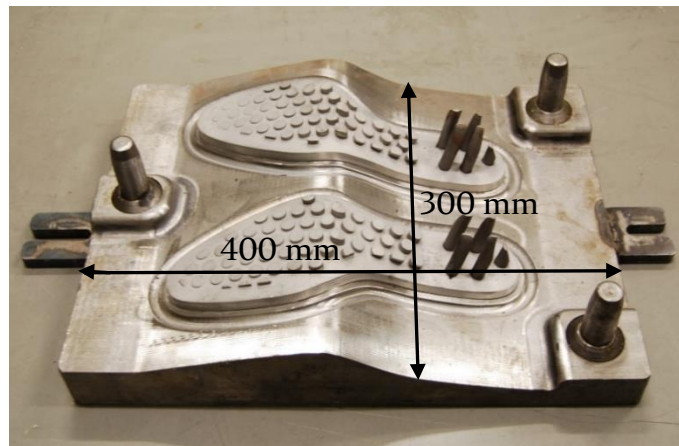
O molde DIVA 38, ao contrário do META 35,5 não é um molde de caixa e já se encontrava fora de serviço, pelo que foi disponibilizado pela Procalçado para ser analisado.

Nas figuras 33 a) e b) encontram-se a base (numa liga de alumínio) e tampa (em aço) do molde DIVA 38, respetivamente, sendo que na figura 34 se mostra uma sola, em SBR, produzida através deste molde.

A base do molde tem 400 mm de comprimento e 300 mm de largura, sendo, portanto, mais pequeno que o META 35,5. Isto acontece porque os moldes semelhantes ao anterior têm um longo histórico de fraturas, pelo que os responsáveis pelo projeto do molde optaram por uma maior robustez. Já a sua altura varia entre 95 mm e 115 mm, conforme a região. A tampa possui as mesmas dimensões quanto ao comprimento e à largura, com a sua altura a variar entre 20 mm e 40 mm.



a)



b)

Figura 33 – Base (a) e tampa (b) do molde DIVA 38. A altura da base varia entre 95 mm e 115 mm e a altura da tampa varia entre 20 mm e 40 mm



Figura 34 – Sola DIVA 38, em SBR

3.2.3. Métodos

3.2.3.1. Análise da composição química

A análise da composição química foi feita através de um espectrómetro de emissão ótica Spectro Max X, do INEGI, utilizando uma amostra extraída do molde META 35,5.

Foi feita uma comparação entre os resultados obtidos e a composição química indicada pelo fabricante dos moldes, a Virtual Ronda, e com a composição química da liga de alumínio tabelada que mais se assemelha à utilizada.

3.2.3.2. Ensaio dilatométrico

Para o ensaio dilatométrico foi utilizado um dilatómetro Bähr Thermoanalyse, do Laboratório de Materiais do DEMec. O ensaio foi feito a uma amostra extraída do molde META 35,5.

3.2.3.3. Análise microestrutural

Para fazer a análise das microestruturas das amostras extraídas dos moldes foi necessário proceder à sua preparação metalográfica, utilizando, para desbaste, lixas de carboneto de silício de 80, 180, 320 e 800 grãos/cm² e, para polimento, panos de polimento com abrasivo diamantado de 3 µm e 1 µm. O microscópio ótico utilizado foi um Zeiss Axiophot, com objetivas com ampliações de 5x, 10x, 20x, 50x e 100x, e o processamento das imagens foi feito utilizando o *software* AxioVision (com um fator de ampliação de 19x). Foi utilizada a objetiva de 5x (ampliação total de 95x) para a recolha de todas as microestruturas presentes neste estudo. O tratamento das imagens obtidas, nomeadamente o cálculo das áreas de defeitos, como porosidades e microrechupes, foi feito utilizando o *software* de acesso livre ImageJ, disponível em: <https://imagej.nih.gov/ij/>.

Para a preparação metalográfica de amostras a partir de cabeças de provete, estas foram montadas numa resina termoendurecível a quente EpoMet F, da Buehler, utilizando uma máquina de montagem de resina a quente Prontopress-2, da Struers.

Molde META 35,5

Foram extraídas duas amostras da uma parte fraturada do molde (figura 29, página 39), para uma primeira análise, sem que tivesse sido feito um registo preciso da sua localização. Tendo em conta a disparidade dos resultados obtidos, foram então retiradas diversas amostras das regiões assinalada a vermelho nas figuras 35 a) e b), as zonas da parte superior e inferior do molde mais próximas do local onde o alumínio é vazado, com o objetivo de analisar as diferenças entre elas. Dado o posicionamento invertido do molde durante o vazamento e solidificação (figura 16 e), página 19), a seta amarela presente na figura 35 b) representa o local onde o metal é vazado.

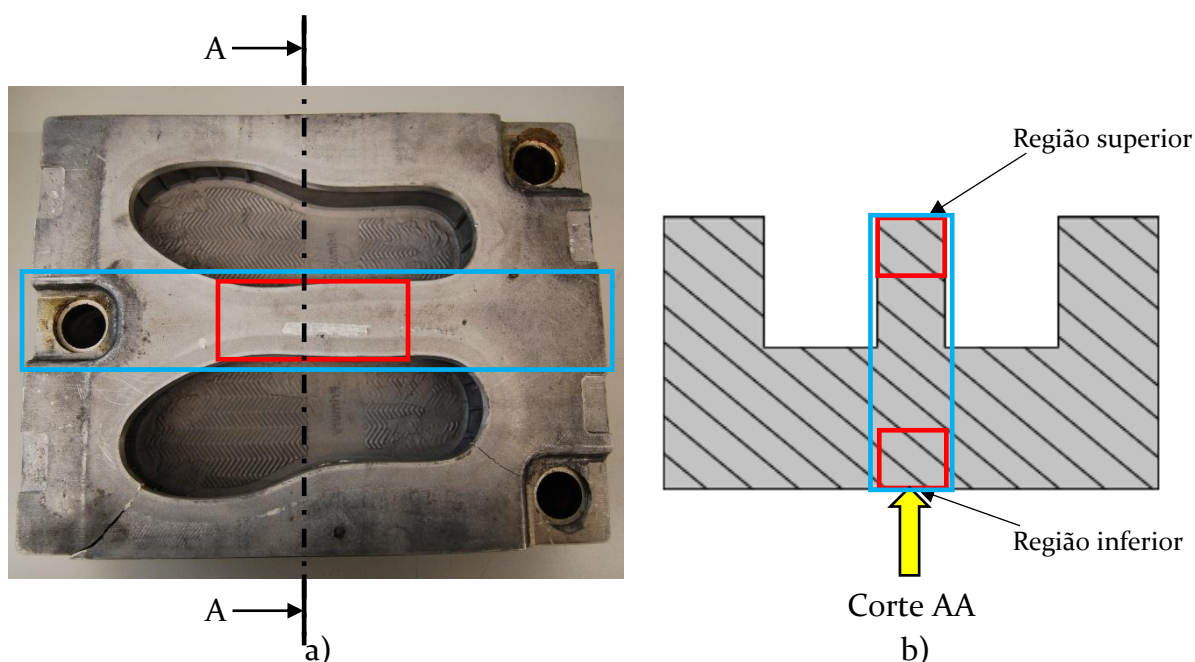


Figura 35 – Molde META 35,5 com regiões de onde foram extraídas as amostras do molde assinaladas a vermelho e de onde foram retirados provetes a azul, numa vista de topo (a) e em corte (b)

Molde DIVA 38

Para fazer a análise microestrutural do molde DIVA 38 foram utilizadas as cabeças dos provetes sujeitos aos ensaios de tração, tendo sido montados em resina termoendurecível para possibilitar a preparação metalográfica.

3.2.3.4. Ensaaios de dureza

Os ensaios de dureza foram efetuados no durómetro Otto Wolpert-Werke Dia Testor 2 Rc, do Laboratório de Ensaios Tecnológicos do DEMec, segundo a escala Vickers, utilizando uma carga com 40 kgf. Foram realizados três ensaios em cada amostra e feita a respetiva média simples.

3.2.3.5. Tratamentos térmicos

Para a realização dos tratamentos térmicos foram utilizados diferentes fornos. A denominação dada neste trabalho a cada um deles, bem como as informações acerca da sua forma de aquecimento, fabricante e localização encontram-se na tabela 7.

Tabela 7 – Fornos utilizados para os tratamentos térmicos com respetiva forma de aquecimento, fabricante e localização

Forno	Forma de aquecimento	Fabricante	Localização
1	Radiação	TermoLab	DEMec
2	Convecção forçada	Friportus	INEGI
3	Convecção forçada	M. J. Amaral	INEGI
4	Radiação	Calamari	INEGI

O forno 1 foi utilizado para os primeiros tratamentos térmicos, tanto para a solubilização como para o envelhecimento. O controlo da temperatura foi feito apenas através da indicação dada pelo controlador e as amostras e provetes sujeitas ao tratamento acompanharam o aquecimento e arrefecimento do forno.

Nos tratamentos posteriores foram utilizados os fornos 2 e 3, para as solubilizações e envelhecimentos, respetivamente. Estes fornos foram instrumentados, tendo sido colocados três termopares tipo K em cada um deles, de forma a garantir a correta medição da temperatura no seu interior. Nestes tratamentos, os materiais só foram colocados no interior dos fornos após as temperaturas de estágio serem atingidas, com o arrefecimento após o envelhecimento a ser feito em contacto com o meio ambiente.

O forno 4 foi utilizado para obter a curva de solidificação da liga, de forma a identificar a temperatura ideal para a solubilização, tendo sido feita a fusão de uma secção do molde META 35,5 num cadinho e, através da aquisição de dados durante o posterior arrefecimento, foi construída a curva.

Todas as amostras e provetes que, durante um tratamento térmico, foram solubilizados e não puderam ser envelhecidos imediatamente foram armazenados em arcas congeladoras, de forma a evitar o seu envelhecimento natural.

Molde META 35,5

Os tratamentos térmicos efetuados a materiais extraídos do molde META 35,5 tiveram como objetivo, numa primeira fase, verificar se estes provocavam um aumento significativo nas propriedades mecânicas dos materiais. Assim, foi realizado um tratamento térmico experimental a uma amostra e, dado os seus efeitos positivos, posteriormente a três provetes.

Tendo em conta os resultados obtidos, tentou-se otimizar o tratamento, fazendo variar os seus parâmetros. Para isso foram utilizadas as amostras retiradas das regiões superior e inferior do molde, representadas a vermelho na figura 35 (página 45).

Molde DIVA 38

Os resultados dos tratamentos térmicos efetuados ao molde META 35,5 foram aplicados no estudo do molde META 38, pelo que neste molde apenas foram extraídos provetes para ensaios de tração, tendo-lhes sido aplicado o tratamento que resultou num maior aumento de dureza das amostras extraídas do primeiro molde.

Dado que se tratava de uma quantidade elevada de provetes e que era necessário garantir que, na têmpra, estes entravam na água na vertical, de forma a não empenarem, e o mais rapidamente possível, foi feita a montagem representada na figura 36.

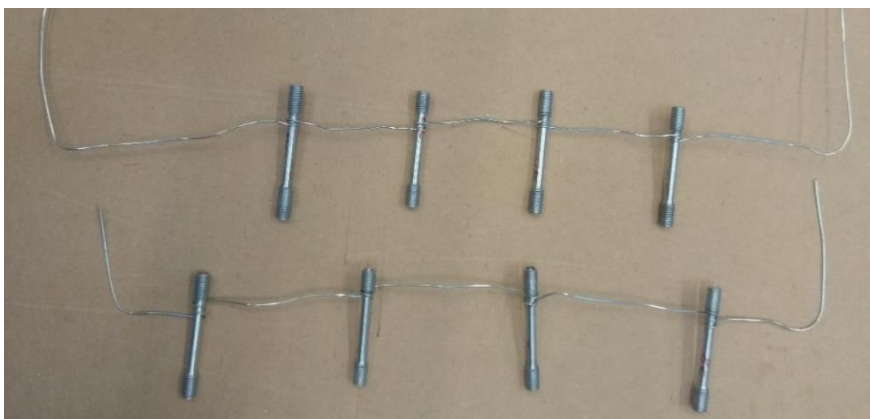


Figura 36 – Montagem feita para facilitar a colocação dos provetes na água rapidamente e na vertical, para evitar o seu empeno

3.2.3.6. Ensaios de tração

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Tecnológicos do DEMec, numa máquina servohidráulica MTS com uma célula de carga de 100 kN, com um avanço de 1,5 mm/min, utilizando um extensómetro MTS com comprimento inicial de 25 mm. Os provetes extraídos dos moldes (figura 37)

foram obtidos por maquinagem de blocos cortados em serra de fita nas oficinas do DEMec e seguem a norma ISO 6892-1 2012. O seu desenho técnico encontra-se no anexo A.



Figura 37 – Provetes utilizados nos ensaios de tração, que seguem a norma ISO 6892-1 2012

Molde META 35,5

Os provetes extraídos do molde META 35,5 foram retirados da zona central do molde (a azul na figura 35, página 45), no entanto não há registo acerca da localização de cada um deles a nível de comprimento ou de profundidade do molde. Foram extraídos cinco provetes, sendo que dois deles foram tracionados no estado bruto de vazamento, enquanto que os restantes três foram sujeitos a um tratamento térmico T6.

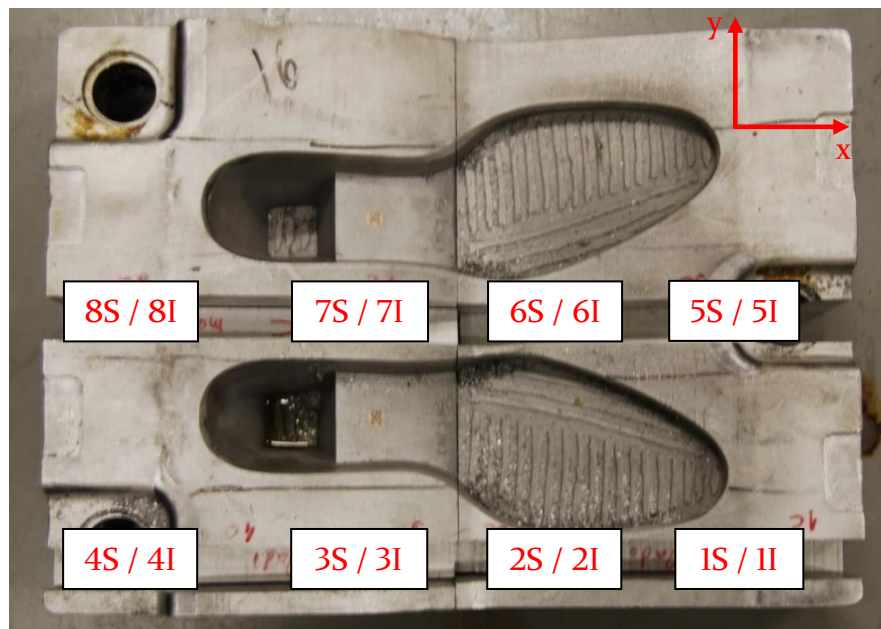
Molde DIVA 38

Na figura 38 encontram-se assinaladas as regiões do molde DIVA 38 de onde foram retirados os provetes, tanto numa planta do molde (figura 38 a)) como numa vista frontal (figura 38 b)). As regiões foram escolhidas de forma a tentar obter uma caracterização o mais completa possível do molde, dentro da disponibilidade de recursos. Para isso, visto que este é simétrico em relação ao eixo XX da figura 38, assumiu-se que os resultados seriam semelhantes em ambos os lados deste eixo, pelo que apenas se considerou metade do molde. De forma idêntica, como o molde é aproximadamente simétrico em relação ao eixo YY da figura 38, considerou-se também que os resultados seriam semelhantes independentemente do lado do eixo de que fossem extraídos os provetes. Assim, analisando apenas um quarto do molde é possível obter uma caracterização adequada da totalidade do mesmo. Foram ainda extraídos provetes de outro quarto do molde com o objetivo de tratar termicamente, e assim ser possível fazer uma comparação entre as propriedades mecânicas de todas as regiões do molde tanto no estado bruto de vazamento como sujeitas a um tratamento térmico T6.

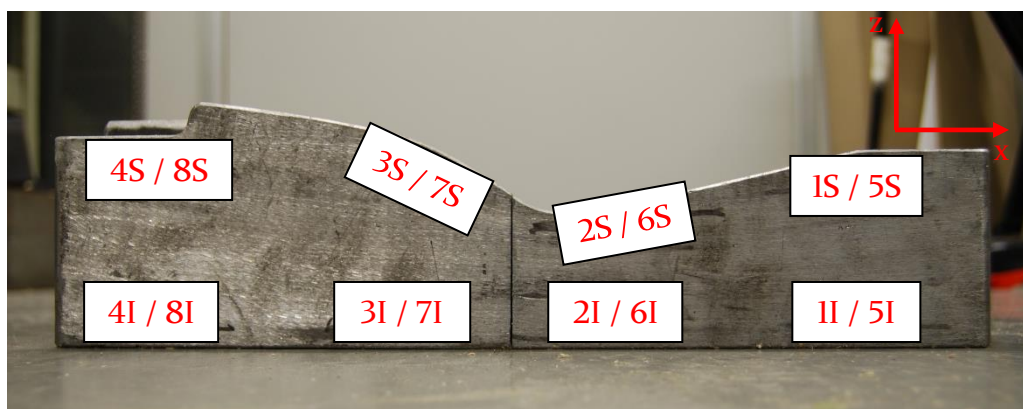
A designação dada aos provetes tem dois componentes:

- Um algarismo, que pode variar entre 1 e 8, indicando a posição no plano XY;
- Uma letra, indicando a posição no eixo ZZ; esta pode ser I, referindo-se assim à parte inferior da base do molde, ou S, caso essa região esteja na sua parte superior.

Desta forma, foram retirados de 16 provetes do molde, oito para ensaiar no estado bruto de vazamento (1I, 1S, 2I, 2S, 5I, 5S, 6I e 6S) e os restantes para ensaiar após sujeitos a um tratamento térmico (3I, 3S, 4I, 4S, 7I, 7S, 8I e 8S). A sua correspondência é indicada na tabela 8.



a)



b)

Figura 38 – Planta (a) e vista frontal (b) do molde META 38 com indicação das regiões de onde foram retirados os provetes para os ensaios de tração

Tabela 8 – Correspondência entre provetes no estado bruto de vazamento e tratados termicamente

Proвете no estado bruto de vazamento	1I	1S	2I	2S	5I	5S	6I	6S
Proвете em zona correspondente tratado termicamente	4I	4S	3I	3S	8I	8S	7I	7S

3.2.3.7. Simulações computacionais

A simulação do processo requereu a modelação CAD dos moldes META 35,5 e DIVA 38. Começou-se por desenhar as solas no *software* CAD SolidWorks, da Dassault Systèmes, tendo para isso sido utilizados modelos das suas superfícies, disponibilizados pela Virtual Ronda, a partir das quais foram modeladas as tampas e as bases dos moldes, apesar das primeiras não terem sido necessárias no modelo escolhido.

A Virtual Ronda apenas modela os tamanhos 38 e 42 das solas, pelo que foram utilizados os tamanhos 38 de ambas, apesar de a sola META corresponder ao tamanho 35,5. Como para a simulação do processo de moldação por compressão a área projetada da cavidade do molde é relevante, foi feita a digitalização tridimensional desta sola, de forma a obter a área referida, utilizando o equipamento de digitalização Eva Artec 3D. No entanto, para as dimensões exteriores do molde, que podem variar de tamanho para tamanho, foram utilizadas as do molde em estudo, o META 35,5. Para o molde DIVA 38 não existiu esta necessidade, visto que o modelo disponibilizado correspondeu ao tamanho do molde em estudo.

Para simular o processo de moldação por compressão utilizou-se o Abaqus FEA, igualmente da Dassault Systèmes. Dada a simetria dos moldes, os modelos utilizados apenas consideram metade destes, tendo sido utilizada uma condição de simetria no Abaqus. Esta situação permitiu diminuir o esforço computacional, sem alterar a precisão do modelo. O modelo utilizado para simular o processo consistiu em considerar uma pressão hidrostática na cavidade dos moldes.

Para definir os materiais que constituíam os moldes foi feita uma divisão de cada meio molde em secções, tendo sido atribuída a cada uma delas a curva tensão-deformação obtida para essa zona através dos ensaios de tração efetuados aos provetes extraídos do molde DIVA 38 no estado bruto de vazamento, uma vez que este foi o único molde totalmente caracterizado através de ensaios de tração, obtendo-se então um modelo elasto-plástico. Como foram realizados ensaios a provetes extraídos de 8 regiões diferentes do molde, considerando a sua simetria foi possível dividir o meio molde em 16 regiões.

As malhas foram definidas de forma a serem bastante refinadas nas zonas das cavidades, mas mais grosseiras nas zonas mais distantes, visto que, como as regiões mais solicitadas seriam, em princípio, as da cavidade, não se justificaria utilizar

elementos tão pequenos noutras zonas, pois iria aumentar consideravelmente o esforço computacional. As malhas utilizadas podem ser consultadas no anexo B.

3.3. Molde META 35,5

3.3.1. Composição química

Os resultados obtidos na análise da composição química de uma amostra extraída do molde META 35,5 encontram-se na tabela 9.

É possível identificar que se trata de uma liga de alumínio com silício como principal elemento de liga, contendo também percentagens bastante significativas de cobre e zinco. Assemelha-se assim ao grupo de ligas de alumínio da série 3000, segundo a designação da Aluminum Association, que engloba as ligas de alumínio-silício não binárias, com quantidades consideráveis de cobre ou magnésio, embora a liga em questão possua uma percentagem de zinco anormalmente elevada para esta série.

Tabela 9 – Composição química da liga de alumínio que constitui o molde META 35,5

Elemento	Composição [% massa]
Alumínio	87,40
Silício	5,35
Cobre	2,75
Zinco	2,47
Ferro	0,887
Magnésio	0,553
Manganês	0,231
Chumbo	0,157
Níquel	0,0643
Titânio	0,0421
Crómio	0,038
Estanho	0,0297
Vanádio	0,0062
Zircónio	0,0032
Berílio	0,0011
Estrôncio	<0,0001

Segundo o fabricante deste molde, a Virtual Ronda, a composição química da liga de alumínio que constitui os moldes é a indicada na tabela 10. Indica-se também a composição obtida para uma melhor comparação.

Verifica-se que, à exceção do magnésio, todas as percentagens obtidas no ensaio realizado no espectómetro se encontram dentro dos limites indicados pelo fornecedor, e que, mesmo para este componente, o desvio é pouco significativo. Desta forma, pode considerar-se que o material utilizado cumpre os requisitos.

Tabela 10 – Composição química da liga que constitui os moldes indicada pelo fornecedor e obtida para o molde META 35,5

Elemento	Indicada pelo fornecedor		Obtida
	Quantidade mínima [% massa]	Quantidade máxima [% massa]	Composição [% massa]
Silício	5	8	5,35
Cobre	2	4	2,75
Zinco	0	3	2,47
Ferro	0	1,1	0,887
Manganês	0	0,55	0,231
Magnésio	0,05	0,55	0,553
Chumbo	0	0,35	0,157
Crómio	0	0,15	0,038
Níquel	0	0,55	0,0643
Titânio	0	0,25	0,0421
Estanho	0	0,25	0,0297
Alumínio	Restante		87,40
Outros	-		0,0486

Analisando as ligas de alumínio tabeladas, aquela cuja composição química mais se assemelha à composição obtida é a liga 319.0, estando esta indicada na tabela II. É novamente indicada a composição obtida para facilitar a comparação.

Verifica-se que, apesar de as quantidades de silício e de cobre se encontrarem ligeiramente abaixo das indicadas, as maiores diferenças estão no zinco e no magnésio, que se encontram em quantidades superiores às indicadas para esta liga. Tal como foi abordado na secção 2.2.2.1 - Efeito dos elementos de liga – tanto a presença de zinco como de magnésio têm efeitos benéficos na reação das ligas a tratamentos térmicos.

Como a liga utilizada na produção dos moldes tem uma composição química semelhante a uma liga conhecida, é possível comparar as propriedades mecânicas obtidas experimentalmente com as propriedades tabeladas, bem como identificar eventuais tratamentos térmicos recomendados como ponto de partida para o seu estudo.

Tabela II – Composição química da liga 319.0, a liga com a composição química semelhante à amostra analisada, e da liga de alumínio que constitui o molde META 35,5 [16]

Elemento	Liga 319.0		META 35,5
	Quantidade mínima [% massa]	Quantidade máxima [% massa]	Quantidade obtida [% massa]
Alumínio	85,8	91,5	87,40
Silício	5,5	6,5	5,35
Cobre	3	4	2,75
Ferro	0	1	0,887
Magnésio	0	0,1	0,553
Manganês	0	0,5	0,231
Zinco	0	1	2,47
Níquel	0	0,35	0,0643
Titânio	0	0,25	0,0421
Outros	0	0,5	0,2353

3.3.2. Ensaio dilatométrico

De forma a obter o coeficiente de expansão térmica linear do material, foi realizado um ensaio dilatométrico. As dimensões aproximadas da amostra utilizada no ensaio eram 34 x 7 x 5 mm.

O ciclo térmico utilizado foi um aquecimento durante 5 horas até 500 °C, seguido de arrefecimento até 20 °C, também durante 5 horas.

Na figura 39 encontra-se o gráfico obtido para a fase de aquecimento, que traduz a dilatação da amostra em função da temperatura. Os dados seguem uma tendência linear, pelo que no gráfico é representada a reta de tendência que melhor se ajusta ao conjunto de pontos e a sua respetiva equação.

De forma a obter o coeficiente de expansão térmica linear, α , através da equação da reta de tendência, utilizou-se a expressão (2), resultando assim $\alpha = 17,08 \mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$.

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (2)$$

Com:

- $L = 34 \times 10^{-3} \text{ m}$
- $\frac{dL}{dT} = 0,5807 \mu\text{m} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

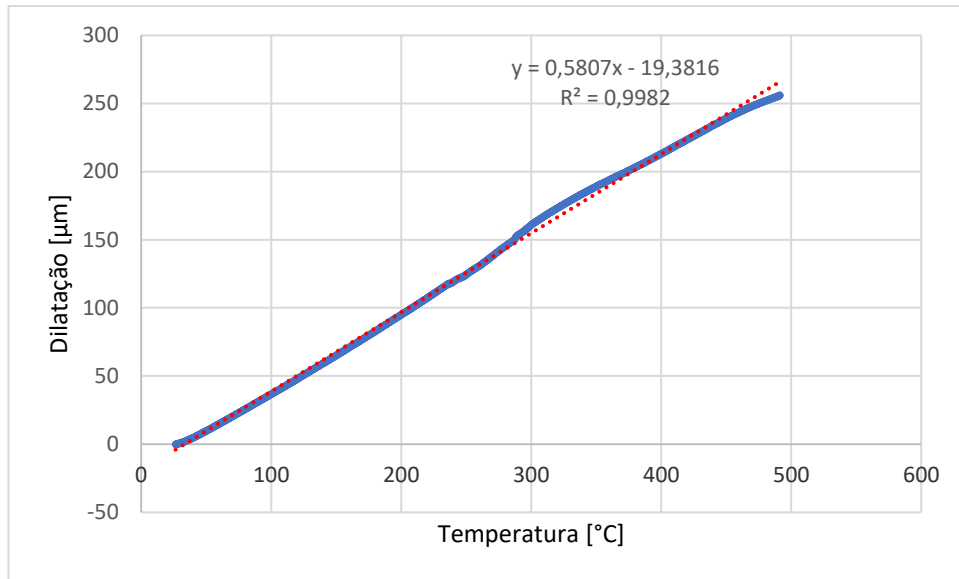


Figura 39 – Dilatação de uma amostra retirada do molde META 35,5 em função da temperatura, obtida através de um ensaio dilatométrico

3.3.3. Análise microestrutural e de dureza

Para uma primeira análise microestrutural e de dureza foram retirada duas amostras de uma parte fraturada do molde (figura 29, página 39). Os resultados da medição das suas durezas encontram-se na tabela 12.

Na figura 40 encontra-se a microesturuta da amostra 1, onde se observa uma quantidade considerável de defeitos, sobretudo microrechupes, ocupando 1,99 % da área total.

Tabela 12 – Durezas medidas nas amostras de uma parte fraturada do molde META 35,5

Amostra	1	2
Dureza [HV]	101/102/103	86/87/91
Dureza média [HV]	102	88

As diferenças bastante significativas nas durezas destas duas amostras revelaram uma heterogeneidade entre regiões dos moldes. De forma a estudar essa situação, extraíram-se amostras da região indicada a vermelho na figura 35 (página 45), tendo em atenção se estas se localizavam na zona inferior ou superior do molde, para avaliar as suas diferenças a nível microestrutural e de dureza.

Na figura 41 a) encontra-se a microestrutura de uma amostra retirada da zona inferior da base do molde. Verifica-se que o tamanho de grão é bastante menor que o da primeira amostra analisada, com defeitos também menores.

A microestrutura de uma amostra retirada da parte superior da base do molde (figura 41 b)) mostra que nesta região existe o maior grão até agora verificado,

bastante superior ao da amostra da parte inferior da base do molde, com microrechupes de dimensões elevadas.

As durezas e áreas de defeitos das duas amostras analisadas encontram-se na tabela 13.

Verifica-se que existem diferenças extremamente relevantes nos tamanhos de grão, durezas e áreas de defeitos das amostras analisadas, conforme a região de onde foram extraídas, confirmando as suspeitas de heterogeneidades nos moldes.

Tabela 13 – Durezas medidas nas amostras recolhidas das zonas inferiores e superiores da região central do molde META 35,5 e suas áreas de defeitos

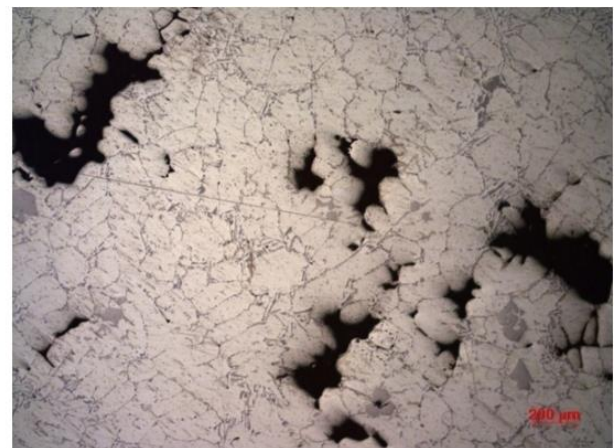
Amostra	Zona inferior	Zona superior
Dureza [HV]	87/89/91	107/110/110
Dureza média [HV]	89	109
Área de defeitos [%]	1,17	7,52



Figura 40 – Microestrutura da amostra retirada de uma das partes que se separou do molde META 35, onde se observam defeitos ocupando 1,99 % da área total



a)



b)

Figura 41 – Microestrutura da amostra extraída da parte inferior do molde (a), com 1,17 % da área com defeitos, e da amostra da parte superior do molde (b), com 7,52 % da área com defeitos

3.3.4. Tratamentos térmicos

De forma a estudar uma possível melhoria das propriedades mecânicas dos materiais após o fabrico do molde, analisou-se, numa primeira fase, o efeito que os tratamentos térmicos teriam na dureza dos materiais, pois os ensaios de dureza são simples de realizar e os seus resultados são, à partida, um bom indicador do efeito do tratamento térmico nas restantes propriedades mecânicas, nomeadamente na tensão limite de elasticidade e na tensão de rotura.

Numa primeira abordagem procedeu-se ao tratamento térmico da amostra 2, que, como foi referido, tinha uma dureza média de 88 HV no estado bruto de vazamento (tabela 12, página 54).

O tratamento escolhido foi o T6, visto que, dos tratamentos térmicos recomendados para a liga 319.0, é aquele que apresenta maior aumento de propriedades mecânicas [38].

Segundo a Affimet [64], os parâmetros do tratamento térmico T6 mais indicados para a liga 319.0 encontram-se na tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros mais indicados para o tratamento térmico T6 da liga 319.0, segundo a Affimet [49]

Solubilização	Temperatura	510 °C
	Duração	5 h
Envelhecimento	Temperatura	170 °C
	Duração	10 h

A figura 42 mostra o ciclo térmico do tratamento térmico efetuado, utilizando o forno I. Por precaução, e numa primeira fase, escolheu-se 490 °C como temperatura de solubilização, 20 °C abaixo da indicada, mantendo-se a sua duração.

De seguida procedeu-se ao envelhecimento. Como este tratamento seria um tratamento experimental, efetuado apenas com o objetivo de perceber os efeitos que um tratamento térmico teria no material, optou-se por reduzir o tempo de envelhecimento de 10 horas para 6 horas, mas compensando essa diminuição através da utilização de uma temperatura de 180 °C, 10 °C superior à indicada.

Os valores de dureza medidos em cada fase encontram-se na tabela 15. Verificou-se que o tratamento térmico T6 provocou um aumento de 46 HV na dureza relativamente ao estado bruto, correspondente a um crescimento de 52 %. Tendo em conta este facto, decidiu-se otimizar os parâmetros do tratamento. Para isso, começou-se por construir a curva de solidificação do material, como será explicado na secção seguinte, com o objetivo de encontrar a temperatura de solubilização ótima. De seguida, o estudo incidiu na etapa do envelhecimento.

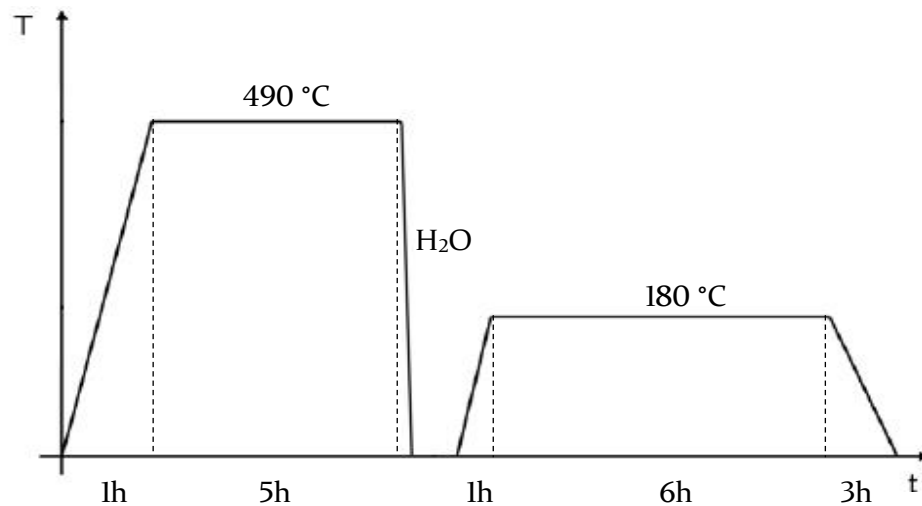


Figura 42 – Ciclo térmico do tratamento térmico experimental a uma amostra extraída do molde META 35,5: solubilização a 490 °C durante 5 horas e envelhecimento a 180 °C durante 6 horas

Tabela 15 – Durezas medidas nas várias fases do tratamento térmico experimental

Amostra	Dureza [HV]	Dureza média [HV]
Estado bruto	86/87/91	88
Solubilizada	74/75/77	75
Envelhecida	133/133/137	134

3.3.4.1. Curva de solidificação

Caso se atingisse, durante o tratamento térmico, uma temperatura que originasse a fusão de uma fase, iriam surgir vazios na estrutura, pois as restantes fases ainda se encontrariam no estado sólido. Como se dá uma expansão de todo o material com o aumento da temperatura, estas vazios seriam maiores do que o tamanho das fases à temperatura ambiente. Desta forma, quando essa fase voltasse a solidificar durante a têmpera, parte dos vazios iria manter-se, originando defeitos internos, num fenómeno conhecido como *burning*. Assim, como a curva de solidificação indica as temperaturas de mudança de fase, é útil para aferir qual a temperatura ótima para fazer a solubilização, primeira etapa do tratamento térmico, devendo esta ser inferior à temperatura a que se dá a fusão da primeira fase.

Na figura 43 encontra-se a parte fraturada do molde META 35,5 que foi fundida e posteriormente arrefecida de forma a obter a curva de arrefecimento da figura 44. Os patamares desta curva representam a fusão ou solidificação de uma fase. Verifica-se que a primeira mudança de fase, no aquecimento, acontece a cerca de 490 °C, pelo que esta temperatura não deverá ser atingida durante o tratamento. Idealmente, a solubilização deve ser feita a temperaturas próximas desta, pois potencia a obtenção dos melhores resultados. No entanto, com o objetivo de

garantir que não haveria qualquer risco de fusão de fases, optou-se por deixar uma margem de segurança de 20 °C, definindo-se então os 470 °C como temperatura de solubilização.

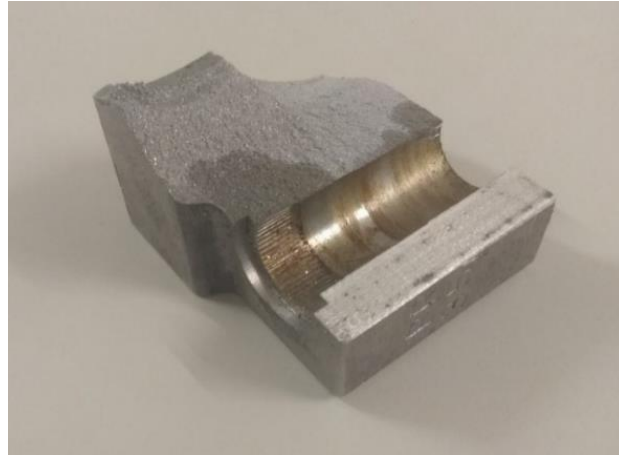


Figura 43 – Parte do molde META 35,5 utilizada para obter a curva de arrefecimento do material

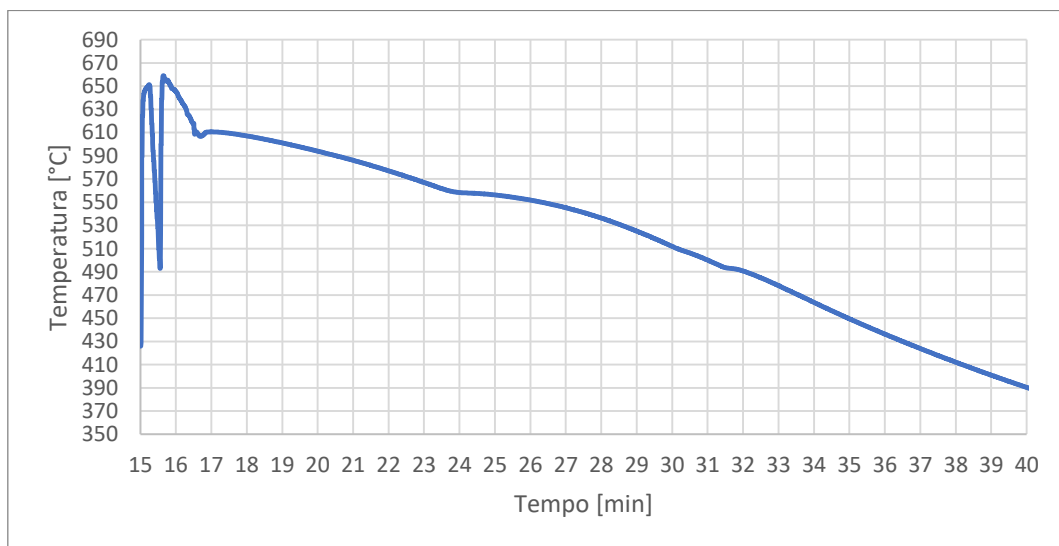


Figura 44 – Curva de arrefecimento do material do molde META 35,5, indicando que a primeira mudança de fase ocorre a 490 °C

3.3.4.2. Envelhecimento a 185 °C

Para o envelhecimento a 185 °C foram utilizadas as amostras da zona inferior central da base do molde (a vermelho na figura 35, página 45). Tal como foi referido, a dureza inicial das amostras desta zona era de 109 HV (tabela 13, página 55).

Para a solubilização foram aplicadas as conclusões obtidas através da curva de solidificação, tendo-se considerado que 6 horas seria uma duração mais adequada para esta etapa [39]. Na tabela 16 indicam-se os parâmetros utilizados neste tratamento.

Tabela 16 – Parâmetros do tratamento térmico com envelhecimento a 185 °C

Solubilização	Forno	2
	Temperatura	470 °C
	Duração	6 h
Envelhecimento	Forno	3
	Temperatura	185 °C
	Duração total	12 h
	Nº amostras	9
	Duração intervalos	1 h 20 min

Na tabela 17 encontram-se os resultados das medições das durezas para as várias durações do envelhecimento. Na figura 45 pode consultar-se a mesma informação sob a forma de gráfico, a chamada curva de envelhecimento.

Os resultados obtidos indicam que o envelhecimento a 185 °C apresenta um pico de dureza para 8 horas de tratamento. A dureza obtida corresponde a um aumento de 23 HV face à dureza no estado bruto de vazamento, o que significa um crescimento de 21 %.

Tabela 17 – Variação da dureza de amostras extraídas do molde META 35,5 com o tempo de envelhecimento a 185 °C, indicando que o pico de endurecimento se dá para 8 horas de estágio

Tempo [h]	Dureza [HV]	Dureza média [HV]
0 (estado bruto)	107/110/110	109
0 (solubilizada)	75/76/78	76
1,33	117/123/123	122
2,67	120/125/125	123
4	122/124/125	124
5,33	122/124/125	124
6,67	127/127/127	127
8	130/131/134	132
9,33	127/130/131	129
10,67	125/128/130	128
12	124/124/124	124

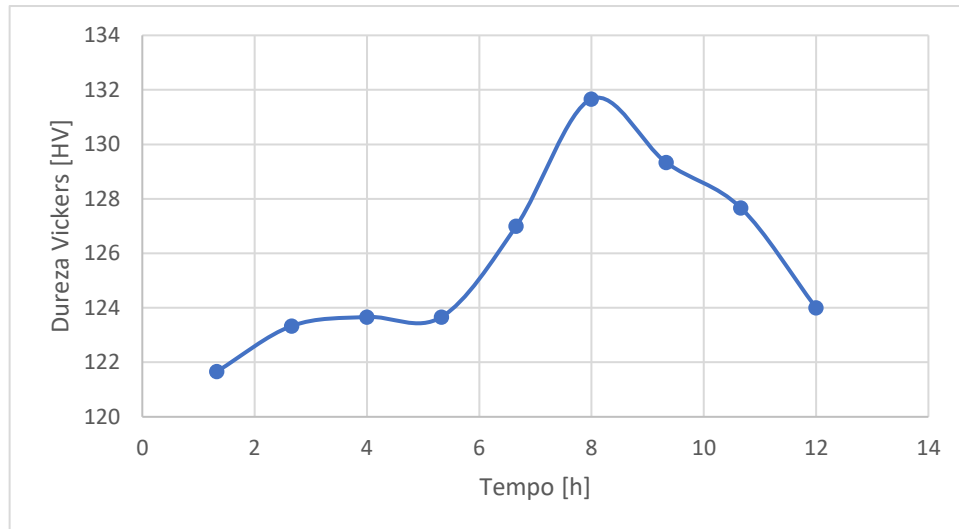


Figura 45 – Curva de envelhecimento de 12h a 185 °C, que indica que o pico de endurecimento se dá para 8 horas de estágio

3.3.4.3. Envelhecimento a 175 °C

O envelhecimento a 175 °C foi feito ao conjunto de amostras retiradas da zona superior central do molde (assinalada a vermelho na figura 35, página 45), onde a dureza média no estado bruto era de 89 HV, como foi referido previamente (tabela 13, página 55).

Na tabela 18 indicam-se os parâmetros deste tratamento.

Tabela 18 – Parâmetros do tratamento térmico com envelhecimento a 175 °C

Solubilização	Forno	2
	Temperatura	470 °C
	Duração	6 h
Envelhecimento	Forno	3
	Temperatura	175 °C
	Duração total	12 h
	Nº amostras	6
	Duração intervalos	2 h

Os valores das durezas das amostras em função do tempo de envelhecimento encontram-se na tabela 19, sendo que na figura 46 está representada a respetiva curva de envelhecimento.

Para este tratamento verificou-se um endurecimento máximo de 122 HV, após 6 horas a 175 °C, o que significa um aumento de 33 HV relativamente à dureza do material no estado bruto de vazamento, o que corresponde a um crescimento de 37 %.

Tabela 19 – Variação da dureza de amostras extraídas do molde META 35,5 com o tempo de envelhecimento a 175 °C, indicando que o pico de endurecimento se dá para 6 horas de estágio

Tempo [h]	Dureza [HV]	Dureza média [HV]
0 (estado bruto)	87/89/91	89
0 (temperada)	65/70/70	68
2	103/106/107	105
4	108/110/113	110
6	120/122/123	122
8	105/110/119	111
10	106/106/106	106
12	102/106/18	105

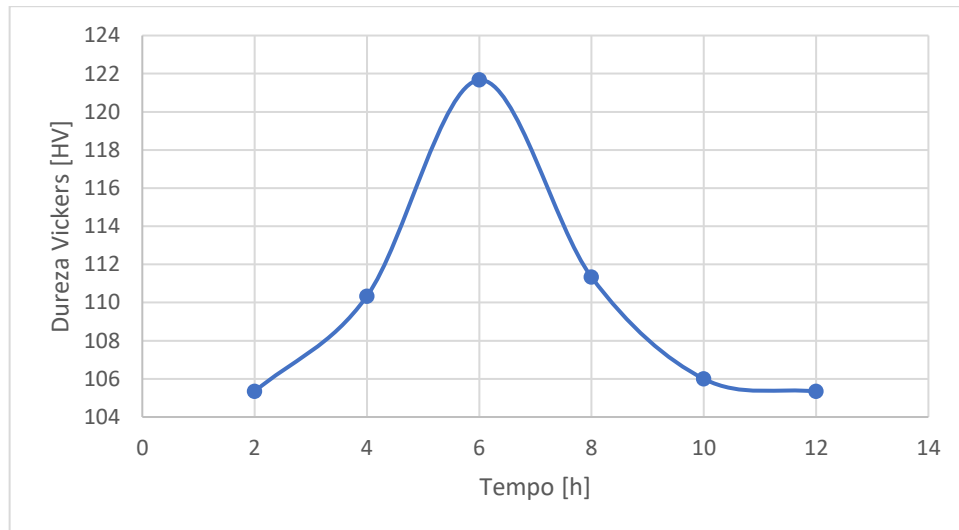


Figura 46 – Curva de envelhecimento de 12h a 175 °C, que indica que o pico de endurecimento se dá para 6 horas de tempo de estágio

Todos os tratamentos térmicos realizados apresentaram aumentos significativos na dureza dos materiais, relativamente às durezas no estado bruto de vazamento. O tratamento experimental revelou-se como sendo o mais eficaz, com um aumento de dureza de 52 %, enquanto que o segundo e o terceiro se ficaram por aumentos de 21 % e 37 %, respetivamente.

Os aumentos na dureza, por si só, são pouco relevantes no que diz respeito ao melhoramento da resistência mecânica dos moldes. No entanto, abriram boas perspectivas relativamente a possíveis aumentos em propriedades como a tensão limite de elasticidade e a tensão de rotura, o que incentivou à sua aplicação em provetes para ensaios de tração.

3.3.5. Ensaio de tração

Foram efetuados ensaios de tração para avaliar a tensão de rotura, a tensão limite de elasticidade, o módulo de elasticidade e a extensão após rotura dos materiais do molde, tanto no estado bruto de vazamento (provetes 1 e 2) como após um tratamento térmico T6 (provetes 3, 4 e 5). Estes provetes foram extraídos da zona assinalada a azul na figura 35, página 45, no entanto não há registo acerca da sua localização a nível de cota e comprimento do molde.

Os parâmetros selecionados foram os do tratamento térmico experimental, estando estes indicados na tabela 20, visto que os provetes foram tratados termicamente antes de ter sido obtida a curva de solidificação e terem sido feitos os estudos para a otimização dos parâmetros. Tendo em conta que o tratamento em questão tinha provocado um aumento significativo da dureza, considerou-se adequado para verificar os efeitos dos tratamentos térmicos nas restantes propriedades mecânicas.

Tabela 20 – Parâmetros do tratamento térmico utilizado para os provetes extraídos do molde META 35,5

Solubilização	Forno	1
	Temperatura	490 °C
	Duração	5 h
Envelhecimento	Forno	1
	Temperatura	180 °C
	Duração	6 h

Na tabela 21 encontram-se as propriedades obtidas a partir das curvas de tensão-deformação resultantes dos ensaios de tração. Estas curvas podem ser consultadas no anexo C.

As propriedades mecânicas dos provetes no estado bruto de vazamento foram muito semelhantes, à exceção da extensão após rotura. No que diz respeito aos provetes sujeitos ao tratamento térmico, verificou-se uma maior variação nas propriedades mecânicas entre provetes, com diferenças de cerca de 16 GPa no módulo de Young e de aproximadamente 14 MPa nas tensões limite de elasticidade e de rotura. Nestes provetes, a extensão após rotura nunca atingiu os 0,20 %, razão pela qual a tensão limite de elasticidade coincide com a tensão de rotura.

As maiores variações nas propriedades dos provetes tratados termicamente relativamente aos restantes podem dever-se ao facto de terem sido ensaiados três, enquanto que no estado bruto de vazamento foram apenas ensaiados dois, ou por eventualmente terem sido extraídos de zonas mais distantes.

Verifica-se que a tensão limite de elasticidade aumentou, em média, cerca de 115 MPa nos provetes tratados termicamente, aproximadamente 69 %, enquanto

que para a tensão de rotura esse aumento foi de cerca de 108 MPa, para um valor 62 % mais elevado que no estado bruto de vazamento. Conclui-se assim que os tratamentos térmicos tiveram um efeito muito positivo no aumento da resistência mecânica.

Tabela 21 – Propriedades obtidas através de ensaios de tração a provetes retirados do molde META 35,5 no estado bruto de vazamento e tratados termicamente

Propriedade mecânica	Estado bruto		Tratados termicamente		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
Tensão limite elast. [MPa]	166,00	167,50	275,00	281,29	288,81
Tensão de rotura [MPa]	173,39	174,77	275,00	281,29	288,81
Extensão após rotura [%]	0,27	0,42	0,14	0,18	0,18
Módulo de Young [GPa]	71,40	71,48	80,77	74,60	74,32

Tendo em conta o estudo feito ao molde META 35,5, foi também analisado outro molde, o DIVA 38, em que não ocorreram fraturas, de forma a compreender as suas diferenças e limitações, com o objetivo de identificar as causas das fraturas.

Como ambos os moldes foram fabricados na mesma serralharia e o seu processo de fabrico e materiais utilizados foram, teoricamente, os mesmos, utilizaram-se alguns resultados obtidos no estudo do molde META 35,5 para o estudo do molde DIVA 38, de forma a fazer uma análise mais completa e também para otimizar recursos:

- Não foi analisada a composição química deste molde, tendo sido assumido que seria semelhante à do primeiro;
- Como o META 35,5 apresentava diferenças bastante significativas na microestrutura e propriedades mecânicas entre as suas várias regiões, foram tidas em atenção todas as zonas de onde foram retiradas amostras e provetes para ensaios de tração;
- Assumiu-se que os parâmetros dos tratamentos térmicos que apresentaram melhores resultados anteriormente também seriam os mais indicados neste caso.

3.4. Molde DIVA 38

3.4.1. Ensaios de tração

Como no estudo do primeiro molde se verificou que existia uma grande heterogeneidade entre as suas diferentes regiões, tanto a nível microestrutural como de propriedades mecânicas, neste estudo foi tida em conta a região exata de onde foram retirados os provetes (figura 38, página 49), tendo como objetivo fazer uma caracterização mais completa ao nível das principais propriedades mecânicas. Os ensaios de tração foram feitos tanto no estado bruto de vazamento como após tratamento térmico.

3.4.1.1. Provetes no estado bruto de vazamento

Os resultados obtidos nos ensaios de tração aos provetes no estado bruto de vazamento encontram-se na tabela 22. As curvas tensão-deformação destes ensaios encontram-se no anexo D.

Tabela 22 – Propriedades mecânicas dos provetes extraídos do molde DIVA 38 no estado bruto de vazamento

Propriedade mecânica	II/IS	2I/2S	5I/5S	6I/6S
Tensão limite de elast. [MPa]	127,50/125,00	129,50/124,50	117,50/125,00	116,50/125,00
Tensão de rotura [MPa]	182,86/163,04	181,18/164,38	178,01/167,41	150,14/145,48
Extensão após rotura [%]	1,05/0,76	0,90/0,75	1,31/0,91	0,77/0,48
Módulo de Young [GPa]	71,74/78,43	68,35/80,55	75,48/88,92	61,09/70,83

Verifica-se que para os provetes extraídos das regiões inferiores da base do molde existe uma variação bastante significativa na tensão de rotura entre a zona mais próxima do vazamento (6I) e as restantes zonas, com a primeira a registar tensões cerca de 20 MPa inferiores. Quanto à tensão limite de elasticidade, também existe uma diferença relevante entre toda a região central do molde (5I e 6I) e as restantes (cerca de 10 MPa). Já o módulo de Young e a extensão após rotura variam numa gama bastante alargada, com diferenças elevadas entre todos os provetes, também com a região 6I a apresentar os valores mais reduzidos.

As propriedades mecânicas variam de forma semelhante na parte superior do molde, com a região 6S a apresentar uma tensão de rotura mais baixa, embora as tensões limite de elasticidade sejam idênticas. O módulo de Young e a extensão após rotura variam de maneira semelhante à registada nas regiões inferiores.

Verifica-se ainda que as regiões inferiores apresentam tensões de rotura significativamente mais elevadas que as regiões superiores, com diferenças que atingem cerca de 15 MPa nas zonas 1 e 2, embora este comportamento não seja

idêntico para a tensão limite de elasticidade. Já os módulos de Young são mais elevados nas regiões superiores, que são também bastante menos dúcteis.

3.4.1.2. Provetes tratados termicamente

Os parâmetros utilizados no tratamento térmico dos provetes estão indicados na tabela 23. Como, dos três tratamentos efetuados, aquele que proporcionou um maior aumento de dureza foi o experimental, optou-se por aplicar esses parâmetros para a etapa do envelhecimento. Para a solubilização voltaram a utilizar-se as conclusões obtidas através da curva de solidificação.

Tabela 23 – Parâmetros do tratamento térmico utilizado para os provetes extraídos do molde META 35,5 sujeitos a ensaio de tração

Solubilização	Forno	2
	Temperatura	470 °C
	Duração	6 h
Envelhecimento	Forno	3
	Temperatura	180 °C
	Duração	6 h

Na tabela 24 encontram-se as propriedades mecânicas obtidas a partir das curvas de tensão-deformação resultantes dos ensaios de tração aos oito provetes tratados termicamente. Estas curvas podem ser consultadas no anexo E. O ensaio aos provetes 3I e 4S apenas permitiu identificar a tensão de rotura, uma vez que o extensómetro não se manteve corretamente posicionado durante todo o ensaio; assim, a deformação não foi corretamente medida, situação que inviabilizou a medição das outras propriedades.

Tabela 24 – Propriedades mecânicas dos provetes extraídos das regiões inferiores do molde DIVA 38 sujeitos a tratamento térmico T6

Propriedade mecânica	3I/3S	4I/4S	7I/7S	8I/8S
Tensão limite elast. [MPa]	-/241,74	259,00/-	262,25/226,47	263,00/236,29
Tensão de rotura [MPa]	259,41/241,74	262,04/242,75	262,25/226,47	264,46/236,29
Extensão após rotura [%]	-/0,11	0,23/-	0,20/0,10	0,22/0,14
Módulo de Young [GPa]	-/73,97	72,30/-	76,29/71,71	78,40/66,57

Tal como tinha sucedido aos provetes extraídos do molde META 35,5 tratados termicamente, por vezes a extensão após rotura destes provetes foi inferior a 0,20 %, razão pela qual se considerou a tensão limite de elasticidade como sendo igual à tensão de rotura.

As propriedades mecânicas dos provetes extraídos das regiões inferiores da base do molde revelaram-se bastante semelhantes, após um tratamento térmico T6.

Na parte superior da base do molde verificou-se uma heterogeneidade maior, com a tensão de rotura a ser mais baixa cerca de 16 MPa na zona central do molde (7S) do que na zona mais afastada do vazamento (4S). A tensão limite de elasticidade apresentou uma variação semelhante à tensão de rotura, enquanto que o módulo de Young voltou a ser mais baixo na região central. Já a extensão após rotura demonstrou alguma uniformidade.

Tal como no estado bruto de vazamento, observaram-se tensões de rotura e ductilidades bastante mais elevadas nas zonas inferiores do molde, embora neste caso também se tenha verificado esse comportamento para a tensão limite de elasticidade, o que não aconteceu no estado bruto.

Verificou-se que as tensões limite de elasticidade e as tensões de rotura dos provetes tratados termicamente foram, em média, cerca de 124 MPa e 83 MPa mais elevadas que nos provetes no estado bruto de vazamento, respetivamente. Estes aumentos, que na tensão de rotura correspondem a quase 50 % e na tensão limite de elasticidade são superiores a 100 %, permitem concluir que os tratamentos térmicos podem aumentar consideravelmente a resistência mecânica do molde.

3.4.2. Análise microestrutural e de dureza

Para fazer uma análise às microestruturas das diferentes zonas do molde DIVA 38 foram utilizadas as cabeças dos provetes utilizados nos ensaios de tração, tendo para isso sido montados numa resina termoendurecível a quente. Os provetes selecionados para a análise foram os provetes nas zonas 1 (1I e 1S) e 6 (6I e 6S), uma vez que estes eram os que se localizavam nas regiões mais afastadas e mais próximas da zona onde a liga de alumínio foi vazada, respetivamente. Para além disso, os provetes das zonas 1 apresentaram as melhores propriedades do molde para as regiões superiores e inferiores, enquanto que os provetes das zonas 6 apresentaram as piores, pelo que seria interessante comparar estas regiões. O facto de o estudo do molde META 35,5 ter revelado grandes diferenças microestruturais entre regiões inferiores e superiores também teve peso nesta escolha.

Nas figuras 47 a) e 47 b) encontram-se as microestruturas das regiões 1I e 1S, respetivamente, onde se observam diferenças pouco significativas no tamanho de grão. Também se verificaram diferenças pouco relevantes nas áreas de defeitos, que podem ser consultadas na tabela 25, tal como nas durezas medidas nas amostras.

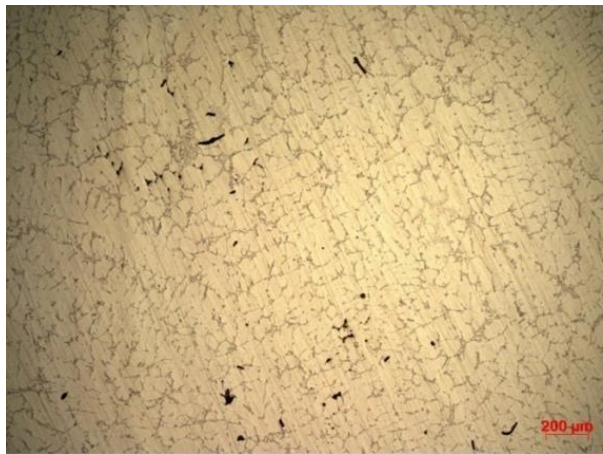
Uma análise às regiões 6I (figura 48 a)) e 6S (figura 48 b)) permitiu identificar maiores áreas de defeitos do que nas zonas analisadas anteriormente (tabela 25), bem como um maior tamanho de grão.

A partir da análise das microestruturas das amostras foi possível concluir que embora existam diferenças significativas no tamanho de grão entre as zonas com maiores e menores resistências mecânicas, estas heterogeneidades são bastante menores do que as observadas no molde DIVA 35,5.

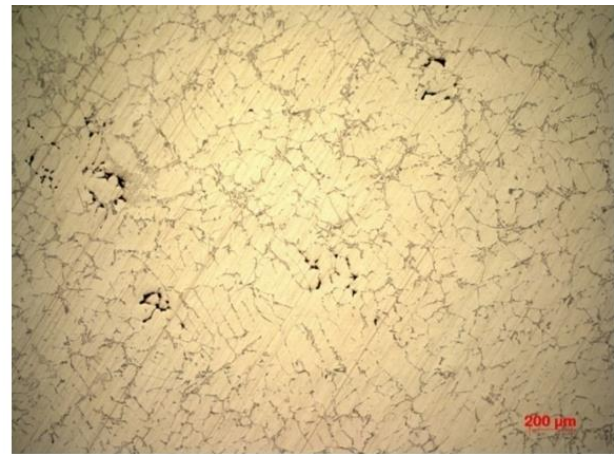
Observou-se ainda que a dureza média diminuiu com o aumento da área de defeitos, tal como já tinha sucedido no molde estudado anteriormente.

Tabela 25 – Áreas de defeitos e durezas das cabeças dos provetes 1I, 1S, 6I e 6S

Amostra	II	IS	6I	6S
Área de defeitos [%]	0,19	0,28	1,07	1,87
Dureza [HV]	93/95/96	89/89/91	79/81/82	77/77/79
Dureza média [HV]	95	90	82	78

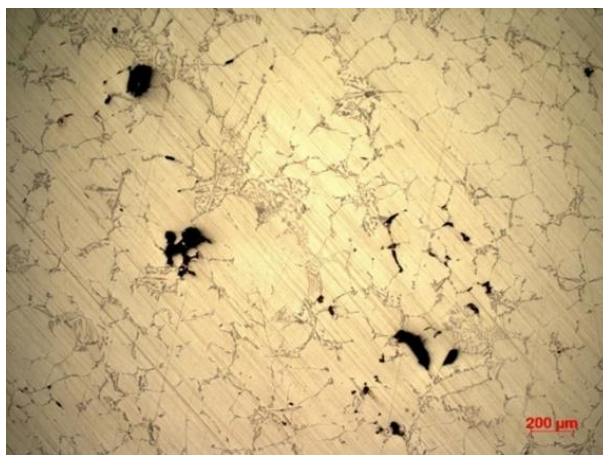


a)

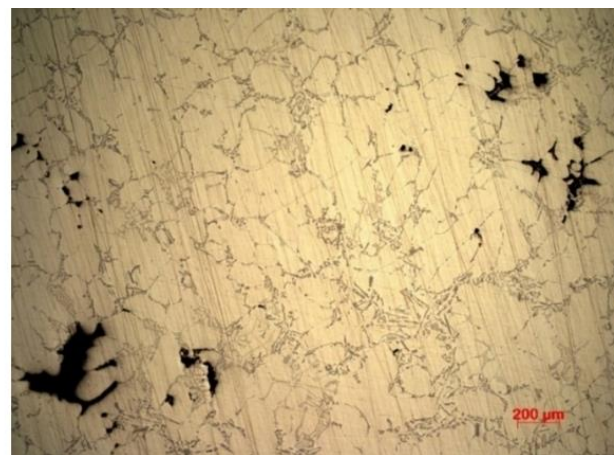


b)

Figura 47 – Microestrutura da região II (a), com 0,19 % da área com defeitos, e da região IS (b), com 0,28 % da área com defeitos



a)



b)

Figura 48 – Microestrutura da região 6I (a), com 1,07 % da área com defeitos, e da região 6S (b), com 1,84 % da área com defeitos

3.5. Simulações computacionais

Foram realizadas simulações computacionais do processo de fabrico das solas META 35,5 e DIVA 38, de forma a averiguar quais os valores das tensões atingidos nas cavidades dos moldes e em que regiões é que estes são máximos. O objetivo deste estudo passa por apurar se a geometria da sola a fabricar é determinante para as tensões atingidas durante o processo, através de uma comparação entre os valores obtidos para os diferentes moldes, e se os materiais utilizados para o fabrico dos moldes são adequados para suportar as tensões atingidas.

O modelo utilizado para a simulação consistiu em considerar uma pressão hidrostática na cavidade dos moldes. Na figura 49 mostra-se uma configuração habitual do processo de moldação por compressão de borracha, em que um cilindro hidráulico, de 350 mm de diâmetro (Φ) comprime quatro moldes em simultâneo, em conjuntos de dois. A pressão do óleo que é injetado no interior do cilindro (P) é, em média, 150 bar, ou 15 MPa. Com estes dados, através da expressão (3), é possível calcular a força exercida pelo cilindro (F) no conjunto de moldes, sendo igual a 1443169 N. Como esta força é exercida numa placa rígida, considerada indeformável, que está em contacto com os moldes, pode ser assumido que a força se distribui uniformemente ao longo dos dois moldes inferiores (figura 50). Assim, a força exercida em cada molde, F^* , é metade dessa força, i.e. 721585 N. O facto de se encontrar outro conjunto de dois moldes sobre eles é irrelevante para o problema, uma vez que a força F se propaga verticalmente, pelo que o conjunto de moldes superior também vai estar sujeito às mesmas cargas.



Figura 49 – Configuração do processo de moldação por compressão de borracha, com indicação do diâmetro do cilindro hidráulico, $\Phi = 350$ mm

$$P = \frac{F}{\frac{\pi \Phi^2}{4}} \quad (3)$$

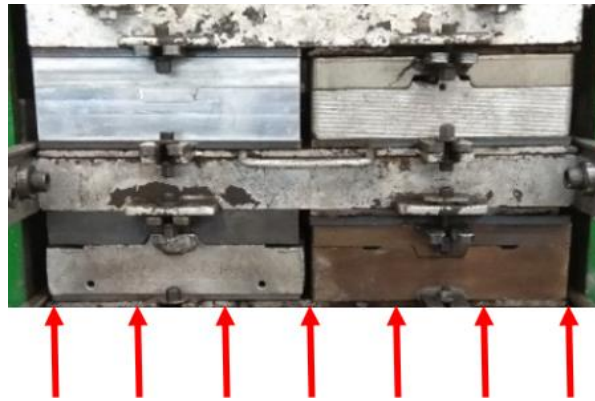


Figura 50 – Força exercida pelo cilindro distribuída uniformemente ao longo dos moldes

Como nos moldes para produção de solas para calçado existem duas cavidades, pois um par é constituído por duas solas, a pressão vai dividir-se por ambas. Assim, a área projetada total das cavidades (S) é 2x a área projetada de cada sola (S*) (expressão (4)).

Conhecendo a força exercida num molde (F*) e a área projetada das cavidades (S), é possível calcular a pressão hidrostática exercida nas superfícies das cavidades (P*) através da expressão (5), uma vez que a área projetada é aquela em que vai ser exercida pressão. Na figura 51 está representada a área projetada de uma situação genérica, que nesse caso é a soma das áreas S₁, S₂ e S₃.

A simulação foi realizada considerando incrementos de 5 bar, pelo que para a pressão aplicada foi escolhido o múltiplo de 5 mais próximo do valor obtido através da expressão (5).

$$S = 2 \times S^* \quad (4)$$

$$P^* = \frac{F^*}{S} \quad (5)$$

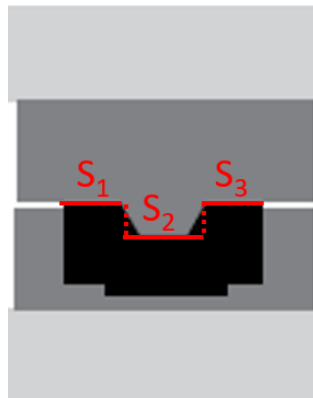


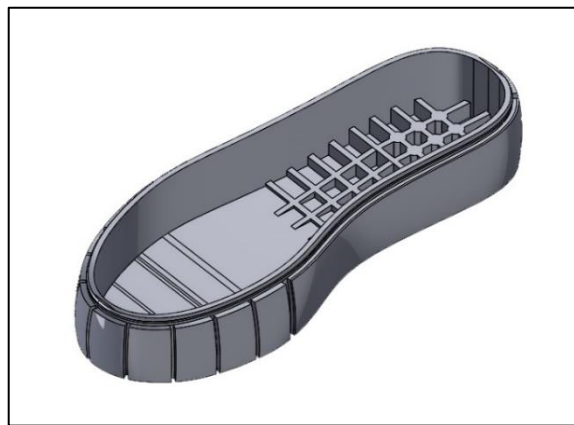
Figura 51 – Representação da área projetada de uma situação genérica, correspondendo a S₁+S₂+S₃

3.5.1. Molde META 35,5

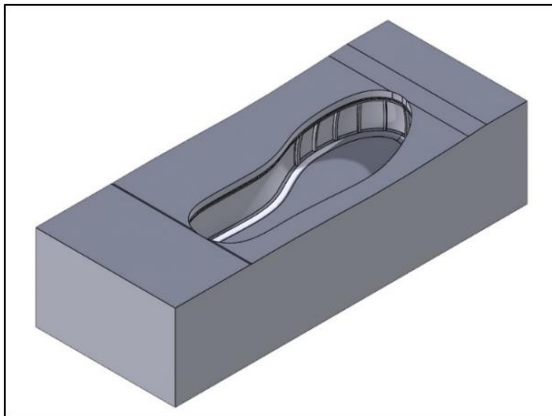
Os modelos da sola, base e tampa do molde META 35,5 encontram-se nas figuras 52 a), b) e c), respetivamente.

Tal como foi referido, para a modelação da cavidade deste molde foi utilizado o tamanho 38, embora para as suas dimensões exteriores tenham sido utilizadas as do META 35,5. Para calcular a área projetada da cavidade do molde com tamanho correto, de forma a obter um modelo mais próximo do caso em estudo, foi feita a digitalização tridimensional da sola META 35,5 (figura 53), o que permitiu, através do SolidWorks, fazer o cálculo desta área. Através das expressões (4) e (5) foi obtida a pressão exercida na cavidade.

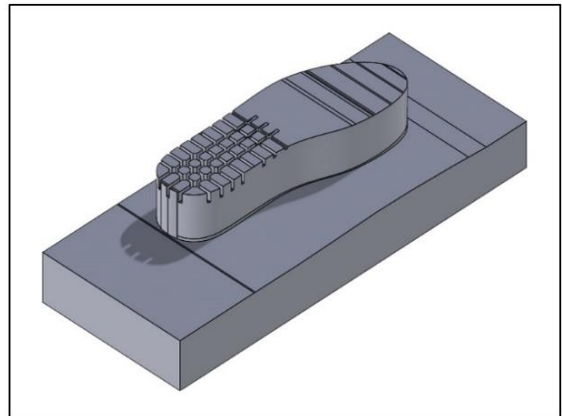
Na tabela 26 encontram-se as áreas e pressões medidas, calculadas e utilizadas na simulação do processo.



a)



b)



c)

Figura 52 – Modelos da sola META 35,5 (a), da base (a) e da tampa (c) do molde META 35,5 construídos no SolidWorks



Figura 53 – Modelo da sola META 35,5, obtido através de digitalização tridimensional, para cálculo da sua área projetada

Tabela 26 – Áreas e pressões utilizadas na simulação do processo de moldação por compressão da sola META 35,5

Área projetada de uma cavidade, S [mm²]	15181
Área projetada total, S* [mm²]	30362
Pressão hidrostática obtida, P* [MPa] (bar)	23,77 (237,7)
Pressão aplicada na cavidade [bar]	240

A distribuição das tensões equivalentes atingidas encontra-se nas figuras 54 a), numa vista global do lado mais solicitado do molde, o exterior, e na figura 54 b), numa vista aproximada da zona crítica. Verifica-se que as tensões são máximas na região de transição de geometria, precisamente onde se deu a fratura neste molde, atingindo 159,1 MPa. Na figura 54 b) encontra-se assinalada a branco a região onde ocorreu a tensão mais elevada, embora se observem tensões próximas desta nas reentrâncias existentes nas proximidades dessa zona.

Na figura 55 podem ser consultados os resultados obtidos para a zona com maiores deformações plásticas equivalentes, cujo máximo foi 0,68 % e ocorreu numa região diferente da zona onde se verificou a tensão máxima, num vértice de umas das reentrâncias, região assinalada a branco na figura.

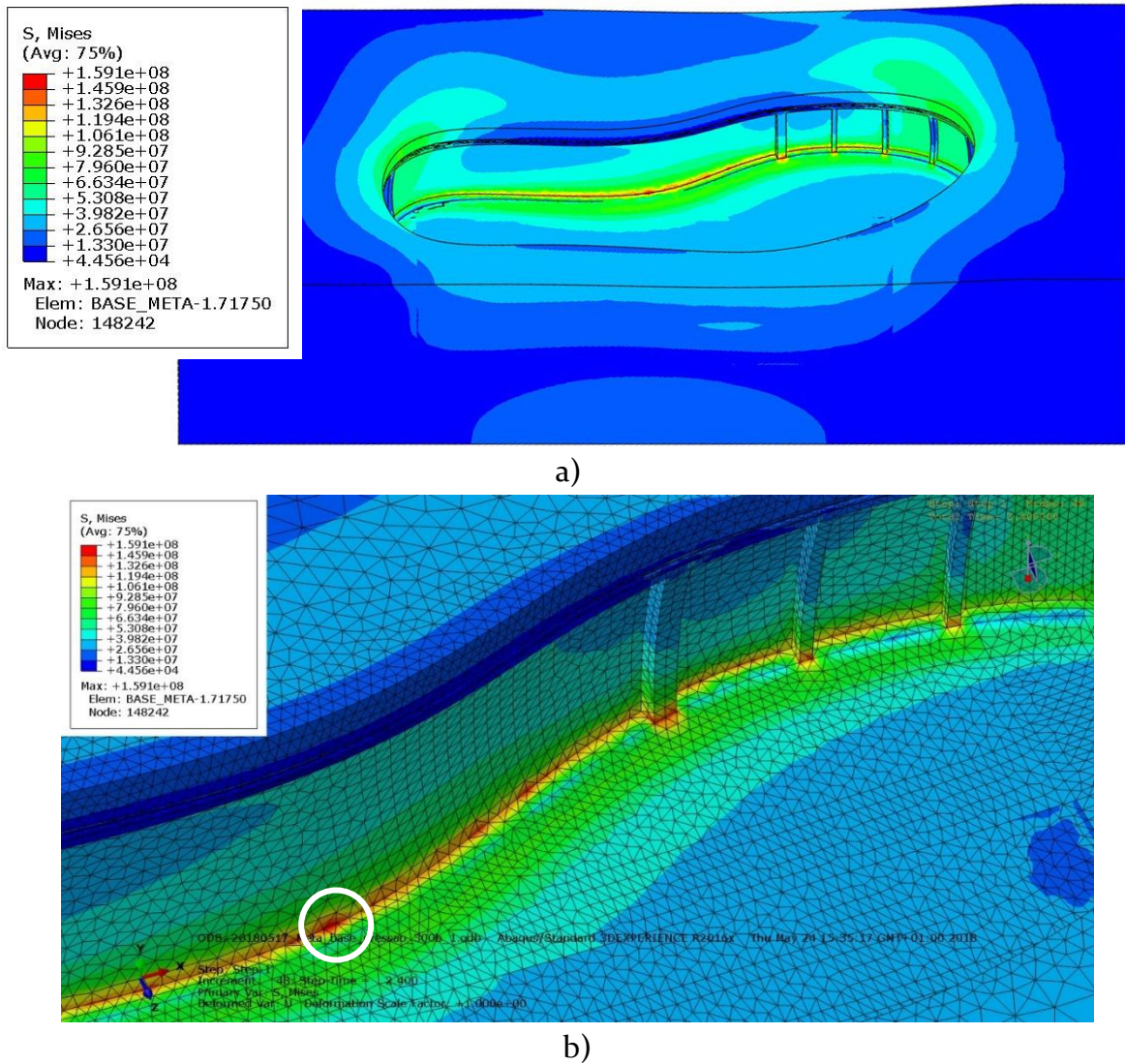


Figura 54 – Vista global do lado mais solicitado do molde META 35,5 (a) e vista aproximada da zona crítica (b), com região onde as tensões foram máximas, 159,1 MPa, assinalada a branco

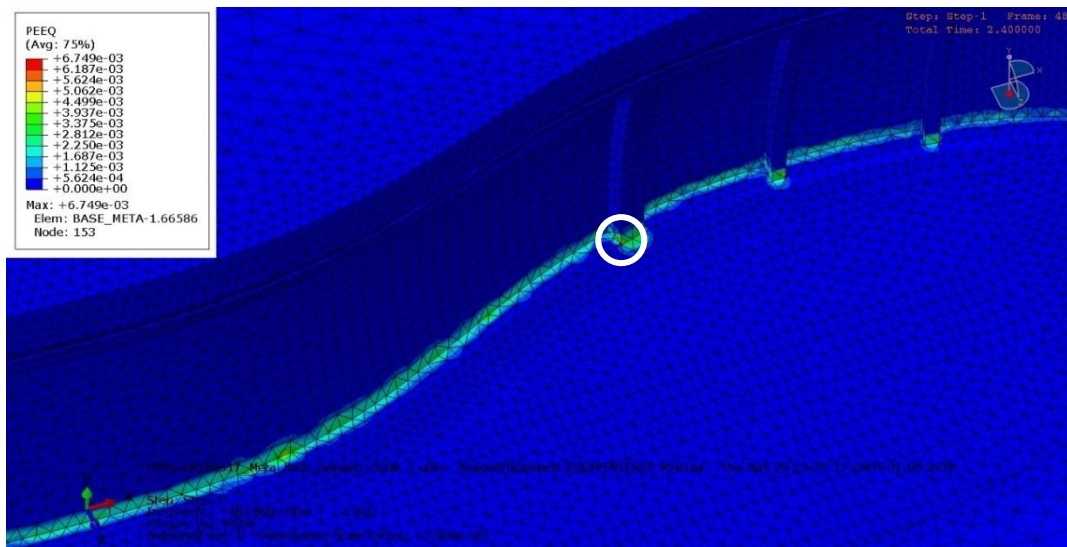


Figura 55 - Zona com maiores deformações plásticas equivalentes, cujo máximo foi 0,68 % e ocorreu na região assinalada a branco

3.5.2. Molde DIVA 38

Nas figuras 56 a), b) e c) encontram-se os modelos da sola, base e tampa do molde DIVA 38.

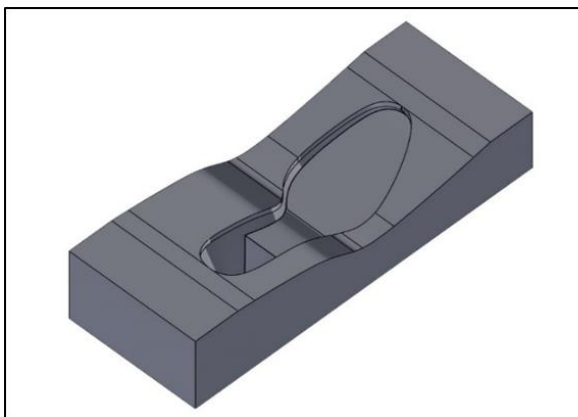
Como o modelo das superfícies da sola disponibilizado já correspondia ao tamanho 38, foi possível medir a área projetada da cavidade diretamente no modelo da base do molde, calculando a pressão exercida na cavidade através das expressões (3) e (4). Na tabela 27 encontram-se todos os valores medidos, calculados e utilizados para as áreas e pressões.

Mais uma vez, o lado mais solicitado do molde foi o exterior, cuja vista global da distribuição de tensões equivalentes se encontra na figura 57 a) e uma aproximação da zona crítica na figura 57 b). A tensão máxima atingida foi de 146,2 MPa, estando assinalada a branco, na figura 57 b), a zona onde esta ocorreu.

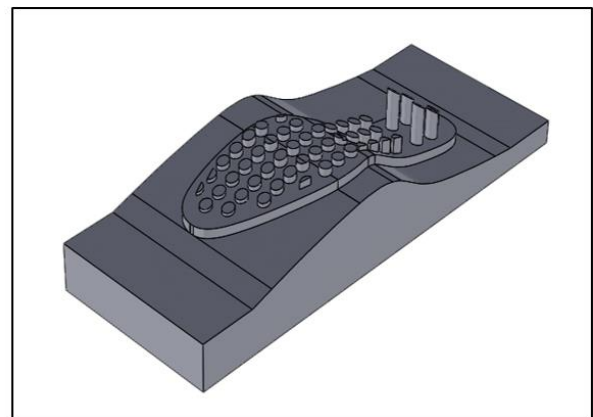
Quanto à deformação plástica equivalente, os resultados obtidos podem ser consultados na figura 58, sendo que o valor máximo obtido foi 0,56 %, e ocorreu na mesma região onde se verificou a tensão máxima, novamente assinalada a branco.



a)



a)



b)

Figura 56 – Modelos da sola DIVA 38 (a), da base (a) e da tampa (c) do molde DIVA 38 construídos no SolidWorks

Tabela 27 – Áreas e pressões utilizadas na simulação do processo de moldação por compressão da sola DIVA 38

Área projetada de uma cavidade, S [mm²]	16566
Área projetada total, S* [mm²]	33231
Pressão hidrostática obtida, P* [MPa] (bar)	21,99 (219,9)
Pressão aplicada na cavidade [bar]	220

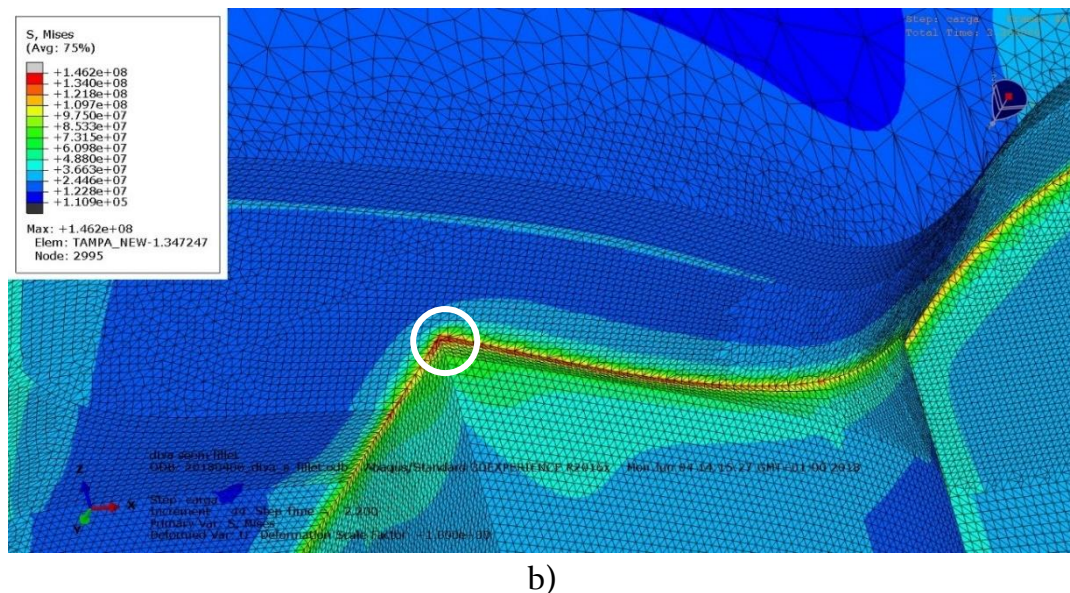
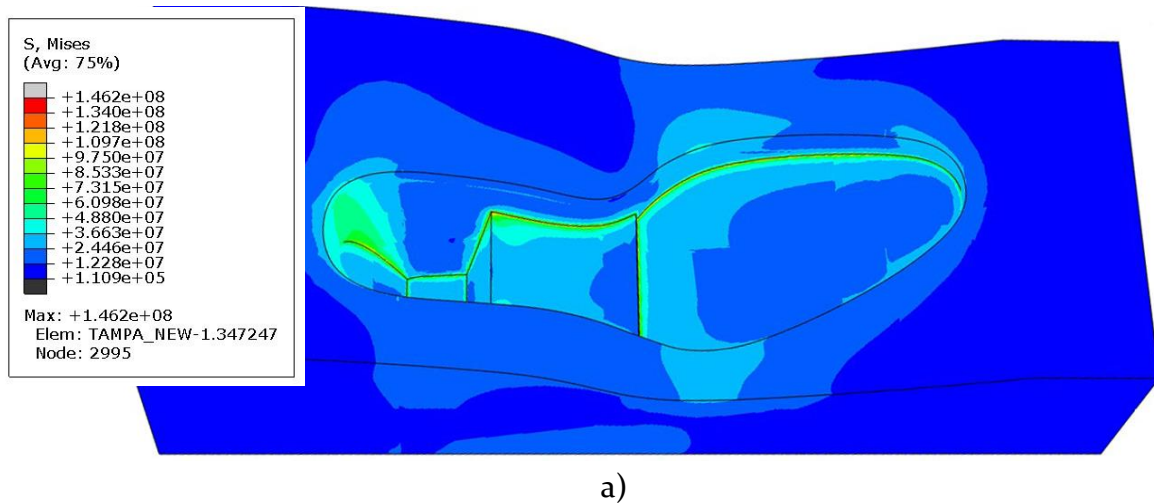


Figura 57 – Vista global do lado do molde DIVA 38 onde foram atingidas tensões mais elevadas (a) e vista aproximada da zona crítica (b), com região mais solicitada, 146,2 MPa, assinalada a branco

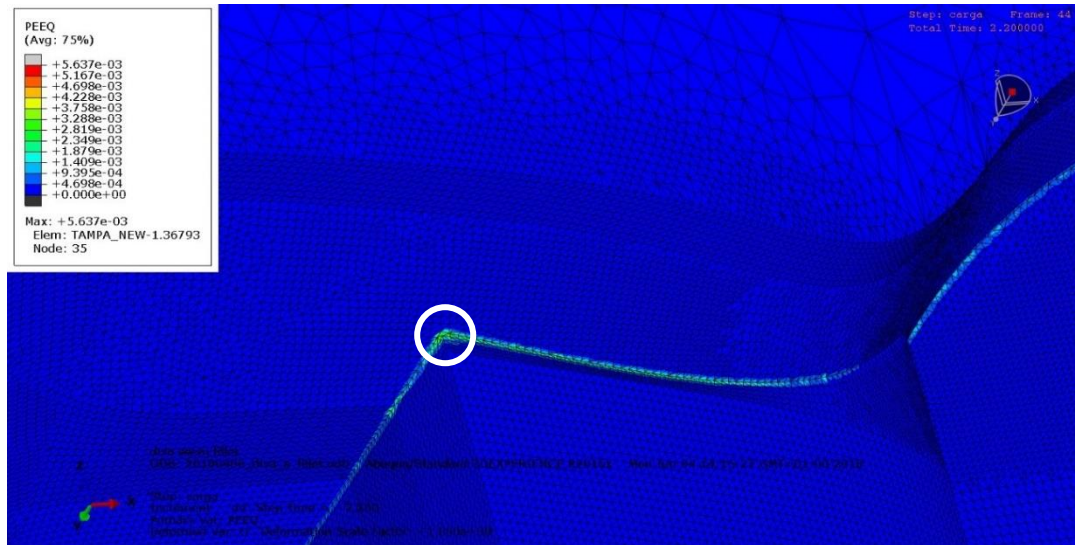


Figura 58 – Região do molde DIVA 38 onde ocorreram maiores tensões plásticas equivalentes, com região onde foi atingido o máximo, 0,56 %, assinalada a branco

3.5.3. Análise de amostra da zona de tensões máximas do molde META 35,5

Dado que a simulação do processo de moldação por compressão permitiu identificar a região onde se verificavam as tensões mais elevadas no molde META 35,5, foi retirada uma amostra dessa região, de forma a avaliar o tamanho de grão, a quantidade de defeitos e a dureza do molde na sua zona mais solicitada (figura 59).

O facto de ter existido uma zona sujeita a maiores tensões não significa necessariamente que a fenda se tenha iniciado aí, uma vez que o material é heterogéneo; assim, caso haja uma região mais frágil nas proximidades de uma zona de tensões elevadas, a fratura pode iniciar-se nesse ponto, já que as simulações mostraram que existem outras zonas com tensões próximas da máxima ao longo da aresta onde se deu a fratura. Ainda assim, com base na informação recolhida, é adequado fazer uma caracterização da região exata sujeita às tensões mais elevadas, de forma a avaliar se esta zona do molde é particularmente frágil.

Na figura 60 encontra-se a microestrutura da amostra recolhida. É possível verificar que o tamanho de grão é elevado, sendo semelhante ao das amostras da parte superior deste molde, que se tinha revelado, até então, a região mais frágil do molde. Ainda assim, esta região apresenta menor quantidade de defeitos, que ocupam uma área correspondente a 2,31 % da área total. Quanto à dureza, os resultados das três medições encontram-se na tabela 28.

Tabela 28 – Durezas medidas na amostra extraída da zona de tensões máximas do molde META 35,5

Dureza [HV]	Dureza média [HV]
83/83/84	83

Estes resultados indicam que a região onde ocorre a tensão máxima, apesar de não apresentar uma percentagem de defeitos tão elevada como, por exemplo, a parte superior da base do molde, é, das zonas analisadas, aquela que apresenta uma dureza mais reduzida. Isto significa que a zona de mudança de geometria na cavidade do molde, para além de ser uma zona de concentração de tensões, é também uma região frágil do molde.

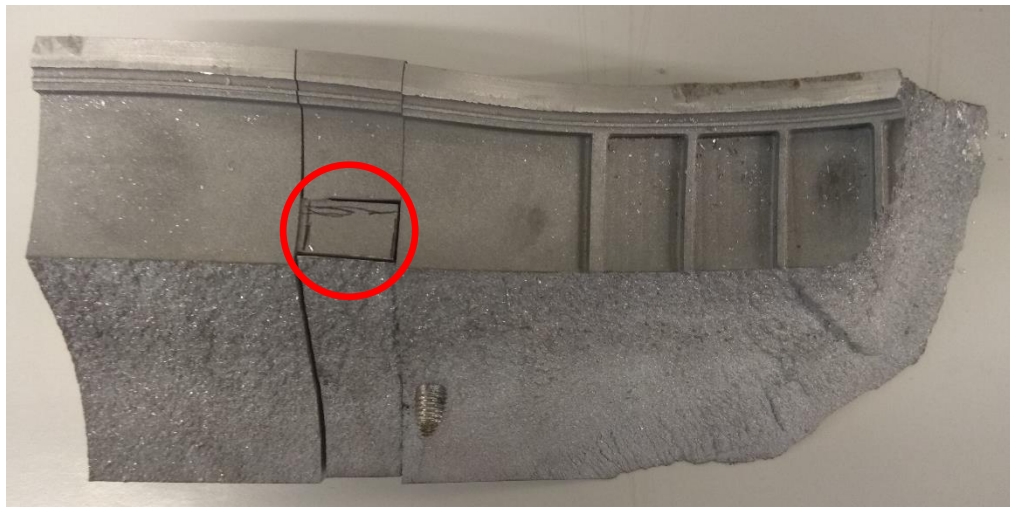


Figura 59 – Zona da fratura do molde META 35,5, estando assinalada a vermelho a região onde ocorrem as tensões mais elevadas, segundo a simulação computacional, e de onde foi extraída uma amostra para análise

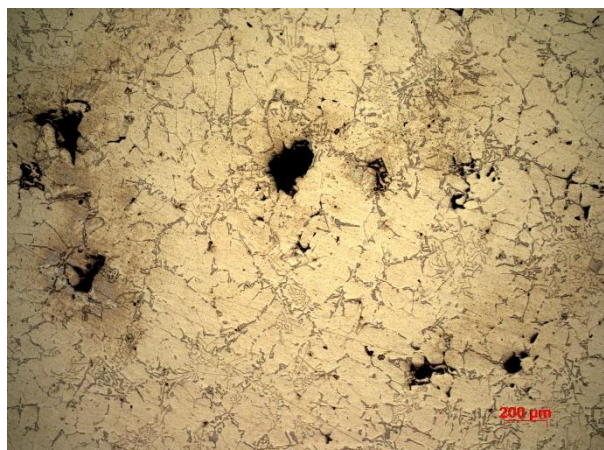


Figura 60 – Microestrutura da amostra extraída da região onde ocorrem as tensões máximas no molde META 35,5, segundo a simulação computacional, com 2,31 % de áreas com defeitos

3.6. Análise de resultados

3.6.1. Heterogeneidades dos moldes

Molde META 35,5

Verificam-se variações bastante significativas no tamanho de grão das várias amostras extraídas da base do molde META 35,5, sobretudo entre as regiões inferiores, que apresentaram um grão e microrechupes pequenos, e as regiões superiores, com grão e defeitos extremamente maiores. Na tabela 29 encontram-se os resultados obtidos para as áreas de defeitos e para as durezas médias das quatro amostras extraídas do molde META 35,5 que foram analisadas quanto a estas propriedades. Estes resultados revelam uma grande heterogeneidade entre regiões distintas do molde, com diferenças de cerca de 20 HV na dureza média e zonas com áreas de microrechupes 6 vezes superiores a outras.

Verifica-se também que, à exceção da amostra da região fraturada, a dureza diminuiu com o aumento da área com defeitos, o que significa que a aglomeração de microrechupes tem um papel relevante na diminuição da dureza do material.

Tabela 29 – Áreas de defeitos e durezas médias das amostras extraídas do molde META 35,5

Amostra	I	Região central inferior	Região central superior	Região fraturada
Área de defeitos [%]	1,99	1,17	7,52	2,31
Dureza média [HV]	102	109	89	83

As propriedades obtidas através dos ensaios de tração podem ser consultadas na tabela 30, que contém a indicação dos valores mínimos, máximos, médios e respetivo desvio padrão para cada propriedade. Como apenas foram ensaiados dois provetes deste molde no estado bruto de vazamento, que se localizavam em regiões muito próximas, os resultados obtidos não permitem avaliar a heterogeneidade do molde. Ainda assim, a extensão após rotura apresentou uma variação significativa.

Tabela 30 – Propriedades mínimas, máximas e média obtidas através dos ensaios de tração a provetes no estado bruto de vazamento extraídos do molde META 35,5

Propriedade mecânica	Mínimo	Máximo	Média
Módulo de Young [GPa]	71,40	71,48	71,44 ± 0,04
Tensão limite de elasticidade [MPa]	166,00	167,50	166,75 ± 0,75
Tensão de rotura [MPa]	173,39	174,77	174,08 ± 0,70
Extensão após rotura [%]	0,27	0,42	0,35 ± 0,08

Molde DIVA 38

Na tabela 31 encontram-se os valores mínimos, máximos (indicando a região onde ocorrem) e médios (por regiões inferiores e superiores), com respetivo desvio padrão, para as várias propriedades mecânicas obtidas através dos ensaios de tração aos provetes no estado bruto de vazamento.

Verificam-se grandes heterogeneidades nas propriedades, com variações próximas de 37 MPa quanto à tensão de rotura, de 13 MPa na tensão limite de elasticidade, de cerca de 28 GPa no módulo de Young e de 0,83 pontos percentuais na extensão após rotura.

Atentando nos valores médios para as regiões inferiores e superiores, observa-se que as primeiras apresentam tensões de rotura significativamente mais elevadas e são mais dúcteis, embora tenham um módulo de Young mais baixo. Quanto às tensões limite de elasticidade não se verifica uma variação relevante.

Tabela 31 – Propriedades mínimas, máximas e média obtidas através dos ensaios de tração a provetes no estado bruto de vazamento extraídos do molde DIVA 38

Propriedade mecânica	Mínimo	Máximo	Média regiões inferiores	Média regiões superiores
Tensão limite elast. [MPa]	116,50 (6I)	129,50 (2I)	122,75 ± 5,80	124,88 ± 0,22
Tensão de rotura [MPa]	145,48 (6S)	182,86 (1I)	173,05 ± 13,37	160,08 ± 8,56
Extensão após rotura [%]	0,48 (6S)	1,31 (5I)	1,00 ± 0,20	0,73 ± 0,16
Módulo de Young [GPa]	61,09 (6I)	88,92 (5S)	69,17 ± 5,30	79,68 ± 6,44

Os resultados obtidos para as áreas de defeitos e durezas médias das quatro cabeças de provete encontram-se na tabela 32, onde é feita também uma relação com a tensão de rotura apresentada por esses provetes. Verifica-se que, tal como no molde META 35,5, a dureza média diminuiu com o aumento da área de defeitos, comportamento idêntico ao da tensão de rotura, o que indica que a quantidade de microrechupes tem relevância na resistência mecânica do material.

Apesar de também existirem diferenças nos tamanhos de grão entre as várias regiões do molde, sobretudo entre as zonas centrais do molde e as restantes, estas foram muito menos significativas do que as observadas no molde META 35,5.

Tabela 32 – Áreas de defeitos e durezas médias das cabeças dos provetes 1I, 1S, 6I e 6S e tensão de rotura desses provetes

Amostra	1I	1S	6I	6S
Área de defeitos [%]	0,19	0,28	1,07	1,87
Dureza média [HV]	95	90	82	78
Tensão de rotura [MPa]	182,86	163,04	150,15	145,48

A elevada quantidade de microrechupes nos moldes, sobretudo no META 35,5, revela uma alimentação inadequada dos moldes, uma vez que estes defeitos se devem a uma deficiente compensação da falta de metal no estado líquido no momento da solidificação, devido à contração do material inerente à mudança de fase, tal como foi referido anteriormente. As elevadas heterogeneidades entre as diferentes regiões dos moldes, verificadas através do tamanho de grão e propriedades mecânicas bastante variáveis, também revelam uma solidificação não uniforme do alumínio.

Para promover uma solidificação mais eficaz, que conduza a uma menor quantidade de defeitos e menor heterogeneidade, é possível utilizar a simulação computacional para projetar um sistema de alimentação mais eficiente.

A utilização do ProCAST é um processo moroso e complexo, pois requer uma formação específica por parte do utilizador e bastante detalhe na especificação dos parâmetros [65]. Ainda assim, o *software* permite obter resultados muito próximos da realidade, tendo apenas algumas dificuldades em prever a posição exata e forma dos defeitos em certas situações [66].

Através do estudo de várias soluções para a alimentação, num processo iterativo, é possível minimizar a presença de rechupes de dimensão relevante e/ou em zonas críticas das peças [65, 66]. Assim, esta solução pode ser muito útil na previsão da solidificação dos moldes e obtenção de moldes mais homogêneos e ausentes de defeitos significativos.

3.6.2. Comparação entre moldes

Na tabela 33 encontram-se os limites mínimos e máximos das propriedades medidas nos moldes META 35,5 e DIVA 38. Verifica-se que a gama de durezas médias observada no primeiro molde é mais elevada que no segundo, no entanto, as áreas de defeitos são bastante maiores no molde META 35,5, o que pode ter conduzido a maiores fragilidades estruturais.

Relativamente ao módulo de Young, à tensão limite de elasticidade, à tensão de rotura e à extensão após rotura, a comparação entre os dois moldes é menos relevante, uma vez que foi feita uma caracterização completa do molde DIVA 38, através do ensaio de provetes extraídos de 8 regiões distintas, enquanto que do molde META 35,5 apenas foram ensaiados 2 provetes, extraídos da mesma região. Ainda assim, verifica-se que nenhum dos provetes do molde DIVA 38 apresentou uma tensão limite de elasticidade tão elevada como os provetes extraídos do molde DIVA 35,5, que apresentaram também uma extensão após rotura inferior a todos os provetes extraídos do molde DIVA 38.

Tabela 33 – Limites mínimos e máximos das propriedades medidas dos moldes META 35,5 e DIVA 38

Propriedade	META 35,5	DIVA 38
Dureza média [HV]	83 – 102	78 – 95
Área de defeitos [%]	1,17 – 7,52	0,19 – 1,87
Módulo de Young [GPa]	71,40 – 71,48	61,09 – 88,92
Tensão limite de elasticidade [MPa]	166,00 – 167,50	116,50 – 129,50
Tensão de rotura [MPa]	173,39 – 174,77	145,48 – 182,86
Extensão após rotura [%]	0,27 – 0,42	0,48 – 1,31

3.6.3. Tratamentos térmicos

Na tabela 34 encontram-se todos os tratamentos térmicos efetuados e os respetivos parâmetros, sendo que nos tratamentos 2 e 3 os parâmetros indicados são aqueles que conduziram ao maior aumento de propriedades.

Os tratamentos térmicos 1, 2 e 3 foram efetuados apenas a amostras do molde META 35,5, com o objetivo de encontrar aquele que maximizasse o aumento de dureza das amostras. A tabela 35 contém as durezas médias iniciais e finais das amostras sujeitas a cada tratamento, bem como o seu aumento. É então possível verificar que os parâmetros que provocaram um maior aumento de dureza foram os do tratamento 1, com um aumento de 46 HV, o que corresponde a um aumento de 52,27 % relativamente à dureza inicial, valor que supera por alguma margem o segundo maior aumento de dureza, de 37,08 %, provocado pelo tratamento térmico 3.

Na tabela 36 encontram-se os valores médios das propriedades mecânicas dos provetes extraídos dos dois moldes, tanto no estado bruto de vazamento como após tratamento térmico, bem como a respetiva variação.

Verifica-se que para as tensões de rotura e limite de elasticidade se obtiveram aumentos extremamente significativos, entre cerca de 50 % e 100 %.

Os tratamentos térmicos provocam ainda uma diminuição da ductilidade dos materiais, dada a menor extensão após rotura que os provetes tratados termicamente.

Por fim, os tratamentos térmicos aparentam não provocar alterações no módulo de Young, uma vez as variações entre as duas condições foram pequenas, sendo positivas no molde META 35,5 e negativas no molde DIVA 38.

Os elevados aumentos verificados nas durezas, tensões limite de elasticidade e tensões de rotura das amostras e provetes tratados termicamente face ao estado bruto de vazamento permitem concluir que os tratamentos térmicos aumentaram a resistência mecânica dos moldes de forma muito significativa. No entanto, associado ao aumento das propriedades mecânicas existe também um aumento significativo no custo de produção, uma vez que dados internos do INEGI indicam

que a aplicação de tratamentos térmicos T6 a este tipo de moldes encarece-os entre 20 % e 30 %.

Tabela 34 – Tratamentos térmicos efetuados e respetivos parâmetros

Tratamento térmico	Solubilização		Envelhecimento	
	Temperatura [°C]	Duração [h]	Temperatura [°C]	Duração [h]
1	490	5	180	6
2	470	6	185	8
3	470	6	175	6
4	470	6	180	6

Tabela 35 – Durezas médias das amostras extraídas do molde META 35,5, no estado bruto de vazamento e após sujeitas a tratamentos térmicos T6

Tratamento térmico	Dureza média estado bruto [HV]	Dureza média trat. térmico [HV]	Aumento de dureza média [HV]	Aumento de dureza média [%]
1	88	134	46	52,27
2	109	132	23	21,10
3	89	122	33	37,08

Tabela 36 – Propriedades mecânicas dos provetes no estado bruto de vazamento e após tratamento térmico

Propriedade mecânica	Provetes	Estado bruto de vazamento	Após tratamento térmico	Variação [%]
Tensão limite elast. média [MPa]	META 35,5	166,75 ± 0,75	281,70 ± 5,64	68,94
	DIVA 38	123,81 ± 4,24	248,13 ± 14,08	100,41
Tensão de rotura média [MPa]	META 35,5	174,08 ± 0,70	281,70 ± 5,64	61,82
	DIVA 38	166,56 ± 12,96	249,43 ± 13,47	49,75
Extensão após rotura média [%]	META 35,5	0,35 ± 0,08	0,17 ± 0,02	-51,43
	DIVA 38	0,87 ± 0,23	0,17 ± 0,05	-80,46
Módulo de Young médio [GPa]	META 35,5	71,44 ± 0,04	76,56 ± 2,98	7,17
	DIVA 38	74,42 ± 7,90	73,21 ± 3,74	-1,63

3.6.4. Comparação com a liga 319.0

Tal como foi referido anteriormente, a liga 319.0 é aquela cuja composição química mais se aproxima do material que constitui os moldes. As suas principais propriedades mecânicas no estado bruto de vazamento e após um tratamento térmico T6 podem ser consultadas nas tabelas 37 e 38, respetivamente. Dado que as propriedades dependem do processo de fundição, e visto que não existem dados

relativos ao processo utilizado no fabrico dos moldes, apresentam-se para comparação os valores para fundição em areia e fundição em coquilha.

Molde META 35,5

No estado bruto de vazamento a tensão limite de elasticidade média é cerca de 37 MPa a 42 MPa superior às indicadas para fundição em areia e em coquilha, respetivamente. No entanto, a tensão limite de elasticidade é, em média, significativamente menor, sobretudo relativamente à fundição em coquilha, em que a diferença é de 61 MPa.

Quanto aos provetes tratados termicamente, a tensão limite de elasticidade excede as tabeladas em 117 MPa (fundição em areia) e 97 MPa (fundição em coquilha). A sua tensão de rotura ronda o valor indicado para fundição em coquilha e é cerca de 30 MPa superior no que diz respeito à fundição em areia.

O coeficiente de expansão térmica da amostra extraída deste molde, 17,08 $\mu\text{m}/\text{m}.\text{°C}$, é significativamente inferior ao valor indicado para esta liga (21,1 $\mu\text{m}/\text{m}.\text{°C}$ a 22,1 $\mu\text{m}/\text{m}.\text{°C}$) [16].

Uma vez que os provetes ensaiados se localizavam em regiões muito próximas, os valores obtidos são pouco representativos da globalidade do molde.

Molde DIVA 38

A tensão limite de elasticidade dos provetes deste molde é, em média, ligeiramente inferior aos valores tabelados para os dois processos, enquanto que a tensão de rotura é inferior em 11 MPa e em 51 MPa face à fundição em areia e em coquilha, respetivamente.

Nos provetes sujeitos a tratamento térmico verifica-se que a tensão limite de elasticidade média é bastante superior às tabeladas, enquanto que a tensão de rotura média ronda os valores indicados para a fundição em areia, mas é cerca de 30 MPa mais baixa que para a fundição em coquilha.

Em ambos os moldes, tanto no estado bruto de vazamento como após tratamento térmico, os módulos de Young são semelhantes aos indicados. Já as extensões após rotura obtida revelaram-se muito baixas, com valores entre cerca de 2x e 18x inferiores aos tabeladas.

Apesar de as tensões limite de elasticidade serem, na maior parte das situações, superiores às tabeladas, as tensões de rotura médias apresentam-se abaixo do esperado. Isto pode dever-se ao facto de o próprio processo de fundição, que é diferente dos usados para comparação, poder conduzir a propriedades mais baixas, ou devido aos excessivos defeitos microestruturais verificados, nomeadamente microrechupes. Como a liga que constitui os moldes não é

exatamente igual à liga 319.0, existe ainda a possibilidade de que a liga utilizada tenha ela própria uma resistência mecânica mais baixa.

Tendo em conta que a comparação foi feita utilizando valores médios para as propriedades, dada a heterogeneidade verificada nos moldes existem regiões onde os valores obtidos se encontram bastante abaixo dos tabelados.

Tabela 37 – Propriedades mecânicas médias obtidas para os moldes estudado e tabeladas para liga 319.0 no estado bruto de vazamento [67]

Propriedade mecânica	Valores médios obtidos		Valores tabelados	
	META 35,5	DIVA 38	F. areia	F. coquilha
Tensão limite elast. [MPa]	166,75 ± 0,75	123,81 ± 4,24	125	130
Tensão de rotura [MPa]	174,08 ± 0,70	166,56 ± 12,96	185	235
Extensão após rotura [%]	0,35 ± 0,08	0,87 ± 0,23	2,0	2,5
Módulo de Young [GPa]	71,44 ± 0,04	74,42 ± 7,90		74

Tabela 38 – Propriedades mecânicas médias obtidas para os moldes estudado e tabeladas para a liga 319.0 após tratamento térmico T6 [67]

Propriedade mecânica	Valores médios obtidos		Valores tabelados	
	META 35,5	DIVA 38	F. areia	F. coquilha
Tensão limite elast. [MPa]	281,70 ± 5,64	248,13 ± 14,08	165	185
Tensão de rotura [MPa]	281,70 ± 5,64	249,43 ± 13,47	250	280
Extensão após rotura [%]	0,17 ± 0,02	0,17 ± 0,05	2,0	3,0
Módulo de Young [GPa]	76,56 ± 2,98	73,21 ± 3,74		74

3.6.5. Simulações computacionais

Na tabela 39 apresentam-se os resultados obtidos através das simulações computacionais para as tensões equivalentes máximas e deformações plásticas equivalentes máximas em ambos os moldes. Verifica-se que a tensão equivalente máxima é 12,9 MPa superior no molde META 35,5 do que no DIVA 38, atingindo 159,1 MPa, o que representa um valor 8,82 % mais elevado. Este comportamento também se verifica quanto à deformação máxima, superior em 0,12 pontos percentuais no mesmo molde. Estes resultados eram expectáveis, na medida em que, sendo o molde META 35,5 aquele que fraturou, seria de esperar que nesse molde surgissem as tensões e deformações mais elevadas. No molde META 35,5 verificou-se que a região mais solicitada foi a aresta inferior externa da sua cavidade, precisamente a zona onde se deu a fratura, o que também seria de esperar.

Tabela 39 – Tensões equivalentes máximas e deformações plásticas equivalentes máximas obtidas nos moldes META 35,5 e DIVA 38 através de simulações computacionais

Molde	Tensão equivalente máxima [MPa]	Deformação plástica equivalente máxima [%]
META 35,5	159,1	0,68
DIVA 38	146,2	0,56

Uma vez que o modelo utilizado considerou uma situação de pressão hidrostática, é adequado fazer uma comparação entre os valores obtidos para as tensões equivalentes e as tensões limite de elasticidade e de rotura dos materiais.

Molde META 35,5

A tensão equivalente máxima situa-se a apenas 4,9 MPa da tensão limite de elasticidade e a 14,3 MPa da tensão de rotura mínima obtida para os provetes extraídos deste molde. No entanto, só foram feitos ensaios de tração a dois provetes no estado bruto de vazamento, que se situavam numa região afastada da zona da fratura, pelo que é possível que, dada a heterogeneidade verificada no molde, existam regiões com tensões limite de elasticidade e tensões de rotura abaixo dos valores máximos obtidos nas simulações. Verifica-se ainda que as deformações plásticas equivalentes se revelaram superiores às extensões após rotura obtidas através dos ensaios de tração.

Molde DIVA 38

As tensões equivalentes máximas ultrapassam as tensões limite de elasticidade e tensões de rotura das zonas mais frágeis do molde, embora essas zonas sejam as menos solicitadas. Ainda assim, as tensões atingidas excedem a tensão limite de elasticidade das zonas críticas em cerca de 20 MPa, embora se situem aproximadamente 20 MPa abaixo da tensão de rotura dessas zonas.

Estas situações permitem concluir que os materiais que constituem os moldes, no estado bruto de vazamento, não são adequados para o processo de moldação por compressão de borracha, pois funcionam com coeficientes de segurança inferiores a 1, dados que as tensões limite de elasticidade são ultrapassadas.

Este modelo, considerando uma pressão uniforme na cavidade, tem em conta apenas a pressão exercida pela borracha a partir do momento em que esta fluidifica e ocupa a totalidade da cavidade do molde. No entanto, numa fase inicial, o macho comprime a borracha, levando-a a deformar-se e a entrar em contacto com as paredes do molde enquanto esta ainda não atingiu a temperatura de mudança de

fase, encontrando-se, portanto, num estado viscoelástico. Esta situação, que o modelo utilizado não prevê, poderá provocar tensões ainda mais elevadas na cavidade dos moldes do que as indicadas. Assim, devem ser realizados mais estudos, eventualmente com recurso a técnicas experimentais, de forma a tornar o modelo utilizado mais próximo da realidade.

Para além disto, nas simulações foi considerada uma pressão média de 150 bar para a pressão do óleo injetado no cilindro hidráulico, utilizada no cálculo da força exercida. Isto significa que nas situações em que esta pressão é excedida as tensões atingidas na cavidade do molde são mais elevadas.

Caso os moldes fossem sujeitos a tratamentos térmicos a sua tensão limite de elasticidade e tensão de rotura poderiam aumentar bastante, como foi verificado, pelo que provavelmente não iriam surgir problemas estruturais, visto que coeficiente de segurança estaria próximo de 1,5.

Capítulo 4

Conclusões e trabalhos futuros

4.1. Conclusões

Foram estudados dois moldes para a produção de solas para calçado através do método de moldação por compressão de borracha, um onde se verificou uma fratura e outro que funcionou sem qualquer contrariedade, com o objetivo de compreender as suas diferenças e limitações, de forma a identificar as causas das fraturas e diminuir a quantidade de ocorrências.

Através de uma caracterização metalográfica verificou-se a existência grandes heterogeneidades entre as várias zonas dos moldes, tanto ao nível do tamanho de grão como da quantidade de microrechupes, que em algumas regiões apresentaram áreas bastante superiores ao desejável, o que revela uma alimentação deficiente do molde. As heterogeneidades microestruturais verificaram-se sobretudo no molde META 35,5, com zonas a apresentaram áreas de defeitos superiores a 7 %, o que poderá ter tornado o molde mais frágil, enquanto que no DIVA 38 a região onde foram verificadas maiores áreas de defeitos não atingiu os 2 %. As heterogeneidades nos moldes estenderam-se também às propriedades mecânicas obtidas através dos ensaios de tração, tendo sido verificadas variações significativas nas tensões de rotura (atingem cerca de 37 MPa), nas tensões limite de elasticidade (13 MPa) e na ductilidade entre as regiões dos moldes.

Através de simulações computacionais verificou-se que a geometria das solas a produzir tem influência nas tensões atingidas nas cavidades dos moldes, sendo superiores no molde META 35,5 (aproximadamente 160 MPa). No entanto, mesmo no molde DIVA 38 observaram-se tensões que ultrapassam as tensões limite de elasticidade e de rotura dos materiais que o constituem, chegando a ser 20 MPa superiores à tensão limite de elasticidade das zonas críticas. Desta forma, o coeficiente de segurança apresentado é extremamente baixo, pelo que se conclui que a liga utilizada, no estado bruto de vazamento, não é adequada para suportar as tensões geradas no processo de moldação por compressão de borracha.

A aplicação de tratamentos térmicos T6 aos provetes extraídos dos moldes revelou-se extremamente eficaz na melhoria das propriedades mecânicas dos materiais que os constituem, uma vez que proporciona aumentos entre cerca de 50 % e 100 % nas tensões de rotura e limite de elasticidade dos materiais. Assim, a aplicação de tratamentos térmicos aos moldes apresenta-se como uma excelente opção, visto que o aumento da resistência mecânica que estes tratamentos são capazes de conferir aos moldes elevaria o coeficiente de segurança do processo de tal forma que afastaria, em princípio, a possibilidade de ocorrência de fraturas, embora isso se fosse refletir no custo dos moldes.

4.2. Trabalhos futuros

Os resultados experimentais obtidos e as conclusões retiradas a partir destes abrem a possibilidade de um estudo mais alargado no âmbito desta dissertação.

A elevadas heterogeneidades e quantidades de microrechupes presentes nos moldes revelam uma alimentação deficiente no processo de fundição. O projeto de um novo sistema de alimentação, apoiado pela simulação computacional da solidificação, pode ajudar a minimizar este problema.

O modelo utilizado nas simulações computacionais apenas considera a pressão exercida pela borracha a partir do momento em que esta fluidifica e ocupa toda a cavidade do molde, desprezando assim as pressões geradas durante o contacto entre a borracha e as paredes da cavidade enquanto esta ainda se encontra num estado viscoelástico. Desta forma, um modelo mais aproximado da realidade passaria por simular uma situação em que fosse feita a compressão de um pré-formado, através da aproximação da base e da tampa, até ao fecho do molde. O facto de já ter sido feita a modelação tridimensional das tampas dos moldes, apesar de estas não terem sido necessárias para o modelo de simulação utilizado, torna esta ideia mais simples de executar.

As simulações computacionais permitiram identificar a região do molde META 35,5 sujeita às tensões mais elevadas, pelo que foi extraída uma amostra dessa zona para uma análise microestrutural e de dureza. No entanto, seria interessante complementar esse estudo com ensaios de tração a provetes extraídos dessas regiões, de forma a avaliar as propriedades mecânicas, principalmente a tensão limite de elasticidade e a tensão de rotura, nas zonas onde se deu a fratura do molde.

Poderia também ser feita uma medição experimental das pressões no interior da cavidade dos moldes, através da utilização de sensores de pressão. Estes sensores, por norma, apenas podem ser colocados em superfícies planas e a gama de pressões que são capazes de medir está longe das tensões máximas atingidas. Assim, a sua utilização poderia ser feita não com o objetivo de identificar os picos de tensão, mas sim de avaliar a precisão dos modelos utilizados nas simulações

computacionais, de forma a melhorá-los. Uma opção seria o FlexiForce HT201 Sensor (figura 61), da Tekscan. Este sensor funciona numa gama de temperaturas de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $204\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a temperatura dos moldes na Procalçado ronda os $145\text{ }^{\circ}\text{C}$), tem capacidade para medir forças até 2224 N e uma área útil de medição de $71,33\text{ mm}^2$, pelo que pode medir pressões até $31,2\text{ MPa}$ [68]. As simulações computacionais mostraram que nos moldes estudados existem algumas superfícies onde as tensões atingidas não são tão elevadas, pelo que colocando os sensores nessas regiões seria possível obter informações acerca da fiabilidade das simulações, o que permitiria refinar o modelo até se obter uma precisão adequada.

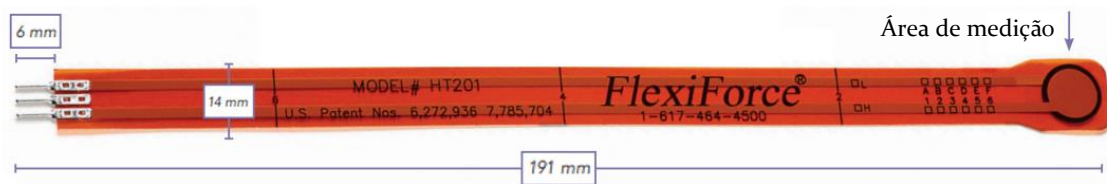


Figura 61 – Sensor de pressão FlexiForce HT201 Sensor, da Tekscan, para medir as pressões na cavidade durante o processo de moldação por compressão - adaptado de [68]

Referências Bibliográficas

- [1] APICCAPS, "Facts & Numbers 2018", 2018.
- [2] Procalçado. *Procalçado* S.A. [Online]. Disponível em: <http://www.procalçado.com/>. Acedido a 15 de maio de 2018.
- [3] M. Guimarães, "Estudo do comportamento de uma sola em borracha com sistema de amortecimento," Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2017.
- [4] N. Karak, *Fundamentals Of Polymers: Raw Materials To Finish Products*: Prentice-Hall Of India Pvt. Limited, 2009.
- [5] J. Vonhof, *Fixing Your Feet: Prevention and Treatments for Athletes*: Wilderness Press, 2006.
- [6] H. Greve, "Rubber, 2. Natural", in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH, 2000.
- [7] R. A. Shanks and I. Kong, "General Purpose Elastomers: Structure, Chemistry, Physics and Performance", *Advances in Elastomers I*, p. 11, 2013. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip.shib&db=edb&AN=93409504&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>
- [8] J. Sommer, "2 - TSE Materials and Compounds", in *Troubleshooting Rubber Problems*. Hanser, 2013, pp. 7-54. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781569905531500039>
- [9] Statista. *Natural rubber production worldwide from 2000 to 2017* [Online]. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/275387/global-natural-rubber-production/>. Acedido a 15 de maio de 2018.
- [10] L. F. Silva, A. T. Marques, F. J. L. Alves, *Materiais de Construção*: Porto: Publindústria, Edições Técnicas. cop. 2013., 2013.
- [11] V. M. Il'in and A. K. Rezova, "Styrene butadiene rubber: production worldwide", *Kauchuk i Rezina*, 2015.
- [12] A. N. Gent, *Engineering with rubber : how to design rubber components*: Hanser Gardner Publications. Hanser Publishers; Cincinnati : Munich, 2001.
- [13] E. Britannica. *Nitrile rubber* [Online]. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/nitrile-rubber>. Acedido a 15 de maio de 2018.
- [14] R. C. Klingender, *Handbook of Specialty Elastomers*: CRC Press, 2008.

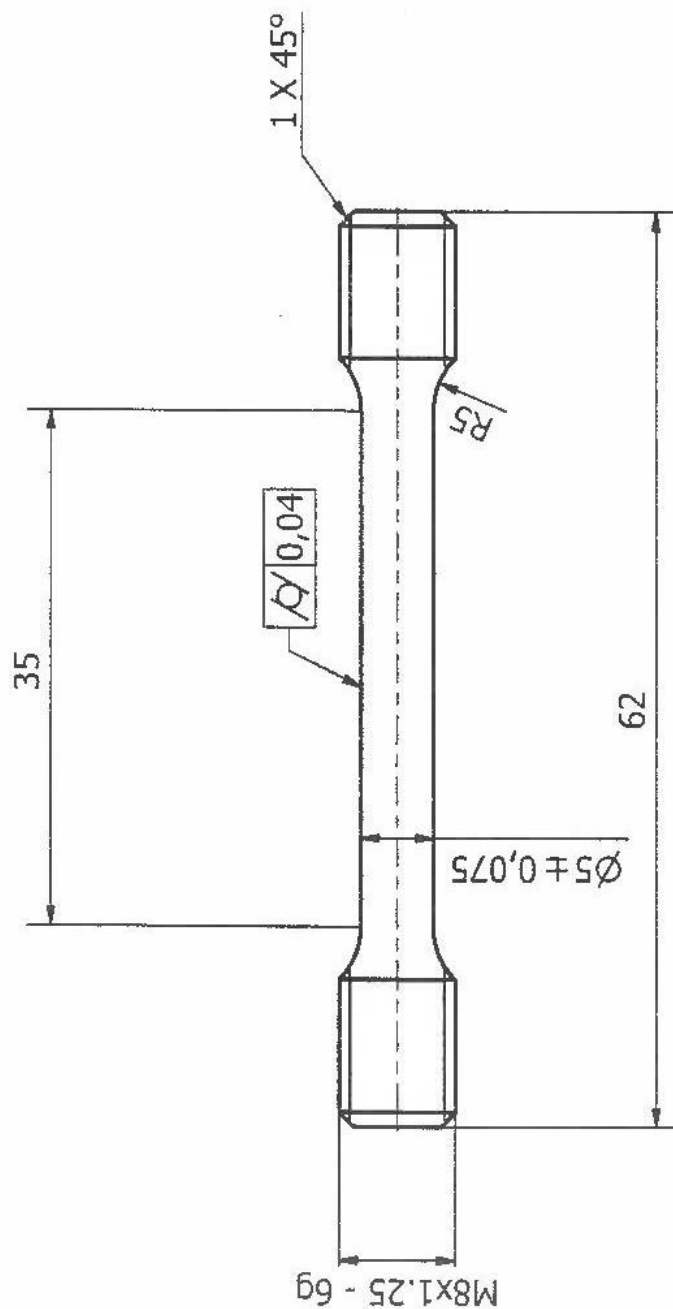
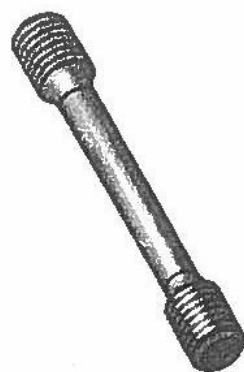
- [15] M.-H. Yeh *et al.*, "Microstructure and mechanical properties of neoprene-montmorillonite nanocomposites", *Applied Surface Science*, vol. 253, no. 10, pp. 4777-4781, 2007. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433206013766>
- [16] Granta Design. "CES EduPack 2017"
- [17] J. E. Mark and B. Erman, *Science and Technology of Rubber*: Elsevier Science, 2011.
- [18] N. Rattanasom *et al.*, "Reinforcement of natural rubber with silica/carbon black hybrid filler", *Polymer Testing*, vol. 26, no. 3, pp. 369-377, 2007. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941806002182>
- [19] Struktol, *Rubber Handbook*, 2004.
- [20] M. Caetano. *Agentes antiestáticos - Ciência e Tecnologia da Borracha* [Online]. Disponível em: <https://ctborracha.com/>.
- [21] A. D. Company. (2018). *Urethane 101: All you want to know about polyurethane elastomers and more!* [Online]. Disponível em: <http://www.andersondevelopment.com/pdf/urethane-101.pdf>.
- [22] Wikimedia. *Vulcanization of Polyisoprene* [Online]. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vulcanization of POLYIsoprene V.2.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vulcanization_of_POLYIsoprene_V.2.png). Acedido a 15 de maio de 2018.
- [23] P. K. Freakley, *Rubber Processing and Production Organization*: Plenum Press, 1985.
- [24] B. B. Guerra *et al.*, "Avaliação reológica de elastômeros e suas composições", *Polímeros*, vol. 14, pp. 289-294, 2004. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282004000400017&nrm=iso
- [25] Gomline. (2017). *Case study rheometric report* [Online]. Disponível em: <https://www.gomline.si/case-study-rheometric-report>. Acedido a 15 de maio de 2018.
- [26] A. R. Manufacturing. *Rubber Molding Guide* [Online]. Disponível em: <http://www.amesrubberonline.com/pdf/arm-rubber-molding-guide.pdf>.
- [27] R. J. Crawford, *Plastics engineering*: Pergamon Press, 1987.
- [28] J. Walker, "Elastomer Engineering Guide", Disponível em: https://www.jameswalker.biz/de/pdf_docs/148-elastomer-engineering-guide
- [29] Ebah. *Tecnologia em polímeros* [Online]. Disponível em: <http://www.ebah.pt/content/ABAAAAiP4AD/tecnologia-polimeros?part=3#>. Acedido a 16 de junho de 2018.
- [30] M. A. Wheelans, *Injection Moulding of Rubber*: Butterworths, 1974.
- [31] Necumer. *Necuron 60I* [Online]. Disponível em: <http://necumer.com/index.php/en/products/board-materials/modelling/necuron-60I>. Acedido a 16 de junho de 2018.
- [32] S. S. P. Editora, *Fabricação de matrizes para solado*: SENAI-SP Editora, 2015.
- [33] A. Moldes. *Moldes SBR* [Online]. Disponível em: <http://www.ascmoldes.pt/>. Acedido a 16 de junho de 2018.
- [34] J. R. Davis *et al.*, *Aluminum and Aluminum Alloys*: ASM International, 1993.

- [35] J. G. Kaufman *et al.*, *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*: ASM International, 2004.
- [36] The Aluminum Association [Online]. Disponível em: <http://www.aluminum.org/>. Acedido a 13 de junho de 2018.
- [37] D. G. Altenpohl, *Aluminum: Technology, Applications and Environment: A Profile of a Modern Metal Aluminum from Within*: Wiley, 1998.
- [38] A. I. H. Committee *et al.*, *ASM Handbook: Casting. Volume 15*: ASM International, 2008.
- [39] G. E. Totten and D. S. MacKenzie, *Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes*: CRC Press, 2003.
- [40] G. Menges *et al.*, *How to Make Injection Molds*: Hanser, 2001.
- [41] M. Technology. *Choosing the Right Aluminum Alloy for Production Injection Molds* [Online]. Disponível em: <https://www.moldmakingtechnology.com/careers/choosing-the-right-aluminum-alloy-for-production-injection-molds>. Acedido a 16 de junho de 2018.
- [42] M. Supermarkets. *Differences between aluminium and stainless steel* [Online]. Disponível em: <https://www.metalsupermarkets.com/10-differences-aluminum-stainless-steel/>. Acedido a 16 de junho de 2018.
- [43] M. Warmuzek, *Aluminum-silicon Casting Alloys: An Atlas of Microfractographs*: ASM International, 2004.
- [44] R. Lumley *et al.*, *The role of alloy composition in the heat treatment of aluminum high pressure die castings* vol. 26, 2008.
- [45] P. R. Beeley, *Foundry Technology*: Butterworth Heinemann, 2001.
- [46] B. Zhang *et al.*, "Casting defects in low-pressure die-cast aluminum alloy wheels", *JOM*, vol. 57, no. 11, pp. 36-43, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0025-1>
- [47] I. Ali, "High Pressure Die Casting Defects and Simulation Process by Computer Added Engineering (CAE)," Ryerson University, 2012.
- [48] J. M. G. de Carvalho Ferreira, *Tecnologia da fundição*: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- [49] R. Neto, *Ligas de Alumínio em Fundição*, 1985.
- [50] T. H. Courtney, *Mechanical Behavior of Materials: Second Edition*: Waveland Press, 2005.
- [51] W. F. Smith, *Principles of Materials Science and Engineering*: McGraw-Hill, 1996.
- [52] A. M. A. Mohamed and F. H. Samuel, "A Review on the Heat Treatment of Al-Si-Cu/Mg Casting Alloys ", *IntechOpen*, 2012.
- [53] E. Sjölander and S. Seifeddine, "Optimisation of solution treatment of cast Al-Si-Cu alloys", *Materials & Design*, vol. 31, pp. S44-S49, 2010. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909005895>
- [54] F.-g. Cong *et al.*, "Effect of homogenization treatment on microstructure and mechanical properties of DC cast 7X50 aluminum alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 25, no. 4, pp. 1027-1034, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632615636949>

- [55] H. Yang *et al.*, "Effect of heat treatment and Fe content on the microstructure and mechanical properties of die-cast Al–Si–Cu alloys", *Materials & Design*, vol. 85, pp. 823-832, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127515301441>
- [56] A. Niklas *et al.*, "Effect of solution heat treatment on gas porosity and mechanical properties in a die cast step test part manufactured with a new AlSi10MnMg(Fe) secondary alloy", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 667, pp. 376-382, 2016. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509316305202>
- [57] E. Sjölander and S. Seifeddine, "The heat treatment of Al–Si–Cu–Mg casting alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 10, pp. 1249-1259, 2010. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013610000993>
- [58] A. Santos, "Simulação de Processos Tecnológicos," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [59] Anylogic. *Use of simulation* [Online]. Disponível em: <https://www.anylogic.com/use-of-simulation/>. Acedido a 16 de junho de 2018.
- [60] P. Melo, "Simulação do enchimento e solidificação de peças em ligas de cobre por fundição de baixa pressão," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [61] D. Systèmes. *3DS Academy* [Online]. Disponível em: <https://academy.3ds.com/>. Acedido a 14 de junho de 2018.
- [62] E. Group. *Casting Simulation Suite* [Online]. Disponível em: <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-manufacturing/casting-simulation-software>. Acedido a 14 de junho de 2018.
- [63] D. Systèmes. *SolidWorks* [Online]. Disponível em: <https://www.solidworks.com/>.
- [64] *Affimet* [Online]. Disponível em: <http://www.affimet.fr>. Acedido a 16 de junho de 2018.
- [65] R. M. M. Duarte, "Desenvolvimento do processo de fundição por baixa pressão para a obtenção de puxadores em ligas de alumínio," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [66] D. d. S. Ferreira, "Fundição de Torneiras por Baixa Pressão," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.
- [67] A. I. H. Committee, *ASM Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals. Volume 2*: ASM International, 1992.
- [68] Tekscan. *FlexiForce HT201 Sensor* [Online]. Disponível em: <https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/ht201>. Acedido a 9 de junho de 2018.

Anexo A: Provetes utilizados nos ensaios de tração

Os provetes utilizados nos ensaios de tração seguem a norma ISSO 6892-1 2012. De seguida encontra-se o seu desenho técnico.



escala (2 : 1)

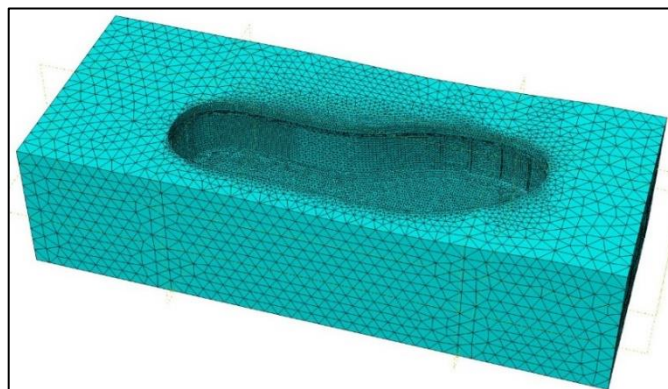
Designed by Figueiredo	Checked by	Approved by	Date	Date
			28-02-2013	
Provete tração cilíndrico 5			Edition	Sheet 1 / 1



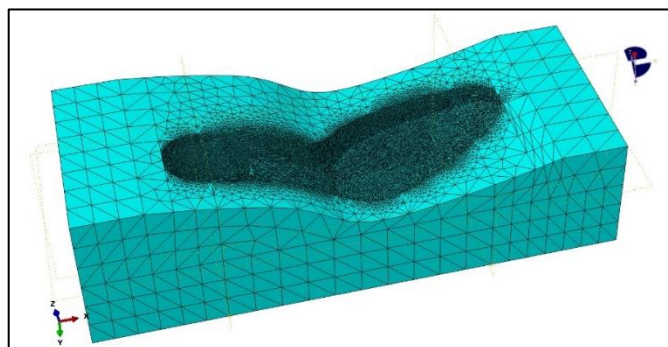
Anexo B: Malhas utilizadas para as simulações computacionais

Para a realização das simulações computacionais foi necessário definir as malhas no Abaqus. Como as regiões mais solicitadas seriam as das cavidades, foram definidas malhas bastante refinadas nessas zonas, enquanto que em zonas mais afastadas esta foi mais grosseira, de modo a diminuir o esforço computacional.

Nas figuras 62 a) e b) encontram-se as malhas definidas para o molde META 35,5 e para o molde DIVA 38, respetivamente. Ambas as malhas são exclusivamente tetraédricas, com crescimento assimétrico de 1,5. O molde META 35,5 possui 143749 elementos e 230933 nós, enquanto que o molde DIVA 38 contém 433277 elementos e 683562 nós.



a)



b)

Figura 62 – Malhas definidas no *Abaqus* para o molde META 35,5 (a), com 143749 elementos e 230933 nós, e para o molde DIVA 38 (b), com 433277 elementos e 683562 nós

Anexo C: Curvas de tensão deformação dos provetes extraídos do molde META 35,5

Nas figuras 63 e 64 encontram-se as curvas tensão-deformação obtidas através de ensaios de tração a provetes extraídos da base do molde META 35,5 no estado bruto de vazamento. Nas figuras 65, 66, e 67 encontram-se as curvas para os provetes extraídos do mesmo molde, mas sujeitos a tratamento térmico.

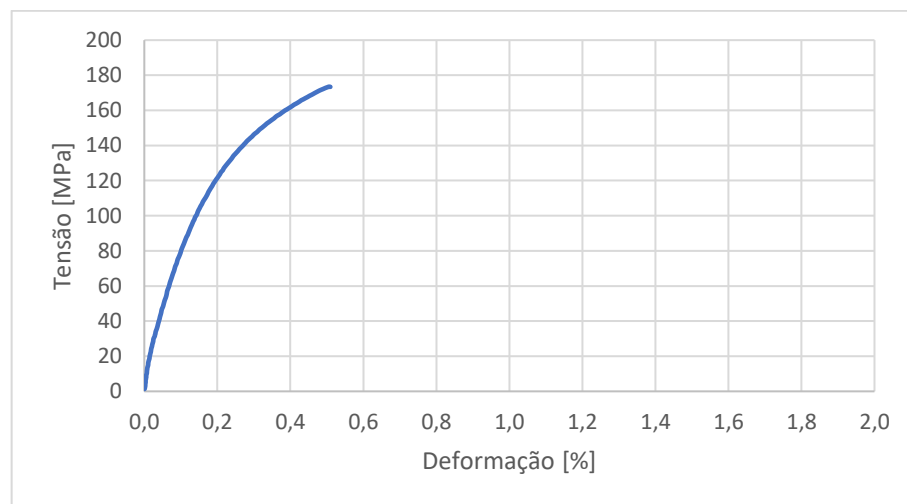


Figura 63 – Curva tensão-deformação do Provede 1, extraído da base do molde META 35,5 (estado bruto de vazamento). $E = 71,40$ GPa; $\sigma_e = 166,00$ MPa; $\sigma_r = 173,39$ MPa; Extensão após rotura = 0,27 %

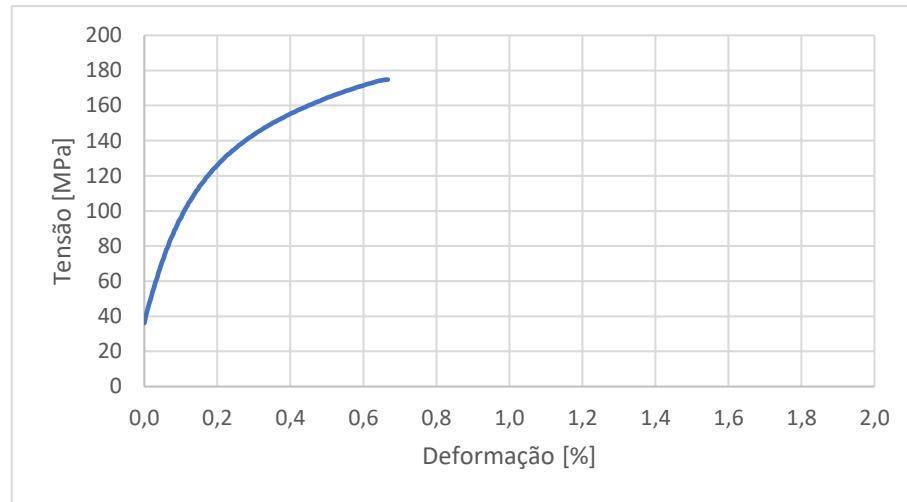


Figura 64 – Curva tensão-deformação do Provete 2, extraído da base do molde META 35,5 (estado bruto de vazamento). $E = 71,48 \text{ GPa}$; $\sigma_e = 167,50 \text{ MPa}$; $\sigma_r = 174,77 \text{ MPa}$; Extensão após rotura = $0,42 \%$

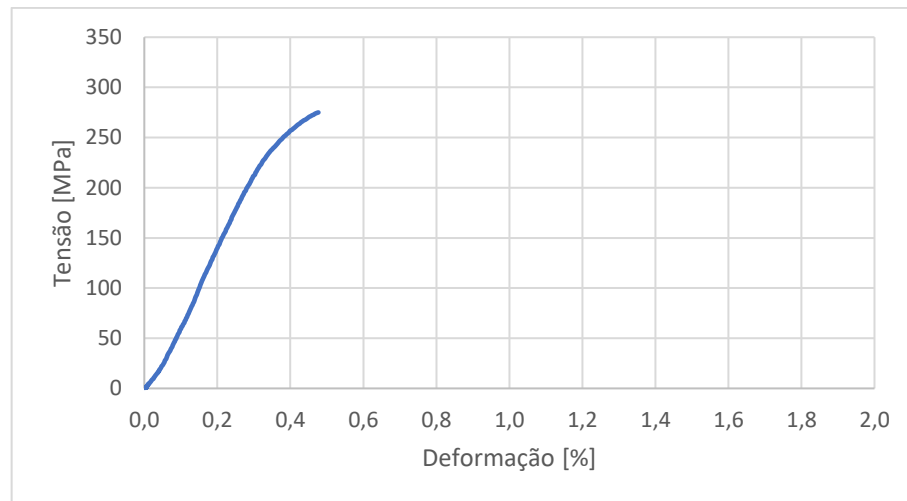


Figura 65 – Curva tensão-deformação do Provete 3, extraído da base do molde META 35,5 (tratado termicamente). $E = 80,77 \text{ GPa}$; $\sigma_e = 275,00 \text{ MPa}$; $\sigma_r = 275,00 \text{ MPa}$; Extensão após rotura = $0,14 \%$

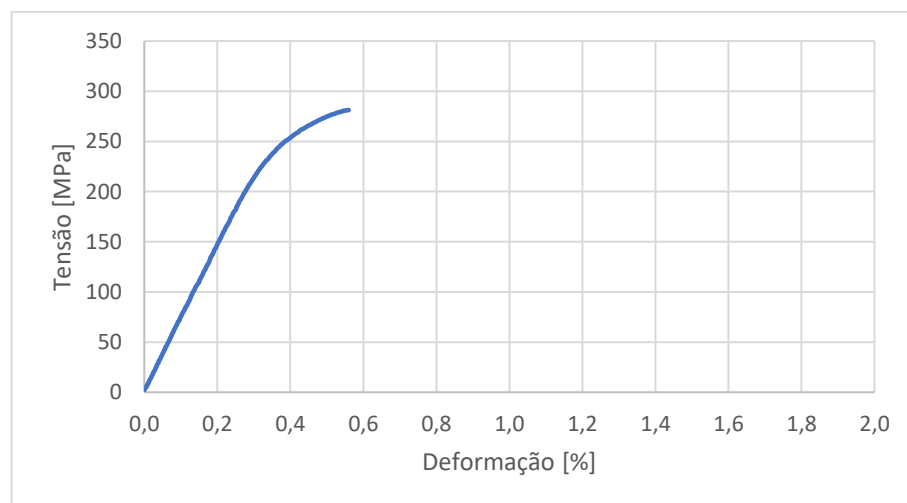


Figura 66 - Curva tensão-deformação do Provete 4, extraído da base do molde META 35,5 (tratado termicamente). $E = 74,60 \text{ GPa}$; $\sigma_e = 281,29 \text{ MPa}$; $\sigma_r = 281,29 \text{ MPa}$; Extensão após rotura = $0,18 \%$

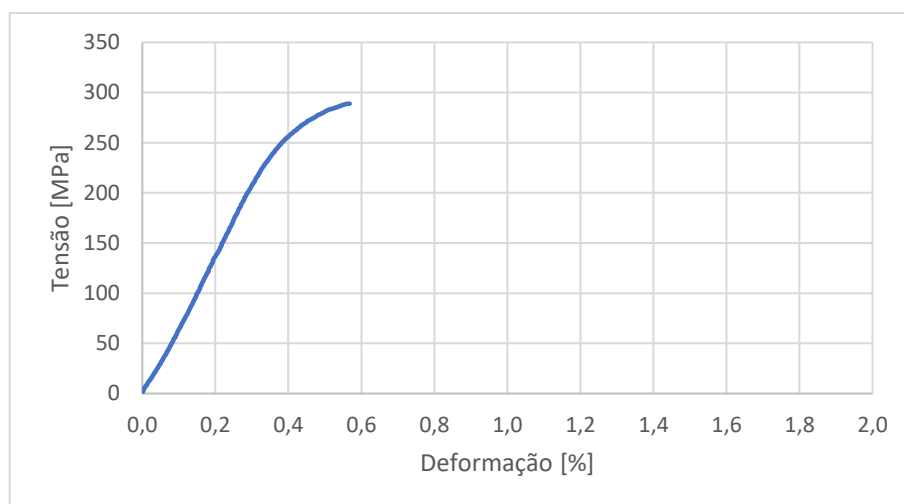


Figura 67 – Curva tensão-deformação do Provet 5, extraído da base do molde META 35,5 (tratado termicamente). $E = 74,32$ GPa; $\sigma_e = 288,81$ MPa; $\sigma_r = 288,81$ MPa; Extensão após rotura = 0,18 %

Anexo D: Curvas de tensão-deformação dos provetes extraídos do molde DIVA 38 no estado bruto de vazamento

Nas figuras 68 a 71 encontram-se as curvas tensão-deformação obtidas através de ensaios de tração a provetes extraídos das regiões inferiores da base do molde DIVA 38 no estado bruto de vazamento. Nas figuras 72 a 75 encontram-se as curvas relativas aos provetes extraídos das regiões superiores da base deste molde, também no estado bruto de vazamento.

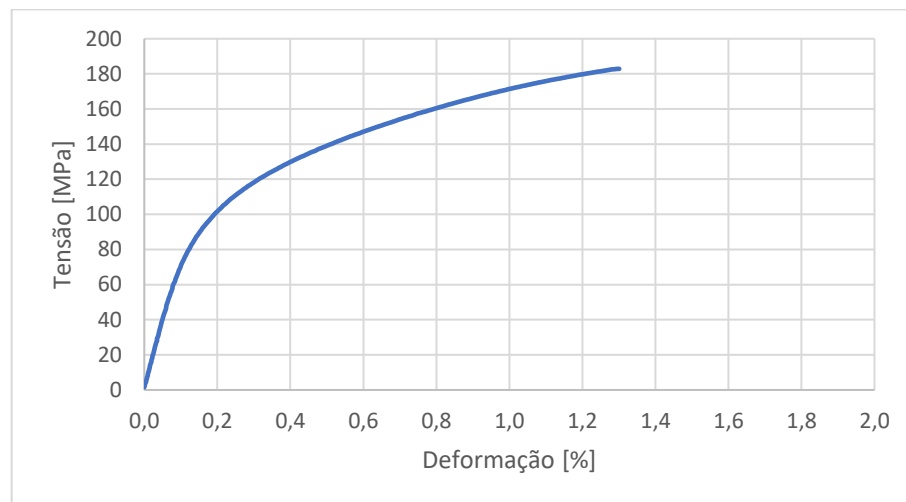


Figura 68 – Curva tensão-deformação do provete II, extraído da região inferior da base do molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 71,74 \text{ GPa}$; $\sigma_e = 127,50 \text{ MPa}$; $\sigma_r = 182,86 \text{ MPa}$; Extensão após rotura = 1,05 %

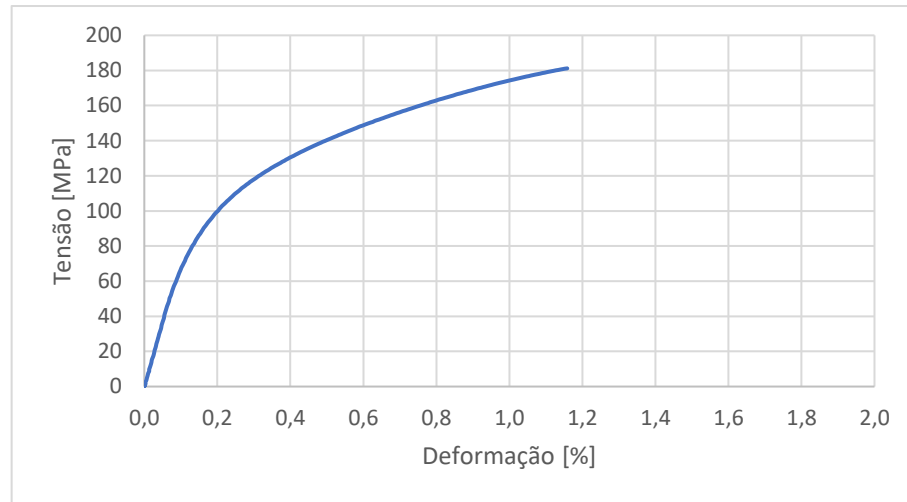


Figura 69 – Curva tensão-deformação do provete 2I, extraído da região inferior da base do molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 68,35$ GPa; $\sigma_e = 129,50$ MPa; $\sigma_r = 181,18$ MPa; Extensão após rotura = 0,90 %

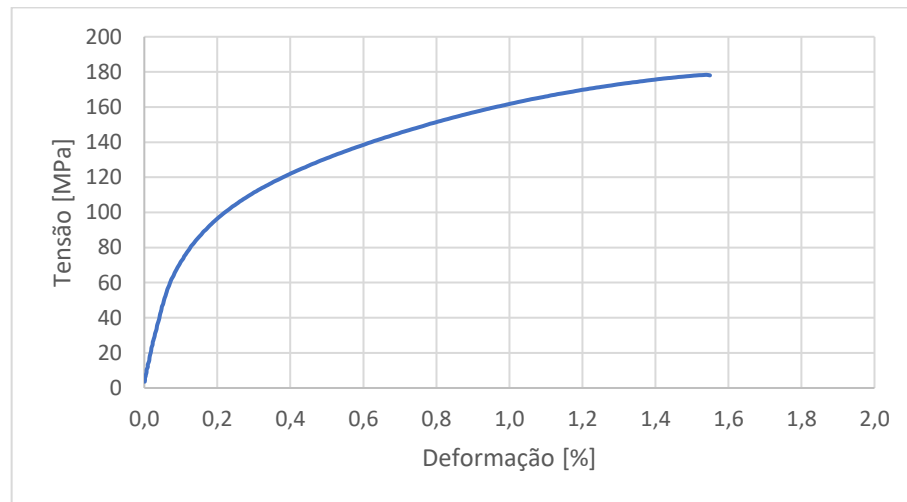


Figura 70 – Curva tensão-deformação do provete 5I, extraído da região inferior da base do molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 75,48$ GPa; $\sigma_e = 117,50$ MPa; $\sigma_r = 178,01$ MPa; Extensão após rotura = 1,31 %

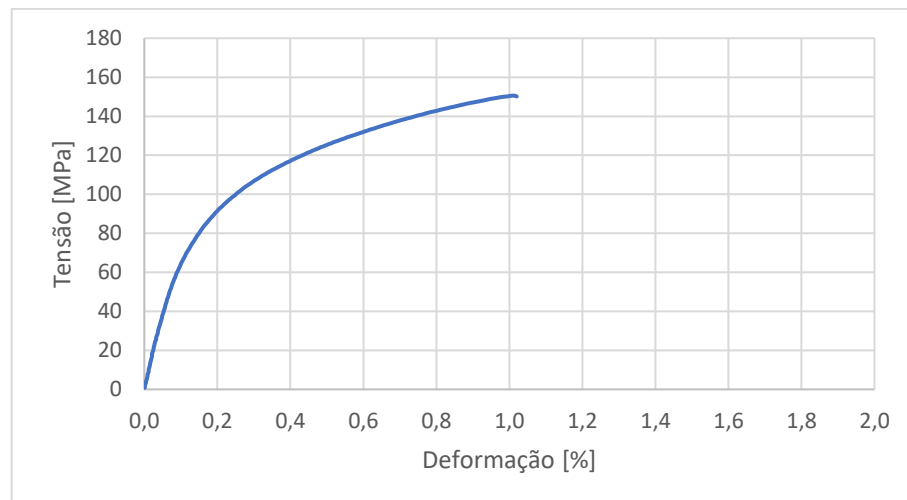


Figura 71 – Curva tensão-deformação do provete 6I, extraído da região inferior da base do molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 61,09$ GPa; $\sigma_e = 116,50$ MPa; $\sigma_r = 150,14$ MPa; Extensão após rotura = 0,77 %

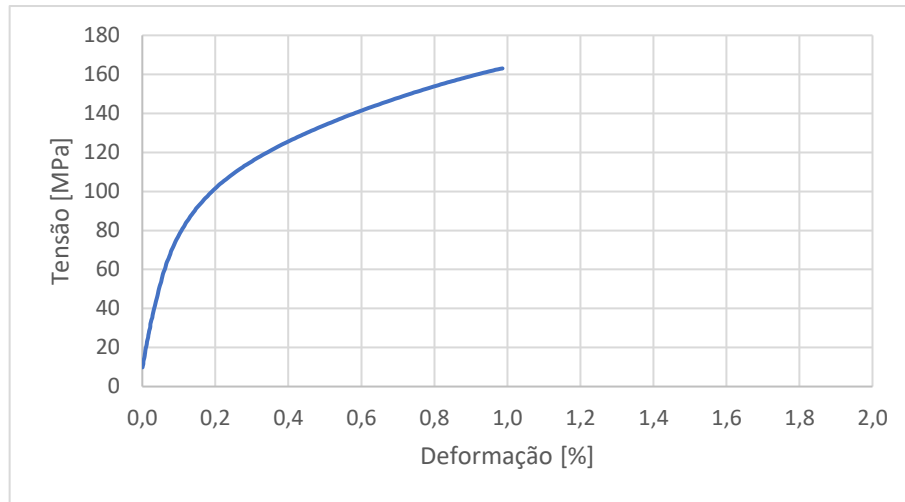


Figura 72 – Curva tensão-deformação do provete 1S, extraído da região superior da base molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 78,43$ GPa; $\sigma_e = 125,00$ MPa; $\sigma_r = 163,04$ MPa; Extensão após rotura = 0,76 %

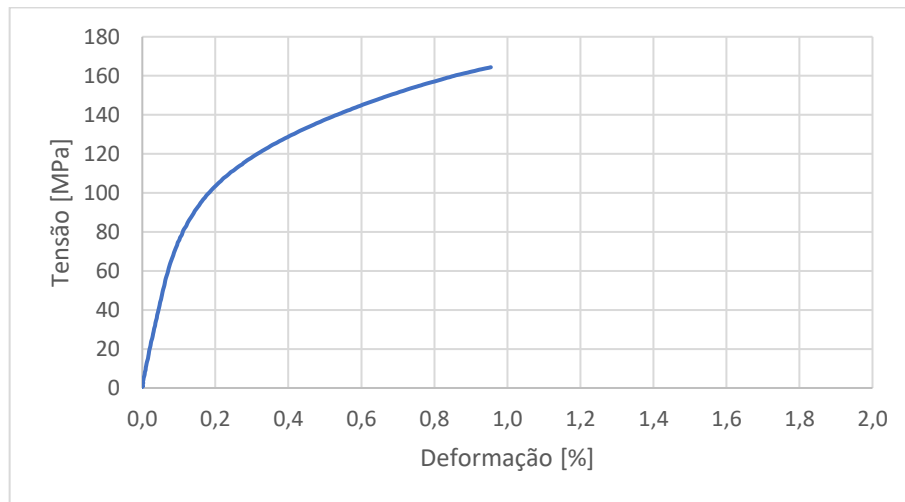


Figura 73 – Curva tensão-deformação do provete 2S, extraído da região superior da base molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 80,55$ GPa; $\sigma_e = 124,50$ MPa; $\sigma_r = 164,38$ MPa; Extensão após rotura = 0,75 %

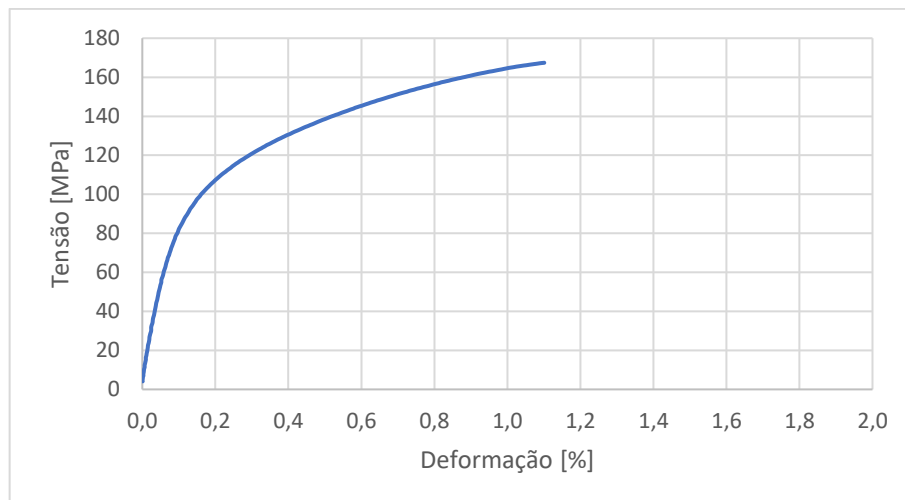


Figura 74 – Curva tensão-deformação do provete 5S, extraído da região superior da base molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 88,92$ GPa; $\sigma_e = 125,00$ MPa; $\sigma_r = 167,41$ MPa; Extensão após rotura = 0,91 %

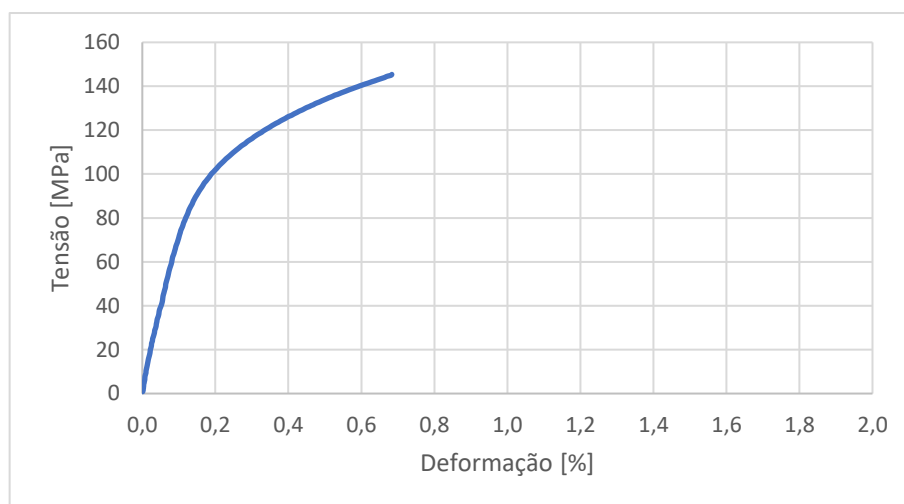


Figura 75 – Curva tensão-deformação do provete 6S, extraído da região superior da base molde DIVA 38 (estado bruto de vazamento). $E = 70,83$ GPa; $\sigma_e = 125,00$ MPa; $\sigma_r = 145,48$ MPa; Extensão após rotura = 0,48 %

Anexo E: Curvas de tensão-deformação dos provetes extraídos do molde DIVA 38 sujeitos a um tratamento térmico T6

Nas figuras 76, 77 e 78 encontram-se as curvas tensão-deformação obtidas através de ensaios de tração a provetes extraídos das regiões inferiores da base do molde DIVA 38 sujeitos a um tratamento térmico. Nas figuras 79, 80 e 81 encontram-se as curvas relativas aos provetes extraídos das regiões superiores da base deste molde, também sujeitos a um tratamento térmico.

Tal como foi referido, não foi possível obter os gráficos dos provetes 3I e 4S, uma vez que o extensómetro não se manteve corretamente colocado ao longo de todo o ensaio.

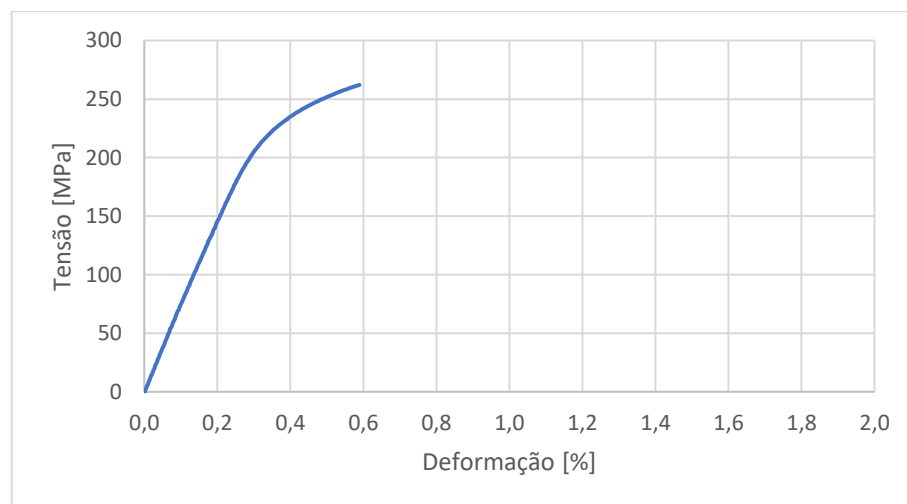


Figura 76 – Curva tensão-deformação do provete 4I, extraído da região inferior da base molde DIVA 38 (tratado termicamente). $E = 72,30 \text{ GPa}$; $\sigma_e = 259,00 \text{ MPa}$; $\sigma_r = 262,04 \text{ MPa}$; Extensão após rotura = 0,23 %

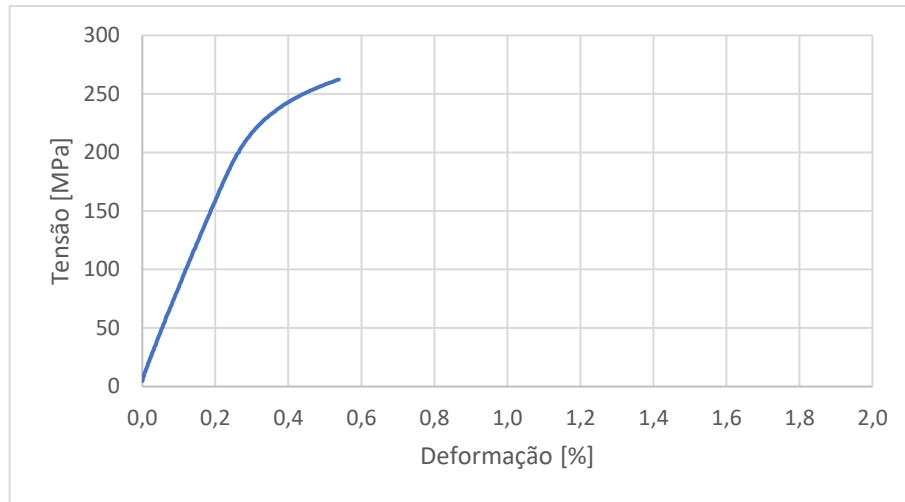


Figura 77 – Curva tensão-deformação do provete 7I, extraído da região inferior da base molde DIVA 38 (tratado termicamente). $E = 76,29$ GPa; $\sigma_e = 262,25$ MPa; $\sigma_r = 262,25$ MPa; Extensão após rotura = 0,20 %

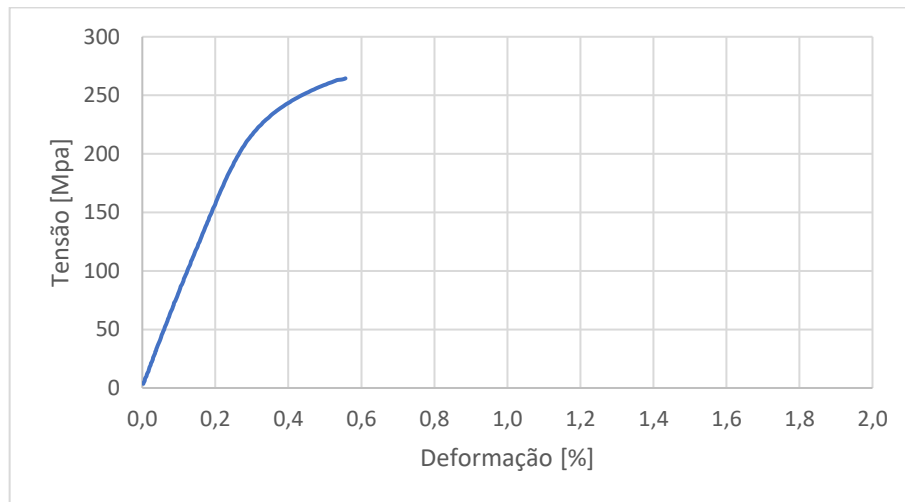


Figura 78 – Curva tensão-deformação do provete 8I, extraído da região inferior da base molde DIVA 38 (tratado termicamente). $E = 78,40$ GPa; $\sigma_e = 263,00$ MPa; $\sigma_r = 264,46$ MPa; Extensão após rotura = 0,22 %

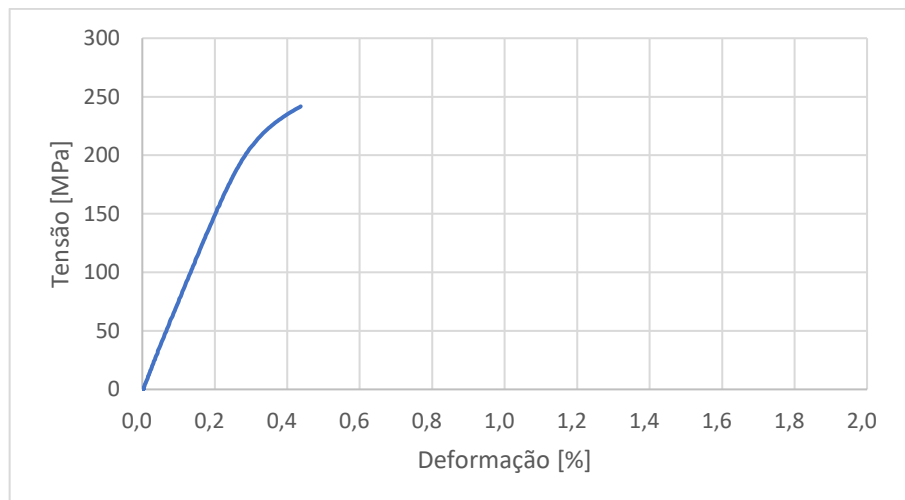


Figura 79 – Curva tensão-deformação do provete 3S, extraído da região superior da base molde DIVA 38 (tratado termicamente). $E = 73,97$ GPa; $\sigma_e = 241,74$ MPa; $\sigma_r = 241,74$ MPa; Extensão após rotura = 0,11 %

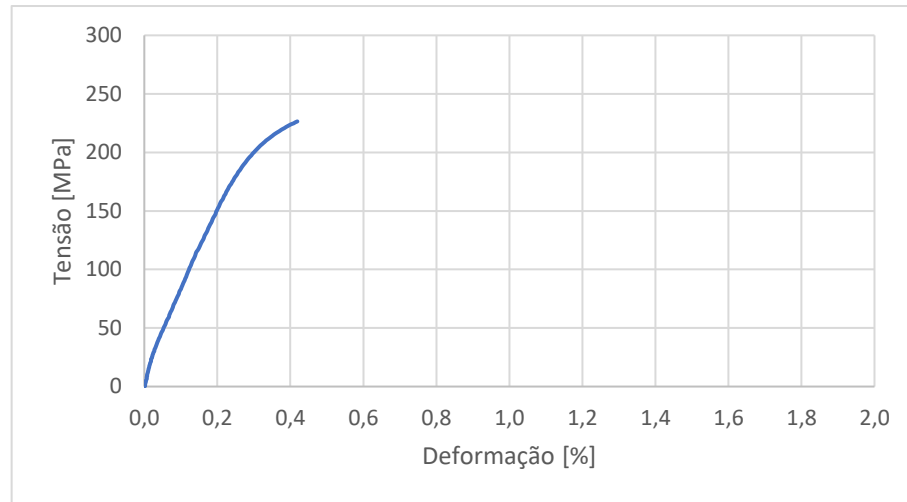


Figura 80 – Curva tensão-deformação do provete 7S, extraído da região superior da base molde DIVA 38 (tratado termicamente). $E = 71,71$ GPa; $\sigma_e = 226,47$ MPa; $\sigma_r = 226,47$ MPa; Extensão após rotura = 0,10 %

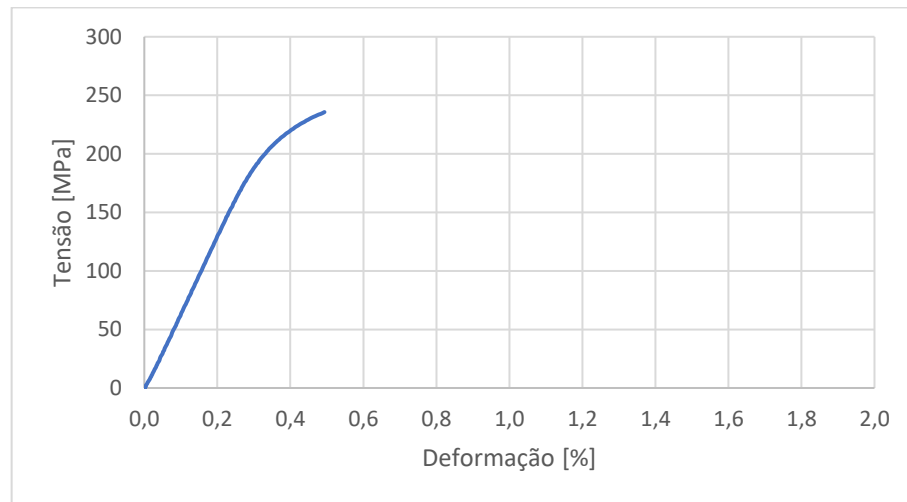


Figura 81 – Curva tensão-deformação do provete 8S, extraído da região superior da base molde DIVA 38 (tratado termicamente). $E = 66,57$ GPa; $\sigma_e = 236,29$ MPa; $\sigma_r = 236,29$ MPa; Extensão após rotura = 0,14 %