



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
2010

**Luís Filipe Ribeiro
Todo Bom**

**Comportamento à compressão e tracção da
cortiça: estudo numérico**



Universidade de Aveiro
2010

Departamento de Engenharia Mecânica

Luís Filipe Ribeiro
Todo Bom

**Comportamento à compressão e tracção da cortiça:
estudo numérico**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Rui António da Silva Moreira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, irmão e avós pelo incansável apoio prestado ao longo do meu percurso académico.

o júri

presidente

Prof. Doutor Robertt Angelo Fontes Valente
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José Fernando Dias Rodrigues
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Porto

Prof. Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira Dias
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

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

agradecimentos

Esta secção assume um carácter muito importante, já que é através dela que expressamos os nossos sinceros agradecimentos às pessoas que nos ajudaram durante um percurso, que nem sempre foi simples. Assim, e sabendo que as palavras enunciadas não conseguem expressar na totalidade a dimensão sentimental que se pretende, quero agradecer aos meus pais e irmão pelo incansável apoio e compreensão que me foi demonstrado em todas as alturas. Aos meus avós, uma palavra de apreço muito especial: Obrigado. E por fim, mas não por último, quero agradecer a alguns colegas de curso que foram importantes durante a minha caminhada académica: Hélder Laranjeira, João Estima, Francisco Silva, Diogo Soares, Nuno Inácio e João Caseiro.

palavras-chave

cortiça, simulação numérica, ensaios experimentais, módulo de Young, compressão, tracção.

resumo

A cortiça tem vindo a adquirir nos últimos anos uma grande importância e notoriedade ao nível industrial, já que ela exibe características que a tornam única, diferenciando-a dos restantes materiais celulares. Industrialmente, são fabricados variados produtos cujas aplicações se encontram associadas a alguns sectores conhecidos: vinícola, construção civil, automóvel, decoração, entre outros. Embora o produto com maior percentagem de produção corresponda às rolhas naturais, os aglomerados apresentam por sua vez valores bastante significativos no meio da indústria corticeira. No presente trabalho, o estudo incidirá apenas na caracterização mecânica de aglomerados de cortiça, submetendo-os à acção de dois esforços mecânicos principais: compressão e tracção. O principal objectivo deste trabalho está associado ao estudo do comportamento da estrutura, assim como da elaboração de modelos numéricos à escala microscópica, através dos quais seja permitido determinar o módulo de Young do material constituinte da parede celular que consiga representar o módulo de Young do aglomerado. Em paralelo, foram realizados ensaios experimentais, que serviram de base às simulações numéricas, já que através destas foi possível determinar o módulo de Young do aglomerado.

keywords

cork, numerical simulation, experimental procedures, Young module, compression, traction.

abstract

Cork has been acquiring a great importance and notoriety at the industrial level; it presents unique characteristics, differentiating it from all the rest of the molecular materials. Various products are industrially made for the winery production, civil construction, car industry, decoration and other products. Although the product is majorly used for corks, the agglomerates show very significant values in the cork industry. The present work will be mainly about the mechanical characterization of the agglomerates, submitting them to the action of two main mechanical processes: compression and traction. The main goal is associated with the study of the structure's behaviour, thus the elaboration of numerical models to a microscopically scale can determine the Young module of the constituent material of the cellular wall, that can represent the Young module of the agglomerate. In parallel, it was done some experimental procedures that were based on the numerical simulations, thus it was possible to determine the Young module of the agglomerate.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Estado da arte	1
1.3. Objectivos	4
1.4. Metodologia adoptada.....	4
2. A cortiça	7
2.1. Produção e transformação da cortiça	8
2.2. Aplicações da cortiça	11
2.3. Propriedades da cortiça	12
2.4. Propriedades mecânicas	15
2.4.1. Compressão	15
2.4.1.1. Efeito da velocidade de deformação na compressão	18
2.4.2. Tracção	19
2.4.2.1. Efeito da velocidade de deformação na tracção.....	21
2.4.3. Efeito do ar no interior das células.....	21
2.4.4. Viscoelasticidade.....	22
2.5. Aglomerados de cortiça e aplicações	23
3. Estudo experimental	27
3.1. Ensaios de compressão	27
3.2. Ensaios de tracção.....	29
3.3. Análise de resultados	30
4. Estudo numérico – Análise linear	35
4.1. Metodologia de estudo.....	35

4.2.	Método dos Elementos Finitos	36
4.3.	Modelos de paredes lineares.....	38
4.3.1.	Análise de convergência	38
4.3.2.	Modelos estudados.....	42
4.3.3.	Condições de fronteira e carregamento.....	43
4.3.4.	Etapa de simulação	44
4.3.5.	Resultados e análise	46
4.4.	Modelos de paredes onduladas	59
4.4.1.	Análise de convergência	60
4.4.2.	Modelos estudados.....	62
4.4.3.	Condições de fronteira e carregamento.....	64
4.4.4.	Resultados e análise	64
4.5.	Análise global dos resultados e discussão	74
5.	Estudo numérico – Análise não-linear.....	75
5.1.	Metodologia de estudo.....	75
5.2.	Resultados e análise.....	76
5.2.1.	Análise global dos resultados e discussão	84
6.	Conclusões gerais.....	87
7.	Trabalhos futuros	91
	Referências	93

Lista de Figuras

Figura 1: Localização do Montado de sobreiro no mundo (à esquerda) e ilustração do montado português (à direita).....	7
Figura 2: Ilustração do sobreiro (<i>Quercus Suber L.</i>).....	8
Figura 3: Ilustração de um sobreiro durante o processo de descortiçamento.....	10
Figura 4: Rolhas Naturais, junta de motores, painéis decorativos e discos.....	12
Figura 5: Partes constituintes do tronco do sobreiro e definição das direcções e secções planas da cortiça.	12
Figura 6: Estrutura macroscópica da cortiça.	13
Figura 7: Estrutura microscópica da cortiça.	14
Figura 8: Compressão uniaxial da cortiça.	15
Figura 9: Curvas de tensão-deformação durante o fenómeno de compressão nas direcções radial (R) e não-radial (NR).....	17
Figura 10: Encurvadura e Esmagamento das paredes das células de cortiça na direcção radial.	18
Figura 11: Efeito da velocidade de deformação de compressão nas curvas de compressão da cortiça: (a) compressão radial; (b) compressão não-radial (direcção axial); (c) curva obtida com variações súbitas da velocidade de deformação (compressão radial)	18
Figura 12: Tracção uniaxial da cortiça	19
Figura 13: Curvas de tensão-deformação durante o fenómeno de tracção na direcção radial (R) e não-radial (NR).....	20
Figura 14: Efeito da velocidade de deformação em tracção tangencial numa cortiça de 1ª qualidade.....	21
Figura 15: Efeito do ar no interior das células na resistência da cortiça. Comparação entre as hipóteses de existência e ausência de ar.....	22
Figura 16: Rolhas aglomeradas, painel de afixação, solas de sapato e revestimento de soalhos	24
Figura 17: Isolamento de telhados, isolamento em paredes duplas e isolamento acústico de telhados e sótãos	25
Figura 18: Estágios de compressão do provete cúbico de aglomerado de cortiça.	28

Figura 19: Aglomerado de cortiça sujeito ao esforço de tracção.	29
Figura 20: Configuração do ensaio de tracção.	29
Figura 21: Ensaio de compressão do aglomerado de cortiça: gráfico força-deslocamento.	31
Figura 22: Ensaio de compressão do aglomerado de cortiça: gráfico tensão-deformação.	31
Figura 23: Curva força-deslocamento associado ao esforço de tracção.	32
Figura 24: Curva tensão-deformação associado ao esforço de tracção.	32
Figura 25: Ilustração do 1º modelo de estudo (Prisma Hexagonal).	38
Figura 26: Condições de fronteira aplicadas ao modelo em estudo.	39
Figura 27: Curva de convergência baseada nos valores tabelados.	41
Figura 28: Ilustração da malha óptima encontrada.	41
Figura 29: Representação esquemática da disposição de células do 2º modelo.	42
Figura 30: Representação esquemática da pressão aplicada e condições de fronteira associadas à direcção axial.	43
Figura 31: Representação esquemática da pressão aplicada e condições de fronteira associadas à direcção tangencial.	44
Figura 32: Representação esquemática da pressão aplicada e condições de fronteira associadas à direcção radial.	44
Figura 33: Comparação entre as curvas tensão-deformação experimental e numéricas, associadas ao esforço de compressão, na direcção axial.	47
Figura 34: Comparação entre as curvas tensão-deformação experimental e numéricas, associadas ao esforço de tracção, na direcção axial.	48
Figura 35: Modelo 3x3 – campo de deslocamentos associados à compressão axial para um coeficiente de Poisson de 0.	48
Figura 36: Modelo 5x5 – campo de deslocamentos associados à compressão tangencial para um coeficiente de Poisson de 0.3.	49
Figura 37: Modelo 9x9 - campo de deslocamentos associados à tracção radial para um coeficiente de Poisson de 0.45.	49
Figura 38: Modelo 11x11 - campo de deslocamentos associados à tracção axial para um coeficiente de Poisson de 0.	50
Figura 39: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção axial para o esforço de compressão.	51

Figura 40: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção tangencial para o esforço de compressão.	52
Figura 41: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção radial para o esforço de compressão.	52
Figura 42: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção axial para o esforço de tracção.	53
Figura 43: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção tangencial para o esforço de tracção.	54
Figura 44: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção radial para o esforço de tracção.	54
Figura 45: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das três direcções definidas, tendo por base o modelo 3x3.	55
Figura 46: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das três direcções definidas, tendo por base o modelo 5x5.	56
Figura 47: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das três direcções definidas, tendo por base o modelo 9x9.	56
Figura 48: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das três direcções definidas, tendo por base o modelo 11x11.	57
Figura 49: Evolução do parâmetro módulo de Young em função do número de células, considerando a direcção axial e um coeficiente de Poisson 0.45.	58
Figura 50: Evolução do parâmetro módulo de Young em função do número de células, considerando a direcção tangencial e um coeficiente de Poisson 0.45.	58
Figura 51: Evolução do parâmetro módulo de Young em função do número de células, considerando a direcção radial e um coeficiente de Poisson 0.45.	59
Figura 52: Cotagem da célula padrão dos modelos de células de paredes onduladas.	60
Figura 53: Curva de convergência associada aos modelos de paredes onduladas.	61
Figura 54: Malha óptima determinada – dimensão 4.5 μm	62
Figura 55: Configuração do modelo 3x3 na direcção axial.	62
Figura 56: Configuração do modelo 5x5 na direcção tangencial.	63
Figura 57: Configuração do modelo 9x9 na direcção axial.	63
Figura 58: Configuração do modelo 11x11 na direcção tangencial.	64

Figura 59: Campo de deslocamentos associado ao modelo 3x3 na direcção axial, para o esforço de compressão, tendo por base um coeficiente de Poisson 0.	65
Figura 60: Campo de deslocamentos associado ao modelo 5x5 na direcção tangencial, para o esforço de compressão, tendo por base um coeficiente de Poisson 0.3.	65
Figura 61: Campo de deslocamentos associado ao modelo 9x9 na direcção axial, para o esforço de tracção, tendo por base um coeficiente de Poisson 0.45.....	66
Figura 62: Campo de deslocamentos associado ao modelo 11x11 na direcção tangencial, para o esforço de tracção, tendo por base um coeficiente de Poisson 0.....	66
Figura 63: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção axial, para o esforço de compressão.....	68
Figura 64: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção tangencial, para o esforço de compressão.	68
Figura 65: Evolução do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção axial, para o esforço de tracção.	69
Figura 66: Evolução do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção tangencial, para o esforço de tracção.	70
Figura 67: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das direcções existentes, considerando o modelo 3x3.....	70
Figura 68: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das direcções existentes, considerando o modelo 5x5.....	71
Figura 69: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das direcções existentes, considerando o modelo 9x9.....	71
Figura 70: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das direcções existentes, considerando o modelo 11x11.....	72
Figura 71: Evolução do parâmetro módulo de Young em função do número de células, considerando a direcção axial e um coeficiente de Poisson 0.45.....	73
Figura 72: Evolução do parâmetro módulo de Young em função do número de células, considerando a direcção tangencial e um coeficiente de Poisson 0.45.	73
Figura 73: Curvas associadas aos módulos de Young, obtidos durante o esforço de compressão na direcção axial.....	77
Figura 74: Curvas associadas aos módulos de Young, obtidos durante o esforço de compressão na direcção tangencial.	77

Figura 75: Curvas associadas aos módulos de Young, obtidos durante o esforço de tracção na direcção axial.	78
Figura 76: Curvas associadas aos módulos de Young, obtidos durante o esforço de tracção na direcção tangencial.	78
Figura 77: Deformada associada ao modelo 5x5, para o esforço de compressão, considerando a direcção axial e um coeficiente de Poisson 0.	80
Figura 78: Deformação associada ao modelo 5x5, para o esforço de compressão, considerando a direcção tangencial e coeficiente de Poisson 0.3.....	80
Figura 79: Deformada associada ao modelo 5x5, para o esforço de tracção, considerando a direcção axial e coeficiente de Poisson 0.	81
Figura 80: Deformada associada ao modelo 5x5, para o esforço de tracção, considerando a direcção tangencial e um coeficiente de Poisson 0.45.....	81
Figura 81: Ilustração de uma célula da estrutura nas suas formas inicial, comprimida e traccionada.....	82
Figura 82: Comparação entre as razões obtidas, numericamente e idealmente, considerando as direcções axial e tangencial.....	84

Lista de Tabelas

Tabela 1: Produção média anual de cortiça por país.....	9
Tabela 2: Deslocamento do nó central da placa e respectiva razão ao valor de referência (calculado para a malha com dimensão de elemento finito de $4.5\mu\text{m}$).....	40
Tabela 3: Caracterização dos modelos tendo por base o número de células.....	43
Tabela 4: Valores de deslocamento obtidos para os modelos 3x3 e 5x5.	46
Tabela 5: Valores de deslocamento obtidos para os modelos 9x9 e 11x11.	47
Tabela 6: Valores dos módulos de Young obtidos para os modelos 3x3 e 5x5.....	50
Tabela 7: Valores dos módulos de Young obtidos para os modelos 9x9 e 11x11.....	51
Tabela 8: Deslocamento do nó central da placa e a respectiva razão ao valor de referência (dimensão do elemento finito $4.5\mu\text{m}$).	61
Tabela 9: Módulos de Young associados aos modelos de paredes onduladas 3x3 e 5x5, considerando regime não-linear.	67
Tabela 10: Módulos de Young associados aos modelos de paredes onduladas 9x9 e 11x11, considerando regime não-linear.	67
Tabela 11: Módulos de Young obtidos para o modelo 5x5, numa análise não-linear.	76
Tabela 12: Razões entre os módulos de Young de tracção e compressão, associados à análise não-linear.....	83
Tabela 13: Razões entre os módulos de Young de tracção e compressão, associados à análise linear.....	83

1. Introdução

Neste capítulo vai-se proceder a uma pequena contextualização da cortiça enquanto material celular e aglomerado, de modo a permitir uma melhor compreensão por parte do leitor acerca das motivações que levaram à realização deste trabalho. Os objectivos, bem como as metodologias de estudo associadas são parte importante do trabalho, assumindo um papel preponderante na sua realização.

1.1. Enquadramento

A realização deste trabalho prende-se com a importância que a cortiça assume, enquanto material, ao nível dos panoramas nacional e internacional, nas suas mais variadas aplicações. Assim, tendo a percepção da notoriedade que este material tem vindo a adquirir nos últimos anos, existem algumas razões que tornam a cortiça, um material tão peculiar, as quais vão ser descritas ao longo do presente trabalho. O objectivo principal deste trabalho visa a elaboração de modelos microscópicos de células de cortiça, com paredes lineares e onduladas, sujeitos aos principais esforços mecânicos, compressão e tracção, com o intuito de explicar o comportamento adoptado pelas células, bem como das curvas tensão-deformação associados a cada esforço descrito.

1.2. Estado da arte

A modelação de materiais celulares é um tema que tem vindo a suscitar interesse por parte dos investigadores, já que existe uma grande variedade de campos onde os referidos

materiais se encontram inseridos. Assim, é possível encontrar, através de pesquisas, trabalhos realizados nesse âmbito, ainda que de uma forma limitada. Em 2001, Andrews e Gibson [Andrews, 2001] realizaram um estudo relacionado com a estrutura bidimensional de uma estrutura em ninho de abelha que se forma numa espuma de alumínio. Neste estudo, foram gerados pontos capazes de simular as células nucleares, que por sua vez dão origem a outras células. Através de uma rotina realizada neste programa, foi possível simular o processo de formação das células, o qual se realizava à mesma taxa, dando assim origem a uma estrutura celular mais complexa. As simulações realizadas tiveram em consideração a aplicação de duas forças, cujas direcções eram perpendiculares entre si, e que correspondiam aos eixos principais. Em 1999, Guo e Gibson [Guo, 1999] debruçaram-se sobre o efeito da presença de defeitos estruturais nas propriedades mecânicas dos materiais.

Especificamente sobre a cortiça, como material natural, a sua estrutura celular é um dos campos referidos por Pereira [Pereira, 2007b]. Além da estrutura da cortiça, a deformação das suas paredes celulares em ensaios de tracção e compressão foram estudados por Gibson *et al.* [Gibson, 1981]. Em 1988, Rosa e Fortes [Rosa, 1988a] estudaram o efeito de deformação sobre o comportamento da cortiça à compressão, avaliando adicionalmente o efeito de relaxação. Dando continuidade a este trabalho, Mano [Mano, 2007] estudou a deformação de algumas amostras de cortiça submetidas à compressão para diferentes valores de temperatura entre 0 e 50°C, aferindo a relaxação a que a cortiça se encontra sujeita. Um estudo detalhado das tensões de crescimento geradas na cortiça, baseado em relações experimentais de tensão e compressão foi feito por parte de Fortes e Rosa [Fortes, 1992]. Rosa e Fortes [Rosa, 1991] observaram o parâmetro de deformação e fractura da cortiça quando submetidas ao esforço de tracção. No seguimento deste estudo, Anjos *et al.* [Anjos, 2008] avaliaram o efeito da qualidade, porosidade e densidade nas propriedades mecânicas à compressão. No presente ano, Anjos *et al.* [Anjos, 2010] publicaram um artigo relacionado com a determinação das propriedades da cortiça quando submetida à tracção na direcção tangencial, em função da variação de alguns parâmetros como: qualidade, porosidade, densidade e posição radial na árvore.

Em 2005, Silva *et al.* [Silva, 2005] abordaram as propriedades, capacidades e aplicações da cortiça. As propriedades viscoelásticas da cortiça foram evidenciadas por Mano [Mano, 2002] para uma variação de temperatura entre -40 e 120°C, utilizando a

técnica de análise DMTA. Os resultados foram comparados com dados dielétricos obtidos em estudos anteriores. Veiga *et al.* [Veiga, 1993] caracterizaram a superfície da cortiça através de estudos calorimétricos, os quais evidenciaram que a cortiça apresenta um baixo valor de tensão superficial, assim como uma elevada capacidade de absorção por líquidos não-polares. Neste estudo, ainda foi abordada a composição química da cortiça. No entanto, este assunto foi analisado com mais pormenor por Pereira [Pereira, 1988], revelando que o principal componente químico da cortiça era a suberina, onde representa cerca de 40% do material. Outra característica encontrada está relacionada com a presença elevada de extractivos (50%) correspondentes a ceras e outros compostos não-polares que são extraíveis com diclorometano. Rosa e Fortes [Rosa, 1988b] efectuaram uma análise termogravimétrica da cortiça, cuja ciência está relacionada com a cinética de remoção da água e com a termodegradação das paredes das células, permitindo a identificação das temperaturas associadas aos principais processos químicos ocorrentes. Em 1989, Rosa e Fortes [Rosa, 1989] estudaram os efeitos do aquecimento do vapor de água na estrutura e propriedades da cortiça, para temperaturas entre 100° e 300°C, efectuando uma comparação com o aquecimento de ar, para o mesmo intervalo de temperaturas. No geral, os autores observaram, para uma temperatura de 300°C, um efeito parcial de redução do enrugamento das paredes celulares, assim como uma degradação térmica do material constituinte. Quando comparadas as duas substâncias gasosas, verificaram que a cortiça sofria maiores expansões volumétricas bem como mudanças de massa, quando na presença de vapor de água. Já em 2009, Rosa e Pereira [Rosa, 2009] estudaram o efeito do tratamento a longo prazo da cortiça a temperaturas entre os 100°C e os 150°C na estrutura, composição química e comportamento da cortiça à compressão. Silva Pereira *et al.* [Silva Pereira, 2006] realizaram um estudo relacionado com as colonizações fúngicas, observando o efeito que estas originavam no desempenho mecânico da cortiça.

Relativamente aos aglomerados de cortiça, é de salientar os estudos realizados por Díaz-Parralejo *et al.* [Díaz-Parralejo, 2003] que se dedicaram ao estudo sobre a resistência à flexão de aglomerados negros e compósitos de cortiça. Por sua vez, Gil [Gil, 1994] concentrou o seu estudo nos aglomerados puros de cortiça, utilizando o processo de densificação a quente, onde observou através da microscopia electrónica e extracção química, as mudanças registadas na estrutura e composição química, respectivamente, antes e após a aplicação do referido processo. Dando continuidade a este estudo, o mesmo

autor desenvolveu a técnica anteriormente descrita, utilizando várias amostras de densidades diferentes [Gil, 1996]. Por fim, Castro *et al.* [Castro, 2010] centraram-se na utilização da cortiça como material base na constituição de estruturas leves.

1.3. Objectivos

Este trabalho tem por objectivo principal a criação de um modelo numérico simplificado da estrutura celular da cortiça que permita:

- estudar o comportamento da estrutura quando sujeita a esforços de tracção e compressão;
- determinar o módulo de Young do material constituinte da parede celular que represente o módulo de Young do aglomerado, o qual é determinado através dos ensaios experimentais.

1.4. Metodologia adoptada

A metodologia adoptada para o cumprimento dos objectivos acima descritos é dividida em duas vertentes: experimental e numérica. Na primeira vertente, são realizados ensaios experimentais onde são usados provetes de cortiça submetidos a ensaios de compressão e tracção. Com base nos resultados obtidos, são extraídos os valores dos parâmetros tensão e deformação, os quais são representados em forma de gráfico a que vulgarmente se designa por curva tensão-deformação. A razão pela qual a vertente experimental é importante no presente trabalho, prende-se com o facto de estes valores servirem de base para as simulações numéricas realizadas, englobadas na vertente numérica. Esta, por sua vez, assume um papel primordial no cumprimento dos objectivos referidos na secção anterior. Nesta vertente são gerados modelos simplificados, os quais se encontram divididos em

dois grupos: modelos de paredes lineares e modelos de paredes onduladas. Os modelos adotados apresentam uma geometria simples e regular, utilizando células de formato hexagonal e de igual dimensão. São utilizados modelos com diferente número de células no sentido de analisar e verificar a possível convergência associado ao nível de detalhe de representação espacial do modelo.

2. A cortiça

A cortiça é um material natural que se extrai do sobreiro (*Quercus Suber L.*), uma árvore nobre com características muito especiais e que cresce sobretudo nas regiões mediterrânicas como Espanha, Itália, França, Marrocos, Argélia e, em especial, Portugal, ontem existem mais de 720 mil hectares de montado de sobreiro, bem como uma indústria corticeira de grande importância económica [Associação Portuguesa Da Cortiça, 2009a]. O montado de sobreiro é uma designação atribuída às florestas de certas árvores protegidas, e que se estende a nível mundial.

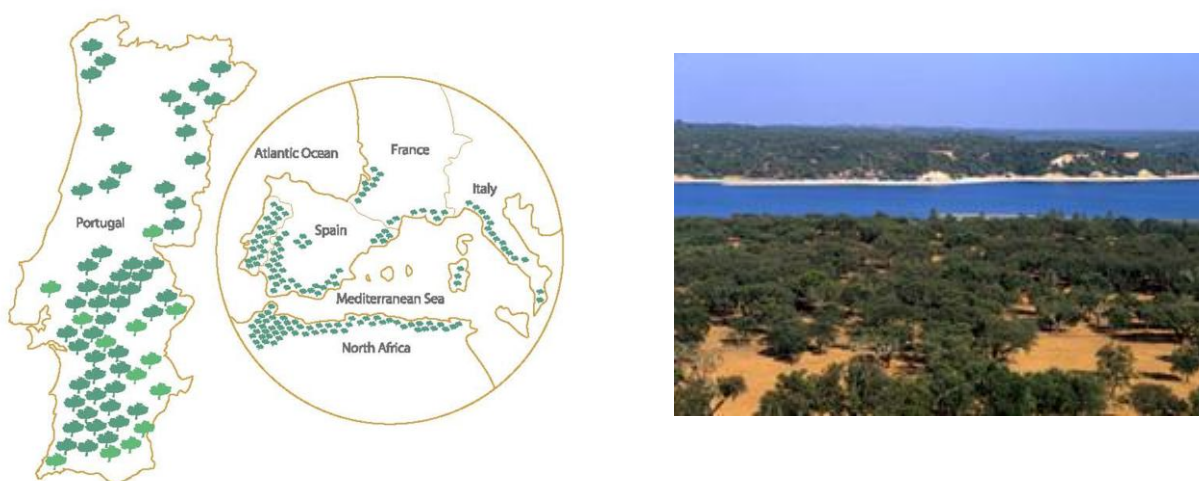


Figura 1: Localização do Montado de sobreiro no mundo (à esquerda) e ilustração do montado português (à direita) [Associação Portuguesa Da Cortiça, 2009b].

Predominantemente arborizado pela espécie *Quercus*, o montado apresenta grandes extensões de azinheiras (*Quercus Retundifolia*), pequenas áreas de carvalho negral (*Quercus Pyrenaica*) e, sobretudo, de sobreiros (*Quercus Suber L.*) [Associação Portuguesa Da Cortiça, 2009b].



Figura 2: Ilustração do sobreiro (*Quercus Suber L.*) [Pereira, 2008]

2.1. Produção e transformação da cortiça

A produção mundial da cortiça ascende anualmente a valores próximos das 300 mil toneladas. Neste sector, Portugal mantém a liderança, apresentando uma produção média anual de cerca de 157 mil toneladas, correspondente a 52.5% do total mundial, seguido da Espanha com 88.4 mil toneladas (29.5%) e da Itália com 17 mil (5.5%), segundo as estatísticas da APCOR, para o ano 2007. Portugal detém ainda a maior capacidade industrial e empresarial do mundo para a transformação da cortiça e exportação dos produtos derivados já transformados, contrariando a tendência de exportação da cortiça em prancha, que caracterizou o início da actividade corticeira em Portugal. Assim, este país transforma cerca de 70% da produção mundial, incluindo uma percentagem substancial de cortiça originária de Espanha [Associação Portuguesa Da Cortiça, 2009c].

Tabela 1: Produção média anual de cortiça por país. Adaptado de [Associação Portuguesa Da Cortiça, 2009c].

País	Produção média anual (toneladas)	Percentagem
Portugal	157.000	52.5
Espanha	88.400	29.5
Itália	17.000	5.5
Argélia	15.000	5.2
Marrocos	11.000	3.7
Tunísia	7.500	2.5
França	3.400	1.1
Total	299.300	100

A cortiça é considerada um material de origem vegetal proveniente da parte exterior da casca dos sobreiros, a qual é originada através de um tecido meristemático, felogénio. Este tecido, além das células de cortiça, também é responsável pela produção de células de feloderme para o interior. Outro tecido meristemático presente nos sobreiros é o câmbio, o qual é capaz de gerar células de madeira para o interior, bem como floema para o exterior. A zona intermédia entre o câmbio e o felogénio é denominada por entrecasco.

Tendo em conta o processo de descortiçamento, Figura 3, a cortiça pode ser classificada de acordo com a periodicidade com que ela é extraída do sobreiro. Assim, a primeira cortiça a ser gerada, cortiça virgem, extraída normalmente aos 20-30 anos de vida da árvore e quando o diâmetro desta varia sensivelmente entre os 20 e 25 cm, é geralmente usada em artigos decorativos ou aglomerados, já que a sua estrutura evidencia pequenas irregularidades causadas pelas fortes tensões de crescimento a que se encontra submetida. A segunda geração de cortiça, a secundeira, apresenta um grau de qualidade superior à verificada aquando da primeira extracção. No entanto, o grau de qualidade desejado só é atingido na terceira geração, aquando da extracção da cortiça amadia, a qual se processa ao fim de 40-50 anos de idade do sobreiro. Ela é principalmente destinada à preparação de pranchas para o fabrico de rolhas, dadas as excelentes características que apresenta, as quais vão ser descritas na secção 2.3.

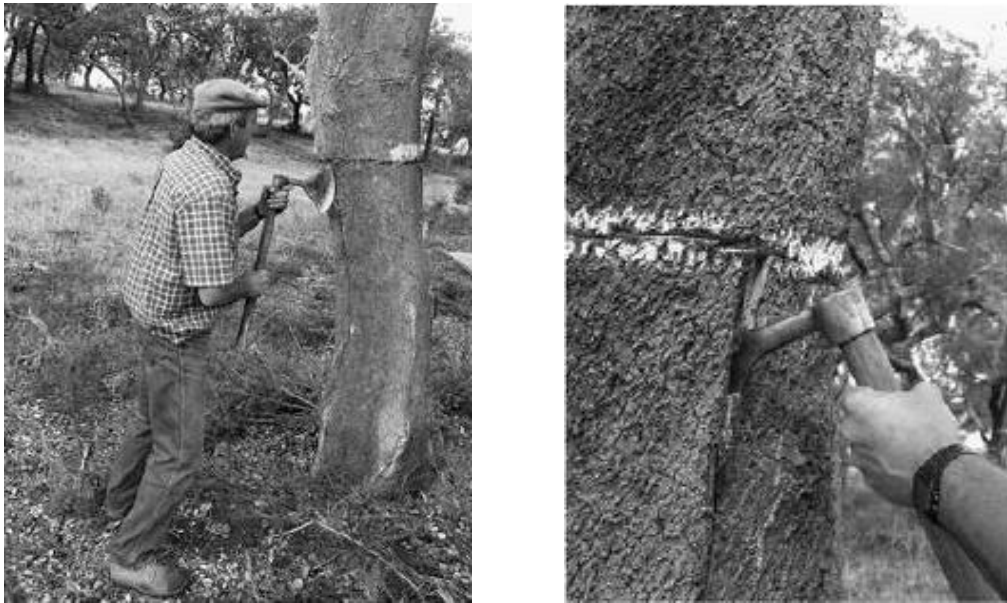


Figura 3: Ilustração de um sobreiro durante o processo de descortiçamento [Pereira, 2007a].

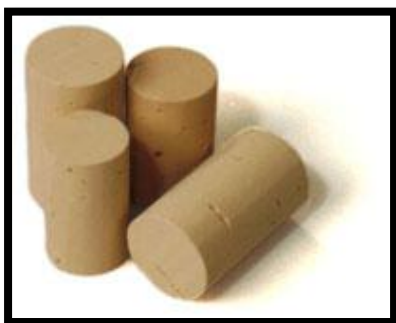
Conhecidos os vários tipos de cortiça existentes, irá ser descrito de seguida o modo como eles são utilizados ao nível industrial para a obtenção de certos produtos. Assim, num primeiro instante, vão ser dados a conhecer os quatro tipos de indústria existentes, englobados na indústria corticeira. Assim, a primeira a ser referida é a indústria preparadora que tem por objectivo preparar e seleccionar a prancha, tendo por base a cortiça amadia, seguindo por isso certos procedimentos tais como: escolha, raspagem, cozedura, repouso, disponsa e recorte, selecção, prensagem e enfardamento. A indústria transformadora ou rolheira tem por objectivo a produção de objectos de cortiça natural por simples corte de pranchas, dos quais as rolhas se destacam. Na indústria granuladora, é possível verificar a existência de quatro processos: trituração, moagem, classificação e embalagem. Numa primeira fase, assiste-se à trituração de refugos, cortiça amadia, de baixa qualidade, não susceptível de ser transformada em rolhas, e bocados de cortiça, peças de cortiça virgem ou amadia cuja superfície é inferior a 400 cm², sendo que a camada exterior da cortiça, raspa, e o pó formado durante a operação são devidamente separados. Durante a fase de moagem, os pedaços anteriormente referidos são moídos de acordo com as várias espessuras desejadas que posteriormente serão classificadas segundo a referida propriedade, através do auxílio de peneiras, bem como o peso específico, através de mesas

densimétricas. Por fim, os produtos obtidos são recolhidos e devidamente embalados. Finalmente, surge a indústria de aglomerados compostos ou aglomeradora, que se encontra associada à produção de granulados, a qual tem por base as cortiças virgem e secundária. Este tipo de indústria abrange algumas fases principais, bastante importantes na qualidade dos produtos obtidos. Assim, podem ser descritas as seguintes fases: secagem, mistura, prensagem, cozimento e laminagem. Na primeira fase, assiste-se à secagem do granulado obtido através da indústria granuladora, a fim de se obter o teor de humidade desejado. Posteriormente, o granulado é misturado com uma cola, sendo que a massa resultante é transferida para moldes onde serão efectuadas as etapas de prensagem e cozimento. Terminadas estas etapas, os blocos atingidos passarão pelo processo de laminagem, de modo a obterem-se as dimensões pretendidas [Schmidt, 1983].

2.2. Aplicações da cortiça

Sendo a cortiça um material celular com bastante representatividade no nosso país, e possuidor de características excepcionais, é natural que ela seja utilizada em diversas aplicações. Assim, a Figura 4 ilustra algumas das suas possíveis aplicações [Fortes, 1989]:

- Rolhas; Discos; Anilhas e juntas de vedação; Flutuadores e Painéis decorativos (folhas finas).



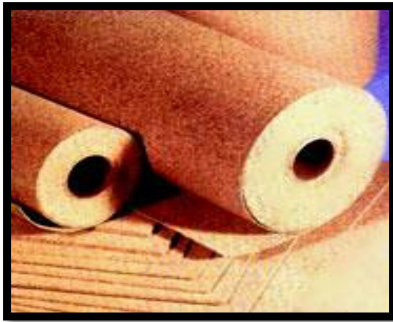


Figura 4: Rolhas Naturais, junta de motores, painéis decorativos e discos [Amorim, 2004].

2.3. Propriedades da cortiça

A cortiça, enquanto material celular, apresenta características peculiares que a distinguem dos restantes materiais da mesma classe. Essas características devem-se em grande parte à sua estrutura celular, a qual será inicialmente analisada nesta secção.

Antes de se proceder a uma descrição pormenorizada da estrutura da cortiça, é importante conhecer a nomenclatura utilizada para a designação das direcções e secções planas existentes em segmentos de cortiça. Assim, definem-se três direcções principais e três secções principais, ortogonais a cada uma das anteriores.

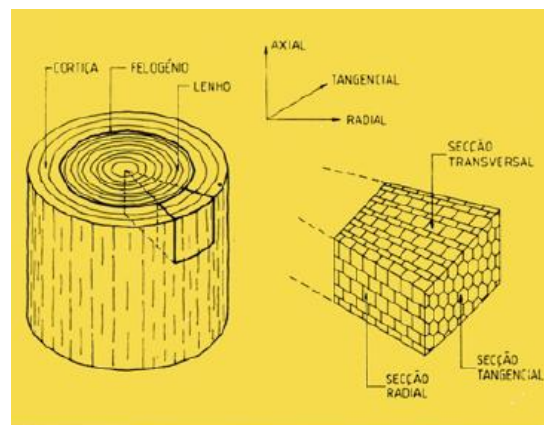


Figura 5: Partes constituintes do tronco do sobreiro e definição das direcções e secções planas da cortiça [Fortes, 1989].

As direcções principais são ortogonais entre si e assumem as seguintes designações: direcção radial, segundo o raio da árvore; direcção axial, segundo o eixo da árvore; direcção tangencial, tangente à circunferência da árvore. Relativamente às secções, a nomenclatura usada é: secção transversal, perpendicular à direcção axial; secção radial, perpendicular à direcção tangencial, sendo portanto paralela ao eixo da árvore e à direcção radial; secção tangencial, perpendicular à direcção radial. Convém ainda designar por direcções não-radiais todas as direcções perpendiculares à direcção radial, ou seja, as direcções no plano tangencial [Fortes, 1989].

Conhecidas as nomenclaturas usadas na caracterização de segmentos de cortiça, começa-se por descrever a sua estrutura macroscópica. Assim, quando a cortiça é extraída das árvores, fica exposta a parte exterior do entrecasco, uma vez que uma nova camada de felogénio começa a ser formada com a finalidade de substituir o felogénio destruído durante o processo de extracção, originando-se a raspa, que seca, contrai e endurece, originando fendas devido ao crescimento (Figura 6). Analogamente, a parte interna do tecido suberoso, correspondente à última camada de crescimento anual, é designada por barriga ou ventre. Esta apresenta menor elasticidade de que as outras camadas e apresenta orifícios dos canais lenticulares, designados por poros. A porosidade está estreitamente ligada à qualidade da cortiça. O tipo de poros, a sua dimensão, quantidade e distribuição, são um factor determinante na qualidade da cortiça.

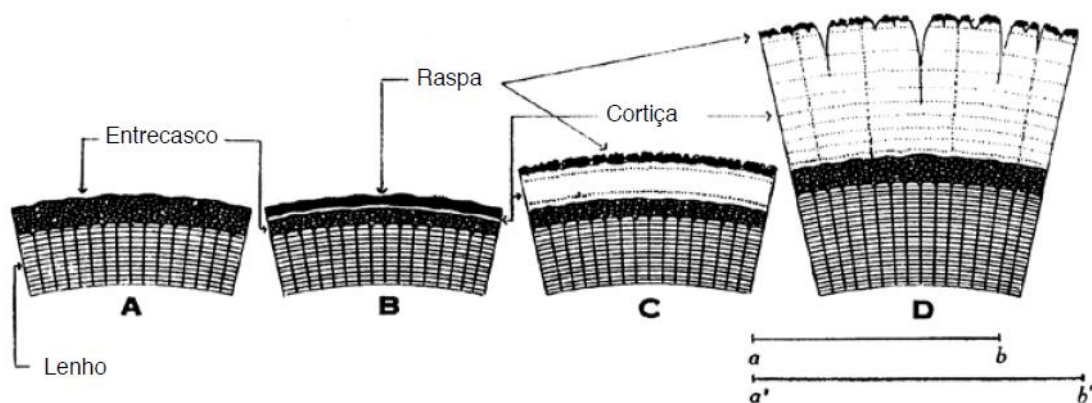


Figura 6: Estrutura macroscópica da cortiça [Gil, 2009].

A estrutura da cortiça é anisotrópica, no entanto, este efeito torna-se pouco evidente num aglomerado de cortiça, dada a orientação aleatória dos grânulos dentro do aglomerado [Gil, 2009].

Relativamente à estrutura microscópica, a cortiça é um tecido constituído por células, dispostas de um modo compacto, sem espaços livres, de uma forma regular, cujo conteúdo desapareceu durante o crescimento e sofreu um posterior processo de suberificação, impermeabilização, das membranas celulares (Figura 7). Não é apenas a estrutura do tecido que confere à cortiça as suas características, pois muitas das suas propriedades devem-se também à natureza das membranas celulares.

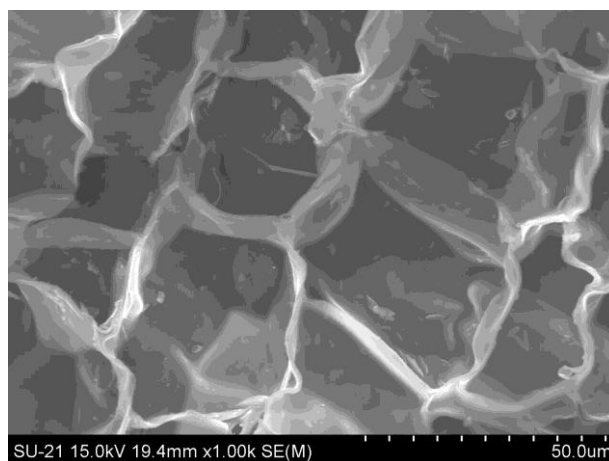


Figura 7: Estrutura microscópica da cortiça.

As células comunicam entre si por microcanais que atravessam a parede celular, designados por plasmodesmos. O volume das paredes das células é cerca de 10-15% do volume total, ou seja, o espaço vazio presente é cerca de 85-90%, o que confere a este material as suas propriedades de isolamento, resiliência e, sobretudo, baixa densidade.

Descrita a estrutura organizada que compõe a cortiça, são referidas de seguida as propriedades gerais da cortiça e só posteriormente se fará uma abordagem mais específica. Assim, entre muitas outras propriedades, podem ser referidas as seguintes:

- baixa densidade;
- elevada deformabilidade e baixa resistência à deformação;

- baixo coeficiente de Poisson;
- grande capacidade de absorção de energia (em impacto);
- grande capacidade de dissipação de energia (em vibrações);
- elevado coeficiente de atrito;
- baixa condutividade térmica;
- boa inércia química;
- baixa absorção de água e outros líquidos;
- boa resistência ao fogo;
- bom isolamento acústico.

2.4. Propriedades mecânicas

2.4.1. Compressão

Em muitas das aplicações da cortiça e dos seus aglomerados, é possível verificar a existência de esforços de compressão (Figura 8).

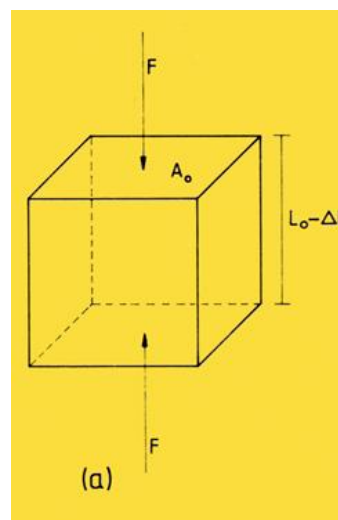


Figura 8: Compressão uniaxial da cortiça [Fortes, 1989].

De entre alguns exemplos onde este fenómeno ocorre, são citados os seguintes: a introdução de uma rolha num gargalo, o acto de pisar o chão, assim como a flexão de uma prancha. Este esforço mecânico pode ser simulado em laboratório através de ensaios a partir dos quais são extraídos parâmetros importantes na caracterização do material em questão. Assim, os ensaios referidos consistem na utilização de provetes que são devidamente amarrados aos travessões da máquina. A geometria adoptada para os provetes consiste normalmente em formas cúbicas ou paralelepípedicas. Durante o ensaio, a máquina vai efectuando a medição correspondente ao módulo da força exercida sobre o provete, bem como a alteração de comprimento a ele associado, sempre a uma velocidade constante. Tendo por base os dados obtidos, é possível determinar dois importantes parâmetros: tensão e deformação. A tensão, σ , é definida por:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

em que F é a força exercida e A_0 é a secção inicial do provete, perpendicular à direcção da força. Por sua vez, a deformação relaciona a variação do comprimento do provete medido, ΔL , com o comprimento inicial do mesmo, L_0 .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

Tendo em consideração estes dois parâmetros, é possível evidenciar a relação entre eles através de um gráfico tensão-deformação. Neste caso particular, a curva representada é denominada por curva de compressão, dado esta se encontrar associada ao esforço mecânico de compressão:

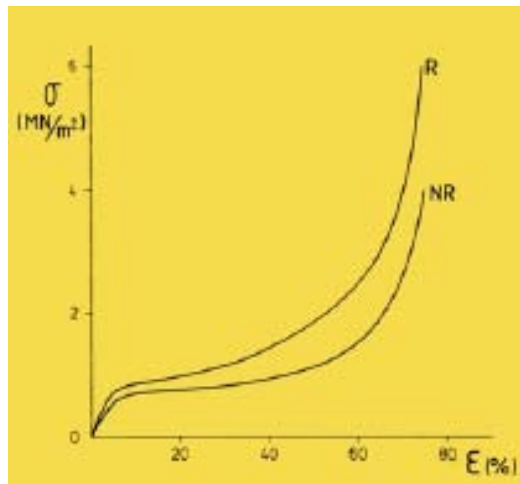


Figura 9: Curvas de tensão-deformação durante o fenómeno de compressão nas direcções radial (R) e não-radial (NR) [Fortes, 1989].

Através da visualização da Figura 9, é possível distinguir três regiões, duas das quais evidentes. Assim, a primeira região é correspondente à deformação viscoelástica da cortiça, propriedade que será referida posteriormente. Nesta região, observa-se a existência de um declive acentuado, associado ao parâmetro módulo de Young, cujo módulo pode ser determinado através da relação de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

A região intermédia compreende a fase de encurvadura, fenómeno que ocorre quando uma pequena perturbação, carga de Euler, origina grandes deformações, assim como o colapso das células. Nesta fase, verifica-se que o declive, módulo de Young, é bastante pequeno, aproximadamente 1 MPa.

A última região está associada ao esmagamento das paredes, originando o contacto entre elas, sem que no entanto, ocorra a fractura das mesmas. Na Figura 10, é apresentada uma imagem da estrutura das células, afectada pelos fenómenos de encurvadura e esmagamento:



Figura 10: Encurvadura e Esmagamento das paredes das células de cortiça na direcção radial [Fortes, 1989].

2.4.1.1. Efeito da velocidade de deformação na compressão

Devido às propriedades viscoelásticas inerentes à cortiça, um dos efeitos influentes no fenómeno de compressão é a velocidade de deformação. Conforme se pode verificar através da Figura 11, à medida que se vai incrementando o valor da velocidade, também os valores de deformação que o material atingirá serão necessariamente maiores.

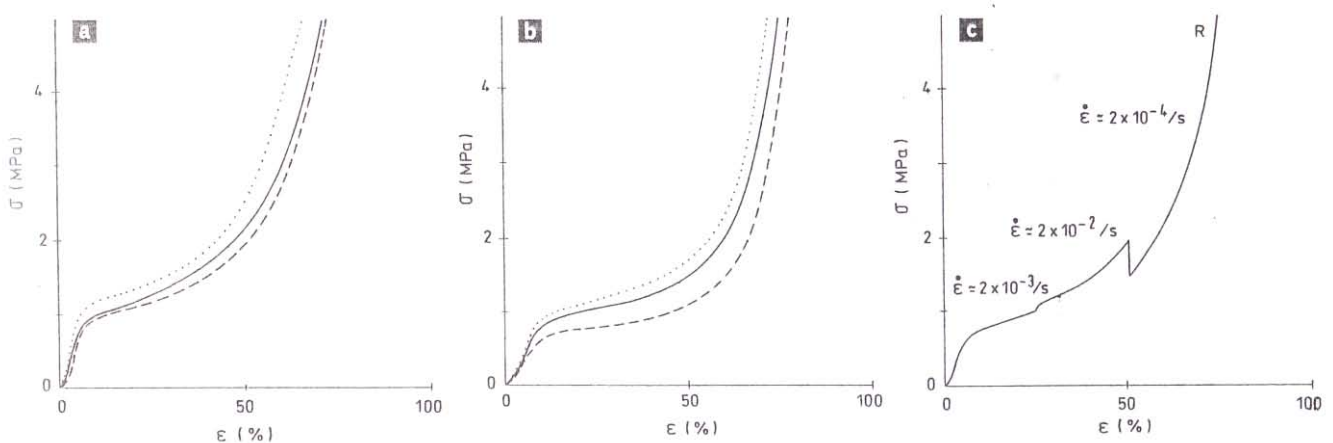


Figura 11: Efeito da velocidade de deformação de compressão nas curvas de compressão da cortiça: (a) compressão radial; (b) compressão não-radial (direcção axial); (c) curva obtida com variações súbitas da velocidade de deformação (compressão radial) [Fortes, 2004].

2.4.2. Tracção

Como foi referido na secção anterior, na maioria dos casos de aplicação de cortiça, ocorre o fenómeno de compressão. Contudo, em algumas situações, também se pode verificar o fenómeno de tracção (Figura 12). Como exemplos de ocorrência deste fenómeno podem ser referidas as pranchas de cortiça sujeitas a flexão, a extracção de uma rolha do gargalo por meio de um saca-rolhas não completamente introduzido na rolha, ou até mesmo durante o processo de crescimento do sobreiro, em que as tensões de tracção existentes são circunferenciais.

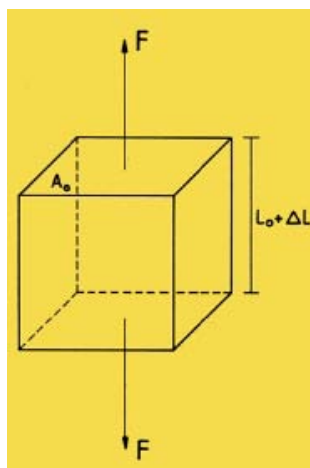


Figura 12: Tracção uniaxial da cortiça [Fortes, 1989].

Os procedimentos adoptados para os ensaios referentes ao esforço mecânico de tracção são análogos aos referidos para o esforço de compressão. Assim, através dos resultados obtidos, aumento de comprimento e força de tracção, é possível calcular a deformação, e a tensão de tracção exercida em cada ensaio, respectivamente, essenciais para a obtenção da curva tensão-deformação $\sigma(\epsilon)$. É de salientar no entanto que esta curva é dependente de alguns factores inerentes ao próprio material sujeito aos ensaios, tais como a temperatura e teor de humidade, assim como factores externos como é o caso da velocidade a que se realiza o ensaio. No mais caso geral, a curva tensão-deformação obtida apresenta o seguinte aspecto:

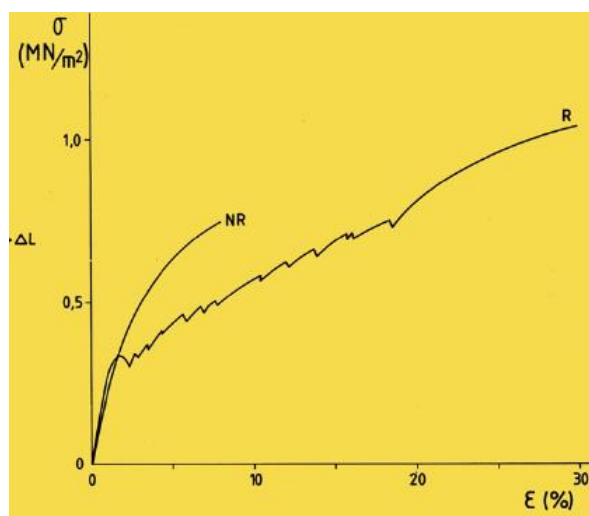


Figura 13: Curvas de tensão-deformação durante o fenómeno de tracção na direcção radial (R) e não-radial (NR) [Fortes, 1989].

Através da análise do gráfico da Figura 13, é possível concluir que para a direcção não-radial, a curva tensão-deformação apresenta uma curva, cuja representação não revela a existência de três zonas distintas, ao contrário do esforço de compressão. Neste esforço, assiste-se ao fenómeno de fractura, que se sucede apenas quando as tensões aplicadas superam as tensões limite do material em análise. Por norma, este fenómeno ocorrerá primeiramente nas zonas próximas aos canais lenticulares existentes numa prancha de cortiça, já que estes actuam como concentradores de tensão.

No caso em que a direcção é radial, a curva tensão-deformação apresenta um comportamento idêntico ao verificado na direcção não-radial até a uma deformação aproximada de 1%. Após este valor, verifica-se a existência de um serrilhado que poderá estar associado a uma instabilidade na deformação, relacionada com a fractura progressiva das paredes laterais.

2.4.2.1. Efeito da velocidade de deformação na tracção

O efeito da velocidade de deformação no esforço de tracção é sensivelmente idêntico ao descrito no caso da compressão, ou seja, a deformação e a velocidade variam no mesmo sentido, dado que quando uma delas aumenta a outra também aumenta.

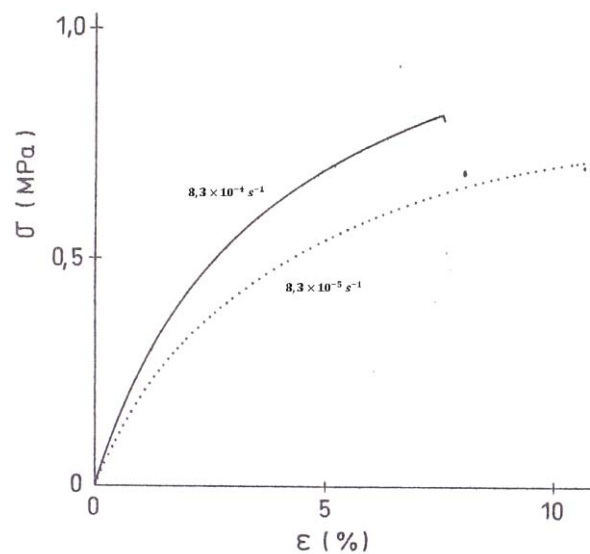


Figura 14: Efeito da velocidade de deformação em tracção tangencial numa cortiça de 1ª qualidade [Fortes, 2004].

2.4.3. Efeito do ar no interior das células

Na cortiça, à semelhança do que acontece com outros materiais celulares, as células são constituídas por ar no seu interior. No caso em que a cortiça é comprimida, além da estrutura celular, também o ar do interior das células é comprimido.

Durante o fenómeno de compressão, assiste-se a uma diminuição do volume de ar, presente no interior das células, enquanto a pressão por ela exercida vai aumentando progressivamente. A compressão é aproximadamente isotérmica, dada a reduzida massa de ar comparada com a massa das paredes, e só para velocidades de deformação muito

elevadas poderá haver aumento significativo de temperatura (compressão adiabática). Se se considerar o ar no interior das células como um gás perfeito, o produto pV , da pressão p pelo volume V , é constante, admitindo que a temperatura se mantém constante na compressão. Sendo o valor inicial da pressão aproximadamente 0.1MPa, pressão atmosférica normal, o volume se reduzir a metade ($\epsilon=50\%$), a pressão passa para o dobro, ou seja, 0.2MPa, valor muito pequeno quando comparado com a tensão necessária para deformar as paredes (cerca de 1.5MPa para $\epsilon=50\%$). Pela análise do gráfico da Figura 15, é possível observar que a influência do ar localizado no interior das células, só é reconhecida para valores de deformação elevados.

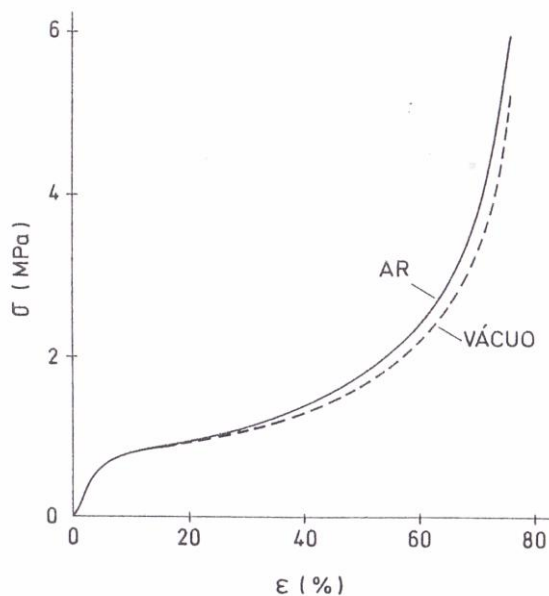


Figura 15: Efeito do ar no interior das células na resistência da cortiça. Comparação entre as hipóteses de existência e ausência de ar [Fortes, 2004].

2.4.4. Viscoelasticidade

Enquanto, nos materiais considerados elásticos, quando se retira o carregamento imposto, os materiais assumem imediatamente a sua configuração inicial, nos materiais viscoelásticos o referido fenómeno não se verifica. Isto porque, nestes materiais, além da

componente elástica, existe uma componente igualmente importante, de natureza viscosa. Esta é definida como sendo uma quantidade que descreve a resistência que um material oferece ao escoamento, originado por uma força F . Assim, neste tipo de materiais, a deformação não acompanha a tensão imposta, dado que os movimentos moleculares desencadeados pela tensão, e que vão originar a deformação, não ocorrem instantaneamente. Estes movimentos são influenciados por certos factores que intervêm no esforço em questão: temperatura e velocidade de deformação.

2.5. Aglomerados de cortiça e aplicações

A cortiça, enquanto material celular, é utilizada ao nível industrial para a obtenção de produtos que hoje em dia se encontram abrangidos por vários sectores, os quais podem ser incluídos em dois grupos: produtos de cortiça natural e produtos de cortiça aglomerada. Os produtos de cortiça natural, referidos nas secções anteriores, são constituídos exclusivamente por cortiça, sem qualquer transformação para além das operações de preparação, corte e acabamento. Este grupo abrange na sua maioria rolhas e discos, contendo no entanto, em menor número, papel de cortiça, lã de cortiça e outros artigos de cortiça natural. Por sua vez, os aglomerados de cortiça são habitualmente classificados em aglomerados compostos e aglomerados puros [Fortes, 2004]:

- os aglomerados compostos, também designados por aglomerados brancos, são constituídos por partículas de cortiça e um adesivo, sendo utilizadas para o fabrico de rolhas aglomeradas, painéis de folhas de cortiça aglomerada para revestimento, e blocos;
- os aglomerados compostos por partículas de cortiça, borracha e um ligante, vulgarmente designados por rubbercork, são utilizados para juntas, vedações e revestimentos;
- os aglomerados puros de partículas de cortiça, também designados por aglomerados negros ou aglomerados de cortiça expandida, são obtidos pela auto-aglomeração térmica dos grânulos de cortiça e utilizam-se como materiais de isolamento.

Além dos produtos anteriormente referidos, são ainda fabricados diversos outros, geralmente agrupados em decorativos ou especialidades.

As aplicações onde este tipo de aglomerados estão inseridas são variadas, de entre as quais se destacam [Fortes, 1989]:

- *Aglomerados compostos*: revestimento de soalhos, revestimento de paredes, painéis de afixação, palmilhas e solas de sapatos, rolhas, anilhas de juntas de vedação, entre outros;
- *Aglomerados puros*: isolante térmico em câmaras frigoríficas, isolante térmico/acústico, juntas de dilatação em construção civil, material antivibrático (bases para máquinas, embalagens), entre outros.

Nas Figuras 16 e 17 são apresentadas algumas das aplicações referidas anteriormente, respectivamente:



Figura 16: Rolhas aglomeradas, painel de afixação, solas de sapato e revestimento de soalhos [Amorim, 2004].

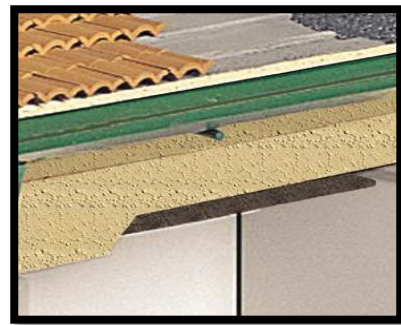


Figura 17: Isolamento de telhados, isolamento em paredes duplas e isolamento acústico de telhados e sótãos [Amorim, 2004].

3. Estudo experimental

Este capítulo resume os procedimentos adoptados para a realização dos ensaios experimentais, que tiveram por base provetes cúbicos de aglomerados de cortiça, analisando o comportamento por eles verificados quando sujeitos à acção dos esforços de compressão e tracção.

3.1. Ensaio de compressão

Como referido na secção 2.4.1, o esforço de compressão pode ser simulado através de ensaios laboratoriais. Assim, com o objectivo de caracterizar o material em estudo, a cortiça, oito provetes cúbicos de aglomerados de cortiça (20x20x20mm) foram submetidos ao esforço de compressão, recorrendo para isso à máquina de teste *Shimadzu* AG-50KNG, com a célula de carga *Shimadzu* SLBL-5KN, para valores de velocidade 5, 10 e 20 mm/min. A Figura 18 é referente aos sucessivos estágios de compressão de um provete cúbico de aglomerado de cortiça cujas dimensões são: (27x26.5x20mm). Durante este ensaio, foi possível observar uma deformação transversal quase reduzida, facto que poderá suportar a ideia de um coeficiente de Poisson muito próximo de zero. Outro dos efeitos verificados durante os ensaios realizados está associado à isotropia que o material exhibe, já que o seu comportamento apresenta-se idêntico nas três direcções existentes. Sabendo, à partida, que a natureza da cortiça contraria a característica encontrada, a possível explicação poderá ser baseada na diferente orientação que os grãos da cortiça assumem, após vários processos industriais.

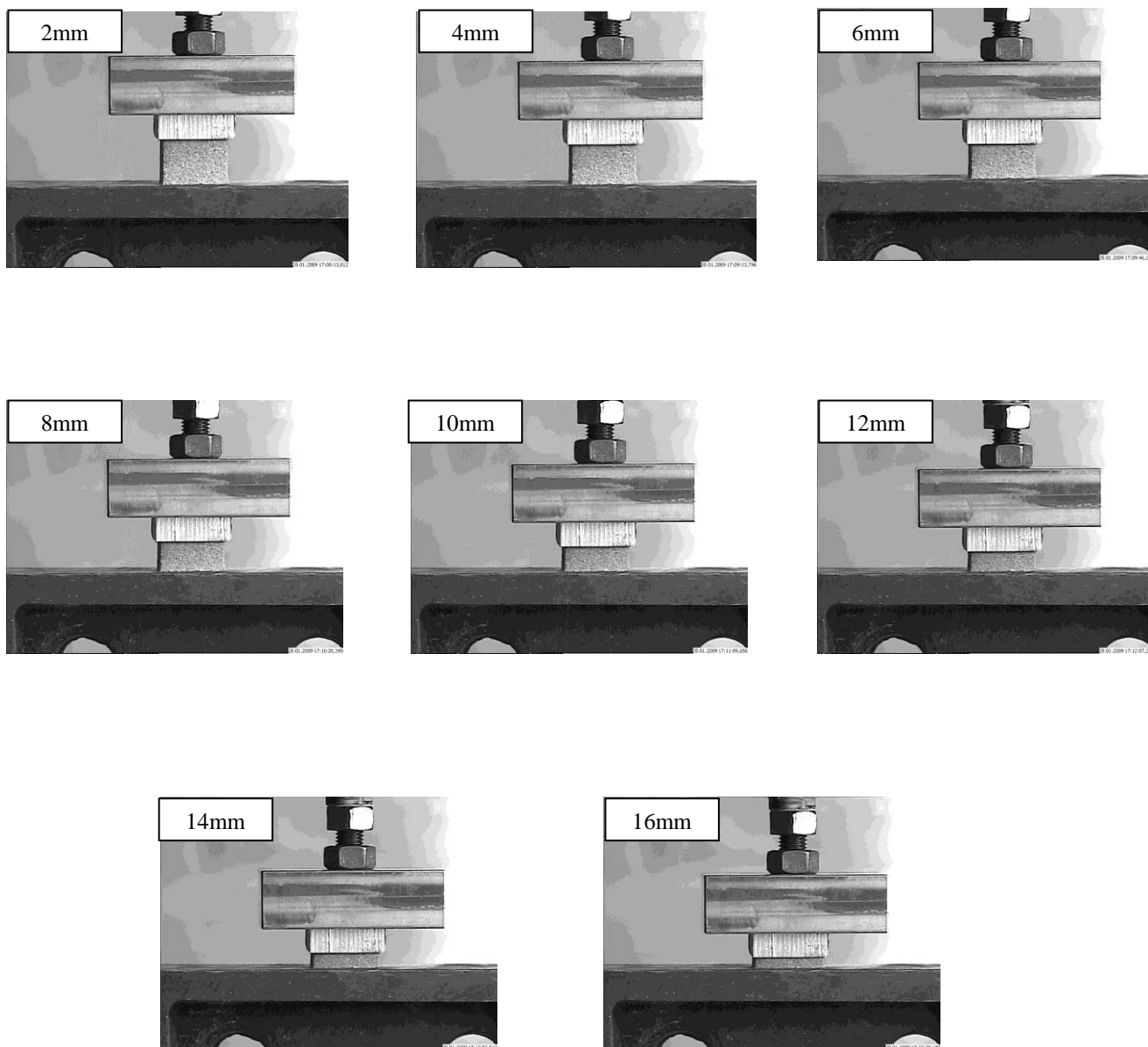


Figura 18: Estágios de compressão do provete cúbico de aglomerado de cortiça.

3.2. Ensaio de tracção

Mantendo a utilização do equipamento referido na secção anterior, bem como de todas as condições de ensaio, cinco amostras foram submetidas ao esforço de tracção, às velocidades 5, 10 e 20 mm/min. A Figura 19 ilustra a constituição do modelo utilizado: provete de aglomerado de cortiça (40×12 mm) e placas de suporte de alumínio coladas para reduzir o efeito de fixação.

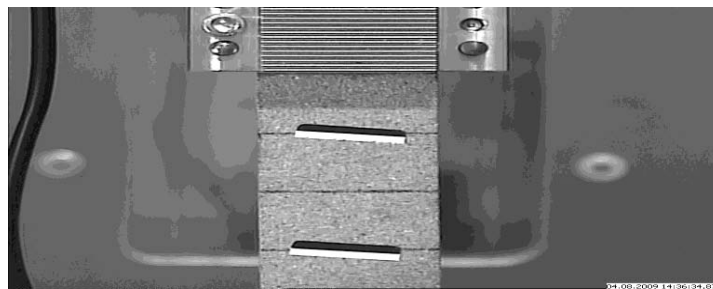


Figura 19: Aglomerado de cortiça sujeito ao esforço de tracção.

O provete foi testado na máquina de tensão *Shimadzu*, conforme ilustrado na Figura 20, utilizando um dispositivo de vídeo extensómetro (*Messphysik ME 46NG*) para medir a deformação axial.

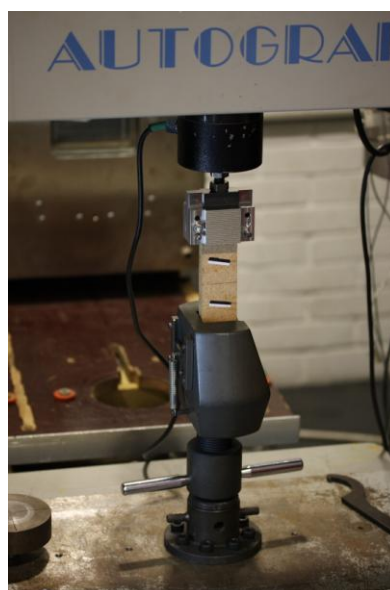


Figura 20: Configuração do ensaio de tracção.

3.3. Análise de resultados

Numa primeira instância, serão realizadas as análises consideradas necessárias, respeitantes ao esforço de compressão e só posteriormente se fará as análises referentes ao esforço de tracção. Assim, a Figura 21 representa as curvas força-deslocamento, associadas ao esforço de compressão, obtidas para o conjunto de amostras de acordo com as velocidades anteriormente especificadas. De acordo com a curva representada é possível observar as regiões presentes e descritas na secção 2.4.1. A primeira região revela um comportamento elástico não-linear, resultante da flexão elástica das paredes das células, estendendo-se a um valor de deformação de aproximadamente 10%. Esta região é seguida de uma zona praticamente constante, evidenciando os efeitos de uma encurvadura progressiva das paredes das células. Finalmente, na terceira fase, assiste-se a um esmagamento das paredes das células, salientando que nesta fase o comportamento evidenciado do aglomerado é devido, exclusivamente, à estrutura celular. É digno de mencionar que após o teste de compressão, onde a deformação até 80% foi imposta, os provetes recuperaram quase a dimensão inicial, apresentando uma deformação residual média inferior a 7.5%.

Como indicado na legenda da Figura 21, foram utilizadas três velocidades de teste e os resultados obtidos mostraram-se independentes desse parâmetro, pelo menos dentro do intervalo de velocidades utilizadas neste estudo. Além disso, para cada subconjunto de velocidade constante, as orientações diferentes do provete cúbico em relação à direcção de carregamento axial foram utilizadas para analisar as características de isotropia do material. Efectuando um aumento da escala até se atingir um valor de deformação de cerca de 10%, conseguiu-se atingir a curva representada na Figura 22.

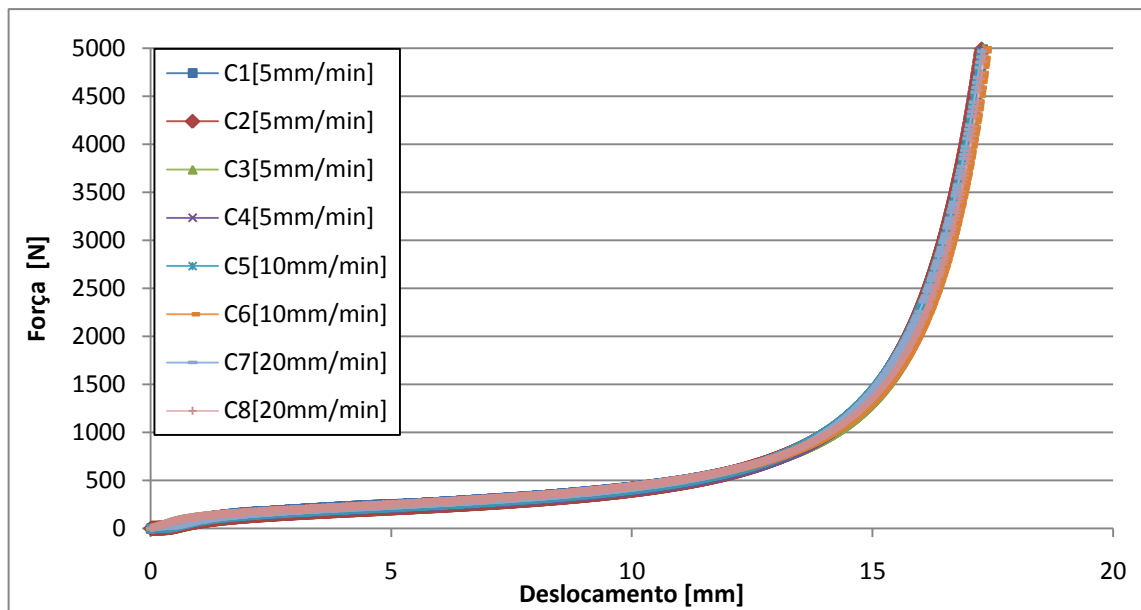


Figura 21: Ensaio de compressão do aglomerado de cortiça: gráfico força-deslocamento.

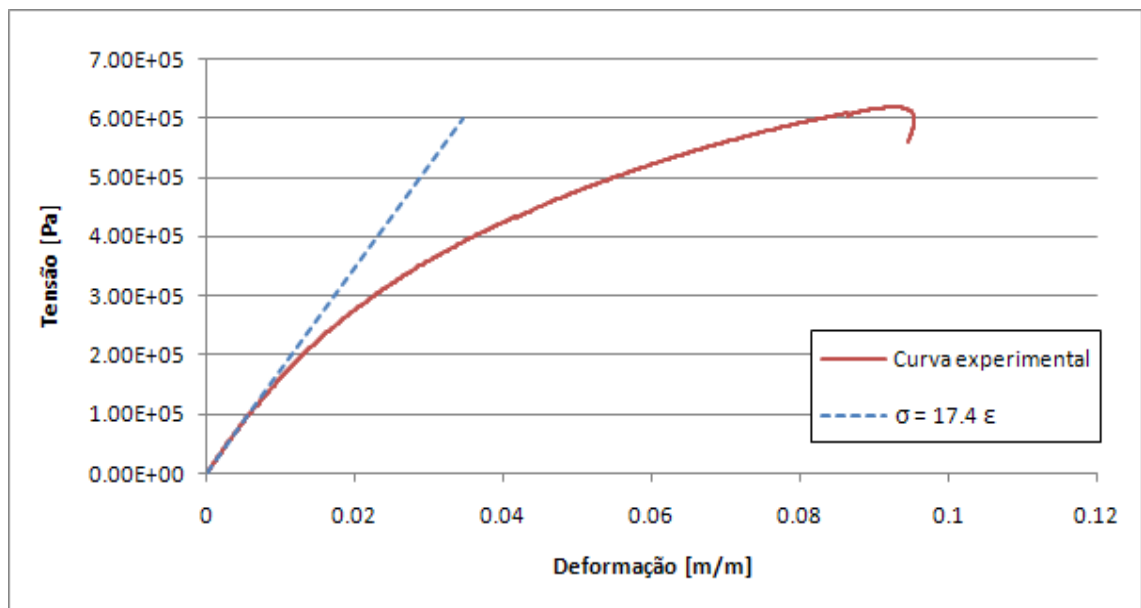


Figura 22: Ensaio de compressão do aglomerado de cortiça: gráfico tensão-deformação.

De acordo com os resultados obtidos com este conjunto de amostras, o composto de cortiça aqui analisado pode ser descrito por um módulo de Young de compressão de 7.4 MPa (desvio padrão: 0.3 MPa).

A Figura 23 representa as curvas força-deslocamento associadas às amostras submetidas ao esforço de tracção, sendo a Figura 24 referente à distribuição da tensão-deformação, onde se encontra representada uma recta cujo objectivo é a determinação do valor do módulo de Young associado à fase inicial.

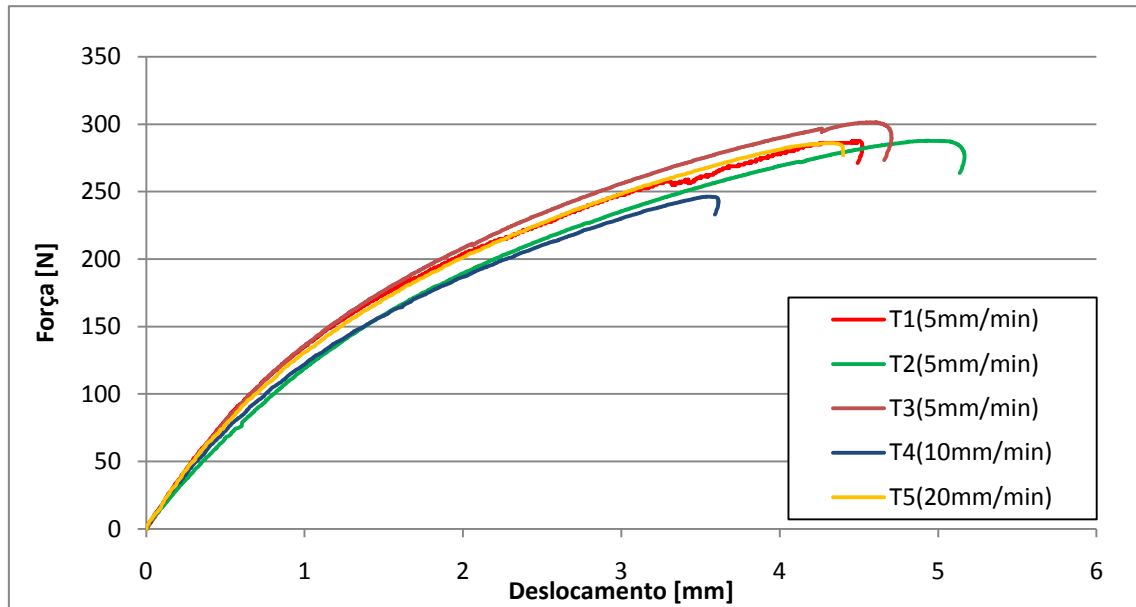


Figura 23: Curva força-deslocamento associado ao esforço de tracção.

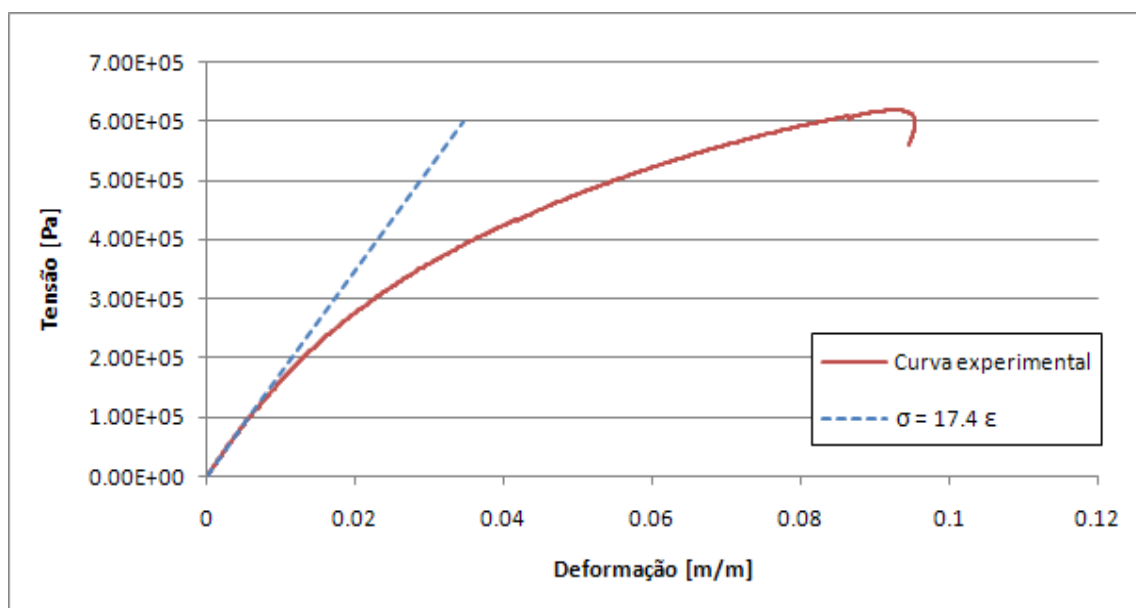


Figura 24: Curva tensão-deformação associado ao esforço de tracção.

Perante os resultados obtidos, o módulo de Young determinado é aproximadamente 17.4 MPa (desvio padrão: 1.3 MPa), que é claramente superior ao módulo obtido no ensaio de compressão. Esta observação está de acordo com as informações fornecidas pelas diversas pesquisas.

Relativamente à influência que o factor velocidade revela na deformação sofrida pelo aglomerado, constata-se que embora no esforço de tracção haja maior diferenciação no que concerne às curvas obtidas, comparativamente ao esforço de compressão, o referido parâmetro não é crucial na obtenção dos resultados.

Obtidos os resultados experimentais no que respeita aos dois esforços mecânicos descritos, compressão e tracção, estes irão servir de base à realização das simulações posteriores que vão ser referidas. Tendo por base a gama de valores atingida pelos parâmetros tensão e deformação, em ambos os esforços, foi tentado através de modelos simplificados gerados, retratar as curvas obtidas, tanto no regime linear como no regime não-linear. Para isso, determinaram-se os valores do módulo de Young óptimos associados a cada modelo, capazes de representar o módulo de Young do aglomerado usado nos ensaios experimentais.

4. Estudo numérico – Análise linear

Neste capítulo procede-se à elaboração de modelos de células de estudo, com paredes lineares e onduladas, que irão posteriormente ser submetidos a uma análise linear numérica detalhada, a fim de determinar os módulos de Young associados a cada modelo.

4.1. Metodologia de estudo

Segundo algumas observações realizadas em diversas amostras de cortiça, concluiu-se que as suas células, na secção tangencial, podem apresentar diferentes configurações geométricas, podendo o número de lados de cada célula variar entre 4 e 9, inclusive. Contudo, as células mais abundantes são correspondentes a 5, 6 e 7 lados, representando cerca de 90% do número total de células [Fortes, 2004]. Efectuando uma média dos valores anteriormente referidos, chegou-se à conclusão de que esse valor seria 6, correspondente a uma geometria hexagonal. Por esta razão, as células que fazem parte integrante dos modelos, que vão sendo descritos ao longo do trabalho, são modeladas tendo em consideração unicamente a geometria referida, considerando-se um bom ponto de partida para o estudo. Além da geometria, um factor bastante influente no comportamento das células de cortiça, quando submetidas aos esforços mecânicos de compressão e tracção, está associado ao enrugamento das paredes celulares.

De uma maneira geral, o trabalho encontra-se dividido em dois grandes grupos de estudo: células com paredes lineares e células com paredes onduladas. Numa primeira abordagem, apenas é tida em consideração uma célula com paredes lineares cujo objectivo é realizar o estudo de convergência que a seguir será descrito, e só posteriormente se vai evoluindo na complexidade dos modelos, sendo que estes tentam retratar um aglomerado de células hexagonais, precisamente para se fazer uma aproximação à realidade. Assim,

vão ser considerados vários modelos, associados às duas vertentes, os necessários até se atingir a convergência dos valores referentes ao parâmetro módulo de Young em qualquer uma das direcções definidas (axial, tangencial e radial). Todos estes modelos têm por base os resultados obtidos experimentalmente, já que tendo conhecimento do módulo de Young experimental associado a cada esforço, compressão e tracção, e considerando um valor de tensão de 0.1MPa, calcula-se a deformação associada. Assim, tendo por referência a deformação obtida, determina-se o valor do módulo de Young numérico pretendido.

4.2. Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método matemático normalmente usado em problemas científicos e de engenharia. O MEF é utilizado em problemas para os quais não se conhece uma solução exacta que possa ser expressa de forma matemática. Desta forma, o MEF é considerado um método numérico e não analítico.

Embora, o MEF possa ser aplicado em problemas unidimensionais, ele é mais utilizado em problemas 2 e 3D, onde o domínio que se pretende estudar é dividido num número finito de áreas ou volumes mais pequenos e regulares, designado por elementos finitos. Este processo designa-se por discretização. Caso o problema em questão seja unidimensional, os elementos finitos utilizados são em forma de segmentos. Para problemas bidimensionais, recorre-se a quadriláteros e triângulos. Finalmente, em problemas tridimensionais os elementos são geralmente hexaedros, tetraedros ou pentaedros.

Restringindo a discussão a uma análise elástica e linear, a primeira quantidade a obter numa análise através do MEF é, na maior parte dos casos, o deslocamento de um número finito de pontos do sistema. Estes mesmos pontos são designados por nós da malha de elementos finitos, encontrando-se normalmente nos vértices dos elementos [Teixeira-Dias, 2001], [Teixeira-Dias, 2010].

Após este processo de divisão, são aplicadas leis da física, princípio dos trabalhos virtuais a cada elemento, obtendo-se as matrizes de rigidez e os vectores de forças internas para cada elemento. Posteriormente, as diversas matrizes de rigidez e vectores de forças

internas elementares são agrupadas numa matriz de rigidez e vector de forças internas da estrutura (assemblagem). A partir da matriz de rigidez e vector de forças internas globais da estrutura, e tendo em consideração as condições fronteira, o vector de variáveis primárias, solução do problema, pode ser obtido.

É de salientar no entanto que, a correcta definição dos modelos de comportamento dos materiais assume um papel bastante importante na obtenção de resultados razoáveis. Na área do cálculo estrutural, os modelos de comportamento ou modelos constitutivos apresentam-se em diversos tipos, como exemplo: (i) elástico (linear), em que após a aplicação da carga o material retoma a sua configuração inicial; (ii) plástico (não-linear), em que não existe linearidade entre a carga aplicada e a deformação ocorrida, sendo esta deformação permanente; (iii) elasto-plástico, apresentando uma fase inicial com comportamento elástico e outra de comportamento plástico; (iv) viscoelástico e viscoplástico, quando a resposta do material depende do tempo (velocidade).

De forma a definir completamente o modelo de comportamento de um material, torna-se necessário o conhecimento de algumas propriedades físicas e mecânicas, tais como, o coeficiente de Poisson, o módulo de elasticidade, entre outras. Esta fase de definição antecede a fase de análise e cálculo do problema proposto [Lopes, 2009].

De forma resumida, a análise com base no Método dos Elementos Finitos pode ser dividida em várias etapas:

1. modelação do problema real em análise;
2. geração da malha de elementos finitos;
3. definição do sistema de cargas;
4. definição de condições de fronteira;
5. atribuição de materiais e respectivas propriedades;
6. cálculo numérico;
7. visualização e análise dos resultados.

4.3. Modelos de paredes lineares

4.3.1. Análise de convergência

Os modelos de paredes lineares, propostos ao longo do presente trabalho, são constituídos por células de paredes rectas, ou seja, sem a existência de nenhuma ondulação, cuja forma geométrica se baseia na estrutura hexagonal. São considerados para isso cinco modelos numéricos, cujas dimensões são: 1x1, 3x3, 5x5, 9x9 e 11x11. A razão pela qual foram escolhidos estes modelos, está associada ao facto de se pretender retratar a etapa de evolução dos modelos, começando pelo modelo mais simples que se poderia considerar. Assim, o primeiro modelo é constituído por uma célula prismática de formato hexagonal de dimensões $20 \times 45 \times 1 \mu\text{m}$, cujos valores são respectivamente a base, altura e espessura e por uma placa de dimensões 34.641×45 , de modo a poder abranger a área ocupada pelas faces superiores das células localizadas no topo do modelo (Figura 25). O material escolhido para as células foi a cortiça, cujas propriedades introduzidas foram: Módulo de Young – 14 MPa e ν – 0.3. Relativamente à placa, esta foi definida por um material que permitisse considerá-la rígida relativamente à célula, com as seguintes propriedades: Módulo de Young – $1\text{E}14$ MPa e ν – 0.3.

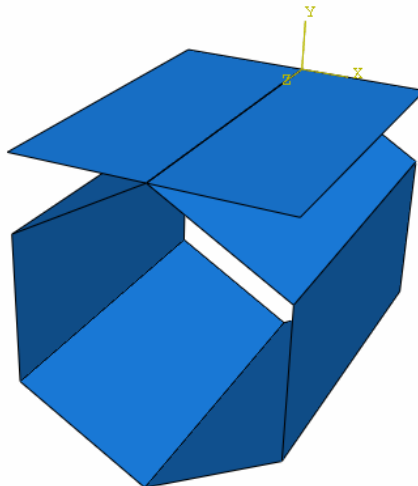


Figura 25: Ilustração do 1º modelo de estudo (Prisma Hexagonal).

Após concluídas as fases de definição da geometria do problema e sua configuração, estão reunidas as condições para se poder avançar para a fase seguinte: definição das condições de fronteira. Neste campo, é de referir a restrição da aresta inferior à translação segundo a direcção Y, das faces laterais à translação segundo a direcção X, bem como das arestas anteriores e posteriores à translação segundo a direcção Z. Com a aplicação destas condições de fronteiras, pretende-se simular os contactos existentes entre as células vizinhas. Adicionalmente procedeu-se à aplicação de uma carga distribuída ao longo da placa, parte auxiliar, que serviu precisamente para assegurar a deformação simultânea das faces laterais do modelo (Figura 26). De salientar que em todos os modelos posteriores será utilizada uma placa semelhante à do modelo presente, tendo apenas em consideração as dimensões respeitantes às faces superiores das células de topo de cada aglomerado, cuja função é a mesma referida anteriormente.

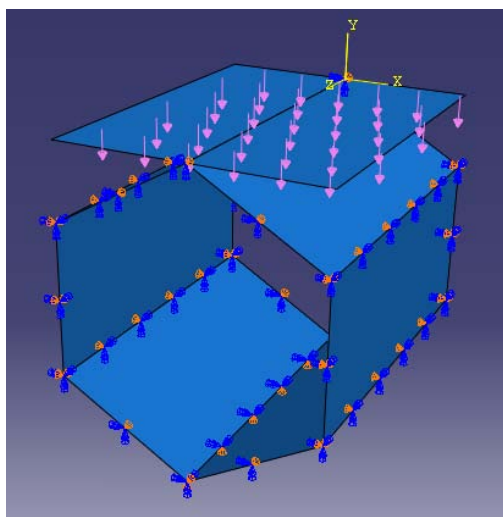


Figura 26: Condições de fronteira aplicadas ao modelo em estudo.

A próxima fase está relacionada com a análise de resultados, correspondendo neste primeiro modelo à etapa de convergência das malhas utilizadas no estudo. Esta etapa assume-se de grande importância, dado que ela permite ao utilizador do programa determinar a malha óptima, a partir da qual o valor do parâmetro estudado, neste caso o deslocamento efectuado pela célula, converge analiticamente para um valor. Assim, a malha óptima alcançada irá ser utilizada nas análises posteriores, garantindo assim um grau

de fiabilidade bastante elevado nos resultados obtidos. No que respeita ao elemento finito utilizado, é de referir que de entre os elementos disponibilizados na biblioteca do ABAQUS – elementos sólidos, de casca, de viga, de membrana – optou-se pela utilização de elementos de casca, já que com a sua utilização, não existe a preocupação relacionada com a rigidez que o material oferece, efectuando uma comparação com elementos sólidos. Assim, foram utilizados elementos de casca triangulares de três nós, S3. Sabendo que, em termos de precisão, quando efectuada uma comparação entre elementos triangulares e quadrangulares, estes últimos possuem alguma vantagem, optou-se pela utilização de elementos triangulares dada a geometria complexa que constituem os modelos de células hexagonais onduladas.

A razão pela qual se procede ao estudo de convergência da malha já foi referida anteriormente, sendo que uma das implicações resultantes visa na redução dos tempos excessivos de cálculo, já que se a dimensão da malha fosse bastante refinada, resultaria num processo de computação moroso e sujeito a erros de cálculos significativos dado o grande número de elementos presentes. Assim, foram realizadas as simulações numéricas de acordo com as configurações anteriormente apresentadas, sendo que o valor da pressão aplicada foi de 0.4 MPa (Tabela 2). De notar apenas que para a obtenção dos resultados referidos foram utilizados, como referência, os valores dos deslocamentos efectuados, num ponto crítico previamente escolhido, comum a todos os ensaios. O ponto escolhido localiza-se no centro da placa superior rígida.

Tabela 2: Deslocamento do nó central da placa e respectiva razão ao valor de referência (calculado para a malha com dimensão de elemento finito de 4.5µm).

Dimensão do elemento finito [µm]	Deslocamento [µm]	Razão
20	47.5356	1.693322
15	47.5022	1.694513
12	80.3545	1.001725
10	80.3544	1.001726
7	80.4627	1.000378
6	80.4627	1.000378
5.5	80.4931	1
5	80.4931	1
4.75	80.4931	1
4.5	80.4931	

Uma malha pode ser considerada suficientemente refinada quando o deslocamento não se altera significativamente com o aumento do número de elementos, ou seja, com a diminuição da dimensão da malha. De acordo com os dados apresentados na Tabela 2, verificou-se que a malha óptima poderia englobar os ensaios sete a dez. Contudo, a malha óptima encontrada é correspondente à dimensão $4.5\mu\text{m}$, malha esta que garantiu a convergência pretendida. Assim, o processo de convergência descrito encontra-se evidenciado na Figura 27, enquanto a malha óptima obtida pode ser visualizada através da Figura 28.

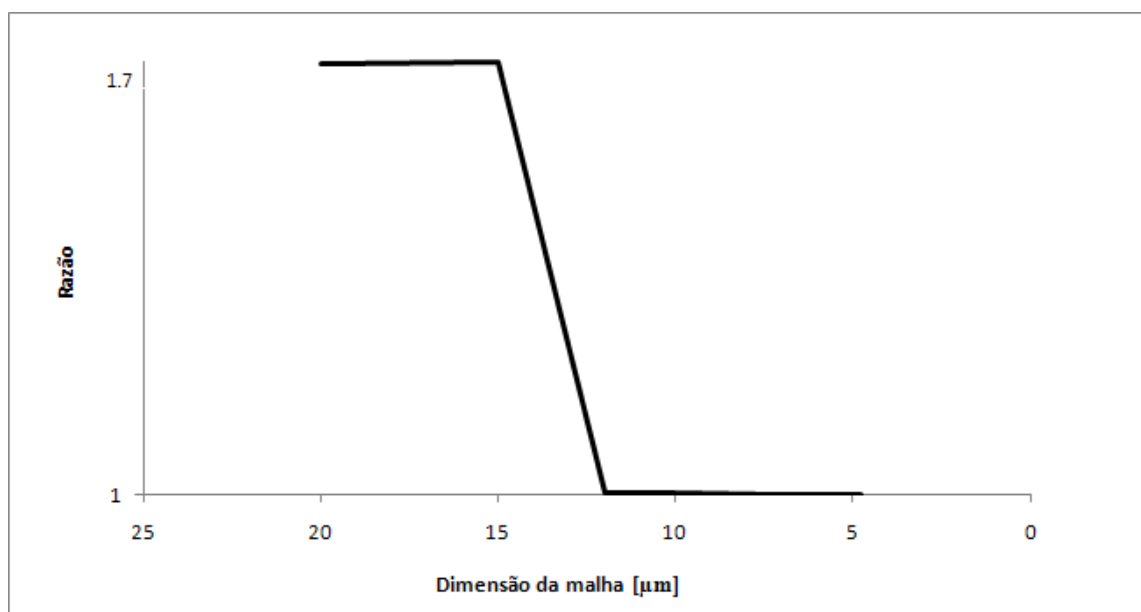


Figura 27: Curva de convergência baseada nos valores tabelados.

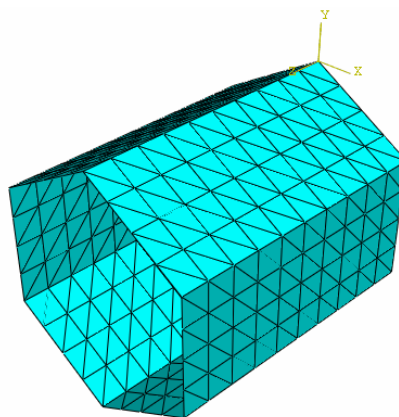


Figura 28: Ilustração da malha óptima encontrada.

4.3.2. Modelos estudados

Obtidos os resultados, no que concerne ao estudo da convergência da malha, as próximas etapas consistem na elaboração de modelos, os quais vão tornando-se cada vez mais complexos, à medida que o trabalho se vai desenrolando. Estes modelos têm por base as células de formato hexagonal anteriormente referidas, sem nunca descurar no entanto a dimensão da malha óptima. Assim, o segundo modelo é constituído por oito células cuja disposição pode ser visualizada através da Figura 29.

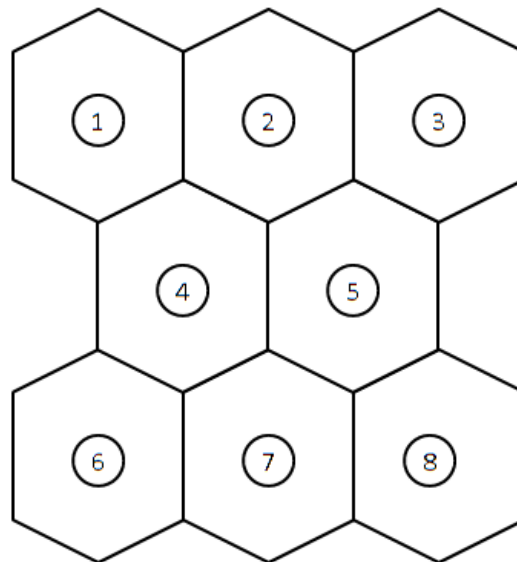


Figura 29: Representação esquemática da disposição de células do 2º modelo.

Estabeleceu-se que este modelo seria constituído por oito células pela razão de ser o modelo mais simples que se poderia considerar. Referidas as geometrias, bem como de todas as configurações associadas ao primeiro modelo, são agora apresentados os modelos posteriores que diferem do primeiro apenas no número de células que o compõem. Assim sendo, a Tabela 3 resume a constituição de cada modelo descrito, no que refere ao número de células presentes.

Tabela 3: Caracterização dos modelos tendo por base o número de células.

Designação do modelo	Número de células
3º Modelo – Modelo 5x5	23
4º Modelo – Modelo 9x9	77
5º Modelo – Modelo 11x11	116

4.3.3. Condições de fronteira e carregamento

Tendo por base a célula hexagonal do 1º modelo de estudo, os modelos anteriormente referidos tiveram em conta algumas considerações. No campo dos carregamentos, não se verifica mudanças significativas relativamente ao 1º modelo, salientando apenas que a restrição das faces laterais é feita apenas nas células mais periféricas. No que se refere ao campo do carregamento, é de realçar a aplicação das cargas nas diferentes direcções, cujo objectivo consiste na avaliação do comportamento das células de cada modelo segundo as três direcções consideradas. Assim, nas Figuras 30, 31 e 32, é possível visualizar esquematicamente as condições associadas aos campos referidos para cada direcção existente.

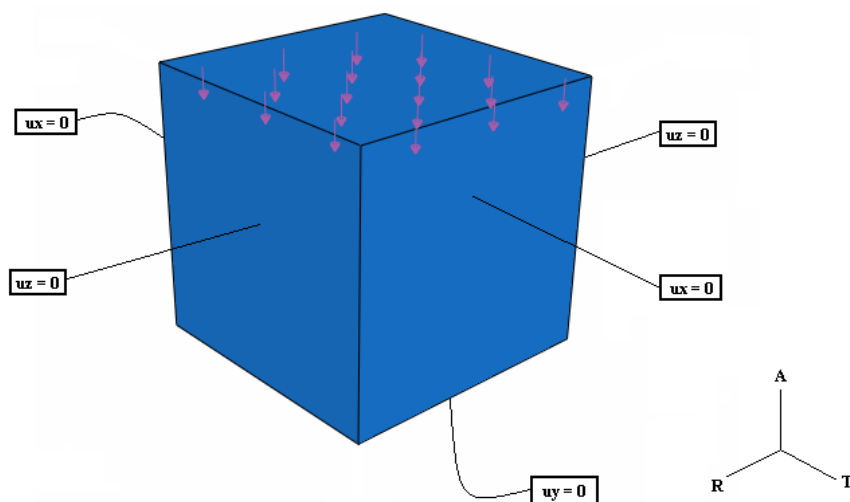


Figura 30: Representação esquemática da pressão aplicada e condições de fronteira associadas à direcção axial.

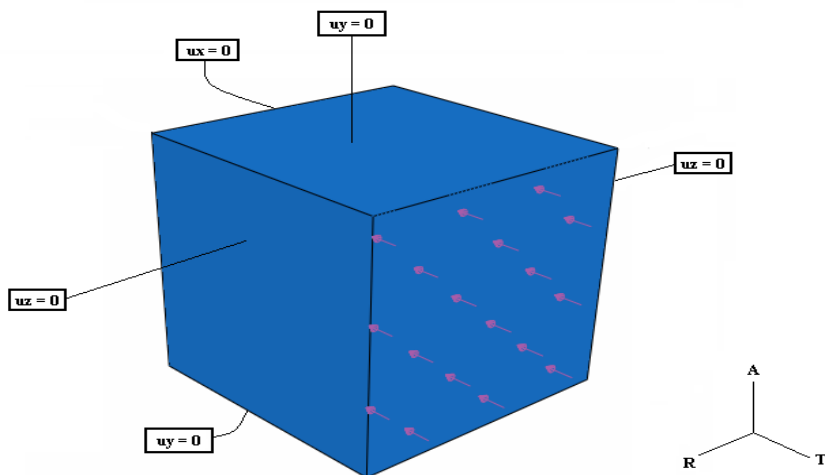


Figura 31: Representação esquemática da pressão aplicada e condições de fronteira associadas à direcção tangencial.

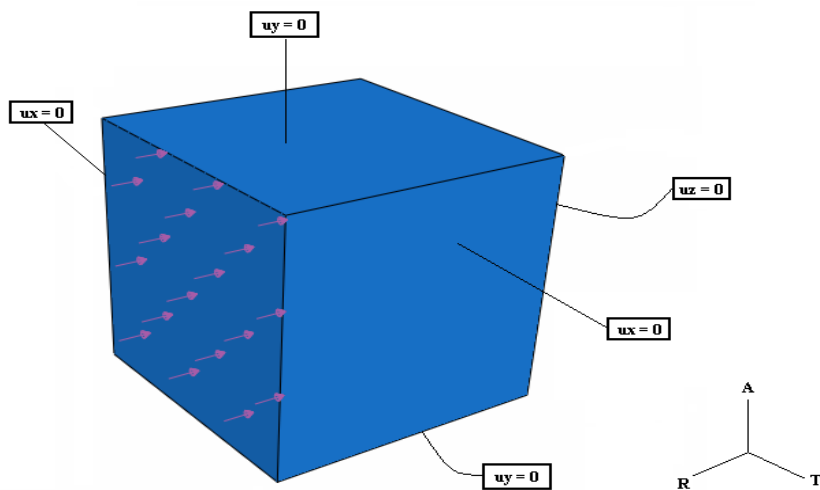


Figura 32: Representação esquemática da pressão aplicada e condições de fronteira associadas à direcção radial.

4.3.4. Etapa de simulação

Ultrapassadas as fases de configuração e definição da geometria do problema, assim como das condições a que este se encontra submetido, a simulação surge como a fase seguinte, a

partir da qual são extraídos os valores que serão posteriormente submetidos a uma análise detalhada. Assim, à semelhança do segundo modelo, os modelos posteriores irão ser submetidos aos esforços mecânicos de compressão e tracção. De seguida, serão referidos os procedimentos usados para a configuração de cada esforço mecânico.

Tendo em consideração apenas o esforço de compressão, e tendo por base os valores experimentais referentes aos parâmetros de tensão e deformação, foi tentado numa primeira fase, determinar os valores do módulo de Young associados ao regime linear, ou seja, até uma deformação aproximada de 10%. Assim, o objectivo que se pretendia atingir com este raciocínio visava a correspondência entre os valores da tensão e deformação, que na prática é apenas tido como referência um único valor, dado que se trata do regime linear. O ponto escolhido foi correspondente a uma tensão de 0.1MPa e a uma deformação de 0.0135, valor determinado pela Lei de Hooke, dado que o valor do módulo de Young já era previamente conhecido, 7.4 MPa, através da análise dos ensaios experimentais.

De referir apenas que essa avaliação foi realizada para cada direcção, tendo por base não só as condições impostas ao modelo, referidas na secção inicial, como também um parâmetro muito importante: coeficiente de Poisson. Este parâmetro assume um papel bastante importante na caracterização do material, já que tendo por base a sua definição, permite a relação entre a deformação transversal, ϵ_2 , e a deformação na direcção de compressão, ϵ_1 . Caso o resultado desta relação seja positivo, o material em análise apresenta uma variação dimensional transversal crescente como resultado da compressão. Se, por contrário, o resultado for negativo, então significa que a compressão do material numa direcção origina diminuição na dimensão transversal. Neste trabalho, assumiu-se que o material da parede celular assume um coeficiente de Poisson positivo, tendo sido considerado três valores diferentes: 0 (compressível), 0.3 (valor típico dos metais) e 0.45 (quase incompressível, valor típico dos elastómeros).

Finalizadas as simulações, são extraídos os valores correspondentes ao parâmetro de saída, deslocamento, que posteriormente serão convertidos no parâmetro deformação, tendo em conta os comprimentos referentes a cada direcção em questão. Para a direcção axial, o comprimento inicial assumido foi de 100 μm , para a direcção tangencial foi de 103.923 μm , enquanto para a direcção radial o valor foi de 45 μm .

De forma análoga, efectuou-se o mesmo raciocínio, desta feita para o esforço de tracção. O ponto escolhido apresentava como coordenada y o valor 0.1MPa e como

coordenada x o valor 0.00575. À semelhança do esforço de compressão foi determinado o valor do parâmetro módulo de Young pela Lei de Hooke, cujo valor foi de 17.4 MPa. Posteriormente foram realizadas as simulações numéricas, de modo a determinar os valores de módulo de Young capazes de representar o módulo de Young do aglomerado utilizado durante os ensaios experimentais. Estão assim reunidas as condições para apresentação e análise dos resultados obtidos.

4.3.5. Resultados e análise

Nesta secção, são apresentados os resultados obtidos para cada modelo de estudo bem como da análise a eles associada. Assim, as Tabelas 4 e 5 reúnem os valores de deslocamento obtidos para cada direcção e valor de coeficiente de Poisson, associados aos esforços de compressão e tracção. Para o caso da compressão, a recta que melhor se ajustava ao regime linear apresentava um declive, ou seja, módulo de Young aproximadamente igual a 7.4 MPa, como já foi referido no capítulo 3. Por sua vez, o esforço de tracção apresentava um módulo de Young de 17.4 MPa. Através da Lei de Hooke, são determinados os valores do parâmetro de deformação, e consequentemente os valores de deslocamento associados. Foi com base nestes valores que se conseguiu garantir a deformação pretendida.

Tabela 4: Valores de deslocamento obtidos para os modelos 3x3 e 5x5.

		Modelo 3x3			Modelo 5x5		
		Coeficiente Poisson			Coeficiente Poisson		
		0	0.3	0.45	0	0.3	0.45
Compressão	Axial	1.35002	1.35003	1.35002	2.16	2.16	2.15423
	Tangencial	1.40354	1.40353	1.40359	2.338	2.33799	2.338
	Radial	0.607798	0.608321	0.608333	0.608006	0.608005	0.607994
Tracção	Axial	0.575104	0.575101	0.575099	0.920003	0.919989	0.92
	Tangencial	0.59962	0.599648	0.599629	0.996016	0.99602	0.996018
	Radial	0.259858	0.259867	0.259245	0.25899	0.258984	0.258989

Tabela 5: Valores de deslocamento obtidos para os modelos 9x9 e 11x11.

	Modelo 9x9			Modelo 11x11		
	Coeficiente Poisson			Coeficiente Poisson		
	0	0.3	0.45	0	0.3	0.45
Compressão						
Axial	3.77999	3.78029	3.78078	4.59	4.59	4.58999
Tangencial	4.20907	4.20906	4.20905	5.14432	5.14422	5.14429
Radial	0.608113	0.608233	0.60812	0.606723	0.608407	0.608378
Tracção						
Axial	1.61006	1.61005	1.61007	1.95504	1.95501	1.955
Tangencial	1.79172	1.79328	1.79329	2.19173	2.19177	2.19174
Radial	0.259456	0.259485	0.259507	0.238513	0.238157	0.237913

Tendo em consideração os valores anteriormente representados, foi possível a construção de dois gráficos (Figuras 33 e 34), tendo por base o valor do coeficiente de Poisson de 0.45, assumindo a deformação sofrida como variável independente e a pressão aplicada como variável dependente. No primeiro gráfico, é possível visualizar a comparação estabelecida entre a curva de compressão experimental e as curvas associadas a cada modelo numérico definido. O segundo gráfico, baseando-se na mesma linha de raciocínio que o gráfico anterior, é referente ao esforço de tracção.

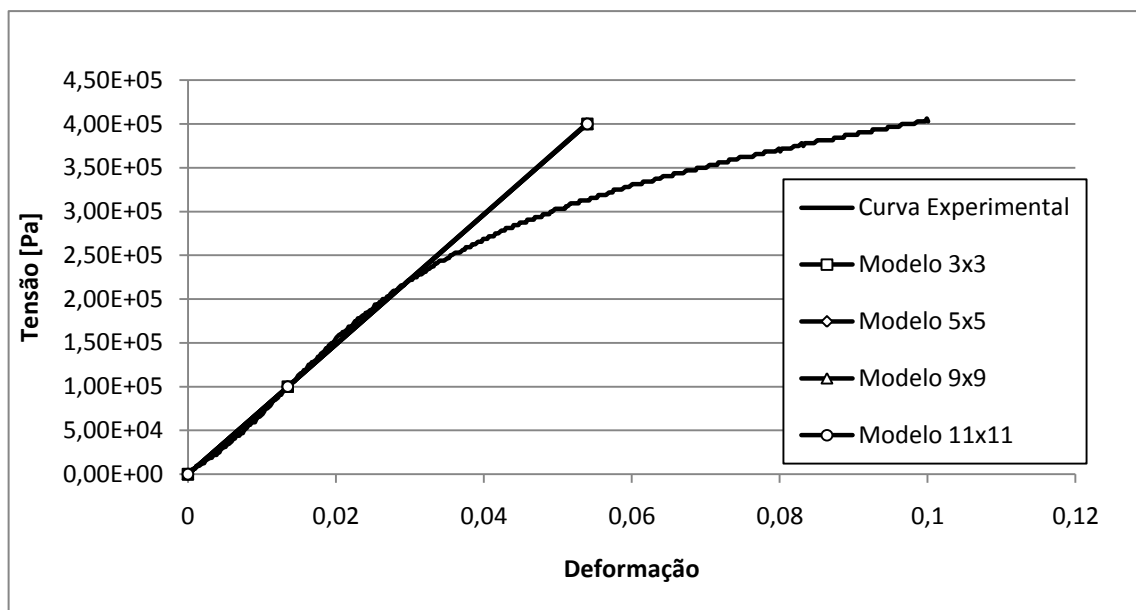


Figura 33: Comparação entre as curvas tensão-deformação experimental e numéricas, associadas ao esforço de compressão, na direcção axial.

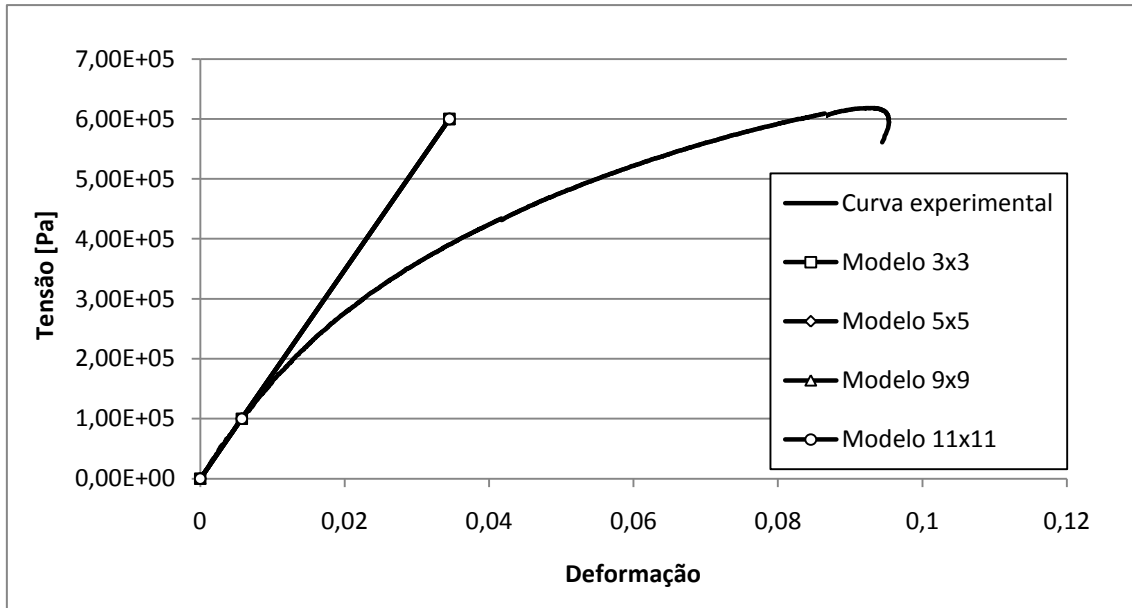


Figura 34: Comparação entre as curvas tensão-deformação experimental e numéricas, associadas ao esforço de tracção, na direcção axial.

Analisando os dois gráficos anteriores, conclui-se que os valores de deformação obtidos através dos modelos numéricos ajustam-se correctamente à parte inicial (região elástica) das curvas de tensão-deformação associadas aos esforços de compressão e tracção experimentais. A título de exemplo, nas Figuras 35 a 38, é possível visualizar as deformadas dos modelos numéricos quando submetidos à acção dos esforços de compressão e tracção.

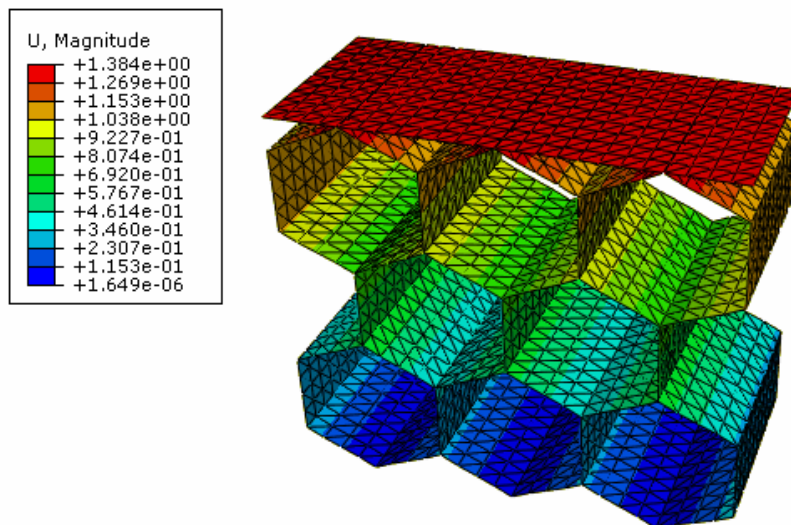


Figura 35: Modelo 3x3 – campo de deslocamentos associados à compressão axial para um coeficiente de Poisson de 0.

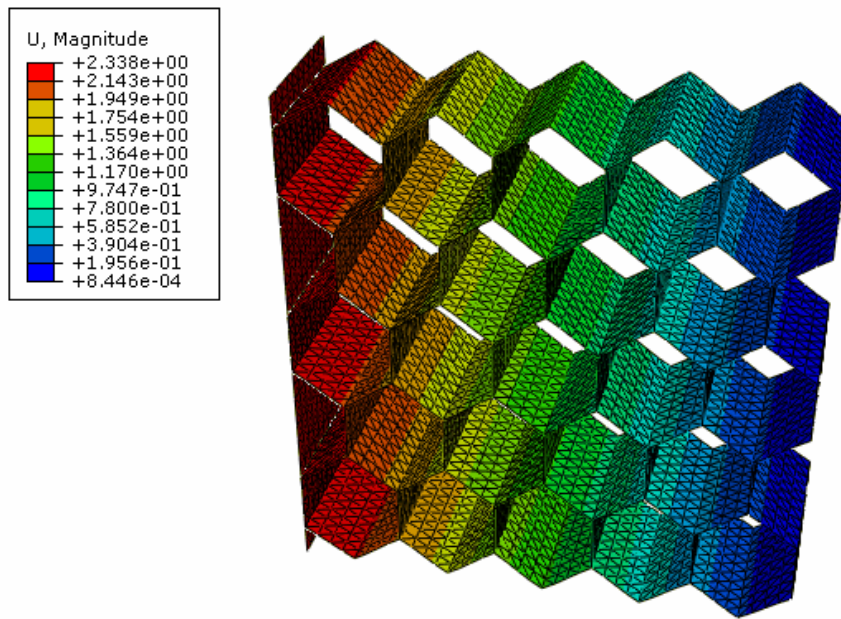


Figura 36: Modelo 5x5 – campo de deslocamentos associados à compressão tangencial para um coeficiente de Poisson de 0.3.

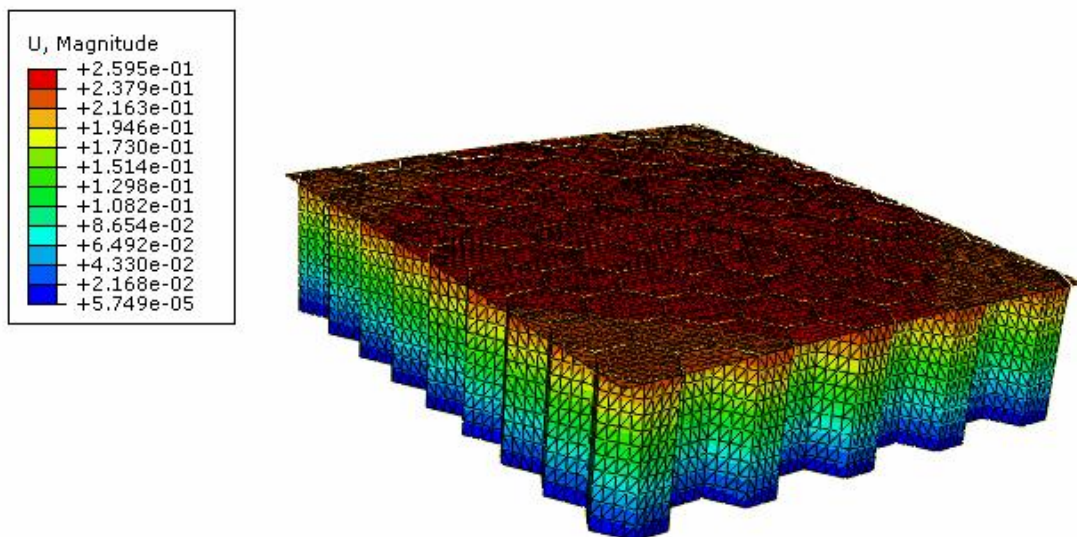


Figura 37: Modelo 9x9 - campo de deslocamentos associados à tracção radial para um coeficiente de Poisson de 0.45.

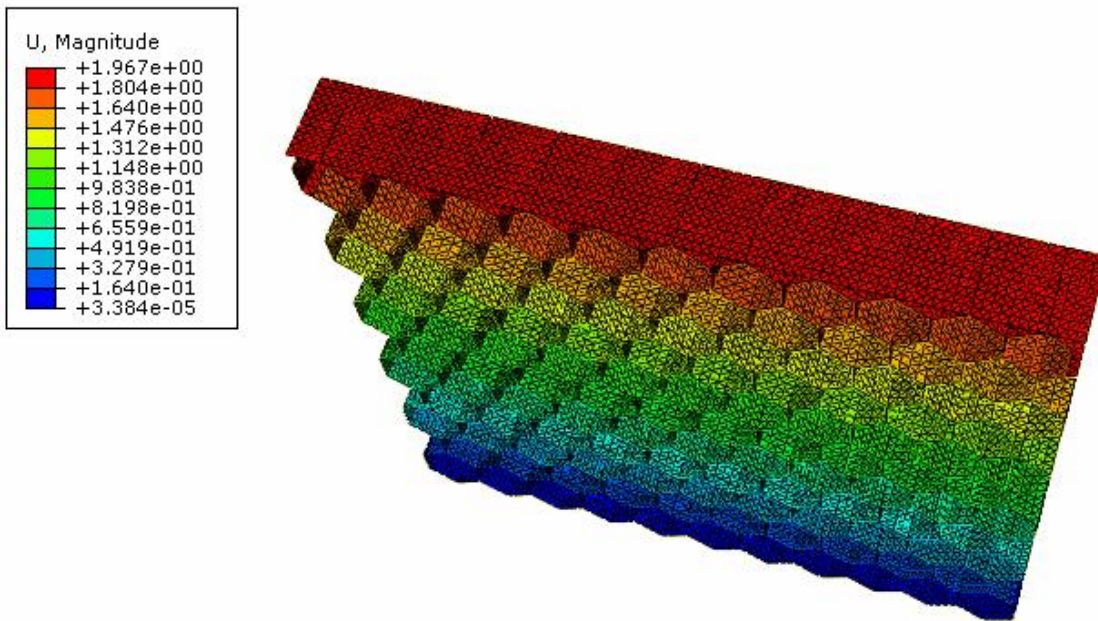


Figura 38: Modelo 11x11 - campo de deslocamentos associados à tracção axial para um coeficiente de Poisson de 0.

Associados aos valores de deformação anteriormente representados, encontram-se os valores do parâmetro módulo de Young, que foram obtidos para cada direcção e coeficiente de Poisson definidos. Assim, nas Tabelas 6 e 7, estão representados os valores obtidos para os diversos modelos:

Tabela 6: Valores dos módulos de Young obtidos para os modelos 3x3 e 5x5.

		Modelo 3x3			Modelo 5x5		
		Coeficiente Poisson			Coeficiente Poisson		
		0	0.3	0.45	0	0.3	0.45
Compressão	Axial	540.39006	491.76202	430.976	532.39727	485.01347	426.92234
	Tangencial	383.3184	348.82532	305.68985	418.60394	381.35625	334.79224
	Radial	91.3722	83.25023	73.1417	101.12226	92.13573	80.87797
Tracção	Axial	1256.94163	1143.84491	1002.45247	1249.31386	1138.13975	999.13573
	Tangencial	932.45178	848.49926	743.63399	985.297	897.61729	788.02257
	Radial	223.262193	203.89849	179.72496	239.27444	218.00308	191.3432

Tabela 7: Valores dos módulos de Young obtidos para os modelos 9x9 e 11x11.

		Modelo 9x9			Modelo 11x11		
		Coeficiente Poisson			Coeficiente Poisson		
		0	0.3	0.45	0	0.3	0.45
Compressão	Axial	523.15773	476.08059	417.22946	520.85131	473.98141	415.39059
	Tangencial	457.22857	416.08359	364.6504	468.04004	425.9296	373.27259
	Radial	114.7785	104.50163	91.67427	119.9928	108.97598	95.58749
Tracção	Axial	1220.35761	1110.6453	973.47935	1221.4016	1111.50841	974.11228
	Tangencial	1083.58001	985.20134	863.40686	1112.95774	1012.79455	887.60625
	Radial	277.66969	253.01179	221.98876	291.29754	265.633	233.20806

As relações referidas são melhor interpretadas recorrendo à utilização de gráficos. Assim, os gráficos das Figuras 39 a 41 são referentes a cada uma das direcções consideradas, utilizando como variável independente o número de células que constituem o modelo em questão e como variável dependente o módulo de Young. Cada curva representada encontra-se associada a um valor de coeficiente de Poisson previamente considerado. Primeiramente, vão ser representados todos os gráficos associados ao esforço de compressão e só posteriormente ao esforço de tracção.

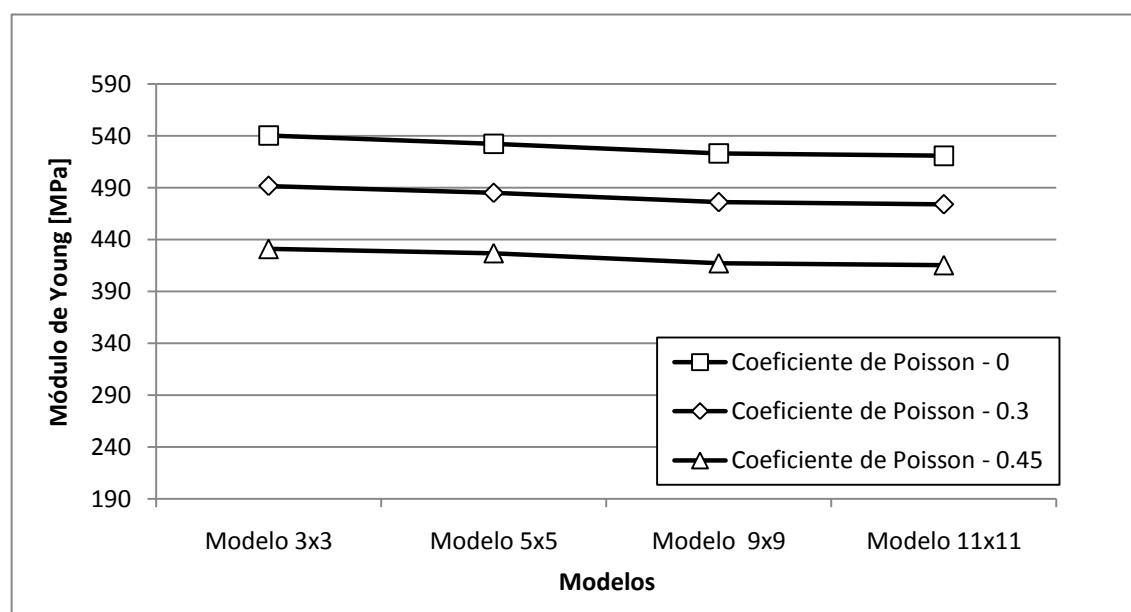


Figura 39: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção axial para o esforço de compressão.

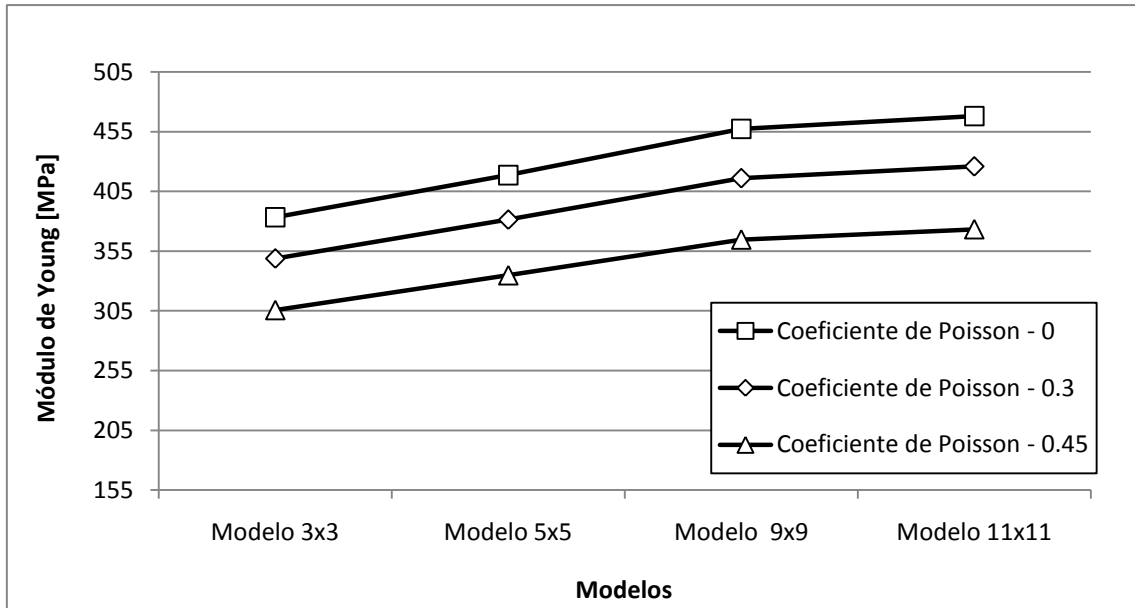


Figura 40: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção tangencial para o esforço de compressão.

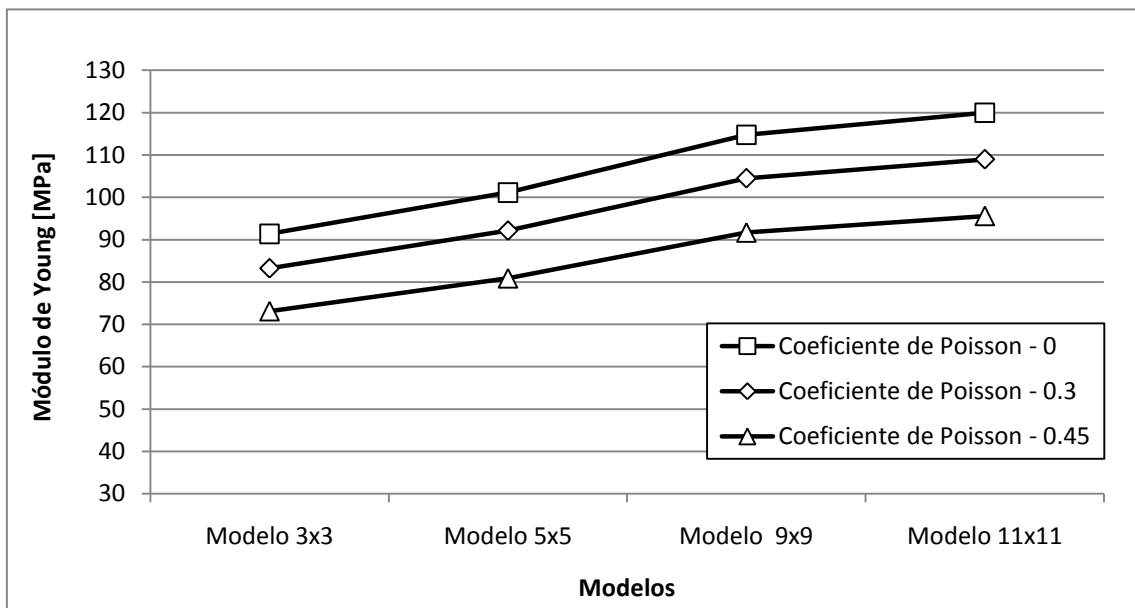


Figura 41: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção radial para o esforço de compressão.

Através da observação dos gráficos, é possível concluir que na direcção axial existe uma pequena variação dos valores de módulo de Young, sendo que as rectas determinadas se aproximam de um modo significativo de uma recta horizontal, realçando o processo de convergência. Relativamente à direcção tangencial é de salientar uma convergência, ainda que de uma forma menos notória, dado que o processo é realmente atingido para o modelo 11x11. A evolução das curvas na direcção radial assemelha-se em grande parte às análises feitas anteriormente. De salientar apenas a razão pela qual esta direcção apresenta valores tão baixos quando comparados com as direcções não-radiais, que se prende com o facto da existência de paredes totalmente direitas. Por outras palavras, efectuando uma comparação entre as estruturas das paredes nas direcções radiais e não-radiais, chega-se à conclusão que estas últimas apresentam maior facilidade em deformar-se, já que elas podem ser assemelhadas ao comportamento de uma mola. Nas Figuras 42 a 44, são apresentados os gráficos da evolução dos módulos de Young em função dos modelos definidos, para o esforço de tracção.

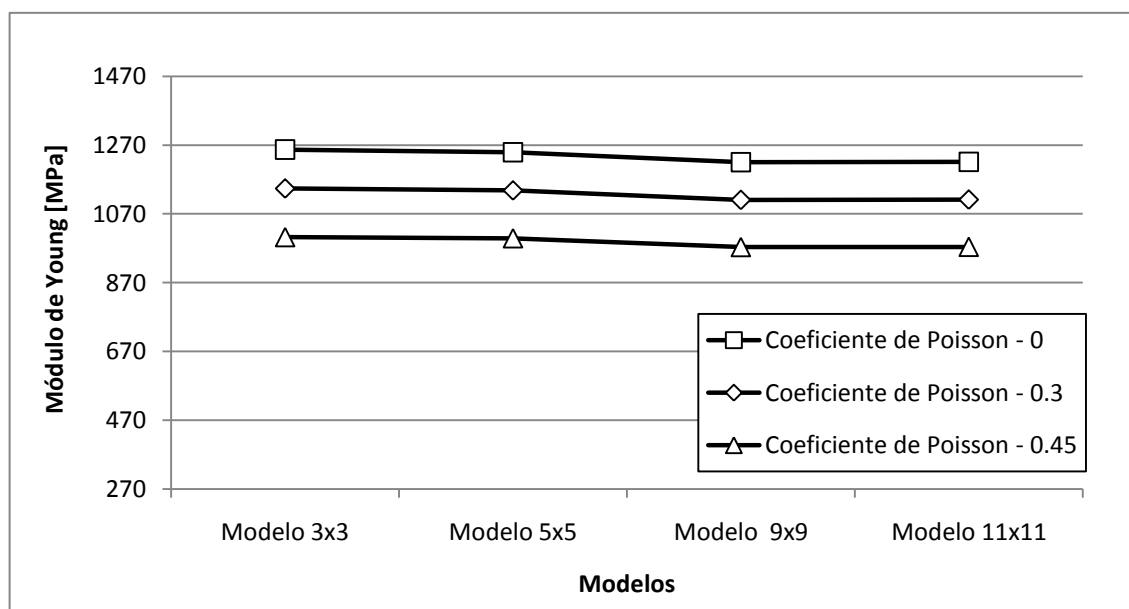


Figura 42: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção axial para o esforço de tracção.

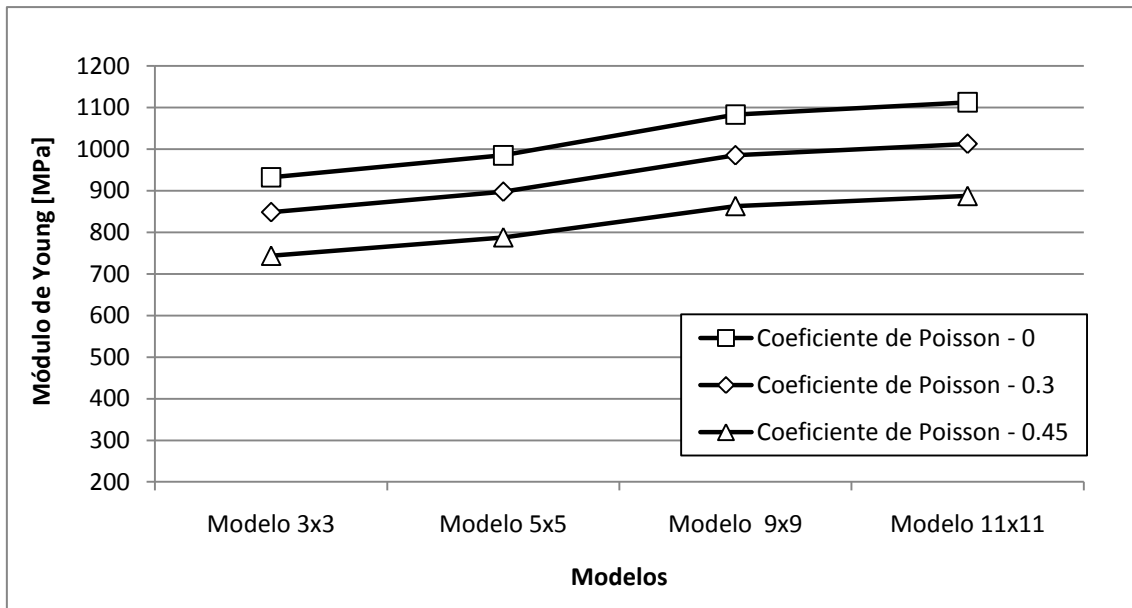


Figura 43: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção tangencial para o esforço de tracção.

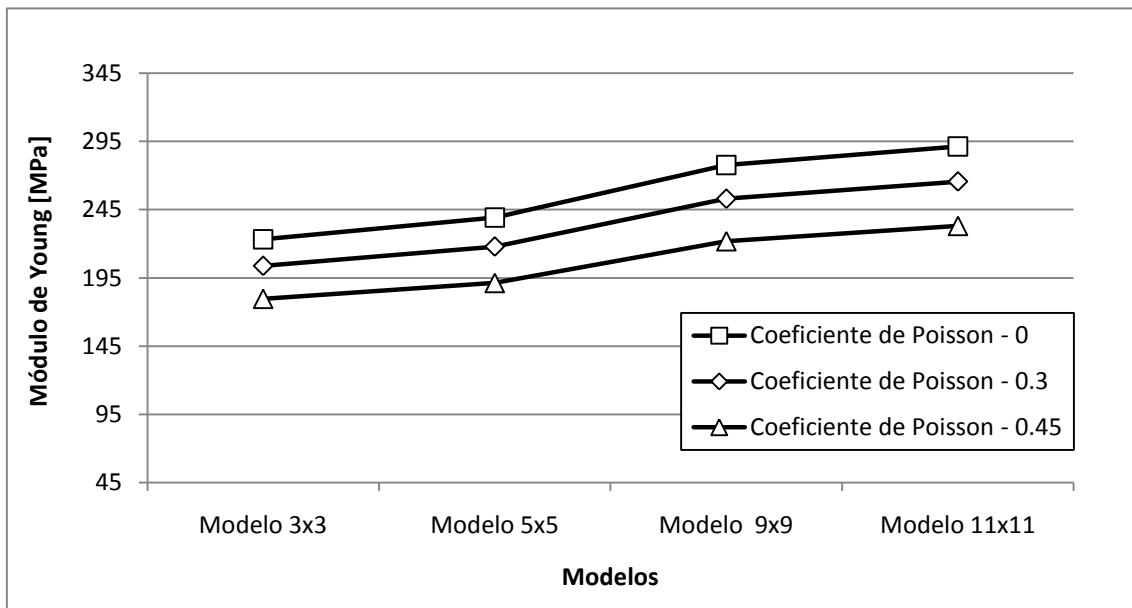


Figura 44: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção radial para o esforço de tracção.

Na generalidade dos gráficos, pode-se concluir que a evolução verificada nas curvas representadas segue o comportamento anteriormente descrito, tendo em conta as direcções a que se encontram associadas. Salienta-se apenas o aumento significativo dos valores do módulo de Young entre os modelos 5x5 e 9x9, nas direcções tangencial e radial.

Outro estudo que foi feito para comprovar a fiabilidade dos resultados obtidos está relacionado com o erro relativo associado à diferença entre os módulos de Young de tracção e compressão, efectuando uma comparação entre os valores obtidos e o valor obtido pela via experimental. Este estudo foi realizado com o objectivo de avaliar o efeito do módulo de Young ao longo das direcções definidas. Assim, através das Figuras 45 a 48, é possível analisar o efeito referido para modelos definidos:

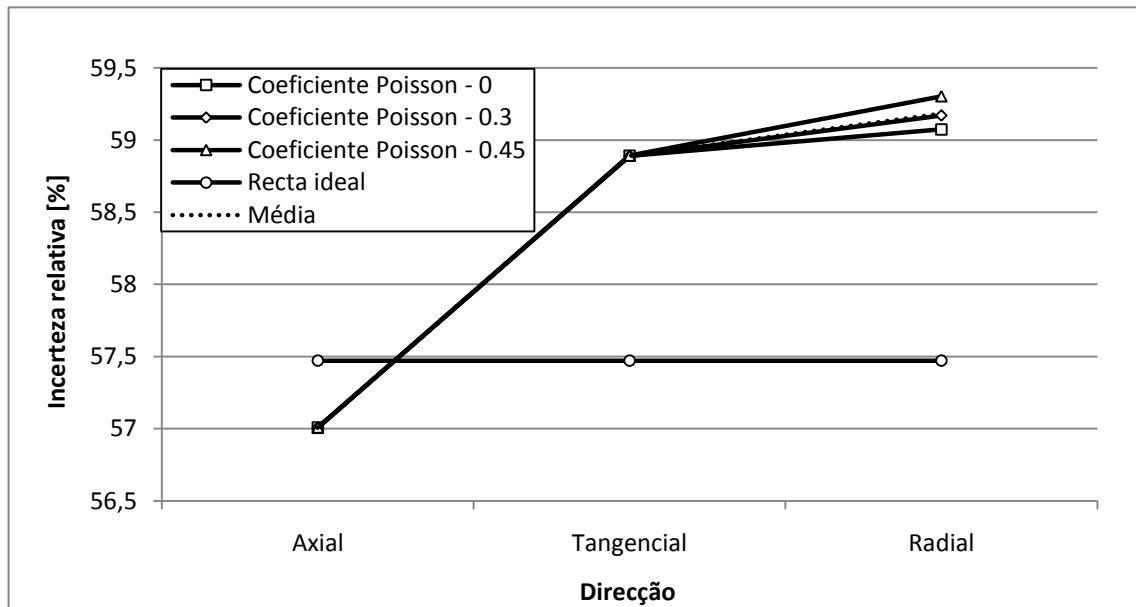


Figura 45: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das três direcções definidas, tendo por base o modelo 3x3.

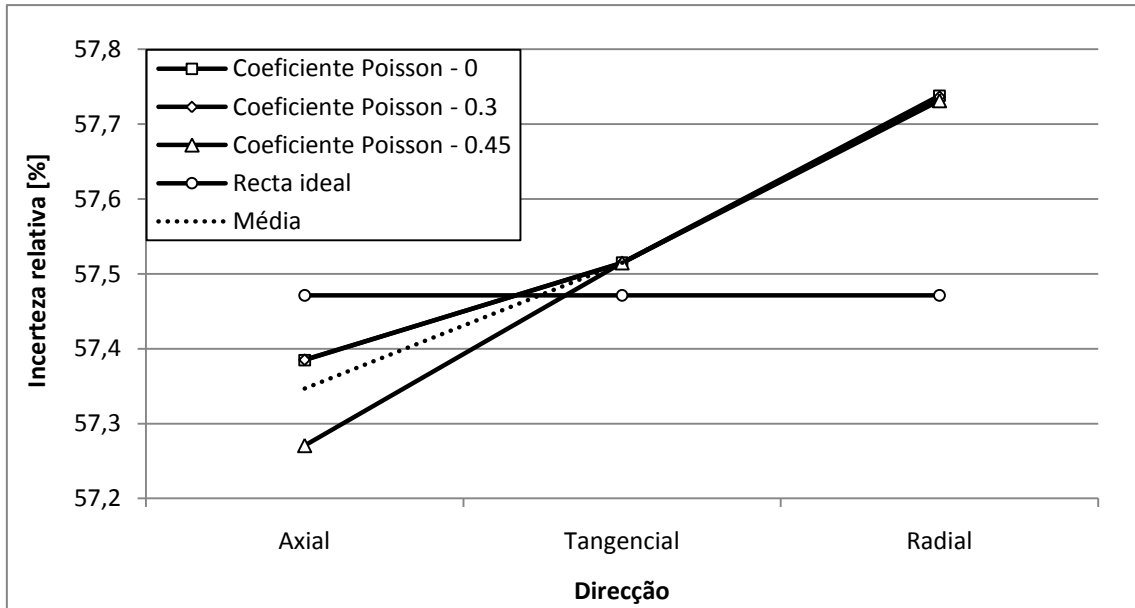


Figura 46: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das três direções definidas, tendo por base o modelo 5x5.

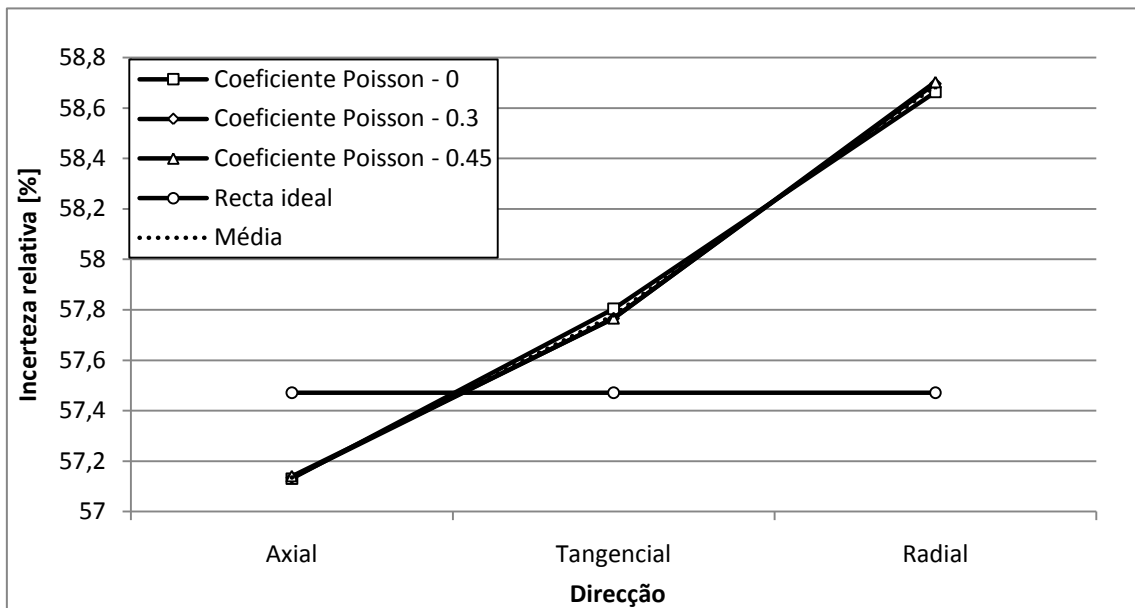


Figura 47: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das três direções definidas, tendo por base o modelo 9x9.

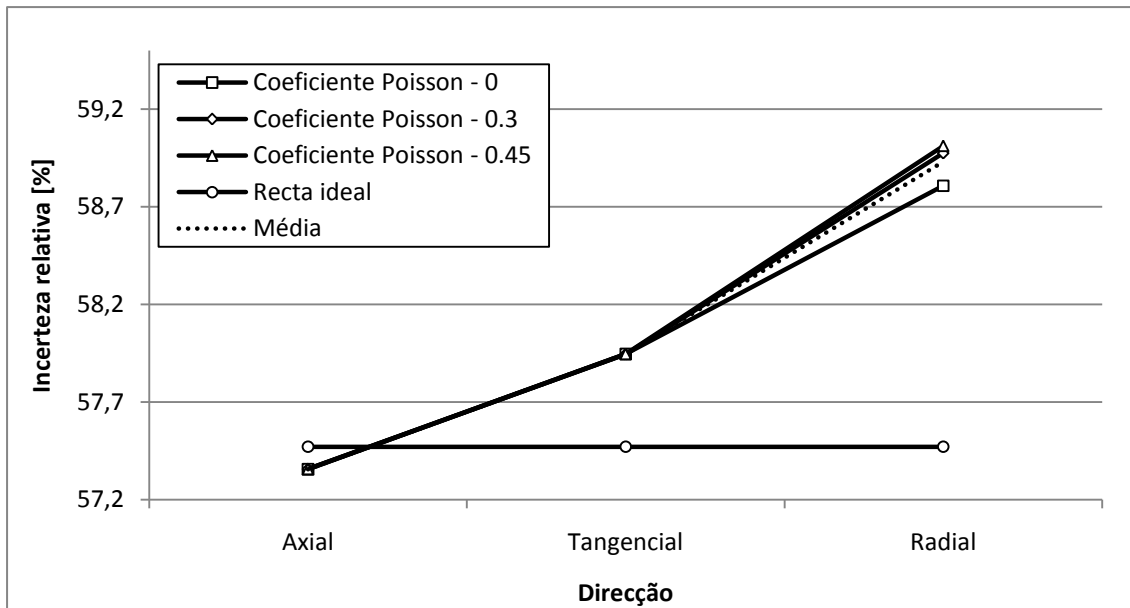


Figura 48: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das três direcções definidas, tendo por base o modelo 11x11.

Para se poder ter uma melhor percepção da aproximação referida, tendo como referência a razão entre os valores dos módulos de Young experimentais, R_1 , associados à tracção e compressão, respectivamente, foram calculadas as razões entre os módulos de Young para cada direcção definida e respectivo coeficiente de Poisson, R_2 , mas desta feita tendo em conta os valores obtidos numericamente. Posteriormente, calculou-se a média dos valores referentes a cada coeficiente de Poisson e estabeleceu-se uma comparação entre os referidos valores e a razão R_1 . Outro dos procedimentos adoptados está relacionado com o cálculo do erro associado à diferença entre as razões R_2 e R_1 . Efectuando uma análise aos gráficos representados, pode-se verificar que em cada gráfico existe uma curva apresentada a azul, representando esta a razão M referida anteriormente. Assim, o erro máximo associado a cada incerteza relativa calculada é aproximadamente 1.83% e encontra-se associada ao modelo 3x3, para um coeficiente de Poisson 0.45 e na direcção radial. Por sua vez, o erro mínimo atinge um valor cerca de 0.12%.

Outro estudo realizado prende-se com o processo de convergência do módulo de Young ao longo da complexidade do modelo espacial, número de células (Figuras 49 a 51).

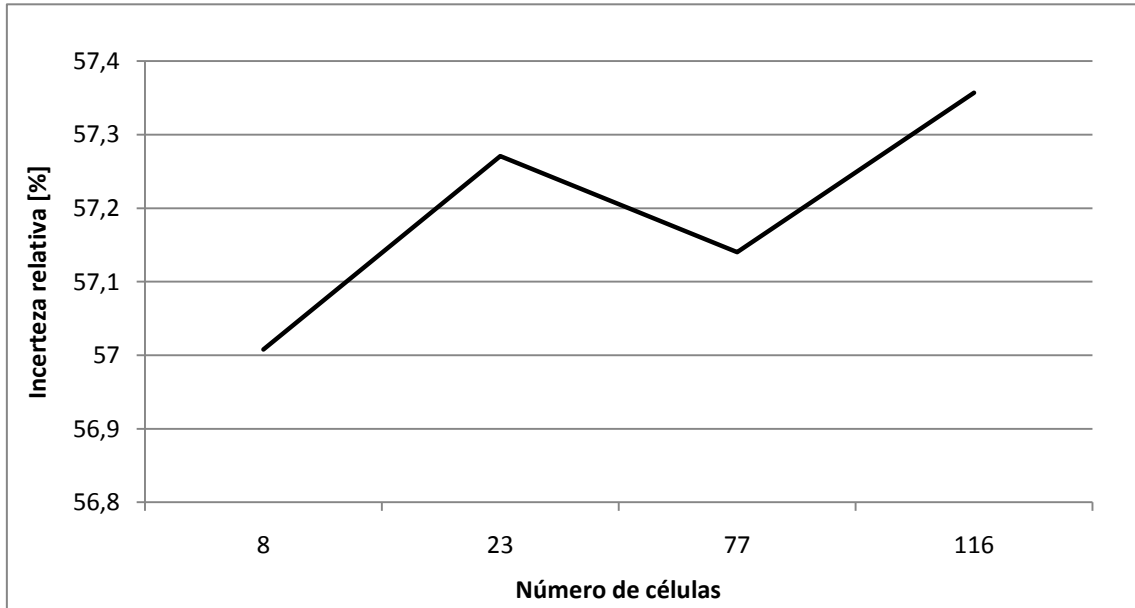


Figura 49: Evolução do parâmetro módulo de Young em função do número de células, considerando a direcção axial e um coeficiente de Poisson 0.45.

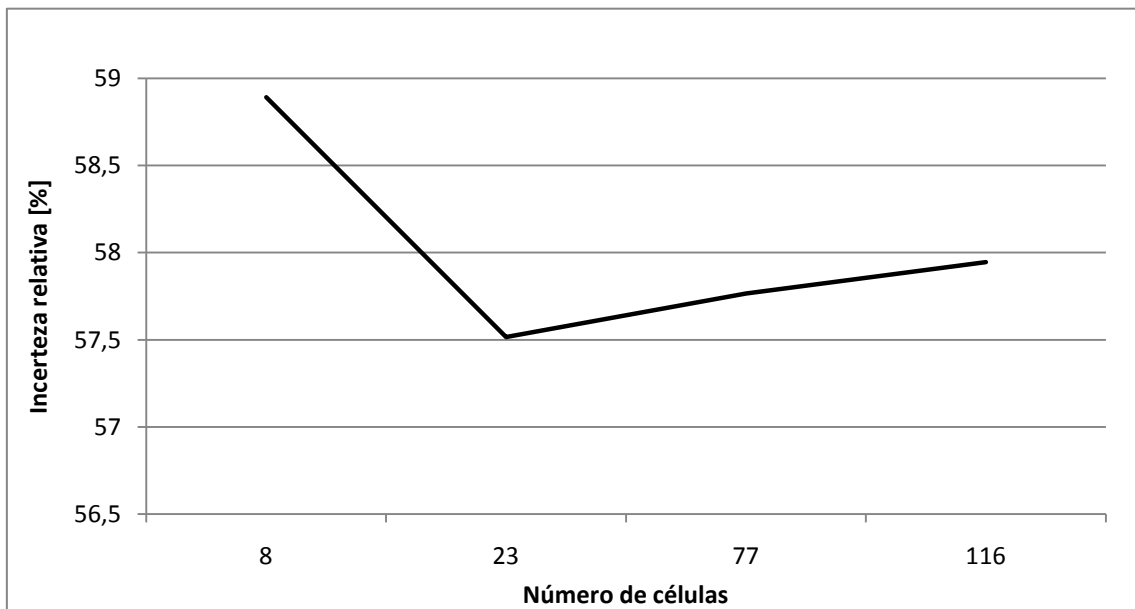


Figura 50: Evolução do parâmetro módulo de Young em função do número de células, considerando a direcção tangencial e um coeficiente de Poisson 0.45.

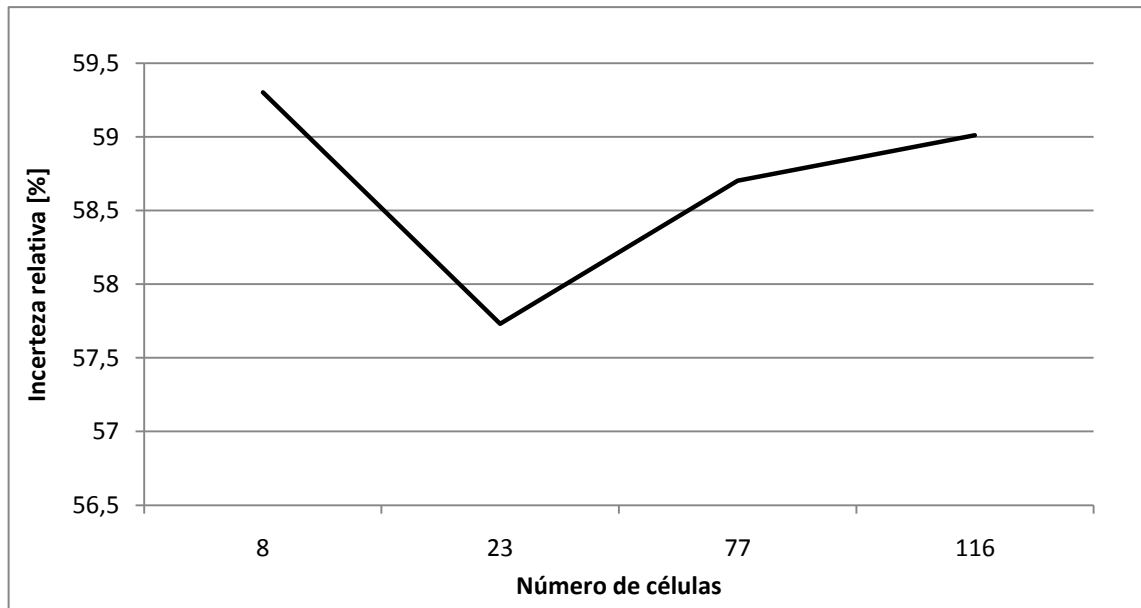


Figura 51: Evolução do parâmetro módulo de Young em função do número de células, considerando a direcção radial e um coeficiente de Poisson 0.45.

O processo de convergência referido é apenas notório nas direcções tangencial e radial, já que na direcção axial o efeito não é perceptível. A razão poderá residir no facto do quociente entre as células localizadas no topo do modelo e as células adjacentes ir diminuindo à medida que a complexidade do modelo vai aumentando.

4.4. Modelos de paredes onduladas

Como foi referido na secção inicial deste capítulo, as células de cortiça apresentam-se onduladas ou enrugadas devido em grande parte às tensões geradas durante o processo de formação e crescimento da cortiça. As tensões ocorrentes encontram-se associadas ao esforço de compressão na direcção radial e ao esforço de tracção na direcção tangencial. Assim, foram criados quatro modelos, os necessários até se verificar a convergência do

parâmetro de módulo de Young, à semelhança do caso anterior. Nesta fase, encontrada a malha óptima que garante a fiabilidade dos resultados obtidos, a etapa de convergência da malha continua válida para os casos que vão ser enumerados de seguida. O primeiro modelo criado é constituído por oito células, cuja célula padrão apresenta a configuração descrita pela Figura 52:

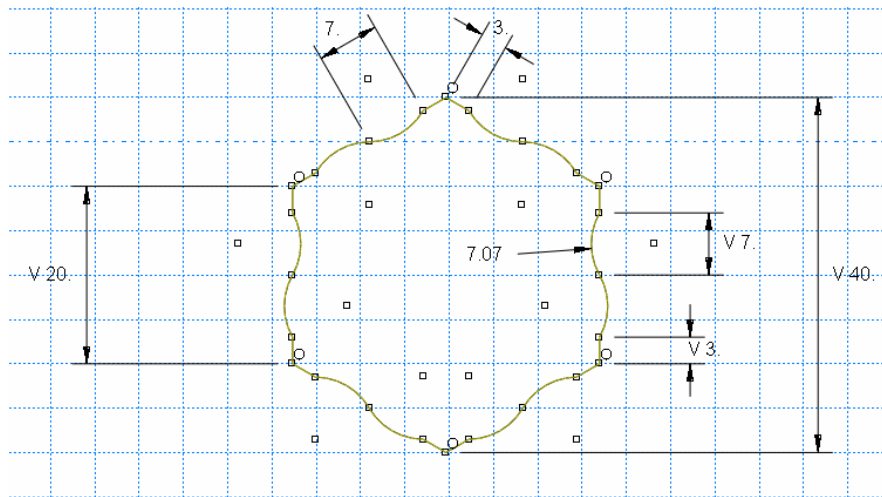


Figura 52: Cotagem da célula padrão dos modelos de células de paredes onduladas.

Através da visualização da cotagem da célula de base, é possível destacar além da existência de ondulações, a existência de rectas que se intersectam nos vértices do hexágono representado. Tal facto deveu-se ao conflito gerado na fase de processamento, apenas com a utilização de splines, para a concepção das ondulações. A razão prendeu-se com a dificuldade que o programa detinha em efectuar o cálculo da normal a cada vértice. Contudo, apesar desse contratempo, a configuração representada não deixa de ser uma boa aproximação à escala real.

4.4.1. Análise de convergência

Da mesma maneira que se procedeu ao processo de análise de convergência para os modelos de paredes lineares, também nos modelos de paredes onduladas o referido processo não podia ser descurado. Assim, mantendo as mesmas condições de fronteira,

assim como de carregamento, foram realizadas as várias simulações em que cada uma destas se encontrava associada a uma dimensão da malha definida. Os resultados obtidos foram os descritos na Tabela 8.

Tabela 8: Deslocamento do nó central da placa e a respectiva razão ao valor de referência (dimensão do elemento finito 4.5 μ m).

Dimensão do elemento finito [μm]	Deslocamento [μm]	Razão
20	188.095	1.003084
15	188.092	1.003100
12	188.094	1.003089
10	188.103	1.003041
7	188.125	1.002924
6	188.267	1.002167
5.5	188.267	1.002167
5	188.43	1.001300
4.75	188.43	1.001300
4.5	188.675	

Através dos valores representados na Tabela 8, foi possível a construção de um gráfico que permitisse evidenciar de uma forma clara o processo de convergência anteriormente descrito (Figura 53). A malha óptima encontrada encontra-se evidenciada na Figura 54.

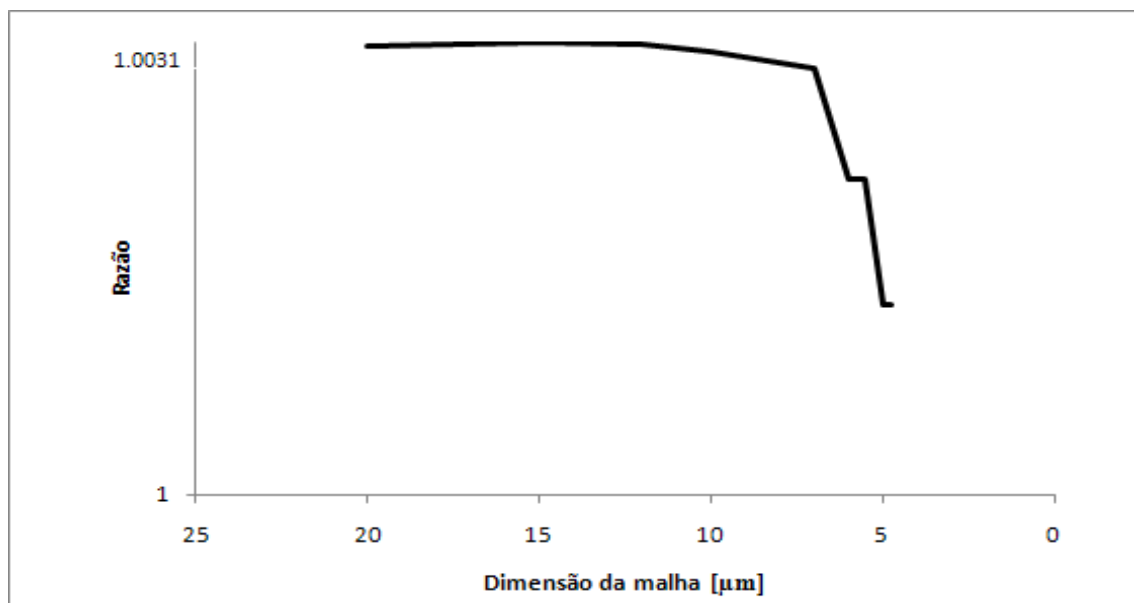


Figura 53: Curva de convergência associada aos modelos de paredes onduladas.

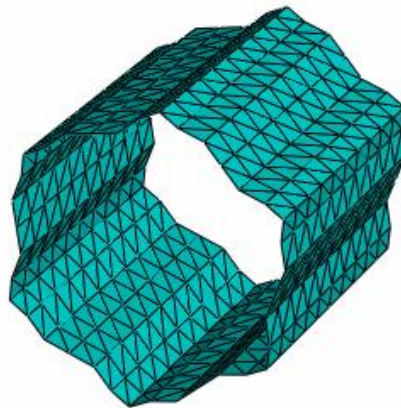


Figura 54: Malha óptima determinada – dimensão 4.5 μm .

4.4.2. Modelos estudados

Realizado o processo de convergência respeitante aos modelos de paredes onduladas, procede-se agora à apresentação da configuração dos modelos que irão servir de base aos resultados obtidos, os quais irão ser posteriormente analisados. Assim, na Figura 55, é apresentado o modelo 3x3.

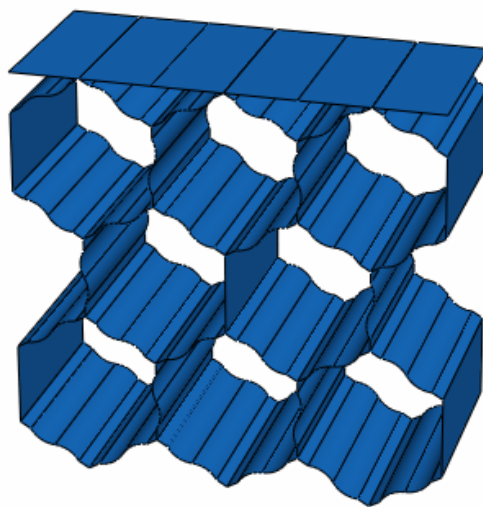


Figura 55: Configuração do modelo 3x3 na direcção axial.

Posteriormente foram criados três modelos, cujas dimensões foram: 5x5, 9x9 e 11x11. A configuração associada a cada um destes modelos encontra-se representada nas Figuras 56 a 58.

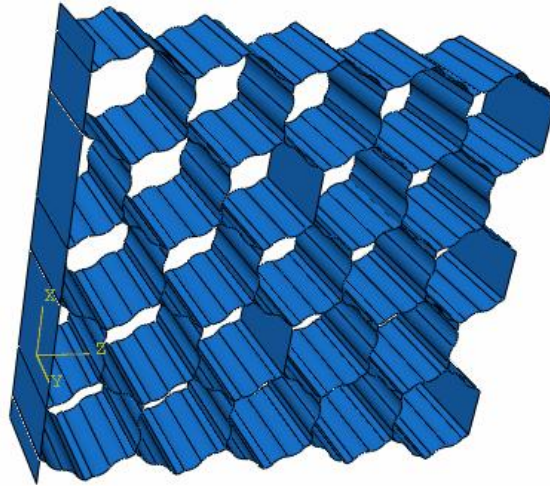


Figura 56: Configuração do modelo 5x5 na direcção tangencial.

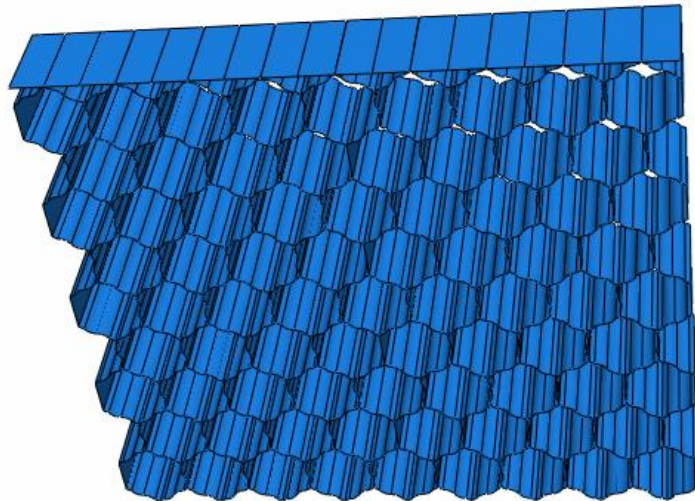


Figura 57: Configuração do modelo 9x9 na direcção axial.

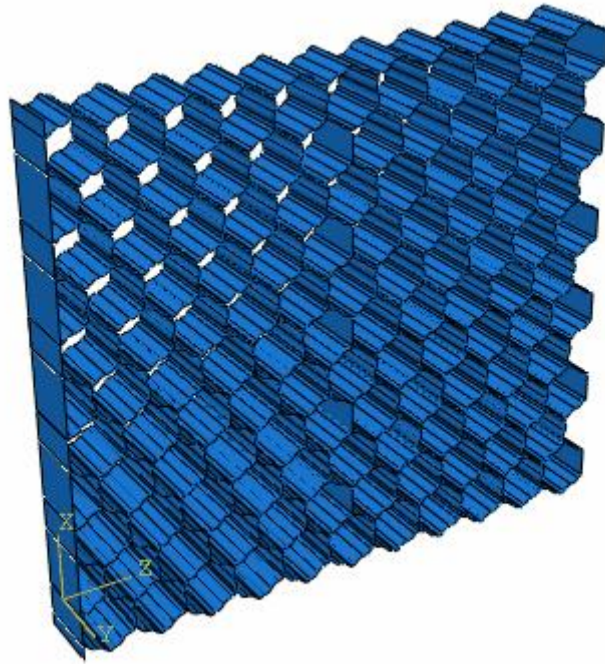


Figura 58: Configuração do modelo 11x11 na direcção tangencial.

4.4.3. Condições de fronteira e carregamento

Relativamente às condições de fronteira impostas aos modelos de paredes onduladas, é de referir que são as mesmas que foram aplicadas nos modelos de paredes lineares, o mesmo acontecendo com o carregamento.

4.4.4. Resultados e análise

À semelhança do que foi referido na secção 4.3.5., também nos modelos de paredes onduladas se procede à visualização dos resultados, assim como de uma análise cuidada e detalhada, com o intuito de extrair conclusões importantes sobre o estudo realizado. Numa primeira fase vão ser apresentadas as configurações dos modelos considerados, em que cada um deles se encontra associado a uma direcção definida. Numa segunda fase, vão ser apresentadas tabelas que reúnem os valores dos módulos de Young associados aos

diferentes modelos, direcções e coeficientes de Poisson. Nas Figuras 59 a 62, encontram-se representados os campos de deslocamentos associados aos modelos 3x3, 5x5, 9x9 e 11x11. Os primeiros dois modelos descritos encontram-se submetidos à compressão, e os dois últimos à tracção.

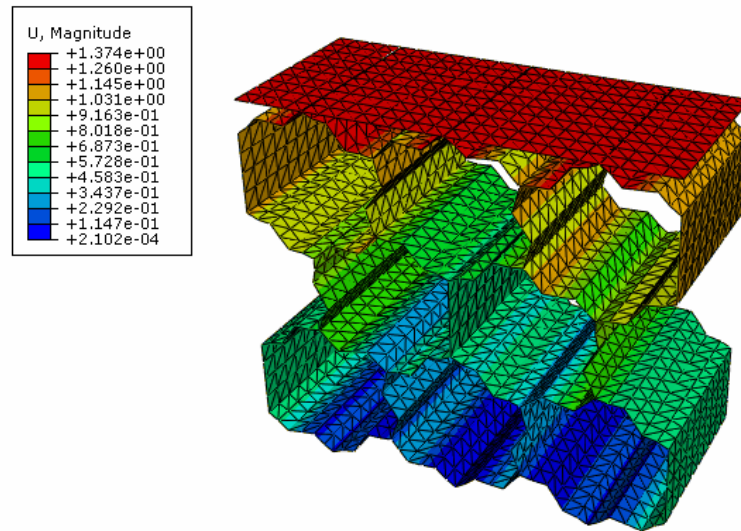


Figura 59: Campo de deslocamentos associado ao modelo 3x3 na direcção axial, para o esforço de compressão, tendo por base um coeficiente de Poisson 0.

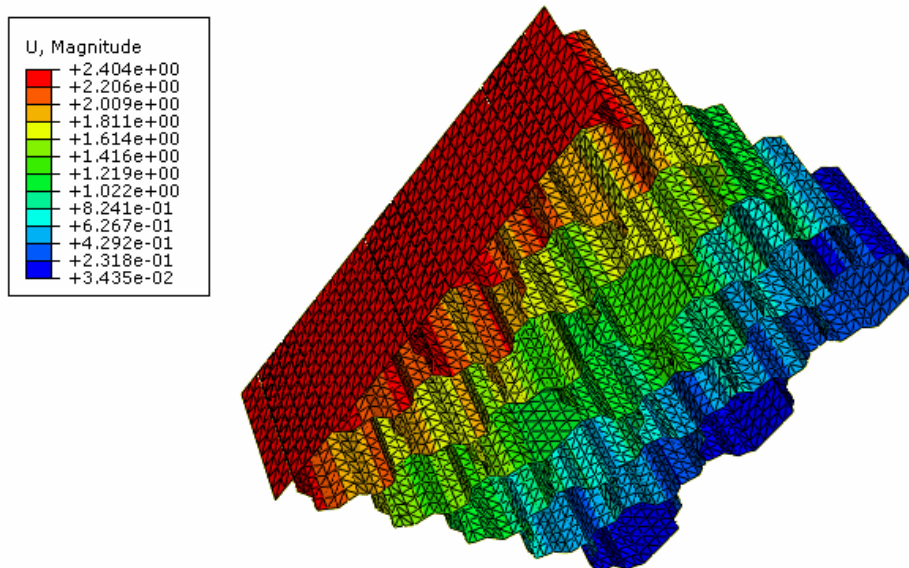


Figura 60: Campo de deslocamentos associado ao modelo 5x5 na direcção tangencial, para o esforço de compressão, tendo por base um coeficiente de Poisson 0.3.

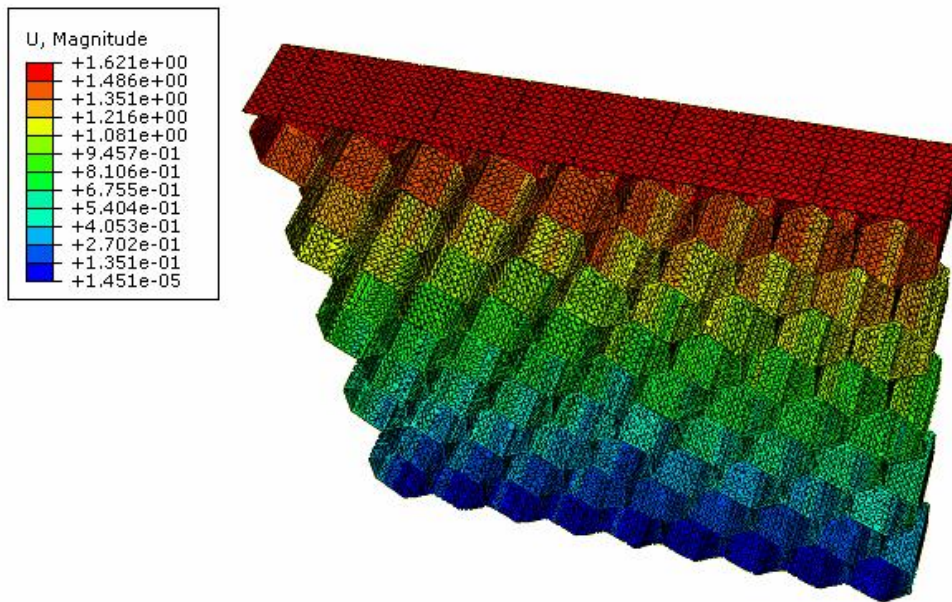


Figura 61: Campo de deslocamentos associado ao modelo 9x9 na direcção axial, para o esforço de tracção, tendo por base um coeficiente de Poisson 0.45.

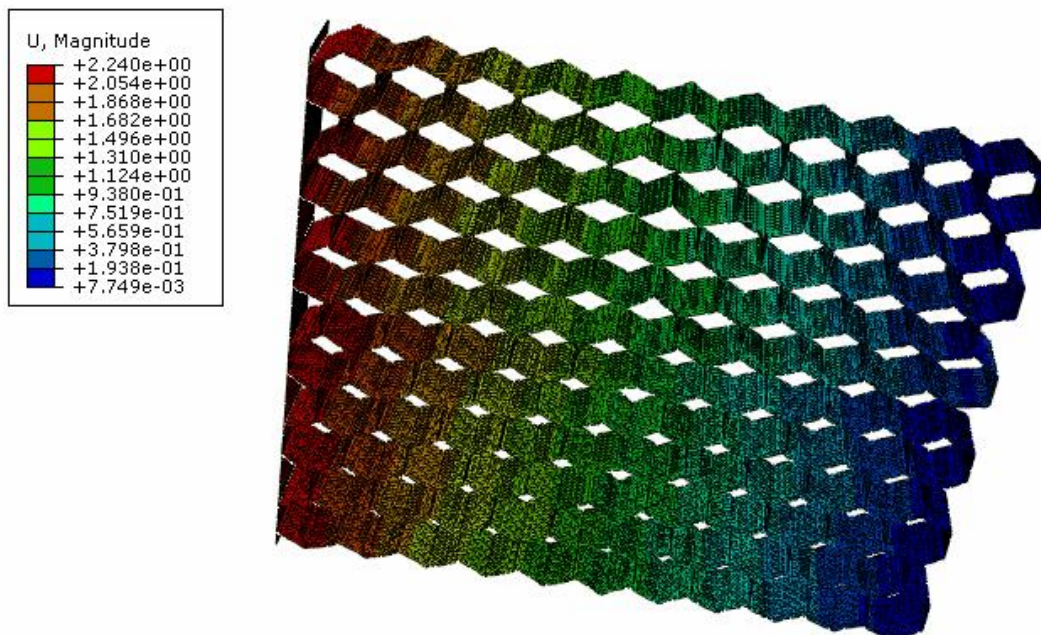


Figura 62: Campo de deslocamentos associado ao modelo 11x11 na direcção tangencial, para o esforço de tracção, tendo por base um coeficiente de Poisson 0.

À semelhança do procedimento adoptado para os modelos de células de paredes lineares, as Tabelas 9 e 10 contêm os valores obtidos para o parâmetro módulo de Young, referentes apenas às direcções axial e tangencial para os modelos de paredes onduladas. No que respeita à direcção radial, é de referir que os modelos construídos apenas permitiam a visualização de valores de módulo de Young correspondentes a deformações superiores a 44%. Como referido na primeira parte deste trabalho, a direcção radial assume um menor relevo comparativamente às restantes direcções pela justificação já citada, pelo que a ausência de resultados associados à direcção mencionada pode ser considerada irrelevante.

Tabela 9: Módulos de Young associados aos modelos de paredes onduladas 3x3 e 5x5, considerando regime não-linear.

		3x3			5x5		
		Coeficiente Poisson			Coeficiente Poisson		
		0	0.3	0.45	0	0.3	0.45
Compressão	Axial	1443.78029	1336.40575	1189.0969	1488.92625	1377.54825	1225.20417
	Tangencial	1046.64505	968.87504	862.14056	1168.59449	1081.34677	961.90017
E [MPa] - Tracção	Axial	3389.66395	3137.55795	2791.7184	3495.52425	3234.03164	2876.37826
	Tangencial	2394.339	2216.04817	1972.6299	2743.94738	2539.08412	2258.60531

Tabela 10: Módulos de Young associados aos modelos de paredes onduladas 9x9 e 11x11, considerando regime não-linear.

		9x9			11x11		
		Coeficiente Poisson			Coeficiente Poisson		
		0	0.3	0.45	0	0.3	0.45
Compressão	Axial	1492.51312	1380.70825	1227.8959	1497.39463	1379.67598	1226.97594
	Tangencial	1299.37652	1202.14279	1069.17779	1333.86033	1234.0307	1097.52035
E [MPa] - Tracção	Axial	3503.6953	3241.24157	2881.51894	3500.94628	3238.69563	2880.25043
	Tangencial	3053.03019	2824.57148	2512.14849	3135.9	2901.20778	2580.26786

No que diz respeito aos gráficos obtidos, tendo por base os valores representados nas Tabelas 9 e 10, existem pequenas variações que serão referidas posteriormente. Numa primeira fase, irão ser apresentados os gráficos referentes unicamente ao esforço de compressão, enquanto numa segunda fase irão ser englobados os gráficos associados ao esforço de tracção.

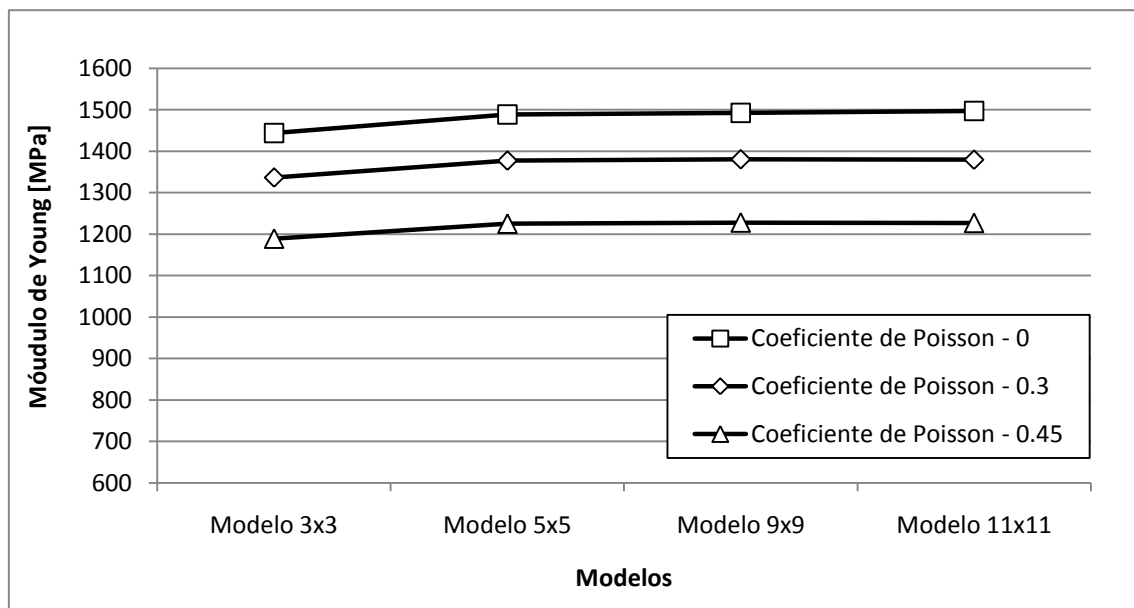


Figura 63: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção axial, para o esforço de compressão.

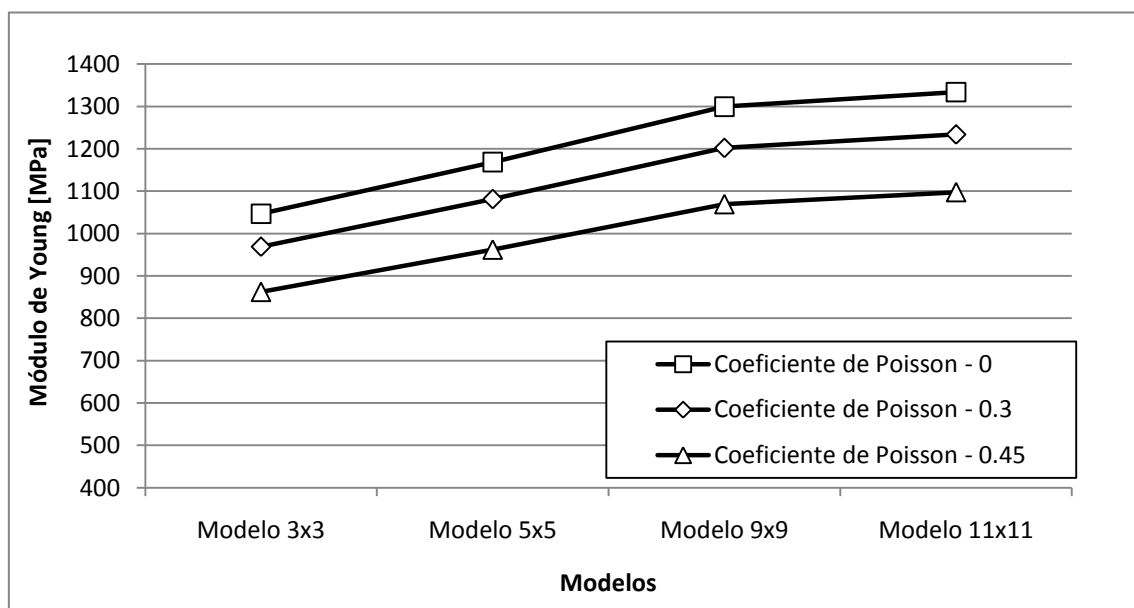


Figura 64: Variação do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção tangencial, para o esforço de compressão.

Através da análise dos gráficos das Figuras 63 e 64, é possível observar uma convergência de valores em ambas as direcções, sendo que na direcção axial esse processo é manifestamente reconhecido, já que existe uma estabilização de valores a partir do modelo 5x5. No que respeita à direcção tangencial, embora o processo de convergência não seja tão claro, é notória a tendência que a curva apresenta, ainda que mínima, para valores próximos dos correspondentes ao modelo 11x11.

Em relação ao esforço de tracção, a evolução das curvas representadas apresentam, em grande parte, uma semelhança com as curvas correspondentes ao esforço de compressão. Assim, no primeiro gráfico, Figura 65, é de salientar a convergência observada, sendo esta mais pronunciada no modelo 11x11, aliás como seria de esperar, já que o objectivo se baseava na obtenção de um modelo óptimo, através do qual a variação do parâmetro módulo de Young fosse reduzida. Na direcção tangencial, Figura 66, este processo é apenas identificável para valores correspondentes ao modelo 11x11, já que anteriormente se assiste a uma linearidade entre os valores obtidos.

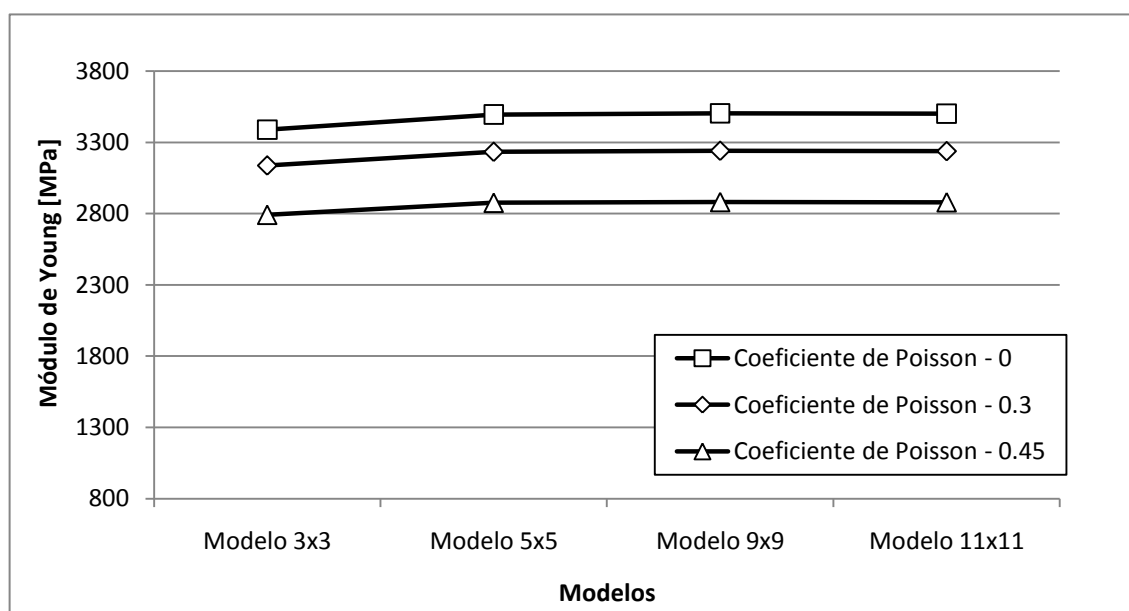


Figura 65: Evolução do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção axial, para o esforço de tracção.

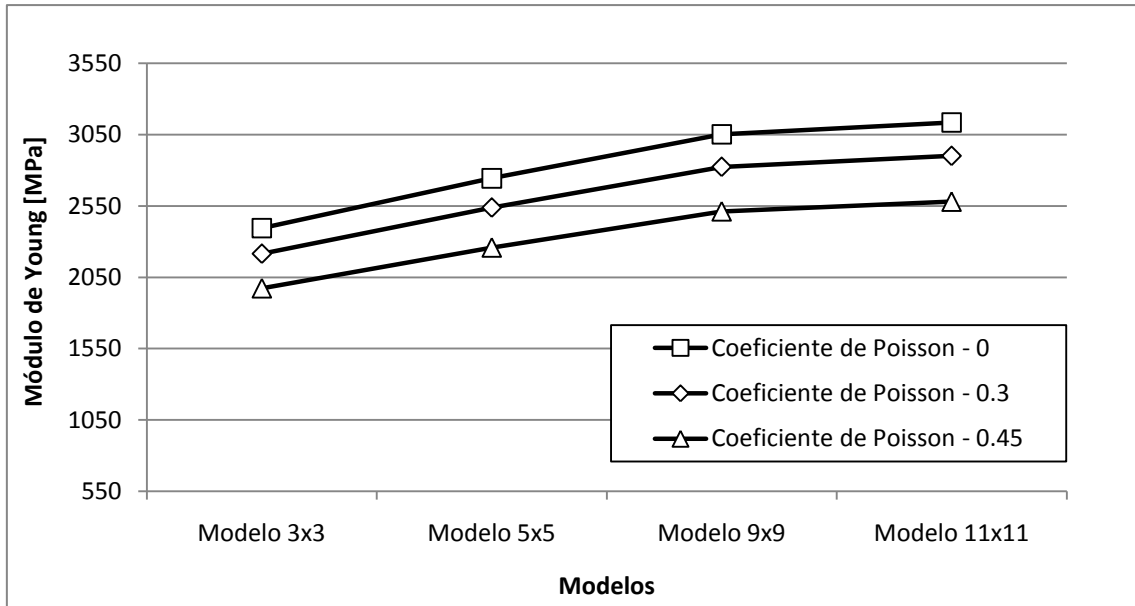


Figura 66: Evolução do módulo de Young em função dos modelos, associada à direcção tangencial, para o esforço de tracção.

Analogamente ao que foi realizado na secção dos modelos de paredes lineares, analisa-se de seguida o efeito da direcção na variação do módulo de Young (Figuras 67 a 70).

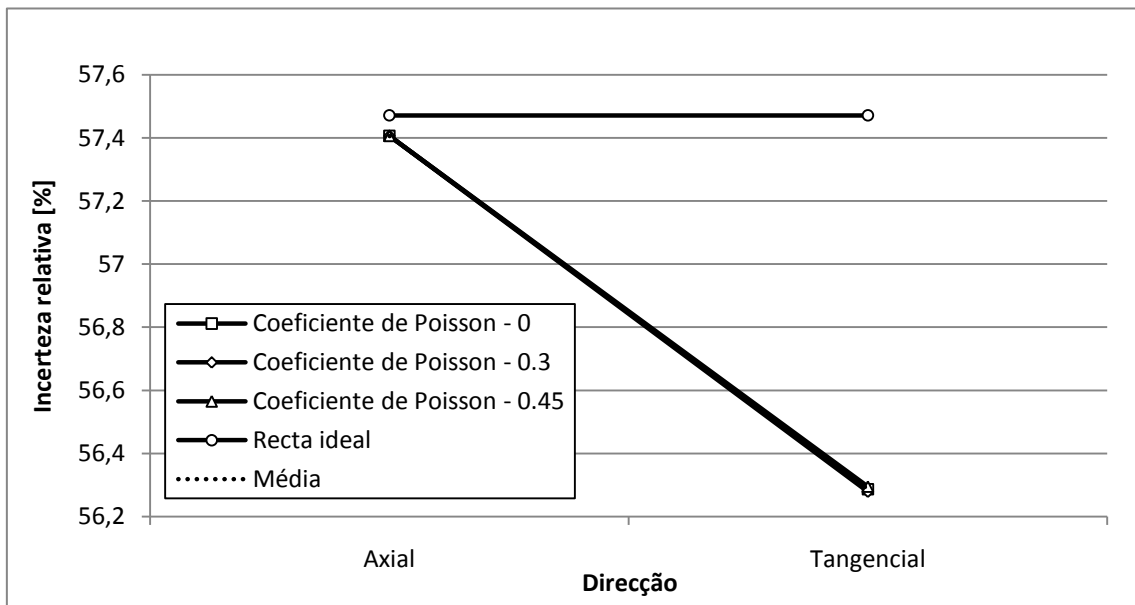


Figura 67: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das direcções existentes, considerando o modelo 3x3.

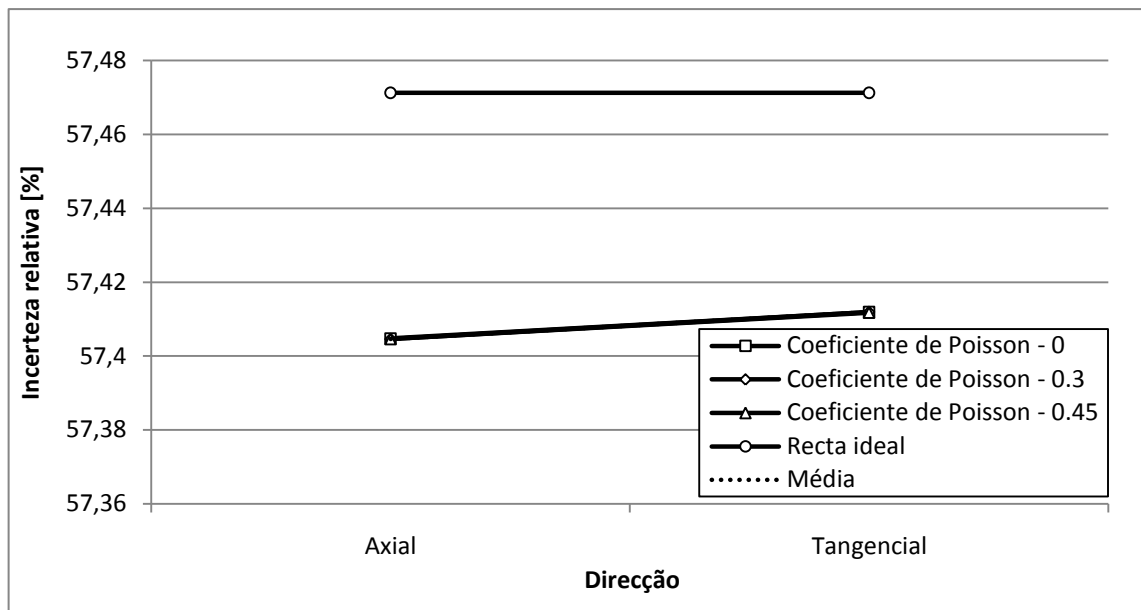


Figura 68: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das direções existentes, considerando o modelo 5x5.

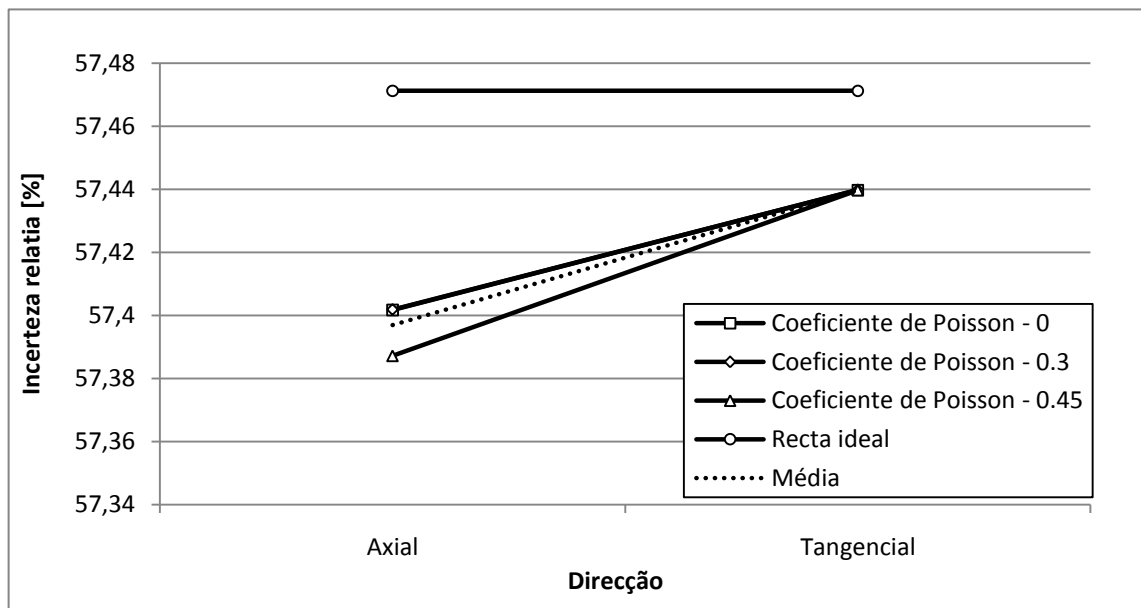


Figura 69: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das direções existentes, considerando o modelo 9x9.

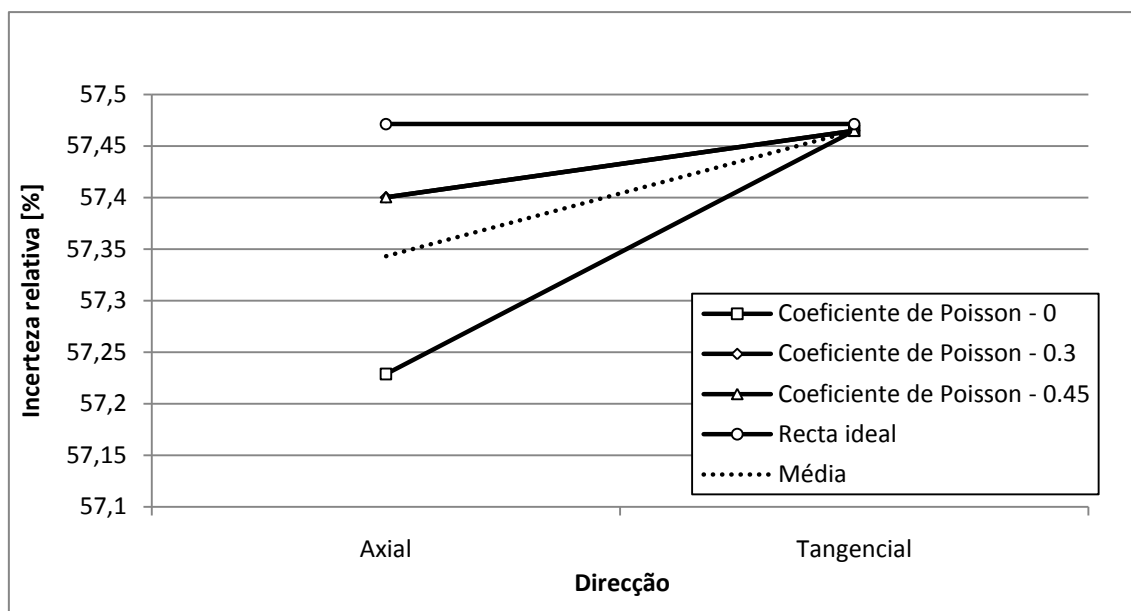


Figura 70: Evolução do parâmetro módulo de Young em função das direções existentes, considerando o modelo 11x11.

A conclusão que se pode extrair através da análise dos gráficos representados é de que existe uma razoável aproximação dos valores do parâmetro módulo de Young obtidos, em torno da recta ideal. Fazendo uma comparação entre os quatro gráficos, constata-se que o modelo que melhor traduz a aproximação referida é o último, ou seja, o modelo 11x11. O erro máximo atingido é aproximadamente 1.18%, sendo o erro mínimo de 0.006%. De salientar apenas o facto de que a convergência no caso dos modelos de paredes onduladas se faz sentir na direcção tangencial. De seguida, são apresentados nas Figuras 71 e 72, gráficos que evidenciam o efeito do parâmetro módulo de Young ao longo do detalhe do modelo espacial (número de células).

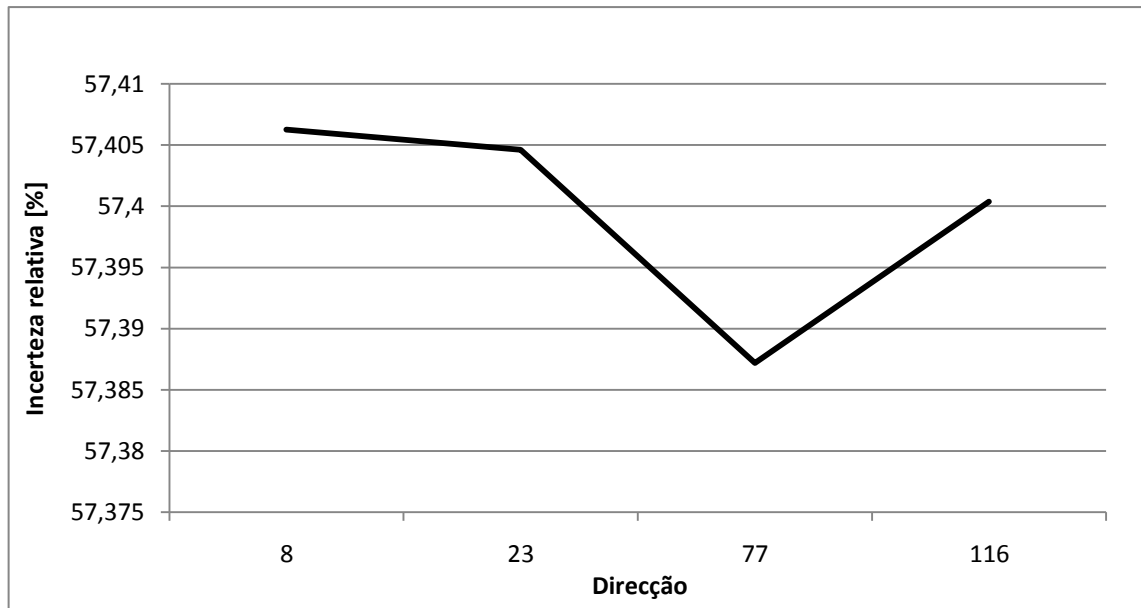


Figura 71: Evolução do parâmetro módulo de Young em função do número de células, considerando a direcção axial e um coeficiente de Poisson 0.45.

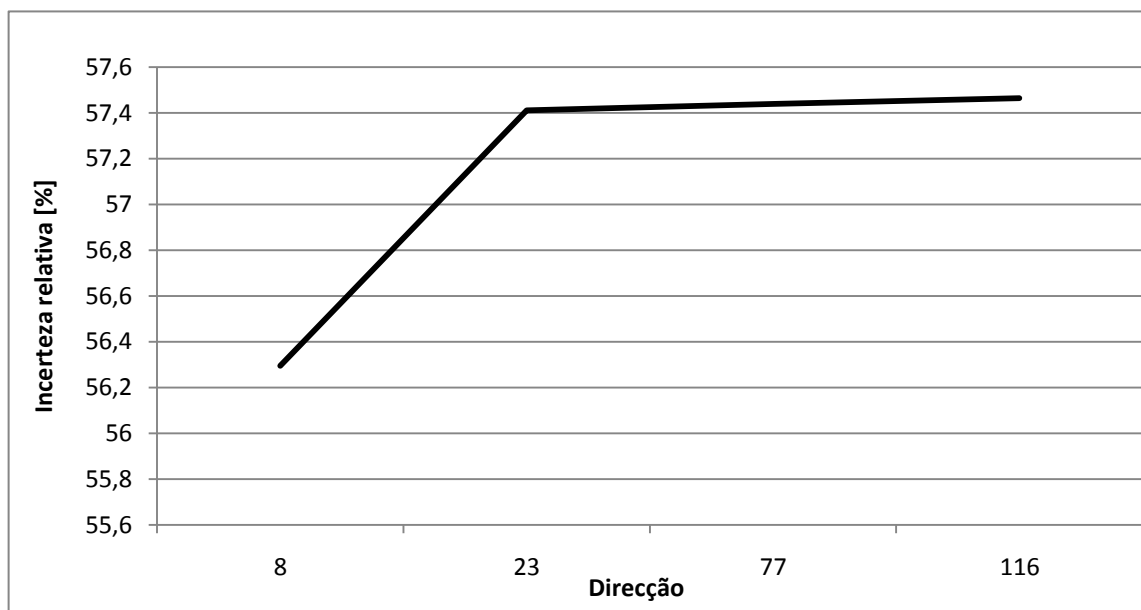


Figura 72: Evolução do parâmetro módulo de Young em função do número de células, considerando a direcção tangencial e um coeficiente de Poisson 0.45.

Através da visualização dos gráficos, conclui-se que existe uma convergência dos valores referentes ao parâmetro módulo de Young associados à direcção tangencial. O mesmo não se sucede com a direcção axial pelo motivo já mencionado na secção dos modelos de paredes lineares.

4.5. Análise global dos resultados e discussão

Nesta secção, vai-se proceder a uma comparação entre os dois tipos de modelos explanados até ao ponto actual do presente trabalho. Assim, tendo em conta que a estrutura dos modelos de paredes lineares se situa um pouco distante da estrutura real das células de cortiça, os resultados obtidos vieram confirmar em certa medida a afirmação referida anteriormente. Essas pequenas diferenças são reflectidas através do cálculo das incertezas relativas associadas às diferenças entre os esforços de tracção e compressão ao nível numérico, as quais se encontram um pouco desfasadas relativamente às incertezas referentes ao estudo experimental. Perante este estudo realizado, e sabendo desde logo que a estrutura definida não caracterizava totalmente a estrutura real da cortiça, procedeu-se à ondulação das paredes, verificando-se assim o seu efeito nos resultados finais. Os resultados obtidos foram mais satisfatórios já que se conseguiu diminuir consideravelmente o erro associado às diferenças entre os módulos de Young de tracção e compressão, atingindo uma boa convergência.

Uma conclusão bastante importante a ser extraída está relacionada com a limitação inerente à própria análise linear realizada, já que este regime encontra-se presente num curto período da curva tensão-deformação. Tendo em conta esta limitação, houve a necessidade de recorrer a uma análise não-linear para poder avaliar e caracterizar de uma melhor forma o comportamento mecânico da cortiça, dado que o regime referido perdura na maior parte da curva.

Outra das conclusões que convém referir está relacionada com os baixos valores de módulo de Young obtidos para a direcção radial. Este facto, como foi referido na secção 4.3.5., é explicado tendo em conta a estrutura que as células apresentam na direcção radial.

5. Estudo numérico – Análise não-linear

À semelhança do capítulo anterior, é apresentado neste capítulo os resultados numéricos obtidos através de simulações realizadas, tendo por base os modelos já referidos anteriormente, mas desta feita tendo em consideração o regime não-linear geométrico. Este tipo de análise assume uma importância bastante relevante, dado que é só através dela que se consegue identificar um comportamento diferente da estrutura quando sujeita à compressão e tracção, que se considera estar associado à forma diferenciada como a estrutura celular se deforma nas diferentes direcções. Isto só é possível de ser analisado recorrendo a grandes deformações, considerando uma análise não-linear geométrica. Por essa razão, espera-se que os resultados obtidos venham a ser mais coerentes que os obtidos pela análise linear.

5.1. Metodologia de estudo

Em geral, a metodologia adoptada para a realização deste estudo numérico é a referida e descrita na secção 4.1. De referir que para este estudo foram utilizados apenas os modelos com uma configuração 5x5. Os modelos estudados tiveram em consideração as direcções axial e tangencial. Tendo por base os gráficos das Figuras 22 e 24, obtidos durante os ensaios experimentais, concluiu-se que o valor de deformação referenciado era insuficiente para uma boa caracterização da análise não-linear. O motivo que justifica a ausência de modelos de paredes onduladas neste tipo de análise está associado à enorme dificuldade na obtenção de valores que fossem minimamente aceitáveis. Por outras palavras, embora se tenha procedido a um grande número de simulações, em que os alvos de estudos fossem os modelos de paredes onduladas, na prática verificou-se que os valores atingidos, no que

respeita aos parâmetros de deformação e tensão, se distanciavam significativamente dos valores associados à curva experimental.

Outro aspecto importante de realçar está associado ao facto de a etapa de convergência ser suprimida, já que os estudos necessários associados a esta fase já foram anteriormente realizados, continuando ainda válidos. Assim, serão apresentados e discutidos, de seguida, os resultados obtidos.

5.2. Resultados e análise

Como referido anteriormente, nesta secção vão ser apresentados os valores associados ao parâmetro módulo de Young, obtidos para os esforços de compressão e tracção, tendo em consideração uma análise não-linear. Os referidos valores encontram-se representados na Tabela 11.

Tabela 11: Módulos de Young obtidos para o modelo 5x5, numa análise não-linear.

		Ceoficientes de Poisson		
		0	0.3	0.45
Compressão	Axial	625	590	547
	Tangencial	490	470	440
Tracção	Axial	880	800	700
	Tangencial	705	640	565

De seguida, são apresentados alguns gráficos (Figuras 73 a 76) que ilustram a evolução das diferentes curvas, associadas aos valores referidos na Tabela 11.

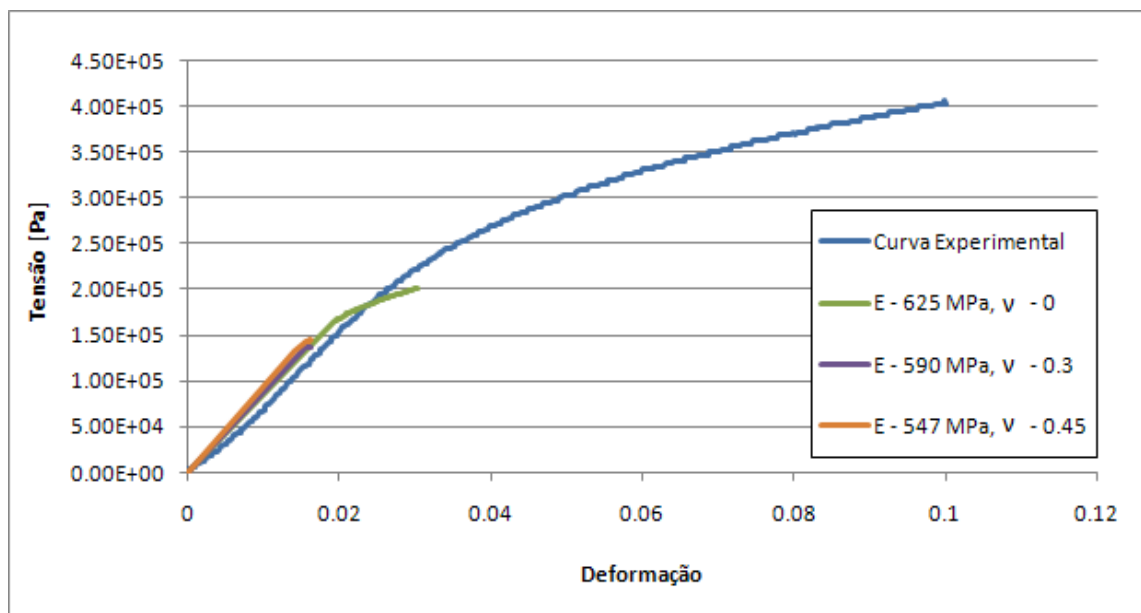


Figura 73: Curvas associadas aos módulos de Young, obtidos durante o esforço de compressão na direção axial.

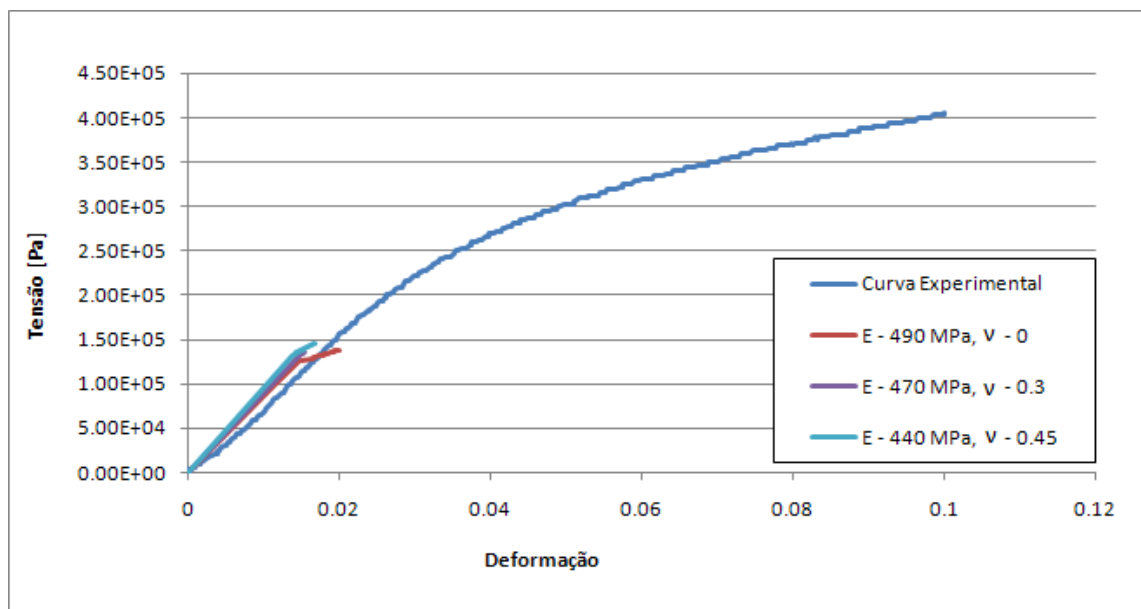


Figura 74: Curvas associadas aos módulos de Young, obtidos durante o esforço de compressão na direção tangencial.

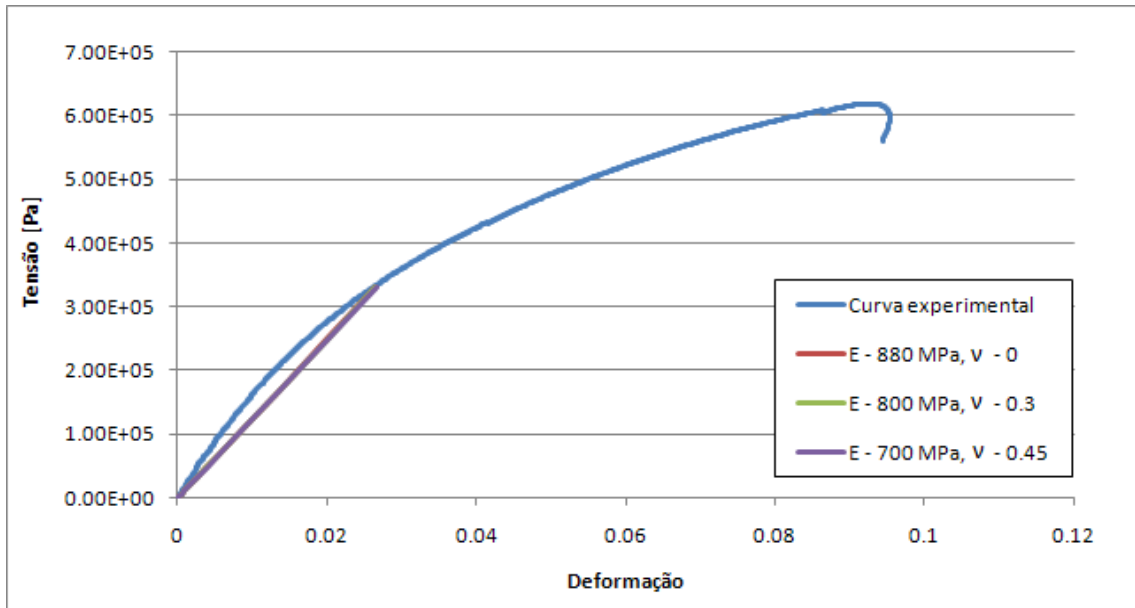


Figura 75: Curvas associadas aos módulos de Young, obtidos durante o esforço de tração na direção axial.

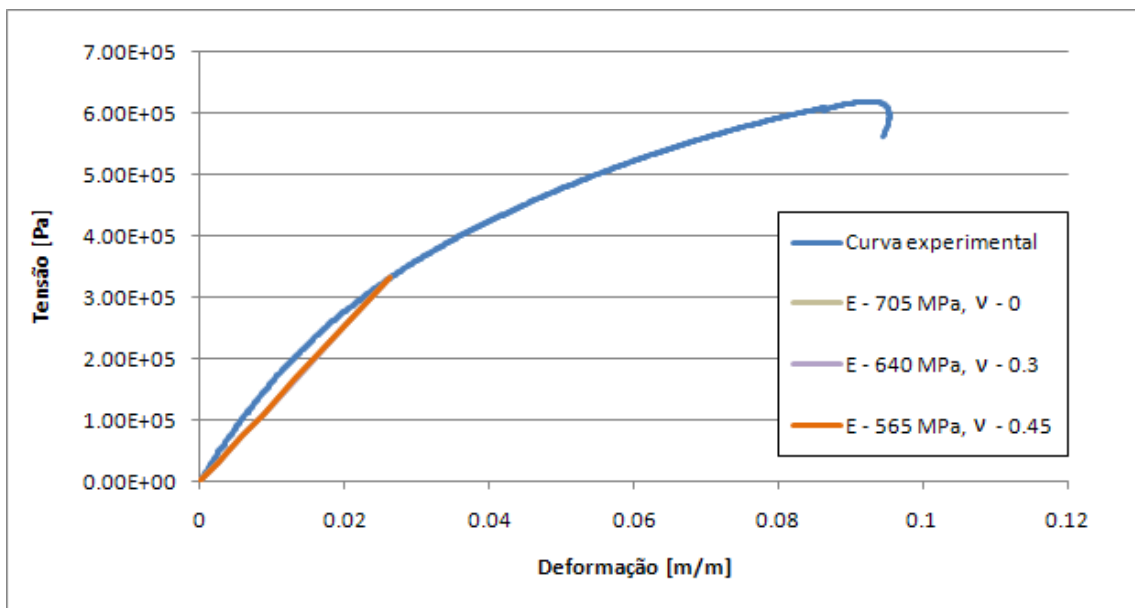


Figura 76: Curvas associadas aos módulos de Young, obtidos durante o esforço de tração na direção tangencial.

Numa primeira instância, é realizada a análise dos gráficos relacionados apenas com o esforço de compressão e só posteriormente se procede à análise dos gráficos associados ao esforço de tracção. Assim, através da análise dos gráficos das Figuras 73 e 74, é possível verificar na generalidade, uma boa aproximação das curvas obtidas numericamente relativamente à curva experimental. De salientar apenas o facto associado aos baixos valores de deformação existentes, que se prende com a grande dificuldade que o programa detinha na determinação de valores superiores a 20%. Outra das conclusões que se pode extrair, apesar da limitação referida anteriormente, está relacionada com o coeficiente de Poisson que melhor caracteriza o regime não-linear evidenciado, cujo valor é 0.45.

Analisando agora os gráficos das Figuras 75 e 76, é possível destacar, em ambos, o aspecto quase linear que as curvas apresentam na sua configuração. Esta limitação é intrínseca ao próprio programa, já que embora a opção da não-linearidade geométrica estivesse activada, a deformada final não apresentava qualquer indício de não-linearidade.

Um aspecto importante de ser realçado, e comum aos dois esforços, está associado à inexistência de valores associados à direcção radial em qualquer um dos gráficos apresentados. O facto baseia-se na divergência de valores obtidos numericamente, relativamente aos valores experimentais, originando por sua vez um desfasamento entre as curvas.

De seguida, a título de exemplo, são apresentadas algumas deformadas associadas aos dois esforços descritos:

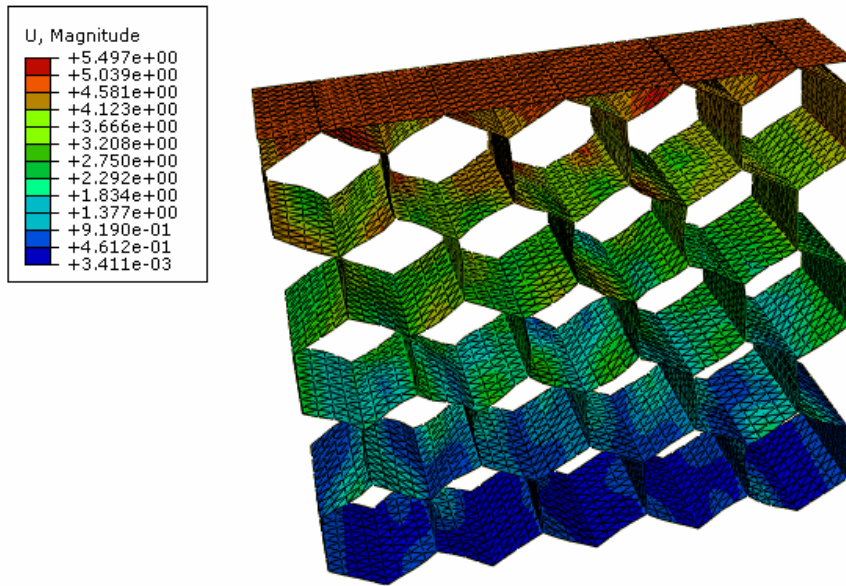


Figura 77: Deformada associada ao modelo 5x5, para o esforço de compressão, considerando a direção axial e um coeficiente de Poisson 0.

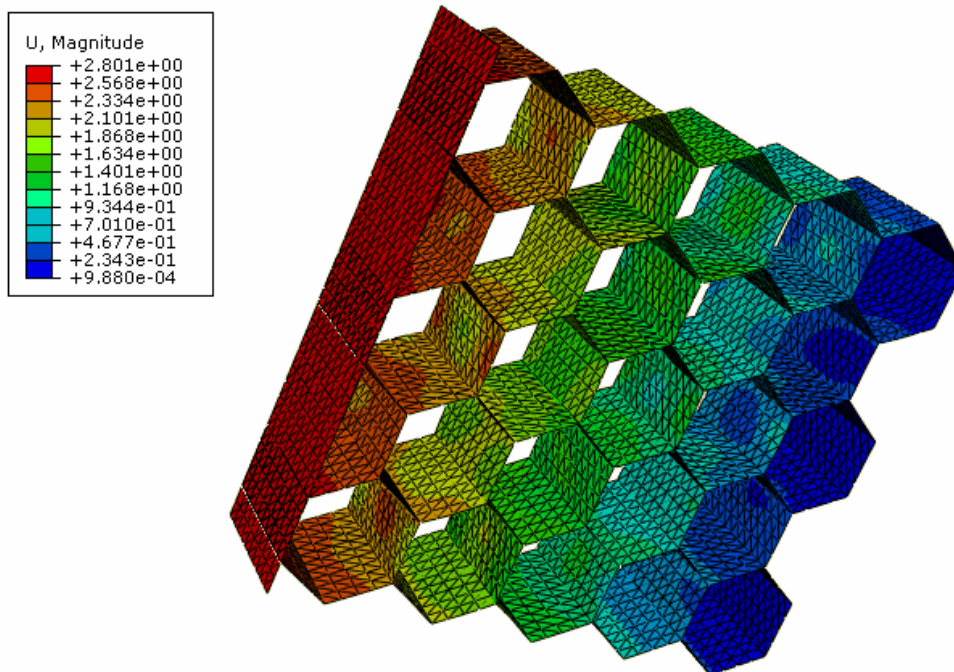


Figura 78: Deformação associada ao modelo 5x5, para o esforço de compressão, considerando a direção tangencial e coeficiente de Poisson 0.3.

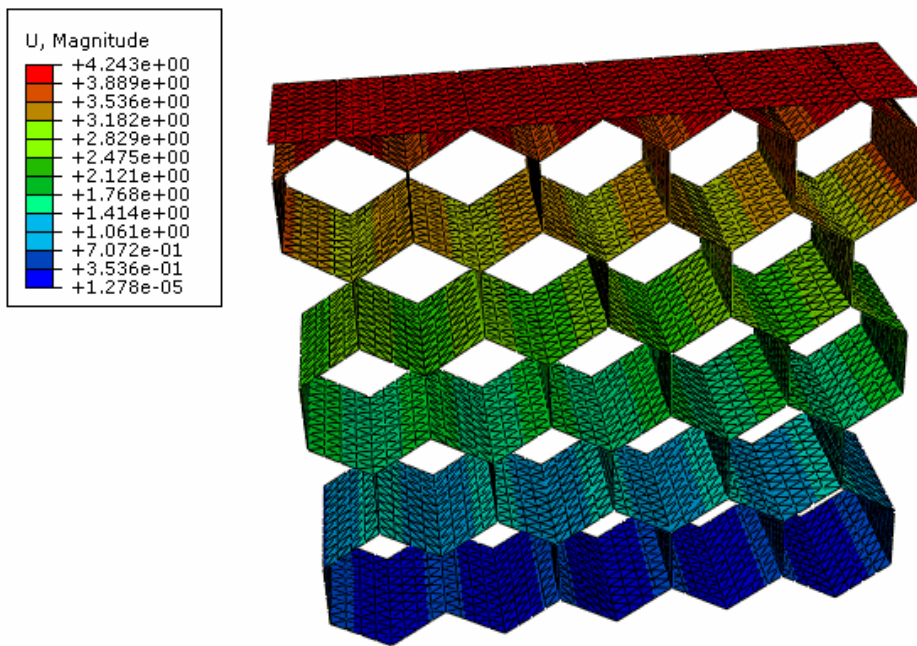


Figura 79: Deformada associada ao modelo 5x5, para o esforço de tracção, considerando a direcção axial e coeficiente de Poisson 0.

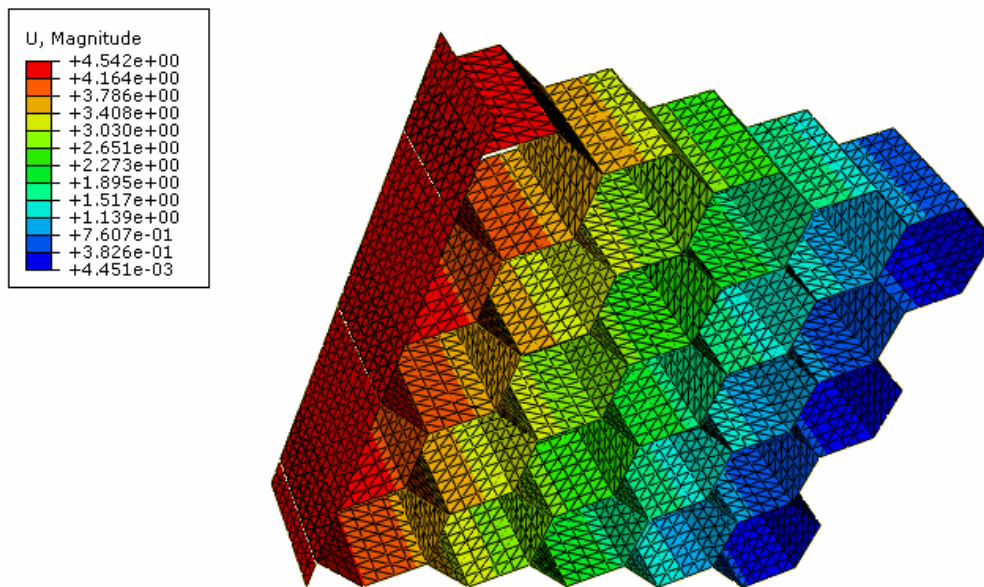


Figura 80: Deformada associada ao modelo 5x5, para o esforço de tracção, considerando a direcção tangencial e um coeficiente de Poisson 0.45.

Na Figura 81, está representada uma célula da estrutura, que pode ser visualizada nas suas formas inicial, comprimida e traccionada.

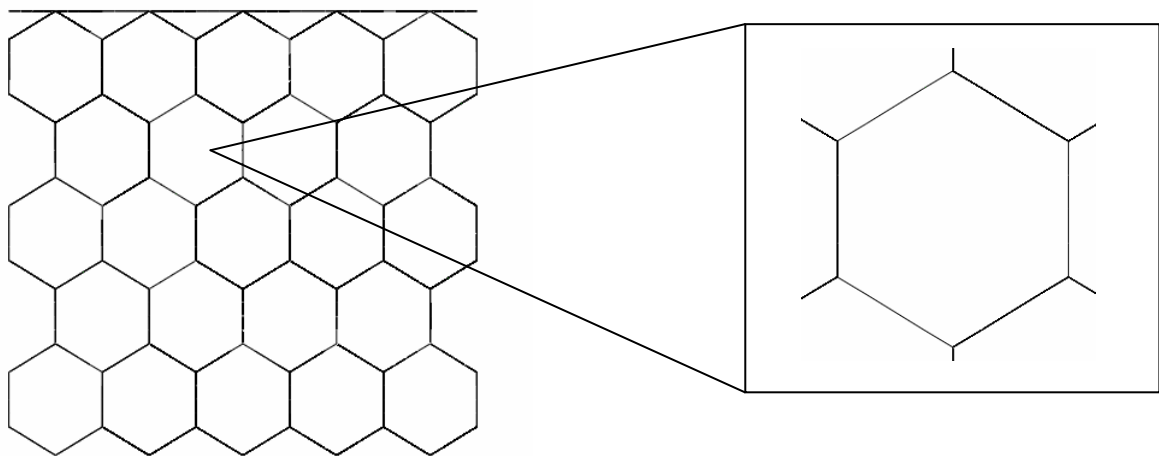
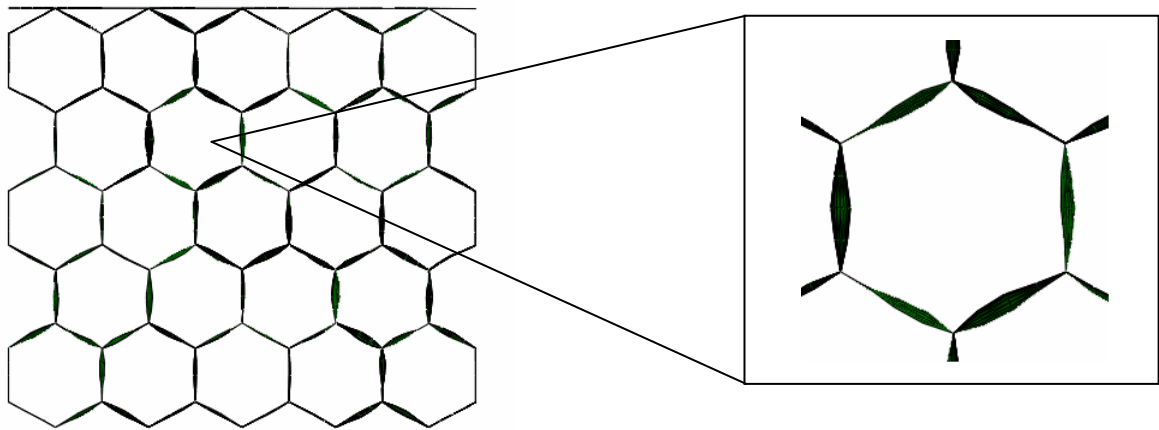
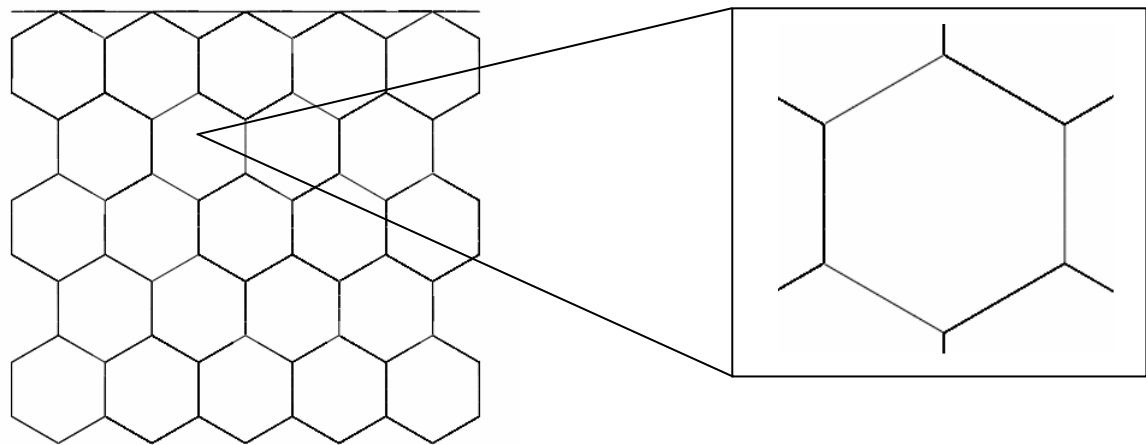


Figura 81: Ilustração de uma célula da estrutura nas suas formas inicial, comprimida e traccionada.

Com o intuito de compreender até que ponto a análise realizada foi benéfica para o trabalho realizado, calcularam-se as razões entre os módulos de Young de tracção e compressão (Tabela 12), sabendo à partida que as referidas razões teriam que ser próximas da unidade. Isto porque, independentemente do esforço considerado, o material em questão é o mesmo, logo os módulos de Young terão de ser necessariamente iguais. Adicionalmente, estabeleceram-se comparações com as razões obtidas pela análise linear (Tabela 13), as quais podem ser visualizadas através da Figura 82.

Tabela 12: Razões entre os módulos de Young de tracção e compressão, associados à análise não-linear.

		Ceoficientes de Poisson		
		0	0.3	0.45
Razão	Axial	1.408	1.355932203	1.279707495
	Tangencial	1.43877551	1.361702128	1.284090909

Tabela 13: Razões entre os módulos de Young de tracção e compressão, associados à análise linear.

		Ceoficientes de Poisson		
		0	0.3	0.45
Razão	Axial	2.346582018	2.346614724	2.340321966
	Tangencial	2.35769054	2.353750043	2.353765936

De seguida, é realizada uma comparação entre as razões dos módulos de Young de tracção e compressão, respectivamente, para as análises linear e não-linear, com o intuito de extrair conclusões esclarecedoras.

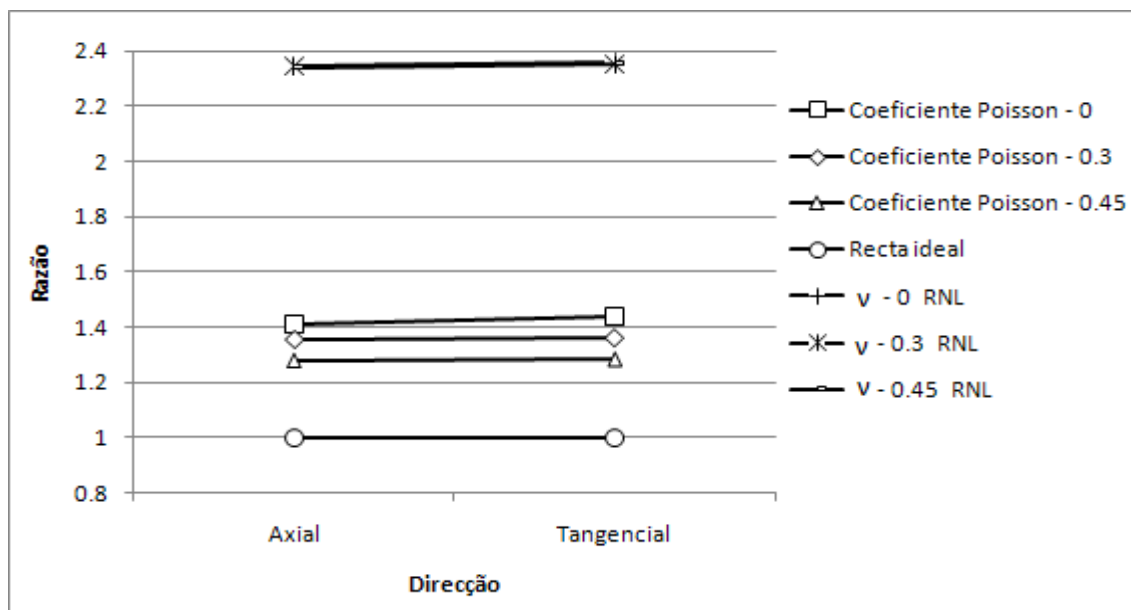


Figura 82: Comparação entre as razões obtidas, numericamente e idealmente, considerando as direcções axial e tangencial.

Através da Tabela 12, é possível constatar que os valores obtidos, na sua generalidade, aproximam-se de um modo bastante satisfatório da recta ideal, a qual é constituída por razões unitárias nas direcções axial e tangencial. Por sua vez, na Tabela 13 estão retratadas as razões obtidas para o regime linear, as quais são bastante superiores comparativamente com as razões do regime não-linear. Através da análise da Figura 82, é possível verificar a grande diferença de valores existentes entre a razão dos módulos de Young associados ao regime linear e não-linear. Assim, é possível concluir que através de uma análise não-linear geométrica, os resultados são bastante mais realísticos, comprovando uma vez mais a limitação do regime linear.

5.2.1. Análise global dos resultados e discussão

Os resultados obtidos e apresentados foram bastante satisfatórios, já que através da análise não-linear geométrica houve uma melhor caracterização mecânica da cortiça, quando

sujeita a esforços de compressão e tracção. As curvas obtidas aproximam-se significativamente das curvas experimentais, ainda que seja para pequenos valores de tensão e deformação. Uma limitação que deve ser referida baseia-se na utilização de apenas um único modelo, que serviu de base à análise não-linear. Isto porque, a utilização dos modelos de dimensão superior, não permitia extrair conclusões plausíveis e fiáveis, já que, através do programa, os valores de deformação obtidos eram bastante inferiores aos verificados no modelo 5x5.

6. Conclusões gerais

O objectivo do trabalho presente consistiu na obtenção de modelos numéricos de células de cortiça, através dos quais se pretendia determinar o módulo de Young do material constituinte da parede celular que fosse capaz de representar o módulo de Young do aglomerado, utilizado durante os ensaios experimentais. Nesse âmbito, o trabalho foi dividido em dois grupos de estudo: modelos de paredes lineares e os modelos de paredes onduladas. Quanto ao tipo de análise efectuada, sentiu-se a necessidade de realizar além da análise linear, uma análise não-linear. Assim, numa primeira fase foram elaborados modelos, cujas dimensões foram previamente definidas, com o intuito de analisar a variação do parâmetro módulo de Young em função do detalhe do modelo espacial. Numa segunda fase, tendo por base os mesmos modelos, estudou-se a variação do parâmetro módulo de Young, mas desta feita ao longo das direcções descritas para cada modelo.

Sobre os ensaios experimentais, de referir apenas que estes serviram de base para as simulações numéricas que posteriormente foram realizadas. Os resultados evidenciaram uma característica bastante interessante do aglomerado da cortiça: isotropia do material. Dado que através da natureza da própria cortiça, esta seja considerada um material anisotrópico, é um facto contraditório os resultados comprovarem a isotropia do mesmo. Contudo, e como foi referido no capítulo 3, os processos industriais estão na causa do facto observado. Como é sabido, as pranchas de cortiça são sujeitas a inúmeras fases de transformação até à obtenção dos produtos finais, tendo em conta as suas futuras aplicações. Assim, e tendo como referência os aglomerados de cortiça, estes não são excepção à regra, havendo durante os processos tecnológicos mudanças de orientação dos grânulos relativamente às suas posições originais.

No que respeita às simulações numéricas realizadas, tendo em consideração as condições a que as células se encontram submetidas na realidade, constatou-se que as condições impostas aos modelos retrataram de um modo bastante satisfatório o comportamento das células quando submetidas aos esforços de compressão e tracção. No entanto, tentou-se simular os contactos existentes entre as células do próprio modelo, os

quais não foram possíveis de ser realizados, dado que o contacto é considerado um dos problemas mais complexos na modelação.

É de salientar o facto de se ter considerado neste estudo uma estrutura celular regular e homogénea usando células regulares de formato hexaédrico (seis lados). Na literatura, tal como observado nas imagens de SEM obtidas em amostras de cortiça, é indicado que as células são de formato irregular e podem ter entre 4 a 9 lados. Uma célula de 6 lados constitui assim uma aproximação média e regular da estrutura real. Tentando extrapolar os resultados aqui obtidos para uma estrutura real, deve considerar-se que, embora uma estrutura regular com células com menor número de lados possa ser considerada mais estável, pode assumir-se que uma estrutura irregular não homogénea deva ser menos estável que a estrutura regular e homogénea aqui considerada, independentemente do formato das células. Não obstante, deveremos ter também em consideração que a estrutura real de uma prancha de cortiça foi criada ao longo do seu processo lento de crescimento, e que certamente apresenta uma configuração otimizada para suportar as tensões resultantes durante esse processo. Assim, não será plausível apresentar uma conclusão sobre esta extrapolação, devendo para o efeito realizar-se um estudo numérico sobre estruturas irregulares com o objectivo de obter resultados esclarecedores.

Relativamente aos resultados obtidos durante a análise-linear, conclui-se que os melhores encontram-se associados aos modelos de paredes onduladas, dado que o erro a eles associado é bastante reduzido. Por uma questão de simplificação e assumindo que o efeito na direcção radial não era significativo na análise que se pretendia realizar, apenas foi considerada a ondulação no plano tangencial-axial.

Numa segunda parte, e com o objectivo de superar algumas das limitações descritas anteriormente, foi realizada uma análise não-linear a fim de questionar ou não a veracidade dos resultados obtidos até então. Para isso, foi utilizado apenas um modelo, 5x5, sendo testado para dois esforços, compressão e tracção, à semelhança do regime linear. Relativamente aos resultados obtidos, em geral, eles podem ser considerados bastante satisfatórios, na medida em que se conseguiu, ainda que para valores baixos de deformação, obter uma semelhança entre as curvas numérica e experimental. De registar apenas um facto observado durante o esforço de tracção, que está associado à configuração assumida pela curva numérica, independentemente da direcção considerada. A explicação

resume-se aos comportamentos diferentes assumidos pela própria estrutura quando submetida aos esforços de compressão e tracção.

De referir apenas que para o parâmetro coeficiente de Poisson foram usados três valores, 0, 0.3 e 0.45, como indicado anteriormente. Segundo os resultados obtidos, o valor correspondente aos melhores resultados (razão entre módulos mais próximo da unidade) é o de 0.45 que significa que o material constituinte tem um comportamento incompressível semelhante ao comportamento de um elastómero. Tendo por base a estrutura da parede celular, bem como da sua estrutura química, o valor encontrado vai de encontro às descrições efectuadas na literatura, já que segundo esta, o maior componente presente na parede celular é a suberina, cuja percentagem é correspondente a 45%, sendo responsável pela elasticidade que a cortiça apresenta.

Por fim, tendo em consideração os valores do parâmetro módulo de Young obtidos, estes podem ser considerados uma boa estimativa, tendo em conta o objectivo principal do trabalho. Assim, a gama de valores de módulo de Young encontrados situa-se entre 400 e 900 MPa, sendo o valor óptimo muito próximo dos 650 MPa, valor médio.

7. Trabalhos futuros

Como é de esperar, um trabalho numa determinada área não abrange exactamente as possibilidades que poderiam ser consideradas por algumas razões. Assim, serão aqui citadas algumas sugestões a serem consideradas num trabalho futuro:

- Simulação do contacto existente entre as células do modelo;
- Alteração da geometria das células, abrangendo assim geometrias menos vulgares, como é o caso do pentágono e heptágono;
- Aumento da complexidade dos modelos, no que se refere ao número de células constituintes.

Referências

Amorim, G. - Natureza e Tecnologia - A solução ideal. [recurso web]. (2004). [Consult. Novembro de 2009].

Andrews, E. W.; Gibson, L. J. - The role of cellular structure in creep of two-dimensional cellular solids. Materials Science and Engineering A. ISSN 0921-5093. Vol. 303, n.º 1-2 (2001), p. 120-126.

Anjos, O.; Pereira, H.; Rosa, M. E. - Effect of quality, porosity and density on the compression properties of cork. European Journal of Wood and Wood Products. Vol. 66, n.º 4 (2008), p. 295-301.

Anjos, O.; Pereira, H.; Rosa, M. E. - Tensile properties of cork in the tangential direction: Variation with quality, porosity, density and radial position in the cork plank. Materials & Design. ISSN 0261-3069. Vol. 31, n.º 4 (2010), p. 2085-2090.

Associação Portuguesa Da Cortiça - O que é a Cortiça? [recurso web]. (2009a). [Consult. Junho de 2009].

Associação Portuguesa Da Cortiça - Real Cork - o Montado. [recurso web]. (2009b). [Consult. Junho de 2009].

Associação Portuguesa Da Cortiça - Sector da Cortiça em números - 2009. [recurso web]. (2009c), p. 3-4, 6-8, 11-12. [Consult. Junho de 2009].

Castro, O. [et al.] - Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. Materials & Design. ISSN 0261-3069. Vol. 31, n.º 1 (2010), p. 425-432.

Díaz-Parralejo, A. [et al.] - Bending strength of black and composite agglomerates of cork. Materials Letters. ISSN 0167-577X. Vol. 57, n.º 24-25 (2003), p. 4004-4008.

Fortes, M. A. - A Cortiça [recurso web]. 1989. [Consult. Junho de 2009].

Fortes, M. A.; Rosa, M. E. - Growth stresses and strains in cork. Wood Science and Technology. Vol. 26, n.º 4 (1992), p. 241-258.

Fortes, M. A.; Rosa, M. E.; Pereira, H. - A Cortiça. Instituto Superior Técnico, 2004. ISBN 972-8469-33-0.

Gibson, L. J.; Easterling, K. E.; Ashby, M. F. - The Structure and Mechanics of Cork. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences. Vol. 377, n.º 1769 (1981), p. 99-117.

Gil, L. - A cortiça como material de construção - Manual Técnico. [recurso web]. (2009), p. 17. [Consult. Junho de 2009].

Gil, L. - Effect of hot pressing densification on the cellular structure of black agglomerated cork board. European Journal of Wood and Wood Products. Vol. 52, n.º 2 (1994), p. 131-134.

Gil, L. M. C. C. - Densification of black agglomerate cork boards and study of densified agglomerates. Wood Science and Technology. Vol. 30, n.º 3 (1996), p. 217-223.

Guo, X. E.; Gibson, L. J. - Behavior of intact and damaged honeycombs: a finite element study. International Journal of Mechanical Sciences. ISSN 0020-7403. Vol. 41, n.º 1 (1999), p. 85-105.

Lopes, C. R. - Spalling e DoP em alvos metálicos – Estudos analíticos e numéricos. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2009. Mestrado.

Mano, J. F. - Creep-recovery behaviour of cork. Materials Letters. ISSN 0167-577X. Vol. 61, n.º 11-12 (2007), p. 2473-2477.

Mano, J. F. - The viscoelastic properties of cork. Journal of Materials Science. Vol. 37, n.º 2 (2002), p. 257-263.

Pereira, H. - Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L. Wood Science and Technology. Vol. 22, n.º 3 (1988), p. 211-218.

Pereira, H. - Cork: Biology, Production and Uses [recurso web]. 1ª. Elsevier B.V., 2007a. [Consult. Junho de 2009].

Pereira, H. - The structure of cork. In: Cork. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2007b. ISBN 978-0-44-452967-1, p. 33-53.

Pereira, J. S.; Bugalho, M. N.; Caldeira, M. D. C. - Do sobreiro à cortiça - Um sistema sustentável. [recurso web]. (2008), p. 14. [Consult. Junho de 2009].

Rosa, M.; Fortes, M. - Effects of water vapour heating on structure and properties of cork. Wood Science and Technology. Vol. 23, n.º 1 (1989), p. 27-34.

Rosa, M. E.; Fortes, M. A. - Deformation and fracture of cork in tension. Journal of Materials Science. Vol. 26, n.º 2 (1991), p. 341-348.

Rosa, M. E.; Fortes, M. A. - Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork. Journal of Materials Science. Vol. 23, n.º 3 (1988a), p. 879-885.

Rosa, M. E.; Fortes, M. A. - Thermogravimetric analysis of cork. Journal of Materials Science Letters. Vol. 7, n.º 10 (1988b), p. 1064-1065.

Rosa, M. E.; Pereira, H. - The Effect of Long Term Treatment at 100°C–150°C on Structure, Chemical Composition and Compression Behaviour of Cork. Holzforschung. ISSN 0018-3830. Vol. 48, n.º 3 (2009), p. 226-232.

Schmidt, A. - Cortiça e Artigos de Cortiça. Lisboa: Banco de Fomento Nacional, 1983.

Silva Pereira, C. [et al.] - Effect of fungal colonization on mechanical performance of cork. International Biodeterioration & Biodegradation. ISSN 0964-8305. Vol. 57, n.º 4 (2006), p. 244-250.

Silva, S. P. [et al.] - Cork: properties, capabilities and applications. International Materials Reviews. Vol. 50 (2005), p. 345-365.

Teixeira-Dias, F. - Mecânica Computacional - Uma Introdução aos Métodos Aproximados em Engenharia. [recurso web]. (2001). [Consult. Novembro 2009].

Teixeira-Dias, F. [et al.] - Método dos Elementos Finitos - Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia. Lisboa: ETEP - Edições Técnicas e Profissionais, 2010. ISBN 978-972-8480-25-7.

Veiga, I. M. [et al.] - Cork surface characterization by calorimetric studies. Journal of Materials Science Letters. Vol. 12, n.º 15 (1993), p. 1206-1207.