



**Élio Filipe Valentim
Neto**

**Otimização do Processo de Moldação por Injeção
Assistida a Gás**



**Élio Filipe Valentim
Neto**

**Otimização do Processo de Moldação por Injeção
Assistida a Gás**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Prof. Doutor Rui António da Silva Moreira
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor Mário António Simões Correia
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria – Instituto Politécnico de Leiria

Orientadora

Prof.^a Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Agradeço à Professora Doutora Mónica Correia pela orientação e coordenação prestada ao longo deste trabalho. À empresa Tetramold por disponibilizar toda a informação necessária para o desenvolvimento deste trabalho. À Doutora Engenheira Tatiana Zhiltsova pelo apoio no Moldflow®. À Inês Matos por estar sempre disponível para ajudar. Aos meus amigos, principalmente ao Mark Neves, Carlos Martinho e Carlos Morgado, por aturarem e me ajudarem em todas as etapas desta vida académica. Por fim, mas não por último, agradeço do fundo do meu coração à minha família, ao meu pai, a minha mãe e ao meu irmão, pelo apoio que me deram durante estes anos e por estarem sempre presentes nos bons e nos menos bons momentos.

Palavras-chave

Moldação por injeção assistida a gás, MIAG, *Full Shot*, Poliamida, Fibra de vidro, Compósito, Exposição da fibra, Tensões residuais, Simulação numérica

Resumo

A moldação por injeção assistida a gás tem sido uma das mais importantes técnicas para a produção de produtos poliméricos. Em comparação com a moldação convencional, este processo tem a vantagem de permitir a produção de peças ocas e, portanto, consideravelmente mais leves. Porém, a introdução de um gás inerte para o interior da cavidade moldante, durante o ciclo de moldação, não é desprovida de desafios e há todo um conjunto de defeitos de produção que devem ser acautelados, nomeadamente aqueles que se prendem com a otimização de condições de processamento na interface polímero/gás. Todavia, a moldação assistida a gás detém um conjunto de vantagens, as quais se prendem essencialmente com a versatilidade de processamento de uma vasta panóplia de materiais poliméricos, pois é possível processar desde termoplásticos de grande consumo, de engenharia, de alto desempenho, bem como materiais compósitos. No entanto, aquando do processamento de polímeros reforçados, é fundamental o correto ajuste dos parâmetros de processamento devido à anisotropia dos constituintes dos compósitos e às implicações que a mesma detém na fusão do polímero e durante as diferentes fases do ciclo de moldação, causando tensões residuais. Assim a utilização de compósitos, quer na moldação convencional ou na assistida a gás, pode levar ao aparecimento de novos defeitos, como a exposição das fibras nas superfícies das peças moldadas. Desta forma, o objetivo principal desta dissertação passa por aprofundar a compreensão do processo de obtenção de peças em material compósito por moldação assistida a gás, no sentido estabelecer metodologias de processamento conducentes à resolução do defeito de exposição da fibra. Para tal recorreu-se à simulação numérica para efetuar um estudo paramétrico deste processo de moldação, com o intuito de estabelecer a influência relativa de um conjunto de variáveis de processamento que a literatura destacou como detentores da maior influência neste defeito. De entre as variáveis estudadas, foi possível verificar que o aumento de temperatura da ferramenta moldante e do fundido contribuem para uma redução da quantidade de tensões residuais, contribuindo para a redução da exposição da fibra nas superfícies das peças obtidas.

Keywords

Gas assisted injection molding, GAIM, Full Shot, Polyamide, Glass fiber, Composite, Fiber exposure, Residual stress, Numeric simulation

Abstract

The gas assisted injection moulding has been one of the most important techniques for the production of polymeric parts. Compared with the conventional injection moulding, this process has the advantage of allowing for the production of hollowed parts and, therefore, considerably lighter ones. However, the introduction of an inert gas into the mould cavity, during the moulding cycle, is not without challenges and there is a whole series of production defects which must be accounted for, in particular those which are related with the optimization of processing conditions at the interface polymer/ gas. Although, gas assisted moulding has a number of advantages, which are mainly related with the versatility of processing of a wide range of polymeric materials, such as: high consumption, engineering or high performance thermoplastics as well as composite materials. However, during processing of reinforced polymers, the correct adjustment of the processing parameters is fundamental due to the anisotropy of the composite system and the implications that it holds in the polymer melt during the moulding cycle, hence inducing residual stresses. Thus, the use of composites, in conventional moulding or in gas assisted moulding, may lead to new defects, such as fibre exposure on the surfaces of moulded parts. Thus, the main objective of this dissertation involves a deeper understanding of the process of obtaining parts in composite material by gas assisted moulding, in order to establish processing methodologies in what concerns the resolution of the fibre exposure defect. To this end, a numerical simulation methodology based upon a parametric study of the moulding process is proposed, in order to establish the relative influence of several processing parameters on this particular defect. Among the studied variables, it was found that a rise in the temperature of the mould and of the melt contribute to a reduction in the amount of the overall residual stresses, hence reducing the fibre exposure on the surfaces of the obtained parts.

Índice

Lista de Figuras	III
Lista de Tabelas	VII
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Moldação por Injeção Convencional	1
1.2 Moldação por Injeção Assistida a Gás.....	2
1.3 Revisão Bibliográfica.....	4
1.4 Síntese	12
1.5 Objetivos	13
1.6 Estrutura da Dissertação	13
Capítulo 2 - Caso de Estudo	15
2.1 Peça em Estudo.....	15
2.2 Material.....	17
2.3 Molde	18
2.3.1 Cavidade.....	18
(1) Sistema de Injeção	18
(2) Sistema Anti-Retorno.....	19
(3) Sistema de Injeção do Gás	20
(4) Sistema de Refrigeração.....	21
2.3.2 Bucha.....	22
(1) Movimentos.....	22
(2) Sistema de Refrigeração.....	23
(3) Sistema de Extração	24
(4) Cavidades Não Moldantes e Sistema de Alimentação.....	25
2.3.3 Molde Fechado.....	26
2.4 Máquina de Injeção	26
Capítulo 3 - Modelação Numérica do Processo de Moldação por Injeção Assistida a Gás	29
3.1 Ferramentas de simulação numérica	29
3.2 Modelação Numérica da Peça em Estudo	31
3.2.1 Modelo e Requisitos Técnicos.....	32
3.2.2 Preparação do Modelo.....	35

Capítulo 4 - Análise Numérica da Peça em Estudo.....	47
4.1 Simulação Numérica da Moldação Experimental	47
4.1.1 Análise dos Requisitos Técnicos.....	55
4.2 Simulações do Estudo Paramétrico.....	61
4.2.1 Análise da Temperatura do Molde	63
4.2.2 Análise da Pressão de Injeção do Gás.....	80
4.2.3 Análise do Atraso da Injeção do Gás.....	88
4.2.4 Análise da Temperatura do Fundido	105
4.3 Simulações de Otimização.....	121
Capítulo 5 - Conclusões e Trabalho Futuro	143
5.1 Conclusões.....	143
5.2 Trabalho Futuro	144
Referências Bibliográficas	145
Anexos	149

Lista de Figuras

Figura 1. Etapas do ciclo de moldação – adaptado de [3]	2
Figura 2. Variante <i>short shot</i> da moldação assistida a gás [4].....	3
Figura 3. Geometria da peça estudada [6]	5
Figura 4. Amostras produzidas durante o estudo – adaptado de [7].....	7
Figura 5. Geometria e dimensões das peças ensaiadas [9]	8
Figura 6. Perfis ensaiados – adaptado de [10].....	10
Figura 7. Perfis ensaiados – adaptado de [11].....	11
Figura 8. Exterior do automóvel [13].....	16
Figura 9. Puxador instalado na porta do veículo [14].....	16
Figura 10. Peça ensaiada	17
Figura 11. Modelação da peça	17
Figura 12. Sistema de injeção.....	19
Figura 13. Sistema anti retorno.....	20
Figura 14. Ponto de injeção do gás.....	21
Figura 15. Sistema de refrigeração da cavidade	22
Figura 16. Movimentos do molde.....	23
Figura 17. Sistema de refrigeração da bucha.....	24
Figura 18. Sistema de extração	25
Figura 19. Cavidade não moldante e sistema de alimentação	26
Figura 20. Exterior do molde	26
Figura 21. Distância entre barras da máquina de injeção.....	27
Figura 22. Peça defeituosa usando a moldação assistida a gás (<i>Blow-trough</i>) - adaptado de [19].....	31
Figura 23. Desenho técnico da peça em estudo	33
Figura 24. Detalhe da exposição da fibra da peça	34
Figura 25. As diferentes zonas do controlo dimensional	35
Figura 26. Modelo CAD	36
Figura 27. Os diferentes tipos de malha do <i>software</i> Autodesk® Moldflow Insight 2012 - adaptado de [22]–[24]	37
Figura 28. Malha <i>Dual Domain</i>	38
Figura 29. Detalhe da malha 3D ao longo da espessura.....	39
Figura 30. Geometria do sistema de injeção do modelo numérico	40
Figura 31. Geometria da cavidade não moldante.....	41
Figura 32. Localização dos pontos de injeção de gás e do fundido	42
Figura 33. Propriedades reológicas do material polimérico	43
Figura 34. Tempo de enchimento.....	49
Figura 35. Força de fecho	50
Figura 36. Temperatura da frente do escoamento do fundido.....	50
Figura 37. Tensões de corte.....	51
Figura 38. Contração volumétrica da peça simulada.....	52
Figura 39. Bolsas de ar numa secção da peça em estudo.....	53

Figura 40. Linhas de soldadura do modelo numérico	53
Figura 41. Percentagem de volume de gás <i>versus</i> tempo.....	54
Figura 42. Volume de gás na peça simulada	55
Figura 43. Área selecionada para a realização das análises	57
Figura 44. Deformações da peça em estudo	58
Figura 45. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico	60
Figura 46. Tensor de orientação das fibras na zona analisada.....	61
Figura 47. Tempo de enchimento (Simulação 1).....	64
Figura 48. Temperatura da frente do escoamento do fundido (Simulação 1)	65
Figura 49. Comparação da Temperatura da frente do escoamento do fundido (Simulação 1).....	65
Figura 50. Contração volumétrica da peça simulada (Simulação 1).....	66
Figura 51. Linhas de soldadura do modelo numérico (Simulação 1)	67
Figura 52. Percentagem de volume de gás <i>versus</i> tempo (Simulação 1).....	67
Figura 53. Volume de gás na peça simulada (Simulação 1)	68
Figura 54. Deformações da peça em estudo (Simulação 1)	69
Figura 55. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 1).....	71
Figura 56. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 1).....	71
Figura 57. Tempo de enchimento (Simulação 2).....	72
Figura 58. Temperatura da frente do escoamento do fundido (Simulação 2)	73
Figura 59. Comparação da Temperatura da frente do escoamento do fundido (Simulação 2).....	74
Figura 60. Contração volumétrica da peça simulada (Simulação 2).....	75
Figura 61. Linhas de soldadura do modelo numérico (Simulação 2)	75
Figura 62. Percentagem de volume de gás <i>versus</i> tempo (Simulação 2).....	76
Figura 63. Volume de gás na peça simulada (Simulação 2)	76
Figura 64. Deformações da peça em estudo (Simulação 2)	77
Figura 65. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 2).....	79
Figura 66. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 2).....	79
Figura 67. Tempo de enchimento (Simulação 3).....	81
Figura 68. Força de fecho (Simulação 3).....	82
Figura 69. Contração volumétrica da peça simulada (Simulação 3).....	83
Figura 70. Percentagem de volume de gás <i>versus</i> tempo (Simulação 3).....	84
Figura 71. Volume de gás na peça simulada (Simulação 3)	84
Figura 72. Deformações da peça em estudo (Simulação 3)	85
Figura 73. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 3).....	87
Figura 74. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 3).....	87
Figura 75. Tempo de enchimento (Simulação 4).....	89
Figura 76. Contração volumétrica da peça simulada (Simulação 4)	90
Figura 77. Linhas de soldadura do modelo numérico (Simulação 4)	90
Figura 78. Percentagem de volume de gás <i>versus</i> tempo (Simulação 4).....	91
Figura 79. Volume de gás na peça simulada (Simulação 4)	91

Figura 80. Deformações da peça em estudo (Simulação 4)	92
Figura 81. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 4)	94
Figura 82. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 4)	94
4)	94
Figura 83. Tempo de enchimento (Simulação 5).....	95
Figura 84. Percentagem de volume de gás <i>versus</i> tempo (Simulação 5).....	96
Figura 85. Volume de gás na peça simulada (Simulação 5)	96
Figura 86. Deformações da peça em estudo (Simulação 5)	97
Figura 87. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 5)	99
Figura 88. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 5)	99
5)	99
Figura 89. Tempo de enchimento (Simulação 6).....	100
Figura 90. Percentagem de volume de gás <i>versus</i> tempo (Simulação 6).....	101
Figura 91. Volume de gás na peça simulada (Simulação 6)	101
Figura 92. Deformações da peça em estudo (Simulação 6)	102
Figura 93. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 6)	104
Figura 94. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 6)	104
6)	104
Figura 95. Tempo de enchimento (Simulação 7).....	106
Figura 96. Força de fecho (Simulação 7).....	106
Figura 97. Temperatura da frente do escoamento do fundido (Simulação 7)	107
Figura 98. Tensões de corte (Simulação 7)	108
Figura 99. Contração volumétrica da peça simulada (Simulação 7).....	108
Figura 100. Percentagem de volume de gás <i>versus</i> tempo (Simulação 7).....	109
Figura 101. Volume de gás na peça simulada (Simulação 7)	110
Figura 102. Deformações da peça em estudo (Simulação 7)	111
Figura 103. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 7)	112
Figura 104. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 7).....	113
Figura 105. Tempo de enchimento (Simulação 8).....	114
Figura 106. Temperatura da frente do escoamento do fundido (Simulação 8)	115
Figura 107. Tensões de corte (Simulação 8).....	115
Figura 108. Linhas de soldadura do modelo numérico (Simulação 8)	116
Figura 109. Percentagem de volume de gás <i>versus</i> tempo (Simulação 8).....	117
Figura 110. Volume de gás na peça simulada (Simulação 8)	117
Figura 111. Deformações da peça em estudo (Simulação 8)	118
Figura 112. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 8)	120
Figura 113. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 8).....	120
Figura 114. Tempo de enchimento (Otimização 1).....	122
Figura 115. Temperatura da frente do escoamento do fundido (Otimização 1)	123
Figura 116. Tensões de corte (Otimização 1)	124
Figura 117. Linhas de soldadura do modelo numérico (Otimização 1)	124
Figura 118. Percentagem de volume de gás <i>versus</i> tempo (Otimização 1).....	125
Figura 119. Volume de gás na peça simulada (Otimização 1)	125

Figura 120. Deformações da peça em estudo (Otimização 1)	126
Figura 121. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Otimização 1).....	128
Figura 122. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Otimização 1).....	128
Figura 123. Tempo de enchimento (Otimização 2).....	129
Figura 124. Força de fecho (Otimização 2).....	130
Figura 125. Contração volumétrica da peça simulada (Otimização 2)	131
Figura 126. Percentagem de volume de gás <i>versus</i> tempo (Otimização 2).....	132
Figura 127. Volume de gás na peça simulada (Otimização 2)	132
Figura 128. Deformações da peça em estudo (Otimização 2)	133
Figura 129. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Otimização 2).....	135
Figura 130. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Otimização 2).....	135
Figura 131. Tempo de enchimento (Otimização 3).....	136
Figura 132. Percentagem de volume de gás <i>versus</i> tempo (Otimização 3).....	137
Figura 133. Volume de gás na peça simulada (Otimização 3)	138
Figura 134. Deformações da peça em estudo (Otimização 3)	139
Figura 135. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Otimização 3).....	140
Figura 136. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Otimização 3).....	141

Lista de Tabelas

Tabela 1. Características do polímero usado.....	18
Tabela 2. Caraterísticas da malha <i>Dual Domain</i>	38
Tabela 3. Propriedades do Akulon® K224 HGS6 Natl	43
Tabela 4. Condições de processamento recomendadas para o Akulon® K224 HGS6 Natl	43
Tabela 5. Parâmetros de processamento da simulação numérica da moldação experimental	48
Tabela 6. Tensões de corte para alguns polímeros – adaptado de [27]	51
Tabela 7. Controlo dimensional da peça ensaiada no molde existente	56
Tabela 8. Controlo dimensional da simulação da peça ensaiada	58
Tabela 9. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada	60
Tabela 10. Simulações do estudo paramétrico	63
Tabela 11. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 1)	69
Tabela 12. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 1)	70
Tabela 13. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 2)	77
Tabela 14. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 2)	78
Tabela 15. Síntese dos resultados das simulações numéricas 1 e 2	80
Tabela 16. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 3)	85
Tabela 17. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 3)	86
Tabela 18. Síntese dos resultados da simulação numérica 3	88
Tabela 19. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 4)	92
Tabela 20. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 4)	93
Tabela 21. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 5)	97
Tabela 22. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 5)	98
Tabela 23. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 6)	102
Tabela 24. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 6)	103
Tabela 25. Síntese dos resultados das simulações numéricas 4, 5 e 6	105
Tabela 26. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 7)	110
Tabela 27. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 7)	112
Tabela 28. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 8)	118
Tabela 29. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 8)	119
Tabela 30. Síntese dos resultados das simulações numéricas 7 e 8	121
Tabela 31. Simulações de otimização	122

Tabela 32. Comparação de diferentes peças analisadas (Otimização 1).....	126
Tabela 33. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Otimização 1).....	127
Tabela 34. Comparação de diferentes peças analisadas (Otimização 2).....	133
Tabela 35. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Otimização 2).....	134
Tabela 36. Comparação de diferentes peças analisadas (Otimização 3).....	138
Tabela 37. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Otimização 3).....	140
Tabela 38. Síntese dos resultados das simulações de otimização 1, 2 e 3.....	142

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo é dedicado à introdução dos processos de moldação por injeção convencionais e não convencionais, à revisão bibliográfica referente a estes processos, bem como aos objetivos a atingir e estrutura desta dissertação.

1.1 Moldação por Injeção Convencional

Atualmente a obtenção de produtos plásticos em materiais poliméricos pode ser conseguida através de um processo de moldação, principalmente através da moldação por injeção. Este processo, que é implementado mundialmente, consome aproximadamente 32 % de todo o material polimérico produzido [1]. A moldação por injeção é um dos processos mais versáteis na produção de peças poliméricas, pois permite a obtenção de componentes com diversas formas, tamanhos e dimensões [2]. Produtos com geometrias complexas são obtidos com maior facilidade quando utilizado este processo de fabrico. A moldação por injeção para além de permitir produzir componentes com geometrias complexas, também permite a moldação de peças com tolerâncias exigentes. Para além dos polímeros termoplásticos, o processo de moldação por injeção permite a utilização de materiais compósitos, termoendurecíveis e espumas. Devido aos requisitos técnicos que os produtos possuem (geometria, dimensões e cadência de produção) é necessário escolher acertadamente o tipo de máquinas de moldação por injeção. Estas diferenciam-se principalmente no tamanho do prato de aperto, na força máxima de fecho e no volume máximo de material a injetar. No ciclo de funcionamento do processo de moldação por injeção são executadas as seguintes etapas: a plasticização, a injeção, a compactação, o arrefecimento do produto e a extração do produto. A plasticização envolve o aquecimento do polímero até ao ponto de fusão, preparando-o para a etapa seguinte. A injeção desloca uma determinada quantidade de polímero fundido, que se encontra sob pressão, para o interior da ferramenta moldante. Quando o preenchimento da cavidade moldante estiver completo, a etapa de compactação mantém o polímero sob pressão durante um determinado período de tempo. Esta etapa é efetuada para compensar a contração do polímero durante a solidificação. O arrefecimento pode ser caracterizado pela redução de temperatura da peça produzida até ao ponto de solidificação, tornando possível a sua extração. Por último, para a extração da peça o molde é aberto e através de um sistema de extração, projetado para o efeito, o produto final é extraído. De seguida o molde é fechado

para dar início a um novo ciclo de moldação. Na Figura 1 é possível observar sumariamente as principais etapas do ciclo de moldação. Para melhorar a eficiência e versatilidade da moldação por injeção, foram introduzidas inovações tecnológicas, como a microinjeção e a moldação por injeção a água e a gás.

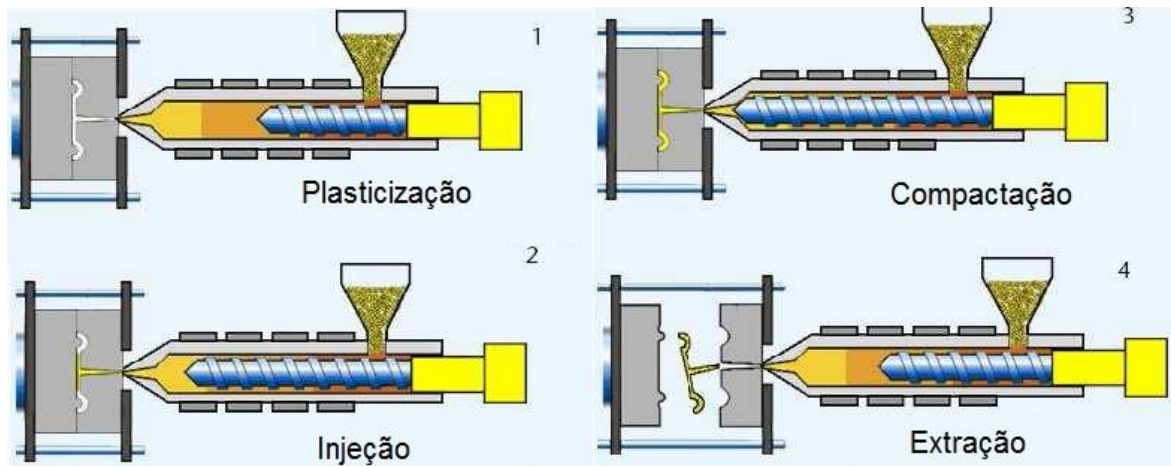


Figura 1. Etapas do ciclo de moldação – adaptado de [3]

1.2 Moldação por Injeção Assistida a Gás

A moldação por injeção assistida a gás tem sido uma das mais importantes técnicas para a produção de peças em material polimérico. Este processo é um tipo de moldação por injeção que usa um gás inerte pressurizado, usualmente nitrogénio entre os 2,5 e os 30 MPa, para produzir peças ocas [2]. O processo de injeção assistida a gás contém duas variantes, o *short shot* e o *full shot*. No *short shot* a cavidade moldante é parcialmente preenchida, cerca de 80 % do volume da cavidade, com o polímero fundido. Na Figura 2 é possível visualizar um exemplo da injeção do fundido e do gás na variante *short shot* da moldação assistida a gás. No *full shot*, a cavidade moldante é totalmente preenchida. Depois de executada esta etapa, o gás inerte é injetado para o interior do fundido. Neste processo, a injeção do gás pode ser realizada por um acessório auxiliar, incorporado no molde, que injeta diretamente na cavidade moldante ou pelo bico de injeção da máquina de injeção, mas neste caso a máquina usada tem de ser específica para este método de injeção. O gás usado neste processo contém uma viscosidade inferior à do polímero fundido, por isso é possível produzirem-se peças ocas complexas com secções grossas e finas dependendo da geometria do produto. Ao contrário da moldação por injeção convencional, este processo utiliza o gás pressurizado para realizar a etapa de compactação. Como a pressão do gás usada nesta etapa é inferior à pressão de compactação dos outros processos de moldação por injeção, apenas 10 a 15 % da força de fecho usada na moldação por injeção é requerida para a injeção assistida a gás [1]. Durante o ciclo de arrefecimento, a pressão do gás é mantida. Quando a peça injetada atinge a temperatura de extração, o gás é despressurizado e a peça é extraída. Existe uma variante do processo *full shot* que contém uma cavidade não moldante, onde é armazenado o excesso de polímero fundido. O polímero expelido do interior da peça é injetado para uma ou mais destas cavidades. Para evitar o preenchimento da cavidade não moldante durante o enchimento da cavidade moldante, é introduzida uma válvula entre a

peça e a cavidade não moldante. Esta válvula só permite o enchimento da cavidade não moldante quando o gás inerte é injetado para o interior da peça. Durante o processo de extração, o excesso de polímero, que se encontra solidificado, é removido com a ajuda do sistema de extração e ao mesmo tempo é separado do produto final. Este processo proporciona, ao produto final, um melhor acabamento superficial, evita empenos e a formação de contrações indesejáveis. As peças produzidas neste processo contêm tensões internas inferiores às peças concebidas por moldação por injeção convencional. Devido à remoção de polímero no interior das peças produzidas a partir deste processo, o tempo do ciclo de arrefecimento pode ser reduzido significativamente, resultando numa redução do tempo ciclo de moldação. A moldação por injeção assistida a gás permite a produção de certos produtos que seriam difíceis de conceber usando processos convencionais, como por exemplo tubos, painéis de automóveis e cabides.



Figura 2. Variante *short shot* da moldação assistida a gás [4]

Como é óbvio cada um dos processos de moldação tem as suas vantagens e desvantagens. Relativamente ao processo convencional de moldação por injeção, a injeção assistida a gás permite inferir as seguintes vantagens [2]:

- Redução das tensões internas da peça moldada, devido às baixas pressões exercidas pelo gás durante o ciclo de moldação
- Aumento da rigidez da peça
- Tempo do ciclo de moldação mais curto
- Forças de fecho reduzidas
- Significativa redução de defeitos superficiais
- Melhor acabamento superficial
- Redução de material utilizado em cada ciclo de moldação, devido a substituição de termoplástico por gás
- Possibilidade de moldação de peças longas

Mas tal como todos os outros processos, a injeção assistida a gás tem as suas desvantagens. Destacam-se assim as seguintes limitações [2]:

- É necessário uma licença especial para o uso deste processo, podendo aumentar o custo de produção
- Este processo requer mais tempo para iniciar a produção
- É difícil de controlar moldes com múltiplas cavidades
- O ponto de injeção do gás tem de se localizar num local que não seja visível
- Este processo tem custos adicionais devido à adição de equipamentos de gás

- A uniformidade de temperatura do molde é ainda mais importante do que na moldação por injeção convencional.

Nos processos de moldação por injeção, os parâmetros de moldação têm uma grande importância para a obtenção de uma produção eficiente. Um bom ajuste de parâmetros como a temperatura do molde, a temperatura do polímero no momento de injeção e a pressão de injeção, pode ajudar a remover defeitos indesejáveis que as peças produzidas possam conter. Por exemplo, o aumento da pressão de injeção durante a etapa de compactação pode ajudar a eliminar empenos. Para além dos parâmetros que são utilizados nos processos de moldação por injeção, a moldação por injeção assistida a gás requer a parametrização das variáveis referentes ao gás. Este processo requer a parametrização da pressão do gás, do intervalo entre a injeção do polímero fundido e do gás inerte e no volume de polímero injetado para o interior da cavidade moldante. A temperatura do gás no momento de injeção não é uma variável que seja regularmente parametrizada, no entanto esta variável pode alterar as propriedades e/ou a qualidade dos produtos produzidos [5]. Apresenta-se de seguida uma revisão bibliográfica evidenciando estudos que de algum modo destacam a importância da parametrização e do controlo das variáveis do processo, bem como da sua influência relativa na qualidade do produto final obtido por moldação por injeção assistida a gás.

1.3 Revisão Bibliográfica

Miguel Sánchez-Soto *et al.* [6] em 2006 apresentaram um estudo focado na otimização da qualidade de um painel de um automóvel, prevenindo os principais defeitos que podem ocorrer na moldação por injeção assistida a gás e investigaram uma apropriada combinação das variáveis deste processo. Os autores analisaram os seguintes parâmetros do processo: pressão do gás, temperatura do fundido, temperatura do molde, atraso do gás e o tempo de aplicação do gás. O componente automóvel localiza-se na parte superior da porta bagageira de um monovolume. Este produto é principalmente estético, tendo a função de cobrir a estrutura metálica da porta. A principal dificuldade de produção desta peça prendeu-se com a sua complexidade geométrica pois, devido ao seu perfil em U o produto apresentava uma rigidez baixa. A geometria da peça pode ser observada na Figura 3. O polímero usado nesta moldação foi um polipropileno reforçado com 20 % de talco. Os autores decidiram que para a obtenção deste produto o mais apropriado seria o uso da injeção *full shot* com a adição de cavidades não moldantes para o excesso de polímero. Inicialmente foram realizadas simulações numéricas para prever o comportamento da injeção na ferramenta moldante. Os parâmetros utilizados para estas simulações foram as recomendadas pelo fabricante do polímero. A partir das simulações, os autores puderam determinar algumas características das peças: o volume do espaço oco, a massa final e a espessura da parede em determinadas partes da peça. As primeiras simulações numéricas iriam determinar a melhor localização para o ponto de injeção do polímero. Três opções de pontos de injeção foram equacionadas: um ponto de injeção na zona central da peça, dois pontos nas extremidades e por último a junção das duas opções anteriores. Foi possível concluir que a melhor localização para o ponto de injeção seria na zona central da peça,

devido à simplicidade do projeto de construção para este molde e evitando a formação de linhas de soldadura que as outras opções apresentavam. De seguida foram simulados três possibilidades diferentes para os pontos de injeção do gás. Uma possibilidade seria introduzir dois pontos junto ao ponto de injeção do polímero. Outra opção foi injetar o gás nas duas extremidades da peça. Como última possibilidade, os autores consideraram a hipótese de utilizar dois pontos junto à injeção do polímero e um ponto em cada zona curva da peça. Foi possível concluir que o uso de dois pontos de injeção junto ao ponto de injeção do polímero seria a opção mais indicada. Esta opção foi a única que originava um canal oco contínuo no interior da peça. Depois de determinada a localização dos pontos de injeção do polímero e do gás, os autores simularam a moldação alterando os diversos parâmetros do processo. Os investigadores concluíram que a massa é influenciada principalmente pela temperatura do molde e do fundido. O volume de polímero removido pelo gás é afetado por três parâmetros; a pressão e a temperatura do gás bem como a temperatura do termoplástico. Relativamente à diferença entre espessuras nas diferentes secções do produto, foi possível concluir que a alteração dos valores dos parâmetros tem pouca influência. Os investigadores tiveram a possibilidade de comparar as conclusões que obtiveram nas simulações com um componente produzido. O painel fabricado não apresentou sinais de rebarba ou linhas de soldadura e não continha empenos ou distorções, como previsto nas simulações.



Figura 3. Geometria da peça estudada [6]

Por vezes nas moldações obtidas por injeção ou nas moldações assistidas por um fluido, água ou gás, são usados polímeros reforçados como material de injeção. Estes

polímeros reforçados, também designados por compósitos, são descritos como a junção entre um polímero e outro componente, o chamado material de reforço. Os dois componentes são fundidos em conjunto para formar um compósito, que quando solidificado permite obter um material que apresenta propriedades mecânicas melhoradas. É comum usar-se fibra de vidro como material de reforço. Apesar das vantagens que os compósitos oferecem, estes requerem um ajuste ainda mais cuidado dos parâmetros de moldação de modo a evitar o aparecimento de defeitos nas peças produzidas. Em 2010, Shia-Chung Chen *et al.* [7] realizaram um estudo para comprovar que a adição de uma etapa de aquecimento rápido num ciclo de moldação permite eliminar o aparecimento de defeitos superficiais em peças moldadas a partir de polímeros reforçados. Os investigadores usaram vapor de água a 500 °C para aumentar rapidamente a temperatura da superfície da cavidade moldante. A injeção do vapor ocorre enquanto o molde se encontra aberto. O ciclo de aquecimento termina quando o molde é fechado, iniciando-se posteriormente o ciclo de moldação convencional. Para apoiar o estudo, os autores construíram uma ferramenta moldante que suporta um ciclo de aquecimento. Com diferentes bocais (4 mm, 6 mm e 8 mm) e diferentes caudais de vapor (100 l/min, 200 l/min e 300 l/min) foi possível aquecer a superfície da cavidade moldante até aos 229 °C. Os autores conseguiram demonstrar as vantagens do ciclo de aquecimento rápido realizando duas moldações por injeção. Uma delas seria uma moldação convencional e a outra com a adição do ciclo de aquecimento. Em ambas as injeções, o polímero usado foi um policarbonato com 10 % de fibra de vidro. Na moldação convencional o molde tinha uma temperatura de 80 °C e o polímero foi injetado a 280 °C a uma pressão de 90 MPa. A peça produzida por este processo, uma chapa retangular com 60 mm de comprimento, 25 mm de largura e 1 mm de espessura, continha defeitos superficiais. Na moldação com o ciclo de aquecimento os parâmetros utilizados relativamente ao polímero e à temperatura do molde foram mantidos, o vapor de água encontrava-se a 500 °C e foi injetado com um caudal de 300 l/min durante 4 segundos por um bocal de 8 mm. Com estes parâmetros foi possível atingir, no momento da injeção do polímero, uma temperatura de 160 °C na superfície da cavidade moldante. Através deste processo a peça injetada não continha os defeitos superficiais que a peça da moldação convencional possuía e apresentava uma superfície de alto brilho. Como pode ser visualizado no lado direito da Figura 4, a peça produzida através da moldação convencional apresentava defeitos superficiais significativos. Do lado esquerdo da Figura 4 é possível observar que o ciclo de aquecimento elimina a exposição da fibra das superfícies da peça.

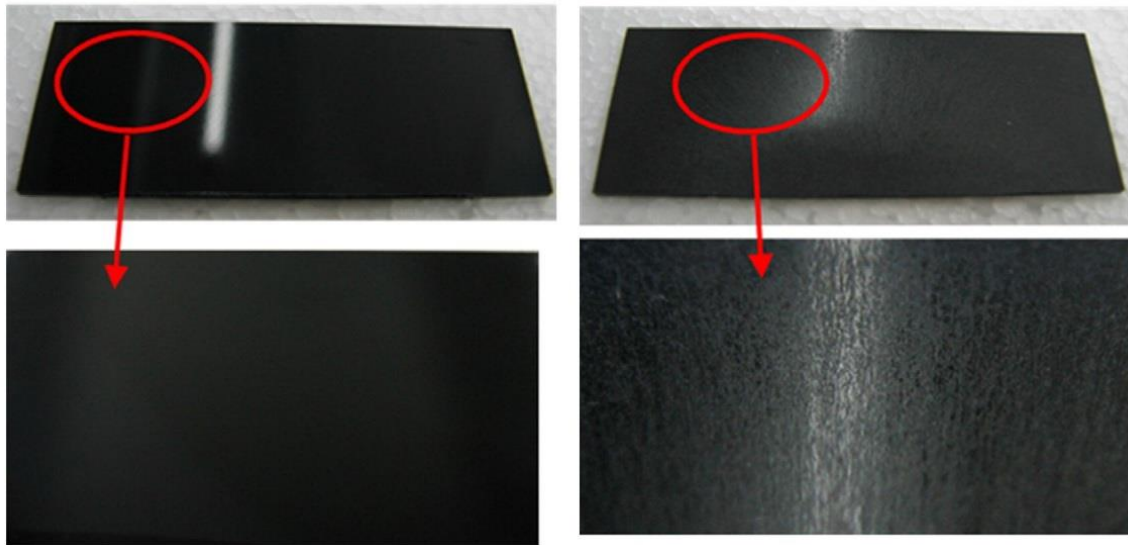


Figura 4. Amostras produzidas durante o estudo – adaptado de [7]

Durante o processo de moldação de injeção assistida a gás podem ocorrer defeitos, não só nas superfícies externas, como também nas superfícies entre o polímero e o gás. Estes defeitos baixam consideravelmente a rigidez das peças produzidas por este processo. J. C. Liang *et al.* [5] investigaram a formação de bolhas de gás na interface entre o polímero e o gás inerte durante a moldação por injeção assistida a gás. Durante este processo de compactação, o gás inerte pode atingir temperaturas entre os 100 e os 200 °C e pressões acima dos 30 MPa, levando-o até um estado supercrítico. Gases diferentes atingem o estado supercrítico a diferentes valores de temperatura e pressão. No caso do nitrogénio o estado supercrítico é atingido a uma temperatura de -147,1 °C e a uma pressão de 3,35 MPa. Durante este estado o gás dissolve-se em qualquer polímero fundido e gradualmente a formação de bolhas de gás no interior do fundido é aumentado. Devido ao aprisionamento do gás, a peça solidificada apresenta no canal do fluido uma superfície rugosa, diminuindo a rigidez da peça. Os autores concluíram que para diminuir a formação de bolhas na superfície do canal do fluido o tempo de compactação deve ser aumentado, a pressão do gás deve ser mantida até que o polímero esteja solidificado e a temperatura do molde deve ser o mais baixa possível para não permitir a dissolução do gás no polímero. Contudo, estas técnicas de prevenção do aparecimento de bolhas reduzem a eficiência do processo.

Ying Lu *et al.* [8] em 2010 apresentaram um estudo focado no relaxamento das tensões internas em peças concebidas através da injeção assistida a gás com diferentes parâmetros de moldação. Para os ensaios experimentais, os autores decidiram usar um polietileno de alta densidade. As peças injetadas foram projetadas com uma geometria cilíndrica de 8 mm de diâmetro e um comprimento de 170 mm. Cada uma das peças produzidas foram injetadas com diferentes parâmetros de moldação; diferentes pressões de injeção do gás (10,34 e 11,72 MPa), diferentes atrasos de injeção do gás (1, 2 e 3 segundos) e diferentes volumes de preenchimento da cavidade moldante (67,5 % e 72,5 %). A temperatura de injeção em todos os ensaios foi de 215 °C e o molde encontrava-se a 40 °C. Para os ensaios experimentais, uma amostra de 80 mm de comprimento foi cortada em cada uma das peças injetadas e estas repousaram durante 24 horas no ambiente a 25 °C. As amostras foram rapidamente distendidas 1 mm e mantidas nessa posição. Durante este

processo o relaxamento das tensões internas foi registado. Depois de realizados os ensaios, os investigadores concluíram que a resistência ao relaxamento das tensões internas das amostras foi melhor quando usaram a maior pressão de injeção, o menor volume de preenchimento e o atraso de 2 segundos.

A moldação por injeção assistida a gás não é o único processo que permite obter produtos de baixa massa e ciclos de moldação mais curtos. A moldação por injeção assistida a água também permite esta eficiência de produção e a conceção destes produtos. Shih-Jung Liu e Yi-Chuan Wu [9] procederam ao estudo dos dois processos de moldação de modo a determinar qual dos dois é capaz de produzir melhores produtos. Os ensaios experimentais foram realizados usando uma máquina de injeção de 80 toneladas equipada com unidades de injeção de gás e água. O polímero utilizado foi um polipropileno semi-cristalino. Os parâmetros de moldação usados nos dois processos foram: uma temperatura de injeção de 205 °C, a temperatura do molde foi de 50 °C e a pressão de injeção foi de 70 MPa. Os fluidos usaram os mesmos parâmetros de injeção (a temperatura do fluido foi de 30 °C e a pressão de injeção foi de 7 MPa), exceto o atraso de injeção onde o gás teve um atraso de 0,5 segundos e a água de 0,1 segundos. Neste estudo foram realizados ensaios experimentais em quatro moldes diferentes. Cada molde produzia uma peça diferente; uma peça retangular simples, uma peça retangular com duas espessuras diferentes, uma peça com duas nervuras simétricas e uma peça com múltiplas nervuras. A geometria de cada peça ensaiada pode ser observado na Figura 5. Os autores concluíram, depois de analisar as peças, que em três dos quatro moldes ensaiados, a moldação por injeção assistida a água apresentava melhores resultados que a moldação assistida a gás. As peças produzidas nestes três moldes apresentavam secções ocas mais uniformes. Os autores observaram ainda que as peças com duas espessuras diferentes apresentavam um menor número de imperfeições na injeção assistida a gás.

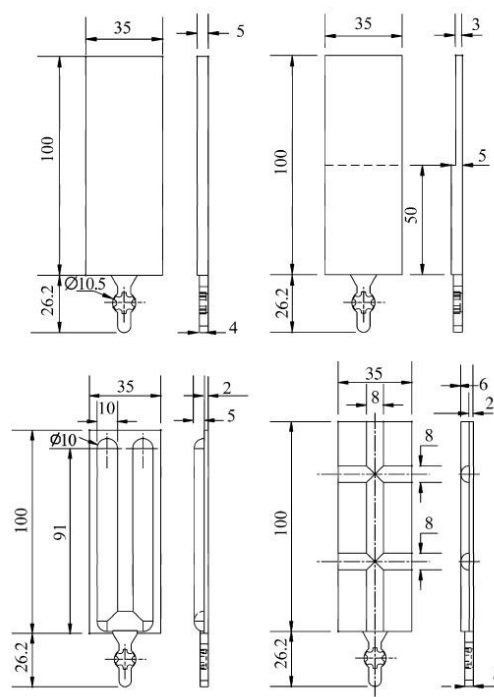


Figura 5. Geometria e dimensões das peças ensaiadas [9]

Dependendo da aplicação, ou seja da sollicitação mecânica a que vão estar sujeitas, todas as peças produzidas pelas diferentes moldações por injeção têm de cumprir diversos requisitos mecânicos, como por exemplo a resistência ao impacto, a resistência à fadiga, à tração, etc... Caso as amostras dos produtos não satisfaçam os requisitos pretendidos todas as peças injetadas têm de ser rejeitadas, pondo mesmo em causa o projeto da ferramenta moldante. Na maioria dos casos um ajuste adequado dos parâmetros de processamento proporciona uma melhoria das propriedades mecânicas das peças produzidas, cumprindo assim os requisitos mecânicos desejados. Rean Der Chien *et al.* [10] apresentaram um estudo que visa avaliar as propriedades mecânicas de três polímeros (PS, PP e *Nylon*) em cinco diferentes configurações usando o processo de moldação por injeção assistida a gás. Neste estudo foi analisada a influência de fatores geométricos como a espessura da peça e a geometria do canal do gás, nas propriedades mecânicas da peça, focando com especial ênfase a tensão e a flexão. Os diferentes *designs* estudados podem ser observados na Figura 6. O molde usado nesta investigação permitiu que as cinco configurações fossem injetadas com duas espessuras diferentes: 2,5 mm e 3 mm. Nos ensaios de tensão foram usadas diferentes velocidades para os três polímeros em estudo. Para o PS foi usado uma velocidade de 1 mm/min e 10 mm/min para o PP e para o *Nylon*. Para que as amostras possuíssem a geometria adequada para os ensaios de tração, as peças foram maquinadas após injeção. Para os ensaios de flexão foram usadas taxas de deformação de $0,01 \text{ s}^{-1}$ para o PS e $0,1 \text{ s}^{-1}$ para o PP e para o *Nylon*. Terminados os diversos ensaios os autores concluíram que relativamente à resistência à tração e à carga máxima, todas as amostras do mesmo material e a com a mesma espessura apresentavam valores idênticos. Esta semelhança de valores foi atribuída aos perfis e canais de gás com as mesmas áreas. As peças injetadas a PP e PS com uma espessura de 2,5 mm apresentavam uma carga máxima ligeiramente inferior relativamente às peças de 3 mm. Ao contrário dos outros polímeros, as peças de *Nylon* com 2,5 mm apresentavam uma carga máxima 10 a 15 % superior às peças de 3 mm. Relativamente à resistência à tração, as peças de PP e PS continham valores ligeiramente superiores para as peças de 2,5 mm de espessura, mas as peças de *Nylon* com 2,5 mm de espessura apresentavam valores 30 a 40 % superiores quando comparados com as peças de 3 mm. Desta forma os investigadores concluíram que a resistência à tração é afetada pela espessura das peças de *Nylon*, principalmente devido ao grau de cristalinidade deste polímero. A espessura das peças de PP e PS e a área transversal do canal de gás não influenciaram a carga máxima de flexão. Contudo, a espessura da peça e a área do canal do gás influenciaram significativamente esta carga nas peças de *Nylon*. Mais uma vez os autores atribuíram a causa desta diferença entre os diferentes polímeros ao nível de cristalinidade. Devido aos ensaios de flexão realizados os autores concluíram que a rigidez do produto depende do momento de inércia. Este momento é determinado pela geometria da peça e pela geometria do canal do gás. Sendo que à espessura do produto também é atribuída alguma influência relativa, mas menos significativa. De todos os *designs* estudados o que apresentou uma maior rigidez foi o *design* E e as peças com 3 mm de espessura exibiram uma rigidez superior quando comparados com as peças de 2,5 mm. Por último, os autores concluíram que apesar de os *designs* E e D apresentarem os melhores resultados no que às propriedades referidas anteriormente diz respeito, relativamente à resistência à flexão estes dois apresentavam os piores resultados quando injetados com PS. A configuração A foi, pois, a que apresentou uma maior resistência à flexão.

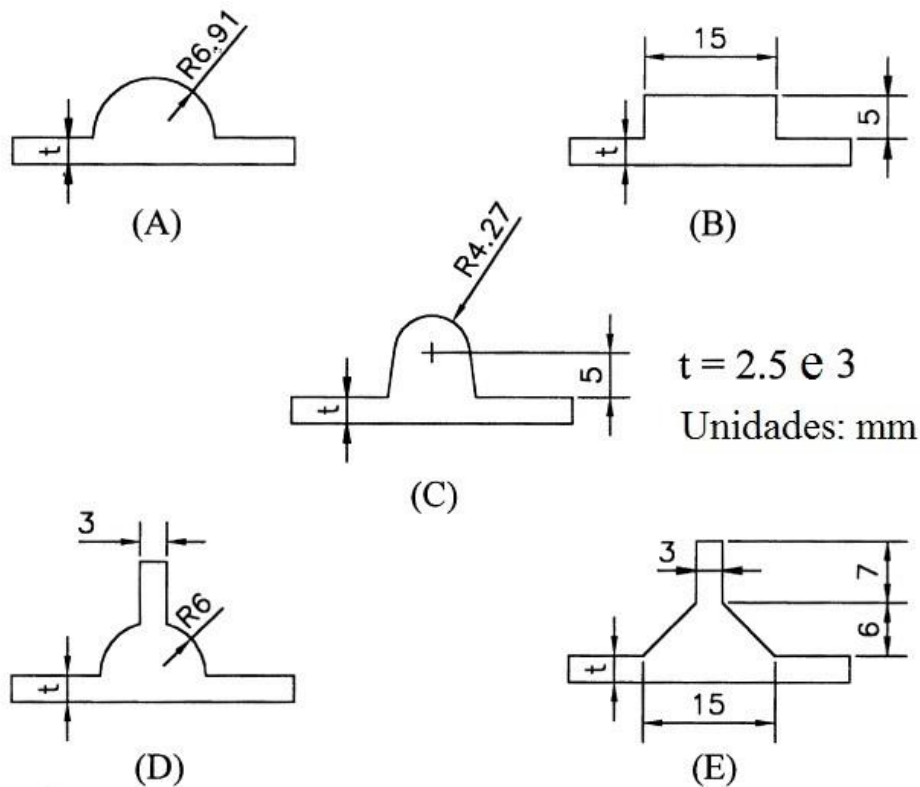


Figura 6. Perfis ensaiados – adaptado de [10]

Em 2000, Nan-Shing Ong *et al.* [11] realizaram um trabalho de pesquisa com o objetivo de estudar a influência dos parâmetros de processamento na qualidade dos produtos obtidos por moldação por injeção assistida a gás, especificamente na variante *short shot*. Uma comparação entre cinco configurações diferentes foi efetuada, tendo os perfis a mesma área (30 mm^2). Os diferentes perfis estudados podem ser observados na Figura 7. O polímero usado neste estudo foi um poliestireno de alto impacto (HIPS). Os autores analisaram quatro parâmetros de processamento neste tipo de moldação por injeção: o volume de preenchimento da cavidade moldante, o atraso de injeção do gás, a pressão do gás e a temperatura do fundido. Os investigadores analisaram o comprimento do canal do gás, a espessura da parede da peça, a resistência à flexão, o empeno da peça e os desvios na trajetória do gás em cada uma das amostras. Estes controlos de qualidade permitiram distinguir as peças de qualidade das defeituosas. O comprimento do canal de gás e a espessura da parede da peça estão diretamente relacionados com a massa do produto. O aumento do comprimento do canal ou a redução a espessura da parede reduz significativamente a massa da peça. O ensaio da resistência à flexão indica se o produto em estudo suporta as solicitações mecânicas exigidas. Os empenos estão relacionados com problemas de tensões residuais e de corte. Os desvios na trajetória do gás são considerados pontos de fraqueza da peça, portanto estes devem ser evitados. Relativamente ao comprimento do canal do gás, os autores concluíram que a redução do volume de preenchimento da cavidade moldante e o aumento do atraso de injeção do gás estavam diretamente ligados ao aumento no comprimento do canal. Os autores concluíram que o aumento da temperatura do fundido e da pressão do gás também aumenta o comprimento

do canal, mas só para determinados *designs*. No que diz respeito aos resultados obtidos no que concerne a espessura da parede da peça, os autores concluíram que estes foram inconsistentes. Esta inconsistência foi relacionada com a inexistência de uma relação direta entre a espessura da parede e os parâmetros de processamento utilizados neste estudo. Os autores concluíram que as peças apresentavam uma maior resistência à flexão quando estas possuíam um canal de gás de baixo diâmetro. O aumento do volume de preenchimento da cavidade moldante, a redução no atraso da injeção do gás, uma baixa pressão do gás e uma baixa temperatura do fundido proporcionavam também a possibilidade de reduzir o diâmetro do canal do gás. No que concerne o empeno das peças injetadas e os desvios da trajetória do gás, os autores não encontraram uma relação direta entre estes e os parâmetros usados nesta investigação. Estes concluíram que, na moldação por injeção assistida a gás, peças com canais de gás com um diâmetro elevado apresentam menores empenos. Contudo, foi possível concluir que os desvios na trajetória do gás seriam mais prováveis em peças com canais de gás com diâmetros baixos.

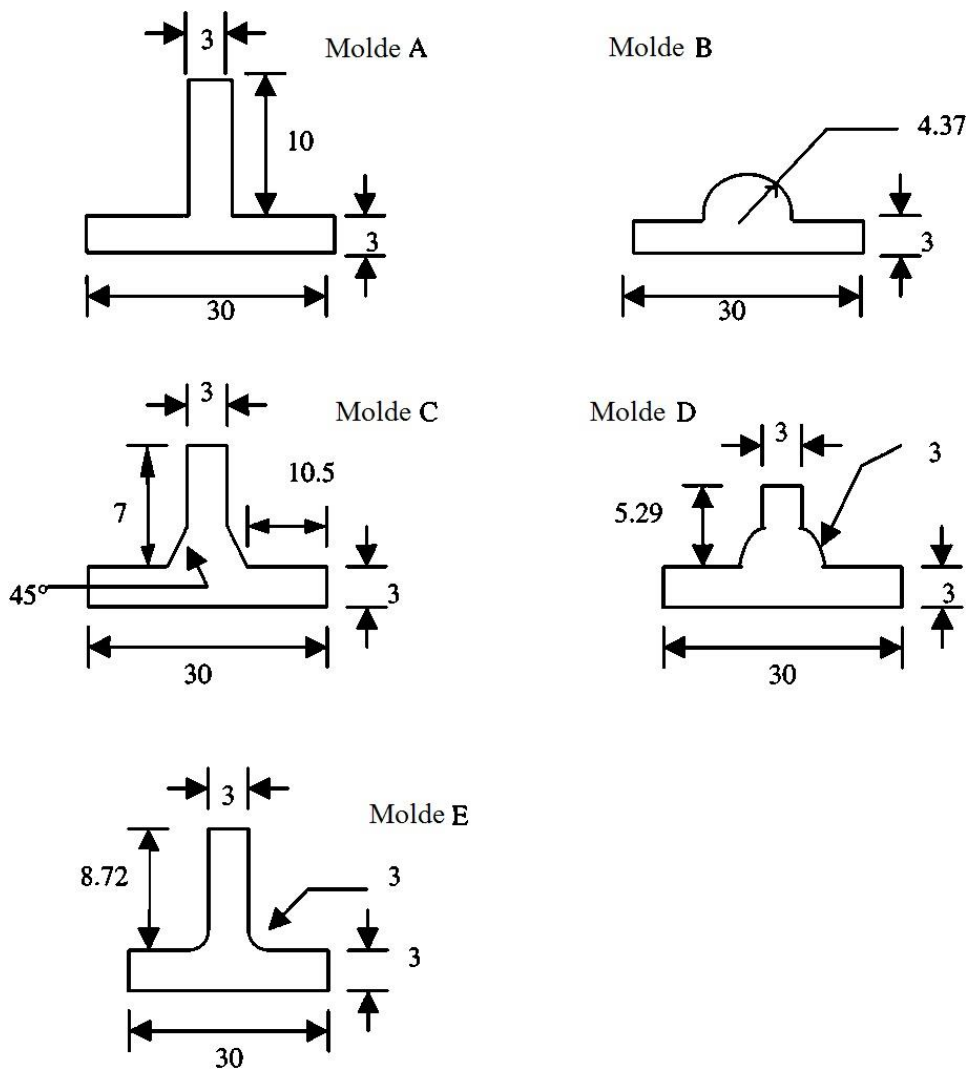


Figura 7.Perfis ensaiados – adaptado de [11]

Shih-Jung Liu e Kuang Huei Chang [12], em 2001 realizaram uma investigação com o objetivo de experimentalmente estudar a moldabilidade do processo de moldação por injeção assistida a gás, especificamente a variedade *full shot*. Depois de moldadas as amostras, os investigadores focaram-se principalmente na análise da penetração do gás inerte. As amostras foram injetadas com diferentes geometrias, alterando a geometria do canal de gás (retangular, semicircular e trapezoidal), com diferentes parâmetros de processamento. Os parâmetros alterados neste estudo foram a temperatura do fundido, o atraso da injeção do gás e o tempo em que o gás permanece no interior da peça. Foram utilizados dois polímeros: um poliestireno e um polipropileno. Os autores testaram cinco temperaturas de fundido (210, 220, 230, 240 e 250 °C) e concluíram que o aumento da temperatura do fundido proporciona o aumento da penetração do gás inerte. Relativamente ao efeito do atraso da injeção do gás, os investigadores ensaiaram atrasos entre 1 e 9 segundos e concluíram que aumentando o atraso da injeção do gás a penetração do mesmo também aumentava. O tempo em que o gás permanece no interior da peça foi o último parâmetro de processamento a ser testado. Variaram o tempo entre os 15 e os 55 segundos. Depois de realizados os ensaios, os autores concluíram que o aumento do tempo do gás proporciona o aumento da penetração do mesmo. Relativamente a geometria do canal de gás, das três que foram analisadas, a que demonstrava uma melhor penetração foi a geometria trapezoidal. Os autores investigaram ainda o efeito do aumento da altura e da largura do canal de gás. Acerca da altura do canal, foram testados canais com 4, 6 e 8 mm de altura e foi possível concluir que o canal com 4 mm foi o que demonstrava uma maior penetração e o canal de 6 mm foi que apresentava menos. Relativamente à largura do canal, os autores testaram canais com 8, 14 e 20 mm de largura. Através deste ensaio concluíram que a redução da largura do canal proporcionava o aumento da penetração do gás.

1.4 Síntese

A literatura permite consolidar que durante o processo de moldação por injeção assistida a gás é fundamental conhecer e controlar quer as variáveis, quer os parâmetros de processamento no sentido de otimizar a qualidade do produto a obter. O uso de ferramentas computacionais como os *softwares* CAE podem ajudar na compreensão e na otimização do processo de moldação sem recorrer a ensaios experimentais, evitando assim os dispendiosos custos inerentes à “tentativa e erro”. Devem ser utilizados numa fase de auxílio ao projeto da ferramenta moldante, mas se tal não for possível, podem e devem ser utilizados como ferramentas de resolução de problemas e otimização da qualidade do produto final, recorrendo a estudos paramétricos do processo e suas variáveis. Por vezes os problemas de empenos são solucionados com o relaxamento de possíveis tensões internas que as peças possam conter. O relaxamento das tensões podem ser obtidos com pequenos ajustes nos parâmetros, principalmente no volume de preenchimento da cavidade moldante, na pressão e no atraso da injeção do gás. Os defeitos superficiais baixam consideravelmente as propriedades mecânicas das peças injetadas, contudo estas anomalias são fáceis de detetar. Ao contrário das irregularidades superficiais, os defeitos localizados na interface entre o polímero e o gás são difíceis de visualizar. Para eliminar estas anomalias do canal de gás é necessário afinar adequadamente o tempo de

compactação e a temperatura do molde. Em alguns casos, a otimização dos parâmetros de processamento não é suficiente para elevar as propriedades mecânicas aos níveis pretendidos. Por vezes a melhor opção é recorrer aos polímeros reforçados. Contudo o uso deste material na moldação assistida a gás resulta no aparecimento de possíveis novas imperfeições. Um afinamento adequado da temperatura do molde e do fundido previne a exposição indesejada do material de reforço na superfície do produto. Através deste conhecimento adquirido acerca da moldação assistida a gás, encontram-se reunidas as condições para definir os objetivos desta dissertação.

1.5 Objetivos

Com esta dissertação pretende-se compreender melhor o processo de moldação por injeção assistida a gás e a influência dos diferentes parâmetros do processo na qualidade final da peça a obter. Pretende-se ainda estabelecer uma metodologia conducente à criação de regras que auxiliem o projeto de ferramentas moldantes, bem com a sua operação. Deste modo pretende-se otimizar quer processos futuros, quer a qualidade dos produtos a obter. Para tal, centra-se a análise num caso de estudo real, uma peça para o sector automóvel, cujas exigências tanto funcionais como estéticas, obrigam à definição de toda uma metodologia assertiva desde a conceção da ferramenta moldante, ao processo e à peça, de modo a estabelecer regras de projeto e métodos de trabalho que visam obter um produto final de qualidade.

1.6 Estrutura da Dissertação

Esta Dissertação de Mestrado contém cinco capítulos, que de seguida vão ser descritos resumidamente.

No primeiro capítulo são expostos dois processos de moldação por injeção: a moldação por injeção convencional e a moldação por injeção assistida a gás. São referidos as particularidades de cada processo, bem como as suas vantagens e desvantagens. Relativamente à moldação assistida a gás, são abordadas com algum pormenor as duas variantes deste processo: a variante *full shot* e a variante *short shot*. Segue-se a revisão bibliográfica que serviu de apoio ao desenvolvimento desta dissertação.

No segundo capítulo é feita a apresentação da peça em estudo e dos diferentes componentes que tornam possível a sua conceção. São descritos com detalhe as funcionalidades, os requisitos e as dimensões gerais da peça. Neste capítulo também é descrito o material polimérico usado para a produção da peça em estudo, a ferramenta moldante e a máquina de injeção usada.

No terceiro capítulo deste trabalho faz-se uma introdução à simulação numérica, referindo-se em particular o processo de modelação no *software* usado para este estudo o Autodesk® Moldflow Insight 2012, bem como os requisitos técnicos da peça em estudo. É descrita a modelação CAD da peça e de toda a ferramenta moldante. Neste capítulo também é feita uma breve explicação dos diferentes parâmetros de processamento que o *software* permite controlar.

Segue-se o quarto capítulo, onde se apresentam os resultados obtidos na simulação numérica do processo de moldação da ferramenta moldante ensaiada, bem como nas simulações do estudo paramétrico e de otimização. Estas foram realizadas com o propósito de analisar os parâmetros do processo que proporcionam uma melhoria das características da peça em estudo. É abordada e discutida a informação que foi possível extrair em cada resultado das simulações.

Por último, no capítulo cinco estão descritas todas as conclusões da dissertação, bem como as sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2

Caso de Estudo

Neste capítulo é feita uma descrição detalhada da peça em estudo, do molde e da máquina de injeção utilizadas no ensaio experimental

2.1 Peça em Estudo

No âmbito deste trabalho de dissertação pretende-se estudar o processo de moldação por injeção assistida a gás e através de um estudo paramétrico estabelecer uma metodologia de otimização, desde o projeto da ferramenta moldante até ao processamento, visando a obtenção de peças de qualidade. Para tal, foi traçado um percurso conducente à obtenção desse conhecimento que incide sobre um caso de estudo real. Assim, neste capítulo, procede-se à descrição da peça, da ferramenta e dos equipamentos auxiliares de moldação. A peça em estudo no âmbito deste trabalho é um componente automóvel, mais especificamente um puxador das portas laterais do automóvel AUDI® TT, que entrará, no início de 2015, no mercado. O automóvel pode ser visualizado na Figura 8. Na Figura 9 pode-se observar em detalhe o puxador instalado na porta do veículo. Este componente é um elemento de *design*, na qual é pretendido um bom acabamento superficial isento de imperfeições visíveis para o proprietário do automóvel. Para além do requisito visual, acrescem os estruturais. A peça tem de suportar os esforços que são exercidos durante o uso corrente do veículo, principalmente as forças exercidas ao abrir e fechar as portas. A peça contém uma geometria complexa com bastantes superfícies curvas e diversos detalhes como encaixes e nervuras, de modo a acautelar o que se pretende que veja a ser a sua função. É possível visualizar uma peça ensaiada na Figura 10. Na Figura 11 pode ser observada a modelação do puxador. Como esta peça é afixada numa das portas do veículo através de encaixes, o seu toleranciamento dimensional é exigente. O puxador não pode conter empenos nem contrações elevadas, de modo a evitar uma má afixação na porta do automóvel. Para reduzir a massa da peça, foi proposto que a sua produção fosse realizada utilizando o processo de moldação por injeção assistida a gás. Para além da redução da massa, este processo eliminaria possíveis contrações nas superfícies da peça, principalmente nas secções de elevada espessura. As dimensões gerais deste puxador são: 22,5 mm de comprimento, 42 mm de largura e 23 mm de espessura.



Figura 8. Exterior do automóvel [13]



Figura 9. Puxador instalado na porta do veículo [14]



Figura 10. Peça ensaiada

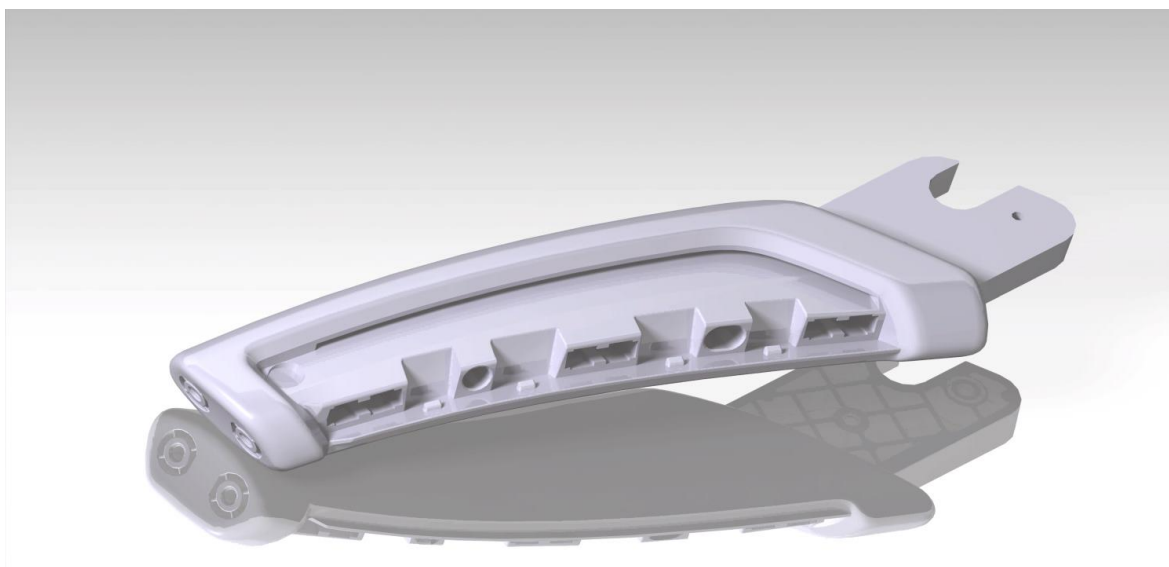


Figura 11. Modelação da peça

2.2 Material

O polímero usado para a produção deste componente automóvel foi o Akulon® K224-LG6/E. Este polímero é produzido pela produtora DSM Engineering Plastics e é uma poliamida com 30 % de fibra de vidro, por isso pode ser considerado como polímero reforçado. Algumas características referentes ao polímero usado podem ser visualizados na Tabela 1. Durante a produção das amostras, antes de ser injetado, este polímero esteve numa estufa a 115 °C durante 6 minutos.

Tabela 1. Características do polímero usado

Características	Valor	Unidade
Densidade	1,35	g/cm ³
Contração na direção do fundido	0,22	%
Contração na direção contrária ao fundido	1,1	%
Módulo de Young	9500	MPa
Tensão de rutura	180	MPa
Deformação de rutura	3,5	%
Temperatura de fusão	220	°C
Coefficiente de expansão térmica linear na direção do fundido	0,00002	cm/cm/°C
Coefficiente de expansão térmica linear na direção contrária ao fundido	0,00007	cm/cm/°C

2.3 Molde

Para a produção deste puxador foi necessário projetar uma ferramenta moldante. Este molde foi concebido para produção desta peça usando especificamente o processo de moldação por injeção assistida a gás. Devido a esta especificidade, o molde contém cavidades não moldantes e um sistema de injeção de gás. Estes componentes não são utilizados em moldes convencionais. Apesar desta especificidade, esta ferramenta contém uma cavidade e uma bucha como os moldes tipicamente utilizados na moldação por injeção convencional.

2.3.1 Cavidade

Esta cavidade contém componentes que são correntemente usados na indústria dos moldes: um sistema de injeção, que permite injetar o polímero fundido para o interior da cavidade moldante e um sistema de refrigeração para a reduzir a temperatura da peça e da ferramenta moldante. Neste molde estão ainda instalados dois componentes que são específicos à moldação assistida a gás. O sistema de injeção do gás que permite introduzir, no momento adequado, o fluido pressurizado para o interior da peça. Para impedir que o polímero fundido retorne para o sistema de injeção durante o processo de injeção do gás, foi montado um sistema de anti retorno.

(1) Sistema de Injeção

O sistema de injeção usado neste molde é composto por um carburador para melhor controlar a temperatura do fundido durante o processo de injeção. Este controlo de temperatura do fundido é de extrema importância, principalmente em polímeros reforçados. Ao contrário dos bicos quentes, este carburador não assegura a fusão do polímero em uma única secção, mas sim em três diferentes secções. Estas contêm resistências elétricas, tornando o controlo de temperatura mais eficaz. Devido à disposição destas três secções, a injeção submarina da ferramenta moldante torna-se mais simplificada,

visto que o ponto de injeção está localizado no topo da peça. O carburador tem um circuito com 406 milímetros de comprimento e um diâmetro médio de 14 milímetros. Na Figura 12 mostra um corte do molde, apresentando o sistema de injeção.

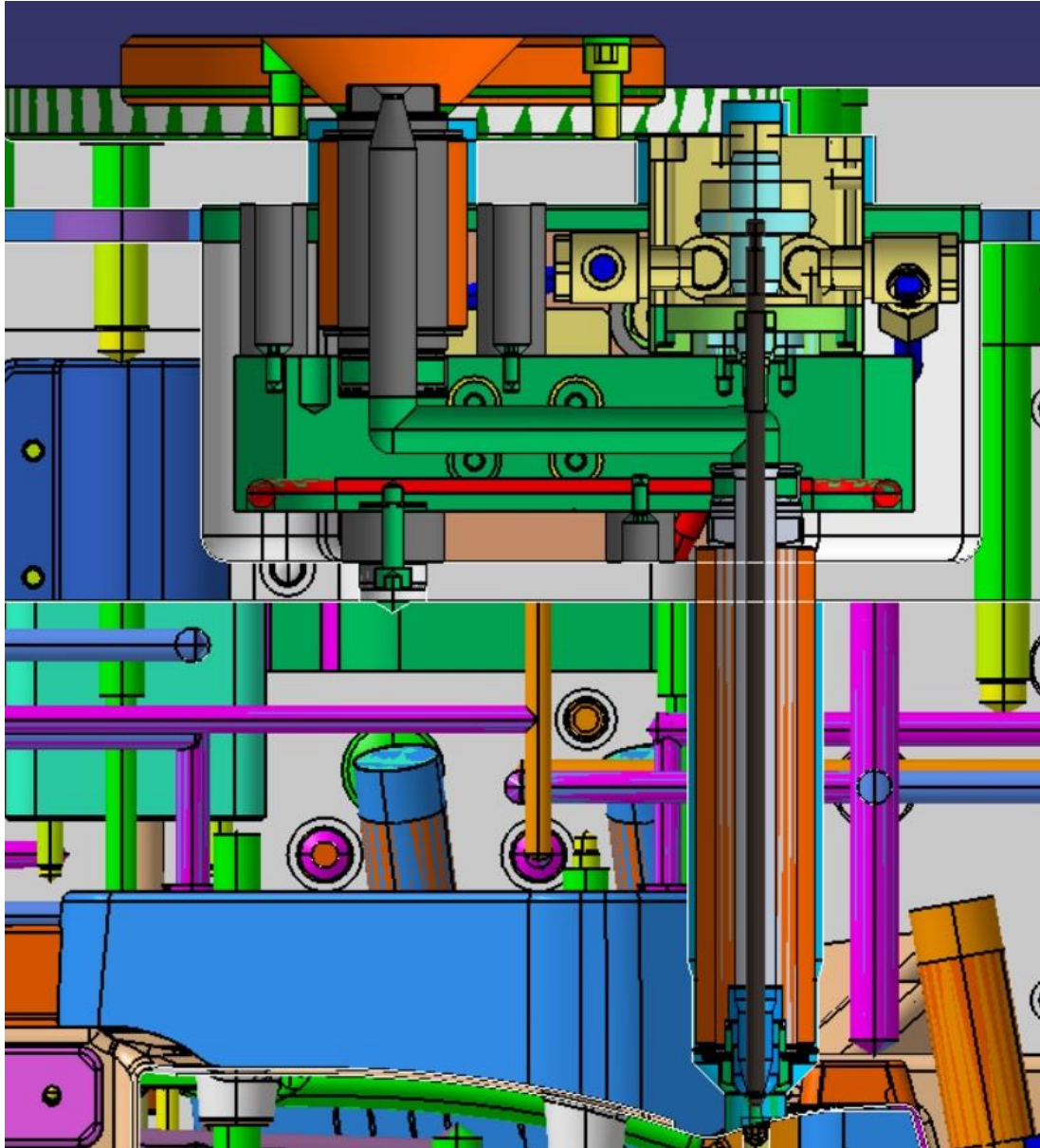


Figura 12. Sistema de injeção

(2) Sistema Anti-Retorno

Para impedir que o polímero fundido retorne ao carburador durante o processo de injeção do gás, um sistema anti-retorno foi instalado no molde. Este sistema é acionado hidráulicamente e executa as suas funções na última secção do carburador. Na Figura 13 mostra-se uma secção do molde, apresentando-se o detalhe do sistema anti-retorno.

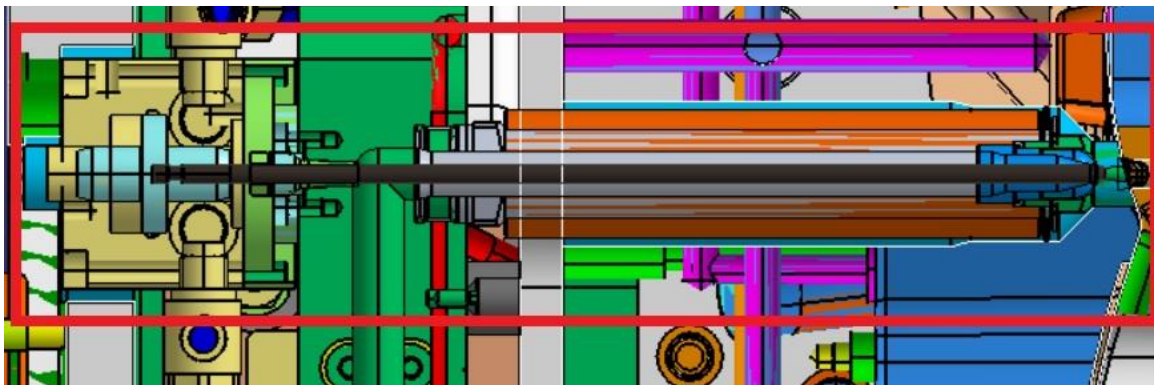


Figura 13. Sistema anti retorno

(3) Sistema de Injeção do Gás

Devido ao processo usado na produção deste molde, este contém um sistema de injeção de gás. Este sistema conduz o fluido inerte para o interior da peça através de um circuito e de um bico de injeção que está incorporado na cavidade do molde. Apesar deste bico de injeção marcar a peça, este ponto de injeção encontra-se localizado numa zona onde é montado uma tampa estética. Cada uma das cavidades moldantes tem um circuito de gás dedicado, podendo assim otimizar os parâmetros do gás individualmente. Os dois circuitos de injeção de gás têm um diâmetro de 8 milímetros no canal junto ao ponto de injeção e os restantes canais do circuito têm 10 milímetros de diâmetro. O comprimento da trajetória de ambos circuitos é diferente. Visto que a ligação entre o circuito e o controlador de gás é feito do lado oposto ao operador, um dos circuitos é mais comprido do que o outro. O circuito mais curto tem 295 milímetros de comprimento e o mais longo tem 392 milímetros de comprimento. A localização do ponto de injeção do gás pode ser observada a azul na Figura 14.

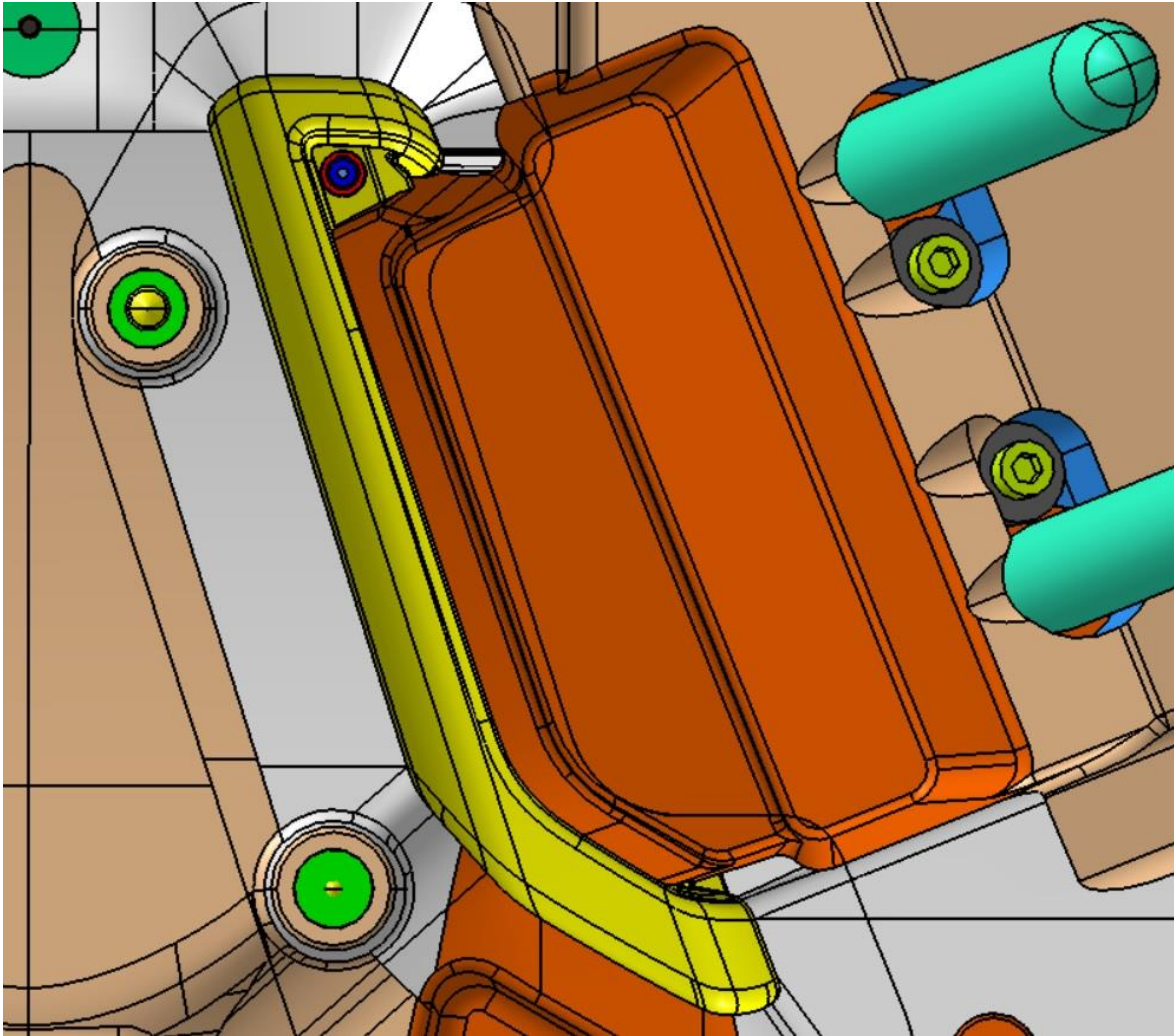


Figura 14. Ponto de injeção do gás

(4) Sistema de Refrigeração

Para que o molde mantenha uma determinada temperatura durante o processo de moldação, este tem de conter um sistema de refrigeração. Na cavidade do molde está incorporado um sistema com três canais de refrigeração independentes, cada um com uma entrada e uma saída. As ligações do sistema de refrigeração estão localizados no lado oposto ao operador da máquina de injeção. Devido à complexidade da geometria da peça foi necessário projetar um sistema de refrigeração com trajetórias complexas para aumentar assim a eficiência do sistema. A complexidade das trajetórias dos canais de refrigeração dificultam a contabilização do comprimento destes. Contudo, o diâmetro dos canais de refrigeração é de 10 milímetros de diâmetro. Neste molde o fluido operante do sistema de refrigeração é a água, mas com a alteração de alguns componentes do molde é possível operar com óleo nos canais de refrigeração. É possível visualizar, a azul, as entradas e as saídas dos diferentes canais de refrigeração, na Figura 15.

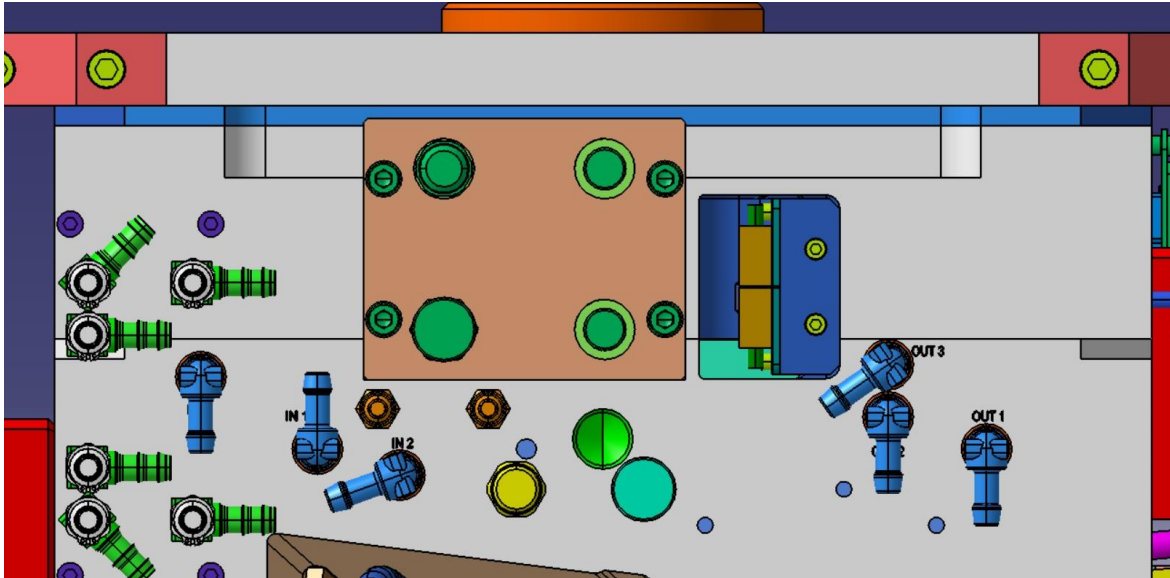


Figura 15. Sistema de refrigeração da cavidade

2.3.2 Bucha

Tal como a cavidade, a bucha contém componentes regularmente usados na indústria dos moldes e sempre que possível normalizados. Alguns dos componentes usados na bucha são idênticos aos usados na cavidade, como o sistema de refrigeração. Contudo certos componentes são específicos da bucha como os movimentos que permitem a obtenção de pormenores complexos e o sistema de extração que remove a peça injetada no final da moldação. Contudo, à semelhança da cavidade, esta bucha contém componentes exclusivos ao processo de moldação usado, tais como as cavidades não moldantes, de modo a acomodar o excesso de polímero que é expelido durante a injeção do gás.

(1) Movimentos

Os movimentos são componentes essenciais à obtenção de pormenores complexos da peça. Se o molde não contivesse estes movimentos seria impossível conceber pormenores como encaixes e nervuras e a extração da peça ficaria comprometida. Esta ferramenta moldante contém três movimentos, dois movimentos são acionados mecanicamente e o terceiro é acionado hidráulicamente. É de notar que um dos movimentos mecânicos é um movimento duplo. Este é composto por diversos componentes e estes componentes deslocam-se em diferentes momentos do processo de extração. Ou seja, para que um componente se possa deslocar, outro componente tem de movimentar-se primeiro. Os diferentes movimentos utilizados neste molde podem ser visualizados na Figura 16.

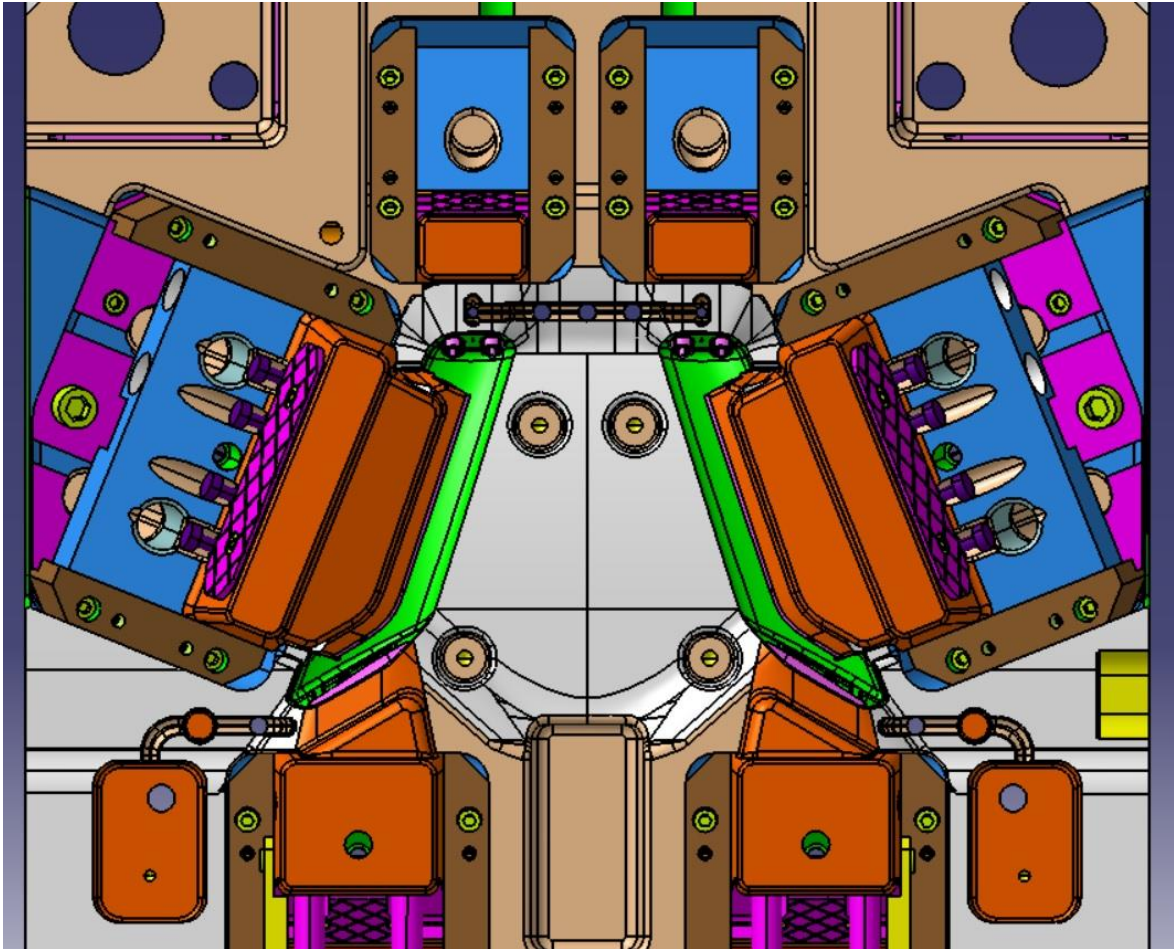


Figura 16. Movimentos do molde

(2) Sistema de Refrigeração

O sistema de refrigeração da bucha é composto por três canais de água independentes. Tal como na cavidade do molde, as ligações do sistema de refrigeração da bucha estão localizadas no lado oposto ao operador da máquina de injeção. Mais uma vez, devido à complexidade da peça a injetar, os canais de refrigeração têm uma trajetória complexa, dificultando a contabilização do comprimento destes. Como no sistema de refrigeração da cavidade, o diâmetro dos canais deste sistema é de 10 milímetros. Este sistema também pode ser adaptado para, caso necessário, trocar entre os diferentes fluidos operantes; água e óleo. Para além dos três canais de refrigeração da bucha, está instalado um circuito de refrigeração dedicado unicamente para o controlo de temperatura dos movimentos do molde. Este circuito mantém controlado a temperatura do movimento duplo e do movimento que é acionado hidráulicamente. Na Figura 17 podem-se observar, a azul, as entradas e a saídas do sistema de refrigeração da bucha.

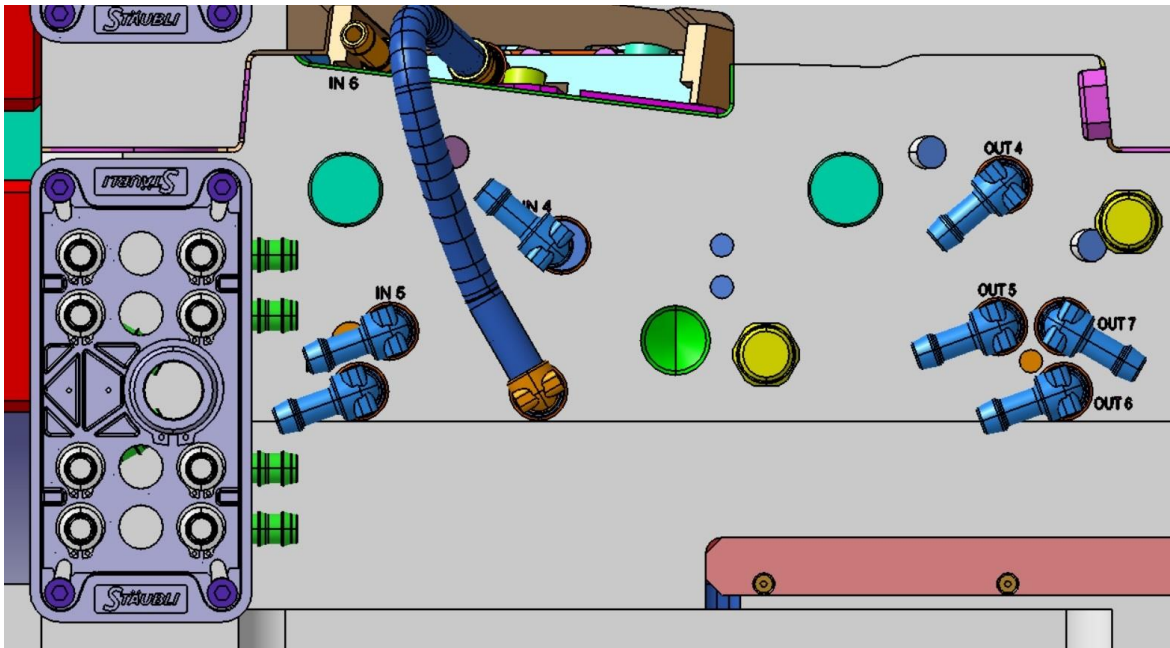


Figura 17. Sistema de refrigeração da bucha

(3) Sistema de Extração

O sistema de extração tem a função de remover a peça solidificada da cavidade moldante no final do processo, para poder iniciar-se um novo ciclo de moldação. O sistema de extração é composto por diferentes elementos como os extratores, placas extratoras e um elemento de ligação entre as placas de extração e a máquina de injeção (na indústria este elemento é conhecido por KO). A peça injetada é extraída por apenas cinco extratores, dois deles são tubulares com 7 milímetros de diâmetro e três são extratores convencionais com 4 milímetros de diâmetro. Estes extratores estão localizados na parte inferior da peça, como pode ser visualizado na Figura 18. Para além das duas peças que são produzidas, o polímero solidificado nas cavidades não moldantes também são extraídas pelo sistema de extração. Um extrator posicionado no canal da cavidade não moldante, remove o plástico em excesso destas cavidades.

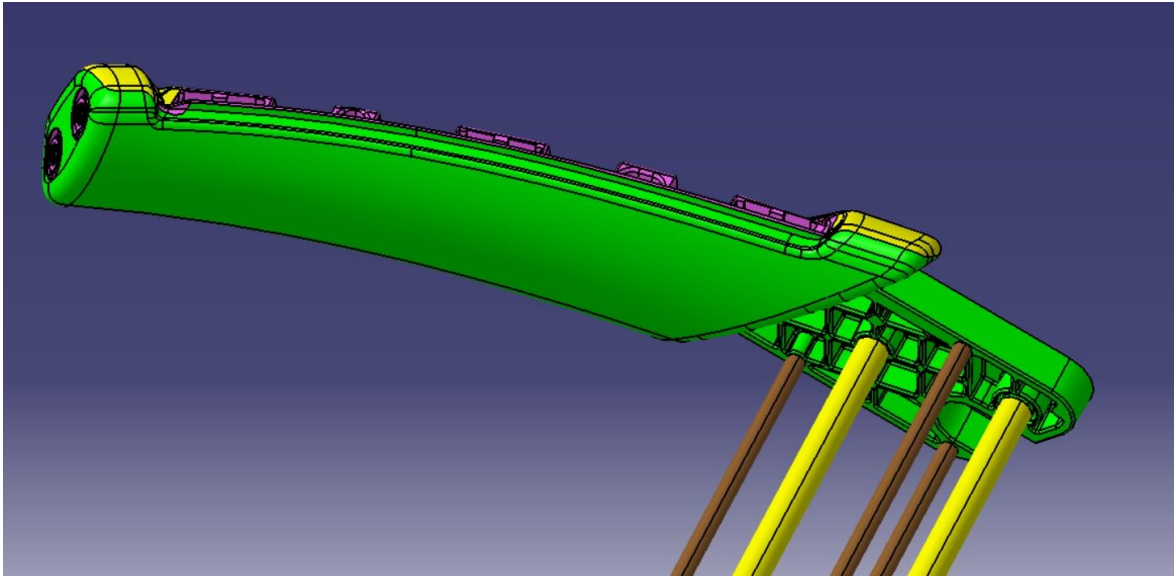


Figura 18. Sistema de extração

(4) Cavidades Não Moldantes e Sistema de Alimentação

Este molde, como mencionado anteriormente, contém duas cavidades não moldantes que armazenam o fundido em excesso, ou seja é depositado nestas cavidades o polímero fundido que é expelido durante o processo de injeção do gás. O processo usado neste molde foi a variante *full shot* da moldação assistida a gás. Devido a este processo, no canal das cavidades não moldantes existe uma válvula que impede o preenchimento desta cavidade durante a injeção do fundido. As duas cavidades não moldantes deste molde tem as seguintes dimensões: 40 mm de comprimento, 45 mm de largura e 20 mm de espessura. Depois de ter percorrido o carburador, o fundido é deslocado pelo sistema de alimentação que, no caso deste molde, é composto por um jito, um canal principal e dois ataques. Como é usual em ferramentas moldantes convencionais, no final do ciclo de moldação o sistema de alimentação possui material polimérico solidificado. Este material deve ser removido durante o processo de extração. O canal principal do sistema de alimentação tem formato retangular com 108 mm de comprimento, 8,7 mm de largura e 8 mm de espessura e o ataque tem um formato cónico com 10 mm de comprimento e uma frente de ataque com 1,5 mm de diâmetro. As geometrias da cavidade não moldante e do sistema de alimentação podem ser observadas na Figura 19.

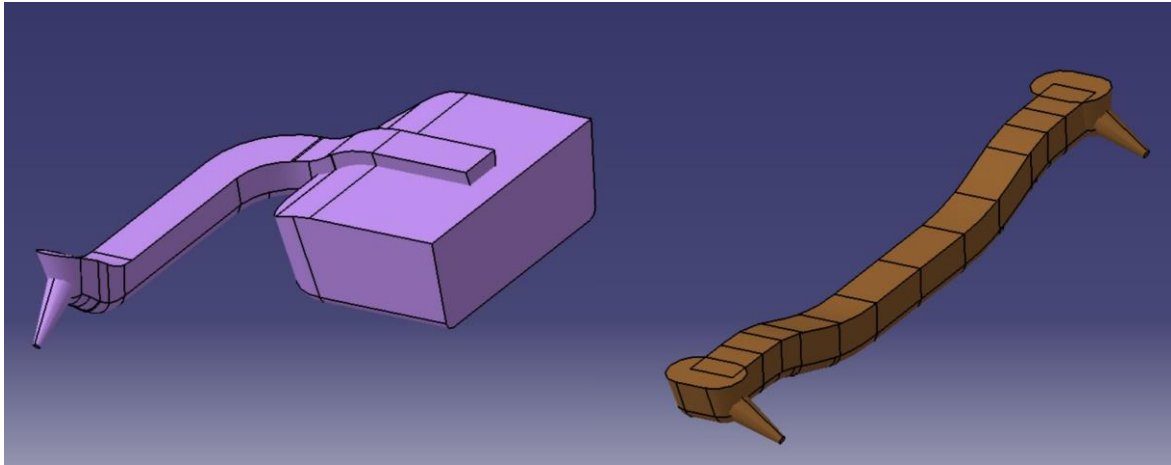


Figura 19. Cavidade não moldante e sistema de alimentação

2.3.3 Molde Fechado

Este molde é composto principalmente por um aço específico para moldes, tendo este a referência P20 da norma AISI e a referência 40 CrMnMo 7 da norma DIN. As dimensões máximas do molde são 628 mm de altura, 746 mm de comprimento e 496 mm de largura. O exterior da ferramenta moldante pode ser observado na Figura 20.

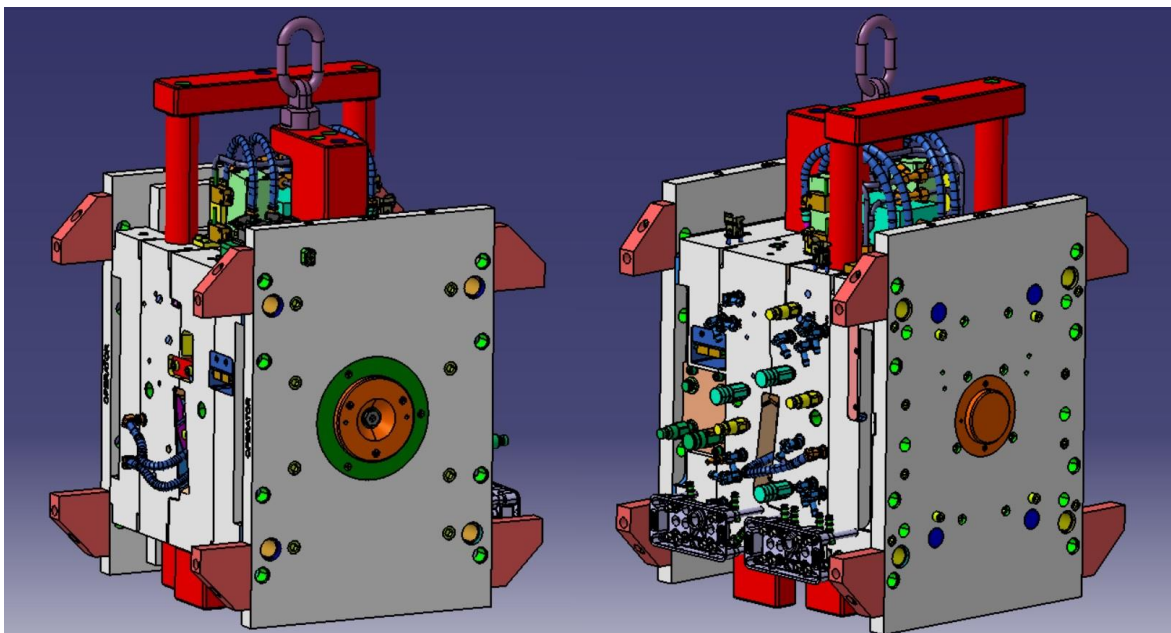


Figura 20. Exterior do molde

2.4 Máquina de Injeção

Relativamente à máquina usada durante a produção das modelos ensaiados, apenas foram disponibilizadas determinadas características. A máquina de injeção tinha uma força de fecho de 420 toneladas e o seu curso do fuso era no mínimo de 140 milímetros. Um sistema de injeção do gás foi utilizado durante a produção das peças, possibilitando assim

a utilização do processo de moldação por injeção assistida a gás. Para poder fixar o molde à máquina de injeção, este tinha de ter no mínimo uma distância entre barras de guiamento de 820 milímetros de comprimento e de largura. Esta distância entre barras foi medida através da modelação CAD do molde e pode ser observado na Figura 21. Nos anexos pode ser observado a ficha técnica da peça ensaiada, contendo todos os parâmetros de processamento do ensaio.

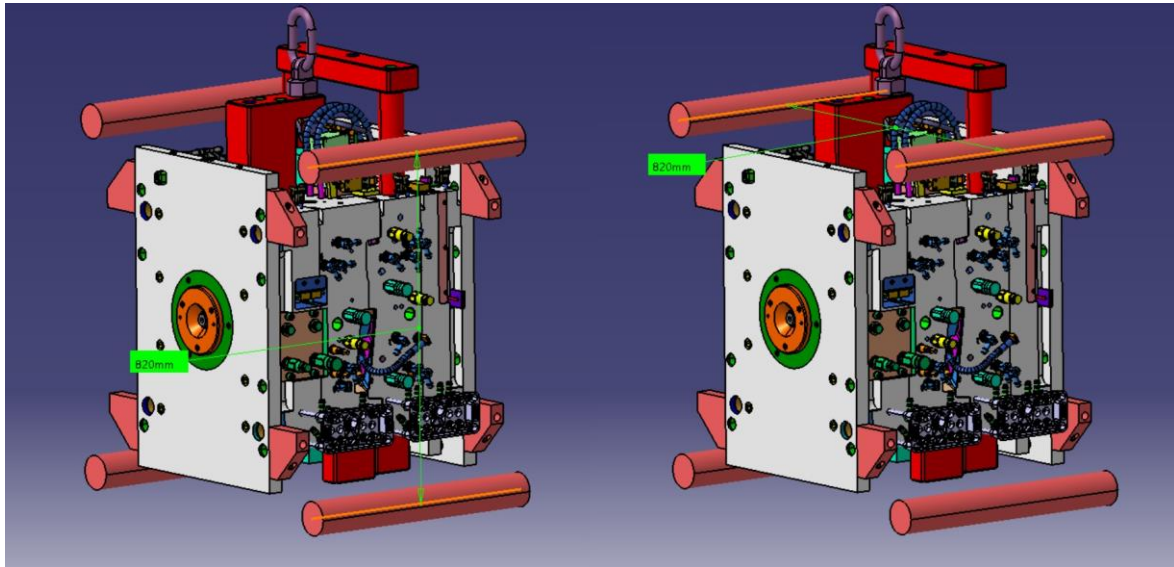


Figura 21. Distância entre barras da máquina de injeção

Capítulo 3

Modelação Numérica do Processo de Moldação por Injeção Assistida a Gás

Neste capítulo é descrito detalhadamente o processo de modelação do processo de moldação, bem como os requisitos técnicos da peça em estudo

3.1 Ferramentas de simulação numérica

No processo de obtenção de peças por moldação por injeção, a realização de ensaios experimentais devido a questões como complexidade, escala e/ou a questões de segurança tem tendência a assumir custos proibitivos, assumindo o estudo do processo, na fase de projeto, por recurso a simulações numéricas seria uma escolha adequada e extremamente interessante na minimização de custos de produção e otimização de metodologias de trabalho.

A simulação numérica recorre a equações que descrevem o comportamento de sistemas de diversas áreas científicas, como a dinâmica dos fluidos, a mecânica das estruturas, transferência de calor, entre outros. As simulações numéricas tem como principal vantagem possibilitar a resolução de equações, como as de Navier-Stokes, que atualmente são impossíveis de resolver analiticamente [15], [16]. Em vez de solucionar todas as equações de um problema em todo o seu domínio, a simulação numérica divide o domínio em pequenas partes e resolve-as separadamente usando métodos, como o método dos elementos finitos, e no final reúne os resultados das diversas partes do domínio, originando assim a solução do problema [15]. Como a maioria dos *softwares* de simulação numérica comerciais utilizam o método dos elementos finitos para o processamento dos dados, estes podem ser mencionados como *softwares* de elementos finitos. O método dos elementos finitos auxilia a prever o comportamento de um produto afetado por diversos efeitos físicos, como tensões residuais, fadiga, deformações, entre outros [17].

Existem atualmente diversos produtores de *softwares* especializados na simulação numérica. Produtos com o Abaqus FEA® e o ANSYS® são *softwares* de elementos finitos dedicados à resolução de problemas estruturais, ou seja analisam a geometria do modelo

importado para o programa e as propriedades mecânicas do material aplicado no modelo e determinam, em certas condições, a resistência do modelo a forças aplicadas. O Autodesk® Moldflow e o Moldex3D® utilizam as equações de Navier-Stokes para prever o comportamento de um fluido, neste caso um polímero, durante um processo de moldação, seja uma moldação por injeção ou uma moldação por bi-injeção. Para além dos *softwares* dedicados à simulação numérica, alguns programas de CAD (*Computer-Aided Design*) como o SolidWorks e o Catia, apesar de não conterem uma secção profundada como os *softwares* anteriores, possibilitam a simulação numérica de determinadas áreas como a mecânica estrutural e dinâmica de fluidos. Estes *softwares* de elementos finitos são essencialmente usados na indústria e nas diversas áreas científicas. O uso destes programas têm vindo a aumentar, principalmente nas áreas científicas. Na indústria as simulações numéricas ajudam no progresso de projetos, como por exemplo na indústria dos moldes, o uso de *softwares* como o Moldflow® e o Moldex3D® auxiliam o projeto de um molde, prevendo as várias etapas do processo de moldação e permitindo postular se o funcionamento da ferramenta moldante é o correto ou não. Estes, permitem ainda também prever possíveis defeitos que a peça injetada possa conter. Na academia, a simulação numérica permite realizar uma investigação focada essencialmente numa componente prática, sem necessitar de um modelo físico. Uma desvantagem dos modelos experimentais é o custo de fabricação de um modelo físico. Por vezes, numa pesquisa científica, o modelo físico exige uma grande fatia do financiamento da investigação. O uso de *softwares* de elementos finitos permite realizar a pesquisa científica desejada, excluindo os custos relacionados com o modelo físico. Quando o *software* é usado adequadamente, os resultados adquiridos das simulações numéricas aproximam-se dos resultados dos modelos experimentais e são obtidos num período de tempo inferior.

Tendo como exemplo o *software* CAE (*Computer-Aided Engineering*) Autodesk® Moldflow para a realização de simulações numéricas do processo de moldação. O Autodesk® Moldflow fornece ferramentas de simulação numérica, focadas na moldação por injeção e nas suas variantes, para auxiliar o projeto da ferramenta moldante e otimizar o processo de moldação. O *software* orienta os projetistas, fabricantes de moldes e engenheiros nas diferentes etapas de configuração da simulação e na interpretação dos resultados, mostrando a influência de determinadas variáveis como o material, a localização da frente de enchimento, a geometria da peça, entre outros, na conceção de produtos poliméricos. O Moldflow® permite testar diferentes parâmetros de processamento e concluir qual é o mais apropriado antes de finalizar o projeto [18]. Como anteriormente referido, o Autodesk® Moldflow utiliza as equações de Navier-Stokes para prever o comportamento do polímero fundido dentro da cavidade moldante do molde durante os diversos estados do processamento de moldação. Nas moldações não convencionais, como a moldação assistida a gás e a água, o *software* para além de usar as equações de Navier-Stokes também utiliza equações específicas do processo para antever as trajetórias do fluido operante no interior do fundido.

A modelação numérica da moldação por injeção assistida a gás contém pormenores exclusivos a este processo. Uma das características desta modelação é a escolha entre as duas variantes deste processo, a variante *full shot* e a *short shot*. Para o *short shot* é necessário indicar ao *software* que o gás tem de ser injetado para o interior da peça antes que cavidade moldante esteja totalmente preenchida. No *full shot* a gás é apenas injetado quando a

cavidade está completamente preenchida. A variante *full shot* é mais usual para a produção de peças ocas com geometrias complexas e a variante *short shot* é mais apropriada para peças com uma configuração simples e comprida. Outra particularidade da modelação da moldação assistida a gás é o atraso da injeção do fluido operante (*Delay time*). Este atraso tem a função de criar uma camada de polímero solidificado nas superfícies da cavidade moldante, reduzindo assim a probabilidade de produzir peças com defeitos na cavidade oca. Uma das possíveis imperfeições é o gás romper o fundido, como pode ser observado na Figura 22. Este atraso pode ser utilizado nas duas variantes da moldação assistida a gás. A modelação deste processo permite definir um perfil de pressões de gás, ou seja é possível injetar o gás com diferentes valores de pressão em diferentes períodos de tempo. Esta particularidade permite controlar, com uma maior precisão e exatidão, o volume de gás no interior da peça. Por vezes, para iniciar a injeção do gás são utilizadas pressões elevadas durante um baixo período de tempo e de seguida são usadas pressões inferiores durante um maior período de tempo para realizar a etapa de compactação. Em determinados moldes concebidos para a moldação assistida a gás, são projetadas cavidades não moldantes para armazenar o polímero em excesso que é extraído durante o injeção do gás. Estas cavidades contêm uma válvula que impede o seu preenchimento durante a fase de injeção do fundido, abrindo apenas durante a etapa de injeção do gás. O controlo desta válvula também é um parâmetro que pode ser ajustado na modelação numérica.

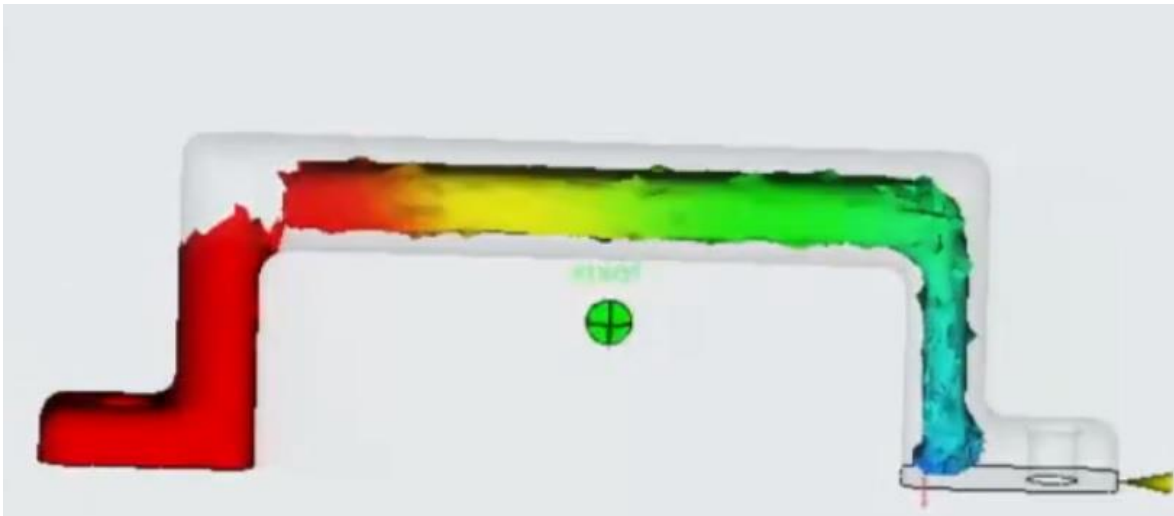


Figura 22. Peça defeituosa usando a moldação assistida a gás (*Blow-through*) - adaptado de [19]

3.2 Modelação Numérica da Peça em Estudo

Neste trabalho pretende-se realizar um estudo de otimização do processo de moldação por injeção assistida a gás de uma ferramenta moldante existente.

Uma possível opção para a eliminação dos defeitos superficiais da peça seria projetar uma nova ferramenta moldante, com novas localizações para os pontos de injeção de fundido e de gás, diferentes configurações para canais de água do sistema de refrigeração e diferentes aços para as cavidades moldantes ou seja, implicaria todo um novo projeto da ferramenta moldante sem a garantia de que, no final o maior defeito de fabrico

identificado seria solucionado. Todavia essa opção teria custos extremamente elevados. A alteração possível, seria mudar o processo de moldação, para a moldação por injeção assistida a água. Este processo, permite obter peças poliméricas com a adequada redução de massa, principalmente em produtos de elevada espessura, e tendencialmente com acabamentos superficiais isentos de imperfeições. Porém este processo requer uma outra unidade de controlo de injeção do fluido operante, neste caso água, diferente do que é utilizado no processo de moldação por injeção assistida a gás. Mais ainda, o uso do processo de moldação assistida a água requereria um novo sistema de injeção, ou seja seria necessário trocar os bicos de injeção de gás por uns para água, especificamente de modo a acomodar tanto a injeção como a extração. Todas estas alterações, são aqui consideradas extremamente drásticas e com custos bastantes elevados, daí se enveredar pelo que se considera uma opção intermédia e que se prende com um estudo numérico paramétrico do processo de moldação assistida a gás, no sentido de otimizar os parâmetros de processamento. Alterando apenas as variáveis de processamento é possível testar diferentes possibilidades de produção das peças a um custo relativamente baixo, quando comparado as alternativas anteriormente referidas. Modificando parâmetros, como a temperatura do fundido, pressão de injeção do gás e o tempo de manutenção, permite conceber peças sem comprometer os requisitos técnicos exigidos – a massa da peça, o acabamento superficial e os requisitos dimensionais nas zonas críticas da peça. Para manter o custo dos ensaios o mais baixo possível e para evitar a necessidade de testar as diferentes variáveis do processo na ferramenta moldante existente, neste trabalho, foram utilizadas ferramentas numéricas para prever o processo de moldação por injeção assistida a gás, em mais concreto o *software* Autodesk® Moldflow Insight 2012.

3.2.1 Modelo e Requisitos Técnicos

Nesta secção define-se os requisitos técnicos da peça em estudo. Estes requisitos têm diferentes categorias, como requisitos dimensionais, visuais, estruturais, etc. Os requisitos técnicos permitem classificar a qualidade das peças produzidas.

De início é necessário definir corretamente as dimensões gerais da peça em estudo. Desta forma é possível verificar se as peças injetadas estão de acordo com o previsto. Não é possível determinar todas as dimensões devido à geometria complexa da peça. O desenho técnico da peça pode ser visualizado na Figura 23. É de notar que as dimensões presentes no desenho técnico são dimensões isentas de contrações do polímero e encontram-se em milímetros.

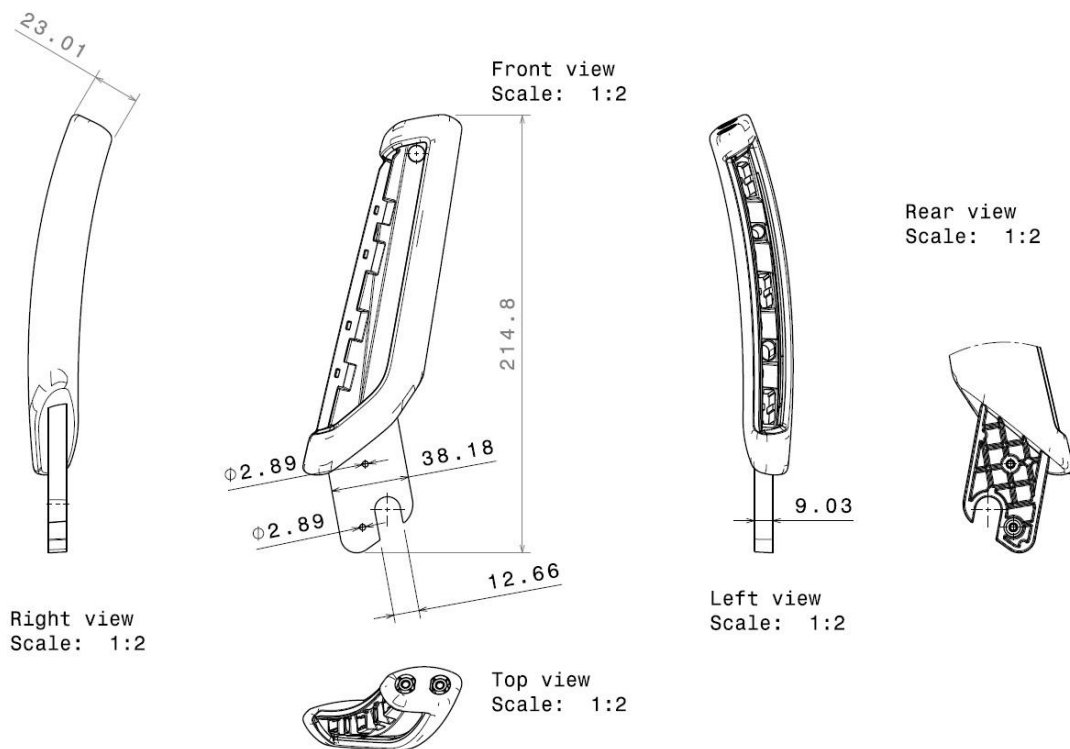


Figura 23. Desenho técnico da peça em estudo

A peça em estudo tem requisitos visuais, estruturais e dimensionais. Como requisitos visuais, é exigido que as peças injetadas não apresentem imperfeições superficiais, ou seja a peça não pode conter “chupados”, marcas de união de fundido, zonas queimadas nem zonas por preencher, visto que esta peça vai ser usado no interior de um automóvel, numa zona onde a peça é visível para o utilizador do veículo. Para além dos requisitos visuais anteriormente referidos, o acabamento superficial exigido a esta peça é um acabamento de alto brilho. De referir que foi selecionado uma poliamida reforçada com 30 % de fibra de vidro devido a requisitos mecânicos e que o acabamento superficial exigido, no modelo experimental, se mostrou algo difícil de conseguir, constituindo mesmo o que aqui se identifica como um defeito, ver Figura 24.

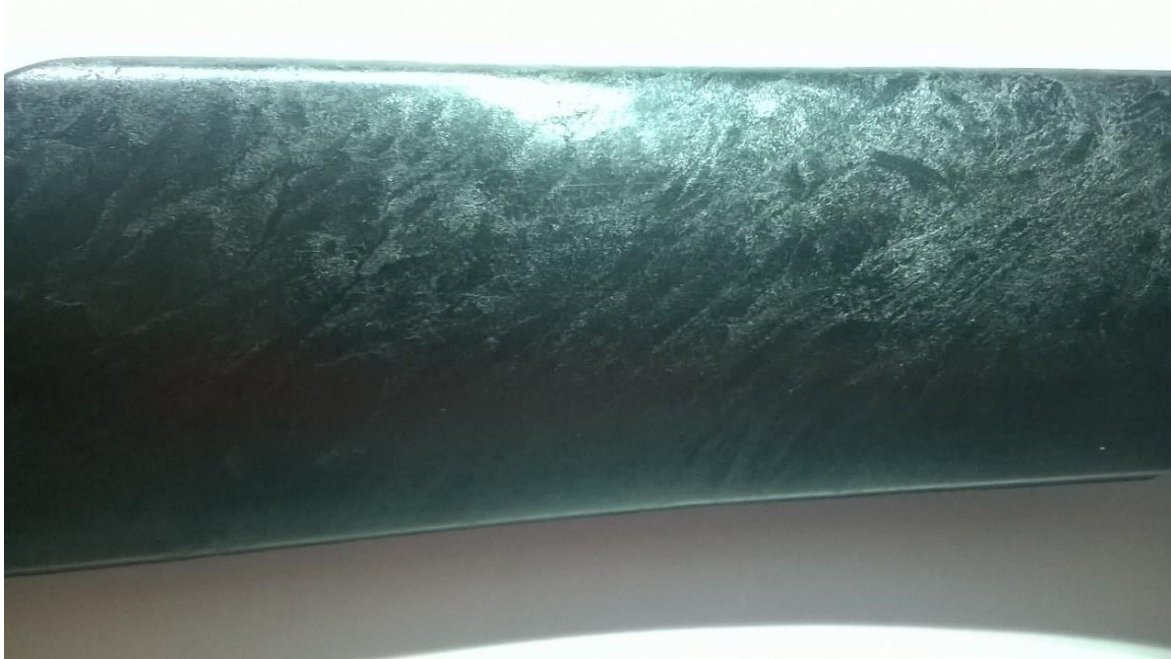


Figura 24. Detalhe da exposição da fibra da peça

Ao nível dos requisitos mecânicos, a peça tem de suportar as forças aplicadas durante a utilização do veículo. Contudo, a peça também tem um limite de massa de 125 gramas. Este limite prende-se com a necessidade de redução de peso nos veículos da atualidade, tornando-os assim mais eficientes ao nível de consumo de combustível. A massa da peça é determinada principalmente pelo nível de compactação do fundido durante a fase de manutenção e pelo volume de gás injetado para o interior da peça. Quanto maior for a compactação da peça e o volume de gás, menor será a massa desta.

Relativamente aos requisitos dimensionais, na peça em estudo existem zonas críticas para o encaixe desta na porta do automóvel, por isso é exigido um controlo dimensional rigoroso nestas zonas. Foi indicado que nestas áreas críticas o toleranciamento dimensional é de $\pm 0,1$ milímetros. O controlo dimensional foi executado através das distâncias de pontos específicos em cada zona crítica. Nas diferentes áreas identificadas foi atribuída uma numeração alfabética para tornar a sua identificação mais simples. Na zona crítica A foi examinado a largura do encaixe inferior, na área B foi controlada a distância entre os dois furos de fixação, na zona C foi verificada a distância entre os dois encaixes superiores e na zona D foi avaliada a dimensão de um dos encaixes para a tampa estética. As diferentes zonas críticas podem ser visualizadas na Figura 25.

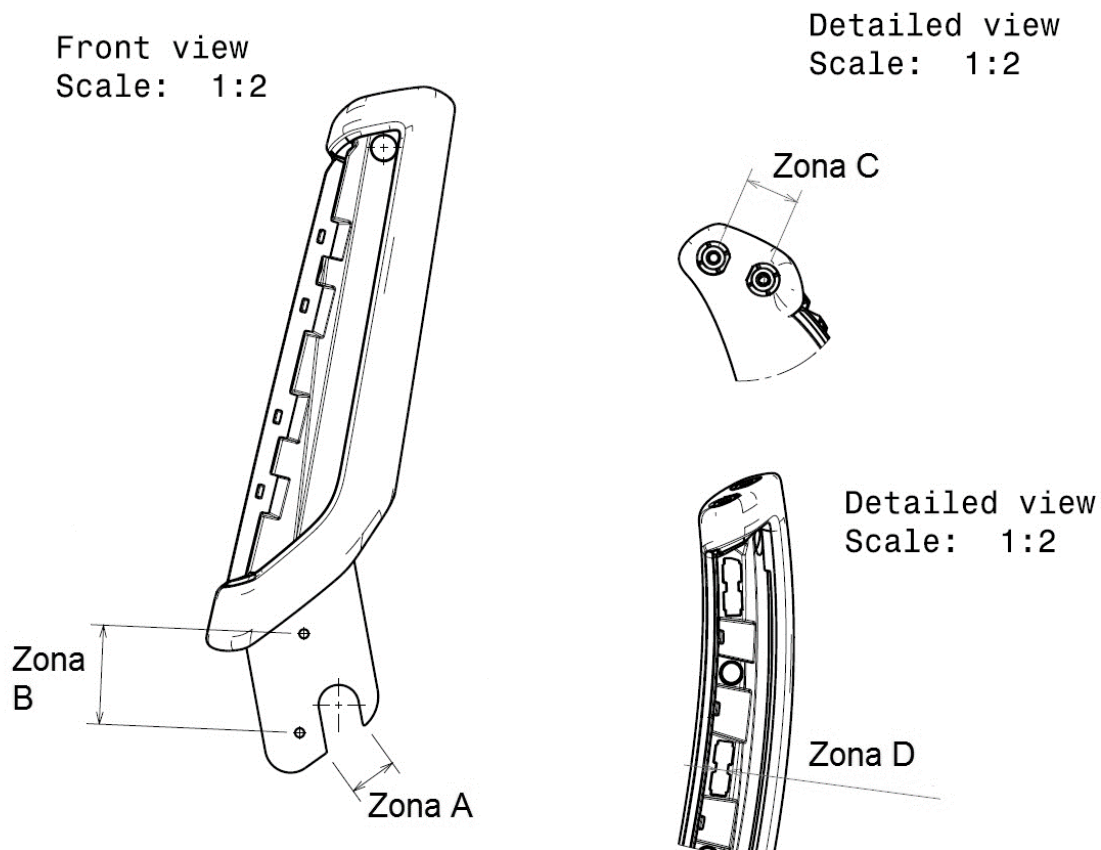


Figura 25. As diferentes zonas do controlo dimensional

3.2.2 Preparação do Modelo

A primeira etapa para encontrar uma solução para eliminar os defeitos superficiais da peça em estudo foi recriar a moldação da ferramenta moldante existente. Para isso foi necessário gerar um modelo numérico do puxador e do processo capazes de representar o experimental. Para poder reproduzir a moldação do molde existente são necessários vários componentes, sendo um desses o modelo CAD. Este modelo é uma representação virtual da peça física, permitindo assim importar a geometria desta para os *softwares* de simulação numérica. No caso da peça em estudo, a sua modelação CAD foi disponibilizada e por isso não foi necessário gerar um modelo numérico da sua geometria. O *software* Autodesk® Moldflow Insight 2012 permite importar modelos de diversos formatos; IGES, STL, STEP, entre outros. O Moldflow® possibilita a importação de modelos com formatos específicos de *softwares* CAD, como o *catpart*, o *x_t* e o *sldprt*, mas é necessário instalar suplementos do Moldflow®, o Autodesk® Moldflow Design Link. O CAD da peça em estudo continha o formato STL, por isso a importação para o Moldflow® foi direta. Na Figura 26 pode-se visualizar o modelo CAD da peça.

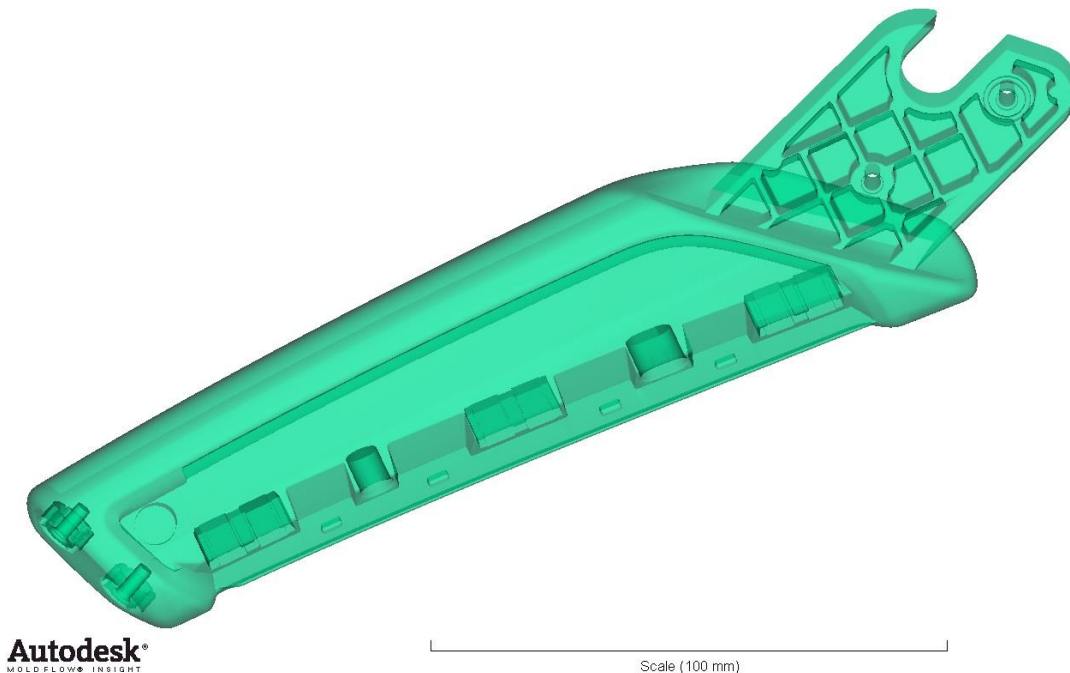


Figura 26. Modelo CAD

Antes de realizar as simulações numéricas da moldação é necessário escolher adequadamente o tipo da malha que o processo escolhido permite. A aplicação da malha no modelo numérico da peça permite discretizar o modelo em partes com uma menor complexidade, possibilitando assim o uso do método dos elementos finitos e melhorando a eficiência do cálculo computacional. Em determinados processos de moldação que o Moldflow® disponibiliza para simular, como a moldação por transferência, a moldação assistida a gás e a moldação por bi-injeção, não é permitido “malhar” a peça com os três tipos de malha do Moldflow® (*Midplane*, *Dual Domain* e 3D). A malha *Midplane* consiste em um conjunto de elementos triangulares de três nós interligados. Estes elementos formam uma representação 2D do modelo CAD da peça com uma determinada espessura [20], [21]. O tipo de malha mais corrente nas simulações numéricas e o que disponibiliza uma maior quantidade de diferentes tipos de análise no Autodesk® Moldflow é a malha *Dual Domain*. Esta malha aplica elementos triangulares de três nós na superfície do modelo sólido da peça. Para que a *Dual Domain* proporcione uma simulação com uma representação realística do processo é recomendado o uso de uma malha com razão de aspeto média inferior a 6 [20], [21]. Caso se pretenda converter uma malha *Dual Domain* para uma malha 3D é recomendado o uso de uma razão de aspeto máxima inferior a 30 [20]. Por último, a malha 3D representa o modelo CAD, preenchendo o modelo com elementos tetraédricos de quatro nós. Esta malha é apropriada para peças complexas com secções com uma espessura elevada porque os elementos tetraédricos atribuem uma representação 3D realística do modelo sólido. Contudo, a malha 3D necessita de uma maior tempo de computação, comparativamente aos dois tipos anteriormente mencionados. Teoricamente, o tamanho da malha deve ser o menor possível para prever melhor o escoamento do fundido, mas uma malha demasiada refinada implica um aumento no tempo de computação [21]. Um exemplo de cada tipo de malha pode ser observado na Figura 27.

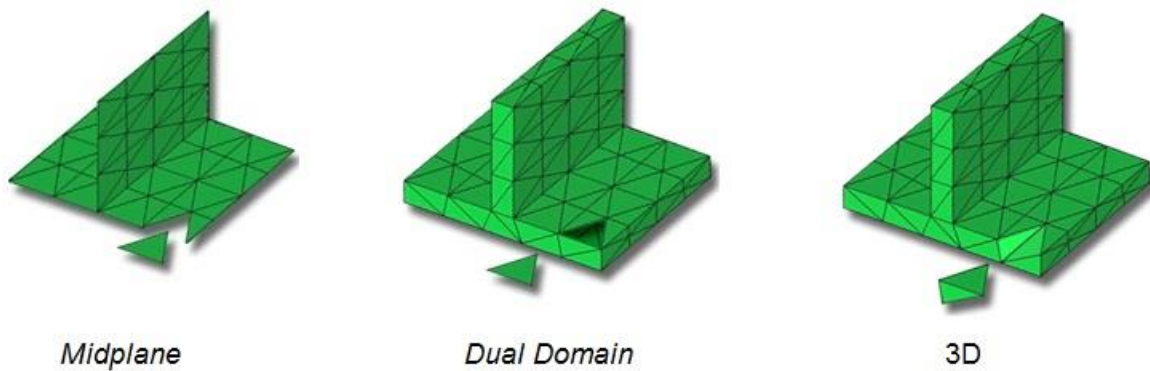
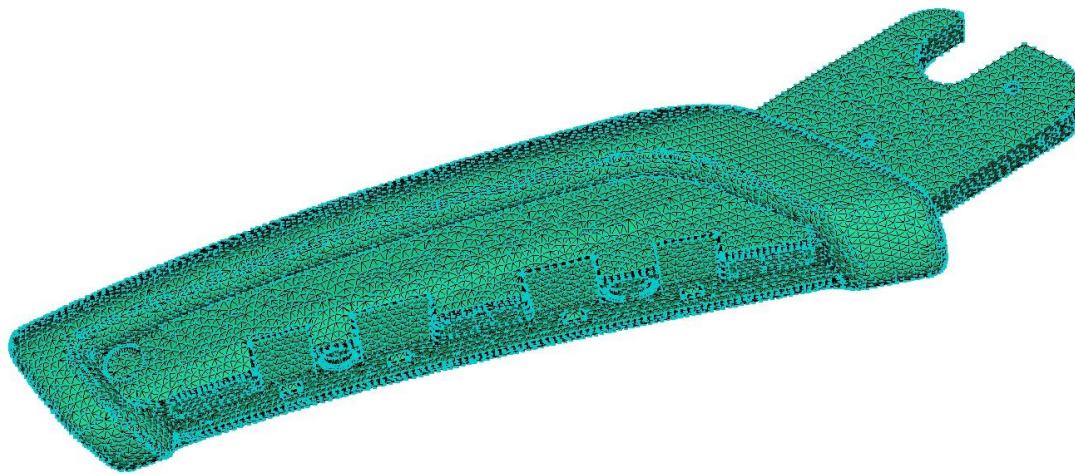


Figura 27. Os diferentes tipos de malha do *software* Autodesk® Moldflow Insight 2012 - adaptado de [22]–[24]

Relativamente à moldação assistida a gás, neste só é permitida a utilização de dois tipos de malhas: a *Midplane* e a 3D. Contudo, para evitar possíveis defeitos na malha 3D, onde só é possível analisar a razão de aspeto, foi aplicada no modelo numérico da peça em estudo uma malha *Dual Domain* com o propósito de a converter, posteriormente, para 3D. Foi aplicado no modelo CAD da peça uma malha com um comprimento de aresta global (*Global edge length*) de 1,5 milímetros e uma tolerância de união (*Merge tolerance*) de 0,15 milímetros. Apesar desta malha aplicada não conter defeitos que pudessem a por em causa o desempenho das simulações, como interseções entre elementos, elementos sobrepostos e elementos não orientados, a sua razão de aspeto máxima era de 63. Como anteriormente referido, quando se pretende converter uma malha *Dual Domain* para 3D a razão de aspeto máxima deve ser inferior a 30. Depois de reparada a malha, foi possível obter uma razão de aspeto máximo de 17, um valor médio de 3,32 e um valor mínimo de 1,16. Para além das diferentes razões de aspeto, é possível visualizar as restantes características da malha *Dual Domain* na Tabela 2. O aspeto da malha pode ser observado na Figura 28. Assim, desta forma, encontram-se as condições para realizar a conversão para a malha 3D. Para o processo de moldação por injeção assistida a gás foi recomendada a utilização de pelo menos 10 elementos ao longo da espessura da peça, por isso a malha 3D contém os 10 elementos recomendados com um comprimento de aresta máximo (*Maximum allowed edge length through thickness*) de 1 milímetro. Esta malha tem 1381431 elementos tetraédricos, existem 236460 nós ligados, a malha tem um volume de 110,563 cm³ e uma razão de aspeto máximo de 45,8, médio de 4,90 e mínimo de 1,05. Para a malha 3D do Moldflow® é recomendada uma razão de aspeto máxima de 50 [20]. É possível visualizar em detalhe os 10 elementos ao longo da espessura do modelo numérico na Figura 29.

Tabela 2. Características da malha *Dual Domain*

Propriedade	Valor		
Nº de elementos triangulares	48470		
Nº de nós ligados	24233		
Área projetada	304,477 cm ²		
Volume	110,536 cm ³		
Razão de aspeto	Máximo	Médio	Mínimo
	17	3,32	1,16
Percentagem de correspondência	65,4%		
Percentagem de correspondência recíproca	60 %		



Autodesk
MOLDFLOW INSIGHT

Scale (100 mm)

Figura 28. Malha *Dual Domain*

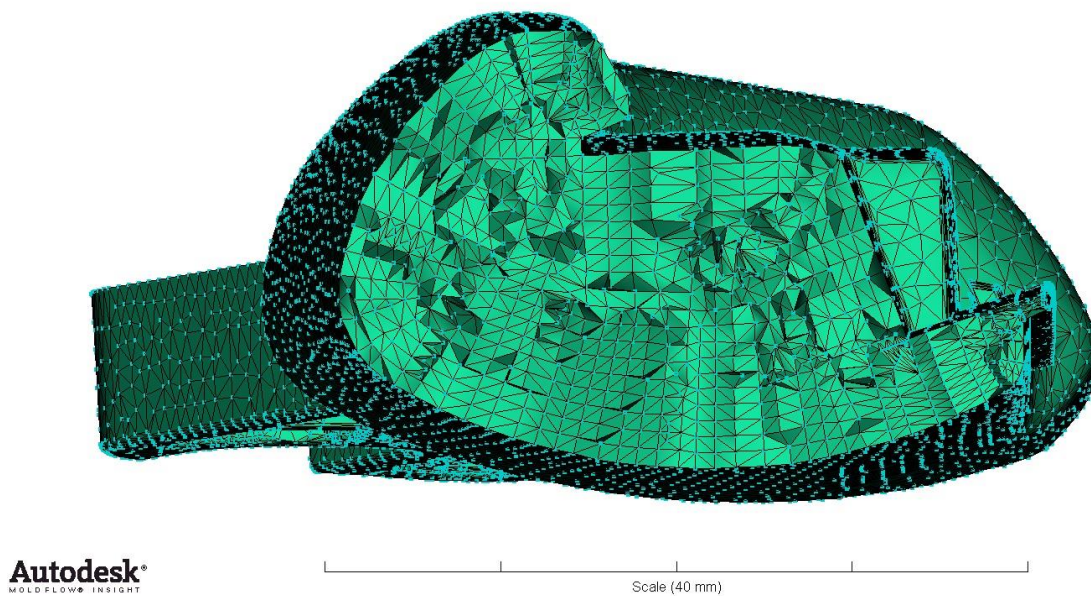


Figura 29. Detalhe da malha 3D ao longo da espessura

Depois de aplicada a malha 3D na peça em estudo, urge dotar o modelo numérico dos diversos sistemas que a ferramenta moldante possui. Dependendo do tipo de análise numérica pretendida, o modelo de um processo de moldação convencional pode conter um sistema de alimentação e um sistema de refrigeração. No entanto, em processos de moldações não convencionais podem ser adicionados sistemas não usuais, como insertos e cavidades não moldantes. Não é necessário adicionar um sistema de extração ao modelo numérico, independentemente do tipo de moldação, pois este sistema executa as suas funções numa fase que não está incluída nas simulações do Moldflow®. A modelação dos sistemas atrás referidos auxiliam a prever com uma maior eficiência a moldação da ferramenta moldante. Como exemplo, a modelação do sistema de refrigeração permite analisar a eficiência deste durante a etapa de arrefecimento e a modelação do sistema de alimentação e de refrigeração ajudam a prever melhor as contrações da peça injetada [25].

No caso da ferramenta moldante deste trabalho, foi incorporado no modelo numérico o sistema de alimentação e duas cavidades não moldantes. Devido à ausência da análise de arrefecimento durante a simulação numérica do processo de moldação assistida a gás quando aplicado uma malha 3D no modelo CAD da peça, não foi incluído no modelo numérico o sistema de refrigeração. A única hipótese de realizar uma análise ao sistema de refrigeração do molde seria aplicar uma malha *Midplane* no modelo virtual. Esta opção foi excluída devido à inadaptação da geometria da peça em estudo, levando a uma análise não representativa do modelo experimental. Contudo, usando a malha 3D foi possível realizar análises das fases de preenchimento da cavidade moldante e de compactação do processo utilizado no molde existente e examinar as contrações e empenos da peça injetada.

O modelo numérico do sistema de alimentação usado neste estudo é uma aproximação do experimental. Esta simplificação do modelo numérico reduz a complexidade geométrica deste e não coloca em causa a credibilidade dos resultados das simulações. Na Figura 30 é possível observar a geometria do modelo do sistema de alimentação usado durante as simulações numéricas. O jito do sistema tem uma geometria

cónica com 5 milímetros de altura, a base inferior tem 3,8 milímetros de diâmetro e a base superior tem 3,5 milímetros de diâmetro. O canal principal tem um perfil retangular com 108 milímetros de comprimento, 8 milímetros de espessura e de largura 8,7 milímetros. Este canal tem duas secções com uma inclinação de 20° , relativamente ao plano XY, durante um comprimento de 25 milímetros. Neste sistema de alimentação foram usados dois ataques, um para cada cavidade moldante, com uma geometria cónica. A base com o diâmetro inferior tem 1,5 milímetros, a outra base tem 5 milímetros de diâmetro e o comprimento do cone é de 10 milímetros. O ataque tem uma inclinação de 150° relativamente à base inferior do canal principal de forma a possibilitar a localização desejada do ponto de injeção, visto que a geometria da zona de injeção é complexa.

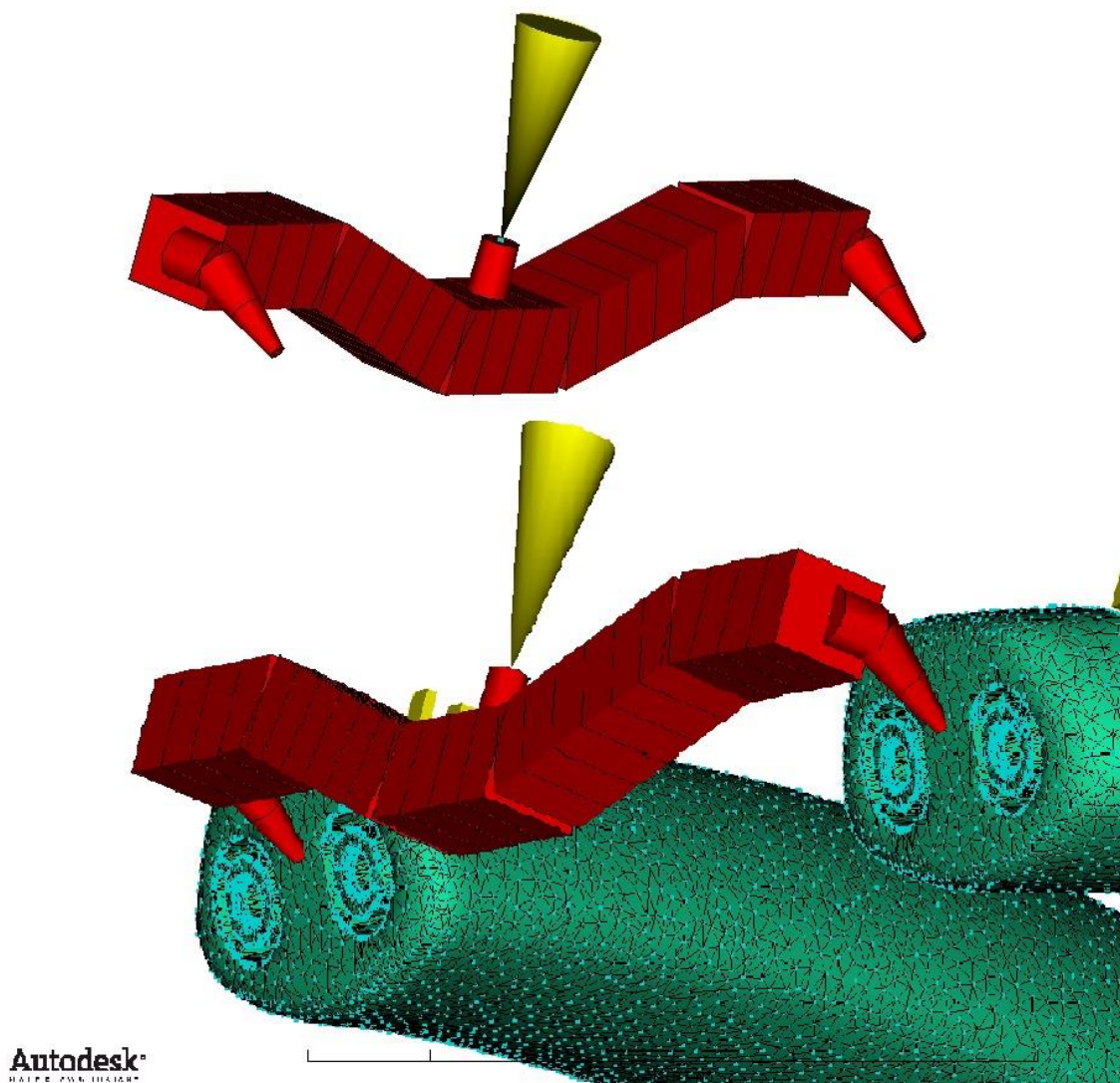


Figura 30. Geometria do sistema de injeção do modelo numérico

Para além do sistema de alimentação, este modelo numérico contém as modelações das duas cavidades não moldantes para o excesso de fundido. Mais uma vez este modelo é uma aproximação do modelo experimental. Cada uma destas cavidades tem um ataque, um canal e uma zona de armazenamento. O ataque tem uma geometria cónica com $13,5^\circ$

milímetros de comprimento, uma base com 1,5 milímetros de diâmetro e outra base com 6 milímetros. O ataque tem uma inclinação de 40° relativamente ao plano XY. O canal é composto por quatro secções cilíndricas de 9 milímetros de diâmetro. A primeira secção, a mais próxima do ataque, tem um comprimento de 18 milímetros e uma inclinação de 40° relativamente ao plano XY. A seguinte secção tem a função de afastar a zona de armazenamento da peça e tem 32 milímetros de comprimento. É neste segmento que está localizada a válvula que permite o escoamento do fundido para o interior da zona de armazenamento durante a injeção do gás. A terceira secção tem 16,28 milímetros de comprimento e uma inclinação, relativamente ao eixo da segunda secção, de aproximadamente $137,5^\circ$. A última secção, a mais próxima da zona de armazenamento, tem 5 milímetros de comprimento. A zona de armazenamento tem um perfil retangular de 40 milímetros de comprimento, 45 milímetros de largura e uma espessura de 20 milímetros. A geometria da modelação da cavidade não moldante pode ser visualizado na Figura 31.

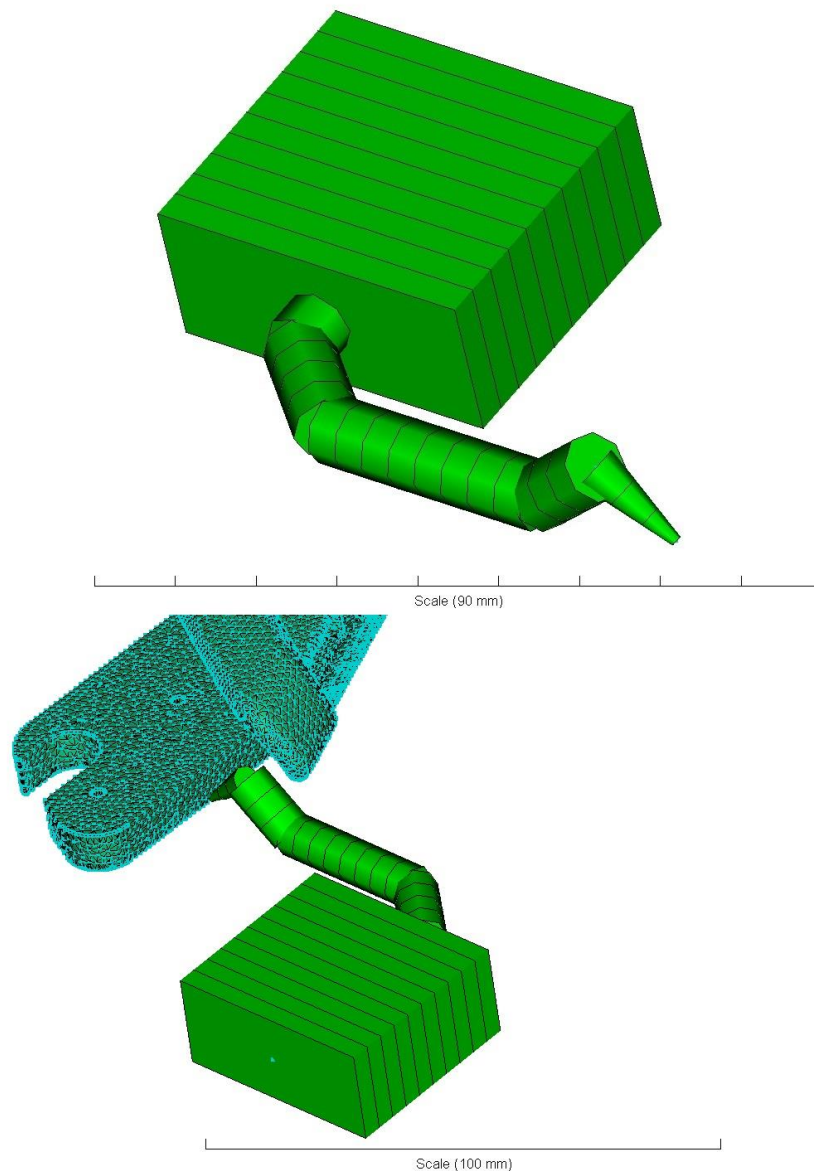


Figura 31. Geometria da cavidade não moldante

Aplicada a malha nos diferentes modelos numéricos representativos dos experimentais, a etapa seguinte é a determinação da localização dos pontos de injeção do fundido e do gás. Como neste estudo se pretende uma representação o mais próxima da do molde existente, no modelo virtual os pontos de injeção estão localizados no mesmo local que os da ferramenta moldante real. A localização destes pontos de injeção no modelo numérico podem ser visualizados na Figura 32. É de notar que o ponto de injeção do fundido está assinalado com um cone amarelo e os pontos de injeção do gás com uma letra G também a amarelo.

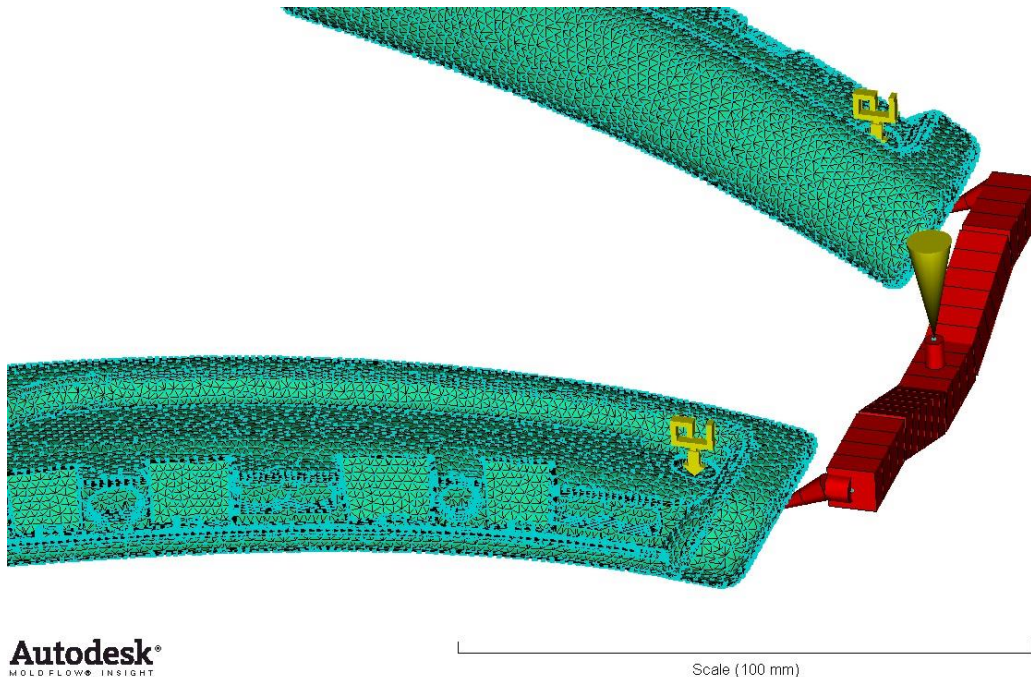


Figura 32. Localização dos pontos de injeção de gás e do fundido

A próxima fase deste estudo numérico é a atribuição do material de injeção. Como anteriormente referido, a peça deste trabalho é para ser moldada em poliamida reforçada com 30 % de fibra de vidro da produtora DSM Engineering Plastics. O Autodesk® Moldflow Insight 2012 contém uma extensa base de dados de diversos polímeros comerciais. Porém, esta base de dados não possui a poliamida usada na injeção das peças em estudo. Por isso foi utilizado uma poliamida reforçada com 30 % de fibra de vidro do mesmo produtor com propriedades semelhantes, o Akulon® K224 HGS6 Natl. Algumas propriedades podem ser observadas na Tabela 3. O Moldflow® recomenda, para um determinado material polimérico, as condições de processamento e as condições deste polímero podem ser examinadas na Tabela 4. O modelo reológico do material polimérico em estudo pode ser observado na Figura 33.

Tabela 3. Propriedades do Akulon® K224 HGS6 Natl

Propriedade	Valor	Unidade
Módulo de elasticidade (segundo a primeira direção principal)	9706	MPa
Módulo de elasticidade (segundo a segunda direção principal)	6994	MPa
Coeficiente de Poisson (v12)	0,4	
Coeficiente de Poisson (v23)	0,59	
Módulo de corte	1961	MPa
Densidade do fundido	1,3912	g/cm ³
Densidade do polímero solidificado	1,5872	g/cm ³

Tabela 4. Condições de processamento recomendadas para o Akulon® K224 HGS6 Natl

Parâmetro	Valor (°C)
Temperatura máxima do molde	100
Temperatura recomenda do molde	80
Temperatura mínima do molde	60
Temperatura máxima do fundido	285
Temperatura recomendada do fundido	275
Temperatura mínima do fundido	265
Temperatura de degradação do fundido	310
Temperatura de ejeção	171

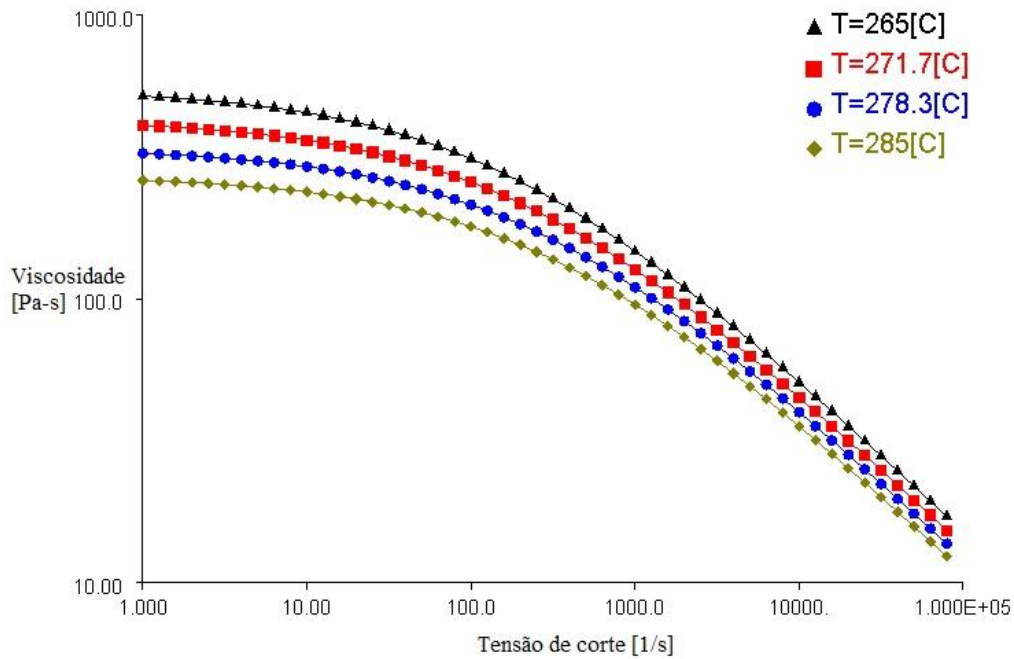


Figura 33. Propriedades reológicas do material polimérico

Existe ainda a necessidade de indicar ao *software* em que máquina de injeção deve o modelo numérico da ferramenta moldante deve ser simulado. Ao selecionar uma máquina de injeção no Moldflow é possível parametrizar variáveis como a velocidade do fuso *versus* tempo e posição do fuso *versus* tempo, resultando numa análise mais precisa [20]. Como neste estudo as únicas informações sobre as características da máquina foram a força de fecho e o curso do fuso, foram estas que ditaram a escolha da máquina de injeção no *software*. Desta forma, durante a realização das diversas simulações numéricas foi utilizada a máquina de injeção 4200H-900 420 tons 16.09 oz (55mm): Netstal. Esta máquina tem um fuso com 55 milímetros de diâmetro e um curso de 200 milímetros. Tal como a máquina de injeção utilizada no ensaio experimental, esta máquina tem uma força de fecho de 420 toneladas e uma pressão de injeção máxima de 184 MPa.

Como último passo antes de se iniciar as simulações, é necessário configurar todos os parâmetros do processo. Dependendo do processo e das análises que se pretende realizar nas simulações numéricas, o número e o tipo de parâmetros a configurar são variáveis. Como o processo usado neste estudo foi a moldação por injeção assistida a gás, as variáveis a parametrizar são, pois referentes a este processo. No *software* Moldflow® é possível configurar a temperatura do molde, a temperatura do fundido, o controlo de enchimento, a comutação velocidade/pressão, o controlo de compactação, o tempo de arrefecimento, o tempo de atraso do gás, o perfil do gás e o controlo das válvulas das cavidades não moldantes [20]. A temperatura do molde é referente à temperatura da superfície da cavidade moldante durante o processo de moldação. A temperatura do fundido está relacionado com a temperatura em que o polímero se encontra no início do sistema de alimentação. Caso o modelo numérico não possua um sistema de alimentação dedicado, este parâmetro é referente à temperatura no ponto de injeção na cavidade moldante. O controlo de enchimento especifica o método de controlo na fase de enchimento. Existem quatro métodos de controlo: automaticamente, por tempo de injeção, por caudal e por velocidade do fuso da máquina de injeção. A comutação velocidade/pressão está relacionada com os critérios pelos quais a máquina de injeção irá comutar entre um controlo em velocidade e um controlo em pressão. É possível selecionar de entre oito opções: por percentagem de volume de preenchimento da cavidade moldante, por pressão de injeção, por força de fecho, por ponto onde se exerce controlo de pressão, por tempo de injeção, por posição do fuso da máquina de injeção, por pressão hidráulica, e pelo primeiro critério que surja por defeito. O controlo de compactação especifica o método que permite controlar a fase de compactação. Este controlo tem quatro opções: percentagem de pressão de preenchimento *versus* tempo, pressão de compactação *versus* tempo, pressão hidráulica *versus* tempo e percentagem de pressão máxima da máquina de injeção *versus* tempo. O tempo de arrefecimento é referente ao tempo da fase de refrigeração ou caso este período não esteja especificado, o *software* postula-o durante as análises de enchimento e compactação. O tempo de atraso do gás é o intervalo entre a fase de compactação e a fase de injeção do gás. Se a injeção do gás se inicia no exato momento em que a fase de compactação termina, o atraso do gás é igual a zero. O perfil do gás permite a introdução de um perfil de pressão ou volume para a etapa de injeção do gás. O controlo das válvulas das cavidades não moldantes especifica em que períodos da moldação estas válvulas se encontram abertas ou fechadas.

No próximo capítulo apresenta-se a metodologia seguida conducente ao estudo numérico do processo de moldação por injeção assistida a gás, bem como a discussão dos resultados obtidos nesse estudo.

Capítulo 4

Análise Numérica da Peça em Estudo

Neste capítulo é apresentado todo o estudo numérico realizado por recurso ao software Autodesk® Moldflow Insight, utilizando para o efeito um modelo da moldação obtida experimentalmente

4.1 Simulação Numérica da Moldação Experimental

No capítulo anterior foi apresentada a metodologia de preparação do modelo virtual da moldação obtida experimentalmente no sentido de proceder a um estudo numérico, paramétrico, conducente à análise da influência dos diferentes parâmetros e variáveis do processo na qualidade final da peça ou moldação a obter.

Assim, numa primeira fase, modelou-se o processo de moldação de injeção assistida a gás tendo por base a ficha técnica de ensaio do molde, replicando as variáveis e parâmetros do processo aí documentadas. Deve contudo mencionar-se que alguns parâmetros fundamentais, quer ao ensaio experimental quer ao numérico, não constavam da ficha técnica do ensaio da ferramenta moldante, tendo-se conduzido alguns estudos numéricos no sentido de estimar o valor do atraso da injeção do gás, bem como do controlo das válvulas das cavidades não moldantes, de modo a tornar possível a obtenção das peças por este processo. Para a obtenção do valor do atraso da injeção do gás foram testados valores entre os 0,5 e os 2 segundos. Conclui-se que o melhor tempo de atraso da injeção do gás para a obtenção de uma peça com as dimensões do puxador em estudo foi de 0,65 segundos. Apesar de este controlo ser ao nível das centésimas de segundo, acredita-se que é possível de alcançar, uma vez que se trata de uma injeção de gás. Relativamente ao controlo das válvulas das cavidades não moldantes foram testados diversos períodos de ativação e desativação destas válvulas. Conclui-se que, para o atraso de 0,65 segundos, o melhor período de ativação ocorria no momento em que a etapa do atraso terminava, ou seja no final de 6,65 segundos do ciclo de moldação. O melhor período para a desativação ocorria quando a percentagem de volume de gás injetado se encontrava entre os 15 e os 20 %, que no caso do atraso anteriormente referido foi aos 9,2 segundos do ciclo de moldação. É de notar que a alteração de determinadas variáveis de processamento, como a temperatura do molde, a pressão de injeção do gás, o atraso da injeção do gás, entre outros,

pode alterar o momento de ativação e desativação das válvulas das cavidades não moldantes. Foram realizadas no total dez simulações numéricas até a obtenção de uma moldação virtual representativa da experimental. Os parâmetros de processamento usados na simulação numérica da moldação experimental podem ser visualizado na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros de processamento da simulação numérica da moldação experimental

Parâmetro	Valor/Opção		
Temperatura do molde	80 °C		
Temperatura do fundido	285 °C		
Controlo de enchimento	Automático		
Comutação velocidade/pressão	Percentagem de volume de preenchimento da cavidade moldante	100 %	
Controlo de compactação	Percentagem de pressão de preenchimento <i>versus</i> tempo	Tempo (Segundos)	Pressão (%)
		0	80
		3	80
Tempo de arrefecimento	40 Segundos		
Tempo de atraso do gás	0,65 Segundos		
Perfil do gás	Tempo (Segundos)	Pressão (MPa)	
	0	18	
	3	18	
	3,5	8	
	8	8	
Controlo das válvulas das cavidades não moldantes	Aberta (Segundos)	Fechada (Segundos)	
	6,65	9,2	

Definida a parametrização base do modelo em estudo é possível consultar no Moldflow® diversos resultados para as diferentes etapas do processo. Este *software* permite visualizar resultados como o tempo de enchimento, força de fecho, tensões de corte, pressão nos pontos de injeção, entre outros. Assim, segundo os resultados desta simulação, as cavidades moldantes foram totalmente preenchidas em aproximadamente 6 segundos do ciclo de moldação. O Autodesk® Moldflow apresenta o resultado do tempo de enchimento, como pode ser visto na Figura 34. Contudo, o período indicado neste resultado é o somatório do tempo de enchimento, do atraso da injeção do gás e do tempo de preenchimento das cavidades não moldantes. É de notar que na ficha técnica do ensaio experimental está indicado que a etapa de enchimento tem um período de 1,88 segundos. Porém, o somatório dos tempos das diferentes fases de moldação é inferior ao tempo do ciclo de moldação indicado nesta ficha. O tempo do ciclo de moldação aproxima-se do mencionado na ficha técnica quando usado um tempo de injeção de 6 segundos. Com este tempo de injeção, o tempo do ciclo de moldação é sensivelmente de 60 segundos, assemelhando-se aos 62,7 segundos indicado na ficha. Desta forma, considerar-se a duração da fase de enchimento da simulação numérica semelhante à obtida experimentalmente.

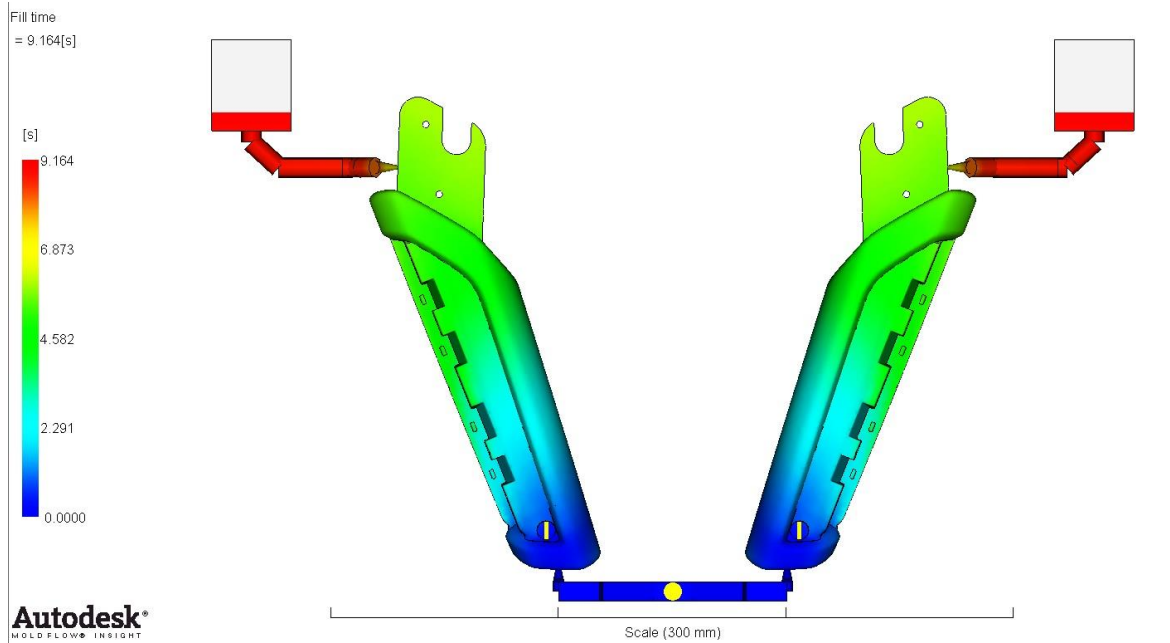


Figura 34. Tempo de enchimento

Relativamente à força de fecho, o estudo de simulação numérica indica que a operação desta ferramenta moldante podia ser realizada na máquina de injeção de aproximadamente 35 toneladas de força. No ensaio experimental foi usado uma máquina de injeção de 420 toneladas, uma força de fecho claramente superior ao valor previsto pela simulação numérica. A utilização desta máquina pode estar relacionada com a dimensão do molde existente, podendo uma máquina com uma força de fecho inferior não suportar tais dimensões. Como exemplo, a produtora Sumitomo (SHI) Demag comercializa máquinas de injeção com uma força de fecho de 50 toneladas, porém a distância entre barras de guiamento destas máquinas é de 360 milímetros [26]. Como a ferramenta moldante do ensaio experimental contém um comprimento de 746 milímetros e uma largura de 496 milímetros, como anteriormente referido, pode-se concluir que a máquina de injeção de 50 toneladas de força da produtora Sumitomo (SHI) Demag não suporta este molde. Outra hipótese, contudo pouco plausível, pode estar relacionada com a indisponibilidade de uma máquina com uma força de fecho adequada. O gráfico disponibilizado pelo Moldflow® referente à força de fecho pode ser visualizado na Figura 35. Através deste gráfico é possível concluir que a força de fecho máxima ocorre desde da finalização da fase do atraso da injeção do gás até as válvulas das cavidades não moldantes fecharem. Existe um patamar de aproximadamente 15 toneladas de força durante o perfil de pressão de gás igual a 8 MPa. Quando este perfil termina, a força de fecho reduz drasticamente para valores próximos de zero.

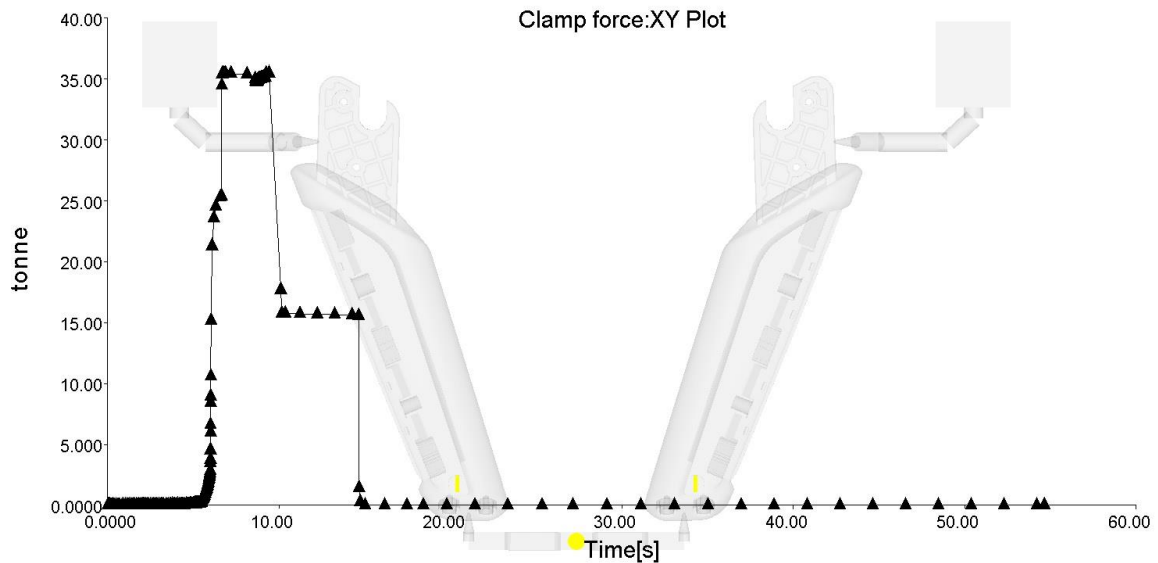


Figura 35. Força de fecho

A análise da temperatura na frente do escoamento do fundido apresenta a temperatura do polímero fundido quando a frente do escoamento atinge uma determinada seção da peça [20]. Caso esta temperatura aumente ou desça mais do que 5 °C, relativamente à temperatura do fundido, em determinadas zonas da peça, pode indicar nessas áreas hesitações durante a fase de enchimento, produzindo desta forma um preenchimento incompleto da cavidade moldante [20]. Na simulação numérica realizada, os resultados da temperatura da frente do escoamento indicam uma ausência de hesitações durante o enchimento da cavidade, visto que esta temperatura varia aproximadamente entre os 284 e os 288 °C. Pode ser visualizada na Figura 36 a temperatura da frente do escoamento do fundido da peça em estudo.

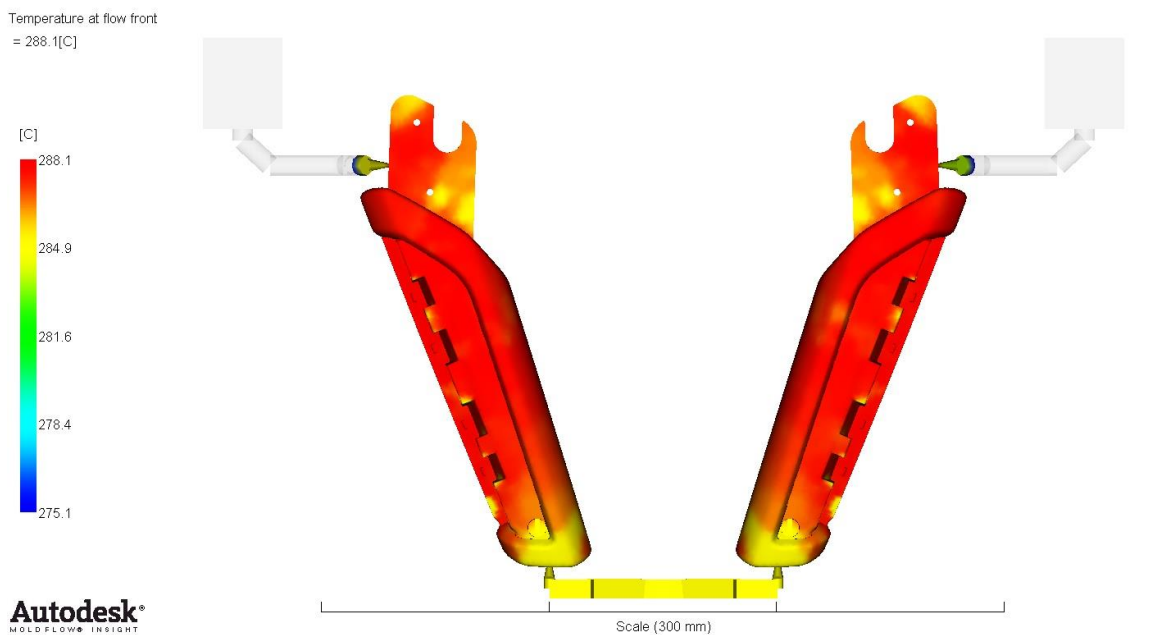


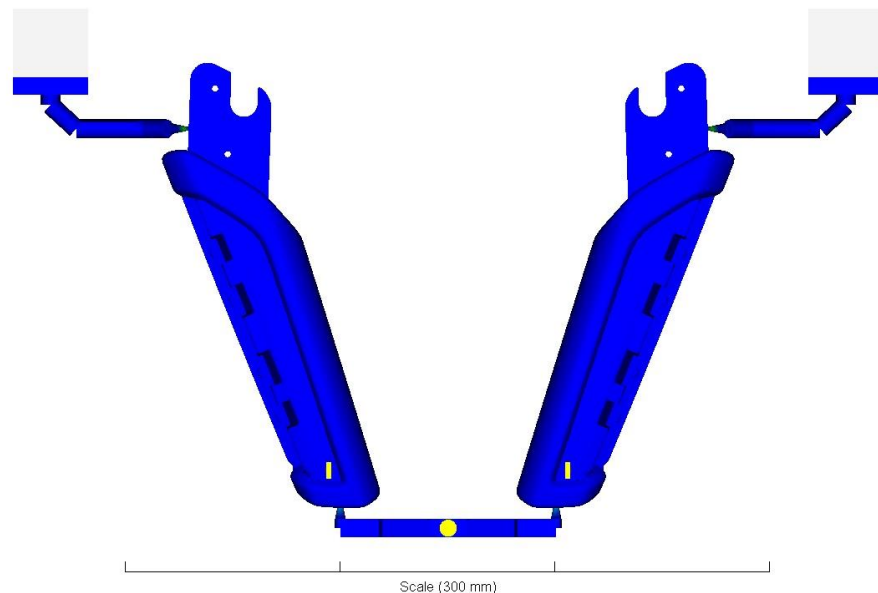
Figura 36. Temperatura da frente do escoamento do fundido

A existência de tensões de corte podem induzir a geração de tensões residuais e deformações na peça. Os diversos polímeros comerciais têm um valor máximo admissível de tensão de corte associado, como pode ser visualizado na Tabela 6. Para a poliamida o valor máximo admissível é de 60000 s^{-1} e na Figura 37 pode ver-se que as tensões de corte que se desenvolvem na peça em estudo não atingem esse valor.

Tabela 6. Tensões de corte para alguns polímeros – adaptado de [27]

Material	Tensão de corte máximo adm. ($1/s$)
ABS	50000
PP	100000
PS	40000
HIPS	40000
PA6	60000
PA66	60000
PBT	50000
PET	50000
PC	40000
PC/ABS	40000
PMMA	40000
POM	40000
PPS	50000
LCP	60000

Shear rate, maximum
Time = 54,65[s]



Autodesk®
MOLD FLOW® INSIGHT

Figura 37. Tensões de corte

A contração volumétrica tem uma importante influência nas deformações e empenos na peça moldada. Uma contração volumétrica irregular nas peças injetadas pode proporcionar empenos nas mesmas, principalmente nas secções longas e de baixa

espessura. Contudo, nos resultados da simulação numérica da peça em estudo não foram observados elevados valores de contração volumétrica, sendo este igual a aproximadamente 1 %, como pode ser observado na Figura 38. Como a contração volumétrica da peça é uniforme, pode-se dizer que no final da moldação para o puxador não seriam esperados valores elevados de empeno ou distorção. De notar que este último é consistente com a seleção de material levada a efeito, ou seja uma poliamida reforçada com 30 % de fibra de vidro.

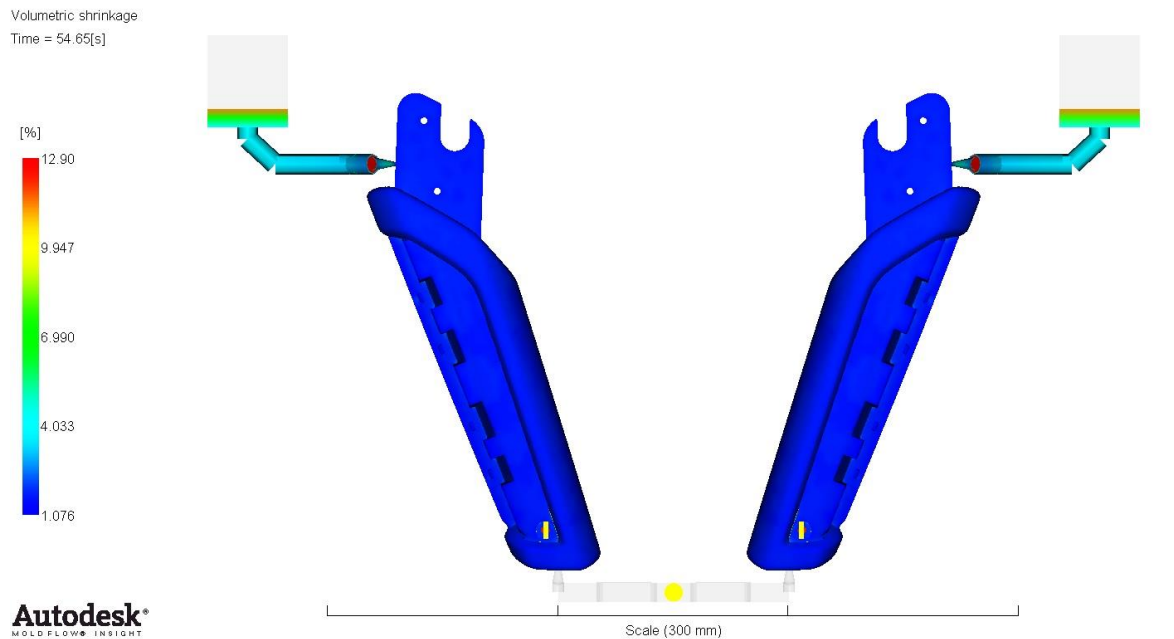


Figura 38. Contração volumétrica da peça simulada

As bolsas de ar presas na cavidade moldante ocorrem quando o fundido aprisiona e comprime ar contra a superfície da cavidade. Estas bolsas proporcionam o aparecimento de zonas por preencher e em casos extremos zonas de polímero degradado [20]. No caso da simulação realizada, a peça apresenta várias zonas de bolsas de ar, como pode ser visualizado na Figura 39. Contudo, estas bolsas podem ser facilmente removidas ao introduzir pontos de fugas de gás nas cavidades moldantes. Apesar da ferramenta moldante existente conter diversas fugas de gás, estas não foram inseridas no modelo numérico do molde, o que se está em crer ser a razão principal de ser destes resultados.

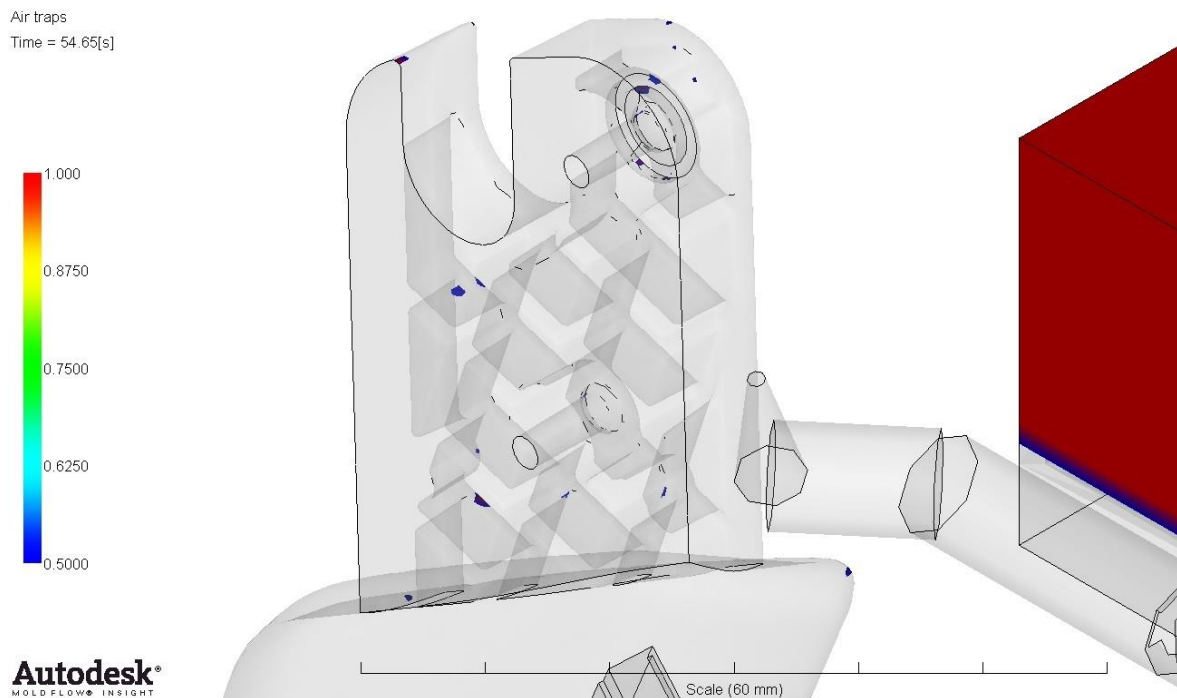


Figura 39. Bolsas de ar numa secção da peça em estudo

As linhas de soldadura constituem pontos de fragilidade para a peça injetada. É nestas zonas onde podem eventualmente ocorrer fraturas. As linhas de soldadura surgem quando duas frentes de fundido convergem. Apesar de a peça simulada apresentar diversos pontos de soldadura, estes não estão localizados numa zona onde o requisito visual é exigente. Contudo na zona dos encaixes, superiores e inferiores, é necessário ter alguma precaução quanto aos esforços aplicados, visto que nestas áreas existem diversas linhas de soldadura, como pode ser examinado na Figura 40.



Figura 40. Linhas de soldadura do modelo numérico

Outro aspeto importante a analisar é o volume de gás injetado para o interior da peça. Para reduzir possíveis empenos e de algum modo comprometer os controlos dimensionais é necessário aumentar o volume de gás, visto que a etapa de compactação é realizada principalmente pelo gás pressurizado. O aumento do volume de gás proporciona também uma redução de massa na peça moldada, uma vez que o gás remove uma determinada quantidade de fundido do interior desta. Na Figura 41 é possível visualizar o desenvolvimento do volume de gás ao longo do ciclo de moldação da peça simulada. Uma representação gráfica deste desenvolvimento pode ser observada na Figura 42. No caso desta simulação numérica, no final do ciclo de moldação a peça contém aproximadamente 19 % de gás no seu interior.

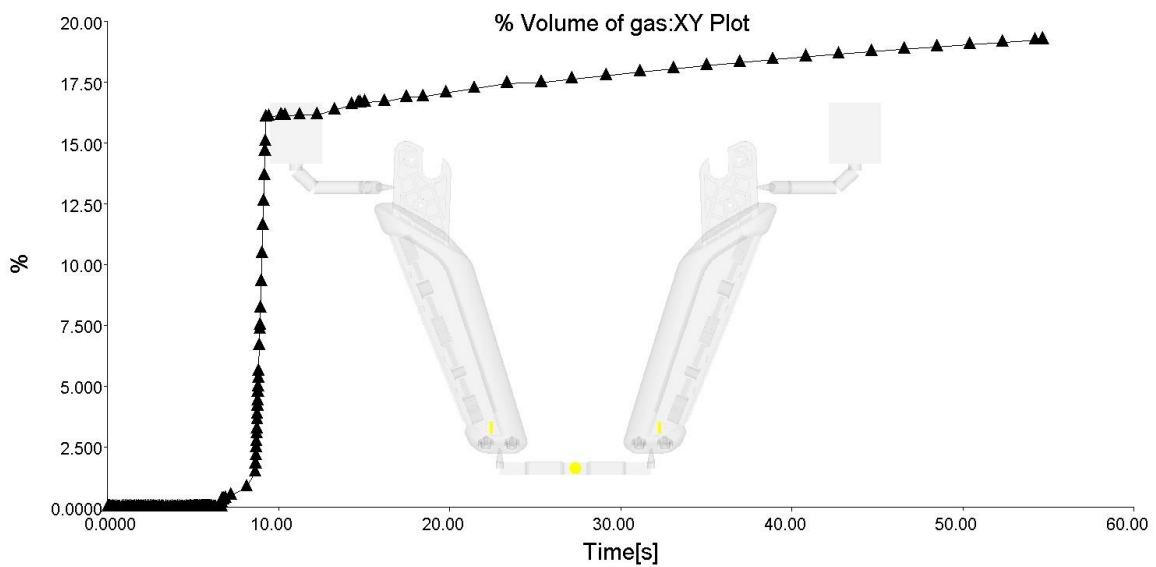


Figura 41. Percentagem de volume de gás *versus* tempo

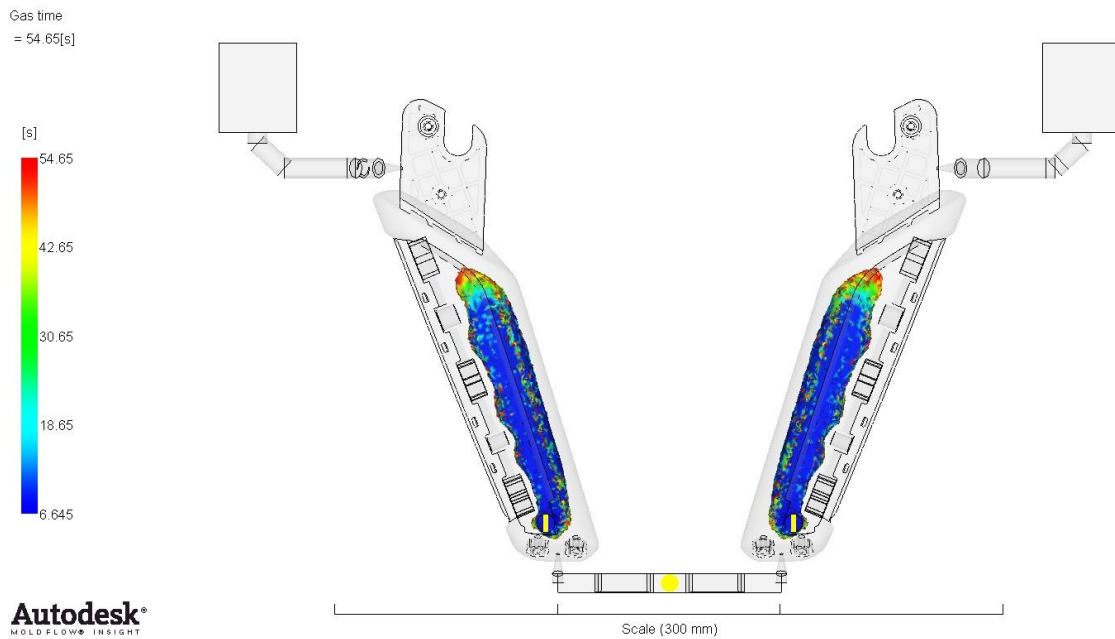


Figura 42. Volume de gás na peça simulada

4.1.1 Análise dos Requisitos Técnicos

Os resultados anteriormente obtidos permitiram obter informação importante para o auxílio do desenvolvimento do estudo, no entanto é fundamental verificar se a peça simulada cumpre os requisitos técnicos exigidos, pois são esses requisitos que confirmam a qualidade da peça final. Relativamente à peça em estudo, foi exigido a satisfação de requisitos dimensionais e visuais, como também o cumprimento do limite de massa. Contudo, antes de realizar a inspeção destes requisitos técnicos no modelo numérico é necessário confirmar se a peça moldada no ensaio experimental satisfaz estes requisitos e se dessa forma existe um modo de comparar os modelos numéricos com a peça ensaiada. Como referido anteriormente, para o requisito dimensional foram selecionadas quatro zonas do puxador para certificar o controlo dimensional: a largura do encaixe inferior, denominado por zona A, a distância entre os dois furos de fixação, designado por zona B, a distância entre os dois encaixes superiores, denominado por zona C, e a dimensão de um dos encaixes da tampa estética, designado por zona D. Os controlos dimensionais da peça fornecida foram medidos por recurso a um paquímetro digital, com uma precisão até à centésima de milímetro, e estes podem ser analisados na Tabela 7. Para confirmar se o requisito dimensional está a ser cumprido nas simulações numéricas, vão ser usados os mesmos controlos dimensionais.

Tabela 7. Controlo dimensional da peça ensaiada no molde existente

Controlo dimensional (mm)			
Zona A	Zona B	Zona C	Zona D
14,46	31,06	20,33	4,01

O limite de massa da peça é um requisito de extrema importância, visto que os automóveis que atualmente estão a ser desenvolvidos exigem componentes cada vez mais leves, aumentando assim a eficiência destes ao nível dos consumos. Como referido anteriormente, a massa da peça em estudo não pode ultrapassar os 125 gramas. Mais uma vez, para a obtenção da massa exata da peça fornecida, esta foi pesada numa balança digital com uma precisão até à centésima de grama. Através desta medição foi possível concluir que a peça em estudo tem uma massa de 109,46 gramas.

Relativamente ao requisito visual, a peça em estudo não foi capaz de cumprir este requisito. Apesar de esta peça não ter defeitos como “chupados”, zonas queimadas ou empenos evidentes, diversas superfícies contém um defeito que pode ser designado por exposição das fibras. Este defeito surge essencialmente quando são usados materiais poliméricos reforçados, principalmente em polímeros com uma percentagem de fibra de vidro elevada. Quanto maior for a percentagem de fibra no polímero, maior será a exposição das fibras nas superfícies da peça. Através da revisão bibliográfica foi possível concluir que esta exposição ocorre devido a tensões residuais induzidas pelo escoamento nas superfícies da peça. Para eliminar esta imperfeição é necessário reduzir as tensões residuais existentes. Este defeito não permite o cumprimento do requisito visual que é exigido à peça em estudo, visto que esta imperfeição vai ser visível para o utilizador do veículo. Foi decidido que para este estudo, para facilitar a aquisição de dados referentes à resolução deste defeito, apenas uma secção da peça em estudo seria analisada. A seleção da zona de análise foi escolhida com base na quantidade de exposição de fibra na superfície da peça em estudo, ou seja seria selecionada a superfície que apresentasse visualmente uma maior exposição das fibras. A área selecionada para a realização das análises com o intuito de resolução deste defeito, pode ser visualizada na Figura 43.



Figura 43. Área selecionada para a realização das análises

Com a peça ensaiada analisada e com os seus requisitos técnicos quantificados, a próxima etapa foi realizar uma comparação desta com o modelo numérico simulado no Autodesk® Moldflow. Relativamente ao controlo dimensional, a peça simulada apresenta valores muito idênticos aos medidos na peça ensaiada. Desta forma é possível concluir que os empenos e as contrações obtidas na simulação numérica representam com exatidão e precisão os do modelo experimental. Assim, pode-se afirmar que a simulação numérica da realizada representa adequadamente a moldação da ferramenta moldante existente. Na simulação numérica, as medições das diferentes zonas de análise referente ao controlo dimensional foram obtidas através da distância entre dois nós de dois diferentes elementos. O controlo dimensional referente à simulação da peça em estudo pode ser observado na Tabela 8. A aquisição dos nós dos diferentes elementos para a análise do controlo dimensional, foi realizada no resultado referente à deformação da peça. Este resultado demonstra as deformações, empenos e contrações, que a peça vai conter no final do ciclo de moldação. Na Figura 44 é possível visualizar o resultado das deformações da peça. Apesar deste resultado indicar deformações de aproximadamente 0,76 milímetros, é de salientar que as contrações da poliamida foram contabilizadas nas dimensões da peça. Assim, no final do ciclo de moldação, o puxador possui as dimensões corretas para a fixação deste componente na porta do veículo.

Tabela 8. Controlo dimensional da simulação da peça ensaiada

Controlo Dimensional (mm)			
Zona A	Zona B	Zona C	Zona D
14,43	31,04	20,36	4,05

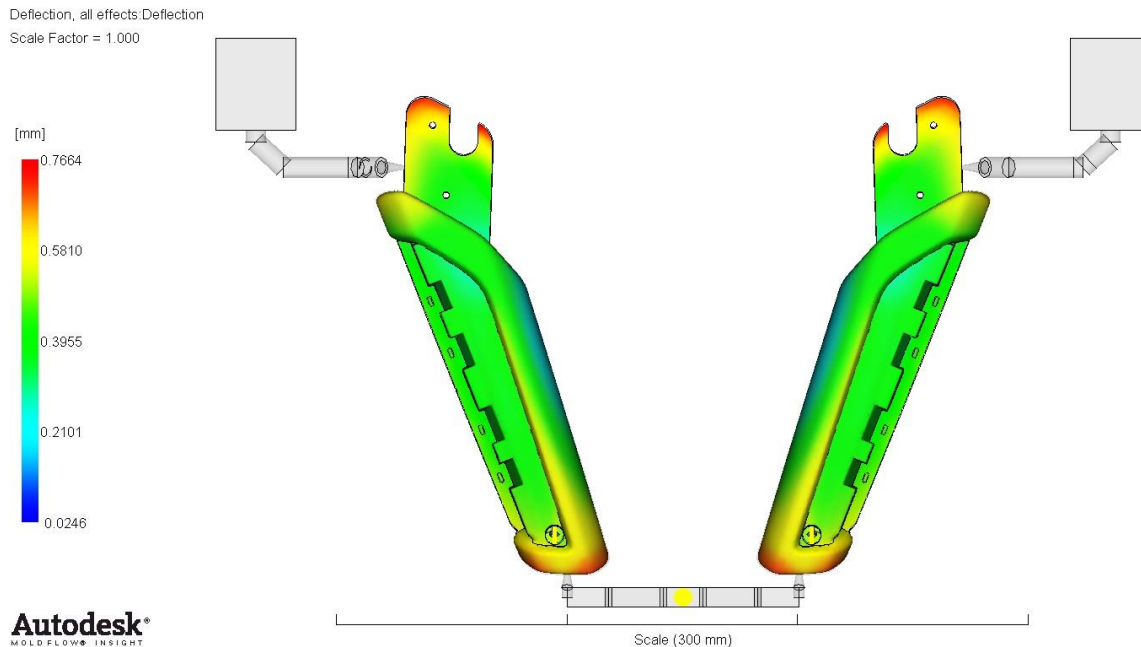


Figura 44. Deformações da peça em estudo

Relativamente à massa da peça simulada, o Autodesk® Moldflow indica que as duas peças no final do ciclo de moldação têm uma massa de 134 gramas. Visto que o limite de massa para esta peça é de 125 gramas, esta não respeitaria o requisito exigido e teria ser rejeitada. Porém, é de notar que a densidade do polímero usado na simulação é de 1,59 g/cm³ quando a peça está solidificada e que a densidade do material polimérico usado na moldação experimental é de 1,35 g/cm³. Esta diferença de densidades entre os dois materiais pode explicar o incumprimento do limite de massa para a peça simulada. Como durante a aplicação da malha foi indicado que a peça tem um volume de 110,563 cm³ e que a peça simulada contém um volume de gás de aproximadamente de 19 %, foi possível calcular a massa da peça caso esta fosse simulada com o polímero que foi utilizado no ensaio experimental. Removendo os 19 % de volume de gás, o volume da peça simulada foi de 89,556 cm³. Multiplicando este valor pela densidade da poliamida Akulon® K224-LG6/E obtém-se uma correção para a massa da peça de 120,9 gramas, aproximando-se assim do limite de massa estipulado.

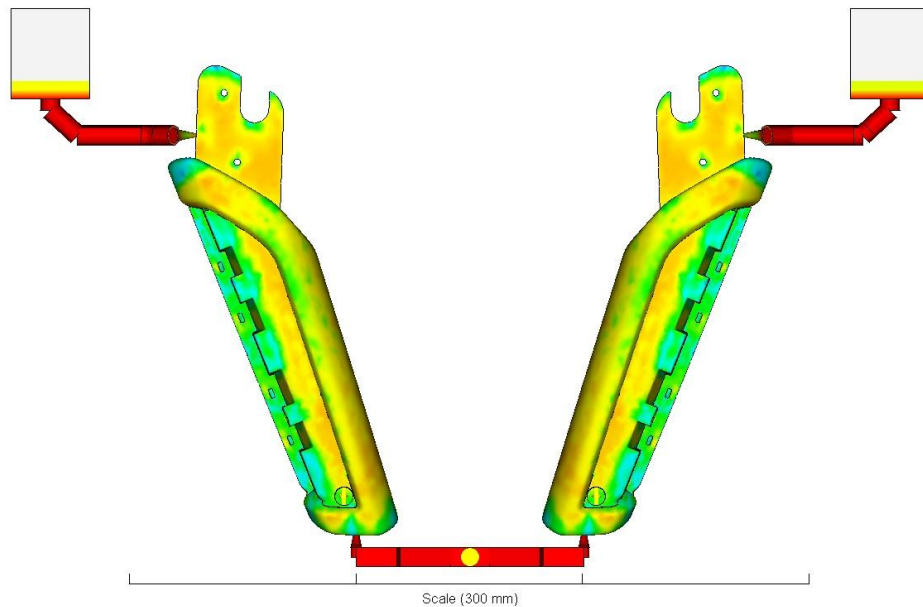
O principal defeito desta peça, como anteriormente referido, é a exposição da fibra de vidro nas superfícies da peça em estudo. Relativamente aos resultados da simulação numérica, não existe um que demonstre diretamente a exposição nas superfícies da peça. Porém, o resultado do tensor de orientação das fibras pode auxiliar na compreensão deste problema. O tensor de orientação das fibras mostra o grau de orientação da fibra no final do ciclo de moldação [20]. Este resultado indica a probabilidade de alinhamento das fibras com a direção principal do escoamento do fundido. Quando o tensor de orientação das

fibras assinalar valores próximos de 1 em uma determinada área de uma peça, indica que nessa zona as fibras estão completamente alinhadas com a direção do escoamento do fundido. Caso o tensor indicar valores próximos de 0, isso sugere uma perpendicularidade entre as fibras e o escoamento do polímero. Por outro lado, se este resultado assinalar valores intermédios, como por exemplo 0,5, indica que a orientação das fibras relativamente ao escoamento do fundido é aleatória. Neste estudo o tensor de orientação das fibras pode indicar o nível de tensões residuais presentes nas superfícies da peça simulada. Supondo que o tensor indica que numa determinada zona de uma peça a orientação das fibras for de, por exemplo, 0,8 e que numa moldação da mesma peça com diferentes parâmetros de processamento indique na mesma zona, um valor de 0,9, isso pode sugerir um relaxamento de tensões na superfície da segunda peça. É do conhecimento geral que as fibras se desalinham em relação à direção do escoamento do fundido devido a tensões e contrações originando tensões residuais. A peça simulada apresenta uma orientação da fibra de vidro maioritariamente paralela relativamente ao escoamento do fundido, como pode ser observado na Figura 45, onde o tensor de orientação das fibras mostra uma grande quantidade de zonas com valores superiores a 0,7. Contudo, em vez de analisar o tensor em todas as superfícies da peça, foi analisado apenas na zona em que na peça fornecida apresenta uma maior quantidade de exposição de fibra. Foram adquiridos 20 valores do tensor de orientação das fibras, escolhidos arbitrariamente ao longo desta secção da peça. Para permitir a comparação deste resultado com futuras simulações foi calculada a média destas 20 amostras. Os valores adquiridos do tensor e a média calculada podem ser observados na Tabela 9. Na Figura 46 é possível visualizar com detalhe a superfície analisada na peça simulada.

Tabela 9. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada

Tensor de orientação da fibra		
Amostras	Máx/Min	Média
0,8219	Máximo	0,8866
0,7987		
0,7877		
0,8621		
0,7872		
0,8681		
0,8435		
0,8718		
0,8389		
0,8677		
0,8702	Mínimo	0,8491
0,8760		
0,8631		
0,8786		
0,8830		
0,8866		
0,8495		
0,8724		
0,8499		
0,8051		

Fiber orientation tensor
= 0.9980



Autodesk
MOLD FLOW INSIGHT

Figura 45. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico

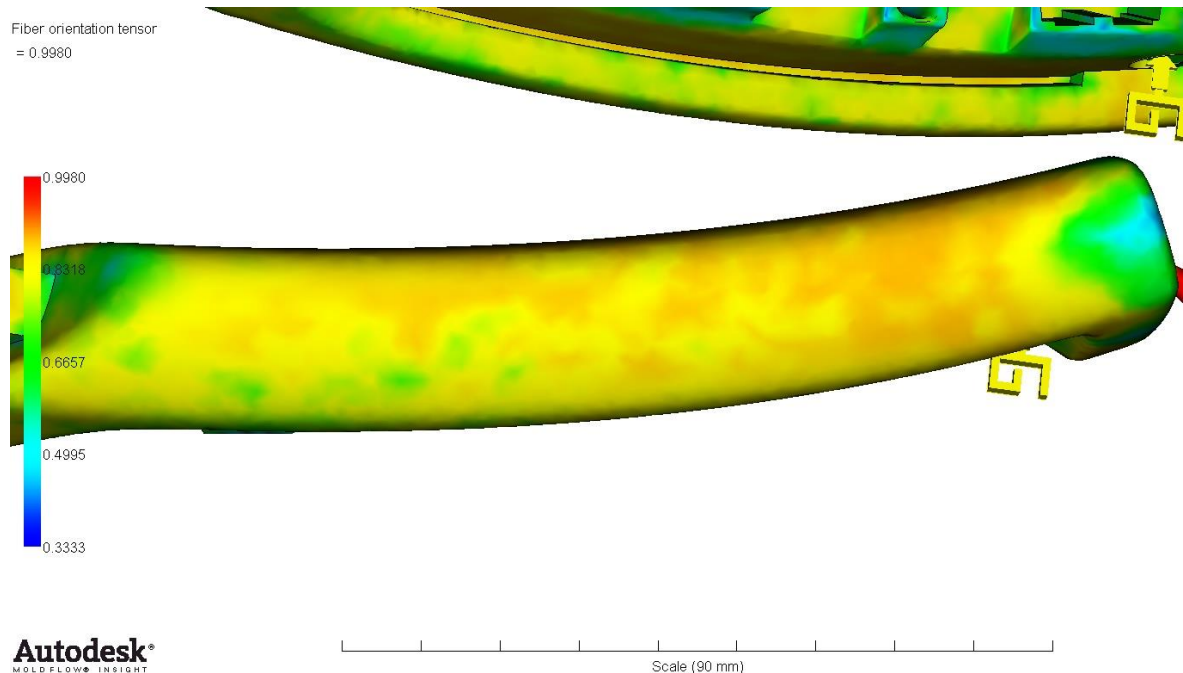


Figura 46. Tensor de orientação das fibras na zona analisada

4.2 Simulações do Estudo Paramétrico

Concluída a análise da simulação numérica do modelo da moldação experimental, segue-se a realização de diferentes simulações com o intuito de otimizar o processo de moldação assistida a gás usado no molde existente. Este estudo paramétrico visa o estudo do processo no sentido de solucionar o defeito da exposição da fibra nas superfícies da peça. A alteração de um ou de vários parâmetros do processamento podem proporcionar a melhoria do acabamento superficial da peça em estudo. Assim, os parâmetros de processamento a alterar nas diferentes simulações foram escolhidos com base nos estudos analisados na revisão bibliográfica. Segundo o estudo de Shia-Chung Chen *et al.* [7], o aumento da temperatura das superfícies da cavidade moldante proporcionam uma melhoria significativa na qualidade do acabamento superficial em peças injetadas com polímeros reforçados. Devido a esta conclusão, optou-se por realizar duas simulações numéricas relacionadas com o aumento da temperatura do molde. Uma das simulações do estudo paramétrico é assim efetuada com o molde a uma temperatura de 90 °C, em vez dos 80 °C anteriormente utilizados, e outra com uma temperatura de 95 °C.

Como anteriormente referido, o aparecimento dos defeitos de exposição das fibras nas superfícies da peça prende-se com a presença de tensões residuais. Uma forma de eliminar, ou pelo menos diminuir, as imperfeições das superfícies afetadas é através da utilização de medidas conducentes ao relaxamento dessas tensões. Esse relaxamento permite que o polímero contraia, durante o processo de moldação, de uma forma mais uniforme ao longo das faces da peça. Segundo a investigação que Ying Lu *et al.* [8] levaram a efeito, existem três variáveis do processo de moldação assistida a gás que permitem o relaxamento de tensões: a pressão do gás, a percentagem de volume de preenchimento durante a injeção do fundido e o tempo de atraso da injeção do gás. Como o processo de

moldação usado no molde existente era a variante *full shot*, a alteração do volume de preenchimento da cavidade moldante não foi equacionada. Ying Lu *et al.* indicaram no seu estudo que o aumento da pressão de injeção do gás confere um maior relaxamento das tensões. Desta forma, decidiu-se realizar uma simulação numérica com um perfil de pressão de gás de 24 e de 14 MPa. Relativamente à moldação realizada no modelo experimental, em que foi usado um perfil de gás de 18 e de 8 MPa, esta condição infere um aumento de 6 MPa na pressão do gás. Relativamente ao tempo de atraso da injeção do gás, Ying Lu *et al.* mostraram que é necessário escolher adequadamente este parâmetro para reduzir as tensões presentes na peça. É de relembrar que neste trabalho foi necessário determinar o atraso de injeção do gás na moldação do puxador, de modo a estabelecer o compromisso de compactação, massa final da peça, tendo-se optado por um atraso de 0,65 segundos e uma massa de aproximadamente 125 gramas. Assim sendo, foram realizadas três simulações numéricas com o intuito de analisar a influência do atraso da injeção do gás na eliminação do defeito da exposição das fibras. Foi simulado um tempo de atraso de 0,4, 0,2 e de 0 segundos.

Como referido anteriormente, para além dos requisitos dimensionais exigidos, a peça em estudo tem um limite de massa de 125 gramas. A vantagem do processo de moldação por injeção assistida a gás em permitir a produção de peças com uma massa reduzida, devido ao interior oco destas, foi uma das razões para o uso deste processo na peça em estudo. Desta forma, é necessário garantir que todas as peças produzidas cumpram este limite. Através da pesquisa que Miguel Sánchez-Soto *et al.* [6] efetuaram foi possível concluir que para se produzir a peça com a menor massa, a temperatura do molde e do fundido devem ser o mais alto possível. Esta afirmação pode ser considerada credível, pois o aumento destas duas variáveis contribuem para a diminuição da viscosidade do fundido, principalmente no interior da peça moldada. Desta forma, decidiu-se simular duas diferentes temperaturas do fundido para analisar a influência destas, não só na massa da peça como também no nível de relaxamento das tensões presentes no modelo numérico. Foram efetuadas simulações numéricas com uma temperatura do fundido de 290 °C e de 295 °C. É de relembrar que na moldação do modelo experimental a temperatura do fundido foi de 285 °C.

Em síntese, neste estudo paramétrico foram efetuadas, no total, oito simulações numéricas com o intuito de analisar a influência de cada variável de processamento no relaxamento das tensões residuais presentes na peça em estudo. Este relaxamento contribui para a eliminação do defeito da exposição das fibras, que o puxador apresenta em diversas zonas. Como anteriormente apresentado, o relaxamento das tensões residuais na peça simulada pode ser comprovado através do resultado, do *software* Autodesk® Moldflow Insight 2012, do tensor de orientação das fibras. É através deste resultado que se pode concluir que um determinado parâmetro de processamento do estudo paramétrico soluciona, ou não, o problema da exposição das fibras na peça em estudo. Na Tabela 10 estão apresentadas as simulações numéricas do estudo paramétrico realizadas neste trabalho e cada simulação tem uma designação específica, facilitando assim a visualização destes no decorrer desta secção.

Tabela 10. Simulações do estudo paramétrico

Secção	Parâmetro	Designação
Análise da temperatura do molde	90 °C	Simulação 1
	95 °C	Simulação 2
Análise da pressão de injeção do gás	24 MPa	Simulação 3
Análise do atraso da injeção do gás	0,4 segundos	Simulação 4
	0,2 segundos	Simulação 5
	0 segundos	Simulação 6
Análise da temperatura do fundido	290 °C	Simulação 7
	295 °C	Simulação 8

4.2.1 Análise da Temperatura do Molde

Utilizou-se, pois, a temperatura do molde como o primeiro parâmetro de processamento a modificar nas simulações do estudo paramétrico. Esta decisão deve-se à presença desta variável de processamento na resolução do defeito das superfícies e na diminuição da massa da peça em estudo. Para este parâmetro determinou-se analisar em primeiro lugar a simulação numérica com a temperatura do molde de 90 °C e de seguida a de 95 °C. Para além deste parâmetro, na simulação de 90 °C foi necessário ajustar adequadamente o controlo das válvulas das cavidades não moldantes. Este afinamento do período de ativação e desativação destas válvulas foi devido à alteração no tempo de enchimento na injeção do fundido, que mais adiante este tópico será aprofundado. Nesta simulação as válvulas das cavidades não moldantes abriram aos 6,92 segundos e fecharam aos 7,9 segundos do ciclo de moldação. Estes dois parâmetros de processamento foram os únicos que foram alterados na realização das simulações de análise da temperatura do molde.

Finalizada a simulação, especificamente a que detém uma temperatura do molde a 90 °C, foi possível reunir algumas informações relevantes sobre a moldação da peça. Relativamente ao tempo de enchimento das cavidades moldantes, o *software* Moldflow® indica que estas foram totalmente preenchidas aproximadamente aos 6,27 segundos do ciclo de moldação. Comparativamente à simulação do modelo experimental, esta teve um aumento de 0,27 segundos no tempo de enchimento. Acredita-se que este acréscimo de tempo é consistente com o aumento do atrito entre o fundido e as superfícies das cavidades moldantes, dificultando o deslocamento do polímero fundido durante a etapa de enchimento. Contudo, devido à diminuição da diferença entre a temperatura do molde e do fundido, quando comparado com a simulação do modelo experimental, a percentagem de polímero solidificado na etapa de injeção de gás é menor. Esta redução de polímero solidificado permite obter um canal de gás com um volume desejado (superior a 15 % do volume da cavidade moldante) em menos tempo. Como pode ser visualizado na Figura 47, o preenchimento das cavidades não moldantes, nesta simulação, cessa aproximadamente aos 7,86 segundos e na simulação do modelo experimental o preenchimento acaba sensivelmente aos 9,16 segundos.

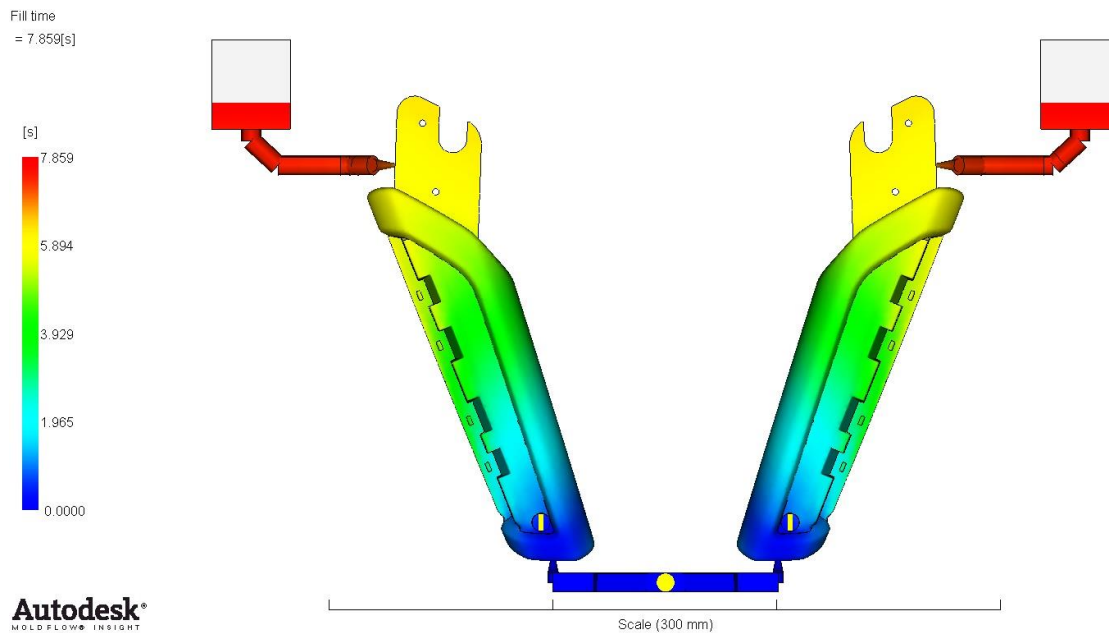


Figura 47. Tempo de enchimento (Simulação 1)

Em relação à força de fecho, não houve qualquer alteração no valor deste resultado, visto que as pressões de injeção do fundido e do gás usadas nesta simulação foram iguais à simulação do modelo experimental. O valor máximo da força de fecho foi aproximadamente de 35 toneladas.

O resultado da análise da temperatura na frente de escoamento do fundido nesta simulação apresenta uma maior uniformidade da temperatura em determinadas zonas da peça em estudo, quando comparado com o modelo experimental. Esta melhoria é devida à menor diferença entre a temperatura do fundido e molde, proporcionando uma menor transferência de calor entre estes dois durante a fase de injeção. Na Figura 48 apresenta-se este resultado referente à simulação com a temperatura do molde a 90 °C. É possível visualizar na Figura 49, do lado esquerdo, uma determinada secção da peça desta simulação referente ao resultado da temperatura da frente de escoamento do fundido e do lado direito da figura a simulação de recriação do molde existente.

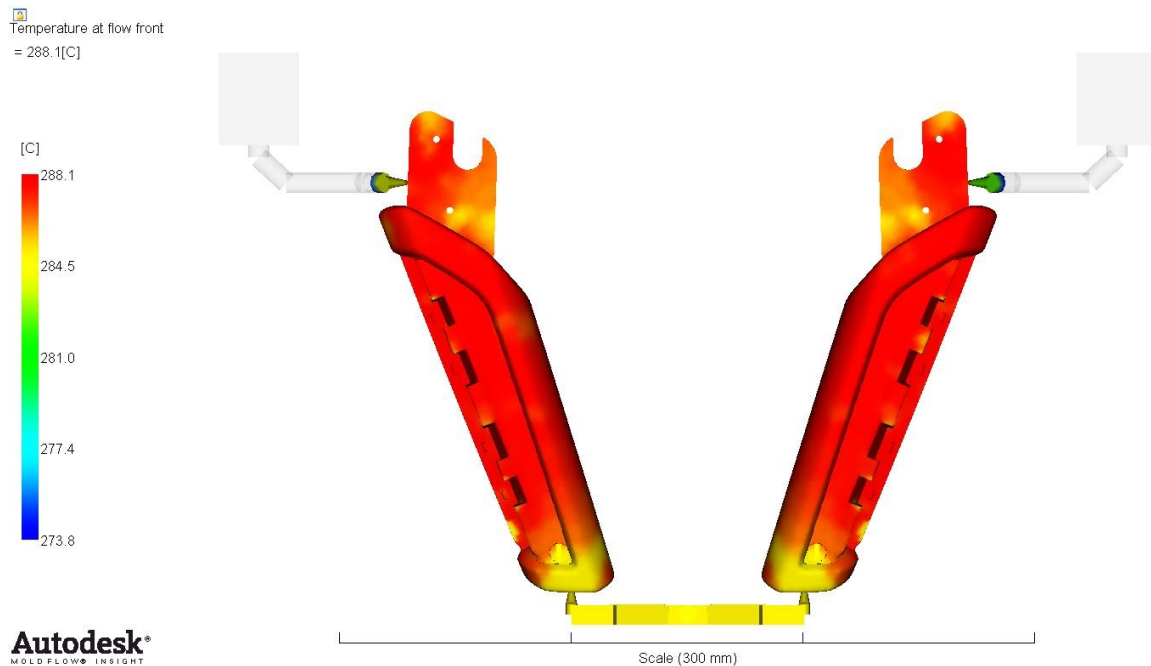


Figura 48. Temperatura da frente do escoamento do fundido (Simulação 1)

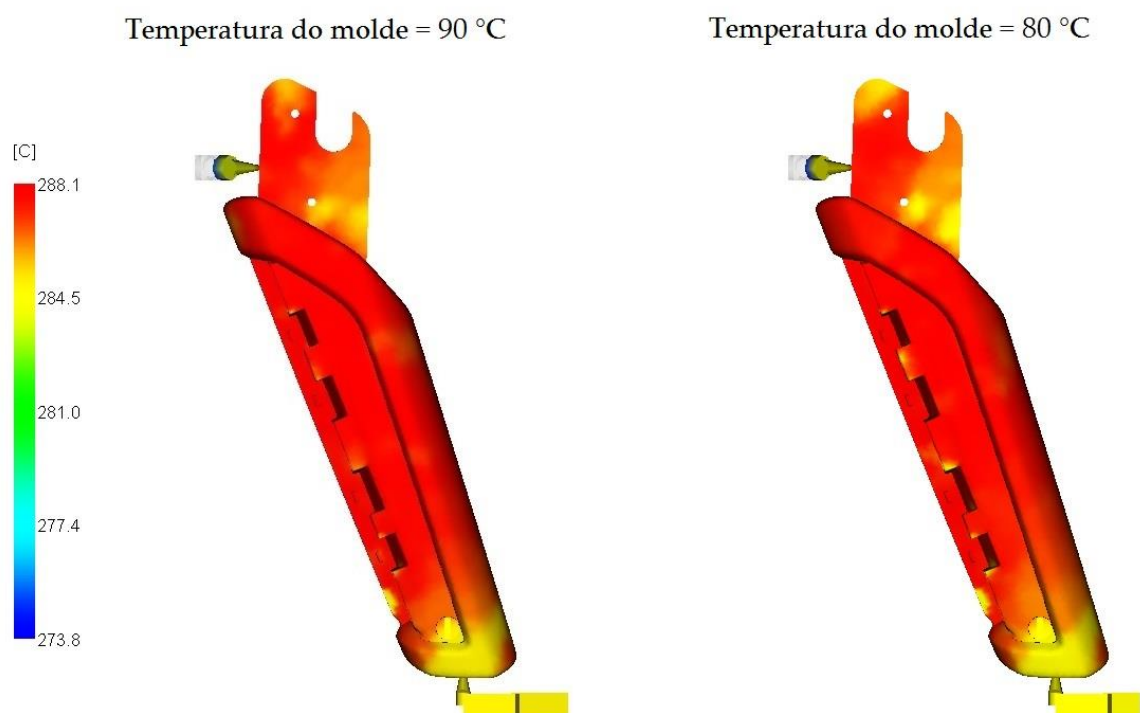


Figura 49. Comparação da Temperatura da frente do escoamento do fundido (Simulação 1)

Relativamente à tensão de corte, o resultado desta simulação demonstra que a peça não contém tensões que ultrapassem o valor admissível (60000 s^{-1}). Como anteriormente referido, na simulação do modelo experimental a peça em estudo também não apresenta tensões que ultrapassem o valor admissível.

A contração volumétrica da peça em estudo nesta simulação teve um aumento, contudo pouco notório. Em vez de uma contração de 1,076 %, que foi apresentada na simulação do molde existente, esta simulação demonstra uma contração volumétrica de 1,398 % na peça em estudo. Contudo, devido à baixa contração volumétrica que esta peça apresenta, pode-se afirmar que esta não vai conter elevados empenos. Na Figura 50 é possível observar a contração volumétrica obtida nesta simulação.

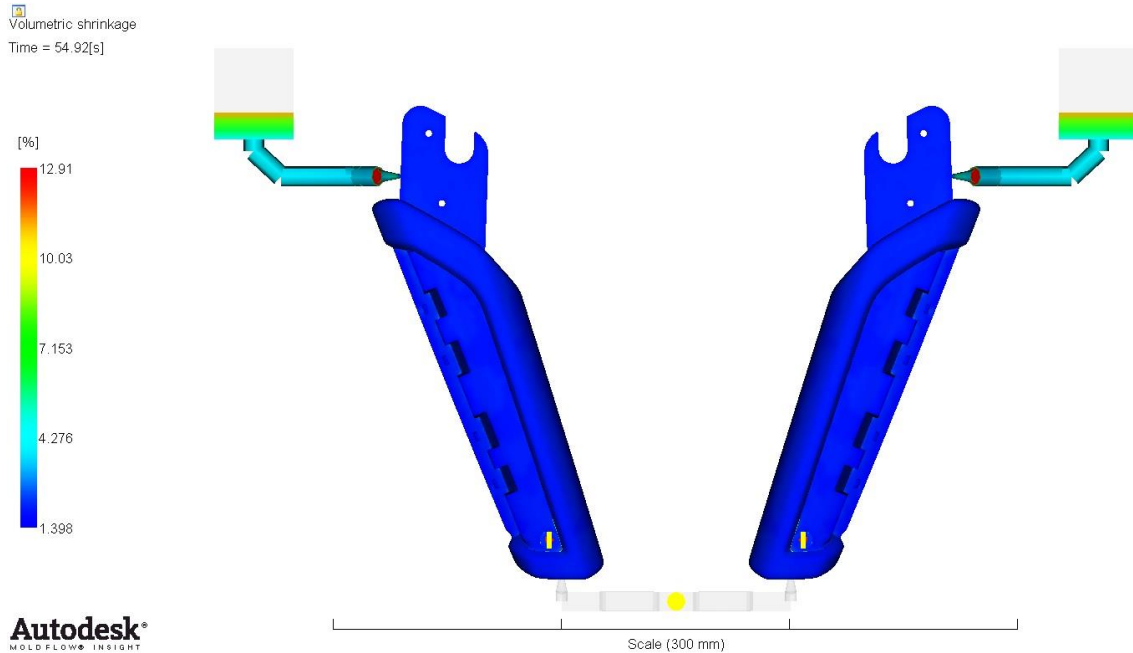


Figura 50. Contração volumétrica da peça simulada (Simulação 1)

Em relação às linhas de soldadura presentes na peça simulada, esta apresenta uma ligeira redução na quantidade deste defeito na secção do encaixe inferior, quando comparado com a simulação do modelo experimental. Contudo, na secção dos encaixes superiores e na secção central da peça houve um ligeiro aumento na quantidade de linhas de soldadura. As linhas de soldadura existentes na peça simulada podem ser visualizadas na Figura 51.

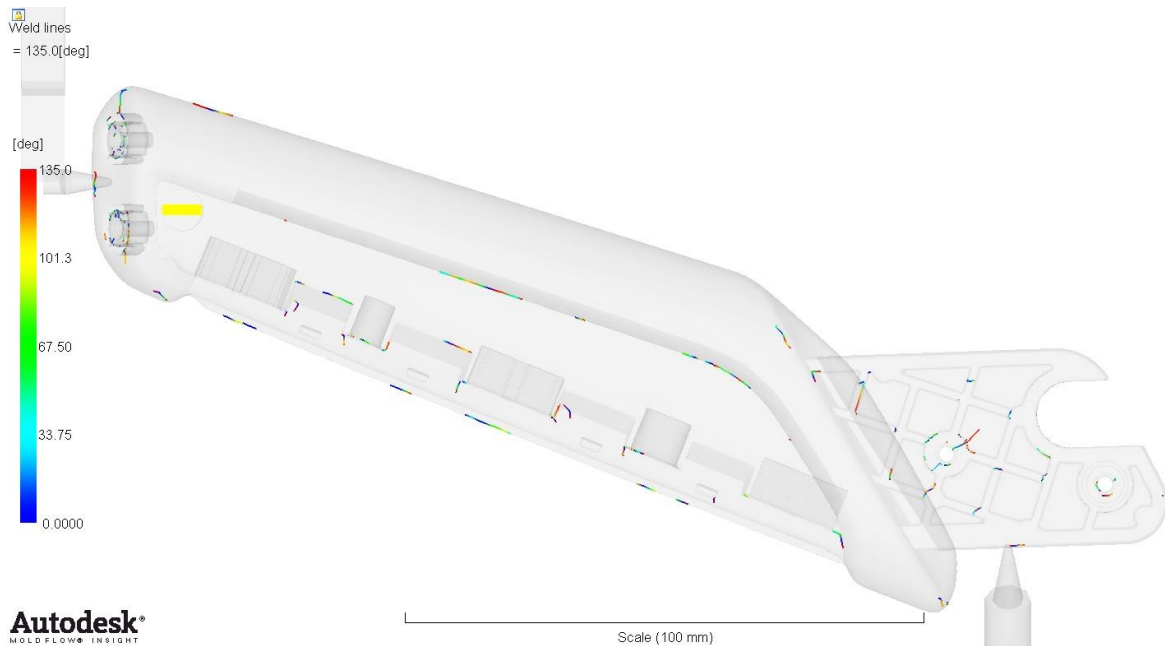


Figura 51. Linhas de soldadura do modelo numérico (Simulação 1)

Nesta simulação numérica o gás inerte, no final do ciclo de moldação, ocupa 21 % do volume da peça em estudo. Relativamente à simulação do modelo experimental, esta peça teve um aumento na percentagem de volume de gás de 2 %. Devido ao aumento da temperatura, a quantidade de polímero solidificado é menor, comparativamente ao modelo experimental. Desta forma, é possível remover uma maior quantidade de material polimérico durante a injeção do gás, aumentando assim o volume de gás. Na Figura 52 é possível visualizar o desenvolvimento do volume de gás ao longo do ciclo de moldação da peça simulada. A representação gráfica deste desenvolvimento pode ser observada na Figura 53.

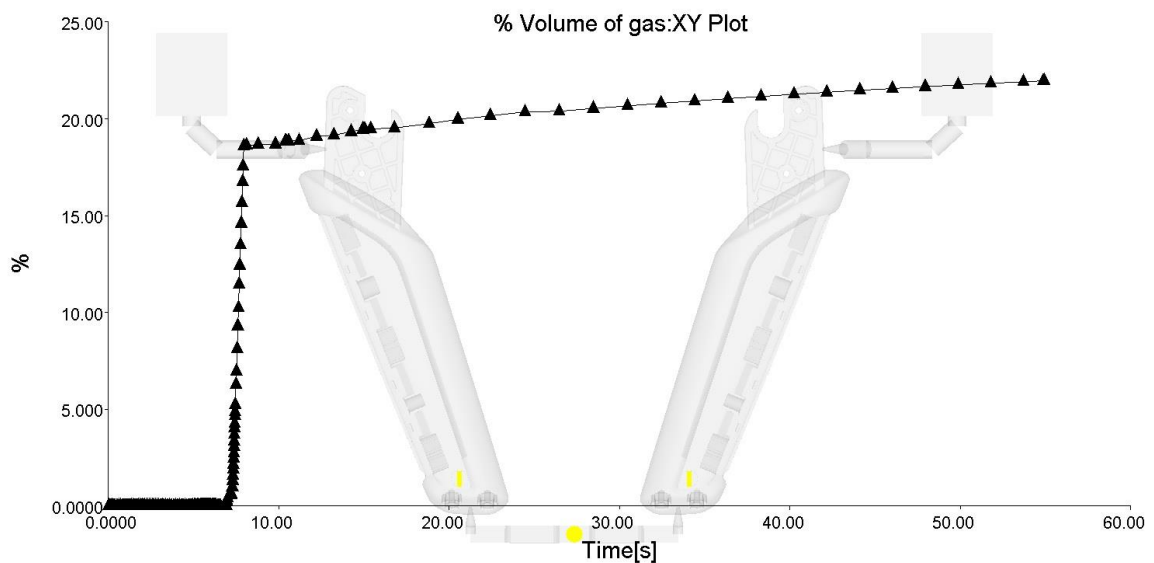


Figura 52. Percentagem de volume de gás *versus* tempo (Simulação 1)

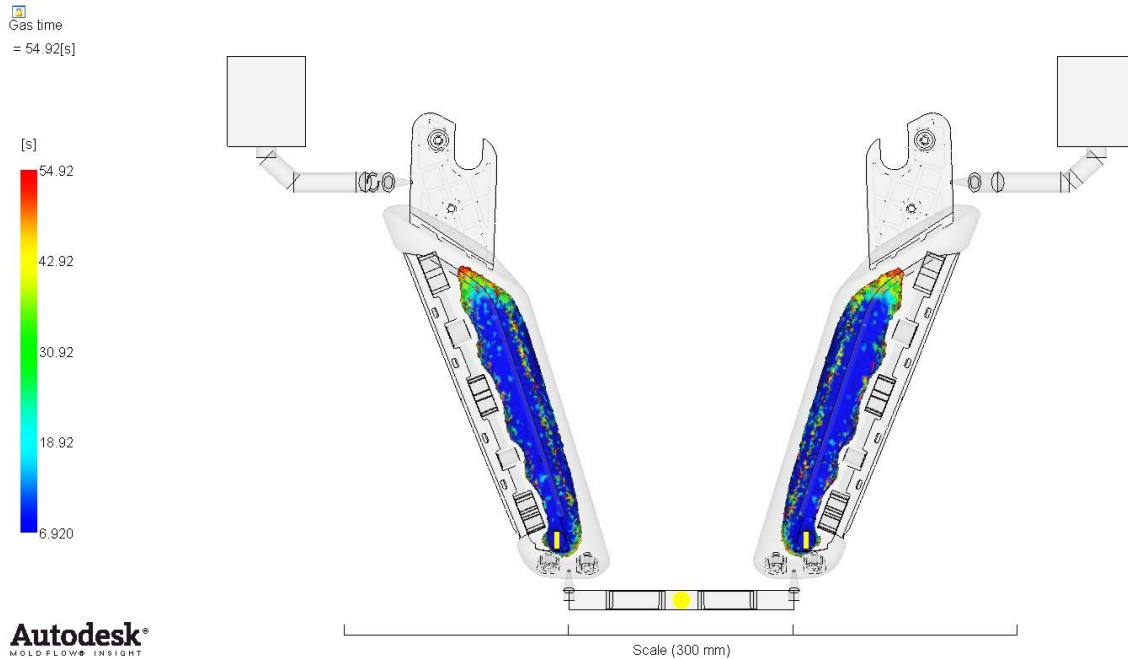


Figura 53. Volume de gás na peça simulada (Simulação 1)

Em relação ao controlo dimensional, a peça nesta simulação apresenta valores idênticos aos medidos, quer na peça ensaiada quer na peça da simulação do modelo experimental. Desta forma é possível afirmar que este aumento da temperatura do molde não proporciona um agravamento nos empenos e nas contrações da peça. Uma comparação do controlo dimensional entre a peça ensaiada, a peça simulada e a peça da simulação do modelo experimental pode ser observada na Tabela 11. Através dos valores da tabela anterior é possível verificar que a peça simulada, em relação à peça da simulação do modelo experimental, tem um desvio máximo de 3 centésimas de milímetro, localizado na zona B. Contudo, este desvio não coloca em causa o cumprimento do requisito dimensional, visto que a peça em estudo tem um toleranciamento de $\pm 0,1$ milímetros. Em relação à peça ensaiada, os valores da tabela indicam que a peça desta simulação também cumpre o requisito dimensional, uma vez que esta tem um desvio máximo de 5 centésimas de milímetro nas zonas B e D. A aquisição dos valores referentes ao controlo dimensional da peça simulada foi realizada no resultado da deformação desta. Na Figura 54 é possível observar este resultado. Está indicado neste resultado que a peça simulada contém uma deformação máxima de aproximadamente de 0,8 milímetros. Contudo, é necessário lembrar que as deformações e contrações da poliamida foram contabilizadas nas dimensões da peça. Desta forma, no final do ciclo de moldação, o puxador possui as dimensões corretas para a fixação deste componente na porta do veículo.

Tabela 11. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 1)

Controlo dimensional	Peça da simulação 1 (mm)	Peça da simulação do modelo experimental (mm)	Peça ensaiada (mm)
Zona A	14,43	14,43	14,46
Zona B	31,01	31,04	31,06
Zona C	20,35	20,36	20,33
Zona D	4,06	4,05	4,01

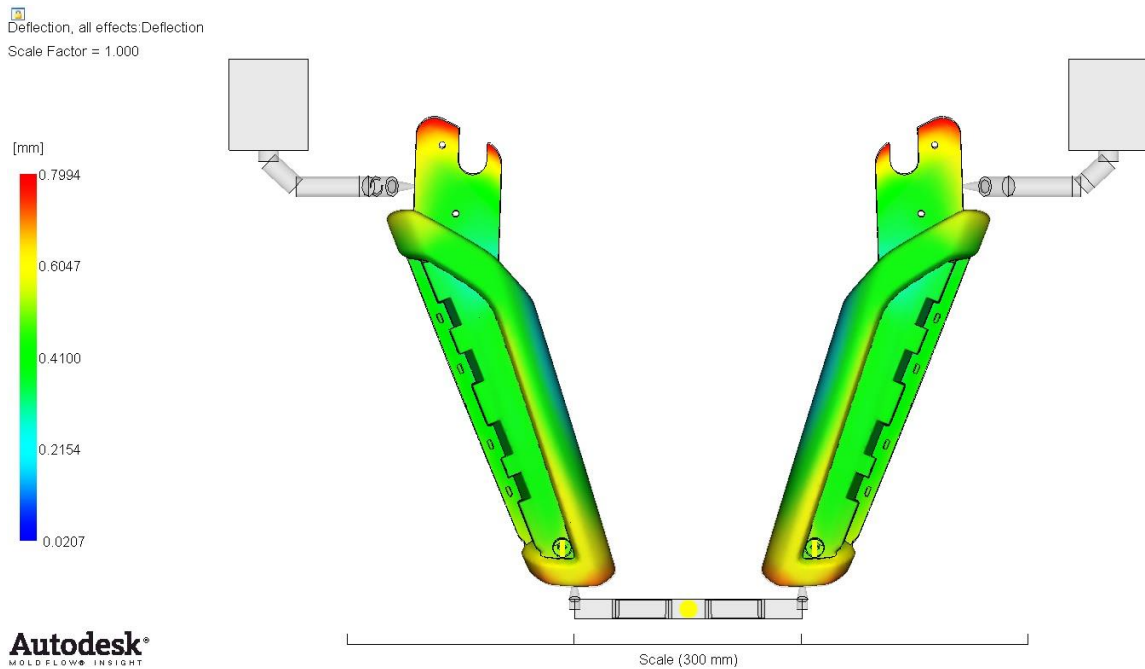


Figura 54. Deformações da peça em estudo (Simulação 1)

Em relação à massa da peça simulada, o *software* Moldflow® indica que as duas peças obtidas no final do ciclo de moldação têm, cada uma, uma massa de 129,5 gramas. Porém é de lembrar que o polímero usado, quer nesta simulação quer na simulação do modelo experimental, tem uma densidade de 1,59 g/cm³, quando a peça se encontra solidificada, e que a densidade da poliamida utilizada nos ensaios experimentais é de 1,35 g/cm³. Contudo, através do volume da peça em estudo e da percentagem de volume de gás no interior desta, foi possível calcular a massa da peça simulada caso fosse usado, na simulação numérica, o polímero correto. Desta forma foi possível concluir que a peça desta simulação tem uma massa de 117,9 gramas.

Como último resultado a analisar, o tensor de orientação das fibras, como anteriormente referido, pode indicar o nível de tensões residuais presentes nas superfícies da peça em estudo. Uma comparação entre duas simulações numéricas permite reunir informações suficientes para concluir se a alteração da variável do processo simulado proporciona um maior ou um menor relaxamento nas tensões residuais presentes na peça. Caso exista um aumento, em comparação com a simulação do modelo experimental, no valor do tensor de orientação das fibras numa determinada secção da peça da simulação do estudo paramétrico, pode-se afirmar que ocorreu um relaxamento das tensões residuais nas

superfícies da peça em estudo. Caso os resultados do tensor desta simulação forem inferiores à da simulação da peça ensaiada, pode-se concluir que, em vez de um relaxamento, ocorreu uma contração nas tensões existentes na peça. As contrações nas tensões residuais aumentam a quantidade e agravam a exposição das fibras, tornando mais evidente os defeitos nas superfícies da peça em estudo. Na simulação do molde com uma temperatura de 90 °C, os valores do tensor de orientação das fibras indicam um relaxamento das tensões residuais. É possível afirmar esta conclusão devido à comparação do valor médio do tensor entre esta simulação e a de recriação do ensaio experimental. Como referido anteriormente, na simulação do modelo experimental o valor médio do tensor foi de 0,8491. Na Tabela 12 é possível observar os valores das amostras retiradas na secção selecionada para a análise do tensor da orientação das fibras, bem como os valores máximo, mínimo e médio das amostras. Como demonstrado nesta tabela, o valor médio do tensor na superfície elegida é de 0,8525, indicando um aumento de 0,0034 unidades. Como pode ser observado na Figura 55, a peça simulada apresenta diversas zonas com uma orientação das fibras superiores a 0,7, indicando um paralelismo entre as fibras de vidro e a direção do escoamento do polímero, resultado idêntico ao encontrado na simulação da peça ensaiada. A comparação deste resultado entre a simulação do modelo experimental e desta simulação pode ser visualizado na Figura 56. Na parte superior desta figura está apresentado o tensor de orientação das fibras desta simulação e na parte inferior o mesmo resultado referente ao obtido durante a simulação da peça ensaiada.

Tabela 12. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 1)

Tensor de orientação da fibra		
Amostras	Máx/Min	Média
0,8377	Máximo	0,8873
0,8627		
0,8186		
0,8744		
0,8164		
0,8725		
0,7877		
0,8818		
0,8573		
0,8843		
0,8598	Mínimo	0,8525
0,8678		
0,8650		
0,8873		
0,8821		
0,8816		
0,8532		
0,8230		
0,8220		
0,8153		

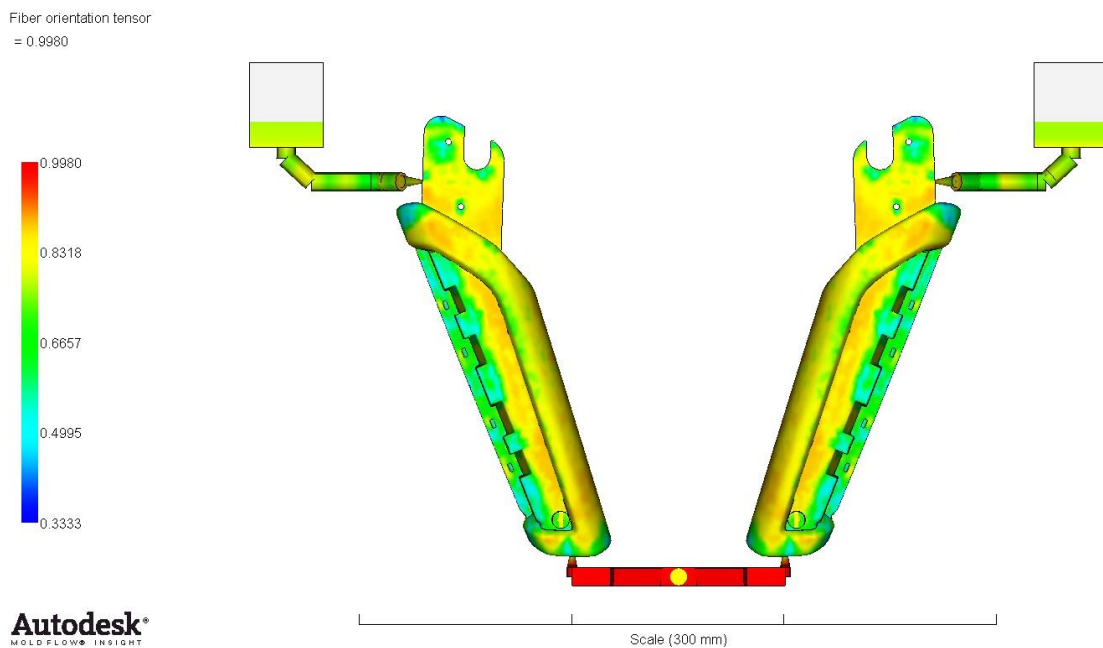


Figura 55. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 1)

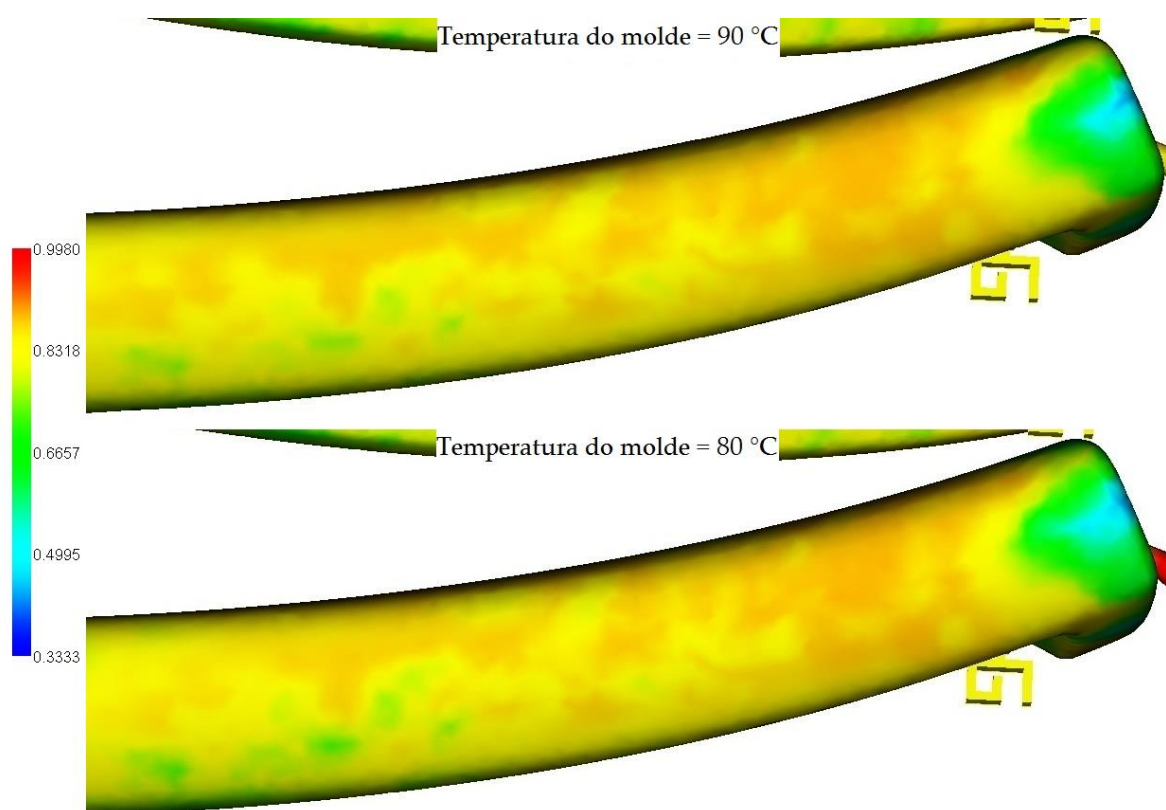


Figura 56. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 1)

O seguinte ensaio foi a simulação numérica com uma temperatura do molde a 95 °C. O controlo das válvulas das cavidades não moldantes teve de ser reajustado, pelos mesmos motivos referidos na simulação anterior. Na simulação da ferramenta moldante a 95 °C, estas válvulas abriam aos 7 segundos e fecharam aos 8,3 segundos do ciclo de

moldação. É de recordar que nas simulações do estudo paramétrico, só dois parâmetros de processamento foram alterados, que no caso desta simulação foi a temperatura do molde e o controlo das válvulas das cavidades não moldantes.

Nesta simulação, o resultado do tempo de enchimento foi de novo diferente do tempo da simulação de recriação do ensaio experimental. Esta simulação teve um tempo de enchimento sensivelmente de 6,4 segundos. Um aumento de 0,4 segundos quando comparado com a simulação do modelo experimental e um aumento de 0,13 segundos relativamente à simulação anterior. Contudo, esta diferença entre a simulação da ferramenta moldante a 95 °C e a do modelo experimental seria esperada, visto que o aumento da temperatura do molde proporciona o aumento do atrito entre as superfícies da cavidade moldante e o fundido, como foi explicado anteriormente. Relativamente à percentagem de polímero solidificado no final do enchimento da cavidade moldante, esta simulação teve uma percentagem de 10,94 %, enquanto na simulação do ensaio experimental a peça tinha 11,84 % de material polimérico solidificado. Esta redução na percentagem de polímero solidificado proporciona um aumento no volume do canal do gás durante a fase de injeção do gás, como explicado no resultado do tempo de enchimento da simulação anterior. Como pode ser observado na Figura 57, o preenchimento das cavidades moldantes e não moldantes termina aproximadamente no instante 8,26 segundos do ciclo de moldação.

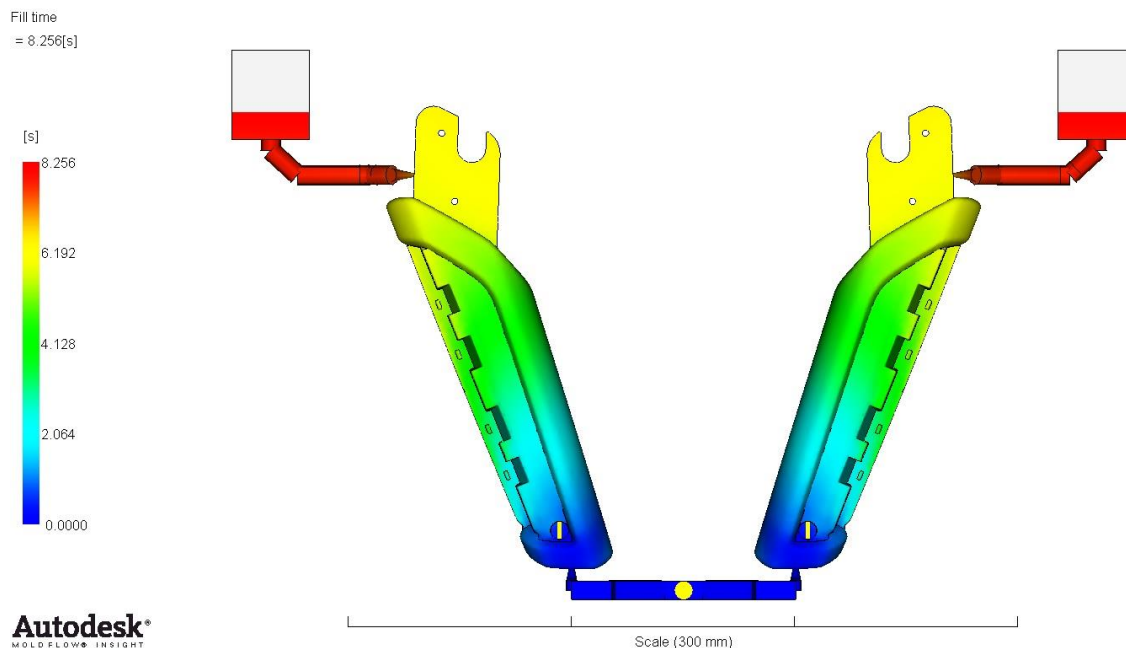


Figura 57. Tempo de enchimento (Simulação 2)

Como referido na simulação anterior, devido à inexistência da alteração dos parâmetros de pressão de injeção do fundido e do gás, a força de fecho foi idêntica nas simulações numéricas realizadas até este momento. Sendo assim, a força de fecho máxima da simulação com a temperatura do molde a 95 °C foi de 35 toneladas.

Relativamente à temperatura na frente de escoamento do fundido, nesta simulação observou-se uma melhoria na uniformidade da temperatura, principalmente no encaixe inferior, em comparação com a simulação do ensaio experimental. Esta melhoria tinha sido

também detetada na simulação anterior. Como referido anteriormente, a redução da diferença entre a temperatura do fundido e molde, proporciona uma menor transferência de calor entre estes dois durante a fase de injeção, oferecendo uma melhoria na uniformidade da temperatura. É possível observar o resultado da temperatura na frente de escoamento do fundido, relativamente à simulação do molde a 95 °C, na Figura 58. A comparação, em relação a este resultado, entre esta simulação e a simulação do modelo experimental pode ser visualizado na Figura 59. No lado esquerdo da figura encontra-se o resultado desta simulação e no lado direito da figura está exposto o resultado da simulação do ensaio experimental.

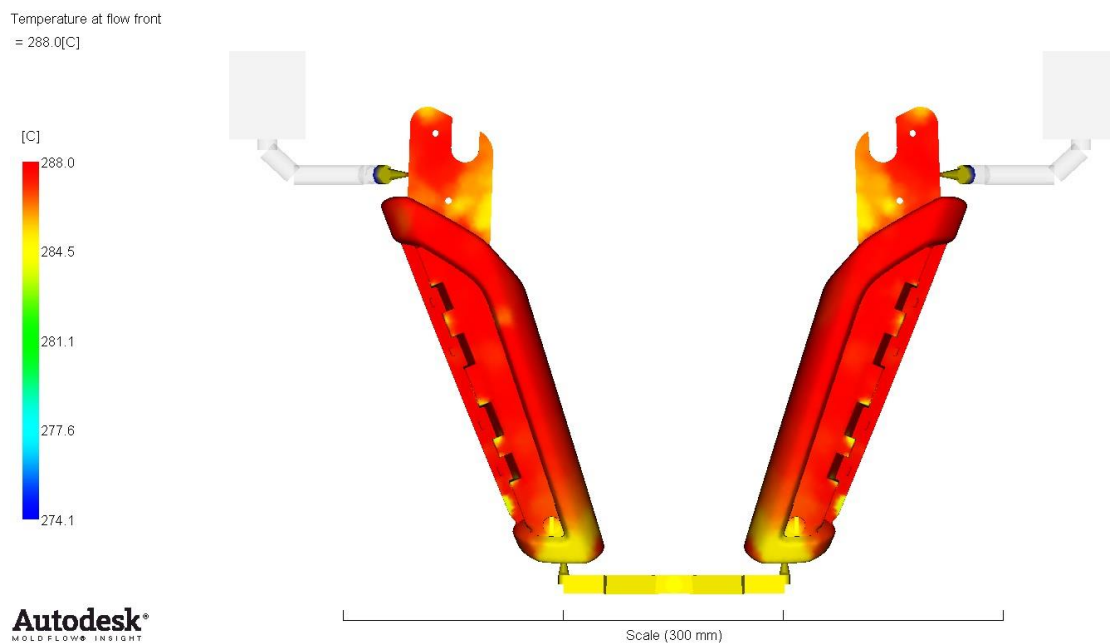


Figura 58. Temperatura da frente do escoamento do fundido (Simulação 2)

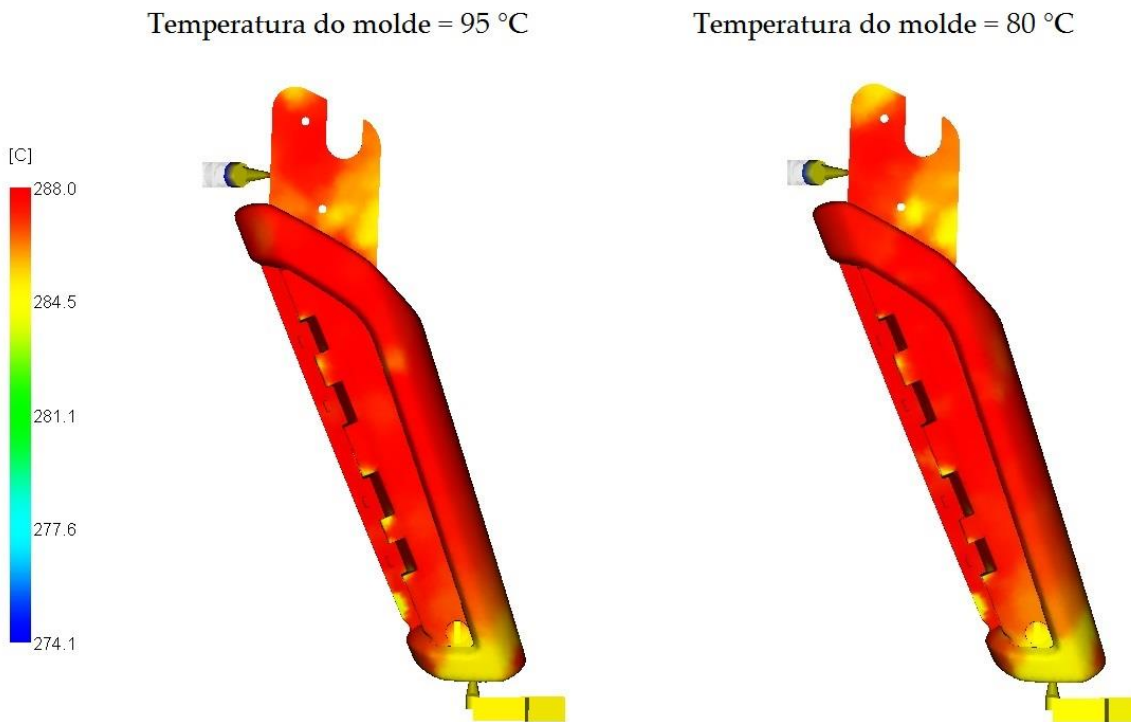


Figura 59. Comparação da Temperatura da frente do escoamento do fundido (Simulação 2)

Em relação à tensão de corte, como sucedeu na simulação do molde a 90 °C, este resultado demonstra que a peça contém tensões com baixos valores. Visto que os valores destas tensões de corte são inferiores ao valor admissível, espera-se que a peça simulada venha a ter baixas deformações.

Como ocorreu na simulação do molde a 90 °C, a contração volumétrica desta simulação teve um ligeiro aumento. Como foi referido anteriormente, a simulação numérica do modelo experimental teve uma contração de 1,076 % e a do molde a 90 °C teve um valor de 1,398 %. Na simulação do molde a 95 °C, a peça em estudo teve uma contração volumétrica de 1,546 %, como pode ser observado na Figura 60.

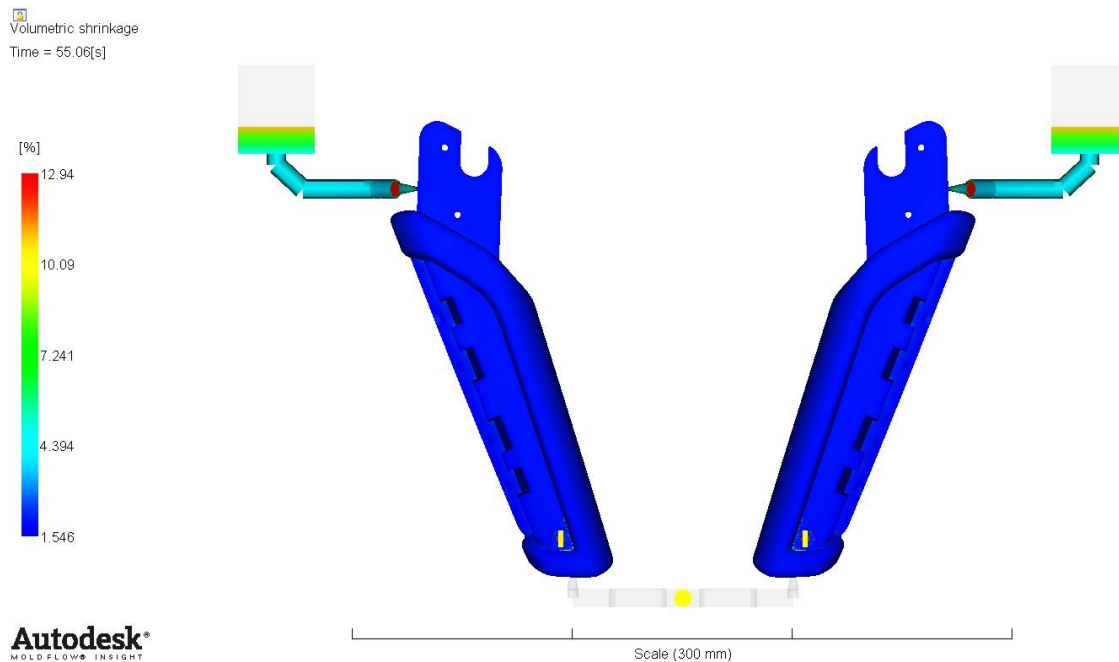


Figura 60. Contração volumétrica da peça simulada (Simulação 2)

Relativamente às linhas de soldadura presentes na peça simulada, foi notória uma melhoria na quantidade em diferentes secções. Esta melhoria foi mais evidente nos encaixes superiores e inferior. A eliminação das linhas de soldadura nestas secções é essencial, visto que este defeito resulta em pontos de fragilidade quando aplicado esforços nestas zonas. As linhas de soldadura existentes na peça simulada podem ser visualizadas na Figura 61.

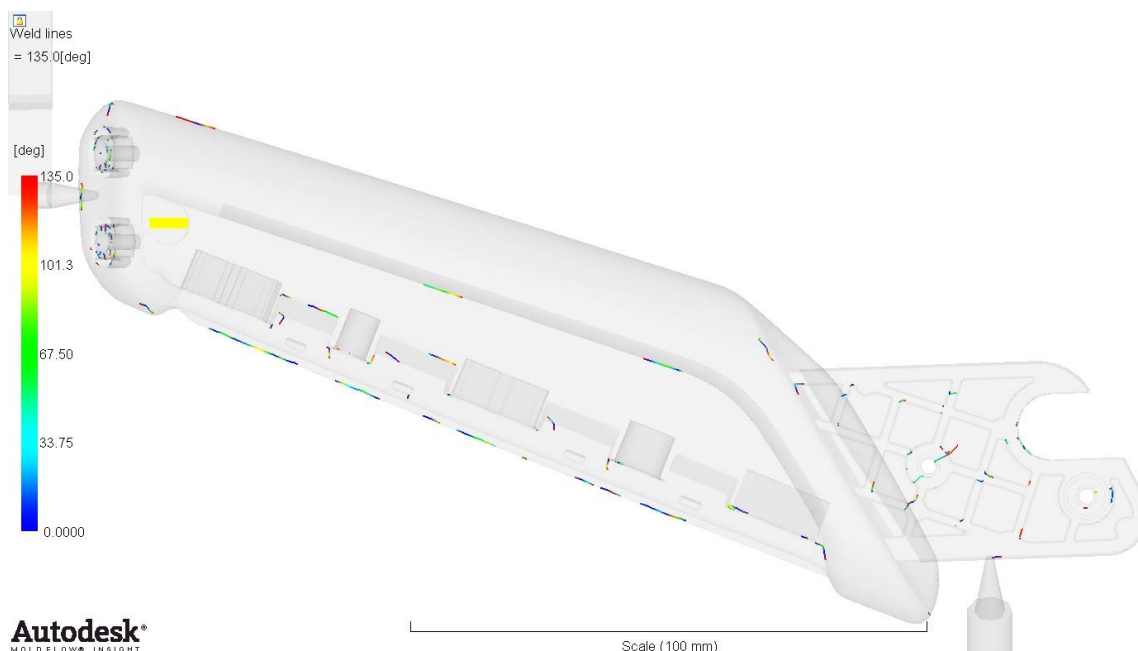


Figura 61. Linhas de soldadura do modelo numérico (Simulação 2)

Nesta simulação, o volume de gás injetado para o interior da peça foi aproximadamente de 22 %. Em comparação com a simulação do modelo experimental e com a do molde a 90 °C, é possível afirmar que este volume teve um aumento de 3 e de 1

%, respetivamente. Como referido anteriormente, devido ao aumento da temperatura, a quantidade de polímero solidificado é menor, aumentando por consequência o volume de gás injetado. É possível observar o desenvolvimento do volume de gás ao longo do ciclo de moldação da peça simulada na Figura 62. A representação gráfica deste desenvolvimento pode ser visualizada na Figura 63.

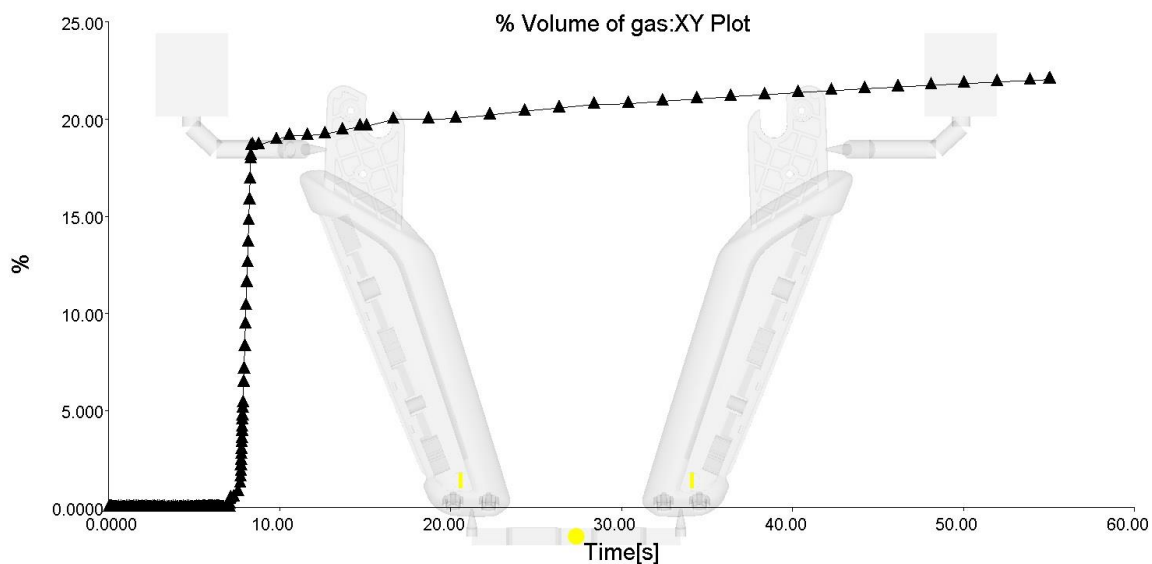


Figura 62. Percentagem de volume de gás *versus* tempo (Simulação 2)

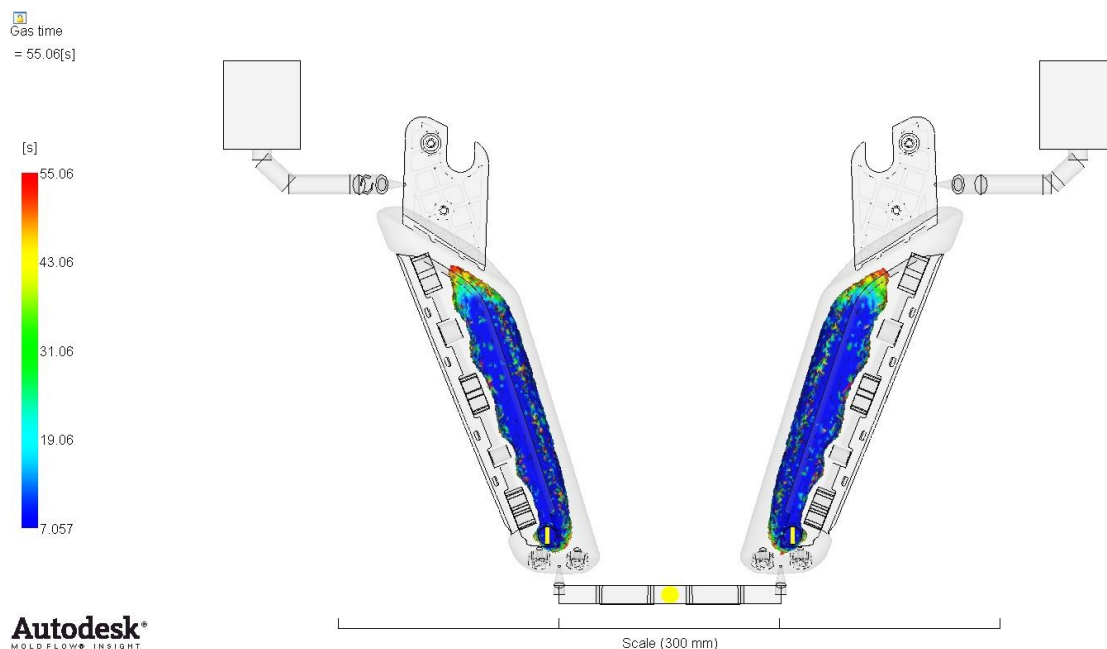


Figura 63. Volume de gás na peça simulada (Simulação 2)

Relativamente ao controlo dimensional, a peça simulada apresenta valores idênticos aos obtidos na simulação do modelo experimental e na peça ensaiada. Desta forma é possível concluir que o aumento da temperatura do molde, só por si, não implica um

aumento nos empenos e/ou contrações na peça. A comparação do controlo dimensional entre as diferentes peças analisadas pode ser observadas na Tabela 13. Relativamente à comparação entre a peça simulada com o molde a 95 °C e a peça do modelo numérico experimental, é possível verificar que existe um desvio máximo de 3 centésimas de milímetro, localizado na zona B. Em relação à peça ensaiada, existe um desvio máximo de 5 centésimas de milímetro nas zonas B e D da peça simulada. Como o desvio máximo do controlo dimensional é inferior à tolerância dimensional exigida ($\pm 0,1$ milímetros), pode-se concluir que a peça desta simulação cumpre o requisito dimensional. A recolha de dados necessários para a análise do controlo dimensional da peça simulada foi realizada no resultado da deformação desta. Na Figura 64 é possível observar este resultado. Como está assinalado na figura anteriormente referida, a peça simulada contém uma deformação máxima de 0,8 milímetros. Este valor é idêntico ao obtido na simulação do molde a 90 °C.

Tabela 13. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 2)

Controlo dimensional	Peça da simulação 2 (mm)	Peça da simulação do modelo experimental (mm)	Peça ensaiada (mm)
Zona A	14,42	14,43	14,46
Zona B	31,01	31,04	31,06
Zona C	20,35	20,36	20,33
Zona D	4,06	4,05	4,01

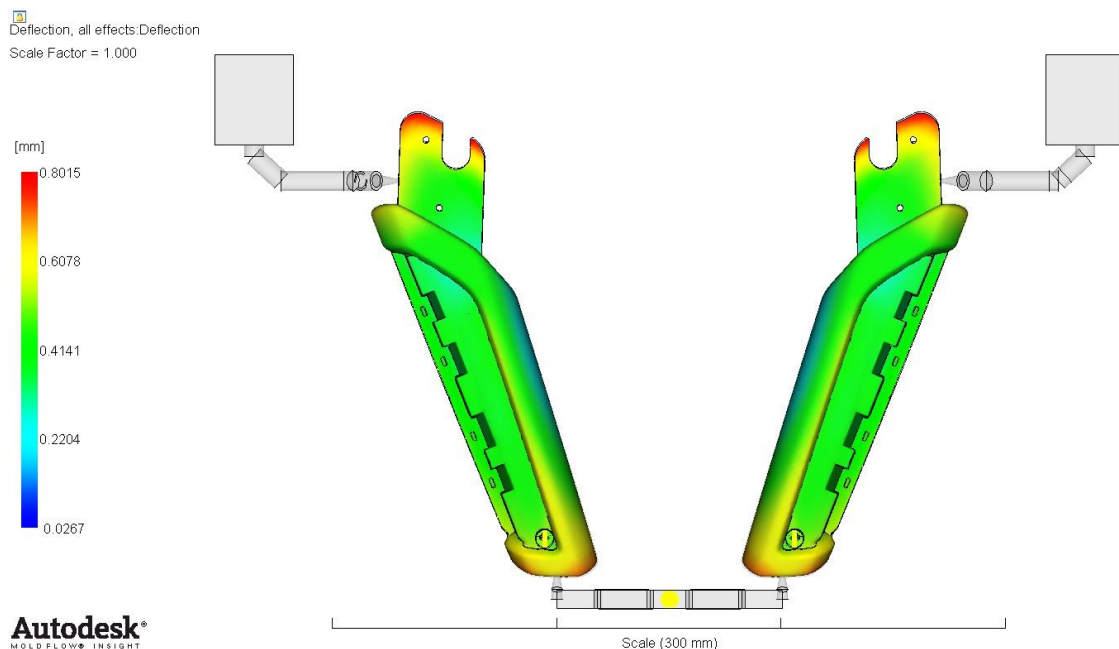


Figura 64. Deformações da peça em estudo (Simulação 2)

Como referido anteriormente, a massa final das peças produzidas deve ser controlado com rigor. A peça obtida nesta simulação tem uma massa aproximadamente de 129 gramas. Porém, devido aos cálculos relacionados com a diferença das densidades entre

o polímero simulado e o usado nos ensaios experimentais, é possível concluir que a peça desta simulação tem uma massa sensivelmente de 116,4 gramas, quando usado a poliamida com uma densidade de 1,35 g/cm³. Sabendo que o limite de massa estabelecido é de 125 gramas, pode-se afirmar que as peças desta simulação cumprem este requisito.

Em relação ao resultado do tensor de orientação das fibras, esta simulação apresenta, na área selecionada para a recolha de amostras, um aumento do valor médio, em relação à simulação do molde a 90 °C e à do modelo experimental. Relativamente à simulação anterior, onde o valor médio deste resultado foi de 0,8525, a simulação do molde a 95 °C, com um valor médio de 0,8550, teve um aumento de 0,0025 unidades. Em comparação com a simulação do modelo experimental, onde o valor médio foi de 0,8491, esta simulação teve um aumento de 0,0059 unidades. Na Tabela 14 é possível observar os valores das amostras retiradas na zona selecionada para a análise do tensor da orientação das fibras, bem como os valores máximo, mínimo e médio das amostras. Nas restantes zonas da peça em estudo, é possível observar, através da Figura 65, que o tensor de orientação das fibras é superior a 0,7, evidenciando um paralelismo entre as fibras de vidro presentes na poliamida e a direção do escoamento do fundido. A comparação deste resultado entre a simulação do modelo experimental e desta simulação pode ser visualizado na Figura 66. Na parte superior desta figura está apresenta-se o tensor de orientação das fibras e na parte inferior o mesmo resultado referente ao obtido durante a simulação da peça ensaiada.

Tabela 14. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 2)

Tensor de orientação da fibra		
Amostras	Máx/Min	Média
0,8455	Máximo	0,8880
0,8575		
0,8033		
0,8724		
0,8421		
0,8673		
0,7794		
0,8762		
0,8391		
0,8807		
0,8679	Mínimo	0,7794
0,8690		
0,8748		
0,8782		
0,8843		
0,8880		
0,8684		
0,8634		
0,8396		
0,8021		

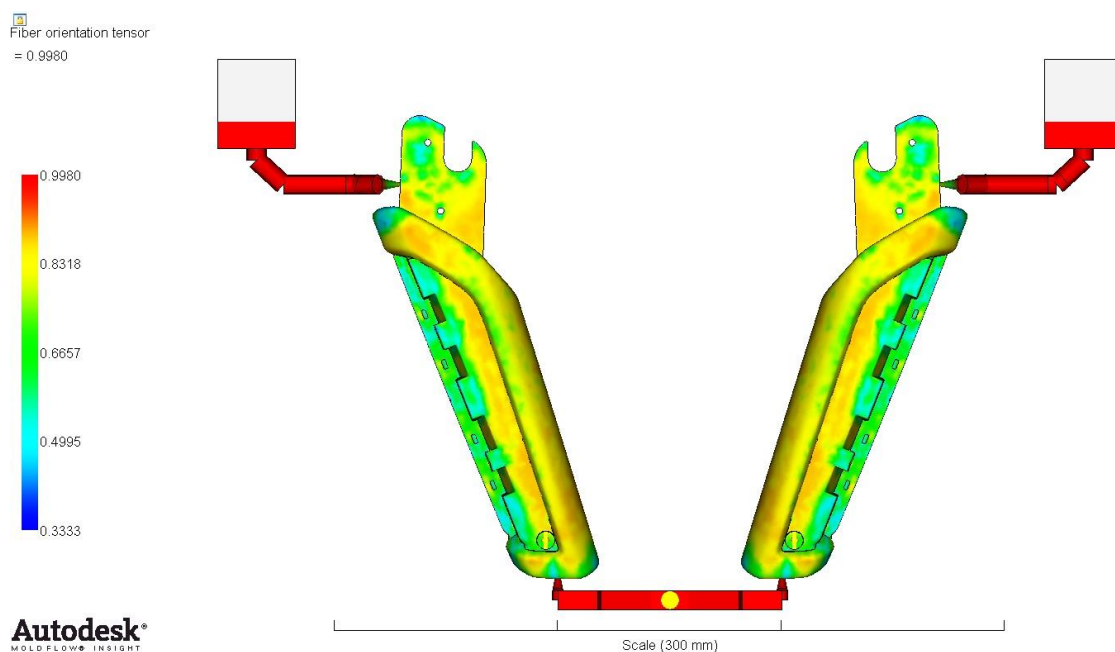


Figura 65. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 2)

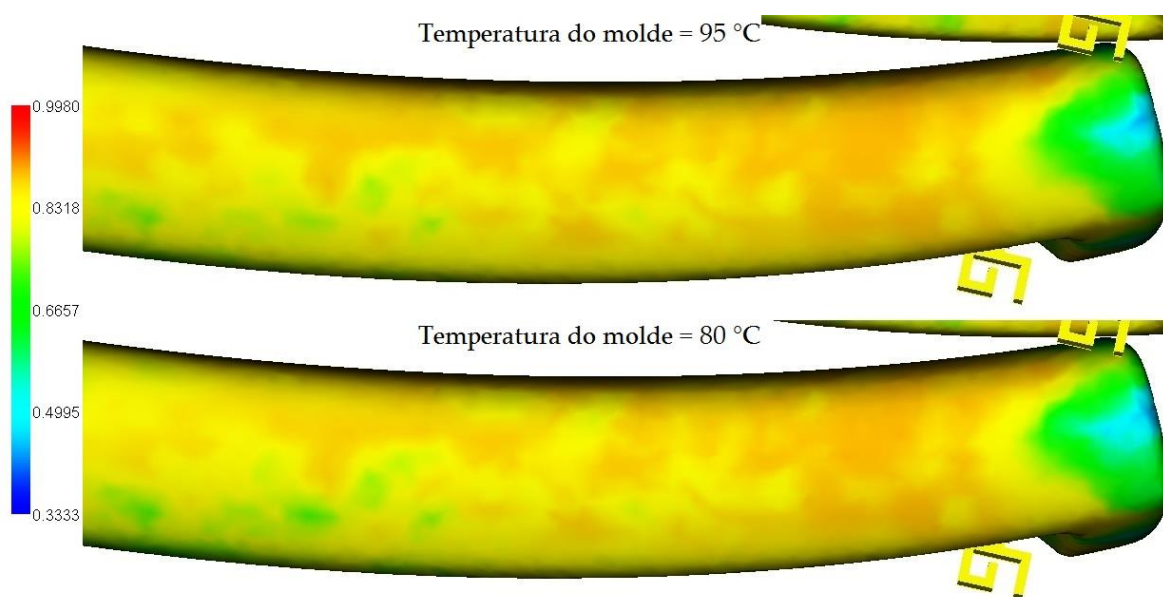


Figura 66. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 2)

Como explicado anteriormente, o aumento do valor do tensor de orientação das fibras sugere um relaxamento das tensões residuais nas superfícies da peça em estudo. Visto que, quer na simulação do molde a 90 °C quer na simulação com a temperatura a 95 °C, houve um aumento no valor da orientação das fibras, pode-se concluir que o aumento da temperatura da ferramenta moldante promove um relaxamento das tensões residuais nas superfícies da peça simulada. Assim, conclui-se que o aumento da temperatura do molde auxilia na eliminação do defeito da exposição das fibras. Uma conclusão semelhante obtiveram Shia-Chung Chen *et al.* [7], em 2011, na investigação *Gas-assisted mold temperature*

control for improving the quality of injection molded parts with fiber additives. Na Tabela 15 apresenta-se uma síntese dos resultados, essenciais para a análise dos requisitos técnicos, das simulações 1 e 2, bem como a do modelo experimental.

Tabela 15. Síntese dos resultados das simulações numéricas 1 e 2

Simulação numérica	Controlo dimensional (mm)				Massa (gramas)	Tensor de orientação das fibras
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D		Valor médio
Modelo experimental	14,43	31,04	20,36	4,05	120,9	0,8491
1	14,43	31,01	20,35	4,06	117,9	0,8525
2	14,42	31,01	20,35	4,06	116,4	0,8550

4.2.2 Análise da Pressão de Injeção do Gás

O estudo seguinte prende-se com a análise da pressão de injeção do gás enquanto variável paramétrica e da sua influência relativa na qualidade final da peça moldada. Como referido anteriormente, o aumento da pressão de injeção do gás inerte promove a redução de tensões residuais nas peças produzidas pelo processo de moldação assistida a gás. Relembrando que o perfil de pressão de injeção do gás usado na simulação do modelo experimental continha duas etapas: durante 3 segundos o gás foi injetado a 18 MPa e durante 5 segundos o gás estava pressurizado a 8 MPa. Neste estudo, a duração deste perfil manteve-se. Contudo, a pressão das duas etapas foi aumentada em 6 MPa, ou seja na primeira etapa o gás foi injetado a 24 MPa e na segunda etapa a 14 MPa. Relativamente ao controlo das válvulas das cavidades não moldantes foi necessário ajustar apenas o fecho destas. Visto que a modificação da pressão do gás não influencia o tempo de enchimento das cavidades moldantes, como se pode ver mais à frente, e o valor do atraso da injeção do gás manteve-se constante. Assim, a abertura das válvulas das cavidades não moldantes manteve-se nos 6,65 segundos do ciclo de moldação. Porém, deve mencionar-se que as válvulas interromperam o enchimento das cavidades não moldantes aos 8,3 segundos do ciclo de moldação, uma vez que, devido ao aumento da pressão de injeção do gás foi possível antecipar o fecho das válvulas em 0,9 segundos, relativamente à simulação do modelo experimental.

O tempo de enchimento da cavidade moldante permanece inalterado, o que seria de esperar até porque a injeção do gás só ocorre após a etapa de enchimento. Desta forma, nesta simulação, as cavidades moldantes foram totalmente preenchidas aproximadamente aos 6 segundos do ciclo de moldação. Porém, devido ao aumento do valor da variável analisada, as cavidades não moldantes foram preenchidas num menor período de tempo. A injeção de polímero para o interior destas cavidades cessou aproximadamente aos 8,3 segundos, como pode ser visualizado na Figura 67. É de lembrar que na simulação do modelo experimental apenas aos 9,2 segundos do ciclo de moldação as cavidades não moldantes foram preenchidas.

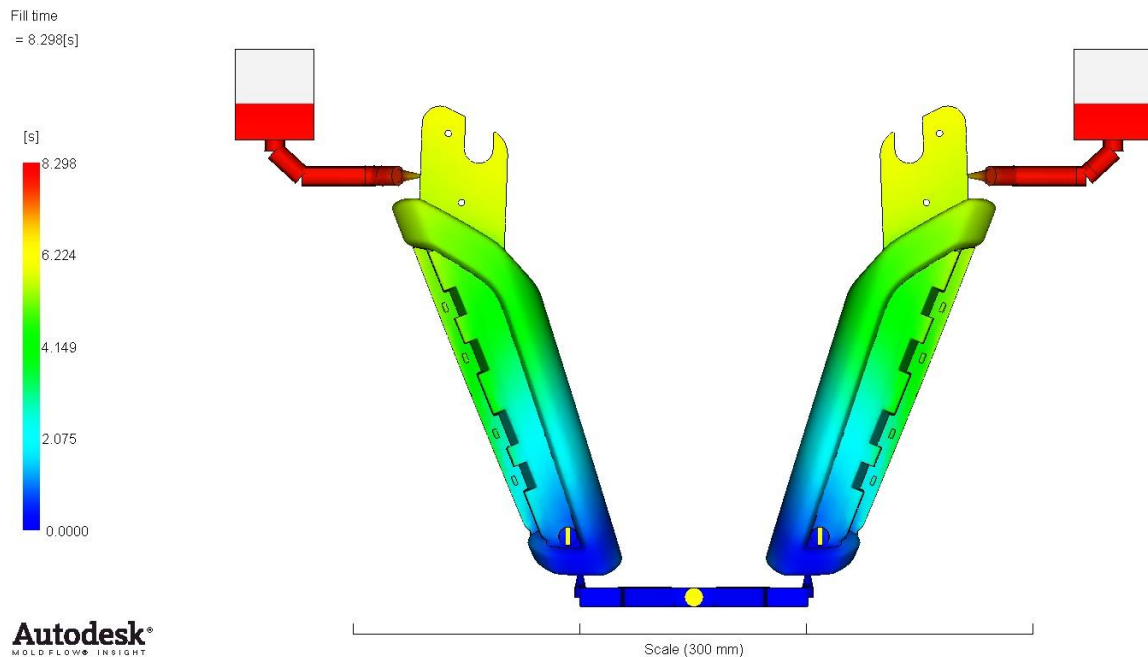


Figura 67. Tempo de enchimento (Simulação 3)

A força de fecho desta simulação foi significativamente influenciada pela pressão de injeção do gás. Como pode ser observado na Figura 68, a força de fecho máxima desta simulação foi aproximadamente de 47 toneladas de força. Em comparação com a simulação do modelo experimental, a força de fecho desta simulação teve um aumento de 12 toneladas. Uma vez que a etapa de compactação deste processo de moldação é realizada pela pressão que o gás exerce no fundido, o aumento desta variável de processamento proporciona um aumento da força de fecho necessária para a concretização de uma moldação por injeção correta. Por vezes, o aumento da força de fecho exige a alteração da máquina de injeção. Quando a força de fecho é superior às capacidades da máquina de injeção, as peças produzidas podem apresentar excesso de material polimérico, principalmente na linha de junção entre a cavidade e a bucha. Para evitar este defeito é necessário recorrer a uma máquina que seja capaz de suportar a força de fecho requerida. Relativamente à máquina de injeção utilizada neste trabalho, o aumento deste resultado não constitui um problema, visto que esta está algo sobredimensionada.

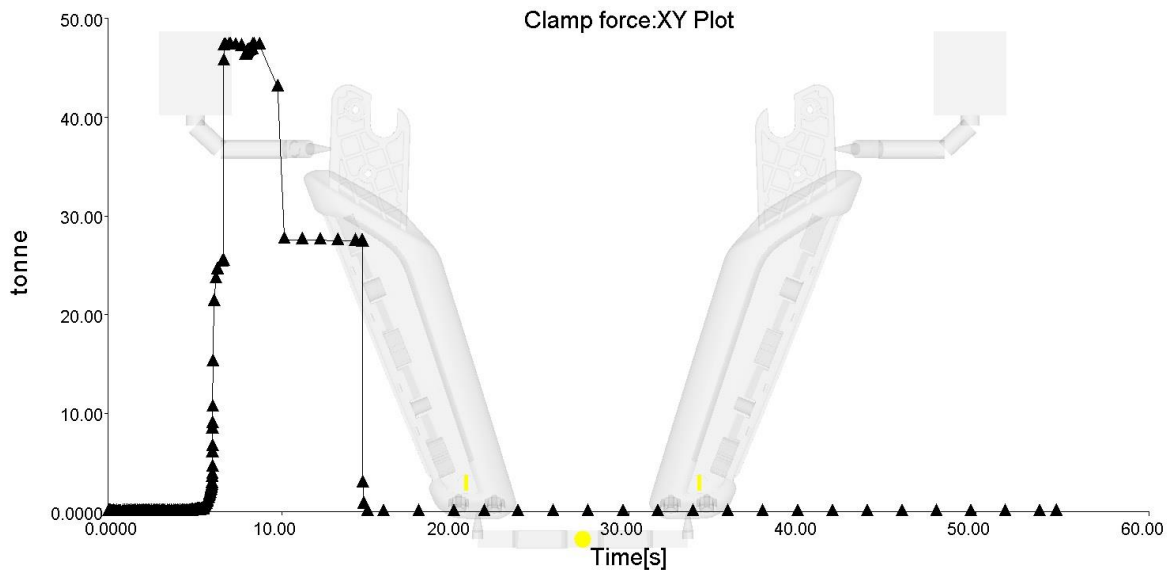


Figura 68. Força de fecho (Simulação 3)

Como a injeção do gás só ocorre durante a fase de compactação, como anteriormente referido, o resultado da temperatura na frente do escoamento do fundido desta simulação é idêntico ao resultado da simulação do modelo experimental.

Relativamente às tensões de corte, a peça apresenta valores inferiores a 60000 s^{-1} , como ocorreu na simulação do modelo experimental. Desta forma pode-se concluir que a peça simulada vai possuir baixas deformações.

A contração volumétrica da peça em estudo nesta simulação foi inferior, contudo pouco notória. Em vez de uma contração de 1,076 %, que foi apresentada na simulação do molde existente, esta simulação apresenta uma contração volumétrica de 1,006 % na peça em estudo. Esta redução deve-se ao maior nível de compactação do polímero durante a sua solidificação. Na Figura 69 é possível observar a contração volumétrica obtida nesta simulação.

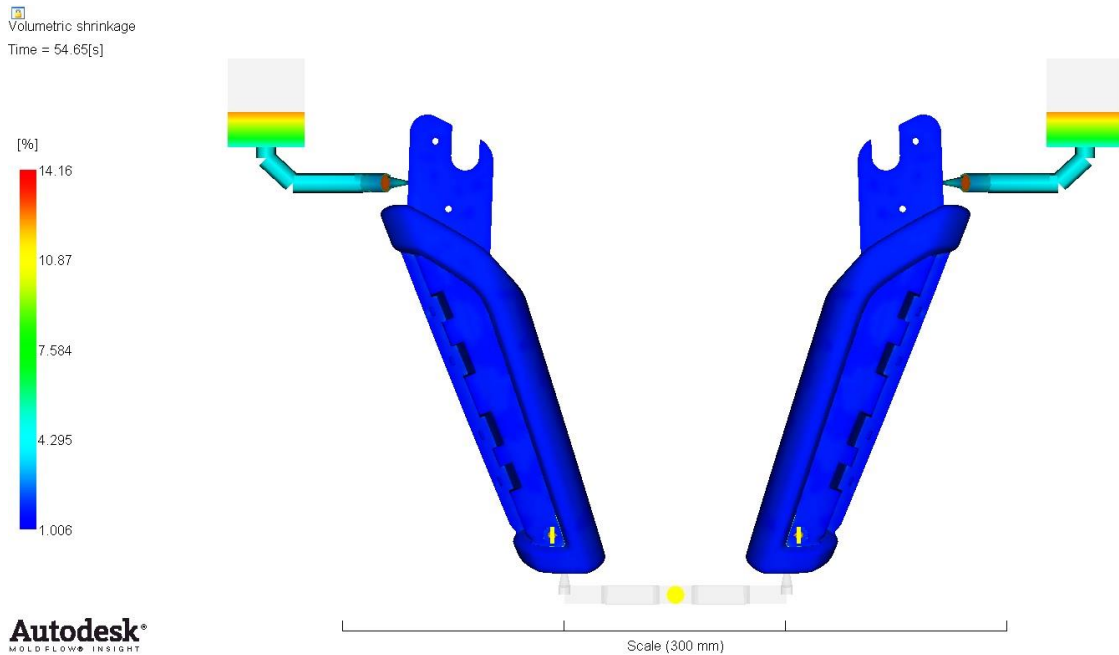


Figura 69. Contração volumétrica da peça simulada (Simulação 3)

Relativamente ao resultado das linhas de soldadura presentes na peça simulada, pode-se concluir que não houve alteração em relação à simulação da peça ensaiada, quer na quantidade quer na localização deste defeito. O aparecimento deste defeito é consistente com a temperatura, do molde e do fundido, uma vez que nesta simulação numérica estes dois parâmetros não foram modificados, sendo, de algum modo um resultado esperado.

Nesta simulação numérica o gás inerte, no final do ciclo de moldação, ocupa aproximadamente 25 % do volume da peça em estudo. Relativamente à simulação do modelo experimental, esta peça teve um aumento na percentagem de volume de gás de 6 %. Na Figura 70 é possível observar o desenvolvimento do volume de gás ao longo do ciclo de moldação da peça simulada. A representação gráfica deste desenvolvimento pode ser visualizada na Figura 71. Devido ao aumento da pressão de injeção do gás é possível, num menor período de tempo, remover uma maior quantidade de fundido, aumentando assim o volume de gás na peça.

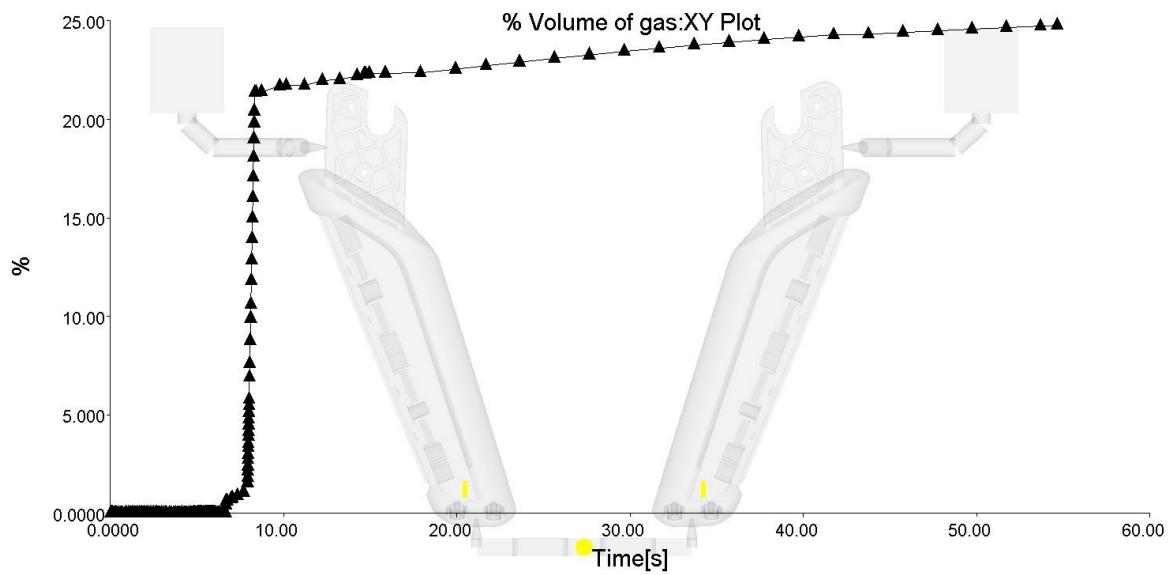


Figura 70. Percentagem de volume de gás *versus* tempo (Simulação 3)

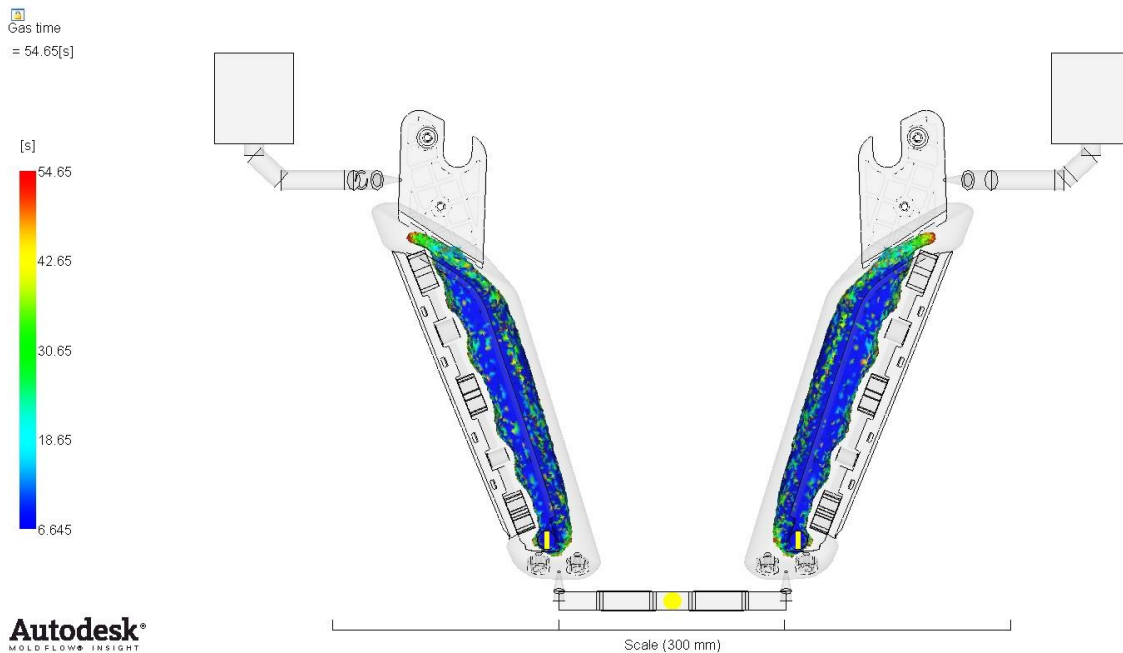


Figura 71. Volume de gás na peça simulada (Simulação 3)

Em relação ao controlo dimensional, a peça nesta simulação apresenta valores semelhantes aos obtidos na simulação do modelo experimental e na peça ensaiada. Desta forma é possível concluir que o aumento da pressão de injeção do gás não contribui para um aumento nos empenos e contrações da peça, antes pelo contrário, teoricamente, alguma estabilidade dimensional seria de esperar. A comparação do controlo dimensional entre as diferentes peças analisadas pode ser observada na Tabela 16. Relativamente à comparação entre a peça desta simulação e a peça do modelo numérico experimental, é possível verificar que existe um desvio máximo de 1 centésima de milímetro, localizado nas zonas A e D. Em relação à peça ensaiada, existe um desvio máximo de 5 centésimas de milímetro na zona D

da peça simulada. Como o desvio máximo do controlo dimensional é inferior à tolerância dimensional exigida ($\pm 0,1$ milímetros), pode-se concluir que a peça desta simulação cumpre o requisito dimensional. A recolha de dados necessários para a análise do controlo dimensional da peça simulada foi realizada no resultado da deformação desta. Na Figura 72 é possível observar este resultado. Como está assinalado na figura anteriormente referida, a peça simulada contém uma deformação máxima de 0,85 milímetros.

Tabela 16. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 3)

Controlo dimensional	Peça da simulação 3 (mm)	Peça da simulação do modelo experimental (mm)	Peça ensaiada (mm)
Zona A	14,42	14,43	14,46
Zona B	31,04	31,04	31,06
Zona C	20,36	20,36	20,33
Zona D	4,06	4,05	4,01

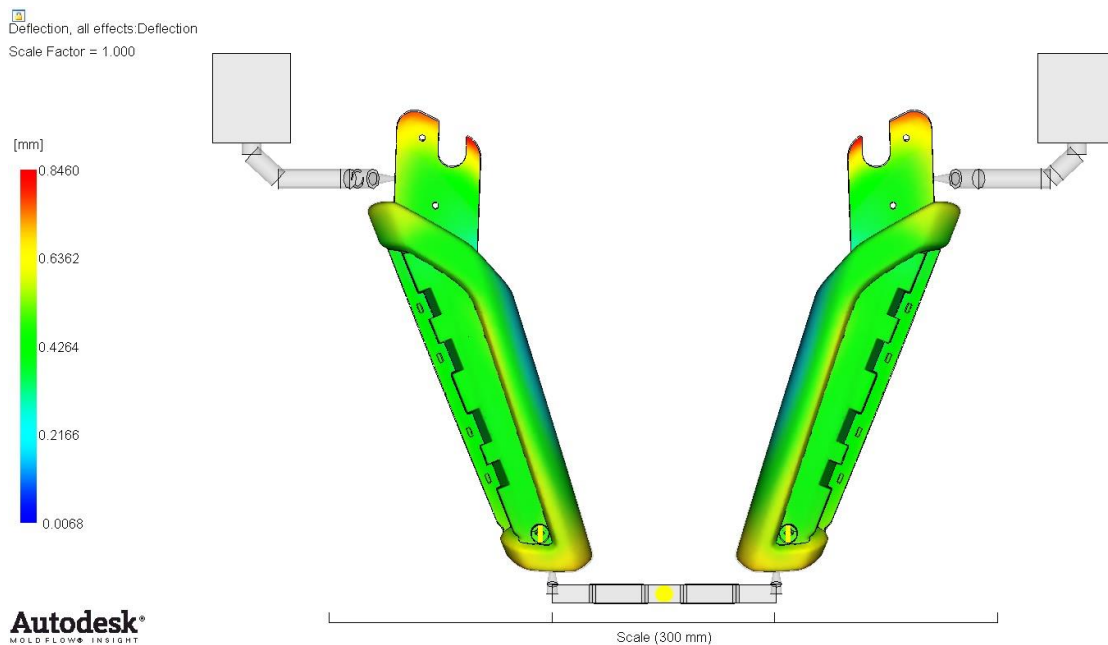


Figura 72. Deformações da peça em estudo (Simulação 3)

Em relação à massa da peça simulada, o *software* Moldflow® indica que as duas peças obtidas no final do ciclo de moldação têm, cada uma, uma massa de 125,5 gramas, que após a correção previamente mencionada resulta em 111,95 gramas e portanto dentro do limite máximo de 125 gramas.

Relativamente ao resultado do tensor de orientação das fibras, esta simulação apresenta, na área selecionada para a recolha de amostras, um valor médio quase idêntico quando comparado com a simulação do modelo experimental. Nesta simulação o valor médio das diferentes amostras, referente a este resultado, foi de 0,8493. É de lembrar que na simulação do modelo experimental o valor médio do tensor de orientação das fibras foi de 0,8491. Na Tabela 17 é possível observar os valores das amostras retiradas na zona

selecionada para a análise do tensor da orientação das fibras, bem como os valores máximo, mínimo e médio das amostras. Através destes valores não é possível concluir que o aumento da pressão de injeção do gás promova um relaxamento das tensões residuais presentes nas superfícies da peça em estudo e dessa forma eliminar a exposição das fibras existentes em diversas zonas do puxador. No entanto os resultados globais tendem a apresentar uma menor anisotropia, com uma orientação da fibra sempre superior a 70 %. Ver Figura 73 e 74.

Tabela 17. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 3)

Tensor de orientação da fibra		
Amostras	Máx/Min	Média
0,8355	Máximo	0,8894
0,8573		
0,7836		
0,8633		
0,7966		
0,8775		
0,7544		
0,8756		
0,8267		
0,8693		
0,8625		
0,8683	Mínimo	0,7544
0,8416		
0,8725		
0,8675		
0,8894		
0,8870		
0,8822		
0,8285		
0,8471		

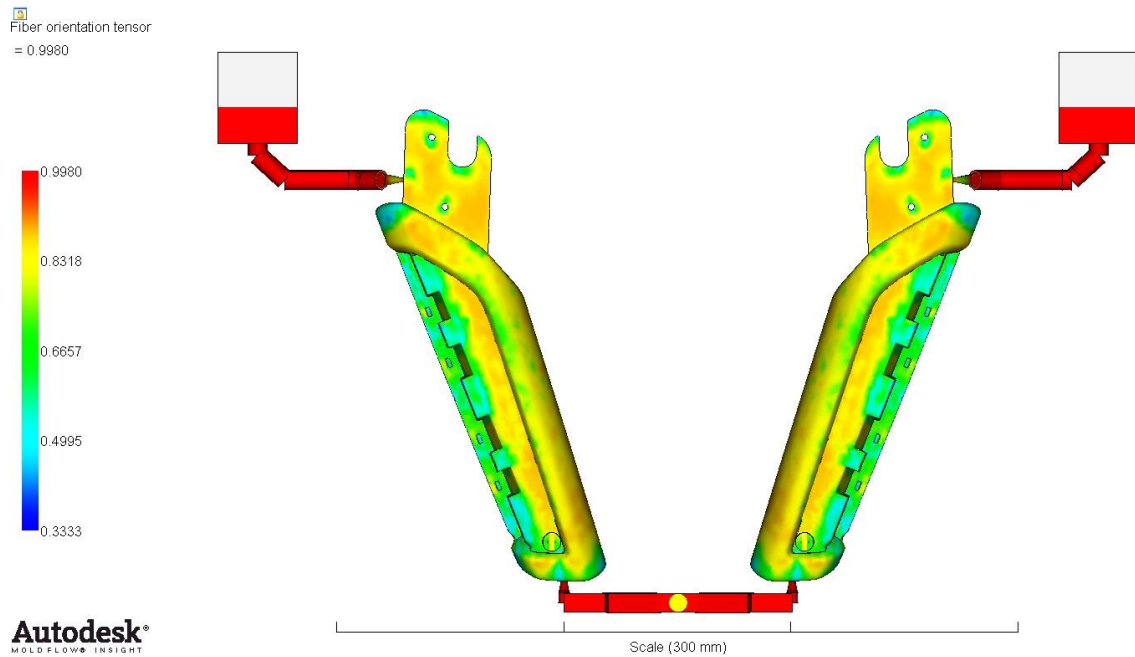


Figura 73. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 3)

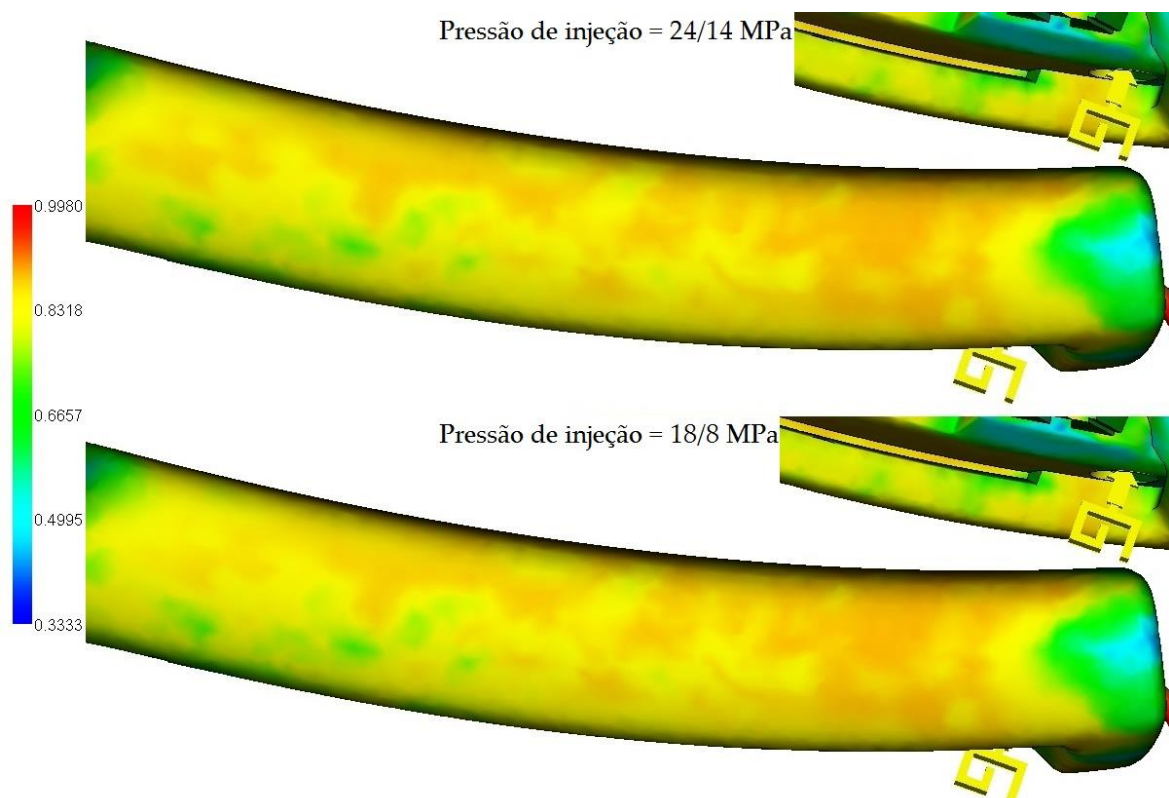


Figura 74. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 3)

Em síntese, no estudo da análise da pressão de injeção do gás, o aumento desta pressão não contribui para um relaxamento das tensões residuais presentes na peça em estudo, uma vez que o valor médio do tensor de orientação das fibras desta simulação é semelhante à obtida na do modelo experimental. Desta forma, o defeito da exposição das

fibras permanece presente nas diferentes superfícies do puxador. De algum modo, este resultado não foi tão evidente neste estudo como o reportado por Ying Lu *et al.* [8], pelo menos não nestas secções da peça. Na Tabela 18 apresenta-se uma síntese dos resultados, essenciais para a análise dos requisitos técnicos, da simulação 3 e da do modelo experimental.

Tabela 18. Síntese dos resultados da simulação numérica 3

Simulação numérica	Controlo dimensional (mm)				Massa (gramas)	Tensor de orientação das fibras
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D		Valor médio
Modelo experimental	14,43	31,04	20,36	4,05	120,9	0,8491
3	14,42	31,04	20,36	4,06	111,95	0,8493

4.2.3 Análise do Atraso da Injeção do Gás

No estudo seguinte pretende-se analisar a influência do atraso da injeção do gás como parâmetro de processamento na resolução de defeitos relacionados com as tensões residuais. Como anteriormente referido, um ajuste cuidado do atraso da injeção do gás pode contribuir para um relaxamento dessas tensões em peças moldadas pelo processo de moldação por injeção assistida a gás. Desta forma decidiu-se realizar três simulações, onde as únicas variáveis a alterar seriam o atraso da injeção do gás e o controlo das válvulas das cavidades não moldantes. A primeira simulação teria um atraso de 0,4 segundos, em vez dos 0,65 segundos utilizados na simulação do modelo experimental, a segunda teria um valor de 0,2 segundos e a última simulação um atraso de 0 segundos. Relativamente ao controlo das válvulas das cavidades não moldantes, na simulação do atraso de 0,4 segundos, as válvulas foram abertas no instante 6,4 segundos e cessando-se o preenchimento destas cavidades aos 7,3 segundos do ciclo de moldação. É de notar que as válvulas na simulação do modelo experimental estiveram abertas durante 2,55 segundos e que nesta simulação o enchimento das cavidades não moldantes teve uma duração de 0,9 segundos, essencialmente devido à viscosidade do material polimérico. Durante a fase de injeção do gás, uma baixa viscosidade permite uma remoção mais acelerada do fundido, reduzindo por consequência o tempo de enchimento das cavidades não moldantes. O controlo destas válvulas nas restantes simulações será descrito mais adiante neste trabalho.

Nesta simulação, o resultado do tempo de enchimento foi idêntico ao obtido na simulação da peça ensaiada. Como o atraso da injeção do gás está incorporado na fase de compactação do ciclo de moldação, este só ocorre depois do preenchimento das cavidades moldantes. Desta forma, não se notaram alterações nos valores referentes ao tempo de enchimento, em comparação com a simulação da peça ensaiada, concluindo-se que as cavidades moldantes foram preenchidas nos 6 segundos do ciclo de moldação. Todavia, devido à redução do atraso da injeção do gás, as cavidades não moldantes foram preenchidas num menor período de tempo, como previamente referido. A injeção de

polímero para o interior destas cavidades cessou sensivelmente aos 7,3 segundos, como pode ser visualizado na Figura 75.

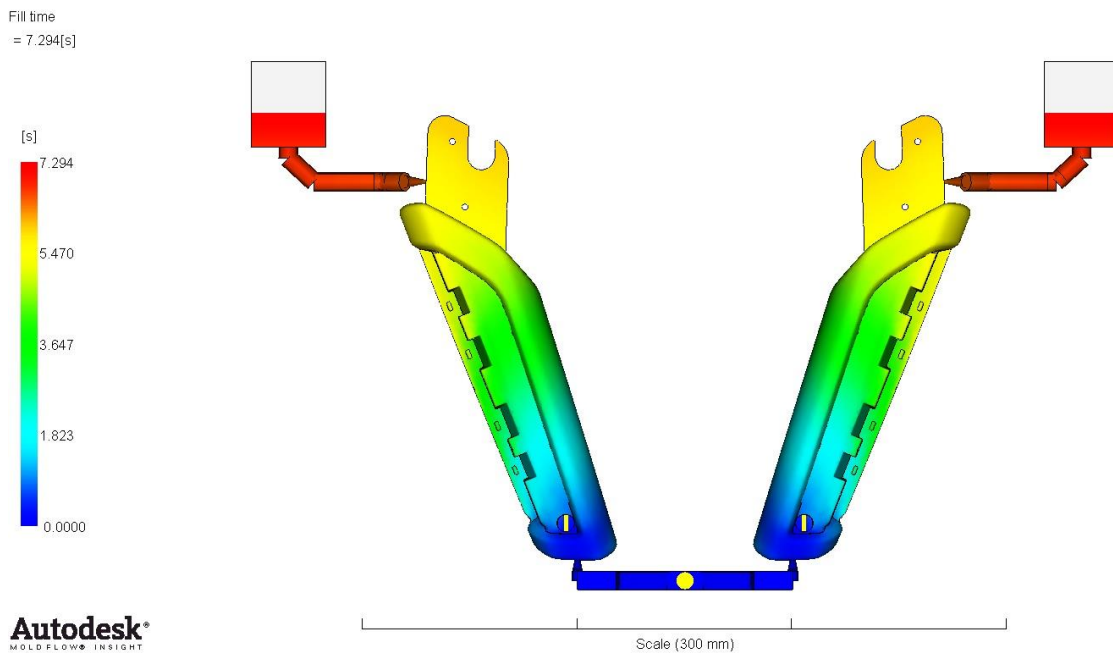


Figura 75. Tempo de enchimento (Simulação 4)

Em relação à força de fecho, não houve qualquer alteração no valor deste resultado, visto que as pressões de injeção do fundido e do gás usadas nesta simulação foram idênticas à simulação do modelo experimental. O valor máximo da força de fecho foi sensivelmente de 35 toneladas.

Como anteriormente referido, o atraso da injeção do gás está incorporado na fase de compactação do ciclo de moldação e por isso, este só ocorre depois do preenchimento das cavidades moldantes. Desta forma, o resultado da temperatura na frente do escoamento do fundido desta simulação foi inalterado, em relação ao resultado da simulação do modelo experimental.

Relativamente à tensão de corte, o resultado desta simulação demonstra que a peça não contém tensões que ultrapassem o valor admissível (60000 s^{-1}), não se esperando grandes deformações ou empenos, uma vez que a contração volumétrica observada foi de 1,114 %, enquanto na simulação do modelo experimental a peça analisada demonstrava um valor de 1,076 %. Na Figura 76 é possível observar a contração volumétrica obtida nesta simulação.

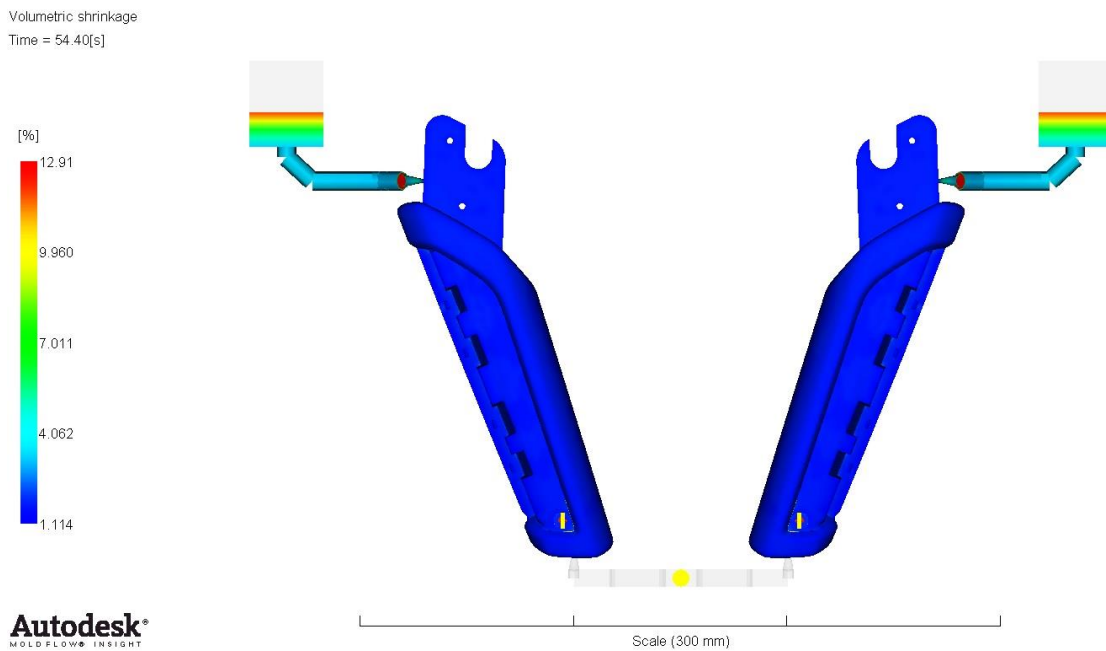


Figura 76. Contração volumétrica da peça simulada (Simulação 4)

No resultado das linhas de soldadura presentes na peça simulada, está apresentada uma ligeira melhoria na quantidade deste defeito na secção do encaixe inferior, quando comparado com a simulação do modelo experimental. Porém, esta melhoria é pouco notória, podendo-se assim afirmar que estes defeitos continuam a ser pontos de fragilidade da peça simulada. As linhas de soldadura existentes na peça simulada podem ser visualizadas na Figura 77.

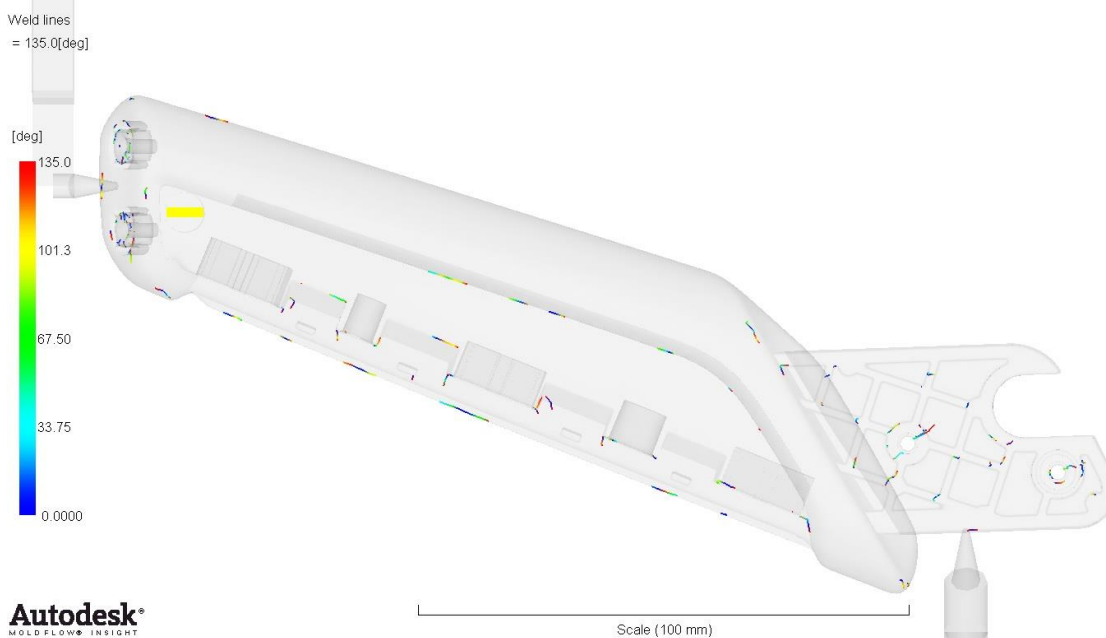


Figura 77. Linhas de soldadura do modelo numérico (Simulação 4)

Nesta simulação numérica o gás inerte, no final do ciclo de moldação, ocupa 25 % do volume da peça em estudo. Em relação à simulação do modelo experimental, esta peça

teve um aumento na percentagem de volume de gás de 6 %. Devido ao menor atraso da injeção do gás, a quantidade de polímero solidificado durante a fase de injeção do gás é menor, comparativamente ao modelo experimental, aumentando por consequência o volume de gás injetado. Na Figura 78 é possível visualizar o desenvolvimento do volume de gás ao longo do ciclo de moldação da peça simulada. A representação gráfica deste desenvolvimento pode ser observada na Figura 79.

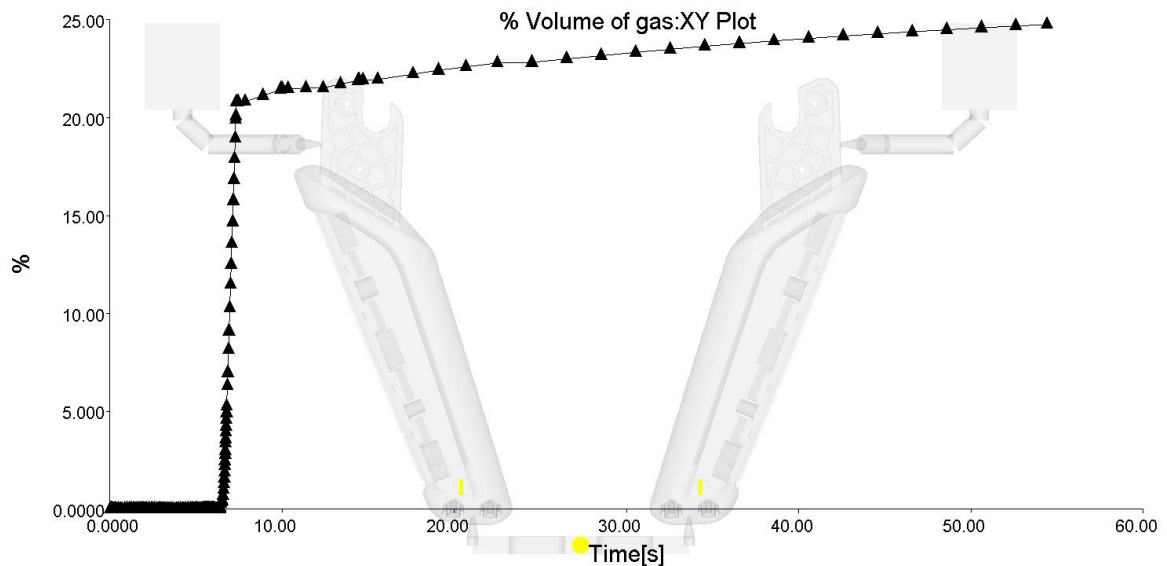


Figura 78. Percentagem de volume de gás versus tempo (Simulação 4)

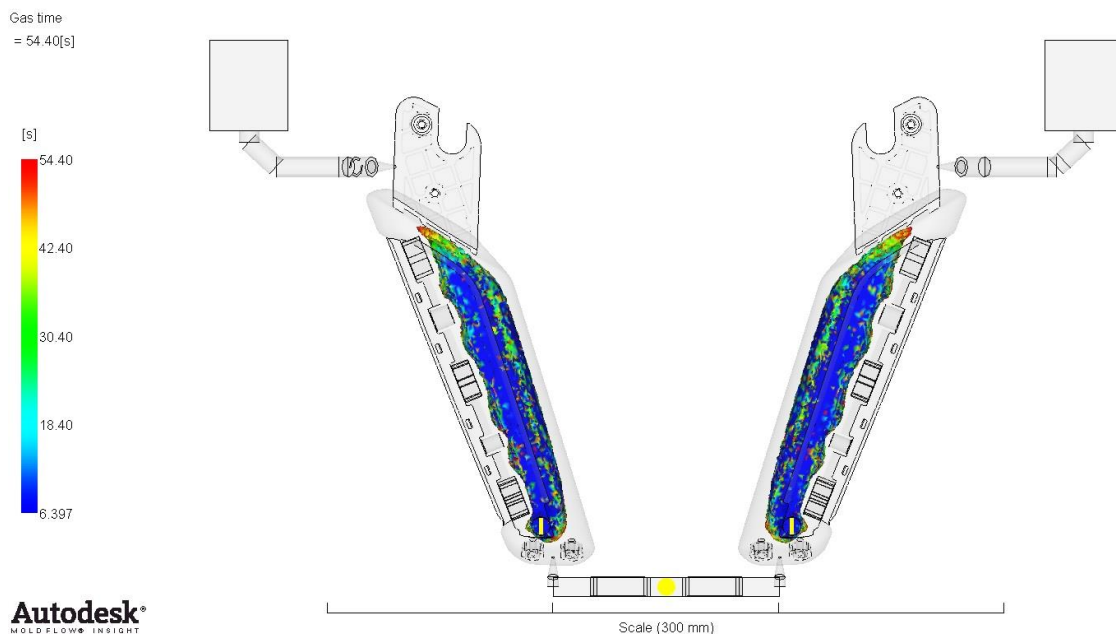


Figura 79. Volume de gás na peça simulada (Simulação 4)

Relativamente ao controlo dimensional, a peça desta simulação apresenta valores semelhantes aos medidos, quer na peça ensaiada quer na peça da simulação do modelo

experimental. Desta forma é possível afirmar que um atraso da injeção do gás de 0,4 segundos não proporciona um aumento nos empenos e contrações da peça simulada. A comparação do controlo dimensional entre as diferentes peças analisadas pode ser observada na Tabela 19. Através dos valores da tabela anterior é possível verificar que a peça simulada, em relação à peça da simulação do modelo experimental, tem um desvio máximo de 2 centésimas de milímetro, localizado na zona B e D. Em relação à peça ensaiada, existe um desvio máximo de 6 centésimas de milímetro na zona D da peça simulada. Como o desvio máximo do controlo dimensional é inferior à tolerância dimensional exigida ($\pm 0,1$ milímetros), pode-se concluir que a peça desta simulação cumpre o requisito dimensional. A recolha de dados necessários para a análise do controlo dimensional da peça simulada foi realizada no resultado da deformação desta. Na Figura 80 é possível observar este resultado. Como está assinalado na figura anteriormente referida, a peça simulada contém uma deformação máxima de 0,85 milímetros.

Tabela 19. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 4)

Controlo dimensional	Peça da simulação 4 (mm)	Peça da simulação do modelo experimental (mm)	Peça ensaiada (mm)
Zona A	14,43	14,43	14,46
Zona B	31,02	31,04	31,06
Zona C	20,36	20,36	20,33
Zona D	4,07	4,05	4,01

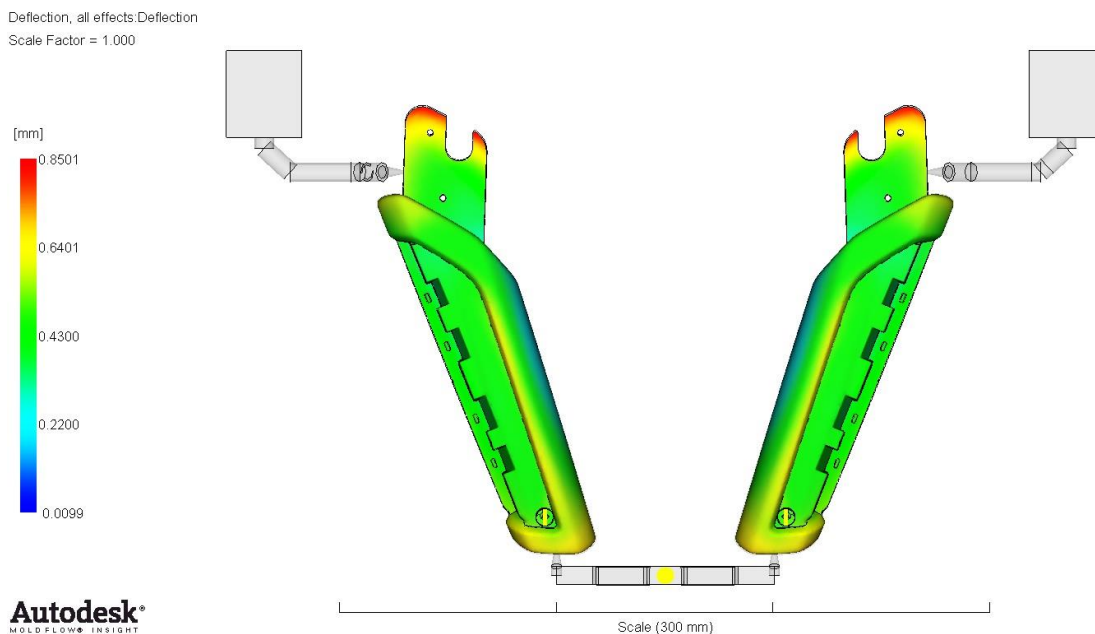


Figura 80. Deformações da peça em estudo (Simulação 4)

A peça desta simulação tem uma massa aproximadamente de 125,5 gramas, que após a correção previamente mencionada resulta em 111,95 gramas e portanto dentro do limite máximo de 125 gramas.

Nesta simulação, o resultado do tensor de orientação das fibras demonstra, na área selecionada para a recolha de amostras, um valor médio de 0,8499. Esta média é semelhante ao valor obtido na simulação do modelo experimental. É de lembrar que na simulação de recriação o valor médio deste resultado foi de 0,8491. Na Tabela 20 é possível observar os valores das amostras retiradas na zona selecionada para a análise do tensor da orientação das fibras, bem como os valores máximo, mínimo e médio das amostras. Como apresentado nesta tabela, os valores deste tensor de orientação das fibras indicam que a redução do atraso da injeção do gás não proporciona um relaxamento das tensões residuais presentes nas superfícies da peça simulada. Desta forma é possível concluir que este atraso não elimina a exposição das fibras nas diversas secções da peça em estudo. Contudo, nas restantes zonas da peça desta simulação, é possível observar que o tensor de orientação das fibras é superior a 0,7, como pode ser visualizado na Figura 81, indicando um paralelismo entre as fibras de vidro e a direção do escoamento do polímero. A comparação deste resultado entre a simulação do modelo experimental e desta simulação pode ser visualizado na Figura 82. Na parte superior desta figura está apresentado o tensor de orientação das fibras e na parte inferior o mesmo resultado referente ao obtido durante a simulação da peça ensaiada.

Tabela 20. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 4)

Tensor de orientação da fibra		
Amostras	Máx/Min	Média
0,8318	Máximo	0,8871
0,8593		
0,7875		
0,8736		
0,7993		
0,8789		
0,8074		
0,8748		
0,7621		
0,8585		
0,8800		
0,8523	Mínimo	0,7621
0,8674		
0,8608		
0,8766		
0,8843		
0,8871		
0,8862		
0,8471		
0,8222		

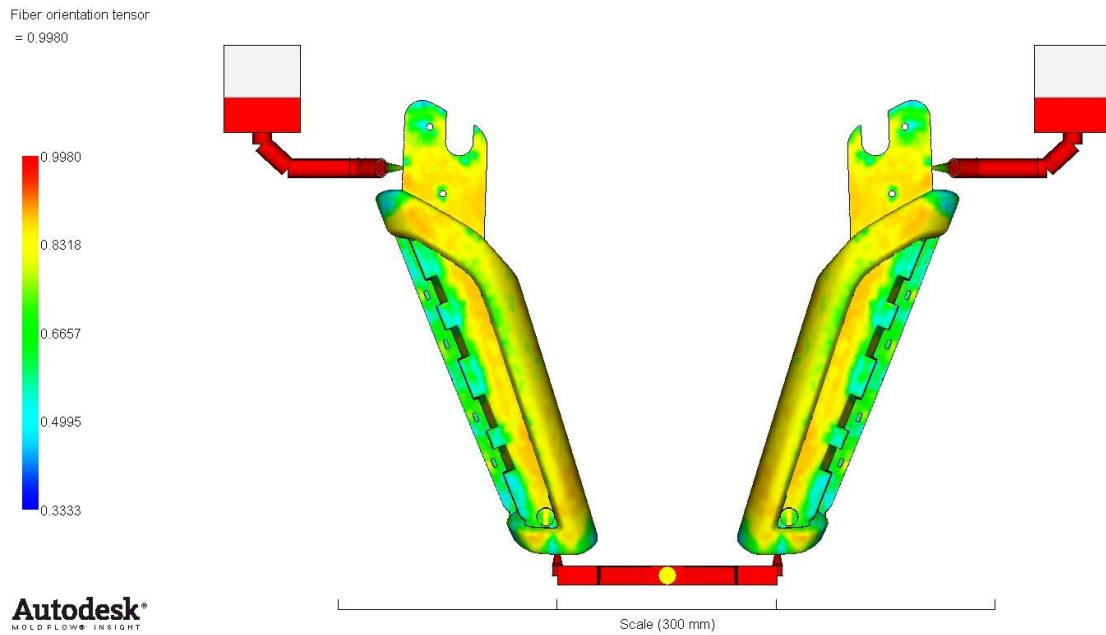


Figura 81. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 4)

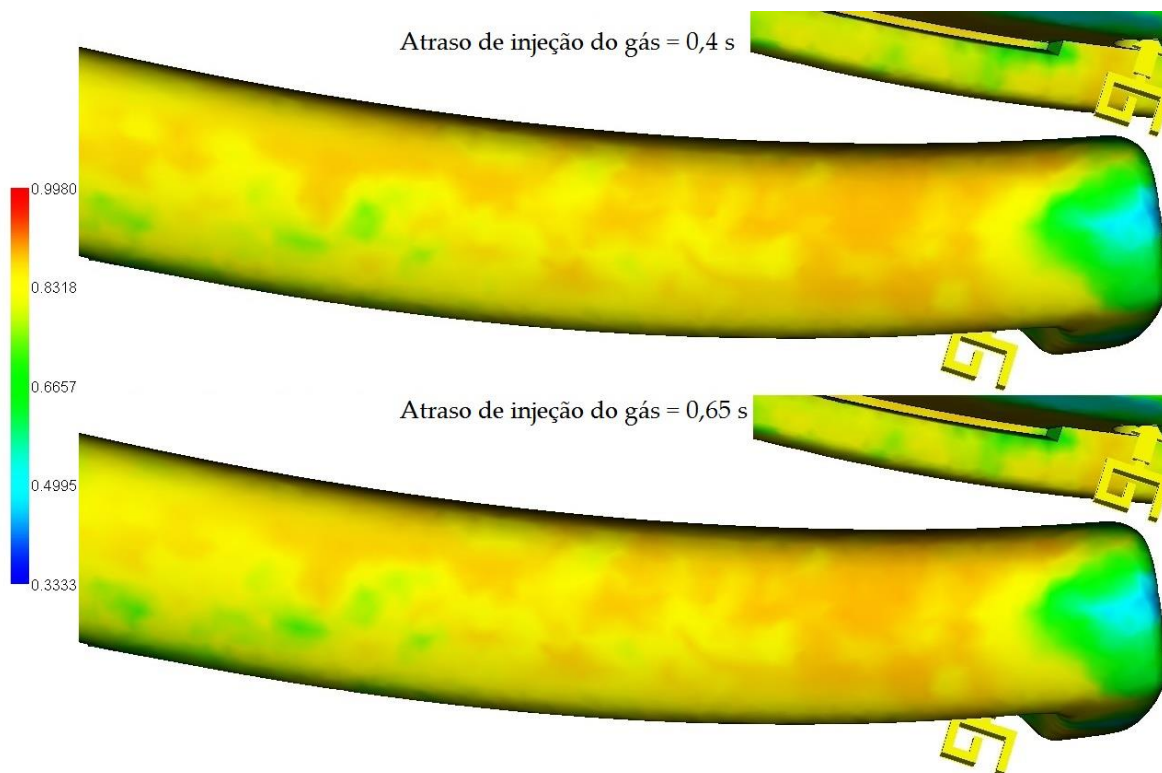


Figura 82. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 4)

Antes de completar as análises do atraso da injeção do gás, salienta-se que nas três simulações que foram apresentadas existem resultados idênticos. Desta forma, verifica-se o seguinte: O tempo de enchimento foi de 6 segundos, a força de fecho não ultrapassa as 35 toneladas, o resultado da temperatura na frente do escoamento do fundido destas simulações foi inalterado, em relação ao resultado da simulação do modelo experimental,

o resultado da tensão de corte demonstra que as peças simuladas não contêm tensões que ultrapassem o valor admissível (60000 s^{-1}), as peças têm uma contração volumétrica de 1,114 % e as linhas de soldadura apresentam uma ligeira melhoria.

A seguinte simulação foi a do atraso da injeção do gás de 0,2 segundos. Devido a este parâmetro, o controlo das válvulas das cavidades não moldantes desta simulação teve de ser reajustado mais uma vez. As válvulas abriram aos 6,2 segundos e foi cessado o enchimento destas cavidades aos 7 segundos, como pode ser visualizado na Figura 83. É de notar que as válvulas na simulação anterior estiveram abertas durante 0,9 segundos e que nesta simulação o enchimento das cavidades não moldantes teve uma duração de 0,8 segundos. Isto deve-se à viscosidade do material polimérico, como anteriormente explicado.

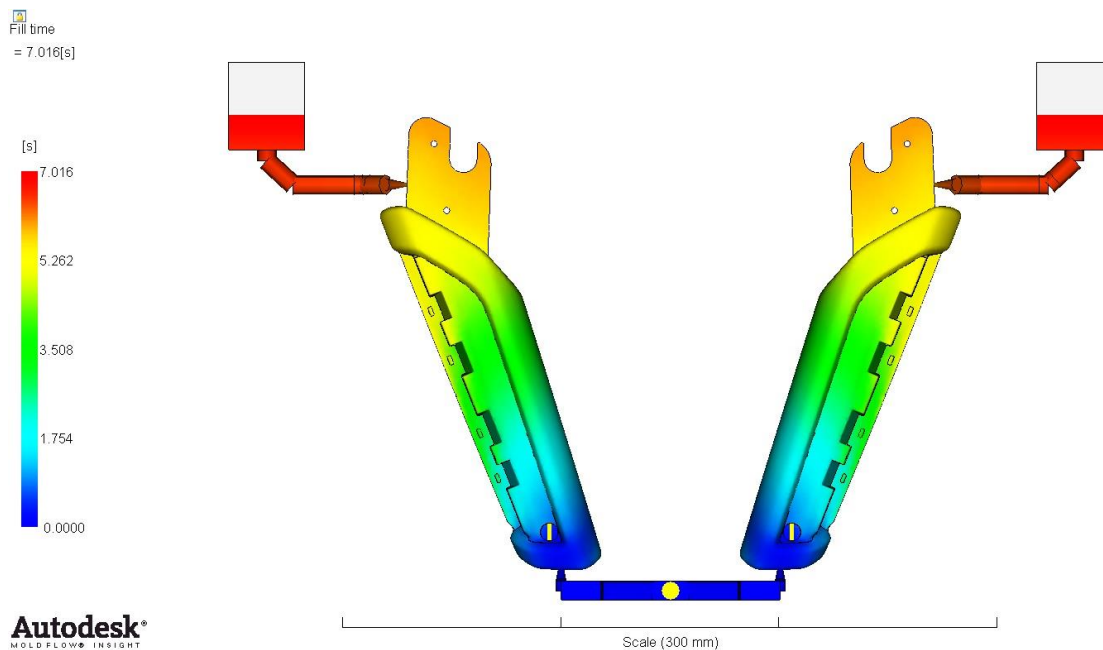


Figura 83. Tempo de enchimento (Simulação 5)

Relativamente à percentagem de volume de gás, nesta simulação a peça contém sensivelmente 24 % de gás no seu interior. Em relação à simulação do modelo experimental, esta peça teve um aumento na percentagem de volume de gás de 5 %. Porém, em relação à simulação anterior houve uma redução de 1 %. Esta redução deve-se ao volume de gás que a peça contém, no momento em que as válvulas das cavidades não moldantes fecham. No caso da simulação com um atraso de 0,4 segundos, existia sensivelmente 20 % de gás no interior da peça quando as válvulas fecharam. Na simulação com um atraso de 0,2 segundos, existia no interior da peça aproximadamente 19,5 % de gás. Com a contração do polímero, esta diferença de 0,5 % aumentou para valor anteriormente referido. Na Figura 84 é possível visualizar o desenvolvimento do volume de gás ao longo do ciclo de moldação desta simulação. A representação gráfica deste desenvolvimento pode ser observada na Figura 85.

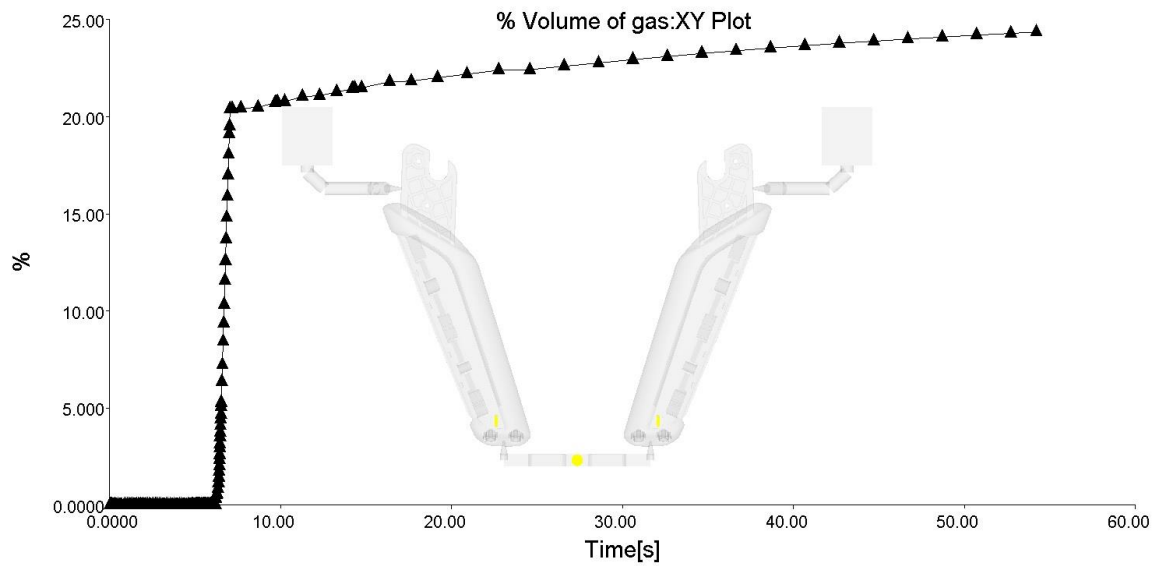


Figura 84. Percentagem de volume de gás *versus* tempo (Simulação 5)

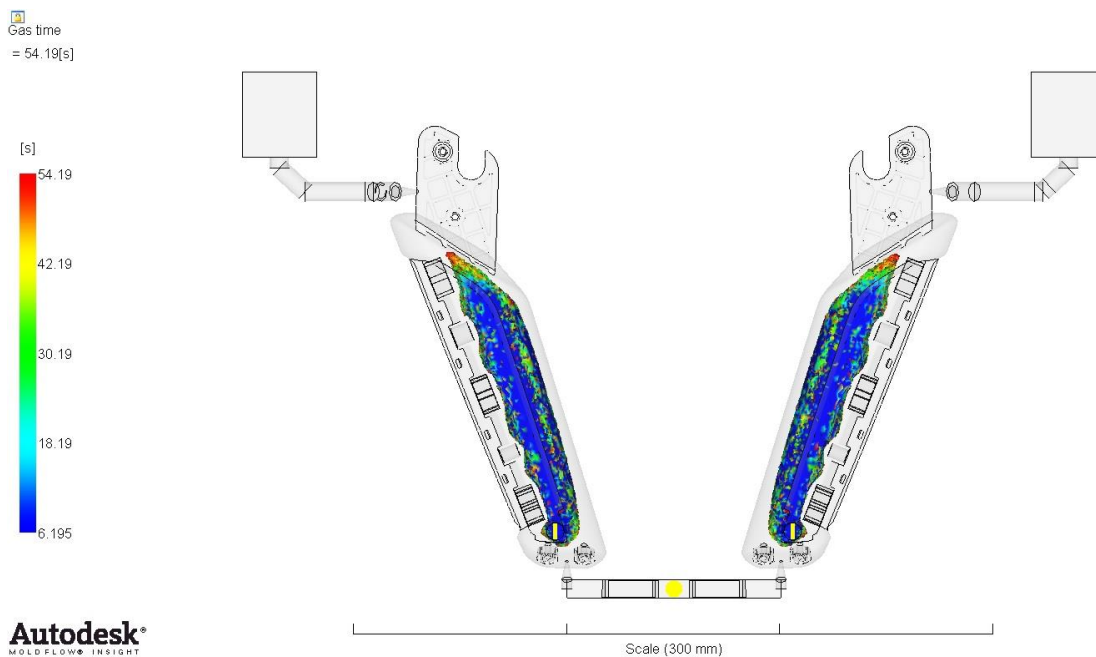


Figura 85. Volume de gás na peça simulada (Simulação 5)

Em relação ao controlo dimensional, a peça simulada apresenta valores idênticos aos medidos, comparando com a peça ensaiada e com a peça da simulação do modelo experimental. Desta forma é possível concluir que um atraso da injeção do gás de 0,2 segundos não proporciona um aumento nos empenos e contrações da peça simulada. A comparação do controlo dimensional entre as diferentes peças analisadas pode ser observada na Tabela 21. Relativamente à comparação entre a peça desta simulação e a peça do modelo numérico experimental, é possível verificar que existe um desvio máximo de 2 centésimas de milímetro, localizado nas zonas B e D. Em relação à peça ensaiada, existe um desvio máximo de 6 centésimas de milímetro na zona D da peça simulada. Pode-se concluir que a peça desta simulação cumpre o requisito dimensional, visto que o desvio máximo do

controlo dimensional é inferior à tolerância dimensional exigida ($\pm 0,1$ milímetros). A aquisição dos valores referentes ao controlo dimensional da peça simulada foi realizada no resultado da deformação desta. Na Figura 86 é possível observar este resultado. Está indicado neste resultado que a peça simulada contém uma deformação máxima de aproximadamente de 0,84 milímetros.

Tabela 21. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 5)

Controlo dimensional	Peça da simulação 5 (mm)	Peça da simulação do modelo experimental (mm)	Peça ensaiada (mm)
Zona A	14,44	14,43	14,46
Zona B	31,02	31,04	31,06
Zona C	20,35	20,36	20,33
Zona D	4,07	4,05	4,01

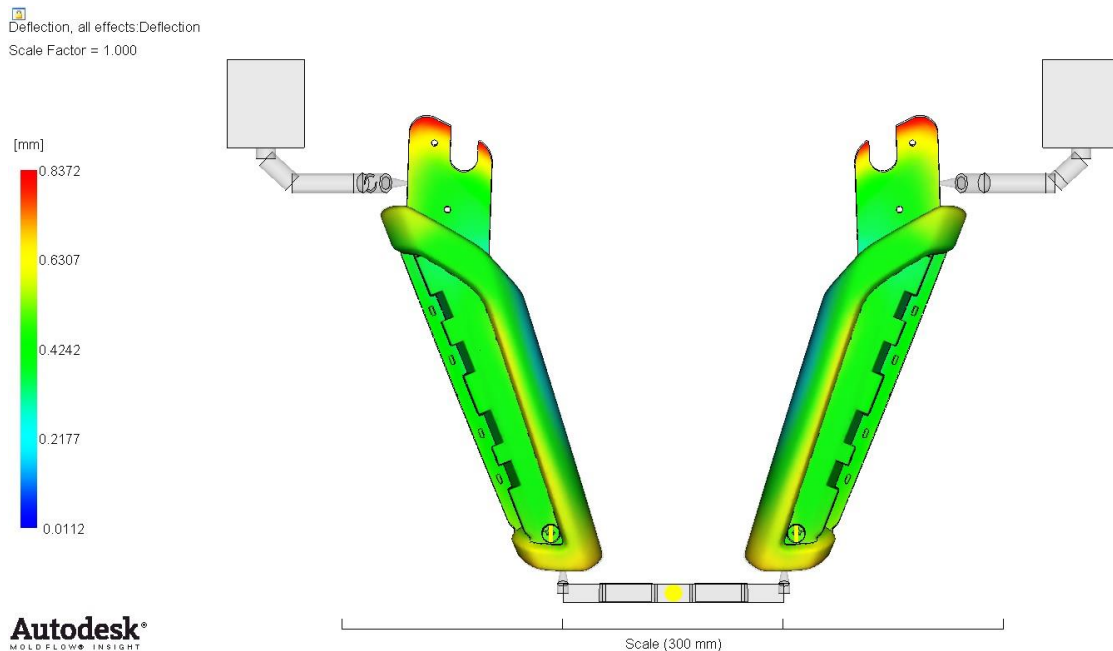


Figura 86. Deformações da peça em estudo (Simulação 5)

Em relação à massa da peça simulada, o *software* Moldflow® indica que as duas peças obtidas no final do ciclo de moldação têm, cada uma, uma massa sensivelmente de 125,5 gramas, que após a correção previamente mencionadas resulta em 113,4 gramas e portanto dentro do limite máximo de 125 gramas.

Nesta simulação, a área selecionada, para a recolha de amostras, apresenta um valor médio de 0,8365 no resultado do tensor de orientação das fibras. Em comparação com o valor obtido na simulação do modelo experimental, a peça simulada contém uma redução no resultado do tensor de 0,0126 unidades. Desta forma é possível afirmar que um atraso da injeção do gás de 0,2 segundos não proporciona um relaxamento das tensões residuais presentes nas diferentes áreas da peça simulada. Com esta afirmação é possível concluir que, em vez de eliminar, este atraso agrava o defeito da exposição das fibras. Na Tabela 22

é possível observar os valores das amostras retiradas na zona selecionada para a análise do tensor da orientação das fibras, bem como os valores máximo, mínimo e médio das amostras. Nas restantes zonas da peça desta simulação, é possível observar que o tensor de orientação das fibras é superior a 0,7, como pode ser visualizado na Figura 87. A comparação deste resultado entre a simulação do modelo experimental e desta simulação pode ser visualizado na Figura 88. Na parte superior desta figura está apresentado o tensor de orientação das fibras e na parte inferior o mesmo resultado referente ao obtido durante a simulação da peça ensaiada.

Tabela 22. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 5)

Tensor de orientação da fibra			
Amostras	Máx/Min		Média
0,8412	Máximo	0,8846	0,8365
0,8520			
0,7464			
0,8571			
0,8382			
0,8598			
0,7800			
0,8707			
0,7931			
0,8780			
0,8202			
0,8796	Mínimo	0,7464	
0,8494			
0,7992			
0,8506			
0,8792			
0,8846			
0,8164			
0,8161			
0,8172			

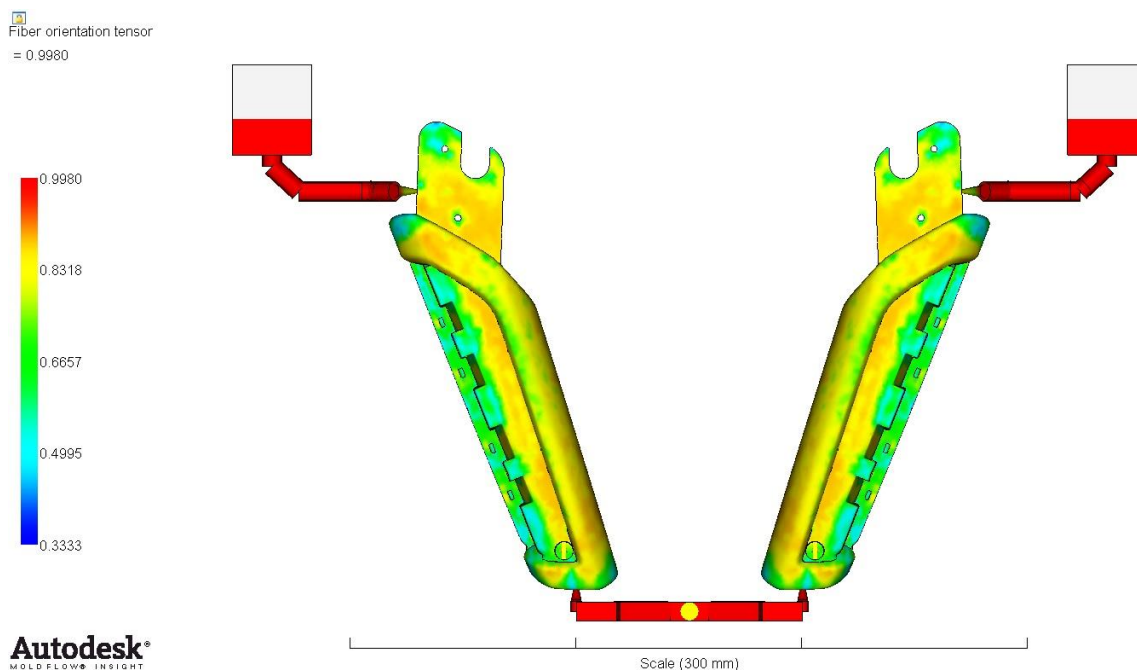


Figura 87. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 5)

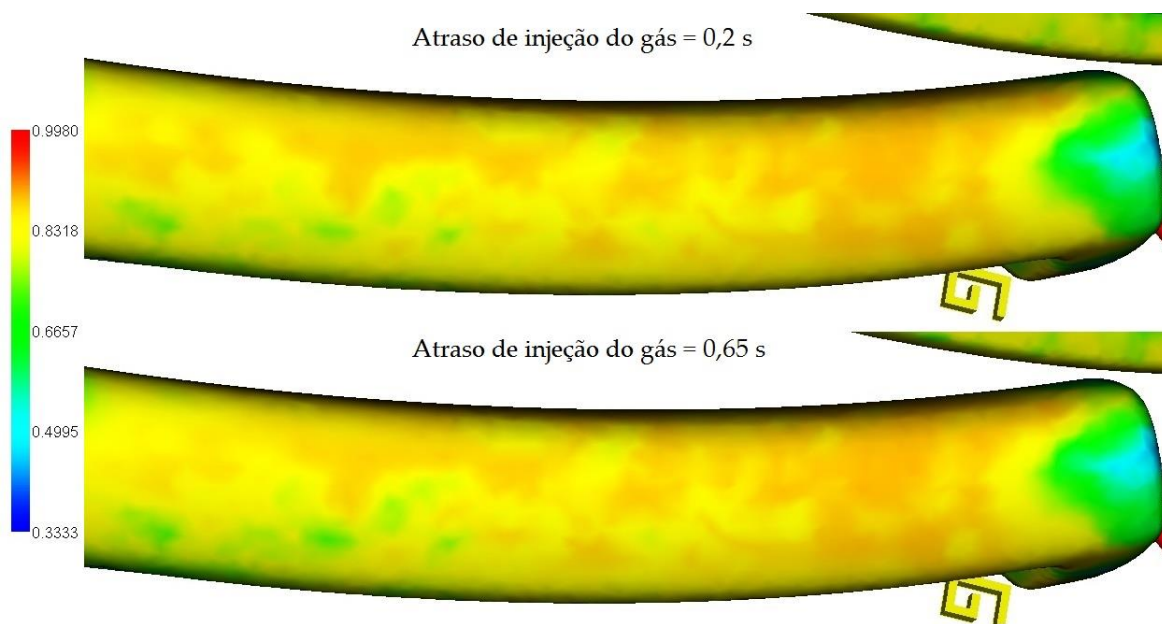


Figura 88. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 5)

A seguinte simulação detém um atraso da injeção do gás igual a zero segundos. Ou seja, quando é completada a fase de enchimento das cavidades moldantes, o gás é imediatamente injetado para o interior da peça moldada. Desta forma, a quantidade de material polimérico solidificado encontra-se no valor mais baixo possível, caso não haja um aumento do valor da temperatura do molde ou do fundido. Relativamente ao valor da viscosidade do polímero, pode-se dizer o mesmo. A abertura e o fecho das válvulas das cavidades não moldantes tiveram de ser de novo calibradas. O instante da abertura das válvulas coincide com a terminação da etapa de enchimento das cavidades moldantes, pelo

motivo anteriormente referido. Desta forma as válvulas das cavidades não moldantes abriram aos 6 segundos do ciclo de moldação e cessaram o preenchimento destas cavidades aos 6,7 segundos, como pode ser observada na Figura 89. É de notar que as válvulas na simulação anterior estiveram abertas durante 0,8 segundos e que nesta simulação o enchimento das cavidades não moldantes teve uma duração de 0,7 segundos. Isto deve-se à viscosidade do material polimérico, como anteriormente explicado.

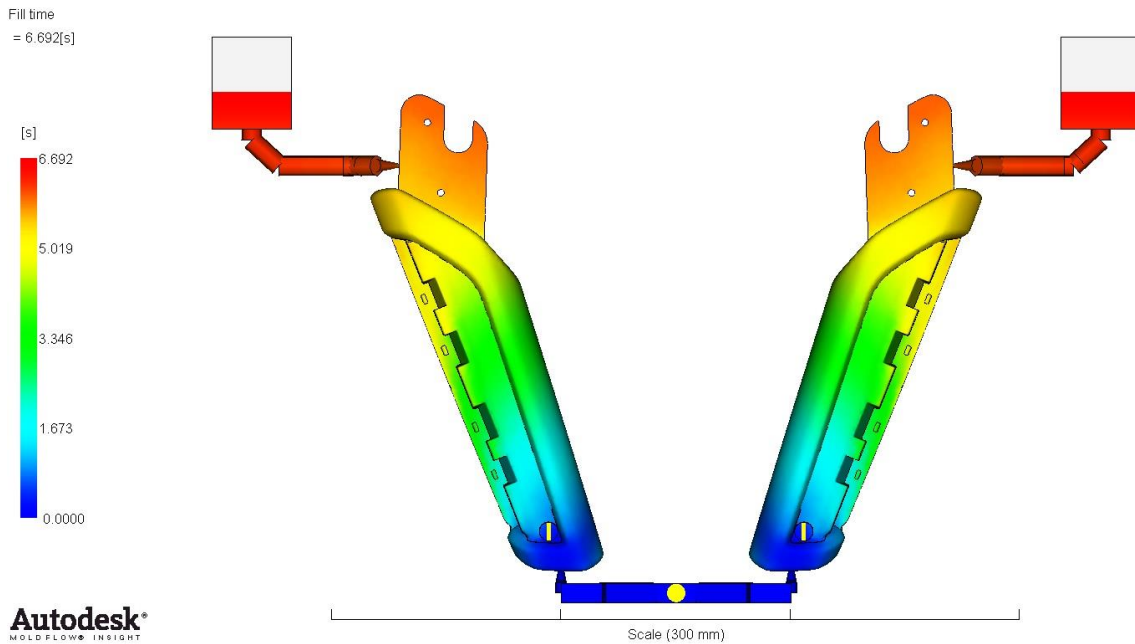


Figura 89. Tempo de enchimento (Simulação 6)

Nesta simulação, o volume de gás injetado para o interior da peça foi sensivelmente de 25 %. Este valor é idêntico ao encontrado na simulação com um atraso de 0,4 segundos. Relativamente ao modelo experimental, esta simulação teve um aumento no volume de gás de 6 %. É possível observar o desenvolvimento do volume de gás ao longo do ciclo de moldação da peça simulada na Figura 90. A representação gráfica deste desenvolvimento pode ser visualizada na Figura 91.

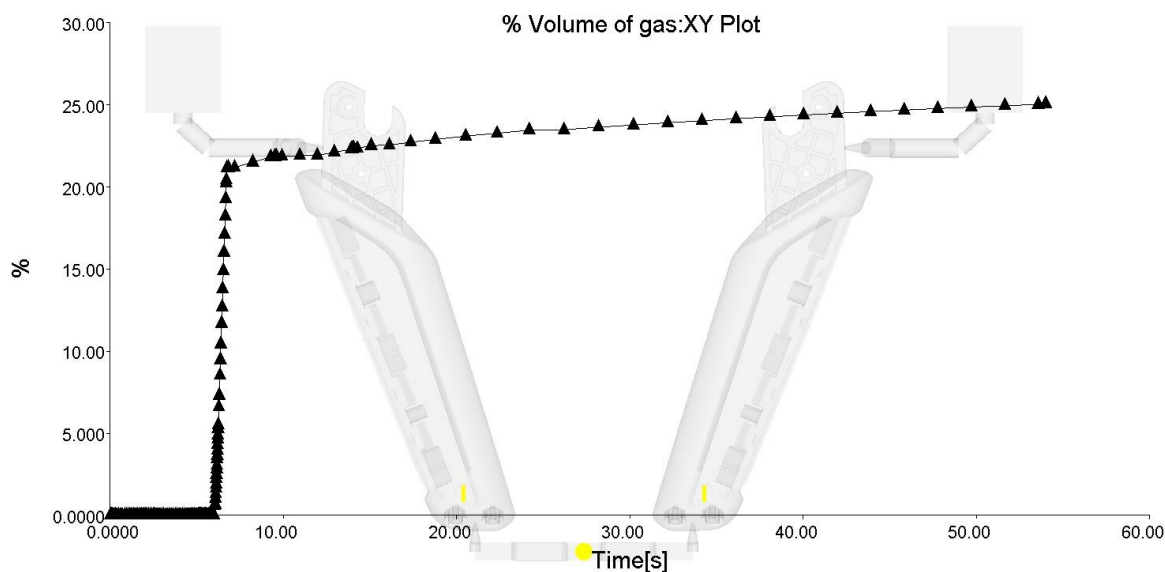


Figura 90. Percentagem de volume de gás *versus* tempo (Simulação 6)

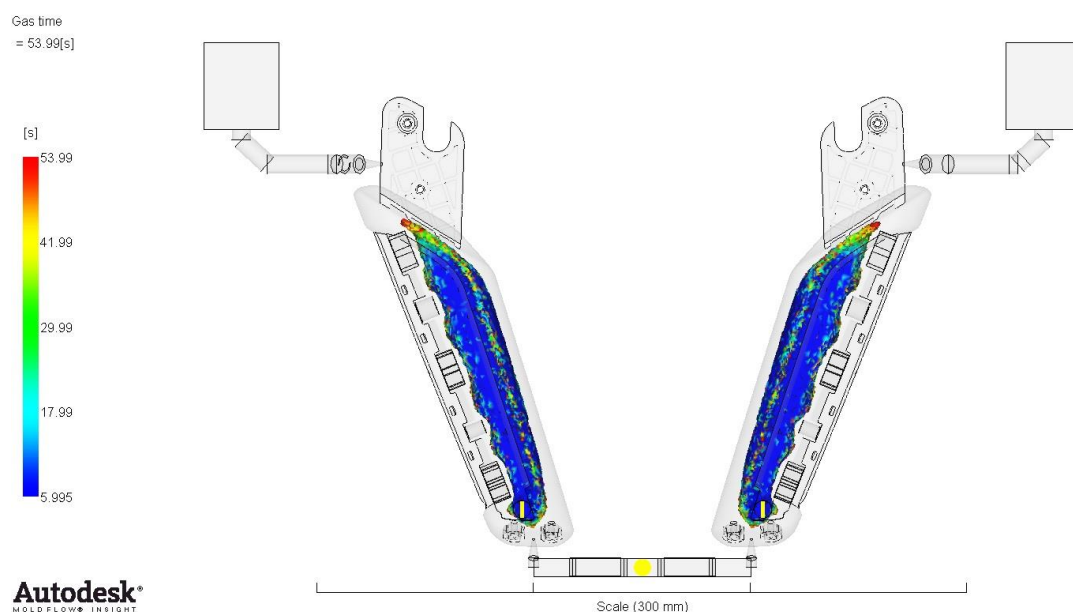


Figura 91. Volume de gás na peça simulada (Simulação 6)

Relativamente ao controlo dimensional, esta simulação apresenta, nas zonas seleccionadas, valores idênticos quando comparado com a simulação do modelo experimental e com a peça ensaiada. A peça simulada, em relação à peça da simulação do modelo experimental, tem um desvio máximo de 3 centésimas de milímetro, localizado na zona B. Relativamente à peça ensaiada, existe um desvio máximo de 6 centésimas de milímetro na zona D da peça simulada. Pode-se concluir que a peça desta simulação cumpre o requisito dimensional, visto que o desvio máximo do controlo dimensional é inferior à tolerância dimensional exigida ($\pm 0,1$ milímetros). Desta forma é possível afirmar que um atraso da injeção do gás de 0 segundos não proporciona um agravamento nos empenos e contrações da peça simulada. A comparação do controlo dimensional entre as

diferentes peças analisadas pode ser observada na Tabela 23. Na Figura 92 é possível visualizar o resultado da deformação da peça desta simulação. A recolha de dados necessários para a análise do controlo dimensional desta peça foi realizada neste resultado. A peça simulada apresenta uma deformação máxima de 0,84 milímetros, como demonstrado no resultado da deformação.

Tabela 23. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 6)

Controlo dimensional	Peça da simulação 6 (mm)	Peça da simulação do modelo experimental (mm)	Peça ensaiada (mm)
Zona A	14,44	14,43	14,46
Zona B	31,01	31,04	31,06
Zona C	20,35	20,36	20,33
Zona D	4,07	4,05	4,01

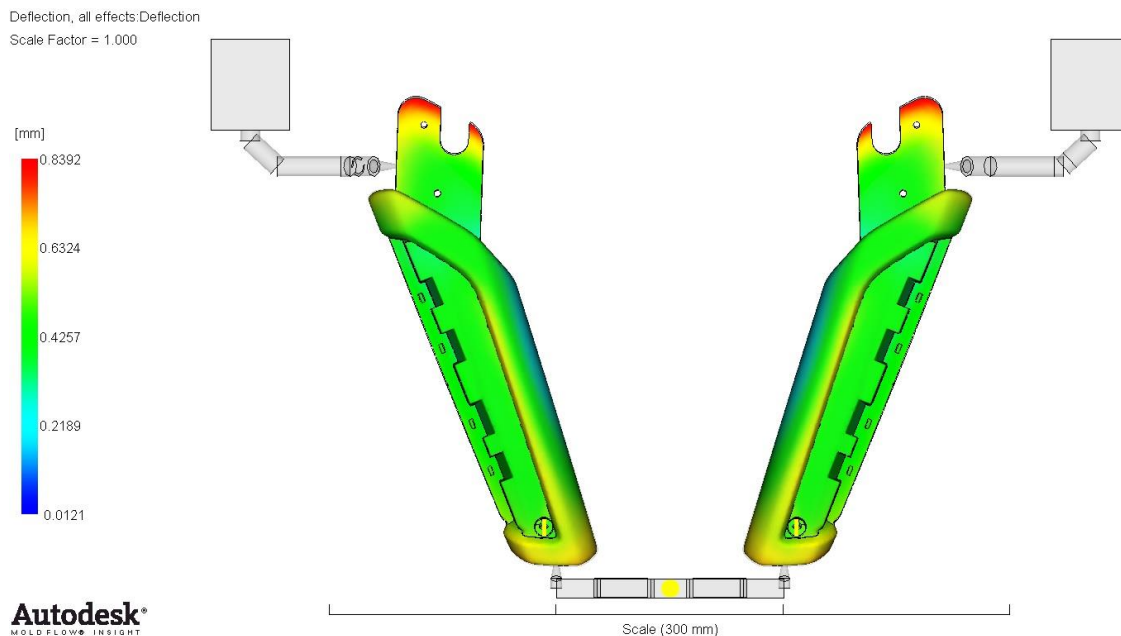


Figura 92. Deformações da peça em estudo (Simulação 6)

A peça desta simulação tem uma massa aproximadamente de 125,5 gramas, que após a correção previamente mencionada resulta em 111,95 gramas e portanto dentro do limite máximo de 125 gramas.

Relativamente ao resultado do tensor de orientação das fibras, esta simulação apresenta, na área selecionada para a recolha de amostras, um valor médio de 0,8318. Este valor é inferior em relação ao da simulação do modelo experimental. Existe uma diferença de 0,0173 unidades entre estas duas simulações numéricas. Na Tabela 24 é possível observar os valores das amostras retiradas na zona selecionada para a análise do tensor da orientação das fibras, bem como os valores máximo, mínimo e médio das amostras. Através destes valores é possível concluir que a diminuição do atraso da injeção do gás não conduz a um relaxamento das tensões residuais presentes nas superfícies da peça em estudo e por

consequência não elimina a exposição das fibras existente em diversas zonas do puxador. Porém, a maioria das restantes secções da peça em estudo apresentam um tensor de orientação das fibras é superior a 0,7, como pode ser visualizado na Figura 93. A comparação deste resultado entre a simulação do modelo experimental e desta simulação pode ser visualizado na Figura 94. Na parte superior desta figura está apresentado o tensor de orientação das fibras e na parte inferior o mesmo resultado referente ao obtido durante a simulação da peça ensaiada. Como demonstrado nas Tabelas 20, 22 e 24, as fibras de vidro da poliamida tendem a se desalinham em relação à orientação do deslocamento do fundido com a redução do valor desta variável. Indicando assim, um menor relaxamento das tensões residuais da peça em estudo.

Não foram realizadas análises para atrasos superiores a 0,65 segundos, pois foi comprovado, nas simulações do ensaio experimental, que o material polimérico encontra-se demasiado solidificado para permitir a sua remoção do interior da peça.

Tabela 24. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 6)

Tensor de orientação da fibra		
Amostras	Máx/Min	Média
0,8169	Máximo	0,8804
0,8557		
0,7547		
0,8434		
0,7986		
0,8796		
0,7589		
0,8762		
0,7674		
0,8666		
0,8280	Mínimo	0,7547
0,8318		
0,7925		
0,8804		
0,8555		
0,8790		
0,8650		
0,8263		
0,8436		
0,8167		

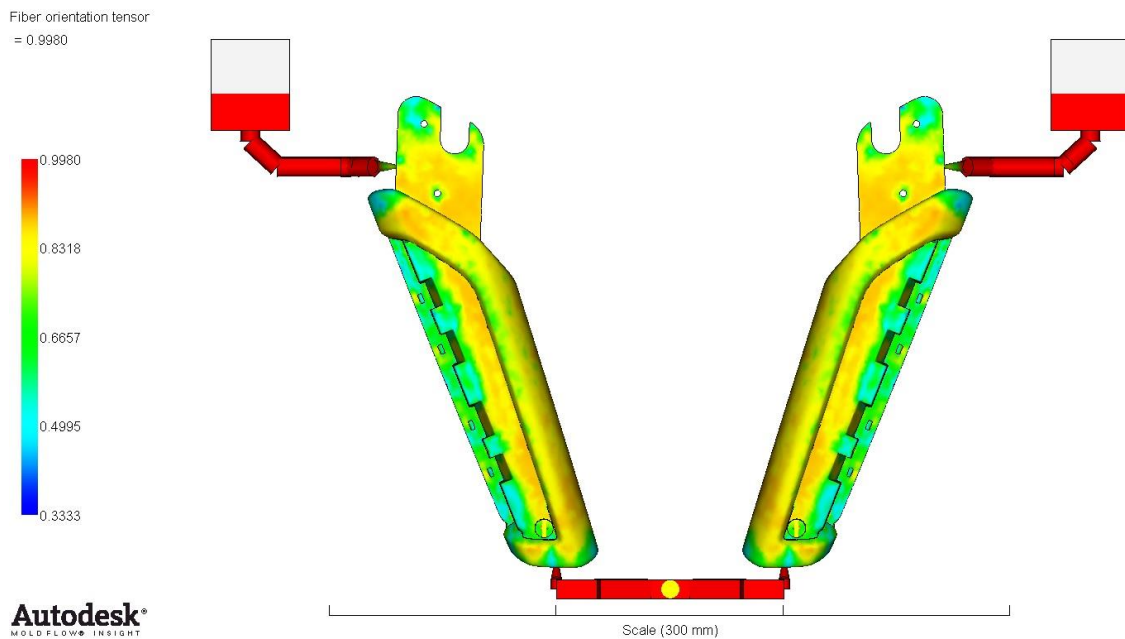


Figura 93. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 6)

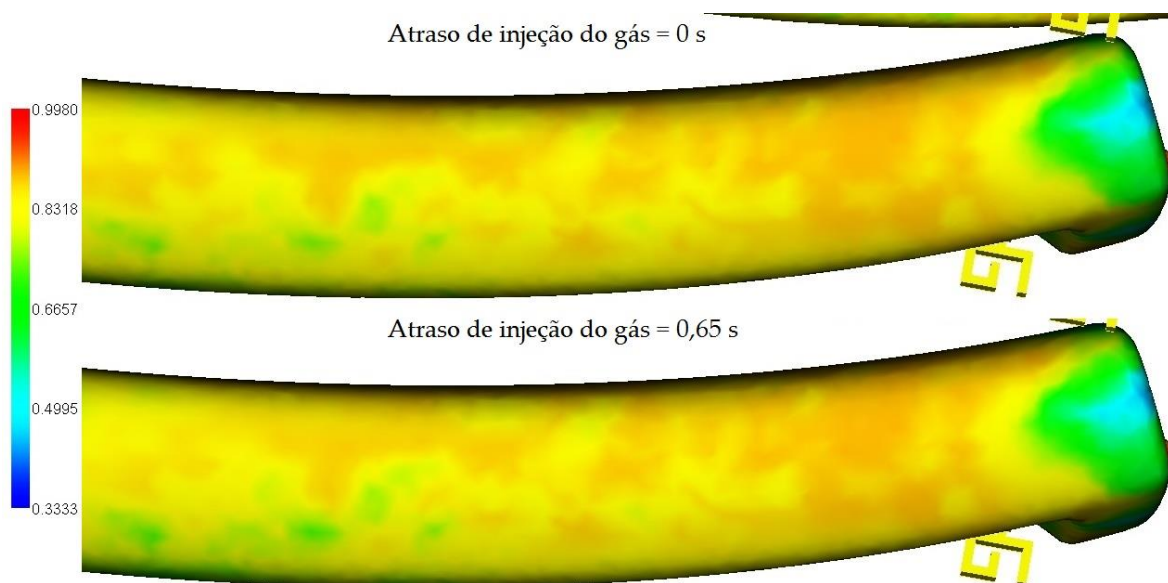


Figura 94. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 6)

Em síntese, no estudo da análise do atraso da injeção do gás, a diminuição do valor deste atraso não contribui para um relaxamento das tensões residuais presentes na peça em estudo, uma vez que esta diminuição proporciona uma redução no valor médio do tensor de orientação das fibras. Assim, o defeito da exposição das fibras permanece presente nas diferentes superfícies do puxador. Na investigação de Ying Lu *et al.* [8] foi descrito que o atraso da injeção do gás deve ser adequadamente ajustado para a obtenção do maior relaxamento das tensões residuais em peças moldadas pelo processo de moldação assistida a gás. Ou seja, não existe uma relação direta entre o nível de relaxamento destas tensões e o atraso da injeção do gás. Desta maneira é possível concluir que para a moldação da peça em estudo, o atraso da injeção do gás mais adequado é de 0,65 segundos. Na Tabela 25

apresenta-se uma síntese dos resultados, essenciais para a análise dos requisitos técnicos, das simulações 4, 5 e 6, bem como a do modelo experimental.

Tabela 25. Síntese dos resultados das simulações numéricas 4, 5 e 6

Simulação numérica	Controlo dimensional (mm)				Massa (gramas)	Tensor de orientação das fibras
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D		Valor médio
Modelo experimental	14,43	31,04	20,36	4,05	120,9	0,8491
4	14,43	31,02	20,36	4,07	111,95	0,8499
5	14,44	31,02	20,35	4,07	113,4	0,8365
6	14,44	31,01	20,35	4,07	111,95	0,8318

4.2.4 Análise da Temperatura do Fundido

A temperatura do fundido é outra das variáveis cuja influência na orientação das fibras de um material polimérico reforçado urge analisar. Assim, este estudo paramétrico analisará dois patamares superiores aos utilizados aquando do ensaio experimental. É do conhecimento geral que temperaturas superiores, durante o enchimento, promovem uma melhor progressão do escoamento, contribuindo para minimizar as tensões induzidas pelo mesmo. Desta forma, variou-se a temperatura do fundido entre 290 e 295 °C, sendo necessário o ajuste do controlo das válvulas das cavidades não moldantes.

No caso da simulação da temperatura de 290 °C, abertura destas válvulas deve ocorrer aos 6,5 segundos e tendo o enchimento das cavidades não moldantes cessado aos 7,4 segundos.

Esta simulação teve um tempo de enchimento sensivelmente de 5,85 segundos. Desta forma é possível verificar que houve uma redução de 0,15 segundos, quando comparado com a simulação do modelo experimental. Esta redução do tempo de enchimento pode ser explicada pela diminuição da viscosidade do fundido, facto que é consistente com o aumento da temperatura do fundido. Na Figura 95 é possível observar o resultado do tempo de enchimento neste estudo. É de notar que o valor apresentado neste resultado é referente ao somatório do tempo de enchimento, do atraso da injeção do gás e do tempo de preenchimento das cavidades não moldantes.

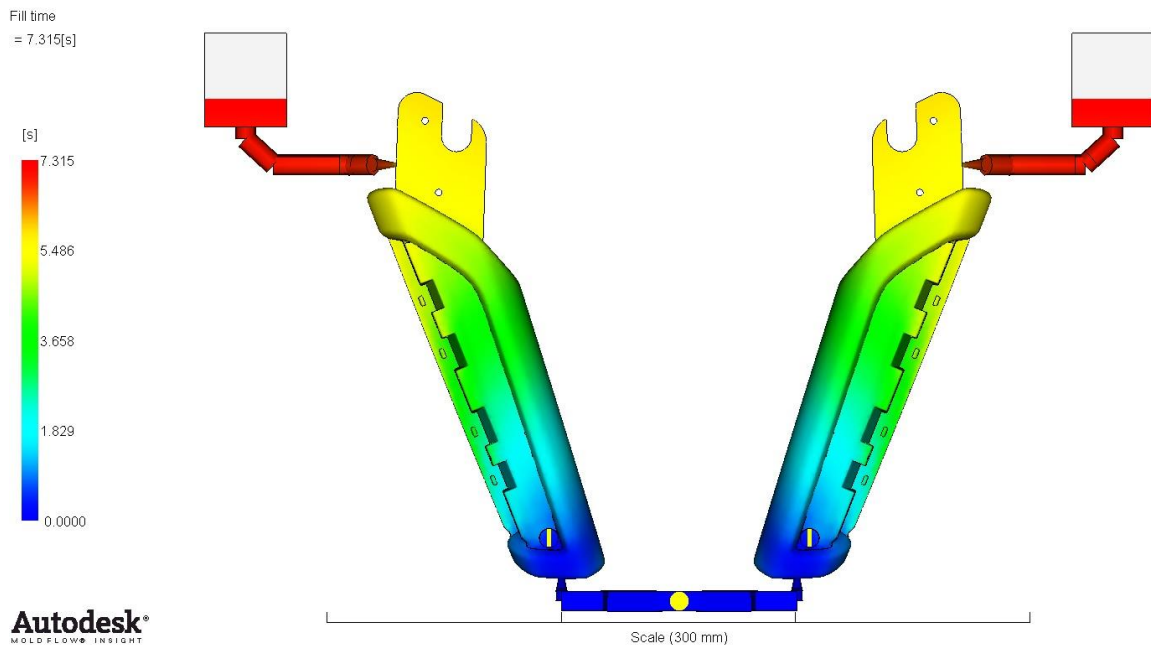


Figura 95. Tempo de enchimento (Simulação 7)

Em relação à força de fecho, não houve qualquer alteração no valor deste resultado, visto que as pressões de injeção do fundido e do gás usadas nesta simulação foram iguais àqueles que foram usadas na simulação do modelo experimental. O valor máximo da força de fecho foi aproximadamente de 35 toneladas. Ver Figura 96.

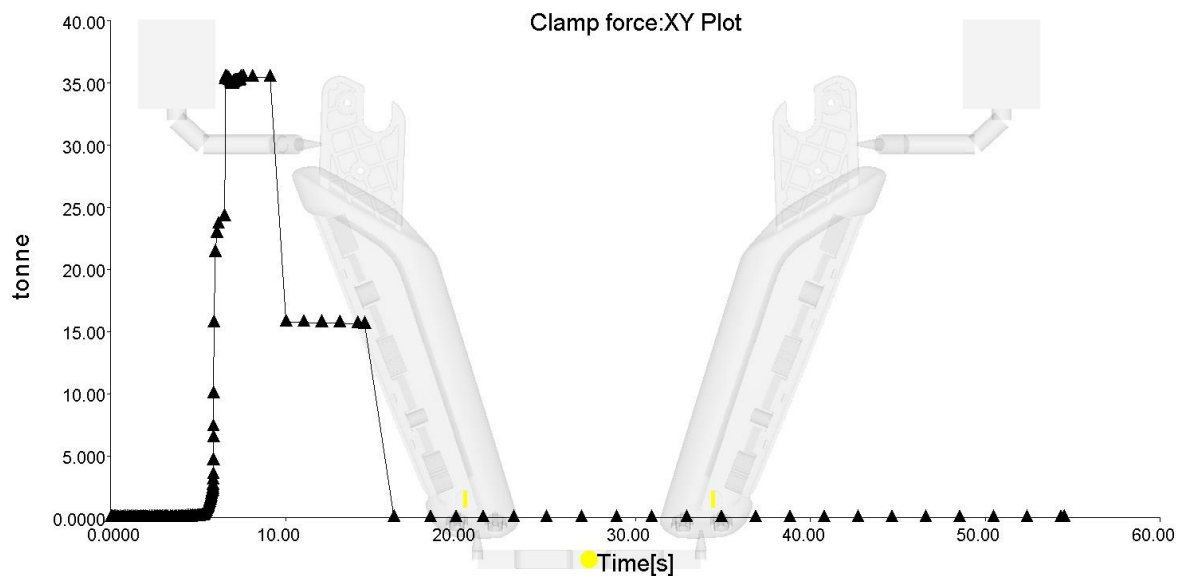


Figura 96. Força de fecho (Simulação 7)

O resultado da análise da temperatura na frente de escoamento do fundido é relativamente uniforme e comparável ao do modelo experimental. Apenas o valor da temperatura máxima se altera, aqui o fundido encontra-se sensivelmente a uma temperatura de 293 °C, enquanto que no modelo experimental se encontra a 288 °C. Devido ao aumento da temperatura, a diferença de temperatura entre a ferramenta moldante e o

fundido aumenta. Contudo, esse aumento não comprometeu a uniformidade da temperatura ao longo da peça em estudo. É possível visualizar o resultado da temperatura na frente de escoamento do fundido desta simulação na Figura 97.

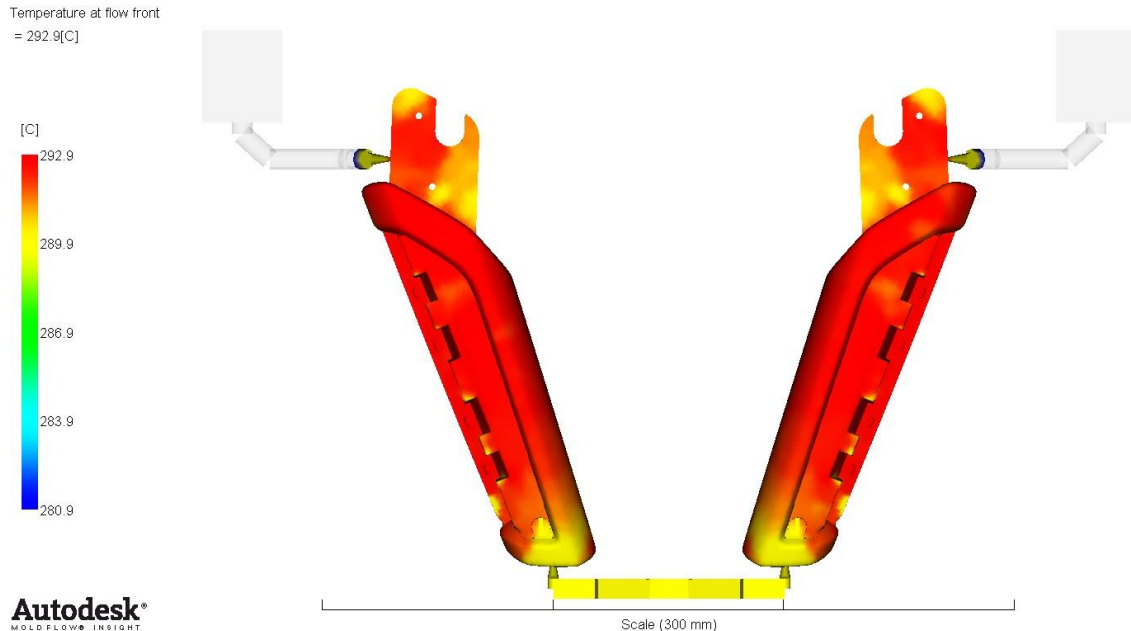


Figura 97. Temperatura da frente do escoamento do fundido (Simulação 7)

Relativamente à tensão de corte, o resultado desta simulação demonstra que a peça não contém tensões que ultrapassem o valor admissível para poliamida: 60000 s^{-1} . Como anteriormente referido, na simulação do modelo experimental a peça em estudo também não apresenta tensões que ultrapassem este valor. Contudo, é possível observar nos canais das cavidades não moldantes um aumento do valor das tensões de corte. Como demonstrado na Figura 98, o polímero apresenta nestes canais uma zona com uma tensão de corte igual a 68274 s^{-1} . Porém, este excesso de material polimérico é separado da peça final durante a fase de extração. Sendo assim, este resultado não representa um problema para a peça em estudo.

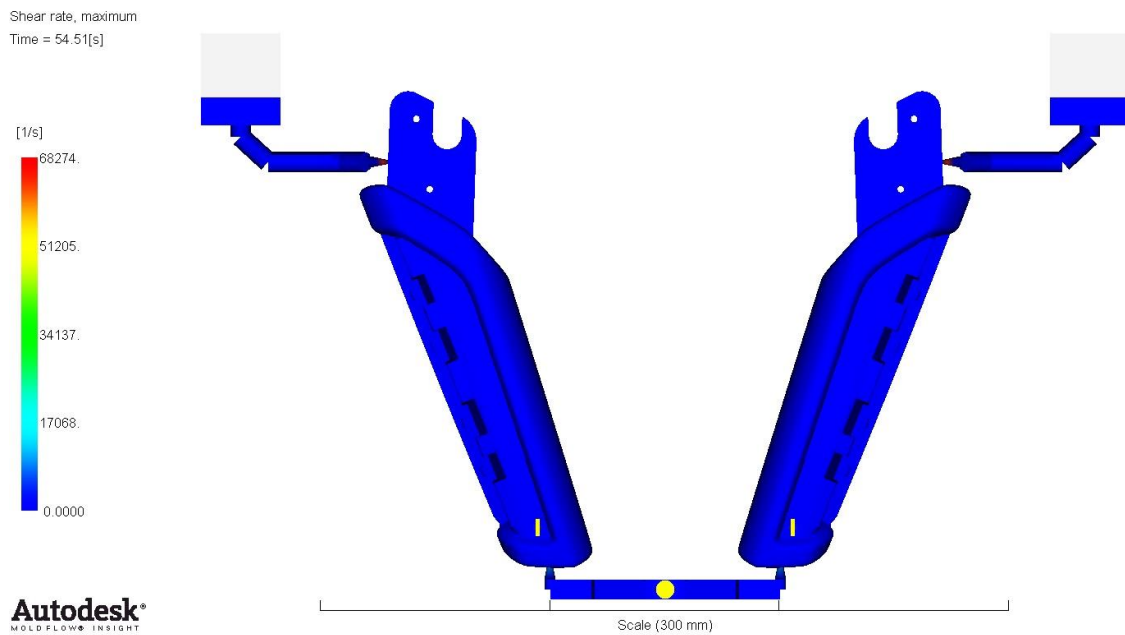


Figura 98. Tensões de corte (Simulação 7)

A contração volumétrica desta simulação teve um aumento pouco notório. Nesse estudo a contração apresenta um valor de 1,114 %, enquanto na simulação do modelo experimental a peça analisada tinha um valor de 1,076 %, não se postulando problemas de maior ao nível de empenos ou deformações. Ver Figura 99.

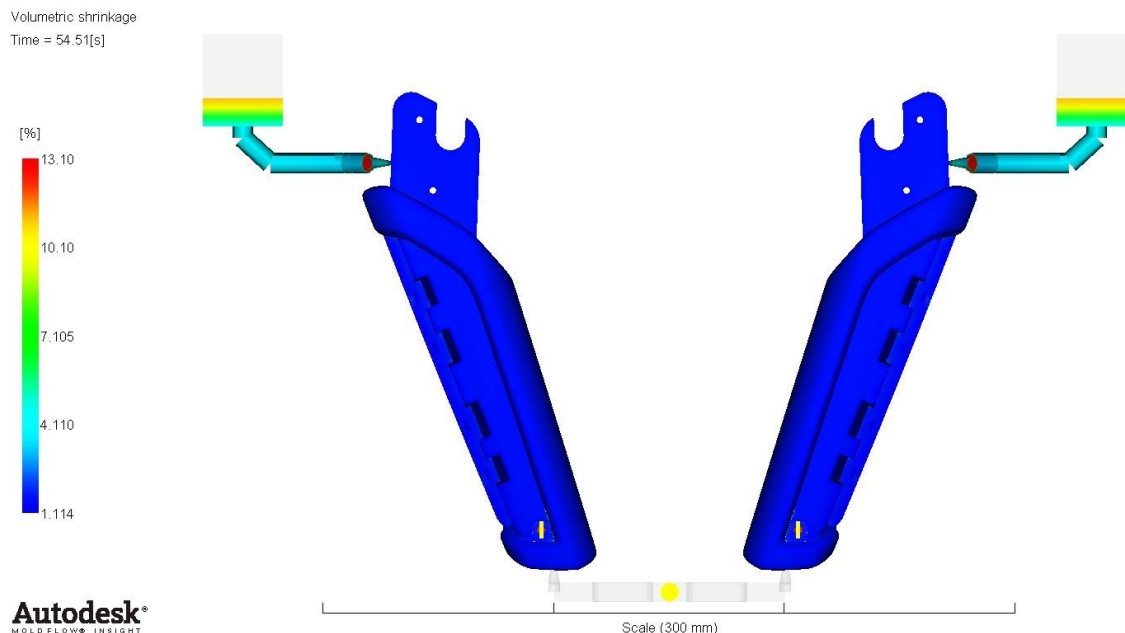


Figura 99. Contração volumétrica da peça simulada (Simulação 7)

Através do resultado das linhas de soldadura presentes na peça simulada, pode-se concluir que não houve alteração em relação a simulação do modelo experimental, quer na quantidade quer na localização desta anomalia. De algum modo este resultado não é consistente com o que seria de esperar, pois um aumento da temperatura do fundido tem

tendência a minimizar as linhas de soldadura [20]. No entanto, o facto de se ter um polímero reforçado talvez contribua para exacerbar os efeitos anisotrópicos denunciados nestas imperfeições.

Nesta simulação, o volume de gás injetado para o interior da peça foi aproximadamente de 23 %. Relativamente à simulação do modelo experimental, esta peça teve um aumento na percentagem de volume de gás de 4 %. Por causa do aumento da temperatura do fundido, durante a fase de injeção do gás, o valor da viscosidade e a percentagem de polímero solidificado são menores, em comparação com o modelo experimental. Desta forma, é possível remover uma maior quantidade de material polimérico durante a injeção do gás, aumentando assim o volume de gás. É possível observar o desenvolvimento do volume de gás ao longo do ciclo de moldação da peça simulada na Figura 100. A representação gráfica deste desenvolvimento pode ser visualizada na Figura 101.

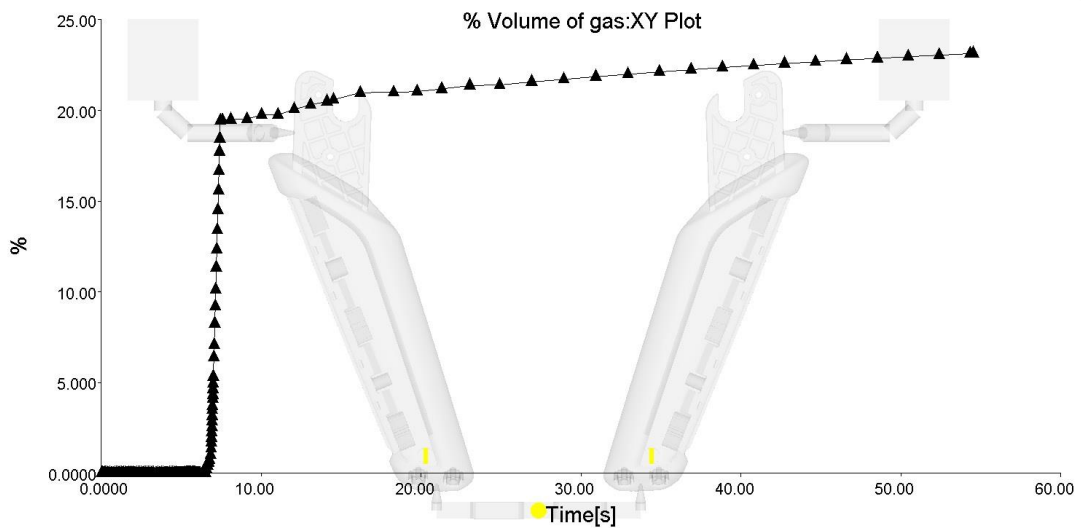


Figura 100. Percentagem de volume de gás *versus* tempo (Simulação 7)

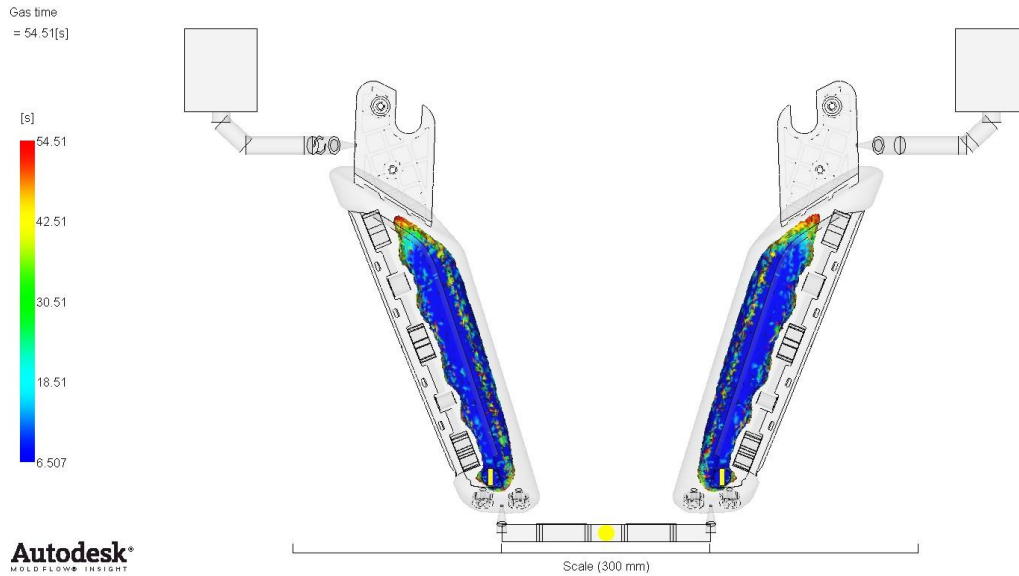


Figura 101. Volume de gás na peça simulada (Simulação 7)

Em relação ao controlo dimensional, a peça desta simulação apresenta valores idênticos aos medidos, quer na peça ensaiada quer na peça da simulação do modelo experimental. Desta forma é possível afirmar que este aumento da temperatura do fundido não promove um aumento nos empenos e nas contrações da peça. Na Tabela 26 é possível observar a comparação do controlo dimensional entre a peça ensaiada, a peça simulada e a peça da simulação do modelo experimental. Através dos valores da tabela anterior é possível verificar que a peça simulada, em relação à peça da simulação do modelo experimental, tem um desvio máximo de 2 centésimas de milímetro, localizado na zona B. Em relação à peça ensaiada, existe um desvio máximo de 5 centésimas de milímetro na zona D. Contudo, este desvio não coloca em causa o cumprimento do requisito dimensional, visto que a peça em estudo tem um toleranciamento de $\pm 0,1$ milímetros. A aquisição dos valores referentes ao controlo dimensional da peça simulada foi realizada no resultado da deformação desta. Na Figura 102 é possível observar este resultado. Está indicado neste resultado que a peça simulada contém uma deformação máxima de aproximadamente de 0,78 milímetros.

Tabela 26. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 7)

Controlo dimensional	Peça da simulação 7 (mm)	Peça da simulação do modelo experimental (mm)	Peça ensaiada (mm)
Zona A	14,43	14,43	14,46
Zona B	31,02	31,04	31,06
Zona C	20,36	20,36	20,33
Zona D	4,06	4,05	4,01

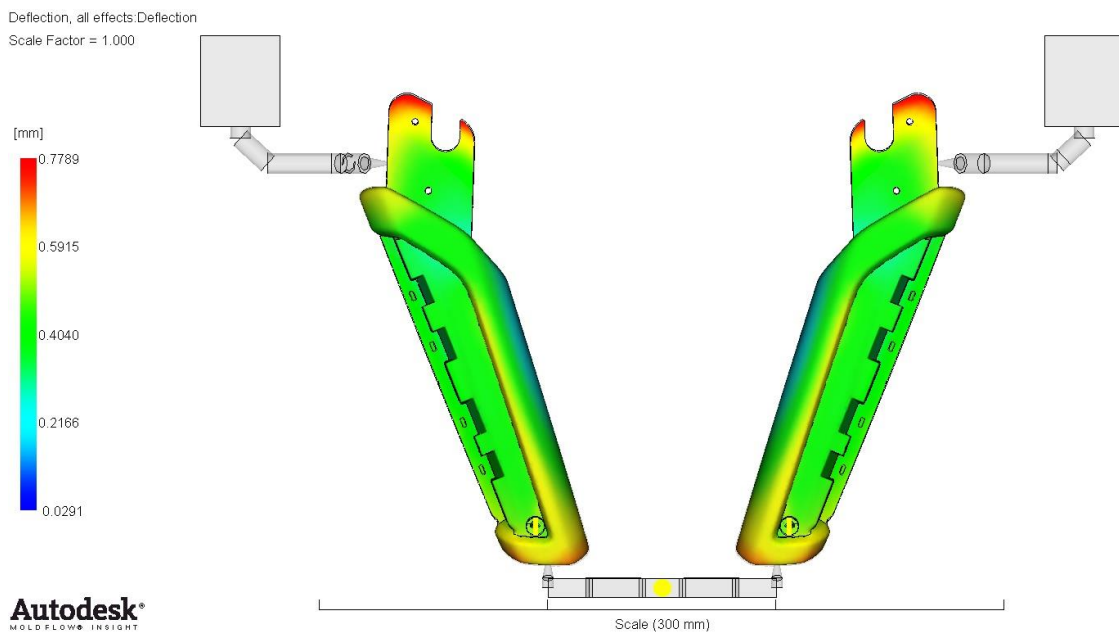


Figura 102. Deformações da peça em estudo (Simulação 7)

A peça obtida nesta simulação tem uma massa aproximadamente de 128 gramas, que após a correção previamente mencionada resulta em 114,9 gramas e portanto dentro do limite máximo de 125 gramas. Em comparação com a peça da simulação do modelo experimental, houve uma diminuição de massa em 6 gramas.

Nesta simulação, o resultado do tensor de orientação das fibras apresenta, na área selecionada para a recolha de amostras, um valor médio de 0,8517. Este resultado demonstra um ligeiro aumento em relação a simulação do ensaio experimental. Entre estas duas simulações existe uma diferença de 0,0026 unidades. Na Tabela 27 é possível observar os valores das amostras retiradas na zona selecionada para a análise do tensor da orientação das fibras, bem como os valores máximo, mínimo e médio das amostras. Como apresentado nesta tabela, os valores do tensor indicam um ligeiro relaxamento das tensões residuais da peça. Desta forma, é possível afirmar que esta temperatura do fundido, apesar de não eliminar, auxilia na remoção da exposição das fibras nas superfícies da peça em estudo. Nas restantes secções da peça, é possível observar um tensor de orientação das fibras superior a 0,7. Este resultado pode ser visualizado na Figura 103. A comparação deste resultado entre a simulação do modelo experimental e desta simulação pode ser visualizado na Figura 104. Na parte superior desta figura está apresentado o tensor de orientação das fibras e na parte inferior o mesmo resultado referente ao obtido durante a simulação da peça ensaiada.

Tabela 27. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 7)

Tensor de orientação da fibra		
Amostras	Máx/Min	Média
0,8281	Máximo	0,8832
0,8595		
0,8452		
0,8623		
0,7990		
0,8784		
0,8509		
0,8755		
0,8568		
0,8406		
0,8166	Mínimo	0,7990
0,8830		
0,8637		
0,8818		
0,8538		
0,8832		
0,8559		
0,8468		
0,8307		
0,8224		
		0,8517

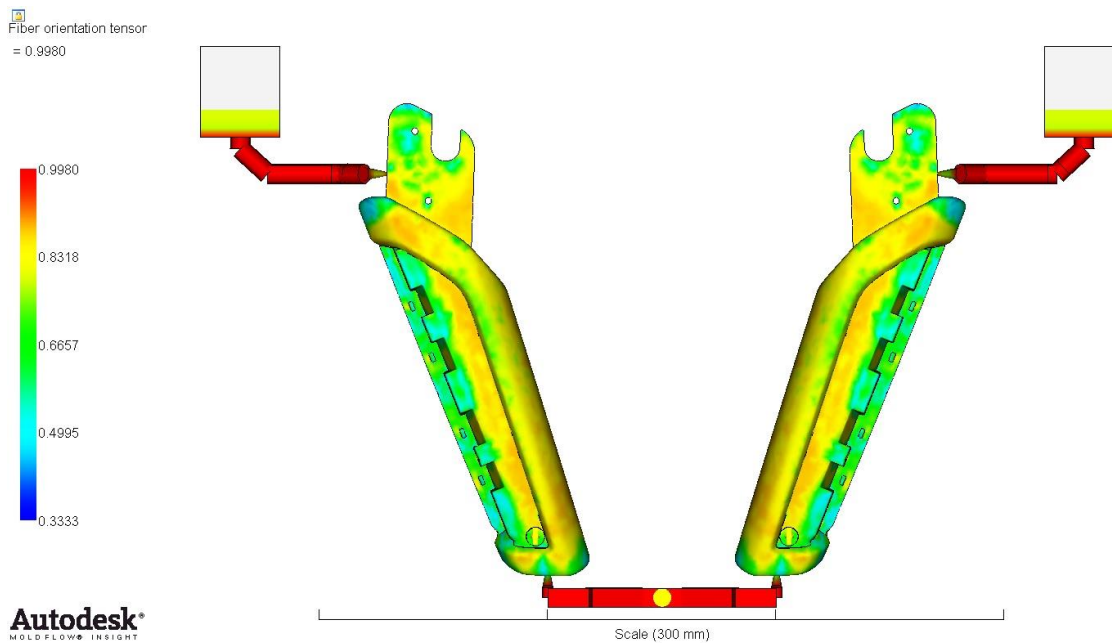


Figura 103. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 7)

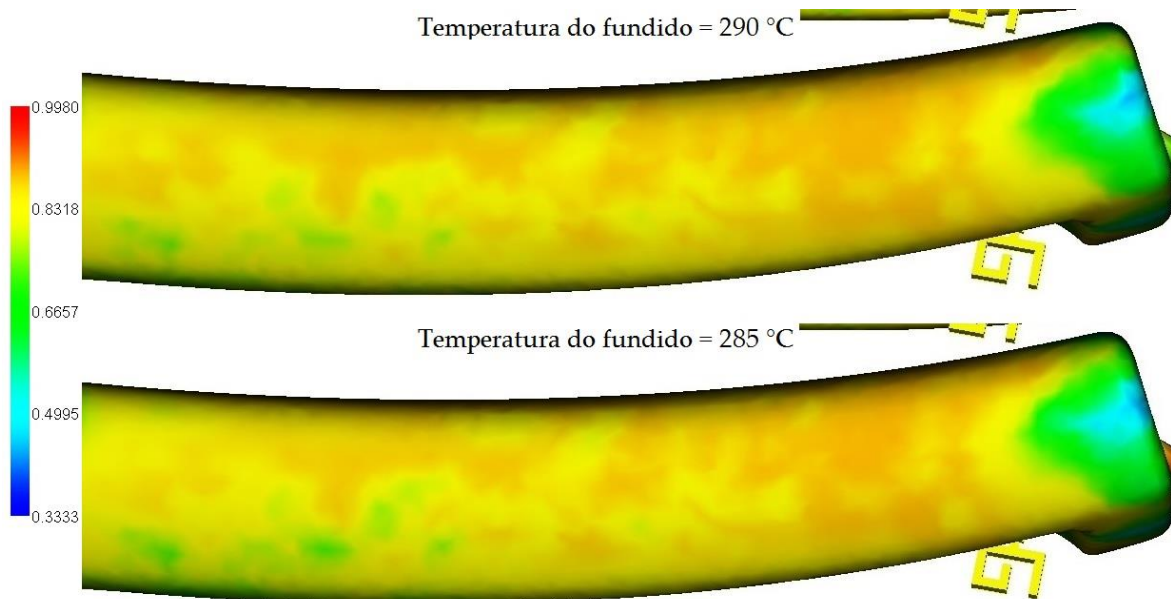


Figura 104. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 7)

Completada a análise da simulação anterior, segue-se a simulação com uma temperatura do fundido a 295 °C. Pelos mesmos motivos da simulação do fundido a 290 °C, o controlo das válvulas das cavidades moldantes teve de ser afinado de novo. Nesta simulação, as válvulas abriram aos 6,2 segundos e cessaram o enchimento destas cavidades aos 7 segundos do ciclo de moldação.

Relativamente ao tempo de enchimento, esta simulação apresenta uma duração de aproximadamente 5,58 segundos. Desta forma é possível verificar que este resultado teve uma diminuição de 0,42 segundos em comparação com a simulação do ensaio experimental. Como explicado na simulação anterior, esta redução do tempo de enchimento deve-se à diminuição da viscosidade do fundido. Na Figura 105 é possível observar o resultado do tempo de enchimento desta simulação. É de notar que o valor apresentado neste resultado é referente ao somatório do tempo de enchimento, do atraso da injeção do gás e do tempo de preenchimento das cavidades não moldantes.

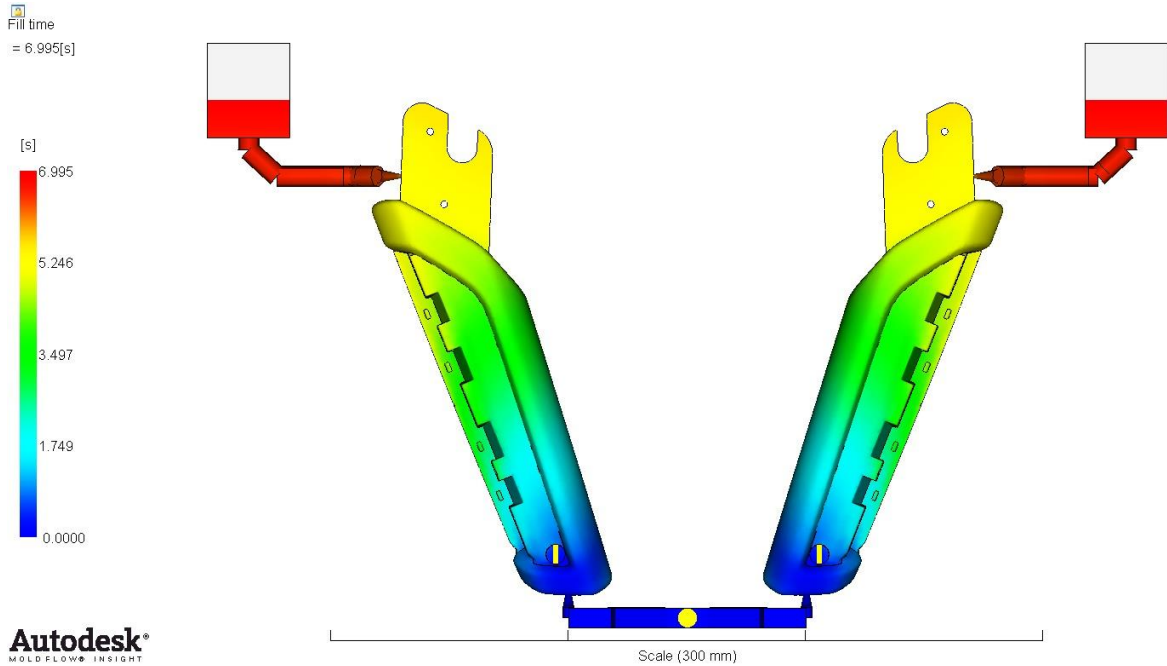


Figura 105. Tempo de enchimento (Simulação 8)

Como seria esperado, em relação à força de fecho, não houve qualquer alteração no valor deste resultado. O valor máximo da força de fecho foi aproximadamente de 35 toneladas.

Relativamente ao resultado da análise da temperatura na frente de escoamento do fundido, esta é relativamente uniforme e comparável ao resultado do modelo experimental e da temperatura de 290 °C. Contudo, o valor da temperatura máxima aumentou para os 298 °C. Em comparação com a simulação anterior, existe uma diferença de temperatura de 5 °C. Esta diferença seria esperada, uma vez que existe uma diferença de 5 °C no valor da temperatura do fundido entre estes dois estudos. É possível visualizar o resultado da temperatura na frente de escoamento do fundido desta simulação na Figura 106.

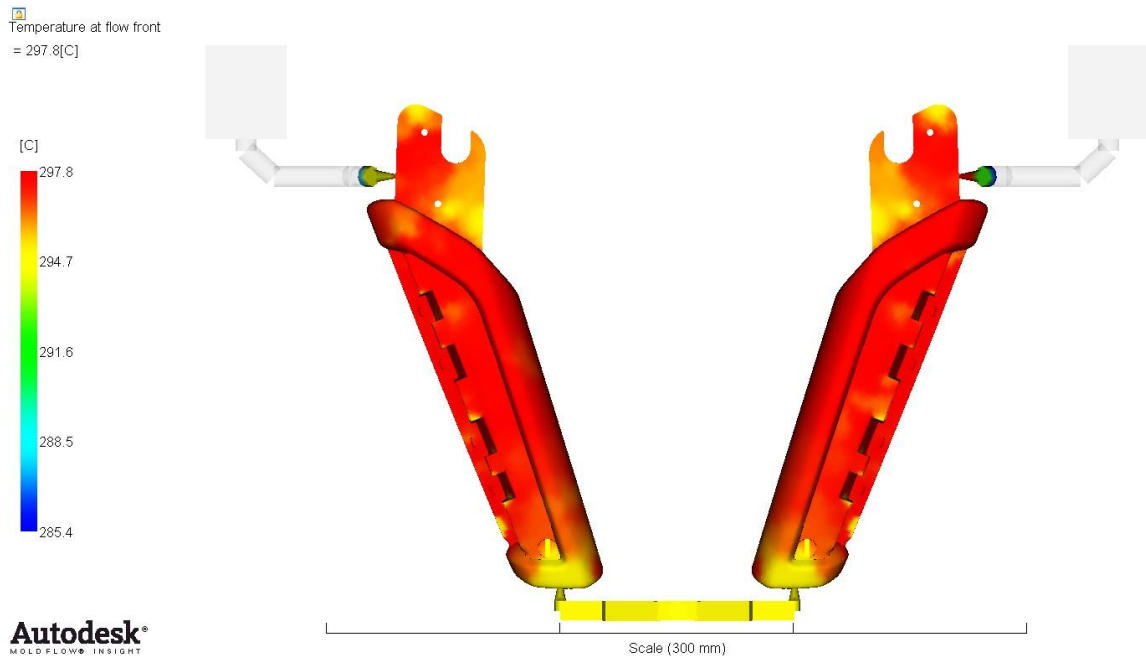


Figura 106. Temperatura da frente do escoamento do fundido (Simulação 8)

O resultado da tensão de corte desta simulação demonstra que a peça não contém tensões que ultrapassam o valor admissível (60000 s^{-1}). Contudo, é possível observar, mais uma vez, nos canais das cavidades não moldantes um aumento do valor das tensões de corte. Contudo, nesta simulação o valor das tensões atingiu os 79992 s^{-1} , como demonstrado na Figura 107. Todavia, este resultado não representa um problema para a peça em estudo, como esclarecido na simulação anterior.

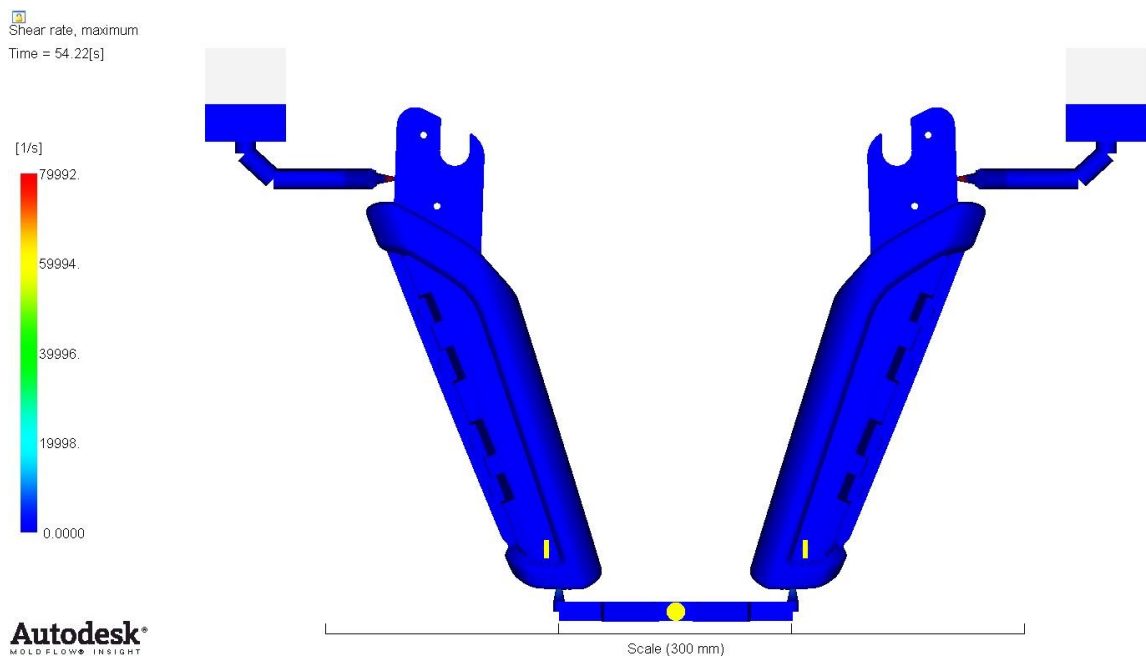


Figura 107. Tensões de corte (Simulação 8)

Nesta simulação foi apresentada uma contração de 1,114 %, idêntica à simulação anterior. Podendo assim concluir que a peça desta simulação não vai apresentar problemas de maior ao nível de empenos ou deformações.

No resultado das linhas de soldadura presentes na peça simulada, está apresentada uma ligeira melhoria na quantidade deste defeito na secção do encaixe inferior, quando comparado com a simulação do modelo experimental. Em relação à simulação anterior houve uma clara melhoria. As linhas de soldadura existentes na peça simulada podem ser visualizadas na Figura 108.

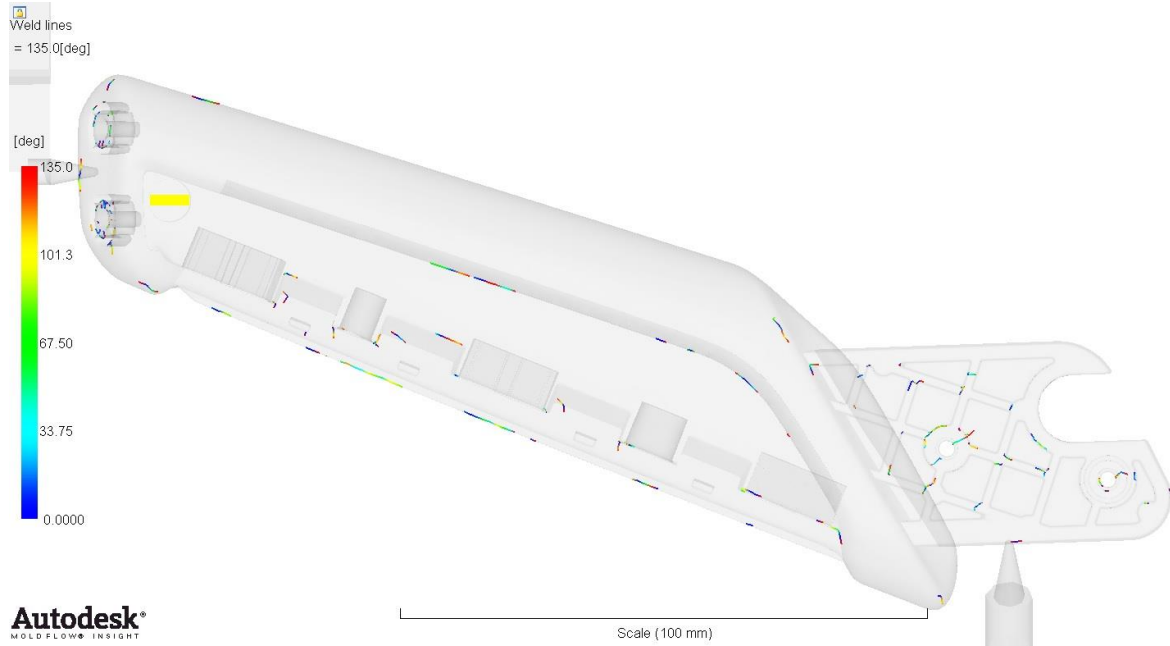


Figura 108. Linhas de soldadura do modelo numérico (Simulação 8)

Relativamente à percentagem de volume de gás, nesta simulação a peça contém aproximadamente 25 % de gás no seu interior. Em relação à simulação do modelo experimental, esta peça teve um aumento na percentagem de volume de gás de 6 %. Em comparação com a simulação anterior houve um aumento de 2 %. Como esclarecido na simulação anterior, por causa do aumento da temperatura do fundido o valor da viscosidade e a percentagem de polímero solidificado são menores, proporcionando assim um aumento do volume de gás. Na Figura 109 é possível visualizar o desenvolvimento do volume de gás ao longo do ciclo de moldação desta simulação. A representação gráfica deste desenvolvimento pode ser observada na Figura 110.

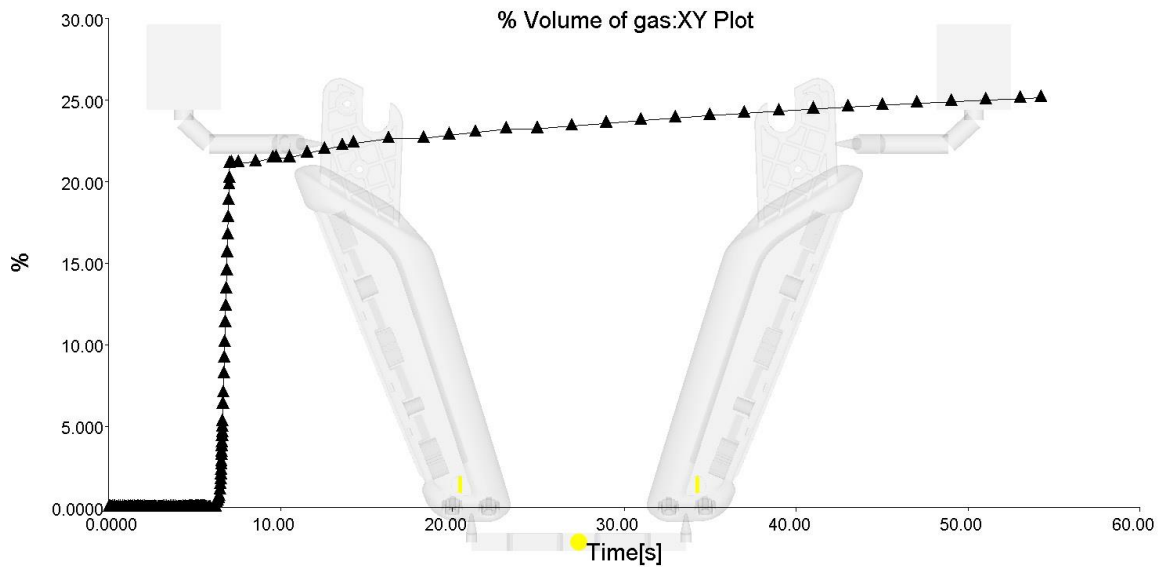


Figura 109. Percentagem de volume de gás *versus* tempo (Simulação 8)

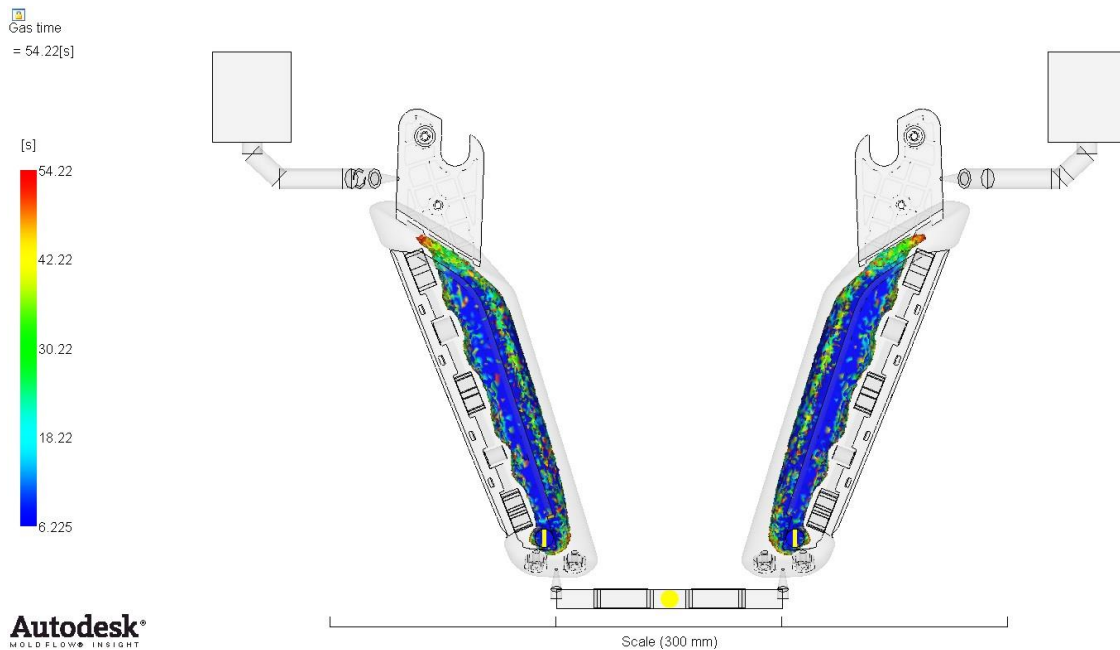


Figura 110. Volume de gás na peça simulada (Simulação 8)

Nesta simulação, a peça apresenta no controlo dimensional valores semelhantes aos obtidos na simulação do modelo experimental e na peça ensaiada. Em relação à peça da simulação do ensaio experimental, esta peça apresenta um desvio máximo de 2 centésimas de milímetro, localizados nas zonas B e D. Em comparação com a peça ensaiada, existe um desvio máximo de 6 centésimas de milímetro na zona D da peça simulada. A comparação do controlo dimensional entre as diferentes peças analisadas pode ser observadas na Tabela 28. Como o desvio máximo do controlo dimensional é inferior ao toleranciamento dimensional requerido, $\pm 0,1$ milímetros, pode-se concluir que a peça desta simulação cumpre o requisito dimensional. Desta forma é possível concluir que o aumento da

temperatura do fundido não proporciona um aumento nos empenos e contrações da peça em estudo. Na Figura 111 é possível visualizar o resultado da deformação da peça desta simulação. A recolha de dados necessários para a análise do controlo dimensional desta peça foi realizada neste resultado. A peça simulada apresenta uma deformação máxima de 0,85 milímetros, como apresentado no resultado da deformação.

Tabela 28. Comparação de diferentes peças analisadas (Simulação 8)

Controlo dimensional	Peça da simulação 8 (mm)	Peça da simulação do modelo experimental (mm)	Peça ensaiada (mm)
Zona A	14,43	14,43	14,46
Zona B	31,02	31,04	31,06
Zona C	20,36	20,36	20,33
Zona D	4,07	4,05	4,01

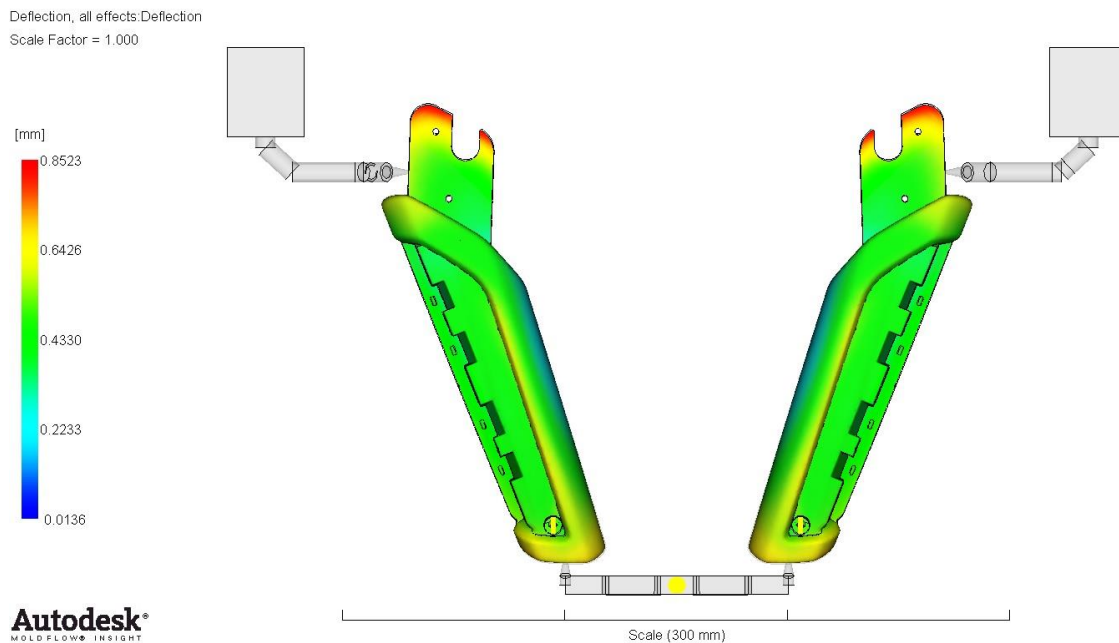


Figura 111. Deformações da peça em estudo (Simulação 8)

Como referido anteriormente, a massa final das peças produzidas deve ser controlado com rigor. A peça obtida nesta simulação tem uma massa aproximadamente de 124,5 gramas, que após a correção previamente mencionada resulta em 111,95 gramas e portanto dentro do limite máximo de 125 gramas. Desta forma, é possível que concluir que o aumento da temperatura do fundido contribui para a redução da massa de peças poliméricas, como comprovado, em 2006, por Miguel Sánchez-Soto *et al.* [6].

Nesta simulação, o tensor de orientação das fibras apresenta, na área seleccionada para a recolha de amostras, um aumento do valor médio, em relação à simulação do fundido a 290 °C e à do modelo experimental. Neste estudo, a peça contém um valor médio de 0,8608, demonstrando um aumento de 0,0097 unidades, em comparação com a simulação do fundido a 290 °C. Relativamente à simulação do ensaio experimental, existe

uma diferença de 0,0117 unidades. Na Tabela 29 é possível observar os valores das amostras retiradas na zona selecionada para a análise do tensor da orientação das fibras, bem como os valores máximo, mínimo e médio das amostras. Como explicado anteriormente, o aumento do valor do tensor de orientação das fibras sugere um relaxamento das tensões residuais nas superfícies da peça em estudo. Desta forma, como em ambas simulações da temperatura do fundido apresentam um aumento no valor médio neste resultado, pode-se concluir que o aumento da temperatura do fundido proporciona um relaxamento das tensões residuais nas superfícies da peça em estudo. Nas restantes secções da peça, é possível observar um tensor de orientação das fibras superior a 0,7. Este resultado pode ser visualizado na Figura 112. A comparação deste resultado entre a simulação do modelo experimental e desta simulação pode ser visualizado na Figura 113. Na parte superior desta figura está apresentado o tensor de orientação das fibras e na parte inferior o mesmo resultado referente ao obtido durante a simulação da peça ensaiada.

Tabela 29. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Simulação 8)

Tensor de orientação da fibra		
Amostras	Máx/Min	Média
0,8441	Máximo	0,8871
0,8710		
0,8369		
0,8754		
0,7991		
0,8792		
0,8401		
0,8771		
0,8565		
0,8666		
0,8750		
0,8719	Mínimo	0,7991
0,8513		
0,8853		
0,8792		
0,8871		
0,8854		
0,8535		
0,8406		
0,8411		

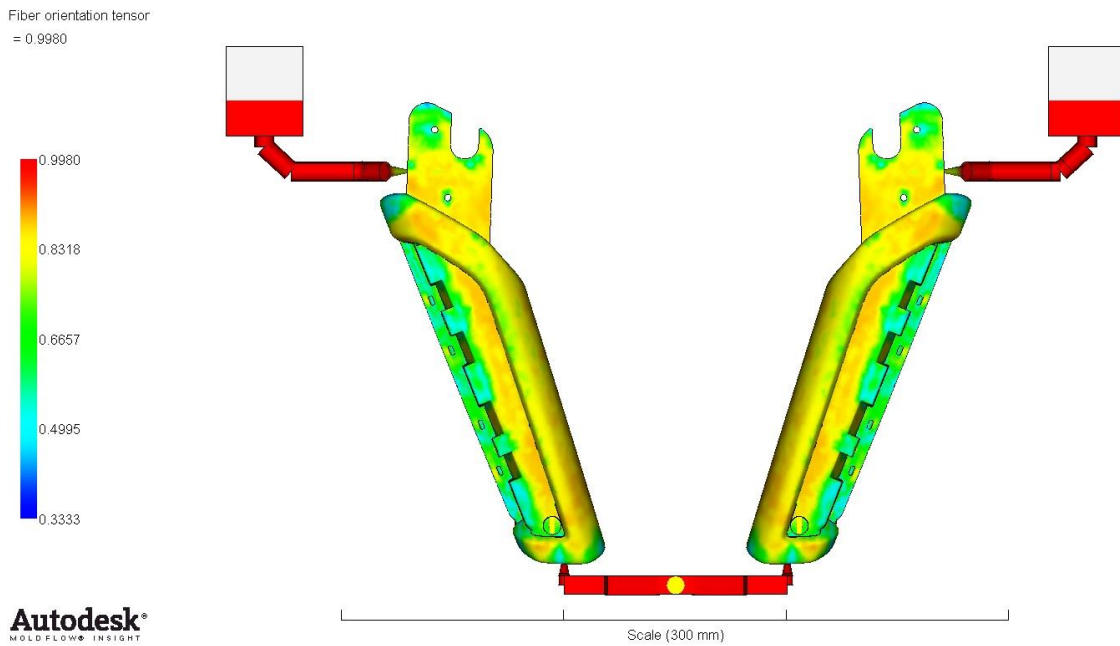


Figura 112. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Simulação 8)

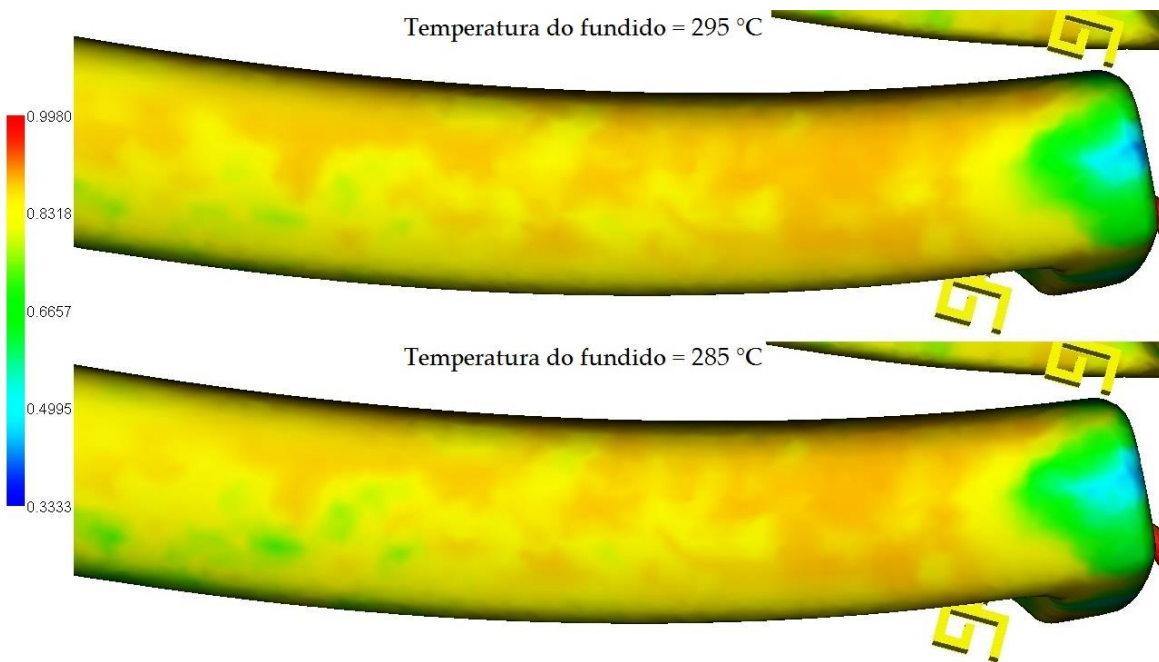


Figura 113. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Simulação 8)

Como explicado anteriormente, o aumento do valor do tensor de orientação das fibras sugere um relaxamento das tensões residuais nas superfícies da peça em estudo. Desta forma, como em ambas simulações da temperatura do fundido apresentam um aumento no valor médio neste resultado, pode-se concluir que o aumento da temperatura do fundido proporciona um relaxamento das tensões residuais nas superfícies da peça em estudo. Assim, pode-se afirmar que o aumento do valor desta variável contribui para a eliminação do defeito da exposição das fibras. Na Tabela 30 apresenta-se uma síntese dos

resultados, essenciais para a análise dos requisitos técnicos, das simulações 7 e 8, bem como a do modelo experimental.

Tabela 30. Síntese dos resultados das simulações numéricas 7 e 8

Simulação numérica	Controlo dimensional (mm)				Massa (gramas)	Tensor de orientação das fibras
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D		Valor médio
Modelo experimental	14,43	31,04	20,36	4,05	120,9	0,8491
7	14,43	31,02	20,36	4,06	114,9	0,8517
8	14,43	31,02	20,36	4,07	111,95	0,8608

4.3 Simulações de Otimização

Desta forma, encontram-se finalizadas todas as análises do estudo paramétrico. As quatro variáveis de processamento foram separadamente examinadas e a partir destas foi possível reunir informações e conclusões importantes para o desenvolvimento deste trabalho. Porém, também é essencial analisar diferentes combinações destes parâmetros. A alteração de duas ou mais variáveis pode influenciar significativamente as características da peça em estudo. Por isso, decidiu-se realizar três simulações de otimização. Como as simulações da temperatura do molde e do fundido foram as que apresentaram os melhores resultados, principalmente no tensor de orientação das fibras, decidiu-se realizar em primeiro lugar uma simulação de otimização com estes dois parâmetros. Nesta simulação o molde contém uma temperatura de 95 °C e o fundido se encontra a 295 °C. Na segunda simulação de otimização foram incorporadas as duas variáveis de processamento da simulação anterior e um perfil pressão de injeção do gás com 24 e 14 MPa durante um período de 3 e 5 segundos, respetivamente. Apesar deste parâmetro, nas simulações anteriores, não alterar significativamente o valor médio do tensor de orientação das fibras, com a adição destes dois parâmetros de temperatura, este valor médio pode aumentar. O aumento da pressão do gás compacta melhor o fundido, auxiliando na transferência de calor entre a ferramenta moldante e o fundido. Por último, decidiu-se acrescentar à simulação de otimização anterior um maior atraso de injeção de gás. Com o aumento da pressão de injeção do gás e o aumento da temperatura do molde e do fundido, foi possível ensaiar um atraso de injeção superior a 0,65 segundos. Desta forma, nesta simulação de otimização foi ensaiado um atraso de 0,7 segundos.

Em síntese, neste estudo foram efetuadas, no total, três simulações de otimização com o intuito de avaliar a influência de cada combinação de parâmetros de processamento no relaxamento das tensões residuais presentes na peça em estudo. Como referido anteriormente, este relaxamento de tensões pode ser comprovado através do resultado, do *software* Autodesk® Moldflow Insight 2012, do tensor de orientação das fibras. Na Tabela 10 estão apresentadas as simulações de otimização realizadas neste trabalho e cada simulação

tem uma designação específica, no sentido de facilitar a visualização destes no decorrer desta secção.

Tabela 31. Simulações de otimização

Simulação numérica	Temperatura do molde (°C)	Temperatura do fundido (°C)	Pressão de injeção do gás (MPa)		Atraso da injeção do gás (s)
			1º Pressão	2º Pressão	
Otimização 1	95	295	18	8	0,65
Otimização 2	95	295	24	14	0,65
Otimização 3	95	295	24	14	0,7

A simulação de otimização com os dois parâmetros de temperatura detém um controlo das válvulas das cavidades não moldantes semelhante à simulação do modelo experimental. As válvulas abrem aproximadamente aos 6,65 segundos e fecharam aos 7,4 segundos do ciclo de moldação. O tempo de enchimento desta simulação de otimização foi de 6 segundos. Na Figura 114 é possível observar o resultado do tempo de enchimento desta simulação de otimização. É de notar que o valor apresentado neste resultado é referente ao somatório do tempo de enchimento, do atraso da injeção do gás e do tempo de preenchimento das cavidades não moldantes.

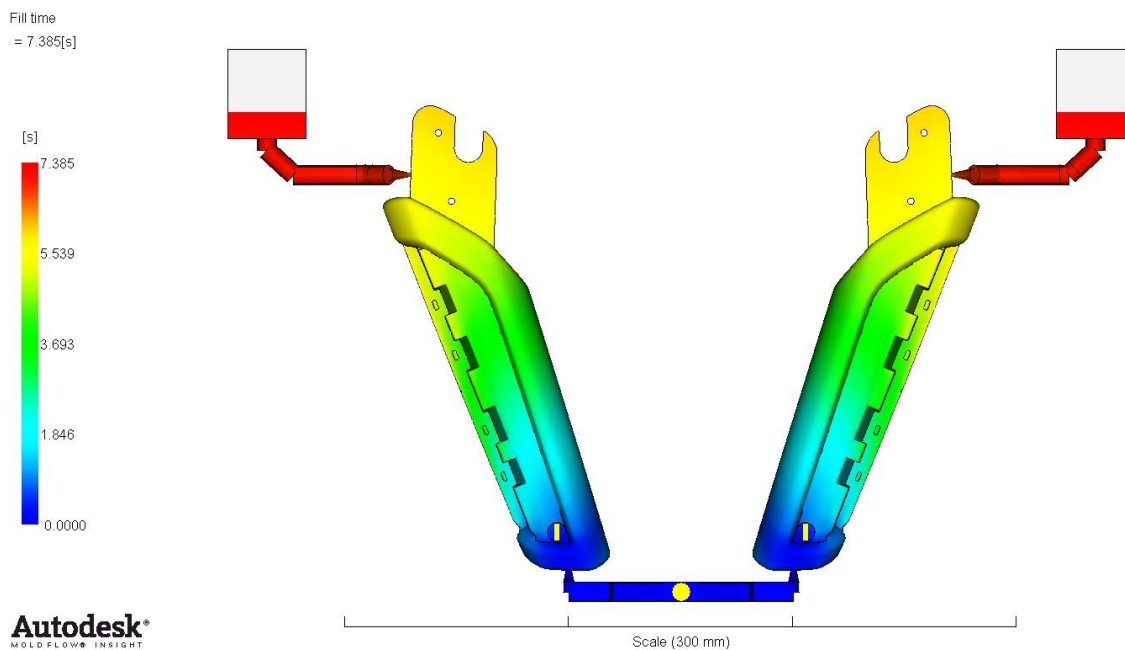


Figura 114. Tempo de enchimento (Otimização 1)

Em relação à força de fecho, não houve qualquer alteração no valor deste resultado, visto que as pressões de injeção do fundido e do gás usadas nesta simulação foram idênticas àqueles que foram usadas na simulação do modelo experimental. O valor máximo da força de fecho foi sensivelmente de 35 toneladas.

Nesta simulação de otimização, o resultado da análise da temperatura na frente de escoamento do fundido é relativamente uniforme e comparável ao da simulação do fundido a 295 °C. Desta forma, é possível afirmar que neste resultado foi atingida uma temperatura de 298 °C. É possível visualizar o resultado da temperatura na frente de escoamento do fundido desta simulação de otimização na Figura 115.

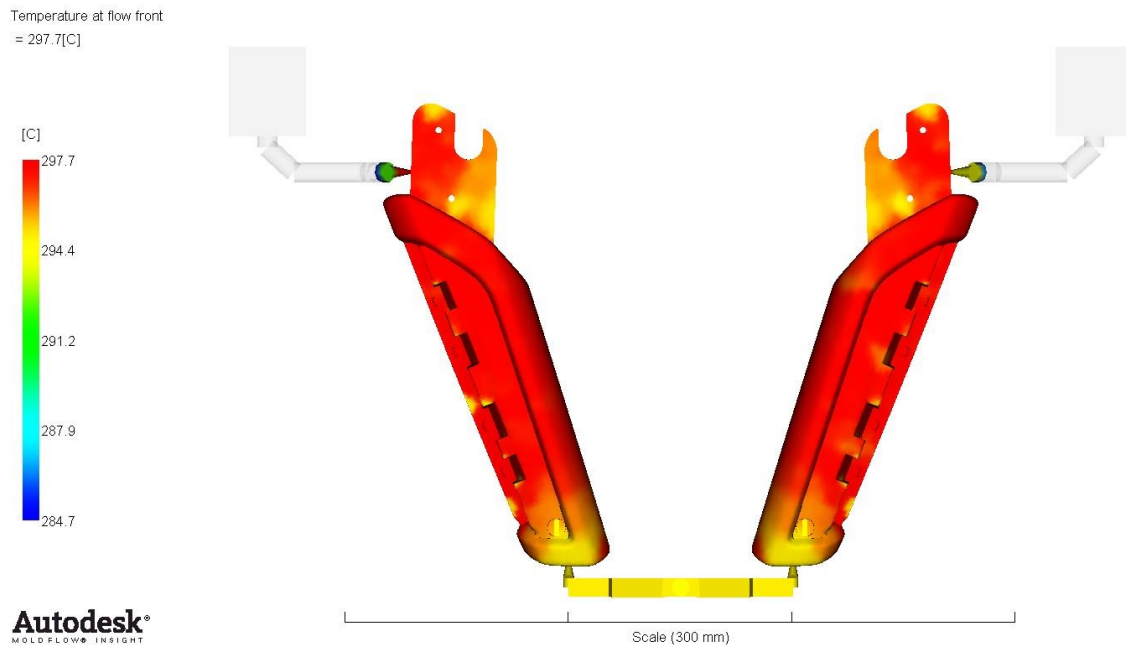


Figura 115. Temperatura da frente do escoamento do fundido (Otimização 1)

Os valores de tensão de corte observados são relativamente baixos não se perspectivando altas deformações ou empenos à semelhança dos estudos anteriores reportados na simulação da temperatura do molde a 95 °C, na do fundido a 295 °C, bem como na do modelo experimental, ver Figura 116.

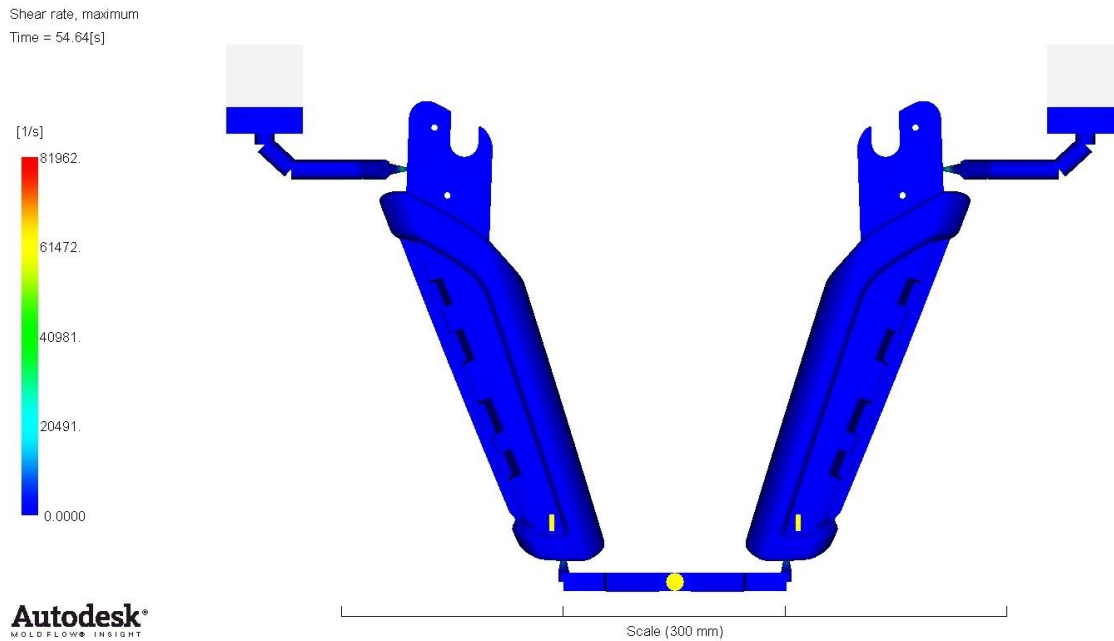


Figura 116. Tensões de corte (Otimização 1)

A peça desta simulação de otimização apresenta uma contração volumétrica de 1,546 %. Este resultado é idêntico ao encontrado na simulação do molde a 95 °C. Devido à baixa contração volumétrica que esta peça apresenta, pode-se afirmar que esta não vai conter elevados empenos.

Em relação às linhas de soldadura é possível verificar ligeiras melhorias, principalmente nas zonas do encaixe superior e inferior, quando comparado com a simulação do modelo experimental. As linhas de soldadura existentes na peça simulada podem ser visualizadas na Figura 117.

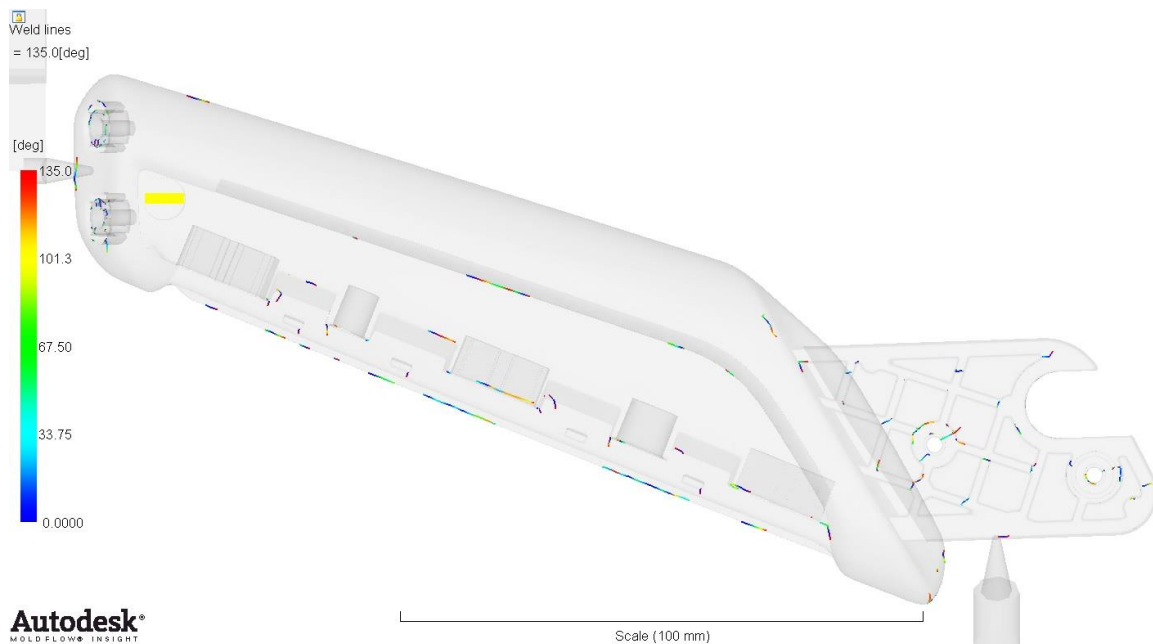


Figura 117. Linhas de soldadura do modelo numérico (Otimização 1)

Relativamente à percentagem de volume de gás, nesta simulação, a peça contém aproximadamente 22 % de gás no seu interior. Em relação à simulação do modelo experimental, esta peça teve um aumento na percentagem de volume de gás de 3 %. Como esclarecido anteriormente, devido ao aumento da temperatura do fundido o valor da viscosidade e a percentagem de polímero solidificado são menores, proporcionando assim um aumento do volume de gás. O aumento da temperatura do molde auxilia na redução da percentagem de polímero solidificado. Na Figura 118 é possível visualizar o desenvolvimento do volume de gás ao longo do ciclo de moldação desta simulação. A representação gráfica deste desenvolvimento pode ser observada na Figura 119.

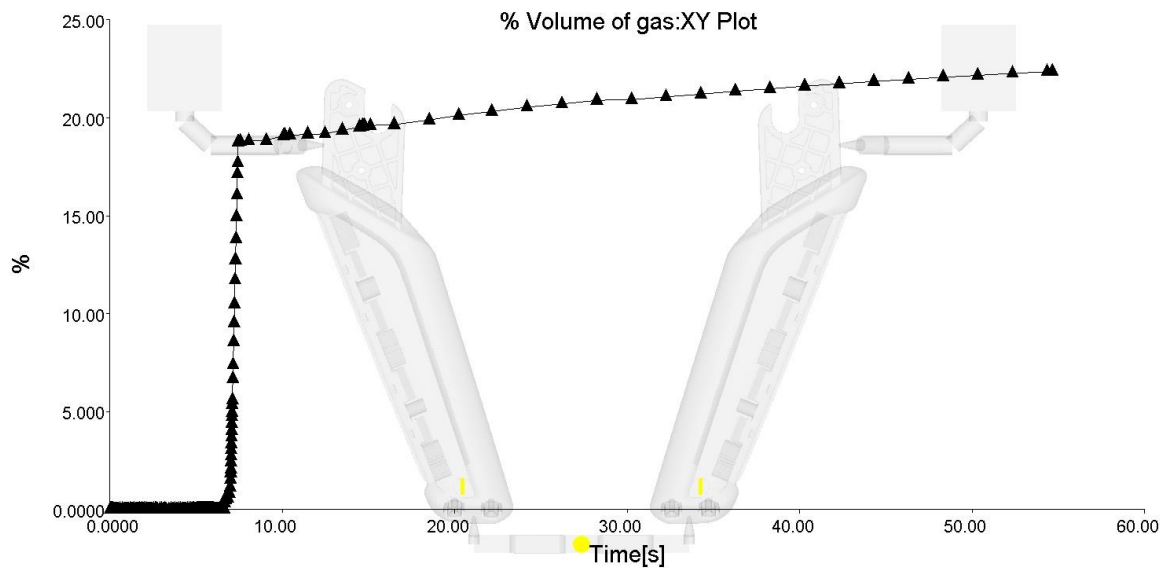


Figura 118. Percentagem de volume de gás *versus* tempo (Otimização 1)

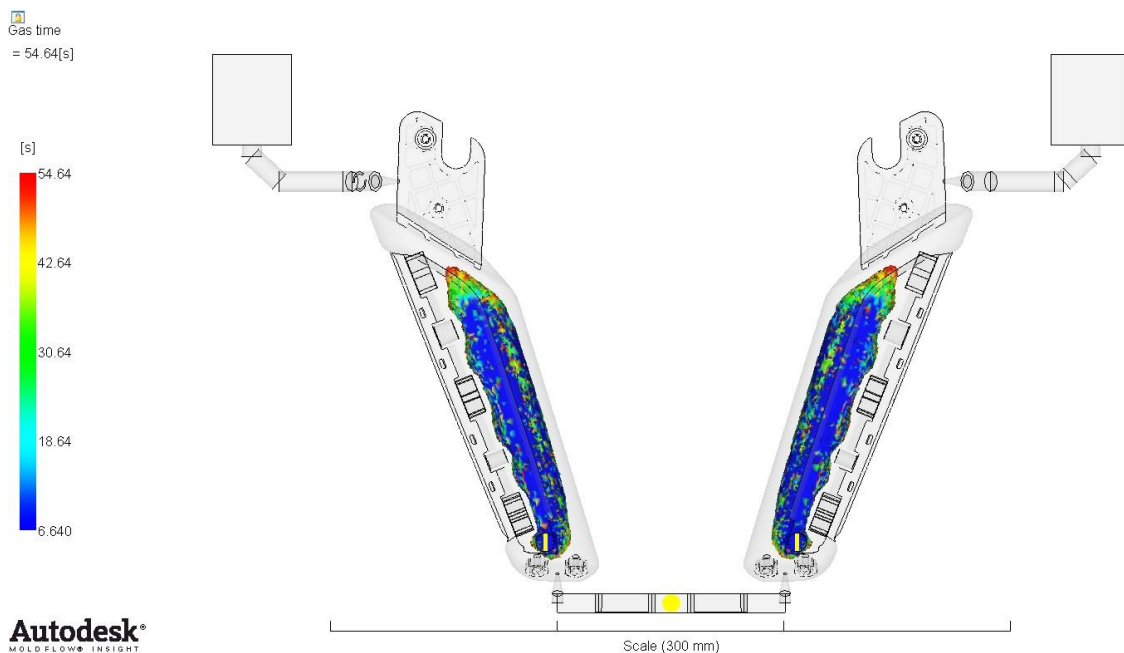


Figura 119. Volume de gás na peça simulada (Otimização 1)

Nesta simulação de otimização, a peça apresenta no controlo dimensional valores semelhantes aos obtidos na simulação do modelo experimental e na peça ensaiada. Em relação à peça da simulação do ensaio experimental, esta peça apresenta um desvio máximo de 4 centésimas de milímetro, localizados na zona B. Em comparação com a peça ensaiada, existe um desvio máximo de 6 centésimas de milímetro na zona B da peça simulada. A comparação do controlo dimensional entre as diferentes peças analisadas pode ser observadas na Tabela 32. Como o desvio máximo do controlo dimensional é inferior ao toleranciamento dimensional requerido, $\pm 0,1$ milímetros, pode-se concluir que a peça da simulação de otimização cumpre o requisito dimensional. Desta forma é possível concluir que esta combinação de parâmetros não proporciona um aumento nos empenos e contrações da peça em estudo. Na Figura 120 é possível visualizar o resultado da deformação da peça desta simulação de otimização, onde a peça simulada apresenta uma deformação máxima de 0,84 milímetros.

Tabela 32. Comparação de diferentes peças analisadas (Otimização 1)

Controlo dimensional	Peça da otimização 1 (mm)	Peça da simulação do modelo experimental (mm)	Peça ensaiada (mm)
Zona A	14,42	14,43	14,46
Zona B	31	31,04	31,06
Zona C	20,34	20,36	20,33
Zona D	4,06	4,05	4,01

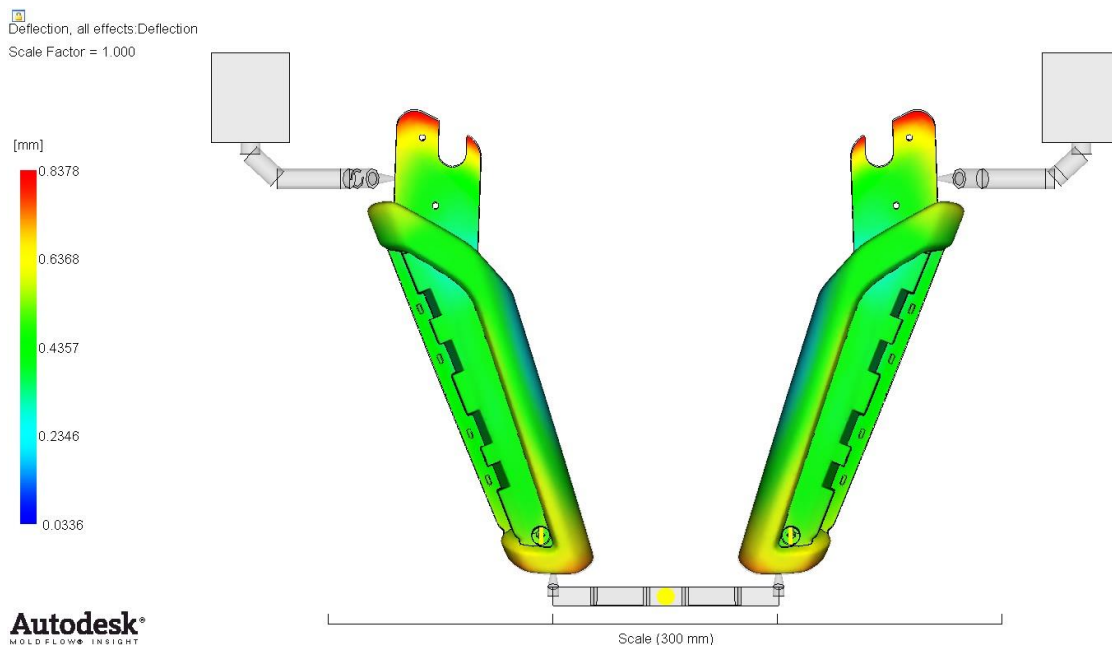


Figura 120. Deformações da peça em estudo (Otimização 1)

A peça desta simulação de otimização tem uma massa aproximadamente de 128 gramas, que após a correção previamente mencionada resulta em 116,4 gramas e portanto dentro do limite máximo de 125 gramas.

Nesta simulação de otimização, o resultado do tensor de orientação das fibras apresenta, na área selecionada para a recolha de amostras, um valor médio de 0,8701. Este resultado demonstra um aumento significativo em relação a simulação do ensaio experimental. Entre estas duas simulações existe uma diferença de 0,021 unidades. Na Tabela 33 é possível observar os valores das amostras retiradas na zona selecionada para a análise do tensor da orientação das fibras, bem como os valores máximo, mínimo e médio das amostras. Através dos valores apresentados na tabela anterior, é possível concluir que esta combinação de parâmetros pode eliminar, nas superfícies da peça em estudo, o defeito da exposição das fibras. Os valores deste resultado indicam um relaxamento das tensões residuais da peça simulada. Nas restantes secções da peça, é possível observar um tensor de orientação das fibras superior a 0,7. Este resultado pode ser visualizado na Figura 121. A comparação deste resultado entre a simulação do modelo experimental e desta simulação pode ser visualizado na Figura 122. Na parte superior desta figura está apresentado o tensor de orientação das fibras e na parte inferior o mesmo resultado referente ao obtido durante a simulação da peça ensaiada.

Tabela 33. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Otimização 1)

Tensor de orientação da fibra			
Amostras	Máx/Min		Média
0,8457	Máximo	0,8944	0,8701
0,8775			
0,8395			
0,8797			
0,8526			
0,8800			
0,8457			
0,8796			
0,8810			
0,8821			
0,8685			
0,8785	Mínimo	0,8395	
0,8725			
0,8887			
0,8857			
0,8825			
0,8724			
0,8944			
0,8438			
0,8514			

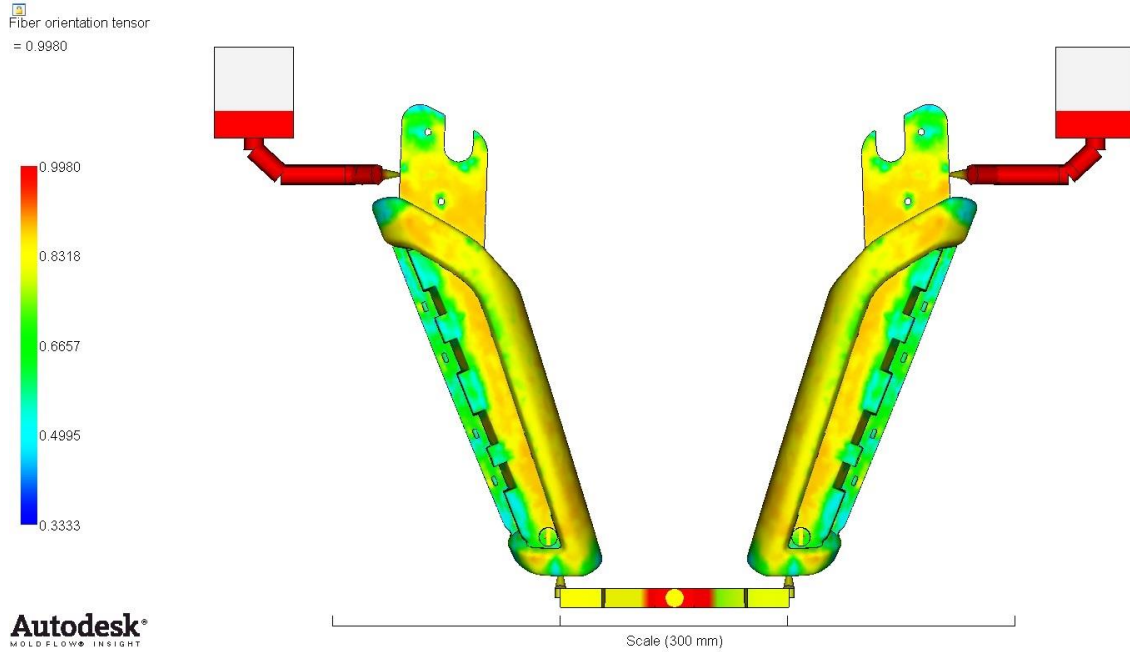


Figura 121. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Otimização 1)

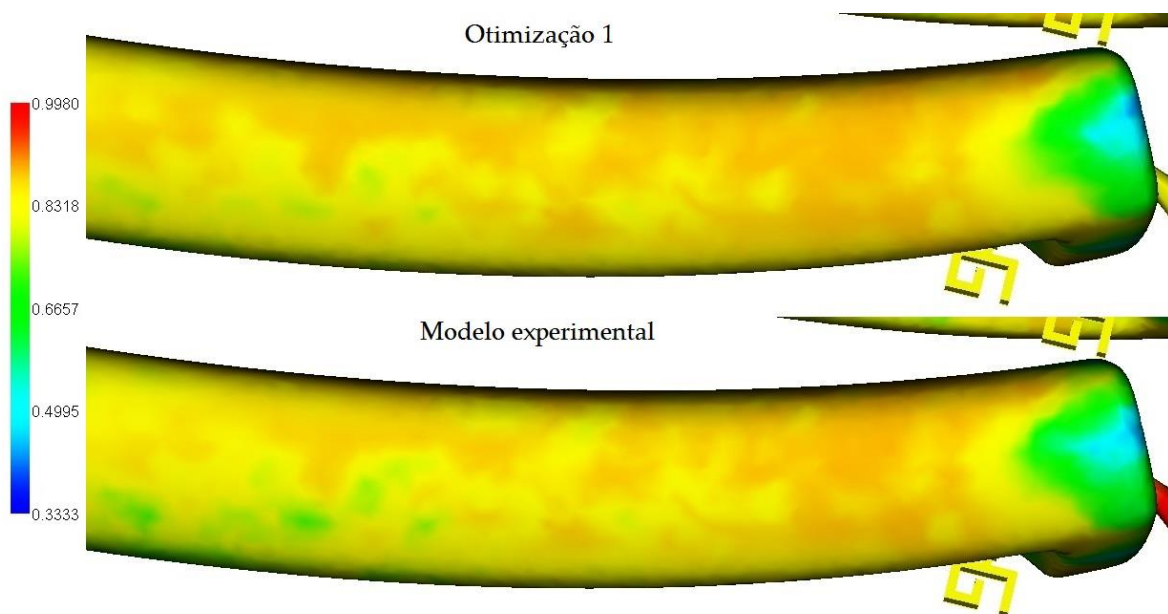


Figura 122. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Otimização 1)

A seguinte simulação de otimização combina as duas temperaturas da simulação anterior com um perfil de pressão de injeção do gás de 24 e 14 MPa. Quando esta injeção é iniciada, o gás encontra-se pressurizado a 24 MPa durante 3 segundos. Terminado este período, a pressão é reduzida para os 14 MPa e mantida durante 5 segundos. Quando este intervalo termina, a injeção do gás é interrompida. Uma vez que a viscosidade do fundido e a quantidade de material polimérico diminuem com o aumento da temperatura do molde e do fundido, este aumento de pressão auxiliará na transferência de calor entre a ferramenta moldante e o fundido. Desta forma, o valor médio do tensor de orientação das fibras pode

aumentar. Relativamente ao controlo das válvulas das cavidades não moldantes foi necessário ajustar apenas o fecho destas. Como o tempo de enchimento das cavidades moldantes não é afetado pelo aumento da pressão do gás, como explicado na simulação da pressão do gás, a abertura das válvulas das cavidades não moldantes foi mantida nos 6,65 segundos do ciclo de moldação. Porém, as válvulas interromperam o enchimento destas cavidades aos 7,1 segundos do ciclo de moldação, como pode ser observado na Figura 123. Em relação ao tempo de enchimento, este foi idêntico ao encontrado na simulação de otimização anterior, ou seja, 6 segundos.

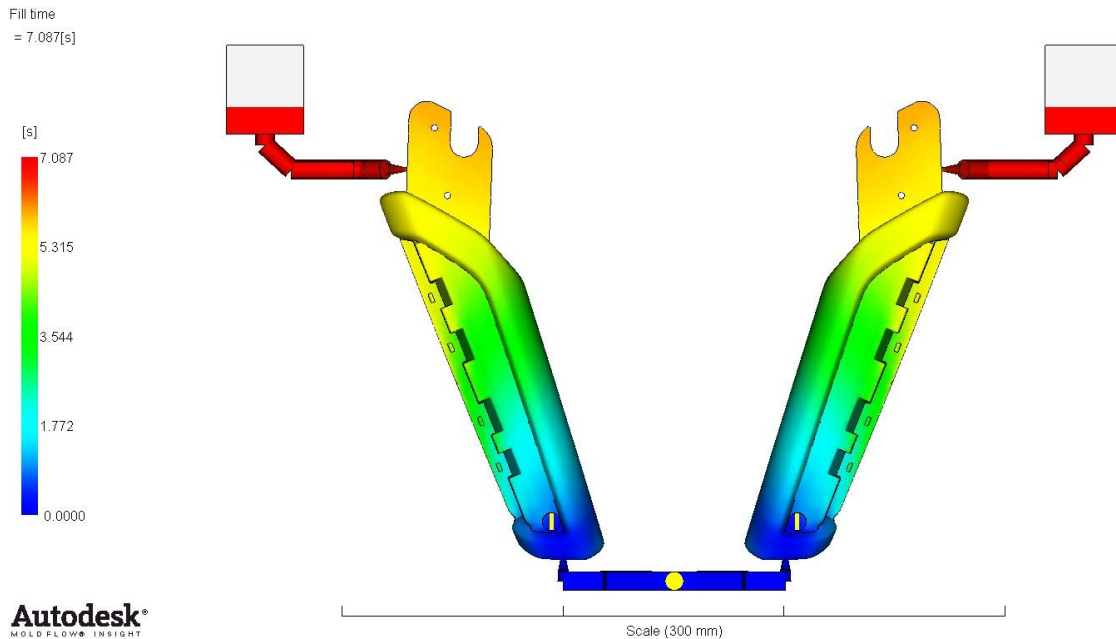


Figura 123. Tempo de enchimento (Otimização 2)

Como ocorrido na simulação da pressão do gás, a força de fecho desta simulação foi significativamente aumentada. Como pode ser observado na Figura 124, a força de fecho máxima desta simulação foi aproximadamente de 47 toneladas de força. Uma vez que a etapa de compactação deste processo de moldação é realizada pela pressão que o gás exerce no fundido, o aumento desta variável de processamento proporciona um aumento da força de fecho necessária para a concretização de uma moldação por injeção correta. Como explicado na simulação da pressão do gás, com esta força de fecho não é necessário recorrer a uma máquina de injeção com maior capacidade.

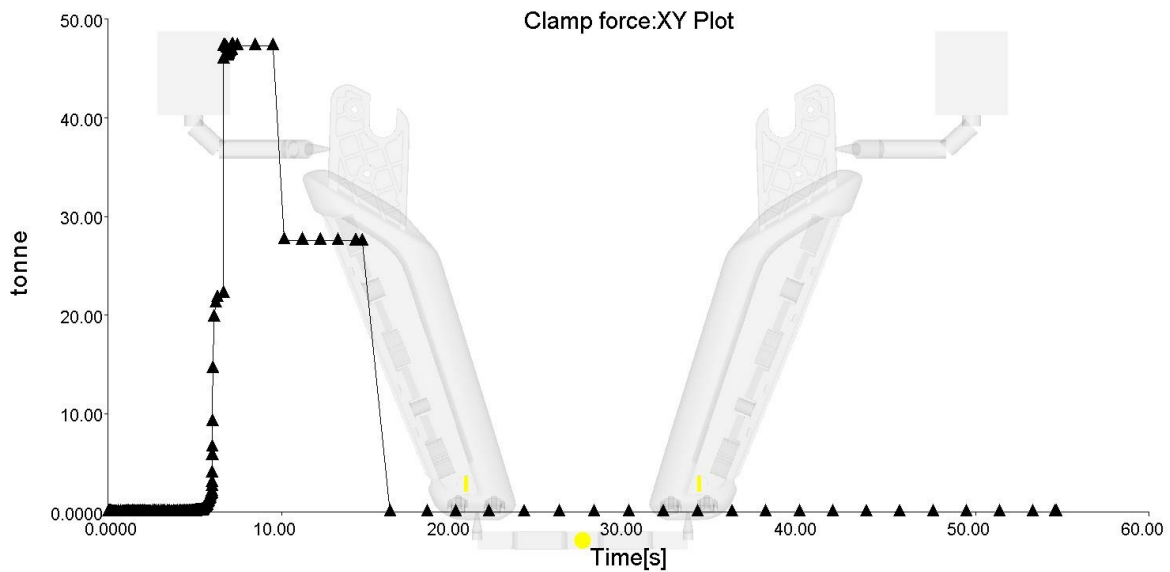


Figura 124. Força de fecho (Otimização 2)

Como a injeção do gás só ocorre durante a fase de compactação, como anteriormente referido, o resultado da temperatura na frente do escoamento do fundido desta simulação é idêntico ao resultado obtido na simulação anterior. Desta forma, a temperatura atingiu um valor máximo de 298 °C.

Relativamente à tensão de corte, este resultado demonstra que a peça contém tensões com baixos valores. Visto que os valores destas tensões de corte são inferiores ao valor admissível, pode-se afirmar que a peça simulada vai conter baixas deformações. Este resultado é idêntico ao obtido na simulação anterior e na do modelo experimental.

A peça desta simulação de otimização apresenta uma contração volumétrica de 1,432 %. Este resultado demonstra uma redução de 0,114 %, comparativamente à simulação anterior. Na simulação da pressão do gás foi demonstrado que este parâmetro reduz o valor da contração volumétrica da peça, o que aqui também seria esperado. Na Figura 125 é possível observar a contração volumétrica obtida nesta simulação.

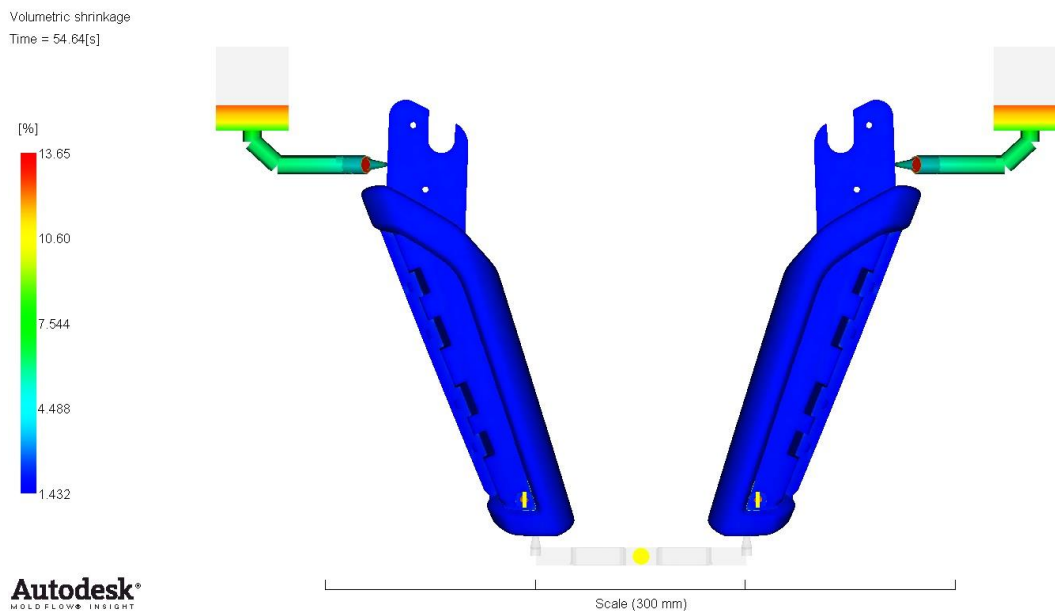


Figura 125. Contração volumétrica da peça simulada (Otimização 2)

Através do resultado das linhas de soldadura presentes na peça simulada, pode-se concluir que não houve alteração em relação a simulação anterior, quer na quantidade quer na localização deste defeito. Em comparação com a simulação do ensaio experimental, ambos os encaixes da peça, superior e inferior, apresentam uma melhoria nas linhas de soldadura.

Relativamente à percentagem de volume de gás, nesta simulação a peça contém aproximadamente 22 % de gás no seu interior. Este volume é idêntico ao obtido na simulação anterior. Em relação à simulação do modelo experimental, esta peça teve um aumento na percentagem de volume de gás de 3 %. É de notar que nestas duas simulações de otimização, a percentagem de volume é idêntica. Contudo, a injeção do gás teve uma duração de 0,75 segundos, na simulação anterior, e devido ao aumento da pressão de injeção do gás foi possível reduzir, nesta simulação de otimização, para os 0,45 segundos. Na Figura 126 é possível visualizar o desenvolvimento do volume de gás ao longo do ciclo de moldação desta simulação. A representação gráfica deste desenvolvimento pode ser observada na Figura 127.

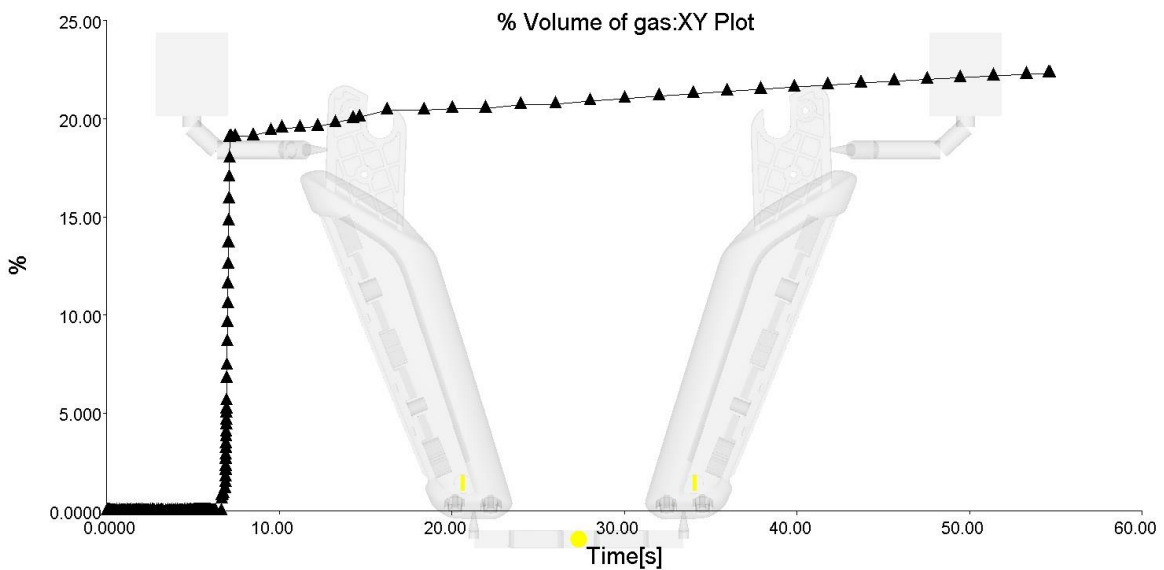


Figura 126. Percentagem de volume de gás *versus* tempo (Otimização 2)

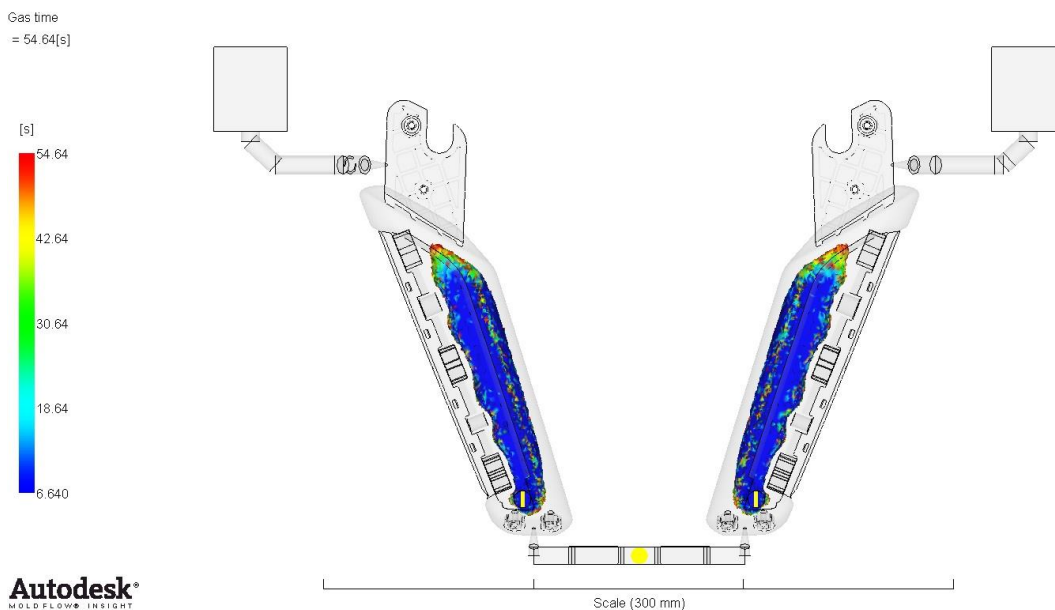


Figura 127. Volume de gás na peça simulada (Otimização 2)

Em relação ao controlo dimensional, a peça desta simulação apresenta valores idênticos aos medidos, quer na peça ensaiada quer na peça da simulação do modelo experimental. Desta forma é possível afirmar que esta combinação de parâmetros não contribui para um aumento nos empenos e contrações da peça. Na Tabela 34 é possível observar a comparação do controlo dimensional entre a peça ensaiada, a peça simulada e a peça da simulação do modelo experimental. Através dos valores da tabela anterior é possível verificar que a peça simulada, em relação à peça da simulação do modelo experimental, tem um desvio máximo de 3 centésimas de milímetro, localizado na zona B. Em relação à peça ensaiada, existe um desvio máximo de 5 centésimas de milímetro nas

zonas B e D. Contudo, este desvio não coloca em causa o cumprimento do requisito dimensional, visto que a peça em estudo tem um toleranciamento de $\pm 0,1$ milímetros. A aquisição dos valores referentes ao controlo dimensional da peça simulada foi realizada no resultado da deformação desta. Na Figura 128 é possível observar este resultado. Está indicado neste resultado que a peça simulada contém uma deformação máxima de aproximadamente de 0,80 milímetros.

Tabela 34. Comparação de diferentes peças analisadas (Otimização 2)

Controlo dimensional	Peça da otimização 2 (mm)	Peça da simulação do modelo experimental (mm)	Peça ensaiada (mm)
Zona A	14,43	14,43	14,46
Zona B	31,01	31,04	31,06
Zona C	20,34	20,36	20,33
Zona D	4,06	4,05	4,01

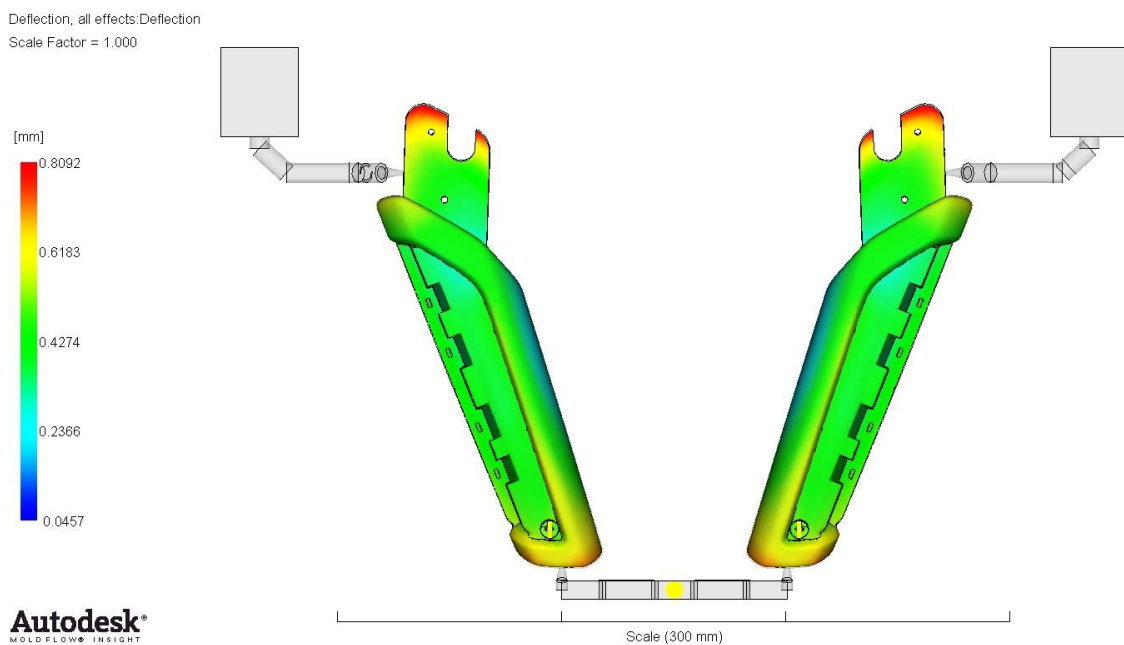


Figura 128. Deformações da peça em estudo (Otimização 2)

O *software* Moldflow® indica que as duas peças obtidas no final do ciclo de moldação têm, cada uma, uma massa de 128 gramas, que após a correção previamente mencionada resulta em 116,4 gramas e portanto dentro do limite máximo de 125 gramas.

O valor médio do tensor de orientação das fibras desta simulação de otimização, na área selecionada para a recolha de amostras, foi de 0,8702. Na Tabela 35 é possível observar os valores das amostras retiradas na zona selecionada para a análise do tensor da orientação das fibras, bem como os valores máximo, mínimo e médio das amostras. Este resultado demonstra um aumento significativo em relação a simulação do ensaio experimental. Entre estas duas simulações existe uma diferença de 0,0211 unidades. Relativamente a simulação anterior, o valor médio do tensor é idêntico, variando apenas uma unidade. Desta forma é

possível concluir que o aumento da pressão de injeção do gás não contribui para um relaxamento das tensões residuais da peça em estudo. Esta conclusão é consistente com os resultados obtidos na análise paramétrica, onde se variou a pressão do gás. Contudo, a combinação de parâmetros usada nesta simulação parece contribuir para uma suavização dos defeitos na moldação de peças, uma vez que nas restantes secções da peça, é sempre possível observar um tensor de orientação das fibras superior a 0,7. Este resultado pode ser visualizado na Figura 129. A comparação deste resultado entre a simulação do modelo experimental e desta simulação pode ser visualizado na Figura 130. Na parte superior desta figura está apresentado o tensor de orientação das fibras e na parte inferior o mesmo resultado referente ao obtido durante a simulação da peça ensaiada.

Tabela 35. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Otimização 2)

Tensor de orientação da fibra		
Amostras	Máx/Min	Média
0,8424	Máximo	0,8882
0,8765		
0,8267		
0,8780		
0,8205		
0,8790		
0,8680		
0,8817		
0,8559		
0,8823		
0,8829		
0,8816	Mínimo	0,8205
0,8696		
0,8860		
0,8863		
0,8882		
0,8853		
0,8820		
0,8645		
0,8670		

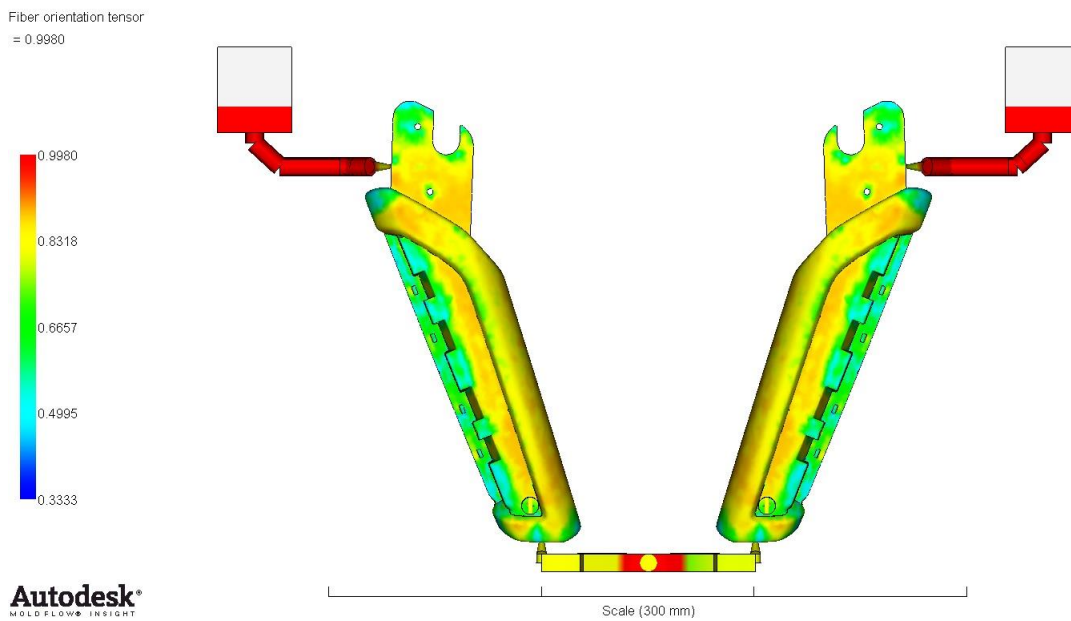


Figura 129. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Otimização 2)

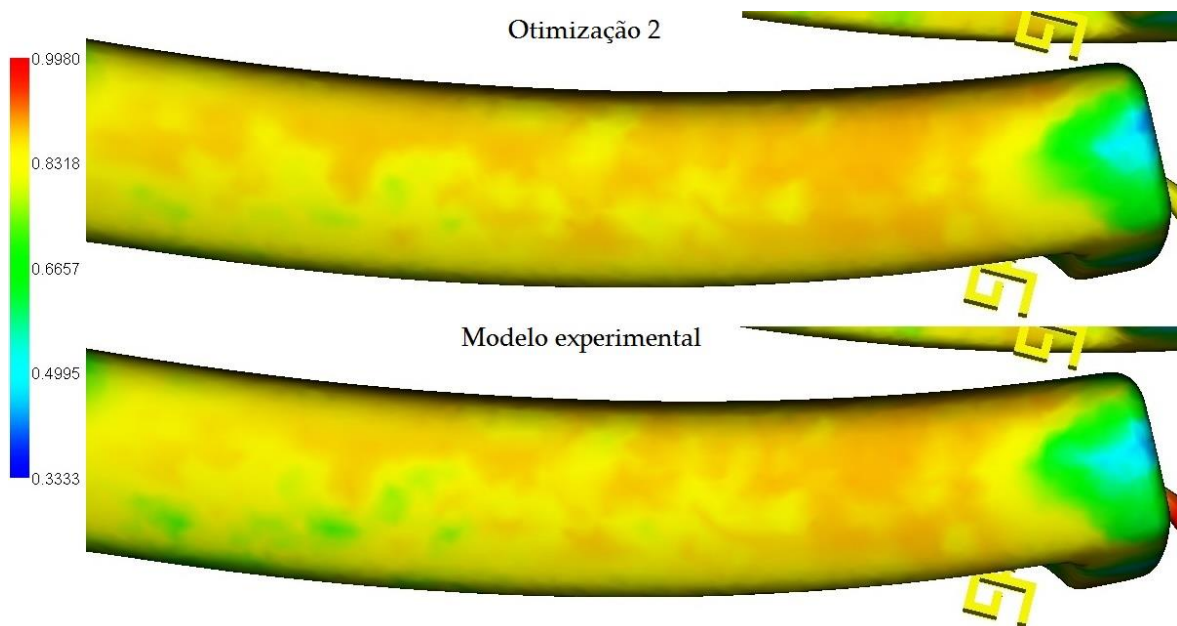


Figura 130. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Otimização 2)

Por último, segue-se a simulação de otimização que incorpora os três parâmetros da simulação anterior com um atraso da injeção do gás de 0,7 segundos. A utilização deste atraso só foi possível devido principalmente ao aumento da temperatura do fundido e do molde. Caso contrário, o fundido encontrar-se-ia demasiado solidificado, impossibilitando a sua remoção do interior da peça. É de relembrar que na simulação do modelo experimental foi usado um atraso de 0,65 segundos. Nas simulações referentes ao atraso do gás foi possível concluir que a redução do valor deste parâmetro aumentava as tensões residuais da peça. Assim, ficou demonstrado que o atraso mais adequado seria o usado no ensaio experimental. Relativamente ao controlo das válvulas das cavidades não moldantes

foi necessário ajustar de novo a abertura e o fecho destas. Devido a um maior atraso da injeção, a abertura das válvulas ocorreu aos 6,7 segundos. Após o enchimento das cavidades não moldantes, as válvulas fecharam aos 7,3 segundos do ciclo de moldação, como pode ser observado na Figura 131. Em relação ao tempo de enchimento, este foi idêntico ao encontrado na simulação de otimização anterior, ou seja, 6 segundos.

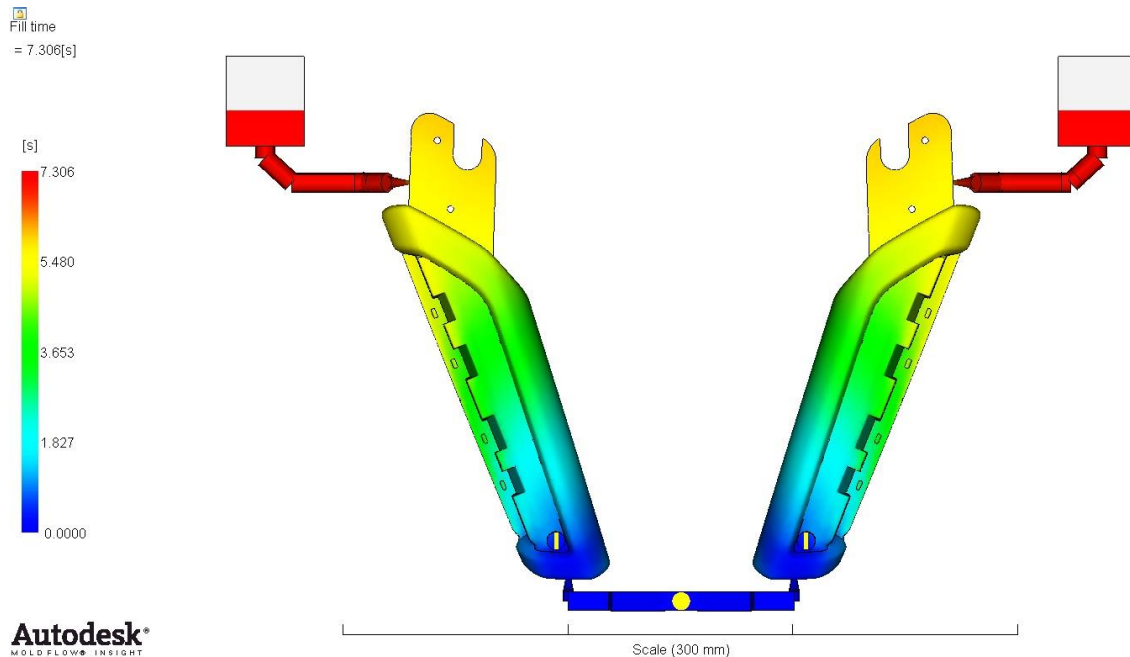


Figura 131. Tempo de enchimento (Otimização 3)

Em relação à força de fecho, não houve qualquer alteração no valor deste resultado em relação à simulação anterior, visto que as pressões de injeção do fundido e do gás usadas nesta simulação foram idênticas. O valor máximo da força de fecho foi sensivelmente de 47 toneladas.

Como o atraso da injeção do gás só ocorre durante a fase de compactação, o resultado da temperatura na frente do escoamento do fundido desta simulação é idêntico ao resultado da primeira simulação de otimização. Assim, a temperatura atingiu um valor máximo de 298 °C.

Relativamente à tensão de corte, este resultado demonstra que a peça contém tensões com baixos valores. Visto que os valores destas tensões de corte são inferiores ao valor admissível, pode-se afirmar que a peça simulada vai conter baixas deformações. Este resultado é idêntico ao obtido nas simulações de otimização anteriores, bem como na simulação do ensaio experimental.

Em relação à contração volumétrica, a peça desta simulação apresenta um valor de 1,432 %. Este resultado é idêntico ao obtido na simulação anterior. Devido à baixa contração volumétrica que a peça apresenta, pode-se afirmar que esta não vai conter elevados empenos.

Através do resultado das linhas de soldadura presentes na peça simulada, pode-se concluir que não houve alteração em relação a simulação anterior, quer na quantidade quer na localização desta anomalia.

É de relembrar que nas simulações do atraso da injeção do gás existia resultados que mantinham-se inalterados, independentemente do valor do atraso. O mesmo pode ser observado entre esta simulação e a anterior.

Nesta simulação de otimização, o volume de gás injetado para o interior da peça foi aproximadamente de 24 %. Relativamente à simulação do modelo experimental, esta peça teve um aumento na percentagem de volume de gás de 5 %. Comparativamente à simulação anterior, o volume aumentou 2 %. Este aumento deve-se ao volume de gás que a peça detém, no momento em que as válvulas das cavidades não moldantes fecham. No caso da simulação anterior, existe sensivelmente 18 % de gás no interior da peça quando as válvulas fecharam. Nesta simulação, no interior da peça existe aproximadamente 20 % de gás. É possível observar o desenvolvimento do volume de gás ao longo do ciclo de moldação da peça simulada na Figura 132. A representação gráfica deste desenvolvimento pode ser visualizada na Figura 133.

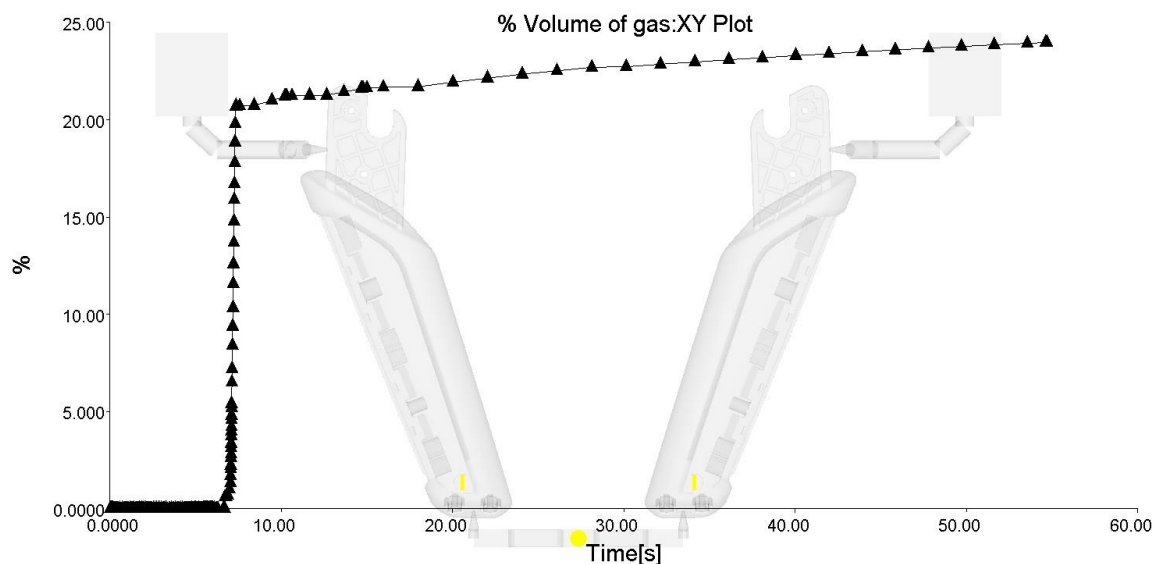


Figura 132. Percentagem de volume de gás *versus* tempo (Otimização 3)

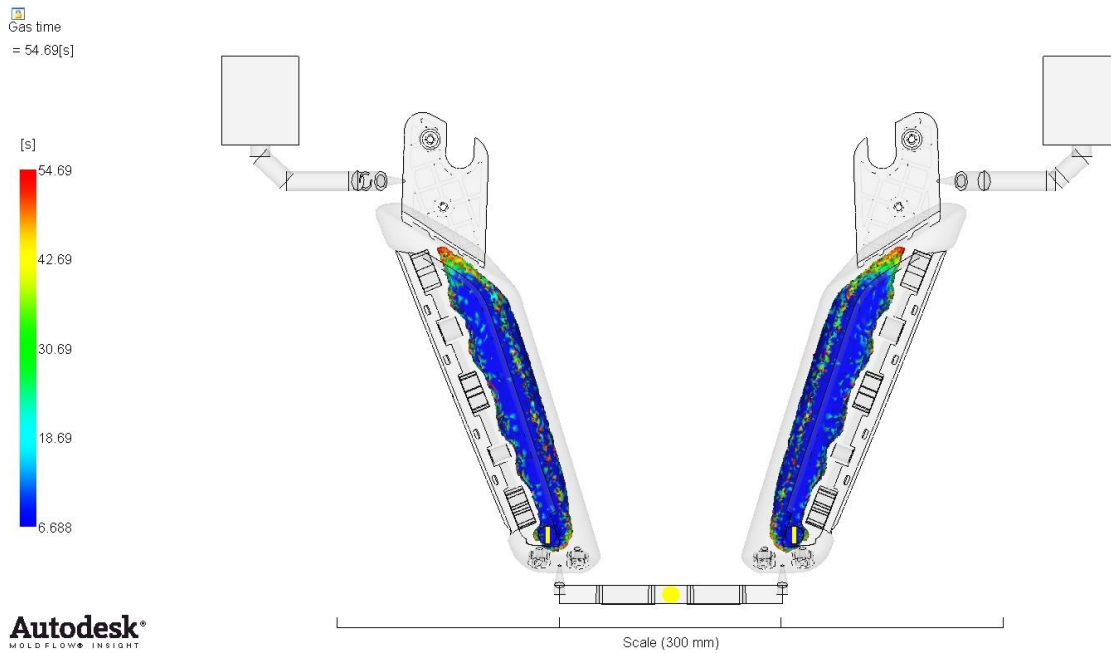


Figura 133. Volume de gás na peça simulada (Otimização 3)

Nesta simulação de otimização, a peça apresenta no controlo dimensional valores semelhantes aos obtidos na simulação do modelo experimental e na peça ensaiada. Em relação à peça da simulação do ensaio experimental, esta peça apresenta um desvio máximo de 4 centésimas de milímetro, localizados na zona B. Em comparação com a peça ensaiada, existe um desvio máximo de 6 centésimas de milímetro na zona B da peça simulada. A comparação do controlo dimensional entre as diferentes peças analisadas pode ser observadas na Tabela 36. Como o desvio máximo do controlo dimensional é inferior ao toleranciamento dimensional requerido, $\pm 0,1$ milímetros, pode-se concluir que a peça da simulação de otimização cumpre o requisito dimensional. Desta forma é possível concluir que esta combinação de parâmetros não proporciona um aumento nos empenos e contrações da peça em estudo. Na Figura 134 é possível visualizar o resultado da deformação da peça desta simulação de otimização. A recolha de dados necessários para a análise do controlo dimensional desta peça foi realizada neste resultado. A peça simulada apresenta uma deformação máxima de 0,87 milímetros, como demonstrado no resultado da deformação.

Tabela 36. Comparação de diferentes peças analisadas (Otimização 3)

Controlo dimensional	Peça da otimização 3 (mm)	Peça da simulação do modelo experimental (mm)	Peça ensaiada (mm)
Zona A	14,42	14,43	14,46
Zona B	31	31,04	31,06
Zona C	20,34	20,36	20,33
Zona D	4,06	4,05	4,01

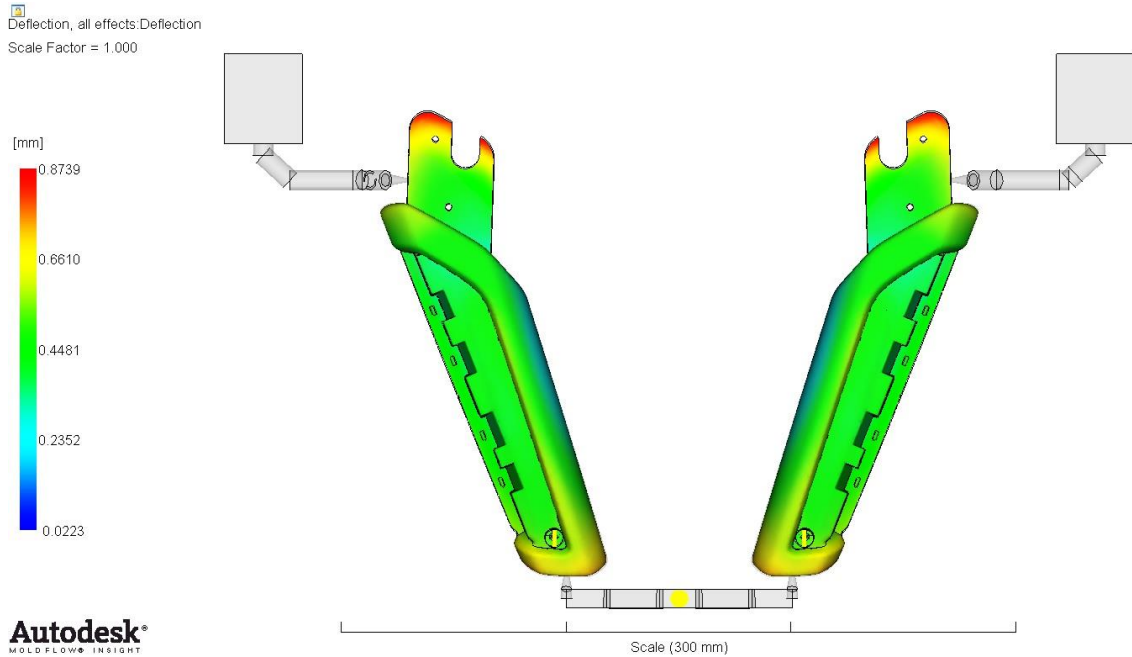


Figura 134. Deformações da peça em estudo (Otimização 3)

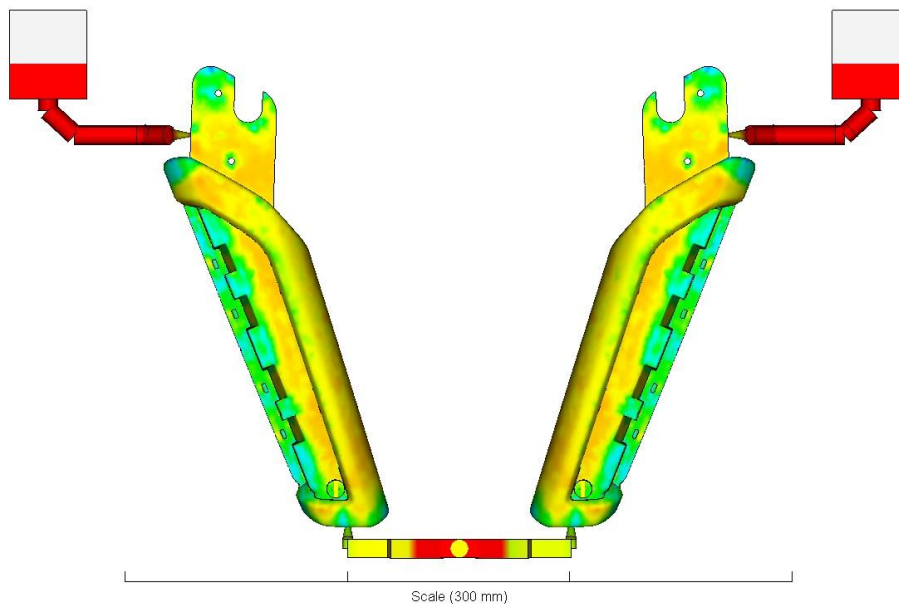
A peça desta simulação de otimização tem uma massa aproximadamente de 125,5 gramas, que após a correção previamente mencionada resulta em 113,4 gramas e portanto dentro do limite máximo de 125 gramas.

Relativamente ao resultado do tensor de orientação das fibras, esta simulação de otimização apresenta, na zona selecionada para a recolha de amostras, um valor médio de 0,8694. Na Tabela 37 é possível observar os valores das amostras retiradas na zona selecionada para a análise do tensor da orientação das fibras, bem como os valores máximo, mínimo e médio das amostras. Comparativamente às duas simulações anteriores, esta peça apresenta uma ligeira redução no valor médio do tensor. Contudo, existe um claro aumento deste resultado em relação às simulações do estudo paramétrico. Desta forma é possível concluir que o aumento do atraso da injeção do gás não contribui para um relaxamento das tensões residuais da peça simulada. Comprovando que o atraso mais adequado para esta moldação é de 0,65 segundos. Contudo, a combinação de parâmetros usada nesta simulação permite possivelmente uma moldação de peças ausentes de defeitos. Nas restantes secções da peça, é possível observar um tensor de orientação das fibras superior a 0,7. Este resultado pode ser visualizado na Figura 135. A comparação deste resultado entre a simulação do modelo experimental e desta simulação pode ser visualizado na Figura 136. Na parte superior desta figura está apresentado o tensor de orientação das fibras e na parte inferior o mesmo resultado referente ao obtido durante a simulação da peça ensaiada.

Tabela 37. Amostras do tensor de orientação das fibras e a média calculada (Otimização 3)

Tensor de orientação da fibra		
Amostras	Máx/Min	Média
0,8532	Máximo	0,8890
0,8769		
0,8370		
0,8622		
0,8251		
0,8822		
0,8499		
0,8783		
0,8463		
0,8807		
0,8637	Mínimo	0,8694
0,8804		
0,8749		
0,8885		
0,8827		
0,8890		
0,8771		
0,8786		
0,8723		
0,8884		

Fiber orientation tensor
= 0.9980



Autodesk®
MOLD FLOW® INSIGHT

Figura 135. Tensor de orientação das fibras do modelo numérico (Otimização 3)

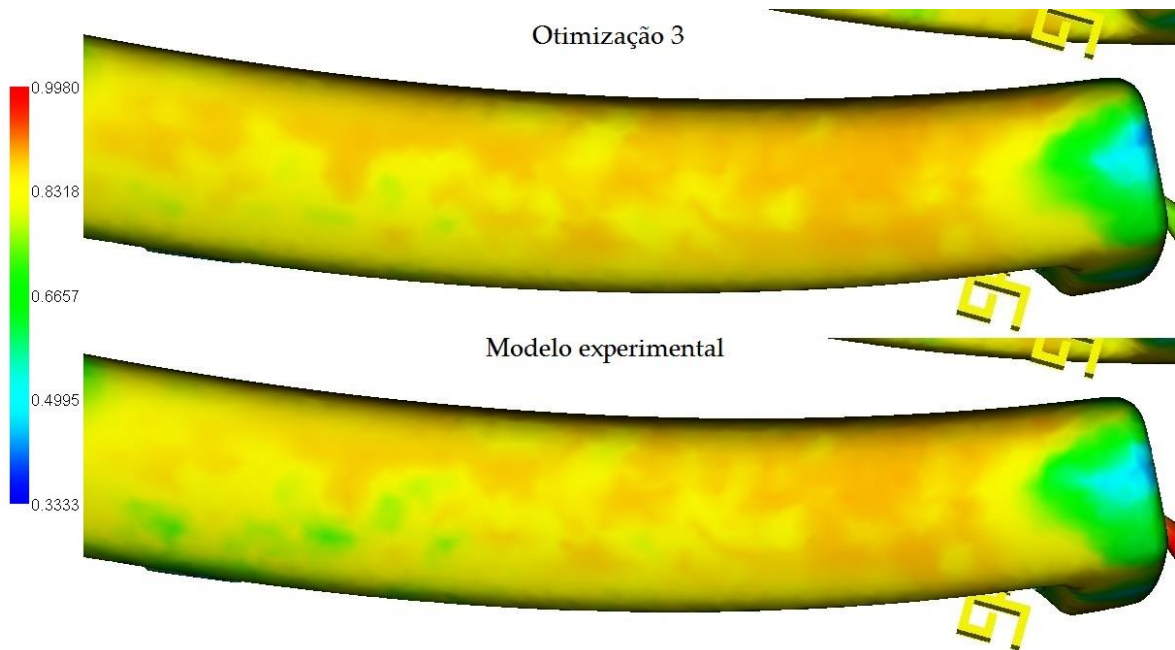


Figura 136. Comparação do tensor de orientação das fibras na zona analisada (Otimização 3)

Em síntese, todas as peças obtidas nestas simulações de otimização contêm um valor médio do tensor de orientação das fibras elevado, em comparação com o mesmo resultado da peça da simulação do modelo experimental. Assim, comprovando um relaxamento de tensões residuais nas peças simuladas, solucionando o defeito da exposição das fibras. Contudo, o valor médio do tensor de orientação das fibras das três simulações de otimização é semelhante, apesar de conterem parâmetros de processamento com valores diferentes. Uma vez que, na simulação de otimização 1 foram apenas foram modificados dois parâmetros de processamento, pode-se concluir que as variáveis deste processo proporcionam uma moldação mais eficiente quando comparado com as simulações de otimização 2 e 3. Desta forma, conclui-se que o acoplamento da temperatura do molde e do fundido infere uma melhor orientação do material de reforço do compósito, contribuindo para a eliminação do defeito da exposição das fibras nas superfícies da peça em estudo. Na Tabela 38 apresenta-se uma síntese dos resultados, essenciais para a análise dos requisitos técnicos, das simulações de otimização 1, 2 e 3, bem como a do modelo experimental.

Tabela 38. Síntese dos resultados das simulações de otimização 1, 2 e 3

Simulação numérica	Controlo dimensional (mm)				Massa (gramas)	Tensor de orientação das fibras
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D		Valor médio
Modelo experimental	14,43	31,04	20,36	4,05	120,9	0,8491
Otimização 1	14,42	31	20,34	4,06	116,4	0,8701
Otimização 2	14,43	31,01	20,34	4,06	116,4	0,8702
Otimização 3	14,42	31	20,34	4,06	113,4	0,8694

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo serão apresentadas todas as conclusões deste trabalho, fazendo-se ainda algumas considerações para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Através desta dissertação foi possível concluir que este tipo de estudo, análise computacional, se deve realizar numa fase inicial do projeto da ferramenta moldante. Existem considerações de projeto, bem como na seleção de materiais poliméricos, que devem ser cautelosamente ponderadas, de forma a produzir produtos de excelência.

Tendo este estudo de caso como referência, pode-se afirmar no que diz respeito à utilização de *softwares* e análises CAE que é possível com as mesmas evitar ou corrigir algumas falhas processuais. Neste caso em particular, recorreu-se a estudos paramétricos que permitiram analisar a influência das variáveis do processo na qualidade do produto final.

Neste estudo do processo de moldação por injeção assistida a gás definiu-se como variáveis de controlo de qualidade, a orientação da fibra na matriz da poliamida no final do ciclo de moldação, na massa do produto e quatro requisitos dimensionais da peça. Desta forma, ao longo de todo um estudo paramétrico, foi possível avaliar a qualidade das peças ensaiadas, bem como definir a combinação de parâmetros de processamento ideal para a obtenção de peças de qualidade.

Assim, conclui-se que a junção da temperatura do molde e do fundido, entre todos os parâmetros de processamento analisados, é a que demonstra uma maior influência na qualidade visual e estrutural da peça. O acoplamento destas variáveis proporciona, na peça em estudo, uma melhor orientação do material de reforço do compósito, bem como do seu nível de compactação, que se reflete na massa final da peça. Esta junção de parâmetros, neste processo, nesta ferramenta moldante, com este polímero, infere à peça uma qualidade global acrescida. De um algum certo modo, este acréscimo era expetável, uma vez que a dinâmica do escoamento acabou por ser beneficiada durante a fase de enchimento das cavidade moldantes, proporcionando um melhor alinhamento das fibras, diminuindo consideravelmente as tensões residuais induzidas pelo escoamento, bem como pelo arrefecimento, uma vez que a diferença de temperatura da interface molde/polímero é atenuada.

Para além destas conclusões, o estudo desta dissertação permitiu compreender a importância de uma metodologia de trabalho para um projeto de uma ferramenta moldante. Antes de projetar o molde é necessário analisar cuidadosamente o produto e todas as suas particularidades. Verificar os requisitos técnicos do produto, sejam estes funcionais, dimensionais ou mesmo estéticos. Deve-se garantir que o produto manufaturado cumpra estes requisitos, por isso estabelecem-se diferentes variáveis de controlo. Estas variáveis devem ser propriedades que sejam facilmente mensuráveis, como a massa ou dimensões particulares do produto. Estabelecidas as variáveis de controlo, segue-se a definição de um estudo paramétrico. Este estudo deve permitir reunir informação necessária para compreender o processo de moldação do produto, promovendo não só um projeto assertivo no que aos sistemas funcionais diz respeito, mas atentando em particularidades processuais de modo a evitar a tentativa e erro. A última etapa prende-se com a otimização do projeto e do processo de moldação. Esta otimização permite obter produtos de excelência de um modo mais eficiente, seja na diminuição do tempo do ciclo de moldação ou na redução de custos associados à produção dos componentes.

Desta forma, é possível concluir que todos os objetivos propostos nesta dissertação de mestrado foram cumpridos com sucesso. De certo modo, este estudo contribui para a complementação do conhecimento do processo de moldação por injeção assistida a gás na comunidade científica, bem como na industrial.

5.2 Trabalho Futuro

Como trabalhos futuros seria interessante ensaiar os parâmetros simulados na ferramenta moldante existente, para comprovar a influência do acoplamento da temperatura do molde e do fundido na qualidade visual e estrutural do puxador. Neste trabalho não foi possível realizar ensaios experimentais uma vez que o molde se encontra em produção fora de Portugal.

Seria aliciante também testar a variante da moldação por injeção assistida a gás *short shot*. Neste trabalho foi simulada a influência dos parâmetros de processamento na moldação *full shot*. Todavia, não foi provado que os parâmetros afetam da mesma forma as moldações da variante *short shot*.

A utilização de outros materiais poliméricos nesta ferramenta moldante seria também um projeto interessante a desenvolver. Nesse trabalho seriam ensaiadas poliamidas reforçadas com diferentes percentagens de material de reforço. Dessa forma, determinando qual a influência efetiva do reforço na exposição das fibras.

Referências Bibliográficas

- [1] D. V. Rosato, D. V. Rosato, and M. G. Rosato, *Injection Molding Handbook*, 3rd ed. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [2] M. R. Kamal, A. Isayev, and Shih-Jung Liu, *Injection Molding: Technology and Fundamentals*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2009.
- [3] L. Xie, L. Shen, and B. Jiang, "Modelling and Simulation for Micro Injection Molding Process," in *Computational Fluid Dynamics Technologies and Applications*, InTech, 2011, p. 1.
- [4] Autodesk, "Gas-assisted Injection Molding (Concept)," 2014. [Online]. Available: <http://knowledge.autodesk.com/support/simulation-moldflow/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/MoldflowComm/files/GUID-8870919C-EB02-4A67-AFC7-3BBF6BD82B3E-htm.html>. [Accessed: 07-May-2014].
- [5] J. C. Liang, Y. Li, D. H. Zhou, Z. R. Li, and W. Zhang, "Analysis of diffusion mechanism between gas and melt in gas-assisted injection molding," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 187–188, pp. 685–689, Jun. 2007.
- [6] M. Sanchez-Soto and A. Gordillo, "Optimising the gas-injection moulding of an automobile plastic cover using an experimental design procedure," *J. Mater. ...*, vol. 178, no. 1–3, pp. 369–378, Sep. 2006.
- [7] S.-C. Chen, P. S. Minh, and J.-A. Chang, "Gas-assisted mold temperature control for improving the quality of injection molded parts with fiber additives," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 38, no. 3, pp. 304–312, Mar. 2011.
- [8] Y. Lu, W. Yang, K. Zhang, and M. Yang, "Stress relaxation behavior of high density polyethylene (HDPE) articles molded by gas-assisted injection molding," *Polym. Test.*, vol. 29, no. 7, pp. 866–871, Oct. 2010.
- [9] S.-J. Liu and Y.-C. Wu, "Dynamic visualization of cavity-filling process in fluid-assisted injection molding-gas versus water," *Polym. Test.*, vol. 26, no. 2, pp. 232–242, Apr. 2007.

- [10] R. Chien, S. Chen, M. Jeng, and H. Yang, "Mechanical properties of gas-assisted injection moulded PS, PP and Nylon parts," *Polymer (Guildf)*, vol. 40, no. 11, pp. 2949–2959, May 1999.
- [11] N.-S. Ong, H. L. Lee, and M. a. Parvez, "Influence of processing conditions and part design on the gas-assisted injection molding process," *Adv. Polym. Technol.*, vol. 20, no. 4, pp. 270–280, 2001.
- [12] S.-J. Liu and K.-H. Chang, "Parameters affecting the full-shot molding of gas-assisted injection-molded parts," *Adv. Polym. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–14, 2003.
- [13] VanityDrift, "2015 Audi TT," 2014. [Online]. Available: <http://vanitydrift.com/2015-audi-tt/>. [Accessed: 12-Apr-2014].
- [14] IndianAutoBlog, "Geneva Live - 2015 Audi TT," 2014. [Online]. Available: <http://indianautosblog.com/2014/03/2015-audi-tt-123980>. [Accessed: 12-Apr-2014].
- [15] SIMACC, "What is numerical simulation?," 2014. [Online]. Available: http://www.simacc.de/en/index.php?page=about_simulation. [Accessed: 12-Apr-2014].
- [16] Encyclopædia Britannica, "computer simulation," 2014. [Online]. Available: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/130683/computer-simulation>. [Accessed: 12-Apr-2014].
- [17] Autodesk, "Finite Element Analysis," 2014. [Online]. Available: <http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/item?siteID=123112&id=17670721>. [Accessed: 12-Apr-2014].
- [18] Wilde Analysis, "Autodesk Simulation Moldflow," 2014. [Online]. Available: <http://wildeanalysis.co.uk/fea/software/autodesk-moldflow>. [Accessed: 12-Apr-2014].
- [19] AutodeskSim360, "Simulation in Action MF -Gas Assist," 2013. [Online]. Available: <http://www.youtube.com/watch?v=LdfU2b7eVHs>. [Accessed: 15-Apr-2014].
- [20] Autodesk, "Autodesk Moldflow Insight help," 2012.
- [21] T. Zhiltsova, "Injection molding process optimization for microstructured part production," Universidade de Aveiro, 2013.
- [22] Autodesk, "Mesh-midplane," 2014. [Online]. Available: <http://help.autodesk.com/view/MFIA/2014/ENU/?guid=GUID-F8306249-74D6-44CB-88C4-54E5A4887D2C>. [Accessed: 12-Apr-2014].

- [23] Autodesk, "Mesh-surface (Dual Domain)," 2014. [Online]. Available: <http://help.autodesk.com/view/MFC/2014/ENU/?guid=GUID-017E9E94-29C6-4509-9254-95268BF9BE89>. [Accessed: 12-Apr-2014].
- [24] Autodesk, "3D mesh," 2014. [Online]. Available: <http://help.autodesk.com/view/MFIA/2014/ENU/?guid=GUID-00993F04-9367-41FE-A6AB-48B531A0F4AA>. [Accessed: 12-Apr-2014].
- [25] Mareco Kunststoffen, "Moldflow warpage simulation," 2014. [Online]. Available: <http://www.mareco-plastics.com/moldflow-warpage.html>. [Accessed: 17-Apr-2014].
- [26] Sumitomo (SHI) Demag, "SE-EV Series," 2014. [Online]. Available: <http://www.sumitomo-shi-demag.us/pdfs/SE50EVspecsMETRIC.pdf>. [Accessed: 19-Jun-2014].
- [27] Moldex3D, "Shear rate distribution." 2013.

ALMOFADA → 77

TEMPO E PRESSÕES

- 1.º INJEÇÃO DE PLÁSTICO DURANTE 6 SEG.
- 2.º INJEÇÃO DE GÁS (AZOTO) DURANTE 3 SEG. A 180 BARES
- 3.º REDUÇÃO DA INJEÇÃO DE GÁS (AZOTO) PARA 80 BARES
MAS SÓ DURANTE 5 SEG.

PLÁSTICO → INJEÇÃO DE PLÁSTICO 6 SEG
 GÁS → INJEÇÃO DE GÁS AZOTO A 180 BARES DURANTE 3 SEG.
 GÁS → REDUÇÃO DA INT. DO GÁS (AZOTO) P/ 80 BARES DURANTE 5 SEG.

Figura A- 2. Ficha técnica - folha 2