



DESENVOLVIMENTO DE UM ATENUADOR DE IMPACTO PARA UM VEÍCULO DE FORMULA STUDENT

HENRIQUE DE MONTALVÃO DOS PRAZERES

Outubro de 2016

DESENVOLVIMENTO DE UM ATENUADOR DE IMPACTO PARA UM VEÍCULO DE *FORMULA STUDENT*

Henrique de Montalvão dos Prazeres

2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

DESENVOLVIMENTO DE UM ATENUADOR DE IMPACTO PARA UM VEÍCULO DE *FORMULA STUDENT*

Henrique de Montalvão dos Prazeres

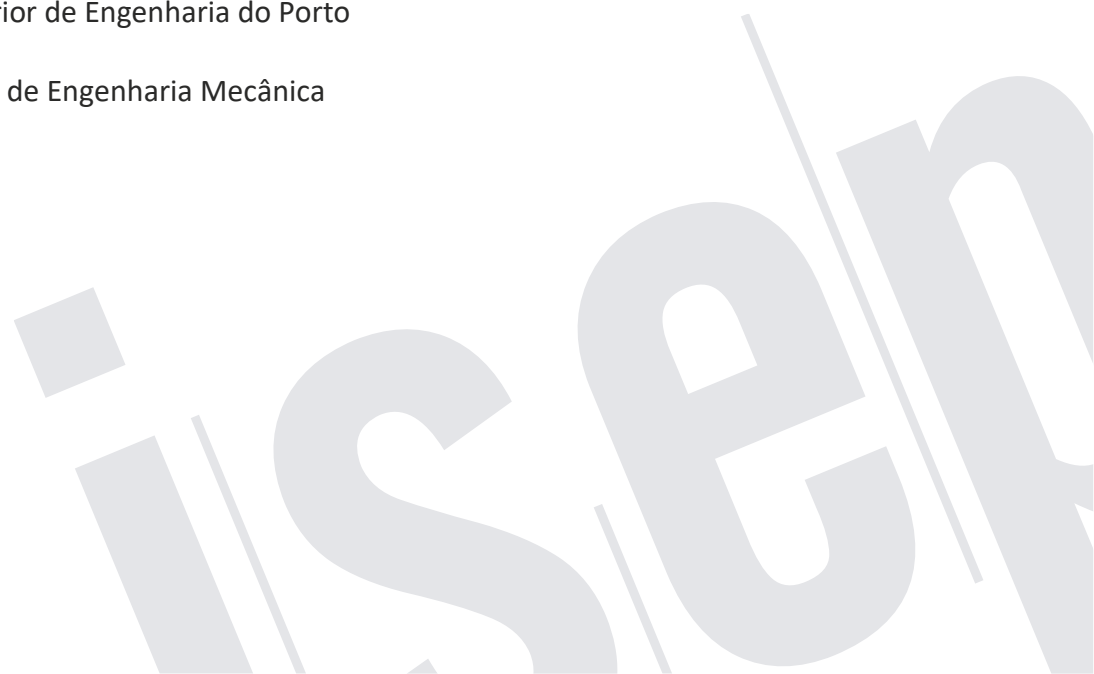
1120154

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Engenheiro Jorge Justo

2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

<Grau Académico e Nome>

<Categoria, Instituição>

Orientador

Doutor Jorge Fonseca Justo

Professor Adjunto, ISEP

Co-orientador

Doutor Fernando José Ferreira

Professor Coordenador, ISEP

Arguente

<Grau Académico e Nome>

<Categoria, Instituição>

AGRADECIMENTOS

Tendo a sorte de contar com um conjunto extraordinário de familiares, amigos e colegas que me têm acompanhado nesta viagem a que chamo vida

Todos merecem o verdadeiro apreço e merecem o meu profundo agradecimento.

O meu agradecimento ao Professor Doutor Jorge Justo meu orientador pelo apoio desde sempre no meu empenho nesta matéria.

Agradeço à direção do CIDEM por disponibilizar o meu acesso em pleno a meios que possibilitassem fazer o meu trabalho.

Gostaria aqui de exprimir todo o meu respeito e gratidão pela minha mãe Isabel Prazeres e pelo meu pai João Prazeres reconhecendo a vossa orientação bondade e apoio.

Também aos meus tios, às minhas irmãs, ao meu cunhado e sobrinhos por toda a alegria, divertimento e sabedoria que acrescentaram na minha vida, com principal enfoque no meu percurso académico.

Por último gostaria de agradecer aos meus amigos e minhas amigas que acompanharam sempre as minhas investidas académicas.

PALAVRAS-CHAVE

Simulação numérica, Caracterização de material, Ensaio experimentais, Modelos de dano, Elementos finitos, Análise dinâmica explícita, Absorção de energia, *Formula Student*, Atenuador de impacto, Estrutura em ninho de abelha.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um atenuador de impacto para um veículo automóvel, destinado a participar na competição *Formula Student*. Este veículo foi desenvolvido por uma equipa de alunos do Instituto Superior de Engenharia do Porto, constituída com o objetivo de participar na referida competição.

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica para levantamento do estado da arte em sistemas de absorção de energia bem como dos modelos numéricos usados.

Para o desenvolvimento do atenuador de impacto recorreu-se a *software* de modelação 3D e simulação numérica, com o objetivo de testar o desempenho de diferentes soluções.

Para a correta definição dos parâmetros do modelo de material usado na simulação numérica, foi realizado um programa de ensaios experimentais. No final obteve-se um modelo de material com características elasto-plásticas e de cedência por introdução do parâmetro de dano por corte.

Foram estudados dois atenuadores de impacto construídos pela equipa de alunos. Foram realizados ensaios experimentais de compactação para levantamento das suas características em termos de absorção de energia, tendo-se concluído que não atingiam os requisitos definidos. Foram testados modelos numéricos destes atenuadores recorrendo ao método de elementos finitos com uma análise dinâmica explícita.

Foi desenvolvida uma metodologia que permitiu modelar um novo tipo de estrutura, tendo sido este objeto de simulações numéricas e ensaios experimentais para avaliar o seu desempenho. Foi construída uma estrutura que cumpriu com sucesso os requisitos impostos pelo regulamento da competição *Formula Student*.

KEYWORDS

Numerical simulation, materials characterization, experimental testing, damage models, finite elements, explicit dynamic analysis, energy absorption, Formula Student, impact attenuator, honeycomb.

ABSTRACT

This study aimed to develop an impact attenuator for a motor vehicle, intended to participate in the Formula Student competition. This vehicle was developed by a team of students of the School of Engineering of Porto, formed in order to participate in this competition.

A literature search was performed in order to know the state of the art in energy-absorbing systems and in the numerical models that were used.

For the development of the impact attenuator a 3D modeling software and numerical simulation were used, in order to test the performance of different solutions.

For the correct setting of the parameters of the material model used in numerical simulation, an experimental testing program was carried out. At the end there was obtained a template material with elasto-plastic and yield characteristics using the shear damage parameter.

Two impact attenuators built by the team of students were studied. Experimental compression tests were performed to survey its characteristics in terms of energy absorption, it was concluded that did not reached the requirements. Numerical models of these attenuators were tested using the finite element method with a dynamic analysis.

A methodology was developed that allowed modeling a new type of structure, being this submitted to numerical simulations and experimental tests to evaluate its performance. A structure that successfully met the requirements, imposed by Formula Student competition rules, were built.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

g	aceleração gravítica
---	----------------------

MPa	Mega Pascal
-----	-------------

Vpr	Valor próprio
-----	---------------

med	média
-----	-------

máx	máximo/a
-----	----------

Nº	número
----	--------

alv	alvéolo
-----	---------

Lista de Unidades

mm	milímetro
----	-----------

mm/min	milímetro por minuto
--------	----------------------

N	Newton
---	--------

kN	kilo Newton
----	-------------

J	Joule
---	-------

kg	kilograma
----	-----------

J/kg	Joule por kilograma
------	---------------------

Lista de Símbolos

%	por cento
---	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 FORMULA SAE [2]	29
FIGURA 2 ESQUEMA DE CORTE DOS PROVETES PLANOS EM VÁRIOS SENTIDOS DA LAMINAÇÃO [3]	36
FIGURA 3 PROVETE PLANO COM ENTALHES AO LONGO DA LARGURA [3]	36
FIGURA 4 PROVETE COM ENTALHE AO LONGO DA ESPESSURA [3]	37
FIGURA 5 PROVETE DE CHAPA CIRCULAR APÓS ENSAIO [3]	37
FIGURA 6 A) PROVETES SEM ENTALHES E B) COM ENTALHES [4]	38
FIGURA 7 PROVETE SUJEITO À COMPRESSÃO [4]	38
FIGURA 8 PROVETE COM ENTALHES AO LONGO DA ESPESSURA [4]	38
FIGURA 9 PROVETES PLANOS, COM E SEM ENTALHES AO LONGO DA LARGURA [5]	39
FIGURA 10 DISPOSITIVO DE ENSAIO IOSIPESCU [6]	39
FIGURA 11 A) ESQUEMA DO ENSAIO DE IOSIPESCU E B) PROVETES ENSAIADOS [5]	40
FIGURA 12 GEOMETRIA DE UM PROVETE PARA ENSAIO CORTE [7]	40
FIGURA 13 APLICAÇÃO DO DISPOSITIVO ARCAN [10]	41
FIGURA 14 CONFIGURAÇÕES DO DISPOSITIVO DE ARCAN [10]	41
FIGURA 15 GEOMETRIA DE UM PROVETE PARA O DISPOSITIVO DE ARCAN [11]	42
FIGURA 16 PROVETE DE ENSAIO	44
FIGURA 17 PROVETE DE LADOS PARALELOS	45
FIGURA 18 PROVETE COM ENTALHES	46
FIGURA 19 PROVETE DE CORTE	47
FIGURA 20 A) MÁQUINA DE ENSAIOS E B) CÉLULA DE CARGA DE 5KN EM PORMENOR.	48
FIGURA 21 MONITOR DAM MÁQUINA DE ENSAIOS	49
FIGURA 22 GRÁFICO DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS PROVETES DE LADOS PARALELOS	49

FIGURA 23 PROVETE EM FORMA DE HALTERE SEGUNDO A NORMA	50
FIGURA 24 PROVETE EM FORMA DE HALTERE N1 EM DIFERENTES DESLOCAMENTOS DO TRAVESSÃO, DURANTE O ENSAIO: A) 0 MM, B) 4 MM E C) 8 MM.	51
FIGURA 25 GRÁFICO DO RESULTADO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DO PROVETE EM FORMA DE HALTERE N1.	52
FIGURA 26 GRÁFICO DO RESULTADO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DO PROVETE EM FORMA DE HALTERE N2.	52
FIGURA 27 PROVETE COM ENTALHES	53
FIGURA 28 PROVETE ENTALHES T1 EM DIFERENTES DESLOCAMENTOS DO TRAVESSÃO, DURANTE O ENSAIO: A) 0 MM, INICIO DO ENSAIO, B) 0,6 MM, INICIO DE FENDA E C) 0,7 MM, ROTURA TOTAL.	53
FIGURA 29 GRÁFICO DO RESULTADO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DO PROVETE COM ENTALHES T1.	54
FIGURA 30 GRÁFICO DO RESULTADO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DO PROVETE COM ENTALHES T2.	54
FIGURA 31 PROVETE DE CORTE	55
FIGURA 32 PROVETE DE CORTE C1 EM DIFERENTES DESLOCAMENTOS DO TRAVESSÃO, DURANTE O ENSAIO: A) 0 MM, INICIO DO ENSAIO, B) 2,76 MM, INICIO DE FENDA E C) 22,28 MM, ROTURA COMPLETA	56
FIGURA 33 GRÁFICO DO RESULTADO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DO PROVETE DE CORTE C1.	57
FIGURA 34 GRÁFICO DO RESULTADO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DO PROVETE DE CORTE C2.	57
FIGURA 35 GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE O RESULTADO OBTIDO NO ENSAIO E O RESULTADO OBTIDO NA SIMULAÇÃO.	59
FIGURA 36 GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE O RESULTADO OBTIDO NO ENSAIO E O RESULTADO OBTIDO NA SIMULAÇÃO CAUSANDO A CEDÊNCIA UTILIZANDO DANO.	60
FIGURA 37 PROVETE EM FORMA DE HALTERE EM DIFERENTES DESLOCAMENTOS DO TRAVESSÃO, DURANTE O ENSAIO: A) 0 MM, B) 4 MM E C) 6 MM.	62
FIGURA 38 GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS E O RESULTADO OBTIDO NA SIMULAÇÃO DO PROVETE EM FORMA DE HALTERE SEGUNDO A NORMA.	63
FIGURA 39 PROVETE COM ENTALHES EM DIFERENTES DESLOCAMENTOS DO TRAVESSÃO, DURANTE O ENSAIO: A) 0 MM, B) 1,2 MM E C) 1,5 MM.	64
FIGURA 40 GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS E O RESULTADO OBTIDO NA SIMULAÇÃO DO PROVETE COM ENTALHES.	64

FIGURA 41 PROVETE DE CORTE EM DIFERENTES DESLOCAMENTOS DO TRAVESSÃO, DURANTE O ENSAIO: A) 0 MM, B) 2,15 MM E C) 18,5 MM.	65
FIGURA 42 GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS E O RESULTADO OBTIDO NA SIMULAÇÃO DO PROVETE DE CORTE.	66
FIGURA 43 A) EXTERIOR DO ATENUADOR 1 E B) REFORÇOS DO ATENUADOR 1.	69
FIGURA 44 A) EXTERIOR DO ATENUADOR 1 JUNTAMENTE COM A BASE DE ENSAIO E B) INTERIOR DO ATENUADOR 1.	70
FIGURA 45 A) EXTERIOR DO MODELO SIMPLES DO ATENUADOR 1 E B) INTERIOR DO MODELO SIMPLES DO ATENUADOR 1.	71
FIGURA 46 A) EXTERIOR DO MODELO SÓLIDO DO ATENUADOR 1 E B) PARTE DO REFORÇO DO MODELO SÓLIDO DO ATENUADOR 1.	71
FIGURA 47 A) DEFORMAÇÃO GROSEIRA EM ELEMENTOS DE CASCA E B) PENETRAÇÃO ENTRE ELEMENTOS	73
FIGURA 48 VÁRIAS ETAPAS DA SIMULAÇÃO DO ATENUADOR 1 COM DESLOCAMENTO DO TRAVESSÃO DE: A) 0 MM, B) 10 MM, C) 50 MM, D) 100 MM, E) 150 MM E F) 220 MM.	74
FIGURA 49 GRÁFICO, DA FORÇA EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO DO TRAVESSÃO, DA SIMULAÇÃO DO ATENUADOR 1.	75
FIGURA 50 ESTRUTURA FRONTAL COM RELEVÂNCIA PARA A <i>BULKHEAD</i> A) E ESTRUTURA TUBULAR B).	75
FIGURA 51 VÁRIAS ETAPAS DO ENSAIO DO ATENUADOR 1 COM DESLOCAMENTO DO TRAVESSÃO DE: A) 0 MM, B) 10 MM, C) 50 MM, D) 100 MM, E) 150 MM E F) 220 MM.	77
FIGURA 52 GRÁFICO, DA FORÇA EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO DO TRAVESSÃO, DO ENSAIO DO ATENUADOR 1.	78
FIGURA 53 A) EXTERIOR DO ATENUADOR 2 E B) REFORÇOS DO ATENUADOR 2.	79
FIGURA 54 DESENHO DO EXTERIOR DO ATENUADOR 2	79
FIGURA 55 PERFIL DAS DUAS CAMADAS DE REFORÇOS DO ATENUADOR 2	80
FIGURA 56 VÁRIAS ETAPAS DA SIMULAÇÃO DO ATENUADOR 2 COM DESLOCAMENTO DO TRAVESSÃO DE: A) 0 MM, B) 10 MM, C) 50 MM, D) 100 MM, E) 150 MM E F) 220 MM.	81
FIGURA 57 GRÁFICO, DA FORÇA EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO DO TRAVESSÃO, DA SIMULAÇÃO DO ATENUADOR 2.	82
FIGURA 58 VÁRIAS ETAPAS DO ENSAIO DO ATENUADOR 2 COM DESLOCAMENTO DO TRAVESSÃO DE: A) 0 MM, B) 10 MM, C) 50 MM, D) 100 MM, E) 150 MM E F) 220 MM.	83

FIGURA 59 GRÁFICO, DA FORÇA EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO DO TRAVESSÃO, DO ENSAIO DO ATENUADOR 2.	84
FIGURA 60 GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE O RESULTADO OBTIDO NO ENSAIO E O RESULTADO OBTIDO NA SIMULAÇÃO DO ATENUADOR 1.	87
FIGURA 61 GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE O RESULTADO OBTIDO NO ENSAIO E O RESULTADO OBTIDO NA SIMULAÇÃO DO ATENUADOR 2.	88
FIGURA 62 GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DOS ATENUADORES 1 E 2.	89
FIGURA 63 LONGARINA DE FORD® TRANSIT COM GEOMETRIA PARA ABSORÇÃO DE ENERGIA DE FORMA CONTROLADA.	93
FIGURA 64 A) LOTUS EVORA APÓS TESTE DE IMPACTO, B) EM PORMENOR A ZONA DEFORMADA [13]	94
FIGURA 65 MODELO EM ABAQUS® A) ANTES DA SIMULAÇÃO, B) APÓS SIMULAÇÃO E C) MODELO REAL APÓS ENSAIO DE IMPACTO [14]	94
FIGURA 66 ATENUADOR PARA VEÍCULOS DE CONSTRUÇÃO/MANUTENÇÃO[15]	95
FIGURA 67 ATENUADOR DA EQUIPA DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA NORUEGA [16]	96
FIGURA 68 ATENUADOR DE IMPACTO EM FIBRA DE CARBONO A SER COMPACTADO[17]	96
FIGURA 69 RESULTADO DO ENSAIO DO ATENUADOR DA UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DA CALIFÓRNIA[17]	97
FIGURA 70 ATENUADOR DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA DE EINDHOVEN [18]	97
FIGURA 71 ATENUADOR EM ESPUMA DURANTE O ENSAIO [19]	98
FIGURA 72 RESULTADO DO ENSAIO DO ATENUADOR DA ACADEMIA DE ENGENHARIA DE SINHGAD [19]	98
FIGURA 73 ATENUADOR DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA DE BUDAPESTE[20]	99
FIGURA 74 GRÁFICO DE FORÇA (<i>LOAD</i>) EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO (<i>POSITION</i>) DO ATENUADOR DA UNIVERSIDADE DE DALHOUSIE[21]	99
FIGURA 75 ATENUADOR <i>TYPE 11</i> [22]	100
FIGURA 76 EXEMPLO DE ATENUADOR [24]	101
FIGURA 77 RESULTADO DOS ENSAIOS DOS ATENUADORES 1 E 2	102
FIGURA 78 DESENHO DO PERFIL DE CADA PARTE DA ESTRUTURA DE DOIS ALVÉOLOS	103

FIGURA 79 DESENHO DO SÓLIDO IGUAL À ESTRUTURA DE DOIS ALVÉOLOS	104
FIGURA 80 PREPARAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE INSTABILIDADE	105
FIGURA 81 BASE DOS ALVÉOLOS TENDO COMO CONDIÇÃO DE FRONTEIRA O ENCASTRAMENTO.	105
FIGURA 82 ALVÉOLO COM MALHA DE A) 2 MM, B) 0,8 MM, C) 0,4 MM E D) 0,2 MM	106
FIGURA 83 COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES PRÓPRIOS PARA CADA TAMANHO DE ELEMENTO	107
FIGURA 84 MODOS DE INSTABILIDADE DA ESTRUTURA, A) PRIMEIRO, B) SEGUNDO, C) TERCEIRO, D) QUARTO E E) QUINTO	109
FIGURA 85 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM A INTRODUÇÃO DE 2, 4 E 10 MODOS	110
FIGURA 86 VÁRIAS ETAPAS DA SIMULAÇÃO DA ESTRUTURA DE DOIS ALVÉOLOS COM DESLOCAMENTO DO TRAVESSÃO DE: A) 0 MM, B) 5 MM, C) 10 MM, D) 15 MM, E) 30 MM E F) 60 MM.	111
FIGURA 87 ESTRUTURA DE DOIS ALVÉOLOS E BASE DE FIXAÇÃO	112
FIGURA 88 VÁRIAS ETAPAS DO ENSAIO DA ESTRUTURA DE DOIS ALVÉOLOS COM DESLOCAMENTO DO TRAVESSÃO DE: A) 0 MM, B) 5 MM, C) 10 MM, D) 15 MM, E) 30 MM E F) 60 MM	113
FIGURA 89 RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DA ESTRUTURA DE DOIS ALVÉOLOS	114
FIGURA 90 GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE O RESULTADO DA SIMULAÇÃO DA ESTRUTURA DE DOIS ALVÉOLOS E O ENSAIO.	114
FIGURA 91 PORMENOR DOS FOLIOS A) ENSAIO EXPERIMENTAL, B) SIMULAÇÃO EM ABAQUS®.	116
FIGURA 92 METODOLOGIA DA CONTAGEM DE ALVÉOLOS	117
FIGURA 93 DESENHO DO PERFIL DE CADA PARTE DA ESTRUTURA DE NOVE ALVÉOLOS	117
FIGURA 94 DESENHO DO SÓLIDO IGUAL À ESTRUTURA DE NOVE ALVÉOLOS	118
FIGURA 95 RESULTADO DA SIMULAÇÃO PARA A COMPACTAÇÃO DE 50 MM DA ESTRUTURA DE NOVE ALVÉOLOS.	120
FIGURA 96 VÁRIAS ETAPAS DA SIMULAÇÃO DA ESTRUTURA DE NOVE ALVÉOLOS COM DESLOCAMENTO DO TRAVESSÃO DE: A) 0 MM, B) 10 MM, C) 20 MM, D) 30 MM, E) 40 MM E F) 50 MM.	121
FIGURA 97 ESTRUTURA DE NOVE ALVÉOLOS E BASE DE FIXAÇÃO	122
FIGURA 98 ESTRUTURA DE NOVE ALVÉOLOS ONDE ESTÃO EVIADAS AS IMPERFEIÇÕES	123

FIGURA 99 VÁRIAS ETAPAS DA SIMULAÇÃO DA ESTRUTURA DE NOVE ALVÉOLOS COM DESLOCAMENTO DO TRAVESSÃO DE: A) 0 MM, B) 10 MM, C) 20 MM, D) 30 MM, E) 40 MM E F) 50 MM.	124
FIGURA 100 ESTRUTURA DE NOVE ALVÉOLOS DEFORMADA	125
FIGURA 101 RESULTADO DO ENSAIO DA ESTRUTURA DE NOVE ALVÉOLOS	125
FIGURA 102 GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS DO ENSAIO E DA SIMULAÇÃO	127
FIGURA 103 DESENHO DO PERFIL DE CADA PARTE DA ESTRUTURA DE TRINTA ALVÉOLOS	129
FIGURA 104 DESENHO DO SÓLIDO IGUAL À ESTRUTURA DE TRINTA ALVÉOLOS	130
FIGURA 105 ESTRUTURA DE TRINTA ALVÉOLOS E BASE DE FIXAÇÃO	131
FIGURA 106 ESTRUTURA DE TRINTA ALVÉOLOS ONDE ESTÃO EVIDENTES AS IMPERFEIÇÕES	132
FIGURA 107 ESTRUTURA DE TRINTA ALVÉOLOS EM VÁRIAS ETAPAS DO ENSAIO COM DESLOCAMENTO DO TRAVESSÃO DE: A) 0 MM, B) 10 MM, C) 20 MM, D) 75 MM, E) 150 MM E F) 208 MM.	133
FIGURA 108 A) ESTRUTURA DE TRINTA ALVÉOLOS APÓS ENSAIO E B) ALVÉOLOS DEFORMADOS EM PORMENOR.	134
FIGURA 109 RESULTADO DO ENSAIO DA ESTRUTURA DE TRINTA ALVÉOLOS	134
FIGURA 110 GRÁFICO COMPARATIVO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS ENTRE OS ATENUADORES 1 E 2, E A ESTRUTURA DE TRINTA ALVÉOLOS.	136

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DO ATENUADOR 1.	87
TABELA 2 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DO ATENUADOR 2.	88
TABELA 3 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS ATENUADORES E OS VALORES EXIGIDOS NO REGULAMENTO DA <i>FORMULA STUDENT</i> .	89
TABELA 4 MODOS DE INSTABILIDADE DA ESTRUTURA DE DOIS ALVÉOLOS, VALOR PRÓPRIO E SUA DIFERENÇA	107
TABELA 5 COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE ENERGIA, FORÇA MÁXIMA E FORÇA MÉDIA DO ENSAIO E DA SIMULAÇÃO COM A INTRODUÇÃO DE 2, 4 E 10 MODOS DE INSTABILIDADE	115
TABELA 6 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DO ATENUADOR 1, ATENUADOR 2 E ESTRUTURA DE DOIS ALVÉOLOS	116
TABELA 7 MODOS DE INSTABILIDADE DA ESTRUTURA DE NOVE ALVÉOLOS, FACTOR MULTIPLICATIVO DE FORÇA E SUA DIFERENÇA	119
TABELA 8 VALORES DE FORÇA MÁXIMA E FORÇA MÉDIA REGISTRADOS NO ENSAIO	126
TABELA 9 COMPARAÇÃO ENTRE VALORES ESTIMADOS E VALORES OBTIDOS NO ENSAIO DA ESTRUTURA DE NOVE ALVÉOLOS	126
TABELA 10 VALORES DE FORÇA E ENERGIA OBTIDOS NO ENSAIO POR ALVÉOLO	127
TABELA 11 VALORES DE FORÇA E ENERGIA ESTIMADOS PARA UMA ESTRUTURA DE TRINTA ALVÉOLOS	128
TABELA 12 COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES EXIGIDOS NO REGULAMENTO, OS ESTIMADOS E OS OBTIDOS NO ENSAIO	135
TABELA 13 COMPARAÇÃO ENTRE OS ATENUADORES 1 E 2 E A ESTRUTURA DE TRINTA ALVÉOLOS	135

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Formula Student	29
1.2	Enquadramento	30
1.3	Organização da tese	30
2	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	35
2.1	Tipo de ensaios para caracterização do material	35
2.2	Provetes segundo a norma EN 10002-1	42
2.3	Provete com entalhes	45
2.4	Provete de corte	46
2.5	Ensaio dos provetes	47
2.5.1	Provete de lados paralelos segundo a norma	49
2.5.2	Provete em forma de haltere segundo a norma	50
2.5.3	Provete com entalhes	52
2.5.4	Provete de corte	55
2.6	Simulação do ensaio dos provetes	57
2.6.1	Simulação do provete de lados paralelos	58
2.6.2	Simulação do provete em forma de haltere segundo a norma	61
2.6.3	Simulação do provete com entalhes	63
2.6.4	Simulação do provete de corte	65
3	ESTUDO DOS ATENUADORES	69
3.1	Atenuador 1	69
3.1.1	O atenuador	69

3.1.2	Desenho do atenuador	70
3.1.3	Simulação	72
3.1.4	Ensaio	75
3.2	Atenuador 2	78
3.2.1	O atenuador	78
3.2.2	Desenho do atenuador	79
3.2.3	Simulação	80
3.2.4	Ensaio	82
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	87
5	CONSTRUÇÃO DE UM ATENUADOR DE IMPACTO	93
5.1	O atenuador de impacto	93
5.2	Tipos de atenuador de impacto na Formula SAE	95
5.3	Regulamento	100
5.4	Considerações para projeto do atenuador	101
5.5	Estrutura de dois alvéolos	103
5.5.1	Desenho da estrutura de dois alvéolos	103
5.5.2	Simulação da estrutura de dois alvéolos	104
5.5.3	Ensaio da estrutura de dois alvéolos	111
5.5.4	Discussão	114
5.6	Estrutura de nove alvéolos	117
5.6.1	Desenho da estrutura de nove alvéolos	117
5.6.2	Simulação da estrutura de nove alvéolos	118
5.6.3	Ensaio da estrutura de nove alvéolos	121
5.6.4	Discussão	126

5.7	Estrutura de trinta alvéolos	128
5.7.1	Desenho da estrutura de trinta alvéolos	129
5.7.2	Ensaio da estrutura de trinta alvéolos	130
5.7.3	Discussão	134
6	CONCLUSÕES	139
7	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	143

INTRODUÇÃO

1.1 FORMULA STUDENT

1.2 ENQUADRAMENTO

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formula Student

A competição Formula SAE[®], Figura 1, desafia equipas do ensino superior a conceber, desenhar, fabricar, desenvolver e competir com veículos do tipo *Formula*. [1]

A *Formula Student* tem como objetivo dar aos seus participantes a oportunidade de demonstrarem as suas capacidades de projeto e de fabrico, possibilitando-lhes ter contacto com o que é trabalho em equipa, gestão de tempo e de projeto, orçamentação e apresentação.

Cada equipa é desafiada a produzir um protótipo de um veículo monolugar para autocross ou corrida de velocidade e apresentá-lo a uma hipotética empresa. Deverá ser um veículo *low cost*, de fácil manutenção e fiável, com alta performance relativamente a aceleração, travagem e manuseamento. Durante a competição cada equipa deve apresentar toda a lógica por trás da proposta e deve ser capaz de demonstrar como pode ser um negócio viável a ambas as partes. [2]



Figura 1 Formula SAE [2]

Para dar às equipas o máximo de liberdade por forma a demonstrarem a sua criatividade e imaginação existem algumas restrições ao projeto. O desafio imposto às equipas é desenvolver um veículo que possa competir com sucesso nas várias provas descritas no regulamento da Formula SAE. As competições dão às equipas a oportunidade de demonstrar e provar tanto a criatividade como o conhecimento a nível de engenharia comparativamente a vários estabelecimentos de ensino espalhados por todo o mundo. [1]

1.2 Enquadramento

Este trabalho surge com a necessidade de estudar os atenuadores de impacto construídos pela equipa da *Formula Student* do ISEP, com vista a verificar se os mesmos cumprem com o regulamento da *Formula Student*.

Existiam dois modelos de atenuadores fabricados, sendo que ambos consistiam numa caixa exterior em forma de tronco de pirâmide reforçada interiormente com chapas quinadas apresentando um perfil trapezoidal.

Foi necessário caracterizar-se o material com que foi construído o atenuador de impacto para que o resultado das simulações estivesse próximo do que se viesse a obter no ensaio experimental. Recorrendo a *software* de cálculo pelo método de elementos finitos caracterizou-se o material, por forma a ser possível prever o seu comportamento. Para tal, foi necessário passar por várias etapas, nomeadamente:

- Construir provetes do mesmo material utilizado para construir o atenuador;
- Fazer ensaios de tração aos respetivos provetes;
- Replicar no *software* Abaqus® o ensaio experimental.
- Concluído e validado o processo de caracterização do material passou-se ao estudo dos atenuadores de impacto, avançando com a seguinte ordem de trabalhos:
 - Modelar os atenuadores existentes;
 - Simular computacionalmente o ensaio do atenuador;
 - Fazer o ensaio do atenuador e comparar;
 - Repetir o processo para os dois atenuadores.

1.3 Organização da tese

Este relatório encontra-se escrito segundo o novo acordo ortográfico e apresenta uma estrutura seguindo a ordem cronológica dos trabalhos realizados.

No capítulo 2 é abordado o assunto de caracterização do material. São apresentados vários tipos de ensaios mecânicos utilizados para esta finalidade assim como aqueles que foram feitos para complementar deste trabalho. Neste estão presentes os resultados dos ensaios e das simulações que levaram à caracterização do material utilizado.

No capítulo 3 é apresentada a geometria dos atenuadores de impacto, construídos pela equipa de *Formula Student*, em estudo e descrito o trabalho desenvolvido para possibilitar a elaboração de simulações de compactação.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios tratados no capítulo 3 e é feita a comparação com os valores exigidos no regulamento da *Formula Student*.

Ao longo do capítulo 5 é exibida a evolução de uma estrutura alveolar, desde uma estrutura simples de dois alvéolos. Inclui o relato do trabalho experimental e simulação numérica. Neste capítulo fica definida a estrutura para um atenuador de impacto que cumpre os requisitos da *Formula Student*.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões que advieram do desenvolvimento desta tese.

CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

2.1 TIPO DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO
MATERIAL

2.2 PROVETES SEGUNDO A NORMA EN 10002-1

2.3 PROVETE COM ENTALHES

2.4 PROVETE DE CORTE

2.5 ENSAIO DOS PROVETES

2.6 SIMULAÇÃO DO ENSAIO DOS PROVETES

2 Caracterização do material

Uma etapa crucial deste trabalho é a replicação em Abaqus® dos ensaios realizados experimentalmente, por forma a garantir uma aproximação dos valores adquiridos nas simulações aos valores obtidos nos ensaios. O caminho que se traçou, para assegurar que isso acontecesse, foi fazer com que nas mesmas condições, se obtivesse numa simulação os mesmos resultados obtidos no ensaio realizado.

Assim sendo foram realizados ensaios de tração, inicialmente de provetes de lados paralelos segundo a norma EN 10002-1, não havendo meios para o fabrico de outro tipo de provetes. Posteriormente, surgiu uma oportunidade de fabricar provetes por corte a laser e realizaram-se outros ensaios. O material utilizado para o ensaio foi o mesmo com que foram construídos os atenuadores.

2.1 Tipo de ensaios para caracterização do material

Como já foi mencionado anteriormente esta etapa é muito importante para garantir que as simulações tenham o menor erro possível. Como tal, muitos autores recorrem a vários tipos de ensaios ao material para que, quando os replicarem numericamente, consigam obter uma gama de valores viável para as várias variáveis existentes.

Meng Luo [3] fez quatro ensaios diferentes para proceder à caracterização do material. Um ensaio de tração com o provete em forma de osso e cortado em vários sentidos relativamente à laminação da chapa, Figura 2. Um segundo ensaio de tração, desta vez de provetes com entalhes ao longo da largura, Figura 3. Fez ainda um ensaio de tração com provetes planos e com entalhe ao longo da espessura, Figura 4. Além dos ensaios de tração fez um ensaio de punção usando provetes circulares, Figura 5.

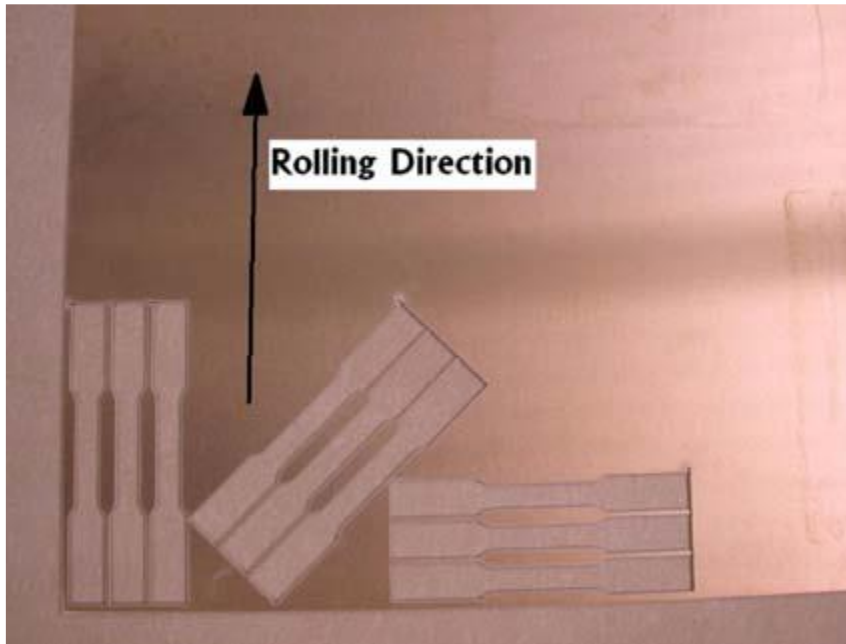


Figura 2 Esquema de corte dos provetes planos em vários sentidos da laminação [3]

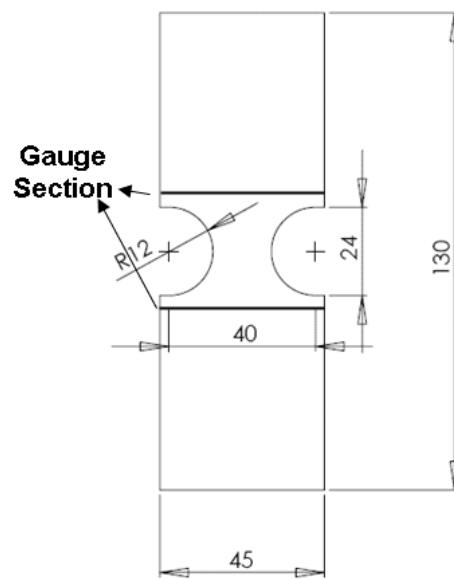


Figura 3 Provette plano com entalhes ao longo da largura [3]

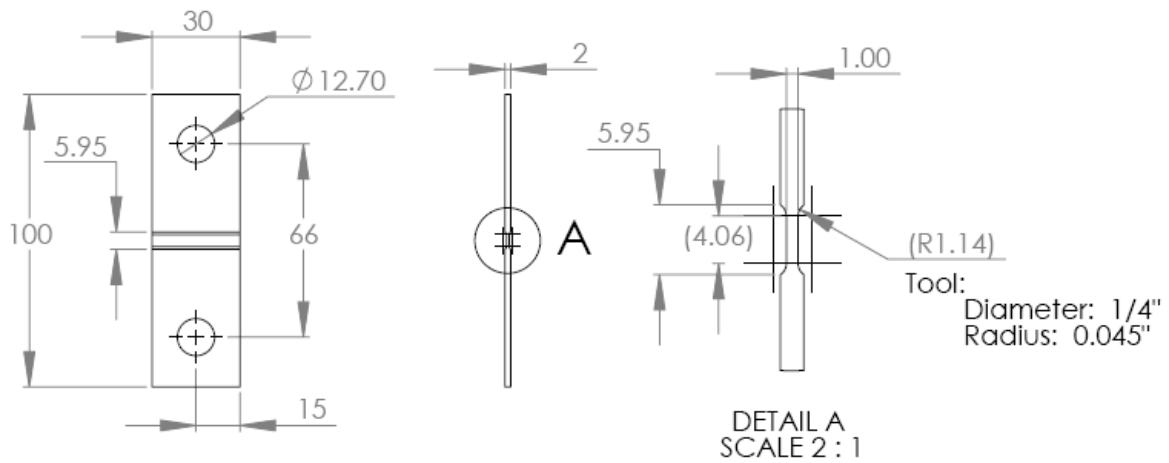


Figura 4 Provete com entalhe ao longo da espessura [3]



Figura 5 Provete de chapa circular após ensaio [3]

Liang Xue et al. [4] com o mesmo propósito, realizou outro tipo de ensaios de material, nomeadamente, com provetes circulares com e sem entalhes, Figura 6, ensaios de compressão, Figura 7, e também ensaio de tração a provetes com entalhes ao longo da espessura, Figura 8.



a)



b)

Figura 6 a) Provetes sem entalhes e b) com entalhes [4]



Figura 7 Provede sujeito à compressão [4]

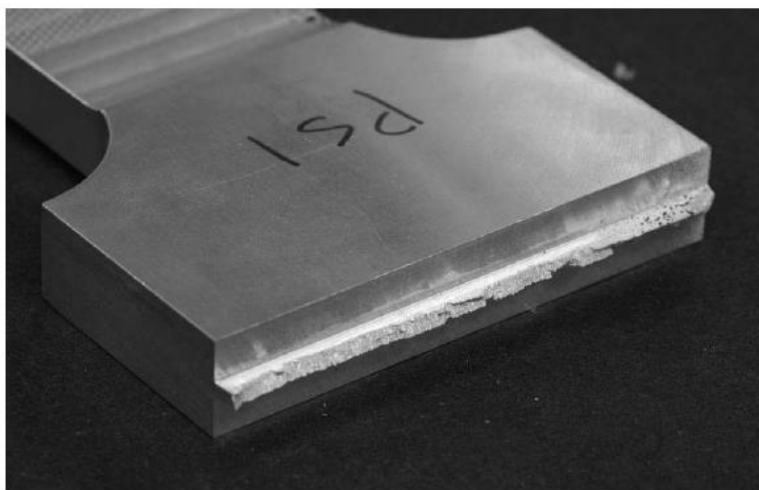


Figura 8 Provede com entalhes ao longo da espessura [4]

No trabalho de Ockewitz et al. [5] para caracterizar o material foram feitos ensaios de tração utilizando provetes planos com e sem entalhes ao longo da largura, Figura 9, idênticos àqueles ensaiados por Meng Luo [3]. Para além disso foram feitos ensaios de losipescu, que requerem um dispositivo apropriado, apresentado na Figura 10. Na Figura 11 está exibido o esquema do ensaio e os provetes ensaiados.

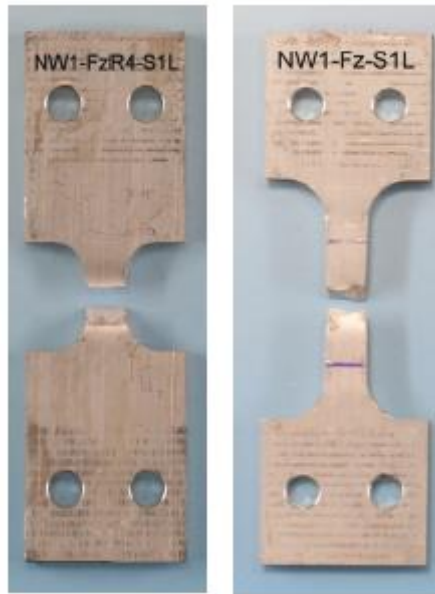


Figura 9 Provetes planos, com e sem entalhes ao longo da largura [5]



Figura 10 Dispositivo de ensaio losipescu [6]

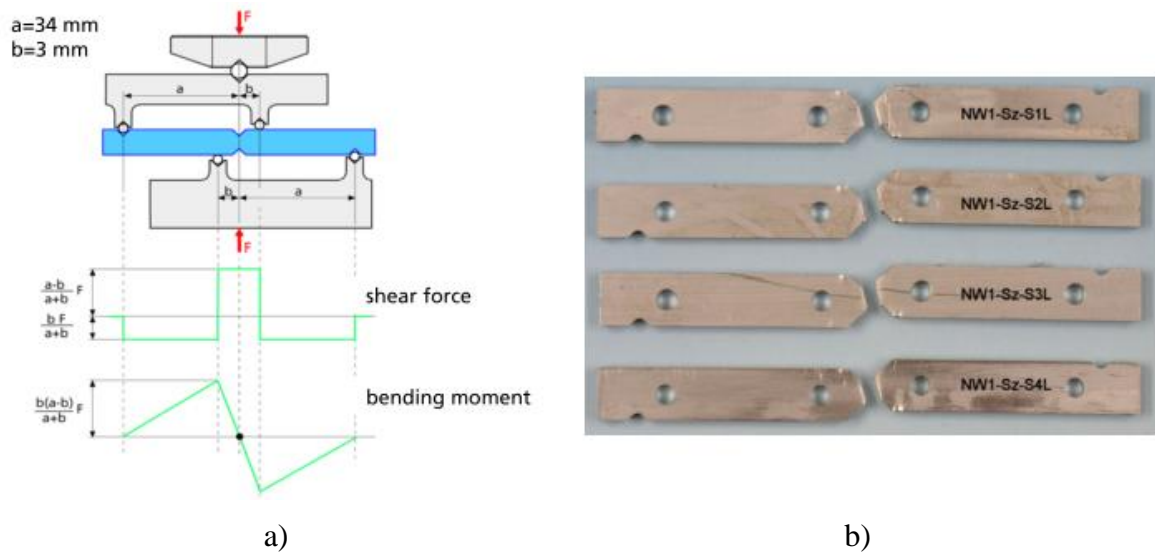


Figura 11 a) Esquema do ensaio de Iosipescu e b) provetes ensaiados [5]

Qiao et al. [7], para além dos provetes planos com e sem entalhes, e dos ensaios de Iosipescu supra referidos, realizou também ensaios de corte, Figura 12.

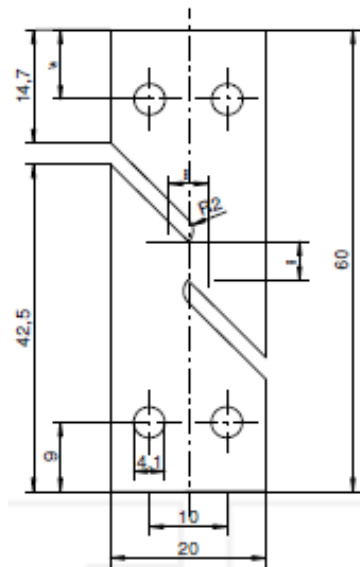


Figura 12 Geometria de um provete para ensaio corte [7]

Autores como Hasanpour et al. [8] e Pucillo et al. [9] utilizaram um dispositivo de Arcan, Figura 13, para efetuar vários ensaios. Alterando a orientação do dispositivo pode-se sujeitar o provete a vários tipos de tensões. Como se pode ver na Figura 14, montando o dispositivo a um ângulo de 0° , com a direção do deslocamento da célula de carga, o provete está sujeito a tensões de tração. Caso faça 45° o provete encontra-se num estado plano de tensão e se estiver a 90° o provete fica sujeito a tensões de

corde. Normalmente a geometria do provete é idêntica àquela apresentada na Figura 15.

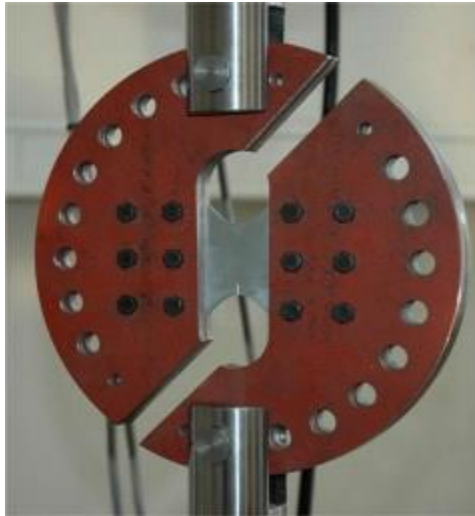


Figura 13 Aplicação do dispositivo Arcan [10]

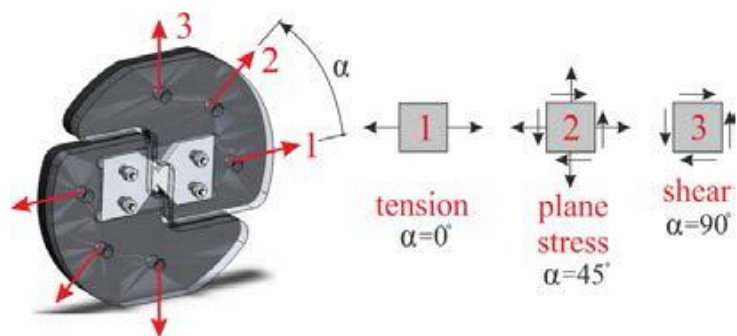


Figura 14 Configurações do dispositivo de Arcan [10]

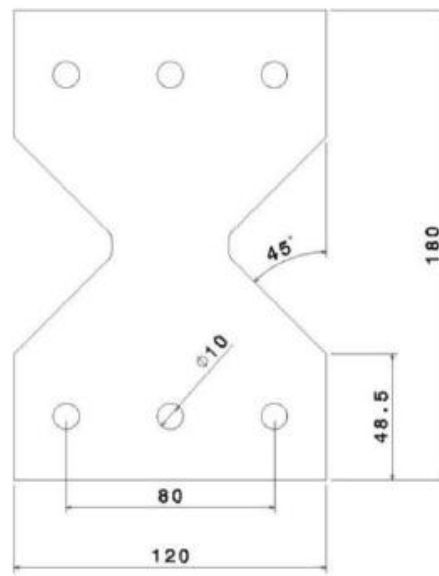


Figura 15 Geometria de um provete para o dispositivo de Arcan [11]

2.2 Provetes segundo a norma EN 10002-1

Na norma EN 10002-1 [12], mais precisamente no capítulo 6.1.1., estão indicadas as generalidades relativamente à forma e dimensões que deve ter um provete para se adquirirem as propriedades do material. É aí referido que “*para provetes em que o comprimento inicial entre referências está relacionado com a área da secção inicial da zona útil pela expressão $L_0 = k\sqrt{S_0}$ são designados proporcionais. O valor de k adotado ao nível internacional é de 5,56. O comprimento inicial não deve ser inferior a 20 mm*”.

De acordo com o quadro 2 do capítulo 6.2 para Chapa/Banda/Produtos planos com espessura compreendida entre 0,1 mm e 3 mm deve ser consultado o Anexo B para definir a forma e dimensões do provete.

No capítulo 8 relativo à marcação inicial entre referências (L_0) lê-se que “o comprimento inicial entre referências pode ser arredondado ao múltiplo de 5 mm mais próximo, desde que a diferença entre o comprimento calculado e o comprimento marcado não exceda 10% de L_0 .”

No capítulo B1 do Anexo B, quanto à forma do provete, este “tem, geralmente, cabeças de amarração mais largas que a zona útil do provete. A zona útil do provete (de comprimento L_c) deverá estar ligada às extremidades por meio de curvas de transição com um raio de pelo menos 20 mm. A largura destas cabeças deve estar compreendida entre 20 mm e 40 mm.

Por acordo o provete poderá ter a forma de uma banda de lados paralelos. No caso de produtos de largura inferior ou igual a 20 mm, a largura do provete poderá ser a mesma em toda a sua extensão”.

No capítulo B2 do Anexo B relativamente às dimensões do provete “O comprimento da zona útil não deverá ser inferior a $L_0 + \frac{b}{2}$ ”.

Em caso de litígio, deverá utilizar-se sempre o comprimento $L_0 + 2b$, exceto se não houver material suficiente.

No caso de provetes de lados paralelos com menos de 20 mm de largura, e a menos que algo em contrario seja especificado pela norma do produto, o comprimento inicial entre referencias (L_0) deverá ser igual a 50 mm. Para este tipo de provetes o comprimento livre entre garras devesa ser igual a $L_0 + 3b$ ”.

Desenhando o provete por forma a ser proporcional, para $b = 22 \text{ mm}$,

$$S_0 = 0,5 * 22 = 11 \text{ mm}^2$$

$$L_0 = 5,56 * \sqrt{11} = 18,44 \text{ mm} \approx 20 \text{ mm}.$$

Sabendo que o arredondamento tem de ser inferior a 10%,

$$20 - 18,44 = 1,56 \text{ mm}$$

$$\frac{1,56}{19,98} * 100 = 8,46\% < 10\%.$$

$$L_c = L_0 + 2b = 20 + 2 * 22 = 64 \text{ mm}$$

Assim sendo o provete para fazer o ensaio deveria ter a geometria indicada na Figura 16.

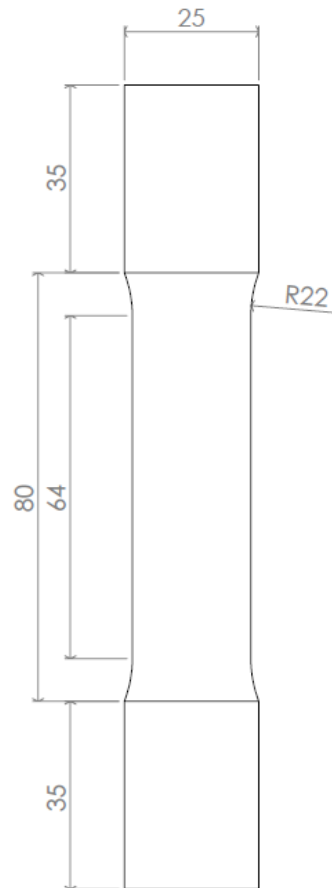


Figura 16 Provetete de ensaio

Tendo em conta os processos de corte disponíveis, não foi possível realizar o corte do material, por forma a produzir provetes proporcionais. Optou-se por utilizar provetes de lados paralelos que, tendo uma geometria muito simples, seria possível construir.

Então, para uma largura $b = 20 \text{ mm}$ e um comprimento $e L_0 = 50 \text{ mm}$,

$$L_{garras} = 50 + 3 * 20 = 110 \text{ mm}.$$

Foi arbitrado um comprimento de 35 mm para a zona onde vai ficar apertada cada garra, assim sendo, o comprimento total será,

$$L_{total} = 110 + 2 * 35 = 180 \text{ mm}$$

Visto isto, o provete de lados paralelos para fazer o ensaio deveria ter a geometria indicada na Figura 17.

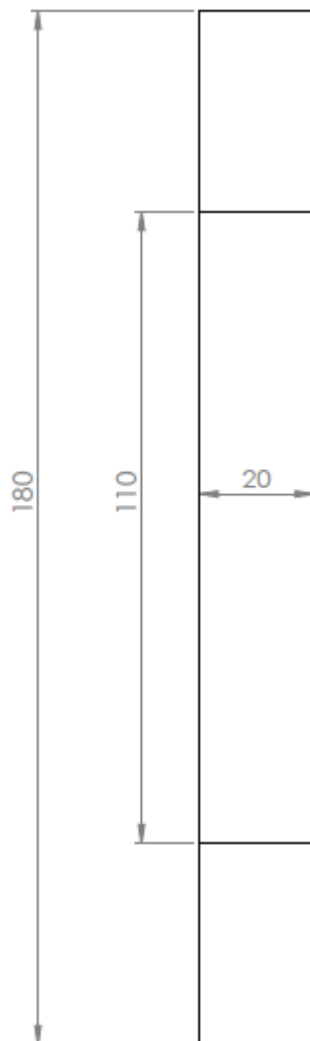


Figura 17 Provete de lados paralelos

2.3 Provete com entalhes

Os provetes com entalhes foram utilizados para a confirmação de valores, propriedades e comportamentos do material. Houve necessidade de perceber se o comportamento era o mesmo em provetes diferentes.

Para desenhar este tipo de provete foi necessário ter em consideração os seguintes aspetos:

A largura das amarras, 25 mm;

Ter secção específica onde iria ocorrer a rotura;

Resistir pelo menos a uma força de 10% da força máxima permitida pela célula de carga.

Sabendo que a zona mais solicitada tem de resistir a uma força superior a 500 N, a espessura do material é 0,5 mm e utilizando, por questões de segurança, uma tensão de cedência de 100 MPa, então:

$$100 \times 0,5 \times l > 500$$
$$l > 10$$

De maneira a respeitar estes requisitos desenhou-se o provete com a geometria apresentada abaixo.

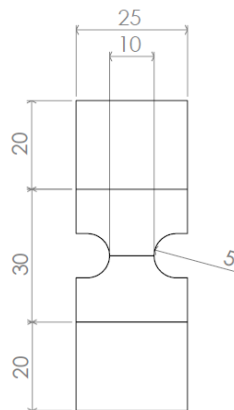


Figura 18 Provete com entalhes

2.4 Provete de corte

Podendo não ser suficiente, para efeitos de caracterização do material e simulação, apenas o comportamento do material quando sujeito à tração, tentou-se recriar uma situação que permitisse saber o comportamento do material quando sujeito a esforços de corte. Para isso decidiu-se desenhar e construir um tipo de provete que tornasse possível submeter o material ao corte utilizando as amarras da máquina para ensaios de tração.

Para desenhar este tipo de provete foi tido em conta:

- A largura das amarras, 25 mm;
- Garantir que a rotura iria ocorrer numa secção específica;
- A rotura iria ocorrer por corte;
- Resistir pelo menos a uma força de 10% da força máxima permitida pela célula de carga.

A secção mais solicitada tinha de resistir a uma força superior a 500 N e admitiu-se que ao corte o material resiste a, aproximadamente, 50% da tensão de cedência. Não havendo variação na espessura e a tensão de cedência, então:

$$100 \times 0,5 \times 0,5 \times l > 500$$

$$l > 20$$

De maneira a respeitar estes requisitos desenhou-se o provete com a geometria apresentada abaixo.

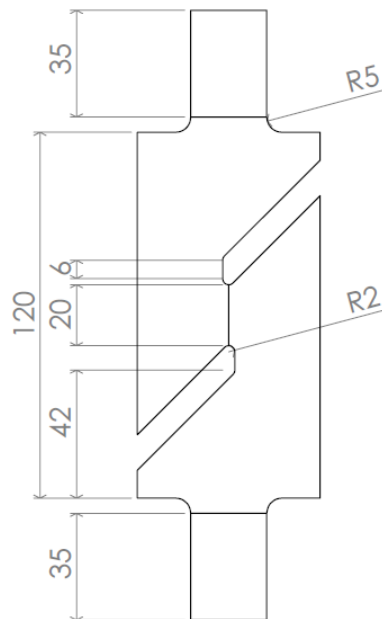
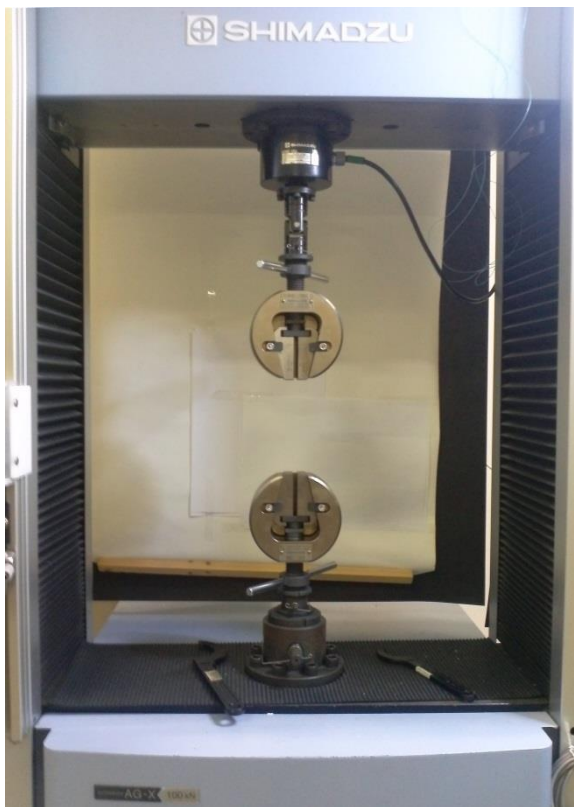


Figura 19 Provete de corte

2.5 Ensaio dos provetes

Para realizar os ensaios de tração utilizou-se uma máquina universal de ensaios, Figura 20 a), com uma célula de carga de 5 kN, Figura 20 b), existente no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM), com o objetivo de fazer a caracterização mecânica dos provetes.



a)



b)

Figura 20 a) Máquina de ensaios e b) célula de carga de 5kN em pormenor.

Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 1,0 mm/min como se pode verificar na Figura 21, no espaço indicado por *testspeed* do monitor da máquina de ensaios. Durante o ensaio, para cada provete foram registados num ficheiro de dados, os valores de força e de deslocamento a cada 0,01 segundos.



Figura 21 Monitor da máquina de ensaios

2.5.1 Provete de lados paralelos segundo a norma

Concluído o ensaio de tração do provete de lados paralelos, efetuou-se o tratamento dos dados do ficheiro criado durante o ensaio. Recorrendo aos dados registados foram desenhadas as curvas da evolução da força registada pela célula de carga em função do deslocamento do travessão da máquina de ensaios. Essas curvas estão representadas no gráfico da Figura 22.

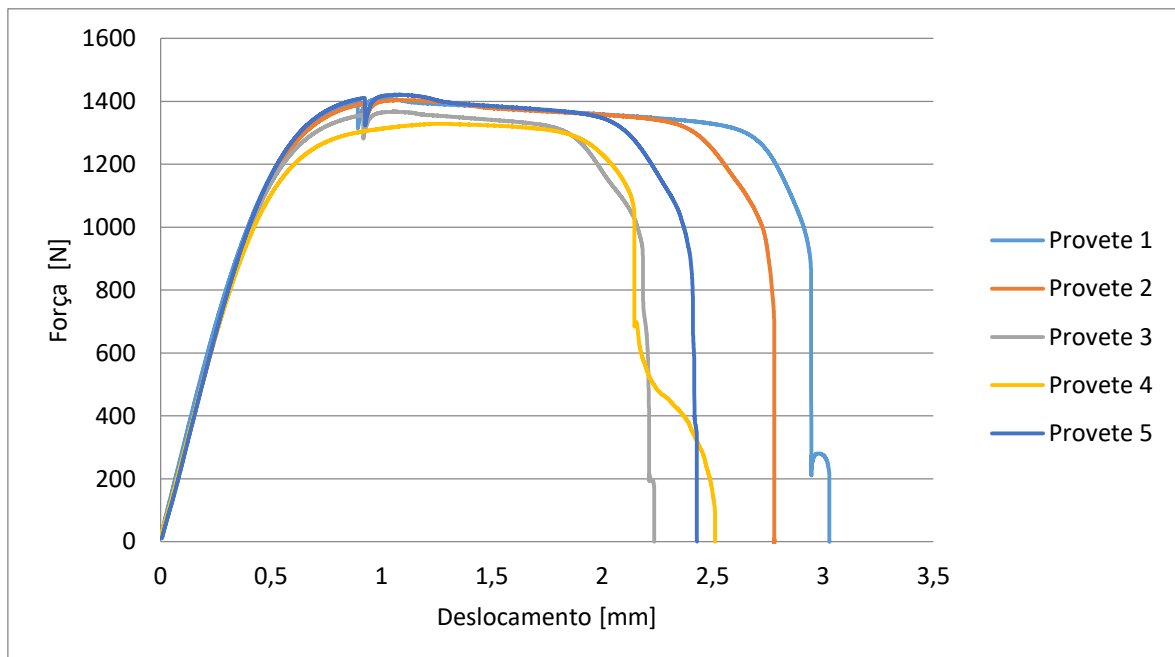


Figura 22 Gráfico de resultados dos ensaios dos provetes de lados paralelos

Durante um ensaio os resultados podem ser influenciados por fatores externos ao provete, tais como, escorregamento entre o provete e as pinças, posicionamento do provete, aperto insuficiente, condições ambientais, etc. Observando as curvas provenientes dos ensaios pôde-se concluir que o ensaio menos influenciado foi o ensaio do provete 1 uma vez que este apresentava maior deformação plástica até ocorrer a rotura. Por esse motivo, os dados utilizados foram recolhidos a partir do ensaio deste provete.

2.5.2 Provete em forma de haltere segundo a norma

Ensaiou-se um provete, em forma de haltere, fabricado a partir do mesmo material utilizado na construção dos atenuadores. A geometria do provete definida para este ensaio foi ditada pela norma, como referido anteriormente. Na Figura 23 está apresentado o provete pronto a ensaiar.

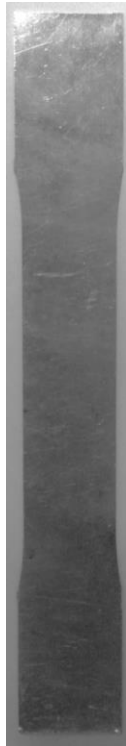


Figura 23 Provete em forma de haltere segundo a norma

Para se ensaiar fixou-se o provete na máquina de ensaios por intermedio de maxilas próprias para este tipo de ensaios.

O ensaio correu dentro da normalidade a uma velocidade de 1 mm/min até que ocorresse a rotura do provete.

Na Figura 24 são apresentadas várias etapas do ensaio de tração do provete em forma de haltere N1.

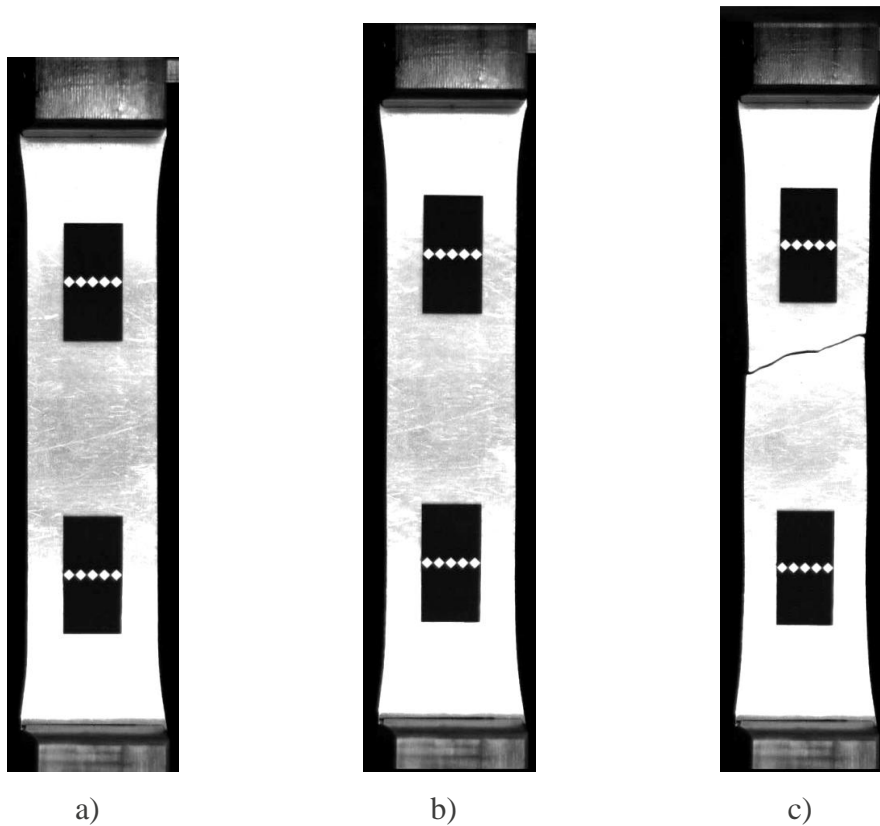


Figura 24 Provete em forma de haltere N1 em diferentes deslocamentos do travessão, durante o ensaio: a) 0 mm, b) 4 mm e c) 8 mm.

Depois do tratamento dos dados obtidos através do extensómetro ótico e do travessão da máquina de ensaios, obtiveram-se os gráficos força-deslocamento representados na Figura 25 e na Figura 26.

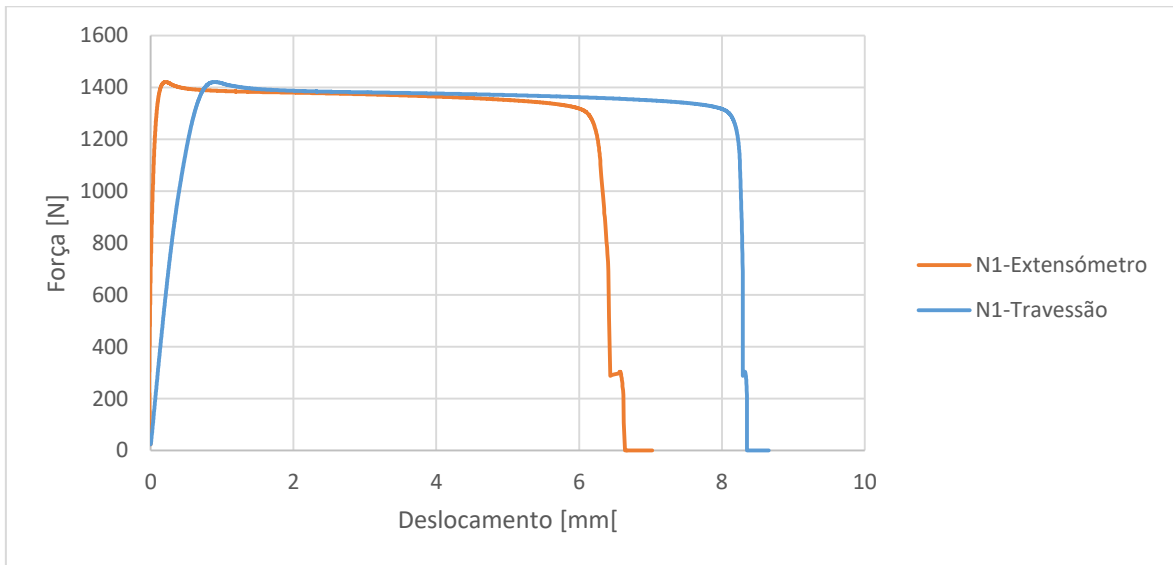


Figura 25 Gráfico do resultado do ensaio de tração do provete em forma de haltere N1.

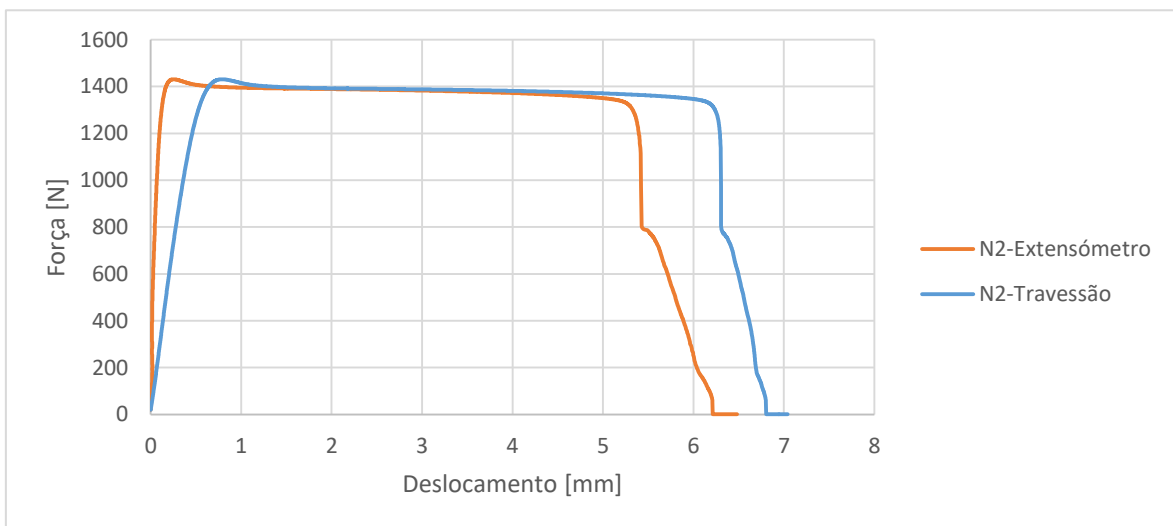


Figura 26 Gráfico do resultado do ensaio de tração do provete em forma de haltere N2.

2.5.3 Provete com entalhes

Ensaiou-se um provete, com entalhes, fabricado a partir do mesmo material utilizado na construção dos atenuadores. A geometria do provete foi referida no capítulo anterior. Na Figura 27 está apresentado o provete pronto a ensaiar.



Figura 27 Provete com entalhes

Para se ensaiar, fixou-se o provete na máquina de ensaios, por intermédio de maxilas próprias para este tipo de ensaios.

O ensaio correu dentro da normalidade a uma velocidade de 1 mm/min até ocorresse a rotura do provete.

Na Figura 28 são apresentadas várias etapas do ensaio de tração do provete com entalhes T1, nomeadamente, a 0 mm de deslocamento a), quando ocorre início de fenda aos 0,6 mm b) e no momento em que a rotura é total aos 0,7 mm c).

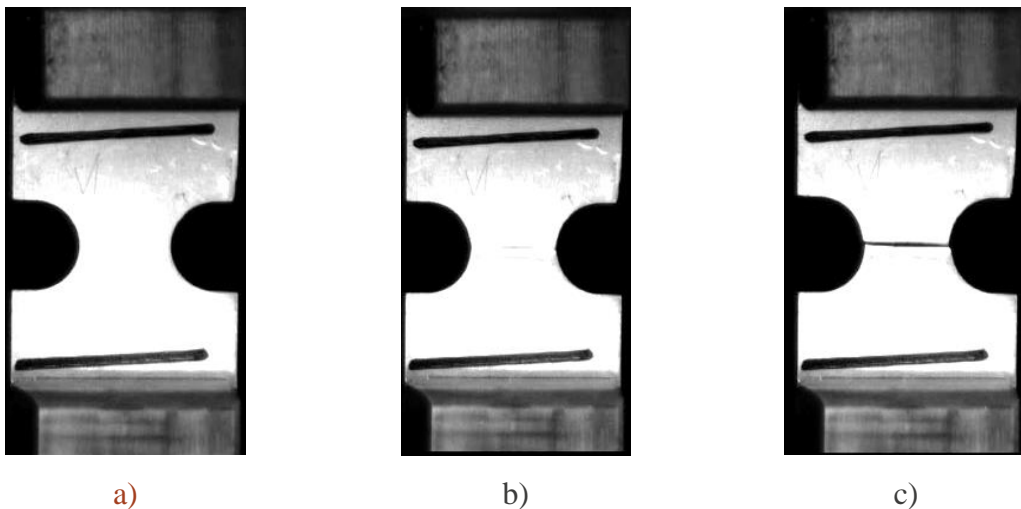


Figura 28 Provete entalhes T1 em diferentes deslocamentos do travessão, durante o ensaio: a) 0 mm, início do ensaio, b) 0,6 mm, início de fenda e c) 0,7 mm, rotura total.

Depois do tratamento dos dados obtidos através do extensómetro ótico e do travessão da máquina de ensaios obtiveram-se os gráficos força-deslocamento presentes na Figura 29 e na Figura 30.

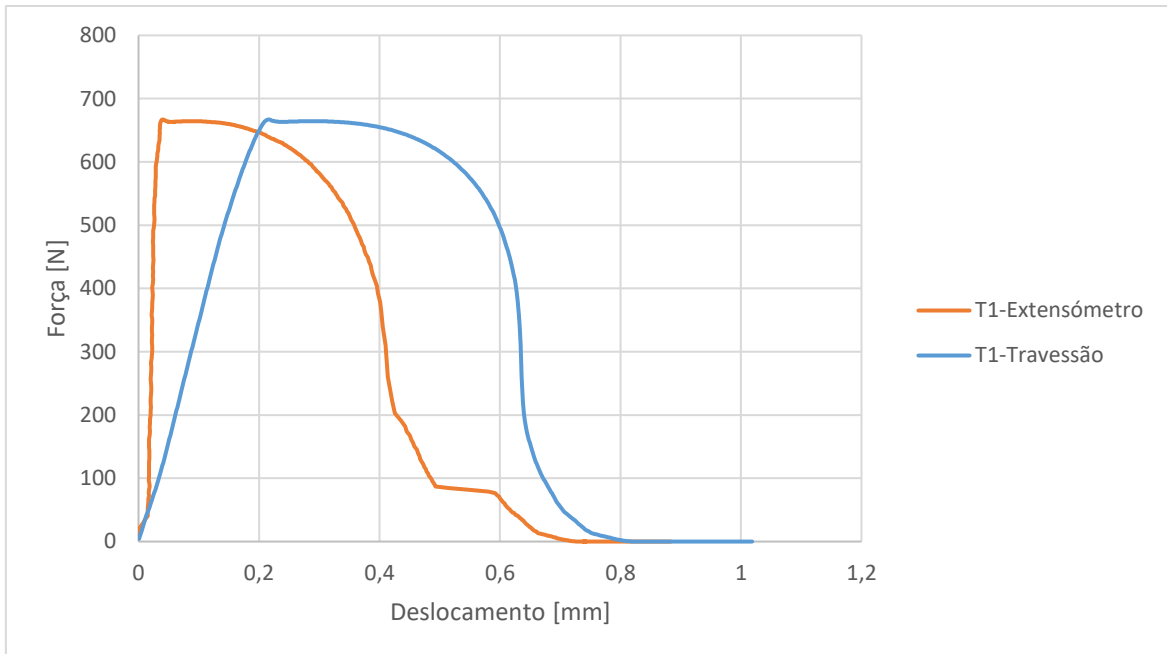


Figura 29 Gráfico do resultado do ensaio de tração do provete com entalhes T1.

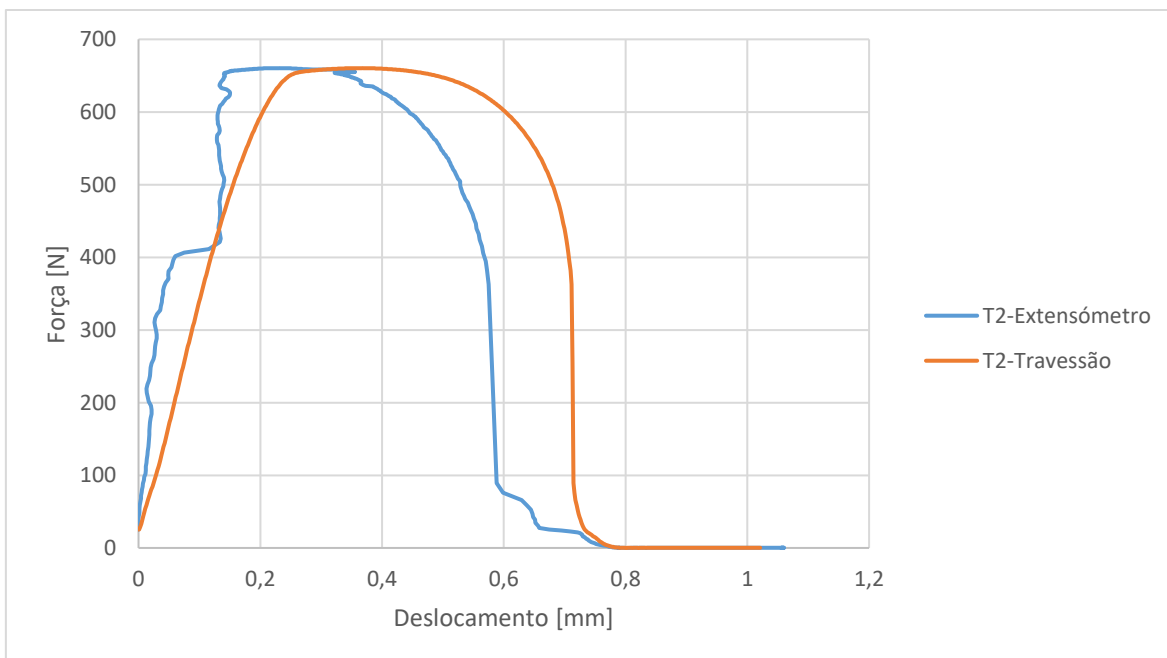


Figura 30 Gráfico do resultado do ensaio de tração do provete com entalhes T2.

2.5.4 Provete de corte

Como referido no capítulo anterior, este provete foi cortado com geometria muito específica, na tentativa de obter rotura por corte. Assim como os outros provetes, também este foi fabricado a partir do mesmo material utilizado na construção dos atenuadores. A geometria do provete foi referida no capítulo anterior. Na Figura 31 está apresentado o provete pronto a ensaiar.



Figura 31 Provete de corte

Para se ensaiar fixou-se o provete na máquina de ensaios por intermedio de maxilas próprias para este tipo de ensaios.

O ensaio correu dentro da normalidade a uma velocidade de 1 mm/min ate ocorresse a rotura do provete.

Na Figura são apresentadas várias etapas do ensaio de tração do provete de corte C1, nomeadamente, a 0 mm de deslocamento a), quando ocorre início de fenda, aos 2,76 mm, b) e no momento em que a rotura é completa, aos 22,28 mm, c).

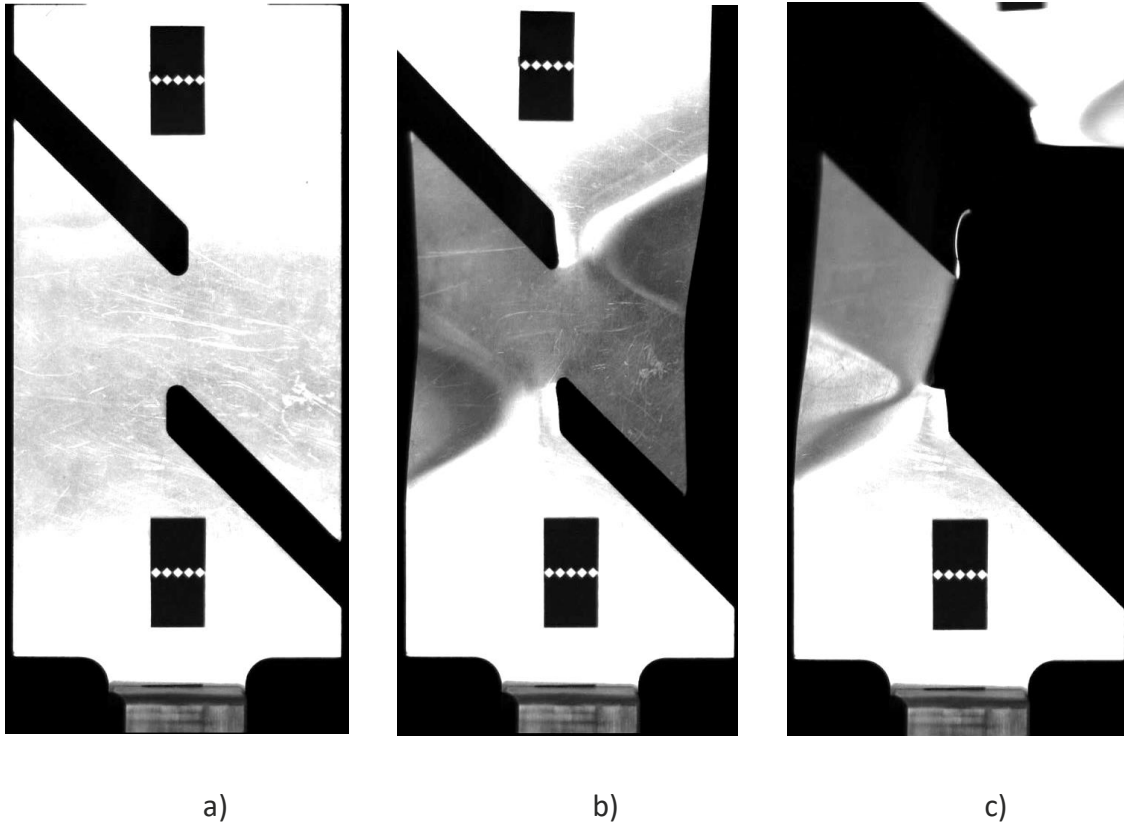


Figura 32 Provete de corte C1 em diferentes deslocamentos do travessão, durante o ensaio: a) 0 mm, início do ensaio, b) 2,76 mm, início de fenda e c) 22,28 mm, rotura completa

Depois do tratamento dos dados obtidos através do extensómetro ótico e do travessão da máquina de ensaios obtiveram-se os gráficos força-deslocamento traçados na Figura 33 e na Figura 34.

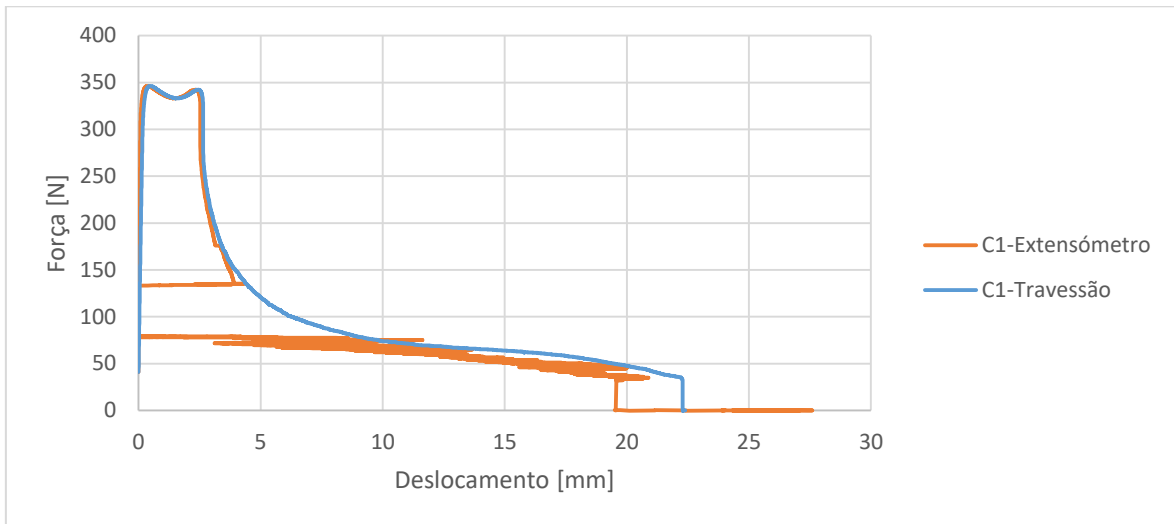


Figura 33 Gráfico do resultado do ensaio de tração do provete de corte C1.

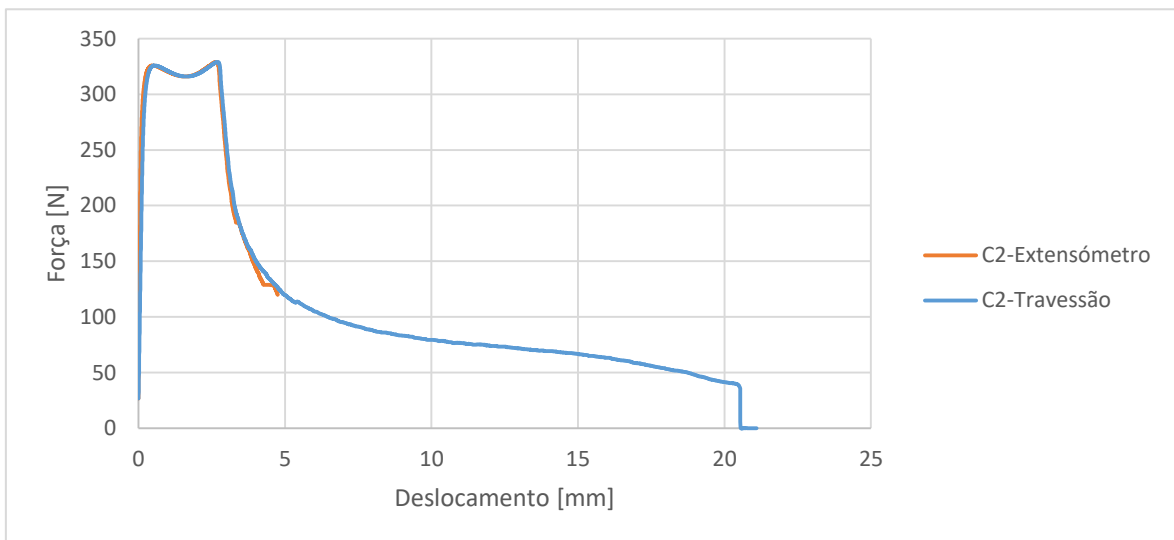


Figura 34 Gráfico do resultado do ensaio de tração do provete de corte C2.

2.6 Simulação do ensaio dos provetes

Nesta etapa pretendeu-se replicar os ensaios experimentais através de simulações. Para isso utilizou-se o *software* Abaqus®, tendo sido permitido o acesso ao CIDEM para utilizar a licença de uma *workstation*. Existem outros *softwares* para esta finalidade como por exemplo o LS-DYNA 3D® ou o Pam Crash®.

Inicialmente tentou-se utilizar o *software* Mechanical Simulation® da Autodesk® para se realizarem as simulações, no entanto surgiram dúvidas relativamente a resultados obtidos, para além disso, o comportamento dos modelos eram irrealistas. Por

estas razões foi necessário recorrer a outro *software*, um que permitisse simular e obter resultados plausíveis. Pelo exposto passou a ser utilizado o *software* Abaqus®.

Ao longo desta tese procurou-se fazer as simulações pelo método de cálculo mais simples, ou seja, em que fosse menor o tempo de cálculo. Ao surgirem barreiras ou erros a simulação foi-se tornando mais cara em termos de tempo. Ainda assim optou-se por esta via por forma a tornar possível a obtenção do resultado pretendido.

O objetivo principal da simulação numérica é permitir-nos prever o resultado dos atenuadores antes de serem ensaiados. Para tal é necessário introduzir no *software* parâmetros que levem o material a comportar-se da mesma forma na simulação e no ensaio. Como se pode constatar no capítulo anterior, foram determinadas as curvas tensão-deformação reais do material e foram essas curvas, mais precisamente uma aproximação a estas, que se introduziu como parâmetro de plasticidade do material. Recorrendo à simulação numérica foi possível recolher valores de determinados parâmetros que dão início ao dano e posteriormente afinar a sua evolução.

Todos os modelos simulados foram desenhados previamente no *software* SolidWorks® e importados no *software* Abaqus® para se proceder às simulações dos mesmos.

2.6.1 Simulação do provete de lados paralelos

Após tratamento de dados dos ensaios dos provetes de lados paralelos, foi desenhado em SolidWorks® um provete com as dimensões previstas para um provete de lados paralelos. Este provete foi desenhado em cascas uma vez que a espessura do provete era muito inferior que as outras dimensões.

Partindo do conhecimento adquirido no ensaio, foi possível saber qual o comportamento que o provete deveria assumir na simulação. Assim, as características do material introduzido no Abaqus® foram alteradas aos poucos e, com essas alterações, pretendeu-se fazer com que curva descrita pelo gráfico da simulação de tração do provete estivesse de acordo com a curva descrita no gráfico tensão-deslocamento resultante do ensaio experimental.

Numa primeira abordagem para simular a cedência do material, utilizaram-se as definições de plasticidade atribuídas ao material. Conhecendo-se o deslocamento que teria a pinça superior quando o provete começou a ceder, foi-se diminuindo a tensão plástica à medida que se aumentava a deformação. Foram feitas várias simulações

para garantir que o provete cedesse quando a pinça superior, na simulação, apresentasse o mesmo valor de deslocamento que no ensaio.

Quando se obteve na simulação um comportamento idêntico ao do ensaio, Figura 35, utilizaram-se esses parâmetros de material para caracterizar o Atenuador 1. No entanto, acabou por se verificar que esta abordagem não era a mais apropriada para o tipo de simulação em questão. O facto de se utilizar parâmetros de uma simulação de tração para realizar uma simulação de compactação originou erros que levaram o programa a abortar a simulação. A causa desse erro foi identificada como elementos demasiado distorcidos.

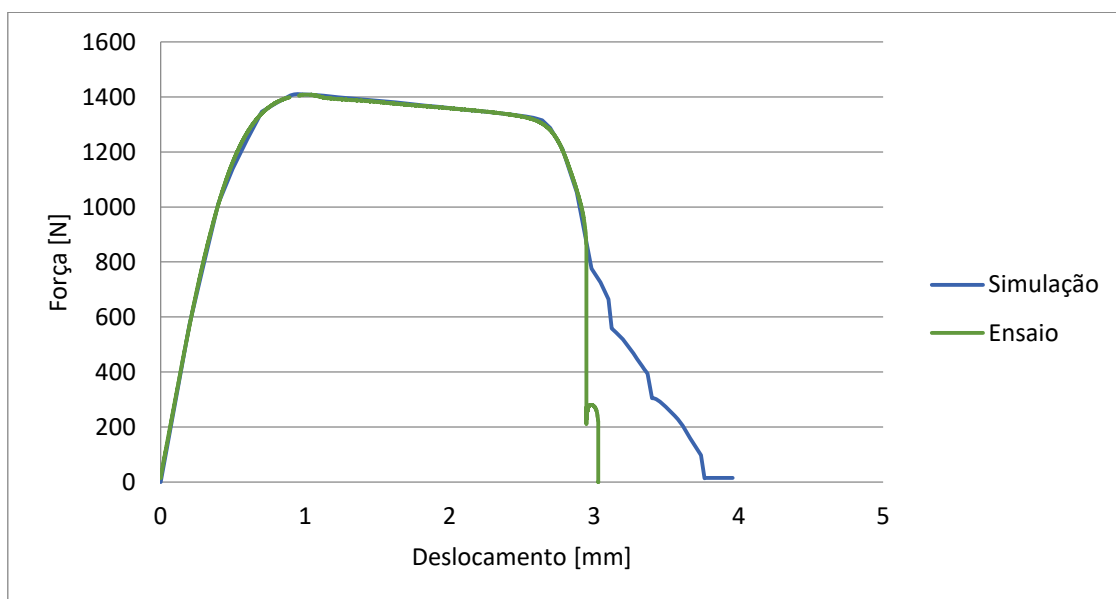


Figura 35 Gráfico comparativo entre o resultado obtido no ensaio e o resultado obtido na simulação.

A estratégia utilizada para não se voltar a ter simulações abortadas, devido a erros demasiado distorcidos, passou pela introdução de dano nas características do material. Esta propriedade dos materiais no Abaqus® faz com que os elementos, que atinjam determinados valores num grupo de variáveis, sejam eliminados evitando assim distorção excessiva. Para que ocorra a eliminação é necessário que sejam verificadas certas condições, para isso existem propriedades de material que são a iniciação de dano e a evolução desse dano. Quando se introduz o dano podem ser utilizadas várias formulações. Neste trabalho optámos por utilizar o dano por corte.

Recorrendo à simulação do ensaio de tração obtiveram-se os valores de deformação e rácio de tensão de corte para o mesmo deslocamento do travessão em

que o material cede no ensaio. Introduzidos esses valores nos parâmetros de iniciação de dano, definiu-se o parâmetro de evolução de dano, um valor que iria descrever a reta desde a iniciação de dano até um valor de tensão igual a zero. Atingido o valor de tensão igual a zero ocorre a eliminação do elemento.

Foram feitas alterações aos parâmetros de dano até os resultados do ensaio e os da simulação apresentarem curvas idênticas, Figura 36.

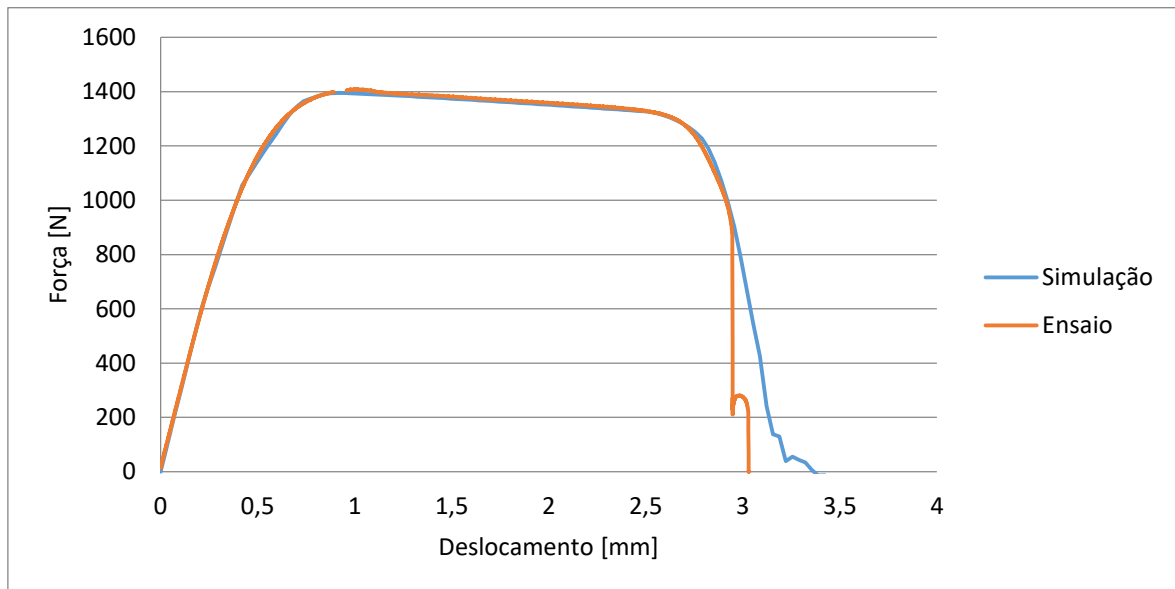


Figura 36 Gráfico comparativo entre o resultado obtido no ensaio e o resultado obtido na simulação causando a cedência utilizando dano.

Com o material caracterizado, simulou-se a compactação do Atenuador 1. Os resultados obtidos visualmente não estavam coerentes com o comportamento do material durante o ensaio. Uma vez que o modelo simulado estava desenhado em cascas, os foles formados durante a compactação não apresentavam o aspeto suave.

Por forma a contornar os problemas que surgiram pelo facto de a estrutura estar desenhada em cascas, alterou-se o modelo. Essa alteração passou por desenhar a estrutura em sólidos ao invés das cascas. Para isso foi necessário verificar os parâmetros do material e afinar o necessário.

Nesta fase do trabalho deixaram de ser utilizados este tipo de provetes, para caracterizar o material. A caracterização do material como sólido fez-se com simulações dos ensaios dos provetes com formato de haltere, provetes com entalhes e os provetes construídos para criar rotura por corte.

2.6.2 Simulação do provete em forma de haltere segundo a norma

Após tratamento de dados e análise do comportamento dos provetes, foram calculados os valores de tensão e deformação reais e introduzidos nos parâmetros de material. De seguida foram feitas as simulações dos ensaios sem utilizar a iniciação de dano. Dessa simulação retiraram-se os valores dos parâmetros “deformação” e “rácio da tensão de corte” no mesmo deslocamento do travessão em que, no ensaio, ocorre a cedência de material. Fez-se a atualização dos parâmetros de material, mas desta vez já com a iniciação de dano introduzida, e simulou-se o ensaio de tração.

Depois de simulado o ensaio, foram feitos alguns ajustes às características do material para os resultados ficarem mais próximos de ensaio.

Na Figura 37 são apresentadas várias etapas da última simulação de tração do provete em forma de haltere.

Depois do tratamento dos dados obtidos na simulação comparou-se com os gráficos força-deslocamento obtidos nos ensaios, Figura 38.

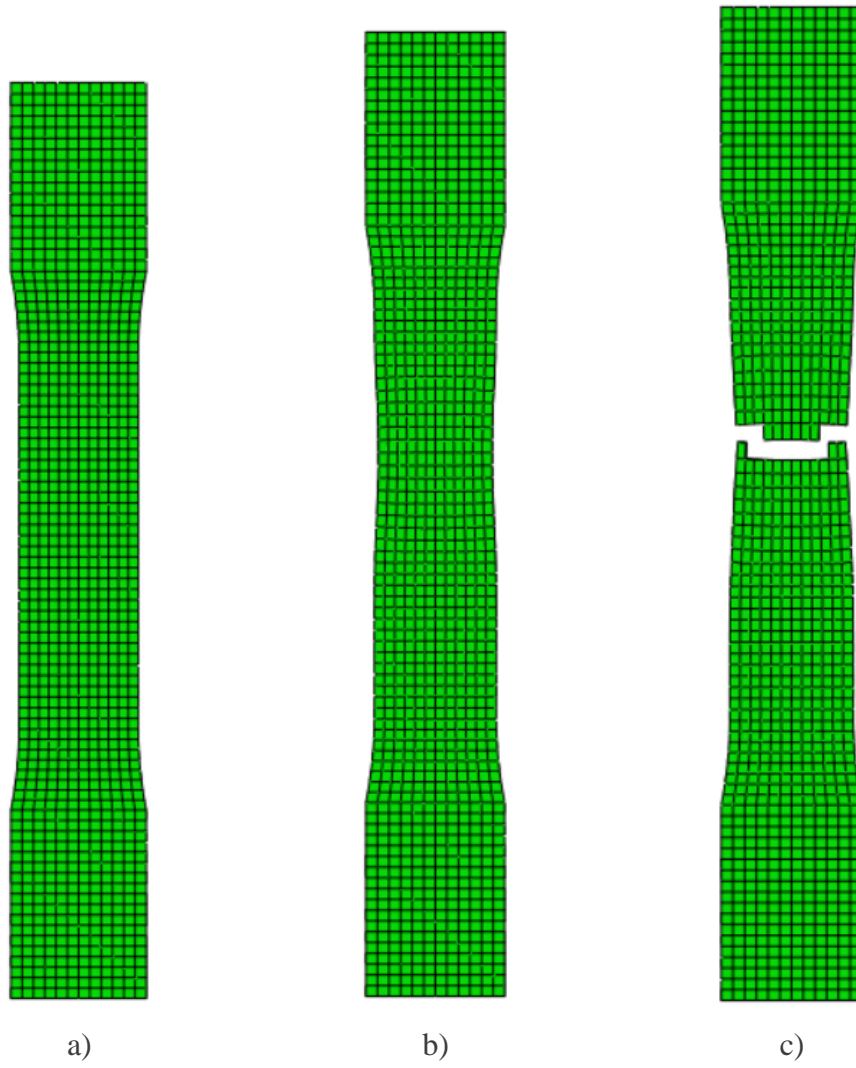


Figura 37 Provete em forma de haltere em diferentes deslocamentos do travessão, durante o ensaio: a) 0 mm, b) 4 mm e c) 6 mm.

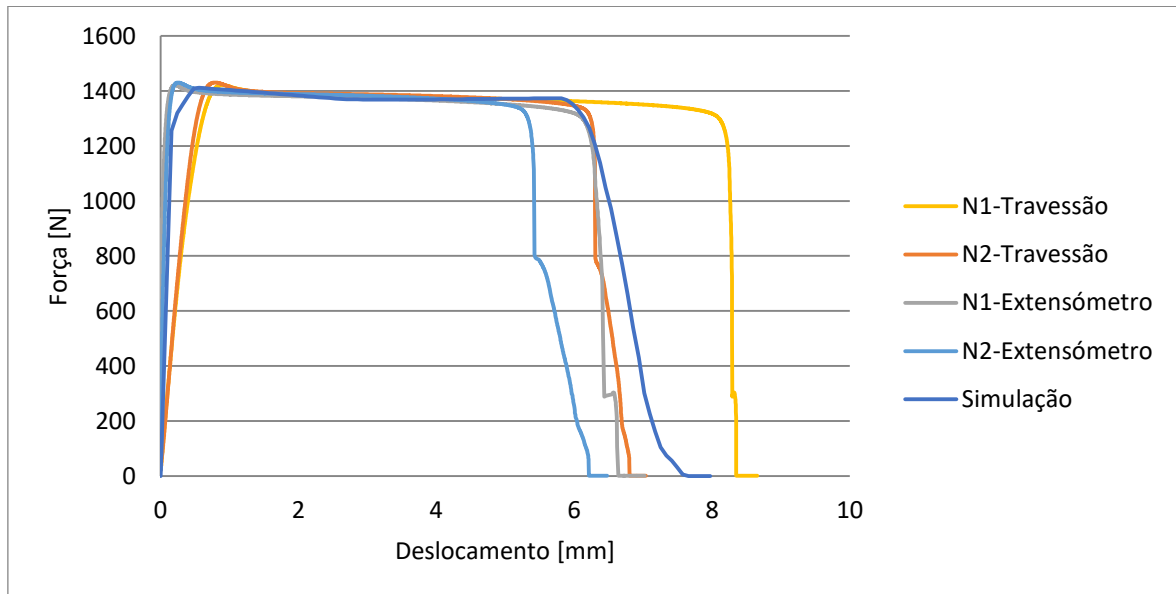


Figura 38 Gráfico comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios e o resultado obtido na simulação do provete em forma de haltere segundo a norma.

2.6.3 Simulação do provete com entalhes

Com os dados adquiridos, nos ensaios do provete com entalhes, e com as características de material proveniente do estudo do provete desenhado segundo a norma, foi realizada a simulação do ensaio de tração do provete com entalhes.

Na Figura 39 são apresentadas várias etapas do ensaio de tração do provete com entalhes, com vários deslocamentos do travessão, nomeadamente, a 0 mm a), quando ocorre início de fenda aos 1,2 mm b) e no momento em que a rotura é total aos 1,5 mm c).

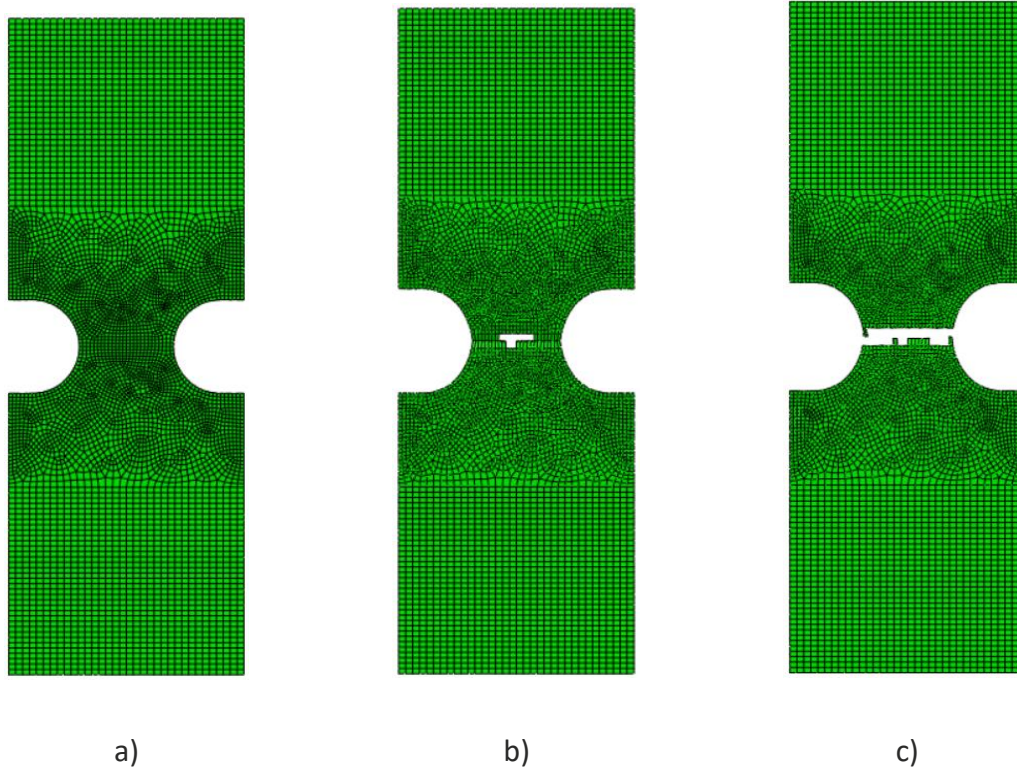


Figura 39 Provete com entalhes em diferentes deslocamentos do travessão, durante o ensaio: a) 0 mm, b) 1,2 mm e c) 1,5 mm.

Depois de terminada a simulação e tratados os dados, comparou-se o resultado com os gráficos força-deslocamento obtidos nos ensaios, Figura 40.

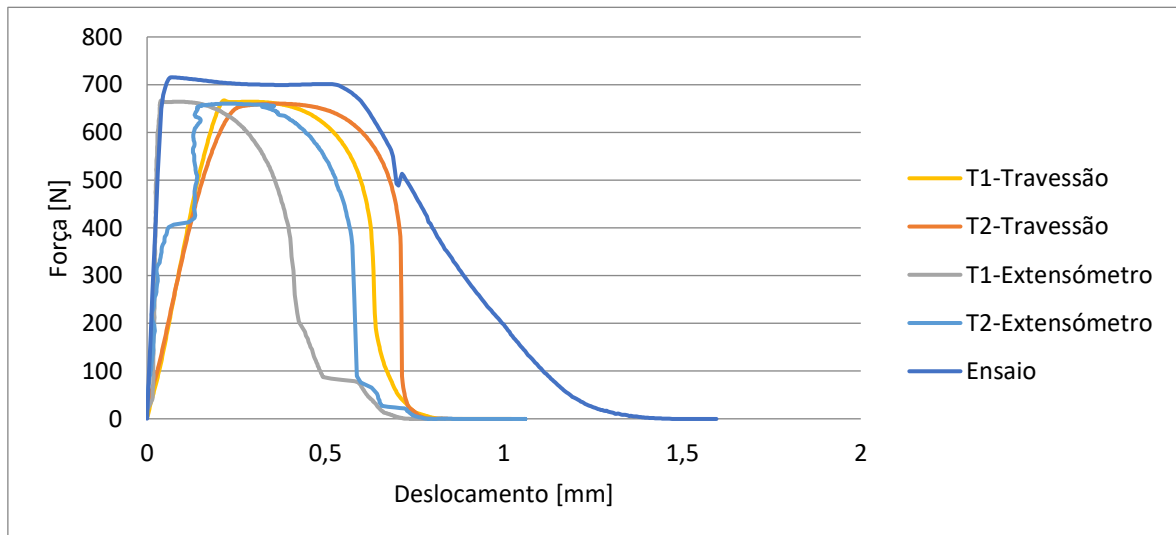


Figura 40 Gráfico comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios e o resultado obtido na simulação do provete com entalhes.

2.6.4 Simulação do provete de corte

Embora a produção deste provete tivesse como objetivo criar uma rotura por corte, o mesmo não se verificou. Em prol de tirar o melhor aproveitamento possível dos dados de que dispomos, simulou-se também o ensaio do provete de corte. Com os dados adquiridos nos ensaios e as características de material proveniente do estudo do provete desenhado segundo a norma, foi realizada a simulação do ensaio de tração ao provete de corte.

Na Figura 41 são apresentadas várias etapas do ensaio de tração do provete de corte, com vários deslocamentos do travessão, nomeadamente, a 0 mm de deslocamento a), quando ocorre início de fenda, aos 2,15 mm, b) e no momento em que a rotura é completa, aos 18,5 mm, c).

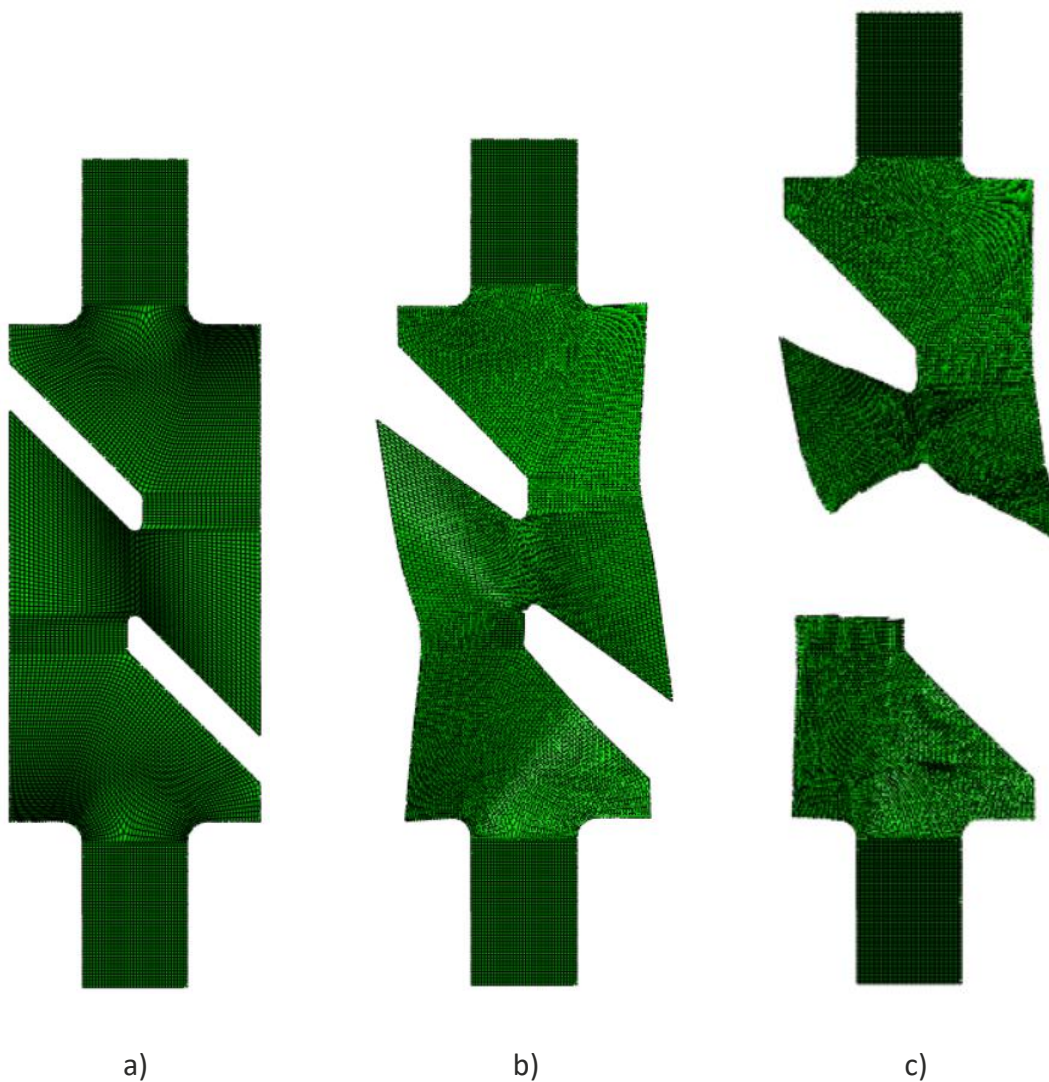


Figura 41 Provete de corte em diferentes deslocamentos do travessão, durante o ensaio: a) 0 mm, b) 2,15 mm e c) 18,5 mm.

Com os dados obtidos da simulação do ensaio, traçou-se um gráfico juntamente com os resultados provenientes do ensaio, Figura 42.

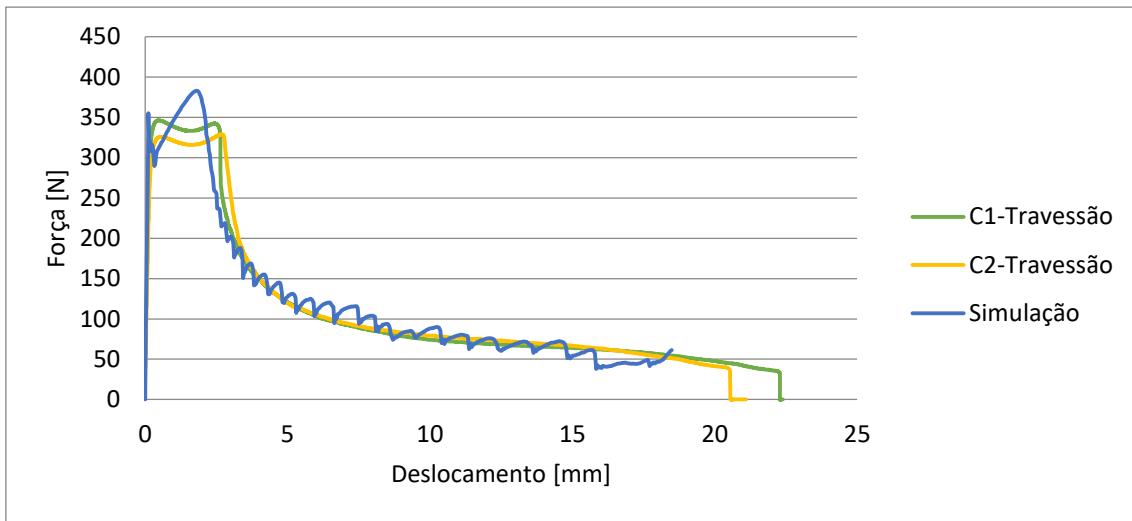


Figura 42 Gráfico comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios e o resultado obtido na simulação do provete de corte.

ESTUDO DOS ATENUADORES

3.1 ATENUADOR 1

3.2 ATENUADOR 2

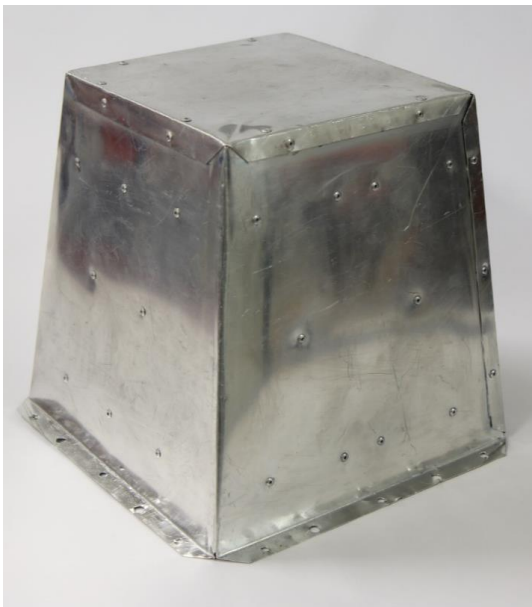
3 ESTUDO DOS ATENUADORES

Como foi referido anteriormente, existiam dois atenuadores construídos pela equipa de *Formula Student* do ISEP. Para cada um dos atenuadores foi feita análise numérica utilizando o *software* Abaqus® e ensaio experimental. Os atenuadores tinham diferenças estruturais como será referenciado ao longo desta tese. Para desenhar os modelos foi utilizado o *software* SolidWorks®.

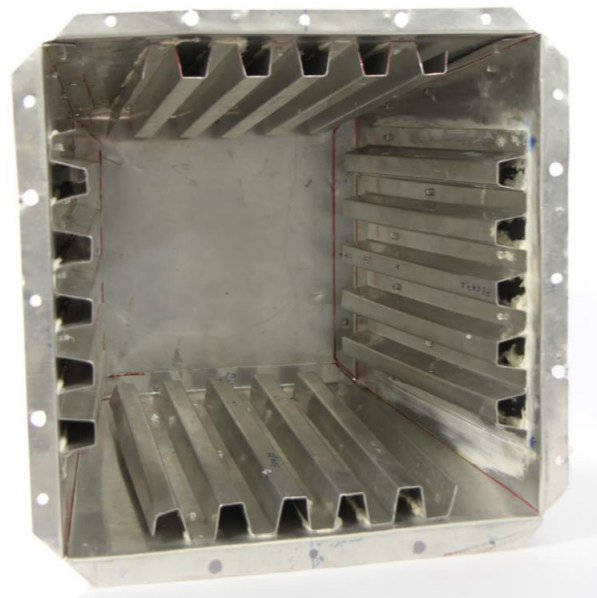
3.1 Atenuador 1

3.1.1 O atenuador

Este atenuador foi o primeiro construído pela equipa de *Formula Student* do ISEP. Este atenuador foi construído em chapa de alumínio com 0,4mm de espessura. Geometricamente tinha a forma de um tronco de pirâmide, Figura 43 a), para aumentar a capacidade de absorção de energia e era reforçado interiormente com chapas quinadas, Figura 43 b). Estas chapas apresentavam um perfil trapezoidal e cada face sujeita a compressão possuía um desses reforços.



a)

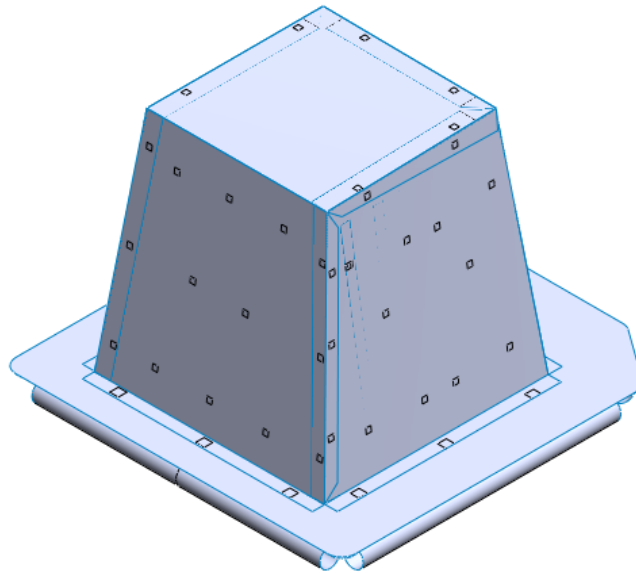


b)

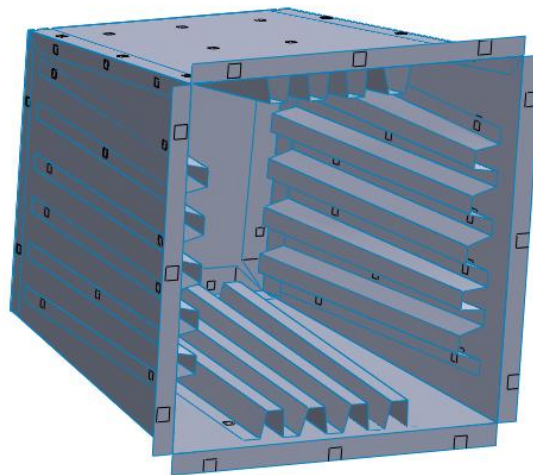
Figura 43 a) exterior do Atenuador 1 e b) reforços do Atenuador 1.

3.1.2 Desenho do atenuador

Inicialmente foi desenhado um modelo fiel à realidade em casca incluindo a chapa de suporte e a estrutura do ensaio, Figura 44 a). Na Figura 44 b) são observáveis os reforços do Atenuador 1.



a)



b)

Figura 44 a) exterior do Atenuador 1 juntamente com a base de ensaio e b) interior do Atenuador 1.

Uma vez que o modelo desenhado consumia muito tempo de cálculo, então, para se reduzir o tempo despendido, optou-se por desenhar um modelo mais simples onde estivessem representadas as principais características do atenuador.

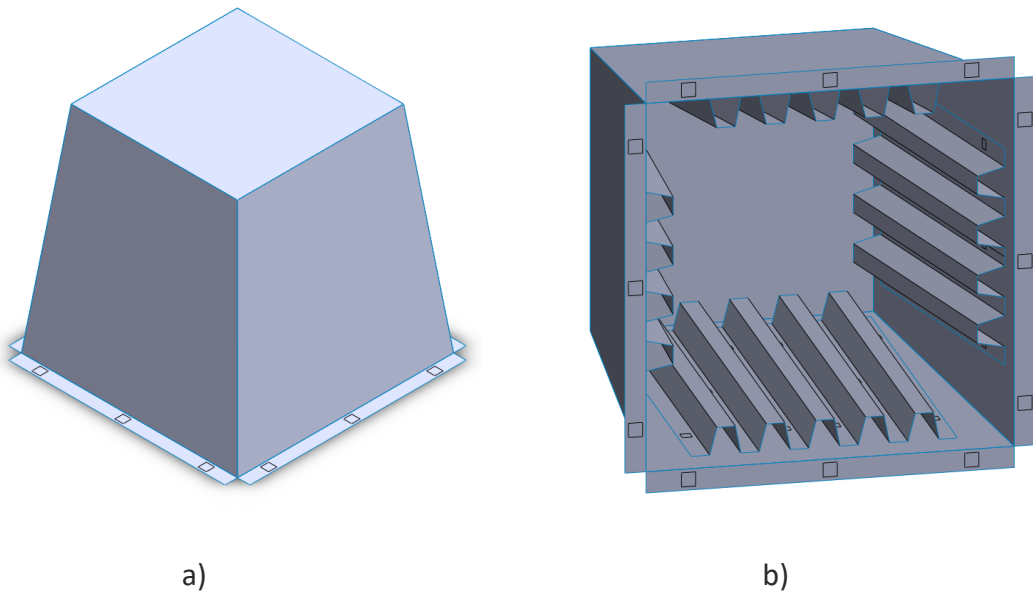


Figura 45 a) exterior do modelo simples do Atenuador 1 e b) interior do modelo simples do Atenuador 1.

Quando analisada a simulação, observou-se que não era captado o comportamento que seria de esperar. Pelo facto do Atenuador 1 ser desenhado em cascas, o modelo não apresentava foles suaves. Para tentar obter esse fenómeno foi alterado o tipo de geometria, desenhando-se o modelo em sólidos, apesar de ter encarecido a simulação, Figura 46.

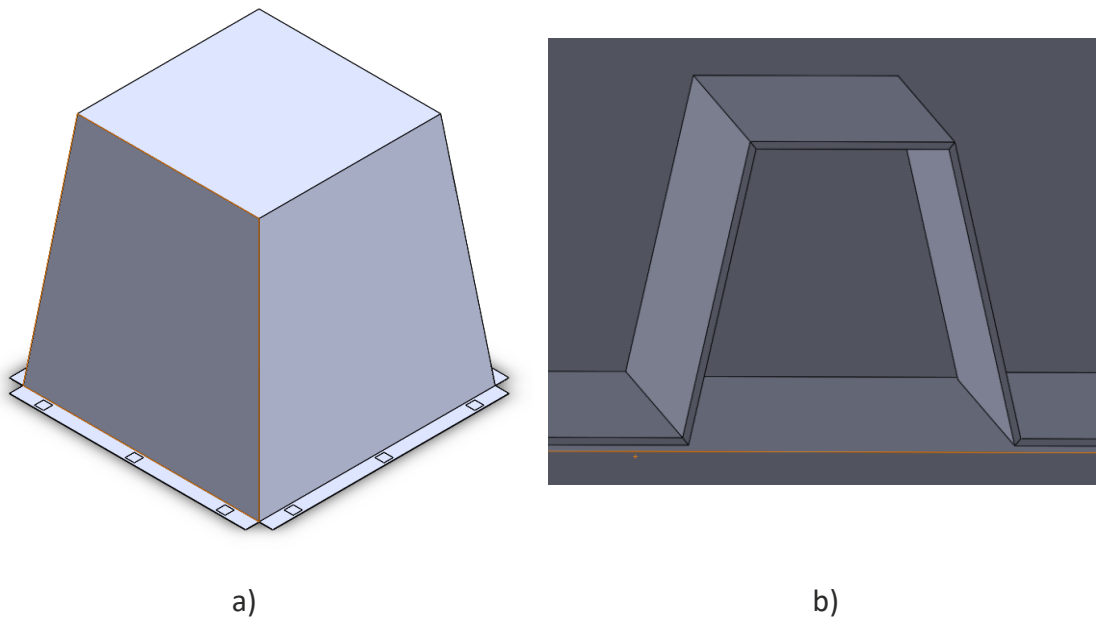


Figura 46 a) exterior do modelo sólido do Atenuador 1 e b) parte do reforço do modelo sólido do Atenuador 1.

3.1.3 Simulação

Para analisar numericamente o Atenuador 1 modelou-se a estrutura com elementos de casca, uma vez que o atenuador foi construído a partir de uma chapa fina, com espessura de 0,4 mm.

O método dinâmico não linear implícito foi o escolhido para as primeiras simulações. Este método gerou problemas desde início, levando a que as simulações não atingissem o fim, pois eram interrompidas por não convergirem para uma solução nas iterações realizadas. Concluiu-se que a existência de diversos tipos de não linearidade torna o cálculo muito complexo, não se tendo a abordagem com o método dinâmico implícito revelado como mais adequada.

Alterando o método de cálculo para não linear explícito surgiu outro problema. Estando o material caracterizado para ceder utilizando apenas as propriedades plásticas do material, o Abaqus® passou a interromper as simulações apontando a existência de elementos demasiado distorcidos como a causa.

Como solução para resolver o problema dos elementos demasiado distorcidos, estudou-se outra propriedade dos materiais no *software*, o dano. Esta propriedade dos materiais no Abaqus® faz com que os elementos sejam eliminados, a dado instante, evitando assim distorção excessiva. Este método dinâmico em conjunto com a caracterização das propriedades de dano mostrou-se mais eficaz para solucionar a compactação do atenuador. Ainda assim surgiu uma incoerência, devido ao facto de se estar a usar elementos de casca, a chapa deformava-se de forma grosseira, Figura 47 a), e durante o contacto havia penetração entre elementos, Figura 47 b).

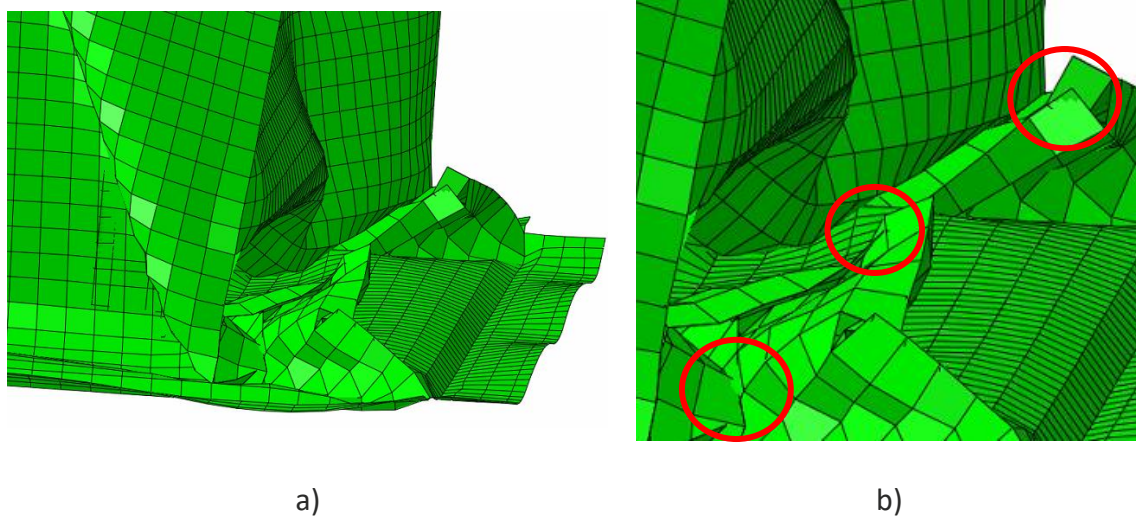


Figura 47 a) deformação grosseira em elementos de casca e b) penetração entre elementos

Com o intuito de aproximar o comportamento do material, àquele que se tinha verificado experimentalmente, definiu-se a estrutura do atenuador como sendo constituída por elementos sólidos. Esta alteração aumentou o tempo de cálculo mas conduziu-nos a resultados mais próximos do comportamento do atenuador. Na Figura 48 estão documentadas etapas com diferentes deslocamentos do travessão, da simulação do Atenuador 1.

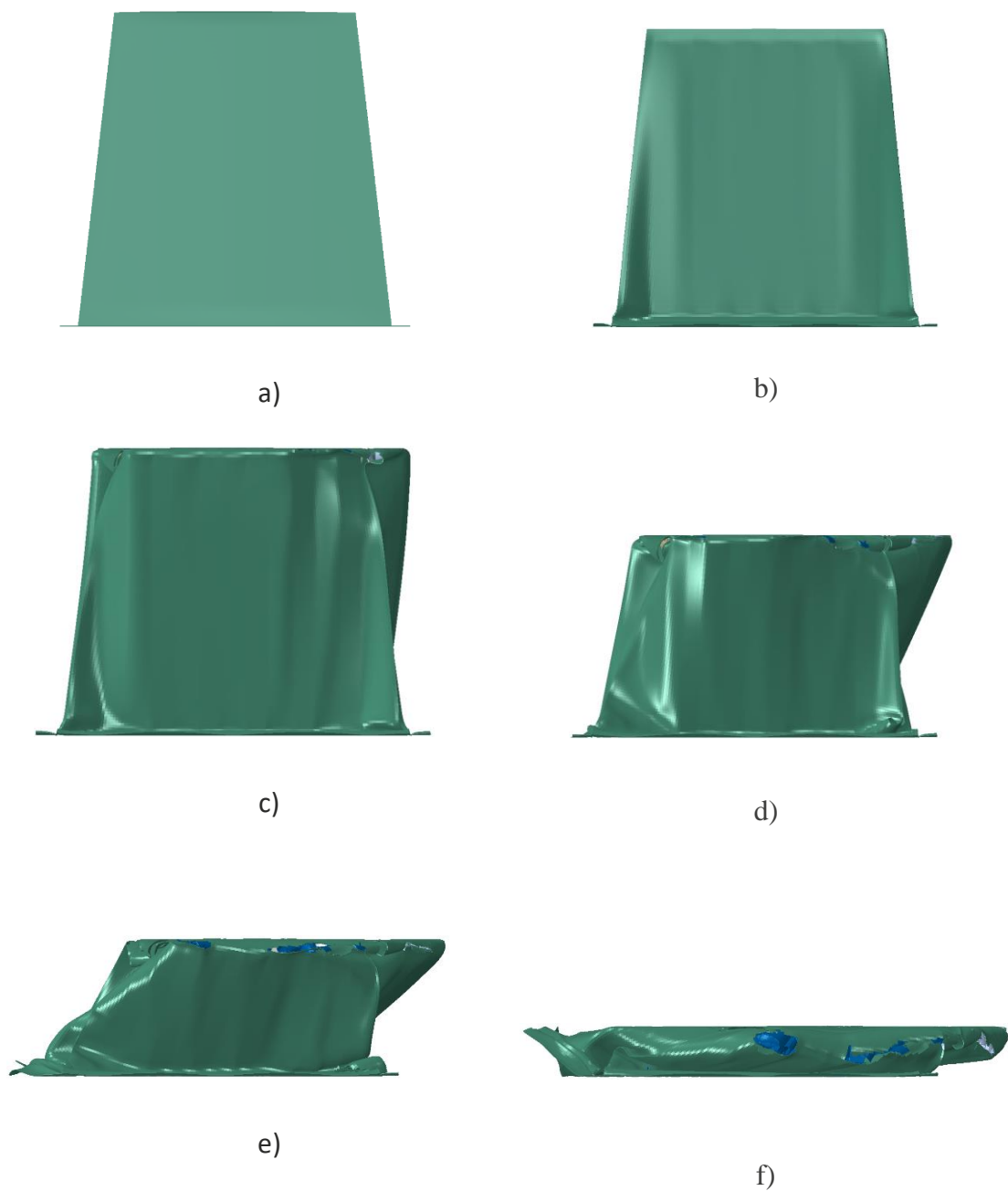


Figura 48 Várias etapas da simulação do Atenuador 1 com deslocamento do travessão de: a) 0 mm, b) 10 mm, c) 50 mm, d) 100 mm, e) 150 mm e f) 220 mm.

Na Figura 49 é apresentada a curva do gráfico da força em função do deslocamento do travessão, da simulação do Atenuador 1.

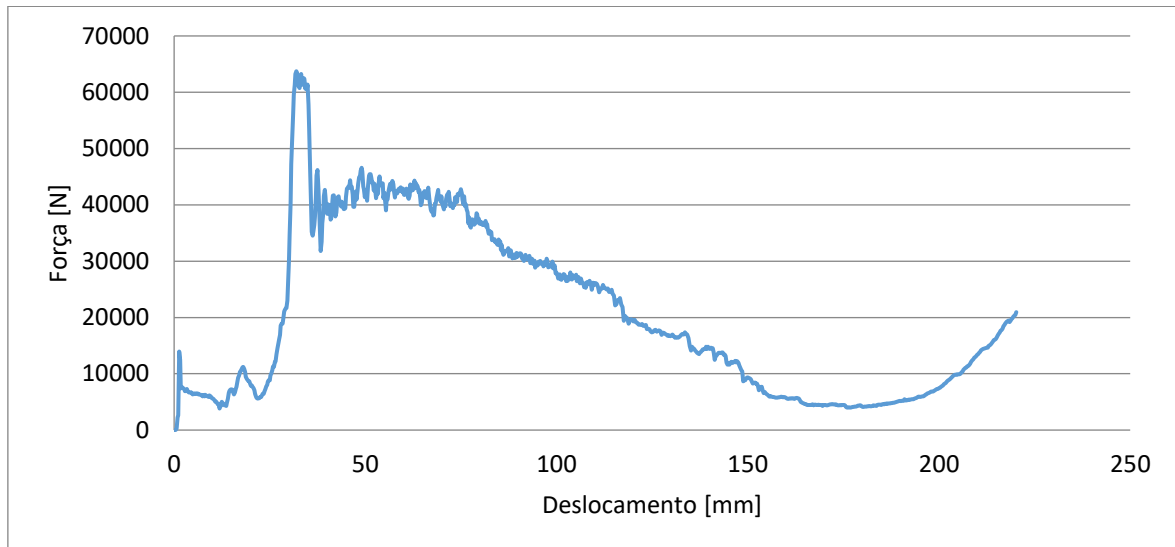


Figura 49 Gráfico, da força em função do deslocamento do travessão, da Simulação do Atenuador 1.

3.1.4 Ensaio

Para ensaiar este atenuador preparou-se uma base onde se fixou uma estrutura idêntica à zona frontal do chassis do veículo de *Formula Student* do ISEP. Esta estrutura era constituída pela chapa frontal ou *bulkhead*, Figura 50 a), e por tubos posicionados tal como no chassis, Figura 50 b). Foi acoplado nesta o atenuador por intermedio de parafusos. Na máquina de ensaios montou-se um conjunto de discos em aço ao carbono, previamente preparados, para serem utilizados neste ensaio.



Figura 50 Estrutura frontal com relevância para a *bulkhead* a) e estrutura tubular b).

Para este ensaio foi utilizada a célula de carga de 100 kN e velocidade de compactação de 100 mm/min.

Na Figura 51 estão apresentadas várias etapas, com diferentes deslocamentos do travessão, do ensaio do Atenuador 1.

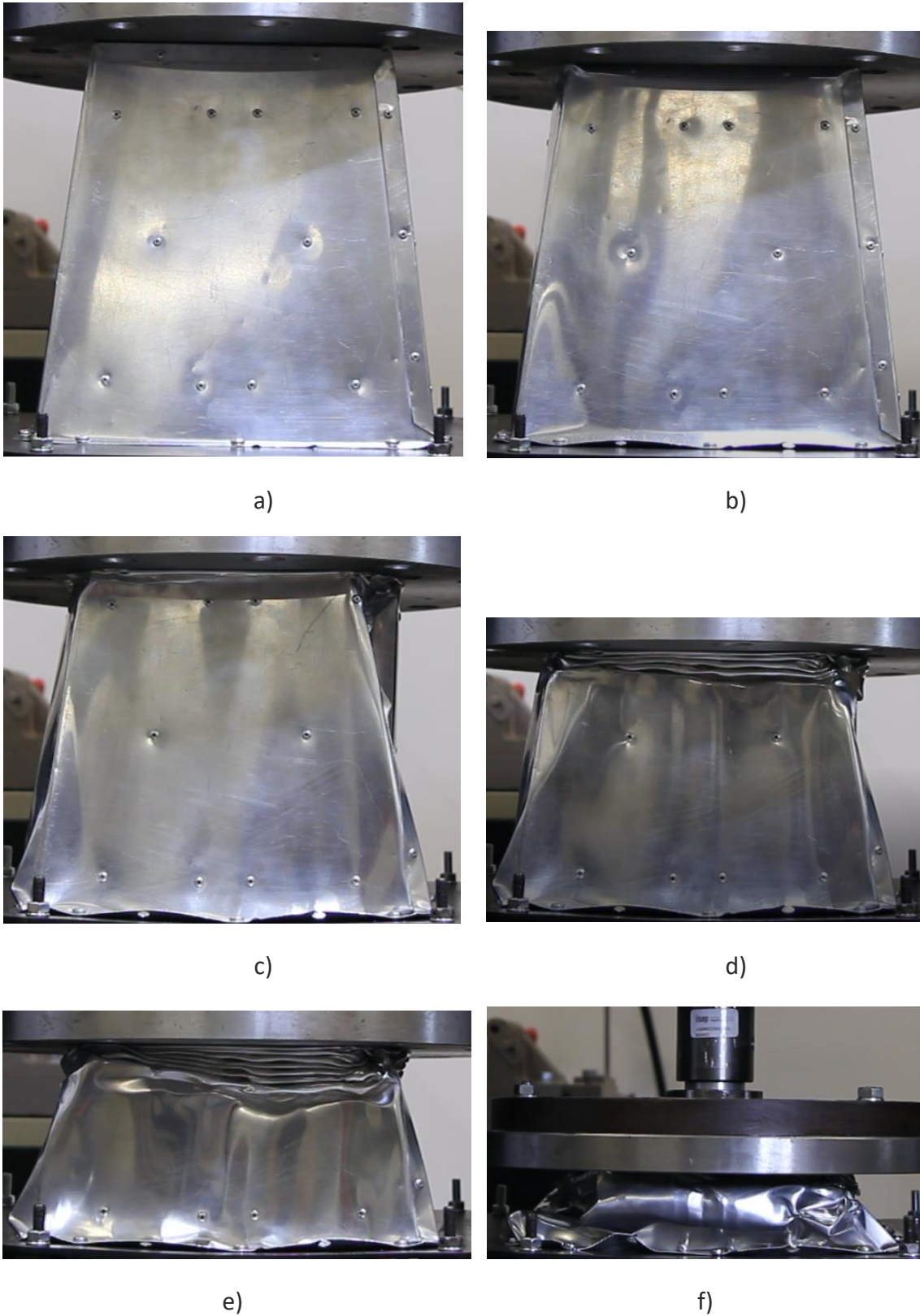


Figura 51 Várias etapas do ensaio do Atenuador 1 com deslocamento do travessão de: a) 0 mm, b) 10 mm, c) 50 mm, d) 100 mm, e) 150 mm e f) 220 mm.

Na Figura 52 é apresentada a curva do gráfico da força em função do deslocamento do travessão, do ensaio do Atenuador 1.

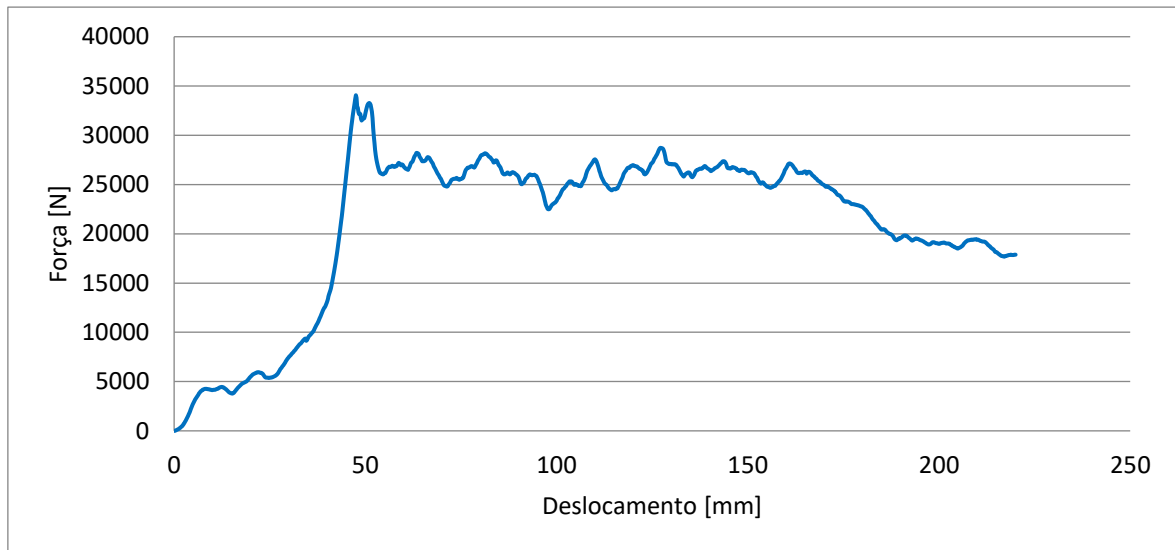
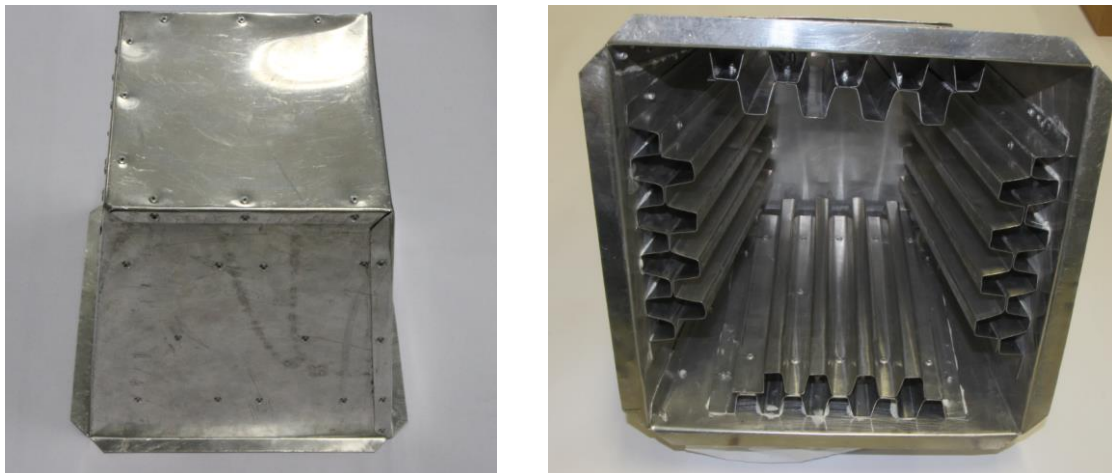


Figura 52 Gráfico, da força em função do deslocamento do travessão, do ensaio do Atenuador 1.

3.2 Atenuador 2

3.2.1 O atenuador

Este atenuador foi construído seguindo a mesma filosofia do primeiro, a forma de um tronco de pirâmide, Figura 53 a), e chapas quinadas a reforça, no entanto, teve três alterações mais evidentes relativamente ao Atenuador 1. A primeira alteração que fizeram na construção deste atenuador passou por construir a caixa exterior a partir de chapa de alumínio de 0,8mm, para aumentar a rigidez da estrutura. A segunda alteração foi utilizar o dobro dos reforços utilizados anteriormente, ou seja, cada face possuía duas chapas quinadas para aumentar a resistência à deformação, Figura 53 b). A terceira e última alteração foi aumentar a altura do atenuador.



a)

b)

Figura 53 a) exterior do Atenuador 2 e b) reforços do Atenuador 2.

3.2.2 Desenho do atenuador

Este atenuador não passou por todo o processo pelo qual passou o Atenuador 1, pois só foi desenhado como um sólido. A caixa exterior do atenuador foi desenhada como uma peça única e simétrica em dois planos, Figura 54.

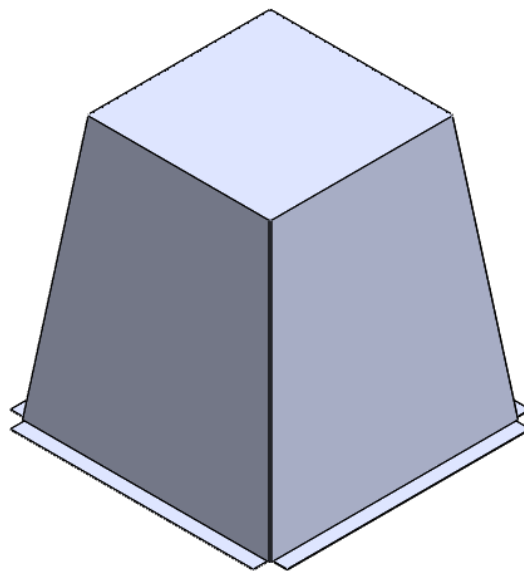


Figura 54 Desenho do exterior do Atenuador 2

Tal como acontecia no modelo real, foram adicionados reforços interiores, cujo perfil era constante em todo o comprimento e sem ter em conta os locais onde estariam aplicados os rebites, Figura 55.

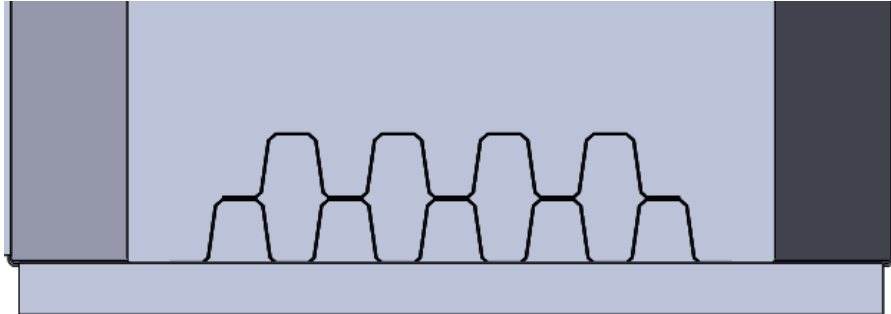


Figura 55 perfil das duas camadas de reforços do Atenuador 2

3.2.3 Simulação

Na simulação de compactação do Atenuador 2 o modelo utilizado tinha as propriedades de sólido e o material utilizado foi o mesmo que se utilizou na última simulação do Atenuador 1. Na Figura 56 podem-se observar várias etapas da simulação do Atenuador 2 com deslocamento do travessão.



Figura 56 Várias etapas da simulação do Atenuador 2 com deslocamento do travessão de: a) 0 mm, b) 10 mm, c) 50 mm, d) 100 mm, e) 150 mm e f) 220 mm.

Na Figura 57 é apresentada a curva do gráfico da força em função do deslocamento do travessão, da simulação do Atenuador 2.

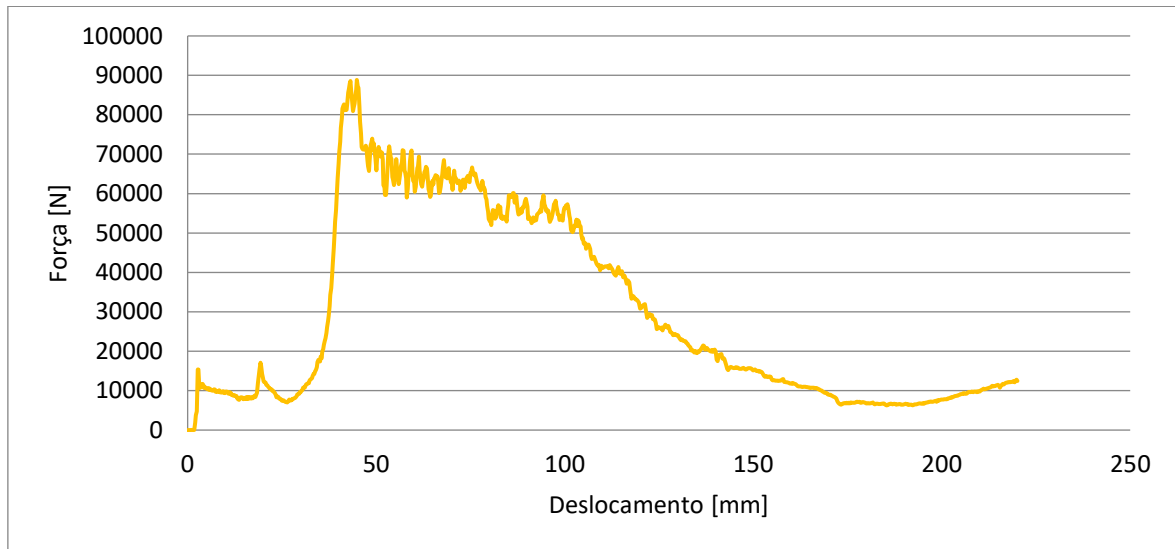


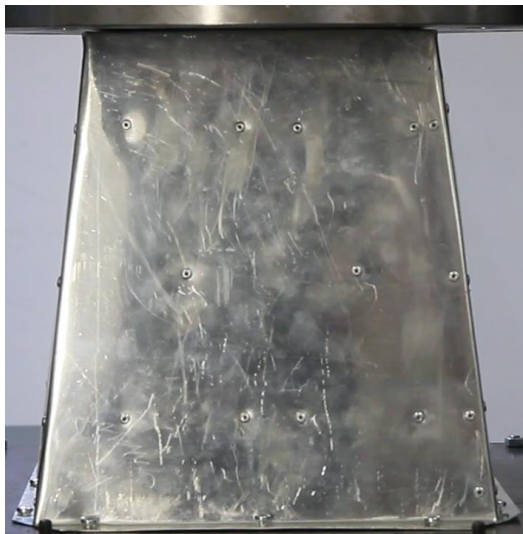
Figura 57 Gráfico, da força em função do deslocamento do travessão, da Simulação do Atenuador 2.

3.2.4 Ensaio

Para se ensaiar este atenuador utilizou-se o mesmo *setup* que o ensaio do Atenuador 1. A estrutura tubular e a chapa da *bulkhead*, idênticos às que constituíam o veículo, à base para ensaios. Por sua vez, através e parafusos, montou-se o Atenuador 2 a essa estrutura. Para se ensaiar o atenuador à compressão foi utilizado o mesmo conjunto de discos que se utilizou no ensaio anterior.

Os parâmetros da máquina foram os mesmos utilizados no ensaio do Atenuador 1, célula de carga de 100 kN e velocidade de compactação de 100 mm/min.

Na Figura 58 estão apresentadas várias etapas, com diferentes deslocamentos do travessão, do ensaio do Atenuador 2.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 58 Várias etapas do ensaio do Atenuador 2 com deslocamento do travessão de: a) 0 mm, b) 10 mm, c) 50 mm, d) 100 mm, e) 150 mm e f) 220 mm.

Na Figura 59 está apresentado o gráfico, da força em função do deslocamento do travessão, do ensaio do Atenuador 2.

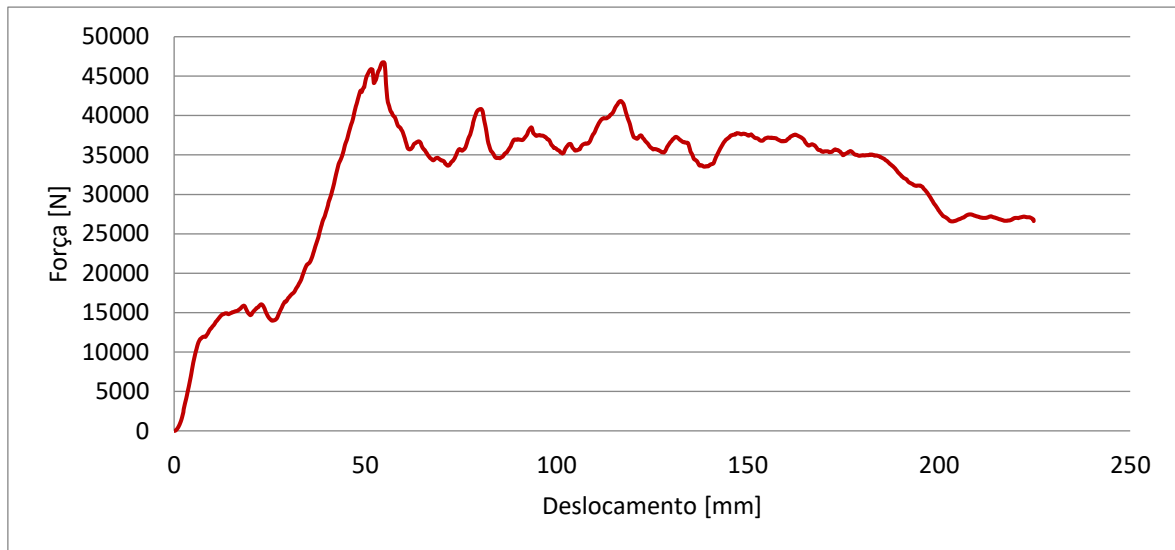


Figura 59 Gráfico, da força em função do deslocamento do travessão, do ensaio do Atenuador 2.

ANÁLISE DE RESULTADOS

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Tratados os dados da simulação final e do ensaio do Atenuador 1, fez-se a comparação entre os resultados destes. Os valores de interesse para o nosso trabalho eram a força máxima, força média e energia. Na Tabela 1 é feita a comparação entre os resultados da simulação e os resultados do ensaio. Na Figura 60 é feita a comparação do comportamento do Atenuador 1 no ensaio e na simulação.

Tabela 1 Apresentação de resultados e comparação entre resultados do Atenuador 1.

	Força máxima [N]	Força média [N]	Energia [J]
Simulação	63730	18720	4520
Ensaio	34063	24945	4643
Erro	87%	25%	3%

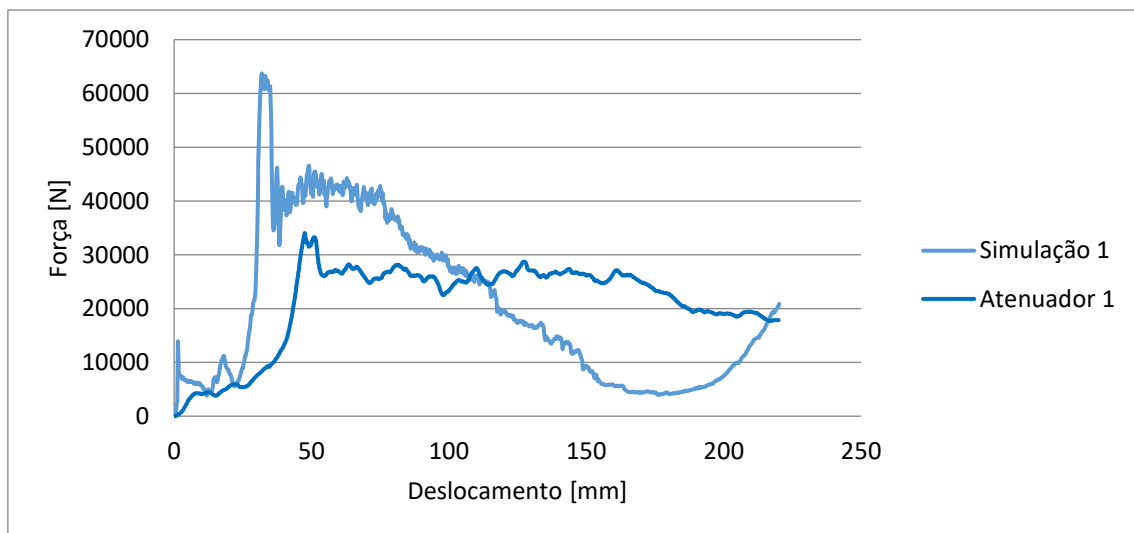


Figura 60 Gráfico comparativo entre o resultado obtido no ensaio e o resultado obtido na simulação do Atenuador 1.

Seguiu-se o procedimento do Atenuador 1 para comparar os resultados da simulação e os resultados do ensaio do Atenuador 2, Tabela 2. Na Figura 61 é feita a comparação do comportamento do Atenuador 2 no ensaio e na simulação.

Tabela 2 Apresentação de resultados e comparação entre resultados do Atenuador 2.

	Força máxima [N]	Força média [N]	Energia [J]
Simulação	88838	17872	6481
Ensaio	46769	35349	7093
Erro	90%	49%	9%

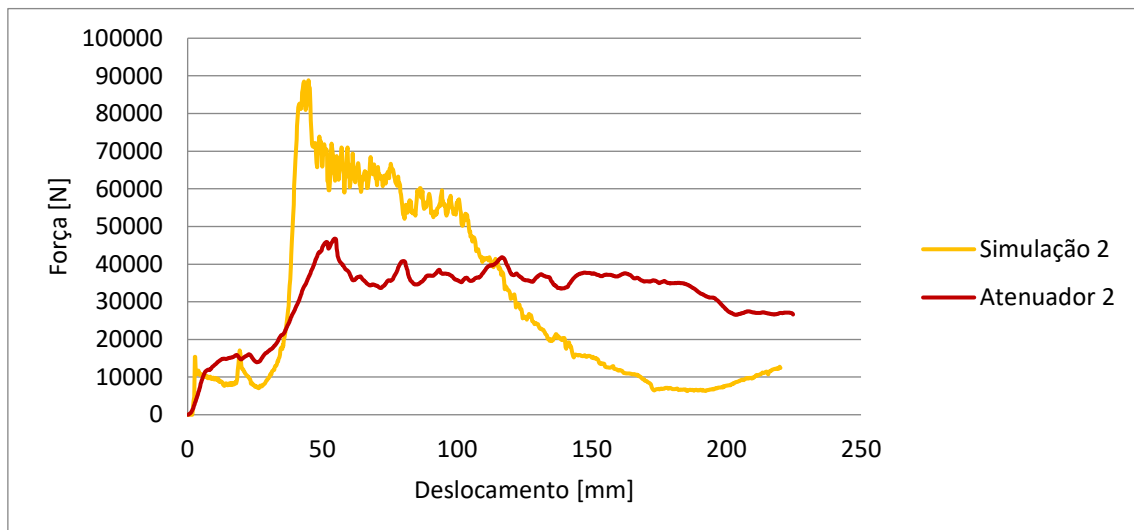


Figura 61 Gráfico comparativo entre o resultado obtido no ensaio e o resultado obtido na simulação do Atenuador 2.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores de força máxima, força média e energia provenientes dos ensaios dos atenuadores, e os valores exigidos pelo regulamento da *Formula Student*. Na Figura 62 é feita a comparação do comportamento do Atenuador 1 e do Atenuador 2 nos respectivos ensaios.

Tabela 3 Comparação entre os resultados dos atenuadores e os valores exigidos no regulamento da *Formula Student*.

	Força máxima [N]	Força média [N]	Energia [J]
Atenuador 1	34063	24945	4643
Atenuador 2	46769	35349	7093
Regulamento	<117000	<58000	7350<

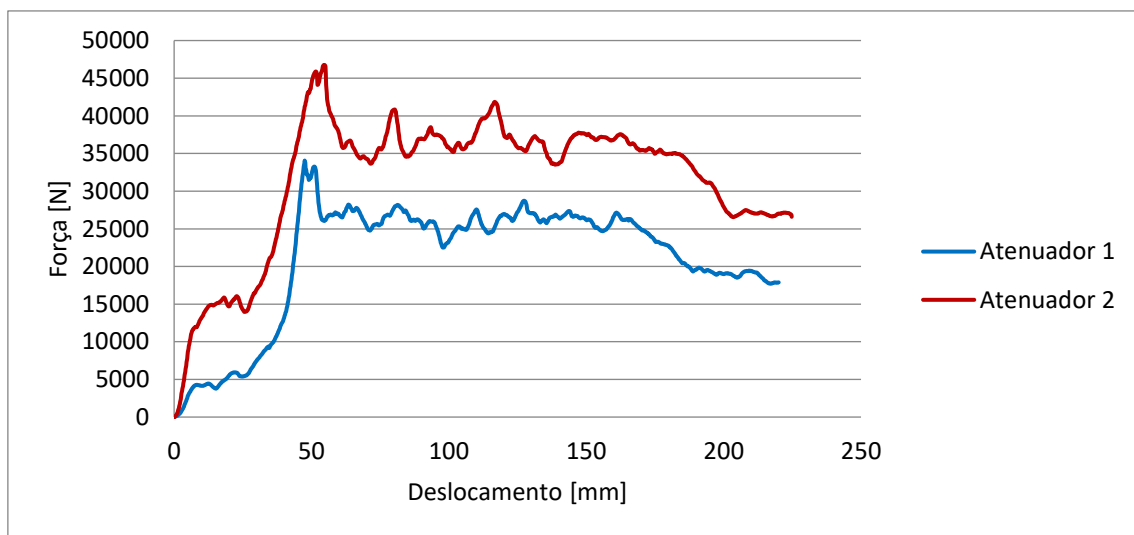


Figura 62 Gráfico comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios dos atenuadores 1 e 2.

O erro entre os valores dos ensaios e das simulações foram elevados quando no que disse respeito ao valor de força máxima e de força média. Na comparação dos valores de energia o erro é pequeno. Conclui-se assim que não se conseguiu captar devidamente o fenómeno durante a simulação.

Nenhum dos atenuadores atingiu o valor de energia necessário para ser aprovado, de acordo com os requisitos exigidos pela *Formula Student*. Com base nestes resultados concluiu-se que se deveria projetar outro atenuador, para satisfazer os requisitos.

CONSTRUÇÃO DE UM ATENUADOR DE IMPACTO

5.1 O ATENUADOR DE IMPACTO

5.2 TIPOS DE ATENUADOR DE IMPACTO NA FORMULA SAE

5.3 REGULAMENTO

5.4 CONSIDERAÇÕES PARA PROJETO DO ATENUADOR

5.5 ESTRUTURA DE DOIS ALVÉOLOS

5.6 ESTRUTURA DE NOVE ALVÉOLOS

5.7 ESTRUTURA DE TRINTA ALVÉOLOS

5 CONSTRUÇÃO DE UM ATENUADOR DE IMPACTO

5.1 O atenuador de impacto

Sendo o objeto em estudo, ao longo desta tese, um atenuador de impacto para um veículo da *Formula Student*, é importante ter em consideração que esta metodologia está presente em vários tipos de veículos. A referida metodologia consiste em absorver o impacto através de deformação de um componente de sacrifício.

Como se pode constatar na Figura 63 está representada uma longarina que, em caso de impacto, se deforma de forma controlada. Ao deformar-se absorve a energia que passaria para o resto da estrutura do veículo e para os seus ocupantes.



Figura 63 Longarina de Ford® Transit com geometria para absorção de energia de forma controlada.

Já na Figura 64 a) está representado um veículo ligeiro, o Lotus Evora, após ensaio de impacto. Na Figura 64 b) pode-se observar em pormenor a longarina deformada enquanto o resto da estrutura que se encontra imediatamente a seguir à mesma não sofreu qualquer dano.

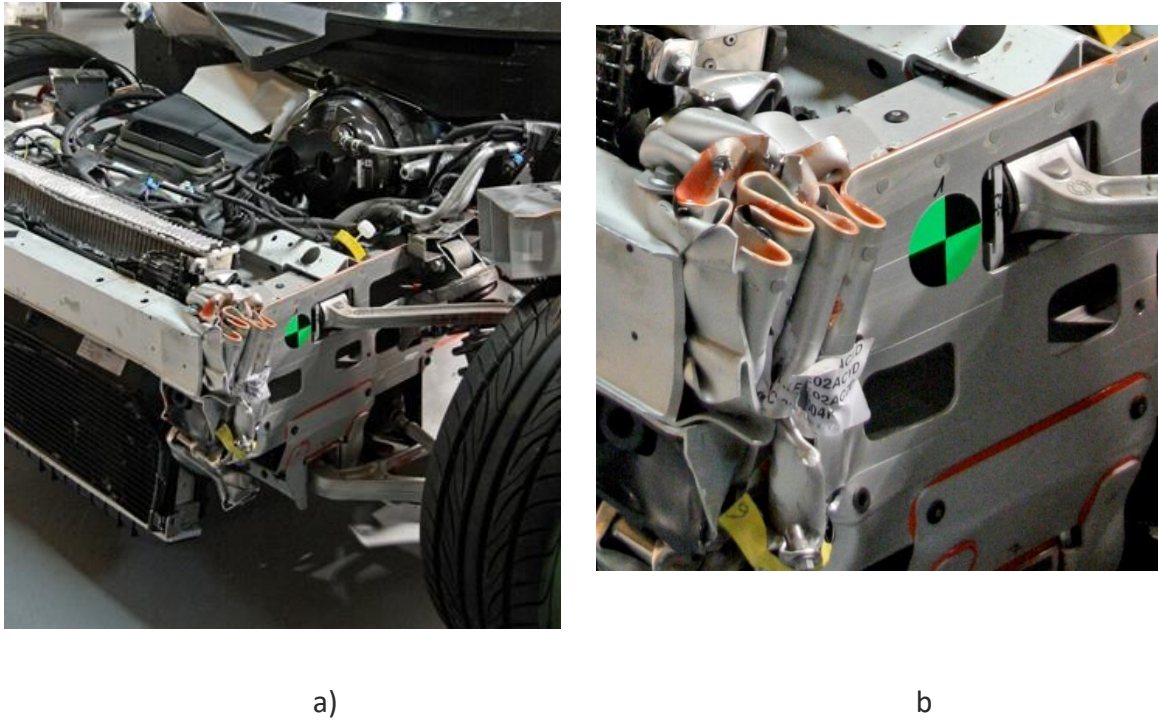


Figura 64 a) Lotus Evora após teste de impacto, b) Em pormenor a zona deformada [13]

É também utilizado em comboios, está representado na Figura 65 a) um desses modelos desenhado e na Figura 65 b) simulado computacionalmente utilizando o *software* Abaqus® e o modelo real durante ensaio de impacto na Figura 65 c).

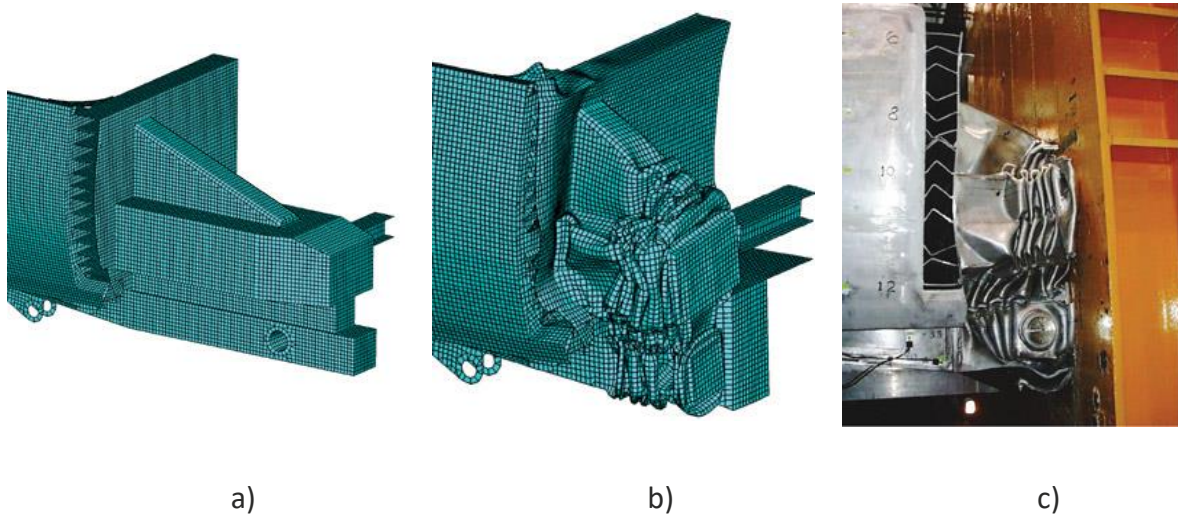


Figura 65 Modelo em Abaqus® a) antes da simulação, b) após simulação e c) modelo real após ensaio de impacto [14]

Pode ser um componente a complementar veículos de manutenção ou construção como se pode observar na Figura 66 em que o atenuador é colocado na retagarda do

veículo, com o intuito de proteger trabalhadores na via ou, por exemplo, condutor de um veículo que possa entrar em despiste.



Figura 66 Atenuador para veículos de construção/manutenção[15]

5.2 Tipos de atenuador de impacto na Formula SAE

Para construir o atenuador de impacto é dada a cada equipa a liberdade de desenhar e incluir os materiais que desejar desde que cumpra com os requisitos exigidos. Existe alguma variedade entre os atenuadores criados pelas equipas participantes relativamente ao material utilizado, geralmente são utilizados: fibra de carbono que é o caso do *Formula Student* do Instituto de Tecnologia da Noruega, Figura 67; favo de mel em alumínio como o da equipa da Universidade Tecnológica de Budapeste, Figura 73

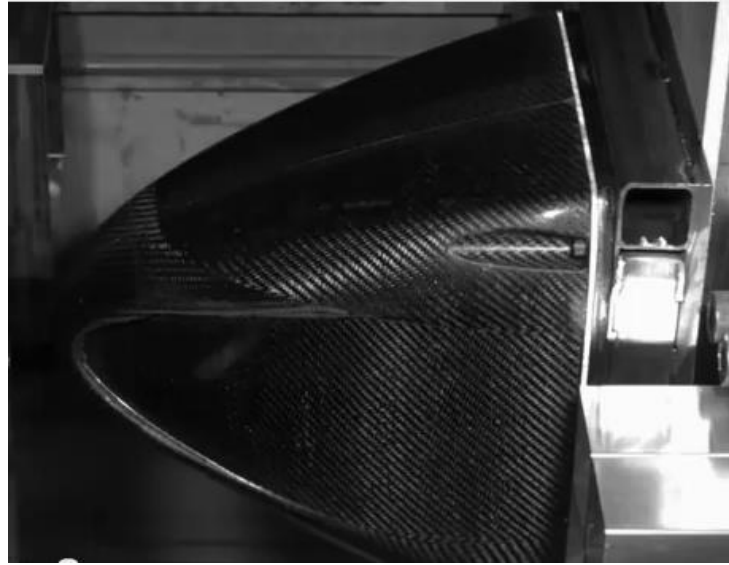


Figura 67 Atenuador da equipa do Instituto de Tecnologia da Noruega [16]

A fibra de carbono sendo um material frágil absorve energia devido às fraturas sucessivas da mesma. A Universidade Politécnica da Califórnia também usou um atenuador deste tipo, Figura 68. Pode-se ver na Figura 69 a curva no gráfico força-deslocamento que representa o resultado do ensaio e onde é perceptível a irregularidade da curva devido às fraturas sucessivas.



Figura 68 Atenuador de impacto em fibra de carbono a ser compactado[17]

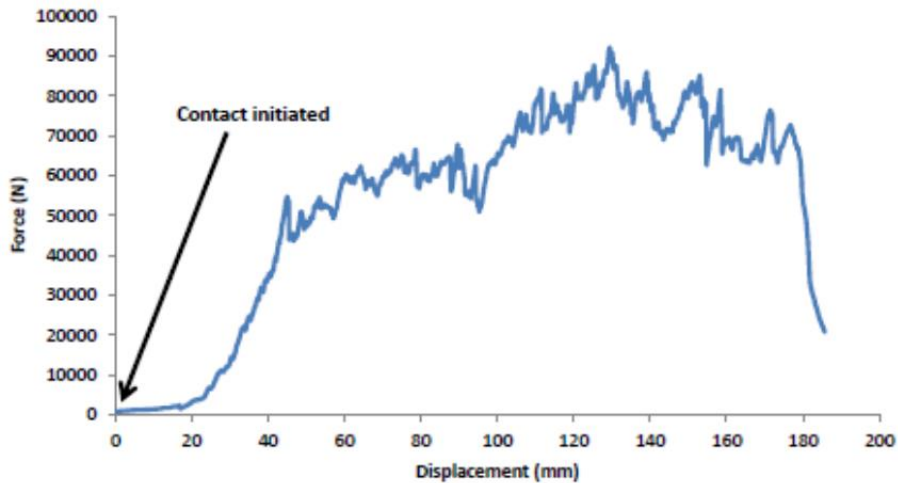


Figura 69 Resultado do ensaio do atenuador da Universidade Politécnica da Califórnia[17]

Relativamente aos atenuadores contruídos a partir de espumas temos na Figura 70, como exemplo, o atenuador construído pela Universidade de Tecnológica de Eindhoven.



Figura 70 Atenuador da Universidade Tecnológica de Eindhoven [18]

Na Figura 71 está o atenuador da Academia de Engenharia de Sinhgad durante o ensaio. Como se pode observar neste caso a espuma absorve energia por deformação plástica e quando já está totalmente compactada começa a aumentar a resistência ao deslocamento, como se pode observar na Figura 72 em que está apresentado o resultado desse mesmo ensaio.



Figura 71 Atenuador em espuma durante o ensaio [19]

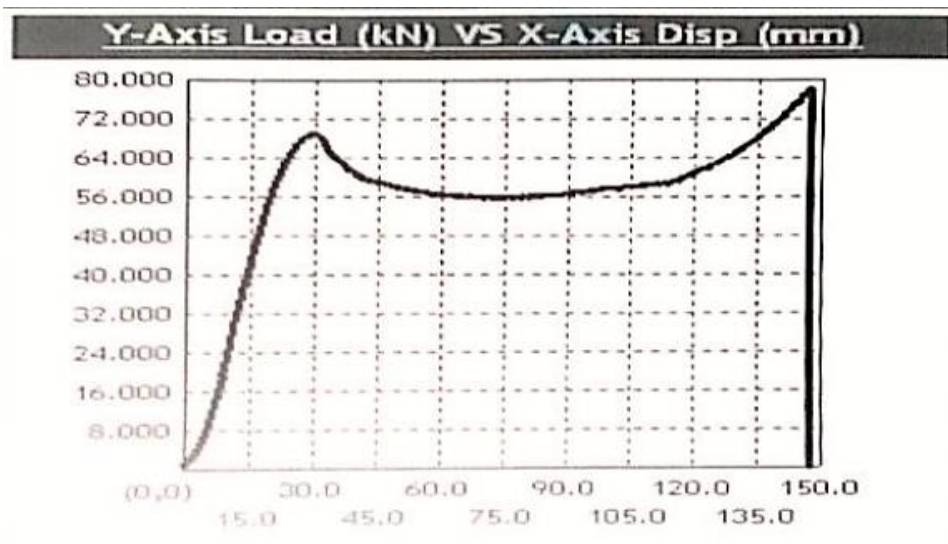


Figura 72 Resultado do ensaio do atenuador da Academia de Engenharia de Sinhgad [19]

É usual encontrar-se nesta prova atenuadores de impacto fabricados a partir de blocos de favo de mel em alumínio, tal como o da Universidade Tecnológica de Budapeste, Figura 73.

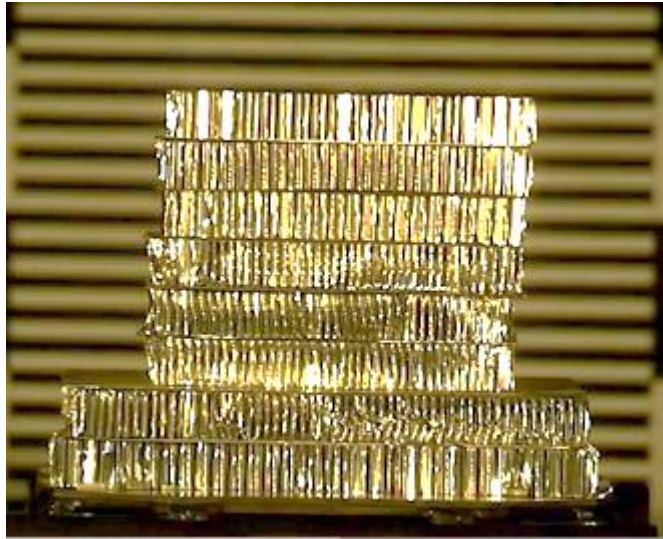


Figura 73 Atenuador da Universidade Tecnológica de Budapeste[20]

A estrutura favo de mel em alumínio tem a particularidade de ter um comportamento constante durante a deformação. Isso pode ser verificado através da Figura 74 onde se observa o gráfico de força em função do deslocamento com que a Universidade de Dalhousie submeteu a sua candidatura à *Formula Student*.

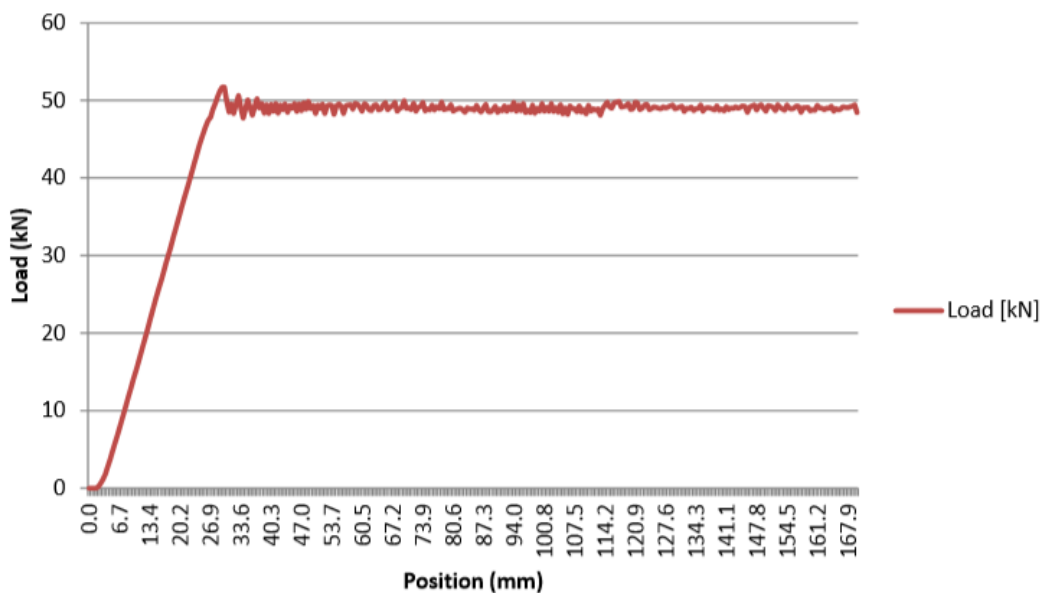


Figura 74 Gráfico de força (*Load*) em função do deslocamento (*Position*) do atenuador da Universidade de Dalhousie[21]

O comité responsável pela legislação da *Formula Student* testou um espécimen do atenuador de impacto de nome *Type 11*, Figura 75. Este atenuador é construído com a espuma para absorção de energia Dow Impaxx® 700. Os resultados dos testes indicaram

que o espécimen satisfazia os requisitos B3.21.1 do regulamento e como tal estão isentos de ensaios.

As equipas que construírem um atenuador *Type 11* devem provar a utilização de Dow Impaxx® 700 levando a prova de compra do material para a inspeção técnica.

Não há um fornecedor específico de Dow Impaxx® 700. Contudo, o modelo previamente cortado com as dimensões de forma a ser considerado um modelo *Type 11* está disponível por US\$150 a unidade e ainda acrescentam os portes desde Carolina do Norte, EUA onde são as instalações de *BSCI Energy Impact Systems*. [22]

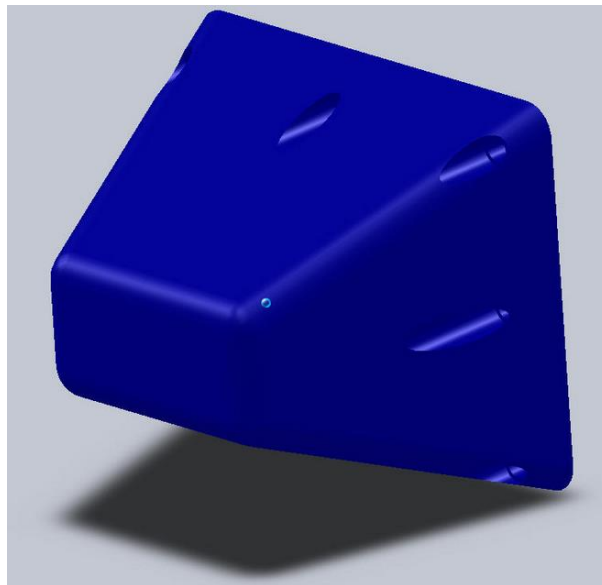


Figura 75 Atenuador *Type 11* [22]

5.3 Regulamento

O atenuador de impacto é um componente deformável que é instalado na zona frontal da estrutura do veículo. [1] O atenuador é necessário para proteger a estrutura do veículo assim como prevenir o condutor de sofrer lesões ou até morte. Para cumprir adequadamente a sua função o AI é projetado para absorver a energia de impacto de forma controlada. [23]

Em 2006 foi incorporado no regulamento da fórmula SAE requisitos que permitissem classificar um atenuador como apto para a competição. Esta medida surgiu por duas principais razões: o regulamento anterior não era suficientemente específico e assim não havia como verificar a eficiência do atenuador e também, devido à imprecisão do regulamento, algumas equipas levaram com pouco respeito a regra que impunha a utilização do atenuador, Figura 76.



Figura 76 Exemplo de atenuador [24]

Segundo o regulamento em vigor para 2015 o atenuador devia cumprir as seguintes especificações:

- Ser montado à frente da estrutura;
- Ter pelo menos 200 mm de comprimento segundo o eixo longitudinal do veículo;
- Ter pelo menos 100 mm de altura e 200 mm de largura a uma distância mínima de 200 mm da chapa frontal;
- Não pode penetrar a placa anti-intrusão em caso de impacto;
- Montado diretamente na placa anti-intrusão e não fazer parte da carroceria;
- O AI deve estar montado de forma a não se soltar em caso de impacto desviado do seu eixo;
- Deve ser feito um teste para provar que a placa anti-intrusão não flete mais que 25,4mm;
- Quando montado num veículo com 300 kg de massa e sofre impacto contra uma barreira não deformável a 7m/s, a desaceleração média do veículo não deve ultrapassar os 20 g's com um pico máximo de 40 g's;
- A energia absorvida pelo AI deve ser igual ou superior a 7350 J.

5.4 Considerações para projeto do atenuador

Para desenhar o novo atenuador tiveram-se em conta os resultados dos ensaios dos atenuadores já construídos. É possível nos gráficos dos resultados das simulações identificar três zonas distintas durante a deformação do atenuador: uma em que apenas

é deformada a caixa exterior do atenuador, Figura 77 (1), uma segunda zona em que são atingidos os reforços, há um aumento significativo da força, é atingido o pico máximo e decréscimo da força porque se inicia a deformação destes, Figura 77 (2), e a terceira zona em que todos os elementos do atenuador estão a ser deformados Figura 77 (3).

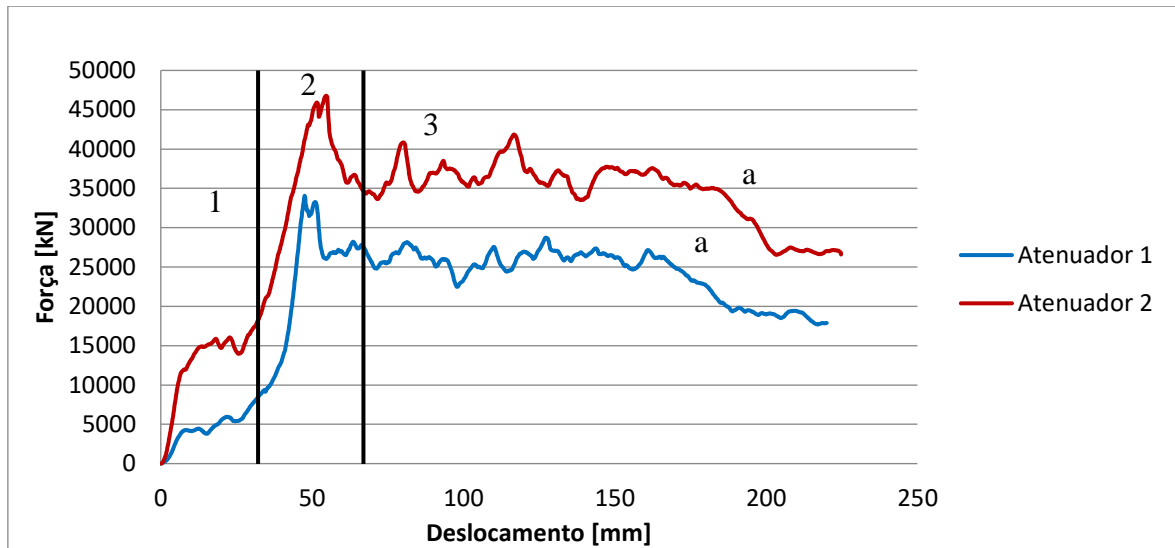


Figura 77 Resultado dos ensaios dos atenuadores 1 e 2

Os aspetos a melhorar que se tornaram mais evidentes foram:

- O contacto com os reforços deve acontecer o mais cedo possível uma vez que a energia absorvida pela caixa exterior é muito reduzida quando comparada com a energia absorvida pelos reforços, mesmo aumentando a espessura da chapa como aconteceu do atenuador 1 para o atenuador 2;
- É necessário que quando os reforços estiverem a ser deformados se encontrem perfeitamente na vertical por forma a maximizar a resistência à deformação oferecida por estes;
- É necessário haver mais suporte dos reforços para que a instabilidade global do conjunto não seja tão evidente comparativamente à instabilidade local e os reforços não dobrem ao meio deixando assim de fazer o efeito que se pretende, Figura 77 (a);
- Os reforços representarão uma estrutura alveolar em que cada alvéolo representa um hexágono;
- O material vai ser o mesmo uma vez que já é conhecido o seu comportamento assim como as suas propriedades mecânicas;

- O estudo do atenuador vai ser feito por etapas para entender o comportamento da estrutura desenvolvida e ser possível atingir os valores necessários no primeiro desenho do atenuador.

5.5 Estrutura de dois alvéolos

A primeira estrutura a ser construída foi uma estrutura constituída apenas por dois alvéolos. Com esta estrutura foram feitos vários cálculos para se escolher os parâmetros a utilizar nas simulações por forma a aproximar os resultados ao ensaio experimental. Na escolha do tamanho de elemento de malha fizeram-se várias análises de instabilidade cada uma com um determinado tamanho de elemento. Na escolha da quantidade de modos de instabilidade a inserir na estrutura para introduzir imperfeições, foram feitas simulações de compactação com diferentes números de modos de instabilidade.

Após o cálculo numérico fez-se o ensaio experimental para conhecer o comportamento real da estrutura e confirmar se as aproximações feitas na fase de cálculo seriam legítimas. Concluído o ensaio conheceríamos a energia específica e assim poderíamos validar, ou não, a configuração escolhida para desenvolver o novo atenuador.

5.5.1 Desenho da estrutura de dois alvéolos

A estrutura era constituída por duas partes, cada uma com perfil igual ao desenho da Figura 78, que juntas formariam um perfil com dois hexágonos com 15 mm de aresta, tendo-se atenção à espessura da chapa de alumínio que se viria a utilizar, 0.4 mm.

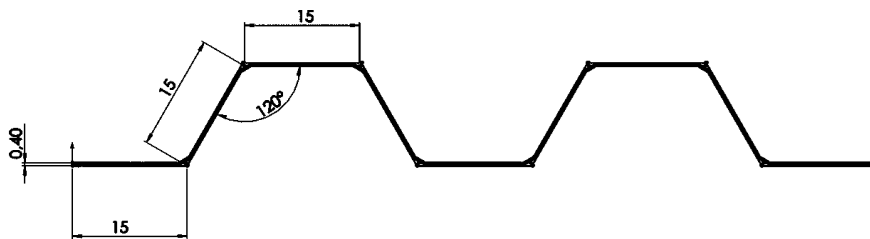


Figura 78 Desenho do perfil de cada parte da estrutura de dois alvéolos

O sólido foi desenhado com 80 mm de altura e as arestas chanfradas para aproximar à forma que apresentaria uma chapa quinada, Figura 79.

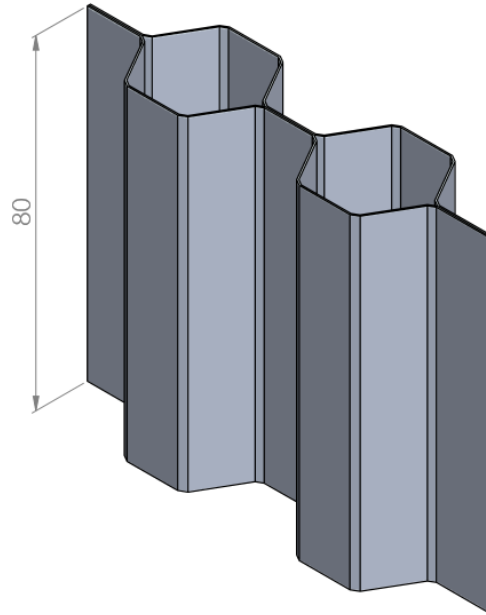


Figura 79 Desenho do sólido igual à estrutura de dois alvéolos

5.5.2 Simulação da estrutura de dois alvéolos

Para escolher o tamanho de elemento a utilizar fizeram-se análises de instabilidade da estrutura. Interessava perceber para que valor tendia o valor próprio e escolher o tamanho do elemento em que este valor se aproximasse da tendência mas que menos encarecesse a simulação a nível de tempo. Tendo em conta que a espessura do elemento não seria variável uma vez que a espessura da chapa era 0,4 mm e só seria utilizado um elemento ao longo da espessura, foram feitas simulações com elementos em que os lados apresentassem o quádruplo da espessura (2 mm) Figura 82 a), dobro da espessura (0,8 mm) Figura 82 b), iguais à espessura (0,4 mm) Figura 82 c) e metade da espessura (0,2 mm) de lado Figura 82 d).

Configurou-se a simulação com uma força de 1N nos locais indicados pelas setas cor de laranja na Figura 80. Esta configuração foi a mesma para todas as simulações em que se analisou a instabilidade. A condição de fronteira definida para esta simulação foi o encastramento da base da estrutura alveolar.

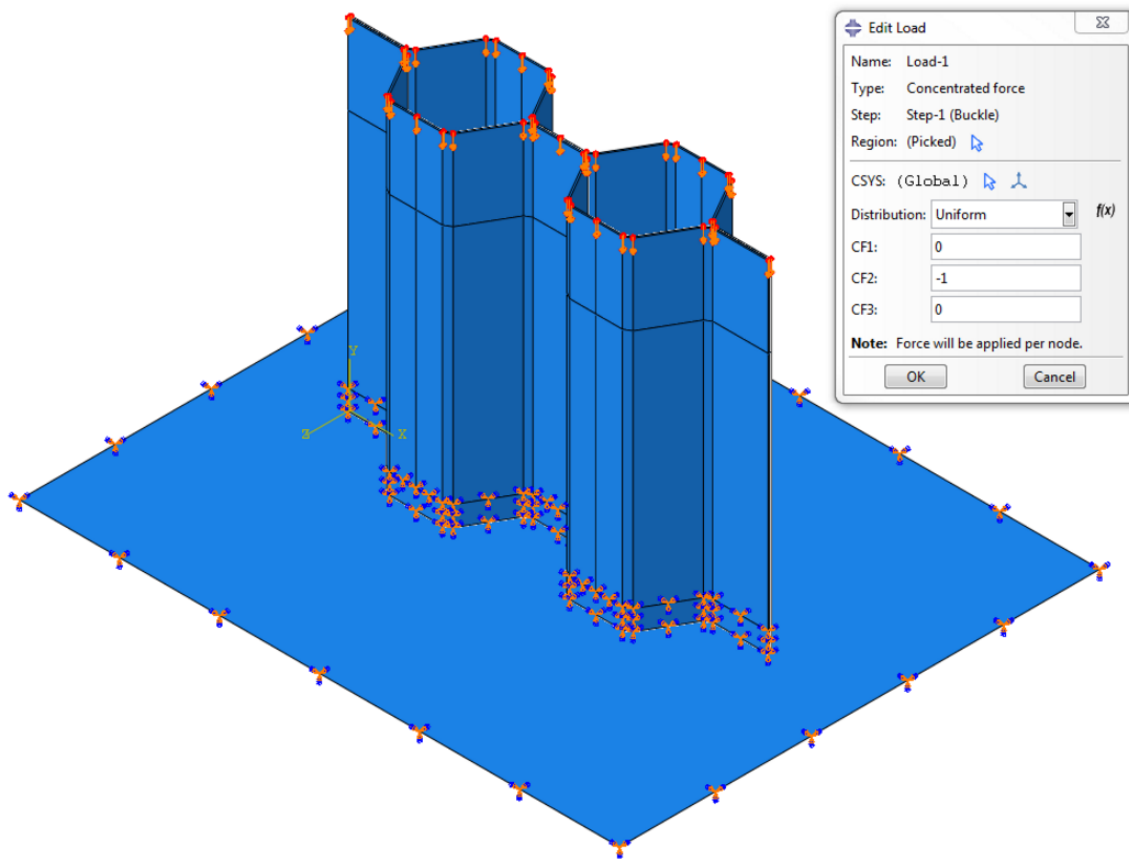


Figura 80 Preparação da simulação de instabilidade

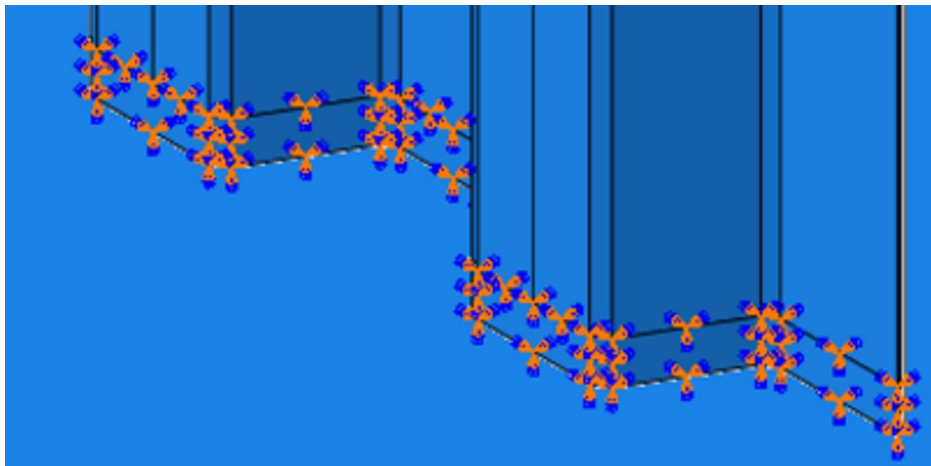


Figura 81 Base dos alvéolos tendo como condição de fronteira o encastramento.

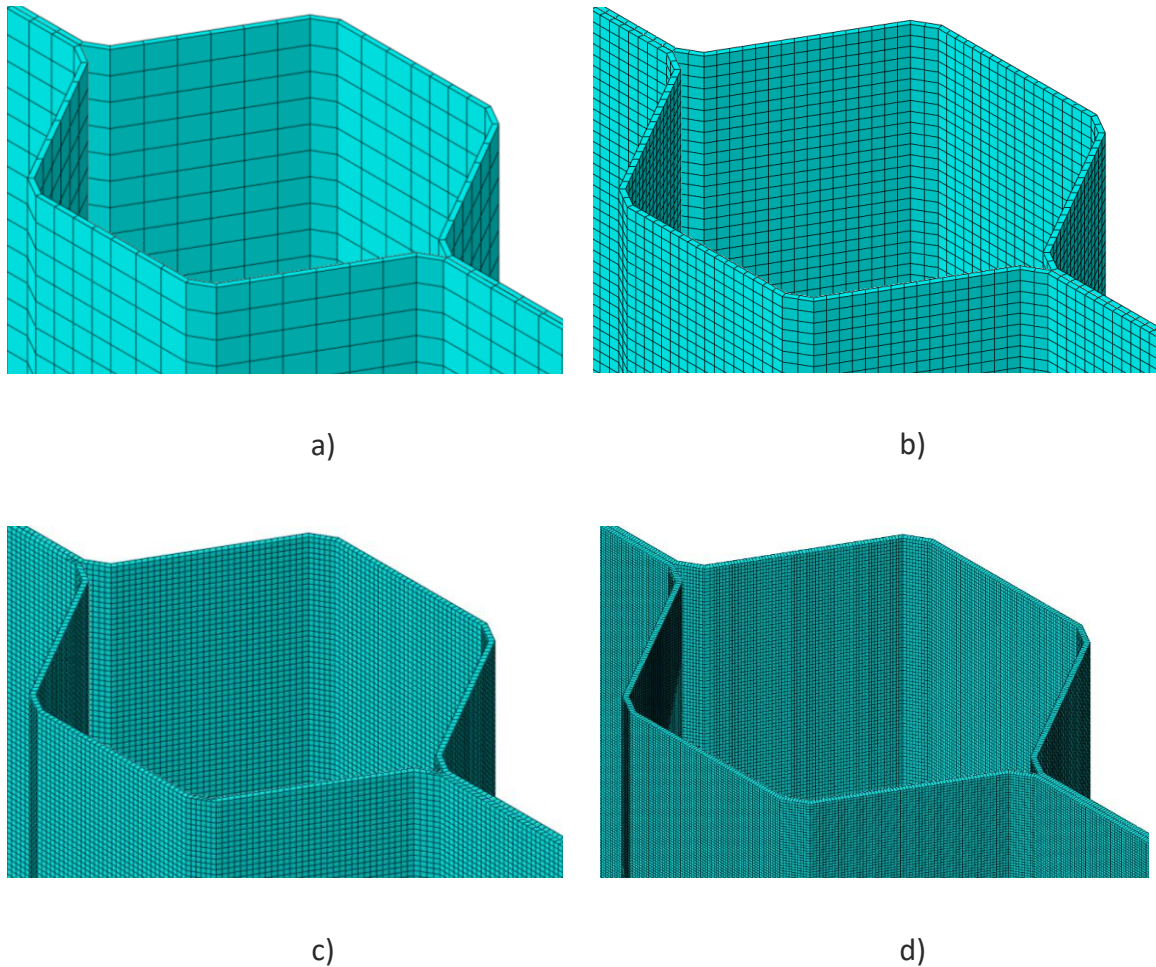


Figura 82 Alvéolo com malha de a) 2 mm, b) 0,8 mm, c) 0,4 mm e d) 0,2 mm

Foi notável a variação do valor próprio à medida que se diminuía o tamanho dos elementos. No Figura 83 está identificado o valor próprio para o respetivo modo dos vários tamanhos de elemento analisados. O valor próprio é um fator de escala que quando aplicado ao valor da carga usada determinará o valor da carga crítica aplicada à estrutura de modo a criar instabilidade. Nota-se que à medida que é diminuído o tamanho do elemento os valores próprios vão tendendo para o mesmo valor. Observa-se que os pontos para 0,4 mm e 0,2 mm estão praticamente sobrepostos, então, o tamanho de elemento escolhido foi de 0,4 mm já que o de 0,2 mm quadruplicaria o número de elementos da estrutura sem haver benefício a nível de resultados.

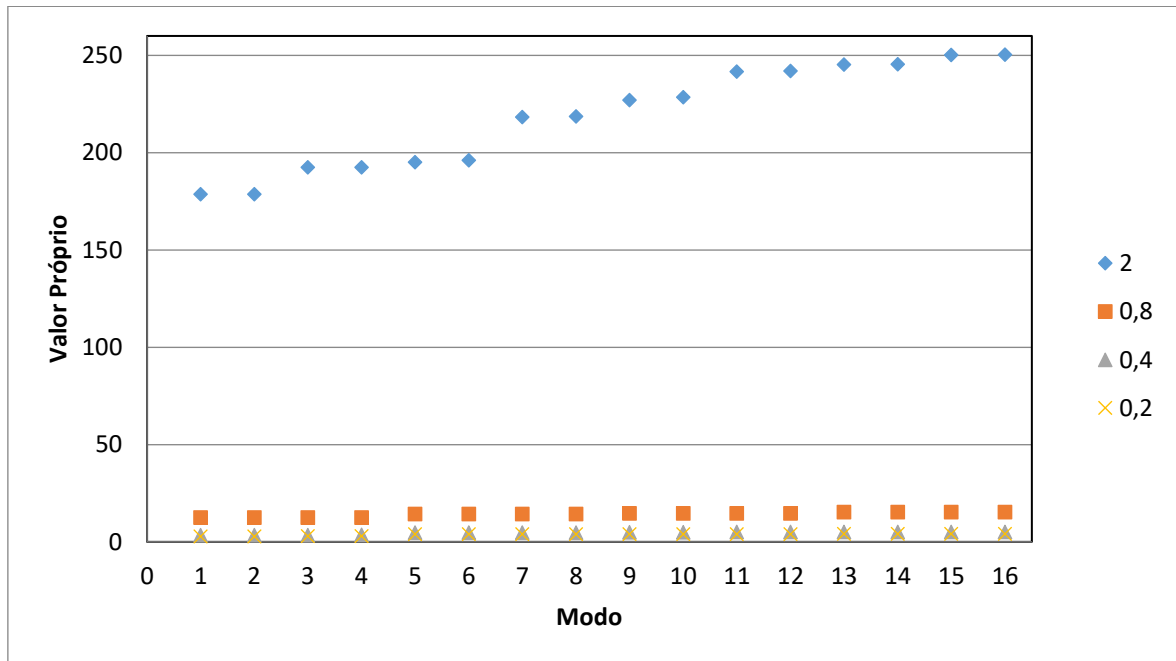


Figura 83 Comparação entre os valores próprios para cada tamanho de elemento

Outro factor que se teve em conta foi o numero de modos de instabilidade a utilizar na simulação. O critério que se utilizou teve em conta a diferença proporcional da força critica entre os modos e utilizaria-se o agrupamento de modos que destacasse dos outros.

A diferença foi calculada da seguinte forma:

$$\text{Diferença} = \frac{Vpr_{i+1} - Vpr_i}{Vpr_i} \times 100$$

em que:

Vpr_i é o valor próprio para um modo i

Assim fez-se a comparação entre estes e destacaram-se os primeiros quatro modos de instabilidade, já que do quarto para o quinto modo a diferença é muito superior às anteriores, 32,6%, tal como se pode verificar na Tabela 4.

Tabela 4 Modos de instabilidade da estrutura de dois alvéolos, valor próprio e sua diferença

Modo i	Valor próprio, V_{pr_i}	Diferença [%]
1	3,4033	
2	3,4034	0,0029
3	3,4438	1,1870
4	3,4779	0,9902
5	4,6118	32,603
6	4,6139	0,0455
7	4,6921	1,6949
8	4,6947	0,0554
9	4,7758	1,7275
10	4,8549	1,6563
11	4,9386	1,7240
12	5,0196	1,6401
13	5,0209	0,0259
14	5,0254	0,0896
15	5,0297	0,0856
16	5,0743	0,8867

Na Figura 84 estão expostos os cinco primeiros modos de instabilidade. Pode-se constatar que os quatro primeiros modos de instabilidade são mais localizados, nomeadamente na parte superior da estrutura, enquanto que o quinto apresenta instabilidade global.

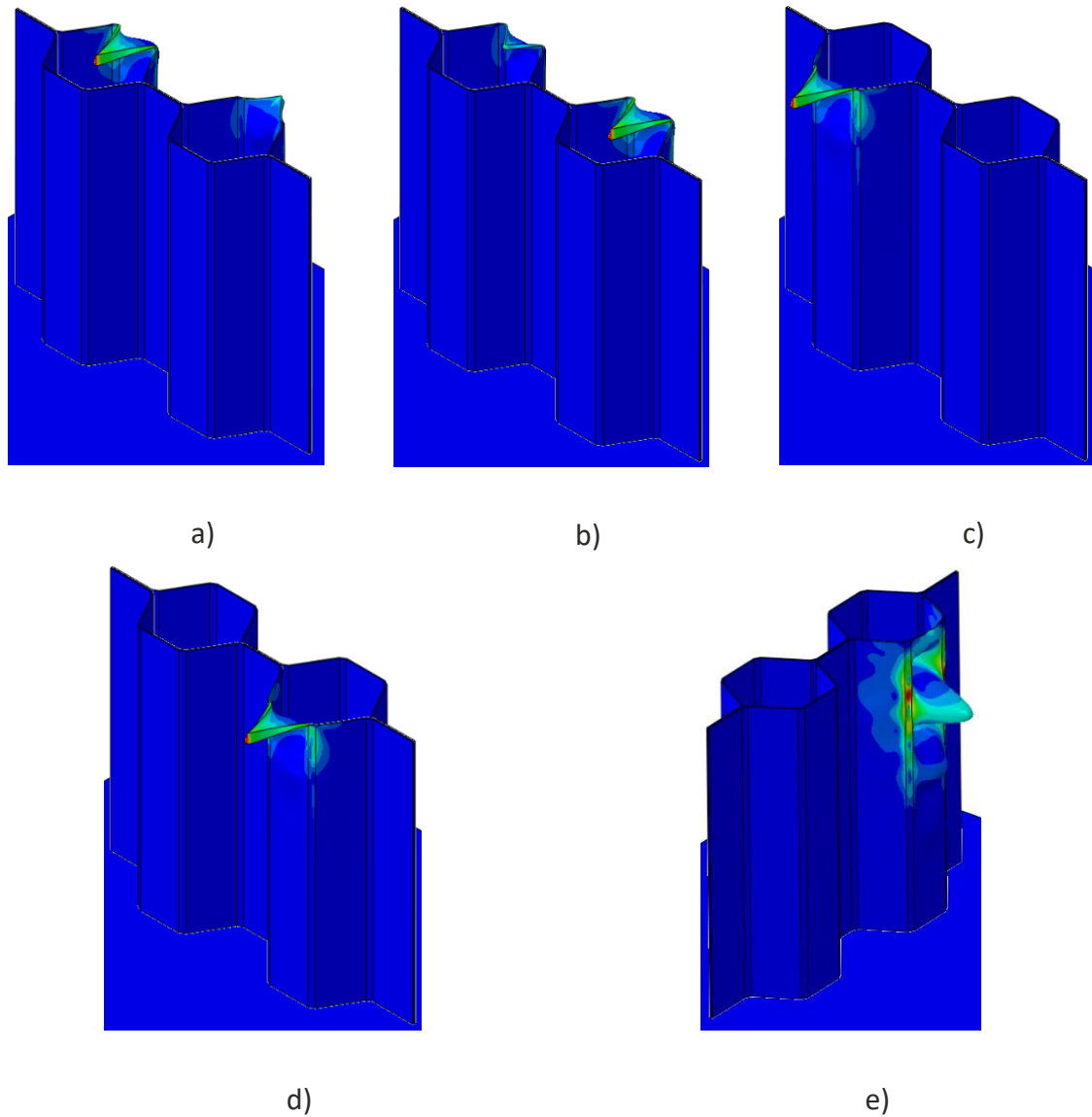


Figura 84 Modos de instabilidade da estrutura, a) primeiro, b) segundo, c) terceiro, d) quarto e e) quinto

Para validar o critério, que levou à escolha dos quatro primeiros modos de instabilidade, fizeram-se simulações de compactação da estrutura de dois alvéolos com a introdução de dois modos, quatro modos e dez modos. Os resultados estão apresentados na Figura 85.

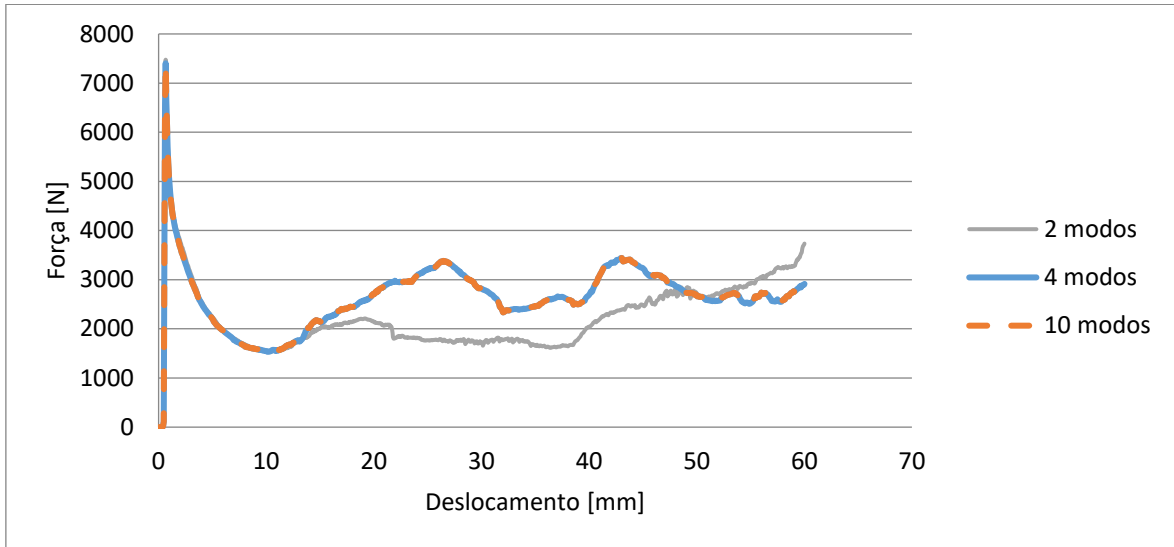


Figura 85 Resultado das simulações com a introdução de 2, 4 e 10 modos

A curva correspondente à simulação com a introdução de dois modos de instabilidade coincide com as restantes até aos 10 mm de deslocamento. As curvas do gráfico correspondentes a quatro e a dez modos de instabilidade estão sobrepostas, o que significa que a introdução de mais de quatro modos de instabilidade não altera o resultado.

Na Figura 86 são apresentadas várias etapas da simulação da estrutura de dois alvéolos.

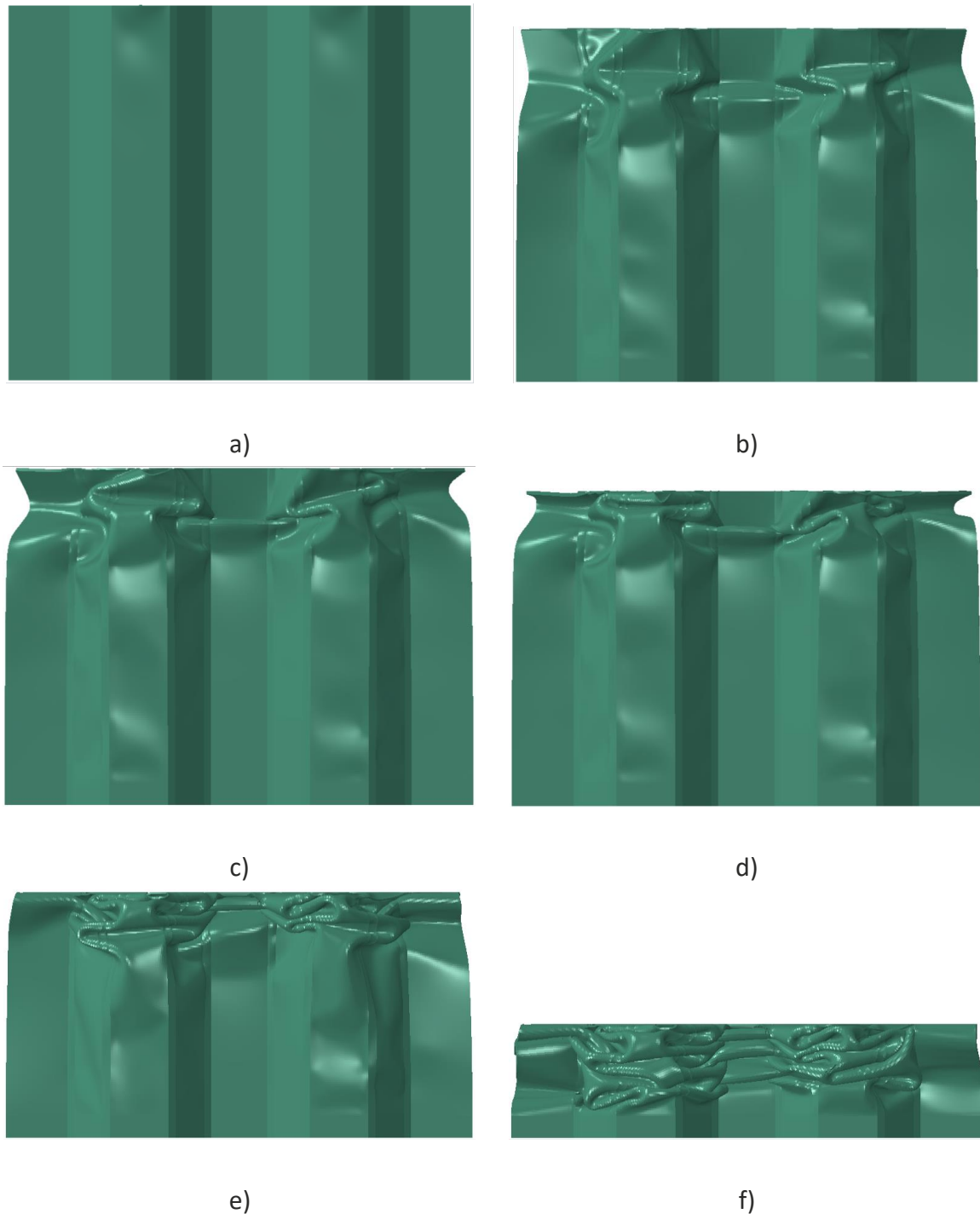


Figura 86 Várias etapas da simulação da estrutura de dois alvéolos com deslocamento do travessão de: a) 0 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, d) 15 mm, e) 30 mm e f) 60 mm.

5.5.3 Ensaio da estrutura de dois alvéolos

Foi construída uma estrutura alveolar idêntica à que foi simulada anteriormente, constituída por dois alvéolos de perfil hexagonal com 15 mm de aresta, a partir de duas chapas previamente quinadas que posteriormente foram coladas com um adesivo

epóxico. Para se fixar à máquina de ensaios a estrutura foi colada a uma base em aço ao carbono, Figura 87, que funcionou também como encastramento, tal como na simulação.

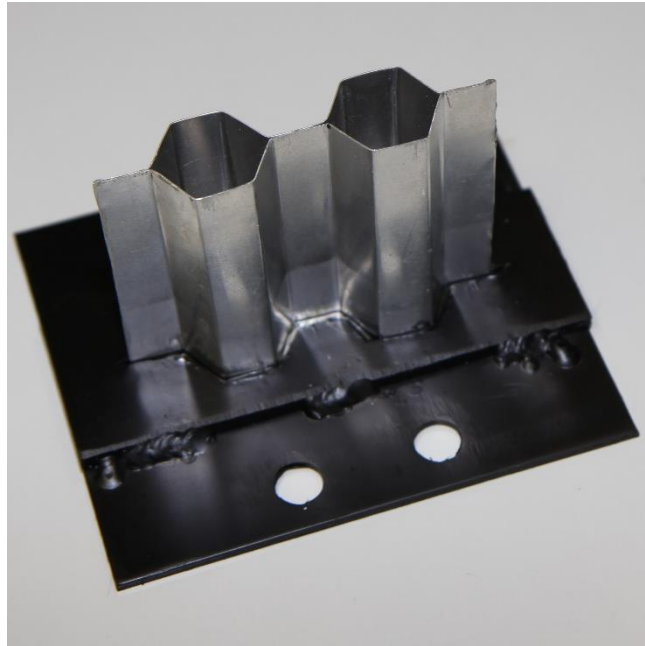


Figura 87 Estrutura de dois alvéolos e base de fixação

Fixou-se o conjunto na máquina de ensaios por intermédio de parafusos tal como se pode verificar na Figura 88.

O ensaio correu dentro da normalidade a uma velocidade de 10 mm/min até que a estrutura ficasse toda compactada. A estrutura alveolar atingiu a compactação ao fim de 60 mm de deslocamento do travessão.

Na Figura 88 são apresentadas várias etapas do ensaio da estrutura de dois alvéolos.

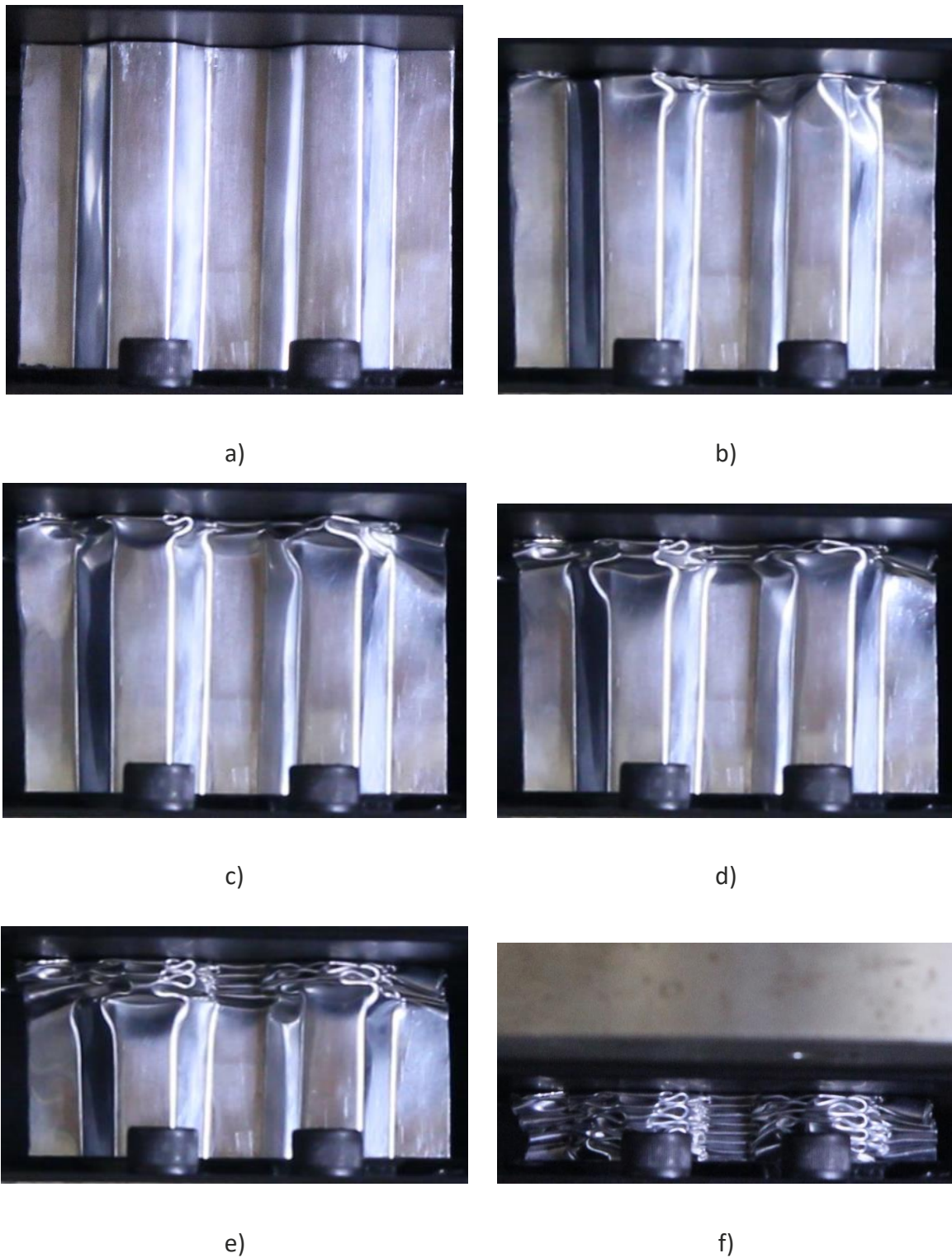


Figura 88 Várias etapas do ensaio da estrutura de dois alvéolos com deslocamento do travessão de: a) 0 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, d) 15 mm, e) 30 mm e f) 60 mm

Na Figura 89 está representado o resultado do ensaio de compressão da estrutura de dois alvéolos.

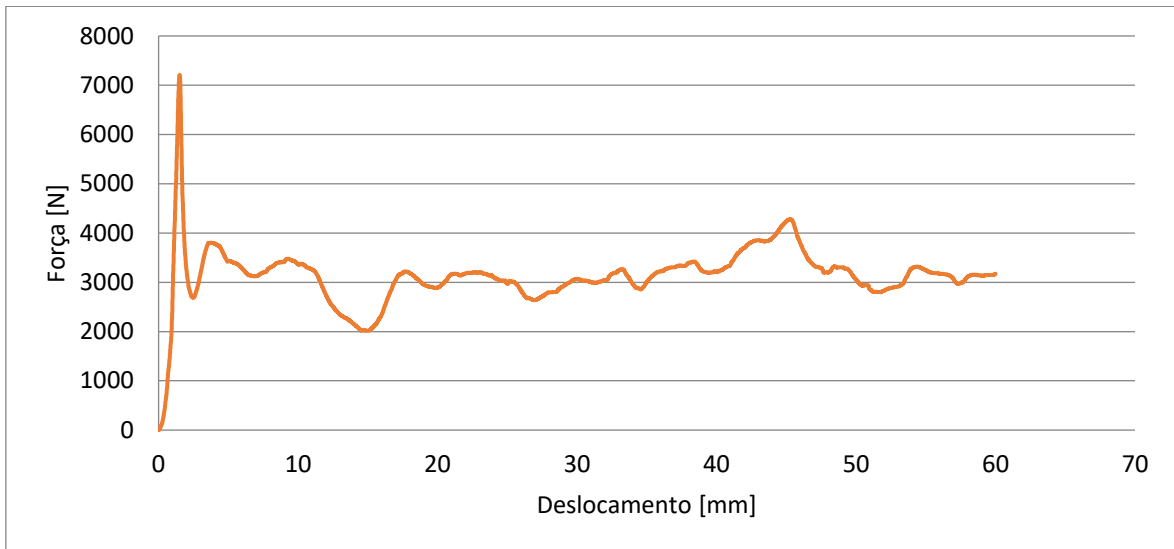


Figura 89 Resultado do ensaio de compressão da estrutura de dois alvéolos

5.5.4 Discussão

Feito o estudo de sensibilidade ao tamanho de malha conclui-se que o tamanho de elemento a escolher para o estudo deste tipo de estrutura. A melhor aproximação entre modelo numérico e a estrutura ensaiada é obtida utilizando elementos iguais à espessura da chapa utilizada, 0,4 mm, Figura 90.

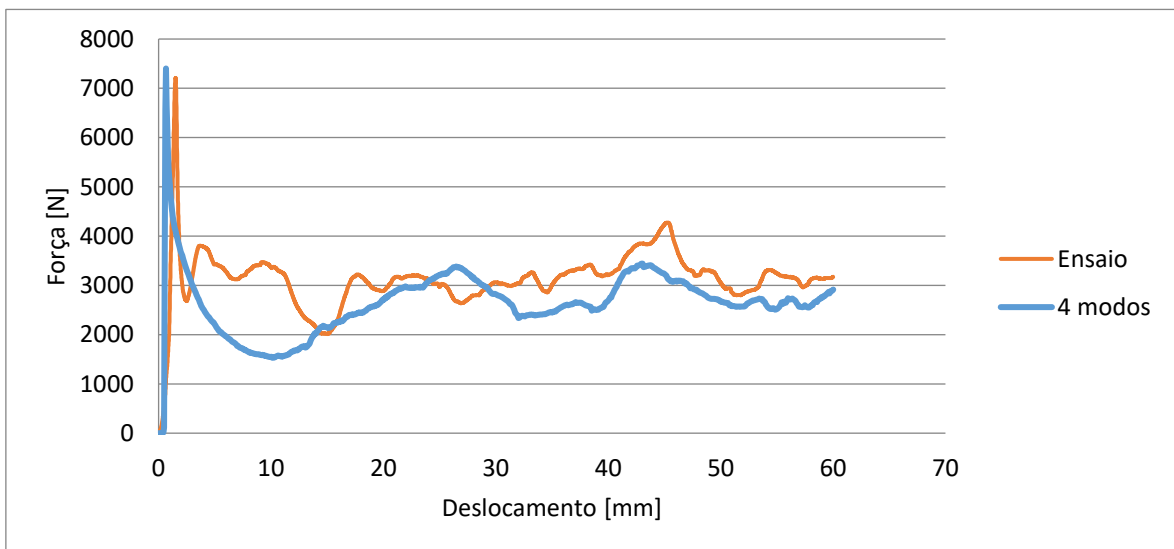


Figura 90 Gráfico comparativo entre o resultado da simulação da estrutura de dois alvéolos e o ensaio.

O critério que conduziu à escolha de quatro modos de instabilidade foi validado. Na Tabela 5 estão apresentados os valores de energia, força máxima e força média das

simulações e do ensaio experimental, assim como o erro entre a simulação com quatro modos de instabilidade e o ensaio.

Tabela 5 Comparação entre os valores de energia, força máxima e força média do ensaio e da simulação com a introdução de 2, 4 e 10 modos de instabilidade

	Energia absorvida [J]	Força máxima [N]	Força média [N]
2 modos	133	7476	2236
4 modos	159	7402	2622
10 modos	159	7402	2622
Ensaio	188	7210	3128
Erro	15%	3%	16%

Obtendo no ensaio experimental um deslocamento do travessão de 60 mm calculou-se a percentagem de compactação dos alvéolos:

$$\frac{\Delta l}{l_0} \times 100 = \frac{60}{80} \times 100 = 75\%$$

A força máxima atingiu 7210 J o que significa que a força máxima por alvéolo foi:

$$\frac{F_{max}}{n^{\circ} alv} = \frac{F_{max}}{2} = \frac{7210}{2} = 3605 J$$

E a força média foi 3428 J, portanto, por alvéolo foi:

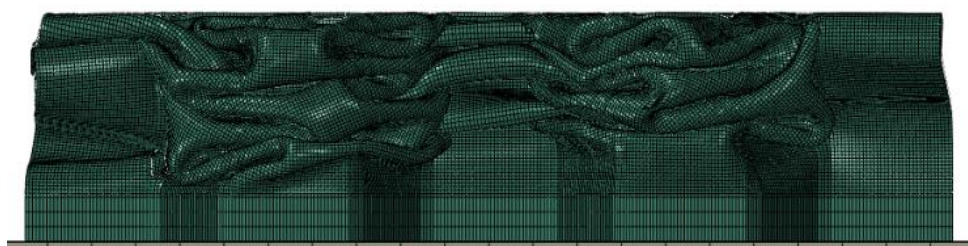
$$\frac{F_{med}}{n^{\circ} alv} = \frac{F_{med}}{2} = \frac{3428}{2} = 1564 J$$

A estrutura teve uma deformação muito controlada não sendo evidentes instabilidades globais. Observou-se que durante a deformação existiu inicialmente um pico de força e a partir daí, formou-se um patamar causado pelas sucessivas cedências do material, dando origem aos foles.

Comparando a forma deformada da estrutura, Figura 91 a), com a forma deformada obtida por simulação, Figura 91 b), conclui-se que estas apresentam muitas semelhanças. No entanto os foles no modelo real aparecem com mais frequência.



a)



b)

Figura 91 Pormenor dos foles a) ensaio experimental, b) simulação em Abaqus®.

Para validar o tipo de construção foi necessário comparar com os atenuadores já existentes e verificar se seria vantajoso construir um utilizando este tipo de configuração. Para isso comparou-se a energia, força máxima e força média específicas dos atenuadores já estudados com a da estrutura alveolar, Tabela 6.

Tabela 6 Comparação entre os resultados dos ensaios do Atenuador 1, Atenuador 2 e estrutura de dois alvéolos

	Energia	Peso	Energia absorvida específica
	[J]	[kg]	[J/kg]
Atenuador 1	4643	0,971	4 781,67
Atenuador 2	7093	1,447	4 901,87
Estrutura de dois alvéolos	188	0,021	8 952,38

Observando a Tabela 6 concluiu-se que a estrutura de dois alvéolos atinge um maior valor de energia absorvida específica quando comparada com qualquer um dos atenuadores. Por esta razão e também pelo facto de se obter uma deformação controlada, decidiu-se avançar com o estudo deste tipo de estrutura para construir um atenuador de impacto válido.

5.6 Estrutura de nove alvéolos

Para ser considerado um alvéolo unitário, este não podia partilhar chapa com outro alvéolo, se assim fosse era considerado apenas espaço intersticial, Figura 92.

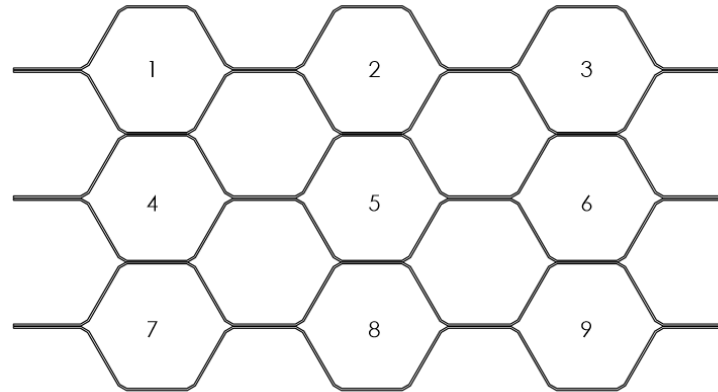


Figura 92 Metodologia da contagem de alvéolos

Outra característica presente nesta estrutura foi a altura uma vez que aqui foi utilizada a mesma altura do Atenuador 2 já estudado, 280 mm. Já conhecendo a força máxima e média por alvéolo e a compactação verificou-se se os valores são diretamente proporcionais ao aumento do número de alvéolos e se a percentagem de compactação da estrutura se mantém.

5.6.1 Desenho da estrutura de nove alvéolos

Tal como na estrutura anterior esta foi criada utilizando várias partes que em conjunto formaram a estrutura propriamente dita. Para criar uma estrutura de nove alvéolos foi necessário desenhar seis peças em que cada duas formaria uma estrutura de três alvéolos. Cada peça tinha o perfil do desenho da Figura 93.

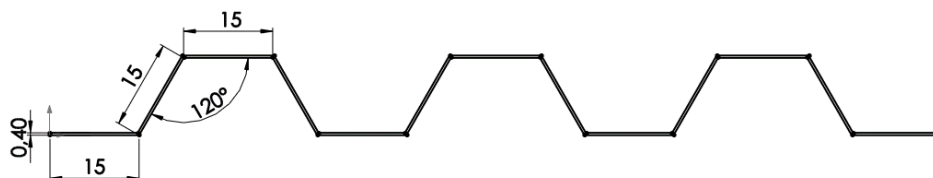


Figura 93 Desenho do perfil de cada parte da estrutura de nove alvéolos

Tal como na estrutura anterior as arestas foram chanfradas para aproximar à forma que apresentaria uma chapa quinada e desta vez o sólido foi desenhado com 280 mm de altura, Figura 94.

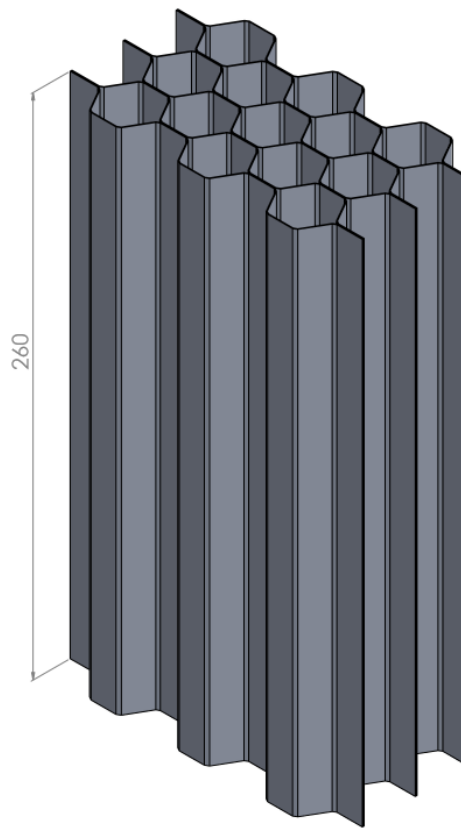


Figura 94 Desenho do sólido igual à estrutura de nove alvéolos

5.6.2 Simulação da estrutura de nove alvéolos

Com o conhecimento adquirido, no estudo da estrutura de dois alvéolos, partiu-se para a análise de instabilidade com elementos de 0,4 mm.

Foi utilizado o mesmo critério de seleção dos modos a utilizar na simulação. Fez-se a comparação entre os vários modos de instabilidade pra verificar quais se destacariam. Como se pode observar na Tabela 7 os primeiros seis modos de instabilidade destacam-se, sendo a diferença do sexto modo para o sétimo é consideravelmente maior que entre os anteriores.

Tabela 7 Modos de instabilidade da estrutura de nove alvéolos, factor multiplicativo de força e sua diferença

Modo	Valor próprio	Diferença
1	0,2408	
2	0,2412	0,166113
3	0,24123	0,012438
4	0,24153	0,124363
5	0,24457	1,258643
6	0,24484	0,110398
7	0,25863	5,63225
8	0,25986	0,475583
9	0,26034	0,184715
10	0,26172	0,530076
11	0,26524	1,344949
12	0,26704	0,678631
13	0,27198	1,84991
14	0,27228	0,110302
15	0,27233	0,018363
16	0,27257	0,088128

Uma vez que a simulação estava a consumir bastante tempo optou-se por deixar compactar apenas 50 mm da estrutura e a partir dos resultados fazer uma estimativa.

A curva apresentada no Figura 95 é o resultado da simulação para compactação de 50 mm da estrutura de nove alvéolos.

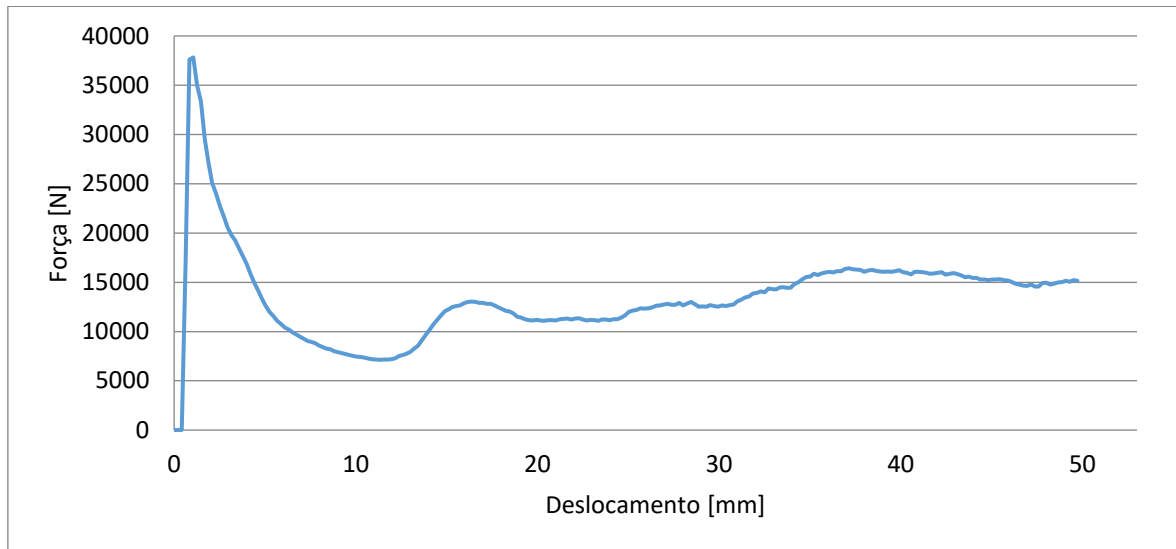


Figura 95 Resultado da simulação para a compactação de 50 mm da estrutura de nove alvéolos.

Na Figura 96 estão apresentadas várias etapas da simulação da estrutura de nove alvéolos, com vários valores de deslocamento do travessão.

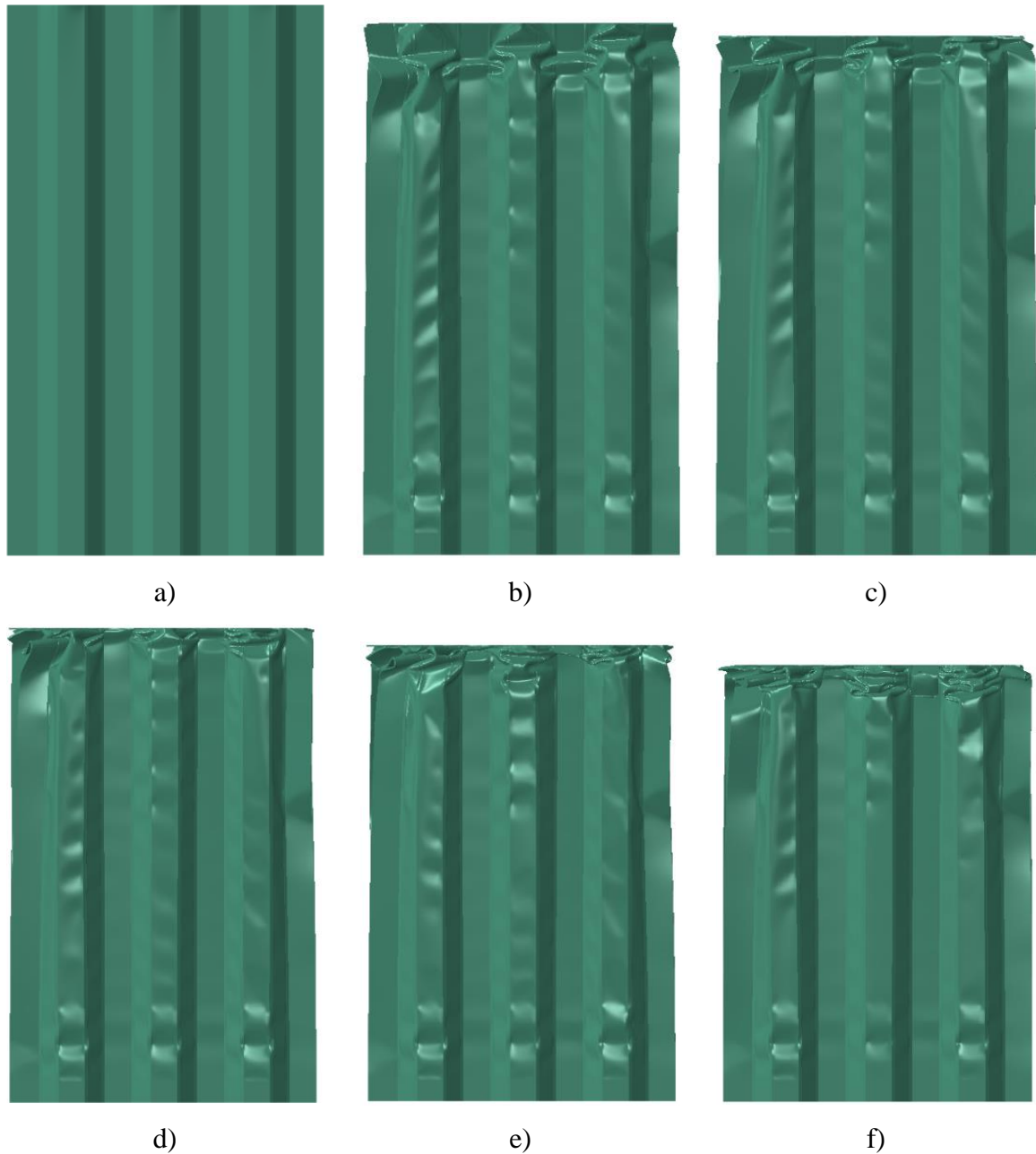


Figura 96 Várias etapas da simulação da estrutura de nove alvéolos com deslocamento do travessão de: a) 0 mm, b) 10 mm, c) 20 mm, d) 30 mm, e) 40 mm e f) 50 mm.

5.6.3 Ensaio da estrutura de nove alvéolos

Para construir a estrutura de nove alvéolos foi necessário quinar seis chapas de alumínio e posteriormente cola-las para formarem a estrutura. Desta vez não foi utilizado um adesivo bi-componente epóxi como na estrutura de dois alvéolos mas um adesivo à base de poliuretano. Esta alteração teve em vista não só facilitar o manuseamento do adesivo mas também preencher irregularidades que surgissem ao longo das peças. Para

auxiliar à construção foram utilizados rebites para manter as peças no devido lugar durante o processo de cura do adesivo. Para fixar a estrutura à máquina de ensaios esta foi colada a uma base de aço ao carbono como se pode verificar na Figura 97

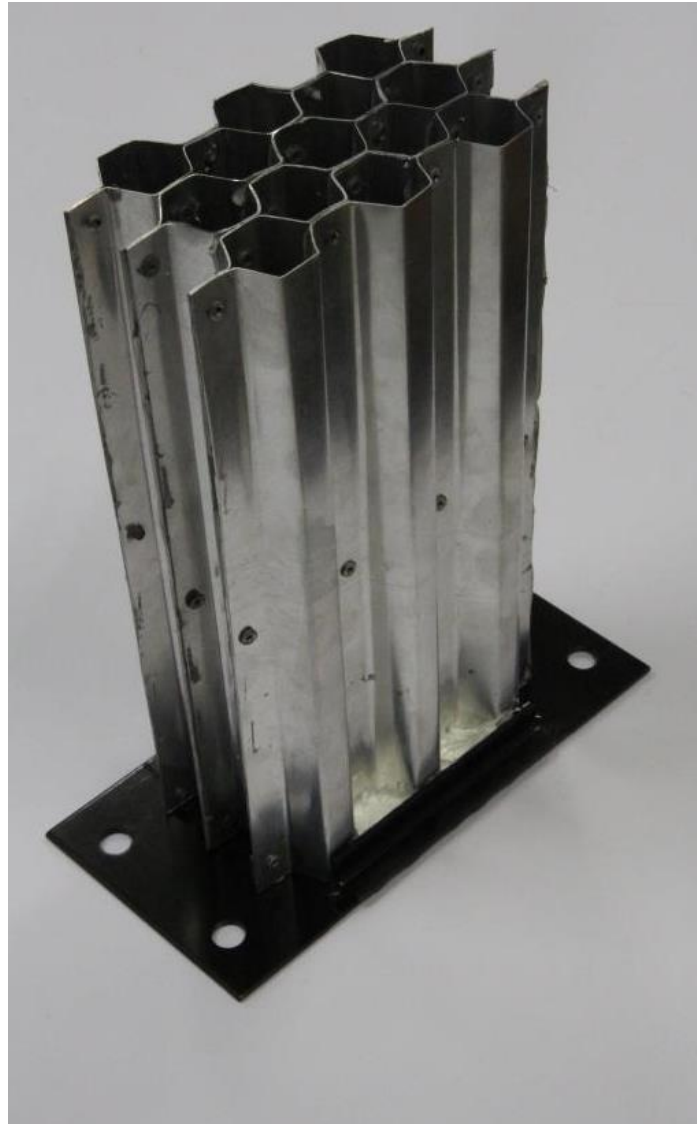


Figura 97 Estrutura de nove alvéolos e base de fixação

Tal como se pode observar na Figura 98 nesta estrutura, devido às dimensões, estão mais evidentes as imperfeições geométricas que surgiram durante o processo de quinagem ou durante a colagem.

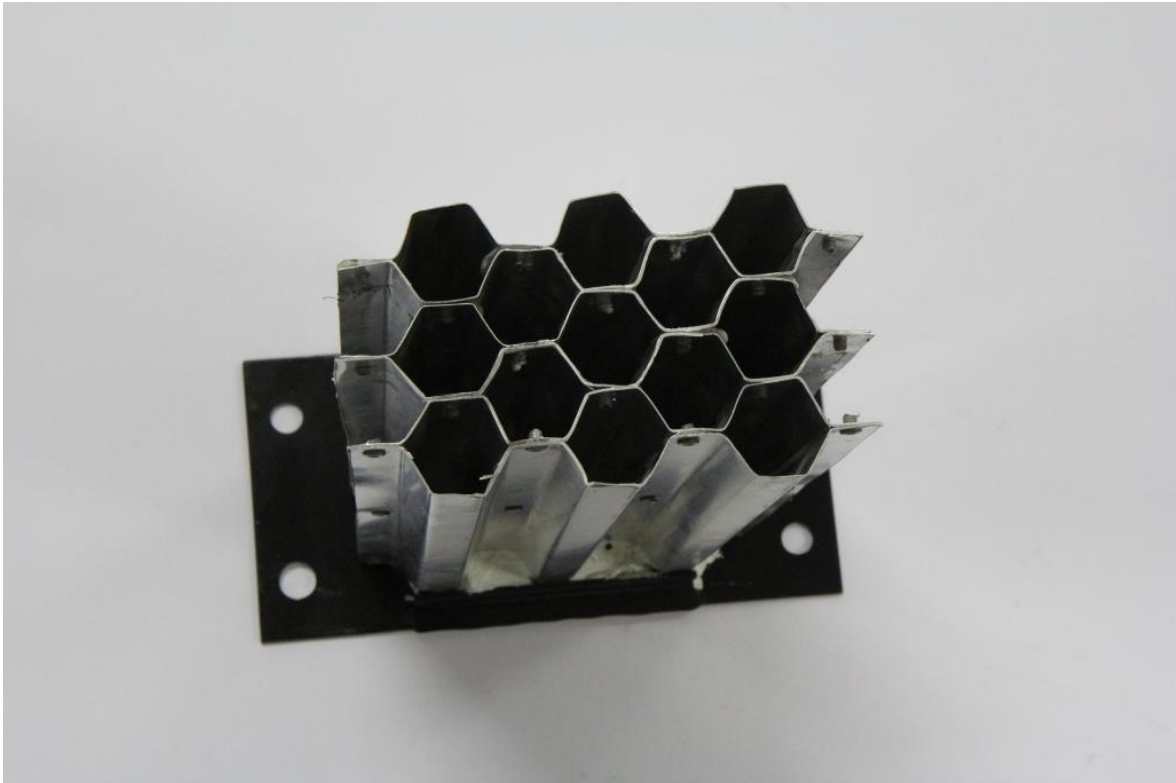


Figura 98 Estrutura de nove alvéolos onde estão evidentes as imperfeições

Na Figura 99 são apresentadas várias etapas do ensaio da estrutura de nove alvéolos. Nesta pode-se observar que ao longo do ensaio a formação dos foles bem evidentes no alvéolo central porém nos alvéolos das extremidades a deformação já não foi tão regular.

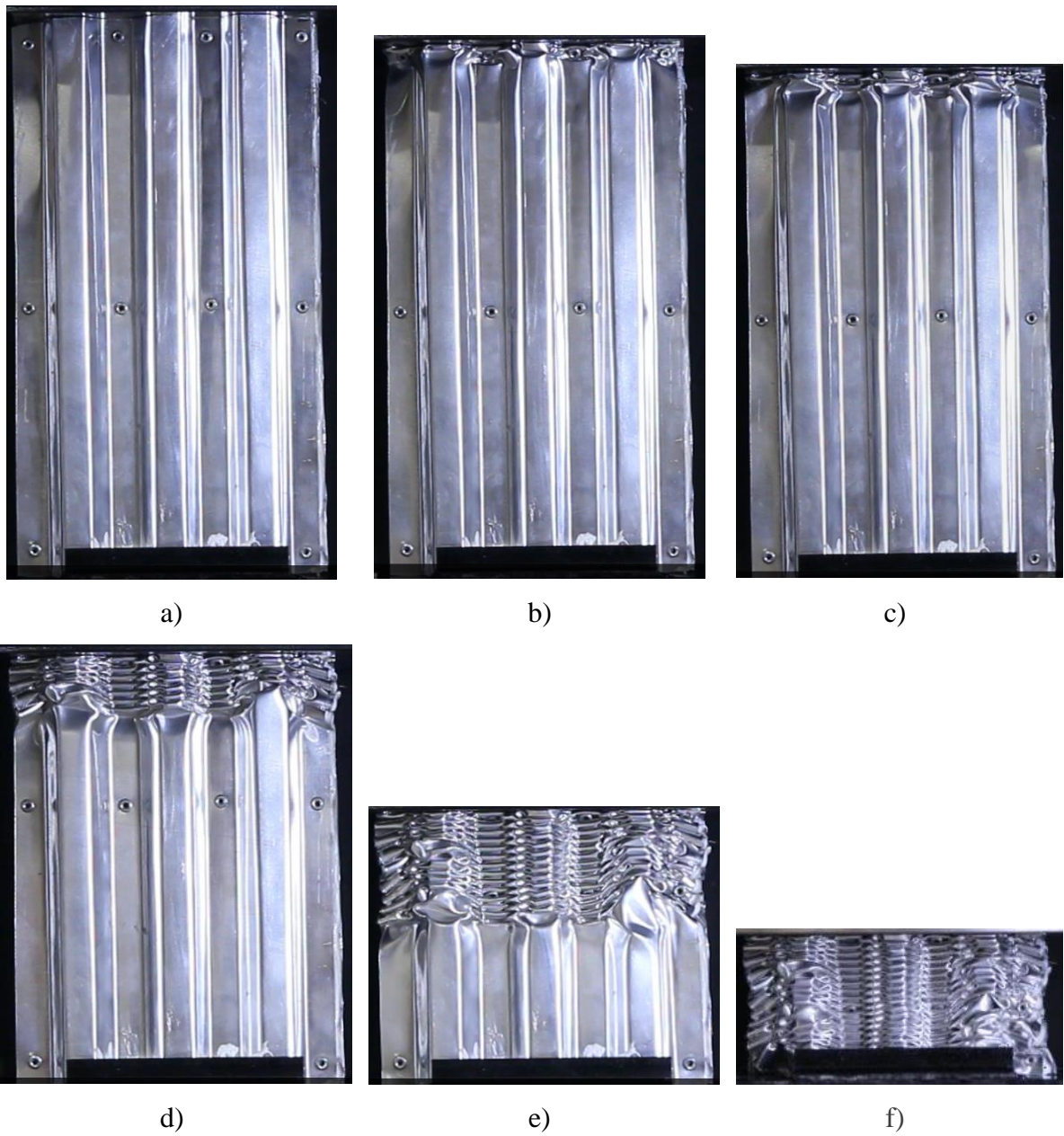


Figura 99 Várias etapas da simulação da estrutura de nove alvéolos com deslocamento do travessão de: a) 0 mm, b) 10 mm, c) 20 mm, d) 30 mm, e) 40 mm e f) 50 mm.

Na Figura 100 pode-se ver a estrutura após compactação, são evidentes os limites dos alvéolos e os foles característicos deste tipo de deformação.



Figura 100 Estrutura de nove alvéolos deformada

A curva na Figura 101 reflete o resultado da simulação expresso em força exercida pela estrutura ao longo do deslocamento do travessão.

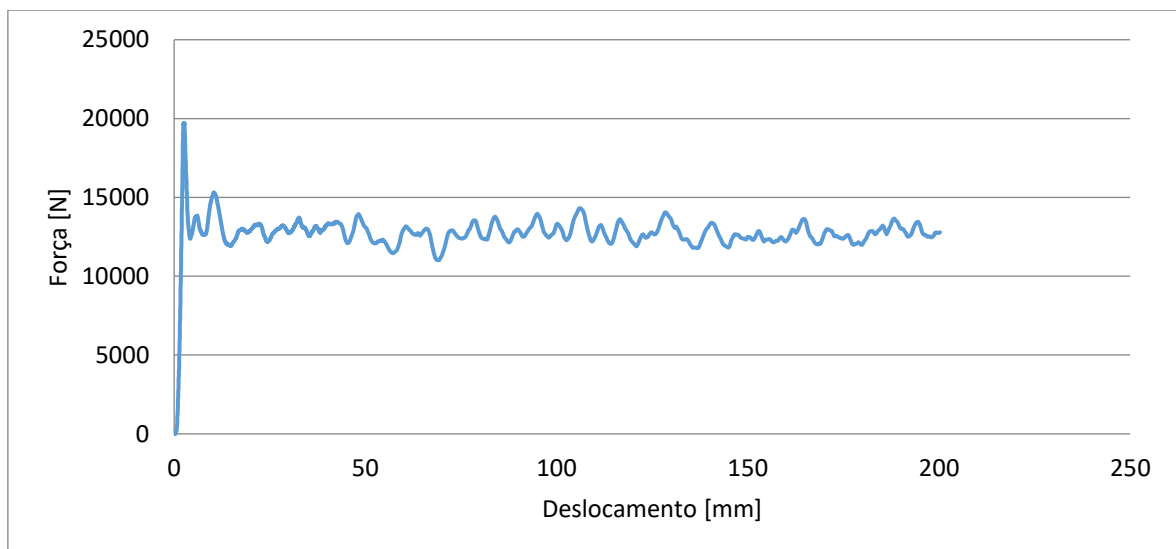


Figura 101 Resultado do ensaio da estrutura de nove alvéolos

5.6.4 Discussão

Se taxa de compactação se mantivesse inalterável, 75%, visto que a altura total da estrutura é 280 mm, então:

$$\text{compactação} = 280 \times 75\% = 210 \text{ mm}$$

Partindo da análise da simulação, Tabela 8, fez-se uma estimativa do resultado do ensaio.

A energia, E , estimada que a estrutura viria a absorver, seria:

Tabela 8 Valores de força máxima e força média registados no ensaio

	Força máxima [N]	Força média [N]
Simulação	37816	13573

$$E = 13573 \times 210 \times 10^{-3} = 2850.33 \text{ J}$$

Na Tabela 9 estão apresentados os valores da energia e de compactação obtidos por estimativa com base nos resultados verificados na simulação e os resultados obtidos no ensaio experimental.

Tabela 9 Comparação entre valores estimados e valores obtidos no ensaio da estrutura de nove alvéolos

	Energia [J]	Força máxima [N]	Força média [N]	Compactação [mm]
Estimativa	2850	37816	13573	210
Ensaio	2546	19725	12756	208
Erro	12%	92%	6%	1%

No gráfico estão presentes os resultados da simulação e do ensaio para 50 mm de compactação, uma vez que a simulação não avançou mais, podendo-se concluir que o comportamento das estruturas é próximo no entanto o pico de força, tal como se verificou na Tabela 9, é aproximadamente o dobro.

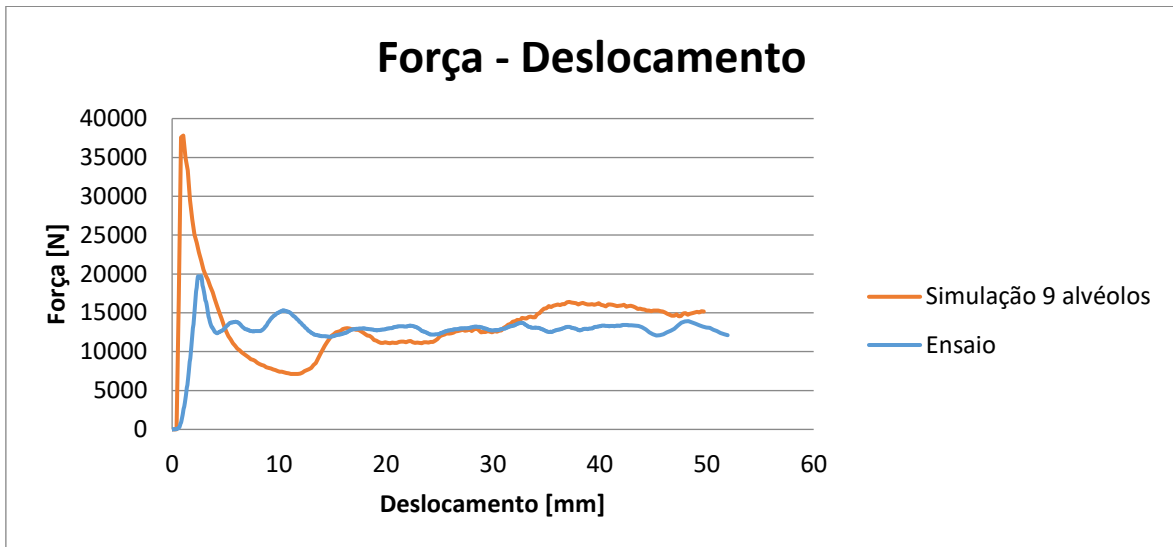


Figura 102 Gráfico comparativo entre os resultados do ensaio e da simulação

Devido às dimensões desta estrutura foi adotada uma estratégia de construção diferente da anterior passando a utilizar-se rebites para fixar as chapas durante o processo de cura do adesivo. Com isto foram introduzidas imperfeições geométricas para além das já introduzidas durante o processo de quinagem, o que retira resistência à estrutura e é possível que isto seja a razão pela qual os valores verificados durante o ensaio não sejam mais próximos dos que foram estimados.

Utilizando os resultados do ensaio experimental desta estrutura calculou-se a força e energia por alvéolo, Tabela 10 e com esses dados fez-se um cálculo aproximado para se saber quantos alvéolos seriam necessários para que uma estrutura fosse válida de acordo com o regulamento da *Formula Student*.

Tabela 10 Valores de força e energia obtidos no ensaio por alvéolo

	Força máxima por alvéolo [N]	Força média por alvéolo [N]	Energia absorvida por alvéolo [J]
9 Alvéolos	2192	1417	283

Sabendo que o atenuador tem que absorver 7350 J de energia e tendo em conta que cada alvéolo absorve 283 J então o número mínimo de alvéolos a utilizar para que absorva a energia necessária era:

$$n^{\circ} \text{ de alvéolos} > \frac{7350}{283} \approx 26$$

Para manter o atenuador com medidas de lado o mais próximas possível a estrutura tinha de ter 30 alvéolos, assim ter-se-ia de agrupar seis conjuntos de cinco alvéolos.

Verificou-se se o atenuador é válido relativamente aos outros parâmetros além da energia nomeadamente força máxima e força média. Para isso multiplicou-se por 30 o resultado, por alvéolo, do ensaio. Os resultados são apresentados na Tabela 11

Tabela 11 Valores de força e energia estimados para uma estrutura de trinta alvéolos

	Força máxima [N]	Força média [N]	Energia [J]
Estimativa 30 Alvéolos	65747	42520	8490

Segundo as normas da Formula Student o atenuador não pode atingir um pico superior a 117000 N, o nosso valor máximo esperado era 65747 N. A força média não pode ultrapassar 58000 N enquanto o nosso valor de força média esperado era 42520 N. Quanto à energia mínima a ser absorvida esperava-se 8490 J sendo o mínimo exigido 7350 J.

Relativamente às dimensões mínimas exigidas o atenuador teria de ter no mínimo 100 mm de altura e 200 mm de largura para um comprimento mínimo de 200 mm. As dimensões estimadas para uma estrutura de trinta alvéolos eram 160 mm de altura e 240 mm de largura para 280 mm de comprimento.

Visto isto passámos à construção de uma estrutura constituída por trinta alvéolos esperando que os resultados do ensaio cumprissem os requisitos da *Formula Student*.

5.7 Estrutura de trinta alvéolos

Esta estrutura foi projetada com base nos resultados do ensaio da estrutura de nove alvéolos, como foi falado anteriormente. Com esta estrutura pretendeu-se atingir os valores necessários para a aprovação como atenuador de impacto para um veículo da *Formula Student*.

5.7.1 Desenho da estrutura de trinta alvéolos

Seguindo o mesmo método de construção utilizado nas outras estruturas, foi necessário utilizar doze peças em que cada duas formariam um conjunto de cinco alvéolos.

O perfil de cada peça seria igual ao da Figura 103.

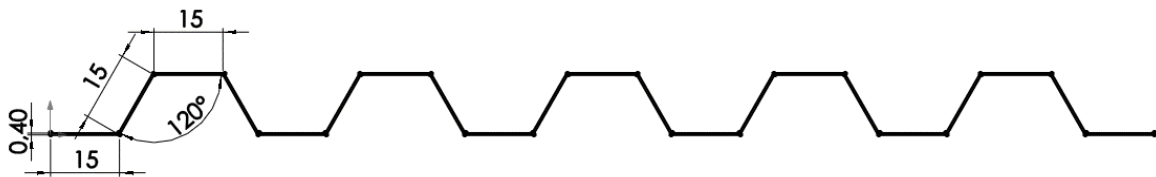


Figura 103 Desenho do perfil de cada parte da estrutura de trinta alvéolos

Na Figura 104 está representada a estrutura de trinta alvéolos com indicação das medidas que cumprem com o que é exigido pelo regulamento da Formula Student, ou seja, onde são exigidos 100 mm a estrutura tem 160 mm, onde são exigidos 200 mm de largura tem 240 mm e onde são exigidos 200 mm ao comprimento tem 280 mm

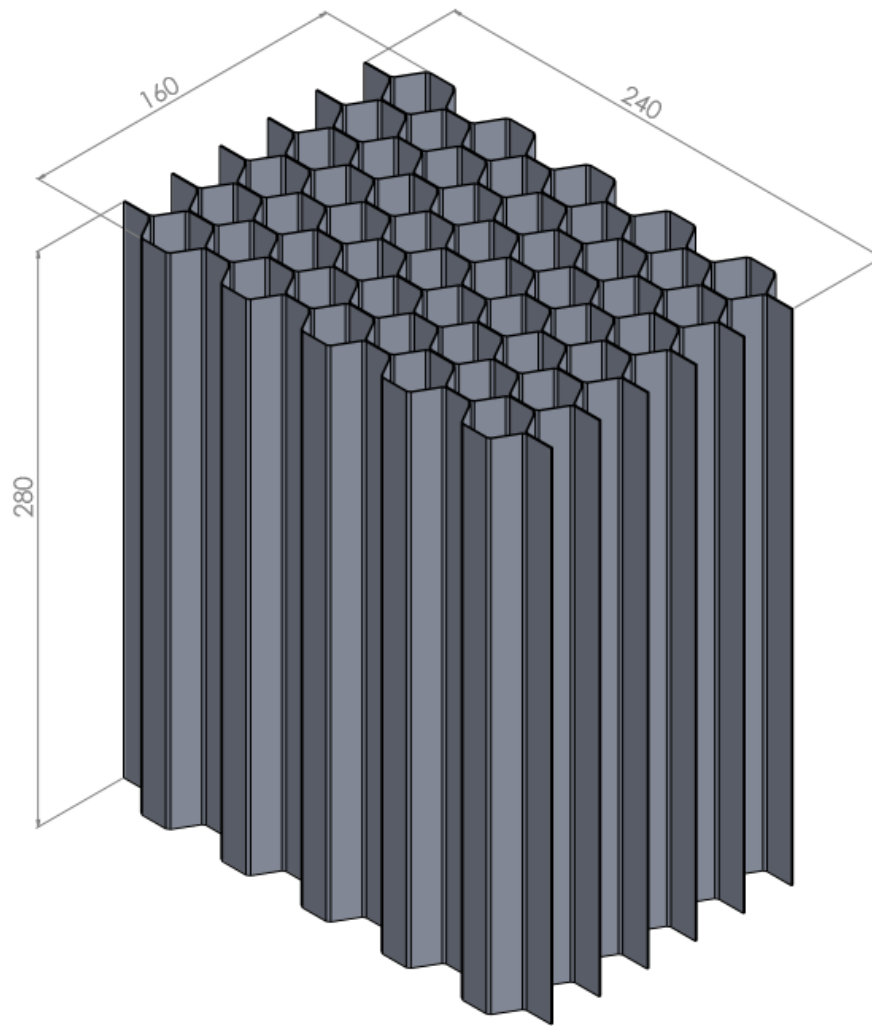


Figura 104 Desenho do sólido igual à estrutura de trinta alvéolos

5.7.2 Ensaio da estrutura de trinta alvéolos

Para construir a estrutura de trinta alvéolos foi necessário quinar doze chapas de alumínio para formar seis conjuntos de cinco alvéolos e posteriormente cola-los para formarem a estrutura. Tal como na estrutura de nove alvéolos foi utilizado um adesivo à base de poliuretano e para auxiliar à construção foram utilizados rebites que mantiveram as peças no devido lugar durante o processo de cura do adesivo. Para fixar a estrutura à máquina de ensaios esta foi colada a uma base de aço ao carbono como se pode verificar na Figura 105.



Figura 105 Estrutura de trinta alvéolos e base de fixação

Na Figura 106 são evidentes as imperfeições, os hexágonos não estão todos iguais nem apresentam uma geometria perfeita, são imperfeições resultantes do tamanho, quantidade de chapas e método de construção.

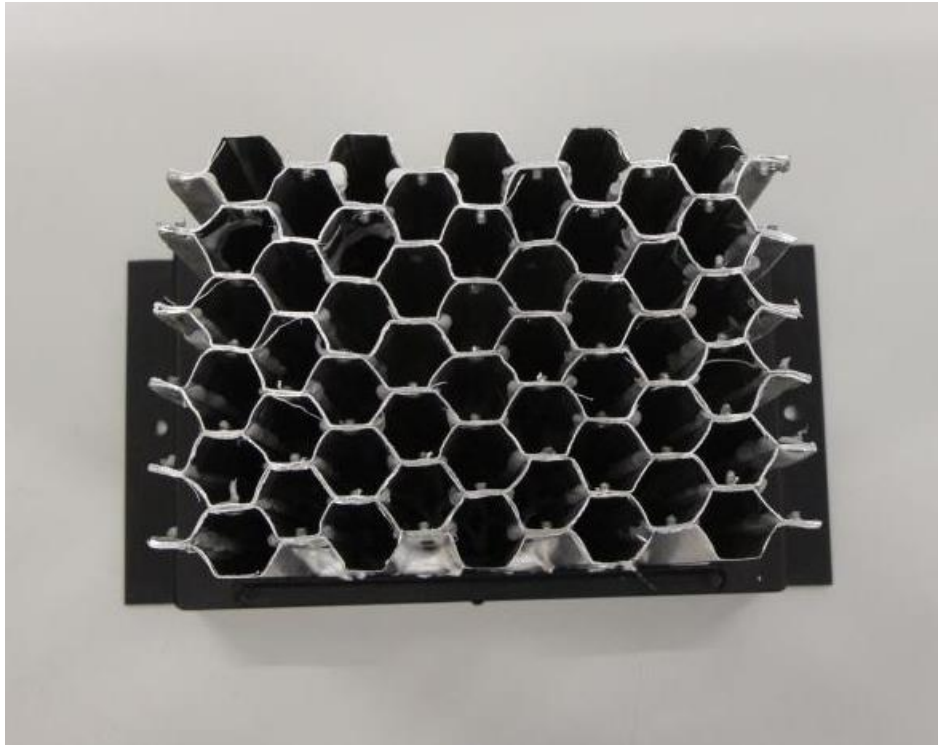


Figura 106 Estrutura de trinta alvéolos onde estão evidentes as imperfeições

Na Figura 107 são apresentadas várias etapas do ensaio da estrutura de trinta alvéolos, com variação do deslocamento do travessão.

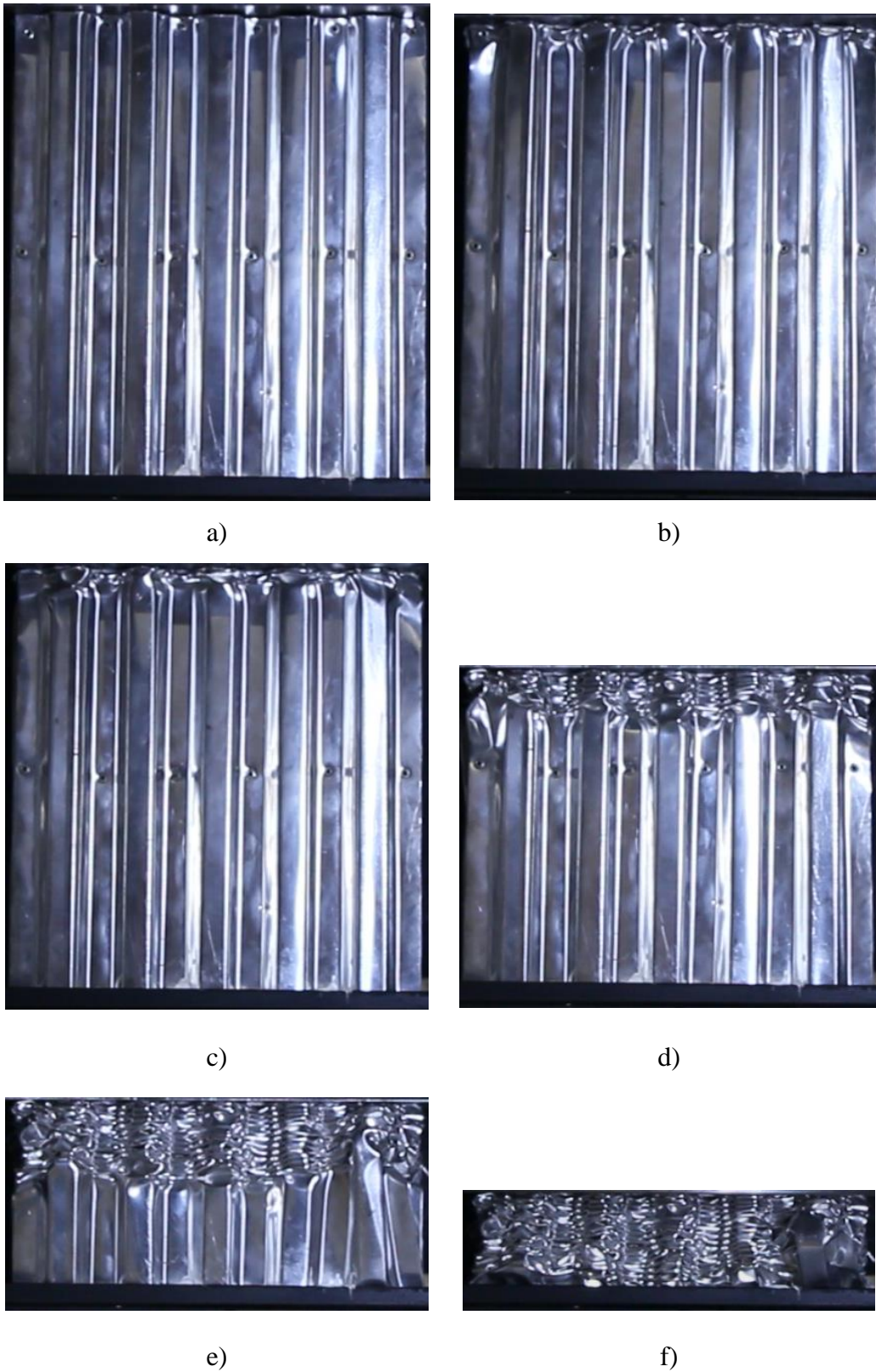


Figura 107 Estrutura de trinta alvéolos em várias etapas do ensaio com deslocamento do travessão de: a) 0 mm, b) 10 mm, c) 20 mm, d) 75 mm, e) 150 mm e f) 208 mm.

Na Figura 108 pode-se ver a estrutura de trinta alvéolos depois do ensaio, tal como nos ensaios das outras estruturas pode-se verificar a uniformidade da deformação em praticamente todos os alvéolos.



a)

b)

Figura 108 a) Estrutura de trinta alvéolos após ensaio e b) Alvéolos deformados em pormenor.

No Figura 109 está apresentado o resultado do ensaio, por intermedio de uma curva que representa a força a exercida pela estrutura em função do deslocamento do travessão.

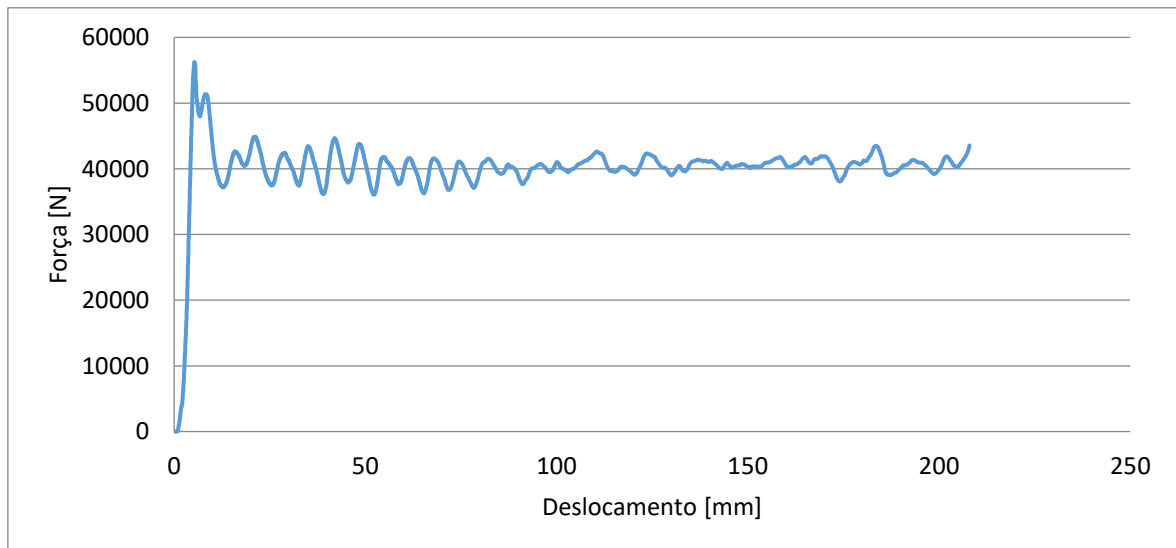


Figura 109 Resultado do ensaio da estrutura de trinta alvéolos

5.7.3 Discussão

A finalidade desta estrutura era obedecer às exigências do regulamento da *Formula Student*. Na Tabela 12 está apresentado o resultado estimado, o obtido, o exigido pelo

regulamento e a percentagem de erro entre o resultado estimado e o resultado obtido no ensaio.

Tabela 12 Comparação entre os valores exigidos no regulamento, os estimados e os obtidos no ensaio

	Força máxima [N]	Força média [N]	Energia [J]
Regulamento	117000	58000	7350
Estimado	65747	42520	8490
Ensaio	56247	39367	8323
Erro	16%	8%	2%

Na Tabela 13 Estão apresentados os resultados dos ensaios dos atenuadores 1 e 2 e da estrutura de trinta alvéolos. Na é exibido um gráfico comparativo dos resultados dos ensaios entre os Atenuadores 1 e 2, e a estrutura de trinta alvéolos.

Tabela 13 Comparação entre os atenuadores 1 e 2 e a estrutura de trinta alvéolos

	Energia [J]	Peso [kg]	Energia específica [J/kg]	Força máxima [N]	Força média [N]
Atenuador 1	4643	0,971	4782	34063	24945
Atenuador 2	7093	1,447	4902	46769	35349
30 Alvéolos	8323	1,591	5231	56247	39367

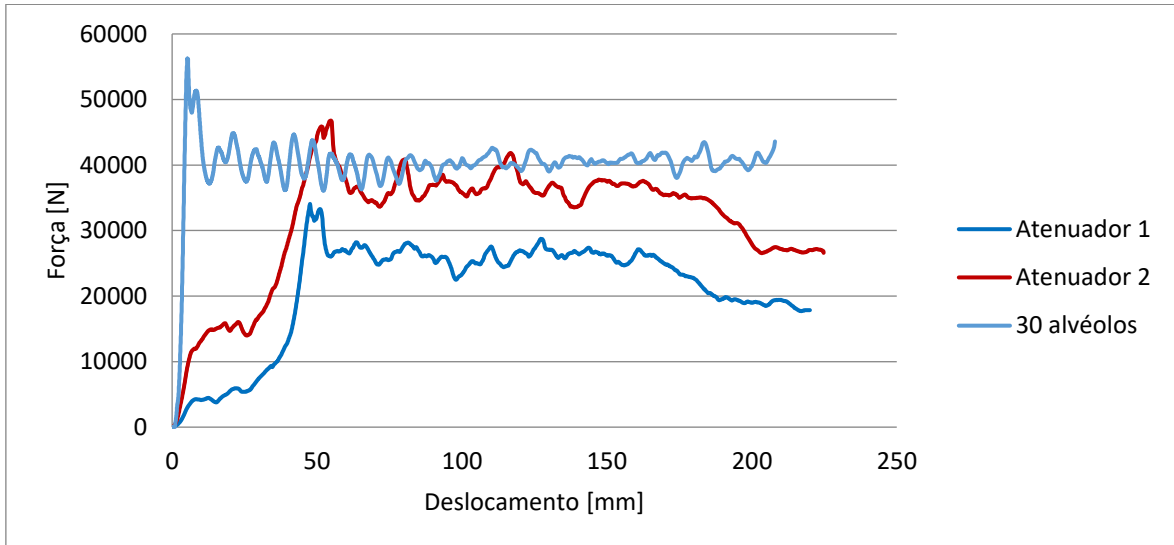


Figura 110 Gráfico comparativo dos resultados dos ensaios entre os Atenuadores 1 e 2, e a estrutura de trinta alvéolos.

Pode-se concluir que uma estrutura alveolar com 280 mm de altura, constituída por 30 alvéolos hexagonais com 15 mm de lado, fabricados a partir de chapa de 0,4 mm, corresponde aos parâmetros exigidos pelo regulamento da *Formula Student*.

CONCLUSÕES

6 CONCLUSÕES

Este trabalho surge com objetivo de desenvolver um atenuador de impacto para um veículo de *Formula Student*, Recorrendo-se a meios computacionais para apoiar

Realizada uma pesquisa bibliográfica foi perceptível que os atenuadores de impacto são usualmente utilizados em dispositivos de segurança, sendo o mais usual encontrarem-se em veículos automóveis. Como apoio a este tipo de componentes, a simulação numérica tem sido cada vez mais utilizada mas dada a complexidade continua a ser uma matéria em estudo.

Os ensaios mecânicos permitem fazer a caracterização do material. Obtendo assim as propriedades não fornecidas pelo fabricante, ou deficientemente comunicadas, não correspondendo com exatidão à realidade. Ficando a conhecer-se a curva do comportamento do material ao longo do ensaio.

Um processo indispensável é a simulação dos ensaios utilizando cálculos numéricos. Desta forma garante-se que perante o mesmo material se consiga simular diferentes solicitações. Dito de outra forma está-se perante um processo que funciona como um *template*.

As simulações revelaram enorme complexidade de cálculo pois envolvem contacto, o material era totalmente deformado, houve necessidade de ter em consideração a não linearidade do material e a não linearidade geométrica. Pelas dificuldades acrescidas deste trabalho foi necessário atribuir parâmetros de dano ao material e utilizar o método dinâmico explícito para ser possível a sua resolução. Veio também a verificar-se obrigatório o estudo da instabilidade estrutural, revelando-se eficaz para introduzir imperfeições ao objeto de estudo.

Quanto aos atenuadores existentes, apurou-se nos ensaios que não estavam aptos a serem parte constituinte do veículo pois não respeitavam o que era exigido no regulamento da *Formula Student*. No entanto, esse estudo serviu de base ao projeto, tornando possível estabelecer um percurso para a construção de um novo atenuador.

Com base nos ensaios dos atenuadores 1 e 2, e no conhecimento do comportamento estrutural modelou-se um modelo simples. Partindo desse modelo foi

definido um conjunto de parâmetros de altura, espessura, modos de instabilidade e elementos de malha que permitiu validar o processo. Obtendo uma deformação controlada e adquirindo a melhor situação para absorção de energia.

Com base nos resultados obtidos nas simulações anteriores modelou-se um atenuador. Tratando-se uma estrutura modelar, pode-se calcular uma estrutura que cumprisse com os requisitos pré-estabelecidos pelo regulamento da *Formula Student*. O atenuador completo não foi simulado pela ausência de meios informáticos que o permitissem.

No final desta tese ficou estabelecido um método que permitiu construir um atenuador que cumpriu as exigências à primeira tentativa, sendo possível extrapolar para qualquer outro caso.

REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS

7 REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS

- [1] “2015 Formula SAE® Rules Table of Contents.” 2015.
- [2] “The Student Challenge.” [Online]. Available: <http://events.imeche.org/formula-student/about-us/thechallenge>. [Accessed: 08-Nov-2014].
- [3] M. Luo, “Ductile Fracture Characterization of an Aluminum Alloy Sheet using Numerical Simulations and Tests,” 2008.
- [4] L. Xue and T. Wierzbicki, “ALUMINUM ALLOY 2024-T351 USING DAMAGE PLASTICITY THEORY,” vol. 1, no. 2, pp. 267–304, 2009.
- [5] A. Ockewitz, D. Sun, H. Klamser, D. Malcher, and P. Ag, “Damage Modelling of Automobile Components of Aluminium Materials under Crash Loading,” 2006.
- [6] “shear-testing.jpg (Imagem JPEG, 333x362 pixéis).” [Online]. Available: <http://www.imetrum.com/assets/images/rhs-content/shear-testing.jpg>. [Accessed: 19-Nov-2014].
- [7] J. Qiao and W. Wang, “Inhomogeneous Material Modelling and Characterization for Aluminium Alloys and Welded Joints,” in *Aluminium Alloys, Theory and Applications*, T. Kvackaj, Ed. 2011.
- [8] R. Hasanpour and N. Choupani, “Rock fracture characterization using the modified Arcan test specimen,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 46, no. 2, pp. 346–354, Feb. 2009.
- [9] G. P. Pucillo, M. Grasso, F. Penta, and P. Pinto, “On the mechanical characterization of materials by Arcan-type specimens,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 78, no. 8, pp. 1729–1741, May 2011.
- [10] Š. František, K. Matúš, and O. Martin, “The Verification of Fixture for Shear Load with Optical Method ESPI,” *Am. J. Mech. Eng.*, vol. 1, no. 7, pp. 180–184, 2013.
- [11] I. Gallana and F. Cordisco, “Fracture analysis in metallic materials.” .
- [12] “Norma EN 10002-1.pdf.” .
- [13] “Lotus Evora front crash test.” [Online]. Available: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lotus_Evora_front_crash_test.jpg. [Accessed: 08-Nov-2014].
- [14] “Will the crash zone crumple? FEA tells.” [Online]. Available:

- <http://machinedesign.com/archive/will-crash-zone-crumple-fea-tells>. [Accessed: 08-Nov-2014].
- [15] “Road Safety Equipment | Great Neck, NY.” [Online]. Available: http://www.impactabsorption.com/Truck___Trailer_Attenuators.html. [Accessed: 08-Nov-2014].
- [16] “Carbon Fiber Nose Crash Test.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=JUhopbbHirA>. [Accessed: 08-Nov-2014].
- [17] J. T. Rappolt, “Analysis of a carbon fiber reinforced polymer impact attenuator,” no. June, 2015.
- [18] J. M. . Schormans, “The design of a formula student front impact attenuator,” 2009.
- [19] N. S. Potabatti, “DESIGN AND PHYSICAL TESTING OF IMPACT ATTENUATOR FOR FORMULA SAE RACECAR,” vol. 5, no. 1, pp. 357–360, 2016.
- [20] “BME Formula Racing Team Impact Attenuator.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=9Fd5w9EwS-k>. [Accessed: 08-Nov-2014].
- [21] U. Dalhousie, “FSAE™ IMPACT ATTENUATOR DATA REPORT,” pp. 3–6, 2012.
- [22] “Formula SAE Impact Attenuator.” [Online]. Available: <http://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=193613e4-fff1-4ea9-97ec-eb1c07fbe3c0>. [Accessed: 08-Nov-2014].
- [23] A. Oshinibosi, “CHASSIS AND IMPACT ATTENUATOR DESIGN FOR FORMULA,” 2012.
- [24] “Formula Student Germany.” [Online]. Available: <https://www.formulastudent.de/academy/pats-corner/faq/>. [Accessed: 08-Nov-2014].

