

Estudo do Comportamento de Estruturas *Sandwich* com Núcleos de Cortiça para Pás de Turbinas Eólicas

Ivo Emanuel Gonçalves da Costa

Relatório do Projecto Final / Dissertação do MIEM

Orientador no INEGI: Dr. P.J.R.O. Nóvoa

Orientador na FEUP: Prof. A. Torres Marques



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2009

*A toda a minha família e
amigos*

Resumo

O presente relatório visa apresentar o trabalho sobre o desenvolvimento e implementação da cortiça enquanto núcleo de uma estrutura compósita tipo *sandwich*, aplicada nas pás das turbinas eólicas.

A adopção da cortiça, enquanto núcleo deste tipo de estruturas, deve-se ao facto de a mesma garantir uma maior tolerância ao dano e à sua leveza. Nota-se, então, um interesse nos materiais compósitos devido ao facto de produzirem um material ajustado às aplicações desejadas, nomeadamente nas pás das turbinas eólicas.

A cortiça contempla um conjunto de características muito atractivas, destacando-se a sua capacidade de amortecimento e absorção de energia conferindo-lhe resistência e tolerância ao dano, bem como melhorando a sua durabilidade.

Apesar das referidas características, tentou-se otimizar a absorção de energia por parte da cortiça tentando-a aproximar a uma estrutura do tipo ninho de abelha, através da adição de um gel absorvente de energia (semelhante ao apresentado pelo Professor Yu Qiao), quando o material é sujeito a algum impacto.

Como as turbinas eólicas requerem materiais resistentes ao impacto devido às condições físicas que as rodeiam, torna-se essencial a realização de um estudo viável para provar que o material em questão pode fazer parte integrante das mesmas. Actualmente as inspecções periódicas são muito exigentes, daí a necessidade de recorrer a uma filosofia de concepção do material em que a durabilidade é o aspecto essencial

Tendo em consideração os requisitos necessários para a aplicação em questão decidiu-se que as peles, ou as camadas exteriores da *sandwich*, seriam constituídas por fibras de vidro e uma matriz termoendurecível. Através da simulação numérica, fez-se um estudo comparativo das diversas disposições dos furos feitos na cortiça, assim como a geometria que os furos podem apresentar tentando-se encontrar a melhor disposição, assim como a melhor forma geométrica dos furos, optimizando e melhorando a performance da cortiça como núcleo, no que respeita a absorção de energia quando solicitado ao impacto e à flexão.

Abstract

This project presents the development and implementation of cork as a core of a sandwich composite structure, for blades of wind turbines. Taking into account the behavior of these types of structures and the need of a lightweight structure with good damage tolerance, there is a potential in cork to be used as a core of a sandwich structure.

Cork has a very attractive set of features like the high capacity of damping and energy absorption that are very appealing to the attempt to achieve a structure with good damage tolerance, resistant to impact and good strength and durability as well. To optimize the energy absorption of a honeycomb structure of cork, it will be tested the addition of a gel with high capacity of energy absorption, when subjected to impact.

In the case of wind turbines, it is a challenge, because the possibilities to use a regular periodic inspection are very limited, therefore, the only way is to use a conception based on durability, because the turbine are unprotected and subject to various types of damage.

To meet the requirements of the application in question, it was decided that the outer layers of the sandwich would be made of fiberglass and an epoxy matrix.

Through numerical simulation, there was a comparative study of various arrangements of the holes made in the cork, as well as the geometry that the holes may have to find the best arrangement and the best geometric shape of the holes optimizing and improving the performance of cork as a core, when applied to bending and low velocity impact.

Agradecimentos

Gostaria de poder agradecer a todas as pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho e que manifestaram apoio e auxiliaram ao longo deste percurso:

Ao Prof. António Torres Marques, por ter aceite ser o meu orientador neste trabalho, bem como pela boa orientação.

Ao Dr. Paulo Nóvoa, o meu manifesto agradecimento por toda a paciência mostrada ao longo da realização deste trabalho, pela orientação, assim como pela imensa disponibilidade e auxílio na parte experimental.

Ao Dinis Dias, por todos os conselhos e ajuda disponibilizada para o projecto assim como à Sofia, pelo auxílio na elaboração do Resumo.

Ao Daniel Peixoto, pelo auxílio, paciência e disponibilidade com o qual me brindou na simulação numérica.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela extensa base de dados e bibliografia que disponibiliza aos alunos, bem como pelas excelentes condições de trabalho que oferece.

À empresa INAPAL PLÁSTICOS, por ter amavelmente cedido as placas que serviram de peles da estrutura *sandwich*, e ao Prof. Yu Qiao um enorme obrigado por ter enviado da Califórnia (EUA) um material que era previsto ter sido adicionado no interior dos furos da cortiça.

Ao INEGI e respectivo pessoal, por disponibilizarem espaço e equipamento fundamental à realização do processo experimental.

Por fim, deixo um agradecimento especial a família e amigos, que me foram acompanhando ao longo deste trabalho e do curso e que sempre estiveram presentes.

Índice

Capítulo 1- Fundamentação Teórica

1.1	Introdução	1
1.2	Motivação do estudo do impacto a baixa velocidade	2
1.3	Definição do conceito	3
1.4	Motivação para o uso de estruturas <i>sandwich</i> com núcleo de cortiça nas pás das turbinas eólicas	5
1.5	Objectivos	8
1.6	Resumo dos capítulos	9
1.7	Bibliografia	10

Capítulo 2- Fundamentação Teórica

2.1	Os Materiais Compósitos.....	11
	2.1.1 Classificação dos Materiais Compósitos.....	11
2.2	Estruturas <i>Sandwich</i>	14
2.3	Cortiça.....	15
	2.3.1 Propriedades da cortiça	16
	2.3.2 Estrutura e composição química da cortiça.....	16
	2.3.3 Propriedades mecânicas da cortiça	18
2.4	Fibras de reforço	20
	2.4.1 Tipos de arquitectura de tecido de uso corrente.....	23
	2.4.2 Fibras de carbono	25
	2.4.3 Fibras de vidro	26
2.5	Matriz.....	27
	2.5.1 Matriz de resina termoendurecível.....	27
	2.5.2 Matriz de resina termoplástica	30

2.6	Impacto em materiais compósitos.....	31
2.6.1	Impacto a baixa e alta velocidade	32
2.6.2	Tipos de dano em estruturas <i>sandwich</i>	33
2.6.3	Caracterização do dano	36
2.6.3.1	Quebra das fibras	36
2.6.3.2	Quebra da matriz	36
2.6.3.3	Separação entre a matriz e as fibras	37
2.6.3.4	Arrancamento de fibras.....	37
2.6.3.5	Fendas de delaminação.....	37
2.6.4	Factores de dano nas pás das turbinas eólicas.....	38
2.7	Gel absorvente de energia.....	40
2.8	Ensaio experimental.....	42
2.8.1	Ensaio de flexão	43
2.8.2	Ensaio de impacto	44
2.8.2.1	Queda livre de um peso.....	44
2.8.3	Ensaio de compressão	46
2.9	Bibliografia	47

Capítulo 3- Estado da Arte

3.1	Aplicações de materiais compósitos	49
3.1.1	Indústria aeronáutica	49
3.1.2	Indústria automóvel.....	51
3.1.3	Indústria ferroviária.....	52
3.1.4	Indústria naval.....	52
3.1.5	Aplicações biomédicas.....	53
3.1.6	Outras aplicações (bicicletas, Indústria eólica, raquetes, etc).....	55
3.2	As estruturas <i>sandwich</i> e o impacto.....	56

3.3	As pás de turbinas eólicas e os materiais compósitos.....	60
3.4	O impacto a baixa velocidade e a simulação numérica	62
3.5	A cortiça.....	64
3.6	Bibliografia	66

Capítulo 4- Simulação numérica

4.1	Simulação numérica de flexão em três pontos.....	69
4.1.1	Geometria das placas de aglomerado de cortiça	71
4.1.1.1	Furos circulares lineares ($d = 2,5 \text{ mm}$)	71
4.1.1.2	Furos circulares com furação em triângulo ($d=2,5 \text{ mm}$).....	72
4.1.1.3	Furos circulares lineares ($d = 5 \text{ mm}$)	73
4.1.1.4	Furos circulares com furação em triângulo ($d = 5\text{mm}$).....	74
4.1.1.5	Furos quadrados lineares ($\text{lado} = 2,5 \text{ mm}$).....	75
4.1.1.6	Furos circulares com furação em triângulo ($\text{lado} = 2,5\text{mm}$).....	76
4.1.1.7	Furos quadrados lineares ($\text{lado} = 5 \text{ mm}$).....	77
4.1.1.8	Furos circulares com furação em triângulo ($\text{lado} = 5\text{mm}$).....	78
4.1.2	Resultados das simulações numéricas da flexão.....	79
4.1.2.1	Aglomerado de cortiça sem furos	79
4.1.2.2	Furos circulares lineares ($d= 2,5\text{mm}$; $e= 2,5\text{mm}$)	80
4.1.2.3	Furos circulares lineares ($d= 2,5\text{mm}$; $e= 5\text{mm}$)	81
4.1.2.4	Furos circulares lineares ($d= 2,5\text{mm}$; $e= 7,5\text{mm}$)	82
4.1.2.5	Furos circulares furação em triângulo($d = 2,5 \text{ mm}$; $e = 2,5 \text{ mm}$)..	83
4.1.2.6	Furos circulares furação em triângulo($d = 2,5 \text{ mm}$; $e = 5 \text{ mm}$) ...	84
4.1.2.7	Furos circulares furação em triângulo($d = 2,5 \text{ mm}$; $e = 7,5 \text{ mm}$)	85
4.1.2.8	Furos circulares lineares ($d= 5\text{mm}$; $e= 2,5\text{mm}$)	86
4.1.2.9	Furos circulares lineares ($d = 5 \text{ mm}$; $e = 5 \text{ mm}$)	87
4.1.2.10	Furos circulares lineares ($d= 5\text{mm}$; $e = 7,5 \text{ mm}$)	88

4.1.2.11 Furos circulares furação em triângulo ($d = 5 \text{ mm}$; $e = 2,5 \text{ mm}$)	89
4.1.2.12 Furos circulares furação em triângulo ($d = 5 \text{ mm}$; $e = 5 \text{ mm}$) ...	90
4.1.2.13 Furos circulares furação em triângulo($d = 5 \text{ mm}$; $e = 7,5 \text{ mm}$) .	91
4.1.2.14 Furos quadrados lineares (lado = $2,5 \text{ mm}$; $e = 2,5 \text{ mm}$)	92
4.1.2.15 Furos quadrados lineares (lado = $2,5 \text{ mm}$; $e = 5 \text{ mm}$)	93
4.1.2.16 Furos quadrados lineares (lado = $2,5 \text{ mm}$; $e = 7,5 \text{ mm}$)	94
4.1.2.17 Furos quadrados furação em triângulo (lado = $2,5 \text{ mm}$; $e = 2,5$ mm)	95
4.1.2.18 Furos quadrados furação em triângulo (lado = $2,5 \text{ mm}$; $e = 5$ mm)	96
4.1.2.19 Furos quadrados com furação em triângulo (lado = $2,5 \text{ mm}$; $e =$ $7,5 \text{ mm}$)	97
4.1.2.20 Furos quadrados lineares (lado = 5 mm ; $e = 2,5 \text{ mm}$)	98
4.1.2.21 Furos quadrados lineares (lado = 5 mm ; $e = 5 \text{ mm}$)	99
4.1.2.22 Furos quadrados lineares (lado = 5 mm ; $e = 7,5 \text{ mm}$)	100
4.1.2.23 Furos quadrados furação em triângulo (lado = 5 mm ; $e = 2,5$ mm)	101
4.1.2.24 Furos quadrados furação em triângulo (lado = 5 mm ; $e = 5$ mm)	102
4.1.2.25 Furos quadrados furação em triângulo (lado = 5 mm ; $e = 7,5$ mm)	103
4.2 Simulação numérica de impacto	104
4.2.1 Resultados da simulação numérica de impacto.....	105
4.3 Conclusões	108
4.3.1 Tensões Máximas.....	108
4.3.2 Energia de deformação.....	110

Capítulo 5 – Procedimento Experimental

5.1	Preparação dos núcleos	111
5.2	Preparação das peles	116
5.3	Preparação das estruturas <i>sandwich</i>	119

Capítulo 6 – Resultados Experimentais

6.1	Resultados experimentais da compressão dos núcleos	125
6.2	Resultados experimentais da flexão.....	139
6.3	Resultados experimentais de Impacto a Baixa Velocidade	148

Capítulo 7- Conclusões

7.1	Discussão de resultados relativos à compressão dos núcleos	149
7.2	Discussão de resultados relativos à flexão.....	152
7.3	Conclusões acerca do melhor material para as pás das turbinas eólicas.....	154
7.4	Propostas para trabalhos futuros	155

Índice de Figuras

Figura 1- Bloco de aglomerado de cortiça.....	3
Figura 2- Bloco de Nomex® em ninho de abelha	3
Figura 3- Furação circular em linha e em triângulo	4
Figura 4- Evolução da capacidade acumulada ao longo dos anos em Portugal	5
Figura 5- Panorama da potência e número de aerogeradores em Portugal	5
Figura 6- Turbina eólica	6
Figura 7- Composição da secção de uma pá de uma turbina eólica	6
Figura 8- Organigrama da classificação dos materiais compósitos.....	11
Figura 9- Tipos de reforço	12
Figura 10- Concentração, tamanho, forma, distribuição e orientação das fibras na matriz	13
Figura 11- Composição de uma estrutura <i>sandwich</i>	14
Figura 12- Sobreiro.....	15
Figura 13- Cortiça virgem empilhada.....	15
Figura 14- Estrutura celular e eixos de referência	17
Figura 15- Estrutura celular	17
Figura 16- Estrutura celular cortiça	17
Figura 17- Granulado de cortiça.....	18
Figura 18- Curva Tensão- Deformação da cortiça à compressão.....	19
Figura 19- Curvas Tensão- Deformação carecterísticas da cortiça no ensaio de tracção	19
Figura 20- Classificação do ponto de vista geométrico das fibras	20
Figura 21- Fibras contínuas longas.....	21
Figura 22- Fibras curtas orientadas unidireccionalmente.....	21
Figura 23- Fibras bidireccionais	22
Figura 25- Tecido unidireccional	23
Figura 24- Arquitectura da fibra de vidro.....	23
Figura 26- Plain Weaving.....	24
Figura 27- Twill Weaving	24
Figura 28- Satin Weaving	24
Figura 29- Mock Leno Weaving	25
Figura 30- Fibra de carbon	25
Figura 32- Constituição do Rovicore®	26
Figura 31- Fibra de vidro.....	26
Figura 33- Temperatura máxima de uso de resinas termoendurecíveis	28
Figura 34- Comparação entre as resinas de epóxico e polyester quanto a Tensão- Deformação	29
Figura 35- Comparação entre as resinas polyester e de opóxico em termos de rigidez e tensão de rotura.....	29
Figura 36- Temperatura máxima de uso de resinas termoplásticas.....	30
Figura 37- Ensaio Izod	31
Figura 38- Ensaio Charpy.....	31
Figura 40- Resposta típica de um impacto a baixa velocidade.....	32
Figura 39- Queda livre de um peso	32
Figura 41- Resposta típica de um impacto a alta velocidade	33
Figura 42- Vários tipos de dano nas fibras	34

Figura 43- Tipos de danos em estruturas <i>sandwich</i>	35
Figura 44- Danos frequentes no ensaio de flexão.....	35
Figura 45- Quebra das fibras	36
Figura 46- Alguns modos de cedência que provocam delaminação	38
Figura 47- Raios de trovoadas nas turbinas eólicas	39
Figura 48- Dano devido a fadiga	39
Figura 49- Dano provocado pela trovoadas	39
Figura 50- Dano proveniente do impacto de um projectil.....	39
Figura 51- Esquema da microestrutura da matriz do gel	40
Figura 52- Esquema do procedimento experimental	41
Figura 53- Gráficos comparativos de dois cilindros, sendo que um contém o gel absorvente	41
Figura 54- Curvas de pressão-volume específico.....	42
Figura 55- Esquema do ensaio de flexão em 3 e 4 pontos	43
Figura 56- Tipo de máquina para queda livre de um peso	45
Figura 57- Progressiva utilização de materiais compósitos no Airbus ao longo das últimas décadas.....	50
Figura 58- Componentes do Airbus fabricados com materiais compósitos	51
Figura 59- Componentes para automóveis em materiais compósitos	52
Figura 60- Carroçaria de um comboio.....	52
Figura 61- Evolução nos materiais utilizados na indústria naval	53
Figura 62- Alguns tipos de estruturas <i>sandwich</i> utilizadas nos cascos dos barcos	53
Figura 63- Pá de uma turbina eólica	55
Figura 64- Bicicletas em compósito	55
Figura 65- Raquete de ténis	55
Figura 66- Corpo de uma bicicleta	56
Figura 67- Núcleo de alumínio em forma de caixa de ovos.....	56
Figura 69- Núcleo testado com fibra de carbono para peles e reforço do núcleo juntamente com uma espuma polimérica	57
Figura 68- Reforços do núcleo em pirâmide	57
Figura 70- Estrutura <i>sandwich</i> com núcleo em aço inoxidável.....	58
Figura 71- Núcleos de aglomerado de cortiça com peles diferentes	58
Figura 72- Núcleo de fibra de carbono	59
Figura 73- Fibras ópticas embebidas numa estrutura <i>sandwich</i>	59
Figura 74- Diagrama de rigidez versus densidade de todos os materiais	60
Figura 75- Pá de 61.5m de comprimento desenvolvida pela LM Glasfiber.....	62
Figura 76- Rolhas de cortiça	64
Figura 77- Aplicações de cortiça	65
Figura 78- Aplicações de cortiça	65
Figura 80- Flexão em 3 pontos do núcleo de cortiça.....	70
Figura 79- Simulação numérica da flexão em 3 pontos	70
Figura 81- Cortiça com furos de 2,5mm de diâmetro e espaçamento de 2,5mm	71
Figura 82- Cortiça com furos de 2,5mm de diâmetro e espaçamento de 5mm	71
Figura 83- Cortiça com furos de 2,5mm de diâmetro e espaçamento de 7,5mm	71
Figura 84- Cortiça com furacão em triângulo, 2,5mm de diâmetro e espaçamento de 2,5mm	72
Figura 85- Cortiça com furacão em triângulo, 2,5mm de diâmetro e espaçamento de 5mm	72
Figura 86- Cortiça com furacão em triângulo, 2,5mm de diâmetro e espaçamento de 7,5mm	72

Figura 87- Cortiça com furos de 5mm de diâmetro e espaçamento de 2,5mm	73
Figura 88- Cortiça com furos de 5mm de diâmetro e espaçamento de 5mm	73
Figura 89- Cortiça com furos de 5mm de diâmetro e espaçamento de 7,5mm	73
Figura 90- Cortiça com furação em triângulo, 5mm de diâmetro e espaçamento de 2,5mm	74
Figura 91- Cortiça com furação em triângulo, 5mm de diâmetro e espaçamento de 5mm	74
Figura 92- Cortiça com furação em triângulo, 5mm de diâmetro e espaçamento de 7,5mm	74
Figura 93- Cortiça com furação quadrangular, 2,5mm de lado e espaçamento de 2,5mm	75
Figura 94- Cortiça com furação quadrangular, 2,5mm de lado e espaçamento de 5mm	75
Figura 95- Cortiça com furação quadrangular, 2,5mm de lado e espaçamento de 7,5mm	75
Figura 96- Cortiça com furação quadrangular em triângulo, 2,5mm de lado e espaçamento de 2,5mm	76
Figura 97- Cortiça com furação quadrangular em triângulo, 2,5mm de lado e espaçamento de 5mm	76
Figura 98- Cortiça com furação quadrangular em triângulo, 2,5mm de lado e espaçamento de 7,5mm	76
Figura 99- Cortiça com furação quadrangular, 5mm de diâmetro e espaçamento de 2,5mm	77
Figura 100- Cortiça com furação quadrangular, 5mm de diâmetro e espaçamento de 5mm	77
Figura 101- Cortiça com furação quadrangular, 5mm de diâmetro e espaçamento de 7,5mm	77
Figura 102- Cortiça com furação quadrangular em triângulo, 5mm de lado e espaçamento de 2,5mm	78
Figura 103- Cortiça com furação quadrangular em triângulo, 5mm de lado e espaçamento de 5mm	78
Figura 104- Cortiça com furação quadrangular em triângulo, 5mm de lado e espaçamento de 7,5mm	78
Figura 105- Distribuição de tensões na placa	79
Figura 106- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	79
Figura 108- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	80
Figura 107- Distribuição de tensões na placa	80
Figura 109- Distribuição de tensões na placa	81
Figura 110- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	81
Figura 111- Distribuição de tensões na placa	82
Figura 112- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	82
Figura 113- Distribuição de tensões na placa	83
Figura 114- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	83
Figura 115- Distribuição de tensões na placa	84
Figura 116- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	84
Figura 117- Distribuição de tensões na placa	85
Figura 118- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	85
Figura 119- Distribuição de tensões na placa	86
Figura 120- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	86
Figura 121- Distribuição de tensões na placa	87
Figura 122- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	87

Figura 123- Distribuição de tensões na placa.....	88
Figura 124- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	88
Figura 125- Distribuição de tensões na placa.....	89
Figura 126- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	89
Figura 127- Distribuição de tensões na placa.....	90
Figura 128- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	90
Figura 129- Distribuição de tensões na placa.....	91
Figura 130- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	91
Figura 132- Distribuição de tensões na placa.....	92
Figura 131- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	92
Figura 133- Distribuição de tensões na placa.....	93
Figura 134- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	93
Figura 135- Distribuição de tensões na placa.....	94
Figura 136- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	94
Figura 137- Distribuição de tensões na placa.....	95
Figura 138- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	95
Figura 139- Distribuição de tensões na placa.....	96
Figura 140- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	96
Figura 141- Distribuição de tensões na placa.....	97
Figura 142- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	97
Figura 143- Distribuição de tensões na placa.....	98
Figura 144- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	98
Figura 145- Distribuição de tensões na placa.....	99
Figura 146- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	99
Figura 147- Distribuição de tensões na placa.....	100
Figura 148- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	100
Figura 149- Distribuição de tensões na placa.....	101
Figura 150- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	101
Figura 151- Distribuição de tensões na placa.....	102
Figura 152- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	102
Figura 153- Distribuição de tensões na placa.....	103
Figura 154- Energia de deformação durante o ensaio de flexão	103
Figura 155- Modelo de impacto implementado	104
Figura 156- Impactor e placa de cortiça	104
Figura 157- Placa deformada devido ao impacto	105
Figura 158- Zona central da placa com maior dano	105
Figura 159- Vista de topo da zona crítica.....	106
Figura 160- Vista em corte da zona central de indentação.....	106
Figura 161- Energia de deformação da placa durante o ensaio de impacto	107
Figura 162- Energia interna da placa durante o ensaio de impacto.....	107
Figura 163- Valores da tensão mais crítica para furos circulares de 2,5mm de diâmetro	108
Figura 164- Valores da tensão mais crítica para furos circulares de 5mm de diâmetro.....	108
Figura 165- Valores da tensão mais crítica para furos quadrados de 2,5mm de lado ..	109
Figura 166- Valores da tensão mais crítica para furos quadrados de 5mm de lado	109
Figura 167- Núcleo de Nomex [®] utilizado	112
Figura 169- Bloco de cortiça com marcação das placas.....	112
Figura 168- Corte das placas de aglomerado de cortiça.....	112
Figura 170- Corte do aglomerado de cortiça para ter 16mm de espessura.....	112
Figura 171- Núcleos de aglomerado de cortiça preparados	113

Figura 172- Corte da cortiça virgem com furos das rolhas	113
Figura 174- Cortiça furada	114
Figura 175- Processo de ligação dos núcleos com cola de contacto	114
Figura 173- Furação da cortiça.....	114
Figura 176- Uniformização das superfícies.....	115
Figura 177- Cola contacto utilizada.....	115
Figura 178- Colagem dos vários pedaços de cortiça virgem.....	115
Figura 179- Face superior do tecido Rovicore	116
Figura 180- Fibras seladas (esquerda) e fibras em vácuo (direita).....	116
Figura 181- Preparação da resina a utilizar na infusão por vácuo.....	117
Figura 182- Resina a ser escoada	117
Figura 184 – Placa com bolhas de ar.....	118
Figura 183- Escoamento da resina ao longo das fibras de Rovicore®.....	118
Figura 185 – Placas que constituem as peles da estrutura <i>sandwich</i>	119
Figura 186 – Limpeza da superfície com isopropanol.....	119
Figura 187 – Adesivo de epóxico e endurecedor	119
Figura 188 – À esquerda tem-se a mistura de resina com endurecedor e à direita a resina espalhada numa pele da <i>sandwich</i>	120
Figura 189 – À esquerda o núcleo de cortiça virgem com resina numa das faces e à direita uma pele já colada	120
Figura 190- À esquerda a estrutura <i>sandwich</i> com Nomex® e à direita com aglomerado de cortiça sem furos.....	120
Figura 192- Provete para impacto.....	121
Figura 191- Alguns provetes para flexão	121
Figura 193 – Estrutura <i>sandwich</i> de Nomex® com pó de cortiça no interior.....	122
Figura 194- Diferentes concentrações de água com Poliacrilato de Sódio	122
Figura 195- Núcleo de cortiça com furação em triângulo com gel de Poliacrilato de Sódio nos furos	123
Figura 196- Provete para compressão com diferentes soluções de Poliacrilato	123
Figura 197- Ensaio de compressão do núcleo	126
Figura 198- Ensaio de compressão do núcleo de cortiça.....	126
Figura 199- Ensaio de compressão do núcleo de Nomex®	126
Figura 200 – Provete de aglomerado de cortiça sem furos.....	127
Figura 201- Gráfico mais exemplificativo de compressão da cortiça sem furos.....	127
Figura 202 - Gráfico mais exemplificativo de compressão da cortiça sem furos ate 10mm de deslocamento	128
Figura 203 – Provete de aglomerado de cortiça com furação em linha	129
Figura 204- Gráfico mais exemplificativo de compressão da cortiça com furos lineares	129
Figura 205- Gráfico mais exemplificativo de compressão da cortiça com furação linear ate 10mm de deslocamento	130
Figura 206 – Provete de aglomerado de cortiça com furação em triângulo.....	131
Figura 207- Gráfico mais exemplificativo de compressão da cortiça com furação em triângulo.....	131
Figura 208- Gráfico mais exemplificativo de compressão da cortiça com furação em triângulo até 10mm de deslocamento	132
Figura 209- Provete de Nomex®	133
Figura 210- Gráfico mais exemplificativo de compressão do Nomex®	133
Figura 211- Gráfico mais exemplificativo de Nomex® até 10mm de deslocamento ...	134
Figura 212- Provete de cortiça virgem	135

Figura 213- Gráfico mais exemplificativo de compressão de cortiça virgem.....	135
Figura 214- Gráfico mais exemplificativo de cortiça virgem até 10mm de deslocamento	136
Figura 215- Compressão de Nomex® com pó de cortiça no interior.....	137
Figura 216- Compressão de Nomex® com Poliacrilato de Sódio no interior.....	137
Figura 217- Saída do Poliacrilato do interior do núcleo.....	138
Figura 218- Comparação dos gráficos com diferentes soluções de Poliacrilato de Sódio	139
Figura 219- Saída de gel do interior do núcleo	139
Figura 220- Flexão em 3 pontos da estrutura <i>sandwich</i> de Nomex®	140
Figura 222- Rotura das células do núcleo	141
Figura 223- Gráfico mais exemplificativo dos provetes com Nomex®	141
Figura 221- Recuperação elástica do núcleo após finalizado o ensaio.....	141
Figura 224- Flexão em 3 pontos da estrutura <i>sandwich</i> de aglomerado de cortiça sem furos.....	142
Figura 225- Momento da rotura das peles	142
Figura 226- Gráfico mais exemplificativo dos provetes com aglomerado de cortiça ..	142
Figura 227- Flexão em 3 pontos da estrutura <i>sandwich</i> de aglomerado de cortiça e furos em linha	143
Figura 228- Gráfico mais exemplificativo dos provetes com aglomerado de cortiça com furação em linha	144
Figura 229- Flexão em 3 pontos da estrutura <i>sandwich</i> de aglomerado de cortiça e furos em triângulo.....	144
Figura 231- Gráfico mais exemplificativo dos provetes com aglomerado de cortiça com furação em triângulo	145
Figura 230- À esquerda o momento da delaminação no ensaio e à direita o delaminagem em pormenor	145
Figura 232- Flexão em 3 pontos da estrutura <i>sandwich</i> de cortiça virgem.....	146
Figura 233- Corte visível do núcleo durante o ensaio à esquerda e delaminação entre núcleo e pele à direita	146
Figura 234- Gráfico mais exemplificativo dos provetes com cortiça virgem	147
Figura 235- Foto pormenorizada da delaminação.....	147
Figura 236- Pormenor do corte do núcleo	147
Figura 237- Comparação dos gráficos de compressão mais exemplificativos de cada núcleo	150
Figura 238- Comparação dos gráficos de compressão mais exemplificativos de cada núcleo	151
Figura 239- Comparação dos gráficos de flexão mais exemplificativos de cada estrutura <i>sandwich</i>	153
Figura 240- Delaminação e corte do núcleo de cortiça virgem.....	155
Figura 241- Nomex® e aglomerado de cortiça como um núcleo único.....	156
Figura 242- Ensaio de compressão Nomex®	165
Figura 243- Ensaio de compressão aglomerado de cortiça sem furos	165
Figura 244- Ensaio de compressão aglomerado de cortiça com furos em linha.....	165
Figura 245- Ensaio de compressão de aglomerado de cortiça com furação em triângulo	166
Figura 246- Ensaio de compressão de cortiça virgem	166
Figura 247- Compressão do Nomex® até 10 mm de deslocamento	166
Figura 248- Compressão aglomerado de cortiça até 10mm de deslocamento	167

Figura 249- Compressão aglomerado de cortiça com furação em linha até 10mm de deslocamento	167
Figura 250- Compressão aglomerado de cortiça com furação em triângulo até 10mm de deslocamento	167
Figura 251- Compressão aglomerado de cortiça virgem até 10mm de deslocamento .	168
Figura 252- Ensaio de flexão das estruturas com Nomex [®]	168
Figura 253- Ensaio de flexão das estruturas com aglomerado de cortiça.....	169
Figura 254- Ensaio de flexão das estruturas com aglomerado de cortiça e furação em linha	169
Figura 255- Ensaio de flexão das estruturas com aglomerado de cortiça e furação em triângulo.....	169
Figura 256- Ensaio de flexão das estruturas com cortiça virgem e furos das rolhas para garrafas	170

Índice de Tabelas

Tabela 1- Propriedades mecânicas da cortiça.....	18
Tabela 2- Energia de deformação no ensaio de flexão das placas com furos circulares	110
Tabela 3- Energia de deformação no ensaio de flexão das placas com furos quadrados	110
Tabela 4- Dimensões e valores relativos à compressão do aglomerado de cortiça sem furos.....	127
Tabela 5- Dimensões e valores relativos à compressão do aglomerado de cortiça sem furos.....	128
Tabela 6- Variação da espessura após o ensaio de compressão	128
Tabela 7- Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de aglomerado de cortiça com furacão em linha.....	129
Tabela 8 - Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de aglomerado de cortiça com furacão em linha.....	130
Tabela 9- Variação da espessura após o ensaio de compressão	130
Tabela 10- Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de aglomerado de cortiça com furacão em triângulo	131
Tabela 11- Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de aglomerado de cortiça com furacão em triângulo	132
Tabela 12- Variação da espessura após o ensaio de compressão	132
Tabela 13- Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de Nomex®	133
Tabela 14- Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de Nomex®	134
Tabela 15- Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de cortiça virgem	135
Tabela 16- Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de cortiça virgem	136

Tabela 17- Variação da espessura após o ensaio de compressão	136
Tabela 18- Valores do provete com Nomex® e pó de cortiça	137
Tabela 19- Valores do provete com Nomex® e Poliacrilato de Sódio	137
Tabela 20- Valores referentes aos provetes com diferentes soluções de Poliacrilato de Sódio.....	138
Tabela 21- Dimensões dos provetes de Nomex®	140
Tabela 22- Dados dos ensaios de flexão.....	141
Tabela 23- Dimensões dos provetes de Aglomerado de cortiça sem furação	141
Tabela 24- Dados dos ensaios de flexão.....	143
Tabela 25- Dimensões dos provetes com aglomerado de cortiça e furação em linha..	143
Tabela 26- Dados dos ensaios de flexão.....	144
Tabela 27- Dimensões dos provetes com aglomerado de cortiça e furação em triângulo	144
Tabela 28- Dados dos ensaios de flexão.....	145
Tabela 29- Dimensões dos provetes com cortiça virgem	146
Tabela 30- Dados dos ensaios de flexão.....	147
Tabela 31- Comparação de Módulo de Young e Energia dos diferentes materiais à compressão	149
Tabela 32- Energia de deformação até ao fim do ensaio ($\epsilon=30\%$)	150
Tabela 33- Valores de energia por unidade de massa de cada núcleo.....	151
Tabela 34- Energia absorvida durante a compressão até 10 mm	151
Tabela 35- Valores de comparação de energia durante a compressão dos núcleos de Nomex®	152
Tabela 36- Valores de comparação de energia durante a compressão dos núcleos de aglomerado de cortiça com furação em triângulo e várias soluções de poliacrilato de sódio	152
Tabela 37 Comparação de Módulo de Young e Energia dos diferentes materiais na flexão	Erro! Marcador não definido.

Tabela 38- Tabela comparativa dos pesos específicos dos dos provetes para compressão	
.....	154

Capítulo 1- Introdução

1.1 Introdução

Um material compósito surge da combinação de dois materiais de naturezas diferentes, sendo eles as fibras e a resina, que se complementam entre si e originam um material não homogêneo e com propriedades bastante superiores às dos constituintes. Normalmente são constituídos por fibras e um tipo de resina, sendo que as fibras assumem o papel de reforço suportando as cargas aplicadas, deixando para a resina o papel de matriz. A matriz tem por finalidade ligar entre si as fibras, transmitindo-lhes as cargas aplicadas e protegendo-as do meio ambiente. Dentro destes materiais, surgem as estruturas *sandwich*, que como o próprio nome indica, assemelha-se a uma *sandwich*, onde se tem um núcleo leve e flexível e as camadas exteriores são finas, rígidas e resistentes, resultando um material com boas e atractivas propriedades mecânicas.

Tem havido um enorme recurso aos materiais compósitos para as mais diversas aplicações, tais como indústria aeronáutica, automóvel, naval, ferroviária, construção, desporto, etc. Este aumento reside no facto destes materiais possibilitarem elevada resistência, elevada rigidez, baixo peso, boas propriedades quando solicitado à fadiga e boa resistência à corrosão.

Os materiais compósitos, também possuem as suas desvantagens que residem no custo da sua produção, uma vez que as fibras não são baratas, não resistem a elevadas temperaturas e ainda existe algum cepticismo em relação a estes materiais.

1.2 Motivação do estudo do impacto a baixa velocidade

No que diz respeito a baixo peso, elevada resistência e elevada rigidez, os materiais compósitos possuem grandes vantagens em relação aos metais. O problema surge quando o impacto é uma variável muito importante a ter em conta na concepção do material, pois com este tipo de solicitações a capacidade de carga da estrutura vai diminuindo e sendo os materiais compósitos muito sensíveis ao impacto, diminui assim a tolerância ao dano da mesma. Factores como a baixa taxa de deformação limite, a fraca resistência ao longo da espessura e a fragilidade do material explicam esta limitação em relação ao impacto [1.1].

O impacto a baixa velocidade surge como uma solicitação muito perigosa, a nível dos efeitos que provoca nos materiais compósitos. Por um lado, pode ser responsável por uma área danificada de vasta extensão, onde se podem verificar os mais variados tipos de efeitos, como delaminação, aparecimento de fendas ou quebra de fibras nas zonas circundantes ao impacto. Por outro, os danos devido ao impacto a baixa velocidade nem sempre são visíveis a olho nu, tornando assim difícil a sua inspecção visual.

Neste trabalho, a cortiça surge na tentativa de absorver o máximo de energia possível quando é submetido ao impacto, melhorando assim a tolerância ao dano de um material compósito, nomeadamente numa estrutura *sandwich*.

Para isso, os ensaios impacto a baixa velocidade vão permitir verificar que tipo de dano impõe na estrutura, permitindo saber se a cortiça, como núcleo, melhora a tolerância ao dano.

1.3 Definição do conceito

Neste trabalho, tentar-se-á introduzir a cortiça como núcleo das estruturas compósitas do tipo *sandwich*, de maneira a poder competir no mercado com outro material também em *sandwich* em ninho de abelha – Nomex®.

A cortiça ao ser um material natural e com relativa facilidade de concepção, pode apresentar-se como um material que tem um baixo preço em relação a outros materiais que já se encontram implementados no mercado e não tem qualquer impacto a nível ambiental. Nas figuras que se seguem abaixo, podem-se visualizar o núcleo ninho de abelha Nomex® e um pequeno bloco de cortiça.



Figura 2- Bloco de Nomex® em ninho de abelha



Figura 1- Bloco de aglomerado de cortiça

Sendo a cortiça um excelente absorvente de energia a nível de amortecimento, um material extremamente leve e tentando adicionar uma resistência e rigidez elevadas, esta combinação de propriedades poderá ser aproveitada para tentar conceber uma estrutura substituta e tentar ser uma alternativa viável no mercado. Existe grande potencial na cortiça para funcionar como núcleo e responder às necessidades das aplicações da engenharia [1.2].

Para se assemelhar com a estrutura em ninho de abelha, a cortiça apresentará pequenos furos, realizados por uma pequena broca helicoidal e no seu interior será colocado o gel absorvente de energia, para se estudarem os efeitos práticos da sua inclusão na cortiça. Como se pode ver na figura apresentada a seguir, será também importante estudar a influência da geometria e a disposição dos furos na cortiça, assim como a distância entre eles.

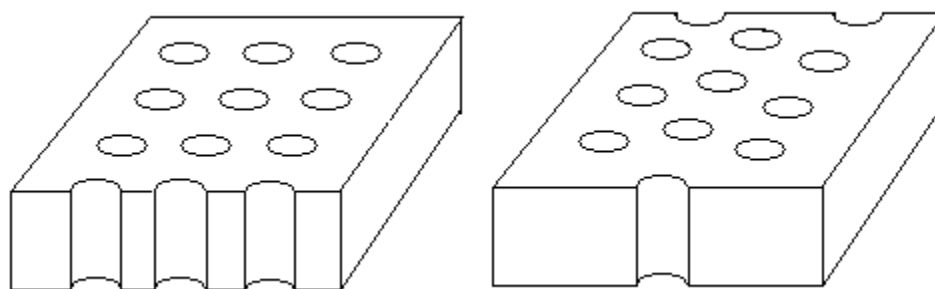


Figura 3- Furação circular em linha e em triângulo

1.4 Motivação para o uso de estruturas *sandwich* com núcleo de cortiça nas pás das turbinas eólicas

Nos últimos tempos tem-se vindo a reparar na enorme quantidade de turbinas eólicas que estão cada vez mais a aparecer nas nossas paisagens, como se pode ver no gráfico.

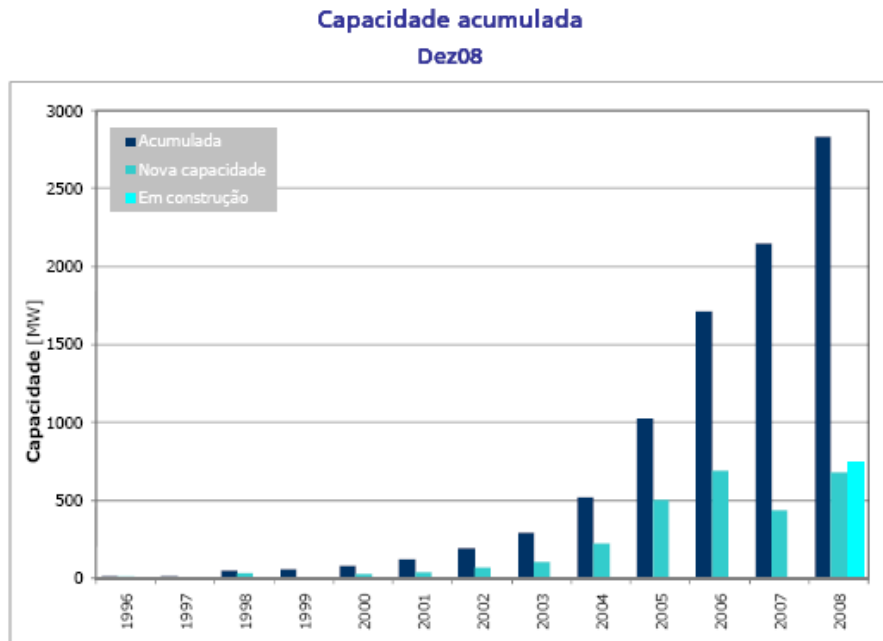


Figura 4- Evolução da capacidade acumulada ao longo dos anos em Portugal [1.3]

Tal facto, deve-se ao grande investimento feito por Portugal, tal como outros países, para diminuírem a sua dependência no petróleo, que cada vez mais é considerado um recurso natural em vias de extinção, e sustentar as suas necessidades energéticas em fontes renováveis de energia. Pela tabela pode-se ver o número e potência de aerogeradores que em Dezembro de 2008 estavam instalados [1.3].

PARQUES EÓLICOS EM PORTUGAL
Potência e número de aerogeradores
Dez08

PARQUES EÓLICOS EM PORTUGAL	Ligados		Em construção		TOTAL	
	MW	Turbinas	MW	Turbinas	MW	Turbinas
CONTINENTE	2811,4	1534	709,6	326	3521,0	1860
MADEIRA	8,7	37	29,9	29	38,6	66
AÇORES	11,6	33	0,0	0	11,6	33
TOTAL	2831,7	1604	739,5	355	3571,1	1959

Figura 5- Panorama da potência e número de aerogeradores em Portugal [1.3]

A energia eólica, que é uma fonte renovável de energia, depende de inúmeros factores, sendo que o maior e mais importante é, sem dúvida, a existência de vento. O vento é necessário para transformar a energia cinética do vento em energia necessária para o dia-a-dia, como por exemplo, electricidade ou calor. Esta conversão de energia deriva da seguinte expressão:

$$P = \alpha \rho A v^3 ,$$



Figura 6- Turbina eólica

onde, P é a potência energética, α é a constante de eficiência aerodinâmica, ρ é a densidade do ar, A a área do rotor e v é a velocidade do vento [1.4].

O rotor, para poder rodar necessita de uma pá com forma aerodinâmica. As pás devem possuir algumas propriedades que são fundamentais para o seu bom desempenho aerodinâmico e assim aumentar a eficiência energética das turbinas eólicas.

Daí haver uma grande importância na interacção entre o vento e as pás da turbina, logo estas devem possuir as melhores propriedades e a melhor qualidade possível, para terem um excelente desempenho, contribuindo, assim, activamente para uma maior eficiência da turbina.

As pás das turbinas eólicas cada vez mais precisam de atingir um nível superior, quer a nível de qualidade dos materiais que a constituem, quer a nível de concepção para não surgirem defeitos de fabrico. Na figura abaixo apresentada, pode-se ter uma ideia da composição da secção de uma pá de turbina eólica.

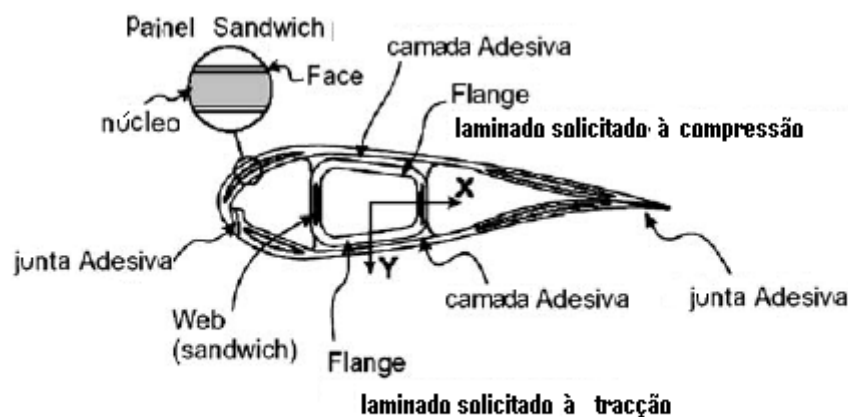


Figura 7- Composição da secção de uma pá de uma turbina eólica [1.4]

As propriedades que as pás devem possuir podem ser vistas como os requisitos para a selecção de materiais que irão constituí-la.

As propriedades são as seguintes [1.4;1.5]:

- Elevada rigidez para manter o óptimo desempenho aerodinâmico;
- Baixa densidade para assim reduzir as forças devido à gravidade;
- Elevada resistência ao corte na interface, entre as peles e o núcleo;
- Resistência ao corte numa gama de temperaturas entre os -50°C e +60°C;
- Elevada resistência e longa vida à fadiga para reduzir a degradação dos materiais quando são submetidos a ambientes agressivos.

Estas propriedades que as pás devem possuir e o modo como são concebidas ajudam a prevenir o aparecimento de problemas e estão directamente relacionados com a provocação de efeitos indesejáveis na estrutura. As estruturas devem garantir a sua integridade, para além de serem capazes de reagir às necessidades contra situações críticas. Por exemplo, se a pá não possuir uma rigidez considerável esta poderá ter problemas a nível vibracional, podendo oscilar em demasia; se a densidade não for baixa, aumentará o peso das pás e assim será mais difícil o vento accionar o movimento rotacional das mesmas e diminuir a produção de electricidade; a resistência à fadiga confere à estrutura uma maior durabilidade evitando a degradação das pás e poupando nos custos de manutenção.

Ora, as estruturas *sandwich* encaixam perfeitamente neste perfil de estruturas com as propriedades acima enunciadas, e tendo como núcleo a cortiça mais a combinação com o gel absorvente de energia, pode-se tentar garantir uma boa resistência ao impacto na estrutura, propriedade esta que também é importante para durabilidade da mesma.

1.5 Objectivos

Este trabalho tem como principal objectivo a tentativa de potenciar, implementar e inovar o uso da cortiça como núcleo de uma estrutura compósita em *sandwich* para aplicação nas pás das turbinas eólicas.

As pás das turbinas eólicas devem possuir características como uma elevada rigidez, uma densidade baixa e uma resistência à fadiga. Estas propriedades encaixam no perfil que as estruturas *sandwich* apresentam podendo ser uma óptima alternativa à fibra de vidro que em conjunto com uma resina termoendurecível, constituem o material mais utilizado nas pás.

A cortiça, sendo um material que possui propriedades mecânicas bastante interessantes e úteis e sendo Portugal o maior produtor a nível mundial deste recurso natural, tentar-se-á aplicar a cortiça numa zona da estrutura em que o seu papel é fundamental para o bom desempenho da mesma.

Posteriormente, outro objectivo, passa pela adição de um gel que absorva energia, para tentar melhorar a tolerância ao dano das estruturas *sandwich*, quando sujeitas ao impacto. Daí que, se tenha tentado algo do género ao que o Prof. Yu Qiao testou e apresentou na 16ª Conferência Internacional de Materiais Compósitos [1.6;1.7;1.8].

O comportamento a longo prazo das estruturas compósitas pode ser previsto através de modelos experimentais e modelos numéricos. Assim, o estudo do efeito da cortiça nas estruturas *sandwich*, será feito através da preparação e desenvolvimento de amostras, para depois serem realizados diversos tipos de ensaios mecânicos e através de um software comercial de elementos finitos serão feitas algumas simulações numéricas do modelo a analisar. A análise por elementos finitos terá como objectivo principal estudar a influência da disposição dos furos feitos na cortiça, assim como a forma geométrica e tamanho dos mesmos, quando o assunto é o impacto e a tentativa de absorver o máximo de energia possível.

1.6 Resumo dos capítulos

Capítulo 1 – O primeiro capítulo deste trabalho faz uma breve abordagem dos temas base em estudo (impacto a baixa velocidade, utilização de materiais compósitos e vantagens de utilização da cortiça), apresentando motivações, objectivos do trabalho em estudo e uma caracterização da energia eólica em Portugal.

Capítulo 2 – Neste capítulo é feito um levantamento bibliográfico de conceitos teóricos inerentes a este trabalho.

Capítulo 3 – No terceiro capítulo, é feita uma exposição dos trabalhos que tem vindo a ser desenvolvidos relativamente ao estudo de materiais compósitos sujeitos a impactos de baixa velocidade, desenvolvimento nas aplicações de cortiça e desenvolvimento a nível de simulação numérica em materiais compósitos.

Capítulo 4 - No capítulo quatro é feita a simulação numérica dos ensaios de flexão e impacto.

Capítulo 5 - No capítulo quatro são descritos os processos experimentais efectuados para a realização do estudo, focando os processos de fabrico das estruturas *sandwich* e realização de ensaios necessários para a caracterização do material.

Capítulo 6 – Neste capítulo é feita a exposição de todos os resultados obtidos através dos ensaios efectuados.

Capítulo 7 – No capítulo 7 é feita uma análise detalhada dos resultados apresentados no capítulo anterior, sendo apresentadas as conclusões que foram possíveis retirar deste estudo experimental, bem como sugerir trabalhos futuros que abordem o estudo desta temática.

1.7 Bibliografia

[1.1] **Moura, Marcelo Francisco de Sousa Ferreira de.** *Modelos de Previsão do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos Carbono-Epóxico Sujeitos a Impacto de Baixa Velocidade e da sua Resistência Residual à Compressão Após Impacto.* Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1995.

[1.2] Grupo Amorim. [Online] [Citação: 21 de Fevereiro de 2009.] <http://www.amorim.pt/home.php>.

[1.3] **Rodrigues, Álvaro.** *Parques Eólicos em Portugal- Dezembro de 2008.* Porto : INEGI, 2008.

[1.4] **Brøndsted, Povl, Lilholt, Hans and Lystrup, Aage.** *Composite Materials For Wind Power Turbine Blades.* Roskilde : Annual Reviews, 2005.

[1.5] *8th International Conference On Sandwich.* **Ferreira, António J. M.** Porto : Publindústria, Produção de Comunicação, Lda., 2008.

[1.6] **Qiao, Yu, Sperball, Lance A. and Punyamurtula, Venkata K.** *A Gel Matrix Energy Absorbing Composite Functionalized by Nanoporous Silica.* San Diego : Department of Structural Engineering, University of California, 2006.

[1.7] **Qiao, Yu, Sperball, Lance A. and Punyamurtula, Venkata K.** *A Honeycomb Structure Enhanced by Nanoporous Material Functionalized Liquid.* San Diego : Department of Structural Engineering, University of California, 2006.

[1.8] **Qiao, Yu and Punyamurtula, Venkata K.** *A Selectively-Energy-Absorbing Nanoporous System.* Materials Letters. 2008, Vols. 62: 2928 - 2930.

Capítulo 2- Fundamentação Teórica

2.1 Os Materiais Compósitos [2.1;2.2]

2.1.1 Classificação dos Materiais Compósitos

Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com o seguinte diagrama:

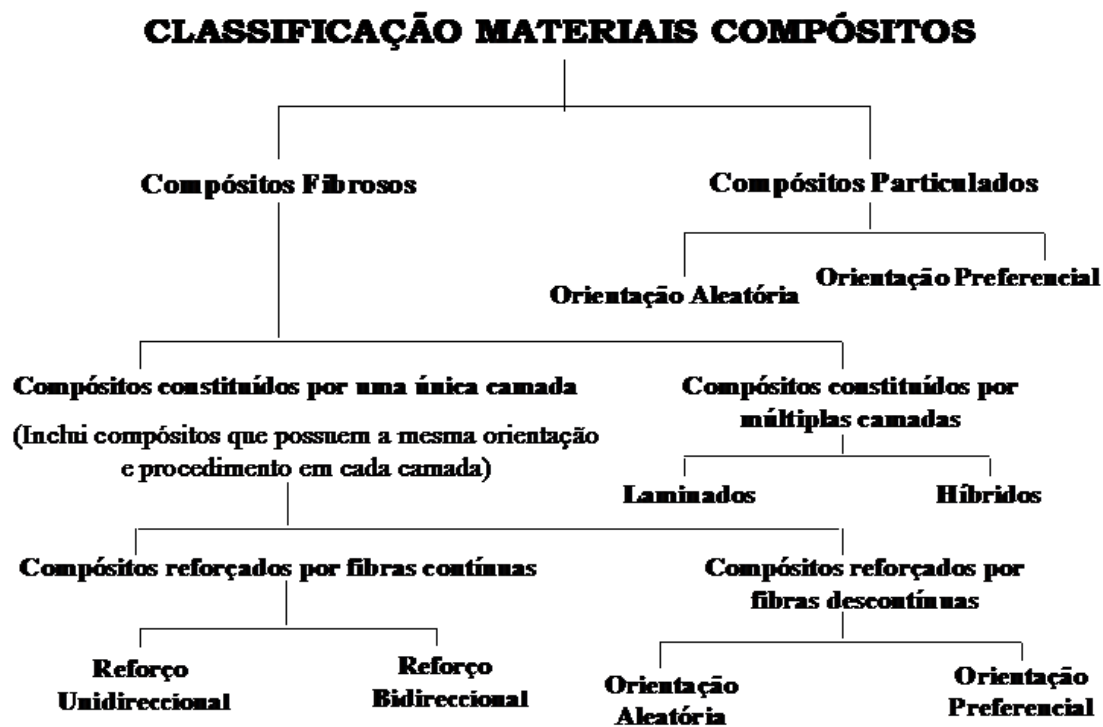


Figura 8- Organograma da classificação dos materiais compósitos

Tal como foi referido na introdução, um material compósito pode ser considerado composto por dois ou mais materiais. A sua finalidade é combinar dois ou mais materiais diferentes (geralmente uma fibra com uma resina), obtendo assim um novo material com efeitos sinérgicos superiores em alguns aspectos às propriedades de cada um dos materiais isolados. Os constituintes dos materiais compósitos estão geralmente arrançados de forma a que uma ou mais fases descontínuas estejam inseridas numa fase contínua. A fase descontínua é designada de reforço e a fase contínua é a matriz. Geralmente, os materiais de reforço apresentam maior rigidez e tenacidade que a matriz. Pode-se ter um reforço sob a forma de partículas, um reforço de fibras ou então uma estrutura laminada compostas por dois ou mais materiais distintos.



Figura 9- Tipos de reforço [2.3]

Em relação às partículas que servem de reforço, geralmente são não fibrosas procurando conferir resistência à deformação da matriz, devido à sua elevada dureza relativamente à matriz. Por outro lado, quando se trata de elastómeros, consegue-se uma boa melhoria no que toca ao aumento da resistência à fractura, suportando muito melhor as cargas aplicadas. Assim, a utilização de um reforço por partículas permite obter um bom aumento da rigidez na matriz polimérica, no entanto, estas contribuem muito pouco para o aumento da resistência mecânica.

A maioria dos materiais compósitos são reforçados por fibras, sendo que as principais são as fibras de vidro, carbono, aramida, boro, poliamidas, poliésteres, amianto, etc. As características mais relevantes dos compósitos reforçados com fibras são uma boa relação entre resistência mecânica e peso próprio.

As propriedades de um material compósito estão, obviamente, dependentes dos materiais constituintes, bem como a forma em como se encontram dispostos e respectiva interacção entre eles, concentração de materiais, tamanho e distribuição. De acordo com a figura representada na página seguinte, para a compreensão de um

material compósito, é necessário ter em conta a fracção volumétrica de cada constituinte, da geometria, distribuição e orientação do material de reforço.

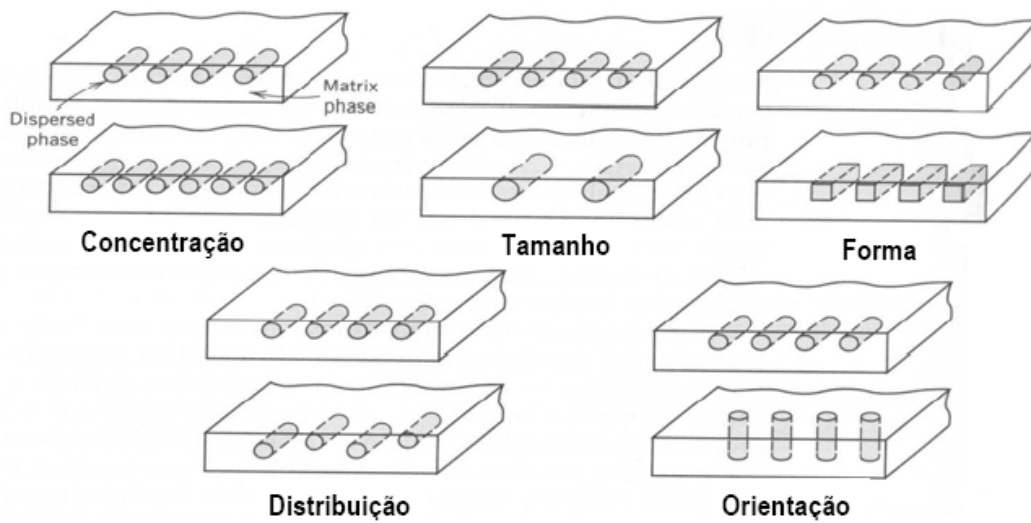


Figura 10- Concentração, tamanho, forma, distribuição e orientação das fibras na matriz [2.3]

A concentração do material de reforço é geralmente considerada como o parâmetro que mais influencia as propriedades de um material compósito. Além disto, esta é uma variável que pode ser facilmente controlada e alterada, de forma a ser possível obter as propriedades mecânicas desejadas.

É importante ter em conta que materiais tradicionais, nomeadamente os metais, são materiais isotrópicos e homogêneos, apresentando uniformidade de propriedades mecânicas em todas as suas direcções. Tal não acontece com os materiais compósitos, que geralmente não se apresentam como homogêneos nem isotrópicos, sendo na sua generalidade materiais anisotrópicos ou ortotrópicos.

2.2 Estruturas *Sandwich*

Quando duas camadas de material estão separadas por um outro material, as três camadas formam uma estrutura do tipo *sandwich*.

Este tipo de estruturas, consistem em duas camadas exteriores que se apresentam como finas, rígidas e resistentes, sendo separadas por um núcleo leve e flexível. Pela figura abaixo representada, pode-se verificar o esquema de uma estrutura compósita *sandwich*.

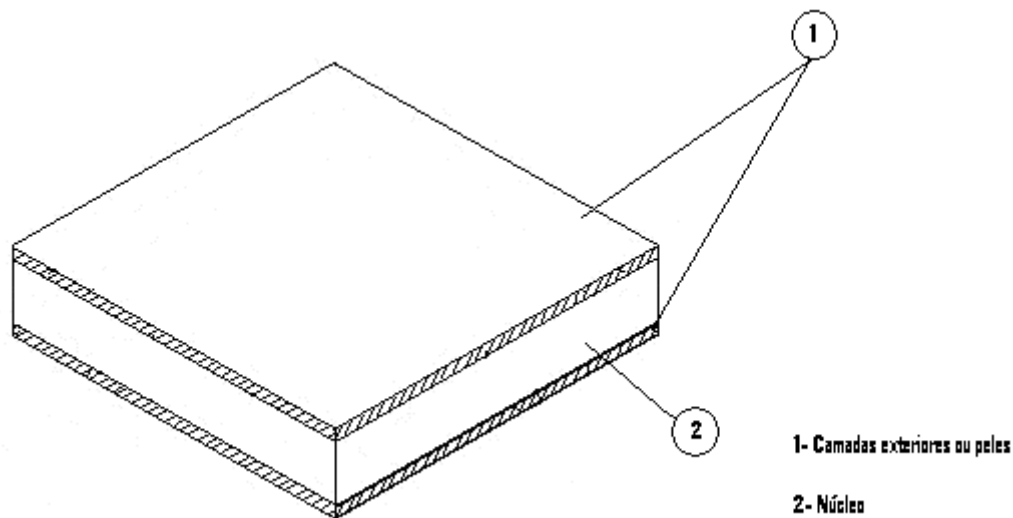


Figura 11- Composição de uma estrutura *sandwich*

Nos dias de hoje este tipo de estruturas tem inúmeras aplicações, nomeadamente na indústria naval, aeroespacial, etc. As estruturas *sandwich* apresentam as seguintes propriedades [2.4]:

- Elevado rácio entre rigidez e peso;
- Elevado rácio entre resistência e peso;
- Excelentes propriedades de fadiga;
- Bom isolamento térmico e acústico;
- Boa resistência à corrosão;
- Grande capacidade de absorver energia;
- Apresentam capacidades multifuncionais.

2.3 Cortiça [2.5]

A cortiça- matéria-prima única que a natureza nos oferece- é um produto ecológico por excelência, inerte, inócuo e com enorme resistência à degradação.



Figura 12- Sobreiro [2.5]

A cortiça é um material orgânico, extraído do sobreiro, sendo por isso a sua produção uma obra da natureza, apenas com benefícios ambientais. Desde há muitos anos tem sido utilizada na indústria naval, indústria do calçado, indústria aeroespacial e claro, nas rolhas das garrafas de vinho, assim como revestimentos.



Figura 13- Cortiça virgem empilhada [2.5]

2.3.1 Propriedades da cortiça

A cortiça é um material que é utilizado em diversos fins devido às suas propriedades. Possui propriedades únicas que nenhum outro produto, seja natural ou artificial, conseguiu até hoje igualar ou ultrapassar:

- Baixa densidade
- Boa estabilidade química
- Impermeável a líquidos e gases
- Bom isolante térmico / acústico
- Resistente ao fogo, não liberta gases
- Baixa condutibilidade eléctrica
- Óptima capacidade de absorção de energia
- Grande coeficiente de fricção
- Elevada elasticidade
- Boa compressibilidade
- Boa flexibilidade

As propriedades de leveza, flexibilidade, elasticidade, compressibilidade e impermeabilidade resultantes da sua estrutura celular e da sua composição química afirmam-na como vedante de excelência [2.5].

2.3.2 Estrutura e composição química da cortiça

A cortiça é formada por células que estão agrupadas numa estrutura alveolar característica. Devido ao facto das células das paredes paralelas à direcção radial possuírem uma disposição aleatória considera-se, em primeira análise, que a cortiça é um material transversalmente isotrópico, o que leva a que seja considerado que as orientações perpendiculares ao eixo radial são aproximadamente equivalentes.

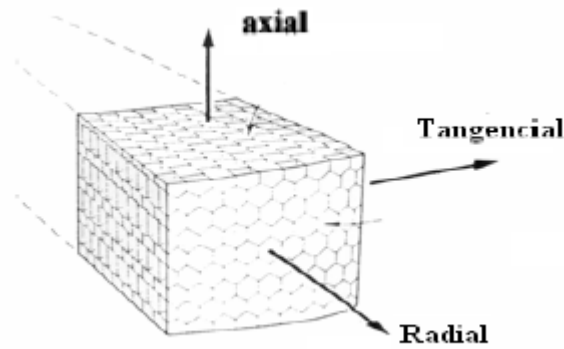


Figura 14- Estrutura celular e eixos de referência [2.7]

Num centímetro cúbico da cortiça contam-se cerca de 40 milhões de células dispostas em fiadas perpendiculares ao tronco de sobreiro. É constituída por 45% de suberina, que é o componente principal das paredes das células de cortiça responsável pela sua elasticidade; 27% de lenhina, que é o elemento isolante; 12% de polissacáridos, que contribuem para a definição da textura; 6% de taninos, que é um composto que garante a cor da cortiça e os restantes 5% são os ceróides, são compostos por minerais, água, glicerina e outras substâncias sendo responsáveis pela impermeabilidade da cortiça [2.6].

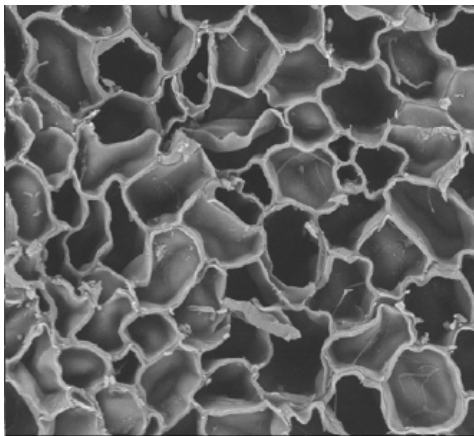


Figura 16- Estrutura celular cortiça [2.7]

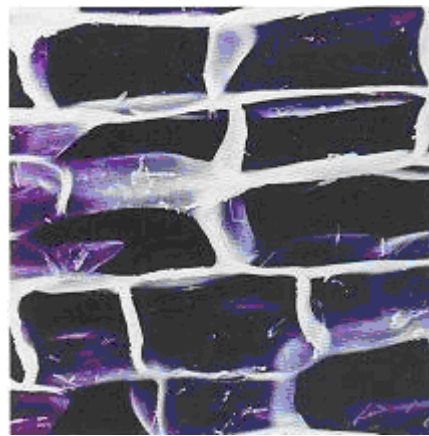


Figura 15- Estrutura celular [2.5]

Como se pode verificar pela figura que acima se apresenta no lado direito, todas estas células são preenchidas por uma mistura de gases semelhantes. Uma placa de cortiça pode atingir cerca de 60% de espaços vazios, o que explica a sua baixa densidade [2.7]. É esta combinação de células/elementos gasosos que concede à cortiça uma elevada compressibilidade. Devido à impermeabilidade que os ceróides concedem

à cortiça faz com que este seja um material hermético, ou seja elementos gasoso contidos no seu interior ficam retidos. Esta propriedade explica a elevada elasticidade e má condutibilidade térmica.



Figura 17- Granulado de cortiça [2.5]

2.3.3 Propriedades mecânicas da cortiça

Para este trabalho, procura-se utilizar a cortiça fundamentalmente pela sua boa capacidade de absorver energia, contando através da sua utilização, melhorar o comportamento mecânico de um material compósito, quando sujeito ao impacto. Além disso, a cortiça é um material reciclável, o que permite proteger o ambiente. As suas propriedades mecânicas são apresentadas na seguinte tabela:

Tabela 1- Propriedades mecânicas da cortiça

Propriedade	Valor Calculado	Valor Medido
$E_1=E_2$	15 MPa	13 ± 5 MPa
E_3	20 MPa	20 ± 7 MPa
ν_{12}	1,0	0,25 – 0,50
$\nu_{23} = \nu_{13}$	0	0 – 0,10
Tensão limite colapso $_{1-2}$	1,5 MPa	$0,7 \pm 0,2$ MPa
Tensão limite colapso $_3$	1,5 MPa	$0,8 \pm 0,29$ MPa
Densidade	1150 kg/m ³	400– 1500 kg/m ³
G_{12}, G_{21}	4 MPa	$4,3 \pm 1,5$ MPa
$G_{13}, G_{31}, G_{23}, G_{32}$	-	$2,5 \pm 1,0$ MPa

A cortiça é um material com comportamento linear elástico apenas até ser atingido 7% da sua deformação, e em seguida comporta-se como um material não linear elástico. Através da figura abaixo representada, onde se apresenta a curva tensão-deformação à compressão da cortiça, pode-se dizer que até 7% da sua deformação, as células mantêm a sua estrutura hexagonal. Ao ultrapassar este valor, estas colapsam, ocorrendo a fase da compactação e fazendo com que a sua estrutura seja destruída e tenha um comportamento não linear elástico. Através da mesma figura, pode-se verificar que uma boa quantidade de energia é absorvida quando a cortiça é submetida à compressão.

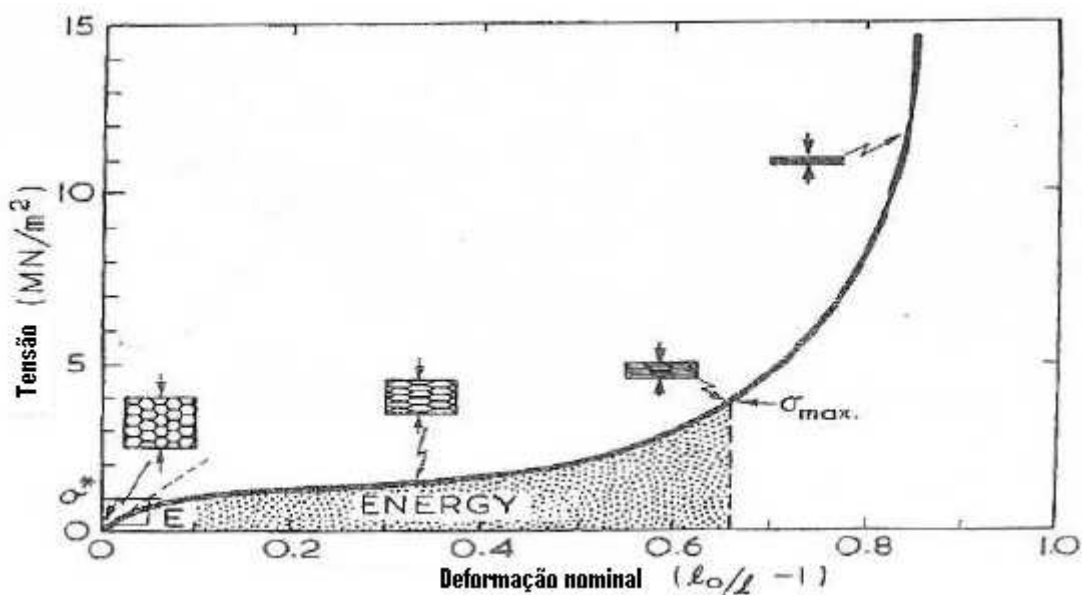


Figura 18- Curva Tensão- Deformação da cortiça à compressão [2.8]

Comparando a cortiça à compressão e tracção, a cortiça quando é submetida à tracção possui um comportamento um pouco diferente verificando-se que o módulo de Young à compressão é bastante menor do que à tracção. Tal diferença pode ser explicada devido à rigidez das paredes onduladas, que vai aumentando à medida que a ondulação diminui. Assim, ao traccionar-se a cortiça, leva a uma diminuição de ondulação, enquanto ao comprimir-se ocorre um aumento de ondulação [2.9].

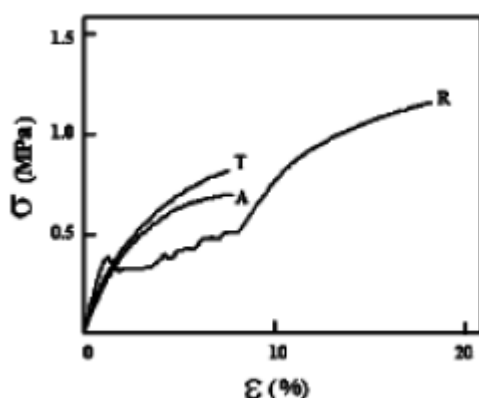


Figura 19- Curvas Tensão- Deformação carecterísticas da cortiça no ensaio de tracção [2.9]

2.4 Fibras de reforço [2.10;2.11]

Um material compósito reforçado por fibras e constituído por fibras contínuas ou fibras curtas, suspensas numa matriz. As geometrias de reforço habitualmente utilizadas nos materiais compósitos são distinguidas como:

- Configuração unidireccional,
- Configuração em forma de tecido,
- Configuração em forma de manta

As configurações unidireccionais são formadas por fibras dispostas paralelamente umas às outras; nos tecidos, existe um entrecruzamento de bandas unidireccionais de fibras longas segundo duas direcções, em geral perpendiculares correspondendo a massas por unidade de superfície entre os 50 e 800 g/m²; as mantas são constituídas pela aglutinação, segundo direcções aleatórias, de feixes de fibras curtas ou longas, sendo por isso necessária a utilização de um ligante fraco e as massas por unidade de superfície varia entre 30 e 600 g/m².

As fibras podem ser divididas do ponto de vista geométrico:

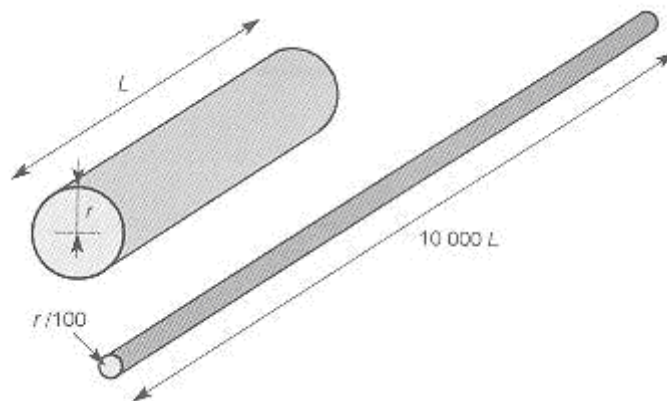


Figura 20- Classificação do ponto de vista geométrico das fibras [2.11]

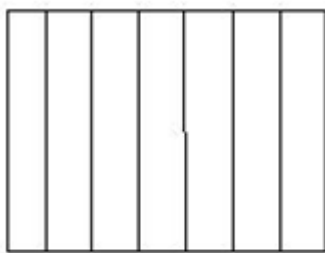
- **Fibras Curtas:** Este tipo de fibras possui relações de comprimento-diâmetro na ordem de $5 < l/d < 1000$, em que os diâmetros rondam valores de 0,02 a 100 μm .

No caso da utilização de fibras curtas, o efeito de transmissão de solicitação por parte da matriz polimérica é bem mais relevante do que no caso da utilização de fibras contínuas. Este tipo de compósitos surge com elevada importância, pois são capazes de suportar solicitações mais elevadas.

- **Fibras Contínuas:** Este tipo de fibras é caracterizado pelo elevado comprimento em relação ao diâmetro. Estas fibras são geralmente mais resistentes e rígidas que material em bruto. O seu diâmetro encontra-se situado entre valores de 3 a 200 μm , dependendo do tipo de fibra.

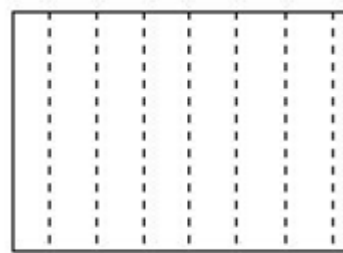
Na utilização de fibras compridas, ocorre transferência de carga para as fibras, de acordo com a sua orientação. Nestes casos, a principal função da matriz não é suportar solicitações, mas sim manter as fibras unidas.

É comum a utilização de compósitos com reforço de fibras contínuas em camadas unidireccionais. Este tipo de compósitos apresenta uma grande resistência mecânica, no caso da solicitação ser aplicada na direcção da orientação das fibras, mas resistência muito baixa, se a solicitação for perpendicular à orientação das fibras.



Fibras contínuas

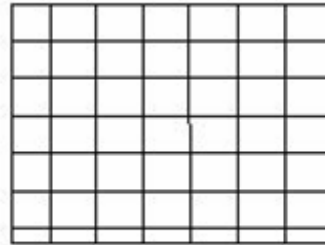
Figura 21- Fibras contínuas longas



Fibras curtas orientadas

Figura 22- Fibras curtas orientadas unidireccionalmente

De forma a conseguir equilibrar as propriedades mecânicas de um material compósito, de acordo com a direcção da solicitação, pode-se utilizar reforço de fibras contínuas orientadas bidireccionalmente.



Bidireccionais

Figura 23- Fibras bidireccionais

Quando as várias camadas são idênticas, são denominados por laminados; no caso de existirem camadas formadas por materiais diferentes, são conhecidos como laminados híbridos. O desempenho mecânico de um material laminado é distinto de uma lâmina isolada. No entanto, o comportamento global do laminado depende das propriedades individuais de cada lâmina que o constitui, bem como da sequência de empilhamento das camadas

Dentro do tipo de fibras utilizados, a fibra de vidro apresenta elevada importância, devido ao seu baixo custo. Porém, fibras de boro, grafite ou aramidas são de utilização bastante interessante, devido a sua elevada rigidez. Devido às pequenas dimensões das suas secções, é impossível a utilização isolada de fibras para aplicações ligadas a engenharia. Deste modo, elas aparecem geralmente associadas a matrizes poliméricas que servem de ligantes entre as fibras. Por outro lado, a matriz polimérica também é responsável pela transferência das solicitações aplicadas para as fibras, bem como responsável pela sua protecção relativamente a agressões do meio envolvente.

Relativamente aos metais, este tipo de materiais compósitos apresenta melhores valores de módulo e resistência específica. No entanto, relativamente a rigidez, ou propriedades absolutas, apresentam valores inferiores.

2.4.1 Tipos de arquitectura de tecido de uso corrente [2.12]

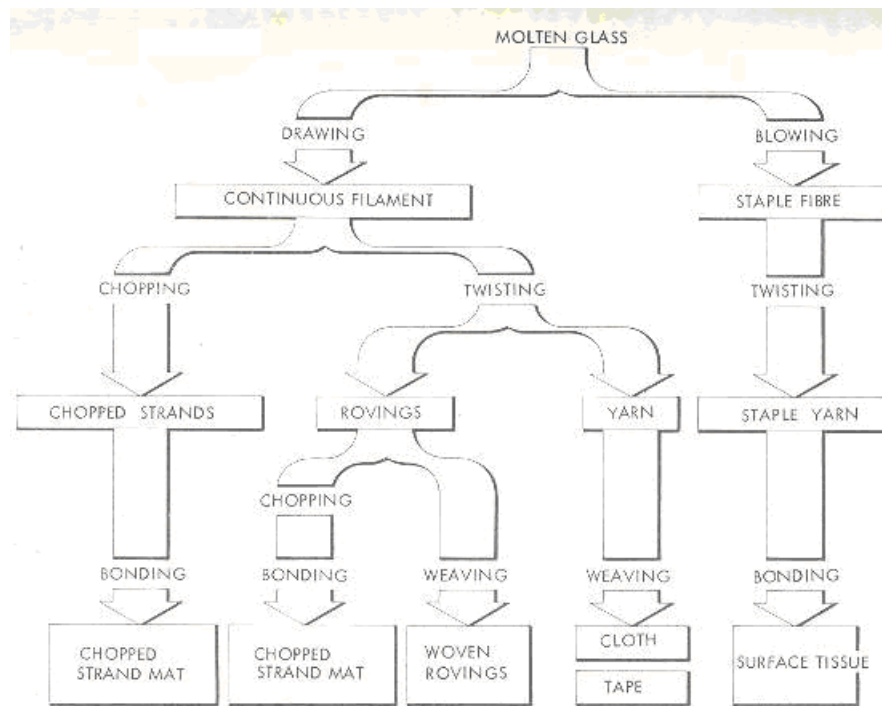


Figura 24- Arquitectura da fibra de vidro [2.12]

Tecido unidireccional- Nesta configuração, o tecido é mais resistente na direcção dos filamentos principais.



Figura 25- Tecido unidireccional [2.12]

Plain Weaving- Este tipo de tecido é simétrico, possui boa estabilidade e uma porosidade razoável. No entanto é dos tipos de tecido mais difíceis de moldar a superfícies curvas, e devido a uma elevada ondulação das fibras, leva a que as suas propriedades mecânicas sejam inferiores quando comparados a outras configurações de tecido.



Figura 26- Plain Weaving [2.12]

Twill Weaving- Este tipo de configuração permite obter uma molhabilidade e capacidade de se moldar a superfícies curvas superior ao anterior, sofrendo apenas uma pequena redução a nível de estabilidade. Devido a uma ondulação inferior das fibras, esta configuração permite obter superfícies mais macias e propriedades mecânicas mais elevadas.



Figura 27- Twill Weaving [2.12]

Satin Weaving- Esta configuração é idêntica à anterior, modificada de forma a que ocorram um menor número de intersecções entre fibras. Este tipo de configuração é muito plano e a baixa ondulação das fibras produz boas propriedades mecânicas. Possui elevada molhabilidade e capacidade de ser moldada a superfícies curvas. Apresenta como desvantagens, a baixa estabilidade e assimetria.



Figura 28- Satin Weaving [2.12]

Mock Leno Weaving- Este tipo de tecido apresenta a característica de os filamentos se agruparem e entrelaçarem três a três, como se pode ver pela figura seguinte.

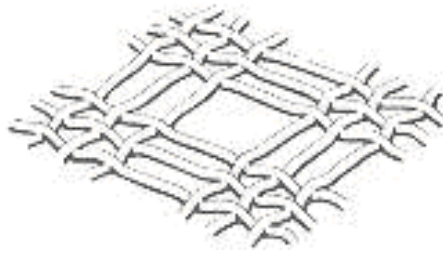


Figura 29- Mock Leno Weaving [2.12]

2.4.2 Fibras de carbono

As fibras de carbono dividem-se em dois tipos consoante a percentagem de carbono. Entre 80 a 95% de carbono são designadas por fibras de carbono propriamente ditas e se a percentagem de carbono for até 99% são designadas de fibras de grafite [2.13].



Figura 30- Fibra de carbon [2.13]

As propriedades das fibras de carbono são:

- Boas propriedades refractárias
- Boa resistência física e química mesmo a elevadas temperaturas
- Fibras de grafite utilizadas em compósitos de elevados desempenho
- Componentes para a indústria aeronáutica aeroespacial e automóvel

2.4.3 Fibras de vidro

As fibras de vidro incluem-se na classe das fibras sintéticas, sendo hoje em dia do tipo de fibras mais utilizadas e também as mais baratas.



Figura 31- Fibra de vidro [2.13]

Os materiais compósitos que utilizam fibra de vidro como reforço apresentam as seguintes características favoráveis [2.13]:

- Elevada razão resistência/peso
- Boa estabilidade dimensional
- Boa resistência ao calor, baixas temperaturas, humidade e corrosão
- Boas propriedades de isolamento eléctrico

Neste trabalho experimental recorreu-se ao uso da fibra de vidro Rovicore®. Este é um tipo de reforço do tipo sandwich, constituída por uma alma não tecida camadas de fibra de vidro, que podem ser em tecido ao dispostas ao acaso sem ligação química. O aspecto deste tipo produto está representado na seguinte figura.

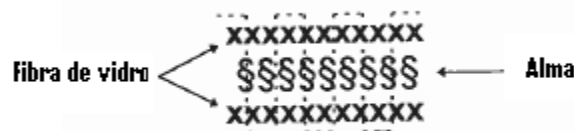


Figura 32- Constituição do Rovicore®

O Rovicore® utilizado no INEGI, tem a seguinte referência 300/D3/300, em que 300 é referente à gramagem da fibra das camadas exteriores e o D3 é a gramagem da alma, que foi de 180g/m².

2.5 Matriz

Como matriz, as resinas existentes são denominadas de termoendurecíveis ou termoplásticas. Os compósitos de matriz polimérica são dos materiais compósitos que apresentam uma maior facilidade de fabrico, independentemente das resinas utilizadas serem termoplásticas ou termoendurecíveis. Isto acontece uma vez que as temperaturas necessárias para o processamento de uma matriz polimérica são relativamente baixas.

Ao ser escolhida a resina, deve-se ter em conta as seguintes características:

- Capacidade de adesão
- Propriedades mecânicas
- Resistência à micro-fissuração
- Resistência à fadiga
- Degradação devido ao contacto com água

Para que a resina consiga transmitir ao material compósito todo o seu potencial, em termos de propriedades mecânicas, é necessário que haja uma boa impregnação das fibras e do material da matriz.

2.5.1 Matriz de resina termoendurecível

Entre as resinas termoendurecíveis destacam-se as resinas de epóxido, fenólicas e os poliésteres, tendo a particularidade das moléculas formarem estruturas tridimensionais bastante rígidas [2.14].

A utilização deste tipo de resinas surge como vantajoso a nível de processamento devido aos seguintes pontos:

- Processamento mais fácil, uma vez que a resina encontra-se inicialmente em estado líquido,
- Melhor molhabilidade das fibras, reduzindo o nível de porosidade e existência de vazios,
- Requisitos de pressão e temperatura inferiores às termoplásticas, tornando o processamento menos custoso e permitindo poupanças energéticas,
- Fáceis de maquinar.

Como desvantagens apresentam:

- Ciclos de cura compridos, levando a menores cadências de produção;
- Após curada e solidificada, e impossível a alteração da sua forma;
- Dificuldade a nível de reciclagem.

Na tabela abaixo representada, encontram-se alguns valores relativos à temperatura máxima de uso de resinas termoendurecíveis:

MATERIAIS	Temperatura de uso máximo (°C)
Termoendurecíveis	
Resina Vinilester	60–150
Resina Poliéster	60–150
Resina Fenólica	70–150
Resina de Epóxido	80–215
Resina Ciano-éster	150–250
Resina Bismaleimida	230–320

Figura 33- Temperatura máxima de uso de resinas termoendurecíveis [2.14]

Nas figuras apresentadas abaixo, apresenta-se uma comparação entre vários tipos de resinas termoendurecíveis, demonstrando a influência das condições de cura nas propriedades mecânicas da resina.

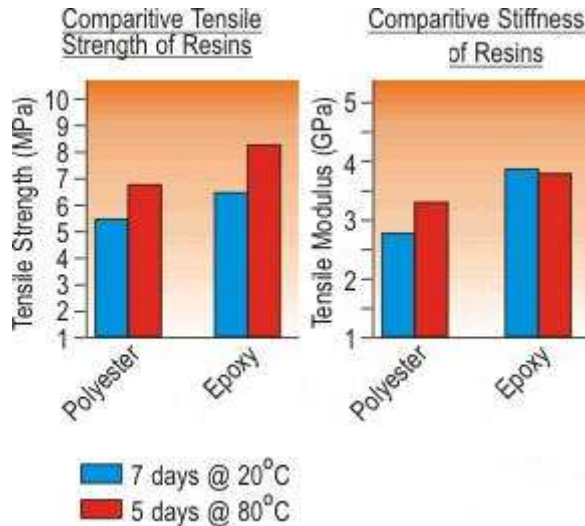


Figura 35- Comparação entre as resinas polyester e de opóxido em termos de rigidez e tensão de rotura [2.14]

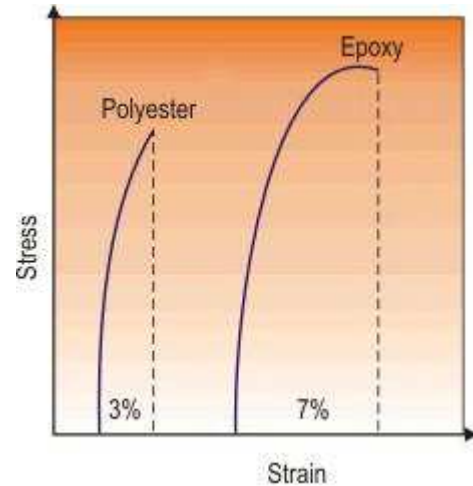


Figura 34-Comparação entre as resinas de epóxido e polyester quanto a Tensão-Deformação [2.14]

As resinas de epóxido apresentam boa capacidade de impregnação, relativamente a outros tipos de resinas. Além do mais, as resinas de epóxido têm uma baixa variação dimensional quando se efectua a sua cura, não havendo qualquer espécie de perturbações entre as interfaces em contacto com a resina líquida enquanto se efectua a cura. A variação dimensional das resinas durante o processo de cura está geralmente associada ao aparecimento de tensões internas, que podem prejudicar as propriedades mecânicas do compósito.

Por outro lado, as resinas de epóxido apresentam boas propriedades mecânicas e rigidez, sendo o processo de cura também determinante para as propriedades.

2.5.2 Matriz de resina termoplástica

Quanto às resinas termoplásticas, nos últimos 10-15 anos, estas têm vindo a ser desenvolvidas para se aumentar e estabilizar o uso recorrente a este tipo de matriz. Possuem valores baixos de rigidez, variando entre 1-3 GPa e as densidades entre 0,9-1,4 g/cm³. O maior interesse deste tipo de resina, reside na potencialidade de reciclagem de termoplásticos [2.13].

Assim, as resinas termoplásticas apresentam as seguintes características:

- Recicláveis;
- Boa resistência ao impacto;
- Boa tenacidade;
- São facilmente processados por injeção ou termoformação;
- Não necessitam de cura;
- Tendência reduzida para a delaminação.

Na tabela abaixo representada, encontram-se alguns valores relativos à temperatura máxima de uso de resinas termoplásticas:

MATERIAIS	Temperatura de uso máximo (°C)
Termoplástica	
Poliétileno (PE)	50–80
Polipropileno (PP)	50–75
Acetal (POM)	70–95
Poliâmida (PA S)	75–100
Poliéster	70–120
PPS	120–220
PEEK ®	120–250
Teflon ®	200–260

Figura 36- Temperatura máxima de uso de resinas termoplásticas [2.14]

2.6 Impacto em materiais compósitos

O impacto é um problema ao qual os materiais compósitos estão sujeitos, e para estes terem um bom desempenho é necessário saber como reagem a impactos de baixa velocidade, ou baixa energia, assim como a impactos de alta velocidade.

Um material compósito quando é submetido a uma solicitação que possa provocar impacto, pode não ter um comportamento que é esperado e desejado. As estruturas *sandwich* têm vindo a ser optimizadas e a compreensão dos mecanismos de tolerância ao dano ganharam uma grande importância, podendo com estes avanços a estrutura ganhar uma durabilidade e resistência superiores.

Tolerância ao dano pode ser referida como a capacidade de uma estrutura aguentar várias solicitações depois de vários tipos de impacto, como por exemplo, queda de objectos, impacto de projecteis, etc., podendo estar também relacionada com a capacidade que uma estrutura tem de absorver energia [2.15].

Normalmente, quando se refere ao impacto em materiais compósitos, este é dividido em impacto a baixa e alta velocidade.

O impacto a baixa velocidade causa dano num material compósito, sendo considerado muito perigoso. Perigoso, pelo dano que é imposto na estrutura e pelo facto de, por vezes, não ser detectado por inspecção visual e ao passar despercebido pode levar a estrutura a falhar em serviço.

Em relação ao ensaio para testar a resistência ao impacto, há três ensaios que são muito populares, sendo o Charpy, o Izod e a queda livre de um peso.



Figura 37- Ensaio Charpy

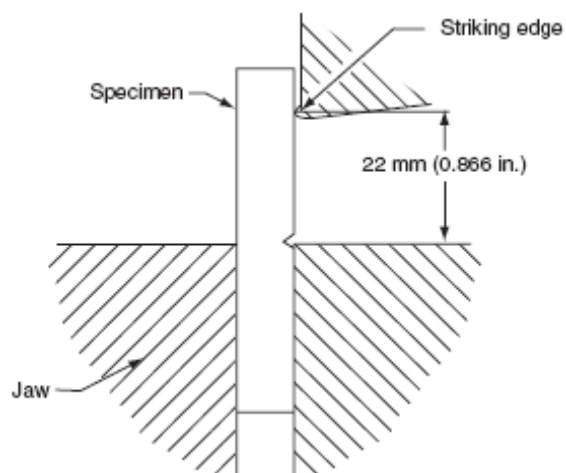


Figura 38- Ensaio Izod [2.14]

Neste trabalho, foi escolhida a queda livre de um peso sobre o material que será adoptado como ensaio a seguir. Na figura abaixo representada, encontra-se o ensaio a adoptar para realizar os testes, podendo variar a forma do impactor. Este pode ser pontiagudo como apresenta a figura 38 (a) ou mais arredondado como se tem em 38 (b).

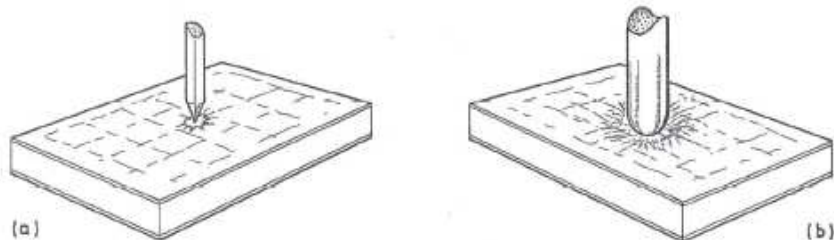


Figura 39- Queda livre de um peso [2.15]

2.6.1 Impacto a baixa e alta velocidade

Através de Gabriella Faur-Csukst, no seu artigo de estudo de materiais compósitos [2.16] em balística, no impacto a baixa velocidade o período de contacto do projectil é maior que o período de tempo do modo vibracional mais baixo do material, havendo uma resposta estrutural do componente e provocando uma extensa área de dano enquanto que, a alta velocidade a resposta é caracterizada pelo comportamento local e nas redondezas da zona de impacto, como por exemplo a furação, sendo que a resposta ao impacto é independente das condições de fixação. O tempo de contacto do projectil no impacto a alta velocidade é muito baixo e é menor que o período do modo vibracional mais baixo da estrutura.

Em termos gerais, considera-se impacto de baixa velocidade como sendo um evento quase-estático, em que as velocidades podem variar desde 1 m/s a 100 m/s, consoante a rigidez do impactor. A nível de efeitos estruturais, geralmente causa dano a uma grande extensão, sendo acompanhada por uma resposta estrutural do componente.

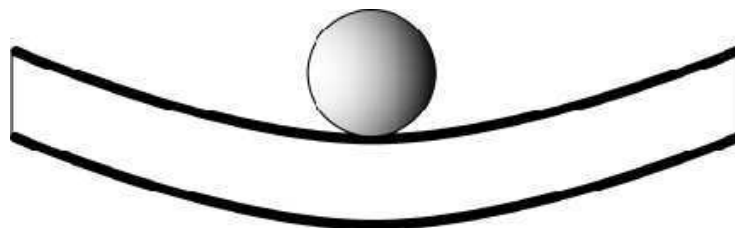


Figura 40- Resposta típica de um impacto a baixa velocidade [2.15]

Por sua vez, impactos de alta velocidade são definidos como aqueles que atingem velocidades superiores a 1 km/s. Devido às elevadas velocidades envolvidas neste tipo de ensaio, a estrutura do componente mostra-se incapaz de conseguir dar resposta à onda de tensão que se propaga pelo material, originando um dano local. No que diz respeito aos materiais compósitos, os valores referenciados como limites e aceitáveis de velocidade estão entre os 10 m/s e 20 m/s.

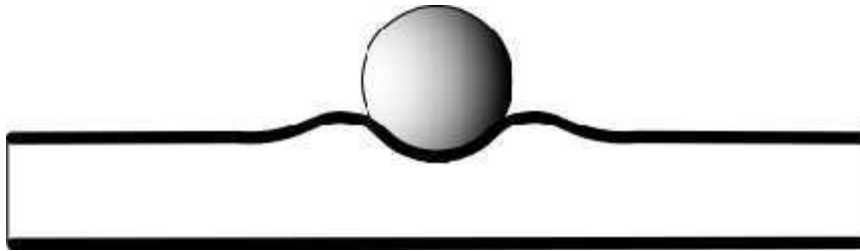


Figura 41- Resposta típica de um impacto a alta velocidade [2.15]

Mas, há quem considere que o tipo de impacto deva ser considerado e classificado conforme a forma de dano provocado. Esta classificação, foi adoptada nas suas investigações por Liu et al [2.17], assim como Joshi et al [2.18], considerando-se que no impacto a alta velocidade o dano é caracterizado pela penetração, originada pela quebra das fibras, enquanto no impacto a baixa velocidade ocorre delaminação e quebra da matriz.

2.6.2 Tipos de dano em estruturas *sandwich*

Os impactos de baixa velocidade podem causar danos consideráveis à estrutura do material compósito, reduzindo assim a sua capacidade de carga. O seu estudo permite ter uma noção da tolerância ao dano que o compósito admite. Os danos causados por este tipo de impacto podem surgir sobre a forma de fissuras, delaminação e quebra das fibras nas zonas circundantes ao local de impacto, como se pode ver na figura seguinte [2.11].

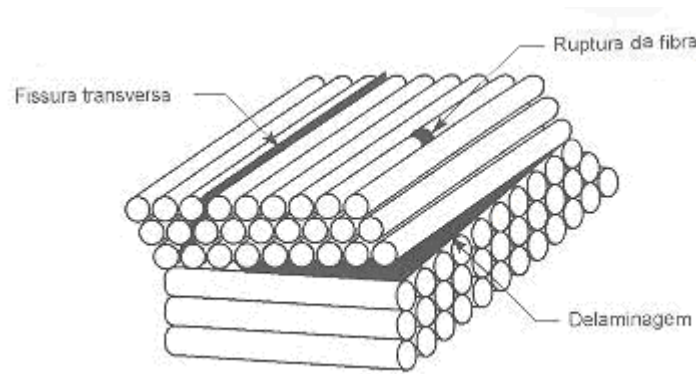


Figura 42- Vários tipos de dano nas fibras [2.11]

Nas estruturas *sandwich*, o dano do impacto, pode estar confinado à face do laminado que sofreu o impacto, ou pode envolver esmagamento e/ou fissuração do núcleo.

No caso dos materiais compósitos, a delaminação é o principal factor responsável pela redução das propriedades mecânicas do material compósito. A delaminação surge como um problema importante, uma vez que habitualmente não é visível a olho nu, salvo o caso em que os materiais utilizados são transparentes ou translúcidos. Também podem surgir fissuras na matriz, no entanto estas fissuras não são responsáveis pelas diminuições drásticas das propriedades mecânicas. No entanto, acredita-se que serão a partir destas fissuras que se irá iniciar o processo de delaminação entre as camadas em contacto.

Os tipos de dano que podem ocorrer na estrutura e inviabilizar o bom funcionamento da mesma são [2.15]:

- Esmagamento das peles, devido ao esforço de compressão ser demasiado elevado para a espessura das mesmas;
- Corte nas peles, quando as peles falham nas extremidades do corpo que provoca impacto submetidos ao corte interlaminar;
- Falha das peles, nomeadamente devido à quebra das fibras ou quebra da matriz;
- Fracasso das peles na flexão;
- Esmagamento do núcleo;
- Falha do núcleo quando submetido ao corte;
- Delaminação entre o núcleo e as peles.

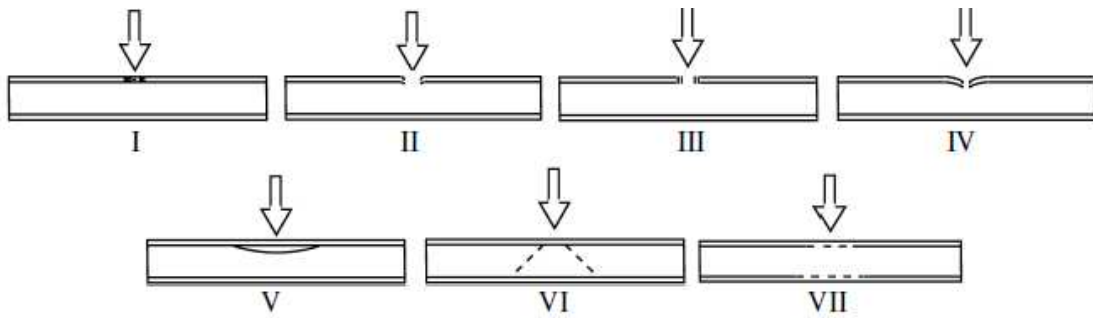


Figura 43- Tipos de danos em estruturas *sandwich* [2.15]

Pela figura acima demonstrada, podemos verificar que, os danos do tipo I, II, IV, V e VII, são tipicamente danos pontuais, enquanto em III e VI há uma resposta da estrutura devido a objectos que atingem a mesma e obrigando-a a flectir em demasia [2.15].

No que diz respeito ao ensaio de flexão, os danos que mais ocorrem nas estruturas *sandwich*, são a indentação, ruptura do núcleo e quebra das fibras das peles. Na figura seguinte estão representados estes danos provenientes do ensaio de flexão.

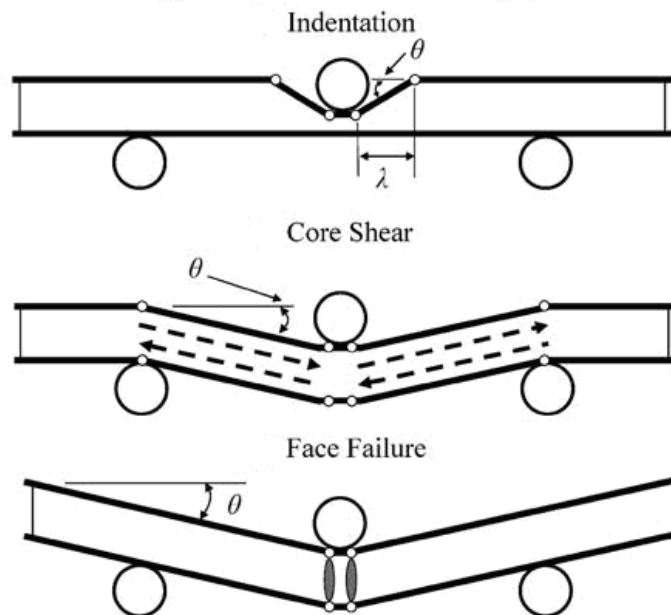


Figura 44- Danos frequentes no ensaio de flexão [2.21]

2.6.3 Caracterização do dano [2.14]

2.6.3.1 Quebra das fibras

Quando uma fenda se propaga numa direcção perpendicular a orientação da fibra, estas acabam eventualmente por quebrar. As fibras quebram quando atingem o seu limite máximo de deformação. Apesar das fibras serem responsáveis pela resistência mecânica do material, a quebra destas representa uma percentagem de energia muito baixa relativamente à quantidade de energia absorvida pelo material compósito. No entanto, há que ter em conta que a presença de fibras influencia o modo de cedência do material, e por conseguinte, a energia total absorvida, após impacto.

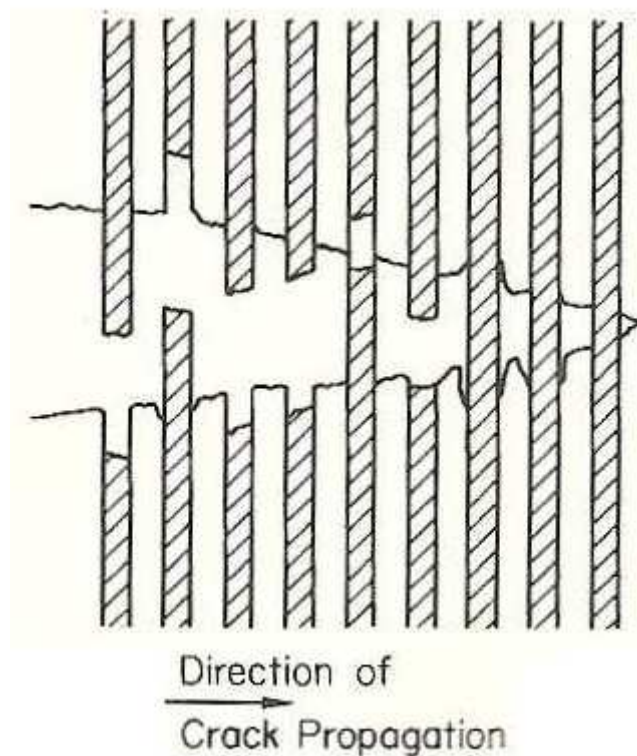


Figura 45- Quebra das fibras [2.2]

2.6.3.2 Quebra da matriz

Para ocorrer a fractura total do compósito, o material da matriz que envolve as fibras deve fracturar completamente. Apesar da absorção de energia devido à deformação e quebra da matriz, a energia absorvida por deformação plástica é consideravelmente mais elevada. Uma vez que as resinas de epóxico e poliésteres são

bastante frágeis, a quantidade de energia absorvida por estas, mediante impacto, é praticamente insignificante.

2.6.3.3 Separação entre a matriz e as fibras

Durante a fractura, pode ocorrer a separação entre a matriz e as fibras, devido à propagação paralela de fendas em relação às fibras. Neste processo, as ligações químicas ou secundárias entre as fibras e a matriz são quebradas. Este tipo de fissura ocorre quando as fibras são bastante fortes e a matriz frágil. Se este tipo de separação for extenso, vai levar a um aumento significativo da energia absorvida durante impacto. O aumento de energia absorvida pode aumentar com a diminuição da força de ligação presente nas interfaces, uma vez que tal promove delaminação e separação entre fibra/matriz.

2.6.3.4 Arrancamento de fibras

Este dano ocorre quando fibras frágeis ou descontínuas estão embebidas numa matriz de elevada resistência. Dá-se a quebra das fibras, originando uma concentração de tensões no local onde a fibra foi quebrada. Esta concentração de tensões pode ser aliviada através da cedência da matriz, evitando que esta quebre. Nesta situação, as fibras são arrancadas do interior da matriz. Este tipo de dano é diferente da separação entre a matriz e as fibras. A separação de fibra/matriz ocorre quando a fenda na matriz é incapaz de se propagar através da fibra, enquanto o arrancamento de fibra deve-se à falta de capacidade da fenda se propagar pela matriz. Os arrancamentos de fibra são geralmente acompanhados pela deformação extensiva da matriz, o que não acontece na separação entre a fibra e matriz. Apesar de estes fenómenos parecerem semelhantes por se darem na região da interface, estes acontecem mediante condições distintas.

2.6.3.5 Fendas de delaminação

Uma fenda que se propague por uma camada, pode deter-se quando atinge as fibras de uma camada adjacente. Devido às elevadas tensões de corte adjacentes à frente

da fenda, a fenda pode dividir-se e propagar-se paralelamente ao plano das camadas. Estas fendas são chamadas fendas de delaminação. A delaminação ocorre frequentemente quando os laminados são testados a flexão. Através da seguinte figura, pode-se visualizar a representação de alguns modos de cedência, que provocam delaminação.

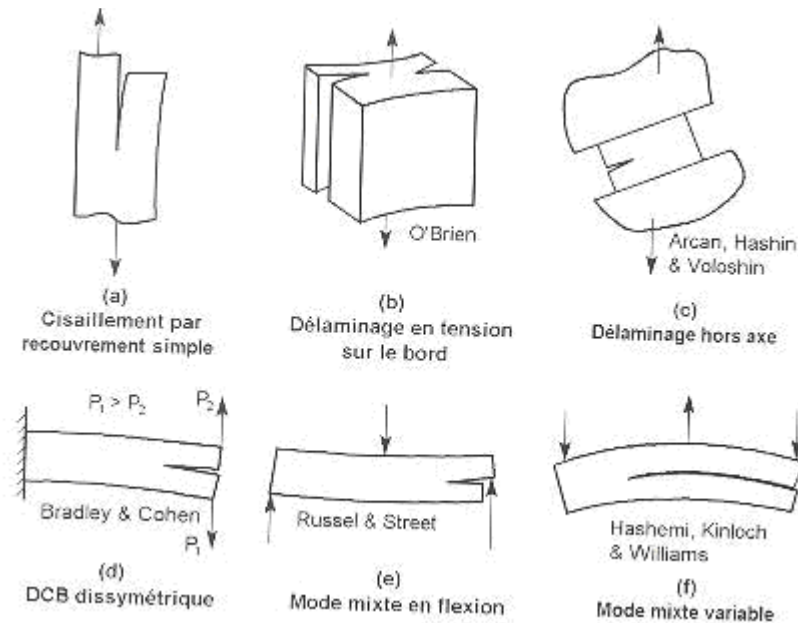


Figura 46- Alguns modos de cedência que provocam delaminação [2.11]

2.6.4 Factores de dano nas pás das turbinas eólicas

As pás das turbinas eólicas estão sujeitas a factores, atmosféricos e não só, que podem provocar danos, podendo diminuir a durabilidade deste componente e pôr em perigo a integridade da mesma. Os factores são os seguintes:

- Pedras de gelo provenientes do granizo;
- Raios de trovoadas;
- Variações de temperatura muito elevadas;
- Embate de aves e morcegos;
- Problemas de fadiga dos materiais;
- Danos durante montagem e manutenção da turbina, como embates de ferramentas e andaimes;
- Projecteis e fragmentos, etc.



Figura 47- Raios de trovoadas nas turbinas eólicas [2.22]



Figura 48- Dano devido a fadiga [2.23]

Os raios da trovoadas são os piores “inimigos” que as turbinas podem ter porque sem protecção contra os raios [2.19], as pás e a própria turbina podem ser seriamente danificadas, devido às elevadas quantidades de energia que advém deste fenómeno ambiental. Um raio de trovoadas pode levar a que a temperatura de um objecto suba até aos 30000°C e resultar numa expansão explosiva de ar contra a pá. Isto, pode causar danos sérios na superfície das pás, delaminagens, fissuras, pode derreter algum material e podem causar danos invisíveis que com o tempo podem resultar numa redução do tempo de vida da pá. Empresas fabricantes de pás de turbinas eólicas, como a LM Glasfiber® já possuem mecanismos de protecção das pás, aguentando até 98% dos ataques dos raios da trovoadas.



Figura 50- Dano proveniente do impacto de um projectil [2.24]



Figura 49- Dano provocado pela trovoadas [2.24]

2.7 Gel absorvente de energia

Nos últimos anos tem-se verificado um enorme desenvolvimento na procura e melhoramento de mecanismos de absorção de energia. A cortiça é um material que apresenta características absorventes de energia e há uma tentativa de melhoramento deste fenómeno, adicionando um gel absorvente de energia.

Com base em pesquisas recentes sobre infiltração por pressão induzida, foi demonstrado que em grandes superfícies nano porosas de materiais, estas podem ser utilizadas para amplificar o efeito capilar. Ao forçar água em partículas hidrofóbicas nano porosas de sílica, uma grande quantidade de trabalho externo pode contribuir para a tensão da interface sólido-líquido, conseguindo este mecanismo absorver muito mais energia que as espumas de polímeros e metais. O mecanismo quando solicitado por uma pressão elevada faz com que as moléculas de água se tornem móveis na matriz de gel, sendo comprimidas nos nano poros, activando o processo de absorção de energia. Na figura seguinte pode-se ver a microestrutura da matriz do gel.

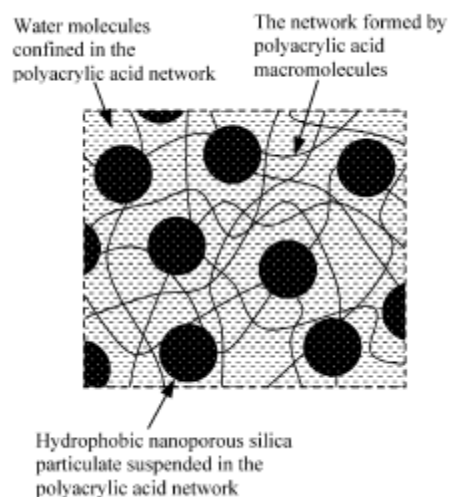


Figura 51- Esquema da microestrutura da matriz do gel [2.25]

Através de um procedimento experimental como se apresenta na seguinte figura, Yu Qiao et al. testou o gel.

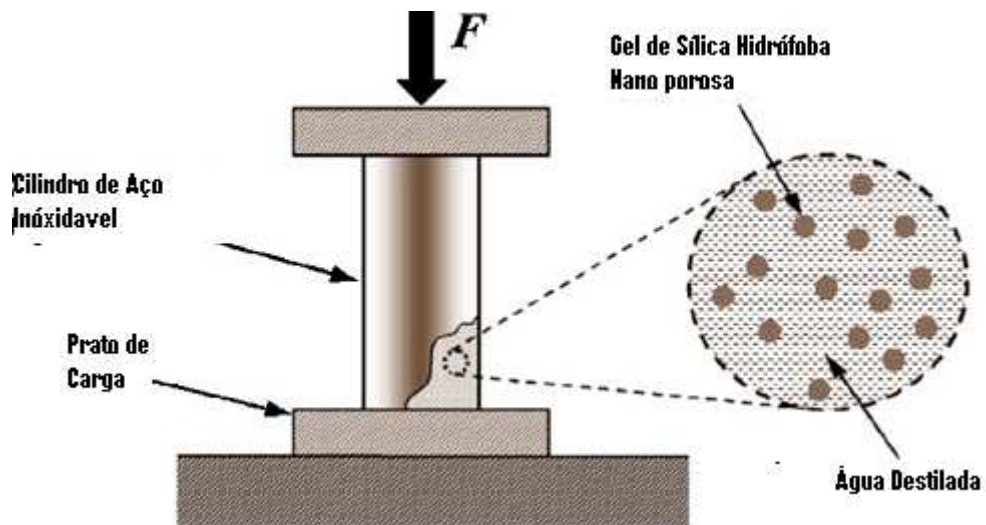


Figura 52- Esquema do procedimento experimental [2.26]

O sistema é formado por uma imersão de um material nano poroso num líquido. Devido ao efeito capilar, o líquido pode entrar nos nano poros apenas quando uma alta pressão é aplicada. Sob a pressão alta, uma vez que a grande superfície é exposta à infiltração de moléculas de líquido, uma parcela significativa do trabalho externo é convertido para a tensão da interface sólido-líquido.

Os resultados alcançados foram bastante interessantes e as figuras em baixo apresentadas traduzem isso mesmo.

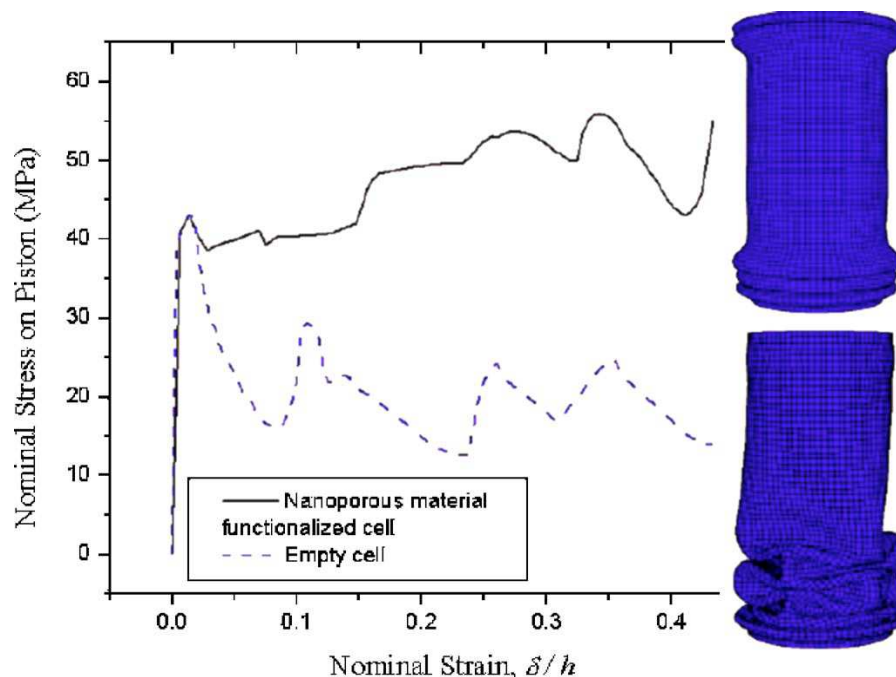


Figura 53- Gráficos comparativos de dois cilindros, sendo que um contém o gel absorvente [2.26]

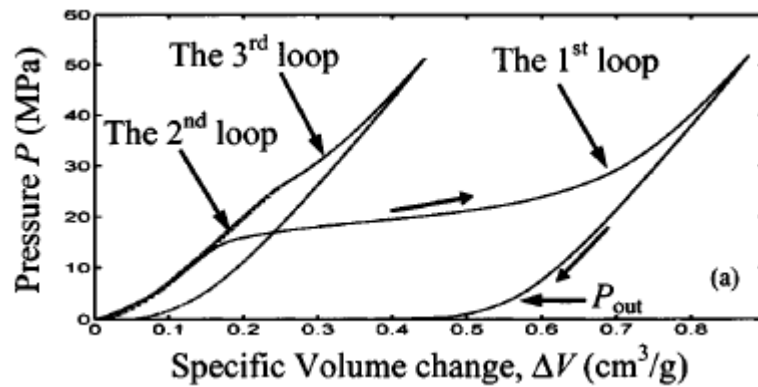


Figura 54- Curvas de pressão-volume específico

Pela figura 54, podemos ver o seguimento da pressão aquando o 1º ciclo de pressão. Após a pressão atingir 14,3MPa, a curva começa a ficar não linear, indicando que se está iniciar a infiltração por pressão induzida. Quando atinge os 27,2 MPa, a maioria dos poros já se encontram saturados fazendo com que a compressibilidade do sistema diminua rapidamente. A energia absorvida pode ser calculada como a área que se encontra abaixo do gráfico relativo ao primeiro loop. No segundo loop, o volume específico deslocado e energia absorvida são muito menores, devendo-se ao facto do resíduo líquido ocupar a maior parte do espaço poroso, antes do início da segunda infiltração.

2.8 Ensaios experimentais

A caracterização experimental passa pela determinação das propriedades do material, realizadas numa amostra com parâmetros predefinidos de acordo com o ensaio a realizar.

Os dados obtidos durante estes ensaios são tratados devidamente de forma a conseguir avaliar as suas propriedades mecânicas. Compreender o modo como o material responde, mediante uma vasta gama de solicitações, é fundamental de forma a ser possível utiliza-los. Outra utilidade da caracterização experimental passa por verificar os processos de produção mais indicados, assegurar a uniformidade do material e fazer a análise comparativa de vários tipos de materiais.

2.8.1 Ensaio de flexão

As propriedades de flexão são determinadas pela norma ASTM- Designation C393-00- Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions [2.20]. O material é solicitado através de uma flexão a 3 pontos ou a 4 pontos. Neste trabalho o método utilizado foi o ensaio de flexão em 3 pontos (ver figura seguinte do lado esquerdo) [2.20].

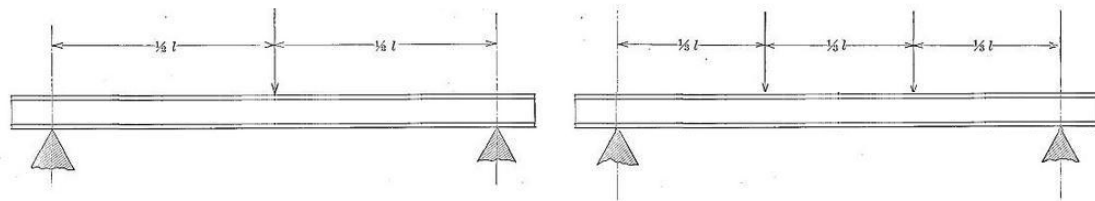


Figura 55- Esquema do ensaio de flexão em 3 e 4 pontos

A tensão à flexão dada por este tipo de ensaio é-nos fornecida através da seguinte fórmula:

$$\sigma = \frac{P_{\max} \times L}{2t(d + c)b}, \text{ onde}$$

$P_{\max}$ = carga máxima aplicada [N]

L = espaçamento entre apoios [mm]

t = espessura da pele [mm]

d = espessura da sandwich [mm]

c = espessura do núcleo [mm]

b = comprimento do provete sandwich [mm]

O módulo de flexão, para peles iguais é dado pela seguinte expressão:

$$D = \frac{E(d^3 - c^3)b}{12}, \text{ onde}$$

E = módulo das peles [MPa]

D = módulo de flexão [MPa]

2.8.2 Ensaio de impacto

As propriedades de impacto de um material representam a capacidade de absorver e dissipar energias mediante casos de impacto. Casos tão dispersos como queda accidental de ferramentas ou colisões a elevadas velocidades são considerados casos de impacto, e as suas consequências vão desde danos localizados ou a desintegração completa do material.

Os métodos utilizados para medir o comportamento ao impacto de um material são geralmente métodos destrutivos. A maneira mais comum de avaliar este tipo de propriedades, passa por determinar a resistência do material através da medição da energia necessária para quebrar um dado material com uma geometria pré-definida.

Neste trabalho o ensaio utilizado foi a queda livre de um peso.

2.8.2.1 Queda livre de um peso

O ensaio de queda livre de um peso foi o escolhido para este trabalho, pois através deste é possível testar os provetes ao impacto, verificar a sua tolerância ao dano e quantificar a absorção de energia que os provetes podem possuir. É um teste destrutivo, levando à rotura do material, não traduzindo os eventos que geralmente se verificam em situações reais de impacto de baixa velocidade. A figura que se apresenta a seguir, da norma “Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart (Tup or Falling Mass)”, [2.27] elucida o dispositivo experimental, sendo que há vários tipos de máquinas de queda livre de peso.

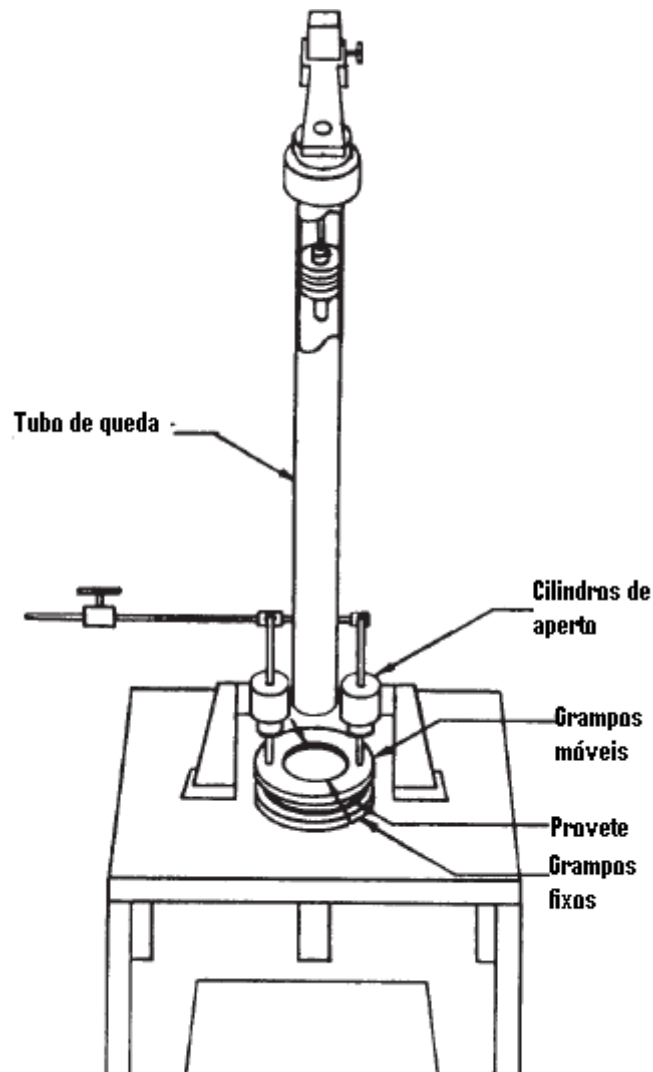


Figura 56- Tipo de máquina para queda livre de um peso
A quantificação de energia é feita através da seguinte fórmula:

$$MNE = h \times f \times w$$

onde,

MNE – MeanFailureEnergy[J]

h – altura[mm]

f – cons tan te · de · conversão · para · Joules = $9.80665\ 3 \times 10^{-3}$

w – massa · do · peso[kg]

2.8.3 Ensaio de compressão

Este tipo de teste apenas serve para obter propriedades do núcleo permitindo obter o módulo de compressão do núcleo. Este valor é um dos valores que estão tabelados em livros, e por isso permitem obter mais um valor de comparação.

O valor do módulo de compressão é dado pela seguinte expressão:

$$E = \frac{\left(\Delta P / \Delta u\right) \times t}{A}, \text{ onde}$$

P= Carga aplicada [N/mm]

A= Área [mm²]

u= deslocamento [mm]

t= espessura [mm]

2.9 Bibliografia

- [2.1] **Staab, G. H.** *Laminar Composites*. s.l. : Butterworth-Heinemann, 1999.
- [2.2] **Agarwal, Bhagwan D. and Broutman, Lawrence J.** *Analysis and Performance of Fiber Composites*. s.l. : Wiley-Interscience, 1980.
- [2.3] Universidade Federal do Rio Grande do Sul. [Online] [Cited: Abril 22, 2009.] <http://www6.ufrgs.br/lacer/cm/area3/compositos.pdf>.
- [2.4] *Localised Effects In Sandwich Structures- Modelling, Experimental Characterisation and Assessment of Failure and Fatigue Behaviour*. Aalborg : Aalborg University, Denmark, 2008.
- [2.5] **Grupo Amorim.** *A Arte da Cortiça*. Mozelos : s.n., 2008.
- [2.6] Grupo Amorim. [Online] [Cited: Fevereiro 21, 2009.] <http://www.amorim.pt/home.php>.
- [2.7] **António M. C. Moraes, Anderson C. Moreira , Carlos R. Appoloni.** *Determinação Da Porosidade Da Cortiça Através Da Metodologia De Transmissão De Raios Gama e Análise De Imagens De Microscopia Eletrônica De Varredura*. Santos : s.n., 2007.
- [2.8] **Ribeiro, C. C.** *Estudo do Processo de Fabrico de Rolhas de Cortiça*. Lisboa : Insituto Superior de Agronomia- Universidade Técnica Lisboa, 1995.
- [2.9] **Silva, S.P., et al.** *Cork: Properties, Capabilities and Applications*. 2005.
- [2.10] **Brito, Fernando J.M. Martins de.** *Comportamento Mecânico das Camadas na Construção de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica*. Porto : INEGI, 1997.
- [2.11] **Bathias, Claude.** *Matériaux Composites*. Paris : Dunod, 2005.
- [2.12] **Warring, R.H.** *The New Glass Fibre Book*. s.l. : Kings Langley, Hertfordshire : Model & Allied Publications, 1975.
- [2.13] **Brøndsted, Povl, Lilholt, Hans and Lystrup, Aage.** *Composite Materials For Wind Power Turbine Blades*. Roskilde : Annual Reviews, 2005.
- [2.14] **Dias, Dinis.** *Comportamento ao Impacto a Baixa Velocidade de Laminados de Epóxido/Fibra de Vidro, com Camadas de Cortiça*. Porto : s.n., 2009.

- [2.15] **Bull, Peter H.** *Damage Tolerance and Residual Strength of Composite Sandwich Structures*. Stockholm : KTH Aeronautical and Vehicle Engineering, 2004.
- [2.16] **Faur-Csukst, Gabriella.** *A Study on the Ballistic Performance of Composites*. s.l. : Macromol.Symp.: 217-226, 2006.
- [2.17] **Liu, D. and Malvem, L.E.** Matrix cracking in impacted glass/epoxy plates. *Journal of Composite Materials*. 1987, Vol. 21.
- [2.18] *Impact-induced fracture initiation and detailed.* **Joshi, S.P. and Sun, C.T.** s.l. : Proc.American Society of Composites, 1987.
- [2.19]. *LM Glasfiber*. [Online] [Cited: Março 17, 2009.] <http://www.lmglassfiber.com/>.
- [2.20] **ASTM.** *Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions - Designation C 393-00*.
- [2.21]**Rice, M.C., Fleischer, C.A. and Zupan, M.** *Study on the Collapse of Pin-Reinforced Foam Sandwich Panel Cores*. s.l. : Experimental Mechanics (2006) 46: 197–204, 2006.
- [2.22][Online] [Cited:Abril 1, 2009.] www.abovetopsecret.com/forum/thread424862/pg21.
- [2.23] [Online] [Cited: Abril 1, 2009.] www.aftermathnews.files.wordpress.com.
- [2.24] *Global Wind Power*. [Online] [Cited: Abril 1, 2009.] www.global-windpower.com/services-bladerepair.php.
- [2.25] **Qiao, Yu, Sperball, Lance A. and Punyamurtula, Venkata K.** *A Gel Matrix Energy Absorbing Composite Functionalized by Nanoporous Silica*. San Diego : Department of Structural Engineering, University of California, 2006.
- [2.26] **Qiao, Yu, Sperball, Lance A. and Punyamurtula, Venkata K.** *A Honeycomb Structure Enhanced by Nanoporous Material Functionalized Liquid*. San Diego : Department of Structural Engineering, University of California, 2006.
- [2.27] **ASTM.** *Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart (Tup or Falling Mass) - Designation D 5628-96*.

Capítulo 3- Estado da Arte

Os materiais compósitos têm vindo a ganhar grande relevo, devido à sua forte inclusão nas mais diversas aplicações industriais. Cada vez mais assistimos à substituição de componentes metálicos, por componentes constituídos por materiais compósitos, tendo estes uma boa performance ao nível mecânico. Indústrias como a aeronáutica, ferroviária, construções, automóvel, naval, etc. foram as que mais beneficiaram e aumento tiveram no uso de materiais compósitos.

3.1 Aplicações de materiais compósitos

3.1.1 Indústria aeronáutica

Factores importantes como a redução de peso, menor consumo de combustível, possibilidade de se alcançar maiores velocidade e a necessidade de se obter uma boa resistência à fadiga e corrosão foram os grandes impulsionadores para que a indústria aeronáutica investisse imenso em investigação para o uso de materiais compósitos como elementos estruturais. O Airbus é um excelente exemplo desta evolução.

Na figura seguinte pode-se verificar a cronologia no que diz respeito à progressiva introdução de compósitos no fabrico de um Airbus. [3.1]

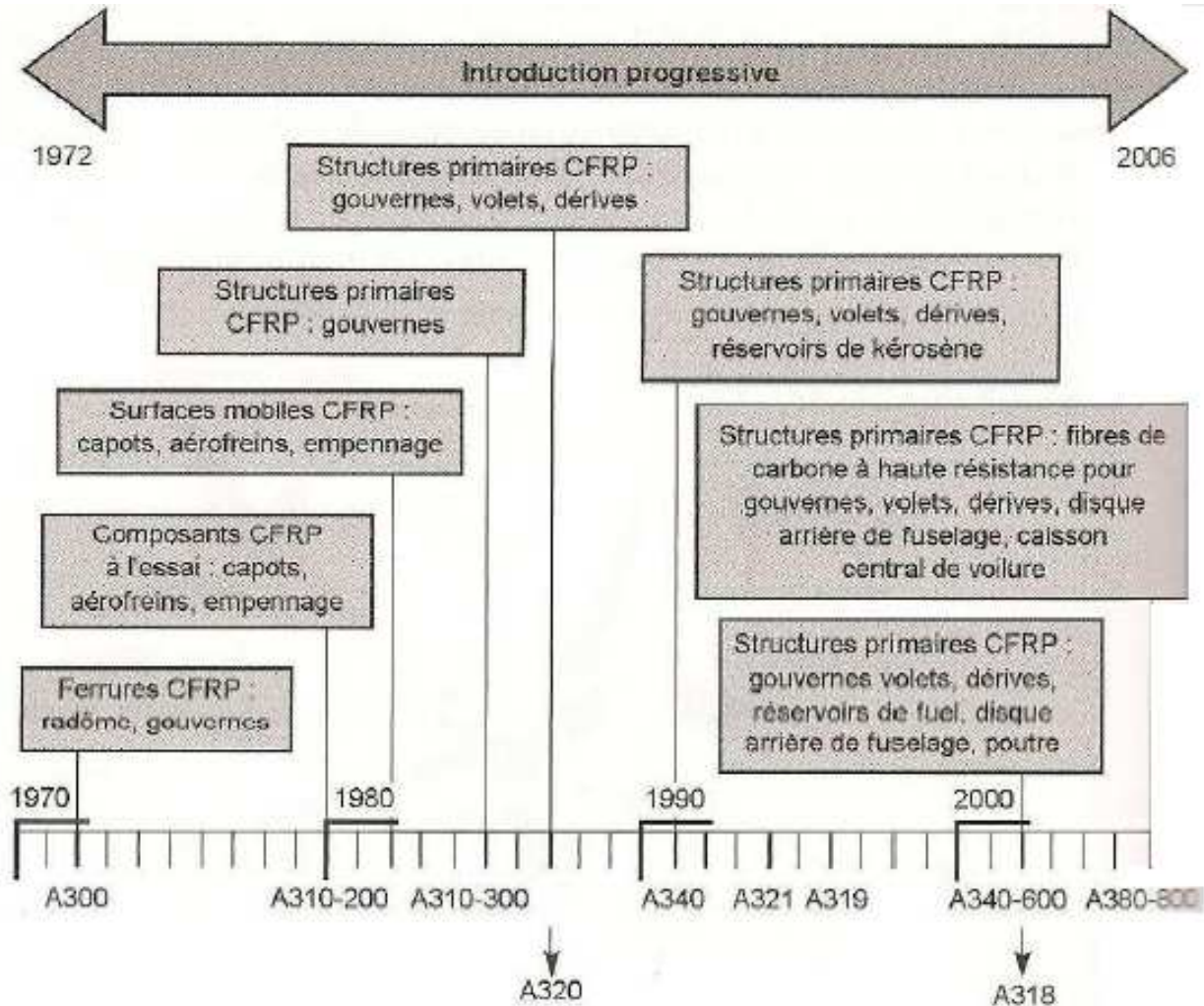


Figura 57- Progressiva utilização de materiais compósitos no Airbus ao longo das últimas décadas [3.1]

Na seguinte figura apresenta-se em detalhe os componentes fabricados em compósitos [3.1].

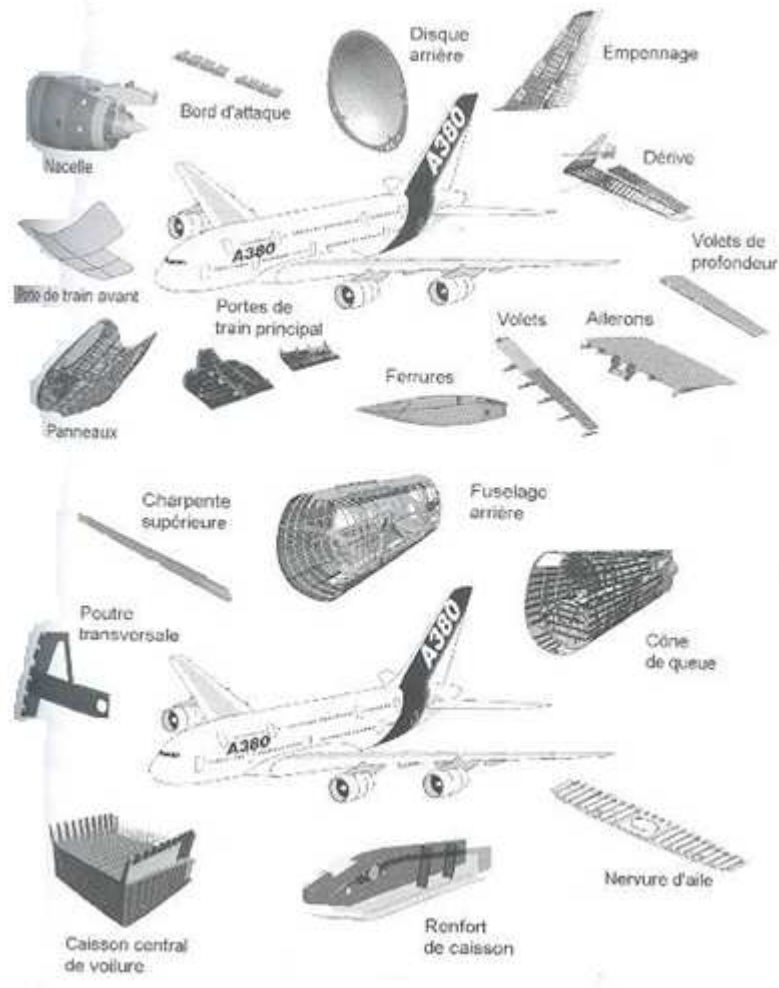


Figura 58- Componentes do Airbus fabricados com materiais compósitos [3.1]

3.1.2 Indústria automóvel

Tal como na indústria aeronáutica, também na indústria automóvel, a redução de peso e o menor consumo de combustível são os factores mais importantes para que os materiais compósitos ganhem aplicabilidade neste ramo.

São as fibras de carbono e de vidro os materiais mais utilizados em componentes como os chassis, suspensões, interiores, carroçarias, painéis, etc.



Figura 59- Componentes para automóveis em materiais compósitos

3.1.3 Indústria ferroviária

Tendo como base a procura de uma estrutura cada vez mais leve, os metais foram perdendo terreno face aos materiais compósitos, pois nesse campo os metais são mais pesados, induzindo naturalmente um maior peso específico na estrutura toda.

Podemos encontrar materiais compósitos nas carroçarias dos comboios, podendo este conseguir maiores velocidades derivado da redução do seu peso.



Figura 60- Carroçaria de um comboio

3.1.4 Indústria naval

Há uma grande tradição no que toca à utilização de materiais compósitos para aplicações marítimas. Desde a década de 60, que se utilizam materiais compósitos, tendo sido a fibra de vidro o material base e mais utilizado [3.1]. Pela figura abaixo representada, podemos constatar a evolução feita no que toca aos materiais utilizados e a possibilidade duma maior utilização da fibra de carbono, devido em grande parte à diminuição do seu preço. Inicialmente a fibra de vidro utilizada com maior frequência era sob a forma de tecido, evoluindo para manta de fibra de vidro.

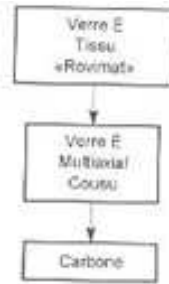


Figura 61- Evolução nos materiais utilizados na indústria naval [3.1]

Um tipo de estrutura muito utilizado hoje em dia, nos cascos dos barcos são as estruturas *sandwich*, com núcleos em espuma de PVC ou núcleos Nomex® em ninho de abelha.

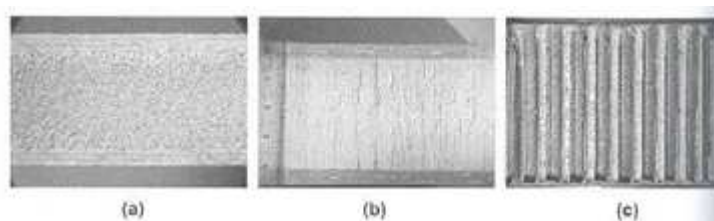


Figura 62- Alguns tipos de estruturas *sandwich* utilizadas nos cascos dos barcos [3.1]

3.1.5 Aplicações biomédicas [3.2]

Um enorme desafio no que toca aos materiais compósitos reside nas aplicações biomédicas, uma vez que neste campo a aplicação precisa de corresponder a algumas exigências mais complexas como é o caso da compatibilidade com o ser humano.

Quando se pretende projectar uma prótese ou um implante, para aplicação no ser humano ou num animal qualquer, é preciso ter noção da função que irá desempenhar e levar em conta as biocompatibilidades, quer com o ser humano e os fluidos que nele circulam, quer com a interacção com os outros órgãos e ossos do corpo humano.

Os biomateriais de uma forma geral caracterizam-se pela sua biocompatibilidade, ou seja, não podem causar efeitos nocivos ao organismo; devem possuir resistência mecânica adequada além de uma resistência à corrosão, pois o meio

fisiológico no qual estarão contidos é sempre extremamente agressivo, podendo induzir algum tipo de degradação.

Factores importantes a ter em conta para a biocompatibilidade de uma prótese e de um implante:

- Infecções;
- Interacções locais adversas do tecido
 - Inflamação;
 - Toxicidade;
 - Possibilidade de formação de tumores;
- Alergias;
- Cura inapropriada dos tecidos
 - Pequeno/Incompleto crescimento dos tecidos;
 - Crescimento excessivo do tecido;
- Incompatibilidade entre paciente e prótese;
- Interacções entre o sangue e materiais utilizados;
- Colocação deficiente causando dores e hemorragias;
- Falha do design podendo provocar danos em ossos ou órgãos;
- Possível adesão de bactérias;

Factores importantes a evitar para a selecção do material a usar na prótese ou implante:

- Falhas estruturais devido à degradação dos materiais;
- Desgaste;
- Fractura;
- Fendas devido ao aparecimento de tensões;
- Calcificação/ Mineralização;
- Corrosão;

- Propriedades inadequadas dos materiais;
- Oxidação ou redução;

Depois de bastantes estudos para garantir biocompatibilidades, conclui-se que os materiais utilizados para este fim são os de matriz de carbono e os de matriz poliméricas biocompatíveis.

3.1.6 Outras aplicações (bicicletas, Indústria eólica, raquetes, etc)

Para além das áreas referidas anteriormente, também podemos encontrar materiais compósitos em áreas como o desporto, lazer, indústria da energia, etc. com o objectivo principal de reduzir o peso estrutural e poder alcançar uma melhor performance.



Figura 63- Pá de uma turbina eólica [3.19]



Figura 64- Bicicletas em compósito [3.29]



Figura 65- Raquete de ténis



Figura 66- Corpo de uma bicicleta

3.2 As estruturas *sandwich* e o impacto

Neste tipo de estruturas, o núcleo tem um papel muito importante para o bom desempenho de uma estrutura *sandwich*. Espuma de PVC, espuma de polyester, Nomex[®], alumínio e balsa de madeira são alguns exemplos de núcleos utilizados e que revelaram ter um bom desempenho nas mais variadas solicitações a que são submetidas. A cortiça possui potencial para ser utilizada como núcleo, de modo a pelo menos poder igualar o desempenho dos núcleos atrás referidos e ser desenvolvido com baixo custo e mantendo o seu baixo peso específico.

Novos núcleos têm vindo a ser desenvolvidos e testados para cada vez mais melhorar-se este tipo de estruturas. No artigo “The plastic collapse and energy absorption capacity of egg-box panels” [3.3], Marc Zupan et al. testam um núcleo de alumínio com a forma de caixa de ovos, como se mostra na figura abaixo representada.



Figura 67- Núcleo de alumínio em forma de caixa de ovos [3.3]

Posteriormente efectuaram-se testes de compressão, assim como ensaios de impacto a baixa velocidade e numa fase posterior foi feita uma simulação numérica. Comparativamente com espumas de metal comerciais, este núcleo em forma de caixa de ovos é competitivo no que respeito à absorção de energia, assim como no seu custo.

Em “Study on the Collapse of Pin-Reinforced Foam Sandwich Panel Cores” [3.4], M.C. Rice, C.A. Fleischer e M. Zupan, o núcleo de espuma polimérica é reforçado com pinos de fibra de carbono e pinos metálicos de titânio e aço. A topologia dos reforços do núcleo é piramidal, como se pode ver pela figura seguinte.

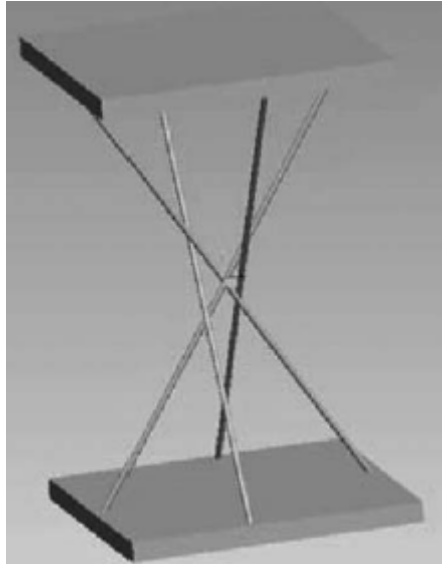


Figura 68- Reforços do núcleo em pirâmide [3.4]

Pela figura abaixo, vê-se o núcleo testado tendo sido escolhido fibras de carbono como reforço para as camadas exteriores e neste caso o reforço do núcleo foi feito pinos de fibra de carbono.

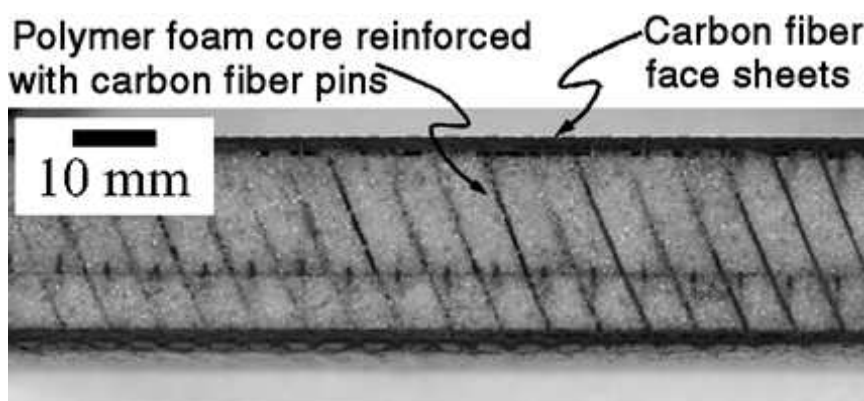


Figura 69- Núcleo testado com fibra de carbono para peles e reforço do núcleo juntamente com uma espuma polimérica [3.4]

Foram efectuados ensaios de flexão e chegou-se à conclusão que os núcleos com pinos de reforço possuem ganhos em rigidez e capacidade de carga, comparando com núcleos comerciais. Também foi concluído que mesmo correndo o risco de ocorrer

indentação, é interessante notar que este núcleo colapsa quando solicitado por cargas superiores às dos núcleos comerciais.

Dos mesmos autores do artigo anterior, “The out-of-plane compressive behaviour of woven-core *sandwich* plates” [3.5], há uma tentativa de introduzir um conceito novo para núcleo de estruturas *sandwich*, sendo este de aço inoxidável e tem a forma que se apresenta na figura abaixo representada.

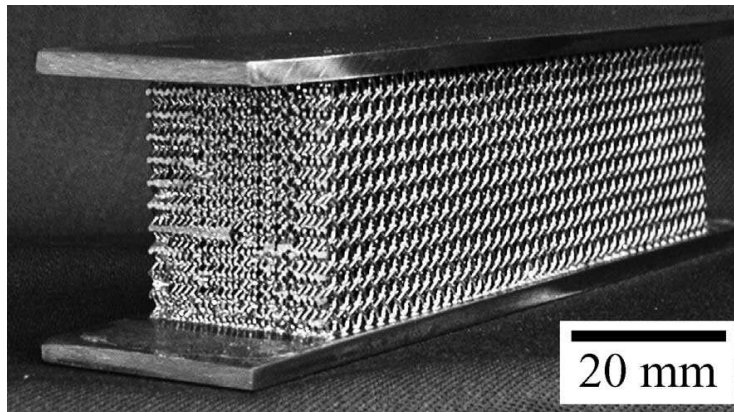


Figura 70- Estrutura sandwich com núcleo em aço inoxidável [3.5]

Relativamente a núcleos de cortiça, alguns autores portugueses, talvez por também se terem apercebido do grande potencial da cortiça para absorver energia e alargar o campo de aplicações deste material, fizeram algumas investigações e ensaios tendo chegado a algumas conclusões.

No artigo “Mechanical behaviour of sandwich beams manufactured with glass or juta fiber in facings and cork agglomerates as core” [3.6], os autores utilizam dois tipos de aglomerado de cortiça, estudando o seu comportamento mecânico e os tipos de dano que ocorrem na flexão, compressão e corte do núcleo. Na figura seguinte, têm-se dois tipos de estruturas *sandwich* com o mesmo núcleo de aglomerado, testadas no ensaio de flexão.



Figura 71- Núcleos de aglomerado de cortiça com peles diferentes [3.6]

Tendo em vista a indústria aeronáutica, o artigo “Exploring the Use of Cork Based Composites for Aerospace Applications” [3.7], de José M. Silva et al. prepararam

e estudaram o comportamento mecânico de estruturas *sandwich*, com fibra de carbono e uma matriz de resina de epóxico um núcleo de aglomerado de cortiça, quando solicitados à flexão e ao impacto. Chegaram a conclusões encorajadoras, no que diz respeito a absorção de energia e valores de tensão de corte por parte dos provetes com núcleo de aglomerado de cortiça, podendo competir com outros núcleos comerciais, como por exemplo, o Nomex® e o Rohacell® 71 WF.

Outro núcleo com uma estrutura curiosa e de fibra de carbono foi desenvolvido por S. Heimbs et al. no artigo “Aircraft *Sandwich* Structures With Folded Core Under Impact Load” [3.8]. Efectuaram-se ensaios de compressão, corte e queda livre de um peso para estudar o impacto a baixa velocidade e posteriormente estes resultados foram comparados com os resultados provenientes da realização de uma simulação numérica.



Figura 72- Núcleo de fibra de carbono [3.8]

Mais recentemente e tendo em vista monitorizar o dano provocado um objecto ou fenómeno qualquer, havendo um recurso à fibra óptica. Em “Barely Visible Impact Damage Detection By Distributed Strain Measurement Along Embedded Optical Fiber With 10 Cm Spactial Resolution” [3.9], são mencionados estes avanços tecnológicos onde se procura detectar o dano provocado pelo impacto. Pela figura representada na página seguinte, pode-se ter uma ideia de como funciona este processo.

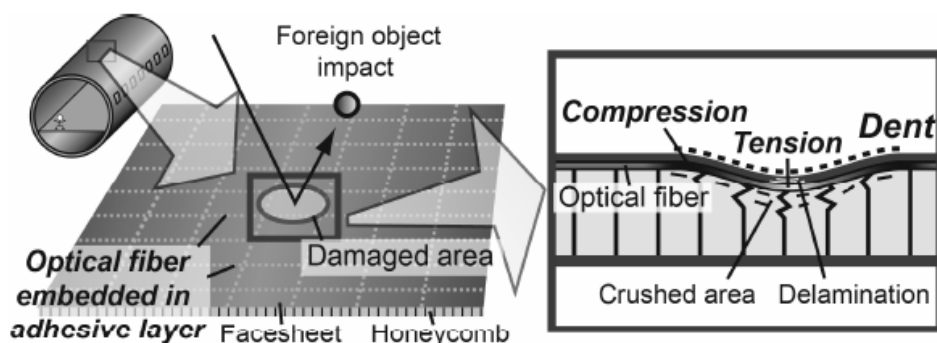


Figura 73- Fibras ópticas embebidas numa estrutura sandwich [3.9]

Como se pôde verificar nos artigos atrás enunciados, as características do núcleo da estrutura *sandwich* são muito importantes, assim como o seu desempenho. As geometrias que podem ter, são algo limitadas, variando entre espumas, passando por núcleos com técnicas de inserção de pinos das mais variadas geometrias de outros materiais. As geometrias da inserção de pinos podem ser tetraédricas, piramidais ou em forma de tecido.

3.3 As pás de turbinas eólicas e os materiais compósitos

Devido à exigência de baixo peso específico e elevada resistência, os materiais compósitos são a escolha mais apropriada para as pás das turbinas eólicas.

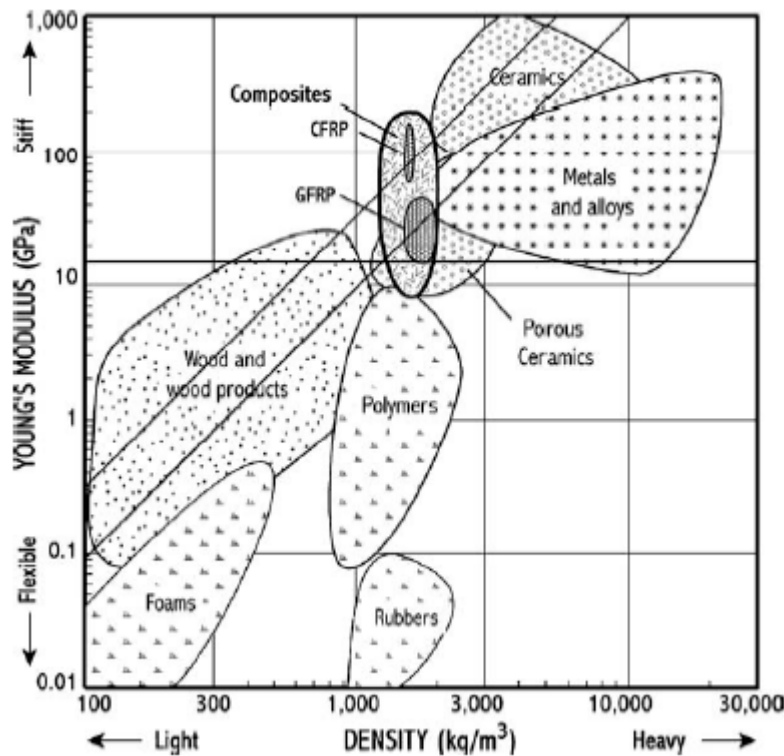


Figura 74- Diagrama de rigidez versus densidade de todos os materiais [3.10]

De longe, o material mais usado é a fibra de vidro em conjunto com uma resina plástica, se bem que nos últimos anos a fibra de carbono tem vindo a ser também utilizada com maior frequência.

Ao nível de mercado, existem muitas empresas que fabricam pás para turbinas eólicas, sendo que as mais importantes são:

- LM Glasfiber [3.11]
- RePower [3.12]
- Enercon [3.13]
- Vestas [3.14]
- GE Energy [3.15]
- Siemens [3.16]
- Gamesa [3.17]
- Nordex [3.18], etc.

Através da consulta do site destas empresas, foi possível verificar que tipos de materiais usam para conceberem os seus produtos.

A LM Glasfiber utiliza na maior parte dos seus produtos, fibra de vidro em conjunto com resina poliéster. Definem a fibra de vidro como sendo “um material único no controle da resistência e rigidez de uma estrutura” e segundo os mesmos possuem um processo de fabrico bastante consolidado.

A RePower para pás relativas a aerogeradores de 5MW, utiliza um misto de fibra de carbono com fibra de vidro envolvida numa matriz de resina de epóxido. Outra empresa que também concebe as suas pás através de uma mistura de fibras de carbono com fibras de vidro, é a Gamesa. No entanto, a Gamesa, para pás bastante mais leves utiliza fibra de vidro envoltos em resina de epóxido, assim como a Siemens e Enercon. Em relação à empresa Nordex, utiliza nos seus produtos, tal como a LM Glasfiber, fibra de vidro com resina poliéster.

A empresa LM Glasfiber, possui actualmente uma das maiores pás com 61.5m de comprimento para uma turbina de 5 MW. Esta pá tem a particularidade em que é feita uma utilização de estruturas *sandwich*, e hoje em dia este tipo de estruturas já constituem a maior parte do material utilizado numa pá.



Figura 75- Pá de 61.5m de comprimento desenvolvida pela LM Glasfiber [3.19]

Como núcleos mais utilizados, tem-se a espuma de PVC e madeira balsa, sendo este último madeira muito leve proveniente da árvore balsa dos trópicos americanos. Há uma grande preocupação em que os materiais do núcleo sejam recicláveis para reduzir custos e proteger o ambiente. Na figura pode-se ver a pá de 61.5m de comprimento da LM Glasfiber [3.19].

3.4 O impacto a baixa velocidade e a simulação numérica

Com o aparecimento dos métodos numéricos, nomeadamente do método dos elementos finitos, começaram a surgir trabalhos em elementos finitos de impacto em materiais compósitos pois até à altura, a maior parte dos trabalhos de investigação eram de cariz experimental baseando-se na compreensão dos danos provocados pelo impacto a baixa velocidade. Mas no entanto, a simulação numérica do impacto a baixa velocidade em materiais compósitos é um processo algo complexo devido aos inúmeros parâmetros que se deve ter em conta, tais como a massa dos projecteis, velocidade e forma dos mesmos, secção e espessura do alvo, condições de fronteira, número e propriedades das camadas envolvidas, etc. e devido à existência de muitos mecanismos que provocam dano.

Em 2001, Serge Abrate apresentou uma revisão teórica dos modelos matemáticos utilizados para a análise de impacto, sugerindo um conjunto de etapas a seguir de forma a ser possível determinar o tipo de impacto e os respectivos efeitos, fundamentais para modelação de casos de impacto [3.20].

A.N. Palazotto e al. em 2000 apresentaram o artigo “Finite element analysis of low-velocity impact on composite sandwich plates” [3.21], que visava a resposta de placas *sandwich* quando sujeitas ao impacto a baixa velocidade estudando o problema do contacto entre a placa flexível e o “quase” rígido impactor. Neste trabalho foi empregue uma previsão de dano através dum critério de falha e progressão do dano através de uma redução de rigidez.

Em “Damage prediction in composite plates subjected to low velocity impact” [3.22] da autoria de R. Tiberkak e al. foi estudado o dano em placas compósitas com reforço de fibras usando a teoria de Mindlin e elementos de Lagrange com 9 nós, efectuando-se estudos paramétricos sobre a força de contacto na placa, deflecção central e distribuição de tensões.

Em 2002 e apresentado por C.F.Li e al. [3.23], apresentaram um modelo numérico que inclui parâmetros tais como critérios de dano, alteração de rigidez das placas devido aos vários tipos de dano, solução eficiente de equações diferenciais de bola rígida, modelação detalhada de vários tipos de dano, o problema de contacto dinâmico entre camadas delaminadas, etc.

S.Li et al. [3.24] apresentam em 2004 um modelo capaz de prever delaminagens múltiplas bem como o aparecimento de fendas transversais em materiais compósitos laminados, sujeitos a impactos a baixa velocidade.

Em 2008 M.V. Donovan e al [3.25] sugerem um modelo tridimensional contemplando a resposta dinâmica de um material, mediante impacto, baseando-se na teoria de mecânica de dano contínuo, permitindo o controlo de energia dissipada, associado aos diversos modos de dano.

Também em 2008, A.G. Mamalis e al. [3.26] procurou um novo conceito de estrutura *sandwich* leve e com alta performance. O novo conceito emprega peles metálicas finas, núcleos de baixa densidade e camadas intermédias para melhorar o impacto e efectuaram-se simulações numéricas para optimizar a topologia dos materiais que constituem este novo conceito híbrido.

Recentemente e ainda em 2009, foi apresentado por E. Etemadi e al. “3D finite element simulation of sandwich panels with a functionally graded core subjected to low velocity impact” [3.27], em que é estudado os efeitos da velocidade inicial do projectil e

energia cinética, assim como foi também realizados estudos sobre o comportamento ao impacto e indentação nas dimensões de uma viga.

O processo de modelação numérica relativamente a casos de impacto, envolve inúmeras variáveis, estando ainda distante a obtenção de um modelo 100% preciso, que contemple todos os casos possíveis, sendo uma aproximação e uma tentativa de previsão do comportamento do material.

3.5 A cortiça [3.28]

A cortiça é um material que há milhares de anos que se encontra ao serviço do homem, onde por exemplo, no tempo da civilização romana, era usada para revestimentos em telhados e tectos. Mas, foi na rolha que a cortiça mais se destacou nos últimos cem anos, sendo Portugal o maior produtor mundial de cortiça, e em consequência disso é também o maior produtor e exportador mundial de rolhas de cortiça, sendo a corticeira Amorim® o maior responsável por isso mesmo.



Figura 76- Rolhas de cortiça [3.28]

Com o desenvolvimento tecnológico ao nível de processos de fabrico, a rolha de cortiça também beneficiou com tal facto e hoje em dia, pode-se encontrar diversos tipos de rolhas, como rolhas para champanhe, rolhas para vinho do porto e rolhas que se encaixam de acordo com as características do vinho e com o tipo de garrafa.

Mas não é só nas rolhas que a cortiça tem aplicação. Nas últimas décadas, começaram a ser feitas investigações sobre outras aplicações onde a cortiça seria útil, tendo como base as excelentes propriedades deste material. Aplicações como isoladores, mobiliário, *memo boards*, pavimentos, utensílios de escritório, palmilhas de calçado, etc. estão já bastante implementadas como aplicações sólidas no nosso dia-a-dia.



Figura 77- Aplicações de cortiça [3.28]

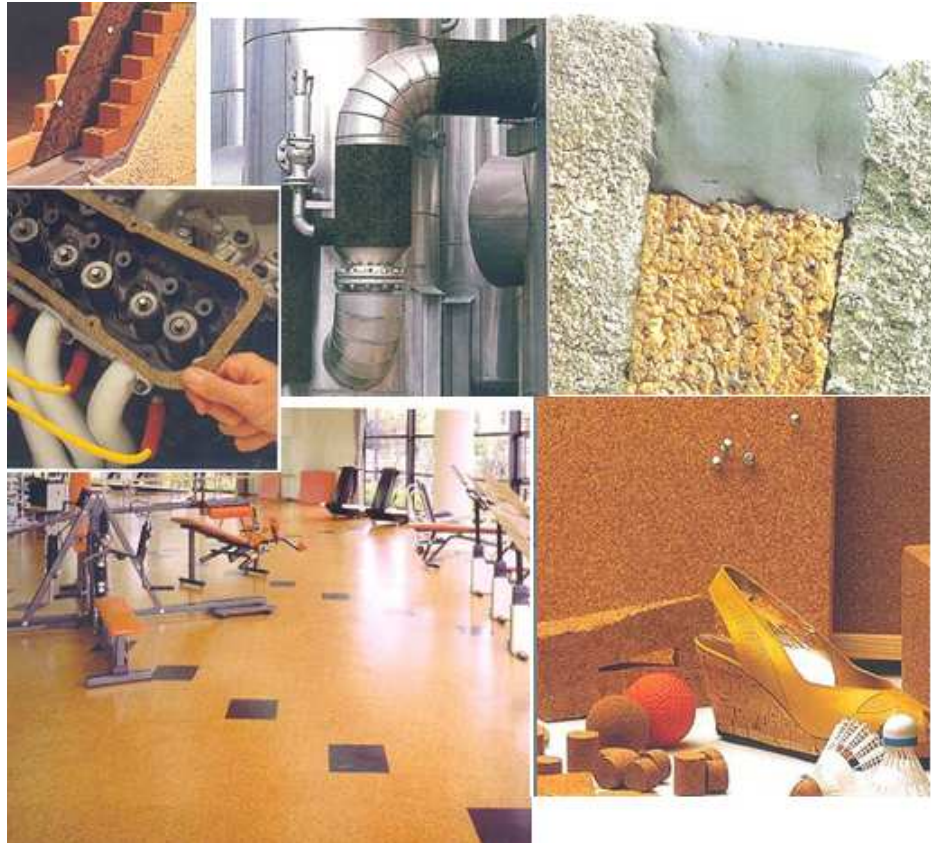


Figura 78- Aplicações de cortiça [3.28]

3.6 Bibliografia

- [3.1] **Bathias, Claude.** *Matériaux Composites*. Paris : Dunod, 2005.
- [3.2] **Costa, Ivo and Correia, Ricardo.** *Processos de Vazamento de Próteses e Implantes*. Porto : s.n., 2007.
- [3.3] **Marc Zupan, C. Chen, N.A. Fleck.** *The plastic collapse and energy absorption capacity of egg-box panels*. s.l. : International Journal of Mechanical Sciences 45 (2003) 851–871, 2003.
- [3.4] **Rice, M.C., Fleischer, C.A. and Zupan, M.** *Study on the Collapse of Pin-Reinforced Foam Sandwich Panel Cores*. s.l. : Experimental Mechanics (2006) 46: 197–204, 2006.
- [3.5] **M. Zupan, V.S. Deshpande, N.A. Fleck.** *The out-of-plane compressive behaviour of woven-core sandwich plates*. s.l. : European Journal of Mechanics A/Solids 23 (2004) 411–421, 2004.
- [3.6] **Reis, Luís, Pedro Carvalho, Cristiano Silva and Freitas, M.** *Mechanical behaviour of sandwich beams manufactured with glass or juta fiber in facings and cork agglomerates as core*. Lisboa : ICEMS, Instituto Superior Técnico.
- [3.7] **Silva, José M., et al.** *Exploring the Use of Cork Based Composites for Aerospace Applications*.
- [3.8] **Heimbs, S.** *Sandwich Structures With Folded Core Under Impact Load*.
- [3.9] **Minakuchi, S., et al.** *Barely Visible Impact Damage Detection By Distributed Strain Measurement Along Embedded Optical Fiber With 10 Cm Spactial Resolution*. 2008.
- [3.10] **Brøndsted, Povl, Lilholt, Hans and Lystrup, Aage.** *Composite Materials For Wind Power Turbine Blades*. Roskilde : Annual Reviews, 2005.
- [3.11] **LM Glasfiber.** [Online] [Cited: Março 30, 2009.] <http://www.lmglasfiber.com/>.
- [3.12] **RePower.** [Online] [Cited: Março 30, 2009.] <http://www.repower.com/en/group>.
- [3.13] **Enercon.** [Online] [Cited: Março 30, 2009.] <http://www.enercon.com/>.
- [3.14] **Vestas.** [Online] [Cited: Março 30, 2009.] <http://www.vestas.pt/Home/index.htm>.

- [3.15] *GE Energy*. [Online] [Cited: Março 30, 2009.]
<http://www.gepower.com/home/index.htm>.
- [3.16] *Siemens*. [Online] [Cited: Março 30, 2009.] <http://w1.siemens.com/entry/pt/pt/>.
- [3.17] *Gamesa*. [Online] [Cited: Março 30, 2009.] <http://www.gamesacorp.com/es>.
- [3.18] *Nordex*. [Online] [Cited: Março 30, 2009.] <http://www.nordex-online.com/en/produkte-service/wind-turbines.html>.
- [3.19] **Jacobsen, Torben K.** *Sandwich Structures in Rotor Blades for Wind Turbines*. Lunderskov : LM Glasfiber, 2008.
- [3.20] **Abrate, S.** *Modeling of Impacts on Composite Structures*. s.l. : Composite Structures(51): 129-138.
- [3.21] **Palazotto, A.N., Herup, E.J. and Gummadi, L.N.B.** *Finite element analysis of low-velocity impact on composite sandwich plates*. s.l. : Composite Structures 49 (2000) 209±227.
- [3.22] **Tiberkak, R., et al.** *Damage prediction in composite plates subjected to low velocity impact*. s.l. : Composite Structures 83 (2008) 73–82.
- [3.23]. **C.F.Li, N.Hu, et al.** *Low-velocity impact-induced damage of continuous fiber-reinforced composite laminates. PartI. An FEM numerical model*. s.l. : Composites - PartA: applied science and manufacturing 33: 1055-1062.
- [3.24] **S.Li, S.R.Reid and al., et.** *Modelling Damage of Multiple Delaminations and Transverse Matrix Cracking in Laminated Composites Due to Low Velocity Lateral Impact*. s.l. : Composite Science and Technology(66): 827-836.
- [3.25] **M.V.Donadon, Iannucci, L. and al., et.** *A progressive failure model for composite laminates subjected to low velocity impact damage*. s.l. : Computers & Structures(86): 1232 - 1252.
- [3.26] **Mamalis, A.G., et al.** *A new hybrid concept for sandwich structures*. s.l. : Composite Structures 83 (2008) 335–340, 2007.
- [3.27] **Etemadi, E., Khatibi, A. Afaghi and Takaffoli, M.** *3D finite element simulation of sandwich panels with a functionally graded core subjected to low velocity impact*. s.l. : Composite Structures 89 (2009) 28–34, 2008
- [3.28] **GrupoAmorim.** *A Arte da Cortiça*. Mozelos : s.n., 2008

[3.29] [Online] [Cited: Março 27, 2009.] <http://groselha.art.br/blog/wp-content/uploads/2008/12/grasshopper1-300x249.jpg>.

Capítulo 4- Simulação Numérica

Neste trabalho, utilizando o software comercial Abaqus® a simulação numérica servia para estudar o comportamento do núcleo de aglomerado de cortiça à flexão e ao impacto, fazendo variar a geometria e tamanho dos furos a executar na cortiça, assim como a distância e disposição dos mesmos. Os furos adoptados foram o circular e o quadrado, uma vez que se torna complicado maquinar outro tipo de furo na cortiça.

Foi utilizado aglomerado de cortiça, portanto podemos considerar que em termos macroscópicos o comportamento do aglomerado tenderá para o isotrópico e para isso fez-se uma média pesada para E e ν . Sendo assim, tem-se $E = (2 \cdot E_1 + E_3) / 3$, porque $E_1 = E_2$, e igual para o coeficiente de Poisson ν . Assim, de acordo com os valores da tabela 1, E tomou o valor de 15,33 MPa e ν 0,2.

4.1 Simulação numérica de flexão em três pontos

Pelas figuras representadas na página seguinte, pode-se ver o modelo utilizado para os ensaios de flexão. A placa de cortiça adoptada tinha dimensões de [60x50] mm com 5mm de espessura, enquanto os três cilindros tinham 10mm de diâmetro. Em relação ao espaçamento entre apoios, este foi de 50mm e a carga que o cilindro impôs na placa foi de 1N.

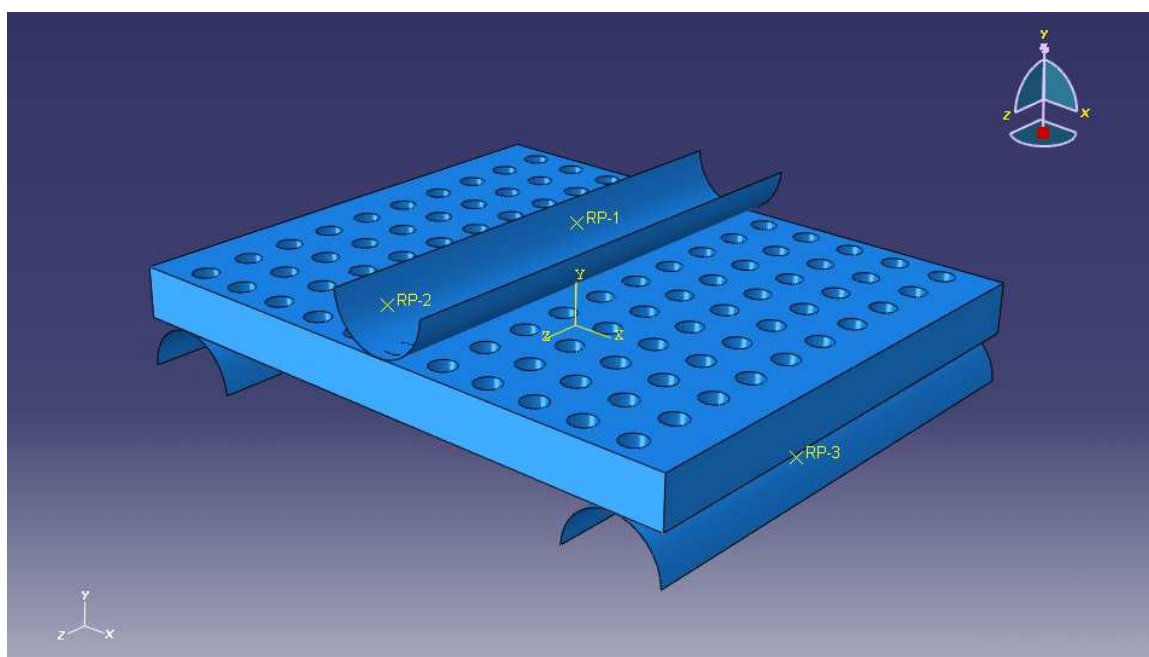


Figura 79- Simulação numérica da flexão em 3 pontos

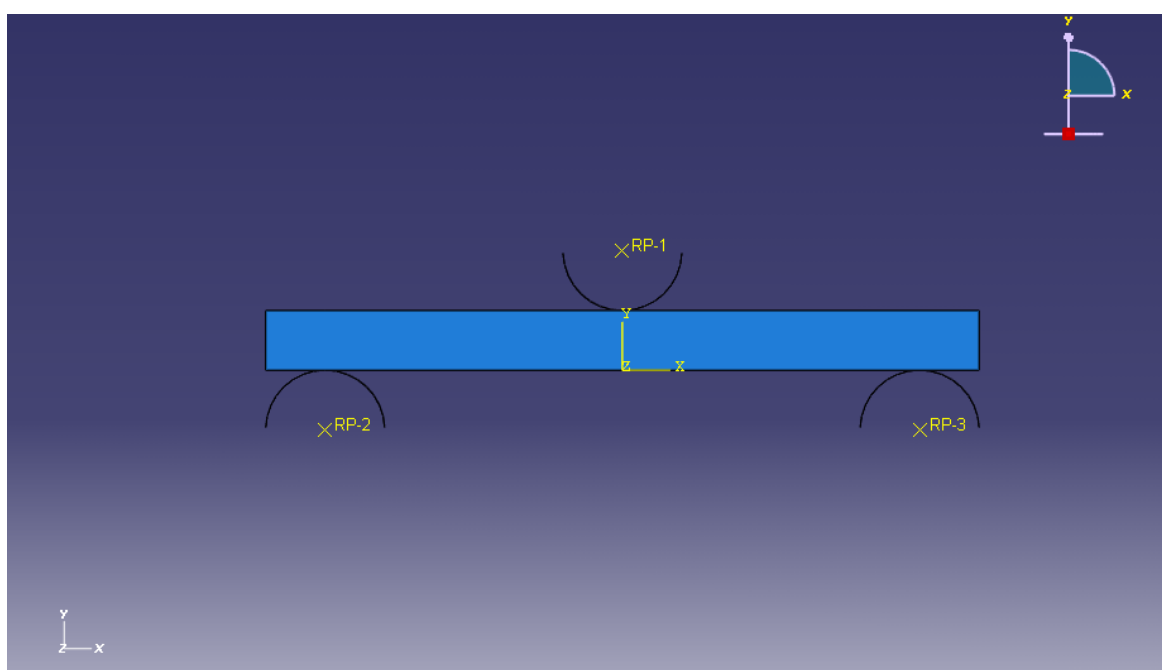


Figura 80- Flexão em 3 pontos do núcleo de cortiça

4.1.1 Geometria das placas de aglomerado de cortiça

4.1.1.1 Furos circulares lineares ($d = 2,5 \text{ mm}$)

Em relação aos furos circulares, estes têm diâmetros de 2,5mm e 5mm, com espaçamento entre eles de 2,5mm, 5mm e 7,5mm.

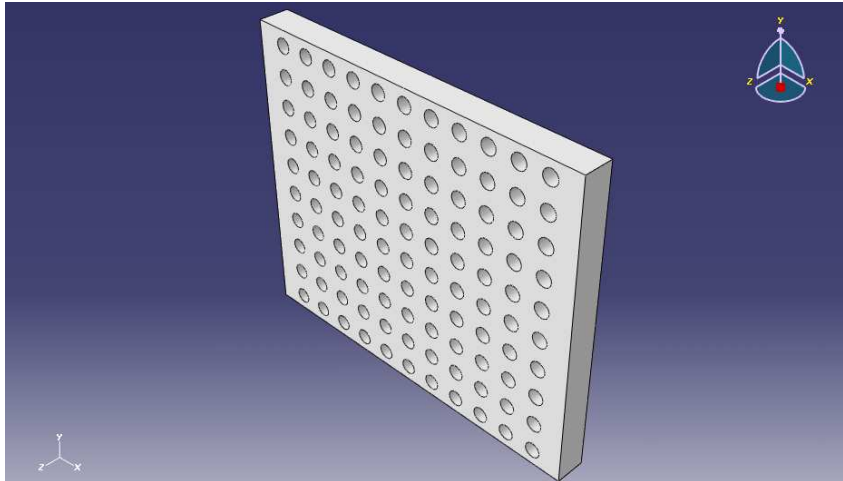


Figura 81- Cortiça com furos de 2,5mm de diâmetro e espaçamento de 2,5mm

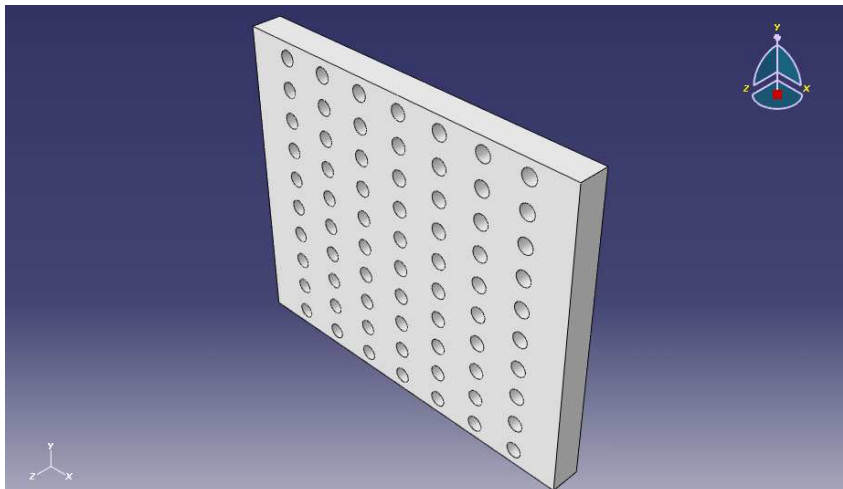


Figura 82- Cortiça com furos de 2,5mm de diâmetro e espaçamento de 5mm

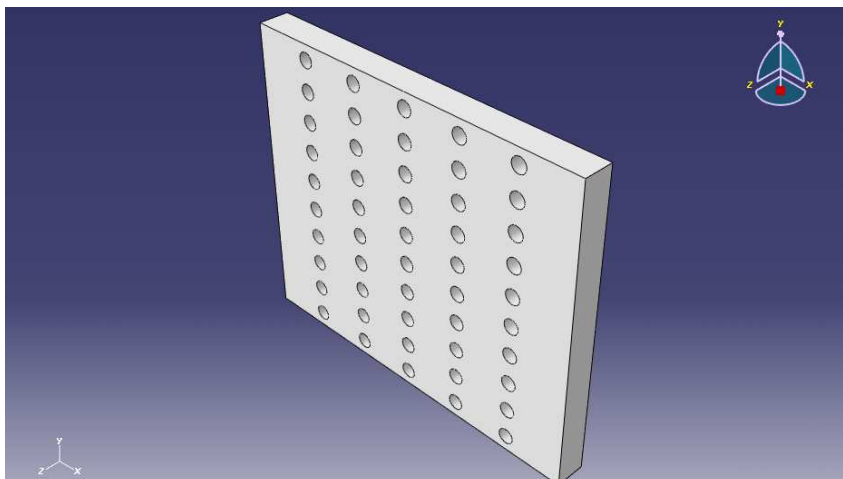


Figura 83- Cortiça com furos de 2,5mm de diâmetro e espaçamento de 7,5mm

4.1.1.2 Furos circulares com furação em triângulo ($d=2,5$ mm)

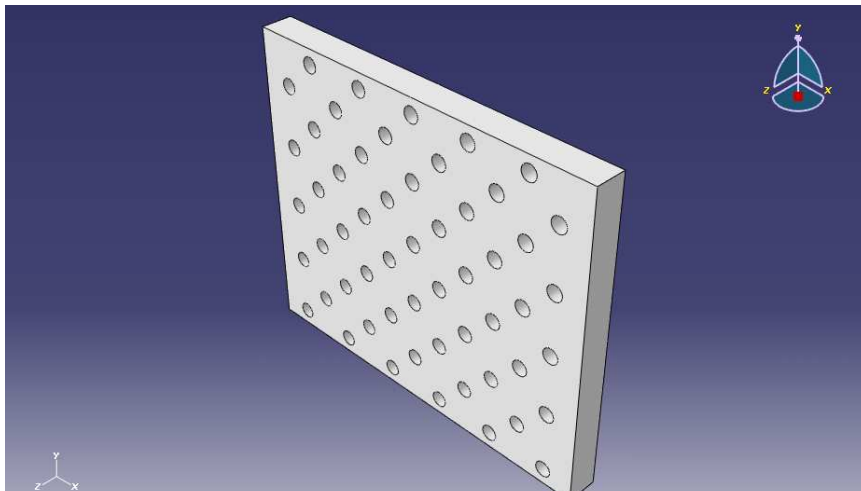


Figura 84- Cortiça com furacão em triângulo, 2,5mm de diâmetro e espaçamento de 2,5mm

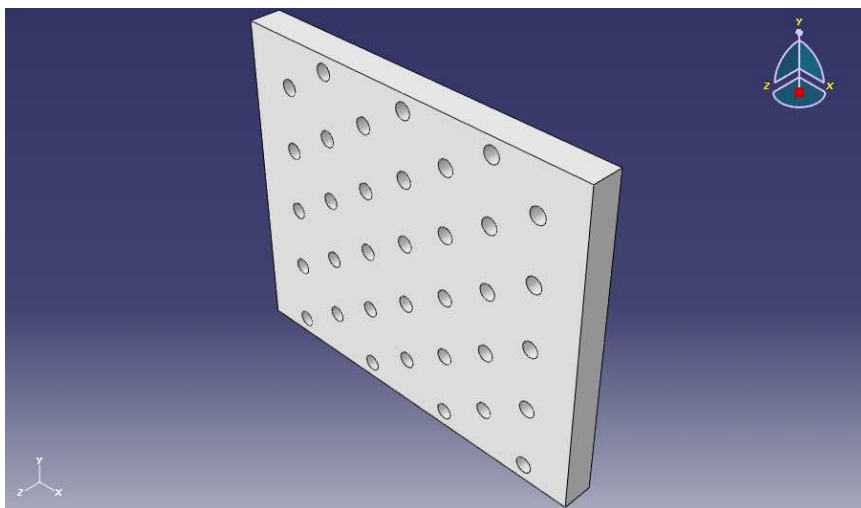


Figura 85- Cortiça com furacão em triângulo, 2,5mm de diâmetro e espaçamento de 5mm

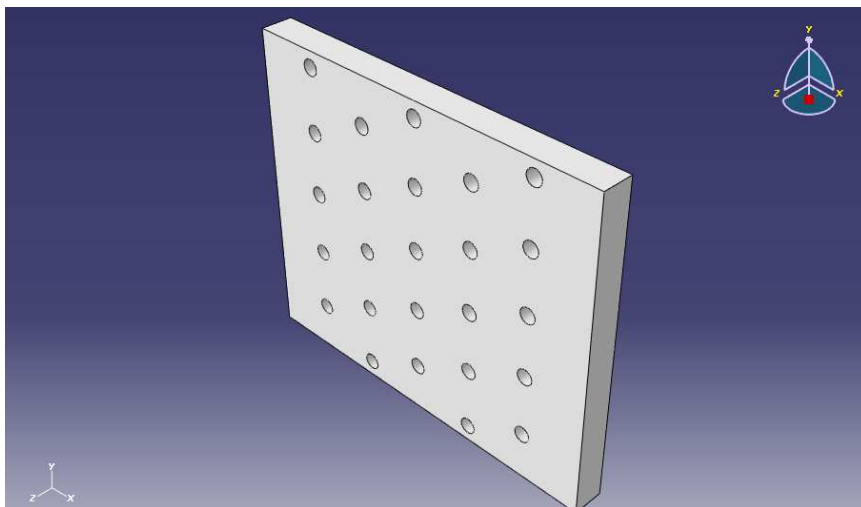


Figura 86- Cortiça com furacão em triângulo, 2,5mm de diâmetro e espaçamento de 7,5mm

4.1.1.3 Furos circulares lineares ($d = 5 \text{ mm}$)

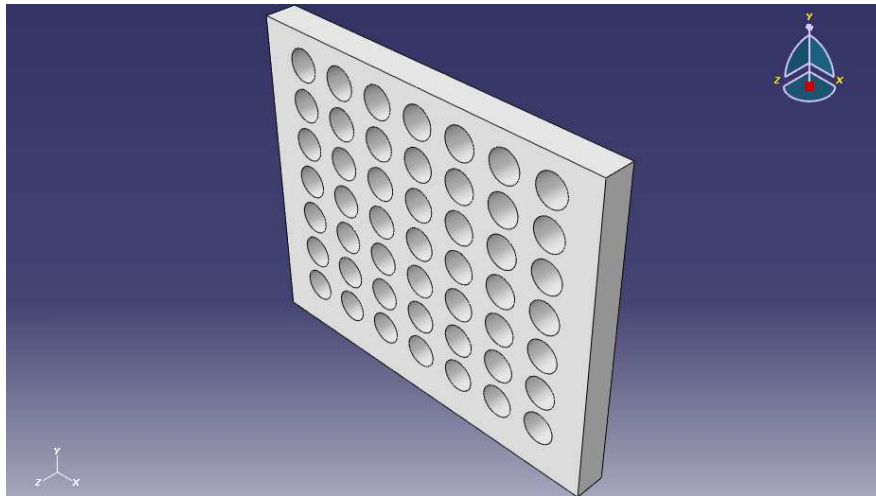


Figura 87- Cortiça com furos de 5mm de diâmetro e espaçamento de 2,5mm

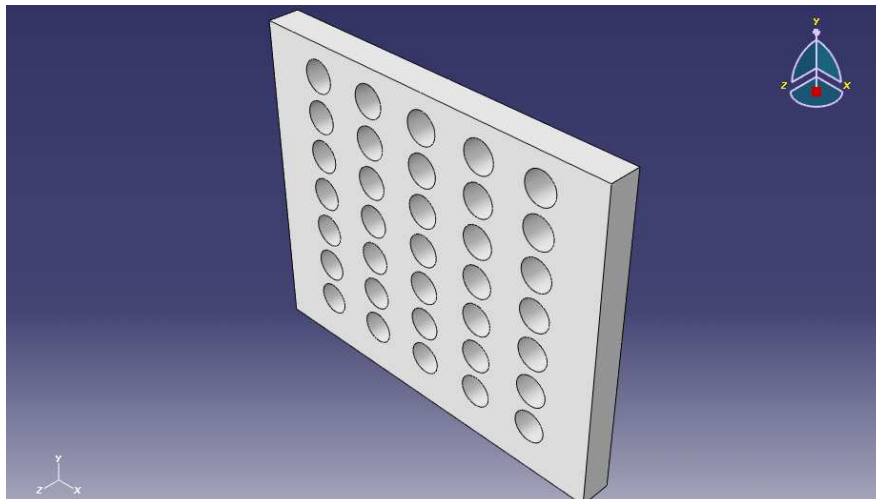


Figura 88- Cortiça com furos de 5mm de diâmetro e espaçamento de 5mm

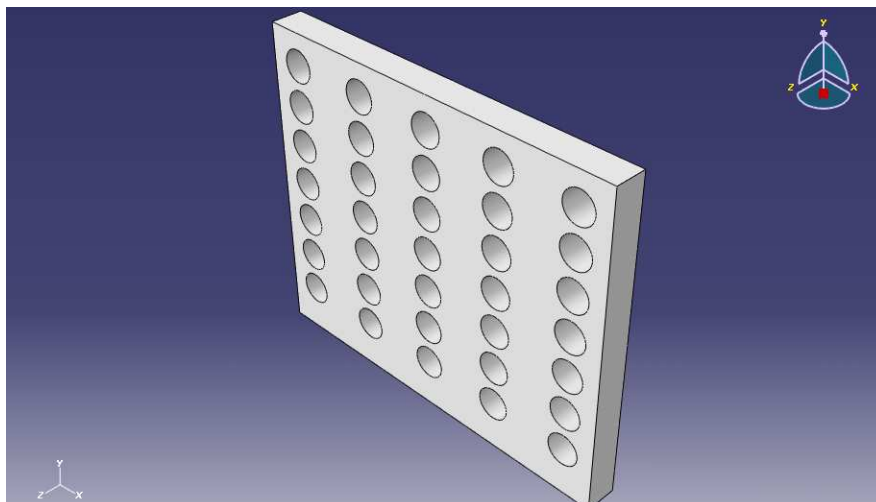


Figura 89- Cortiça com furos de 5mm de diâmetro e espaçamento de 7,5mm

4.1.1.4 Furos circulares com furação em triângulo ($d = 5\text{mm}$)

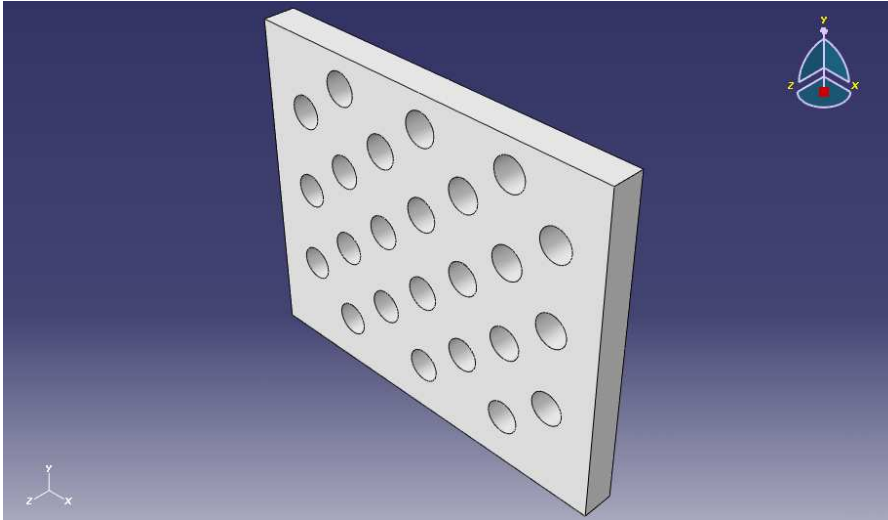


Figura 90– Cortiça com furação em triângulo, 5mm de diâmetro e espaçamento de 2,5mm

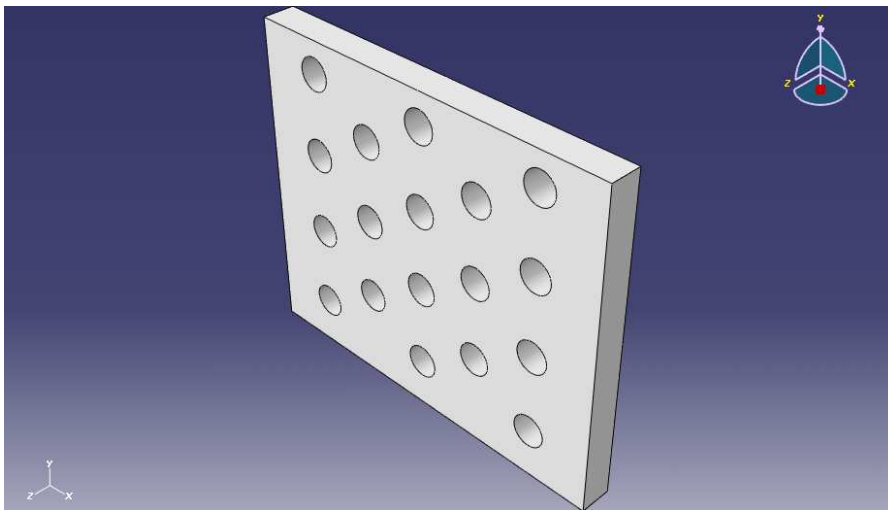


Figura 91- Cortiça com furação em triângulo, 5mm de diâmetro e espaçamento de 5mm

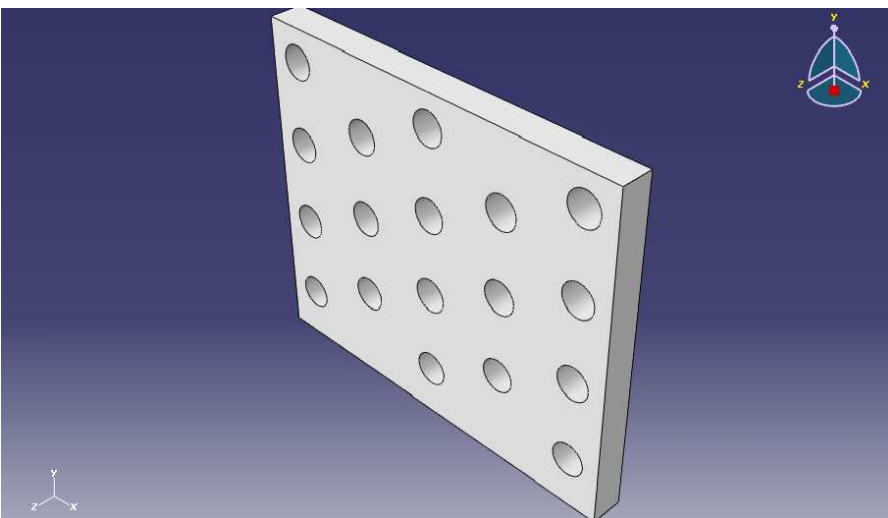


Figura 92– Cortiça com furação em triângulo, 5mm de diâmetro e espaçamento de 7,5mm

4.1.1.5 Furos quadrados lineares (lado = 2,5 mm)

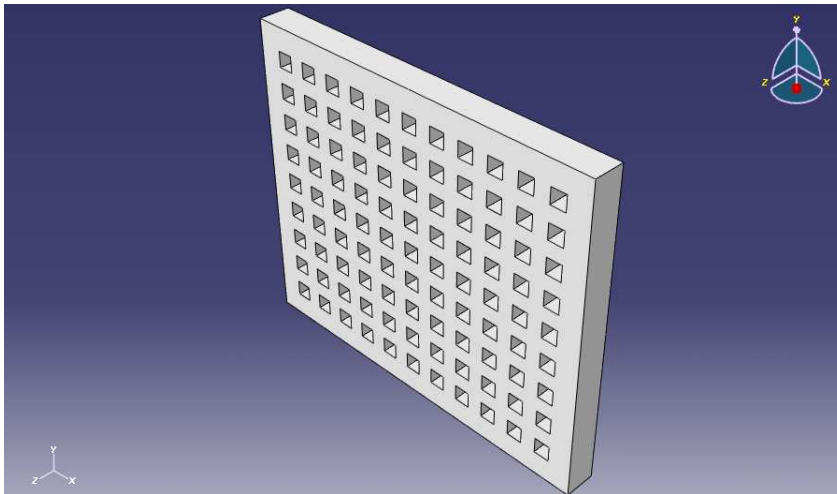


Figura 93– Cortiça com furação quadrangular, 2,5mm de lado e espaçamento de 2,5mm

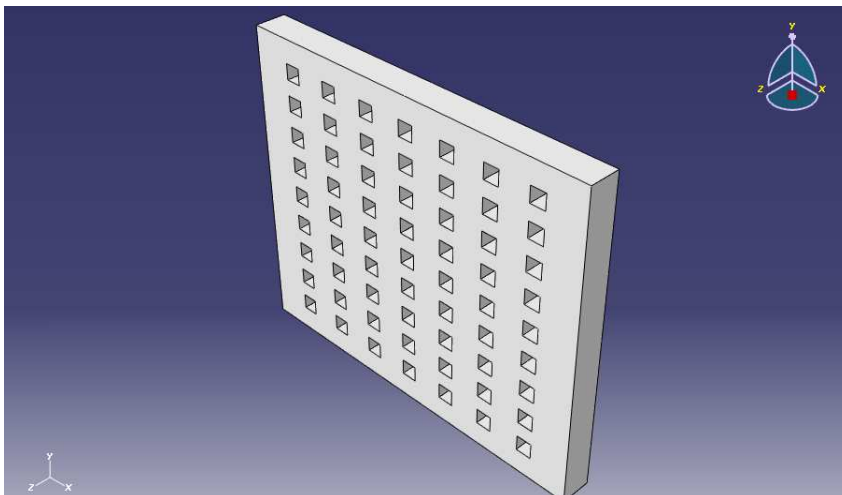


Figura 94– Cortiça com furação quadrangular, 2,5mm de lado e espaçamento de 5mm

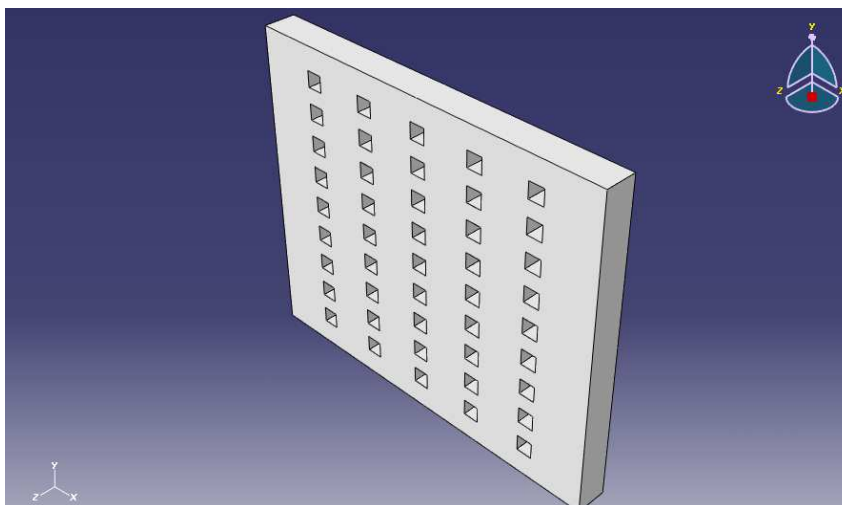


Figura 95– Cortiça com furação quadrangular, 2,5mm de lado e espaçamento de 7,5mm

4.1.1.6 Furos circulares com furação em triângulo (lado = 2,5mm)

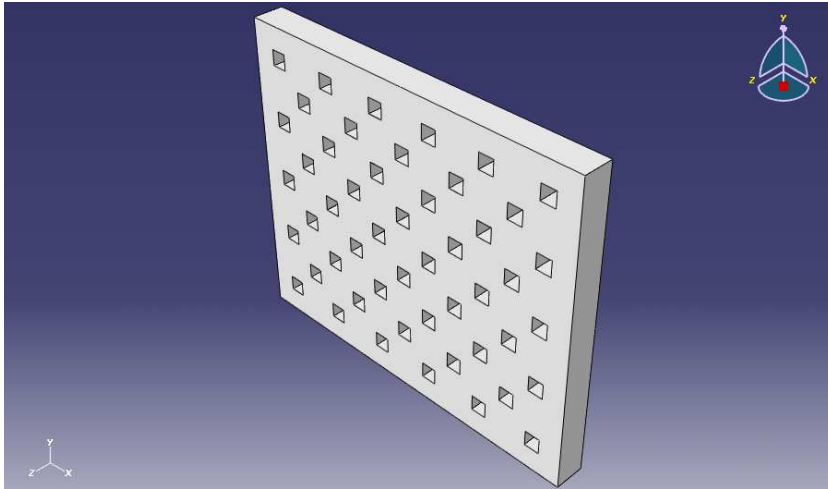


Figura 96– Cortiça com furação quadrangular em triângulo, 2,5mm de lado e espaçamento de 2,5mm

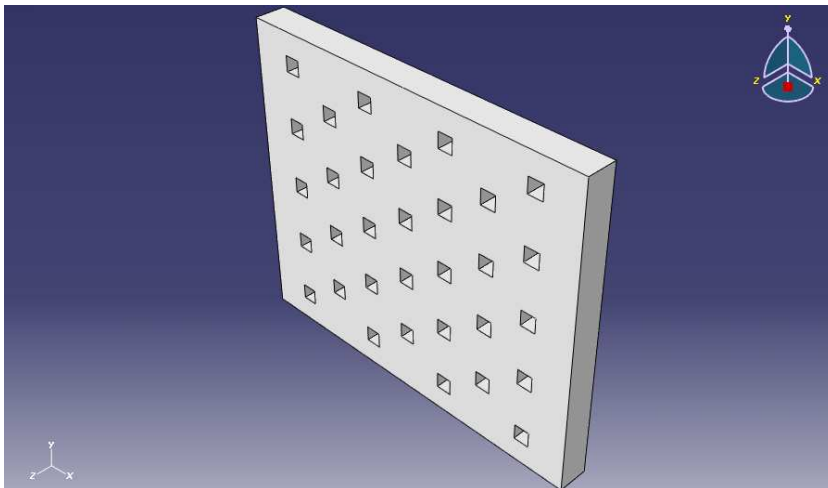


Figura 97– Cortiça com furação quadrangular em triângulo, 2,5mm de lado e espaçamento de 5mm

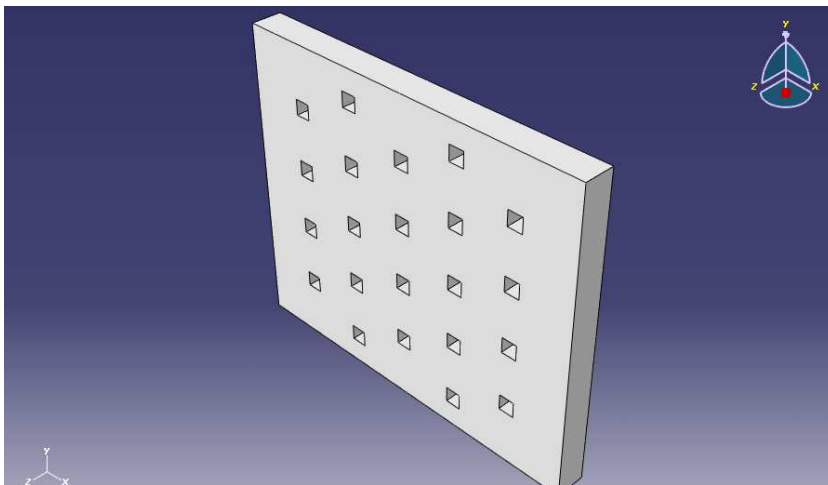


Figura 98– Cortiça com furação quadrangular em triângulo, 2,5mm de lado e espaçamento de 7,5mm

4.1.1.7 Furos quadrados lineares (lado = 5 mm)

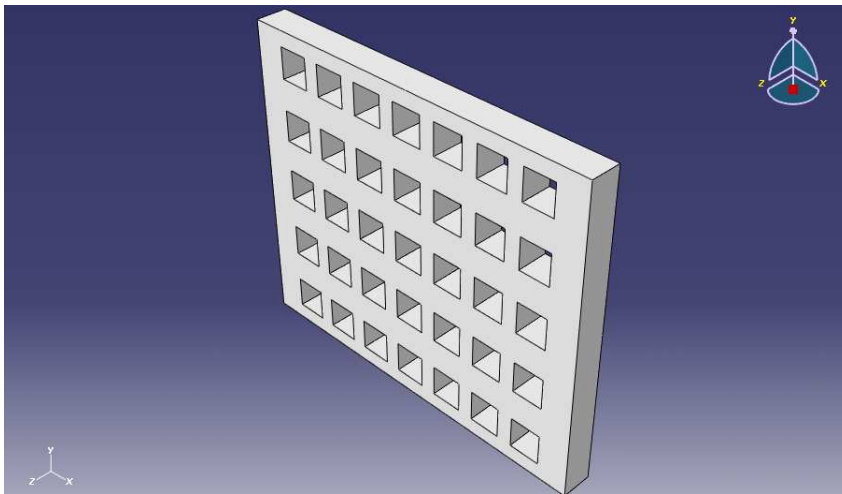


Figura 99– Cortiça com furação quadrangular, 5mm de diâmetro e espaçamento de 2,5mm

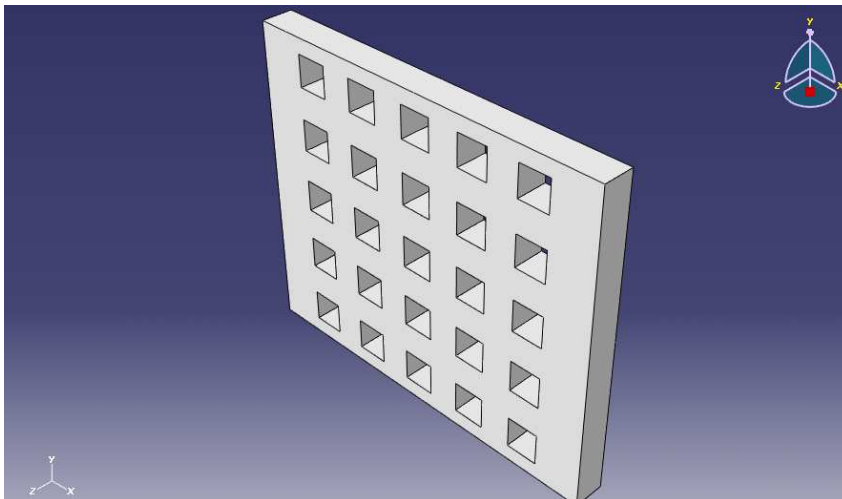


Figura 100– Cortiça com furação quadrangular, 5mm de diâmetro e espaçamento de 5mm

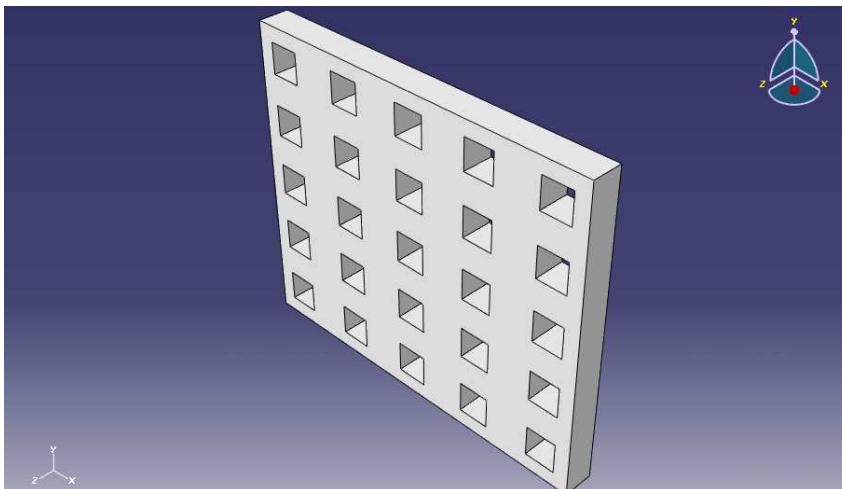


Figura 101– Cortiça com furação quadrangular, 5mm de diâmetro e espaçamento de 7,5mm

4.1.1.8 Furos circulares com furação em triângulo (lado = 5mm)

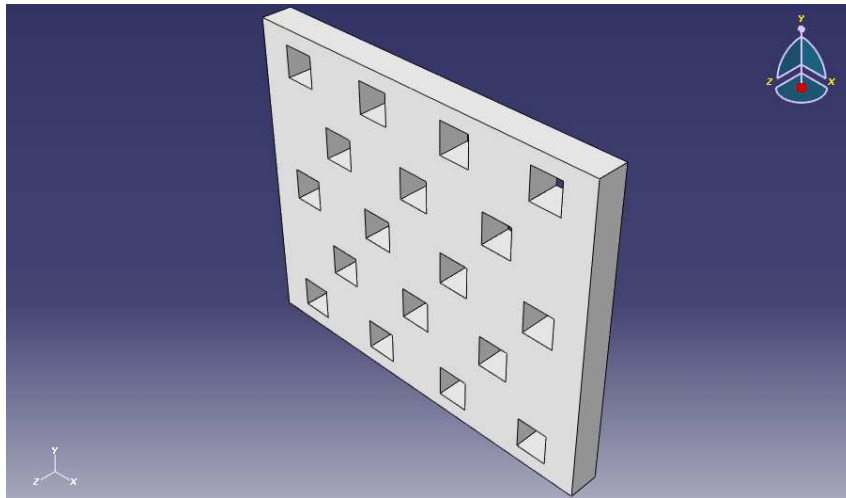


Figura 102– Cortiça com furação quadrangular em triângulo, 5mm de lado e espaçamento de 2,5mm

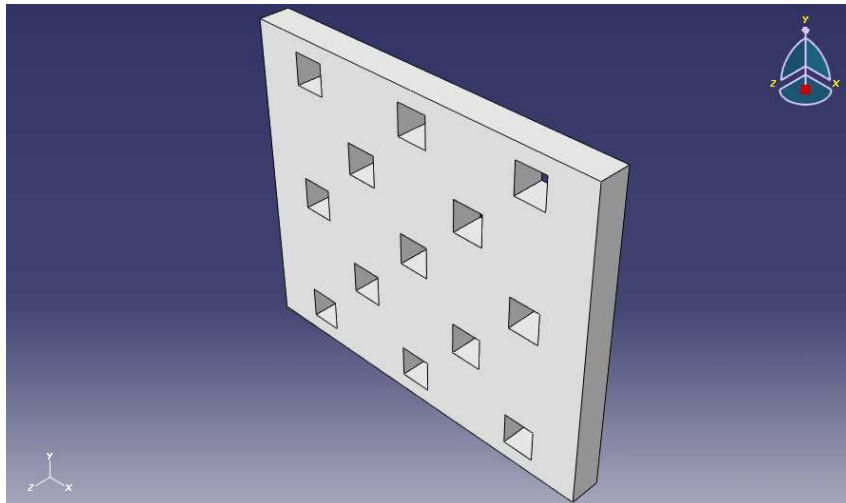


Figura 103– Cortiça com furação quadrangular em triângulo, 5mm de lado e espaçamento de 5mm

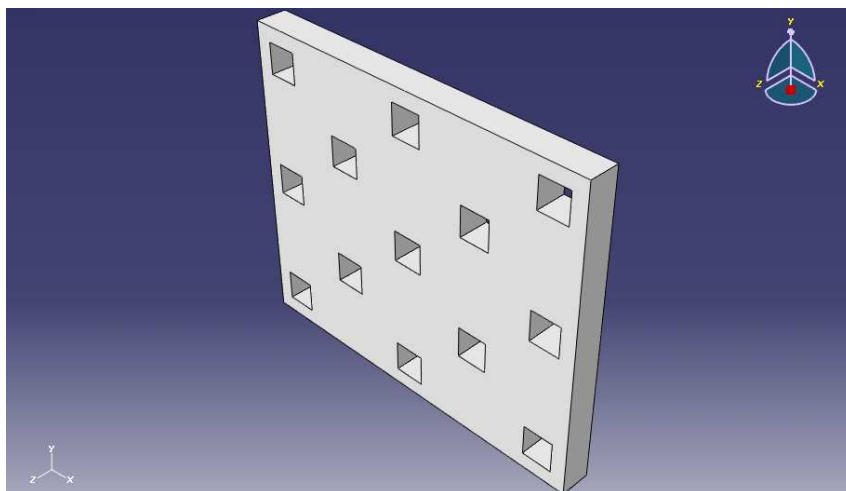


Figura 104– Cortiça com furação quadrangular em triângulo, 5mm de lado e espaçamento de 7,5mm

4.1.2 Resultados das simulações numéricas da flexão

4.1.2.1 Aglomerado de cortiça sem furos

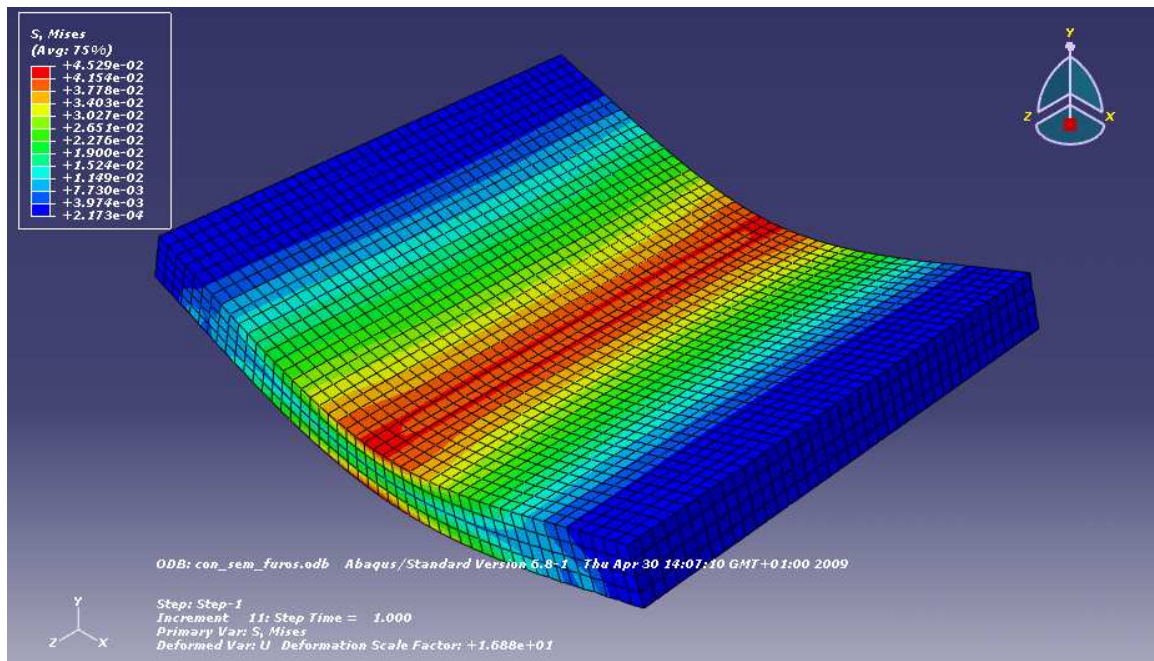


Figura 105- Distribuição de tensões na placa

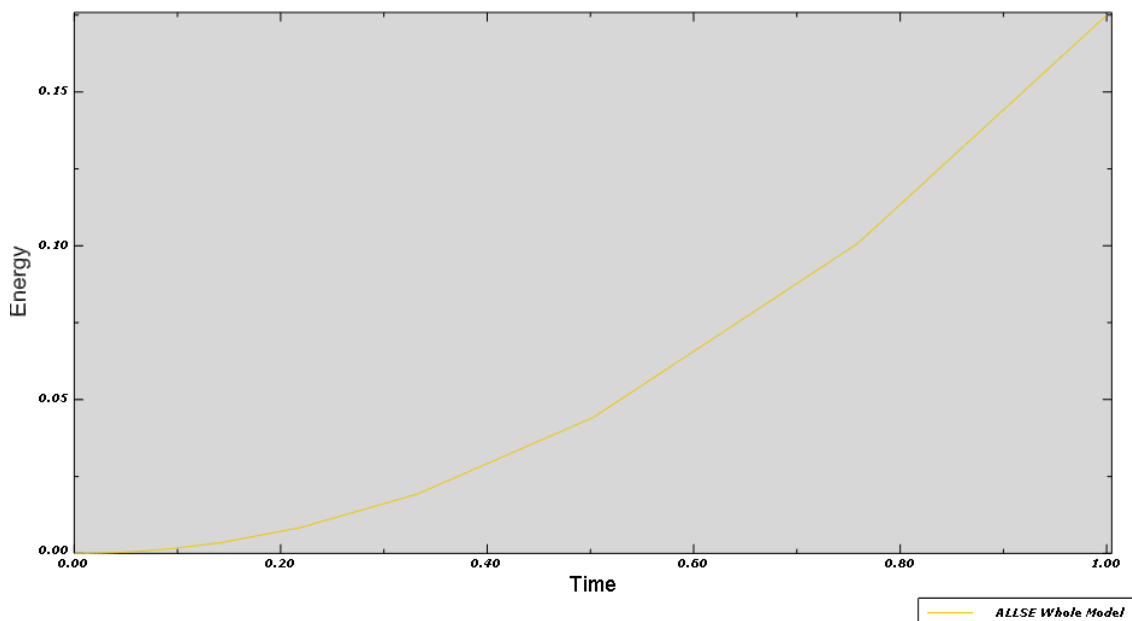


Figura 106- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.2 Furos circulares lineares (d= 2,5mm; e= 2,5mm)

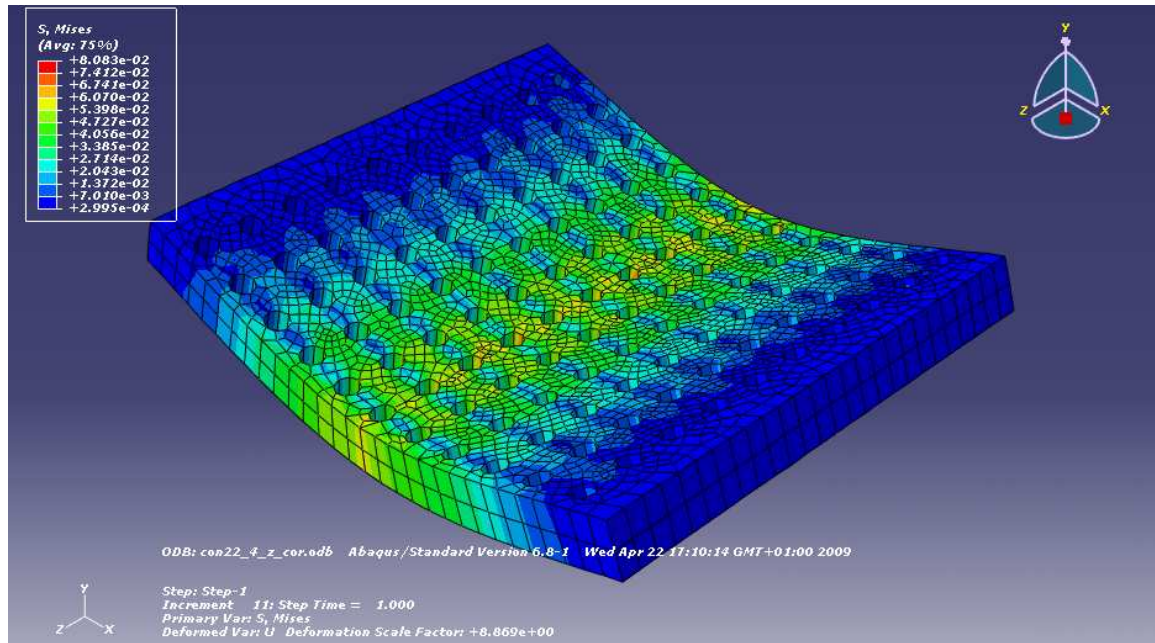


Figura 107- Distribuição de tensões na placa

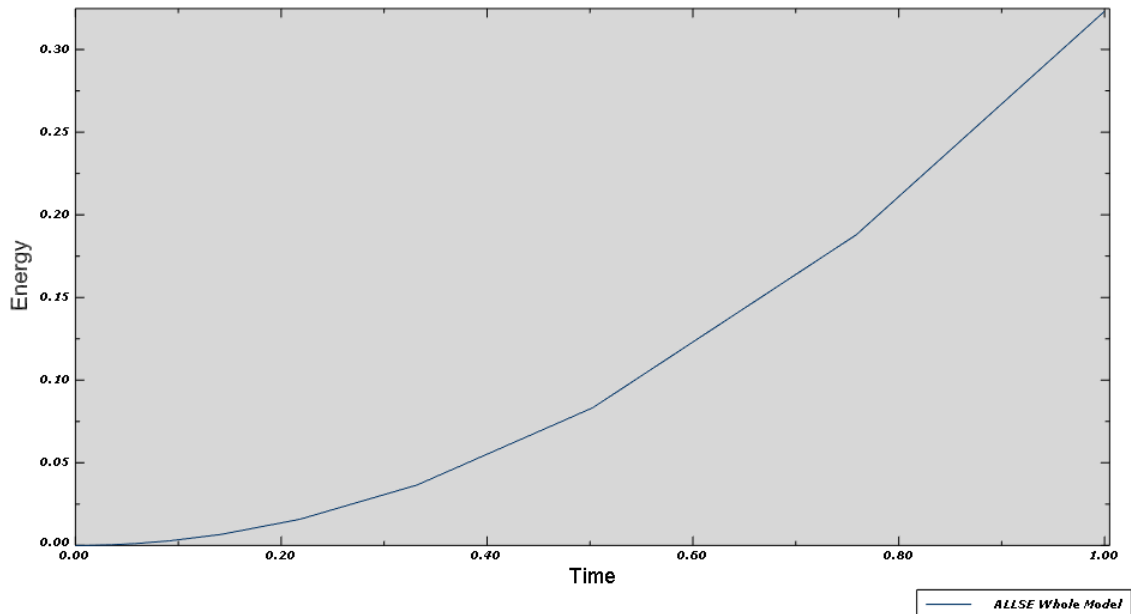


Figura 108- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.3 Furos circulares lineares ($d= 2,5\text{mm}$; $e= 5\text{mm}$)

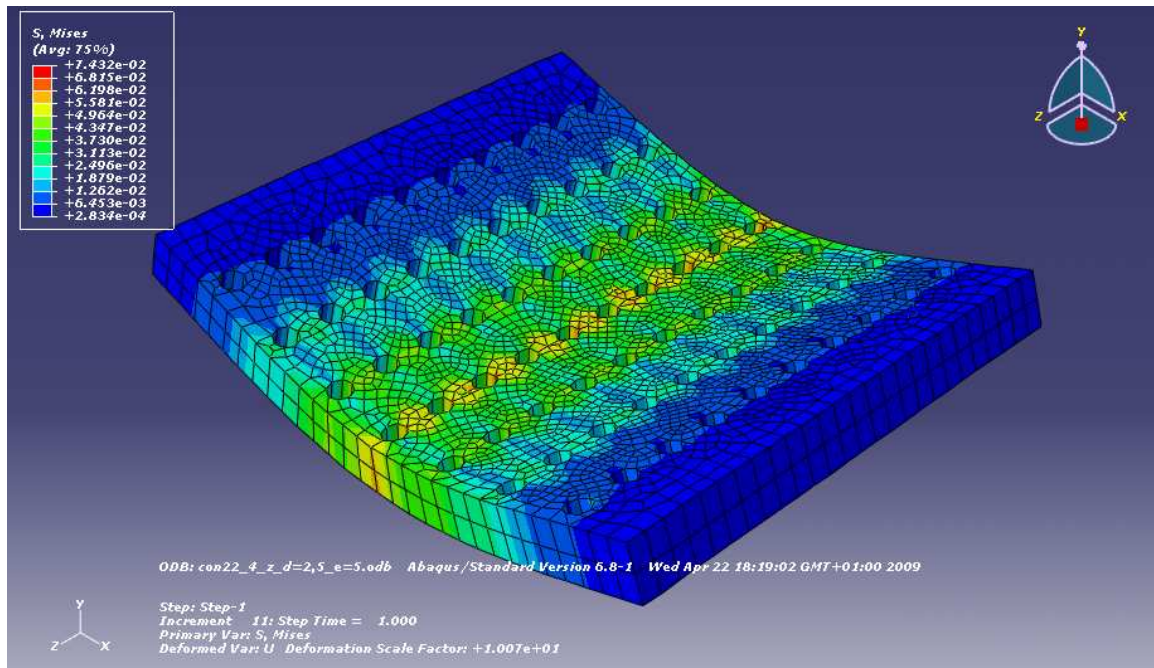


Figura 109- Distribuição de tensões na placa

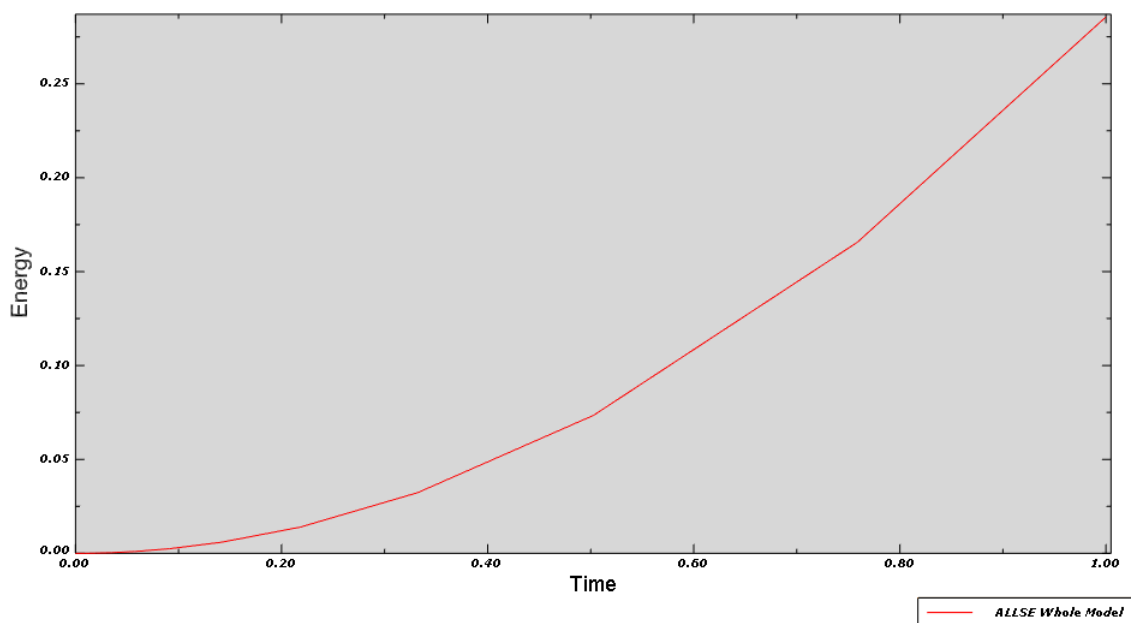


Figura 110- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.4 Furos circulares lineares ($d=2,5\text{mm}$; $e=7,5\text{mm}$)

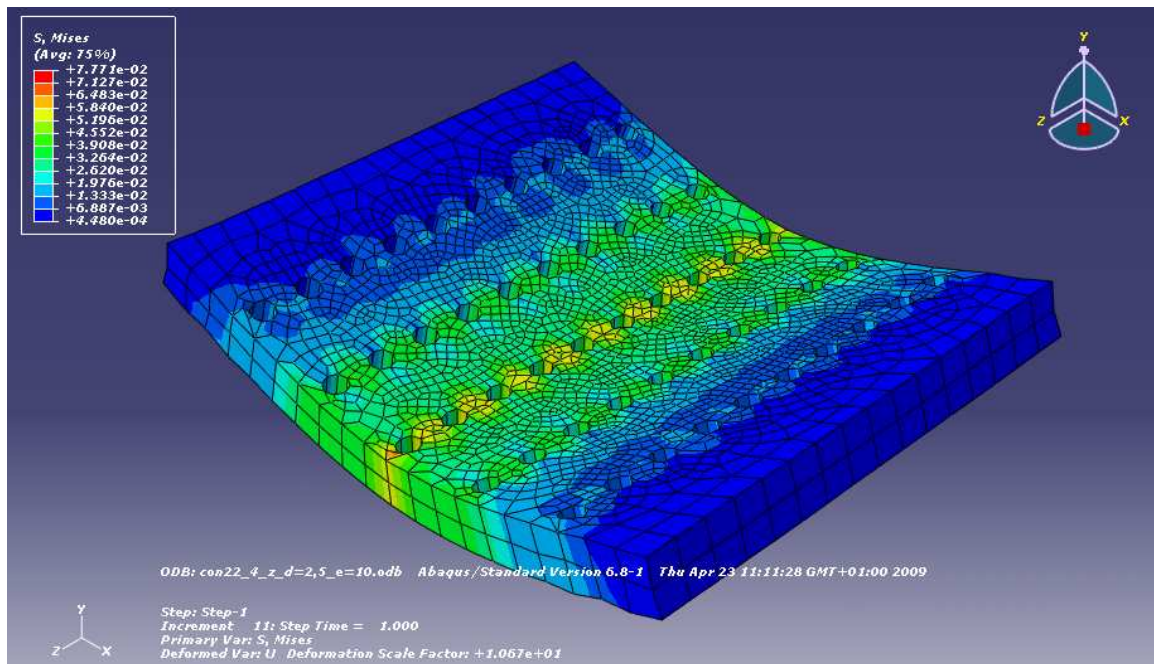


Figura 111- Distribuição de tensões na placa

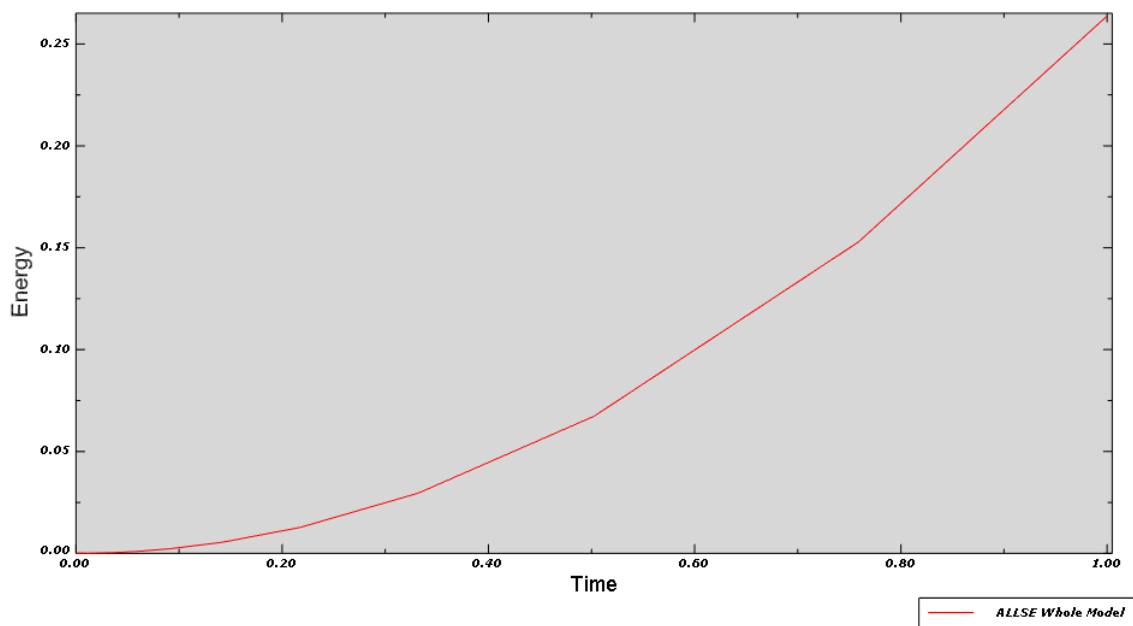


Figura 112- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.5 Furos circulares com furação em triângulo ($d = 2,5 \text{ mm}$; $e = 2,5 \text{ mm}$)

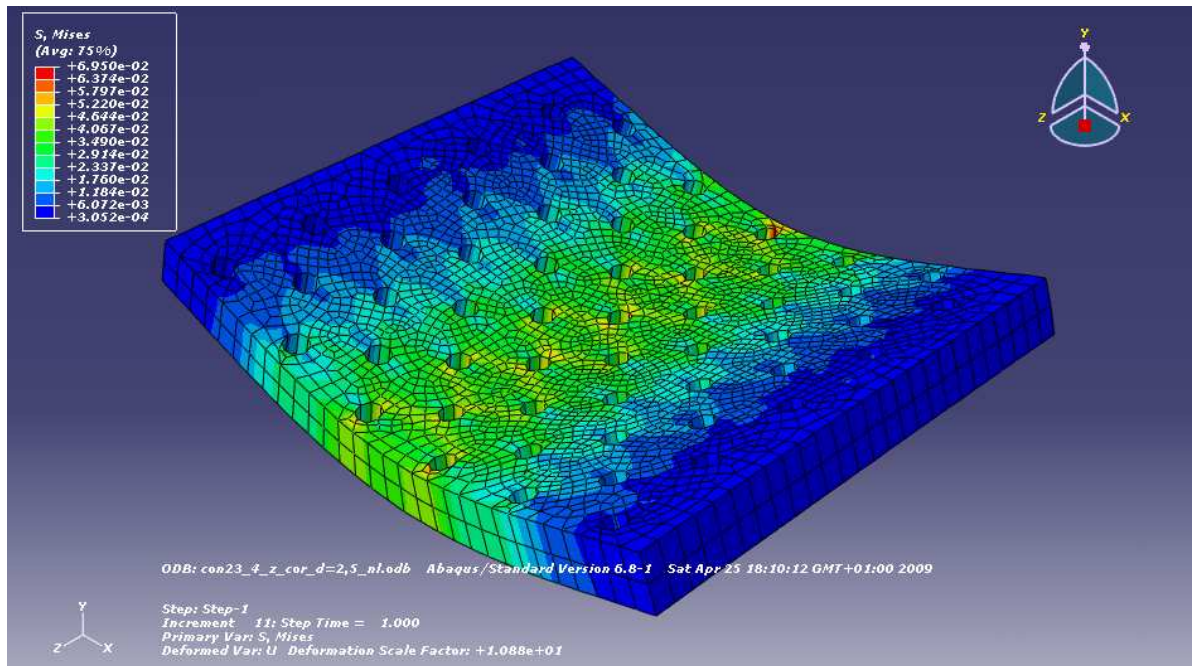


Figura 113- Distribuição de tensões na placa

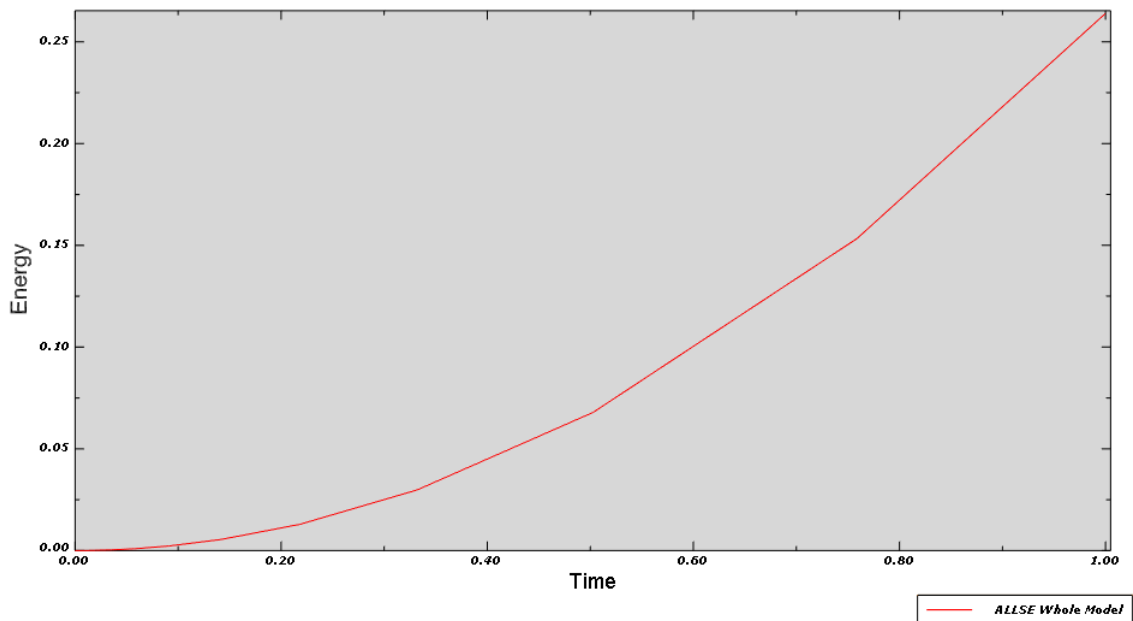


Figura 114- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.6 Furos circulares com furação em triângulo ($d = 2,5 \text{ mm}$; $e = 5 \text{ mm}$)

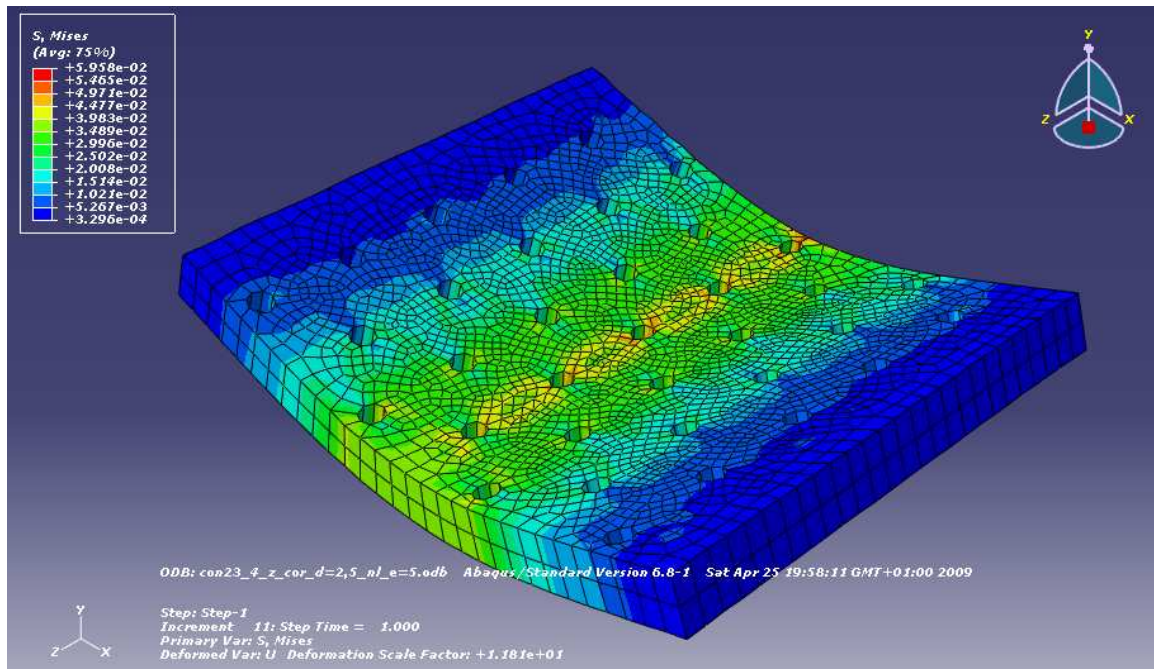


Figura 115- Distribuição de tensões na placa

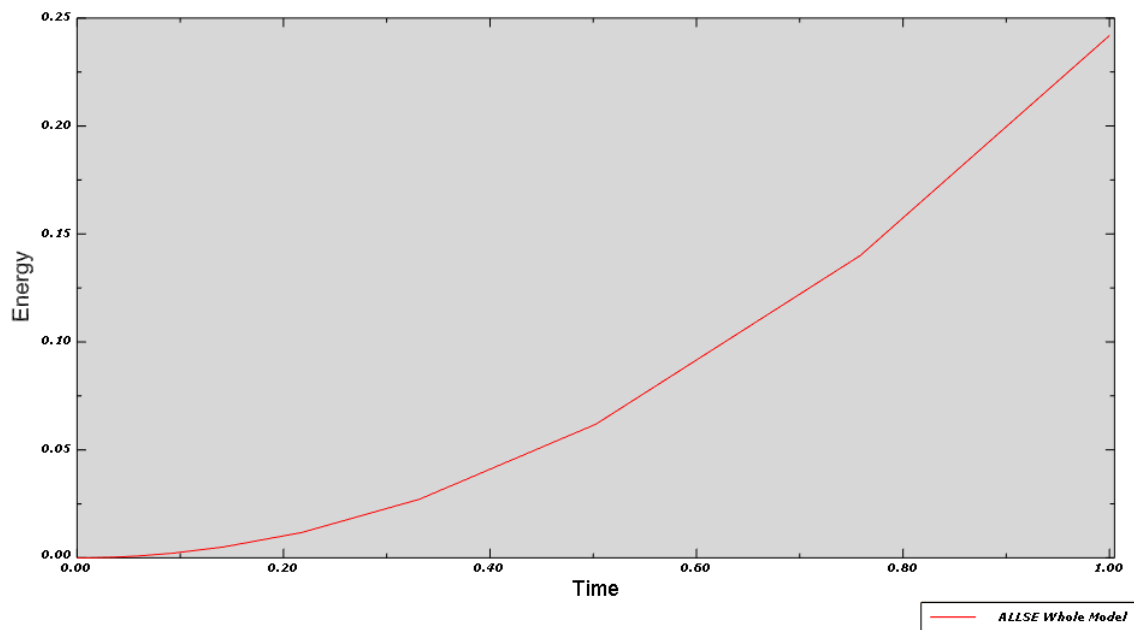


Figura 116- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.7 Furos circulares com furação em triângulo ($d = 2,5 \text{ mm}$; $e = 7,5 \text{ mm}$)

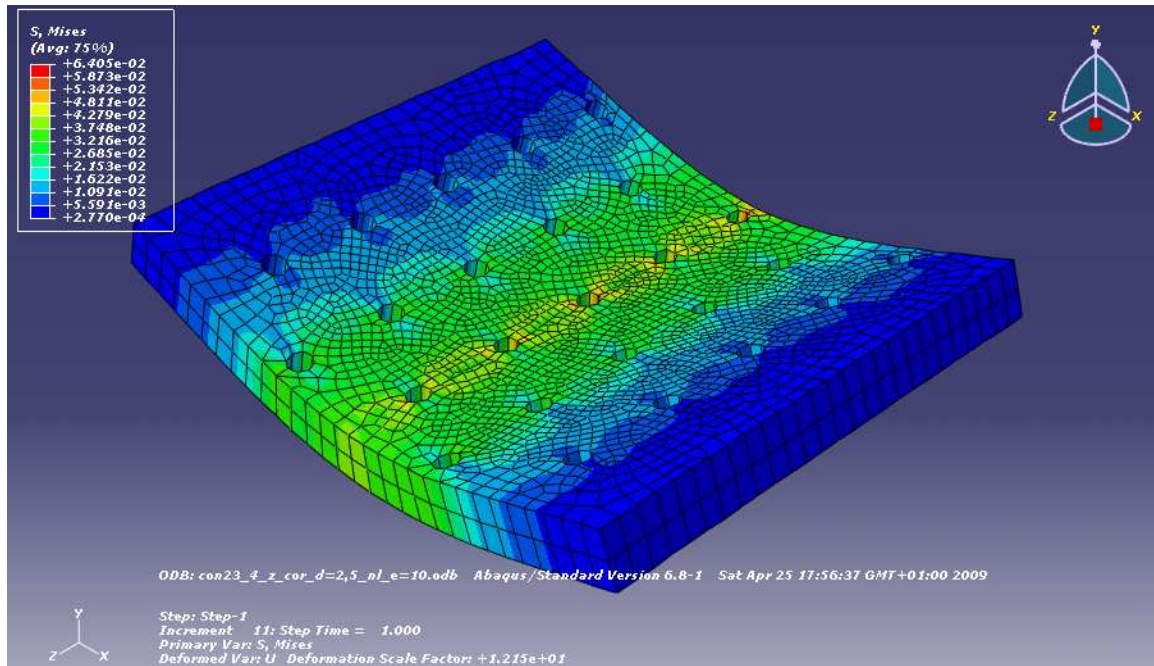


Figura 117- Distribuição de tensões na placa

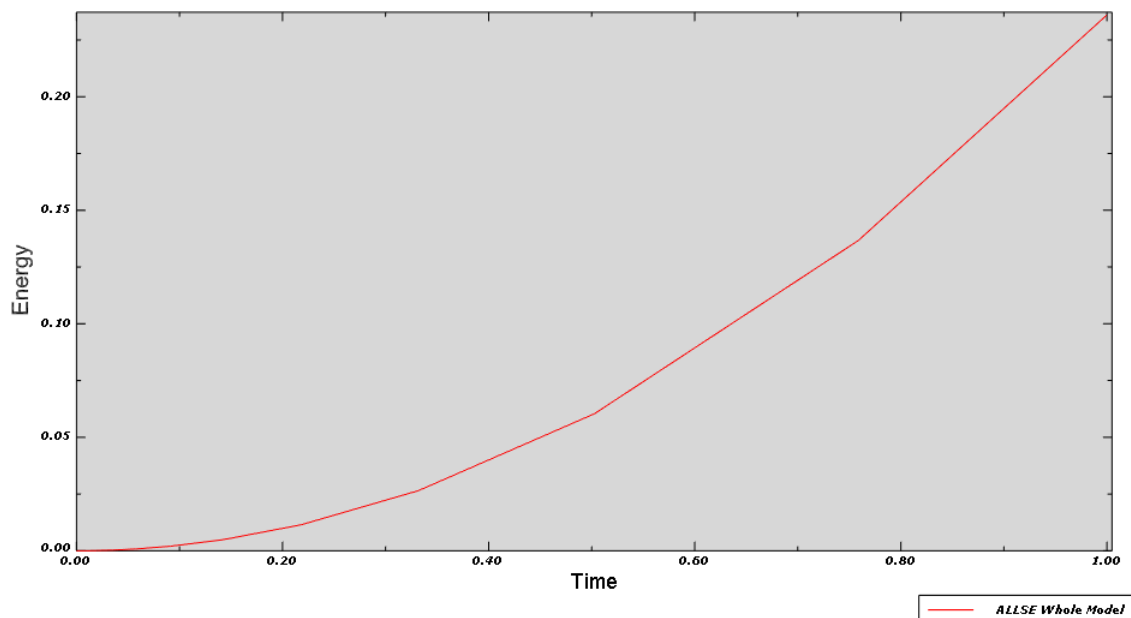


Figura 118- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.8 Furos circulares lineares ($d= 5\text{mm}$; $e= 2,5\text{mm}$)

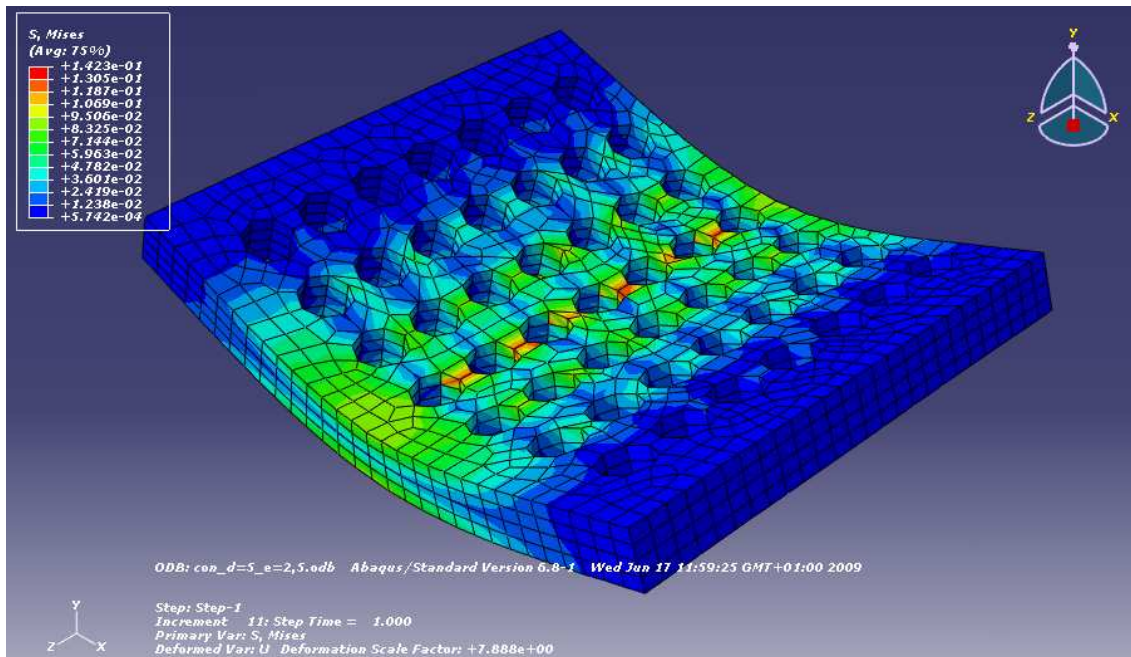


Figura 119- Distribuição de tensões na placa

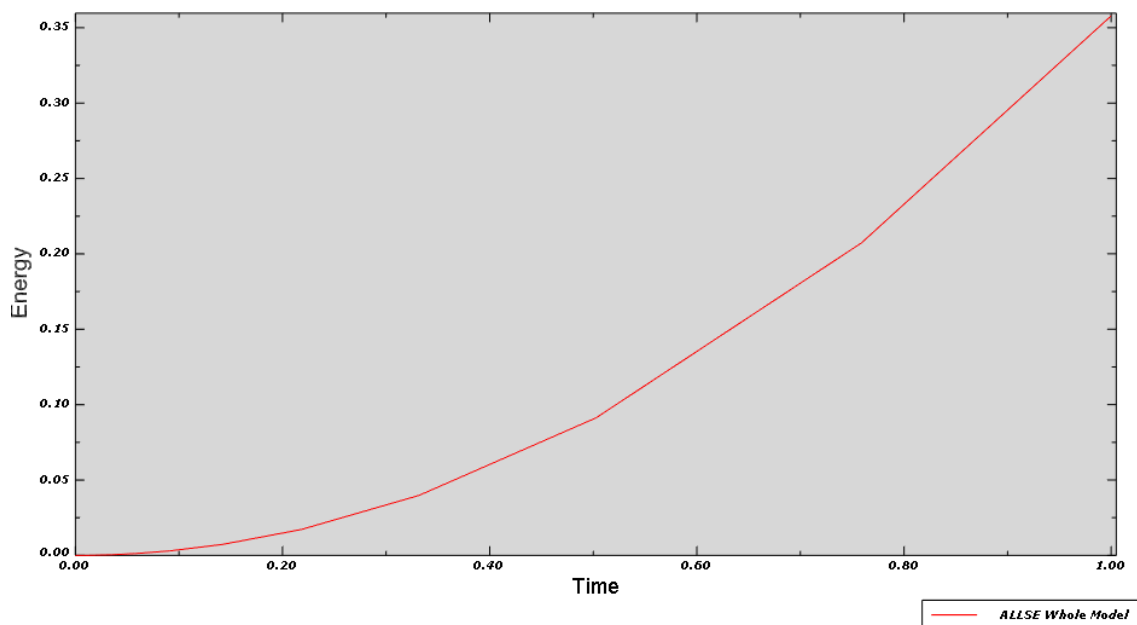


Figura 120- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.9 Furos circulares lineares ($d = 5 \text{ mm}$; $e = 5 \text{ mm}$)

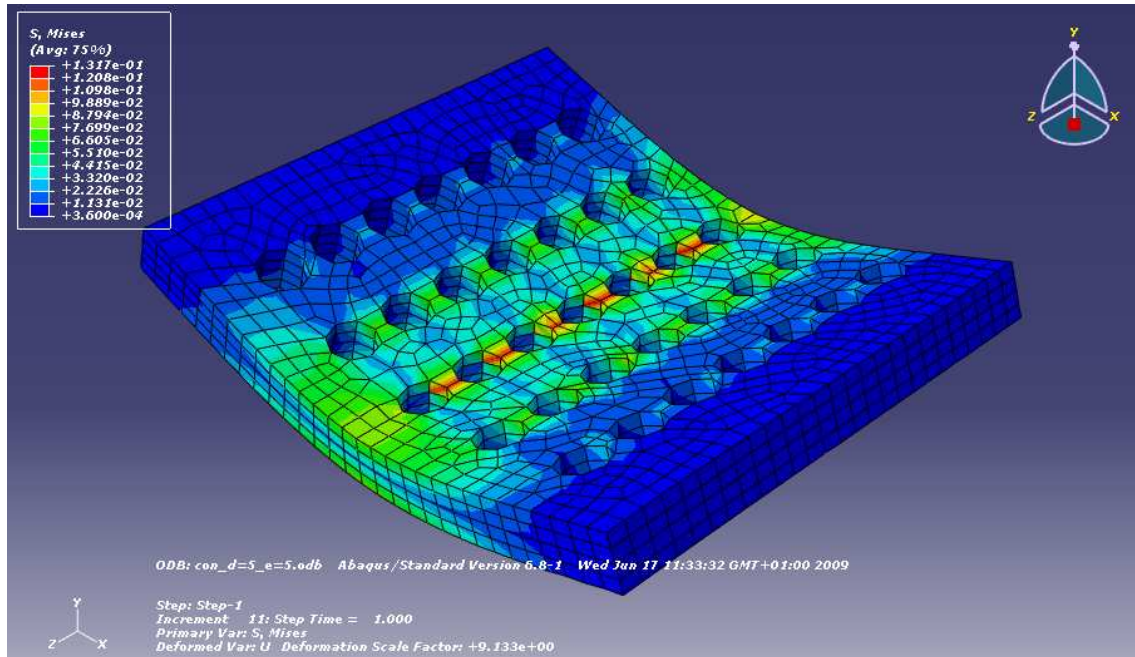


Figura 121- Distribuição de tensões na placa

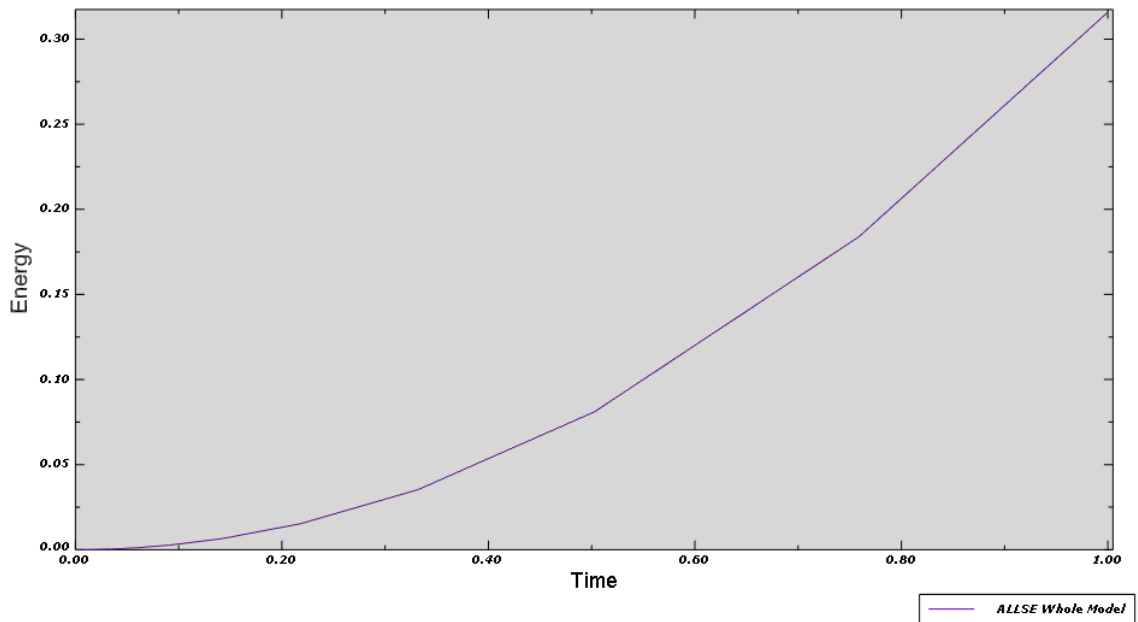


Figura 122- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.10 Furos circulares lineares ($d=5\text{mm}$; $e=7,5\text{mm}$)

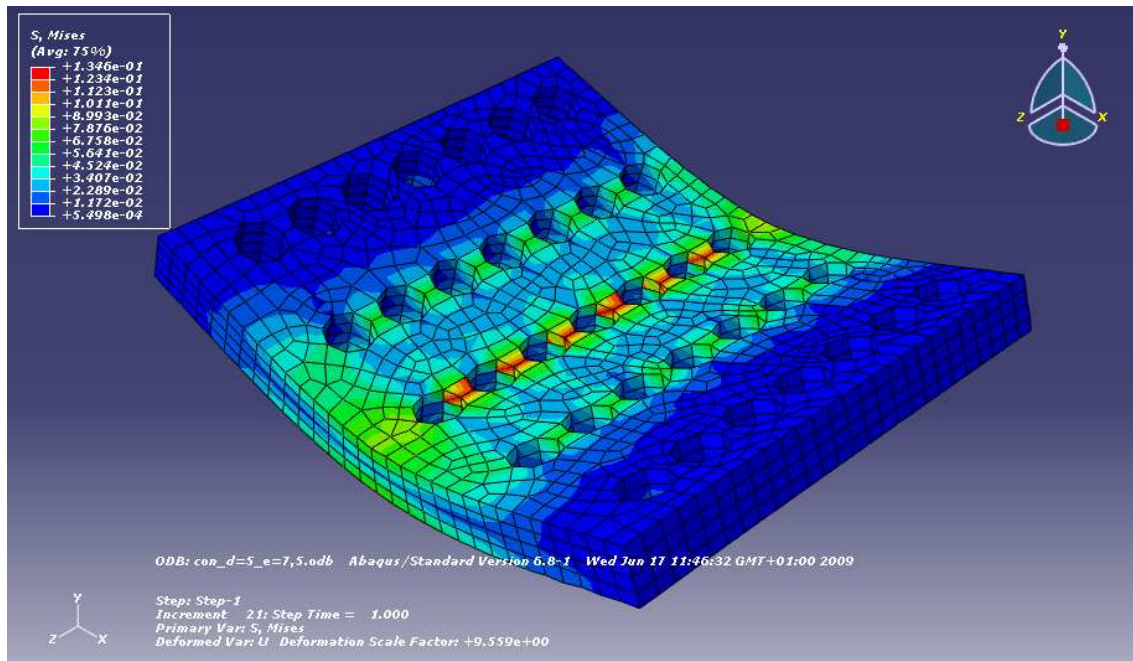


Figura 123- Distribuição de tensões na placa

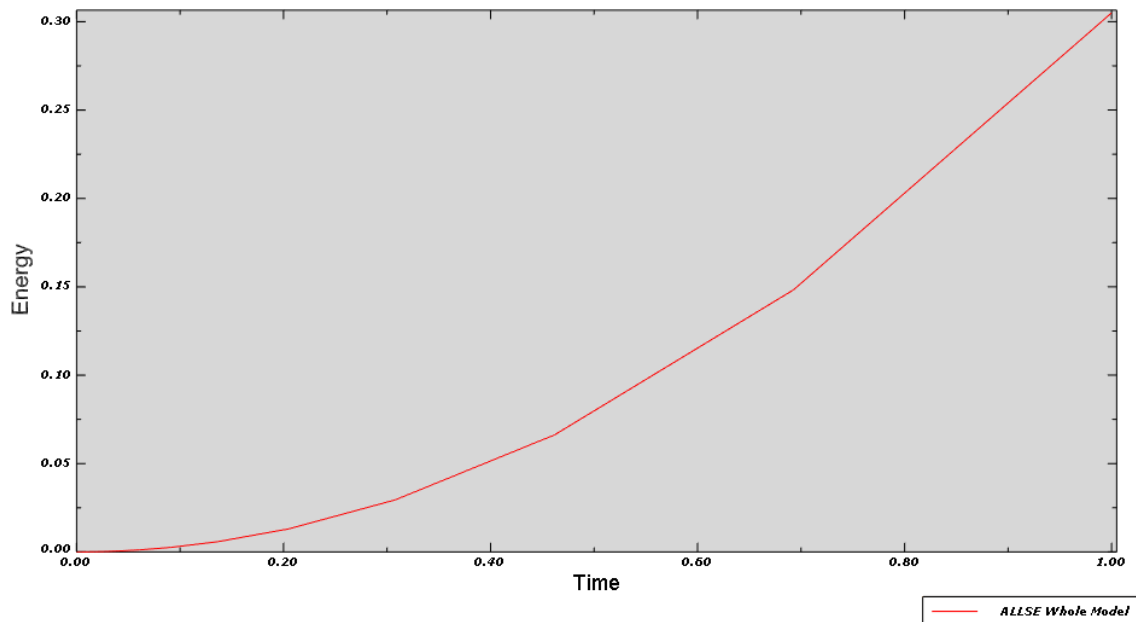


Figura 124- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.11 Furos circulares com furação em triângulo ($d = 5 \text{ mm}$; $e = 2,5 \text{ mm}$)

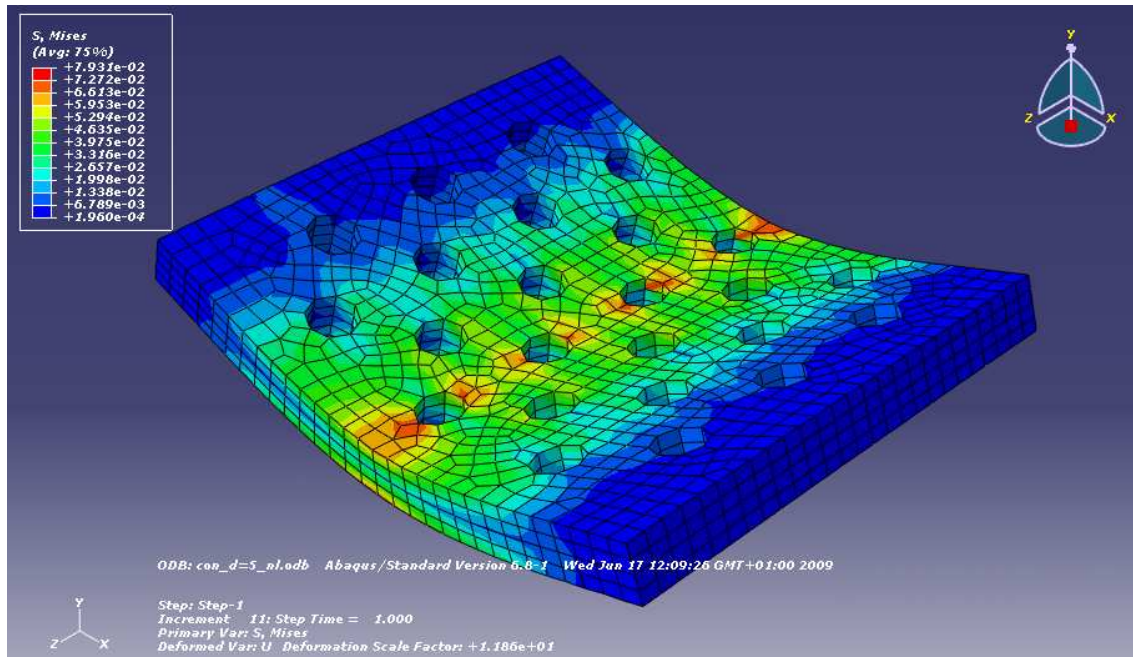


Figura 125- Distribuição de tensões na placa

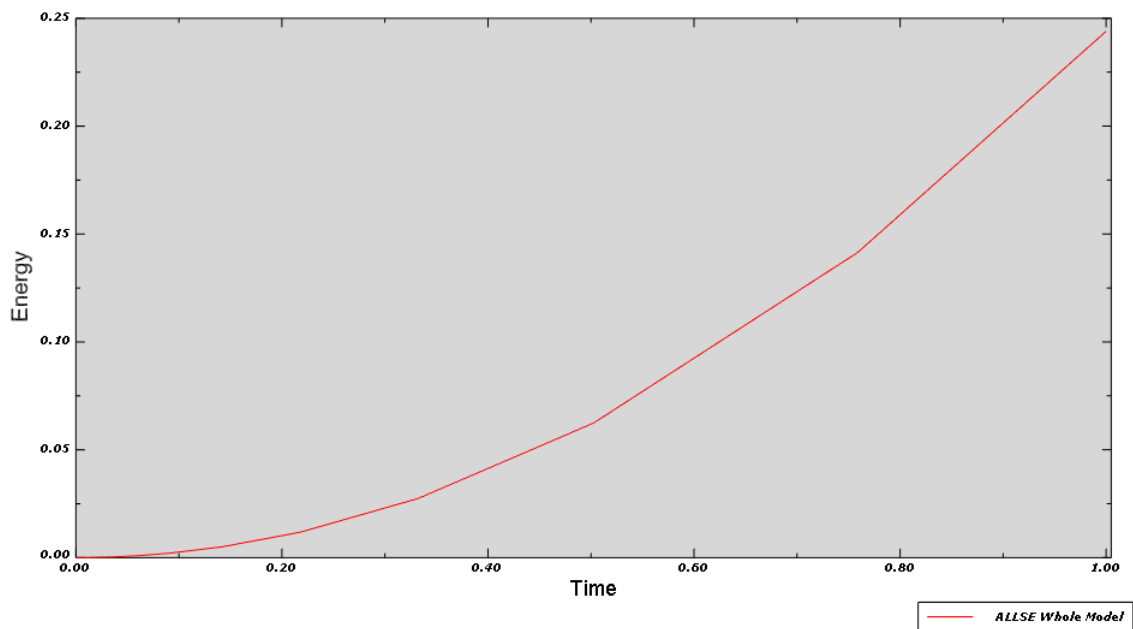


Figura 126- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.12 Furos circulares com furação em triângulo (d = 5 mm; e = 5 mm)

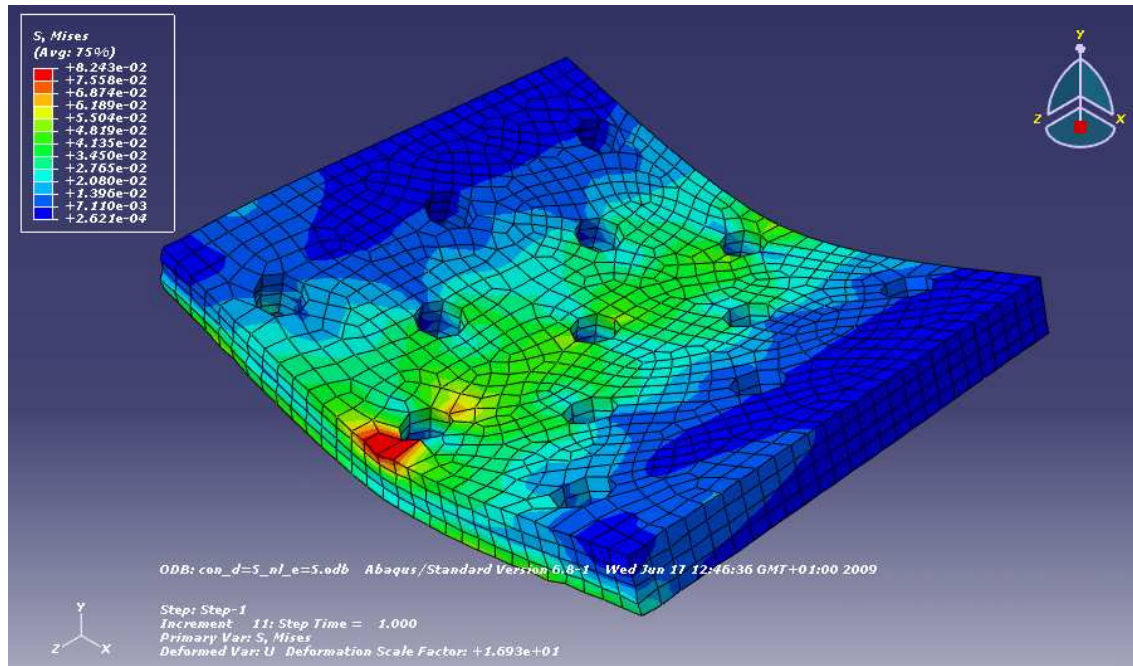


Figura 127- Distribuição de tensões na placa

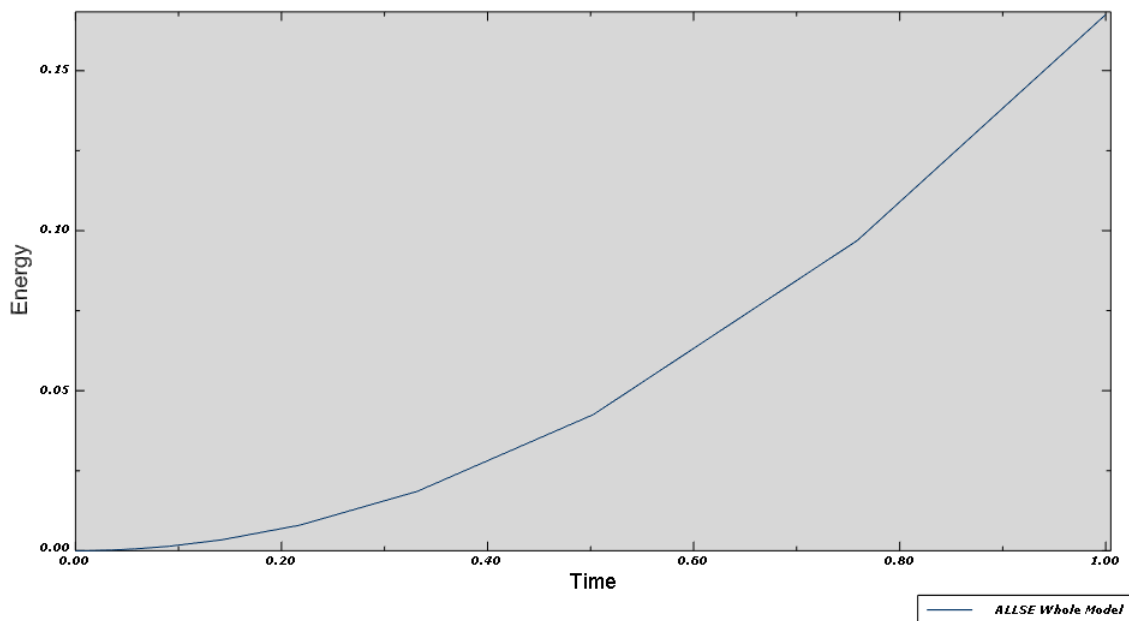


Figura 128- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.13 Furos circulares com furação em triângulo ($d = 5 \text{ mm}$; $e = 7,5 \text{ mm}$)

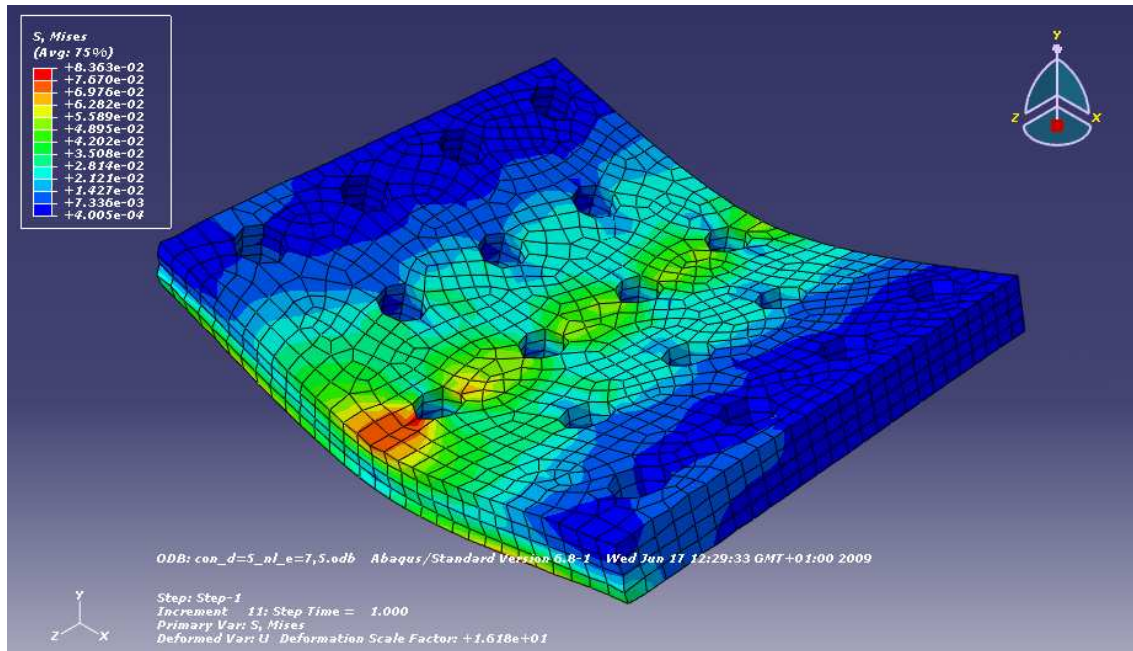


Figura 129- Distribuição de tensões na placa

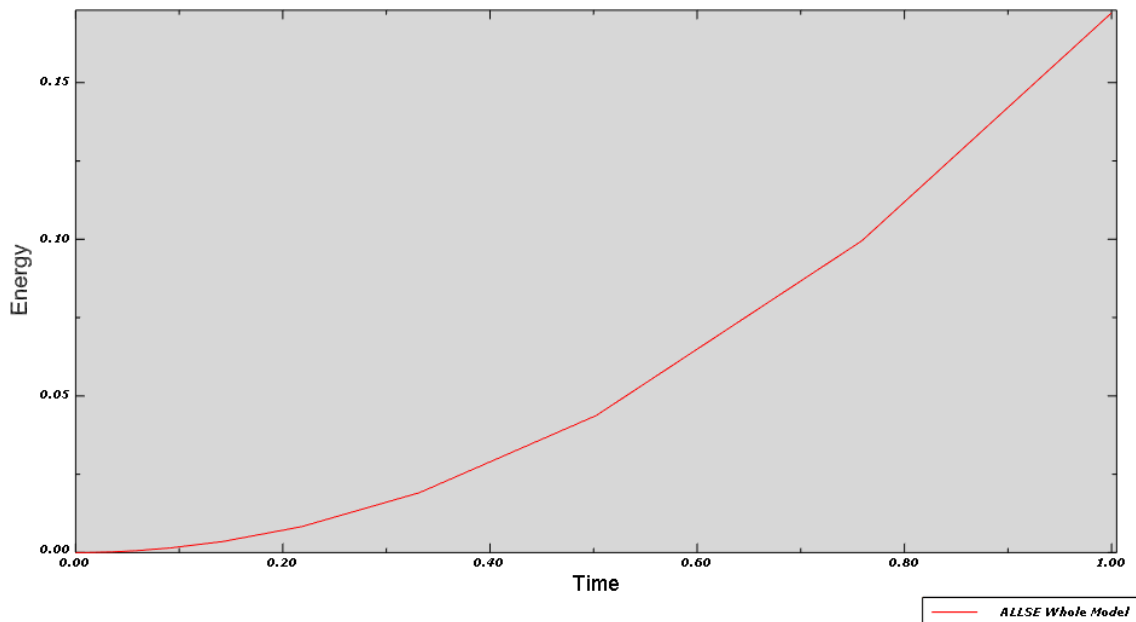


Figura 130- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.14 Furos quadrados lineares (lado = 2,5 mm; e= 2,5mm)

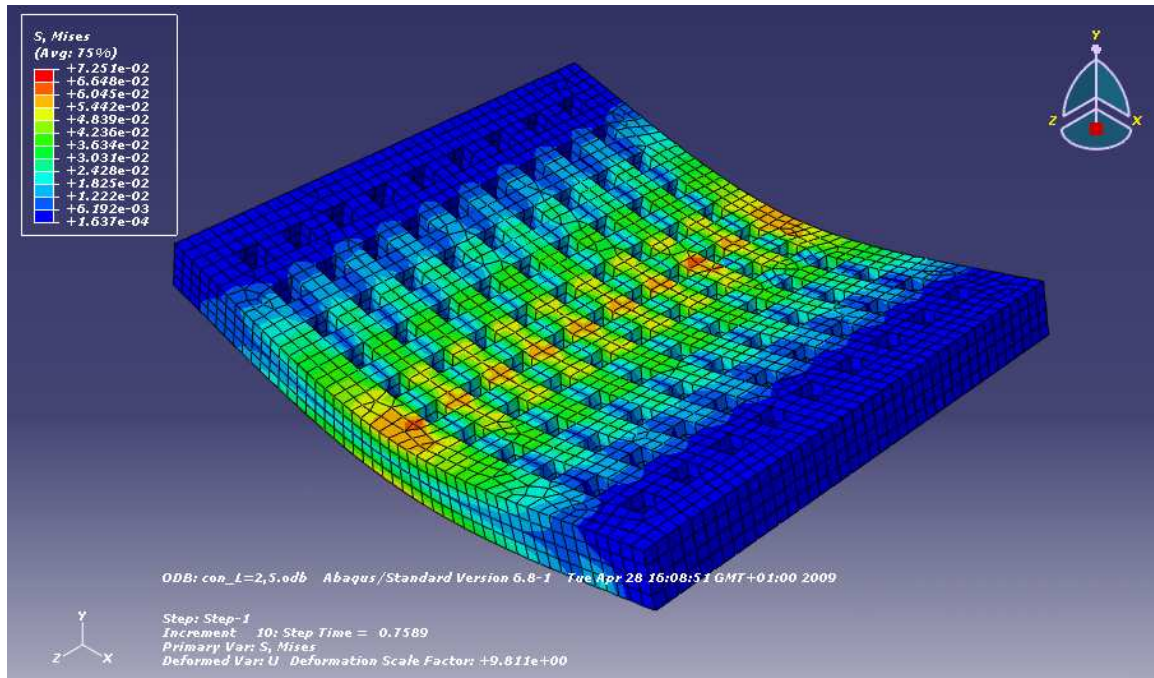


Figura 132- Distribuição de tensões na placa

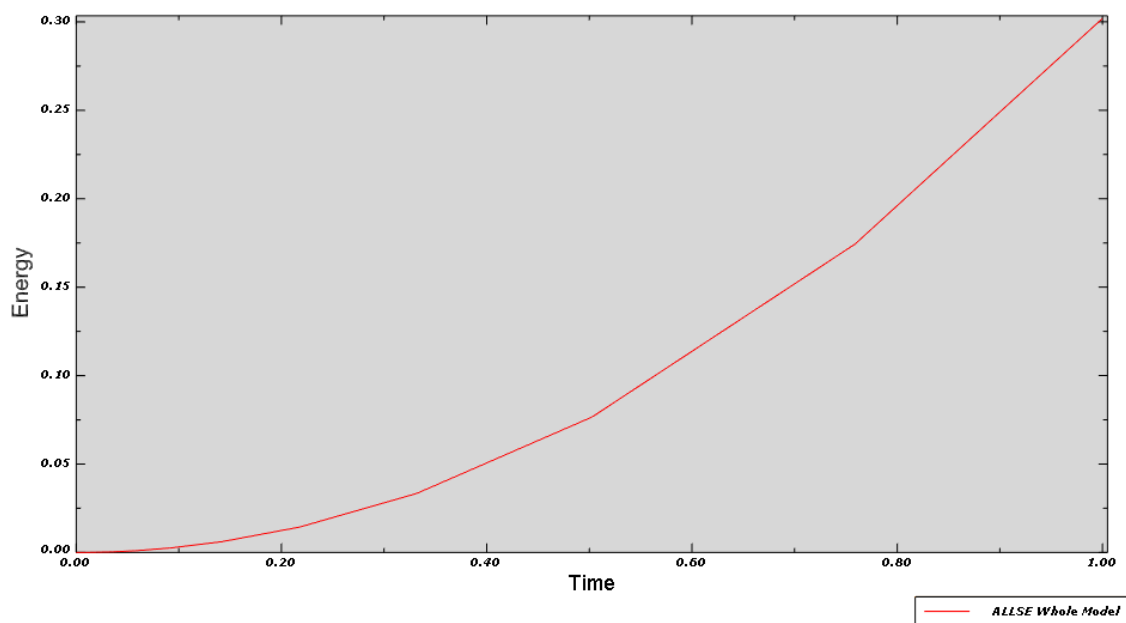


Figura 131- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.15 Furos quadrados lineares (lado = 2,5 mm; e= 5mm)

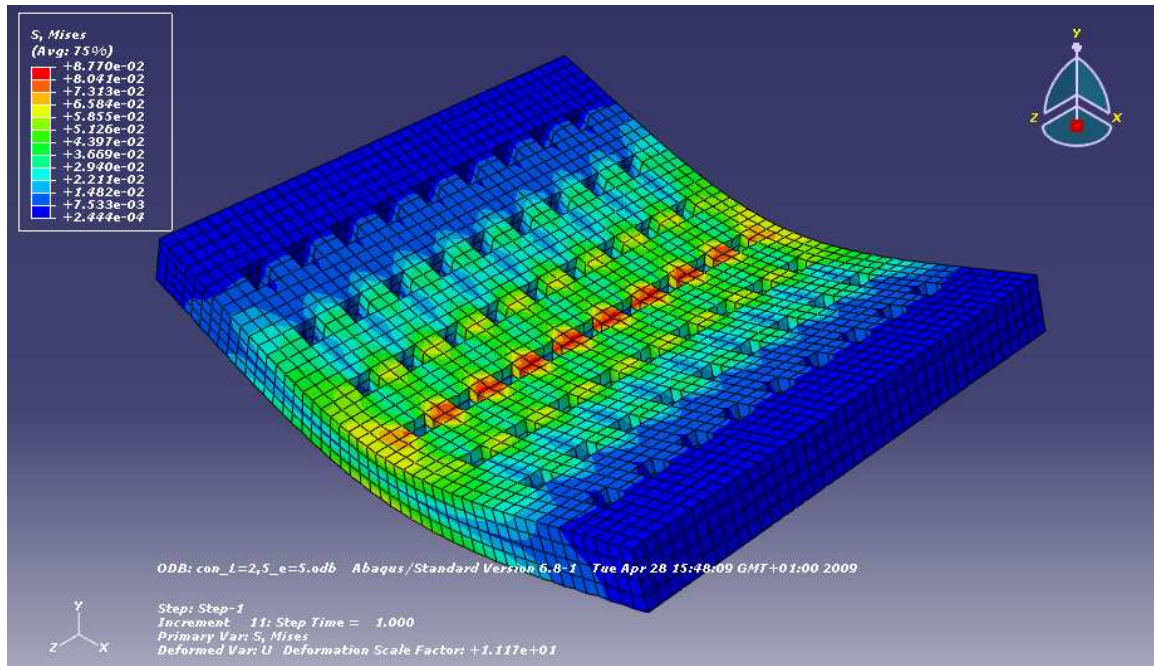


Figura 133- Distribuição de tensões na placa

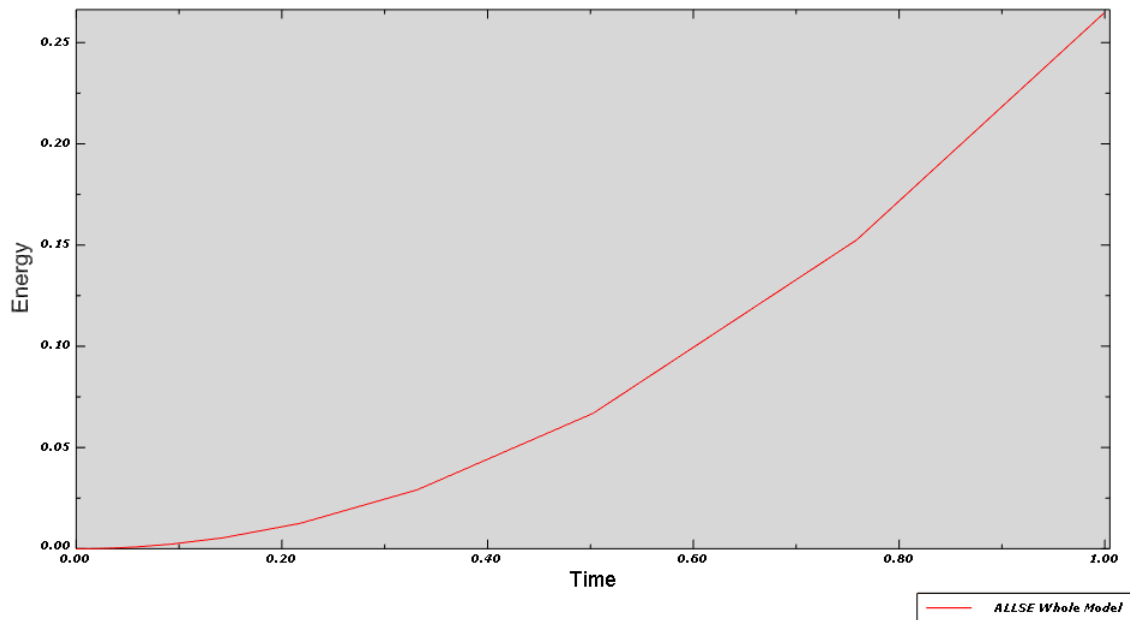


Figura 134- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.16 Furos quadrados lineares (lado = 2,5 mm; e= 7,5mm)

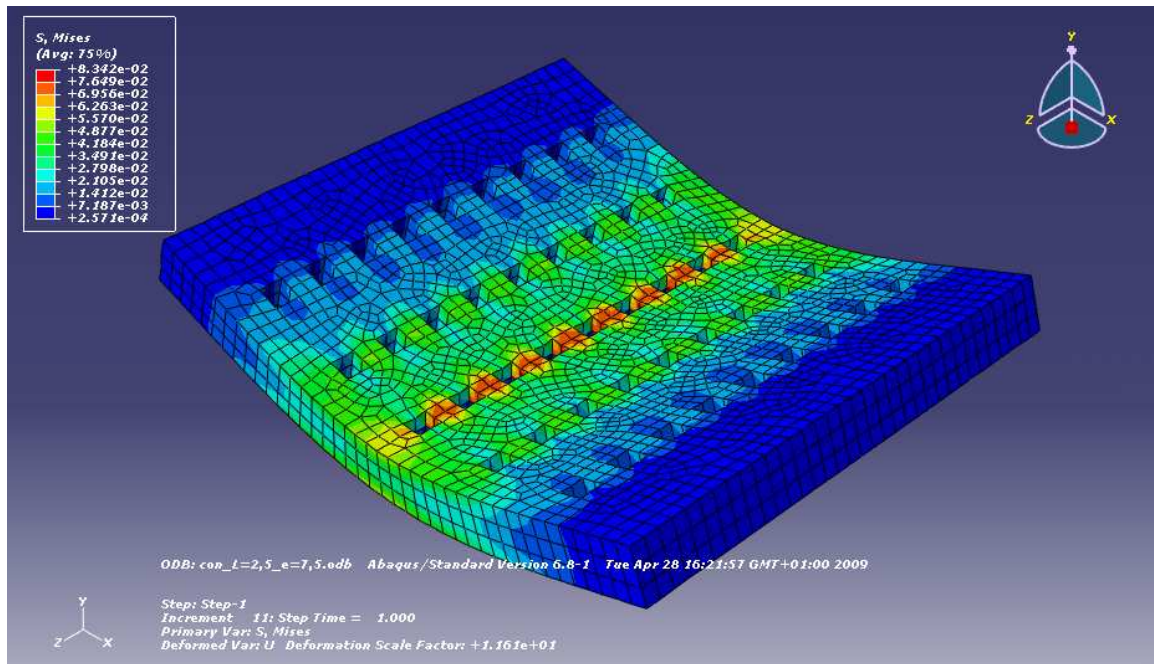


Figura 135- Distribuição de tensões na placa

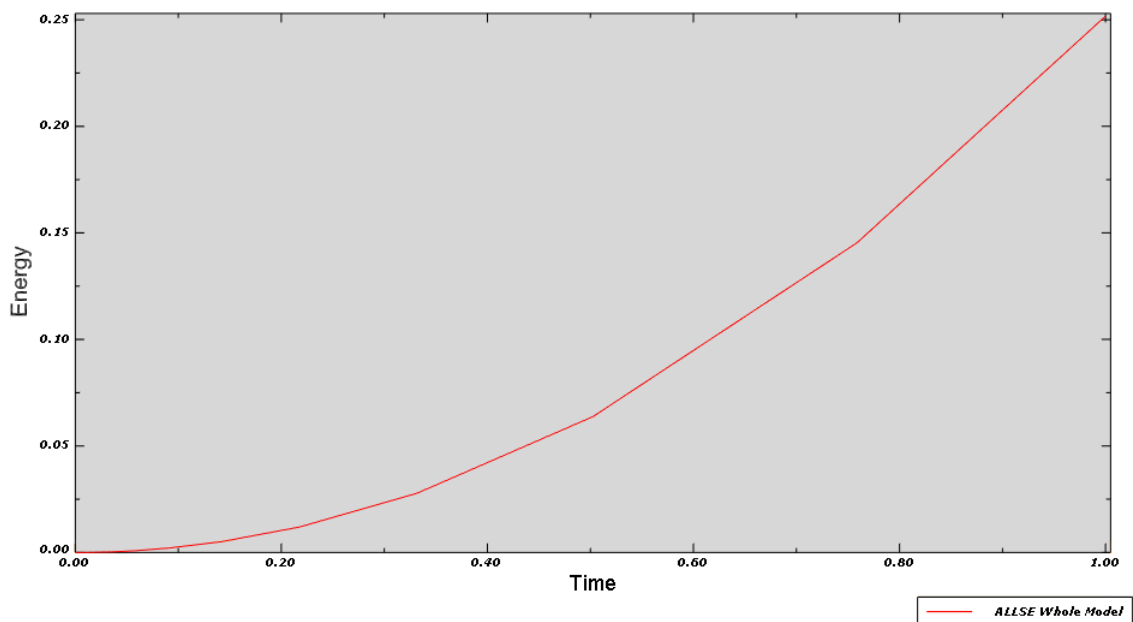


Figura 136- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.17 Furos quadrados com furação em triângulo (lado = 2,5mm; e = 2,5 mm)

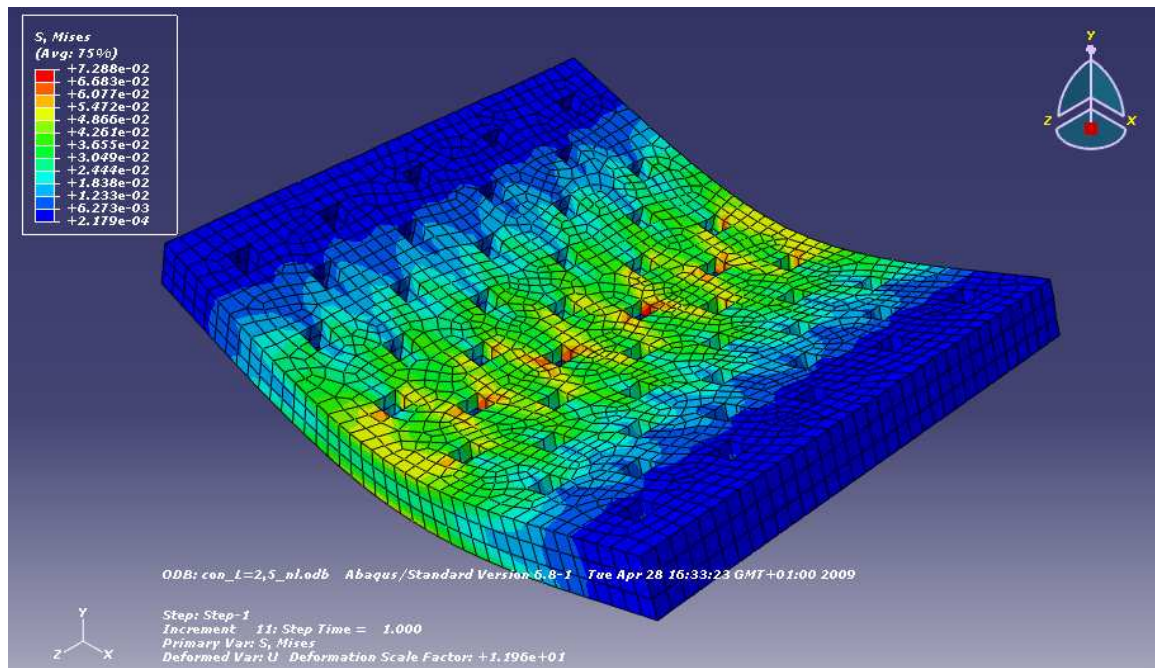


Figura 137- Distribuição de tensões na placa

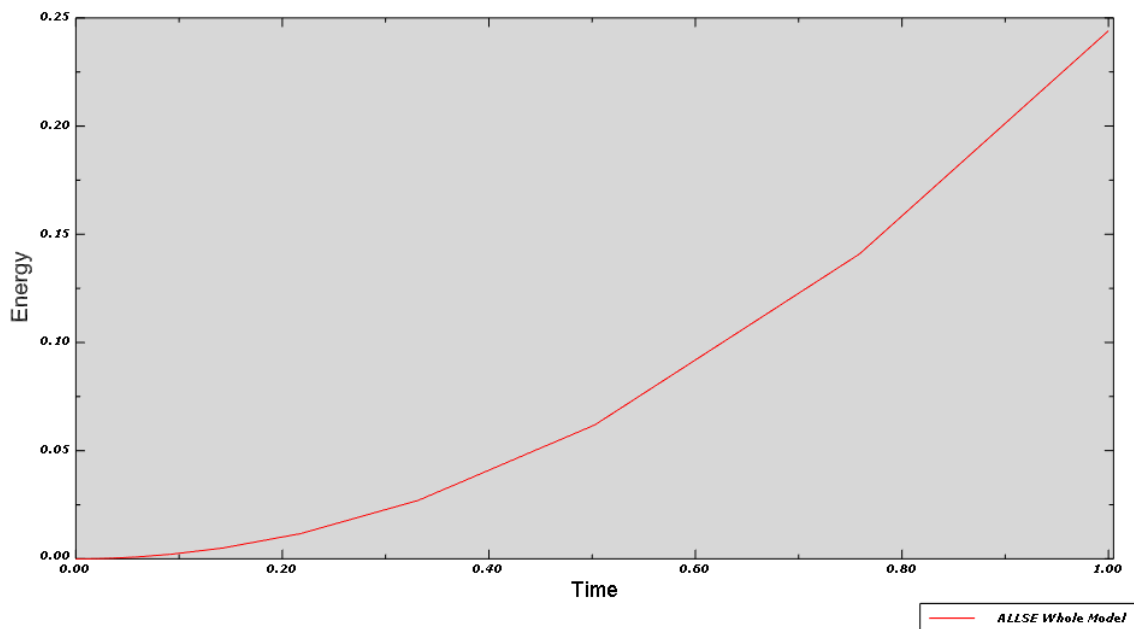


Figura 138- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.18 Furos quadrados com furação em triângulo (lado = 2,5mm; e = 5 mm)

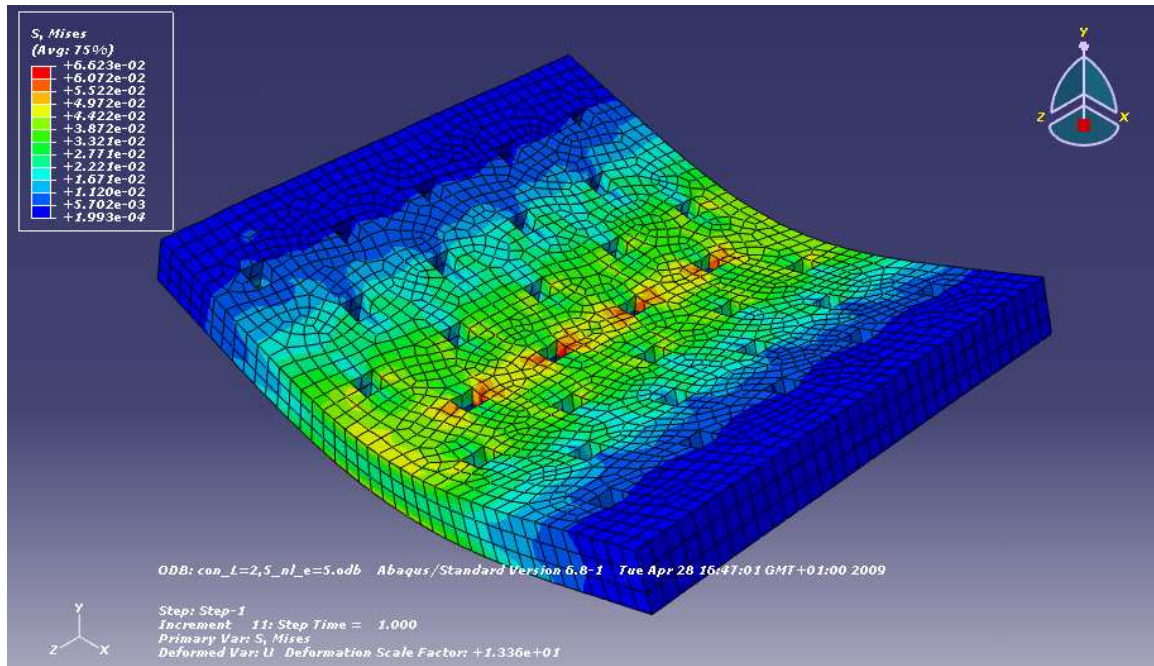


Figura 139- Distribuição d e tensões na placa

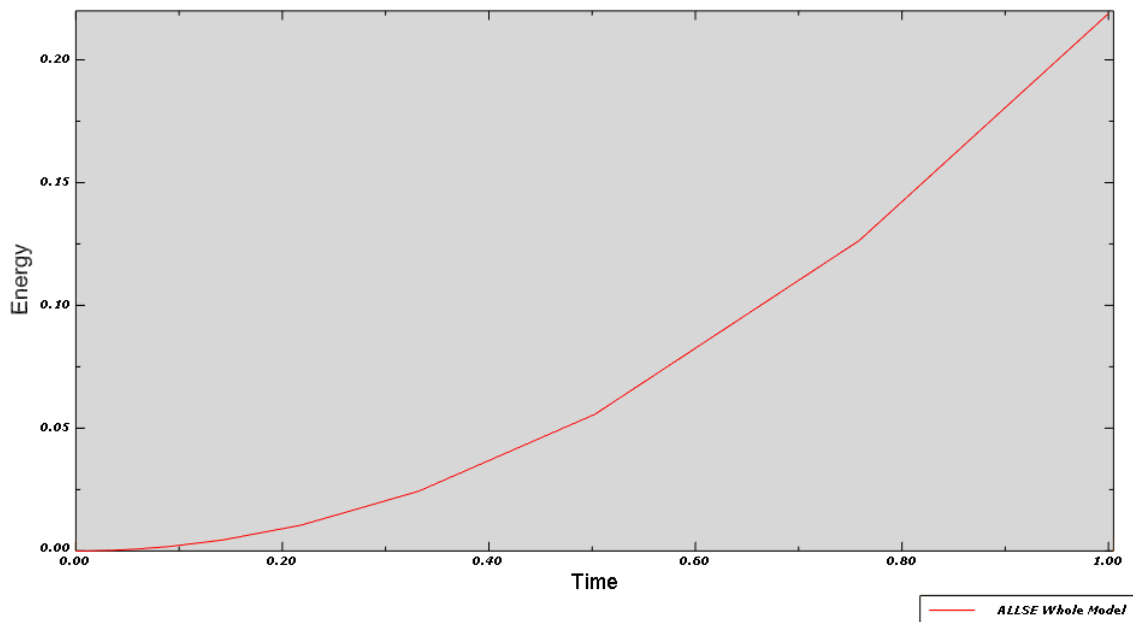


Figura 140- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.19 Furos quadrados com furação em triângulo (lado = 2,5mm; e = 7,5 mm)

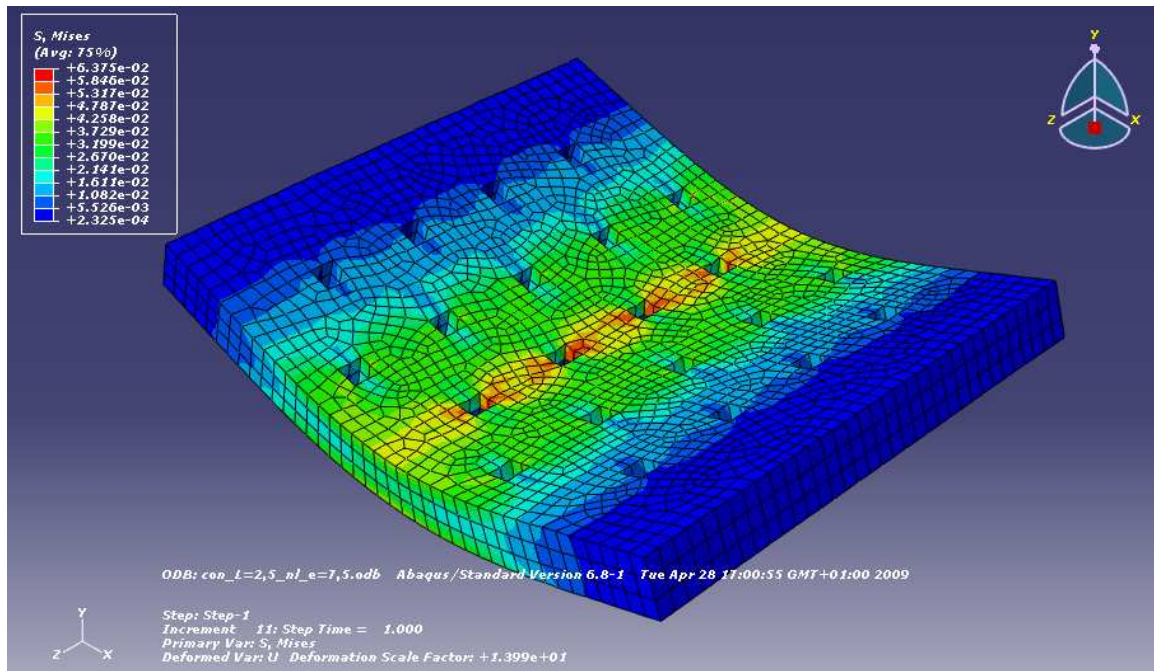


Figura 141- Distribuição de tensões na placa

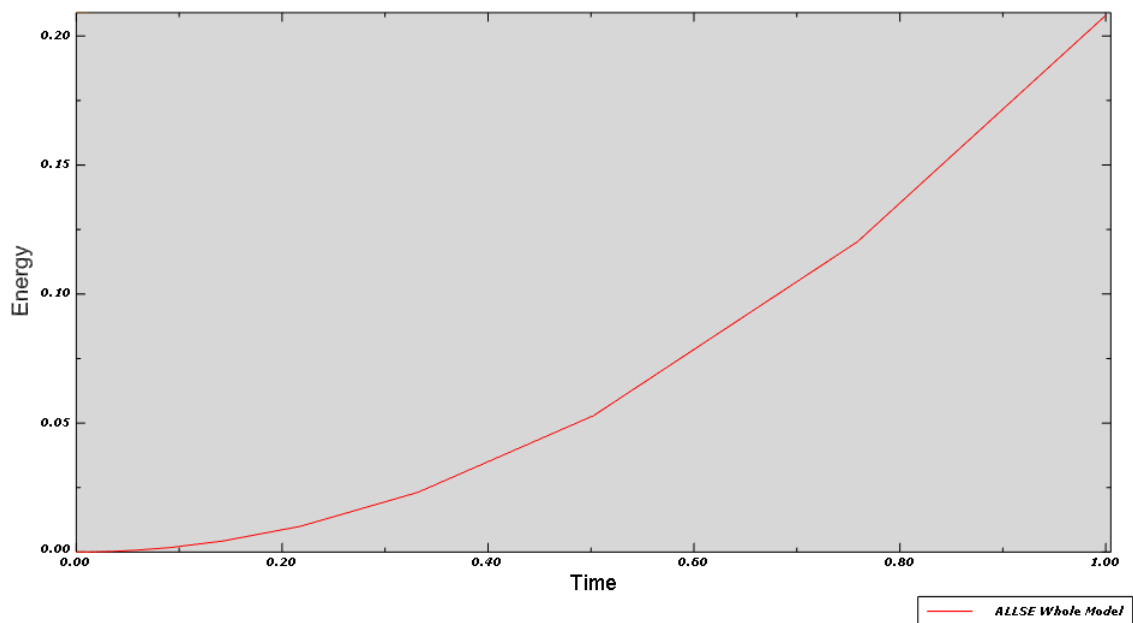


Figura 142- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.20 Furos quadrados lineares (lado = 5 mm; e = 2,5mm)

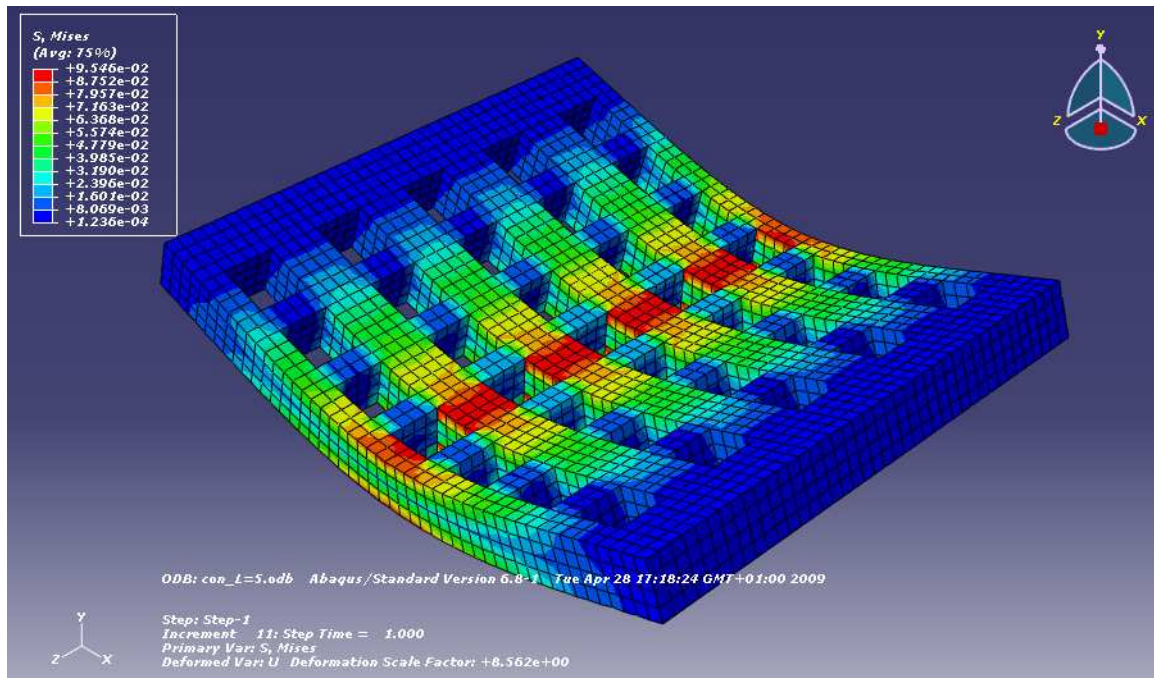


Figura 143- Distribuição de tensões na placa

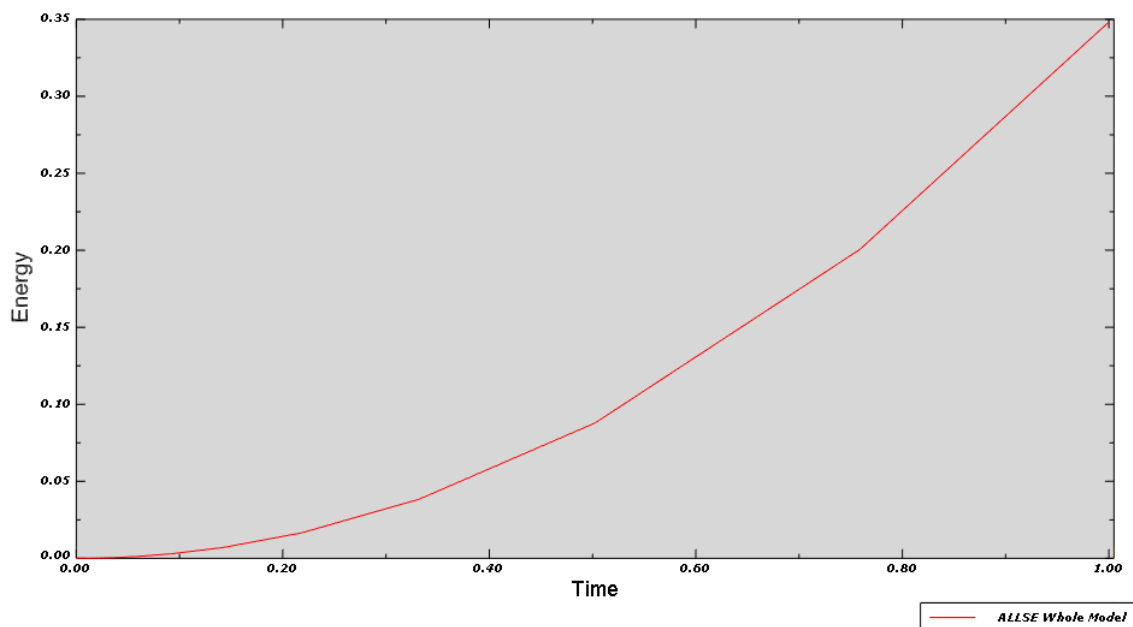


Figura 144- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.21 Furos quadrados lineares (lado = 5 mm; e = 5mm)

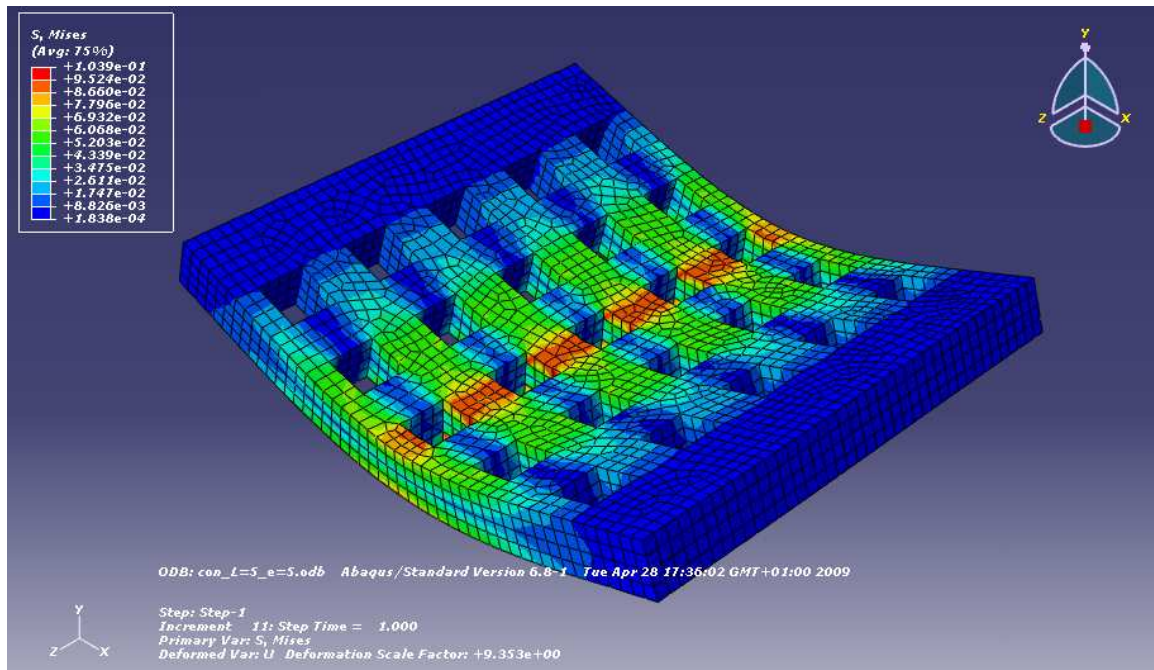


Figura 145- Distribuição de tensões na placa

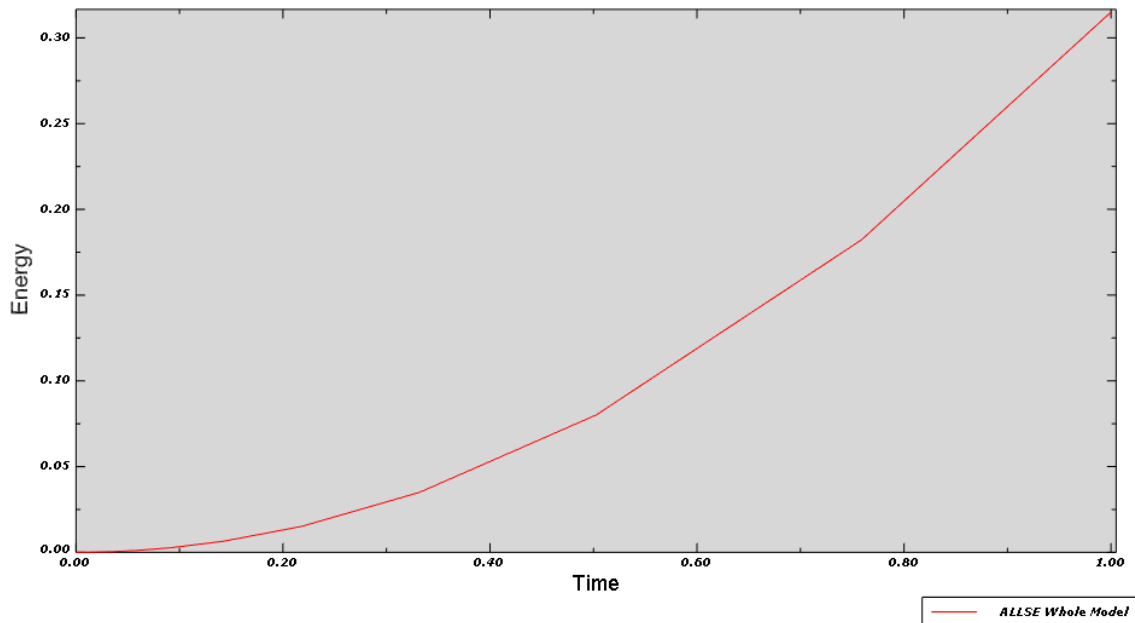


Figura 146- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.22 Furos quadrados lineares (lado = 5 mm; e = 7,5mm)

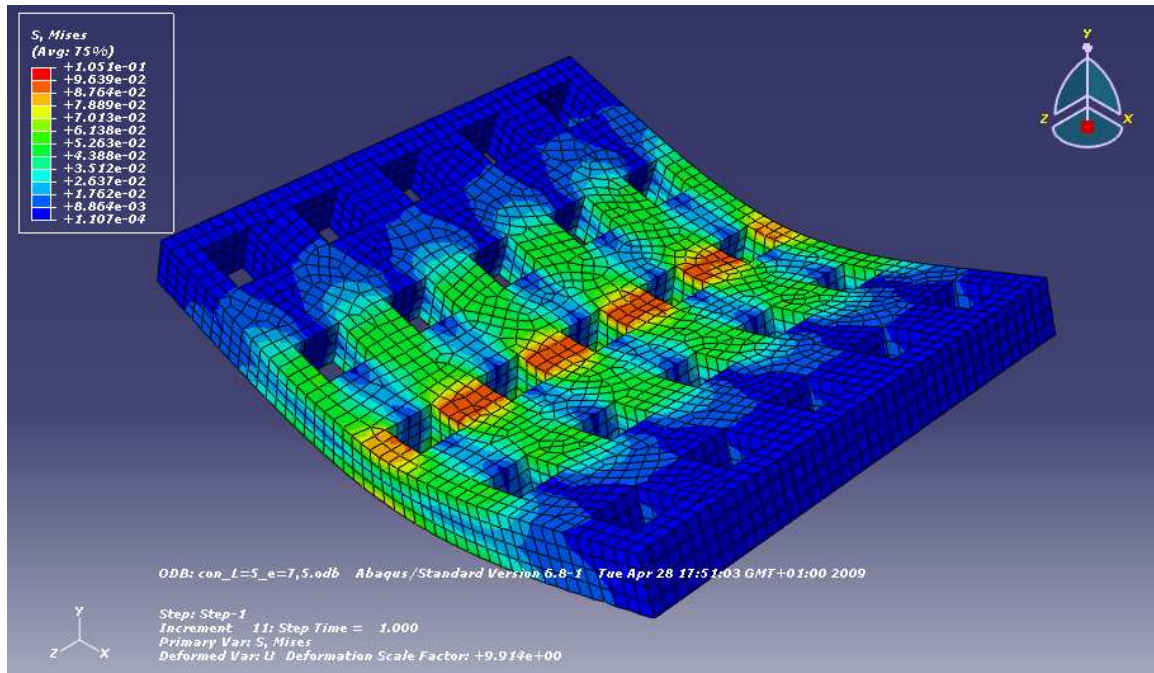


Figura 147- Distribuição de tensões na placa

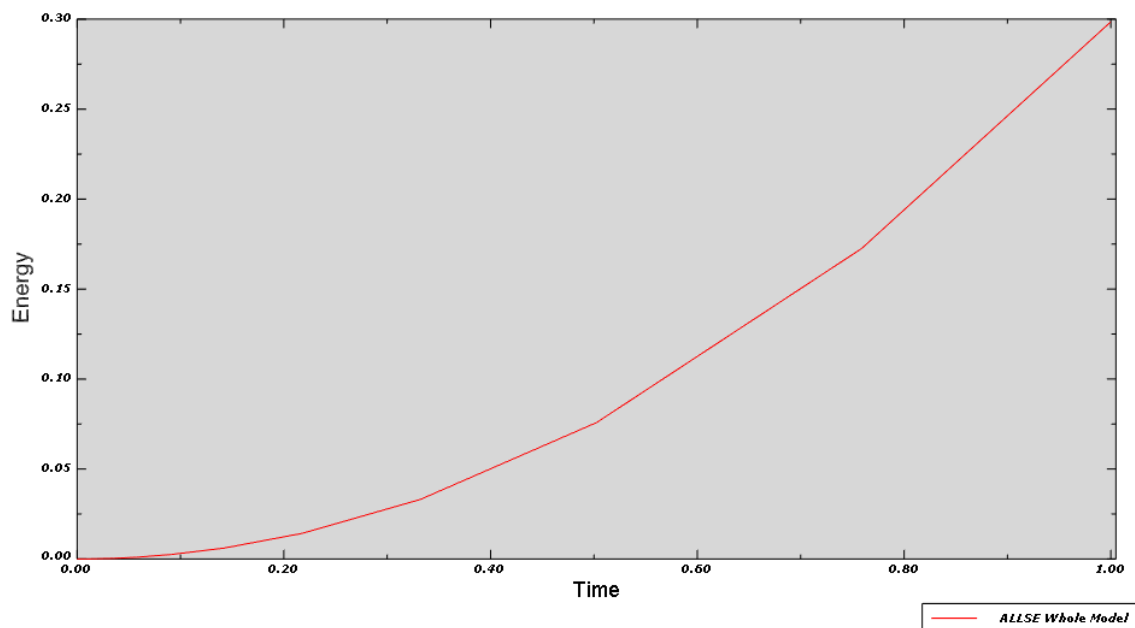


Figura 148- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.23 Furos quadrados com furação em triângulo (lado = 5mm; e = 2,5 mm)

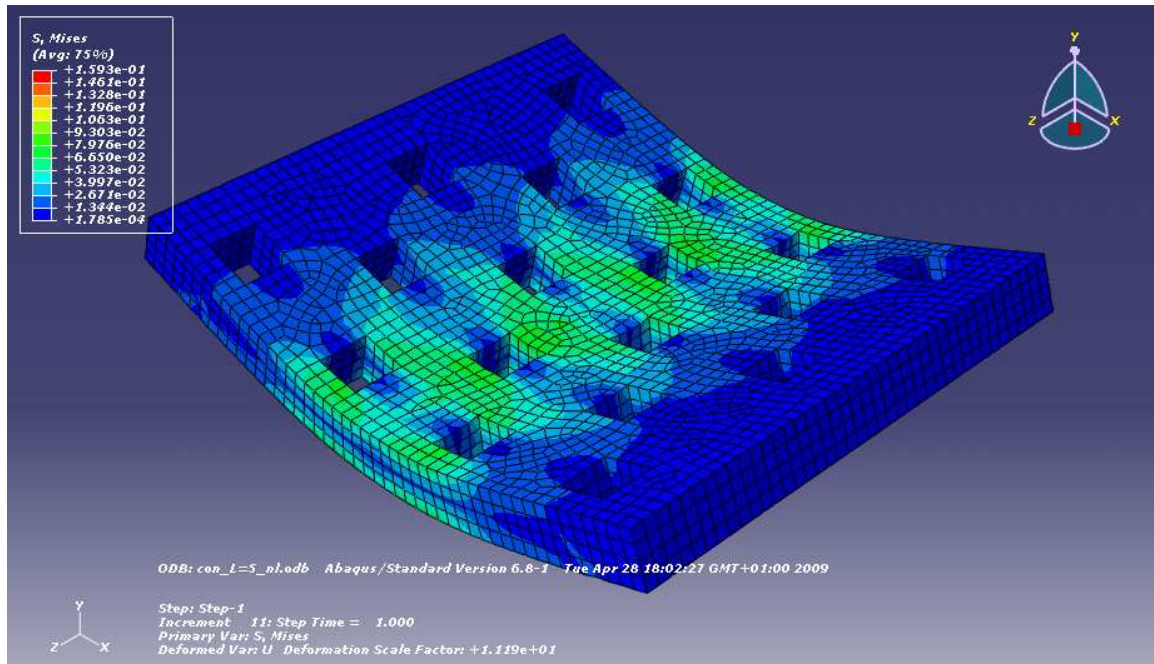


Figura 149- Distribuição de tensões na placa

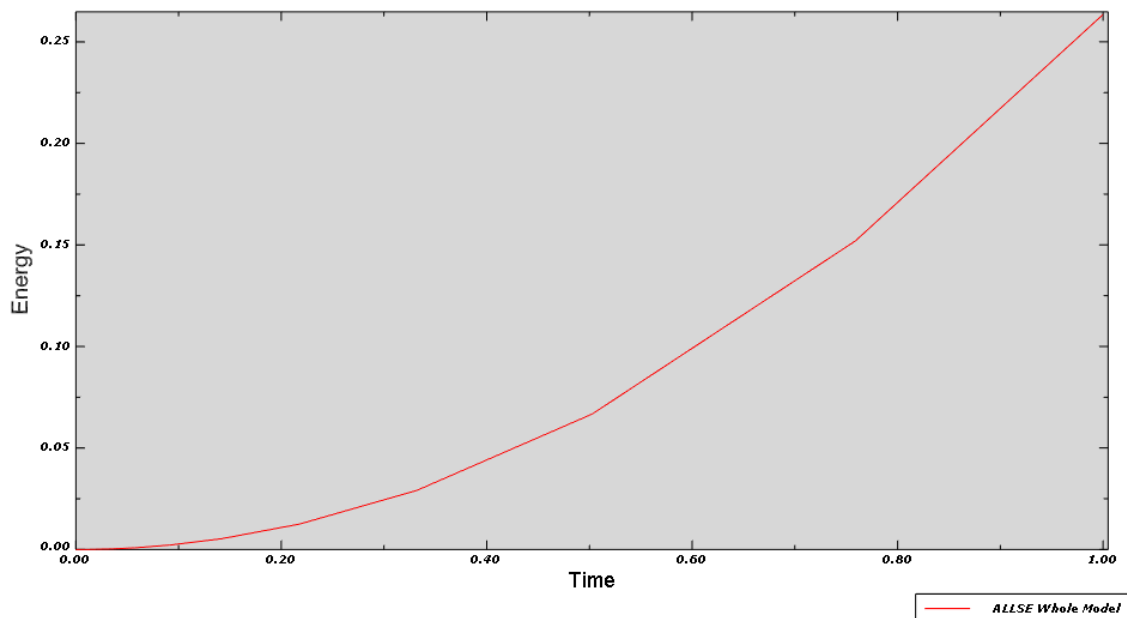


Figura 150- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.24 Furos quadrados com furação em triângulo (lado = 5mm; e = 5 mm)

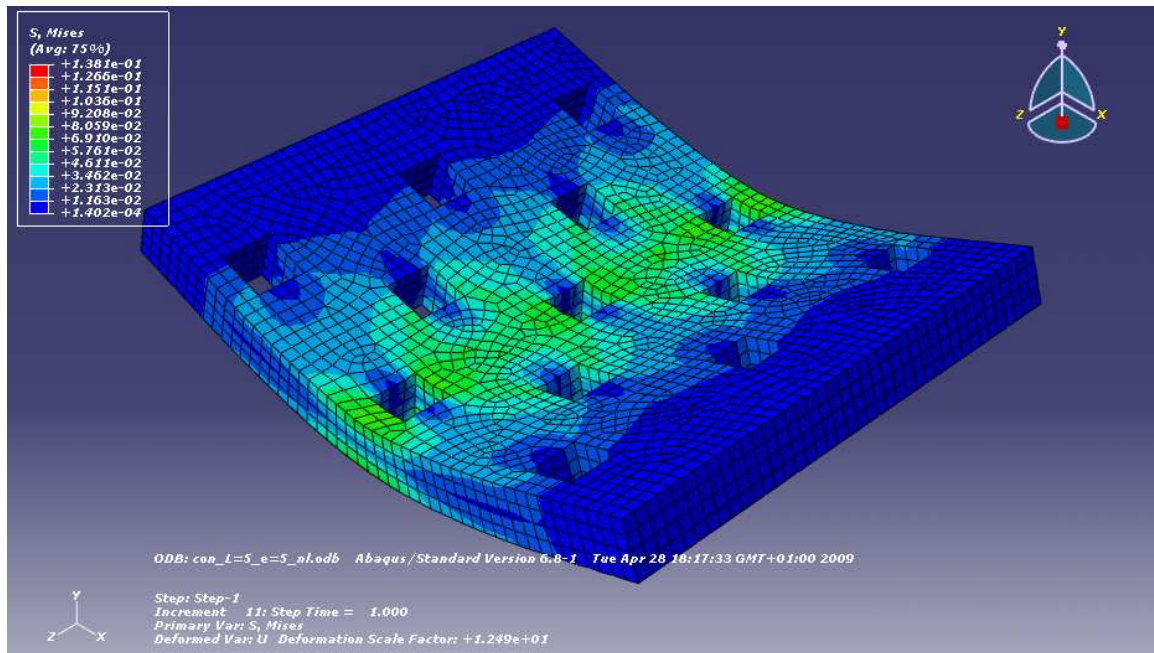


Figura 151- Distribuição de tensões na placa

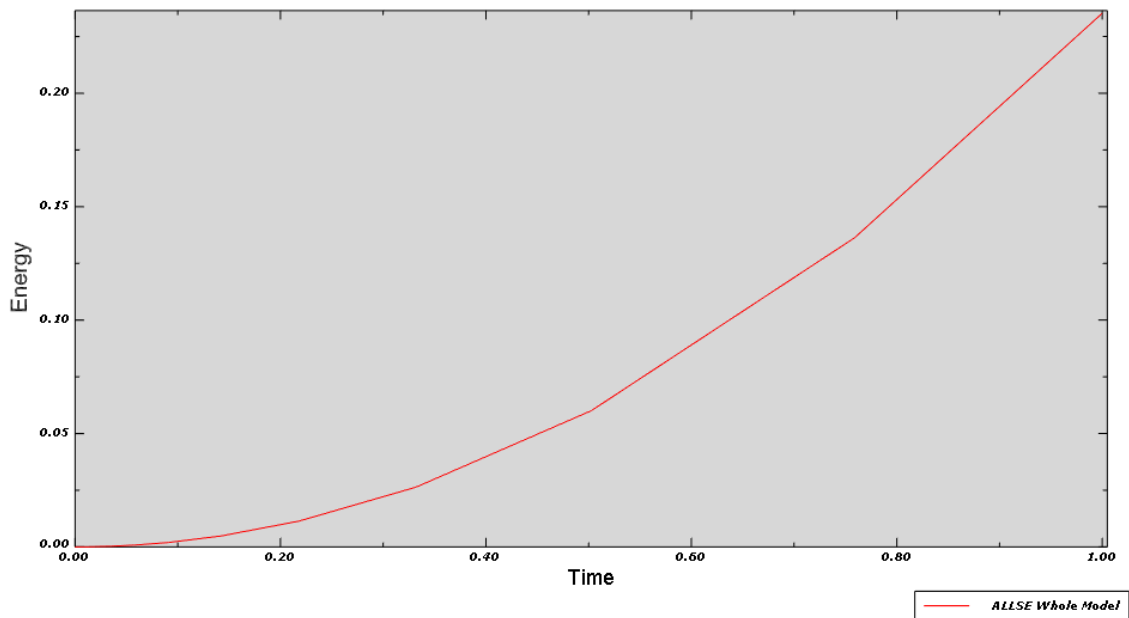


Figura 152- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.1.2.25 Furos quadrados com furação em triângulo (lado = 5mm; e = 7,5 mm)

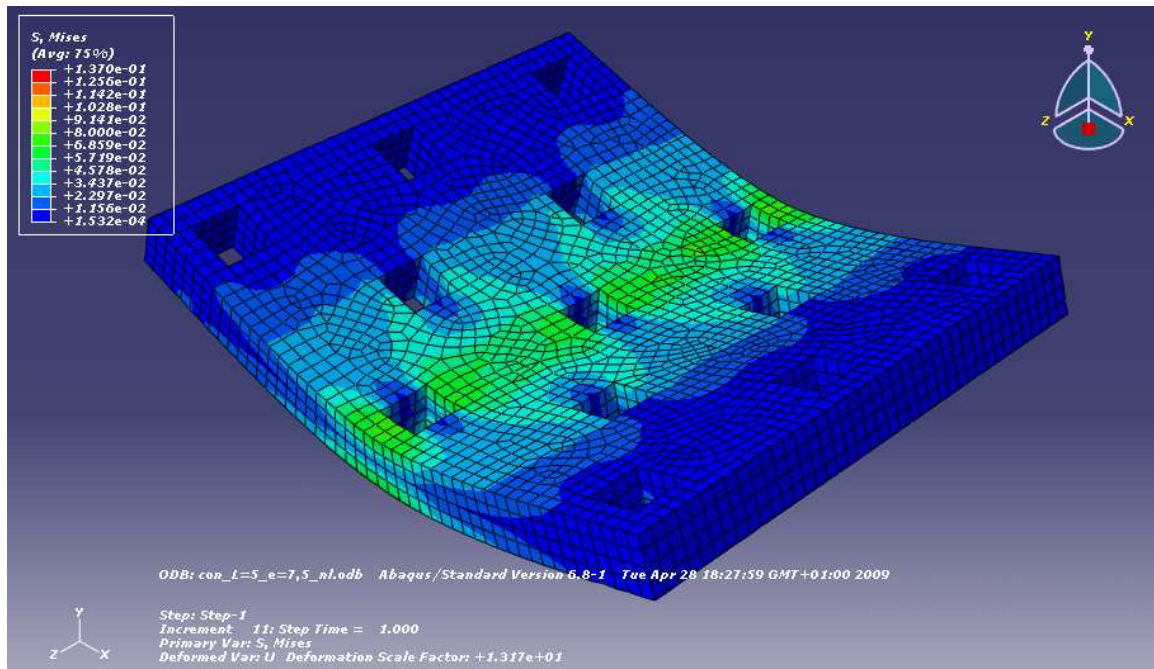


Figura 153- Distribuição de tensões na placa

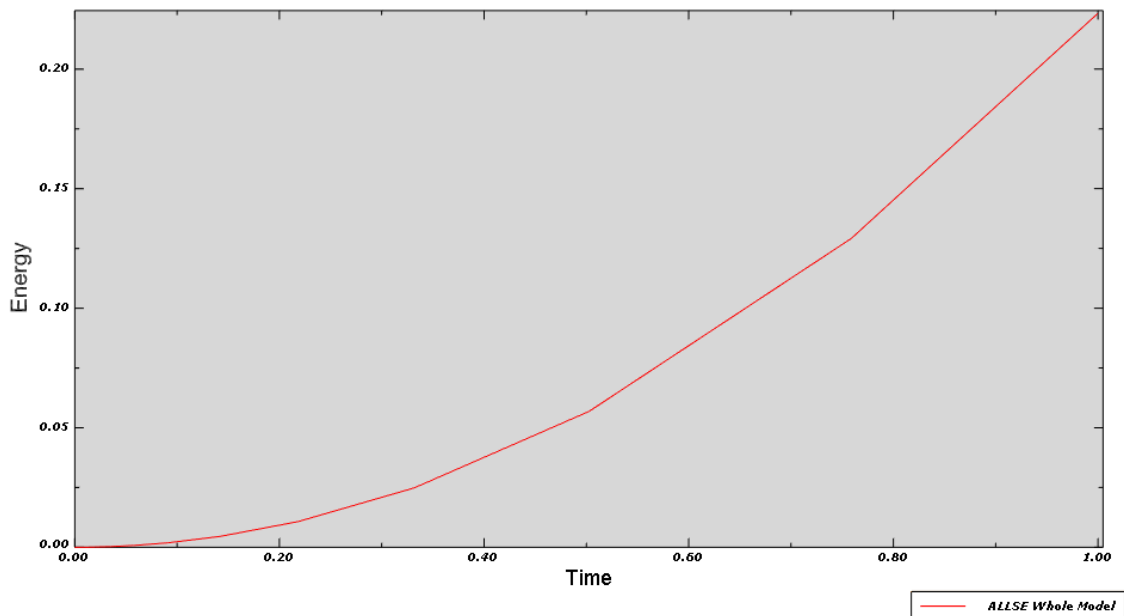


Figura 154- Energia de deformação durante o ensaio de flexão

4.2 Simulação numérica de impacto

Pelas figuras seguintes, pode-se ver o modelo utilizado para o ensaio de impacto na placa de aglomerado de cortiça. A placa de cortiça adoptada tinha dimensões de [60x60] mm com 5mm de espessura e o impactor em forma de meia esfera, tinha um diâmetro de 20 mm. O impactor impôs uma carga unitária de 1N na placa de aglomerado de cortiça.

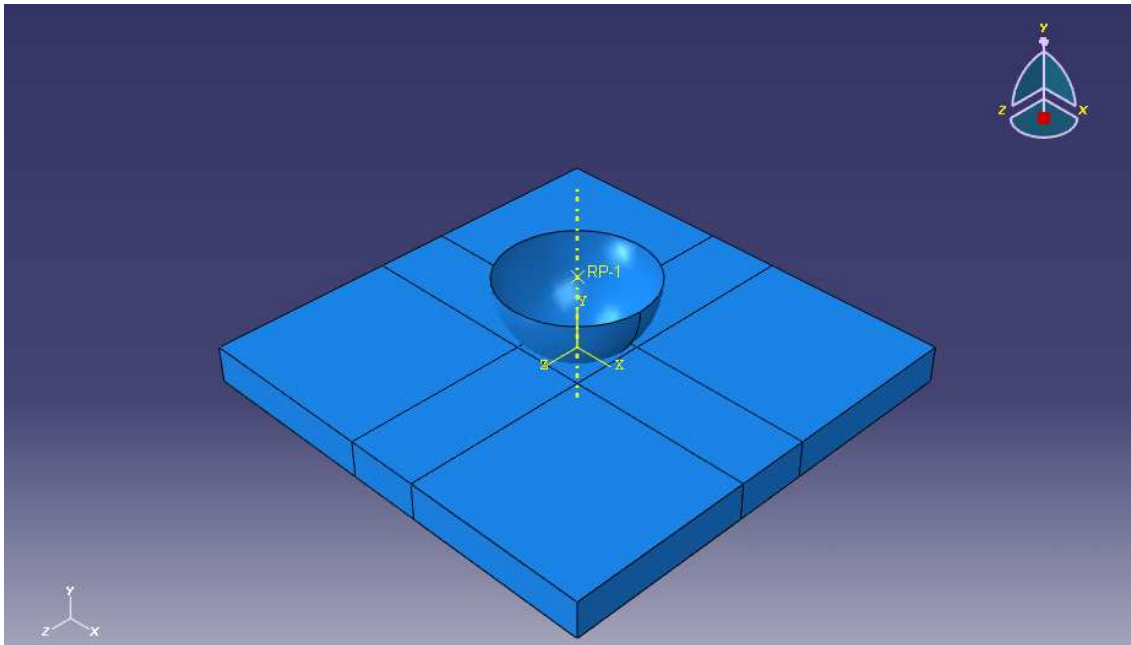


Figura 155- Modelo de impacto implementado

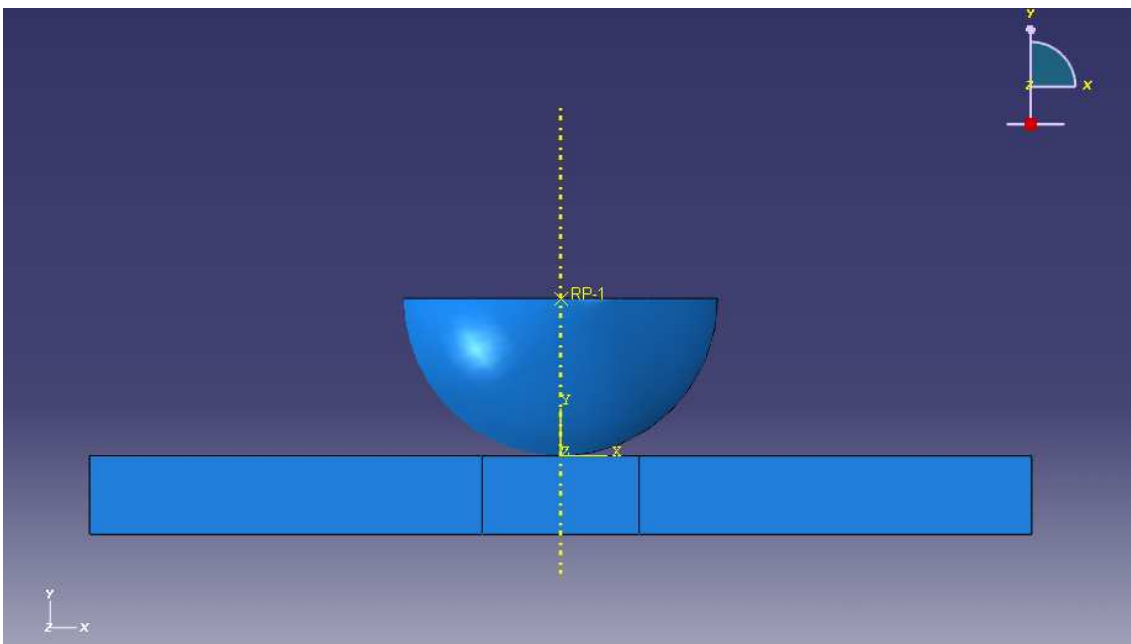


Figura 156- Impactor e placa de cortiça

4.2.1 Resultados da simulação numérica de impacto

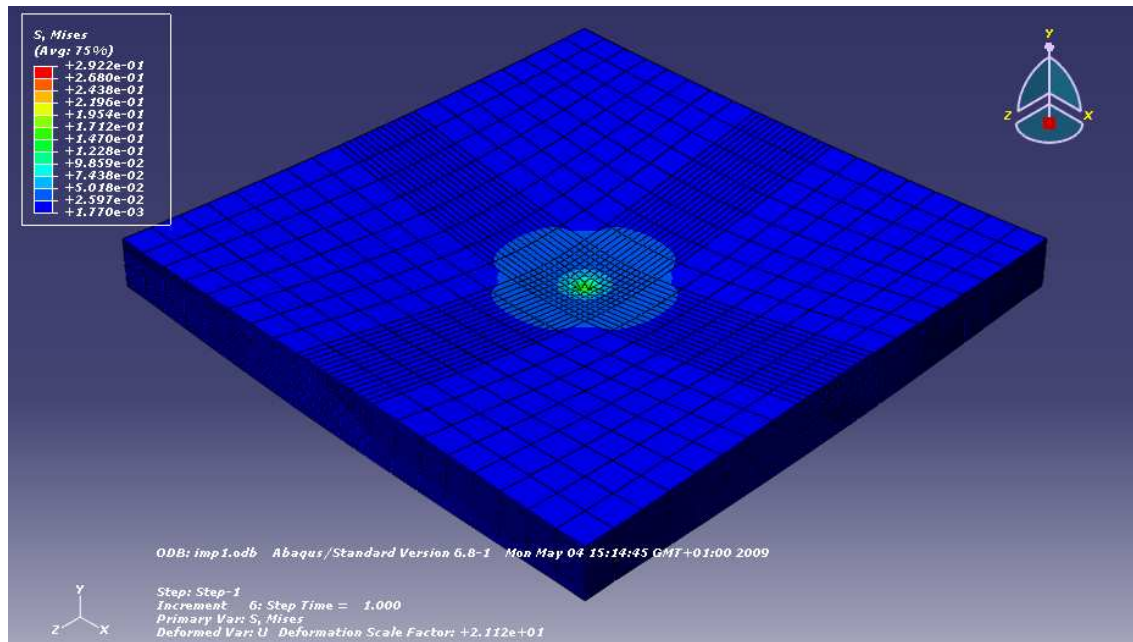


Figura 157- Placa deformada devido ao impacto

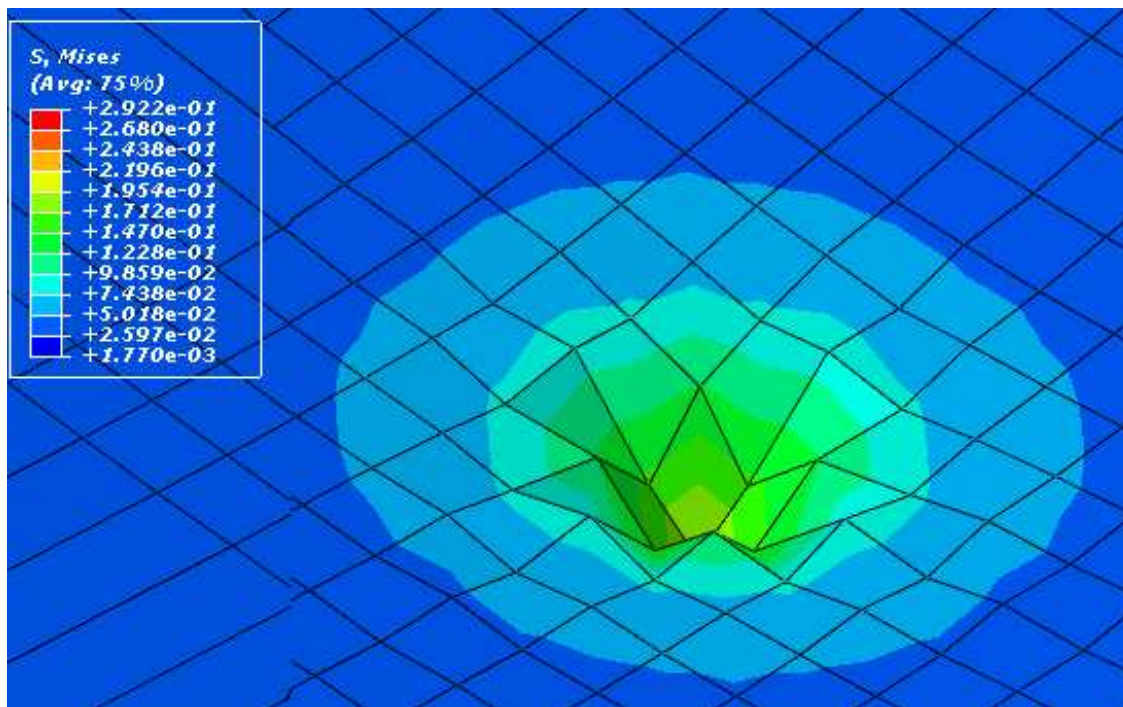


Figura 158- Zona central da placa com maior dano

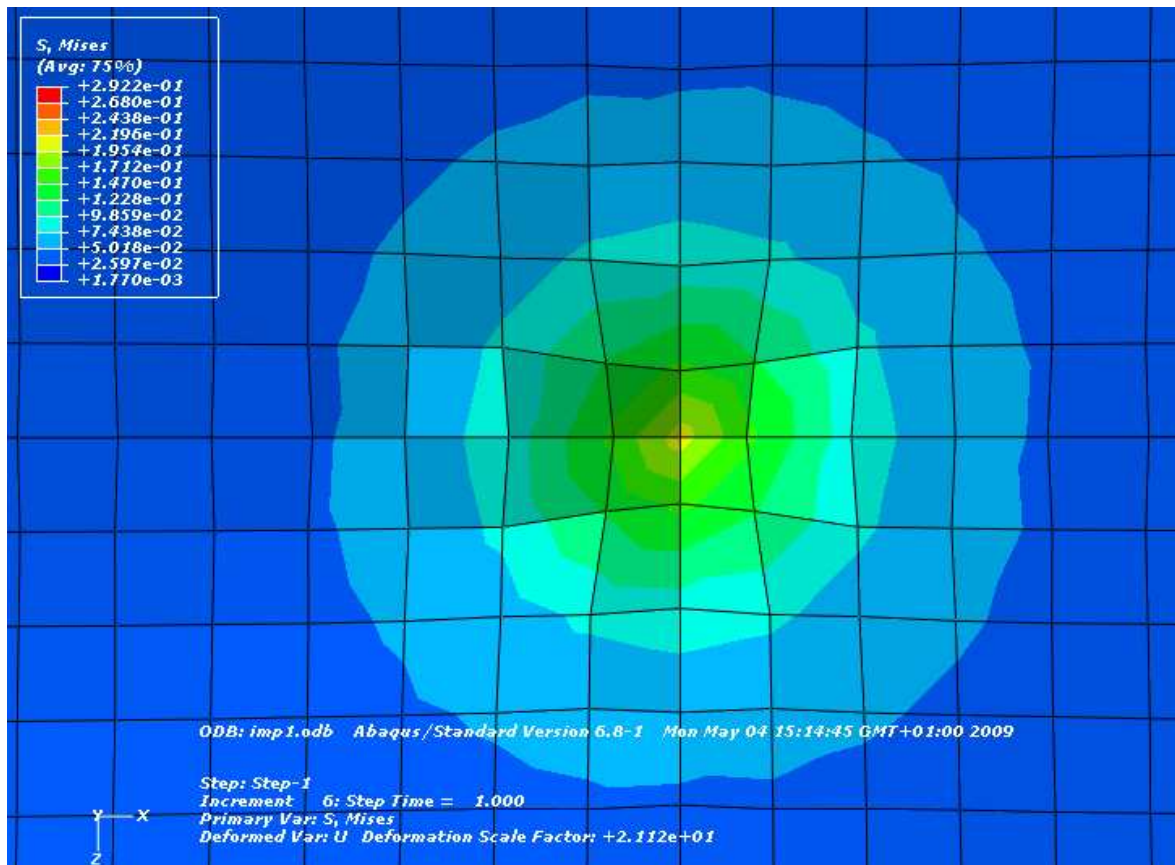


Figura 159- Vista de topo da zona crítica

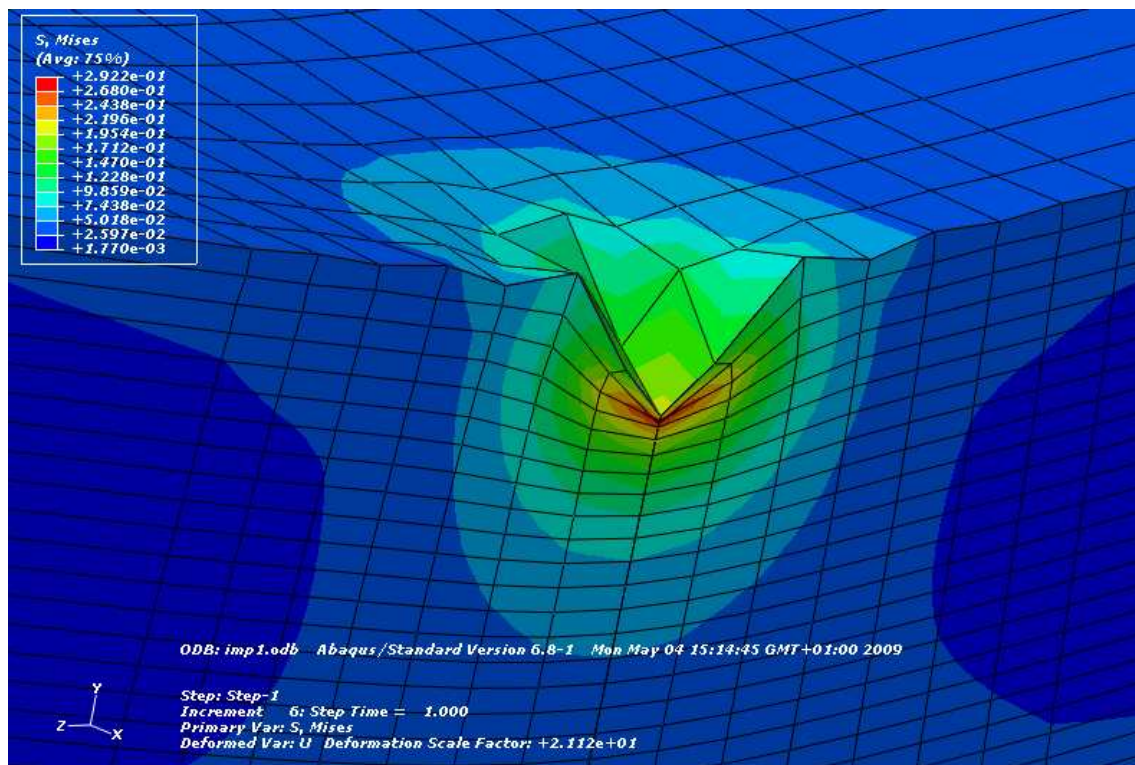


Figura 160- Vista em corte da zona central de indentação

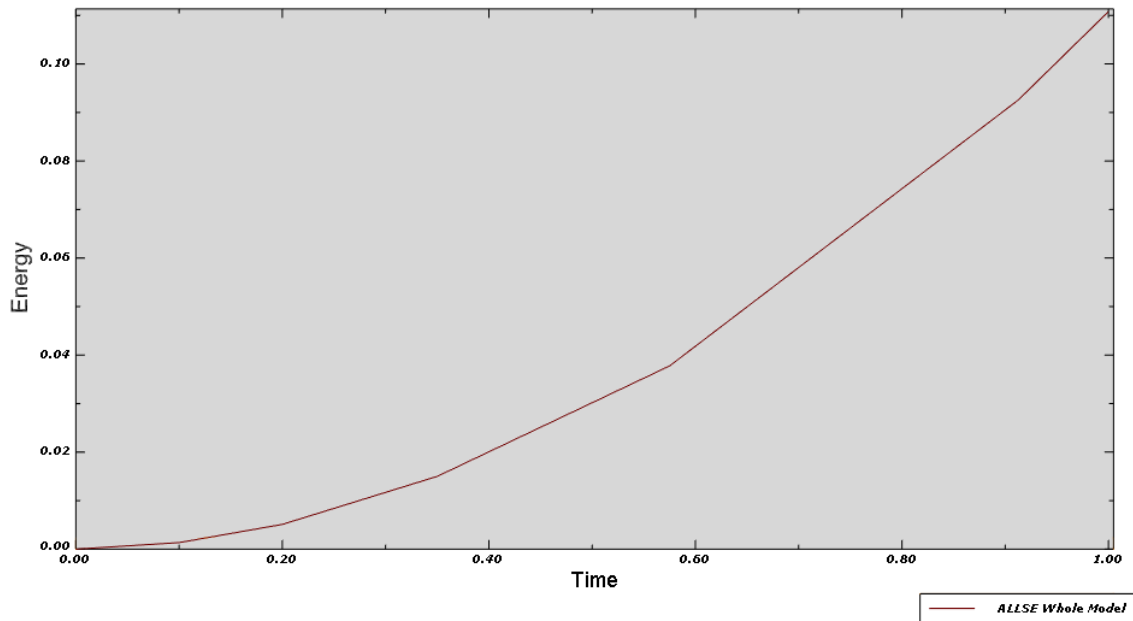


Figura 161- Energia de deformação da placa durante o ensaio de impacto

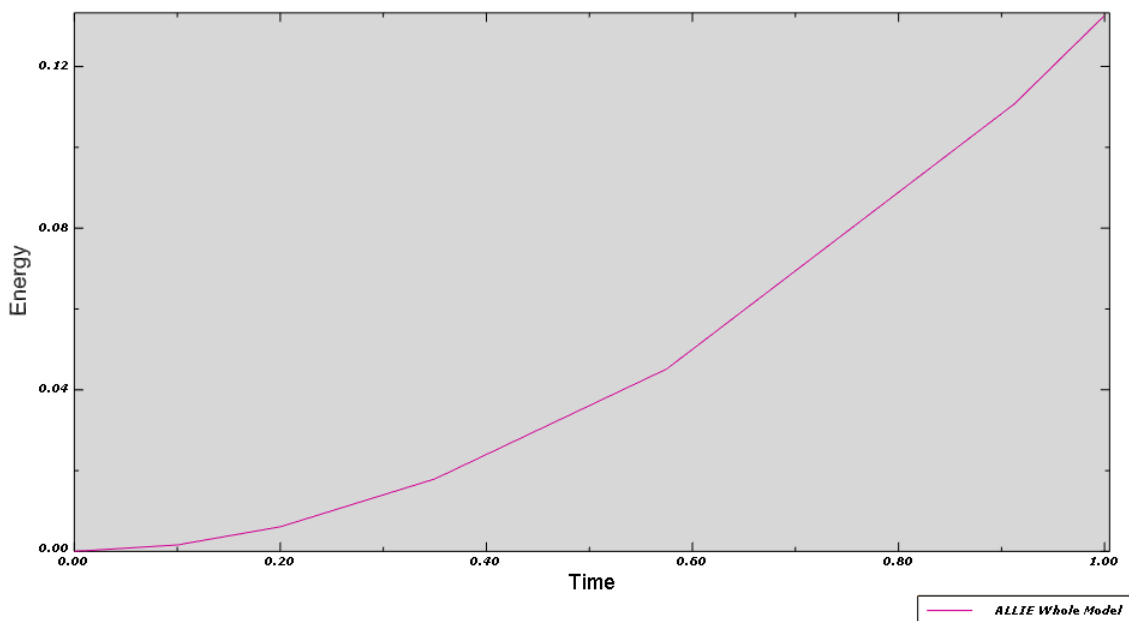


Figura 162- Energia interna da placa durante o ensaio de impacto

Estaria previsto a simulação de impacto das várias geometrias apresentadas atrás aquando da flexão, mas por alguma razão não descortinada o modelo utilizado não funcionou quando a placa apresentava diversas geometrias de furos. Foi inclusive tentada a simulação de impacto de uma placa com apenas um furo de 1mm numa extremidade e o modelo voltou a não funcionar, tendo sucessivos incrementos cada vez mais pequenos até que atingia o limite mínimo dando por terminada a simulação sem qualquer tipo de resultados práticos.

4.3 Conclusões

4.3.1 Tensões Máximas

No que concerne à simulação dos ensaios de flexão, pelos gráficos apresentados em baixo pode-se verificar a atenuação do valor da tensão máxima, quando a furação é não linear ou seja, em triângulo. Tal acontece para qualquer tipo de furo testado. De uma forma geral, os furos circulares lineares e não lineares de 2,5mm de diâmetro são os que apresentam tensões de menor valor. No entanto, se a placa de cortiça não possuir furos, a tensão máxima é bastante mais baixa, tendo-se alcançado um valor de 45,29 kPa.

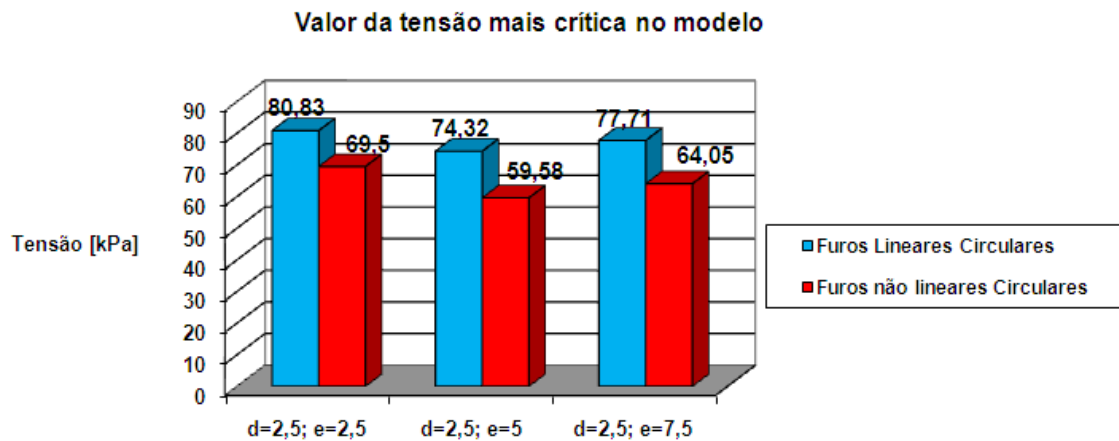


Figura 163- Valores da tensão mais crítica para furos circulares de 2,5mm de diâmetro

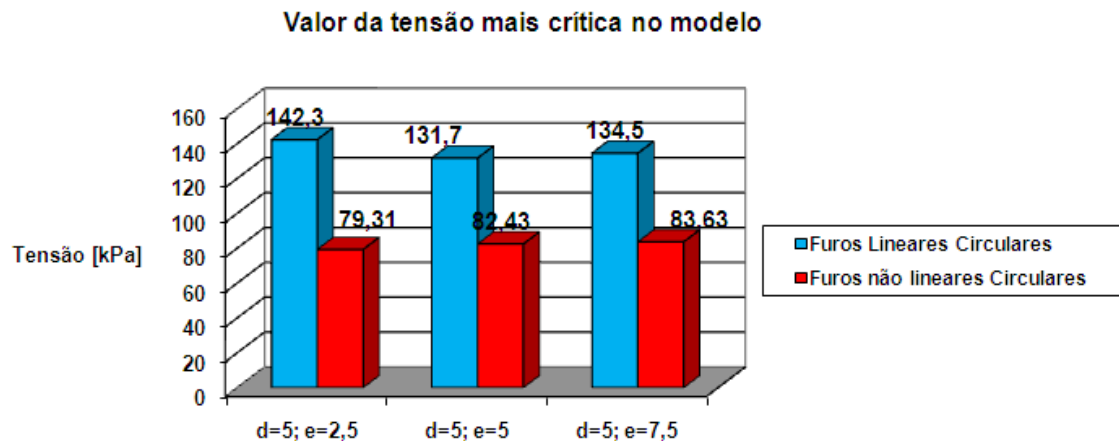


Figura 164- Valores da tensão mais crítica para furos circulares de 5mm de diâmetro

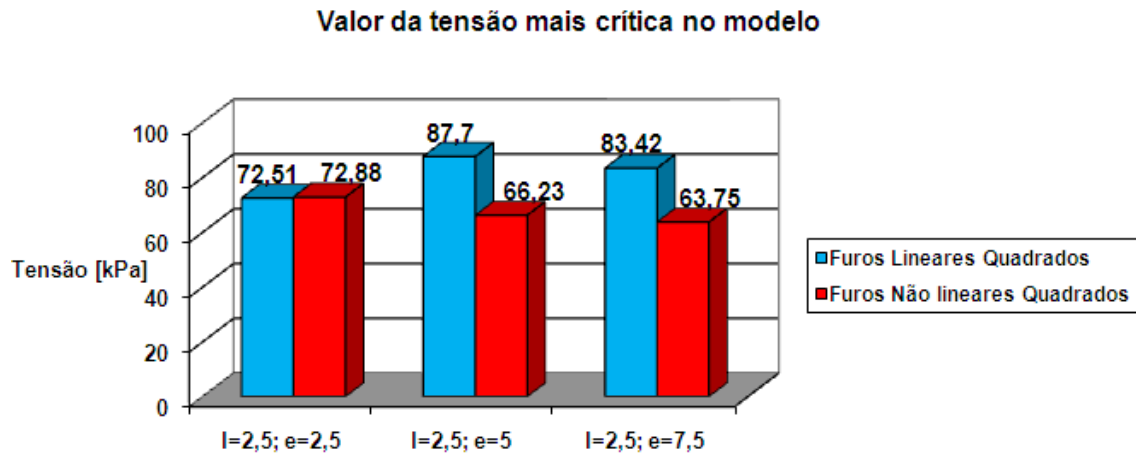


Figura 165- Valores da tensão mais crítica para furos quadrados de 2,5mm de lado

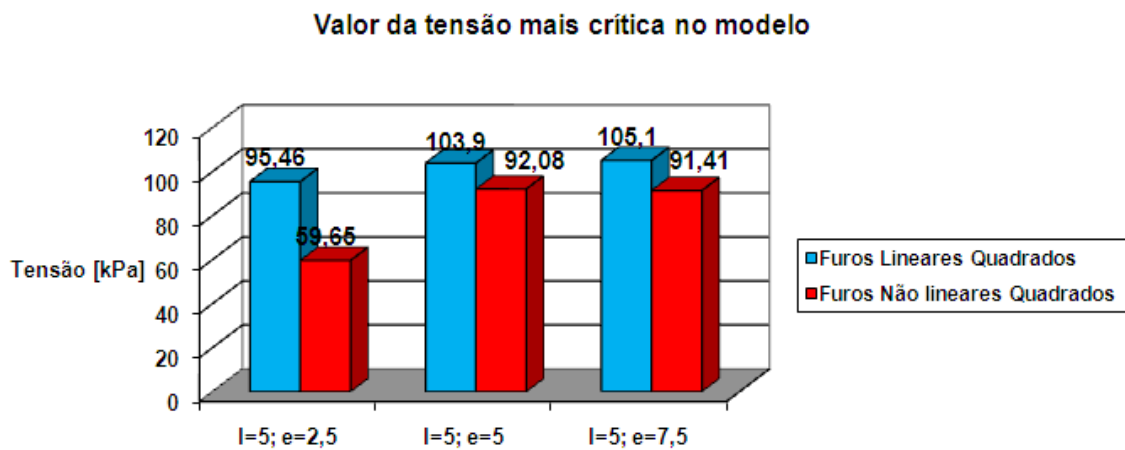


Figura 166- Valores da tensão mais crítica para furos quadrados de 5mm de lado

Com esta simulação numérica efectuada, pretende-se ter uma ferramenta de decisão para a melhor disposição dos furos a realizar na cortiça, sendo que no seu interior será inserido um gel com propriedades absorventes para tentar uma maior absorção de energia quando sujeito ao impacto. Assim, é possível concluir que a melhor opção é não haver qualquer tipo de furo. Mas, como há o objectivo de inserir nos furos um gel que absorva a energia de impacto, então a furação em triângulo será a mais adequada.

4.3.2 Energia de deformação

Em relação à energia de deformação, pelos gráficos a seguir apresentados dá para concluir que há uma maior energia de deformação durante o ensaio de flexão quando a placa apresenta furos. O valor máximo de energia de deformação ocorre quando a placa apresenta furos circulares de diâmetro 5mm e espaçamento 2,5mm.

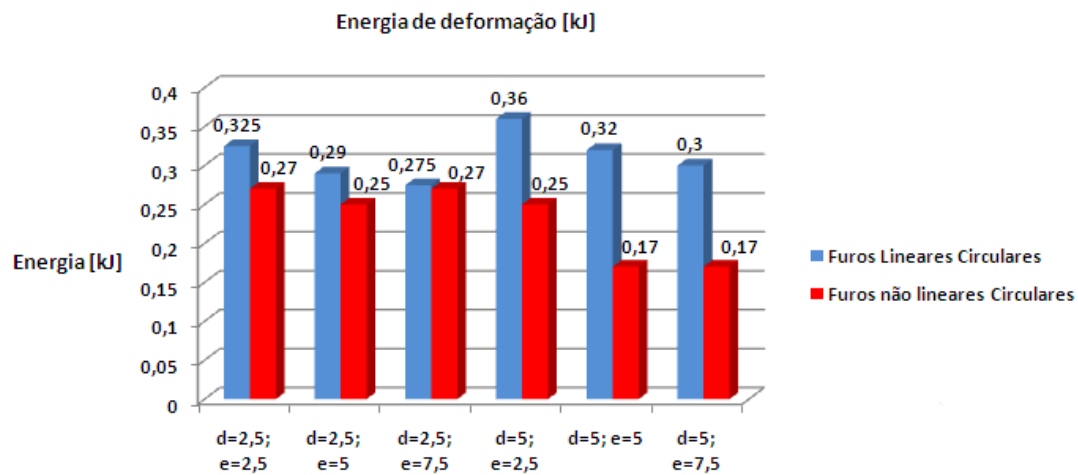


Tabela 2- Energia de deformação no ensaio de flexão das placas com furos circulares

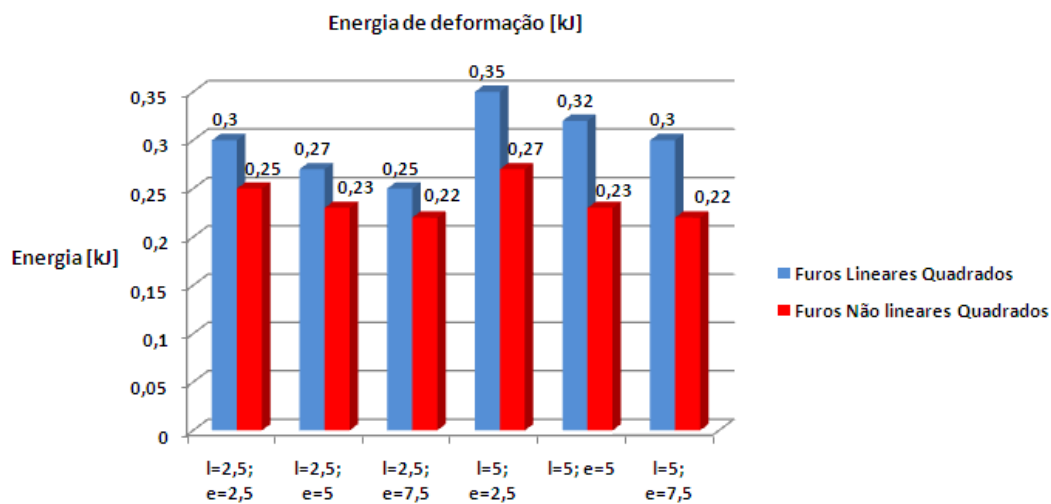


Tabela 3- Energia de deformação no ensaio de flexão das placas com furos quadrados

Capítulo 5 – Procedimento Experimental

Nesta etapa do trabalho, começou-se por decidir quais os núcleos que iam ser utilizados nas estruturas *sandwich* e prepará-los. Assim, a escolha e configuração dos núcleos são as seguintes:

- Núcleo de Nomex[®];
- Aglomerado de cortiça sem qualquer tipo de furação;
- Aglomerado de cortiça com furos circulares dispostos em linha;
- Aglomerado de cortiça com furos circulares dispostos em triângulo;
- Cortiça virgem, extraída directamente do sobreiro com furos das rolhas;

5.1 Preparação dos núcleos

A espessura do Nomex[®] é de 16mm, logo as outras placas de cortiça também teriam de possuir a mesma espessura. Quanto às dimensões da área principal, a placa tem de dimensões 400 x 400 mm.

Procedeu-se ao corte do Nomex[®], tendo em conta as dimensões acima referidas e ficando com o aspecto que se apresenta na figura seguinte.



Figura 167- Núcleo de Nomex[®] utilizado

Depois seguiu-se a preparação das placas de aglomerado de cortiça, em que foi necessário cortá-las com as dimensões pretendidas, e ajustar aos 16 mm de espessura, para terem espessura igual ao Nomex[®].



Figura 169- Bloco de cortiça com marcação das placas



Figura 168- Corte das placas de aglomerado de cortiça



Figura 170- Corte do aglomerado de cortiça para ter 16mm de espessura

Depois de cortadas as 8 placas como se apresentam na figura seguinte, no final as placas irão ser agrupadas duas a duas, para formar os 4 núcleos que contém aglomerado de cortiça decidido inicialmente.



Figura 171- Núcleos de aglomerado de cortiça preparados



Figura 172- Corte da cortiça virgem com furos das rolhas

Em relação à cortiça extraída do sobreiro e com furos das rolhas de garrafa escolheram-se as que não estavam danificadas e foi também necessário prepará-las com a espessura de 16 mm. A figura ilustra esse processo. Depois todas as tiras iriam ser agrupadas, formando o núcleo.

Depois procedeu-se à furação dos aglomerados de cortiça, tendo adoptado um furo com 3 mm de diâmetro e um espaçamento entre eles de 9 mm. Não há qualquer hipótese de tentar uma aproximação à geometria do Nomex[®], uma vez que o aglomerado de cortiça utilizado, possui um tamanho de grão um pouco elevado e caso se efectuassem algo do género, a placa de cortiça ficaria muito frágil e o mais certo era ficar destruída.

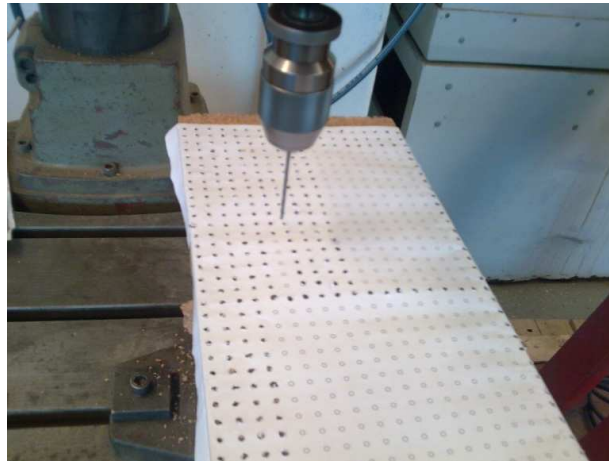


Figura 173- Furação da cortiça



Figura 174- Cortiça furada

Para os núcleos terem as mesmas dimensões que as peles, foi necessário uni-las através de cola de contacto, tendo-se deixado secar durante 48h. As imagens que se apresentam na página seguinte ilustram este processo.



Figura 175- Processo de ligação dos núcleos com cola de contacto

Para uniformizar as superfícies dos núcleos, com uma lixa macia deu-se um acabamento e mais uniforme aos núcleos, como elucida a figura.



Figura 176- Uniformização das superfícies

A preparação do núcleo de cortiça virgem necessitou de cola de contacto, por exemplo a que os sapateiros utilizam nos consertos dos sapatos. A cola utilizada no processo de colagem deste núcleo foi a que se apresenta na seguinte figura.



Figura 177- Cola contacto utilizada

Pelas fotos seguintes podemos ver o processo de colagem da cortiça virgem, onde apenas foram retiradas as rolhas para garrafas.



Figura 178- Colagem dos vários pedaços de cortiça virgem

5.2 Preparação das peles

Nesta fase do trabalho, optou-se por tentar um processo que não a moldação manual para conceber as peles. Esse processo é denominado de infusão por vácuo e tentou-se o uso de Rovicore®, que é constituído por três camadas de fibra de vidro, formando uma espécie de *sandwich* mais fina. Pela figura seguinte pode-se ver a face superior do tecido de Rovicore®.



Figura 179- Face superior do tecido Rovicore

Preparou-se a chapa de alumínio onde foram depositadas as fibras, sendo posteriormente seladas e não haver fugas de ar. Para haver um melhor escoamento da resina, foi utilizado peel-ply.



Figura 180- Fibras seladas (esquerda) e fibras em vácuo (direita)

A resina utilizada foi uma de epóxico, e através da figura seguinte pode-se ver a sua preparação. Foi realizada a preparação da resina de epóxico SR 1500 e o endurecedor utilizado foi o SD 2505. As fichas técnicas da resina e seu endurecedor encontram-se em anexo A.



Figura 181- Preparação da resina a utilizar na infusão por vácuo

Depois de bem mexida e com consistência homogênea, escoou-se a resina para molharem as fibras e se conseguir uma boa impregnação.



Figura 182- Resina a ser escoada

Pela seguinte sequência de fotos, pode-se ver o decorrer do processo de infusão por vácuo, na parte do escoamento de resina sobre as fibras e peel-ply.

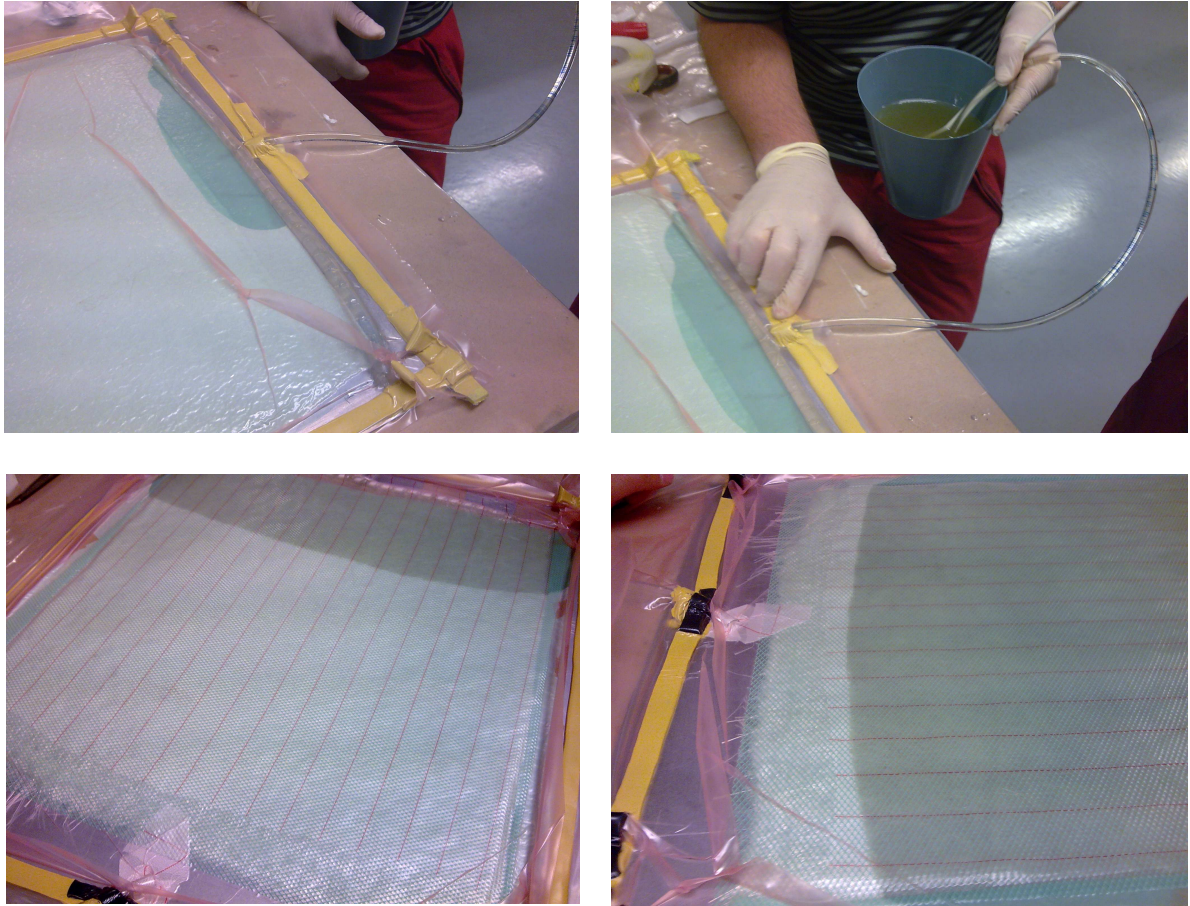


Figura 183- Escoamento da resina ao longo das fibras de Rovicore®

Depois de finalizado o processo, a resina curou durante 24 horas e posteriormente desmoldou-se a placa tendo-se verificado a existência de algumas bolhas de ar, como se prova pela figura apresentada abaixo e assinalado a vermelho.



Figura 184 – Placa com bolhas de ar

Confirmada a existência de bolhas de ar, algo que limitaria o desempenho da estrutura *sandwich*, as placas foram gentilmente cedidas pela Inapal Plásticos, S.A. Foram então disponibilizadas placas de fibra de vidro envoltas numa matriz de resina poliéster, como se pode verificar pela figura apresentada abaixo. Para promover a adesão ao núcleo e através de uma lixa suave, as superfícies foram tratadas de forma a ficarem sem o acabamento espelhado que apresentam e se pode ver na seguinte figura.



Figura 185 – Placas que constituem as peles da estrutura *sandwich*



Figura 186 – Limpeza da superfície com isopropanol

Depois do uso da lixa, foi realizada uma limpeza da superfície aderente com isopropanol.

5.3 Preparação das estruturas *sandwich*

Para unir núcleos e peles e assim formar a estrutura *sandwich*, utilizou-se um adesivo de epóxido para garantir que durante os ensaios que posteriormente irão ser realizados não ocorra delaminação por fraca adesão entre as peles e o núcleo. O adesivo e respectivo endurecedor podem ser vistos na seguinte figura e a ficha técnica encontra-se no anexo B.



Figura 187 – Adesivo de epóxido e endurecedor

O adesivo de epóxico tem uma razão de mistura de 100:45. Aplicou-se o adesivo e respectivo endurecedor nas peles da *sandwich*, tendo sido composto por 90g de resina de epóxico e 40,4g de endurecedor. Repetiu-se o processo para as restantes estruturas tendo a cura demorado 24 horas e posteriormente realizou-se uma pós-cura durante 3 horas na câmara ambiental a uma temperatura de 80°C, tal como indicava na ficha técnica do adesivo.

Nas figuras seguintes pode-se ver o processo descrito acima.



Figura 188 – À esquerda tem-se a mistura de resina com endurecedor e à direita a resina espalhada numa pele da *sandwich*



Figura 189 – À esquerda o núcleo de cortiça virgem com resina numa das faces e à direita uma pele já colada



Figura 190- À esquerda a estrutura *sandwich* com Nomex® e à direita com aglomerado de cortiça sem furos

Depois de prontas as placas, cortaram-se os provetes para os ensaios de flexão e impacto. No que respeita à flexão, segundo a norma da ASTM utilizada, as dimensões dos provetes de aglomerado de cortiça e Nomex[®] foram de [140x45] mm enquanto os provetes de cortiça virgem tinham dimensões de [205x76,5] mm.



Figura 191- Alguns provetes para flexão

Em relação ao ensaio de impacto, foram cortados provetes com dimensões de [60x60] mm para as estruturas *sandwich* de aglomerado de cortiça e Nomex[®], assim como para as estruturas *sandwich* com núcleo de cortiça virgem.



Figura 192- Provetes para impacto

Por se assemelhar e apresentar algumas características em comum com o gel absorvente fornecido pelo Prof. Yu Qiao, recolheram-se os cristais que se encontram no interior das fraldas dos bebés. Este cristal, que é denominado de Poliacrilato de Sódio, é um polímero super absorvente, possuindo grande afinidade com a água, sendo que o mecanismo de absorção funciona por osmose. O poliacrilato de sódio absorve água para equilibrar a concentração de iões dentro e fora do polímero, podendo absorver uma massa de água centenas de vezes maior que a sua.

Para testar alguns provetes à compressão, e seguindo o modelo de ensaio semelhante ao que o Prof. Yu Qiao utilizou no seu artigo para testar o gel absorvente de sílica, foi inserido no interior do Nomex[®], pó de cortiça e cristais provenientes das fraldas dos bebés que misturados com água, formam um solução “gelificada”. Estes cristais possuem propriedades semelhantes às do gel absorvente de sílica que o Prof. Yu Qiao testou. No interior do aglomerado de cortiça com furação em triângulo, inseriu-se cristais de Poliacrilato de Sódio misturados com água, tendo-se testado diferentes concentrações de água.

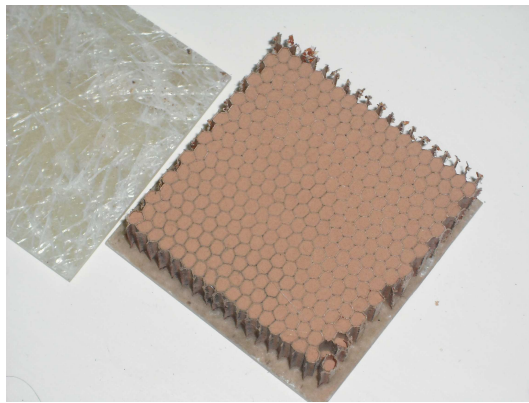


Figura 193 – Estrutura sandwich de Nomex[®] com pó de cortiça no interior

Depois de retirados os cristais de Poliacrilato de Sódio do interior das fraldas, fez-se um teste para saber que quantidade de água seria possível absorver até ocorrer a saturação da solução. Posto isto, decidiu-se inserir em cada recipiente, 0,5g de Poliacrilato de Sódio, tendo-se feito variar a quantidade de água. Assim, num recipiente, aos 0,5g de cristais adicionou-se água em quantidade 200 vezes superior à do pó (100g); noutro 100 vezes superior (50g); noutro 50 vezes (25g); noutro 25 vezes (12,5g) e por fim no último 10 vezes a quantidade de Poliacrilato (5g).



Figura 194- Diferentes concentrações de água com Poliacrilato de Sódio



Figura 195- Núcleo de cortiça com furação em triângulo com gel de Poliacrilato de Sódio nos furos

Depois de cheios os buracos de cortiça com cada uma das misturas de Poliacrilato com diferentes quantidades de água, procedeu-se ao enchimento de um núcleo de Nomex[®], com 0,5g de Poliacrilato de sódio e 50g de água. Os provetes estão apresentados na seguinte figura. Com cola Araldite[®], fez-se a colagem das peles, que neste caso foram constituídas por chapas de aço, só para tentar garantir que o gel não saia do interior do núcleo, quando este é comprimido.

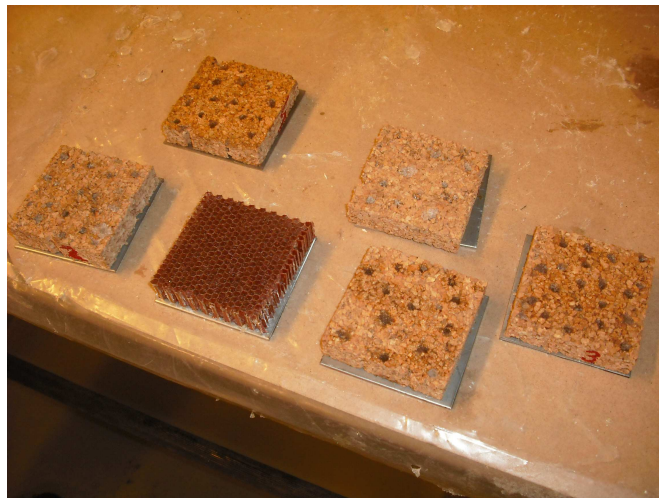


Figura 196- Provetes para compressão com diferentes soluções de Poliacrilato

Capítulo 6- Resultados Experimentais

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais dos ensaios de compressão aos diversos núcleos, assim como resultados dos ensaios de flexão e impacto das estruturas *sandwich*.

6.1 Resultados experimentais da compressão dos núcleos

Foram testados quatro tipos de núcleo, sendo eles o núcleo Nomex[®], núcleo de aglomerado de cortiça sem qualquer tipo de furação, núcleo de aglomerado de cortiça com furação em linha e núcleo de aglomerado de cortiça com furação em triângulo.

Antes dos ensaios de compressão realizados na INSTRON 4208, efectuaram-se umas medições das dimensões dos provetes ensaiados, como se irá ver nos quadros apresentados.

As nomenclaturas usadas são as seguintes:

AGØ – Núcleo de aglomerado de cortiça sem qualquer tipo de furo

AGF1 – Núcleo de aglomerado de cortiça com furação em linha

AGF2 – Núcleo de aglomerado de cortiça com furação em triângulo

N – Núcleo de Nomex[®]

CV- Núcleo de cortiça virgem

A velocidade de ensaio foi de 0,4mm/min. Os provetes numerados de 1 a 5 são relativos ao ensaio de compressão com um deslocamento até 5mm, enquanto os provetes 6,7 e 8 dizem respeito a um deslocamento de 10mm, tendo sido efectuados com uma velocidade de 2mm/min. Os gráficos de todos os provetes de compressão podem ser consultado no anexo C, sendo apresentados nas páginas seguintes o gráfico mais exemplificativo de cada núcleo.



Figura 197- Ensaio de compressão do núcleo

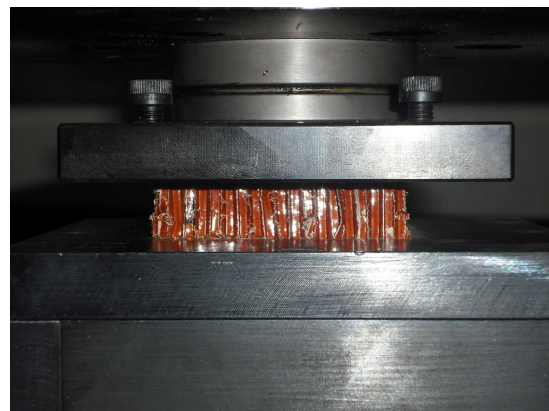
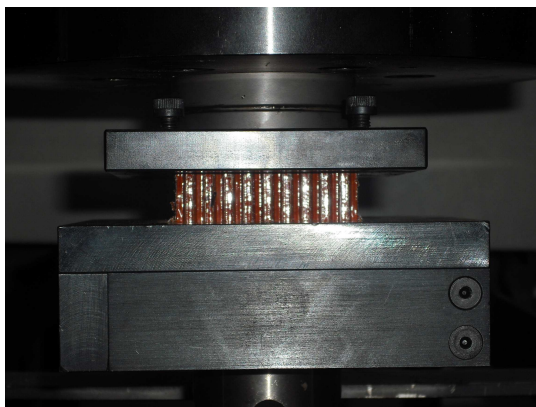


Figura 199- Ensaio de compressão do núcleo de Nomex®

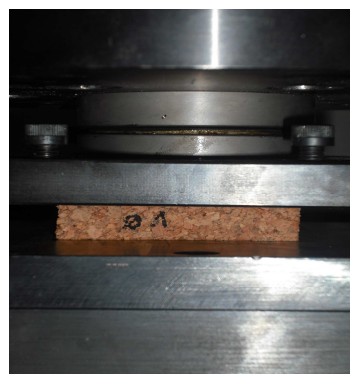
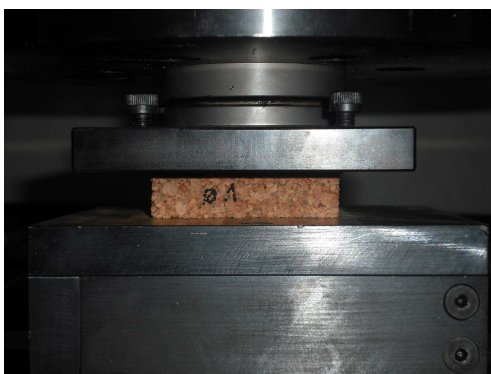


Figura 198- Ensaio de compressão do núcleo de cortiça

6.1.1 Núcleo de aglomerado de cortiça sem furos



Figura 200 – Provete de aglomerado de cortiça sem furos

Tabela 4- Dimensões e valores relativos à compressão do aglomerado de cortiça sem furos

Provete	Largura 1 [mm]	Largura 2 [mm]	Espessura 1 [mm]	Espessura 2 [mm]	Peso [g]	E (MPa)	Energia $\epsilon=5\%$ (J)	Energia $\epsilon=5\text{mm}$ (J)
AGØ1	59,9	60	15,9	15,6	8,3	5,06	0,13	2,74
AGØ2	59,7	59,9	15,6	15,5	8	2,67	0,12	2,75
AGØ3	59,8	60	15,4	15,8	8	1,68	0,11	2,21
AGØ4	59,7	60	15,9	15,9	8,4	1,75	0,14	2,76
AGØ5	59,8	60	15,6	15,7	7,9	2,43	0,11	2,18

Pelo gráfico abaixo apresentado e para uma melhor apresentação dos resultados, apenas está representada a curva mais exemplificativa deste ensaio.

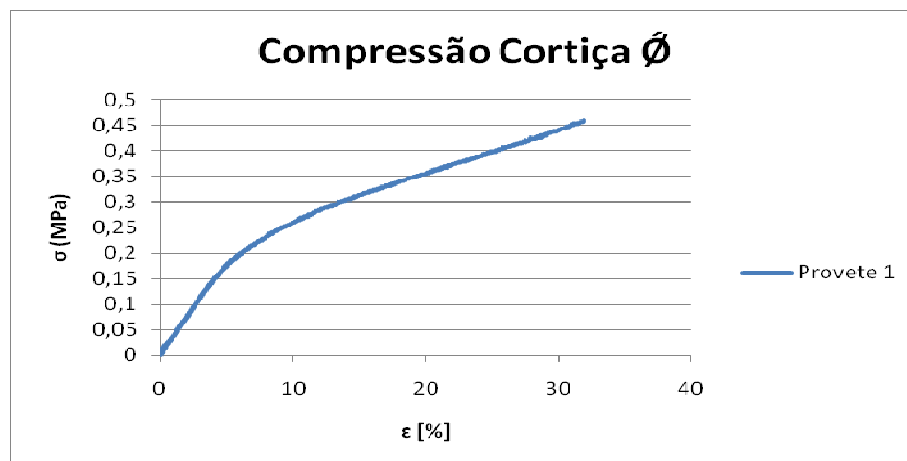


Figura 201- Gráfico mais exemplificativo de compressão da cortiça sem furos

Tabela 5- Dimensões e valores relativos à compressão do aglomerado de cortiça sem furos

<i>Provete</i>	<i>Largura1</i> [mm]	<i>Largura 2</i> [mm]	<i>Espessura 1</i> [mm]	<i>Espessura 2</i> [mm]	<i>Peso</i> [g]	<i>Energia</i> $\epsilon=10\text{mm (J)}$
AGØ6	60	60	15	15	8	6,57
AGØ7	60	60	15	14,9	8,2	6,44
AGØ8	60	60	15,7	15,4	8,3	6,86

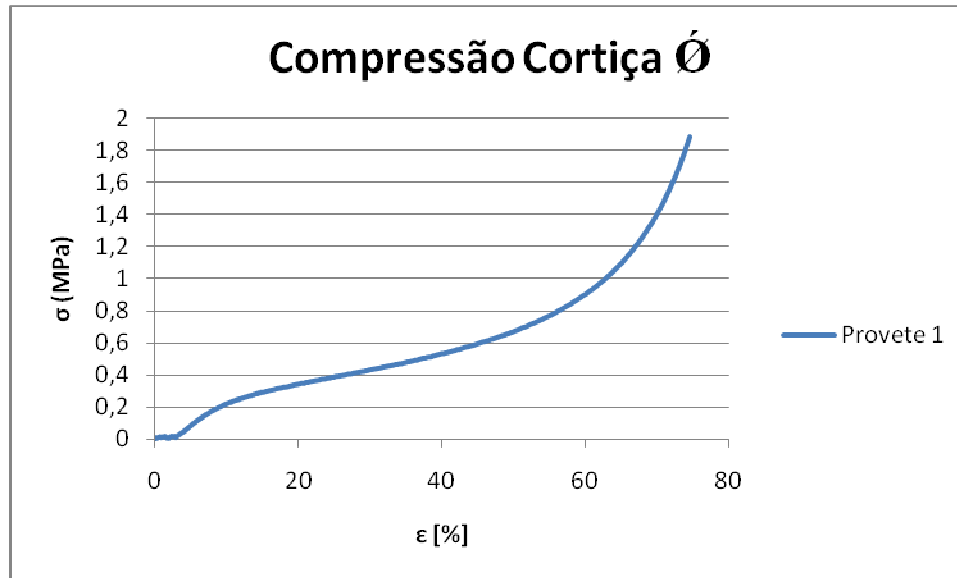


Figura 202 - Gráfico mais exemplificativo de compressão da cortiça sem furos ate 10mm de deslocamento

Tabela 6- Variação da espessura após o ensaio de compressão

<i>Provete</i>	<i>Espessura após ensaio [mm]</i>	<i>Espessura 24h após ensaio [mm]</i>	<i>Espessura 72h após ensaio [mm]</i>
AGØ6	12,2	14	14,1
AGØ7	13,1	14,3	14,5
AGØ8	13,4	14,5	14,9

6.1.2 Núcleo de aglomerado de cortiça com furacão em linha

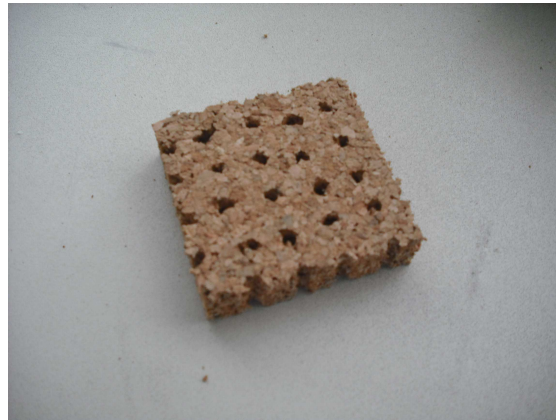


Figura 203 – Provete de aglomerado de cortiça com furacão em linha

Tabela 7- Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de aglomerado de cortiça com furacão em linha

Provete	Largura 1 [mm]	Largura 2 [mm]	Espessura 1 [mm]	Espessura 2 [mm]	Peso [g]	E (MPa)	Energia $\epsilon=5\%$ (J)	Energia $\epsilon=5\text{mm}$ (J)
AGF1.1	60,2	59,7	15,5	15,8	8	3,4436	0,11	2,55
AGF1.2	60	59,8	15,8	15,7	8	1,5339	0,07	2,14
AGF1.3	59,6	58,7	16,1	15,6	8,1	2,2587	0,11	2,82
AGF1.4	60	59,8	16	15,7	7,9	2,522	0,09	3,93
AGF1.5	59,7	59,9	15,5	15,9	7,5	2,0438	0,09	1,90

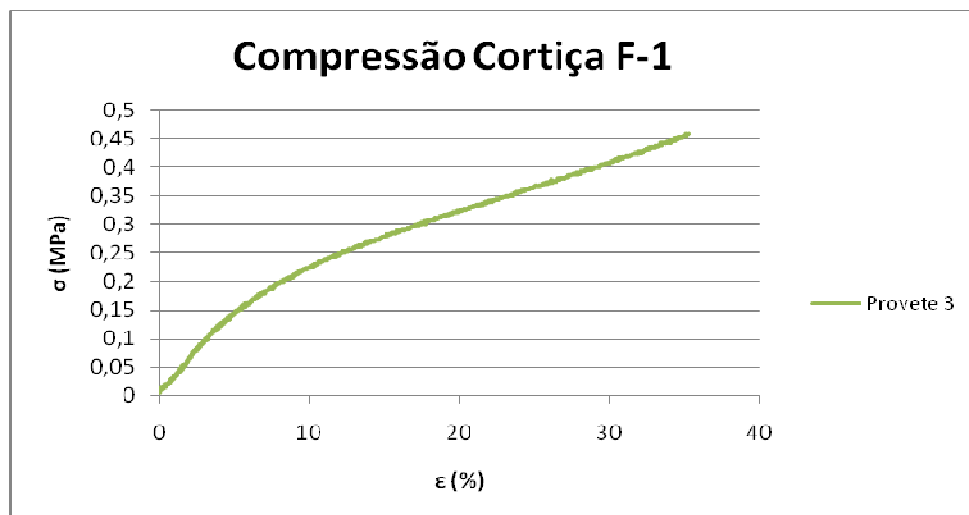


Figura 204- Gráfico mais exemplificativo de compressão da cortiça com furos lineares

Tabela 8 - Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de aglomerado de cortiça com furacão em linha

<i>Proвете</i>	<i>Largura 1</i> [mm]	<i>Largura 2</i> [mm]	<i>Espessura 1</i> [mm]	<i>Espessura 2</i> [mm]	<i>Peso</i> [g]	<i>Energia</i> $\epsilon=10\text{mm}$ (J)
AGF1.6	59,5	59,5	15,9	15,7	8,1	6,56
AGF1.7	59,5	59,5	14,9	15,5	7,4	5,80
AGF1.8	59,5	59,5	15,9	15,9	7,6	6,63

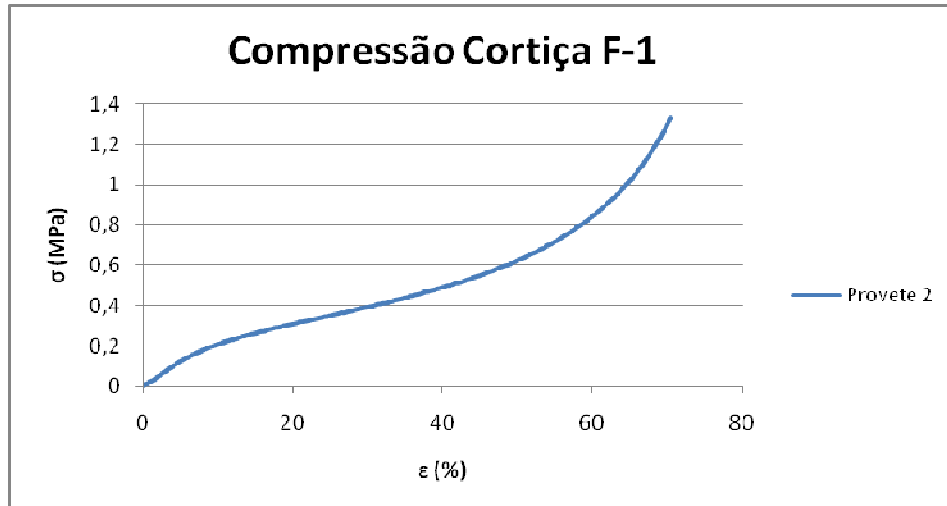


Figura 205- Gráfico mais exemplificativo de compressão da cortiça com furacão linear ate 10mm de deslocamento

Tabela 9- Variação da espessura após o ensaio de compressão

<i>Proвете</i>	<i>Espessura após ensaio</i> [mm]	<i>Espessura 24h após ensaio</i> [mm]	<i>Espessura 72h após ensaio</i> [mm]
AGF1.6	13	15,1	15,2
AGF1.7	12,5	14,2	14,5
AGF1.8	13	15	15,2

6.1.3 Núcleo de aglomerado de cortiça com furacão em triângulo



Figura 206 – Provete de aglomerado de cortiça com furacão em triângulo

Tabela 10- Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de aglomerado de cortiça com furacão em triângulo

Provete	Largura 1 [mm]	Largura 2 [mm]	Espessura 1 [mm]	Espessura 2 [mm]	Peso [g]	E (MPa)	Energia $\epsilon=5\%$ (J)	Energia $\epsilon=5\text{mm}$ (J)
AGF2.1	60	60	14,9	13	7,2	3,26	0,10	2,84
AGF2.2	60	60	14,9	14,9	7,8	1,48	0,08	2,16
AGF2.3	60	60	12,9	12	6,2	1,97	0,06	1,81
AGF2.4	59,9	59,8	14,7	14,4	7,7	1,55	0,08	1,76
AGF2.5	60	60	12,5	14	7,1	2,49	0,07	2,50

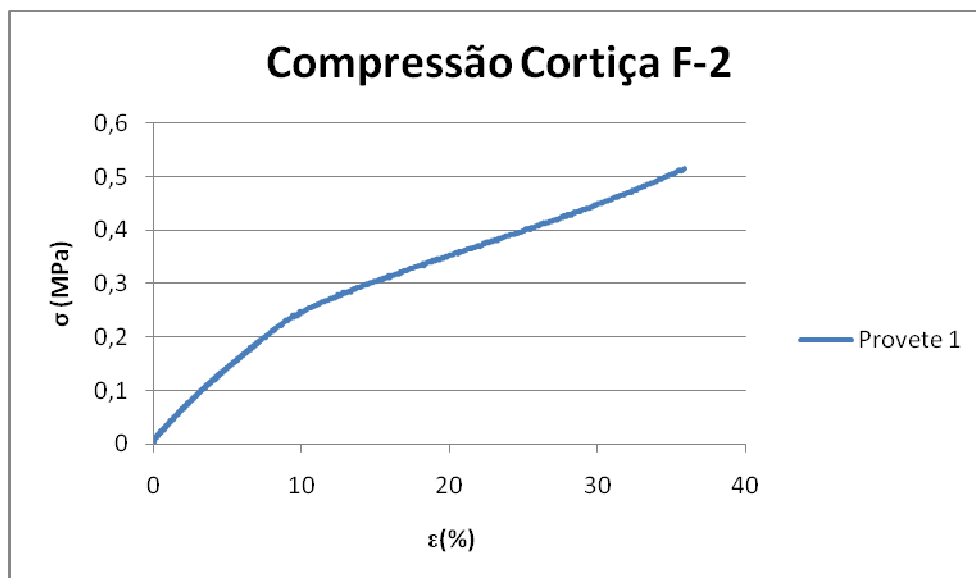


Figura 207- Gráfico mais exemplificativo de compressão da cortiça com furacão em triângulo

Tabela 11- Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de aglomerado de cortiça com furacão em triângulo

<i>Proвете</i>	<i>Largura 1</i> [mm]	<i>Largura 2</i> [mm]	<i>Espessura 1</i> [mm]	<i>Espessura 2</i> [mm]	<i>Peso</i> [g]	<i>Energia</i> $\epsilon=10\text{mm}$ (J)
AGF2.6	59,6	59,6	11,9	10,9	5,9	4,92
AGF2.7	59,5	59,6	15,5	14,9	7,8	5,65
AGF2.8	59,5	59,5	14,8	14,8	7,6	6,42

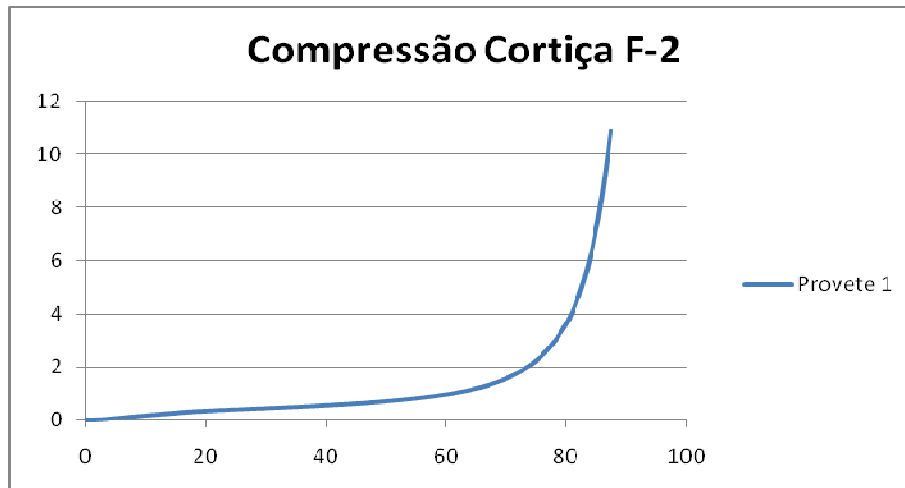


Figura 208- Gráfico mais exemplificativo de compressão da cortiça com furacão em triângulo até 10mm de deslocamento

Tabela 12- Variação da espessura após o ensaio de compressão

<i>Proвете</i>	<i>Espessura após ensaio</i> [mm]	<i>Espessura 24h após ensaio</i> [mm]	<i>Espessura 72h após ensaio</i> [mm]
AGF2.6	8,6	9,9	10,7
AGF2.7	13,5	14,8	15
AGF2.8	12,1	14,1	14,3

6.1.4 Núcleo de Nomex®

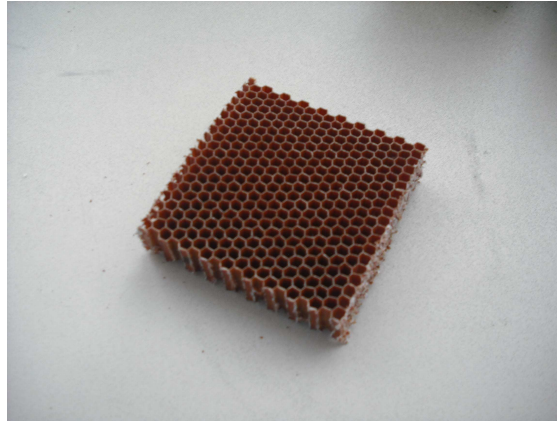


Figura 209- Provete de Nomex®

Tabela 13- Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de Nomex®

Provete	Largura 1 [mm]	Largura 2 [mm]	Espessura 1 [mm]	Espessura 2 [mm]	Peso [g]	E (MPa)	Energia até Rotura (J)
N1	60	60	16	16	4	34,28	1,85
N2	60	60	16	16	3,9	25,71	1,30
N3	59,6	59,9	16	16,2	3,9	34,72	1,83
N4	59,8	60,2	16	16	4	24,73	1,58
N5	60	60	16	16,1	4,1	35,57	1,76

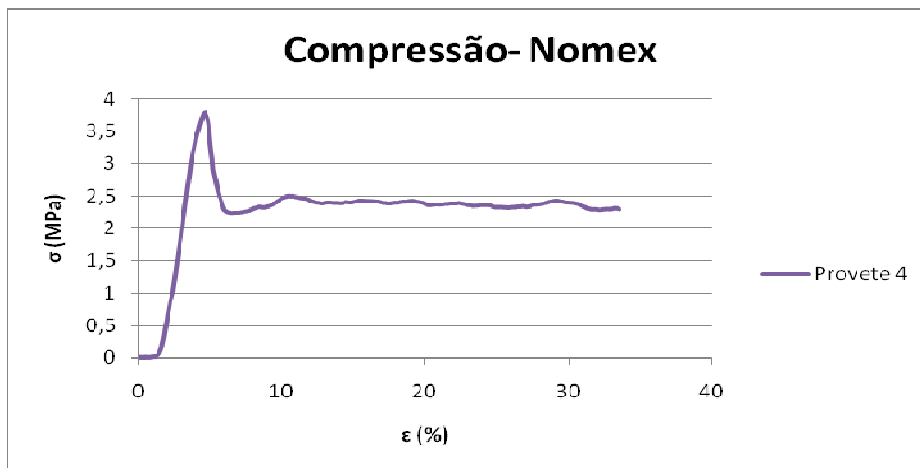


Figura 210- Gráfico mais exemplificativo de compressão do Nomex®

Tabela 14- Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de Nomex®

<i>Proвете</i>	<i>Largura 1</i> [mm]	<i>Largura 2</i> [mm]	<i>Espessura 1</i> [mm]	<i>Espessura 2</i> [mm]	<i>Peso</i> [g]	<i>Energia até</i> <i>Rotura (J)</i>
N6	60	59,9	16	16	3,9	1,43
N7	59,7	59,9	16	16	4,1	1,74
N8	60	60,2	16	16	4	2,18

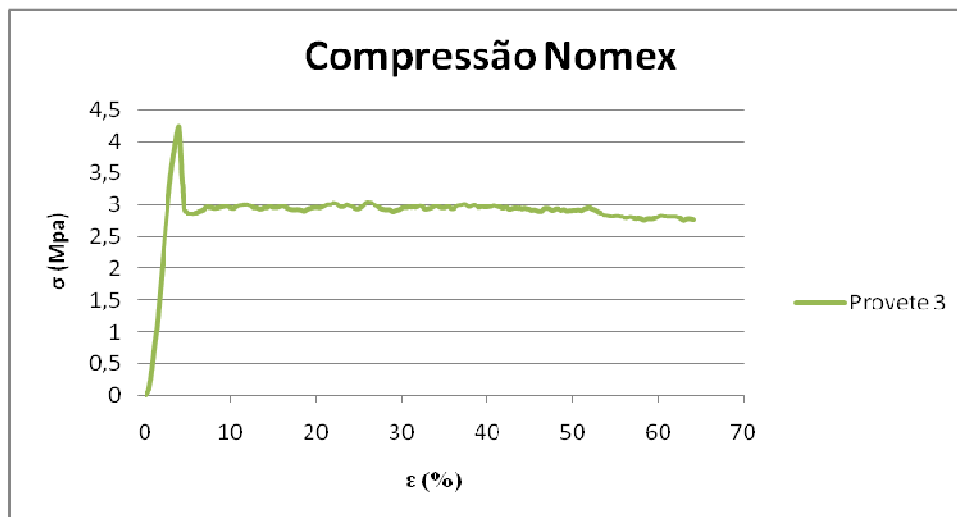


Figura 211- Gráfico mais exemplificativo de Nomex® até 10mm de deslocamento

6.1.5 Núcleo de cortiça virgem



Figura 212- Provete de cortiça virgem

No ensaio do provete CV 3, o software informático que acompanha a INSTRON bloqueou e todos os dados relativos ao ensaio foram perdidos. Posteriormente, quando se testou novamente o provete, chegou-se à conclusão que houve perda de propriedades devido aos resultados estarem um pouco diferentes dos outros provetes. Não se efectuou o mesmo número de ensaios que os anteriores materiais devido a não haver mais material disponível.

Tabela 15- Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de cortiça virgem

Provete	Largura 1 [mm]	Largura 2 [mm]	Espessura 1 [mm]	Espessura 2 [mm]	Peso [g]	E (MPa)	Energia $\epsilon=5\%$ (J)	Energia $\epsilon=5\text{mm}$ (J)
CV 1	77,6	80	17	16,8	8,66	1,39	0,10	4,30
CV 2	80,2	80,5	17	17	11,34	3,54	0,297	6,66
CV 3	80	80,2	17	16,5	9,84	-	-	-

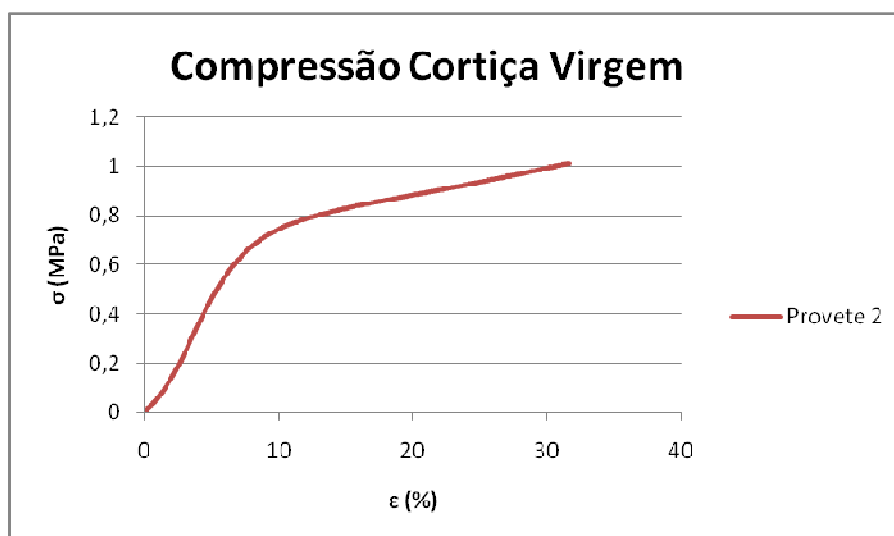


Figura 213- Gráfico mais exemplificativo de compressão de cortiça virgem

Tabela 16- Dimensões e valores relativos à compressão dos provetes de cortiça virgem

<i>Proвете</i>	<i>Largura 1</i> [mm]	<i>Largura 2</i> [mm]	<i>Espessura 1</i> [mm]	<i>Espessura 2</i> [mm]	<i>Peso</i> [g]	<i>Energia</i> $\epsilon=10\text{mm}$ (J)
CV 4	80	80,5	17	16,7	8,77	14,17
CV 5	79,5	80,3	17,1	17,3	10,61	18,74

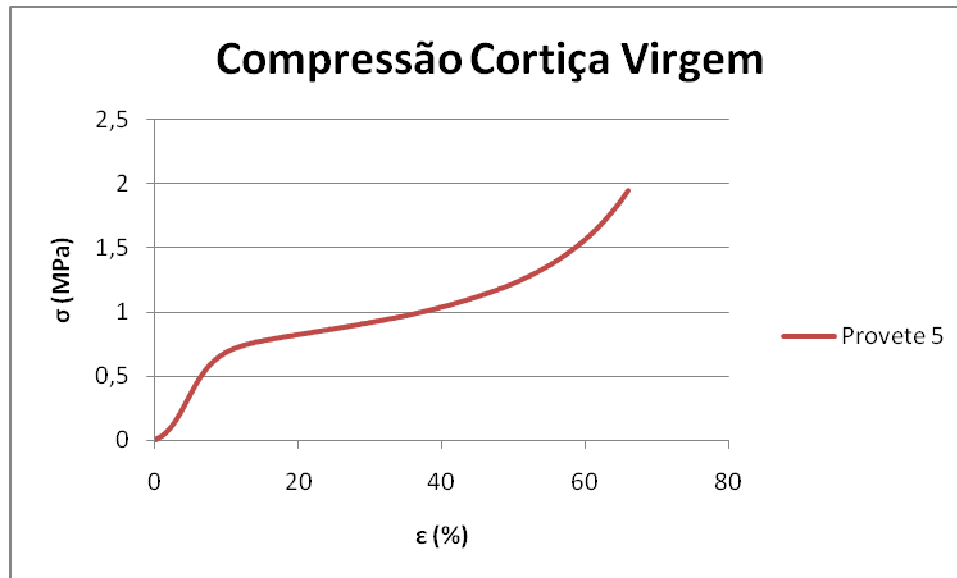


Figura 214- Gráfico mais exemplificativo de cortiça virgem até 10mm de deslocamento

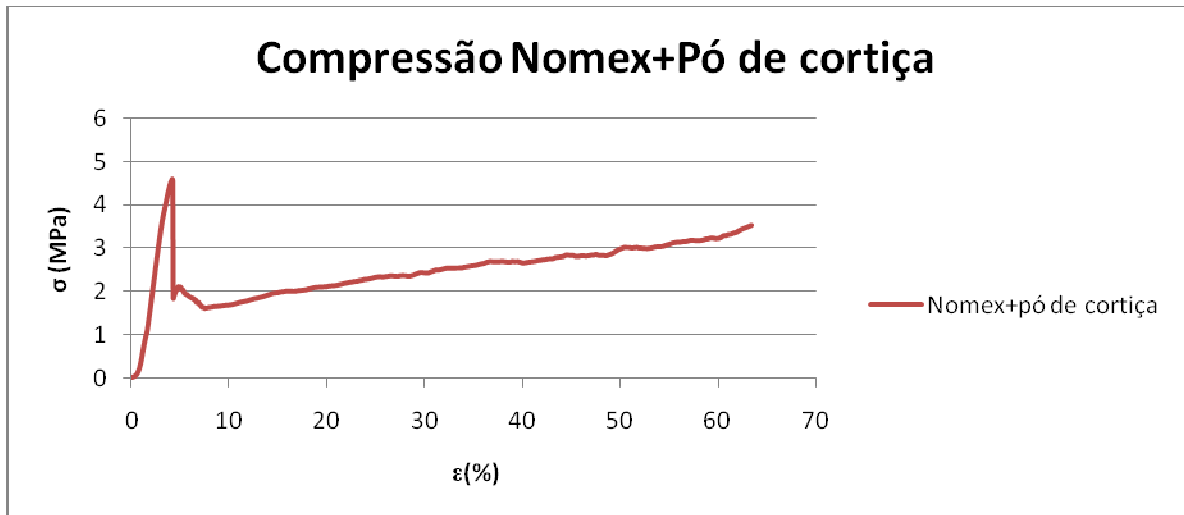
Tabela 17- Variação da espessura após o ensaio de compressão

<i>Proвете</i>	<i>Espessura após ensaio</i> [mm]	<i>Espessura 24h após ensaio</i> [mm]	<i>Espessura 72h após ensaio</i> [mm]
CV 4	13,5	15,2	16,5
CV 5	14,5	16	16,7

6.1.6 Estrutura *sandwich* de Nomex® com pó de cortiça no interior

Tabela 18- Valores do provete com Nomex® e pó de cortiça

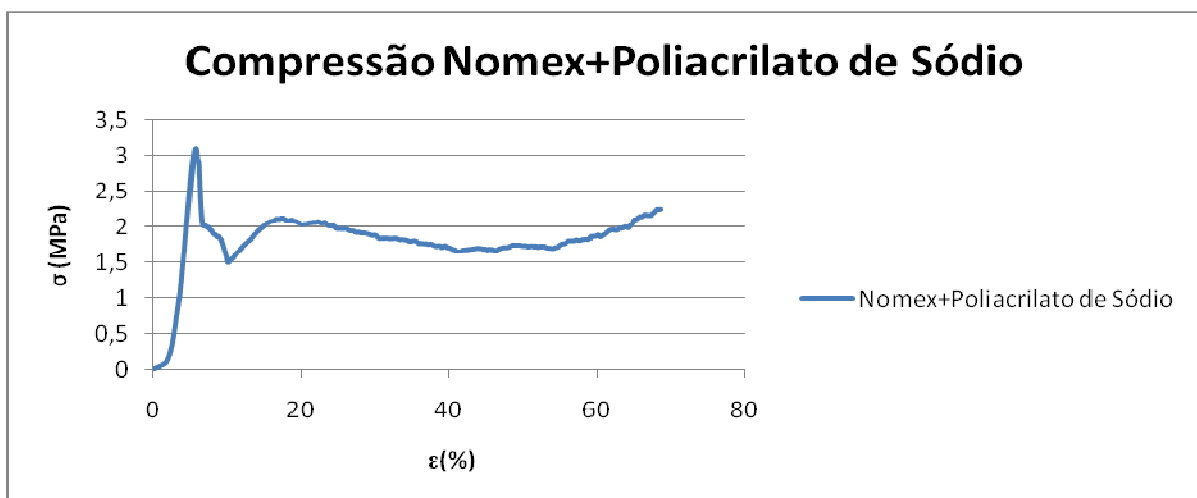
Largura 1 [mm]	Largura 2 [mm]	Espessura 1 [mm]	Espessura 2 [mm]	Peso núcleo [g]	Energia até rotura (J)
61,3	61,1	16	16	8,44	2,75



6.1.7 Estrutura *sandwich* de Nomex® com solução de Poliacrilato de Sódio (100x)

Tabela 19- Valores do provete com Nomex® e Poliacrilato de Sódio

Largura 1 [mm]	Largura 2 [mm]	Espessura 1 [mm]	Espessura 2 [mm]	Peso núcleo [g]	Energia até rotura (J)
61	61	16	16	31,3	2,43



Neste ensaio ocorreu a saída da solução de Poliacrilato do interior do Nomex, como se pode ver pela figura seguinte.

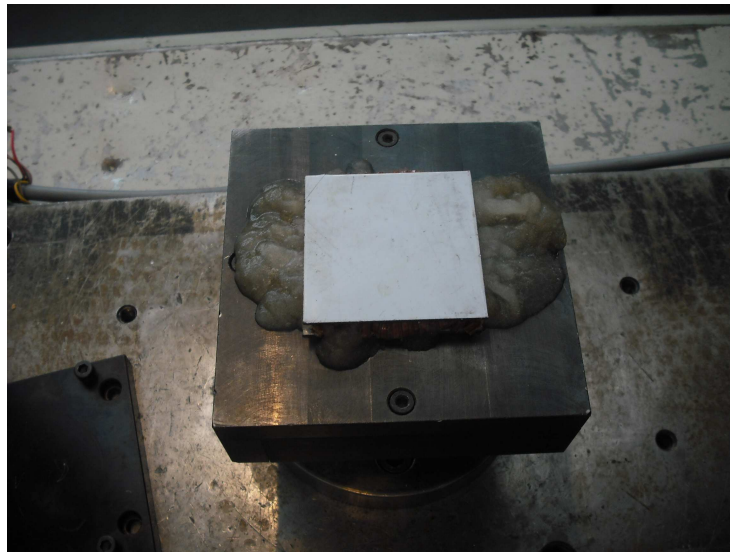


Figura 217- Saída do Poliacrilato do interior do núcleo

6.1.8 Estrutura *sandwich* de AGF2 com várias soluções de Poliacrilato de Sódio

Tabela 20- Valores referentes aos provetes com diferentes soluções de Poliacrilato de Sódio

Mistura	Largura 1	Largura 2	Espessura 1	Espessura 2	Peso núcleo	Energia
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	$\epsilon=10\text{mm}$ (J)
Mistura 200x	61,2	61	15,1	14,9	14,32	8,385
Mistura 100x	61	61,2	15,1	15,5	14,22	7,121
Mistura 50x	61	61	15,5	15,3	14,97	8,272
Mistura 25x	60,6	60,5	15,9	15,6	10,42	7,329
Mistura 10x	61	60,9	15,6	15,5	11,40	6,872

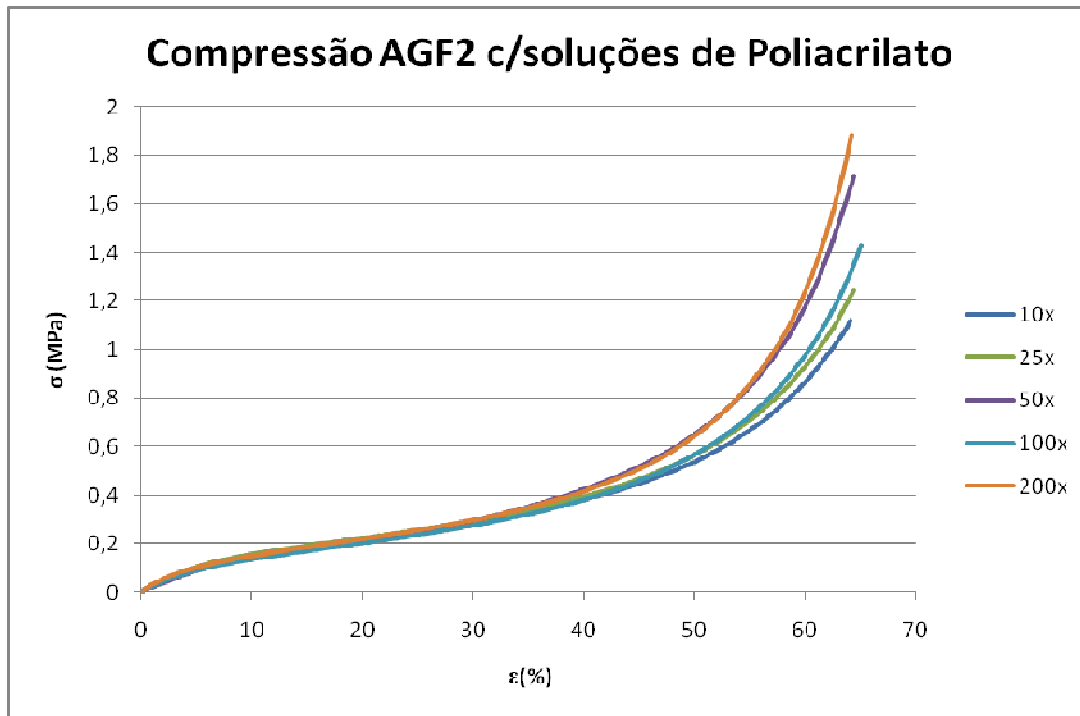


Figura 218- Comparação dos gráficos com diferentes soluções de Poliacrilato de Sódio

Neste conjunto de ensaios de compressão, há a realçar a saída do gel dos provetes com mistura 50x, 100x e 200x pelos bordos que ligam o núcleo e as peles. Tal, pode ser confirmado pela figura seguinte.



Figura 219- Saída de gel do interior do núcleo

6.2 Resultados experimentais da flexão

A flexão em 3 pontos foi realizada na máquina INSTRON 4208, sendo que, o cilindro central tem 20 mm de diâmetro, enquanto os de apoio têm 10 mm de diâmetro. Foram utilizadas umas tiras de borracha, na zona de apoio dos 3 cilindros para aliviar a concentração de tensões nessas zonas. Para os provetes com aglomerado de cortiça e

Nomex®, segundo a norma utilizada, o espaçamento entre apoios foi de 95 mm e a velocidade de ensaio de 2.5mm/min; quanto aos com núcleo em cortiça virgem, o espaçamento entre apoios foi de 160 mm e a velocidade de ensaio foi de 7mm/min.

Todos os gráficos dos provetes ensaiados podem ser consultados no anexo D, sendo que nas páginas seguintes apresentam-se os gráficos mais simplificados para cada estrutura *sandwich*.

6.2.1 *Sandwich* de Nomex®

As dimensões que os provetes tinham, encontram-se assinaladas na seguinte tabela:

Tabela 21- Dimensões dos provetes de Nomex®

<i>Proвете</i>	<i>Largura</i> [mm]	<i>Espessura</i> [mm]
<i>N 1</i>	45	20,8
<i>N 2</i>	44,9	21
<i>N 3</i>	45	20,9

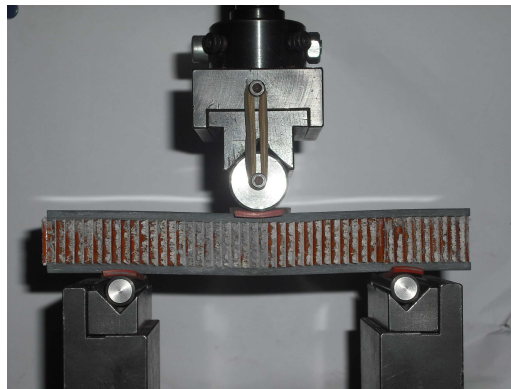


Figura 220- Flexão em 3 pontos da estrutura *sandwich* de Nomex®

Durante a realização dos ensaios verificou-se que não houve ocorrência de delaminação, o que leva a crer que a adesão entre o núcleo e peles foi boa. De notar a rotura das células que constituem o Nomex® antes da rotura das peles e a cada um dos provetes teve uma boa recuperação elástica do núcleo.

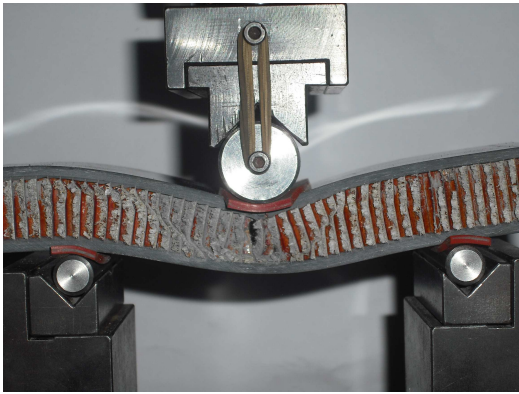


Figura 222- Rotura das células do núcleo

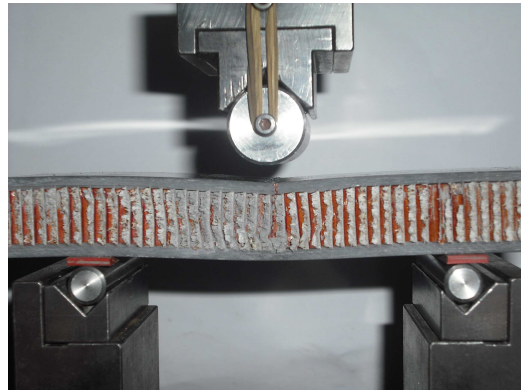


Figura 221- Recuperação elástica do núcleo após finalizado o ensaio

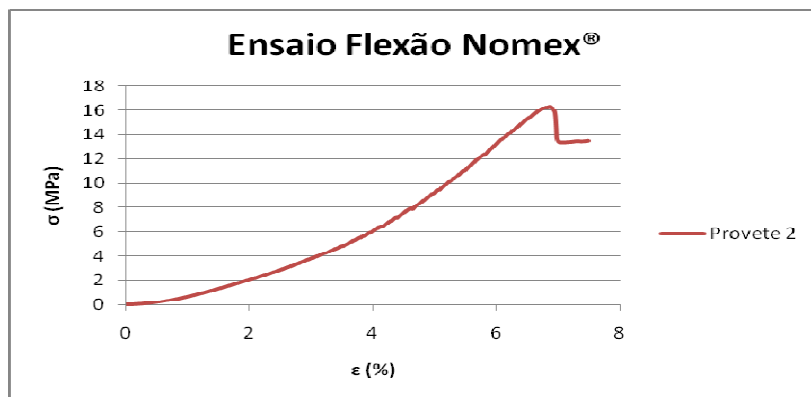


Figura 223- Gráfico mais exemplificativo dos provetes com Nomex®

Tabela 22- Dados dos ensaios de flexão

Provete	ϵ_{rot} (%)	σ_{max} (MPa)	E (MPa)	Energia (J)
1	4,14	16,16	126,60	4,16
2	4,03	16,31	105,90	4,09
3	3,89	15,91	104,50	3,86

6.2.2 *Sandwich* de aglomerado de cortiça sem furação

As dimensões que os provetes tinham, encontram-se assinaladas na seguinte tabela:

Tabela 23- Dimensões dos provetes de Aglomerado de cortiça sem furação

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]
AGØ 1	45	20,9
AGØ 2	45,4	20,4
AGØ 3	45	21



Figura 224- Flexão em 3 pontos da estrutura *sandwich* de aglomerado de cortiça sem furos

Tal como os provetes de Nomex®, também durante estes verificou-se que não houve ocorrência de delaminação, tendo-se alcançado uma adesão entre o núcleo e peles foi boa. O comportamento deste núcleo é muito típico de um núcleo homogêneo de outro material, tendo-se registado uma recuperação elástica quase total do núcleo.

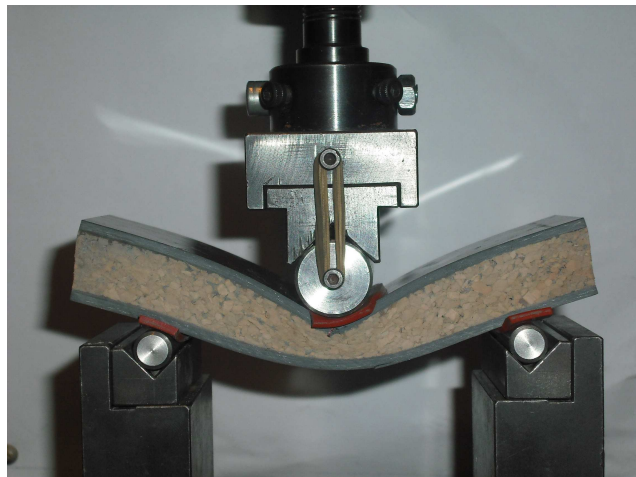


Figura 225- Momento da rotura das peles

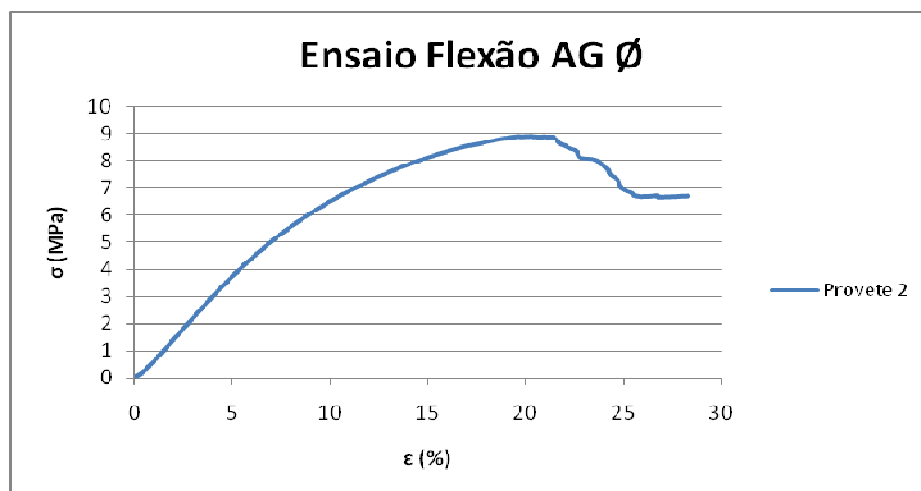


Figura 226- Gráfico mais exemplificativo dos provetes com aglomerado de cortiça

Tabela 24- Dados dos ensaios de flexão

Provete	ε_{rot} (%)	σ_{max} (MPa)	E (MPa)	Energia (J)
1	16,89	8,48	25,57	8,90
2	20,07	8,88	41,22	10,81
3	28,04	6,67	27,21	11,04

6.2.3 *Sandwich* de aglomerado de cortiça com furação em linha

As dimensões que os provetes tinham, encontram-se assinaladas na seguinte tabela:

Tabela 25- Dimensões dos provetes com aglomerado de cortiça e furação em linha

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]
AGF1 1	45	20,9
AGF1 2	45	21,5
AGF1 3	45	21



Figura 227- Flexão em 3 pontos da estrutura *sandwich* de aglomerado de cortiça e furos em linha

Também durante estes ensaios verificou-se que não houve ocorrência de delaminação, tendo-se assim alcançado uma adesão entre o núcleo e peles foi boa. Registou-se também uma recuperação elástica quase total do núcleo, algo que é muito comum quando é utilizado cortiça.

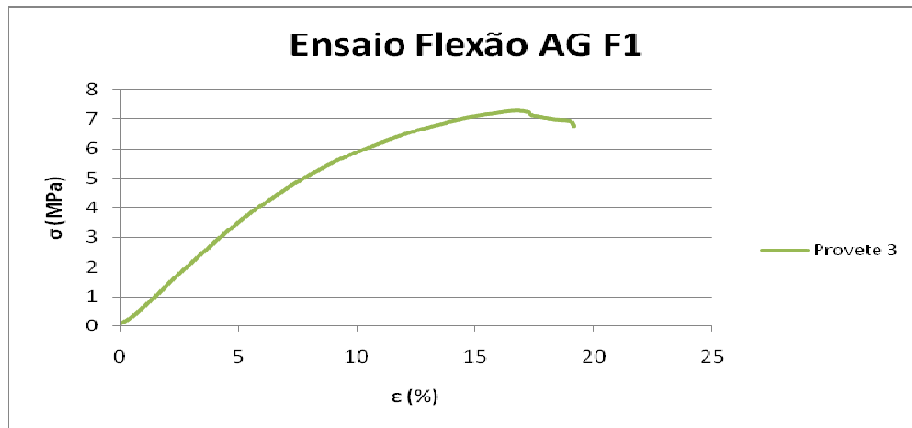


Figura 228- Gráfico mais exemplificativo dos provetes com aglomerado de cortiça com furação em linha

Tabela 26- Dados dos ensaios de flexão

Provetes	ϵ_{rot} (%)	σ_{max} (MPa)	E (MPa)	Energia (J)
1	18,02	8,25	46,65	9,37
2	19,05	7,89	42,50	10,14
3	16,68	7,23	41,66	7,81

6.2.4 *Sandwich* de aglomerado de cortiça com furação em triângulo

As dimensões que os provetes tinham, encontram-se assinaladas na seguinte tabela:

Tabela 27- Dimensões dos provetes com aglomerado de cortiça e furação em triângulo

Provetes	Largura [mm]	Espessura [mm]
AGF2 1	45	20,7
AGF2 2	44,7	19,9
AGF2 3	45	20,5



Figura 229- Flexão em 3 pontos da estrutura *sandwich* de aglomerado de cortiça e furos em triângulo

Na parte final destes ensaios verificou-se a ocorrência de delaminação nos provetes 1 e 3. Registou-se também uma recuperação elástica quase total do núcleo, algo que é muito comum quando é utilizado cortiça.

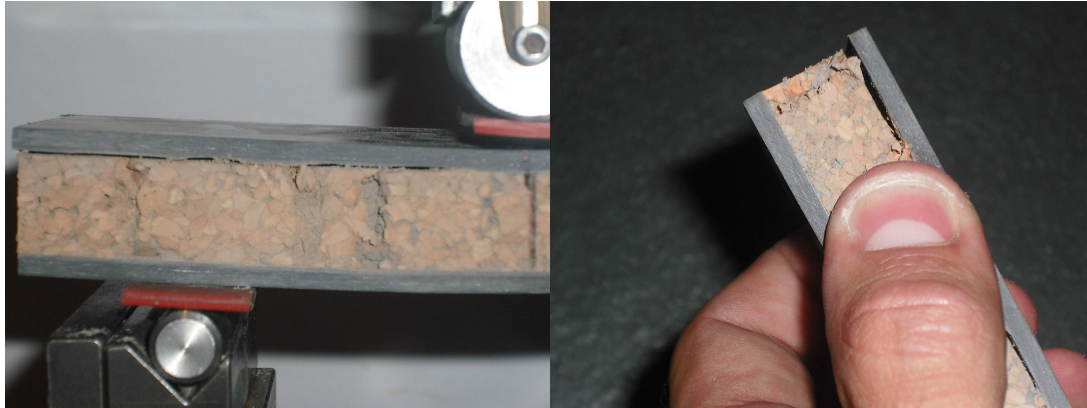


Figura 230- À esquerda o momento da delaminação no ensaio e à direita o delaminação em pormenor

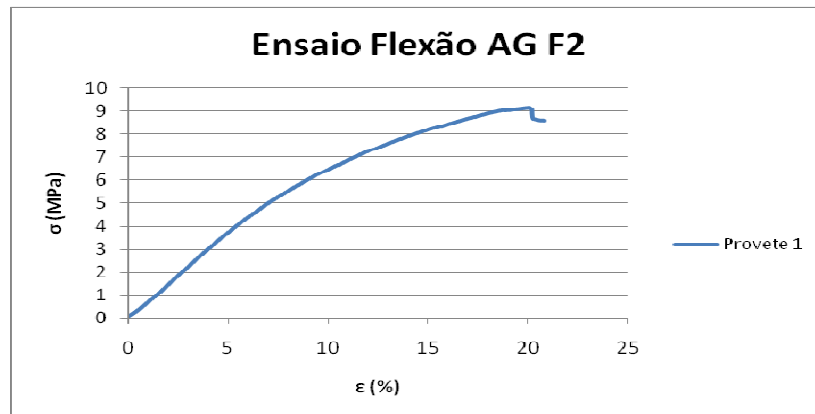


Figura 231- Gráfico mais exemplificativo dos provetes com aglomerado de cortiça com furação em triângulo

Tabela 28- Dados dos ensaios de flexão

Provete	ϵ_{rot} (%)	σ_{max} (MPa)	E (MPa)	Energia (J)
1	19,96	9,15	47,20	10,39
2	17,33	8,42	53,16	8,80
3	21,16	7,21	61,23	7,99

6.2.5 *Sandwich* de cortiça virgem

As dimensões que os provetes tinham, encontram-se assinaladas na seguinte tabela:

Tabela 29- Dimensões dos provetes com cortiça virgem

Proвете	Largura [mm]	Espessura [mm]
CV 1	77,2	21
CV 2	77	20,5
CV 3	76,9	20,6



Figura 232- Flexão em 3 pontos da estrutura *sandwich* de cortiça virgem

Durante a realização dos ensaios ocorreram vários cortes do núcleo, assim como delaminagens entre as peles e o núcleo. Tais ocorrências podem ser visualizadas nas seguintes imagens.

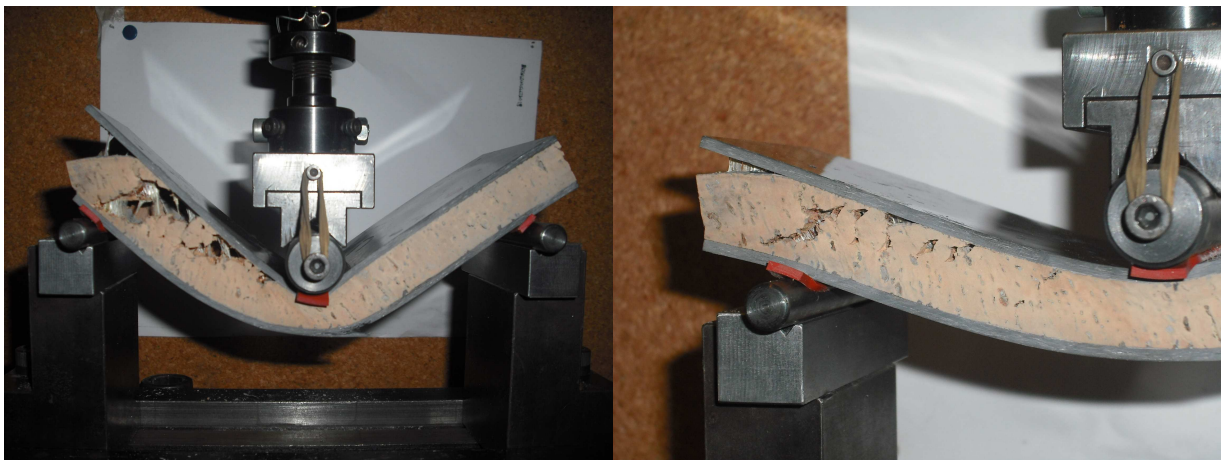


Figura 233- Corte visível do núcleo durante o ensaio à esquerda e delaminagem entre núcleo e pele à direita

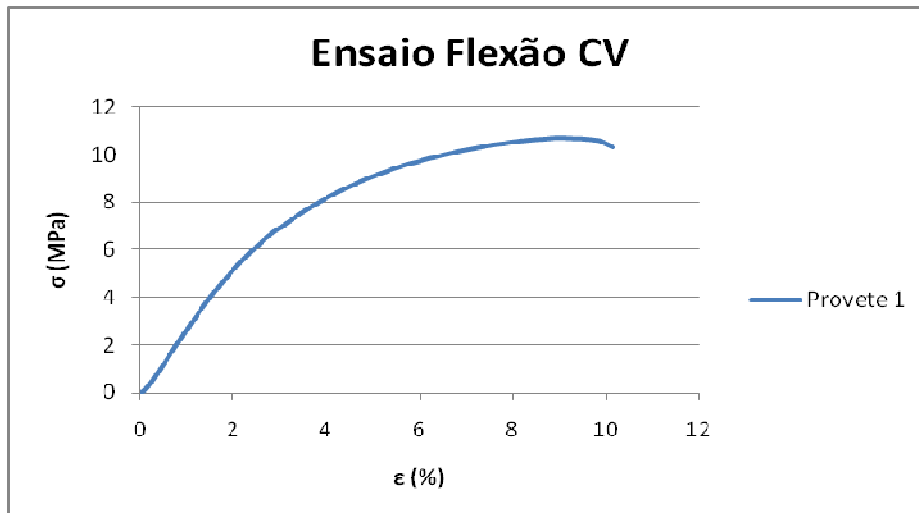


Figura 234- Gráfico mais exemplificativo dos provetes com cortiça virgem

Tabela 30- Dados dos ensaios de flexão

Provete	ε rot (%)	σ _{max} (MPa)	E (MPa)	Energia (J)
1	9,06	10,70	223,17	19,94
2	7,62	10,40	250,00	16,07
3	8,13	10,61	106,04	17,74

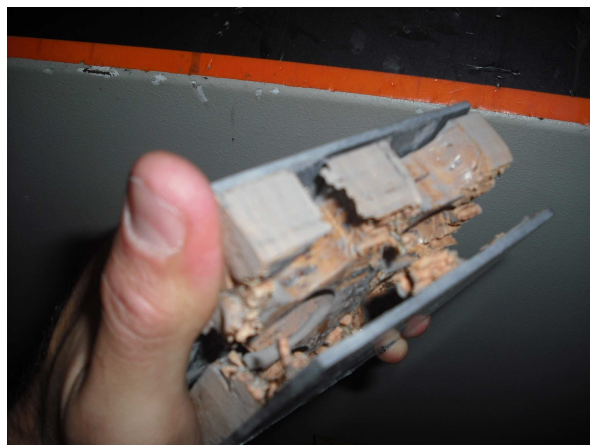


Figura 235- Foto pormenorizada da delaminação



Figura 236- Pormenor do corte do núcleo

6.3 Resultados experimentais de Impacto a Baixa Velocidade

Devido à indisponibilidade da máquina de impacto do Departamento de Mecânica da FEUP, os ensaios de impacto a baixa velocidade foram realizados na Universidade do Minho, agradecendo a disponibilidade dada.

Os provetes provenientes de todas as estruturas *sandwich* elaboradas, tinham de dimensões [60x60] mm e o diâmetro interior da zona onde ocorre o impacto da máquina da Universidade do Minho é de 40 mm. Aguarda-se disponibilidade da Universidade do Minho, para serem realizados e posteriormente publicados.

Capítulo 7- Conclusões

7.1 Discussão de resultados relativos à compressão dos núcleos

Relativamente aos ensaios de compressão realizados sobre os diversos núcleos considerados neste estudo, podem retirar-se algumas conclusões com base nas tabelas de resultados a seguir apresentadas.

Fazendo uma comparação entre os diversos núcleos em estudo, o Nomex[®] tem um Módulo de Young muito superior devido à maior rigidez proporcionada pela geometria em ninho de abelha cujas células possuem o eixo principal normal ao plano do núcleo (e de ensaio). Estabelecendo uma comparação até ao valor médio observado para a deformação de rotura em compressão do núcleo de Nomex[®], que foi de aproximadamente 5%, verifica-se que o Nomex[®] apresenta maior absorção de energia quando comparado com as soluções e baseadas no uso de cortiça.

Tabela 31- Comparação de Módulo de Young e Energia dos diferentes materiais à compressão

Provete	AG Ø		AG F1		AG F2		Nomex		CV	
	E (MPa)	Energia $\epsilon=5\%$ (J)	E (MPa)	Energia $\epsilon=5\%$ (J)	E (MPa)	Energia $\epsilon=5\%$ (J)	E (MPa)	Energia $\epsilon=5\%$ (J)	E (MPa)	Energia $\epsilon=5\%$ (J)
1	5,06	0,132	3,44	0,108	3,26	0,102	34,28	1,847	1,39	0,100
2	2,67	0,118	1,53	0,070	1,48	0,083	25,71	1,297	3,54	0,297
3	1,68	0,107	2,26	0,110	1,97	0,064	34,72	1,826	-	-
4	1,75	0,137	2,52	0,090	1,55	0,077	24,73	1,585	-	-
5	2,43	0,115	2,04	0,088	2,50	0,067	35,57	1,763	-	-
Média	2,72	0,122	2,36	0,093	2,15	0,078	31,00	1,664	2,47	0,198

Dado que a cortiça apresenta uma deformação à rotura (*i.e.*, colapso das micro-células) muito superior, apresentam-se na seguinte tabela os valores de absorção de

energia até ao fim do ensaio, que consistia em comprimir provetes em 5 mm (i.e., deformação de *ca.* 31%). Daqui se pode concluir, devido à muito superior compressibilidade dos núcleos de cortiça, que os valores de energia absorvida até à rotura do Nomex[®] são da mesma ordem de grandeza dos observados para os núcleos à base de aglomerado de cortiça, e inferiores a 50% do observado para o núcleo de cortiça natural, quando estes são submetidos a uma deformação de 30%. Após este ensaio qualquer das soluções de cortiça recupera a sua geometria original sem dano aparente.

Tabela 32- Energia de deformação até ao fim do ensaio ($\epsilon=30\%$)

Proвете	AG Ø	AG F1	AG F2	CV
	Energia $\epsilon=30\%$ (J)	Energia $\epsilon=30\%$ (J)	Energia $\epsilon=30\%$ (J)	Energia $\epsilon=30\%$ (J)
1	2,74	2,55	2,84	4,30
2	2,75	2,14	2,16	6,66
3	2,21	2,82	1,81	-
4	2,76	3,93	1,76	-
5	2,18	1,90	2,50	-
Média	2,53	2,67	2,21	5,48

A figura abaixo apresenta o gráfico tensão vs deformação, podendo comparar o seu comportamento ao longo dos 5mm de deslocamento.

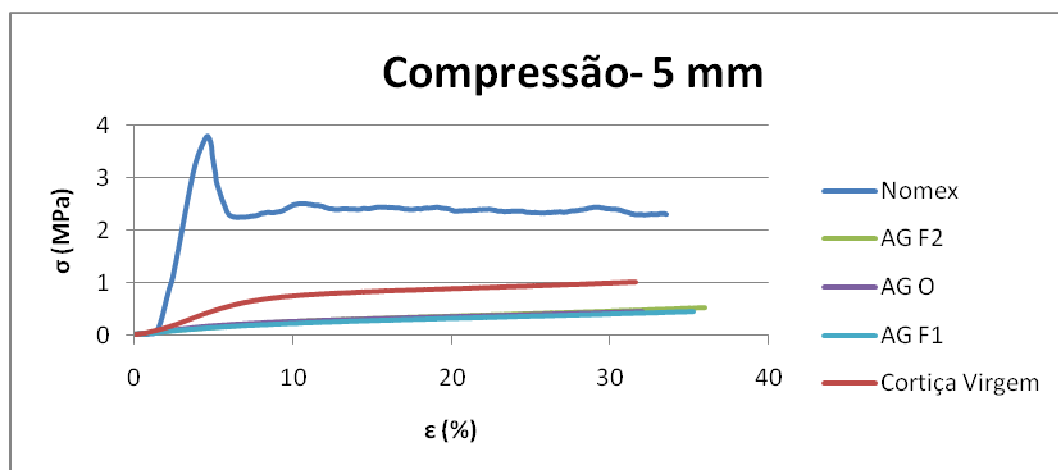


Figura 237- Comparação dos gráficos de compressão mais exemplificativos de cada núcleo

Mas levando em consideração o peso dos provetes e comparando a energia absorvida por unidade de massa (J/g), o Nomex[®] devido à sua leveza comparativamente aos outros núcleos, surge como o segundo melhor material em termos de energia

absorvida específica, apenas ultrapassado pelo desempenho do núcleo com cortiça virgem. A seguinte tabela demonstra a conclusão anterior.

Tabela 33- Valores de energia por unidade de massa de cada núcleo

<i>Provete</i>	<i>AG Ø</i>	<i>AG F1</i>	<i>AG F2</i>	<i>CV</i>	<i>Nomex</i>
	Energia $\epsilon=30\%$ (J/g)	Energia $\epsilon=30\%$ (J/g)	Energia $\epsilon=30\%$ (J/g)	Energia $\epsilon=30\%$ (J/g)	Energia até Rotura (J/g)
1	0,33	0,32	0,39	0,50	0,33
2	0,34	0,27	0,28	0,59	0,46
3	0,28	0,35	0,29	-	0,46
4	0,33	0,50	0,23	-	0,41
5	0,28	0,25	0,35	-	0,43
Média	0,31	0,34	0,31	0,55	0,42

Em relação aos ensaios de compressão em que o deslocamento foi de 10 mm, a figura apresenta o comportamento dos núcleos ao longo do ensaio e a tabela a quantidade de energia absorvida. A cortiça virgem é o material que mais energia absorve.

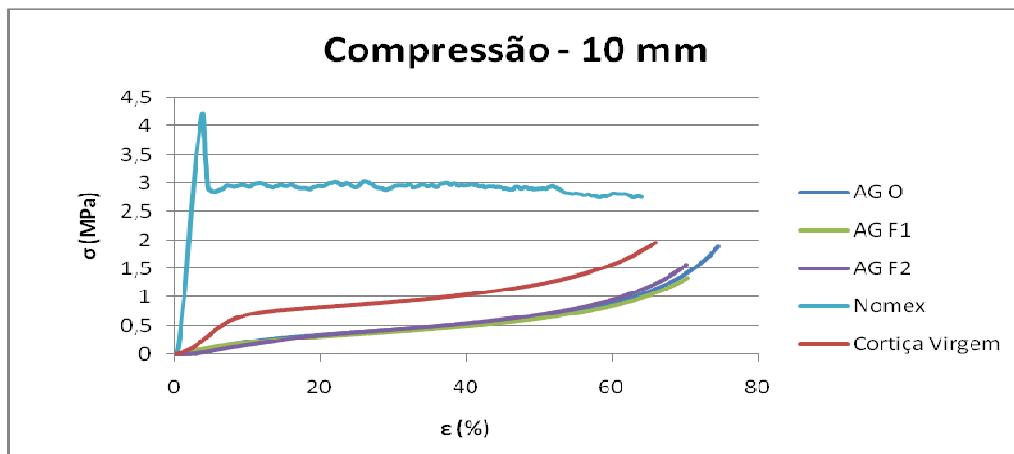


Figura 238- Comparação dos gráficos de compressão mais exemplificativos de cada núcleo

Tabela 34- Energia absorvida durante a compressão até 10 mm

<i>Provete</i>	<i>AG Ø</i>	<i>AG F1</i>	<i>AG F2</i>	<i>Nomex</i>	<i>CV</i>
	Energia (J)	Energia (J)	Energia (J)	Energia (J)	Energia (J)
1	6,57	6,56	4,92	1,43	14,17
2	6,44	5,80	5,65	1,74	18,74
3	6,86	6,63	6,42	2,18	-
Média	6,62	6,33	5,66	1,78	16,45

Também se deve referir que também a estes elevados níveis de compressão ($\epsilon_c > 60\%$) os núcleos de cortiça recuperarem quase na sua totalidade a sua forma inicial. Por outro lado o Nomex[®] apresenta a sua estrutura muito danificada e sem capacidade de recuperação, nem mesmo parcial.

Com a introdução de pó de cortiça e solução de poliacrilato de sódio (100x), o objectivo era tentar aumentar a energia de absorvida durante a compressão. Pela tabela seguinte, pode-se verificar que os núcleos com as adições absorvem mais energia.

Tabela 35- Valores de comparação de energia durante a compressão dos núcleos de Nomex[®]

<i>Nomex</i>	<i>Nomex+Pó Cortiça</i>	<i>Nomex+Sol 100x</i>
Energia (J)	Energia (J)	Energia (J)
1,78	2,41	2,43

Por último, comparando os provetes de aglomerado com várias soluções de poliacrilato com o valor médio de energia de aglomerado de cortiça com furação em triângulo, podemos constatar que há um aumento substancial, sendo que o provete com solução de 200x absorve mais energia, talvez devido ao facto de ser a solução com maior quantidade de água, tornando mais difícil a sua compressão.

Tabela 36- Valores de comparação de energia durante a compressão dos núcleos de aglomerado de cortiça com furação em triângulo e várias soluções de poliacrilato de sódio

<i>AG F2 + Sol. 200x</i>	<i>AG F2 + Sol. 100x</i>	<i>AG F2 + Sol. 50x</i>	<i>AG F2 + Sol. 25x</i>	<i>AG F2 + Sol. 10x</i>	<i>AG F2</i>
Energia (J)	Energia (J)	Energia (J)	Energia (J)	Energia (J)	Energia (J)
8,38	7,12	8,27	7,33	6,87	5,66

7.2 Discussão de resultados relativos à flexão

Em relação aos ensaios de flexão realizados sobre as diversas estruturas *sandwich*, pelos gráfico e tabela a seguir apresentados, podem retirar-se algumas conclusões.

Tabela 37- Tabela comparativa de flexão da energia de deformação e Módulo de Young para cada *sandwich*

Provete	AG Ø		AG F1		AG F2		Nomex		CV	
	E (MPa)	Energia (J)	E (MPa)	Energia (J)	E (MPa)	Energia (J)	E (MPa)	Energia (J)	E (MPa)	Energia (J)
1	25,57	8,90	46,65	9,37	47,20	10,39	126,60	4,16	223,17	19,94
2	41,22	10,81	42,50	10,14	53,16	8,80	105,90	4,09	250,00	16,07
3	27,21	11,04	41,66	7,81	61,23	7,99	104,50	3,86	106,04	17,74
Média	31,33	10,25	43,60	9,11	53,87	9,06	112,33	4,04	193,07	17,92

Os provetes de aglomerado de cortiça possuem uma maior extensão até rotura, devido à sua maior elasticidade e menor rigidez, quando comparados com os provetes de Nomex® e com os de cortiça virgem. No que toca à energia de deformação até ao momento em que ocorre a rotura do provete, e com base na tabela seguinte apresentada, podemos concluir que a cortiça virgem absorve mais energia, enquanto o Nomex® apresenta os piores valores de energia.

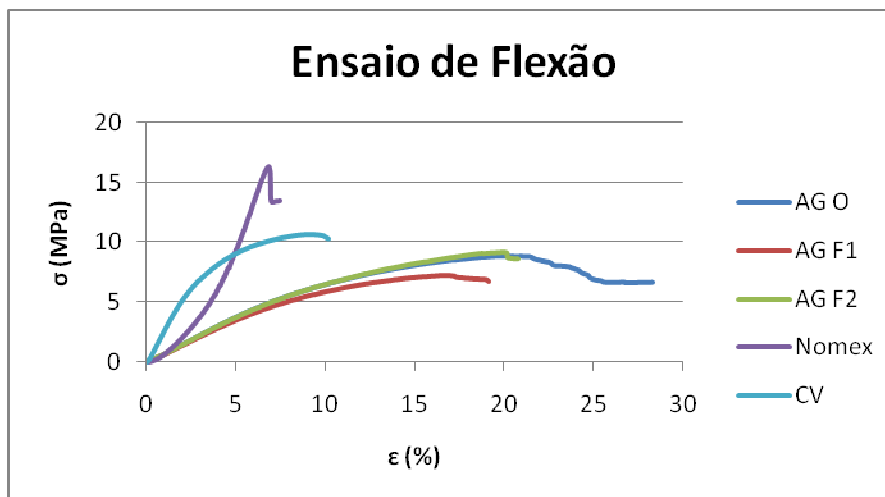


Figura 239- Comparação dos gráficos de flexão mais exemplificativos de cada estrutura *sandwich*

De todos os provetes utilizados, o núcleo de Nomex® mostrou ser um núcleo com qualidade muito superior em relação à cortiça. Pode-se dizer que, quando solicitado à flexão, a resistência das estruturas *sandwich* com núcleo em cortiça se deve quase exclusivamente às peles, enquanto as estruturas *sandwich* com núcleo Nomex®, o núcleo tem influência e desempenho relevantes.

Mas, em situações em que a solicitação à flexão não seja primordial, pode-se concluir que é vantajoso utilizar os núcleos em cortiça, pois a cortiça é muito menos dispendiosa que o Nomex®. No caso das pás das turbinas eólicas, em que o vento pode

ser algo intenso provocando flexão ao longo do comprimento da pá, não é apropriada a utilização de apenas cortiça como núcleo de uma *sandwich*.

7.3 Conclusões acerca do melhor material para as pás das turbinas eólicas

Depois de realizados todos os ensaios para melhor se caracterizarem os materiais em estudo, podemos concluir logo à partida que o Nomex[®] pesando menos que a qualquer das alternativas com aglomerado de cortiça tem vantagens em ser escolhido, pois um dos critérios de selecção de materiais para pás de turbinas passa pela sua leveza. Mesmo quando se efectuem furos no aglomerado cortiça, para diminuir o peso específico e tentar uma aproximação à configuração do Nomex[®], a diminuição fica aquém da desejada e permanece a desvantagem neste parâmetro relativamente ao Nomex[®]. Mesmo no caso da alternativa utilizada com cortiça virgem com orifícios de muito maior raio, subsiste alguma desvantagem em relação ao Nomex[®], ainda que menos acentuada. No quadro seguinte onde são comparados os valores de massa de provetes com dimensões de 60 x 60 x 16 mm³ de todos os materiais estudados, pode verificar-se o que atrás foi dito.

Tabela 38- Tabela comparativa de massas dos provetes para os materiais dos núcleos estudados

AG Ø		AG F1		AG F2		Nomex		CV	
Provete	Peso [g]	Provete	Peso [g]	Provete	Peso [g]	Provete	Peso [g]	Provete	Peso [g]
Ø1	8,3	F1.1	8	F2.1	7,2	N1	4	CV1	4,9
Ø2	8	F1.2	8	F2.2	7,8	N2	3,9	CV2	6,4
Ø3	8	F1.3	8,1	F2.3	6,2	N3	3,9	CV3	5,5
Ø4	8,4	F1.4	7,9	F2.4	7,7	N4	4	CV4	5,0
Ø5	7,9	F1.5	7,5	F2.5	7,1	N5	4,1	CV4	6,0

No que toca a rigidez, que é outro ponto de selecção de materiais para pás, a cortiça virgem é superior ao aglomerado, mas o Nomex[®] possui características de rigidez mais elevadas do que a cortiça. O mesmo acontece quando se reporta à resistência ao corte do núcleo, uma vez que nos ensaios de flexão, ocorreram delaminações no caso dos núcleos de aglomerado de cortiça, e delaminações quer roturas por esforços de corte no caso do núcleo com cortiça virgem, algo que não sucedeu nas estruturas com Nomex[®].

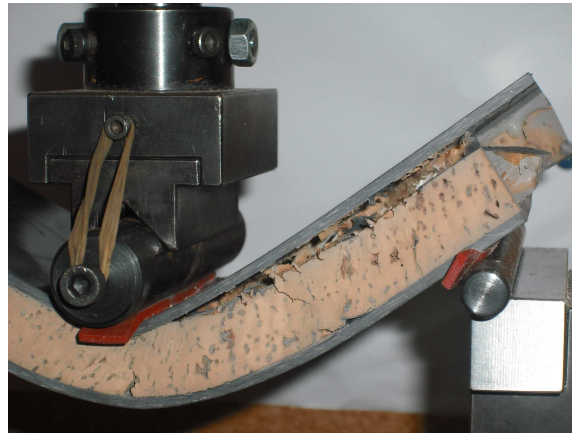


Figura 240- Delaminagem e corte do núcleo de cortiça virgem

Uma grande vantagem que a cortiça tem em relação ao Nomex[®], é o facto de ser um produto 100% natural e o seu fabrico ser muito mais económico, resultando em mínimas consequências para o meio ambiente.

Isto não significa que a cortiça não possa encontrar grande utilidade em aplicações de engenharia, existindo diversas áreas em que a sua utilização poderá revelar-se benéfica, como por exemplo em capacetes para amortecimento de impacto, interiores de aviões, barcos ou kayaks (algo que já se encontra em desenvolvimento), bem como em paredes para isolamento.

7.4 Propostas para trabalhos futuros

Finalizado o trabalho, há inúmeras hipóteses que poderiam ser investigadas no futuro, tendo em vista um maior e melhor aproveitamento da utilização de cortiça como material para núcleo e em muitas outras e diversas aplicações. Desde logo, a utilização de um aglomerado de cortiça com um tamanho de grão inferior aos 5-6 mm existente nos aglomerados utilizados neste trabalho. Esse parâmetro garantiria um melhor acabamento nos furos realizados, bem como a tentativa de outras geometrias, e não exclusivamente a circular, podendo ser quadrada (como a que foi testada na simulação numérica) ou mesmo hexagonal, que permitiria uma mais realista aproximação ao Nomex[®]. Tendo deparado com algumas dificuldades ao nível de furação, por ter sido um processo muito minucioso e trabalhoso, sugere-se o aconselhamento numa empresa de extracção de cortiça com experiência no sector, para a cedência de conselhos no que toca à maquinaria de cortiça, ou então a cedência de aglomerado de cortiça com a

furação, consoante a decisão do tipo de furo a realizar. Na minha opinião, a última hipótese seria a melhor.

Uma outra desvantagem que o aglomerado de cortiça tem em relação ao Nomex[®], reside na menor rigidez que apresenta. Uma forma de tentar aumentar esta rigidez, pode muito bem passar pela adição do gel absorvente fornecido pelo Prof. Yu Qiao. Esta experiência não foi testada devido à falta de tempo para preparar uma outra estrutura *sandwich* que contivesse no seu interior este gel. Seria interessante verificar em que medida, a adição deste gel poderia melhorar o comportamento ao impacto de um material compósito. Seria também interessante, colocar no interior dos furos de aglomerado de cortiça, insertos de Nomex[®], aumentando-se a rigidez do núcleo. A cortiça virgem com furos de rolhas para garrafas tem uma rigidez superior à do aglomerado, e concerteza que a adição de Nomex[®] no interior dos furos deixados pelas rolhas poderá trazer alguns benefícios ao nível de rigidez, bem como no desempenho da cortiça como núcleo de estrutura *sandwich*, para aplicações com um maior grau de exigência. Não só de Nomex[®] poderá preencher-se o interior dos furos deixados pelas rolhas de garrafa ou dos furos de aglomerado de cortiça; pode-se tentar um outro conceito, como por exemplo a introdução de um material como insertos de compósito, um elastómero, ou então adição de uma espuma de poliuretano. Um outro conceito que seria diferente, provocando alguma curiosidade em como se iria comportar, seria um núcleo formado por Nomex[®] e aglomerado de cortiça, estudando qual seria a melhor disposição sobre qual dos dois deveria ficar a um nível superior. Este conceito pode ser elucidado pela seguinte figura.

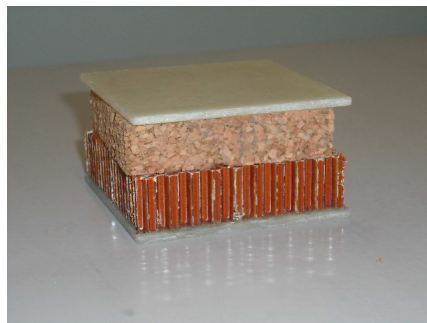


Figura 241- Nomex[®] e aglomerado de cortiça como um núcleo único

ANEXO A



SR 1500 Epoxy laminating system

Description

This modified epoxy resin has been formulated to be cristalization free and low toxicity.
 The formulation bases of SR 1500 are bisphenol A and F
 This epoxy system has very good wet-out, degazing properties and an excellent adhesion to all type of reinforcements (glass, aramid, carbon, polyester...)
 Adjustable working time depending on the choice of the hardener
 Respecting the ratio resin / hardener, the hardeners are mixable by weight, to achieve the most adapted reactivity for the application.
 Glass transition : 75 - 81°C
 The parts can be in service after 7 to 14 days @ 23°C for the hardeners **SD 2507**, **SD 2505** and **SD 2503**.
 Post-cure @ a minimum of 40°C for a Tg above 55°C.
Developped for : ship building, aeronautic, automotive prototypes, tool making.
Other applications : putty for coating with microspheres, syntactic core material, casting volume depending on the hardeners.(see technical data sheet of **SD 4871** or **SD 597.20**)

Epoxy resin SR 1500

Aspect / color	Light yellow liquid	
Viscosity (mPa.s)	@ 20 °C	2 100
	@ 25 °C	1 180
Density (g/cm³)	@ 20 °C	1.13
Storage	Cristalization free	

Hardeners SD 250x or SD 6131

Hardeners		SD 2507	SD 2505	SD 2503	SD 6131
Type of reactivity		"fast"	"standard"	"slow"	"very slow"
Aspect / color		Yellow liquid	Yellow liquid	Yellow liquid	Red liquid
Viscosity (m.Pas)	@ 20°C	1 800	280	180	80
	@ 25°C	1 400	210	125	55
Viscosity of the mix (mPa.s)	@ 20°C	1 700	800	700	650
	@ 25°C	1 160	550	510	470
Density (g/cm³)	@ 20°C	1.09	1.00	1.00	0.98
Mixing ratio by weight		100 g / 33 g	100 g / 33 g	100 g / 33 g	100 g / 31 g
Mixing ratio by volume		100 ml / 35 ml	100 ml / 37 ml	100 ml / 37 ml	100 ml / 36 ml

Specific applications

SR 1500 / SD 2507 :

Thin laminate, low temperature curing (10 – 15°C)
Quick repairs or bondings
Putty for structural foam core, sandable coating.

SR 1500 / SD 2505 , SD 2503:

Standard laminating systems : all type of part sizes, tooling, fillet joints...

SR 1500 / SD 6131

Large parts and thick laminate, injection, casting of small volume
Long working time on the laminate
Post-cure temperature : 55°C minimum

Other formulations based on the SR 1500

SR 1500 i : Fire resistant M1

SR 1500 / SD 597.20.: Casting of large volume

Reactivities of the mixes SR 1500 / SD 250. and SD 6131

Systems		1500 / 2507	1500 / 2505	1500 / 2503	1500 / 6131
Gel time TECAM on 150 g mix :					
	@ 25°C	14'	28'	1 h 10'	5 h 30'
	@ 20°C	19'	54'	3 h 10'	8 h
Pot-life on 500 g mix :					
	@ 25°C	13'	24'	47'	8 h 10'
	@ 20°C	16'	35'	1 h	8 h 45'
Working time on 3 layers of E glass fabric of 300 g/m ² :					
	@ 25°C	1 h 15'	2 h 15'	3 h 30'	7 h
	@ 20°C	2 h	3 h 15'	5 h	9 h

Curing

SD 2507 and SD 2505 have been developed to offer excellent mechanical properties after a post-cure at moderate temperature

	SD 2507 SD 2505	SD 2503	SD 6131
Time to wait @ 20°C before post-cure	2 to 4 hours	24 hours	48 hours
Minimum post-cure cycle	2 to 7 days @ 20°C	14 days @ 20°C	20 hours @ 55°C
Advised post-cure cycle	2 to 7 days @ 20°C	14 days @ 20°C	20 hours @ 55°C
	Or	Or	
	12 hours @ 40°C	24 hours @ 40°C	
	Or	Or	
	6 hours @ 60°C	16 hours @ 60°C	

Packaging (in Kg)

Kits	Resin SR 1500	hardeners SD 250x
260.00	1 x 200	6 x 10
43.00	1 x 33	1 x 10
15.60	1 x 12	1 x 3.6
4.30	1 x 3.3	1 x 1
1.30	1 x 1	1 x 0.3
	Resin SR 1500	Hardener SD 6131
320	240	8 x 9.3
40	30	9.3

Safety data- (EEC classification 67 / 548 / EEC Directive)

Reference	Symbol	Danger	Risk phrase
SR 1500		Xi : Irritating N : Dangerous for the environment	36/38 51/53 43
SD 2503 SD 2505		C : Corrosive	21/22 34 43
SD 2507		T : Toxic	20 24/25 35 43
SD 6131		T : Toxic	45 48/20/21/22 37 43

Mechanical properties on cast resin :

SR 1500 /	SD 6131				SD 2503		SD 2505		SD 2507			
	48 h AT + 24 h @ 40 °C	48 h AT + 20 h @ 50 °C	48 h AT + 16 h @ 60 °C	48 h AT + 8 h @ 80 °C	14 days AT	24hAT + 16 h @ 60 °C	14 days AT	24 h AT + 24 h @ 40 °C	24 h AT + 8 h @ 60 °C	14 days AT	24 h AT + 24 h @ 40 °C	24 h AT + 8 h @ 60 °C
Curing cycles												
Tension												
	Modulus of elasticity	N/mm²	3160	3130	3000	2820	3350	2860	3100	2900	3200	3140
	Maximum resistance	N/mm²	67	69	81	78	77	71	74	74	80	80
	Resistance at break	N/mm²	67	69	81	75	72	65	68	74	72	74
	Elongation at max.load	%	2.5	2.6	4.3	4.8	3.6	4.7	4.4	4.7	3.7	3.9
Elongation at break	%	2.5	2.6	4.4	6.2	5.4	8.0	4.5	6.0	4.5	4.7	
Flexion												
	Modulus of elasticity	N/mm²	3360	3330	3070	3010	3300	2760	3100	3100	3450	3300
	Maximum resistance	N/mm²	111	119	120	124	125	123	115	117	123	123
	Elongation at max. resistance	%	3.5	4.8	5.5	6.0	4.6	6.4	4.8	5.6	4.8	5.0
	Elongation at break	%	3.5	5.6	7.9	7.6	7.2	7.5	7.7	7.9	7.8	8.1
Compression												
	Compressive yield strength	N/mm²	115	112	110	105						
	Offset compressive yield	%	5.7	6.1	7.0	6.2						
Choc Charpy												
	Resilience	KJ/m²	15	16	23	28	12	30	25	30	19	27
Glass transition												
	Tg1	°C	67	74	88	95	55	70	56	68	55	69
	Tq1 max.	°C				99	76	76		72	69	73
AT : Ambient Temperature												

AT : Ambient Temperature

Tests carried out on cast resin, without prior degassing, between steel plates.
Procedures carried out in accordance with AFNOR norms.

Tension : NF T51-034

Flexion : NF T51-001

Compression: NF T51-101

Charpy Impact Strength: NF T51-501

Glass transition : DSC Tg 1 = 1° point at 10°C / minute

ANEXO B

TECHNICAL DATA SHEET

pag. 1/4



Structural adhesive

Resin
AS 89

Hardener
AW 89

Mixing ratio by weight
100:45

Cartridges kit

ADH 89.89

Mixing ratio by volume
100:50

Application: Structural thermal resistant bonding. Adhesive for the assembly of composite materials, metals, automotive components, sport components.

Processing: Brush application, by spatula or with mixing/dispensing devices. Room temperature or hot curing. The post-curing by subministration of heat is necessary to achieve the thermal resistance indicated in the data sheet. Also available in cartridges of 400 ml.

Description: Two component modified, un-filled and thixotropic epoxy system. Easy mixing ratio 2:1 by volume. Solvent free. Sag resistance up to 5 mm. High toughness. Good thermal resistance. It is advisable to use the system at a temperature no lower than 20-25°C

SYSTEM SPECIFICATIONS

Resin					
Viscosity at:	25°C	IO-10-50 (EN13702-2)	mPas	200.000	300.000
Hardener					
Viscosity at:	25°C	IO-10-50 (EN13702-2)	mPas	250.000	350.000
Pot life	25°C (40mm;100ml)	IO-10-53 (*)	min	20	30

TYPICAL SYSTEM CHARACTERISTICS

Processing Data					
Mixing ratio by weight		for 100 g resin	g	100:45	
Mixing ratio by volume		for 100 ml resin	ml	100:50	
Resin Colour				Milky	
Hardener Colour				Black Amber	
Density at: 25°C Resin		IO-10-51 (ASTM D 1475)	g/ml	1,10	1,12
Density at: 25°C Hardener		IO-10-51 (ASTM D 1475)	g/ml	0,95	0,99
Pot life	25°C (40mm;100ml)	IO-10-53 (*)	min	20	30
Exothermic peak	25°C (40mm;100ml)	IO-10-53 (*)	°C	140	160
Initial mixture viscosity at: 25°C		IO-10-50 (EN13702-2)	mPas	130.000	190.000
Gelation time	25°C (1mm)	IO-10-55 (ASTM D5885-03)	h	2	3
Setting time	25°C 0,1 mm	(*)	h	3,5	4,5
Suggested curing cycles		(**)		2 h 80°C	

TECHNICAL DATA SHEET

pag.2/4

ADH 89.89 - AS 89/AW 89



TYPICAL CURED SYSTEM PROPERTIES

Properties determined on specimens cured: 2h 80°C (salvo dove diversamente specificato)

Density 25°C	IO-10-54 (ASTM D 792)	g/ml	1,04	1,08
Hardness 25°C	IO-10-58 (ASTM D 2240)	Shore D/15	81	85
Glass transition (Tg)	IO-10-69 (ASTM D 3418)	°C	45	55
24h RT		°C	55	65
7days RT		°C	55	65
2h 80°C		°C	85	90
Shear strength by tension:				
- Inox steel AISI 316 cured 6h RT (tested RT)	IO-10-80 (ASTM D 1002)	MPa	3,5	4,0
- Inox steel AISI 316 cured 24hRT (tested RT)		MPa	11,5	14,0
- Inox steel AISI 316 cured 7days RT (tested RT)		MPa	18,0	22,0
- Inox steel AISI 316 cured 2h80°C (tested RT)		MPa	27,0	33,0
- Inox steel AISI 316 cured 2h80°C (tested -40°C)		MPa	17,0	21,0
- Aluminium cured 2h80°C (tested RT)		MPa	27,0	33,0
- Aluminium cured 2h80°C (tested 80°C)		MPa	13,5	16,5
- Carbon composite cured 24hRT (tested RT)		MPa	13,5	16,5
- Carbon composite cured 2h80°C (tested RT)		MPa	32	39
Flexural strength	IO-10-86 (ASTM D 790)	MN/m ²	82	92
Maximum strain	IO-10-86 (ASTM D 790)	%	9	13
Strain at break	IO-10-86 (ASTM D 790)	%	10	14
Flexural elastic modulus	IO-10-86 (ASTM D 790)	MN/m ²	1.900	2.400
Tensile strength	IO-10-83 (ASTM D 538)	MN/m ²	45	55
Elongation at break	IO-10-83 (ASTM D 538)	%	6	9

IO-00-00 = Elantas Camattini's test method. The correspondent international method is indicated whenever possible.

nd = not determined na = not applicable RT = TA = laboratory room temperature (23±2°C)

Conversion units: 1 mPas = 1 cPs 1MN/m² = 10 kg/cm² = 1 MPa

(*) for larger quantities pol life is shorter and exothermic peak increases

(**) the brackets mean optionality

(***) The maximum operating temperature is given on the basis of laboratory information available being it function of the curing conditions used and of the type of coupled materials. For further possible information see post-curing paragraph.

TECHNICAL DATA SHEET

pag. 3/4

ADH 89.89 - AS 89/AW 89



Instructions:	The surfaces must be clean and dry. Generally a mechanical abrasion or sanding followed by degreasing with solvent (ex. acetone) is sufficient. Add the appropriate quantity of the hardener to the resin, mix carefully. Once applied, the system is moisture and carbonic anhydride sensitive: quickly cover the junction or cure in the oven. The final cleaning of the equipment can be carried out with normal solvent such as acetone, nitro, etc.
Curing Post-curing:	Post curing is always advisable for RT curing systems in order to stabilize the component and to reach the best properties. It is necessary when the component works at high temperature.
Storage:	Epoxy resins and their hardeners can be stored for two years in the original sealed containers stored in a cool, dry place.
Handling precautions:	Refer to the safety data sheet and comply with regulations relating to industrial health and waste disposal.

emission date:	January	2006
revision n° 02	March	2008

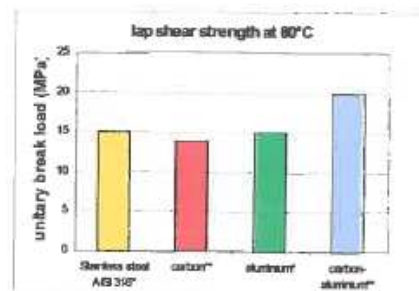
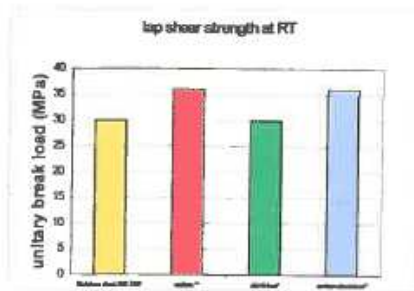
TECHNICAL DATA SHEET

pag.4/4



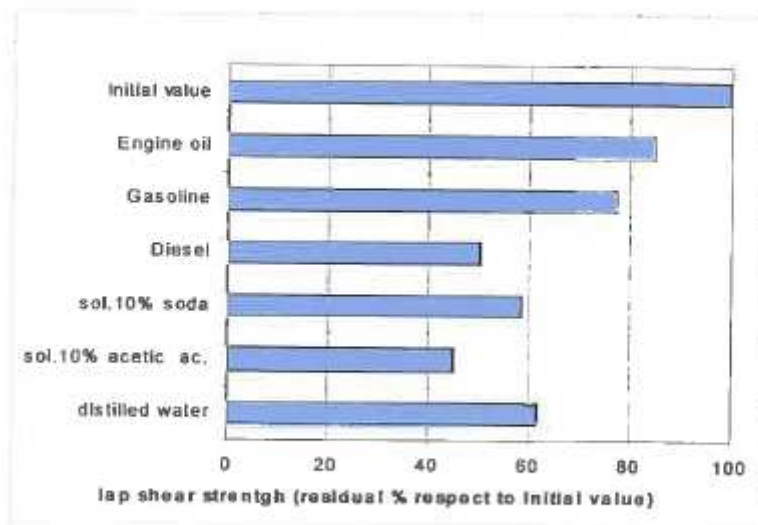
ADH 89.89 - AS 89/AW 89

Typical cured properties after 2h at 80°C
ASTM standards: D 1002 and D 3528-96



*= ASTM D1002
**=ASTM D3528-96

Lap shear strength
after immersion in different media
(ASTM D1002)



Support: stainless steel
Curing cycle: 2h 80°C.
The lap shear strength was determined after immersion for 30 days at 23±2 °C.

ANEXO C- Gráficos Compressão

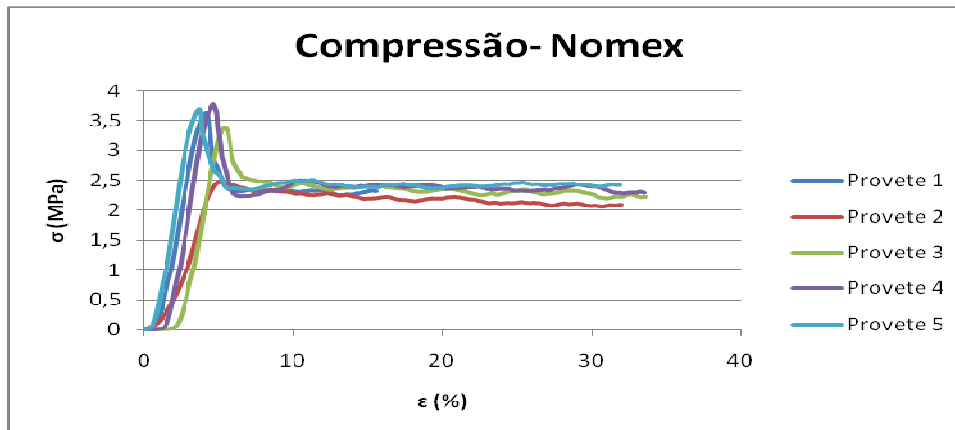


Figura 242- Ensaios de compressão Nomex®

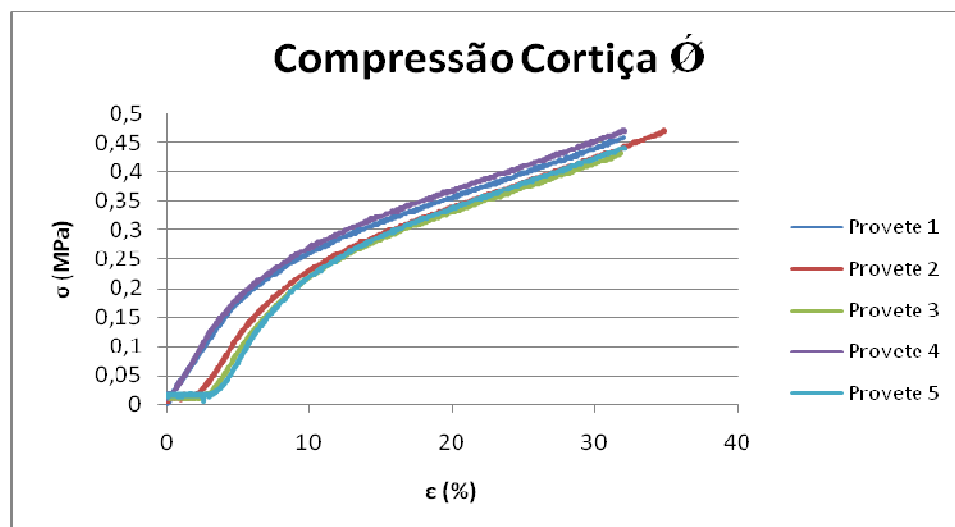


Figura 243- Ensaios de compressão aglomerado de cortiça sem furos

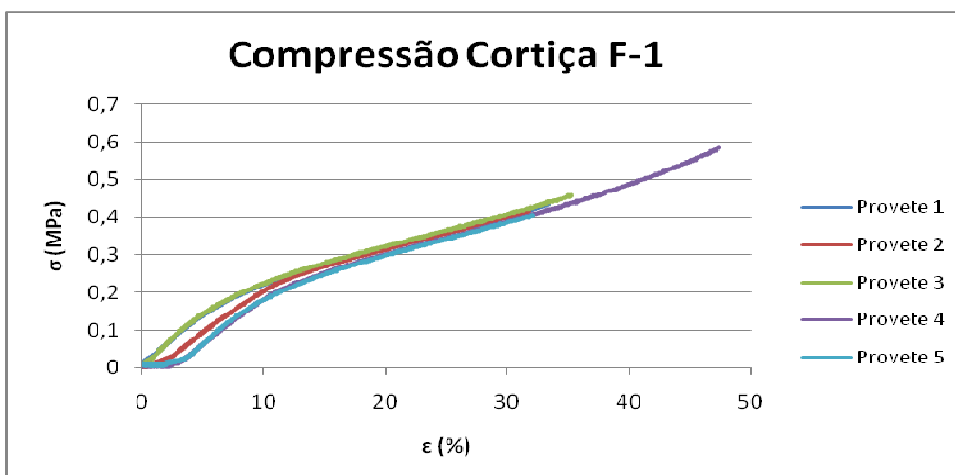


Figura 244- Ensaios de compressão aglomerado de cortiça com furos em linha

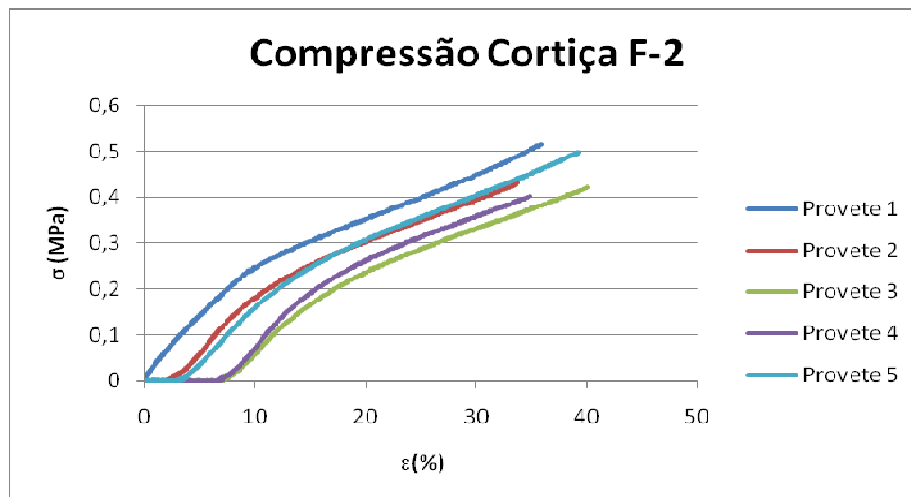


Figura 245- Ensaio de compressão de aglomerado de cortiça com furação em triângulo

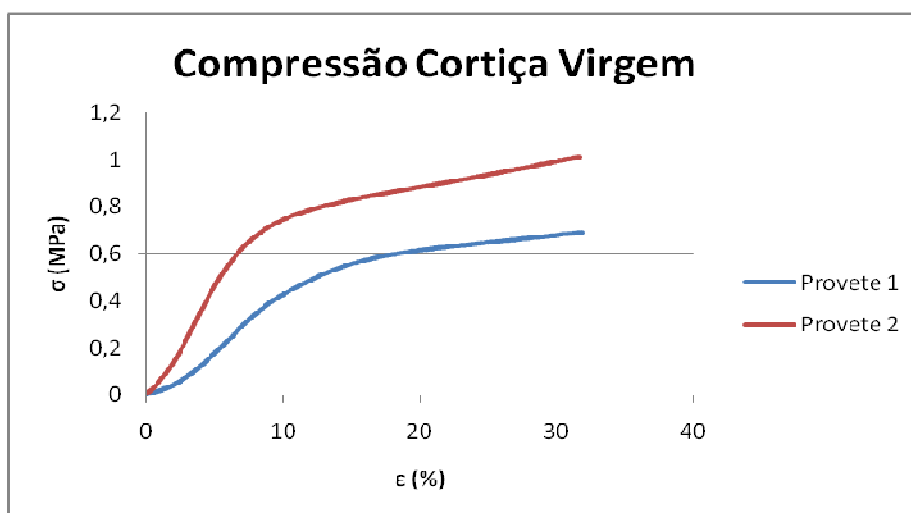


Figura 246- Ensaio de compressão de cortiça virgem

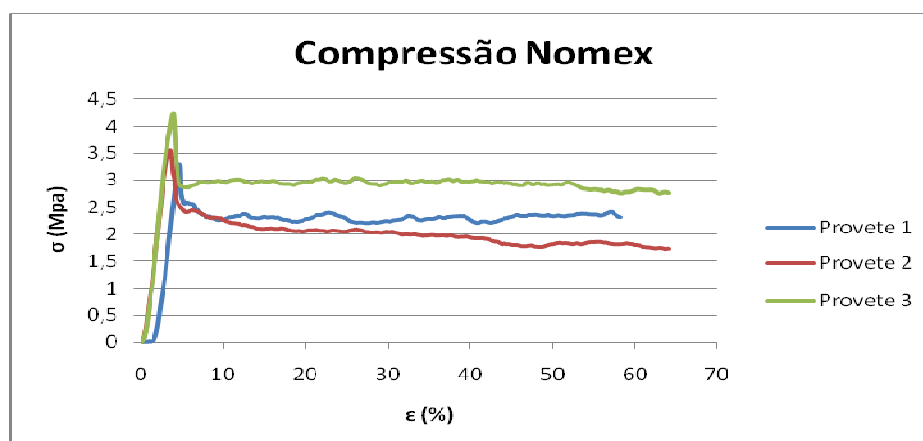


Figura 247- Compressão do Nomex® até 10 mm de deslocamento

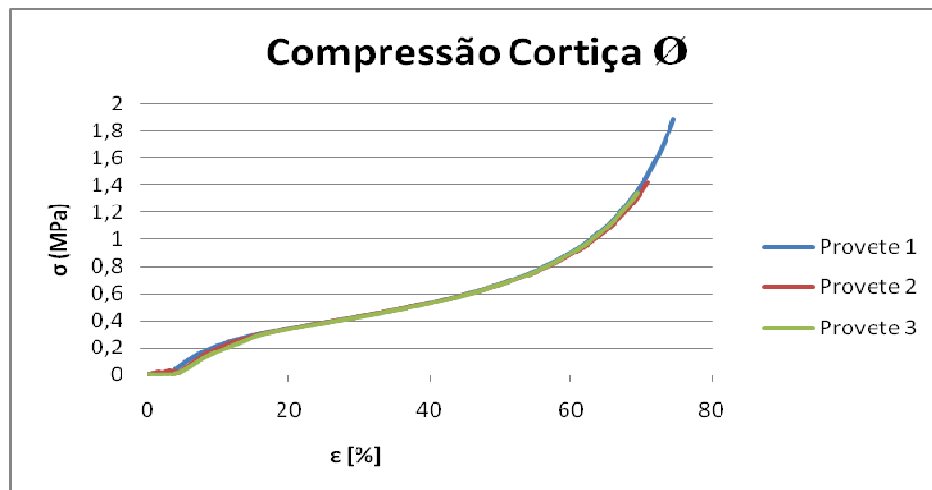


Figura 248- Compressão aglomerado de cortiça até 10mm de deslocamento

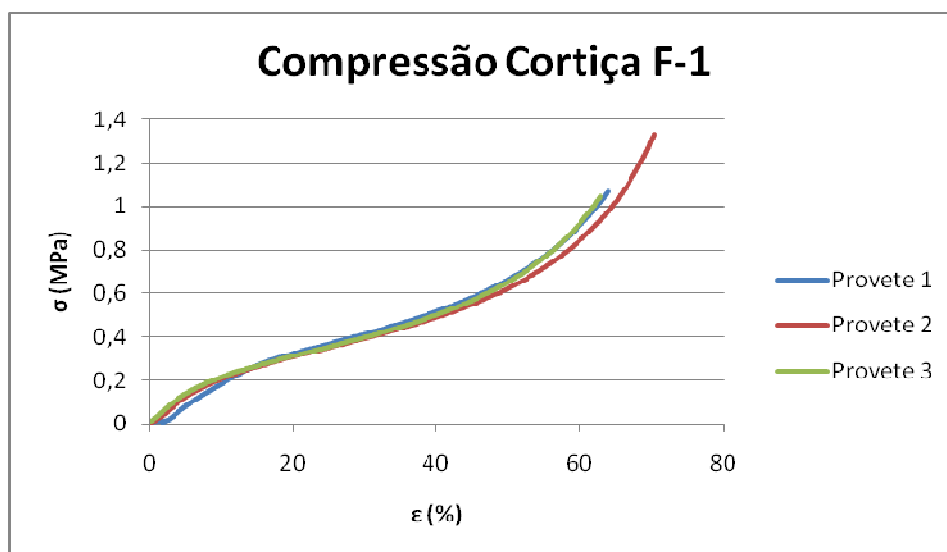


Figura 249- Compressão aglomerado de cortiça com furação em linha até 10mm de deslocamento

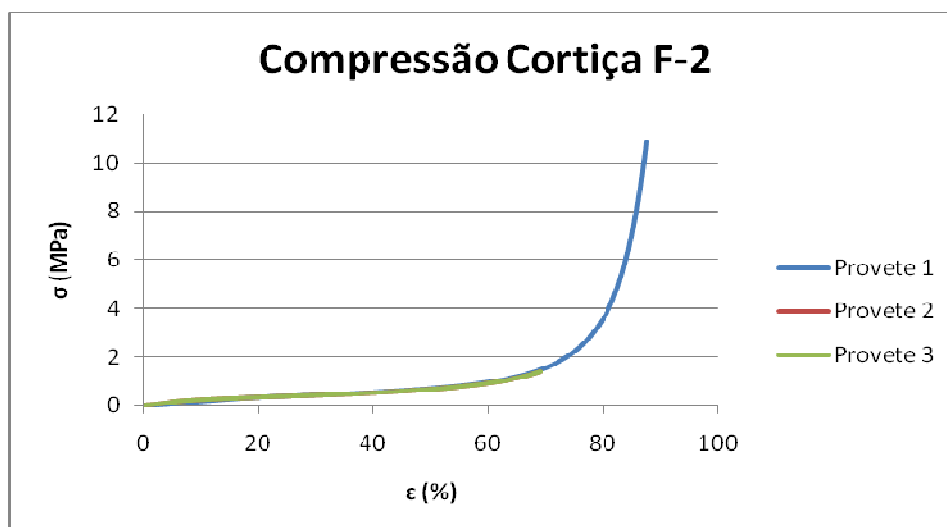


Figura 250- Compressão aglomerado de cortiça com furação em triângulo até 10mm de deslocamento

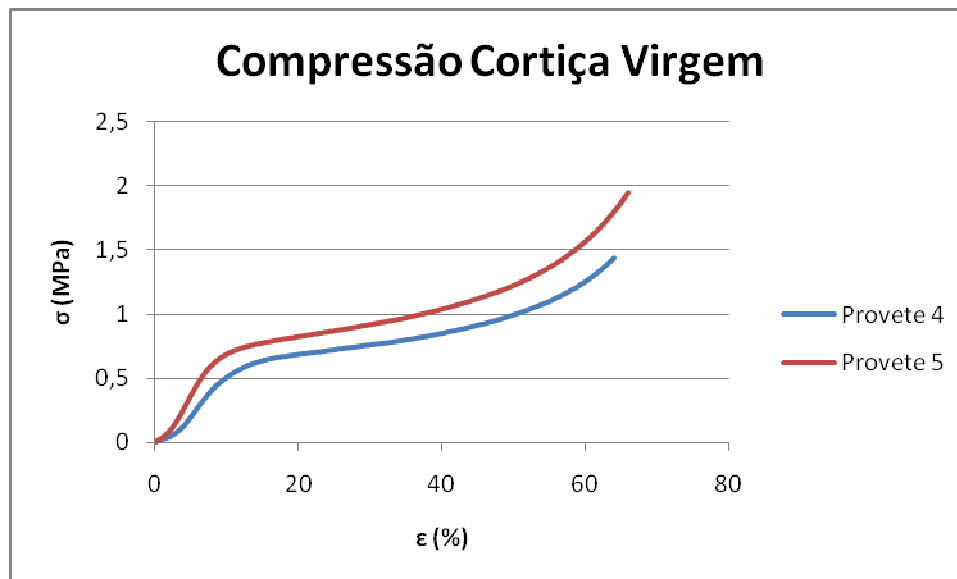


Figura 251- Compressão aglomerado de cortiça virgem até 10mm de deslocamento

ANEXO C- Gráficos Flexão

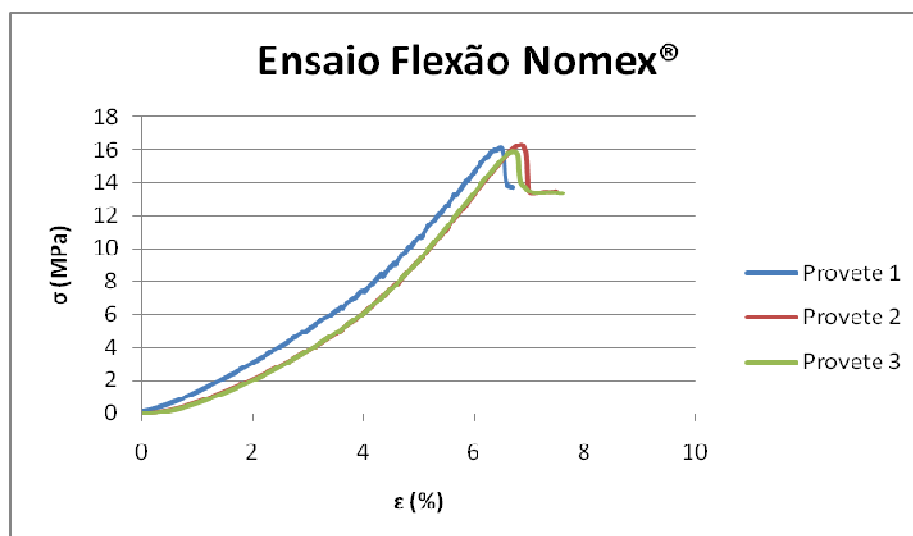


Figura 252- Ensaio de flexão das estruturas com Nomex®

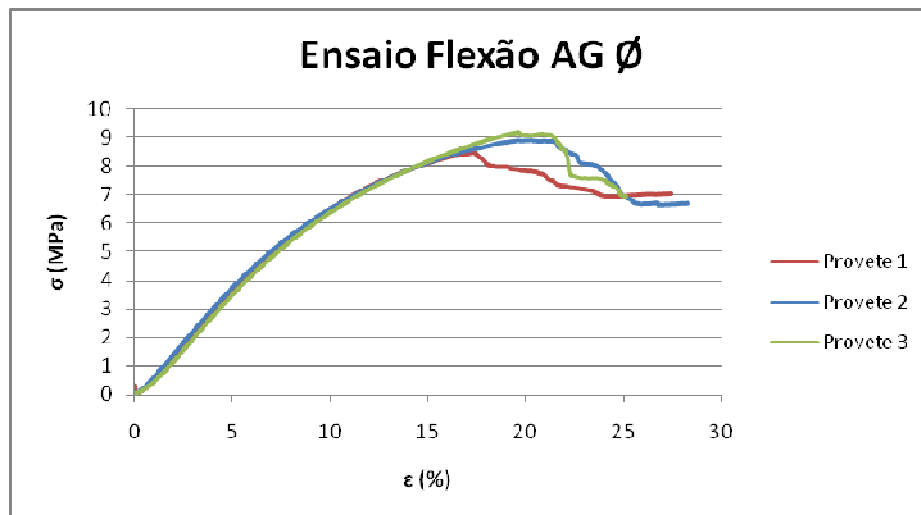


Figura 253- Ensaios de flexão das estruturas com aglomerado de cortiça

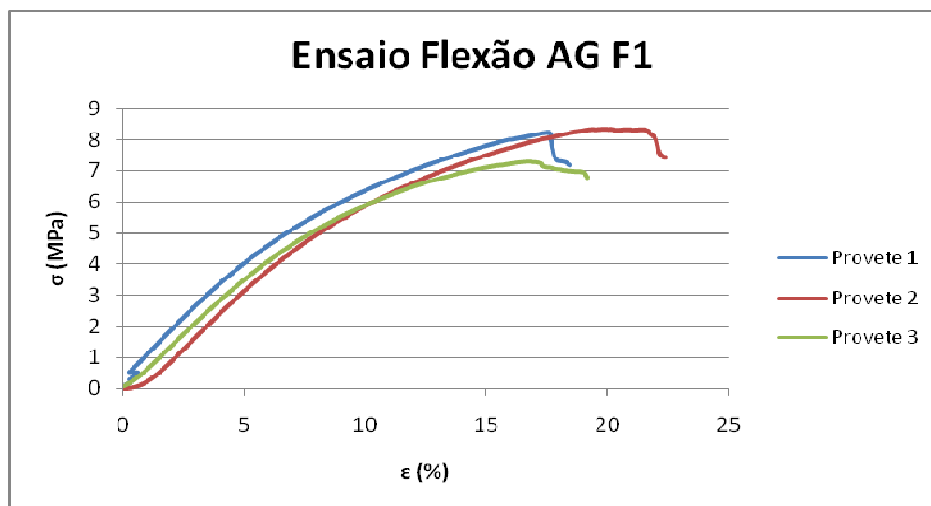


Figura 254- Ensaios de flexão das estruturas com aglomerado de cortiça e furação em linha

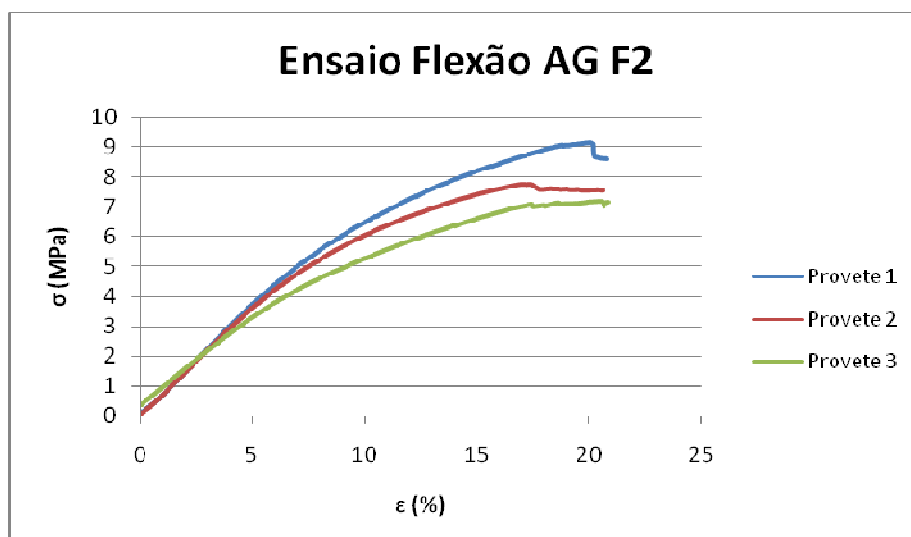


Figura 255- Ensaios de flexão das estruturas com aglomerado de cortiça e furação em triângulo

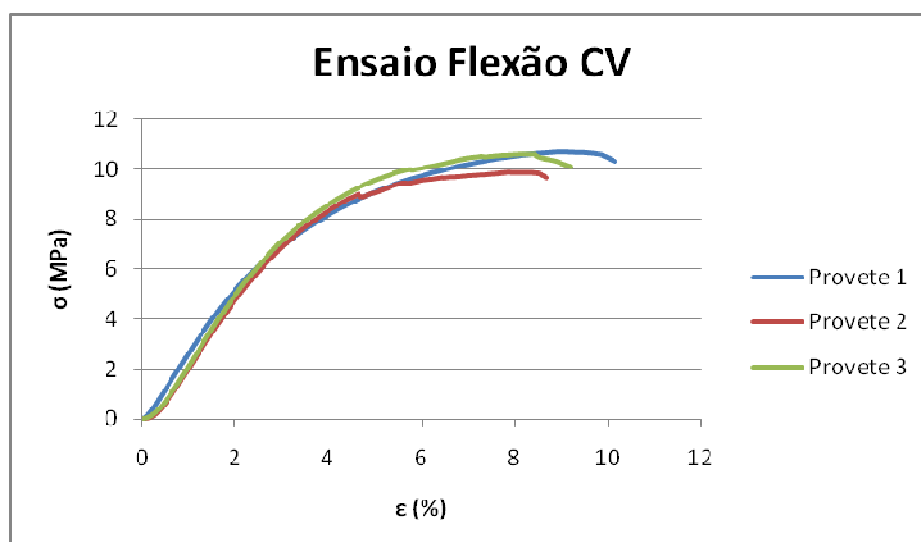


Figura 256- Ensaio de flexão das estruturas com cortiça virgem e furos das rolhas para garrafas