



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Alexandre Gonçalves de Sousa

Estudo experimental e numérico da interação fluido-estrutura em embalagens de ketchup

Tese de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor Gustavo Rodrigues Dias

Doutora Ana Filipa Gonçalves da Costa Carneiro

Fevereiro de 2017

DECLARAÇÃO

Nome: Bruno Alexandre Gonçalves de Sousa

Endereço eletrónico: brunohayatobusa@gmail.com Telefone: 932891905

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 13774016

Título da dissertação: Estudo experimental e numérico da interação fluido-estrutura em embalagens de ketchup

Orientadores:

Professor Doutor Gustavo Rodrigues Dias

Doutora Ana Filipa Gonçalves da Costa Carneiro

Ano de conclusão: 2017

Designação do Mestrado:

Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO.

Universidade do Minho, ____/____/_____

Assinatura:

Resumo

O trabalho realizado teve como objetivo compreender a influência do comportamento de fluido no interior de uma embalagem, na resposta mecânica quando sujeita a uma carga de compressão e comparar esse comportamento entre os resultados experimentais e a simulação numérica. Para isso, foram necessários os estudos, experimental em compressão com embalagens de ketchup vazias e com diferentes fluidos no seu interior (sendo estes água e ketchup) e da simulação numérica representativa desses ensaios experimentais.

De forma a possibilitar um estudo comparativo mais preciso, entre realidade e simulação, foi relevante estudar a embalagem em relação à sua geometria, espessura, assim como às propriedades do material que a constituem, de modo a caracterizá-la o melhor possível, para utilizar esses dados na simulação.

Antes da execução das simulações, foram realizados estudos preliminares a modelos numéricos, tais como, Co-Simulação fluido-estrutura, SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) e CEL (*Coupled Eulerian-Lagrangian*), de modo a perceber qual o modelo que melhor se ajusta ao caso de estudo pretendido. A partir dos resultados obtidos chegou-se à conclusão que os melhores modelos seriam o SPH e o CEL, sendo estes os modelos seleccionados para simular a compressão da embalagem com fluidos.

Os resultados observados dos ensaios experimentais de compressão foram de acordo com o que era previsto, ou seja, na compressão das embalagens vazias estas deformaram mais e a força resultante foi inferior do que nas embalagens com fluido. Isto deve-se ao facto de a pressão interna gerada pelos fluidos contrariar a deformação da embalagem e como tal é necessário que o equipamento de compressão gere mais força para o mesmo deslocamento.

Na simulação numérica, com o primeiro estudo (simulação estrutural sem fluido), foi possível validar o modelo de material, assim como todas as condições de entrada, malhas, condições de fronteira, velocidade/deslocamento, interações, pois a curva de força/deslocamento obtida era semelhante à experimental, assim como o comportamento da embalagem. Com a simulação das embalagens com fluido, observou-se também que a curva força/deslocamento obtida era bastante próxima do resultado experimental nos dois modelos numéricos estudados, chegando-se à conclusão que o modelo que melhor representa a realidade é o modelo numérico CEL.

Abstract

The objective of this project was to understand the influence of the fluid dynamics on the package, on the mechanical response when being subject to a compression charge and compare that behavior between experimental results and numerical simulation. For that, it was necessary the studies, experimental in compression with empty ketchup containers and with fluids on the inside (namely ketchup and water) and numerical simulation representative of those experimental essays.

For a more precise comparative study, between reality and simulation, it was relevant studying the container's geometry, thickness, and the material properties that compose it, in order to better characterize it, for utilizing that data on the simulation.

Before the simulations execution, preliminary studies to numerical models were realized, such as, Co-Simulation fluid-structure, SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) and CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian), in order to understanding which model better qualifies for the pretended study. From the obtained results, the conclusion was that SPH and CEL would be the better models, these being selected to simulate the container compression with fluids.

The observed results of the compression essays was as expected, that is, the compression of empty bottles had a greater deformation and the resultant force was lower than the containers with fluid. This is due to the internal pressure generated by the fluids that contradict the deformation of the container, as such it is necessary that the compression equipment generate more force for the same displacement.

In the numerical simulation, with the first study (structural simulation without fluid), it was possible to validate the material model, as well as all the input's, meshes, boundary conditions, velocity/displacement, interactions, because the obtained force/displacement curve was similar to the experimental, just like the container behavior. With the simulation of the filled containers with fluid, were also noticed that the curve force/displacement obtained was fairly close to the experimental reality in the two studied numerical models, reaching the conclusion that the better model to represent the reality is the CEL numerical model.

Agradecimentos

Neste parágrafo serão mencionadas algumas pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação e por isso merecem o devido agradecimento.

Aos meus orientadores, Professor Gustavo Rodrigues Dias e Doutora Ana Filipa Gonçalves da Costa Carneiro, pelo acompanhamento, apoio e aconselhamento prestados ao longo de todo o trabalho.

Aos colaboradores do PIEP, Liliana Santos e Jordana Gonçalves, no tempo dispensado para a ajuda na realização dos ensaios de propriedades físicas e Andreia Vilela pelo tempo dispensado para a ajuda na realização nos ensaios mecânicos.

Aos meus familiares, com especial ênfase, aos meus pais, Alexandre e Maria e ao meu irmão, Hugo, pelo apoio incondicional dado ao longo de todo o trabalho e percurso académico.

Aos meus amigos, principalmente aqueles que mais me acompanharam na realização desta dissertação por estarem também a trabalhar no PIEP, Lourenço Bastos, Tiago Fernandes, Pedro e Rui Oliveira, por proporcionarem momentos de humor e companheirismo, indispensáveis a realização desta dissertação.

A todos o meu mais profundo e sentido obrigado!

Índice

Resumo.....	I
Abstract.....	III
Agradecimentos.....	V
Índice.....	VII
Índice de figuras.....	XI
Índice de tabelas.....	XIII
Capítulo I - Estado da arte	1
1.1. Introdução.....	2
1.2. Ketchup	3
1.3. Modelos numéricos.....	5
1.3.1. Ferramenta de análise estrutural.....	8
1.3.2. Ferramenta de análise CFD	8
1.3.3. Modelo de Co-Simulação	9
1.3.4. Modelo CEL.....	10
1.3.5. Modelo SPH.....	10
Capítulo II - Estudo da embalagem	13
2.1. Seleção da embalagem	14
2.2. Geometria da embalagem.....	14
2.3. Espessura da embalagem.....	15
Capítulo III - Propriedades de material	19
3.1. Objetivo	20
3.2. Ensaio de densidade.....	20
3.2.1 Procedimento do ensaio de densidade.....	20
3.2.2 Resultados do ensaio de densidade	21
3.3. Ensaio experimental de tração.....	21
3.3.1 Procedimento do ensaio experimental de tração.....	21
3.3.2 Resultados do ensaio experimental de tração	23
3.4. Propriedades dos materiais.....	27
Capítulo IV - Estudo experimental	29
4.1. Objetivo	30
4.2. Procedimento do ensaio de compressão das embalagens sem fluido	30
4.3. Resultados dos ensaios das embalagens sem fluido.....	31
4.4. Procedimento do ensaio de compressão das embalagens com fluido.....	35

4.5.	Resultados dos ensaios das embalagens com fluidos.....	37
4.5.1.	Ensaio com água	37
4.5.2.	Ensaio com ketchup.....	40
4.5.3	Comparação dos resultados dos ensaios das embalagens com fluidos.....	44
Capítulo V - Estudo dos modelos numéricos		47
5.1.	Objetivo	48
5.2.	Análise das embalagens sem fluido	48
5.2.1	Procedimento numérico das embalagens sem fluido.....	48
5.2.2	Estudo de malha.....	53
5.2.3	Resultados da análise da embalagem sem fluido	56
5.3.	Análise FSI	61
5.3.1	Procedimento numérico da análise FSI.....	61
5.3.2	Estudo de malha do campo Euleriano.....	66
5.3.3	Estudo de malha SPH	70
5.3.4	Resultados FSI.....	71
5.3.5	Comparação dos resultados dos modelos estudados.....	86
Capítulo VI - Discussão de resultados		89
6.1.	Comparação dos estudos das embalagens sem fluido	90
6.2.	Comparação dos estudos das embalagens com fluido	92
Capítulo VII - Conclusões.....		99
7.1.	Estudo estrutural (embalagens sem fluido).....	100
7.2.	Estudo FSI (embalagens com fluido)	100
7.3.	Obstáculos encontrados.....	101
Capítulo VIII - Referências bibliográficas.....		103
Capítulo IX - Anexos		107
9.1.	Estudos preliminares.....	108
9.2.	Estudo ketchup.....	110

Índice de figuras

Figura 1: Curva característica do ketchup.....	3
Figura 2: Curvas de fluxo de pasta de tomate, temperatura 25 °C.....	4
Figura 3: Parâmetros do modelo de Carreau, para as pastas e o ketchup com diferentes concentrações.....	4
Figura 4: Curvas de fluxo para uma pasta (pontos preenchidos) e para o ketchup (pontos vazios) correspondente com diferentes concentrações.....	5
Figura 5: Embalagem selecionada.....	14
Figura 6: Dimensões características da embalagem de estudo.....	15
Figura 7: A - Dimensões da base da embalagem. B – Representação em desenho da base e as suas dimensões.....	15
Figura 8: Representação das zonas de estudo da espessura da embalagem.....	16
Figura 9: Variação da espessura com a altura da embalagem.....	17
Figura 10: Variação da espessura com o raio da zona 4.....	18
Figura 11: Representação das zonas onde foram retirados os provetes.....	22
Figura 12: Equipamento dos ensaios de tração (Shimadzu AGX-50kN).....	23
Figura 13: Comparação de velocidades 50mm/min vs 500mm/min. A – Corpo inferior; B – Corpo Superior; C – Corpo central horizontal; D – Corpo central vertical; E – Lateral.....	26
Figura 14: A - Curva tensão/deformação dos pontos selecionados; B – Curva parte plástica tensão/deformação usada no Abaqus.....	28
Figura 15: Embalagem entre os pratos da máquina no instante de tempo de ensaio inicial.....	31
Figura 16: Curva Força/Deslocamento representativa do ensaio de compressão sem fluido.....	32
Figura 17: Representação das embalagens nos pontos A, B, C e D da curva de força/deslocamento.....	32
Figura 18: Sobreposição das curvas Força/Deslocamento de todas as embalagens.....	33
Figura 19: Curva Força/Deslocamento média do ensaio experimental estrutural.....	34
Figura 20: Embalagens entre pratos e dentro da caixa de proteção no início do ensaio experimental. A - Embalagem com ketchup; B - Embalagem com água.....	36
Figura 21: Curva Força/Deslocamento representativa do ensaio de compressão com água.....	37
Figura 22: Representação das embalagens nos pontos A, B, C e D da curva de força/deslocamento.....	37
Figura 23: Sobreposição das curvas Força/Deslocamento de todas as embalagens com água.....	38
Figura 24: Curva representativa do ensaio de compressão com água.....	39
Figura 25: Curva Força/Deslocamento representativa do ensaio de compressão com ketchup.....	40
Figura 26: Representação das embalagens nos pontos A, B, C e D da curva de força/deslocamento.....	41
Figura 27: Sobreposição das curvas Força/Deslocamento de todas as embalagens com ketchup.....	42
Figura 28: Curva representativa do ensaio de compressão com ketchup.....	43
Figura 29: Comparação das curvas forças/deslocamento características dos ensaios com água e ketchup.....	44
Figura 30: Esquema do procedimento numérico.....	49
Figura 31: Representação CAD da embalagem. Com a vista frontal e vista lateral.....	49
Figura 32: Representação da malha à esquerda da embalagem e à direita do prato.....	50
Figura 33: Assembly da embalagem com os pratos.....	51

Figura 34: Interações da embalagem. A - Interação consigo própria; B - Interação com prato inferior; C - Interação com prato superior.	51
Figura 35: Condições de fronteira. A - Simetria da embalagem nos dois eixos; B – Simetria dos pratos nos dois eixos; C – Encaسته do prato inferior e limitação do movimento do prato superior.	52
Figura 36: Representação da velocidade imposta (seta vermelha).	52
Figura 37: Malhas estudadas. A, malha de elementos triangulares (S3R); B, malha de elementos quadrangulares (S4R); C, malha com elementos triangulares e quadrangulares (S3R/S4R).	53
Figura 38: Desmonstração da zona de estudo ao longo dos instantes.	54
Figura 39: Representação da evolução da malha de elementos triangulares, no instante 2 (16s).	55
Figura 40: Representação da evolução das três malhas em estudo, no instante 5 (40s).	56
Figura 41: Tenões na embalagem ao longo do tempo de simulação.	57
Figura 42: Deformações na embalagem ao longo do tempo de simulação.	59
Figura 43: Curva Força/Deslocamento da simulação numérica estrutural.	60
Figura 44: Esquema procedimento numérico CEL.	61
Figura 45: Representação do CAD do fluido. A - CAD complete; B – ¼ do CAD inicial.	62
Figura 46: Representação do campo Euleriano já com a malha atribuída.	63
Figura 47: Combinação do campo Euleriano com o CAD do fluido (a vermelho o campo e a rosa o CAD do fluido).	64
Figura 48: Representação do assembly do modelo CEL. A – Campo Euleriano com embalagem e CAD do fluido no interior; B – A vermelho a embalagem; C – A vermelho CAD fluido.	64
Figura 49: Simetria do campo nos dos dois planos.	65
Figura 50: Representação da evolução da malha do campo Euleriano, no instante 2 (13,6s). ..	67
Figura 51: Esquema do procedimento numérico SPH.	67
Figura 52: Fluido do modelo SPH.	68
Figura 53: Representação dos nós que vão ser convertidos em partículas.	69
Figura 54: Assembly do modelo SPH.	69
Figura 55: Representação da evolução da malha de elementos triangulares, no instante 2 (13,6s).	71
Figura 56: Tensões na embalagem ao longo do tempo de simulação.	72
Figura 57: Deformações na embalagem ao longo do tempo de simulação.	73
Figura 58: Curva força/deslocamento da simulação numérica CEL da água.	74
Figura 59: Tensões na embalagem ao longo de tempo de simulação.	75
Figura 60: Deformações na embalagem ao longo de tempo de simulação.	76
Figura 61: Curva força/deslocamento da simulação numérica CEL do ketchup.	77
Figura 62: Comparação das curvas força/deslocamento do modelo CEL entre os dois fluidos estudados.	78
Figura 63: Tensões na embalagem ao longo de tempo de simulação.	80
Figura 64: Deformações na embalagem ao longo de tempo de simulação.	80
Figura 65: Curva força/deslocamento do modelo numérico SPH da água.	81
Figura 66: Tensões na embalagem ao longo de tempo de simulação.	82
Figura 67: Deformações na embalagem ao longo de tempo de simulação.	83
Figura 68: Curva força/deslocamento do modelo numérico SPH do ketchup.	84
Figura 69: Comparação das curvas força/deslocamento do modelo CEL entre os dois fluidos estudados.	85
Figura 70: Comparação das curvas força/deslocamento dos modelos CEL e SPH no caso com água.	86

Figura 71: Comparação das curvas força/deslocamento dos modelos CEL e SPH no caso com ketchup.....	86
Figura 72: Comparação dos resultados das embalagens sem fluido. A - Ensaio experimental. B - Simulação numérica.....	90
Figura 73: Comparação da curva força/deslocamento experimental com a da simulação numérica estrutural.....	91
Figura 74: Comparação dos resultados das embalagens com água. A - Ensaio experimental. B - Modelo CEL, C - Modelo SPH.....	93
Figura 75: Comparação entre os modelos numéricos CEL e SPH com os dados experimentais, embalagens com água.....	93
Figura 76: Comparação dos resultados das embalagens com ketchup. A - Ensaio experimental. B - Modelo CEL, C - Modelo SPH.	95
Figura 77: Comparação entre os modelos numéricos CEL e SPH com os dados experimentais, embalagens com ketchup.	96
Figura 78: Resultados CEL.	108
Figura 79: Resultados SPH.....	109
Figura 80: Resultados Co-Simulação.	109
Figura 81: Comparação das curvas força/deslocamento dos modelos CEL, SPH e Co-Simulação.	110
Figura 82: Interseção da taxa de corte com a curva de fluxo do ketchup.	111

Índice de tabelas

Tabela 1: Propriedade de propagação do som no ketchup	5
Tabela 2: Tabela representativa de modelos estudados em alguns artigos encontrados.....	7
Tabela 3: Resultados obtidos dos ensaios de densidade das amostras retiradas da zona inferior	21
Tabela 4: Resultados obtidos dos ensaios de densidade das amostras retiradas da zona superior	21
Tabela 5: Resultados obtidos dos ensaios de tração para determinar o módulo de elasticidade	23
Tabela 6: Resultados obtidos dos ensaios de tração à velocidade de 50mm/min	24
Tabela 7: Resultados obtidos dos ensaios de tração à velocidade de 500mm/min	25
Tabela 8: Propriedades do PET e PE inseridos no Abaqus	27
Tabela 9: Valores de tensão/deformação selecionados e inseridos no Abaqus.....	28
Tabela 10: Equipamentos e condições do ensaio de compressão sem fluido.....	31
Tabela 11: Força máxima e deslocamento correspondente para os ensaios estruturais.....	34
Tabela 12: Equipamentos e condições dos ensaios de compressão com fluido	36
Tabela 13: Força máxima e deslocamento correspondente para ensaios com água	39
Tabela 14: Força máxima e deslocamento correspondente para os ensaios com ketchup	43
Tabela 15: Comparação da média dos resultados dos ensaios com água e ketchup	44
Tabela 16: Resultado do estudo de malha de elementos triangulares.....	54
Tabela 17: Resultados do estudo de malha de elementos quadrangulares	55
Tabela 18: Resultados do estudo de malha de elementos híbridos	55
Tabela 19: Força máxima e deslocamento correspondente, simulação estrutural.....	60
Tabela 18: Propriedades da água e do ketchup	63
Tabela 21: Resultados do estudo de malha do campo Euleriano	66
Tabela 22: Propriedades da água e do ketchup	68
Tabela 23: Resultados do estudo de malha do fluido	70
Tabela 24: Força máxima e deslocamento correspondente, simulação CEL da água	74
Tabela 25: Força máxima e deslocamento correspondente, simulação CEL do ketchup	77
Tabela 26: Comparação da força máxima e deslocamento correspondente entre os dois fluidos estudados, do modelo CEL.....	78
Tabela 27: Força máxima e deslocamento correspondente, simulação SPH da água	81
Tabela 28: Força máxima e deslocamento correspondente, simulação SPH do ketchup	84
Tabela 29: Comparação da força máxima e deslocamento correspondente entre os dois fluidos estudados, do modelo SPH	85
Tabela 30: Comparação da força máxima e deslocamento correspondente entre os modelos CEL e SPH.....	87
Tabela 31: Comparação da força máxima e deslocamento correspondente entre experimental e simulação numérica	91
Tabela 32: Comparação da força máxima e deslocamento correspondente entre experimental e simulação numérica, para o caso com água	93
Tabela 33: Comparação da força máxima e deslocamento correspondente entre experimental e simulação numérica, para o caso com ketchup	96

Capítulo I - Estado da arte

1.1. Introdução

Os fluidos são de um modo geral materiais com propriedades interessantes, pois ao aplicar uma força ao mesmo fluido variando apenas a velocidade desta, o fluido pode ter comportamentos totalmente diferentes, devido às propriedades que o constituem. Como tal, estas propriedades dos fluidos podem ter influência no comportamento de um produto, quando estes no seu interior têm algum fluido, isto é, uma garrafa cheia de água, e outra com outro fluido diferente (ketchup, maionese, glicerina) ao serem deixadas cair de uma certa altura, as deformações da garrafa podem ser totalmente diferentes.

O grande desafio deste projeto foi perceber qual a influência dos fluidos no interior de uma embalagem no comportamento desta quando é submetida a um esforço mecânico. Para isso, estudaram-se dois fluidos diferentes, sendo eles água e ketchup e pretendeu-se compreender qual a influência de cada um na resposta mecânica de uma embalagem quando sujeita a um ensaio de compressão.

Este projeto encontra-se enquadrado no âmbito de um projeto de estudo realizado, sobre a interação fluido-estrutura de uma garrafa de água num ensaio de queda. Tal projeto foi desenvolvido no PIEP, em que foi estudado a queda livre de uma garrafa de água de uma determinada altura e comparada a resposta mecânica entre as diferentes condições utilizadas, pois o estudo foi efetuado com a garrafa totalmente cheia de água, parcialmente cheia e sem fluido, mas com um peso representativo de cada um dos casos com água. Nesse projeto também se simulou o ensaio experimental, de modo a comparar os resultados experimentais com os resultados numéricos. Essa simulação foi dividida em duas partes, uma estrutural e outra com o modelo CEL (*Coupled Eulerian-Lagrangian*) em que se simulou os casos com água, concluindo-se que este modelo tinha uma boa capacidade na previsão de resultados.

Para o presente caso de estudo, decidiu-se estudar outros fluidos para perceber a diferença entre eles, assim como outros modelos numéricos. Como tal, houve a necessidade de pesquisar estudos em que fossem efetuadas análises quer experimentais, quer numéricas de outros fluidos além da água. E também estudos de outros modelos numéricos, para além do modelo CEL.

1.2. Ketchup

Como um dos fluidos em estudo foi o ketchup, foi necessário pesquisar as propriedades mais importantes deste material, de modo a que a simulação numérica fosse o mais próximo da realidade possível.

Sendo o ketchup um fluido não-newtoniano, foi necessário perceber qual o melhor modelo de material para caracterizar o ketchup, concluiu-se então que existem vários modelos de material que podem caracterizar os materiais não-newtonianos. Pois há vários investigadores que estudaram o comportamento do ketchup e o definiram com modelos diferentes, como por exemplo o modelo de Bingham [1] [2], modelo de Casson [3] ou modelo de Herschel-Bulkley [3] [4].

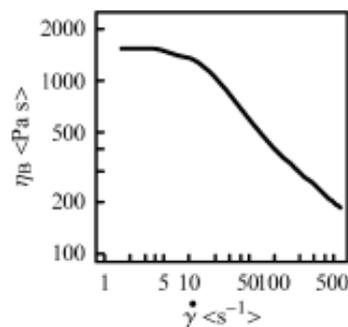


Figura 1: Curva de fluxo característica do ketchup [2].

Em 2003, os autores M.C. Sánchez, C. Valencia, A. Ciruelos, A. Latorre e C. Gallegos, estudaram num artigo as propriedades reológicas do molho de tomate. Este estudo foi realizado com o intuito de perceber a influência da adição do sumo de tomate à pasta de tomate e detetar as alterações das propriedades reológicas do produto final, ou seja, o molho de tomate, na figura 2 é apresentado a curva de fluxo para as pastas de tomate. Concluindo que esta adição não afetava significativamente as propriedades [5].

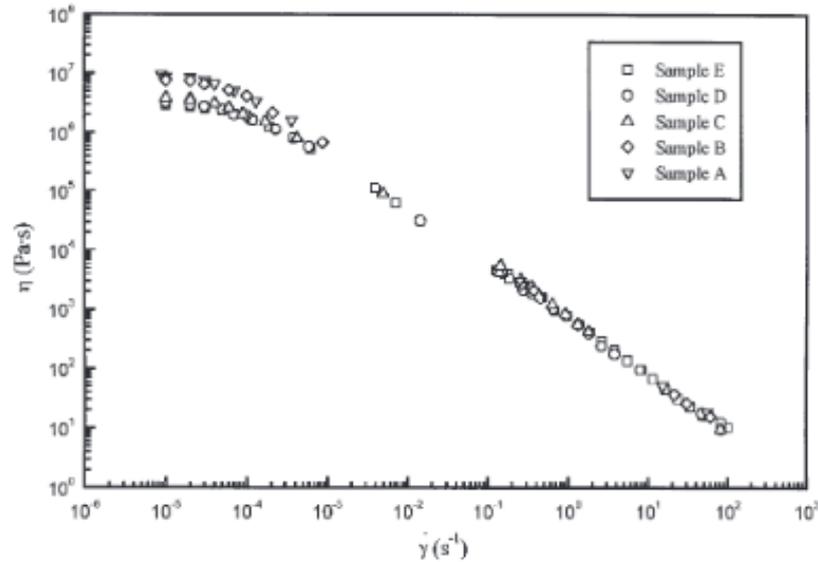


Figura 2: Curvas de fluxo de pasta de tomate, temperatura 25 °C [5].

Em 2007, os autores Elena Bayod, Ene Pilman Willers e Eva Tornberg, decidiram estudar a pasta de tomate, de modo a obter a caracterização estrutural e reológica deste material. Para caracterizar o material, os autores utilizaram o modelo de Carreau [6].

Para atingir o objetivo proposto, optaram por usar 3 pastas de tomate diferentes e com cada uma delas criar ketchup, e assim perceber se com diferentes pastas obtinham diferentes propriedades de ketchup [6].

Após o ketchup obtido e os estudos realizados, os investigadores concluíram que as diferentes pastas tinham influência no ketchup, tal é demonstrado na figura 3 e no gráfico apresentados na figura 4.

	ϕ (-)	η_0 (10^3 Pa s)	λ_c (10^3 s)	N (-)	SSL (-)
Paste 1	0.54	486	11.5	0.41	1.6
	0.21	11	2.7	0.40	0.6
	0.18	3	1.6	0.40	0.4
Paste 2	0.59	742	26.8	0.37	0.7
	0.23	23	4.5	0.41	0.7
	0.19	11	4.9	0.40	0.6
Paste 3	0.52	662	18.4	0.38	0.2
	0.21	21	4.8	0.40	0.3
	0.17	9	4.2	0.40	0.1
Ketchup 1	0.37	50	4.4	0.41	0.3
	0.33	40	4.5	0.42	0.3
	0.26	28	3.1	0.43	0.4
Ketchup 2	0.32	43	4.4	0.41	0.3
	0.29	29	4.3	0.42	0.3
	0.23	26	3.6	0.43	0.2
Ketchup 3	0.34	43	4.7	0.41	0.2
	0.31	42	5.3	0.41	0.2
	0.24	30	3.4	0.43	0.3

Figura 3: Parâmetros do modelo de Carreau, para as pastas e o ketchup com diferentes concentrações [6].

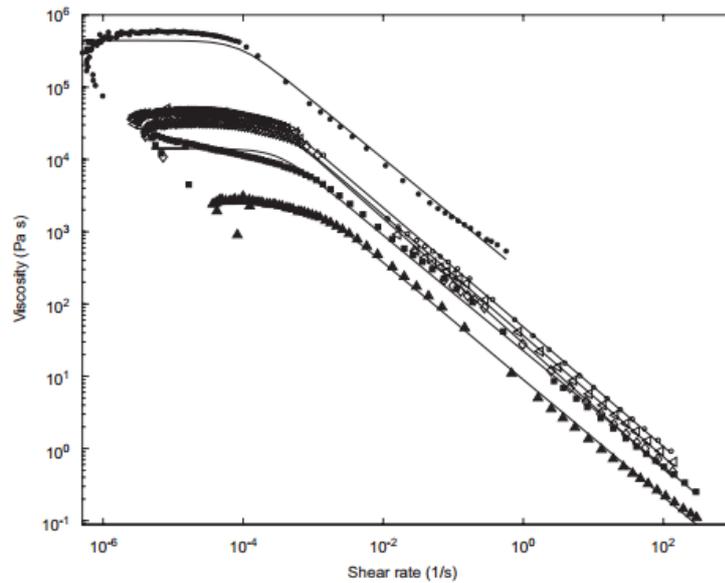


Figura 4: Curvas de fluxo para uma pasta (pontos preenchidos) e para o ketchup (pontos vazios) correspondente com diferentes concentrações [6].

A partir destas pesquisas foi possível obter a velocidade de propagação do som no ketchup. Esta propriedade é muito importante na descrição do fluido no software Abaqus, pois está relacionada com o módulo volumétrico do material. A propriedade está apresentada na tabela abaixo.

Tabela 1: Propriedade de propagação do som no ketchup [7]

Velocidade de propagação do som (m/s)	1526,4
---------------------------------------	--------

1.3. Modelos numéricos

Neste projeto como o objetivo é comparar os resultados experimentais com os resultados da simulação numérica, para a obtenção dos resultados numéricos definiu-se que as simulações se iam realizar no software Abaqus, pois é um software com uma elevada capacidade de simulação numérica.

O conjunto de produtos ABAQUS Unified FEA oferece soluções poderosas e completas para os problemas de engenharia, desde os mais comuns aos mais sofisticados, cobrindo uma vasta gama de aplicações industriais.

Na indústria automóvel, grupos de trabalho são capazes de considerar cargas em veículos completos, vibração dinâmica, sistemas de múltiplos corpos, impacto / colisão, acoplamento térmico estático não-linear, e acoplamento acústico-estrutural utilizando uma estrutura de dados com modelo comum e tecnologias de resolução integrada.

Para além da capacidade de trabalho com sólidos, este conjunto de produtos são capazes de simular fluidos com todas as propriedades necessárias para os caracterizarem. Podendo considerar velocidades de deslocamento nos fluidos, criar efeitos de ondulação do mar [35] e simular a interação entre fluidos e estruturas, como por exemplo a entrada de um objeto sólido no oceano [18], os escoamentos laminares ou turbulentos de fluido dentro de tubagens considerando a interação entre fluido e tubagem.

Empresas de topo aproveitam o ABAQUS Unified FEA para consolidar os seus processos e ferramentas, reduzir custos e ineficiências, e ganhar vantagem competitiva [8].

O ABAQUS é essencialmente um conjunto de *softwares* de análise de elementos finitos constituído por cinco módulos:

- ABAQUS / CAE: módulo utilizado para a modelação e análise de componentes mecânicos e montagens e visualizar o resultado da análise de elementos finitos;
- ABAQUS / Standard: módulo de análise de elementos finitos de uso geral que utiliza esquemas de integração implícitos;
- ABAQUS / Explicit: módulo de análise de elementos finitos que utiliza esquemas de integração explícita para resolver sistemas altamente não-lineares com muitos contactos complexos sob cargas transientes;
- ABAQUS / CFD: módulo que fornece capacidades computacionais avançadas de dinâmica de fluidos, com amplo suporte para pré-processamento e pós-processamento previsto no ABAQUS / CAE.
- ABAQUS / eletromagnetic: módulo que resolve problemas computacionais eletromagnéticos avançados.

De modo a perceber melhor a potencialidade do software de simulação numérica Abaqus, assim como os modelos numéricos que podiam ser aplicados ao problema em estudo, foram pesquisados artigos em que recorressem a modelos numéricos para solucionar o estudo que estavam a fazer.

Visto que o foco principal deste trabalho é perceber a interação fluido-estrutura, procurou-se maioritariamente por artigos em que fossem utilizados modelos numéricos que tinham a capacidade de simular fluidos. Assim sendo, os modelos mais recorrentes para este tipo de simulação eram o modelo CEL (*Coupled Eulerian-Lagrangian*), SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*).

Mas também foram encontrados estudos com modelos de Co-Simulação em que era possível combinar um modelo com fluido com um modelo estrutural, podendo ser simulados ao mesmo tempo e com uma interação entre eles.

Na tabela 2 são apresentados alguns autores de artigos, que estudaram algum dos modelos referidos anteriormente. Sendo que alguns destes autores estudaram vários modelos no mesmo artigo e também houve alguns que compararam resultados experimentais com os da simulação numérica.

Tabela 2: Tabela representativa de modelos estudados em alguns artigos encontrados

Autores	Ano	Ensaio Experimental	Modelos				
			Estrutural	CFD	Co-Simulação	CEL	SPH
Matthias Müller <i>et al.</i> [10]	2003			✓			✓
A.E.P. Veldman <i>et al.</i> [11]	2007	✓		✓			
A. Karac [12]	2008	✓	✓			✓	
Cao Yuan [13]	2010		✓			✓	
I.Smojver [14]	2010					✓	
Simulia [15]	2011				✓		
Jihun Yu <i>et al.</i> [16]	2012						✓
Simulia [17]	2012						✓
M. Ahmadzahed <i>et al.</i> [18]	2013	✓				✓	
Simulia [19]	2013	✓					✓
Thorben Hamann <i>et al.</i> [20]	2014					✓	
R. Elahi <i>et al.</i> [21]	2014					✓	✓
Liu Xiaochuan <i>et al.</i> [22]	2014		✓				
Jesse A. Sherburn <i>et al.</i> [23]	2014	✓				✓	
Zihang Zhu <i>et al.</i> [24]	2015	✓				✓	
Pascal Matura <i>et al.</i> [25]	2015	✓				✓	
Antonia Strantzi [26]	2016						✓

Com os artigos da tabela acima referenciados, foi possível compreender melhor a capacidade dos modelos numéricos referidos, apesar de a maior parte dos artigos estudarem modelos na simulação de fluidos, os casos de estudo eram diferentes.

Este estudo permitiu compreender que houve uma evolução no modo de utilização dos modelos, estes também foram evoluindo ao longo do tempo, pois cada vez mais é possível implementar novas condições de entrada na simulação numérica que permitem melhorar a capacidade de resposta do modelo.

1.3.1. Ferramenta de análise estrutural

Esta ferramenta de análise é o modelo padrão do *software* Abaqus (Abaqus/Standard) utilizado maioritariamente para simulação de qualquer tipo de estrutura, sendo que possa haver a necessidade de recorrer a outros modelos/ferramentas quando o objetivo é simular fluidos ou componentes com elevada deformação.

É uma ferramenta que dá boa resposta a casos de simulação mais simples, como ensaios experimentais totalmente estruturais, isto é, um ensaio de tração; um ensaio de compressão tal como foi estudado pelo autor A. A. N. ALJAWI que simulou a compressão de amostras cilíndricas [9]; um ensaio de queda de algum produto tal como estudaram os investigadores P.E. Reed, G. Breedveld, B.C. Lim, em que o objetivo foi simular um ensaio de queda de embalagens de plástico e comparar as alturas de ressalto entre os resultados obtidos experimentalmente e da simulação numérica [27], assim como a força de impacto; ou como o S.H. Masood, V. Keshava Murthy que decidiram estudar o colapso de uma embalagem [28]. Sendo que esta ferramenta serve de base para validar toda a parte estrutural de um modelo em estudo, ou seja, pode validar as condições de fronteira impostas, interações entre componentes, malhas ou mesmo modelos de material.

1.3.2. Ferramenta de análise CFD

Esta ferramenta de análise, permite a simulação de fluidos com grande precisão, acompanhando bem os regimes laminares ou turbulentos em escoamentos.

A principal vantagem deste modelo é que tem uma elevada capacidade de simulação de fluidos, dando uma boa resposta na interação fluido-estrutura. A principal limitação, é que o fluido deve preencher na totalidade o domínio de estudo [8].

Este método é normalmente mais usado para simulação de escoamento quer laminar, quer turbulento [8].

1.3.3. Modelo de Co-Simulação

Este modelo de simulação, permite o acoplamento de diferentes modelos numéricos, de modo a que cada modelo numérico realize a análise para a qual foi submetido interagindo com os outros modelos utilizados e obtendo resultados de acordo com a interação entre eles. Assim um problema de análise complexa é dividido em várias análises e cada modelo é responsável unicamente pela sua parte do problema tendo em conta as outras análises, deste modo a utilização deste método de simulação reduz o tempo de computação em relação ao modelo que analisaria todo o problema em conjunto.

Existem estudos de investigadores que utilizaram este método de modo a melhorar a rapidez de computação, assim como o desempenho de cada modelo usado para a Co-Simulação, tirando assim partido das qualidades de que cada modelo [29].

Este método também nos permite o acoplamento de dois *softwares* diferentes, quer que eles sejam de simulação ou que apenas seja um de simulação, e assim conjugar os dois softwares na análise do problema. Tal como a Beta CAE Systems SA, que acoplou o *software* Abaqus com o software ANSA (software de pré-processamento), para simular uma scooter em movimento [30]. Já o artigo referido anteriormente na tabela 2, foram acoplados dois sistemas do software Abaqus, o Abaqus/Standard com o Abaqus/Explicit [15]. Sendo também possível acoplar o modelo CFD com o modelo estrutural (Abaqus/Standard ou Abaqus/Explicit) de modo a simular problemas com fluidos.

As principais vantagens deste método, são o acoplamento de análises de multi-dominios e multi-física, e ser possível executar a Co-Simulação com diferentes *softwares*. As limitações são, que neste método é possível definir interação FSI e transferência de calor, mas não se pode definir ambos; e também no caso de se utilizar fluidos, este deve ocupar todo o espaço livre da geometria estrutural [8].

Este método é normalmente mais usado para simulação de escoamento em tubagens [8].

1.3.4. Modelo CEL

O modelo CEL é um modelo que acopla dois métodos de cálculo, o método Lagrangiano com o método Euleriano.

O método Lagrangiano é utilizado na simulação numérica para resolver problemas totalmente estruturais, ou seja, é o método de cálculo utilizado para os cálculos de componentes com malha Lagrangiana.

E o método Euleriano que é mais utilizado na simulação numérica para resolver problemas com fluidos, pois normalmente os fluidos têm uma distorção de malha superior às estruturas, isto é, os fluidos deformam com maior facilidade, sendo que a malha Lagrangiana não tem capacidade de acompanhar essas deformações, enquanto que a malha Euleriana dá uma boa resposta a este problema [32].

Este modelo tem uma grande capacidade de simular qualquer tipo de fluido, podendo ser gás ou líquido, os investigadores Fan Yuxin e Xia Jian estudaram o tempo de abertura total de um parafuso, como tal usaram este modelo para efetuar a simulação [31].

As vantagens deste modelo são: grande eficácia em análises com deformações elevadas; boa capacidade de simular a ondulação e escoamento de fluidos e tem uma boa interação entre os elementos da malha Lagrangiana com os da malha Euleriana [8].

As principais limitações deste modelo, são que se deve ter em atenção o uso de elemento do tipo casca da malha Lagrangiana, pois com este tipo de elementos pode haver interpenetração do material Euleriano; materiais com orientação não são suportados pelos elementos Eulerianos; e este tipo de elementos não podem ser importados [8].

Este método é normalmente mais usado para simulação de escoamentos fluidos, quer de gases ou líquidos e também simulações que envolvam ondulação [8].

1.3.5. Modelo SPH

O modelo SPH é um modelo de simulação em que a malha de um componente em estudo é convertida em partículas, normalmente mais utilizado para fluidos, pois estes estão sujeitos a uma distorção maior da malha, mas este modelo também pode ser utilizado na análise de problemas com sólidos que ao sofrerem algum tipo de carga ficam completamente fragmentados, como por exemplo o impacto de granizo (onde a água está no estado sólido com a forma de uma bola) [19].

Assim sendo, a malha ao ser convertida em partículas permite que esta possa ter uma maior deformação.

Já em 1977 se recorria a este modelo para estudar o escoamento de fluidos, sendo que este modelo tem uma grande capacidade par simular a ondulação, podendo até ser simulado a ondulação do mar. Mas para uma boa simulação, a densidade das partículas deve ser grande, pois quanto maior for, melhor será o movimento que se pretender obter do fluido em estudo [35] [36] [37].

As principais vantagens da utilização deste modelo são: eficácia nas análises com deformações elevadas; e tal como o modelo CEL, também este tem uma boa capacidade de simular a ondulação; no caso em que haja a necessidade de tornar a malha Euleriana do modelo CEL demasiado refinada (tamanho dos elementos da malha muito pequenos), este modelo pode ser uma solução nesse estudo, pois o tempo de computação é mais reduzido [8] [33] [34].

As principais limitações deste modelo são que não apresenta muita eficácia em problemas com deformações pequenas; não podem ser aplicadas cargas superficiais às partículas; e quando o material está num estado de tensão, as partículas tornam-se instáveis aumentando assim o tempo de computação [8].

Este método é normalmente mais usado para simulação de escoamento com fluidos, quer de gases ou líquidos, simulações que envolvam ondulação, estudos de casos em que o objetivo seja simular estilhaço de um componente [8].

Capítulo II - Estudo da embalagem

2.1. Seleção da embalagem

Para dar início a este projeto, inicialmente selecionou-se a embalagem de estudo, para isso decidiu-se que devia de ser uma embalagem de ketchup, pois normalmente este tipo de embalagens estão mais sujeitas a cargas de esforço do que os outros tipos de embalagens.

Pois na utilização deste tipo de embalagens, é normal “apertar” ou “bater” no componente, isto é, impor uma carga no componente, de modo a que o conteúdo no seu interior saia, como tal, selecionou-se uma embalagem do género de ketchup.

Após várias pesquisas deste tipo de produtos, decidiu-se escolher um que tivesse uma geometria mais simples, de modo a facilitar posteriormente a sua representação em CAD, assim como a sua simulação.

Também para uma melhor perceção da influência dos fluidos no seu interior, quando esta fosse submetida ao ensaio experimental proposto, optou-se por uma embalagem com um certo grau de deformabilidade, isto é, que se deformasse facilmente, pois permitia perceber melhor o que acontecia quando esta fosse comprimida.

Como resultado das especificações pretendidas para a embalagem de estudo, a embalagem selecionada está apresentada na figura 5.



Figura 5: Embalagem selecionada.

2.2. Geometria da embalagem

Nas figuras 6 e 7, são apresentadas as dimensões da embalagem em estudo, sendo que foram estas dimensões permitiram a sua construção em CAD.

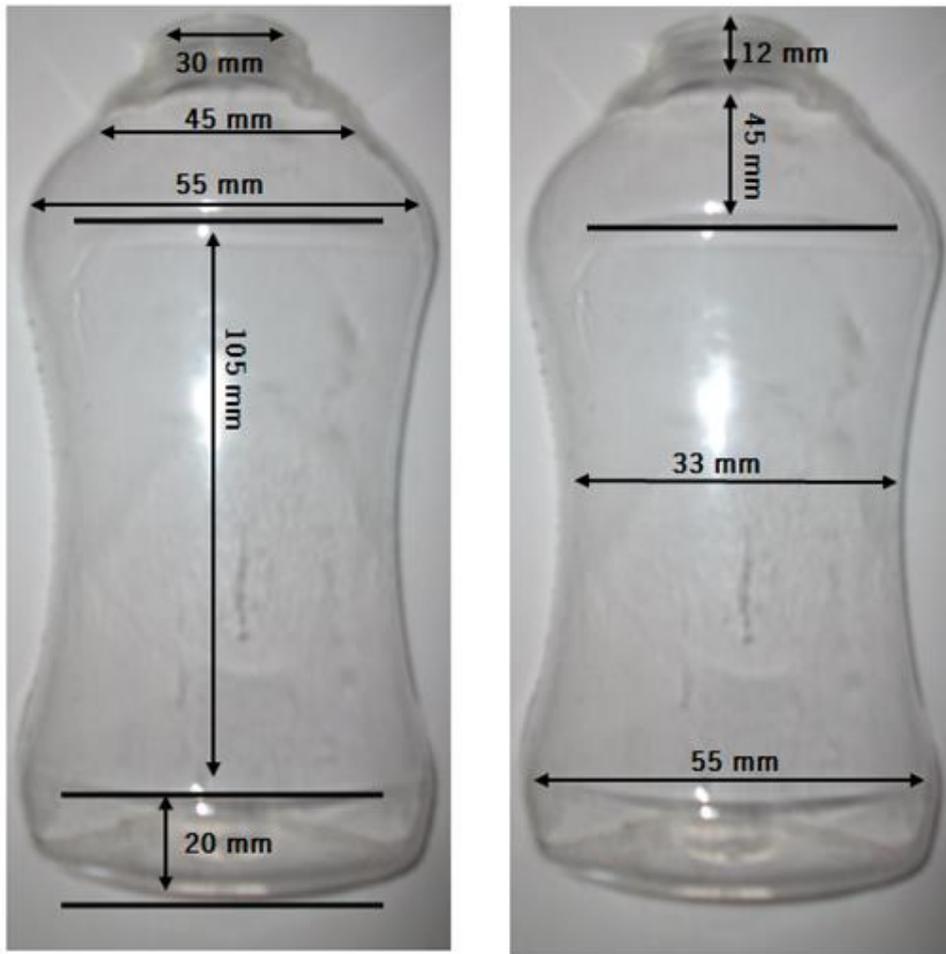


Figura 6: Dimensões características da embalagem de estudo.

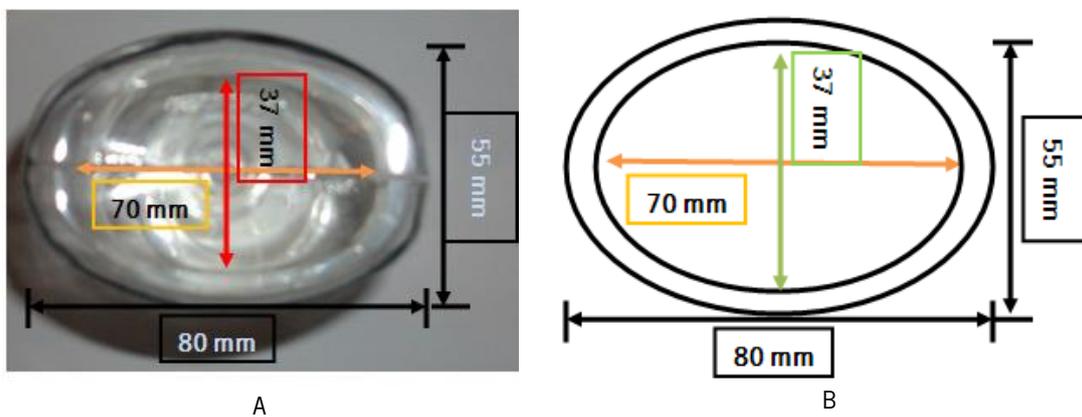


Figura 7: A - Dimensões da base da embalagem. B - Representação em desenho da base e as suas dimensões.

2.3. Espessura da embalagem

De modo a obter uma boa aproximação numérica ao caso de estudo experimental, decidiu-se estudar a espessura da embalagem, pois esta característica da embalagem é importante e tem

uma relevância elevada para os resultados obtidos. Desta forma, também foi possível aproximar as características da embalagem à realidade.

Para estudar a variação da espessura, foram utilizadas três embalagens e em cada uma das zonas representadas na figura 8, foram marcados pontos de medição.



Figura 8: Representação das zonas de estudo da espessura da embalagem.

Usando um micrómetro de pontas foi possível obter o valor de espessura nos pontos estudados, com esses valores construiu-se um gráfico combinando as zonas de estudo, que é apresentado na figura 9 e 10 e assim percebeu-se a variação da espessura.

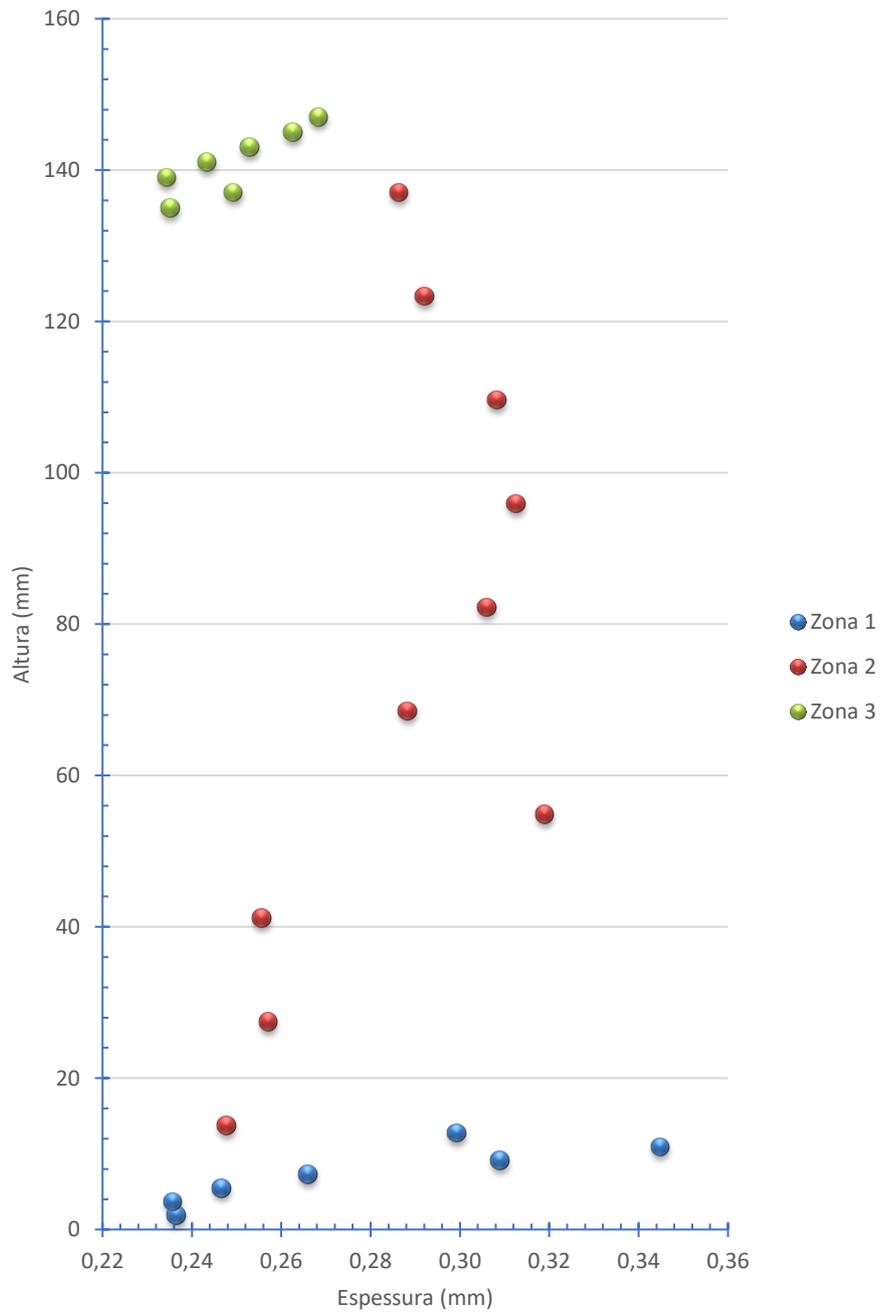


Figura 9: Variação da espessura com a altura da embalagem.

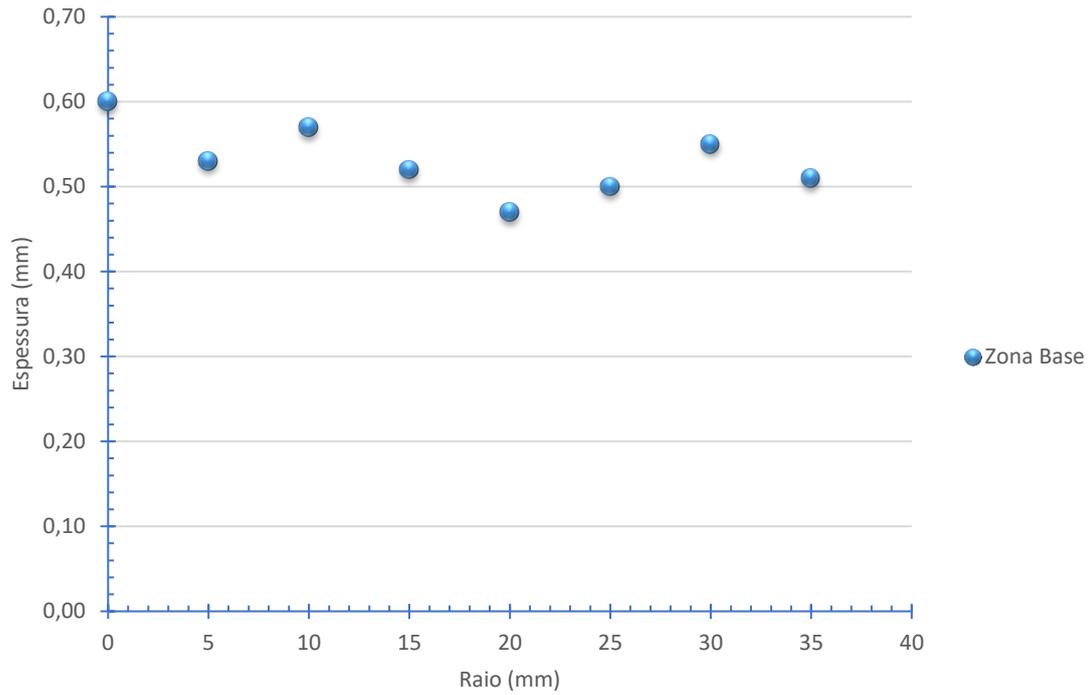


Figura 10: Variação da espessura com o raio da zona 4.

A partir dos dados obtidos, constatou-se que a variação da espessura em cada zona não era significativa, ou seja, cada zona de estudo tinha uma espessura aproximadamente uniforme.

Como a espessura de cada zona da embalagem era sensivelmente uniforme, na simulação numérica apenas se considerou o valor médio da espessura de cada zona. E assim definiu-se a espessura em cada zona de estudo com o valor médio obtido.

Capítulo III - Propriedades de material

3.1. Objetivo

De modo a obter resultados da simulação fiáveis e com elevado grau de precisão quando comparados com os resultados experimentais, foi necessário determinar as propriedades mais importantes do material (PET) que constitui a embalagem.

Como o caso de estudo é o ensaio de compressão de embalagens de ketchup vazias e também com fluidos no seu interior, as propriedades do material relevantes nos resultados seriam, as propriedades mecânicas e físicas:

- Densidade;
- Módulo de Young (Módulo de Elasticidade);
- Tensão de cedência;
- Tensão de rotura;
- Deformação à cedência;
- Deformação à rotura.

Para a obtenção destas propriedades foi necessário se fazer ensaios de tração a provetes retirados das embalagens e ensaios para determinar a densidade do PET.

3.2. Ensaio de densidade

Para a realização deste ensaio utilizou-se a norma *ASTM D792-00* [38] onde a densidade é determinada a partir do princípio de Arquimedes, utilizando a seguinte equação:

$$\rho = \frac{A}{A - B} \cdot (\rho_0 - \rho_L) + \rho_L \quad (\text{Eq. 1})$$

Neste estudo, a densidade do material foi obtida a partir de amostras que foram retiradas de duas zonas da embalagem, sendo elas uma zona mais próxima da base e a outra mais próxima do gargalo.

3.2.1 Procedimento do ensaio de densidade

Utilizaram-se dez amostras de tamanho idêntico (25x10mm) de cada uma das zonas de estudo da embalagem. De modo a obter os parâmetros necessários para determinar a densidade de cada amostra pesaram-se as amostras numa balança com um sistema especial.

3.2.2 Resultados do ensaio de densidade

Nas tabelas 3 e 4 são apresentadas a média e desvio padrão dos resultados obtidos do ensaio de densidade da zona inferior e zona superior respetivamente.

Tabela 3: Resultados obtidos dos ensaios de densidade das amostras retiradas da zona inferior

Zona Inferior		
	Média	Desvio Padrão
Massa Volúmica (g/cm ³)	2,12	0,008

Tabela 4: Resultados obtidos dos ensaios de densidade das amostras retiradas da zona superior

Zona Superior		
	Média	Desvio Padrão
Massa Volúmica (g/cm ³)	2,11	0,005

Ao observar os resultados obtidos dos ensaios de densidade na zona inferior, verificou-se que a variação de resultados existente não é muito significativa, visto que a dispersão dos resultados não se afasta muito da média destes, como se pode observar pelo valor do desvio padrão.

Ao comparar estas duas zonas de estudo, concluiu-se que não existia variação de densidade do material nas diferentes zonas. Deste modo, utilizou-se o valor médio de densidade entre as duas zonas de estudo nas propriedades de material no modelo numérico.

3.3. Ensaio experimental de tração

Com a realização deste ensaio, foi possível obter as propriedades mecânicas que eram mais importantes para caracterizar o material, sendo eles o Módulo de Young, tensão de cedência, tensão de rotura e as respetivas deformações.

3.3.1 Procedimento do ensaio experimental de tração

Para o estudo destas propriedades, foram utilizadas quatro embalagens e foram estudadas quatro zonas da embalagem, o corpo inferior, o corpo central, corpo superior e zona lateral como está apresentado na figura 11. Para cada uma destas zonas foram retirados quinze provetes, sendo

que na zona do corpo central foram retirados mais provetes. Pois esta zona permitia retirar provetes quer na vertical, quer na horizontal, isto permitiu perceber a uniformidade da embalagem e se o comportamento do material era semelhante, para cada uma das destas foram retirados também quinze provetes.

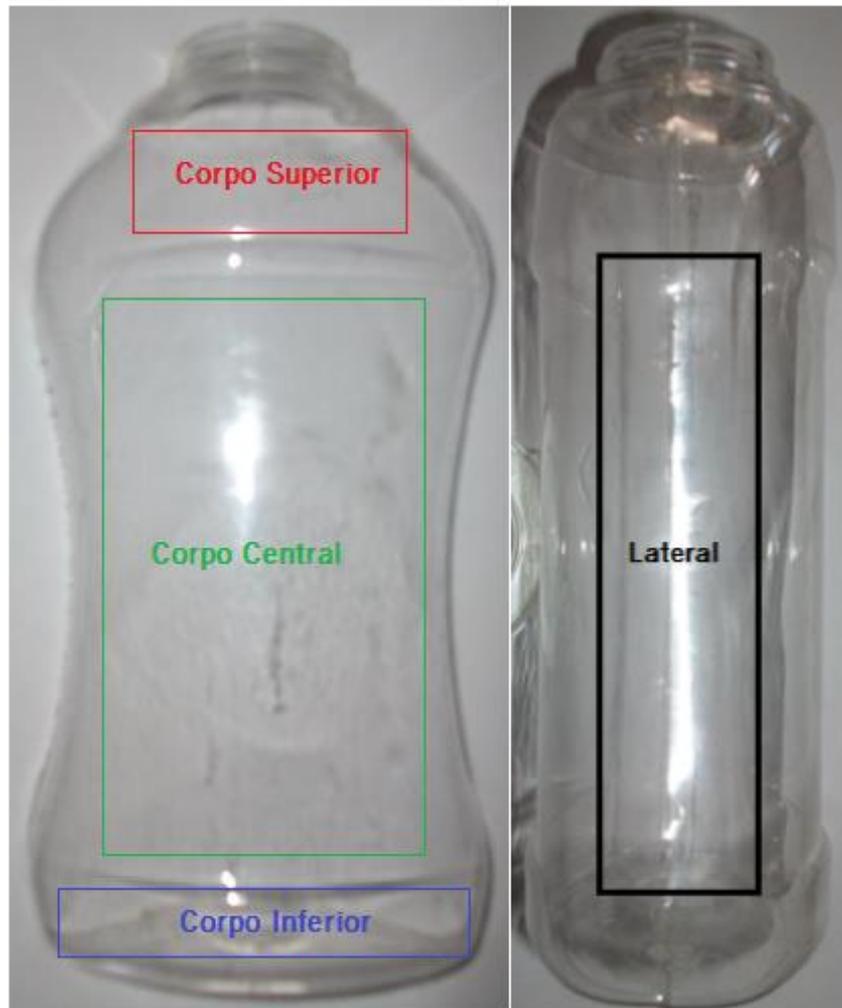


Figura 11: Representação das zonas onde foram retirados os provetes.

Para a obtenção dos provetes da embalagem, utilizou-se uma ferramenta de corte (cortante) com forma de provete com as dimensões da norma *ISO 527-2* [39] e assim obter provetes com dimensões iguais. Estes provetes não seguiram totalmente a norma acima referida, pois a espessura estava abaixo do mínimo recomendado pela norma, apesar de as outras dimensões estarem dentro das especificações.

Este ensaio foi realizado no equipamento *Shimadzu AGX-50kN* (figura 12), com garras pneumáticas, de modo a que os provetes ficassem bem presos às garras, pois como a espessura

média dos provetes não ultrapassa 1mm, estes poderiam escorregar caso se usasse as garras normais. Quando se utiliza as garras pneumáticas a célula de carga da máquina deve ser de 1kN.



Figura 12: Equipamento dos ensaios de tração (Shimadzu AGX-50kN).

Como um dos objetivos deste ensaio era obter o módulo de Young em cada zona de estudo, foi necessário efetuar o ensaio de tração a uma velocidade de 1 mm/min, pois é a velocidade recomendada pela norma *ISO 527-1* [40].

Para a obtenção da curva característica do ensaio de tração, decidiu-se estudar duas velocidades, umas mais lenta de 50 mm/min e uma mais rápida a 500 mm/min, para perceber o impacto da velocidade na resposta mecânica do material.

3.3.2 Resultados do ensaio experimental de tração

De seguida, na tabela 5 são apresentados os resultados obtidos do ensaio de tração para determinar o Módulo de Young. Para a determinação desta propriedade, foi utilizada a curva obtida do ensaio a 1 mm/min e calculou-se o declive da reta entre os valores percentuais de deformação de 0,05% e 0,25%.

Tabela 5: Resultados obtidos dos ensaios de tração para determinar o módulo de elasticidade

	Módulo de Young (MPa)	
	Média	Desvio Padrão
Corpo Inferior	1053,10	134,74
Corpo Centro Vertical	1567,46	112,61

Corpo Centro Horizontal	1051,29	137,61
Lateral	1794,12	191,93
Corpo Superior	1235,47	154,68

Ao observar estes resultados, constatou-se que existe uma variação ao comparar os resultados de cada zona de estudo, sendo que o valor médio do corpo inferior é semelhante ao valor obtido do corpo centro horizontal, isto deve-se ao facto de nestas zonas os provetes terem sido retirados na horizontal.

Já na zona corpo superior, os provetes foram retirados na horizontal, no entanto existe uma certa diferença entre estes resultados e os anteriores, pois nesta zona os provetes continham curvatura superior, o que levou a essa diferença no módulo.

Nas zonas lateral e corpo centro vertical os provetes foram retirados na vertical, verificando-se que os resultados obtidos destas zonas não apresentam uma variação elevada. No entanto quando se compara estes resultados com os anteriores, verifica-se uma maior variação entre os resultados e os anteriores, os provetes anteriores foram retirados na horizontal e estes na vertical, sendo que os provetes retirados na horizontal continham curvatura o que levou a esta variação.

De seguida são apresentados na tabela 6 os resultados obtidos dos ensaios de tração à velocidade de 50mm/min, seguidos dos resultados à velocidade de 500mm/min sendo estes estão apresentados na tabela 7.

Tabela 6: Resultados obtidos dos ensaios de tração à velocidade de 50mm/min

		Tensão de Cedência (MPa)	Deformação à Cedência (%)	Tensão de Ruptura (MPa)	Deformação à Ruptura (%)
Corpo Inferior	Média	51,85	5,92	47,79	122,00
	Desvio Padrão	7,50	0,57	5,61	65,63
Corpo Centro Vertical	Média	65,87	6,00	63,44	109,94
	Desvio Padrão	4,63	0,43	15,38	44,82
Corpo Centro Horizontal	Média	42,37	6,47	44,58	159,35
	Desvio Padrão	6,23	0,23	9,66	55,95
Lateral	Média	61,12	6,28	89,58	111,60
	Desvio Padrão	7,02	0,49	12,85	45,23
Corpo Superior	Média	43,01	7,23	39,91	115,40
	Desvio Padrão	4,31	0,84	3,44	15,54

Tabela 7: Resultados obtidos dos ensaios de tração à velocidade de 500mm/min

		Tensão de Cedência (MPa)	Deformação à Cedência (%)	Tensão de Ruptura (MPa)	Deformação à Ruptura (%)
Corpo Inferior	Média	55,52	6,41	37,77	114,34
	Desvio Padrão	9,39	0,70	6,57	69,22
Corpo Centro Vertical	Média	64,11	6,16	66,81	130,78
	Desvio Padrão	6,21	0,69	11,74	50,60
Corpo Centro Horizontal	Média	58,27	6,69	46,54	99,01
	Desvio Padrão	8,57	0,57	10,05	81,80
Lateral	Média	64,05	6,64	78,93	80,76
	Desvio Padrão	5,24	0,52	10,74	14,60
Corpo Superior	Média	50,56	7,43	41,38	72,66
	Desvio Padrão	3,92	0,50	9,56	36,85

A partir dos resultados observados destas tabelas, constatou-se que geralmente as tensões de cedência e ruptura de cada zona de estudo, são maiores nos resultados a uma velocidade superior do que a uma velocidade inferior, pois os provetes ao serem tracionados a uma velocidade superior, a resposta do material atua com maior intensidade e assim a força gerada para tracionar o provete é maior, logo as tensões são maiores.

No entanto, nos resultados à velocidade inferior verificou-se uma deformação de ruptura maior, pois o provete a ser tracionado a uma velocidade maior torna-se mais instável e sofre ruptura mais facilmente, pois tal como foi referido anteriormente com velocidade superior as forças geradas pelo equipamento são elevadas, o que leva à ruptura precoce neste caso.

De modo a ser mais perceptível a diferença entre os resultados destas duas condições, é seguidamente apresentado na figura 13 uma comparação entre os gráficos representativos de cada condição para cada zona de estudo.

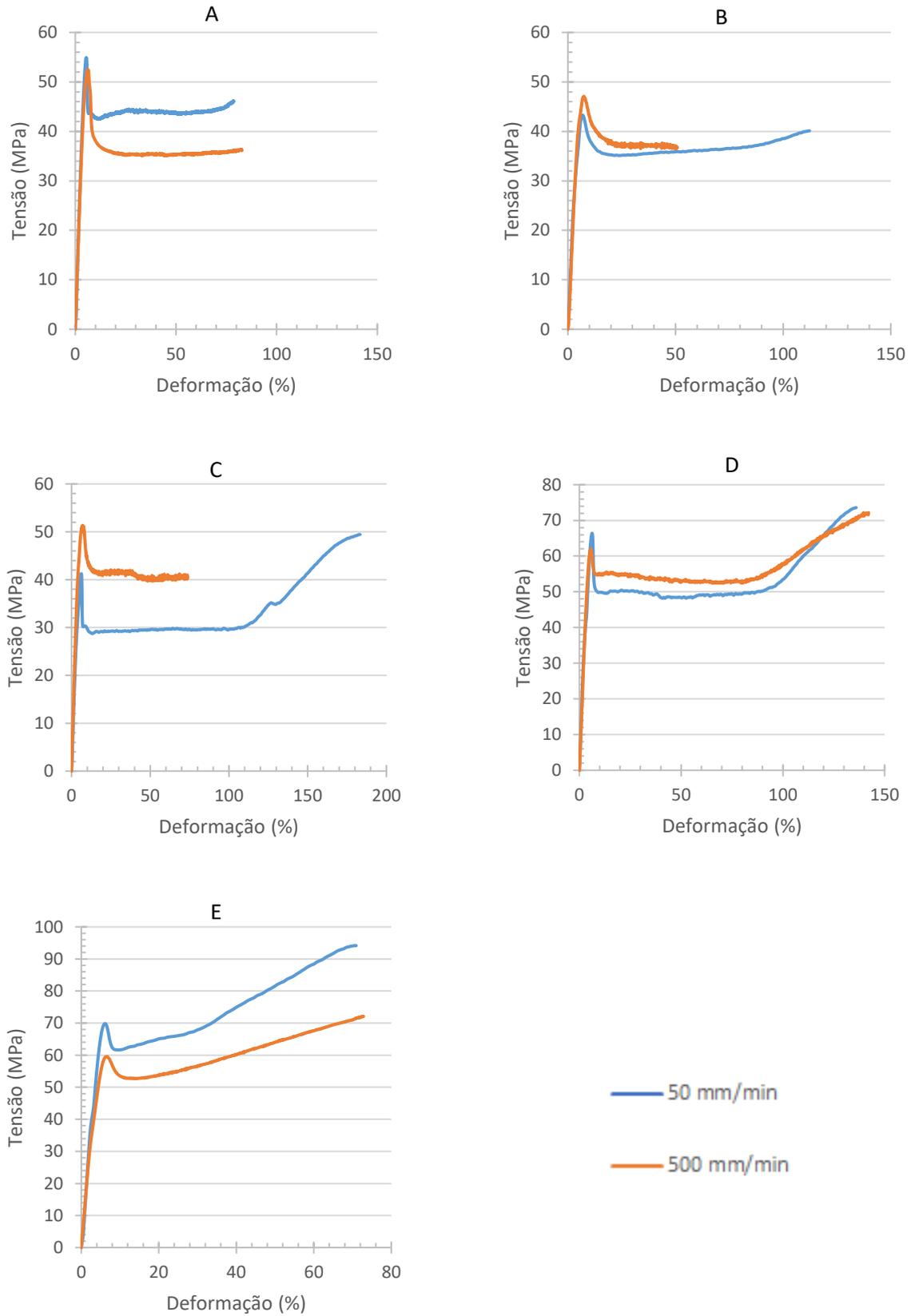


Figura 13: Comparação de velocidades 50mm/min vs 500mm/min. A – Corpo inferior; B – Corpo Superior; C – Corpo central horizontal; D – Corpo central vertical; E – Lateral.

Pela observação dos resultados obtidos, concluiu-se que no módulo de Young existe uma variação de valores ao comparar as zonas de estudo, isto deveu-se ao facto de os provetes retirados em algumas zonas de estudo terem uma geometria um pouco diferente, pois continham curvatura.

Nos resultados das curvas tensão/deformação obtidos, concluiu-se que os ensaios com uma velocidade superior, as tensões estudadas tendem a ser mais elevadas do que a uma velocidade inferior, já as deformações são o contrário, ou seja, as deformações tendem a ser inferiores com o aumento da velocidade de ensaio.

3.4. Propriedades dos materiais

Após análise de todos os resultados experimentais realizados, foi possível definir as propriedades dos materiais que constituem a embalagem para serem usados nos modelos numéricos estudados.

Na tabela 8 são apresentadas as propriedades massa volúmica, módulo de Young e coeficiente de *Poisson* do PE e do PET.

Tabela 8: Propriedades do PET e PE inseridos no Abaqus

	Massa Volúmica (kg/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de <i>Poisson</i>
Polietileno (PE)	1000	1000	0,33
Polietileno Tereftalato (PET)	2120	1796,33	0,33

No caso do PET, utilizou-se o modelo elásto-plástico, isto é para além do modelo elástico também se utilizou o modelo plástico, para isso utilizaram-se pontos de uma das curvas obtidas do ensaio de tração (curva zona lateral para velocidade de 50mm/min). Mas para se inserir estes dados no Abaqus, foi necessário utilizar as equações 2 e 3 para calcular a tensão e deformação verdadeiras respetivamente na zona plástica, sendo estes valores apresentados na tabela 9.

$$\sigma_T = \sigma_n \cdot (1 + \varepsilon_n) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon_n) - \frac{\sigma_T}{E} \quad (\text{Eq.3})$$

Tabela 9: Valores de tensão/deformação selecionados e inseridos no Abaqus

Pontos Curva Tensão/Deformação		Pontos Curva Tensão/Deformação inseridos	
Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão Plástica Verdadeira (MPa)	Deformação Plástica Verdadeira
0	0	-	-
60,63	6,23	60,63	0
62,63	19,38	74,77	0,1355
70,13	47,5	103,44	0,3311
81,38	66,88	135,81	0,4365
89,6	111,6	189,59	0,6439

Após a obtenção dos valores de tensão e deformação a inserir no Abaqus, a figura 14 apresenta a comparação entre as curvas de tensão/deformação criadas a partir dos pontos da tabela 9.

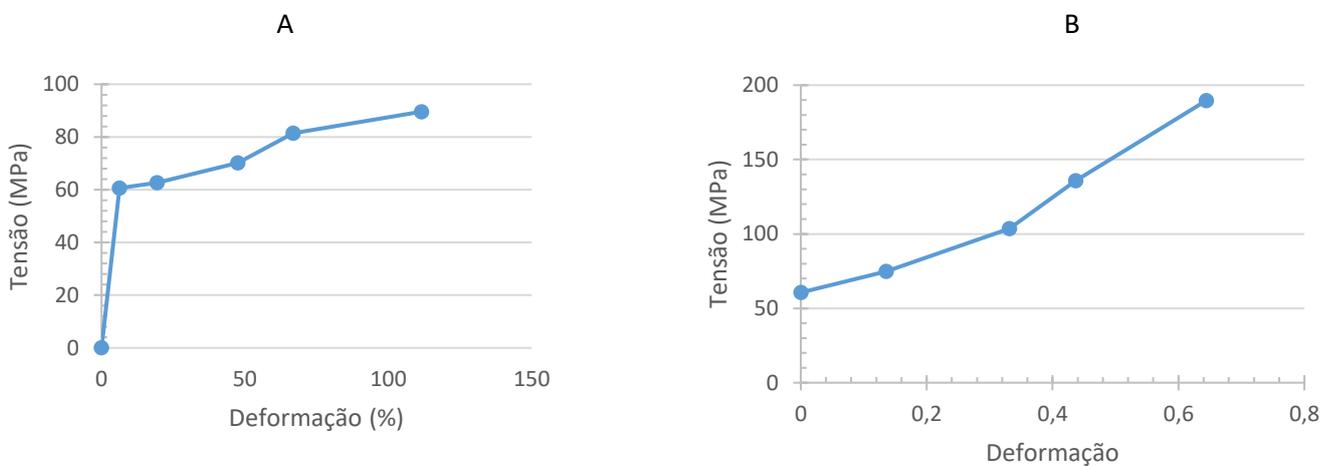


Figura 14: A - Curva tensão/deformação dos pontos selecionados; B – Curva parte plástica tensão/deformação usada no Abaqus.

Capítulo IV - Estudo experimental

4.1. Objetivo

O presente caso de estudo, tem como objetivo comprimir embalagens de ketchup vazias, com água e com ketchup no seu interior individualmente. Decidiu-se estudar as embalagens com estas três variações, com o intuito de compreender a influência de diferentes fluidos no comportamento mecânico da embalagem, já que o ketchup tem uma viscosidade substancialmente superior à viscosidade da água.

O primeiro estudo experimental foi comprimir as embalagens vazias, deste modo foi possível observar a resposta da embalagem sem efeitos externos, quer nas deformações sofridas, quer nas forças de reação geradas para o deslocamento imposto. Para além disto, este ensaio serviu como base de validação para o modelo numérico criado.

O segundo estudo experimental foi dividido em duas partes, uma em que as embalagens comprimidas tinham ketchup no seu interior na quantidade original da compra do produto. E outra em que as embalagens tinham água equivalente à quantidade de ketchup.

4.2. Procedimento do ensaio de compressão das embalagens sem fluido

Para este ensaio experimental, utilizaram-se cinco embalagens vazias, os ensaios foram efetuados na máquina *Shimadzu AGX-50kN*, com uma célula de carga de 50kN. Foi imposto um deslocamento máximo de 33,5mm, com uma velocidade constante de 50mm/min. Decidiu-se utilizar esta velocidade, pois a norma *ASTM D 695-02* [41] não especificava um valor de velocidade para a compressão para amostras com as dimensões da embalagem em estudo, por isso optou-se pela velocidade mais lenta usada nos ensaios de tração que caracterizaram o material da embalagem. Pois esta velocidade permitia mais facilmente acompanhar o comportamento da embalagem, assim como todas as variações de deformação sofridas e forças de reação geradas. Enquanto que para o deslocamento, decidiu-se comprimir a embalagem no máximo de 20% da altura total desta, logo assim se obteve o deslocamento imposto.

De modo a comparar mais facilmente os resultados entre o ensaio experimental e a simulação numérica, optou-se por filmar cada um dos destes ensaios, para isso utilizou-se o equipamento *GoPro 4*.

Tabela 10: Equipamentos e condições do ensaio de compressão sem fluido

	Ensaio estrutural
Número de embalagens	5
Volume de fluido (ml)	Sem fluido
Equipamento	<i>Shimadzu AGX-50kN</i>
Célula de carga (N)	50
Velocidade de ensaio (mm/min)	50
Deslocamento máximo (mm)	33,5
Equipamento de filmagem	<i>GoPro 4</i>



Figura 15: Embalagem entre os pratos da máquina no instante de tempo de ensaio inicial.

4.3. Resultados dos ensaios das embalagens sem fluido

Nas figuras 16 e 17. estão representadas a evolução da curva força/deslocamento retirada do ensaio de compressão e a evolução do comportamento da embalagem ao longo do tempo.

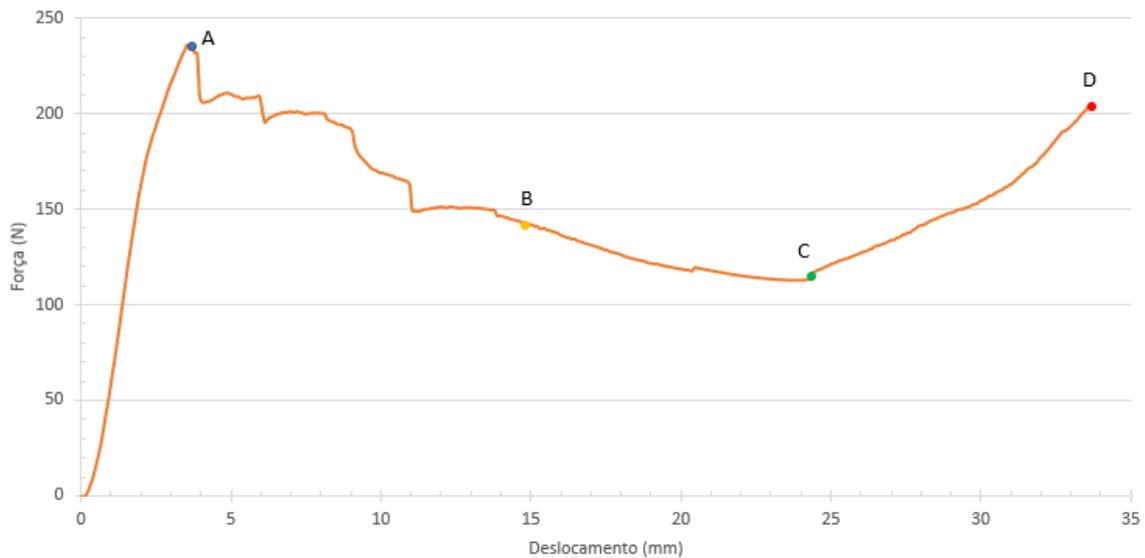


Figura 16: Curva Força/Deslocamento representativa do ensaio de compressão sem fluido.

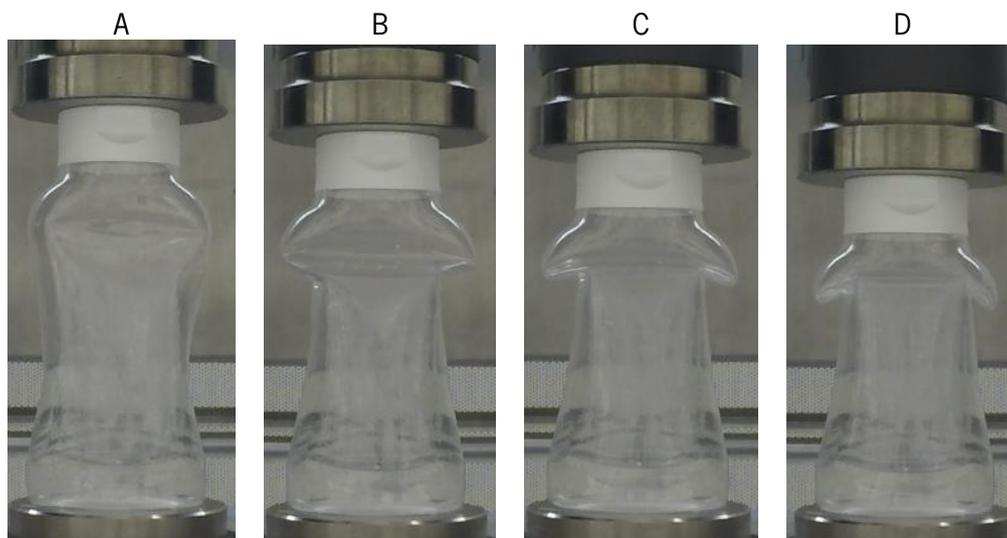


Figura 17: Representação das embalagens nos pontos A, B, C e D da curva de força/deslocamento.

Na relação das figuras com a curva, foi possível verificar que a resposta mecânica da embalagem tenta contrariar o movimento que é imposto. Foi possível observar um aumento da força até ao ponto máximo (A), este aumento deve-se à resistência que a embalagem impõe ao equipamento, a força aumenta porque as forças de reação da embalagem atuam com uma maior intensidade enquanto esta se mantém estável, sendo que no ponto A é o momento em que a embalagem começa a ceder pela primeira vez.

A partir do ponto A esta começa a ceder e as forças atuam com menor intensidade daí se verificar uma quebra na força gerada, ou seja, a embalagem começa a deformar-se e por isso a sua geometria altera-se, o que leva às forças de reação geradas não serem tão intensas como na sua

forma original, pois a geometria não está estável e estas forças não estão distribuídas uniformemente.

Enquanto a embalagem continuar instável, as forças de reação desta são menos acentuadas permitindo assim uma maior facilidade da compressão efetuada pelo prato superior do equipamento, pois as forças que tentam contrariar este movimento são baixas. Mas a partir do momento que a embalagem apesar de estar deformada se torne estável, tal como se pode constatar essas forças voltam a atuar com maior intensidade a partir do ponto C em que a força necessária para fazer o prato superior se deslocar volta a aumentar. A força gerada aumenta até ao final do ensaio, representado pelo ponto D.

Após esta demonstração do ensaio de compressão das embalagens vazias, segue-se na figura 18 a sobreposição as curvas força/deslocamento de cada embalagem estudada. Por fim, na tabela 9 são apresentados os resultados mais relevantes do ensaio experimental e posteriormente a curva média deste ensaio experimental.

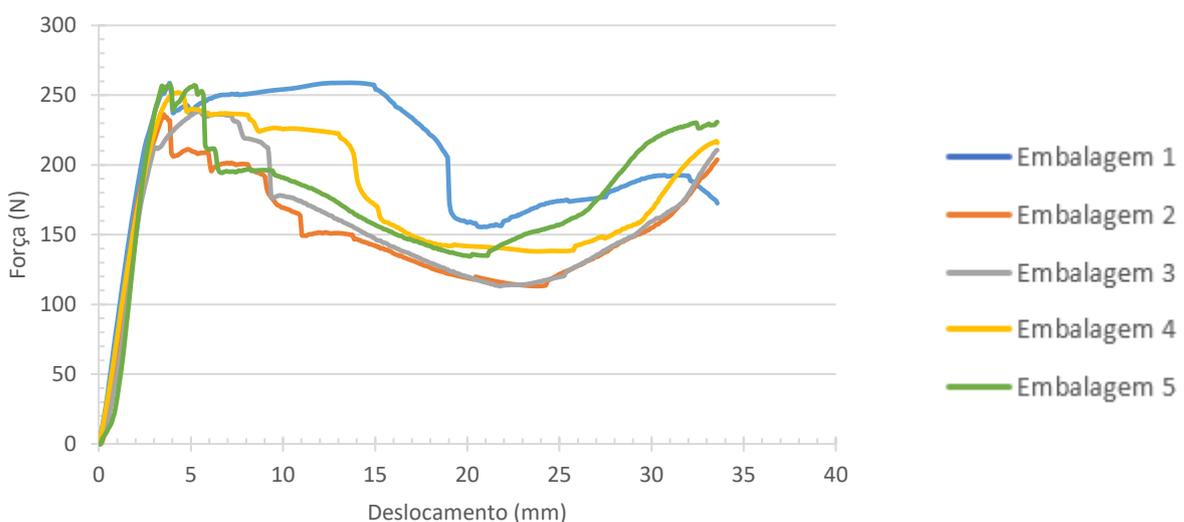


Figura 18: Sobreposição das curvas Força/Deslocamento de todas as embalagens.

Pelas curvas força/deslocamento obtidas dos ensaios experimentais das cinco embalagens, constatou-se que de um modo geral as curvas obtidas dos ensaios de compressão das embalagens sem fluido têm um comportamento semelhante. Podendo-se observar a curvas obtida da embalagem 1 tem um comportamento um pouco diferente das restantes, isto deveu-se ao facto

de a embalagem que originou essa curvas ter escorregado enquanto sofria compressão, o que levou a não ter um comportamento da curva semelhante à representada pela figura 16.

As restantes diferenças entre as curvas que se observam, deveram-se ao facto de algumas embalagens terem uma pequena deformação antes do inicio do ensaio, o que levou a estas começarem a ceder pelo local que tinha essa deformação e não pela zona expectável, levando assim a pequenas alterações na curva força/deslocamento resultante.

Na tabela 11 são apresentados os resultados de a força máxima que cada embalagem sofreu assim como o deslocamento que em que esta se deu, seguida da curva média destes resultados experimentais.

Tabela 11: Força máxima e deslocamento correspondente para os ensaios estruturais

	Deslocamento (mm)	Força (N)
Embalagem 1	3,856	258,390
Embalagem 2	3,523	236,297
Embalagem 3	5,440	238,482
Embalagem 4	4,273	251,921
Embalagem 5	3,856	257,341
Média	4,190	248,486
Desvio Padrão	0,669	9,348

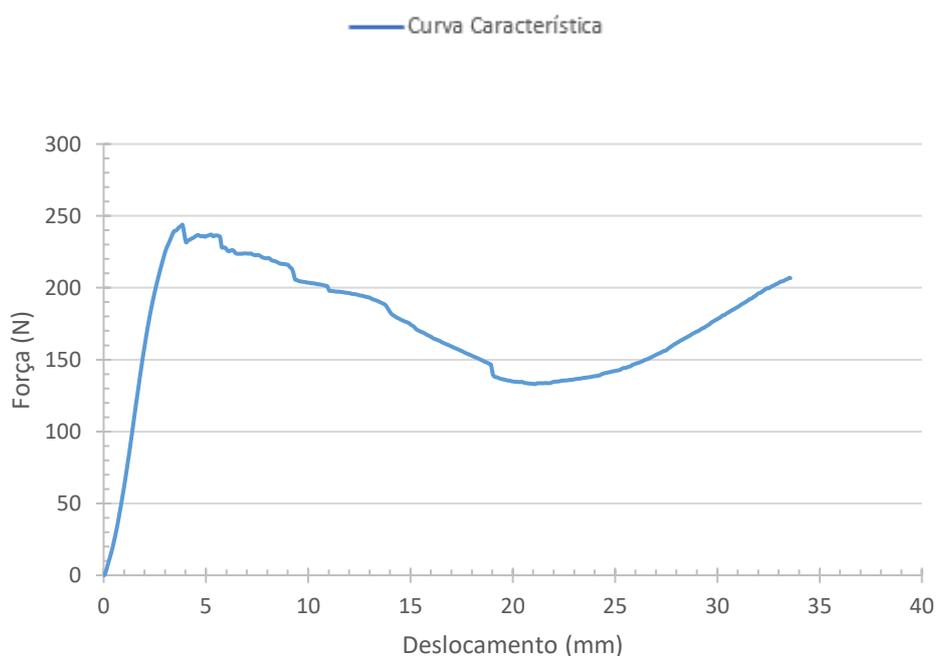


Figura 19: Curva Força/Deslocamento média do ensaio experimental estrutural.

Pelos resultados obtidos observou-se que o comportamento das embalagens em estudo é semelhante, no que diz respeito à força máxima exercida pelo equipamento e ao deslocamento onde esta surge, também se pode constatar que não existe uma variação significativa dos resultados obtidos.

No entanto, a variação existente deveu-se ao facto de tal como já foi referido anteriormente, algumas embalagens já teriam uma pequena deformação antes do ensaio o que leva as embalagens a iniciarem a deformação nesse local e não na zona mais crítica, sendo que esse local estava mais instável que o normal. Embora surgisse este percalço, a maior parte das embalagens iniciaram a deformação na zona crítica que era na transição do corpo central para o corpo superior, sendo este tipo de deformação uma característica da embalagem em estudo.

Apesar dessa diferença, os comportamentos das curvas obtidas são semelhantes, tendo um aumento da força até a embalagem começar a ceder, depois a força baixa gradualmente até que a embalagem tem um aumento da rigidez e a partir desse momento a força exercida pelo equipamento volta a aumentar.

4.4. Procedimento do ensaio de compressão das embalagens com fluido

Para estes ensaios, foram utilizadas também cinco embalagens para cada condição (cinco embalagens cheias de ketchup, e cinco cheias de água), o equipamento usado também foi a máquina *Shimadzu AGX-50kN* com uma célula de carga de 50kN, uma velocidade de 50mm/min e um deslocamento máximo de 33,5mm. Sendo que nestes ensaios, decidiu-se utilizar uma caixa de modo a proteger todo o equipamento no caso de alguma embalagem verte o fluido que tinha no interior ou mesmo de sofrer rotura ao ser comprimida. Como um dos objetivos nestes ensaios também foi filmar cada um dos ensaios experimentais com fluido, a caixa tinha de ser transparente, para isso optou-se por construir uma caixa em acrílico já que este material tem uma grande capacidade de transparência. Nestes ensaios também foi utilizado o equipamento de filmagem *GoPro 4*.

Tabela 12: Equipamentos e condições dos ensaios de compressão com fluido

	Embalagens com água	Embalagens com ketchup
Número de embalagens	5	5
Volume do fluido (ml)	500	500
Equipamento	<i>Shimadzu AGX-50kN</i>	<i>Shimadzu AGX-50kN</i>
Célula de carga (kN)	50	50
Velocidade de ensaio (mm/min)	50	50
Deslocamento máximo (mm)	33,5	33,5
Equipamento de filmagem	<i>GoPro 4</i>	<i>GoPro 4</i>

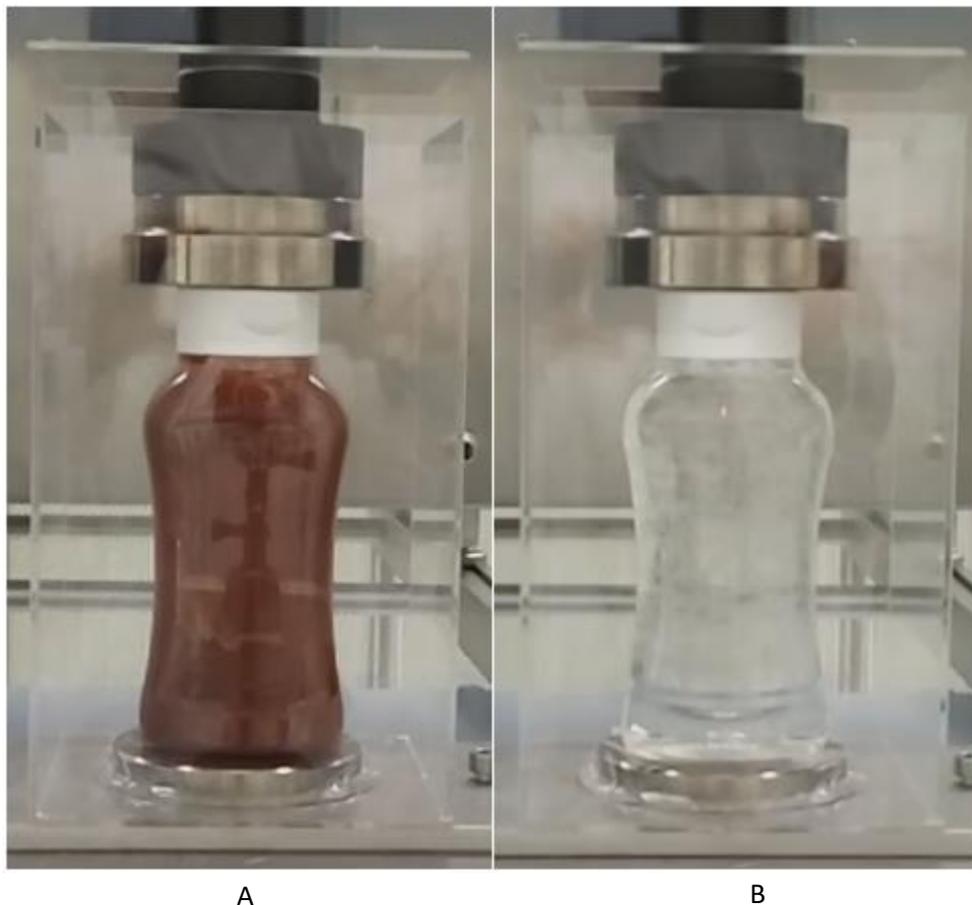


Figura 20: Embalagens entre pratos e dentro da caixa de proteção no início do ensaio experimental. A - Embalagem com ketchup; B - Embalagem com água.

4.5. Resultados dos ensaios das embalagens com fluidos

Tal como nos resultados dos ensaios sem fluido, no ensaio das embalagens com água inicialmente é apresentado uma demonstração do ensaio de compressão de uma embalagem com água, com a evolução da curva força/deslocamento. Depois são apresentadas a sobreposição das curvas força/deslocamento de cada embalagem. Por fim, é apresentado uma tabela dos resultados mais relevantes e a curva representativa deste ensaio experimental. Este método é repetido para os ensaios das embalagens com ketchup.

4.5.1. Ensaio com água

Nas figuras 21 e 22, estão representadas a evolução da curva força/deslocamento retirada do ensaio de compressão e a evolução do comportamento da embalagem ao longo do tempo.

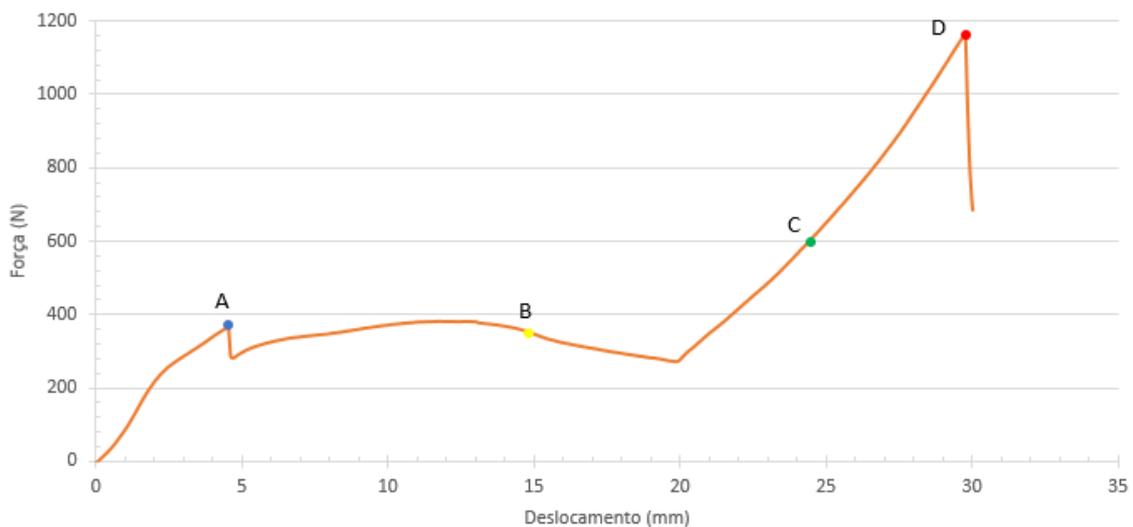


Figura 21: Curva Força/Deslocamento representativa do ensaio de compressão com água.

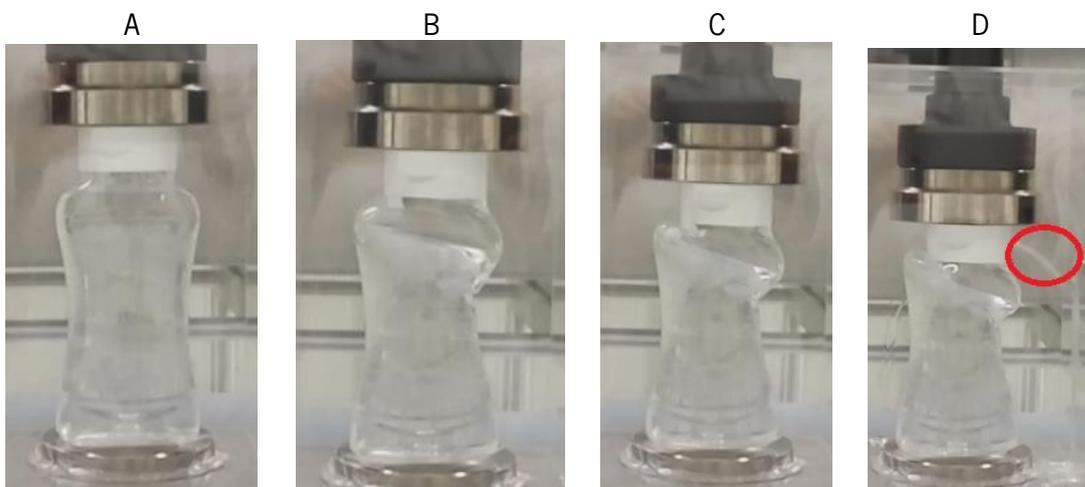


Figura 22: Representação das embalagens nos pontos A, B, C e D da curva de força/deslocamento.

Tal como no ensaio experimental sem fluido também neste se constatou que a força aumenta com o aumento do deslocamento do prato superior do equipamento até ao ponto A, onde embalagem começar a ceder, e a partir desse momento à uma quebra na força gerada. Mas neste caso com água no interior da embalagem esta quebra não é prolongada, pois dá-se a quebra e há uma estabilidade imediata da força que se mantém até ao ponto B, isto acontece porque as forças de reação da embalagem diminuem de intensidade e tornam-se baixas, mas são imediatamente compensadas pelas forças de reação que a água também exerce para tentar contrariar o movimento do prato e assim existe uma estabilidade da curva.

Depois tal como nos ensaios anteriores a força volta a aumentar, pois a embalagem volta a tornar-se estável e as forças de reação desta voltam a intensificar e por isso a força gerada pelo equipamento aumenta até um máximo representado pelo ponto D, em que nesse momento existe saída de água de dentro da embalagem (assinalado na figura 22, pela imagem D), invalidando o resto do ensaio.

De seguida são apresentadas as curvas de força/deslocamento das cinco embalagens estudadas.

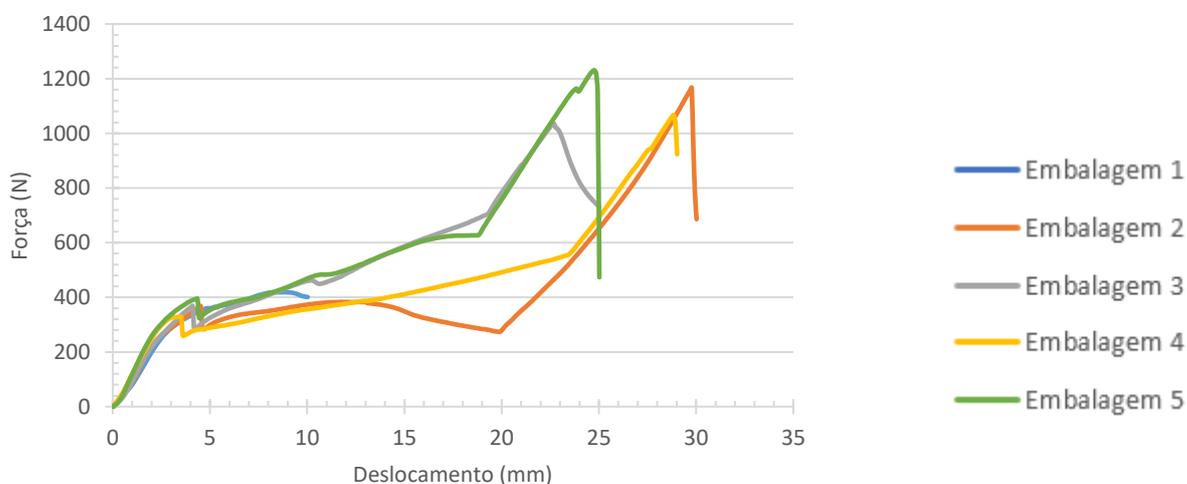


Figura 23: Sobreposição das curvas Força/Deslocamento de todas as embalagens com água.

Pelas curvas de força/deslocamento observadas resultantes deste ensaio experimental, constatou-se que tal como nas curvas obtidas dos ensaios sem fluidos, apesar de as curvas observadas terem um comportamento idêntico, elas não são totalmente coincidentes, isto deveu-se ao facto de a cedência das embalagens não se iniciar no mesmo local entre elas, e no caso da primeira embalagem de estudo a água ter saído antes do que aconteceu nas restantes, o que invalidou muito cedo o resto do ensaio.

Também foi possível constatar que nestes ensaios a força máxima sofrida pelas embalagens é significativamente superior à dos ensaios sem fluido, isto deve-se ao facto da água no interior da embalagem também gerar forças de reação para tentar contrariar a compressão desta.

Por fim é apresentada a curva característica destes resultados, seguida de uma tabela com a força máxima que cada embalagem sofreu assim como o instante que em que esta se deu e o deslocamento máximo, que é o deslocamento que cada embalagem sofreu até à saída de fluido do seu interior.

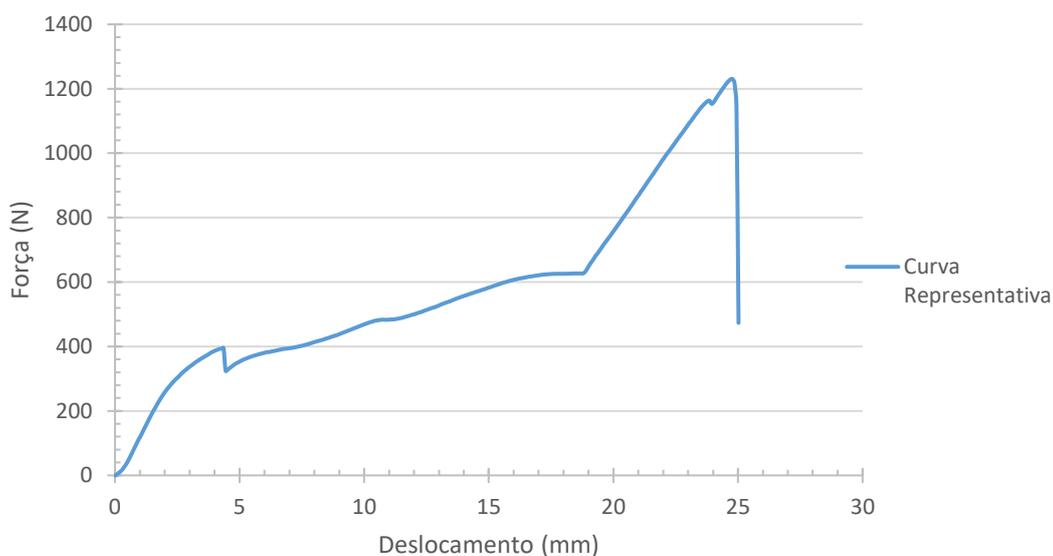


Figura 24: Curva representativa do ensaio de compressão com água.

Tabela 13: Força máxima e deslocamento correspondente para ensaios com água

	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento máximo (mm)
Embalagem 1	8,523	418,544	10,023
Embalagem 2	29,773	1166,471	30,202
Embalagem 3	22,690	1036,159	25,123
Embalagem 4	28,856	1066,804	29,243
Embalagem 5	24,773	1230,494	25,023
Média	22,923	983,694	23,923
Desvio Padrão	7,655	290,989	8,118

Pelo que foi observado dos resultados experimentais dos ensaios com água, concluiu-se que a força gerada pela máquina é superior à força gerada nas embalagens vazias, isto deve-se ao facto

de a água ser um material incompressível e como tal, aumenta a resistência do sistema à compressão.

Devido a esta característica da água, o deslocamento máximo imposto para a compressão destes ensaios experimentais não foi alcançado pois como a água é incompressível, a embalagem ao ser comprimida a água no seu interior devia expandir, mas era limitada pelas paredes da embalagem, o que fez com que a água saísse por uma fenda existente na tampa destas embalagens ou então a pressão interna gerada pela água rebentava a tampa. Na figura 20 está assinalado a saída de água.

Pelas curvas obtidas e pela tabela de resultados, concluiu-se que o ponto de força máxima em todas as embalagens surge geralmente no instante da saída de água. Observou-se ainda, que as curvas têm todas um comportamento semelhante à exceção da primeira embalagem, pois neste caso, a água saiu antes do que o espectável, ou seja, a água saiu com um deslocamento inferior em relação aos outros ensaios, como consequência o pico de força foi muito inferior do que outros ensaios.

4.5.2. Ensaio com ketchup

Nas figuras 25 e 26. estão representadas a evolução da curva força/deslocamento retirada do ensaio de compressão e a evolução do comportamento da embalagem ao longo do tempo.

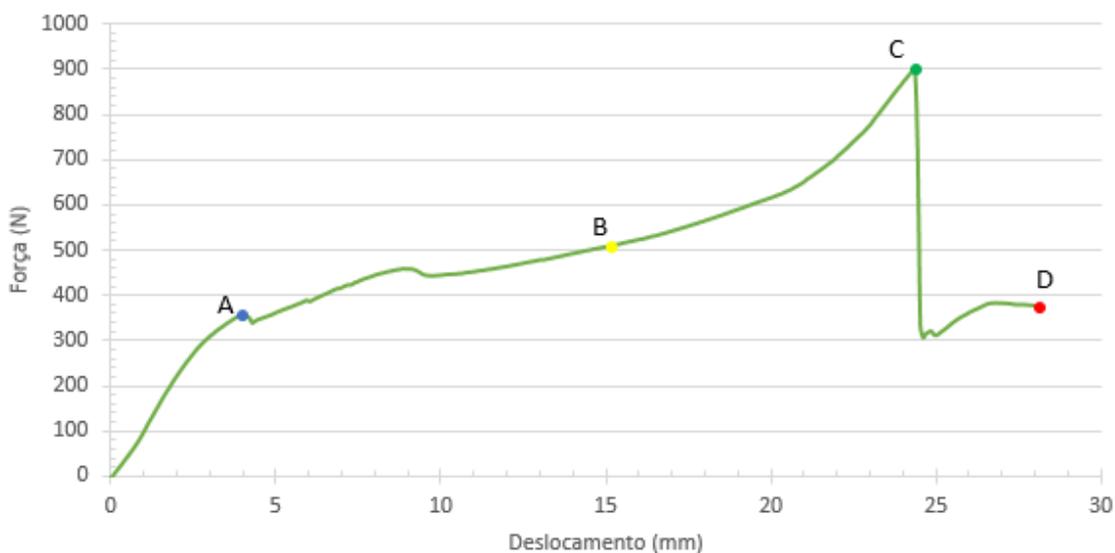


Figura 25: Curva Força/Deslocamento representativa do ensaio de compressão com ketchup.

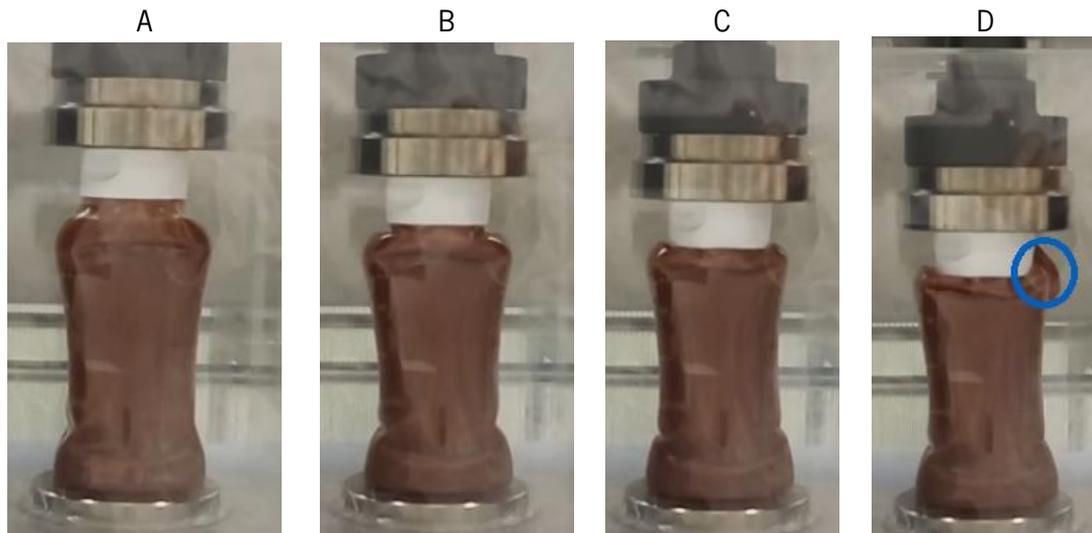


Figura 26: Representação das embalagens nos pontos A, B, C e D da curva de força/deslocamento.

Tal como nos ensaios anteriores, também neste foi possível perceber que na evolução da curva força/deslocamento apresentada inicialmente há um aumento da força com o aumento do deslocamento até ao ponto A, sendo que depois existe uma pequena quebra da força tal como já foi referido anteriormente, essa quebra deve-se ao instante que a embalagem começa a ceder, mas tal como nos ensaios com água também neste caso essa quebra não foi continua mas estabilizou de imediato devido às forças de reação exercidas pelo fluido, neste caso ketchup.

Sendo que a força a partir do ponto B torna-se mais acentuada, pois como a embalagem está estável e as forças de reação da embalagem e do fluido atuam com maior intensidade, levam a um aumento da força gerada pelo equipamento até ao ponto máximo (C).

Por fim constatou-se uma quebra acentuada da força, tal deveu-se à saída de ar de dentro da embalagem, mas neste caso o ketchup pode não sair imediatamente nesse instante tal como acontecia nos casos com água, pois como a viscosidade do ketchup é substancialmente superior à da água, esta característica faz com ele escoe mais lentamente, no entanto o ensaio considerou-se invalido a partir momento em que ele saiu de dentro da embalagem, tal como nos ensaios com água.

Na figura 27 são apresentadas as curvas de força/deslocamento resultantes dos ensaios das cinco embalagens com ketchup.

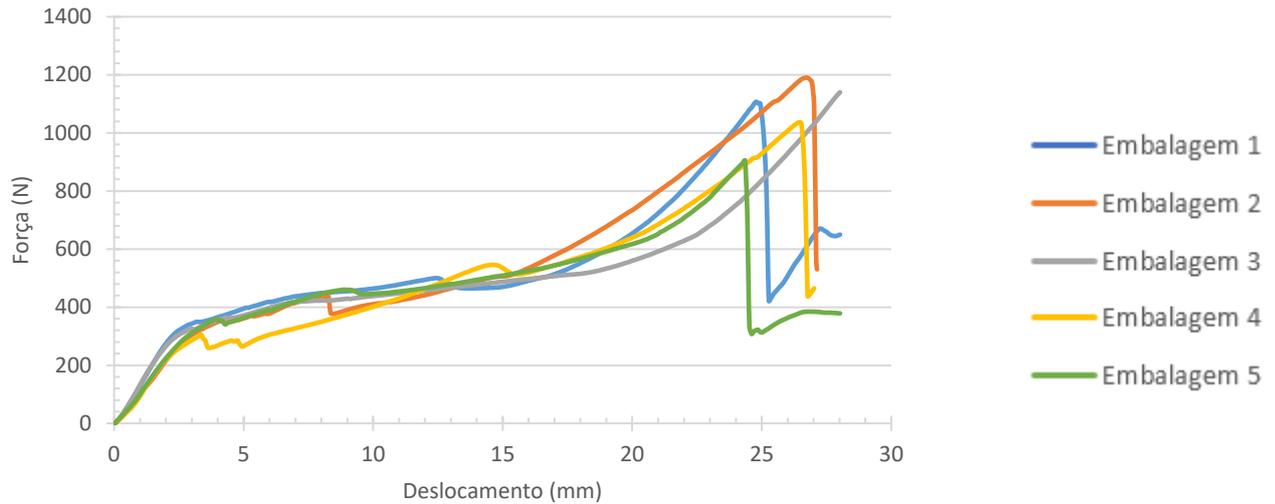


Figura 27: Sobreposição das curvas Força/Deslocamento de todas as embalagens com ketchup.

A partir das curvas observadas, constatou-se que estas curvas são mais consistentes que nos ensaios anteriores quer com água, quer sem fluido. As pequenas diferenças que existem na comparação entre as curvas devem-se tal como já foi referido nos ensaios anteriores, a algumas embalagens já conterem uma pequena deformação antes do ensaio, o que levou à embalagem ceder por esse local e não pela zona expectável.

Também foi possível perceber que neste caso, o ketchup não sai exatamente no instante que a curva atinge o máximo de força, pois como o ketchup é um material mais viscoso do que a água, a sua resposta é mais lenta, logo vai escoar com uma velocidade menor.

De seguida na figura 28 é apresentada a curva de força/deslocamento que caracteriza este ensaio de compressão com ketchup. Seguido de uma tabela (tabela 14) onde é apresentada a força máxima que cada embalagem sofreu assim como o instante que em que esta se deu, e o deslocamento máximo que cada embalagem sofreu.

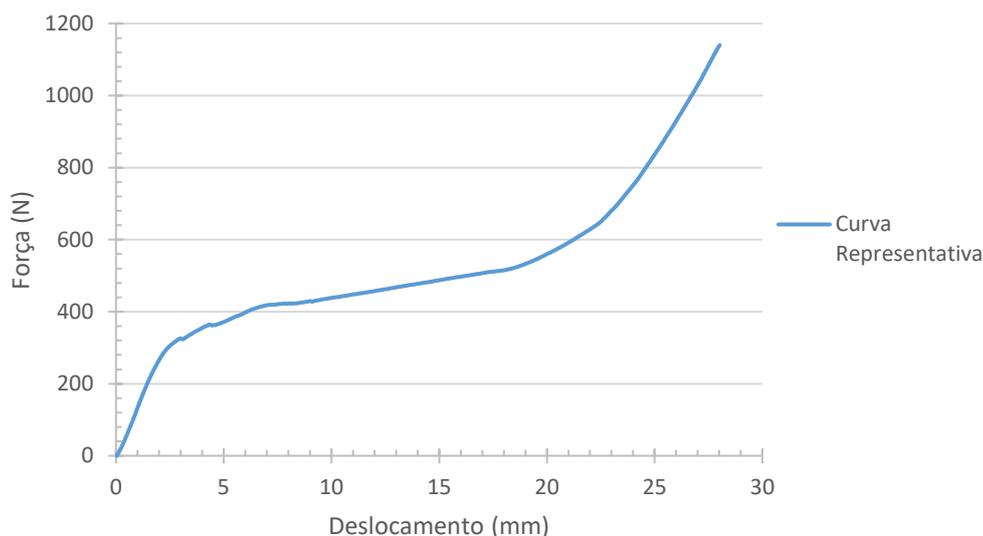


Figura 28: Curva representativa do ensaio de compressão com ketchup.

Tabela 14: Força máxima e deslocamento correspondente para os ensaios com ketchup

	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento máximo (mm)
Embalagem 1	24,773	1107,200	29,939
Embalagem 2	26,690	1189,891	27,337
Embalagem 3	28,023	1139,911	28,203
Embalagem 4	26,440	1036,755	27,356
Embalagem 5	24,356	904,624	28,023
Média	26,056	1075,676	27,772
Desvio Padrão	1,496	110,610	0,400

Pelos resultados obtidos destes ensaios de compressão, conclui-se tal como nos ensaios das embalagens com água, que a força máxima exercida pelo equipamento é muito superior aos ensaios sem fluido.

E tal como os ensaios com água, nestes ensaios o ketchup também saiu das embalagens, quer pela fenda da tampa, quer no caso desta rebentar, esta saída está assinalada na figura 26. No entanto, esta saída de fluido surge com um deslocamento um pouco superior em relação ao dos ensaios com água, isto deve-se ao facto de a viscosidade do ketchup ser substancialmente superior à viscosidade da água, o que faz com que o escoamento do fluido seja mais lento.

As curvas força/deslocamento obtidas destes ensaios, estas também têm um comportamento muito semelhante quando comparadas entre si, tal como os resultados descritos na tabela 14.

Isto revela uma boa consistência da embalagem em estudo, já que os resultados obtidos foram muito semelhantes em cada ensaio experimental.

4.5.3 Comparação dos resultados dos ensaios das embalagens com fluidos

Na figura 29 é apresentado a sobreposição das curvas características de força/deslocamento dos ensaios de compressão com água e ketchup. Na tabela 15 é apresentada as médias dos resultados obtidos para cada um destes ensaios.

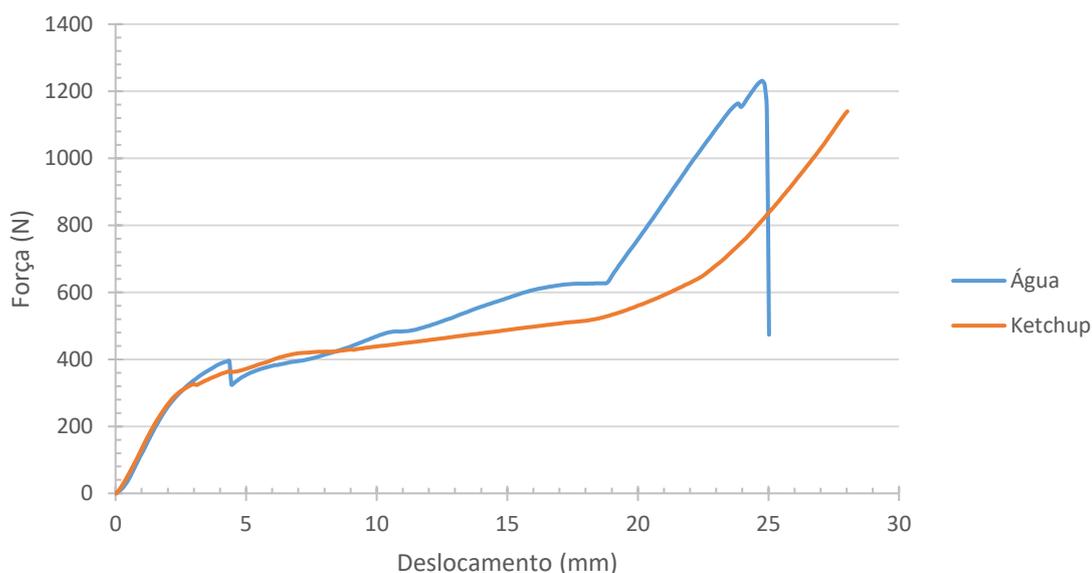


Figura 29: Comparação das curvas forças/deslocamento características dos ensaios com água e ketchup.

Tabela 15: Comparação da média dos resultados dos ensaios com água e ketchup

		Deslocamento (mm)	Força (N)
Água	Média	22,923	983,694
Ketchup	Média	26,056	1075,676

Comparando os resultados obtidos dos ensaios experimentais da compressão de embalagens com água e ketchup, foi possível constatar que o comportamento das curvas de força/deslocamento é semelhante, sendo que no caso das embalagens com água, apesar da força máxima de cada embalagem em geral ser aproximadamente idêntica aos ensaios experimentais com ketchup, ao comparar a força máxima em média dos ensaios, verificou-se que no caso das embalagens com água, a força é ligeiramente inferior à força máxima média das embalagens com ketchup, esta diferença deve-se principalmente ao facto de no ensaio experimental da primeira com água este ter ficado invalidado antes do que aconteceu com os restantes ensaios.

Também foi possível observar que nos ensaios experimentais das embalagens com ketchup, devido à viscosidade deste fluido ser significativamente superior à viscosidade da água, o fluido dentro da embalagem escoasse mais lentamente para fora desta e assim permitiu que o deslocamento máximo fosse superior em relação às embalagens com água no interior.

Capítulo V - Estudo dos modelos numéricos

5.1. Objetivo

O objetivo da simulação numérica, foi simular o caso de estudo experimental e compreender se era possível obter resultados próximos aos obtidos nos ensaios experimentais. Para isso a simulação numérica foi dividida em duas análises, uma estrutural e outra FSI (interação fluido-estrutura), houve a necessidade de realizar estas duas análises, a primeira tinha o intuito de validar todo o modelo numérico, isto é, toda a parte estrutural sem fluido já que esses resultados apenas dependiam da resposta da embalagem e assim validar todas as condições da simulação sem fluido.

A segunda análise, foi o estudo numérico do caso de estudo principal, que serviu para comparar a compressão das embalagens com fluidos e perceber se a simulação conseguia acompanhar de forma precisa a resposta das embalagens à compressão, assim como a influência dos diferentes fluidos estudados. Para essa compreensão, decidiu-se estudar o modelo CEL (*Coupled Eulerian-Lagrangian*) e o modelo SPH (*Smooth Particle Hydrodynamics*), pois a partir de um estudo preliminar (ver anexo 9.1), concluiu-se que estes dois modelos eram os mais eficazes para o caso de estudo em questão.

5.2. Análise das embalagens sem fluido

Como já foi referido, o principal objetivo desta análise numérica, foi validar todo o modelo estrutural, isto é, geometria da embalagem CAD, modelo do material, condições de fronteira, tais como, velocidade/deslocamento imposto, interações entre componentes e malha selecionada, em que esta teve um estudo independente, devido à sua influência nos resultados.

5.2.1 Procedimento numérico das embalagens sem fluido

Para melhor compreensão sobre a construção do modelo numérico, é apresentado na figura 30 um esquema com os passos essenciais para a construção deste. Sendo de seguida explicado sucintamente cada um deles.

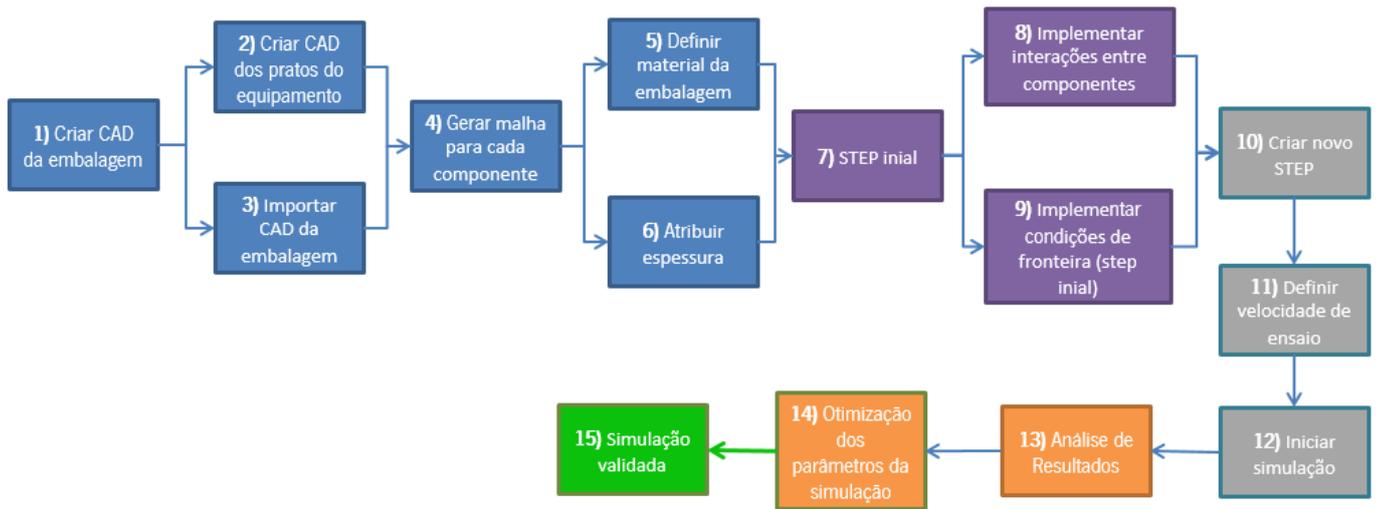


Figura 30: Esquema do procedimento numérico.

1. Embalagem criada em *SolidWorks* segundo as dimensões obtidas do estudo desta. Como a embalagem era simétrica apenas se considerou $\frac{1}{4}$ desta, de modo a aumentar a velocidade de computação;

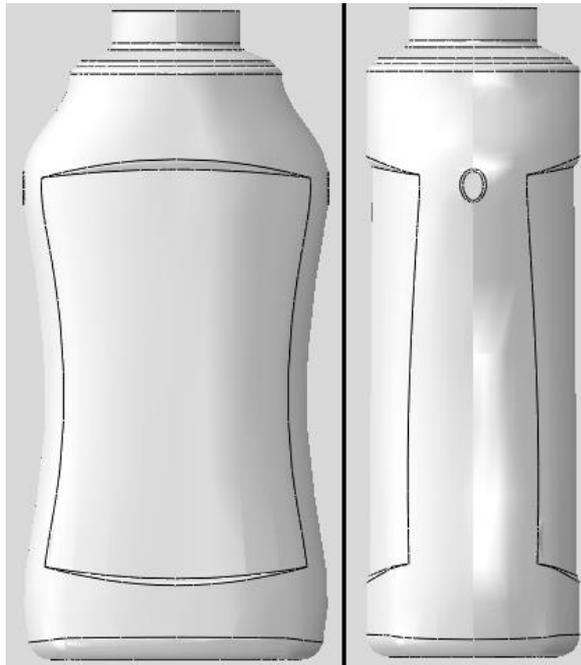


Figura 31: Representação CAD da embalagem. Com a vista frontal e vista lateral.

2. Representação dos pratos do equipamento criados no *software Abaqus*. Cada um deles foi criado com o sendo um componente discreto rígido, pois eram componentes que não

deformavam e permitia uma maior velocidade de computação. Tal como a embalagem neste caso também se considerou $\frac{1}{4}$ da peça total;

3. Importou-se o ficheiro *.igs* obtido do *SolidWorks* para o *Abaqus* e assim obteve-se o CAD da embalagem no *Abaqus*;
4. Gerou-se uma malha a todos os componentes necessários à simulação (embalagem, prato superior e prato inferior);

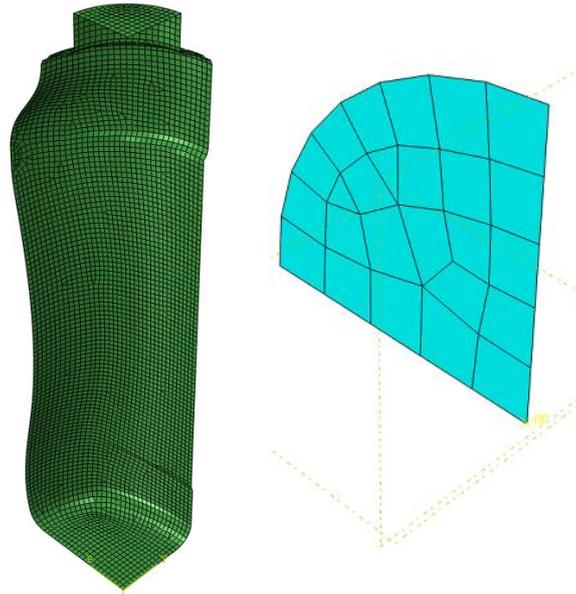


Figura 32: Representação da malha à esquerda da embalagem e à direita do prato.

5. Criou-se e atribuiu-se o material à embalagem, sendo a tampa de PE (polietileno) e a embalagem PET (polietileno tereftalato), assim como as propriedades principais de cada. Os pratos não necessitaram da atribuição de material pois foram considerados como componentes discretos rígidos;
6. Definir a evolução da espessura da embalagem e implementar essa espessura à embalagem;
7. Step inicial;



Figura 33: Assembly da embalagem com os pratos.

8. No step inicial, definir as interações entre os componentes, isto é, interação entre embalagem e prato superior, interação entre embalagem e prato inferior e interação entre as paredes da própria embalagem. Estas interações são de contacto do tipo *“Penalty Contact”*, com um coeficiente de atrito equivalente a 0,2;

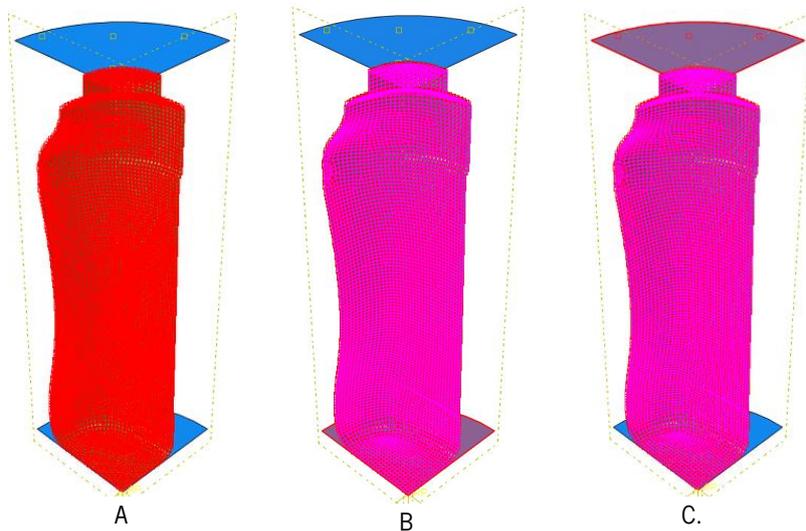


Figura 34: Interações da embalagem. A - Interação consigo própria; B - Interação com prato inferior; C - Interação com prato superior.

9. Também no step inicial, definiu-se as condições de fronteira, sendo elas: encastre do prato inferior, de modo a este não se mover; limitar o movimento do prato superior, para este apenas se mover na vertical. E anda se definiu a simetria em dois planos para cada componente;

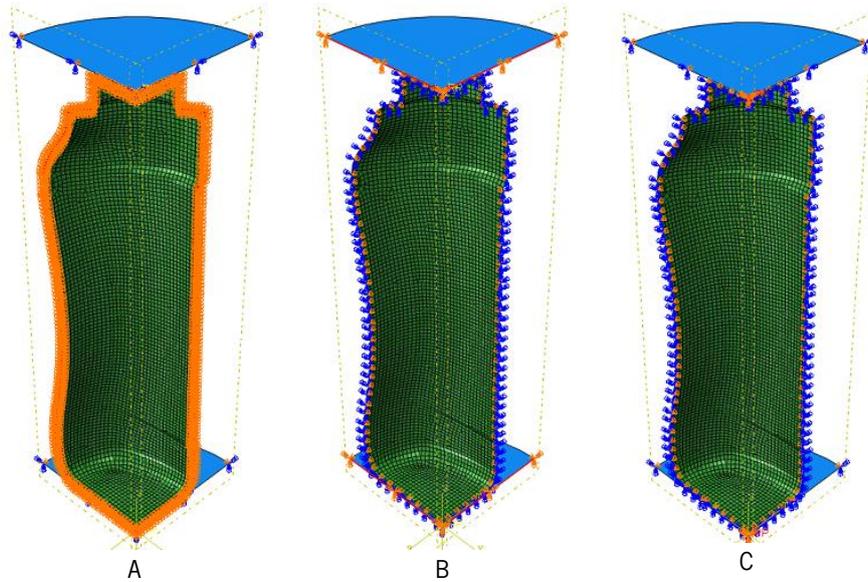


Figura 35: Condições de fronteira. A - Simetria da embalagem nos dois eixos; B – Simetria dos pratos nos dois eixos; C – Encastre do prato inferior e limitação do movimento do prato superior.

10. Criar Step 1. Definiu-se como um step dinâmico e explícito, com um tempo total equivalente ao tempo do ensaio experimental (40 segundos);
11. Dentro deste novo step implementou-se a velocidade de movimento do prato superior, sendo esta velocidade igual à velocidade de ensaio, ou seja, 50mm/min (aproximadamente 0,83mm/s);

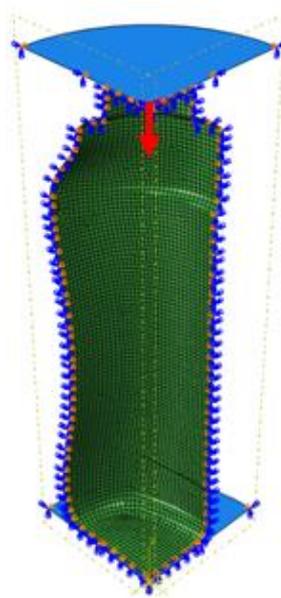


Figura 36: Representação da velocidade imposta (seta vermelha).

12. Simular o modelo;

13. Após simulação do modelo, analisaram-se os resultados obtidos e depois otimizaram-se os parâmetros da simulação de modo a melhorar esta;
14. Depois de todos os resultados analisados e de se otimizar o modelo, considerou-se a simulação validada.

5.2.2 Estudo de malha

Houve a necessidade de se fazer um estudo de malha para a embalagem, com o intuito de ajustar o melhor possível este parâmetro já que tem uma elevada influência nos resultados obtidos, pois a precisão dos resultados está também relacionada com o refinamento da malha. Deste modo, optou-se pela malha que no estudo realizado apresentasse resultados mais estáveis e com menor tempo de computação.

Visto que o refinamento da malha está diretamente relacionado com o tempo de computação, isto é, quanto melhor for o refinamento da malha, maior vai ser o tempo de simulação do caso de estudo com essa malha. Assim, selecionou-se a malha que permitisse obter resultados com um bom grau de precisão, ou seja, em que as variações de resultados nos refinamentos superiores não fossem significativas, e com o menor tempo de simulação.

Para a realização deste estudo, definiram-se três tipos de malhas diferentes, sendo elas: uma malha com elementos totalmente triangulares (S3R); uma malha com elementos totalmente quadrangulares (S4R); e outra em que misturava os dois tipos de elementos das malhas referidas anteriormente, ou seja, em zonas com mais espaço utilizava elementos quadrangulares e em zonas com espaço reduzido ou de refinamento maior utilizavam-se elementos triangulares.

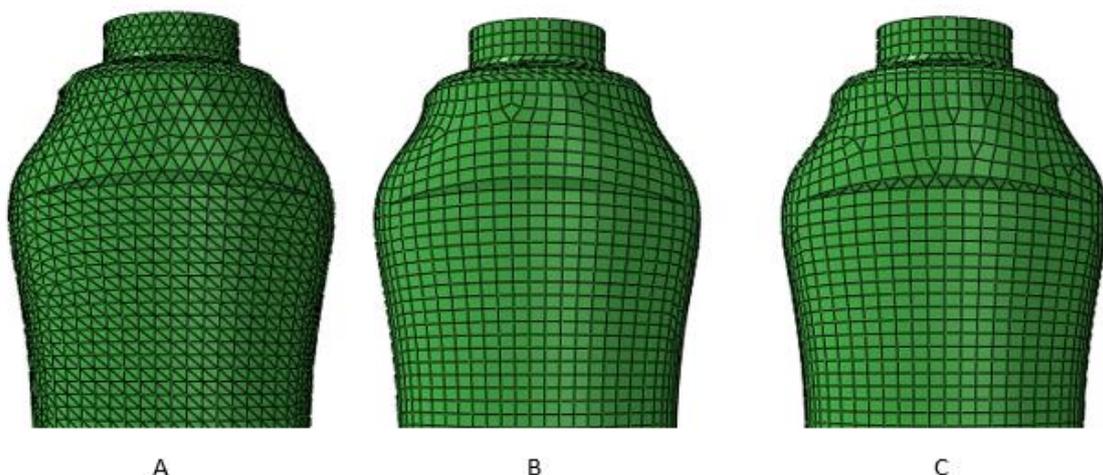


Figura 37: Malhas estudadas. A, malha de elementos triangulares (S3R); B, malha de elementos quadrangulares (S4R); C, malha com elementos triangulares e quadrangulares (S3R/S4R).

Depois de se definir os tipos de malha a estudar, decidiu-se usar uma malha menos refinada para cada um dos tipos, isto é, elementos com elevada dimensão. Efetuou-se uma simulação para cada malha, e a partir dos resultados obtidos observaram-se e registaram-se os valores de tensão e deformação num dos elementos da zona mais crítica da embalagem (transição entre corpo central e corpo superior), que foi a zona que sofreu uma maior deformação nos resultados experimentais. Sendo que estes valores foram retirados sequencialmente em cinco instantes de tempo de simulação, de modo a estudar estes resultados ao longo da simulação.

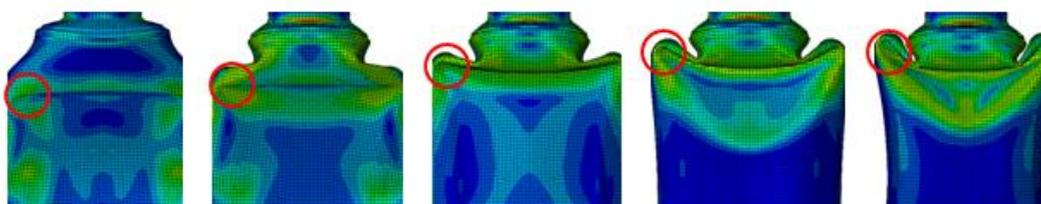


Figura 38: Desmonstração da zona de estudo ao longo dos instantes.

De seguida, foram realizados refinamentos a cada um dos tipos de malha, ou seja, reduziu-se o tamanho dos elementos para cada tipo de malha e voltou-se a simular o modelo, e assim a partir dos resultados obtidos conseguiu-se perceber a influência que a variação das malhas estavam a ter nos resultados. Repetiu-se este passo várias vezes até que os valores de tensão e deformação registados estivessem a convergir para um valor, logo significava que a variação dos resultados obtidos era reduzida apesar do aumento do refinamento. Na tabela 16 são apresentados os resultados do estudo de malha para a malha com elementos triangulares, seguindo-se a figura 39 que demonstra a evolução do refinamento da malha com este tipo de elementos.

Tabela 16: Resultado do estudo de malha de elementos triangulares

Tipo	Tamanho médio dos elementos	Número de elementos	Tensão (MPa) em cada instante de tempo		Tempo de simulação (min)
			Instante 2 (16s)	Instante 5 (40s)	
S3R	7	2401	10,980	34,400	120
S3R	6	3116	11,760	34,340	174
S3R	5	3993	6,990	31,770	196
S3R	4	5389	7,920	32,750	205
S3R	3	7926	6,670	32,510	315
S3R	2,5	10589	6,689	32,500	355
S3R	2	14197	6,685	31,670	739
S3R	1,5	23639	6,683	30,540	1221

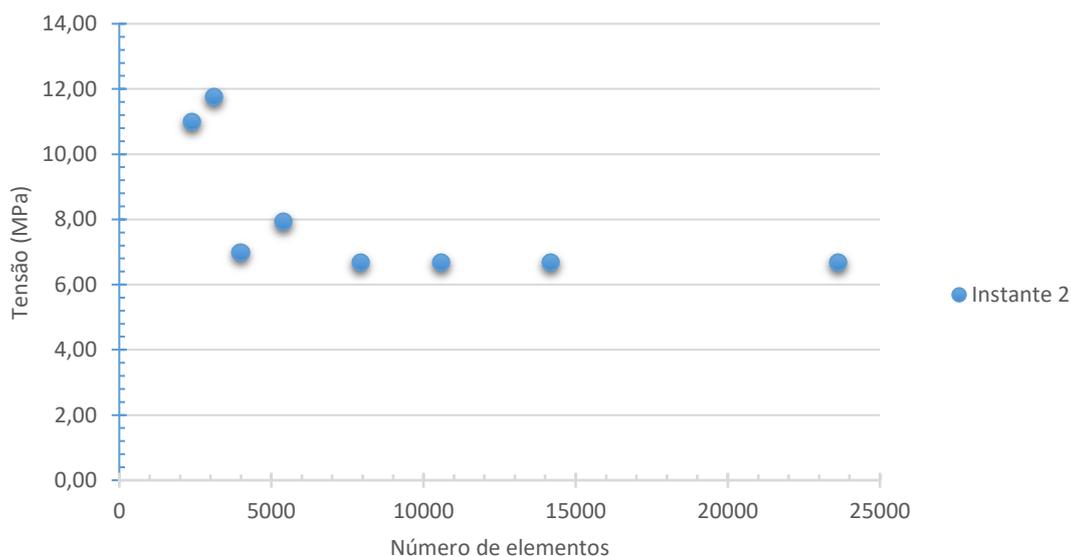


Figura 39: Representação da evolução da malha de elementos triangulares, no instante 2 (16s).

Com os resultados obtidos do estudo de malha de elementos triangulares, concluiu-se que a partir da malha de do refinamento com elementos de tamanho médio 3, os resultados começam a estabilizar, devido a este facto decidiu-se começar o estudo das outras malhas a partir desse refinamento. Nas tabelas 17 e 18 são apresentados os resultados de estudo de malha para as malhas com elementos do tipo quadrangulares e híbridos respetivamente.

Tabela 17: Resultados do estudo de malha de elementos quadrangulares

Tipo	Tamanho médio dos elementos	Número de elementos	Tensão (MPa) em cada instante de tempo		Tempo de simulação (min)
			Instante 3 (24s)	Instante 5 (40s)	
S4R	3	3989	8,350	31,250	246
S4R	2,5	5386	8,340	30,250	257
S4R	2	7416	8,338	30,180	386
S4R	1,5	12749	8,333	31,120	651

Tabela 18: Resultados do estudo de malha de elementos híbridos

Tipo	Tamanho médio dos elementos	Número de elementos	Tensão (MPa) em cada instante de tempo		Tempo de simulação (min)
			Instante 3 (24s)	Instante 5 (40s)	
S3R/S4R	3	4363	9,165	30,000	286
S3R/S4R	2,5	5511	6,710	29,750	299
S3R/S4R	2	7793	5,850	28,760	367
S3R/S4R	1,5	11918	5,860	28,130	507

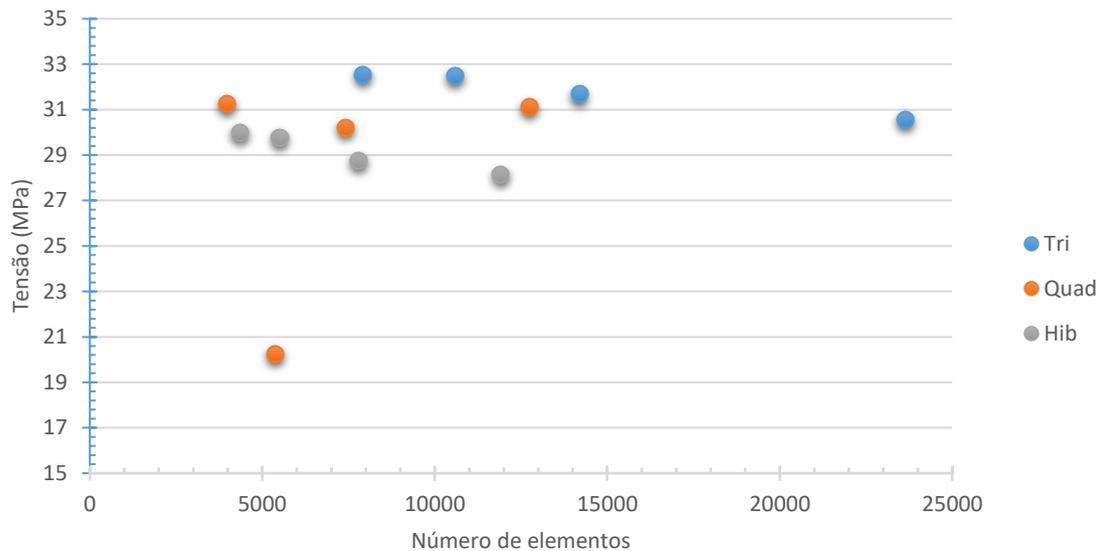


Figura 40: Representação da evolução das três malhas em estudo, no instante 5 (40s).

Após os resultados obtidos para as malhas em estudo, observou-se que as malhas de elementos triangulares com tamanho médio dos elementos 7, 6, 5 e 4 tinham pouca precisão nos resultados apesar de o tempo de simulação ser pequeno, mas uma pequena variação da dimensão dos elementos influenciava muito os resultados, logo eram malhas de precisão reduzida para o objetivo da simulação e por isso foram excluídas.

Das restantes malhas, concluiu-se que as malhas de elementos triangulares com tamanho médio de elementos 2 e 1,5 tinham uma precisão mais elevada, mas comparativamente às restantes malhas, a variação de resultados não era significativa. Visto que estas malhas de precisão elevada, para terem este tipo de consistência tinham de ter um grande número de elementos e como tal o tempo de simulação era elevado.

Depois destas análises, concluiu-se que as malhas com a melhor relação entre tempo de computação e precisão, eram as malhas de elementos híbridos com tamanho médio de 1,5, a de elementos quadrangulares com tamanho médio de 1,5 e a de elementos triangulares com tamanho médio de 2,5, optou-se pela malha com elementos híbridos de tamanho médio de 1,5.

5.2.3 Resultados da análise da embalagem sem fluido

Após o estudo de malha e de todas as afinações do modelo estrutural, foi efetuada a simulação definitiva deste modelo. De seguida, são apresentados os resultados mais interessantes obtidos desta simulação. Primeiro é apresentado as tensões sofridas pela embalagem ao longo do tempo, demonstradas em duas vistas representativas da embalagem.

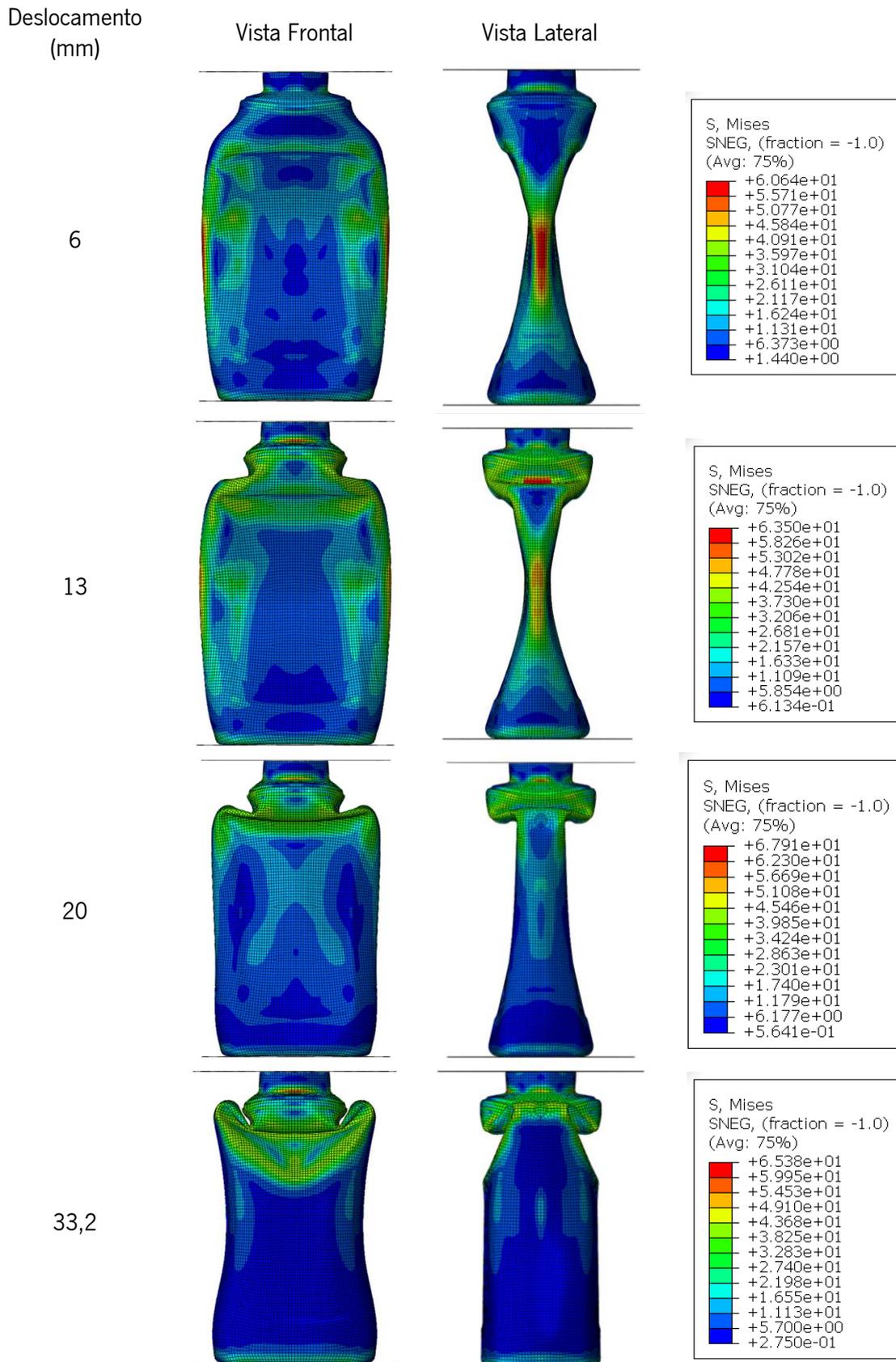


Figura 41: Tenões na embalagem ao longo do tempo de simulação.

Pela a observação destes resultados obtidos da simulação numérica, foi possível verificar que no primeiro instante de tempo as tensões são mais acentuadas na zona lateral da embalagem, pois

esta zona está a sofrer um esforço maior do que as restantes. A partir desse instante foi notório que o maior esforço sofrido pela embalagem passou para a zona crítica, que é a transição entre o corpo central e corpo superior, as tensões tornam-se mais acentuadas nessa zona, pois a embalagem sofre uma deformação inicial e torna-se instável, e quando esta volta a estabilizar esse local é que suporta todo o esforço imposto pelo prato superior.

Na figura 42 são apresentadas as deformações presentes na embalagem ao longo do tempo, com duas vistas diferentes da embalagem.

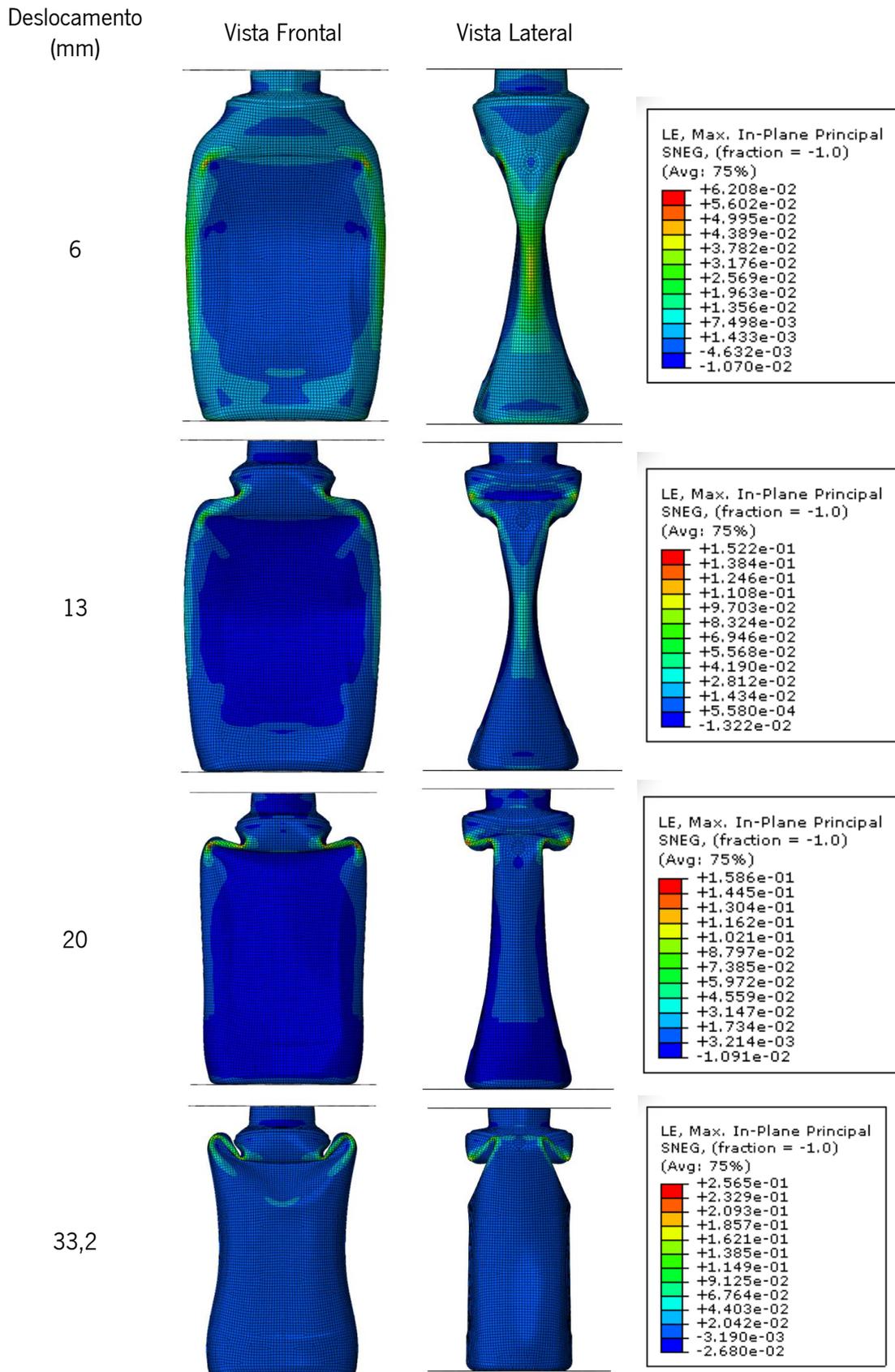


Figura 42: Deformações na embalagem ao longo do tempo de simulação.

Pela a observação destes resultados, foi possível perceber que no primeiro instante de tempo existiu uma deformação da malha da embalagem na zona lateral, pois como a embalagem

começou a deformar no corpo central, os elementos da malha na zona lateral sofreram uma distorção maior do que os restantes. Nos restantes instantes de tempos, como a embalagem começa a estabilizar a distorção dos elementos diminui, sendo que a zona com maior deformação de elementos foi a zona lateral.

Por fim é apresentada na figura 43 a curva força/deslocamento obtida da simulação numérica estrutural, que serviu de comparação com a curva média dos ensaios experimentais. E na tabela 19 é apresentado o valor de força máxima e deslocamento correspondente obtidos a partir da curva.

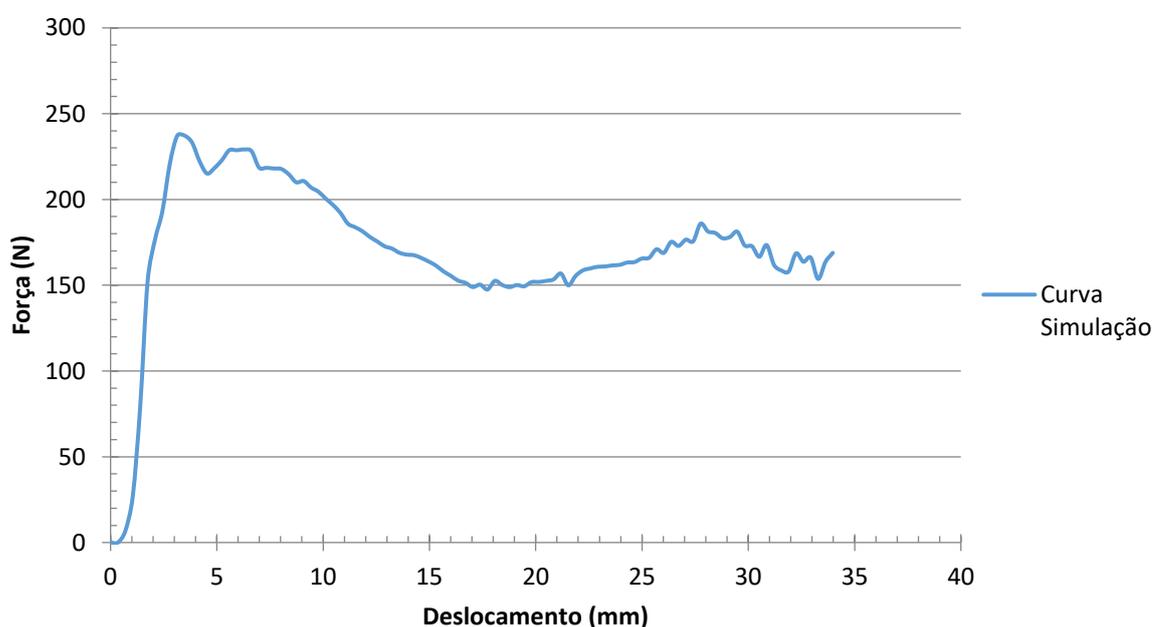


Figura 43: Curva Força/Deslocamento da simulação numérica estrutural.

Tabela 19: Força máxima e deslocamento correspondente, simulação estrutural

Deslocamento (mm)	Força (N)
3,488	237,158

Pelos resultados obtidos da curva força/deslocamento, constatou-se que a embalagem inicialmente tenta contrariar o movimento imposto com maior intensidade. Pois foi possível observar que há um aumento da força até a um ponto máximo, mas após este máximo dá-se uma quebra acentuada da força tal como aconteceu nos ensaios experimentais, pois a embalagem destabiliza e começa a ceder o que leva a que as forças resultantes sejam menos acentuadas do

que inicialmente. Sendo que a partir do momento que a embalagem volta a estabilizar, esta aumenta a sua rigidez e as forças resultantes voltam a aumentar.

5.3. Análise FSI

Nesta análise como já foi referido, foram estudados os modelos numérico CEL e SPH, para tentar perceber qual destes é o mais eficaz em comparação com os ensaios experimentais realizados.

O modelo CEL é um modelo numérico que trabalha a parte estrutural com uma malha Lagrangiana e a parte do fluido com uma malha Euleriana. Este modelo é normalmente o usado para solucionar problemas em que a malha do fluido sofra grandes deformações, pois a malha Euleriana permite acompanhar melhor essas deformações, ou seja, pode se deformar mais que a Lagrangiana. Assim sendo, este modelo é muito eficaz para problemas com fluidos.

O modelo SPH é um modelo que invés de necessitar de uma malha diferente para o fluido, todos os componentes têm uma malha Lagrangiana, apenas no caso do fluido os nós desta malha são convertidos em partículas, permitindo assim uma maior possibilidade de deformação da malha. Que normalmente não possui esta característica, assim este modelo torna-se também muito eficaz para solucionar problemas em que as deformações sejam enormes, podendo ser fluidos ou sólidos.

5.3.1 Procedimento numérico da análise FSI

Na figura 44 está representado o esquema com os passos essenciais na construção do modelo CEL. Sendo também explicado sucintamente cada um dos passos apresentados.

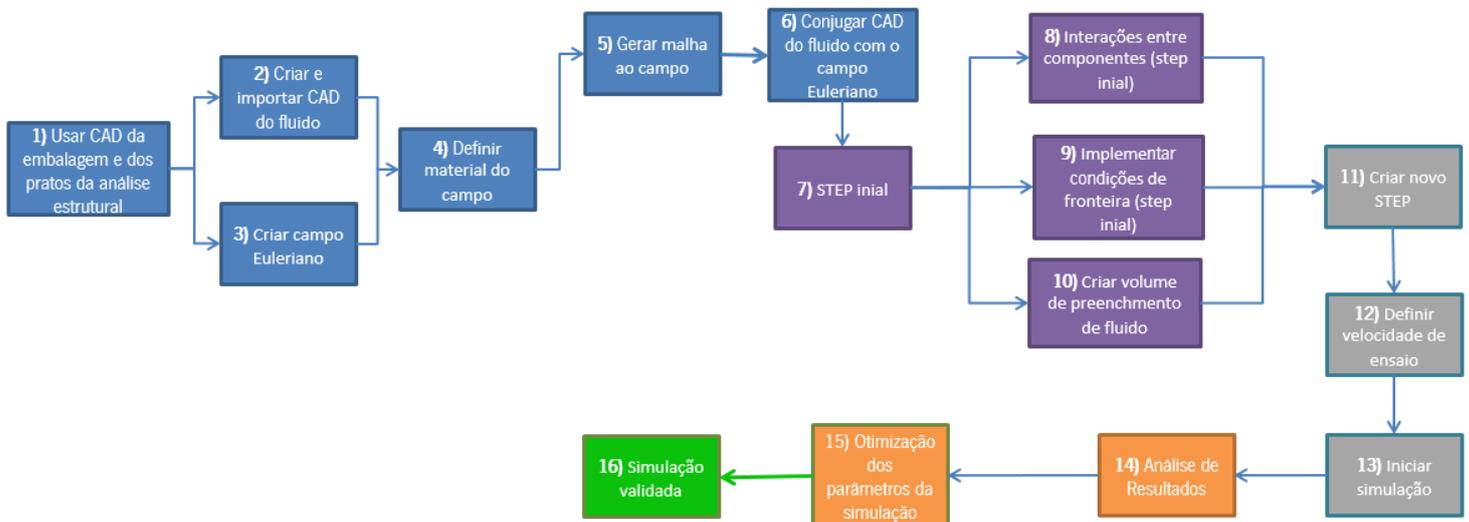


Figura 44: Esquema procedimento numérico CEL.

1. Como o modelo numérico estrutural foi validado, então utilizou-se os componentes construídos nesse modelo assim como todos os parâmetros necessários à simulação, tais como, propriedades dos materiais da embalagem, condições de fronteira e interações. Assim sendo utilizou-se a embalagem e os pratos desse modelo, tanto como as propriedades de cada componente;
2. Neste modelo, como se pretendia simular o ensaio de compressão das embalagens com fluido, foi essencial se construir o CAD do fluido. Para isso, utilizou-se o *software SolidWorks*, depois do CAD criado importou-se o ficheiro *.igs* para o *Abaqus*. Tal como na simulação estrutural, neste modelo também se utilizou apenas $\frac{1}{4}$ dos componentes;

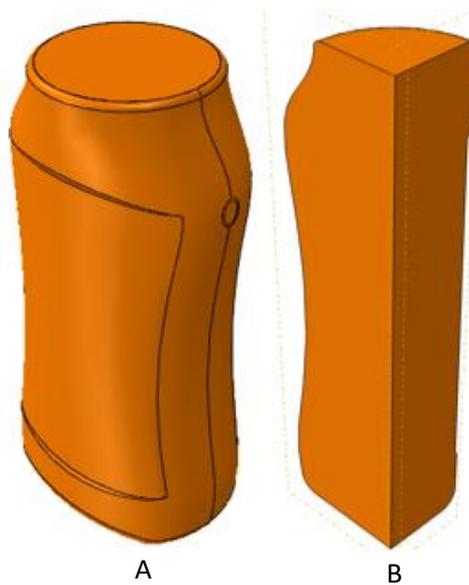


Figura 45: Representação do CAD do fluido. A - CAD complete; B – $\frac{1}{4}$ do CAD inicial.

3. Nesta análise, como foi estudado o modelo numérico CEL então para a construção deste modelo, foi necessário se criar um campo Euleriano, que conjugado com o CAD do fluido, representava o efeito da água ou ketchup na simulação. Pois como já foi referido, o modelo CEL contém uma parte Euleriana que trata de todo o fluido e uma parte Lagrangiana que trata toda a estrutura;
4. Neste passo, atribuiu-se as propriedades do fluido em estudo ao campo Euleriano, ou seja, propriedades da água quando se pretendia simular água e as propriedades do ketchup quando este era simulado. Sendo que o ketchup foi considerado um fluido newtoniano (ver anexo 9.2).

Tabela 20: Propriedades da água e do ketchup

Fluidos	Massa Volúmica (kg/m ³)	Viscosidade (MPa.s)	Velocidade de propagação do som (m/s)
Água	1000	1e-9	1483
Ketchup	1188,53	1e-3	1526,4

5. Gerar a malha do campo Euleriano, que é um parâmetro muito influente nos resultados obtido. Devido a esta influência houve uma necessidade de se estudar qual a melhor malha para utilizar;

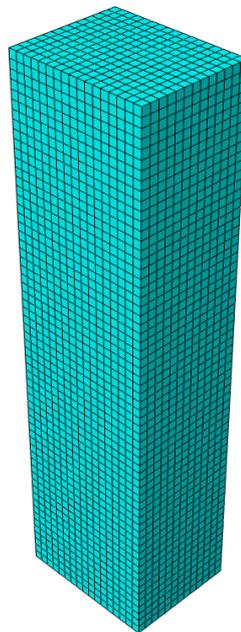


Figura 46: Representação do campo Euleriano já com a malha atribuída.

6. Conjugando o campo Euleriano com o CAD do fluido, isto serviu apenas para definir o volume inicial de fluido. O campo era toda a zona estimada que a água ou o ketchup poderiam percorrer ao longo da simulação, o CAD do fluido apenas serviu para definir no campo o volume de fluido, não precisando por isso de malha e as propriedades de material;

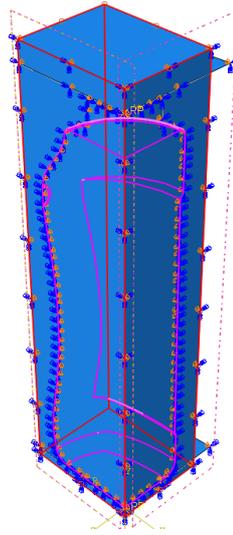


Figura 47: Combinação do campo Euleriano com o CAD do fluido (a vermelho o campo e a rosa o CAD do fluido).

7. Step inicial;

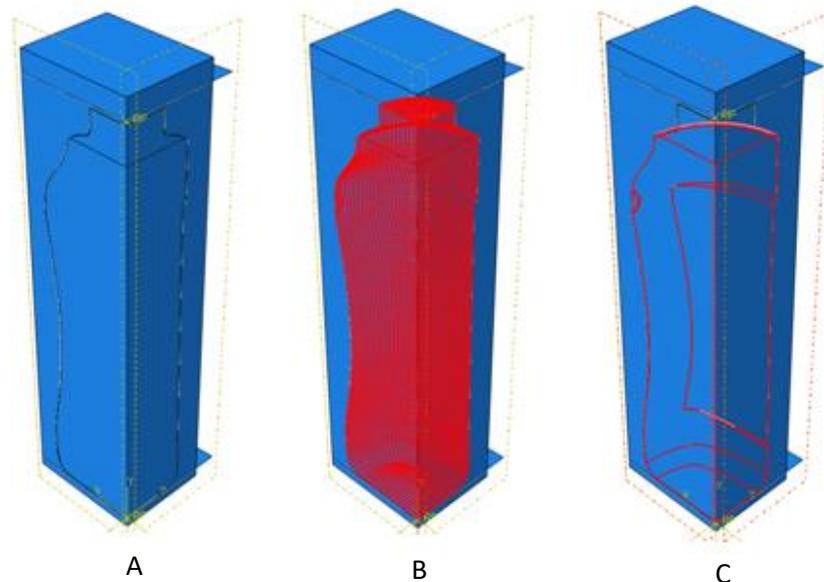


Figura 48: Representação do assembly do modelo CEL. A – Campo Euleriano com embalagem e CAD do fluido no interior; B – A vermelho a embalagem; C – A vermelho CAD fluido.

8. No step inicial, definir as interações entre os componentes, isto é, interação entre embalagem e prato superior, interação entre embalagem e prato inferior e interação entre as paredes da própria embalagem, utilizando o mesmo tipo de interação que no caso sem fluido, com o mesmo coeficiente de atrito. E a interação entre o fluido e parte interior da embalagem, também se considerou uma interação de contacto, mas do tipo “*Rough*”;

- Definiu-se as condições de fronteira, sendo elas: encastre do prato inferior, de modo a este não se mover; limitar o movimento do prato superior, isto é, o prato superior apenas se pode mover na vertical. E ainda se definiu a simetria de cada componente;

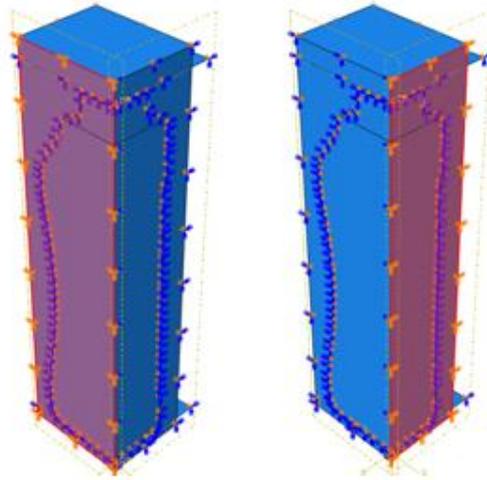


Figura 49: Simetria do campo nos dos dois planos.

- Neste step, ainda se definiu o preenchimento de cada um dos elementos da malha do campo Euleriano, ou seja, como já se tinha definido o volume inicial de fluido, este passo serviu para atribuir a cada elemento da malha a percentagem que este elemento tinha de água ou ketchup. Havendo assim elementos sem fluido, completamente cheios ou parcialmente cheios, tudo isto no instante inicial da simulação, sendo que ao longo da simulação estas percentagens vão se alterando;
- Criar Step 1. Definiu-se como um step dinâmico e explícito, com um tempo total equivalente ao tempo do ensaio experimental. No caso da água definiu-se um tempo de 28 segundos, que corresponde à média do deslocamento máximo dos ensaios experimentais. No caso do ketchup definiu-se um tempo de 34 segundos, correspondendo também à média do deslocamento máximo dos ensaios experimentais;
- Neste novo step implementou-se a velocidade de movimento do prato superior, sendo esta velocidade igual à velocidade de ensaio, ou seja, 50mm/min (aproximadamente 0,83mm/s);
- Simular o modelo;
- Após simulação do modelo, analisaram-se os resultados obtidos e depois otimizaram-se os parâmetros da simulação de modo a melhorar esta;

15. Depois de todos os resultados analisados e de se otimizar o modelo, considerou-se a simulação validada.

5.3.2 Estudo de malha do campo Euleriano

Houve a necessidade de se estudar a malha do campo Euleriano no modelo CEL, pois neste modelo o fluido é representado por um campo, que é a possibilidade que o fluido tem de se mover. É importante se fazer este estudo, pois neste modelo tem de se combinar o CAD do fluido com o campo, de modo a definir o volume inicial de fluido, e no caso da malha do campo ser pouco refinada esta combinação torna-se robusta e o volume inicial de fluido não fica bem definido no campo. Então, quanto mais refinada for a malha do campo melhor se torna a representação do fluido.

Tal como no estudo de malha da embalagem, neste caso também se analisou e registou os valores de tensão da zona crítica da embalagem, na tabela 21 são apresentados os resultados das tensões para dois deslocamentos definidos e na figura 50 é apresentada a evolução da malha.

Tabela 21: Resultados do estudo de malha do campo Euleriano

Tipo	Tamanho médio dos elementos	Número de elementos	Tensão (MPa) em cada instante de tempo		Tempo de simulação (min)
			Instante 2 (13,6s)	Instante 5 (34s)	
EC3D8R	10	380	151,70	-	159
EC3D8R	7	1134	150,61	-	189
EC3D8R	5	3040	148,20	379,20	216
EC3D8R	3,5	8316	138,30	356,62	297
EC3D8R	3	13923	140,70	360,60	364
EC3D8R	2,5	24320	142,70	357,60	497
EC3D8R	2	47500	141,10	-	370*

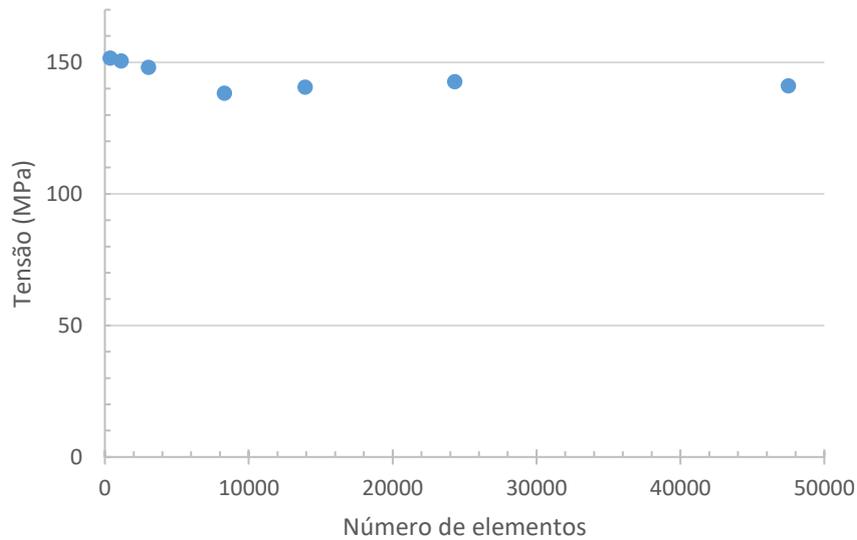


Figura 50: Representação da evolução da malha do campo Euleriano, no instante 2 (13,6s).

Após a análise destes resultados, optou-se pela malha com tamanho médio dos elementos de 3,5, pois constatou-se que os resultados estabilizavam a partir desta.

Na figura 51 está representada o esquema com os passos essenciais na construção do modelo SPH. Sendo também explicado sucintamente cada um dos passos apresentados.

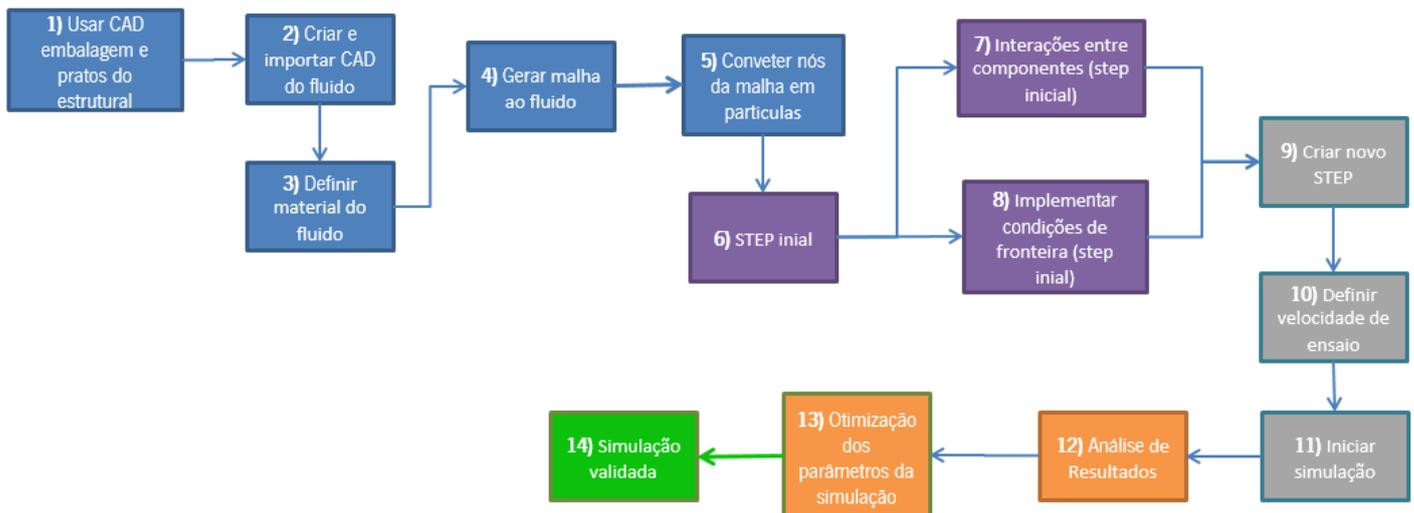


Figura 51: Esquema do procedimento numérico SPH.

1. Como o modelo numérico estrutural foi validado, então utilizou-se os componentes construídos nesse modelo assim como todos os parâmetros necessários à simulação, tais como, propriedades dos materiais da embalagem, condições de fronteira e interações,

sendo que neste caso de estudo não foi possível usar o método de simetria. Assim sendo utilizou-se a embalagem e os pratos desse modelo, tanto como as propriedades de cada componente;

2. Nesta análise, como foi estudado o modelo numérico SPH, não foi necessário se construir o campo Euleriano, pois o CAD do fluido é suficiente para simular o fluido em estudo. Para isso é necessário atribuir o material (água ou ketchup) ao CAD do fluido;

Tabela 22: Propriedades da água e do ketchup

Fluidos	Massa Volúmica (kg/m ³)	Viscosidade (MPa.s)	Velocidade de propagação do som (m/s)
Água	1000	1e-9	1483
Ketchup	1188,53	1e-3	1526,4

3. Definir a malha do fluido, que é um parâmetro muito influente nos resultados obtido. Devido a esta influência houve uma necessidade de se estudar qual a melhor malha para utilizar;

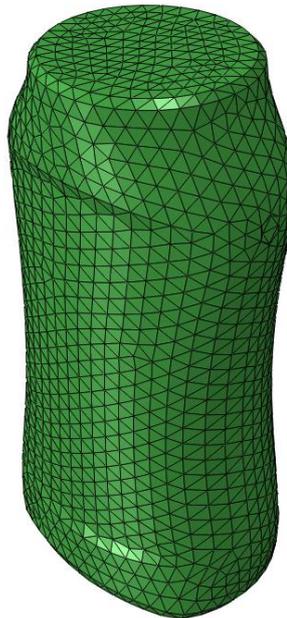


Figura 52: Fluido do modelo SPH.

4. Neste caso, tal como já foi referido não é necessário o campo Euleriano, no entanto foi necessário converter todos os nós da malha do fluido em partículas, para isso basta usar um comando do *software Abaqus* e esta conversão é automática;

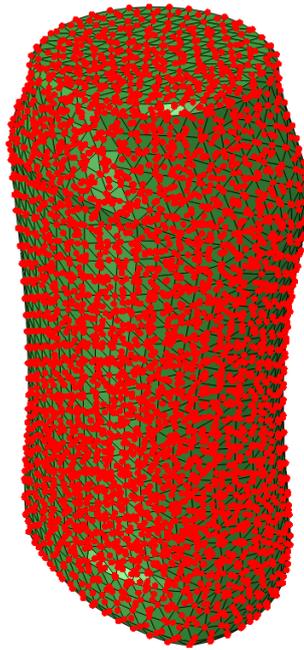


Figura 53: Representação dos nós que vão ser convertidos em partículas.

5. Step inicial;



Figura 54: Assembly do modelo SPH.

6. No step inicial, definiu-se as interações entre os componentes, isto é, interação entre embalagem e prato superior, interação entre embalagem e prato inferior e interação entre as paredes da própria embalagem, considerando neste caso também o mesmo tipo de interação que no caso sem fluido e com um coeficiente de atrito de 0,2. E a interação

entre o fluido e parte interior da embalagem, em que esta interação foi de contacto do tipo “*Rough*”;

7. Definiu-se as condições de fronteira, sendo elas: encastre do prato inferior, de modo a este não se mover; limitar o movimento do prato superior, isto é, o prato superior apenas se pode mover na vertical;
8. Criar Step 1. Definiu-se como um step dinâmico e explícito, com um tempo total equivalente ao tempo do ensaio experimental. No caso da água definiu-se um tempo de 28 segundos, que corresponde à média do deslocamento máximo dos ensaios experimentais. No caso do ketchup definiu-se um tempo de 34 segundos, correspondendo também à média do deslocamento máximo dos ensaios experimentais;
9. Neste novo step implementou-se a velocidade de movimento do prato superior, sendo esta velocidade igual à velocidade de ensaio, ou seja, 50mm/min (aproximadamente 0,83mm/s);
10. Simular o modelo;
11. Após simulação do modelo, analisaram-se os resultados obtidos e depois otimizaram-se os parâmetros da simulação de modo a melhorar esta;
12. Depois de todos os resultados analisados e de se otimizar o modelo, considerou-se a simulação validada.

5.3.3 Estudo de malha SPH

Houve a necessidade de se estudar a malha do fluido no modelo SPH, pois como neste modelo o fluido é tratado como um sólido, apenas tem as propriedades dos fluidos e posteriormente a sua malha é convertida em partículas, isto é, considera-se os nós da malha como sendo partículas e assim permite a uma maior distorção da malha inicial. Esta conversão, permite a este modelo acompanhar bem as deformações na malha convertida em casos de estudo onde exista deformações elevadas do objeto em estudo.

Tal como nos estudos anteriores, também neste foram retirados os valores de tensão na mesma zona que nos anteriores, na tabela 23 são apresentados os resultados das tensões para dois deslocamentos definidos e na figura 55 é apresentada a evolução da malha.

Tabela 23: Resultados do estudo de malha do fluido

Tipo	Tamanho médio dos elementos	Número de elementos	Tensão (MPa) em cada instante de tempo		Tempo de simulação (min)
			Instante 2 (13,6s)	Instante 5 (34s)	
C3D4	10	2927	80,54	132,34	29
C3D4	7	7127	67,23	122,00	31
C3D4	5	16254	62,29	121,20	61
C3D4	3,5	40221	63,25	120,25	209
C3D4	2	141872	62,87	-	502

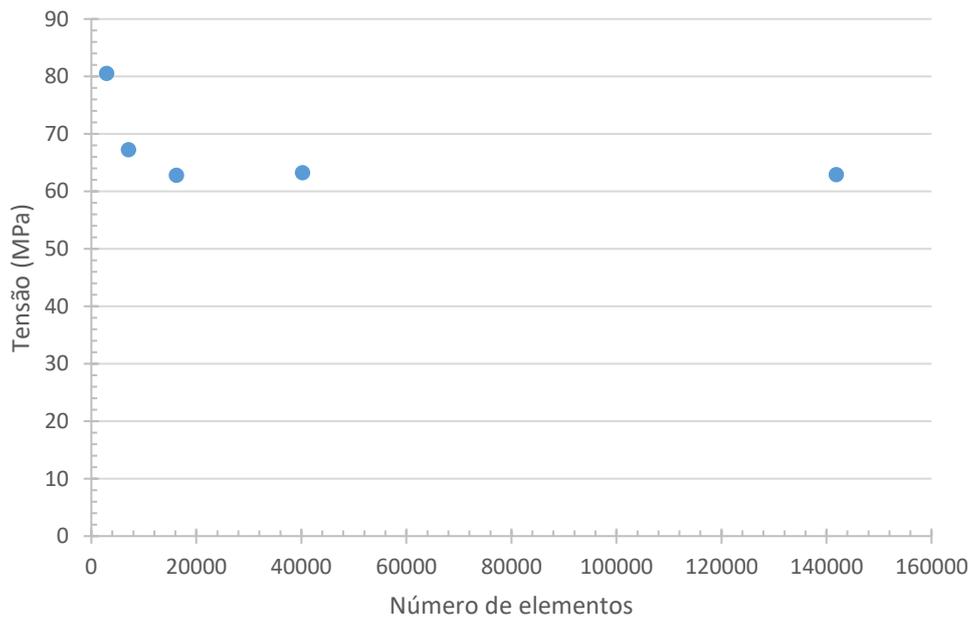


Figura 55: Representação da evolução da malha de elementos triangulares, no instante 2 (13,6s).

Após a obtenção e posterior análise dos resultados, selecionou-se a malha com o tamanho médio dos elementos de 5, pois a partir deste tamanho médio de elementos verifica-se uma estabilização nos resultados das malhas em estudo seguintes.

5.3.4 Resultados FSI

Na apresentação dos resultados dos modelos com fluidos, primeiro são apresentados os resultados obtidos do modelo CEL e posteriormente os resultados do modelo SPH.

5.3.4.1 Resultados CEL

Seguem-se os resultados da água, na figura 56 é apresentado a evolução das tensões ao longo do deslocamento do prato superior, e na figura 57 é apresentado a evolução das deformações para o caso de estudo com água.

- Tensões (água)

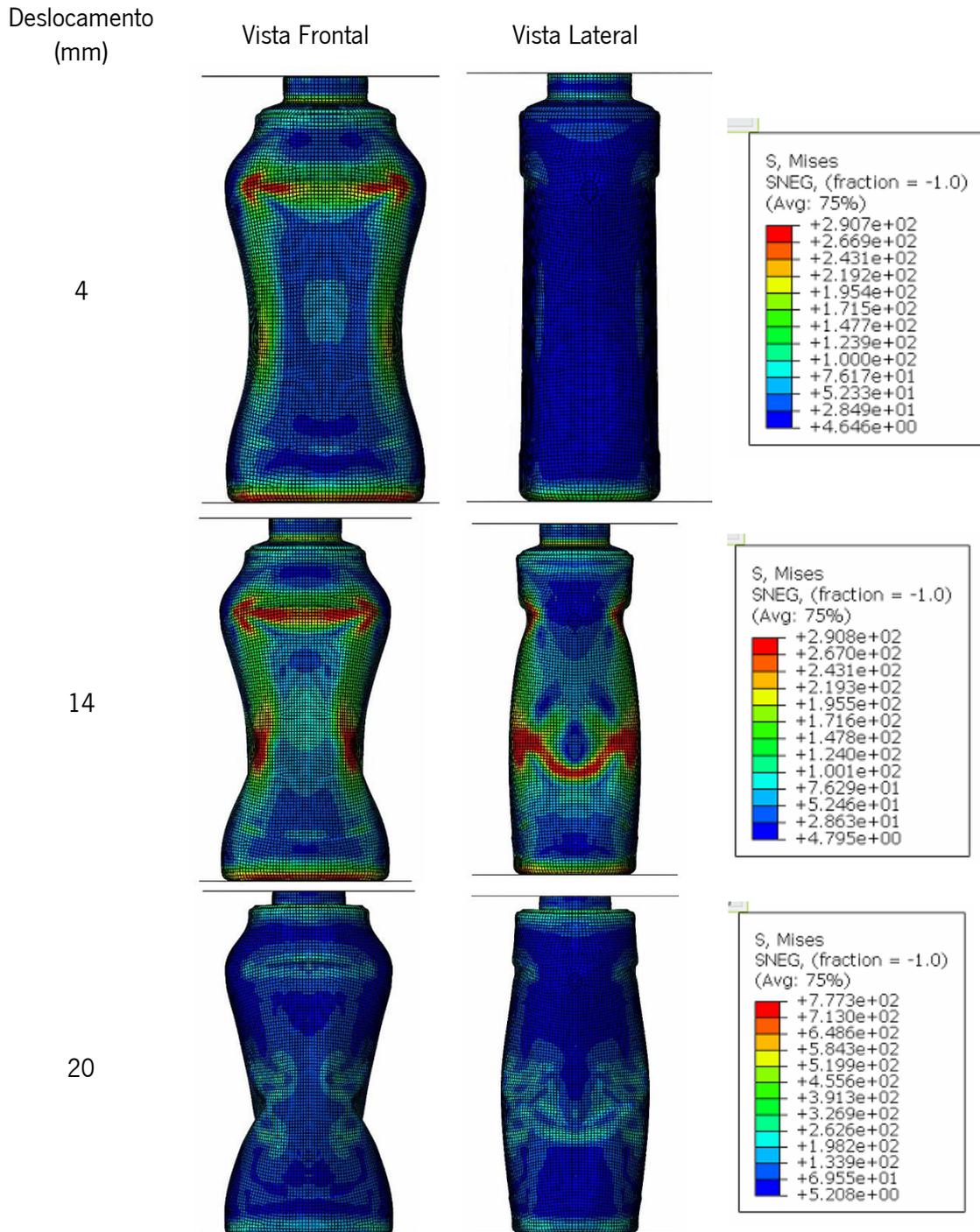


Figura 56: Tensões na embalagem ao longo do tempo de simulação

Pela observação destes resultados obtidos da simulação numérica, foi possível verificar que a zona de transição entre o corpo central e corpo superior (zona crítica) é a que apresenta as tensões mais acentuadas, pois esta zona sofreu um maior esforço ao longo da simulação em relação às restantes zonas da embalagem. No entanto ao longo da simulação também foi possível verificar um aumento das tensões no centro da zona corpo central, pois a embalagem a partir de um

momento começou também a ceder nessa zona, o que levou a um maior esforço efetuado pelos elementos da malha dessa zona e como tal um aumento das tensões.

- Deformações (água)

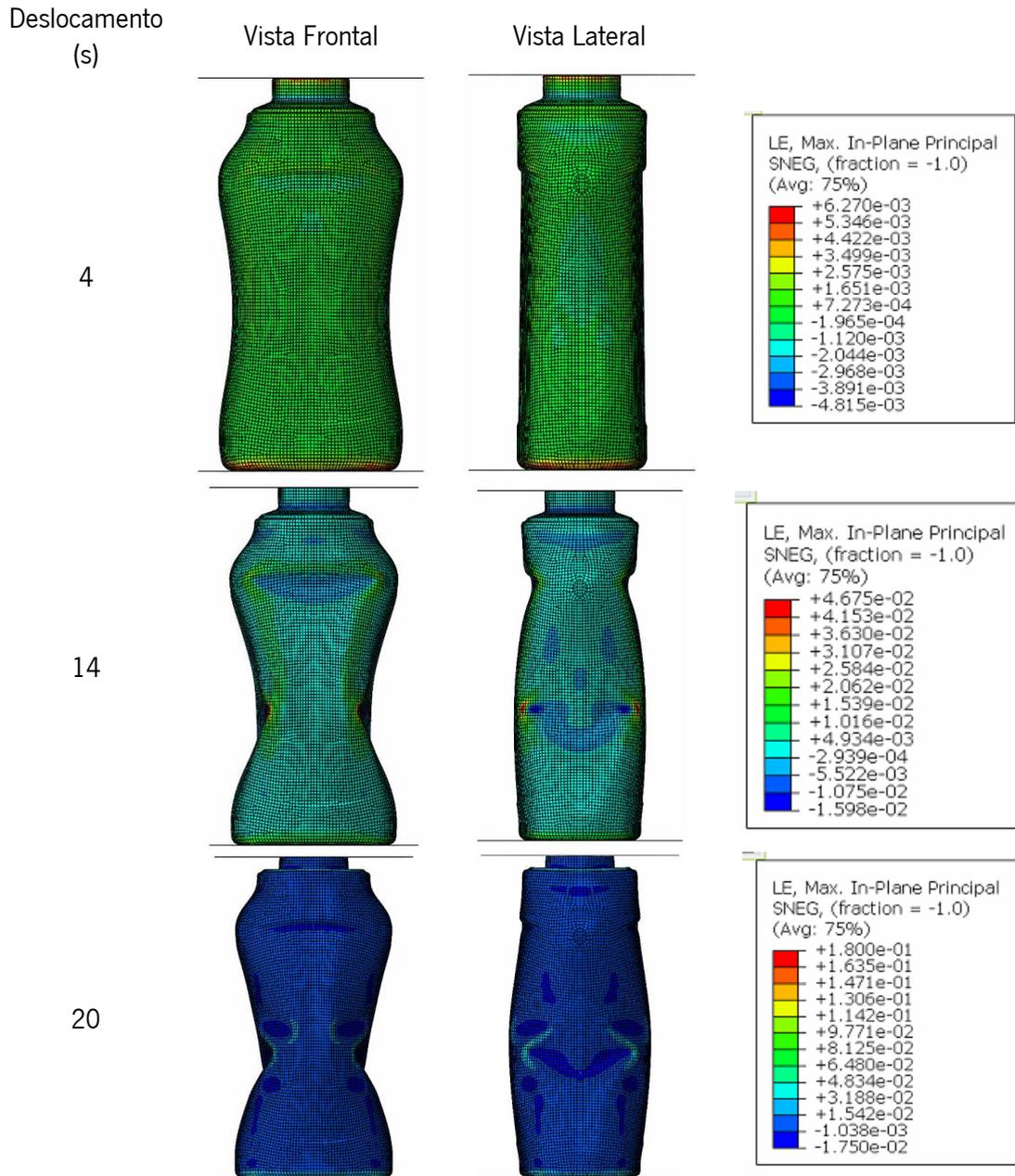


Figura 57: Deformações na embalagem ao longo do tempo de simulação

Pelos resultados a acima apresentados, foi possível constatar que as deformações nos elementos da malha tornam-se mais acentuada ao longo da simulação, sendo que a deformação dos elementos é maior na zona onde os resultados das tensões apresentadas anteriormente eram mais acentuados.

- Curva força/deslocamento (água)

Na figura 58 é apresentada a curva de força/deslocamento obtida a partir da simulação numérica, e na tabela 24 os resultados mais relevantes retirados da curva.

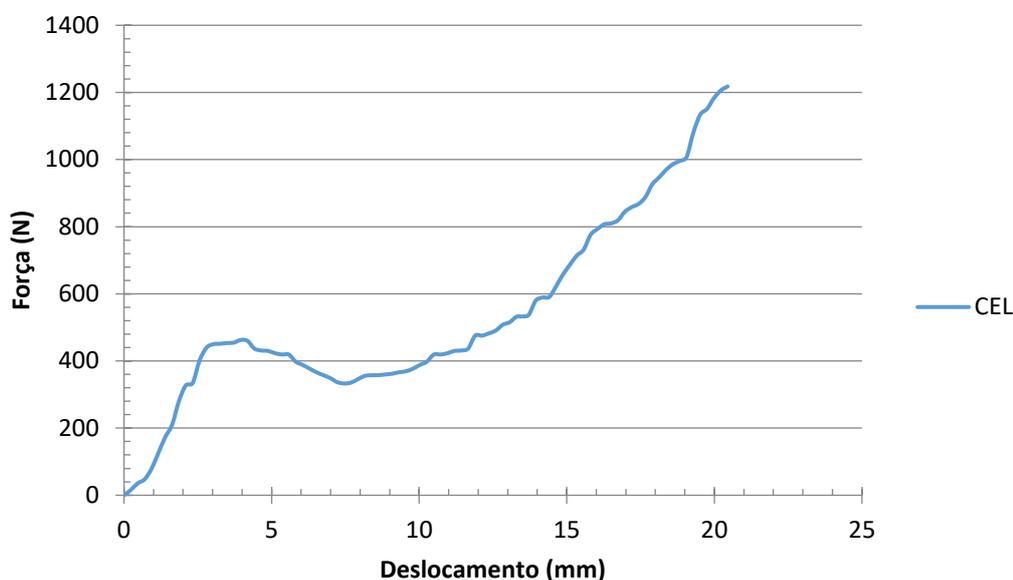


Figura 58: Curva força/deslocamento da simulação numérica CEL da água.

Tabela 24: Força máxima e deslocamento correspondente, simulação CEL da água

Deslocamento (mm)	Força (N)
20,451	1217,664

Com os resultados obtidos desta simulação numérica da embalagem com água, foi possível constatar que tal como nos ensaios experimentais, a força resultante máxima é significativamente superior à força resultante máxima obtida da simulação da embalagem sem fluido, isto deveu-se ao facto de a pressão interna gerada pela água ajudar a embalagem a contrariar o movimento imposto pelo prato superior.

Na curva força/deslocamento obtida da simulação, foi possível perceber que a pressão interna gerada pela água compensa a quebra da força resultante da embalagem, porque quando se deu a quebra da força, imediatamente esta aumenta, pois quando a embalagem destabilizou e começou a deformar deu-se esta quebra, mas a água no seu interior foi definida como um fluido incompressível, tentou contrariar o movimento e assim compensou a quebra da força resultante e aumentou esta de imediato.

Tal como no estudo numérico do caso com água, neste caso (ketchup) inicialmente também apresentado as tensões ao longo da simulação pela figura 59 e na figura 60 é apresentada a evolução das deformações.

- Tensões (ketchup)

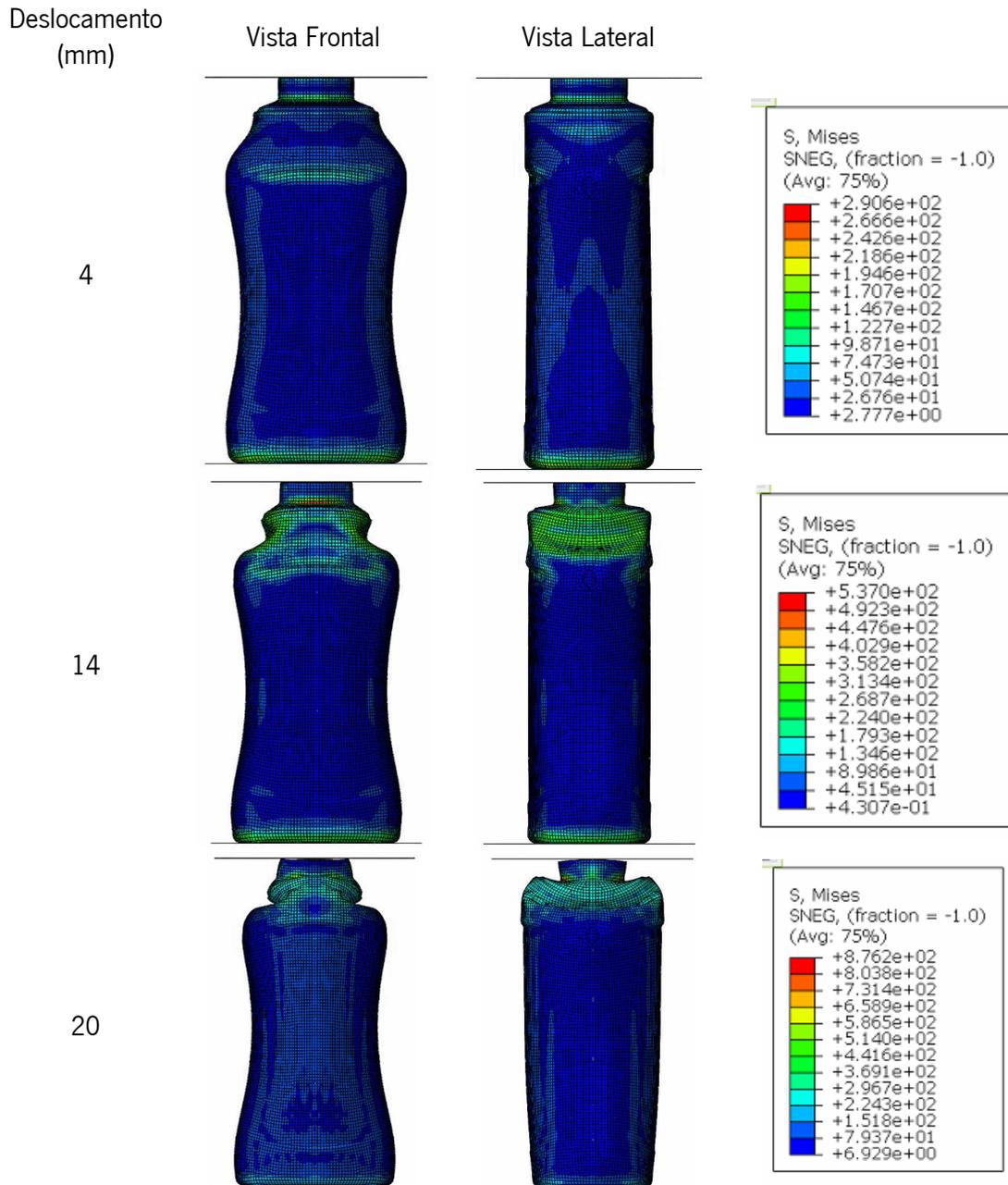


Figura 59: Tensões na embalagem ao longo de tempo de simulação

Pela observação destes resultados obtidos da simulação numérica, foi possível verificar que as zonas de transição entre o corpo central e corpo superior (zona crítica) e corpo superior, são as que apresentaram as tensões mais acentuadas, pois estas zonas sofreram um maior esforço ao longo da simulação em relação às restantes zonas da embalagem. No entanto ao longo da simulação também foi possível verificar um aumento das tensões no centro da zona corpo central, pois a embalagem a partir de um momento também se verificou uma pequena deformação dessa

zona, o que levou a um maior esforço efetuado pelos elementos da malha dessa zona e como tal um aumento das tensões.

- Deformações (ketchup)

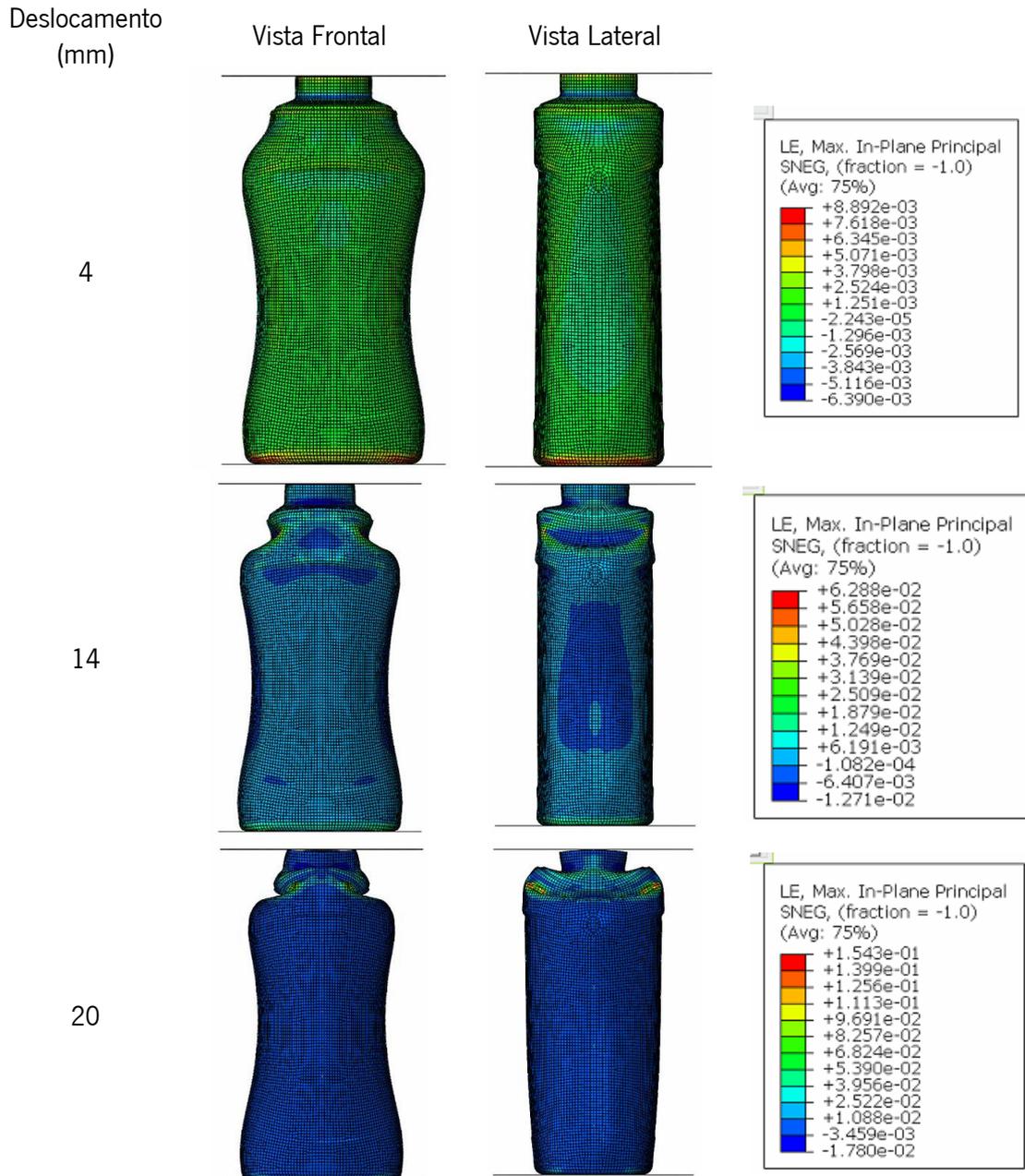


Figura 60: Deformações na embalagem ao longo de tempo de simulação

Tal como foi constatado nos resultados da simulação numérica do modelo numérico CEL no caso com água, na zona em que as tensões são mais acentuadas, os elementos da malha nessa zona sofreram uma maior deformação, sendo que neste caso (ketchup) em geral os elementos da malha sofreram uma maior deformação em relação aos elementos da malha no caso da simulação CEL com água.

Na figura 61 é apresentada a curva de força/deslocamento obtida a partir da simulação numérica, e na tabela 25 os resultados mais relevantes retirados da curva.

- Curva força/deslocamento (ketchup)

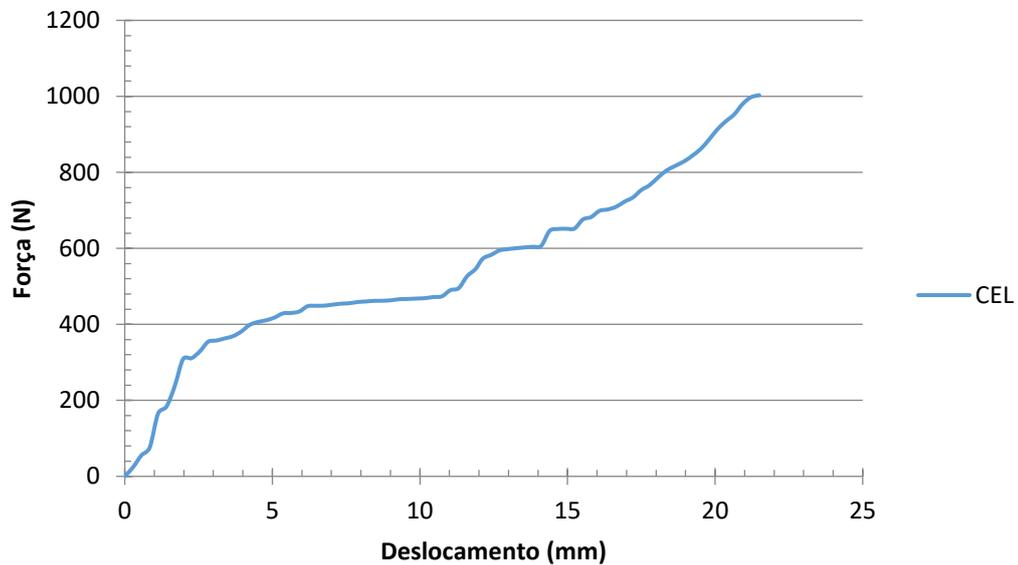


Figura 61: Curva força/deslocamento da simulação numérica CEL do ketchup.

Tabela 25: Força máxima e deslocamento correspondente, simulação CEL do ketchup

Deslocamento (mm)	Força (N)
21,495	1003,252

Com os resultados obtidos desta simulação numérica da embalagem com ketchup, foi possível constatar que tal como no caso de estudo anterior e como nos ensaios experimentais, a força resultante máxima é significativamente superior à força resultante máxima obtida da simulação da embalagem sem fluido, isto deveu-se ao facto de a pressão interna gerada pelo ketchup auxiliar a embalagem a contrariar o movimento imposto pelo prato superior.

Na curva força/deslocamento obtida da simulação, foi possível perceber que a pressão interna gerada pelo ketchup compensa a quebra da força resultante da embalagem, sendo que esta quebra não se verifica. Neste caso o ketchup foi definido como um fluido newtoniano, pois para a velocidade de ensaio imposta o ketchup tem um comportamento newtoniano e como um fluido incompressível, e devido a estas características é que foi possível a este fluido compensar a quebra de força resultante da embalagem quando esta começou a ceder.

5.3.4.2 Comparação dos resultados numéricos do modelo CEL de água vs ketchup

Na figura 62 está representado a sobreposição das curvas força/deslocamento obtidas das simulações numéricas do modelo CEL para o caso com água e ketchup. Na tabela 26 são apresentados os resultados mais relevantes de cada um dos casos em estudo para o modelo CEL.

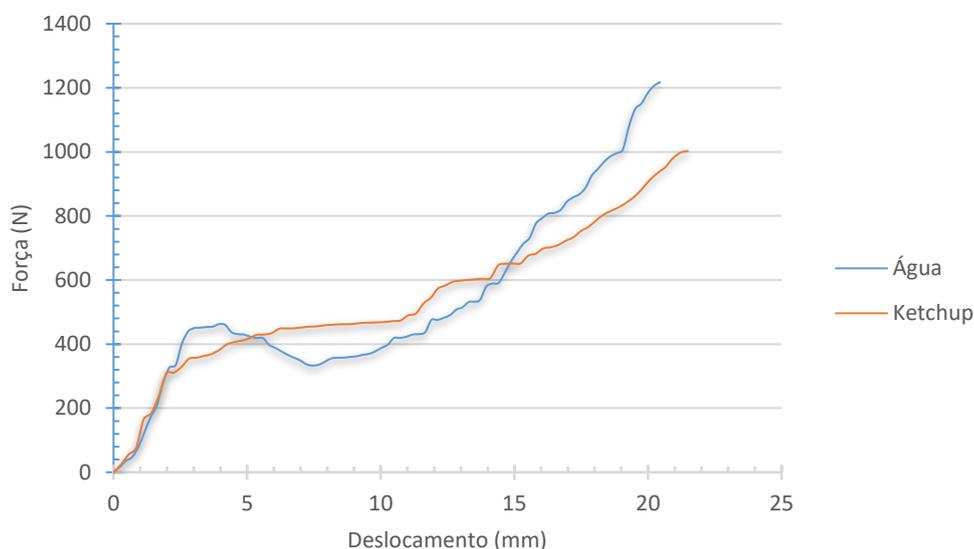


Figura 62: Comparação das curvas força/deslocamento do modelo CEL entre os dois fluidos estudados.

Tabela 26: Comparação da força máxima e deslocamento correspondente entre os dois fluidos estudados, do modelo CEL

Fluidos	Deslocamento (mm)	Força (N)
Água	20,451	1217,664
Ketchup	21,495	1003,252

A partir dos resultados obtidos das simulações o modelo numérico CEL com água e ketchup, foi possível constatar que o comportamento das curvas força/deslocamento é semelhante, sendo possível verificar que no caso com água a força máxima é superior em relação ao caso com ketchup. Também se verificou que o aumento da força é mais acentuado no caso com água do que no caso com ketchup, pois a viscosidade da água é significativamente inferior do que a do ketchup, o que leva a esta ter uma resposta mais rápida para contrariar o movimento imposto em relação ao ketchup, que devido à superioridade no valor de viscosidade, a resposta para contrariar o movimento é mais lenta, o que leva ao aumento da força não ser tão acentuado como no caso com água.

5.3.4.3 Resultados SPH

Tal como no modelo CEL, primeiro são apresentados os resultados da simulado do caso de estudo com água e depois o caso com ketchup. Para cada dos casos de estudo, inicialmente é apresentado a evolução das tensões presentes na embalagem ao longo da simulação (figura 63), assim como a evolução das deformações (figura 64). E por fim, é apresentado na figura 65 a curva de força/deslocamento obtida para o caso de estudo apresentado seguida da tabela (tabela 27) com os resultados mais relevantes obtidos a partir da curva.

- Tensões (água)

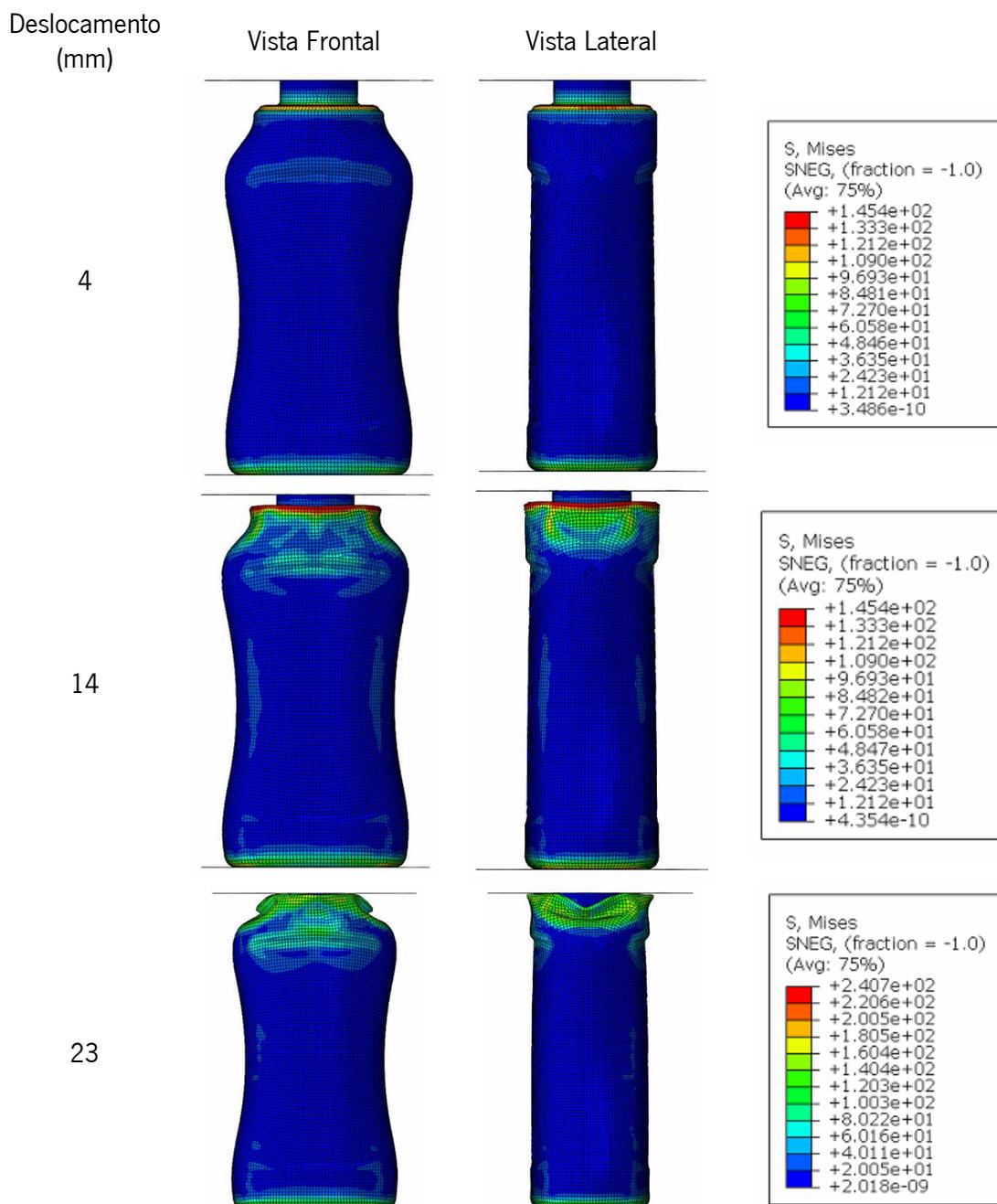


Figura 63: Tensões na embalagem ao longo de tempo de simulação

Pela observação destes resultados obtidos da simulação numérica (SPH), foi possível constatar que a zona do corpo superior mais próxima da tampa é que apresenta as tensões mais acentuadas, pois ao se dar a compressão da embalagem a tampa desta sofreu maior deformação maior, entrando na embalagem, e como tal a zona referida sofreu um maior esforço ao longo da simulação em relação às restantes zonas da embalagem.

- Deformações (água)

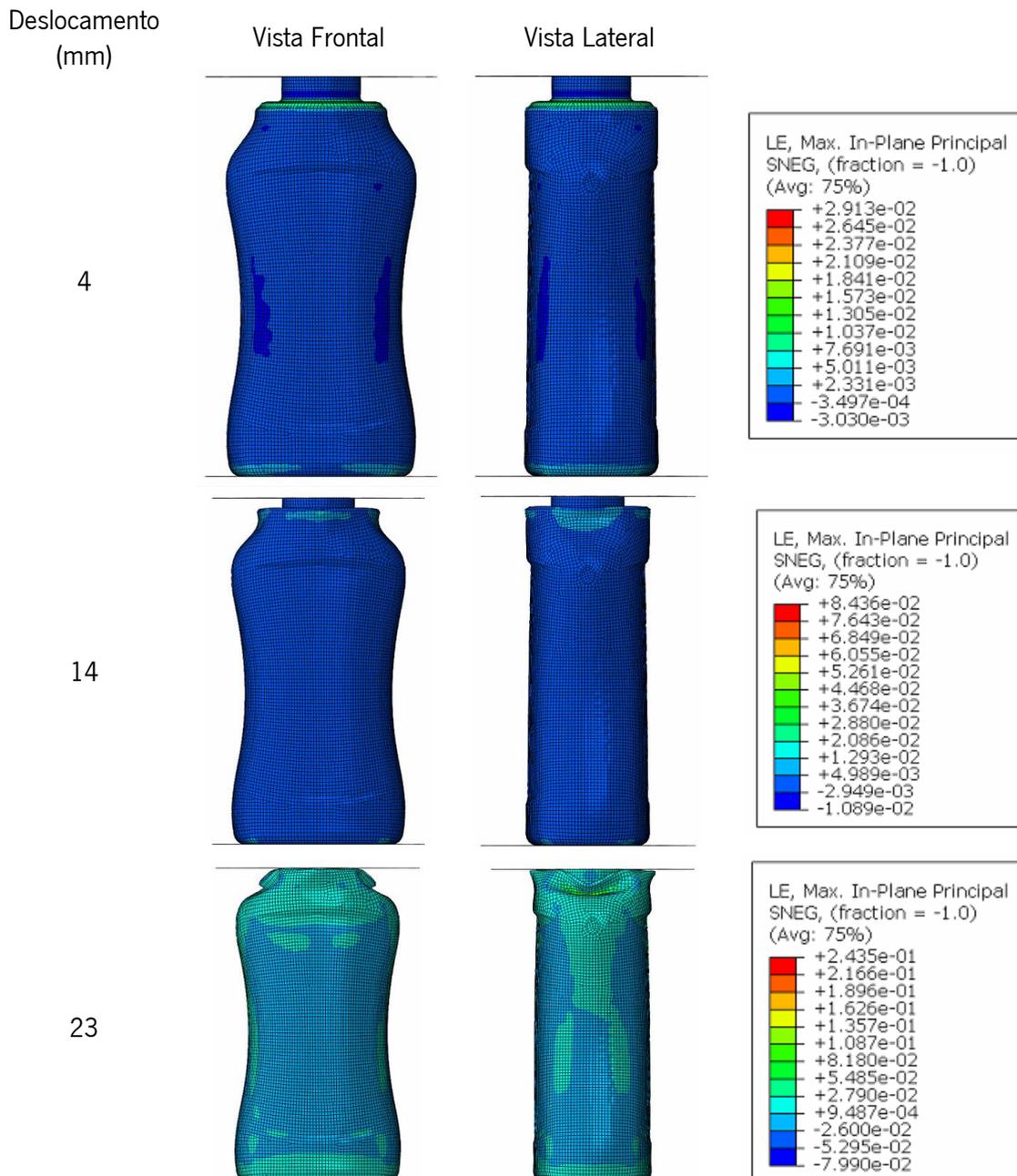


Figura 64: Deformações na embalagem ao longo de tempo de simulação

Pela observação dos resultados da simulação do modelo numérico SPH, foi possível constatar que na zona em as tensões são mais acentuadas, os elementos da malha nessa zona sofreram uma maior deformação, pois como foi referido anteriormente a tampa ao ser comprida entrou na embalagem, levando a que os elementos da zona superior da embalagem sofressem um esforço maior e como tal uma deformação maior.

- Curva força/deslocamento (água)

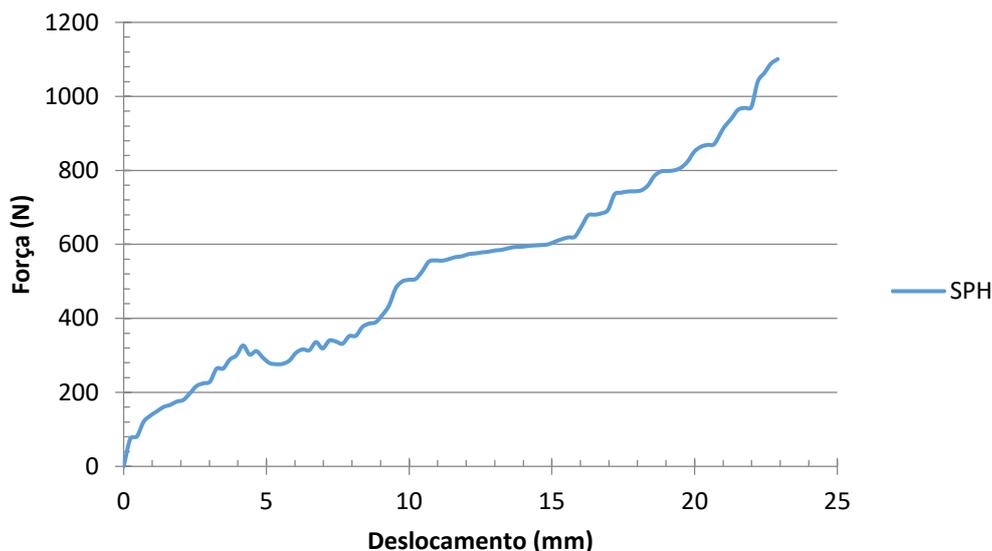


Figura 65: Curva força/deslocamento do modelo numérico SPH da água.

Tabela 27: Força máxima e deslocamento correspondente, simulação SPH da água

Deslocamento (mm)	Força (N)
22,915	1100,752

Tal como no modelo numérico CEL, neste modelo também se contactou a partir dos resultados obtidos da simulação numérica da embalagem com água, que a força resultante máxima é significativamente superior à força resultante máxima obtida da simulação da embalagem sem fluido, isto deveu-se ao facto de a pressão interna gerada pela água ajudar a embalagem a contrariar o movimento imposto pelo prato superior, como já foi referido.

Na curva força/deslocamento obtida da simulação, foi possível perceber que a curva é um pouco diferente do modelo anterior, no entanto constatou-se também que pressão interna gerada pela água compensa a quebra da força resultante da embalagem e deste modo, a quebra da força não é muito significativa, dando-se de imediato um aumento desta devido ao comportamento do fluido.

De seguida são apresentados os resultados obtidos da simulação numérico do modelo SPH para o caso de estudo com ketchup. Tal como no caso de estudo anterior (caso com água), inicialmente é apresentado a evolução das tensões presentes na embalagem ao longo da simulação (figura 66) e as suas deformações (figura 67), e depois a curva de força/deslocamento (figura 68) e uma tabela (tabela 28) com os resultados mais relevantes obtidos da curva.

- Tensões (ketchup)

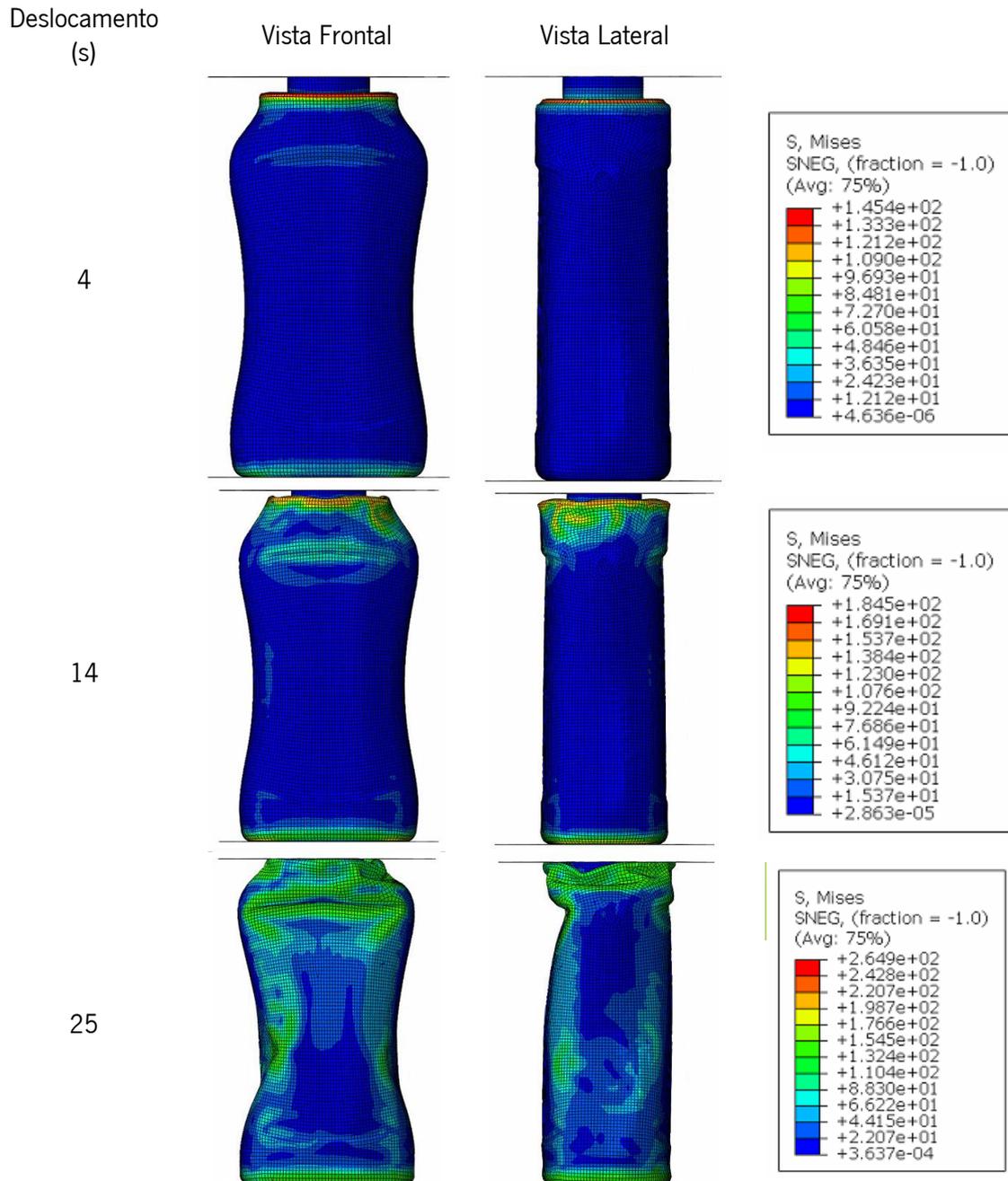


Figura 66: Tensões na embalagem ao longo de tempo de simulação

Tal como foi observado nos resultados obtidos da simulação numérica (SPH) no caso com água também neste caso (ketchup), foi possível constatar que a zona do corpo superior mais próxima

da tampa é que apresenta as tensões mais acentuadas, esta zona sofreu um maior esforço ao longo da simulação em relação às restantes zonas da embalagem, devido às mesmas razões que no caso anterior (água) em que a tampa ao ser comprida entra na embalagem, o que leva a um maior esforço por parte dos elementos da malha na zona referida. Verificou-se ainda que as tensões apresentadas nos elementos da malha neste caso (ketchup) são mais acentuadas do que no caso com água.

- Deformações (ketchup)

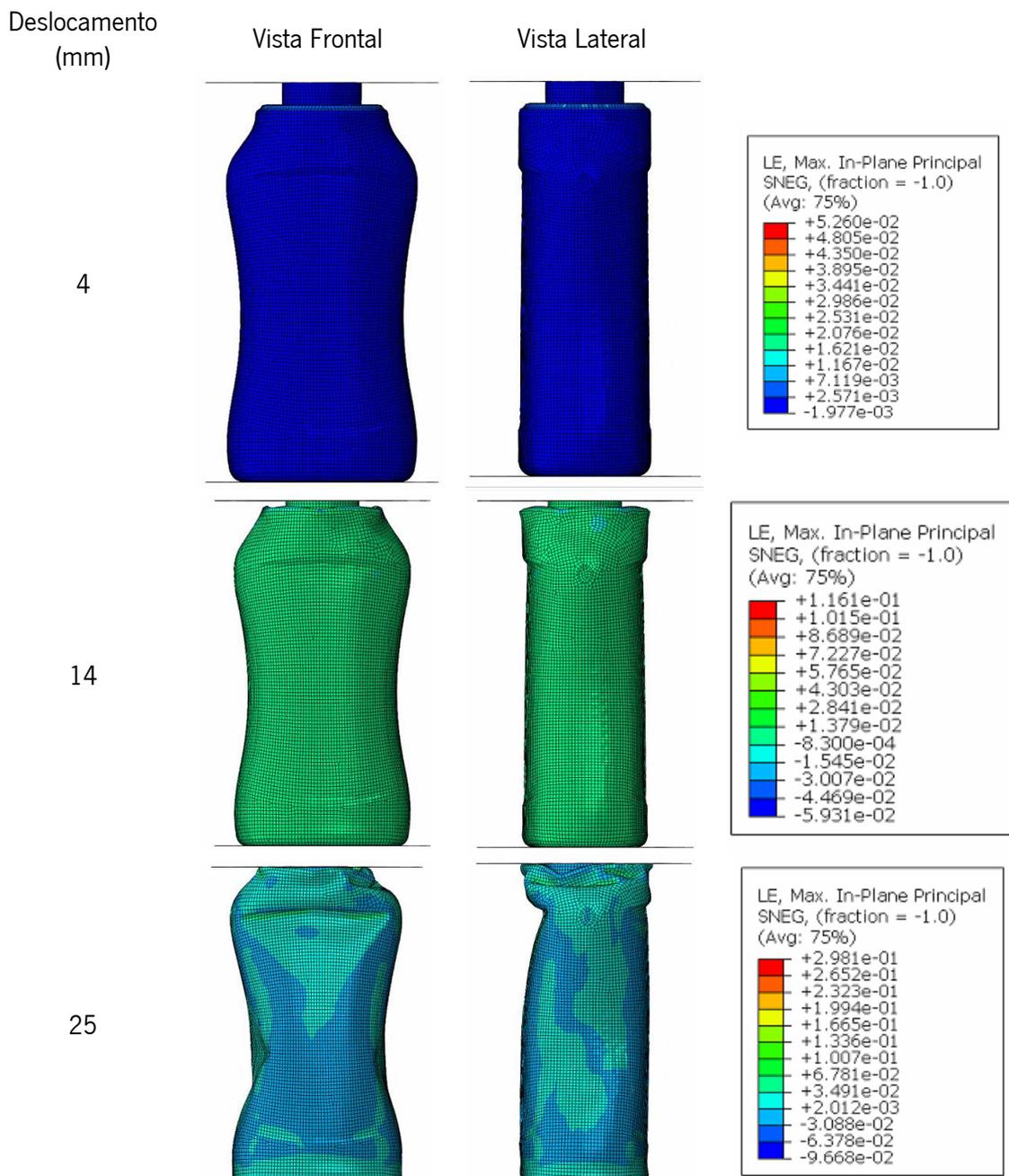


Figura 67: Deformações na embalagem ao longo de tempo de simulação

Tal como foi constatado nos resultados da simulação numérica do modelo numérico SPH no caso com água, na zona em que as tensões são mais acentuadas, os elementos da malha nessa zona sofreram uma maior deformação, devido à razão referida anteriormente, sendo que neste caso (ketchup) em geral os elementos da malha sofreram uma maior deformação em relação aos elementos da malha no caso da simulação SPH com água.

- Curva força/deslocamento (ketchup)

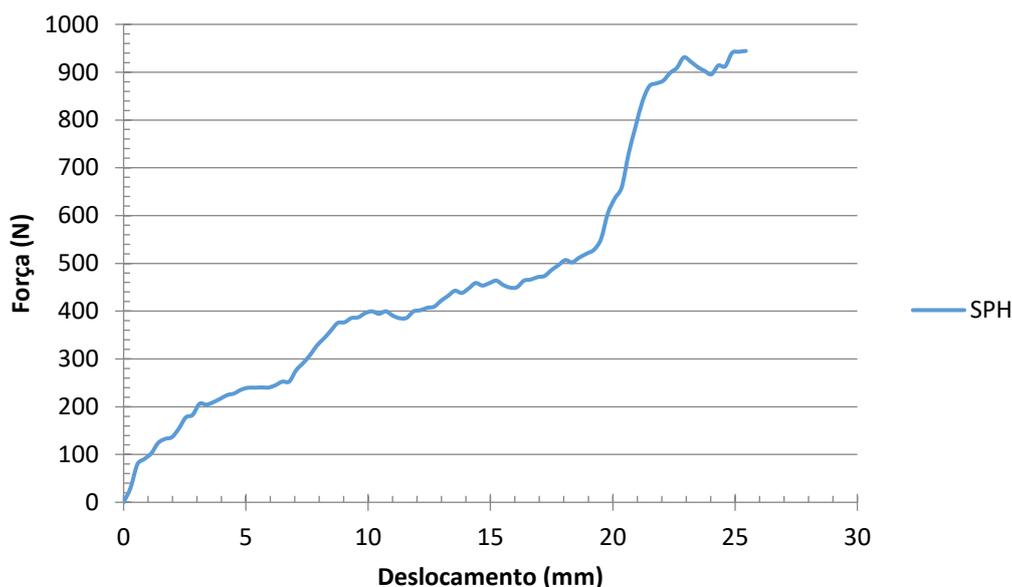


Figura 68: Curva força/deslocamento do modelo numérico SPH do ketchup.

Tabela 28: Força máxima e deslocamento correspondente, simulação SPH do ketchup

Deslocamento (mm)	Força (N)
25,443	944,422

Tal como no modelo numérico CEL, neste modelo também se contactou a partir dos resultados obtidos da simulação numérica da embalagem com ketchup, que a força resultante máxima é significativamente superior à força resultante máxima obtida da simulação da embalagem sem fluido, isto deveu-se ao facto de a pressão interna gerada pelo ketchup ajudar a embalagem a contrariar o movimento imposto pelo prato superior, como já foi referido.

Na curva força/deslocamento obtida da simulação, foi possível perceber que a curva é um pouco diferente do modelo numérico anterior, no entanto constatou-se também que pressão interna gerada pelo ketchup compensa a quebra da força resultante da embalagem e deste modo, a quebra da força não é muito significativa, dando-se de imediato um aumento desta devido ao

comportamento do fluido, e tal como no modelo anterior, neste também o ketchup foi definido como um fluido newtoniano (devido ao seu comportamento newtoniano para a velocidade de ensaio que é uma velocidade lenta e gera taxas de corte baixas) e como um fluido incompressível.

5.3.4.4 Comparação dos resultados numéricos do modelo SPH de água vs ketchup

Na figura 69 está representado a sobreposição das curvas força/deslocamento obtidas das simulações numéricas do modelo CEL para o caso com água e ketchup. Na tabela 29 são apresentados os resultados mais relevantes de cada um dos casos em estudo para o modelo SPH.

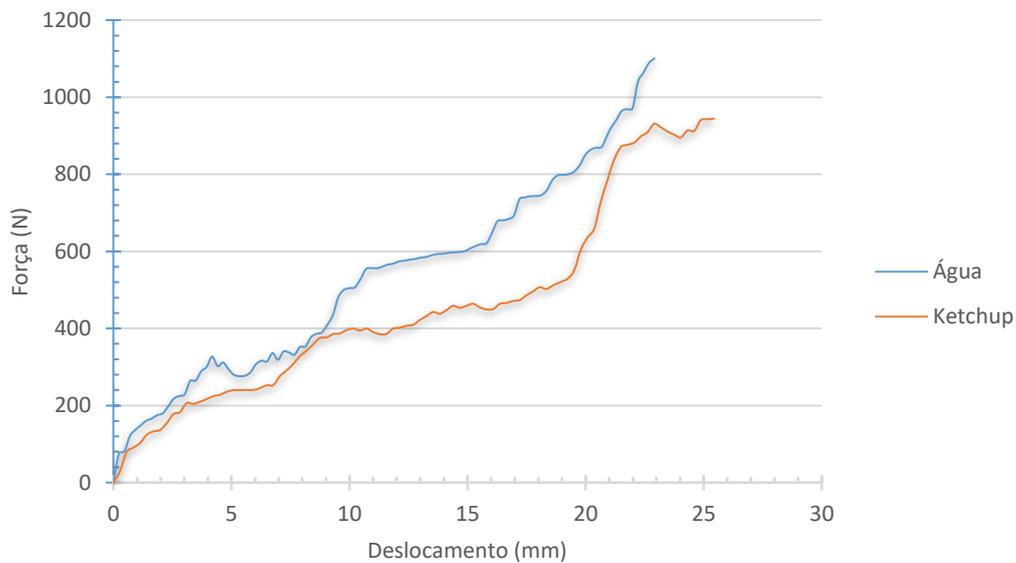


Figura 69: Comparação das curvas força/deslocamento do modelo CEL entre os dois fluidos estudados.

Tabela 29: Comparação da força máxima e deslocamento correspondente entre os dois fluidos estudados, do modelo SPH

Fluidos	Deslocamento (mm)	Força (N)
Água	22,915	1100,752
Ketchup	25,443	944,422

Tal como no modelo numérico CEL, pois a partir dos resultados obtidos das simulações o modelo numérico SPH com água e ketchup, foi possível constatar que o comportamento das curvas força/deslocamento é semelhante, sendo também possível verificar que no caso com água a força máxima é superior em relação ao caso com ketchup. Já em comparação à evolução da curva não se verifica um aumento mais acentuado no caso com água do que no caso ketchup, ao contrário do que foi verificado no modelo numérico CEL.

5.3.5 Comparação dos resultados dos modelos estudados

Nas figuras 70 e 71 são apresentados em cada um deles a sobreposição das curvas força/deslocamento obtidas das simulações numéricas do modelo CEL e SPH, sendo no primeiro para o caso com água e no segundo para o caso com ketchup. Na tabela 30 são apresentados os resultados mais relevantes para a comparação destes modelos nos diferentes casos de estudo em que foram utilizados.

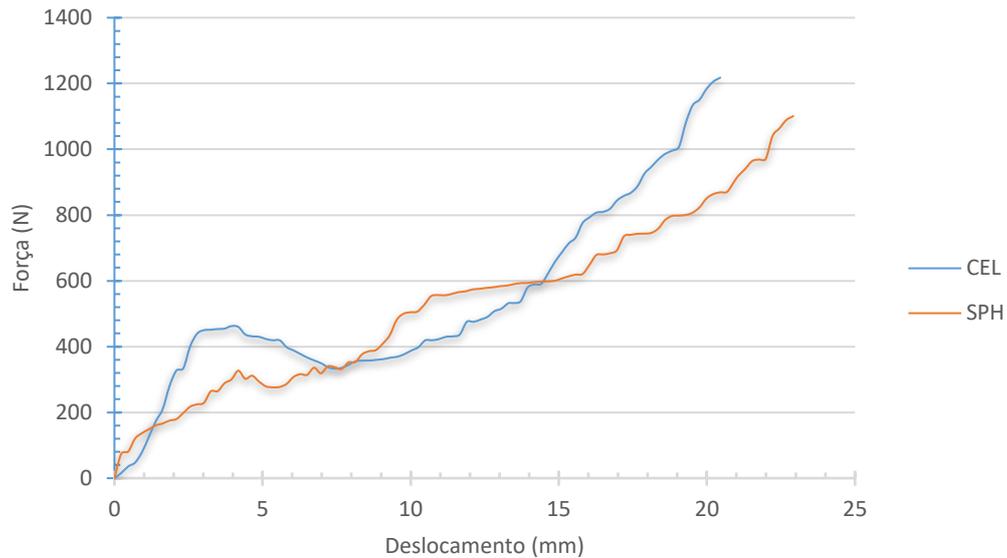


Figura 70: Comparação das curvas força/deslocamento dos modelos CEL e SPH no caso com água.

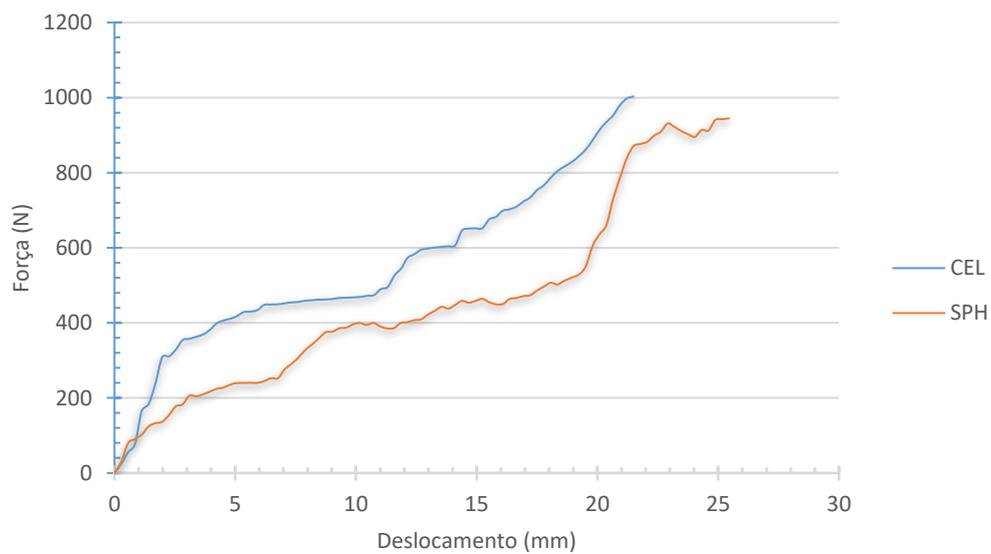


Figura 71: Comparação das curvas força/deslocamento dos modelos CEL e SPH no caso com ketchup.

Tabela 30: Comparação da força máxima e deslocamento correspondente entre os modelos CEL e SPH

Fluidos	Modelos	Deslocamento (mm)	Força (N)
Água	CEL	20,451	1217,664
	SPH	22,915	1100,752
Ketchup	CEL	21,495	1003,252
	SPH	25,443	944,422

Ao comparar os dois modelos numéricos estudados, CEL e SPH, foi possível verificar que no caso com água, quer no caso com ketchup que a curva força/deslocamento obtida é mais realista no modelo numérico CEL em relação ao modelo SPH, pois é possível verificar a quebra da força ou a diminuição de intensidade quando a embalagem começa a ceder, representada nas curvas obtidas no modelo CEL, enquanto que no modelo SPH não foi possível observar esse efeito nas curvas obtidas.

Também ao se observar a tabela 30, a força máxima e deslocamento associado, em cada fluido para cada modelo, foi possível perceber que a força máxima apresentava valores superiores no modelo CEL em relação ao modelo SPH, no entanto no que diz respeito ao deslocamento verificou-se que era o modelo SPH que apresentava valores superiores.

Capítulo VI - Discussão de resultados

6.1. Comparação dos estudos das embalagens sem fluido

Inicialmente foi comparado o comportamento da embalagem entre o ensaio experimental e a simulação numérica para o caso de estudo sem fluido, tal como é apresentado na figura 72.

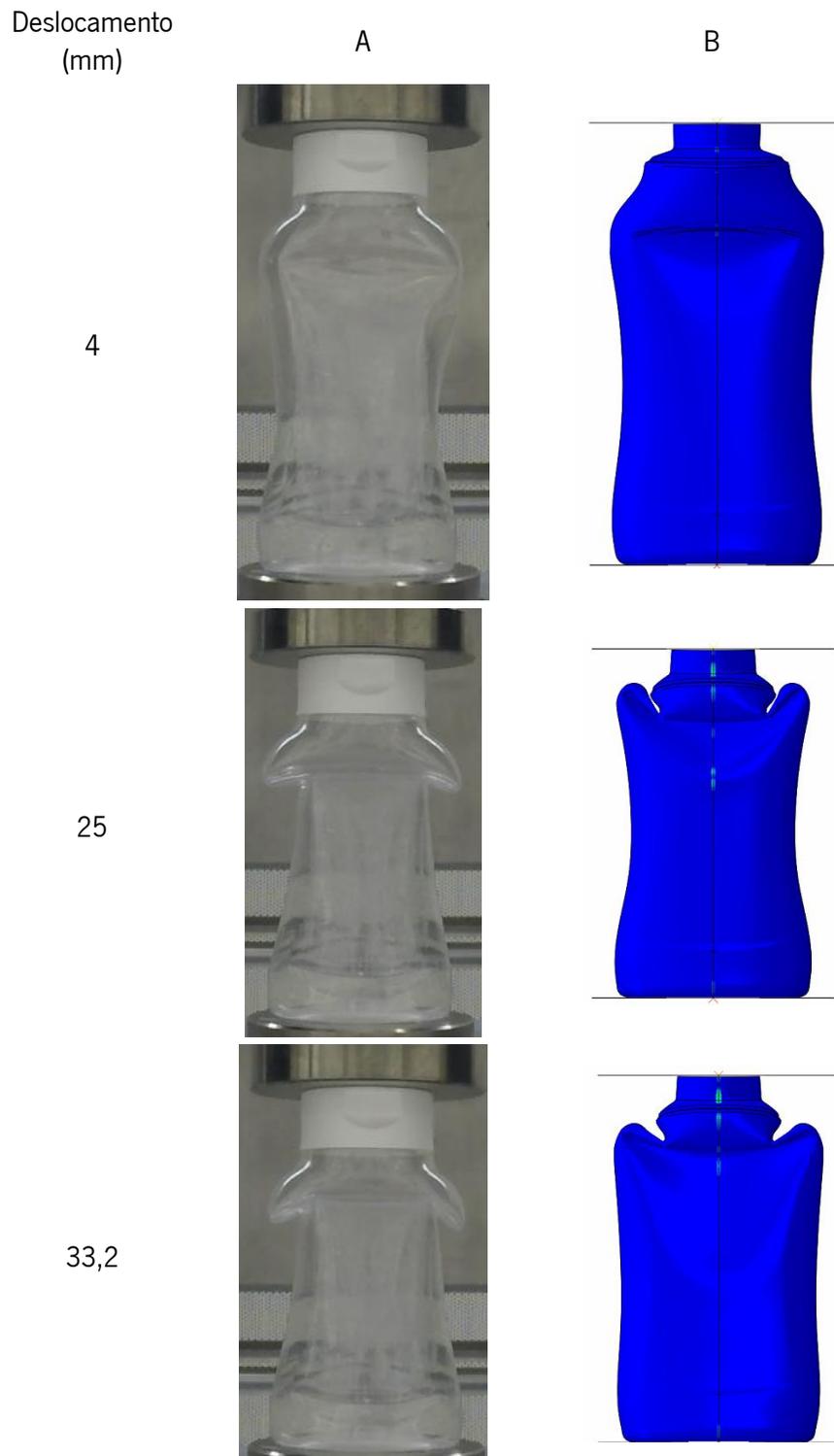


Figura 72: Comparação dos resultados das embalagens sem fluido. A - Ensaio experimental. B - Simulação numérica.

Na figura 73 é apresentada a sobreposição da curva média de força/deslocamento obtida a partir dos ensaios experimentais com a curva de força/deslocamento obtida da simulação numérica, e na tabela 31 é apresentado a força máxima obtida em cada uma das curvas mencionadas e o deslocamento correspondente, sendo também apresentado a diferença percentual entre o ensaio experimental e a simulação numérica destes resultados.

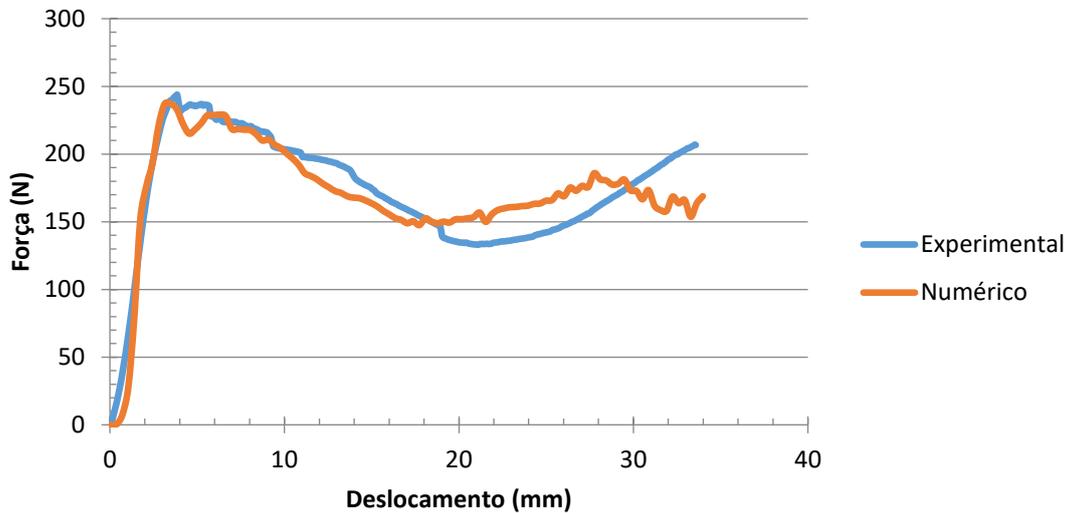


Figura 73: Comparação da curva força/deslocamento experimental com a da simulação numérica estrutural.

Tabela 31: Comparação da força máxima e deslocamento correspondente entre experimental e simulação numérica

	Deslocamento (mm)	Força (N)
Experimental	4,19	248,49
Simulação numérica	3,49	237,16
Diferença (%)	16,75	4,56

Comparados os resultados experimentais com os resultados da simulação numérica estrutural, concluiu-se que os resultados do modelo numérico são muito idênticos aos do ensaio experimental, tanto no comportamento da embalagem ao sofrer a compressão, como na curva força/deslocamento obtida. Também se observou que os valores de força máxima e deslocamento correspondente são próximos à média dos resultados experimentais, tendo uma diferença de 16,75% em relação ao deslocamento e 4,56% em relação à força.

Podendo assim, afirmar que o modelo numérico tem uma boa precisão de resultados, e assim foi possível validar este modelo, como tal, validou-se o modelo de material selecionado para a embalagem, a malha desta, os modelos de interação, e as condições de fronteira de simetria.

6.2. Comparação dos estudos das embalagens com fluido

Na comparação dos estudos das embalagens com fluido, na figura 74 é apresentada a comparação do comportamento da embalagem do ensaio experimental, do modelo numérico CEL e do modelo SPH para o caso de estudo com água.



Figura 74: Comparação dos resultados das embalagens com água. A - Ensaio experimental. B - Modelo CEL, C - Modelo SPH.

Na figura 75 é apresentado a sobreposição da curva média de força/deslocamento obtida a partir dos ensaios experimentais com as curvas de força/deslocamento obtidas da simulação numérica do modelo CEL e do modelo SPH para o caso de estudo em que o fluido é água. E na tabela 32 é apresentado a força máxima obtida em cada uma das curvas mencionadas e o deslocamento correspondente, sendo também apresentado a diferença percentual entre o ensaio experimental e a simulação numérica de cada um destes modelos para os resultados referidos.

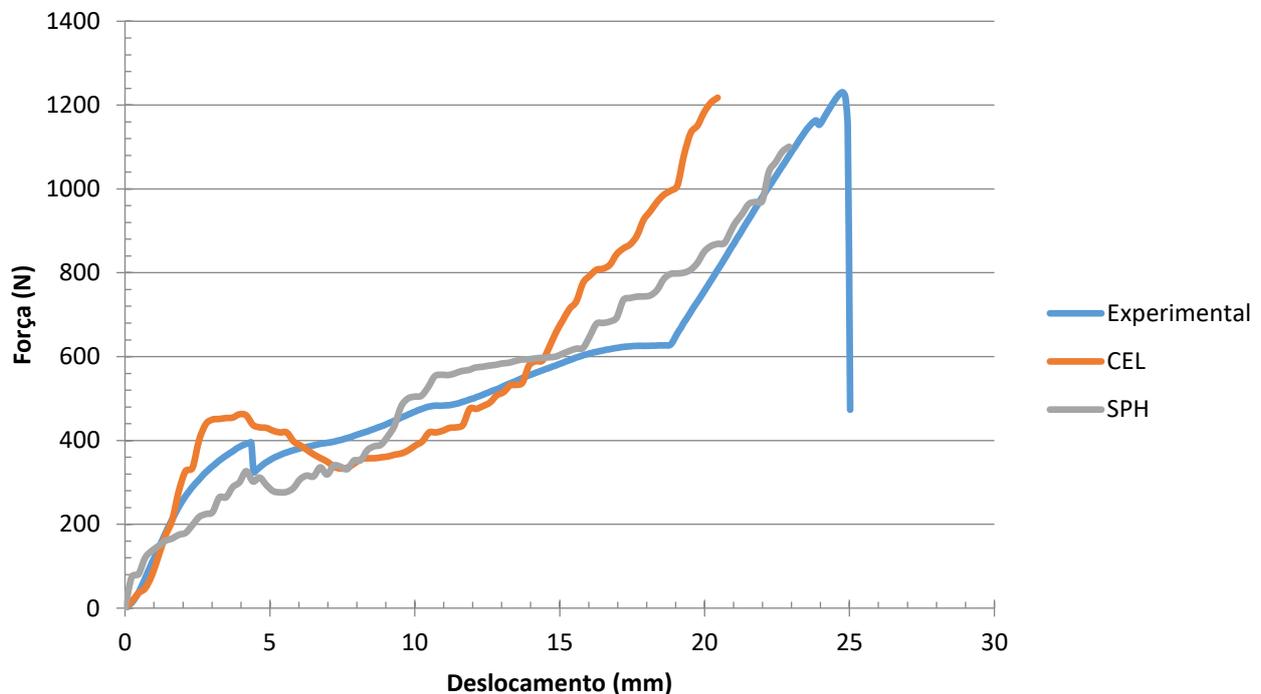


Figura 75: Comparação entre os modelos numéricos CEL e SPH com os dados experimentais, embalagens com água.

Tabela 32: Comparação da força máxima e deslocamento correspondente entre experimental e simulação numérica, para o caso com água

	Deslocamento (mm)		Força (N)	
Experimental	22,92		983,69	
Simulação numérica (CEL SPH)	20,45	22,92	1217,66	1100,75
Diferença (%) (CEL SPH)	10,78	0,03	23,78	11,90

Pelos resultados observados, constatou-se que em termos de comportamento da embalagem o modelo CEL é mais semelhante ao comportamento do ensaio experimental, enquanto que o modelo SPH, apesar de estar nas mesmas condições, este comportamento não se assemelha ao ensaio experimental.

Para além de que as curvas de força/deslocamento obtidas, também se constatou que a curva obtida do modelo CEL tem um comportamento mais idêntico ao experimental, enquanto que a curva do modelo SPH apesar do pico de força ser semelhante e próximo do deslocamento da curva experimental, estas não se assemelham. Pois foi possível constatar na tabela 30, que em relação aos valores de deslocamento o modelo CEL tem uma diferença de 10,78% enquanto que essa diferença apenas é de 0,03% no modelo SPH, já nos valores de força, o modelo CEL apresenta uma diferença de 23,78% e o modelo SPH uma diferença de 11,90%, sendo que no caso de não contabilizar o ensaio experimental da primeira embalagem com água, o valor de força média aumentava e a diferença em relação ao modelo CEL diminuía, enquanto que no modelo SPH essa teria um aumento.

Após análise e comparação de todos os resultados obtidos quer experimentalmente, quer da simulação numérica, no caso do ensaio de compressão de embalagens com água no seu interior, concluiu-se que o método mais eficaz para simular este caso é o modelo numérico CEL.

Na figura 76 é apresentada a comparação do comportamento da embalagem do ensaio experimental, do modelo numérico CEL e do modelo SPH para o caso de estudo com ketchup.

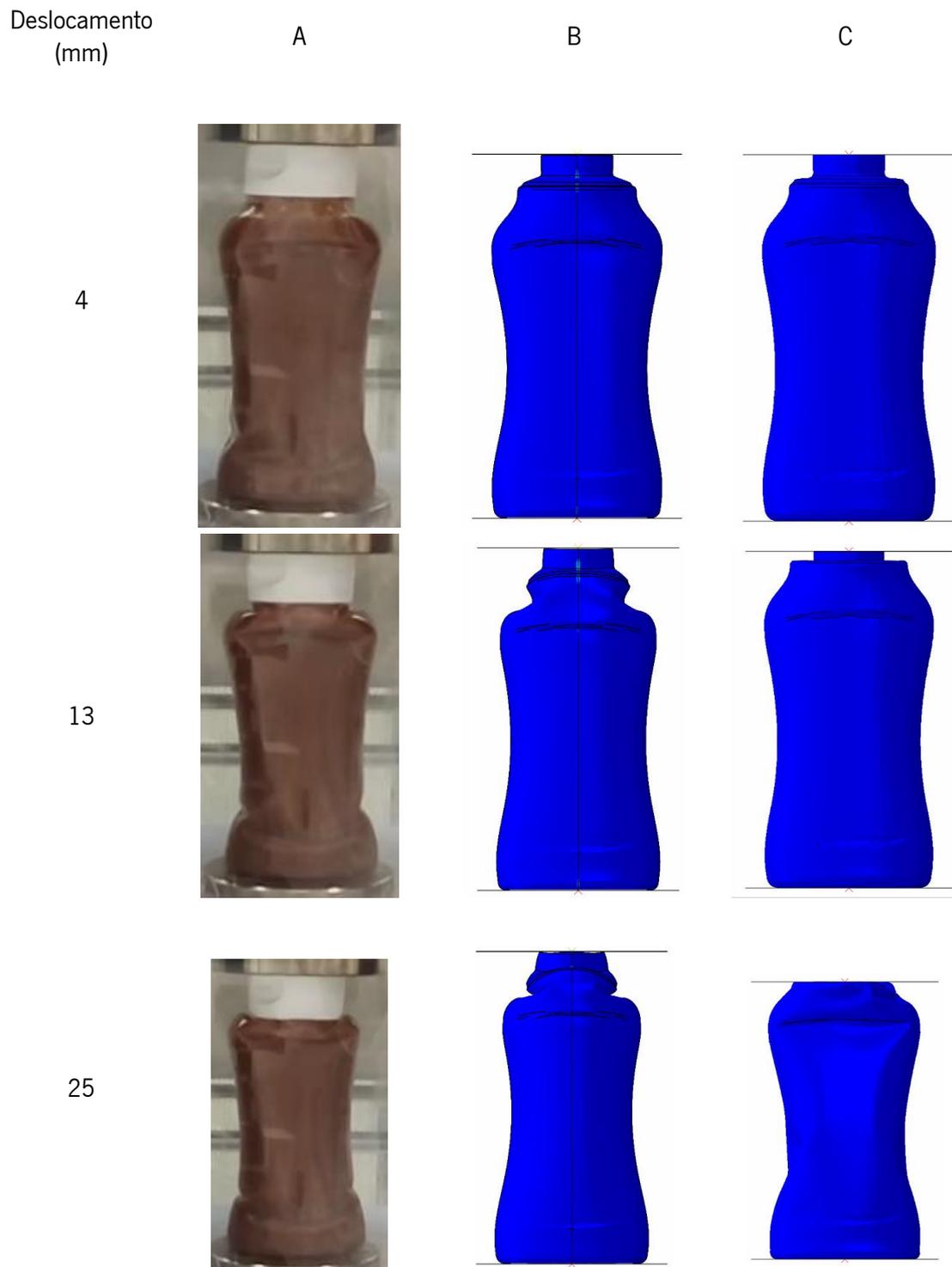


Figura 76: Comparação dos resultados das embalagens com ketchup. A - Ensaio experimental. B - Modelo CEL, C - Modelo SPH.

Na figura 77 é apresentado a sobreposição da curva média de força/deslocamento obtida a partir dos ensaios experimentais com as curvas de força/deslocamento obtidas da simulação numérica do modelo CEL e do modelo SPH para o caso de estudo em que o fluido é ketchup. E na tabela 33 é apresentado a força máxima obtida em cada uma das curvas mencionadas e o deslocamento

correspondente, sendo também apresentado a diferença percentual entre o ensaio experimental e a simulação numérica de cada um destes modelos para os resultados referidos.

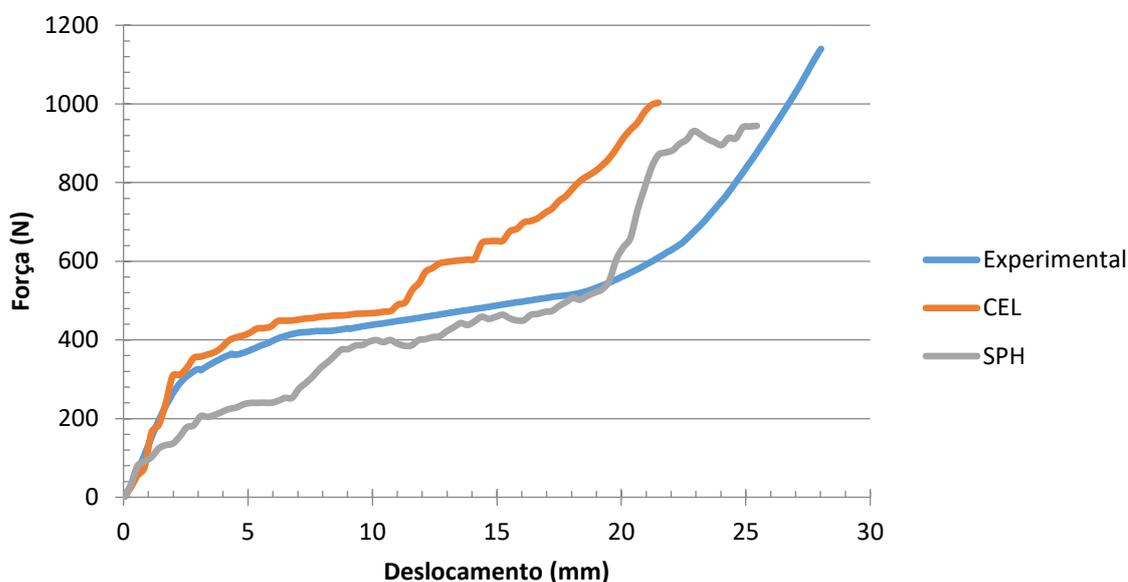


Figura 77: Comparação entre os modelos numéricos CEL e SPH com os dados experimentais, embalagens com ketchup.

Tabela 33: Comparação da força máxima e deslocamento correspondente entre experimental e simulação numérica, para o caso com ketchup

	Deslocamento (mm)		Força (N)	
	Experimental	26,06		1075,68
Simulação numérica (CEL SPH)	21,49	25,44	1003,25	944,42
Diferença (%)	17,53	2,38	6,73	12,20

Pelos resultados observados, constatou-se que em termos de comportamento da embalagem o quer no modelo CEL quer no modelo SPH não são muito semelhantes ao comportamento das embalagens nos ensaios experimentais, sendo que esta diferença no comportamento pode-se dever ao facto de o ketchup ter sido definido como um fluido incompressível, no entanto na realidade pode ter alguma compressibilidade, que faz que que exista esta diferença no comportamento da embalagem.

Apesar de o ketchup ser um fluido não-newtoniano, ele foi definido como sendo newtoniano pois a velocidade de ensaio utilizada gera taxas de corte baixas, e a essas taxas de corte o ketchup apresenta um comportamento newtoniano, e tal como já foi referido foi definido também como sendo um fluido incompressível, no entanto com estas características definidas nos modelos

numéricos para o ketchup, a partir da observação e comparação das curvas de força/deslocamento obtidas, foi possível constatar que a curva obtida do modelo CEL tem um comportamento mais próximo ao comportamento da curva obtida experimentalmente, do que o comportamento da curva do modelo SPH. Depois de analisar a tabela 33, foi possível observar que em relação aos valores de deslocamento o modelo CEL tem uma diferença de 17,53% enquanto que essa diferença apenas é de 2,38% no modelo SPH, já nos valores de força, o modelo CEL apresenta uma diferença de 6,73% e o modelo SPH uma diferença de 12,20%.

Após análise e comparação de todos os resultados obtidos, e tal como no caso anterior, também no ensaio de compressão de embalagens com ketchup no seu interior, concluiu-se que o modelo mais eficaz para representar o ensaio experimental é o modelo numérico CEL.

Capítulo VII - Conclusões

7.1. Estudo estrutural (embalagens sem fluido)

Como já foi referido no capítulo IV (estudo experimental), o estudo estrutural teve como finalidade validar todo o modelo estrutural, condições de fronteira, malhas, modelos de material, interações entre componentes e variação de espessura da embalagem.

Através da observação dos resultados e da comparação deste estudo entre o ensaio experimental e o estudo numérico, concluiu-se que o modelo numérico estrutural tem um bom grau de precisão, sendo os resultados próximos aos do ensaio experimental.

Tal deveu-se às propriedades dos materiais estarem bem definidas e com um elevado grau de precisão já que se utilizaram as propriedades obtidas dos ensaios de tração e densidade. Esta comparação, também permitiu concluir que a malha selecionada para embalagem a partir do estudo realizado, é uma malha com um bom nível de precisão, já que este é um parâmetro com grande influencia nos resultados. Também foi possível concluir que as restantes condições de entrada foram submetidas com sucesso e precisão.

7.2. Estudo FSI (embalagens com fluido)

O objetivo deste estudo, foi simular numérica e experimentalmente ensaios de compressão de uma embalagem com fluido no seu interior (água e ketchup) e compreender qual a influencia de cada um destes fluidos nos resultados obtidos, ou seja, na resposta mecânica da embalagem.

Assim, foi possível constatar através dos resultados obtidos numérica e experimentalmente que a força de reação gerada pelas embalagens com água no seu interior era superior à força das embalagens com ketchup, tal como foi referido, isso deve-se ao facto da água ter uma viscosidade inferior ao ketchup, o que permite ter uma resposta mais rápida à carga imposta, e assim o esforço exercido pelo equipamento teve de ser maior para o mesmo deslocamento.

Comparando os resultados experimentais com os numéricos, constatou-se no modelo CEL, no que diz respeito à curva força/deslocamento este modelo apresenta uma boa precisão, pois os resultados são idênticos, ou seja, as curvas têm comportamentos semelhantes. No que diz ao comportamento da embalagem ao sofrer a compressão, o caso com água aproxima-se mais do ensaio experimental do que o caso com ketchup, no entanto não foi possível concluir que este modelo seja semelhante quer no caso em que o fluido é a água ou no caso do fluido ser ketchup.

No modelo SPH, no que diz respeito à curva força/deslocamento este modelo apesar de apresentar semelhanças nos valores dos resultados da força resultante máxima e do deslocamento correspondente, não foi possível afirmar que as curvas têm um comportamento idêntico às curvas obtidas experimentalmente. No que diz respeito ao comportamento da embalagem, comparando os resultados experimentais com os da simulação, também não foi possível afirmar que este modelo acompanhe com total precisão esse comportamento.

Comparando os resultados modelos numéricos CEL e SPH com os experimentais, concluiu-se que o modelo mais próximo da realidade experimental, ou seja, o modelo mais eficaz para o presente caso de estudo é o modelo CEL, pois apresenta uma maior precisão nos resultados que o modelo SPH.

7.3. Obstáculos encontrados

Como primeiro ponto, revelou-se difícil encontrar informação de modelos numérico que simulassem com rigor o modelo de material do ketchup, para além de estudos semelhantes ao estudo deste projeto. Este é um ponto importante, principalmente pelos modelos que simulassem o ketchup, pois este a ser um fluido não-newtoniano, pode ser definido por vários modelos de material. Assim sendo, optou-se por uma informação mais generalizada e foi definido como sendo um fluido incompressível e newtoniano, pois a partir da informação encontrada o ketchup para a velocidades de ensaio utilizada tem um comportamento newtoniano.

Já nos ensaios experimentais, houve a necessidade de fixar a base da embalagem ao prato da máquina, pois a embalagem ao sofrer compressão escorregava e não sofria uma compressão uniforme, alterando assim os resultados experimentais que eram expectáveis.

Para além disso, nos ensaios com fluidos não era expectável que o fluido escoasse para fora da embalagem, que não fosse por rotura desta. Devido a este problema, apesar do fluido ter saído, os ensaios experimentais não foram interrompidos e como tal a deformação final da embalagem não foi considerada a mais correta.

Nas simulações numéricas com fluidos, não foi possível fazer com que o fluido saísse de dentro desta com precisão, pois não foi possível identificar com que velocidade o fluido escoava. Assim sendo, nas condições de construção dos modelos apenas se considerou o tempo até ao instante que o fluido sai da embalagem, isto foi possível pois como os ensaios experimentais foram filmados, permitiu a obtenção destes dados.

Outros problemas que ocorreram quer relacionados com a simulação numérica quer relacionados com outro ponto da dissertação da tese, foram solucionados com a ajuda dos orientadores do projeto.

Capítulo VIII - Referências bibliográficas

- [1]– **T. C. Papanastasiout, A. G. Boudouvis**, FLOWS OF VISCOPLASTIC MATERIALS: MODELS AND COMPUTATIONS (1997).
- [2]– **Y.K. Leong, Y.L. Yeow**, Obtaining the shear stress shear rate relationship and yield stress of liquid foods from Couette viscometry data (2003).
- [3]– **Evan Mitsoulis**, FLOWS OF VISCOPLASTIC MATERIALS: MODELS AND COMPUTATIONS (2007).
- [4] – **P. Coussot, F. Gaulard**, Gravity flow instability of viscoplastic materials: The ketchup drip (2005).
- [5] – **M. C. Sánchez, C. Valencia, A. Ciruelos, A. Latorre, C. Gallegos**, Rheological Properties of Tomato Paste: Influence of the Addition of Tomato Slurry (2003).
- [6] – **Elena Bayod, Ene Pilman Willers, Eva Tornberg**, Rheological and structural characterization of tomato paste and its influence on the quality of ketchup (2007).
- [7] – **M. A. Rao, Syed S. H. Rizvi, Ashim K. Datta**, Engineering Properties of Foods, Third Edition (2005).
- [8] – ABAQUS. Disponível em: <www.3ds.com>. Acedido em: 10 de Novembro de 2016.
- [9] – **A. A. N. ALJAWI**, Numerical Simulation of Axial Crushing of Circular Tubes (2002).
- [10] – **Matthias Müller, David Charypar, Markus Gross**, Particle-Based Fluid Simulation for Interactive Applications (2003).
- [11] – **A.E.P. Veldman, J. Gerrits, R. Luppés, J.A. Helder, J.P.B. Vreeburg**, The numerical simulation of liquid sloshing on board spacecraft (2007).
- [12] – **A. Karac, A. Ivankovic**, Investigating the behaviour of fluid-filled polyethylene containers under base drop impact: A combined experimental/numerical approach (2008).
- [13] – **Cao Yuan, Jin Xianlong**, Dynamic response of flexible container during the impact with the ground (2010).
- [14] – **I. Smojver, D. Ivan čević**, Coupled Euler Lagrangian Approach Using Abaqus/Explicit in the Bird Strike Aircraft Damage Analysis (2010).
- [15] – **Simulia**, Full Vehicle Durability Using Abaqus/Standard to Abaqus/Explicit Co-simulation (2011).
- [16] – **Jihun Yu, Chris Wojtan, Greg Turk, Chee Yap**, Explicit Mesh Surfaces for Particle Based Fluids (2012).
- [17] – **Simulia**, Fluid-Structure Interaction Analysis of a Prosthetic Aortic Valve using Abaqus/Explicit Smoothed Particle Hydrodynamics (2012).
- [18] – **M. Ahmadzadeh, B. Saranjam, A. Hoseini Fard, A.R. Binesh**, Numerical simulation of sphere water entry problem using Eulerian–Lagrangian method (2013).

- [19] – **Simulia**, Simulation of Hail Impact Using the Smoothed Particle Hydrodynamic Method in Abaqus/Explicit (2013).
- [20] – **Thorben Hamann, Gang Qiu, Jürgen Grabe**, Application of a Coupled Eulerian–Lagrangian approach on pile installation problems under partially drained conditions (2014).
- [21] – **R. Elahi, M. Passandideh-Fard, A. Javanshir**, Simulation of liquid sloshing in 2D containers using the volume of fluid method (2014).
- [22] – **Liu Xiaochuan, Guo Jun, Bai Chunyu, Sun Xiasheng, Mou Rangke**, Drop test and crash simulation of a civil airplane fuselage section (2014).
- [23] – **Jesse A. Sherburn, Michael I. Hammons, Michael J. Roth**, Modeling finite thickness slab perforation using a coupled Eulerian–Lagrangian approach (2014).
- [24] – **Zihang Zhu, Spyros Kamnis, Sai Gu**, Numerical study of molten and semi-molten ceramic impingement by using coupled Eulerian and Lagrangian method (2015).
- [25] – **Pascal Matura, Georg Heilig, Martin Lueck, Martin Sauer**, Simulation and Experiments of Hypervelocity Impact in Containers with Fluid and Granular Fillings (2015).
- [26] – **Antonia Strantzi**, Masters Project Fluid Simulation Using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) (2016).
- [27] – **P.E. Reed, G. Breedveld, B.C. Lim**, Simulation of the drop impact test for moulded thermoplastic containers (2000).
- [28] – **S.H. Masood, V. KeshavaMurthy**, Development of collapsible PET water fountain bottles (2005).
- [29] – **Marija Trčka, Jan L.M. Hensen, Michael Wetter**, Co-simulation of innovative integrated HVAC systems in buildings (2010).
- [30] – **BETA CAE systems S.A.**, Model setup for Abaqus/Standard /Explicit Co-Simulation with ANSA.
- [31] – **Fan Yuxin, Xia Jian**, Simulation of 3D parachute fluid–structure interaction based on nonlinear finite element method and preconditioning finite volume method (2014).
- [32] – **G. Qiu, S. Henke, J. Grabe**, Applications of Coupled Eulerian-Lagrangian Method to Geotechnical Problems with Large Deformations (2009).
- [33] – Particle-Based Fluids COMS6998–Problem Solving for Physical Simulation.
- [34] – **Yihua Xiao, Huanghuang Dong, Jianmin Zhou, Jungang Wang**, Studying normal perforation of monolithic and layered steel targets by conical projectiles with SPH simulation and analytical method (2016).
- [35] – **Mohammad Sarfaraz, Ali Pak**, SPH numerical simulation of tsunami wave forces impinged on bridge Superstructures (2016).
- [36] – **J J Monaghan**, Smoothed particle Hydrodynamics (2005).

[37] – **R. A. Gingold, J. J. Monaghan**, Smoothed particle hydrodynamics: application to non-spherical stars (1977).

[38] – **ASTM D 792 – 00**: “Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement”.

[39] – **ISO 527-2**: “Plastics - Determination of tensile properties – Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics”.

[40] – **ISO 527-1**: “Plastics - Determination of tensile properties – Part 1: General principles”.

[41] – **ASTM D 695 – 02a**: “Standart Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastcs”.

Capítulo IX - Anexos

9.1. Estudos preliminares

Foram efetuados alguns casos de estudo, de modo a aumentar o conhecimento das ferramentas que o software Abaqus proporciona aos utilizadores. Também ajudaram a aumentar a sensibilidade de manipulação do *software*, e assim facilitar a construção dos modelos numéricos que pretendem solucionar problemas de engenharia.

Estudaram-se três modelos de simulação diferentes, sendo eles o modelo CEL (*Coupled Eulerian-Lagrangian*), o modelo de Co-Simulação de um modelo CFD com um Standard/Explicit) e o modelo SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*).

Foi criado um caso de estudo, de modo a comprar as ferramentas de cálculo de problemas de interação fluido-estrutura acima anunciadas. Foi realizada esta comparação para se perceber qual a ferramenta que mais se adequa ao problema que terei de estudar.

Para todos os métodos foi utilizado um problema de compressão de uma geometria cilíndrica entre duas placas circulares, com um fluido no seu interior. O tempo de compressão foi de 0,05 segundos, a uma velocidade de 750 mm/s e considerando a aceleração gravítica de 9800 mm/s. Também foi definido as mesmas propriedades para a água e para o material da geometria, considerando também as mesmas condições de fronteira e interações entre componentes.

A geometria cilíndrica foi criada como uma geometria do tipo casca, segundo as dimensões: diâmetro de 95 mm, comprimento de 150 mm e espessura de 0,8 mm.

Resultados obtidos CEL:

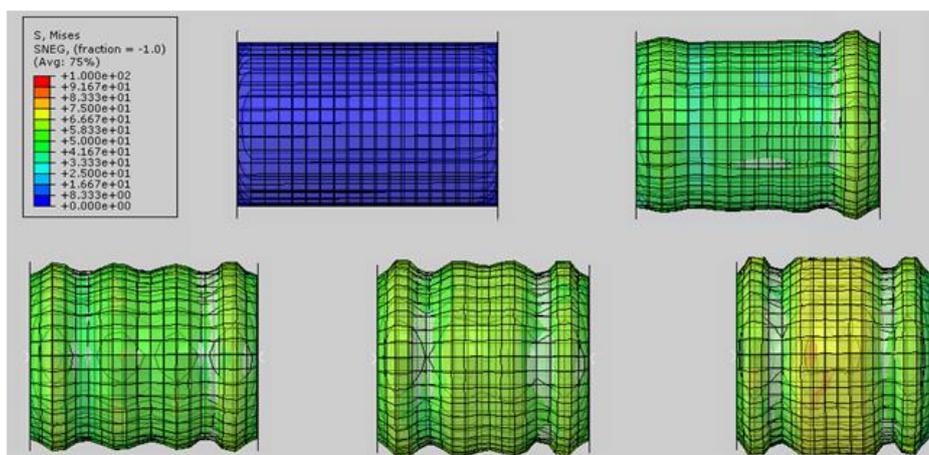


Figura 78: Resultados CEL.

Resultados SPH:

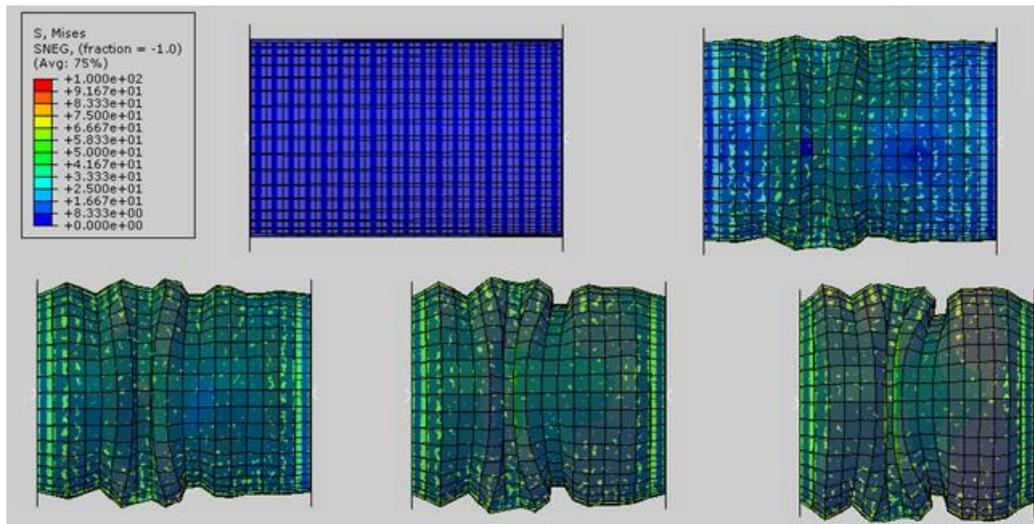


Figura 79: Resultados SPH.

Resultados Co-Simulação:

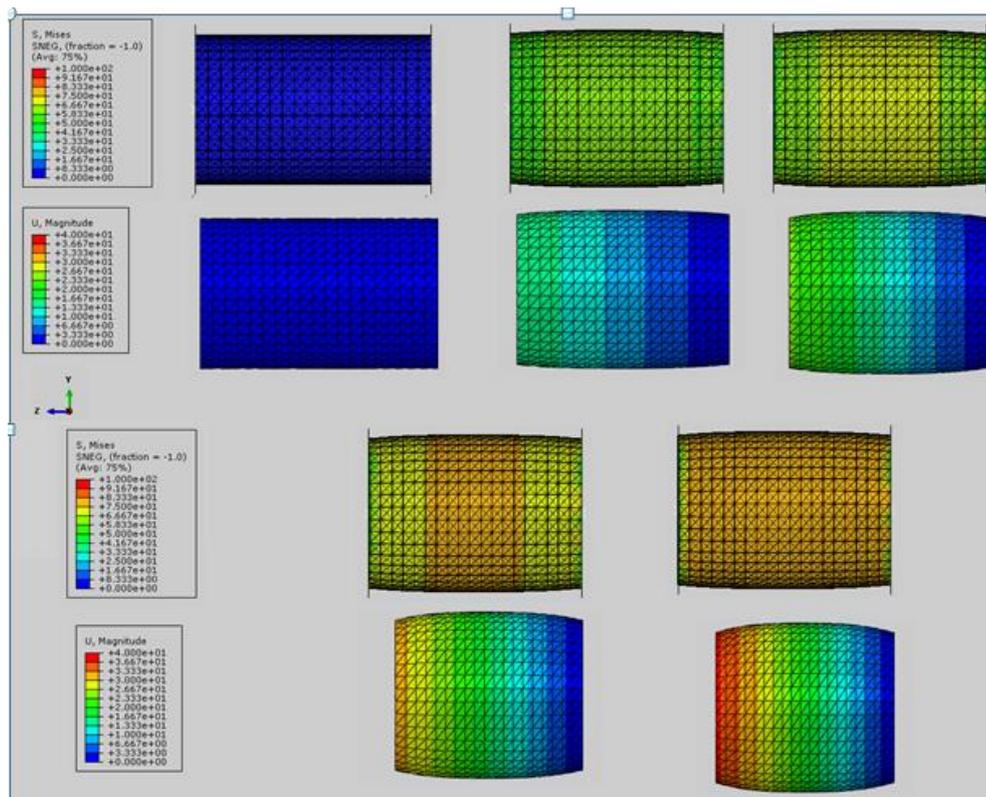


Figura 80: Resultados Co-Simulação.

Comparação de todos os métodos:

Na figura 81 é apresentado a sobreposição das curvas obtidas das simulações numéricas dos modelos CEL, SPH e Co-Simulação, para o caso em que se estudo o componente completamente cheio de fluido, que neste caso foi água.

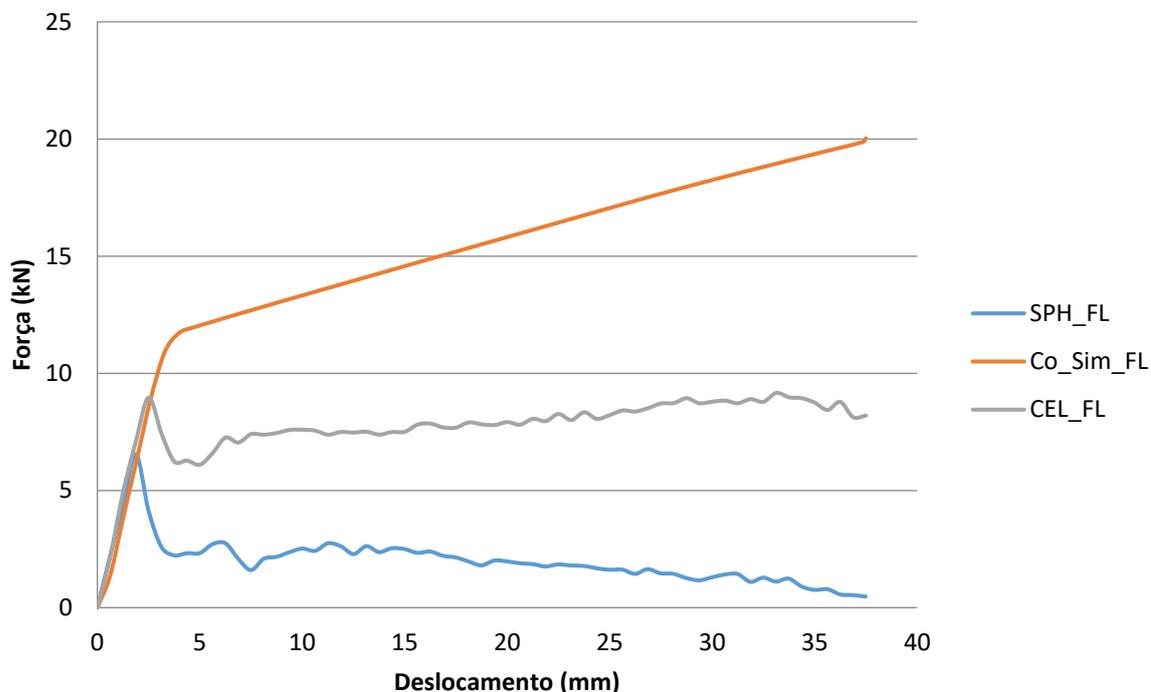


Figura 81: Comparação das curvas força/deslocamento dos modelos CEL, SPH e Co-Simulação.

Após obtenção destes resultados concluiu-se que os modelos, mas eficazes para simular a compressão de embalagens com fluidos são o modelo CEL e SPH. Pois quer nos resultados obtidos da curva força/deslocamento, quer na observação do comportamento à compressão da geometria cilíndrica, o modelo de Co-Simulação não apresentava resultados que pudessem representar a realidade ao contrário dos outros dois modelos estudados.

9.2. Estudo ketchup

Para se definir o modelo de material para o ketchup nas simulações numéricas, decidiu-se primeiro calcular a taxa de corte do ketchup para a velocidade de ensaio definida, para isso utilizou-se a equação 4, em que a taxa de corte (γ) é calculada a partir da razão entre a velocidade (v) e o diâmetro da embalagem (h) que teria no seu interior ketchup.

$$\gamma = \frac{v}{h} \quad (\text{Eq.4})$$

Sabendo que a velocidade de ensaio é 50mm/min e distância média entre paredes é de 67,5mm, obtém-se a taxa de corte de 0,014, sendo o pior caso em que a distância entre as paredes é de 55mm a taxa de corte obtida é de 0,015.

Utilizando a informação encontra sobre o ketchup, e relacionando a curva de fluxo da figura 1 com a taxa de corte obtida a partir da equação 4 obtendo a figura 82, concluiu-se que esta velocidade de ensaio gera uma taxa de corte baixa, e o ketchup a essa taxa de corte tem um comportamento newtoniano, então na simulação definiu-se o ketchup como sendo um fluido newtoniano.

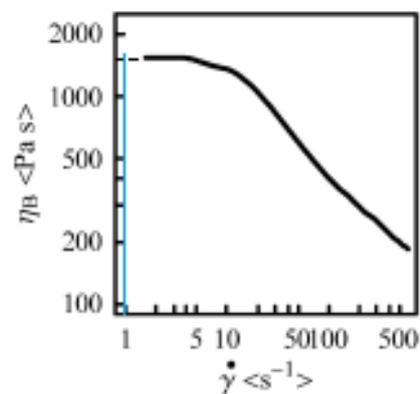


Figura 82: Interseção da taxa de corte com a curva de fluxo do ketchup.