



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Caracterização experimental de núcleos de cortiça de configuração alveolar para aplicações em componentes do tipo *sandwich*

Alexandre José Macedo Meneses

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Aeronáutica
(Ciclo de estudos Integrado)

Orientador: Prof. Doutor Paulo Fael
Coorientador: Prof. Doutor José Miguel Silva

Covilhã, março de 2014

Agradecimentos

No âmbito do desenvolvimento deste trabalho contribuíram várias pessoas, que num maior ou menor envolvimento, foram importantes para a sua concretização e a quem expresseo o meu agradecimento.

Em primeiro lugar ao Professor Doutor Paulo Fael, orientador desta dissertação, pela dedicação, apoio e pelo seu contributo tanto na realização do trabalho experimental como na elaboração da tese.

Um agradecimento especial ao Professor Doutor José Miguel Silva, pela preciosa ajuda no trabalho experimental, pelos conhecimentos e conselhos dados.

A todos os elementos do Departamento de Ciências Aeroespaciais da Universidade da Beira Interior, professores e funcionários pela contribuição prestada.

Gostaria ainda de agradecer aos alunos de doutoramento Filipe Couceiro e Pedro Santos, pela disponibilidade, ajuda e conhecimentos partilhados.

Finalmente agradecer à minha família, em especial aos meus pais e irmão, pela compreensão e ajuda durante todo o meu percurso académico.

Resumo

A indústria aeronáutica/aeroespacial está em constante procura de novos materiais, assim como de novos processos. Este desenvolvimento pretende sempre alcançar estruturas leves e de elevada resistência específica, como também de elevada tolerância ao dano e fiabilidade na aplicação.

O principal objetivo deste trabalho é realizar a caracterização mecânica do aglomerado de cortiça com configuração alveolar de base NL-10. Como é de conhecimento geral, a cortiça é um material natural, renovável e reciclável com propriedades muito interessantes, nomeadamente térmicas e acústicas.

Nesta investigação, utiliza-se uma estrutura semelhante à *honeycomb* com a finalidade de reduzir a densidade global do material sem perdas de propriedades mecânicas acentuadas. Com a criação de vários provetes, efetuam-se testes mecânicos estáticos, de modo a analisar as suas propriedades mecânicas e os seus modos de falha. Os ensaios mecânicos realizados foram à flexão em quatro pontos, à tração e ao corte, variando os seguintes parâmetros de estudo: padrão, dimensão do furo e espaçamento de parede entre os furos.

Os resultados obtidos revelam que a performance deste material pode depender da granulometria da cortiça e também o agente de ligação utilizado. Como conclusão geral constata-se que, o comportamento do material sendo algo irregular com a combinação dos parâmetros em estudo, não apresentam degradação excessiva das propriedades mecânicas específicas, melhorando mesmo em muitos casos.

Palavras-chave

Cortiça, *honeycomb*, modos de falha, flexão, tração e corte.

Abstract

The aeronautical/aerospace industry is in constant search for new materials, as well as new processes. This development aims always to achieve lightweight and high specific strength structures, and also high damage tolerance and reliability in application.

The main objective of this work is the mechanical characterization of cork agglomerate NL-10. As is widely known, cork is a natural, renewable and recyclable material with very interesting properties, particularly thermal and acoustic.

In this study, a similar honeycomb structure is used in order to reduce density of the material without accentuated losses of mechanical properties. With the creation of several specimens, static mechanical tests are realized in order to analyze their mechanical properties and failure modes. The mechanical tests performed were flexural at four points, tensile and shear, varying the following study parameters: pattern, hole size and spacing wall between the holes.

The results show that the performance of this material may depend on the particle size of the cork agglomerate and also the binding agent used. As a general conclusion it appears that the behavior of the material being somewhat irregular with the combination of the parameters under study show no excessive degradation of specific mechanical properties, improving it in many cases.

Keywords

Cork, honeycomb, failure mode, flexural, tensile and shear.

Índice

| | |
|---|----|
| Capítulo 1 - Introdução | 1 |
| 1.1. Motivação | 1 |
| 1.2. Objetivos da investigação | 2 |
| 1.3. Estrutura | 2 |
| Capítulo 2 - Revisão bibliográfica | 5 |
| 2.1. Generalidades sobre a cortiça..... | 5 |
| 2.2. Propriedades da cortiça | 7 |
| 2.2.1. Propriedades mecânicas..... | 7 |
| 2.2.2. Propriedades de amortecimento..... | 10 |
| 2.3. Estruturas sandwich | 12 |
| 2.4. Modos de falha | 12 |
| 2.4.1. Falhas em <i>sandwich</i> | 13 |
| 2.4.2. Falhas de materiais usados em núcleos | 15 |
| 2.5. Aplicações de compósitos de cortiça em aeronáutica | 17 |
| Capítulo 3 - Metodologia experimental | 19 |
| 3.1. Materiais e parâmetros de estudo | 19 |
| 3.1.1. Materiais | 19 |
| 3.1.2. Parâmetros de estudo | 20 |
| 3.2. Processos de fabrico e equipamento | 21 |
| 3.3. Ensaio mecânicos | 25 |
| 3.3.1. Ensaio de flexão em quatro pontos | 25 |
| 3.3.2. Ensaio ao corte | 27 |
| 3.3.3. Ensaio de tração..... | 29 |
| Capítulo 4 - Análise e discussão dos resultados | 33 |
| 4.1. Características à flexão | 33 |
| 4.2. Características ao corte | 39 |
| 4.3. Características à tração | 46 |
| Capítulo 5 - Conclusões | 53 |
| Referências | 55 |
| Anexos | 57 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Imagem microscópica da cortiça natural. a) secção radial, b) secção tangencial. [5] | 6 |
| Figura 2 - Representação esquemática da disposição celular da cortiça. [6] | 7 |
| Figura 3 - Curva típica tensão-deformação da cortiça á compressão. [8] | 8 |
| Figura 4 - Curva típica tensão-deformação da cortiça à tração, T é a direção tangencial; A é a direção axial e R é a direção radial. [8] | 8 |
| Figura 5 - Curva tensão-deformação para a tração da cortiça aplicada na direção tangencial. [9] | 9 |
| Figura 6 - Curvas tensão-extensão em função do tempo para um material viscoelástico. [11] | 11 |
| Figura 7 - Gráfico tensão-extensão para um material viscoelástico. [12] | 11 |
| Figura 8 - Estrutura sandwich. | 12 |
| Figura 9 - Modos de falha de uma estrutura sandwich. [14] | 13 |
| Figura 10 - Estrutura sandwich com núcleo em honeycomb. [15] | 14 |
| Figura 11 - Mapa dos modos de falha a flexão. ρ_c – densidade do <i>honeycomb</i> , ρ_s – densidade do material do <i>honeycomb</i> . [15] | 15 |
| Figura 12 - Deformação do Rohacell 51 WF, a) sem compressão, b) compressão a 0,45 da deformação, c) compressão a 0,75 da deformação. [16] | 15 |
| Figura 16 - Direções L e W no plano para o <i>honeycomb</i> . [16] | 16 |
| Figura 17 - Modo de falha ao corte. [17] | 17 |
| Figura 18 - Exemplos de aplicação de cortiça no sistema de propulsão de veículos espaciais. [18] | 18 |
| Figura 19 - Provetes de ensaio com furação de 3mm e espaçamento de parede de 3mm. a) padrão linear, b) padrão triangular. | 20 |
| Figura 20 - Etapas do processo de fabrico das faces. a) laminação manual, b) saco de vácuo. | 24 |
| Figura 21 - Máquinas de ensaios. a) Shimadzu AG-IC, b) Instron 1341. | 24 |
| Figura 22 - Representação esquemática de ensaios de flexão a quatro pontos, com travessões a 1/3 dos suportes da medida do vão | 25 |
| Figura 23 - Nomenclatura das dimensões. | 26 |
| Figura 24 - Representação esquemática do ensaio de corte. | 27 |
| Figura 25 - Esquema do ensaio de tração <i>flatwise</i> . | 29 |
| Figura 26 - Representação esquemática do ensaio de tração <i>flatwise</i> . | 30 |
| Figura 27 - Peça utilizada para o alinhamento das fixações de carregamento. | 30 |
| Figura 28 - Curva força-deslocamento e força-tempo, no ensaio de flexão para a amostra F5_EP5_PL. | 33 |
| Figura 29 - Mecanismo de falha da sandwich de cortiça à flexão. | 34 |
| Figura 30 - Resistência ao corte específica para ensaios de flexão em quatro pontos. | 34 |
| Figura 31 - Resistência ao corte específica para ensaios de flexão em quatro pontos, com padrão linear. | 35 |
| Figura 32 - Resistência ao corte específica para ensaios de flexão em quatro pontos, com padrão triangular. | 35 |
| Figura 33 - Resistência ao corte específica para ensaios de flexão em quatro pontos, com espaçamento de parede de 3mm. | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 34 - Resistência ao corte específica para ensaios de flexão em quatro pontos, com espaçamento de parede de 5mm. | 36 |
| Figura 35 - Resistência ao corte específica para ensaios de flexão em quatro pontos, com espaçamento de parede de 7mm. | 37 |
| Figura 36 - Curva força-deslocamento e força-tempo, no ensaio de corte para a amostra F5_EP5_PL..... | 39 |
| Figura 37 - Etapas de carregamento ao corte. | 40 |
| Figura 38 - Resistência ao corte específica para ensaios de corte..... | 41 |
| Figura 39 - Resistência ao corte específica para ensaios de corte, com espaçamento de parede de 3mm. | 41 |
| Figura 40 - Resistência ao corte específica para ensaios de corte, com espaçamento de parede de 5mm. | 42 |
| Figura 41 - Resistência ao corte específica para ensaios de flexão a quatro pontos, com espaçamento de parede de 7mm. | 42 |
| Figura 42 - Resistência ao corte específica para ensaios de corte, com padrão linear. | 43 |
| Figura 43 - Resistência ao corte específica para ensaios de corte, com padrão triangular. ... | 43 |
| Figura 44 - Curva força-deslocamento e força-tempo, no ensaio à tração <i>flatwise</i> para a amostra F5_EP5_PL..... | 46 |
| Figura 45 - Etapas de ensaio a tração <i>flatwise</i> | 47 |
| Figura 46 - Resistência à tração específica <i>flatwise</i> | 47 |
| Figura 47 - Resistência à tração específica <i>flatwise</i> , com espaçamento de parede de 3mm. . | 48 |
| Figura 48 - Resistência à tração específica <i>flatwise</i> , com espaçamento de parede de 5mm. . | 48 |
| Figura 49 - Resistência à tração específica <i>flatwise</i> , com espaçamento de parede de 7mm. . | 49 |
| Figura 50 - Resistência à tração específica <i>flatwise</i> , com padrão linear. | 49 |
| Figura 51 - Resistência à tração específica <i>flatwise</i> , com padrão triangular. | 50 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Propriedades mecânicas gerais da cortiça, R corresponde à direção radial e NR corresponde a direção não radial. [8]..... | 10 |
| Tabela 2 - Propriedades mecânicas do material NL-10. [20] * A densidade é obtida das placas utilizadas na produção das amostras. | 19 |
| Tabela 3 - Código de nomenclatura dos provetes. | 21 |
| Tabela 4 - Relação entre a densidade nominal e a densidade real, para furação de 3mm. | 22 |
| Tabela 5 - Relação entre a densidade nominal e a densidade real, para a furação de 5mm. . | 22 |
| Tabela 6 - Relação entre a densidade nominal e a densidade real, para a furação de 7mm. . | 23 |
| Tabela 7 - Dados das faces dos provetes para ensaios de flexão. | 23 |
| Tabela 8 - Geometria das amostras de ensaio de flexão em quatro pontos. | 26 |
| Tabela 9 - Geometria das amostras de ensaio de corte. | 28 |
| Tabela 10 - Área mínima recomendada. | 31 |
| Tabela 11 - Geometria das amostras de ensaio de tração <i>flatwise</i> | 31 |
| Tabela 12 - Valores médios da resistência ao corte específica e do seu desvio padrão, para ensaios de flexão em quatro pontos. | 38 |
| Tabela 13 - Valores médios da resistência ao corte específica e do seu desvio padrão, para ensaios ao corte. | 44 |
| Tabela 14 - Valores médios da resistência à tração específica e do seu desvio padrão, para ensaios de tração <i>flatwise</i> | 51 |

Lista de Acrónimos

| | |
|--------|--|
| DESAIR | Design of Environment Friendly Structures for Aircraft |
| ESA | European Space Agency |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| ASTM | American Society for Testing Materials |

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Motivação

O projeto *Design of environment friendly structures for aircraft*, doravante designado DESAIR, do qual é participante o departamento de Ciências Aeroespaciais da Universidade da Beira Interior, tem como perspectiva o desenvolvimento de um material compósito de alto desempenho com características diferenciadoras ao nível da integração de constituintes de base naturais e processos de fabrico associados.

Neste contexto foi solicitado o desenvolvimento de um núcleo de cortiça com características otimizadas para estruturas de aplicação em componentes aeronáuticos, com especial incidência na aviação comercial. Isto porque, as exigências económicas, financeiras e ambientais suscitam uma constante procura de novos materiais, como poderá ser o caso dos compósitos de cortiça.

A cortiça é um material de origem vegetal das cascas dos sobreiros, *Quercus suber L*, muito importante para a economia nacional na medida em que ocupa um lugar de destaque na balança das exportações. Anualmente, tendo por referência o ano de 2012, representou 845,7 milhões de euros de matéria prima a sair das nossas fronteiras. [1]

Enquanto material natural possui características únicas seja pela sua baixa densidade, ou até mesmo pela sua impermeabilidade de líquidos e gases, elasticidade e compressibilidade, também de combustão lenta, resistência ao atrito e com extrema capacidade de isolamento térmico e acústico. [2]

Na indústria aeronáutica, as características supra mencionadas permitem à cortiça competir com materiais não naturais, conseguindo-se com esta os mesmos resultados que se logram quando utilizamos espumas não naturais. De facto, *“para um material que tem sido usado desde a antiguidade, a versatilidade camaleónica da cortiça é astronómica (...) graças à sua capacidade de renovação e de adaptação a novas exigências tecnológicas”*. [3]

Atualmente, a cortiça, permite a sua aplicação nos mais variados setores. Foi utilizada no interior do protótipo F700 da Mercedes, nos componentes para interiores de autocarros, de comboios de alta velocidade e aviões. Também no desporto é revelada a sua aplicabilidade prática seja em bolas de baseball, pranchas de surf, de snowboard e em kayaks que conquistaram medalhas em jogos olímpicos. [3]

No decurso do século XXI a cortiça demonstra ser um material cuja tecnologia não pode deixar de ser relevada, entrando em campos que até aqui pertenciam à indústria do metal e derivados do petróleo. Numa sociedade onde a consciência ambiental assumiu uma posição essencial, a cortiça, enquanto material natural e ecológico, afirmou-se na conquista do espaço, com a NASA e a ESA a incorporá-la em estudos térmicos e em revestimentos das naves espaciais. [3]

1.2. Objetivos da investigação

Esta investigação científica tem como objetivo principal a caracterização mecânica de compósitos de cortiça com configuração alveolar, mais concretamente o estudo dos modos de falha sobre as diferentes condições de carregamento. Para este estudo varia-se alguns parâmetros, tais como, a dimensão da furação, o padrão em que a furação é disposta e o espaçamento de parede entre a furação.

A posteriori do objetivo principal desta investigação, existe também o objetivo da caracterização experimental, que vai servir de suporte a um trabalho computacional que visa a otimização das propriedades deste tipo de materiais para a aplicação em núcleos de estrutura *sandwich* em estruturas aeronáuticas.

1.3. Estrutura

Este trabalho será composto por cinco capítulos: introdução, revisão bibliográfica, metodologia experimental, discussão de resultados e conclusões.

No primeiro capítulo – introdução – é feita uma breve explicação da motivação e a contextualização do trabalho e descritos os objetivos da investigação.

No segundo capítulo – revisão bibliográfica – evidenciam-se as generalidades da cortiça, as propriedades mecânicas da cortiça e a sua natureza viscoelástica. De seguida referem-se os modos de falha de materiais celulares, finalizando este capítulo com referências a aplicações de compósitos de cortiça em aeronáutica.

O terceiro capítulo – metodologia de investigação – abrange a descrição de todos os materiais e equipamentos utilizados para a realização dos ensaios, bem como os processos de fabrico na construção dos provetes.

No quarto capítulo – discussão resultados – serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de flexão, tração e corte.

Por fim o último capítulo – conclusões – retiram-se todas as conclusões do trabalho experimental, identificando vantagens e desvantagens e referenciando também pontos de interesse para trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica

2.1. Generalidades sobre a cortiça

A cortiça é um material cujas aplicações são conhecidas desde a Antiguidade, sobretudo como artefacto flutuante e como vedante. Uma das primeiras referências ao sobreiro e à cortiça é uma passagem da História Natural de Plínio, em que é mencionada a faculdade que o sobreiro possui para a regeneração da casca retirada. O mesmo Plínio refere que na Grécia apenas os sacerdotes podiam cortar a cortiça, sendo que a mesma era adorada como um símbolo de liberdade e de honra. [4]

Em épocas anteriores ao nascimento de Cristo, a cortiça já era utilizada para diversos fins, e por diversas civilizações como os Egípcios, Babilónios, Assírios, Fenícios e Persas. Uma aplicação em comum a estas civilizações era a sua utilização em boias para a arte de pesca e em sapatos. No Egipto, foram também encontradas ânforas com tampões de cortiça em sarcófagos milenários.

Na Antiguidade, a cortiça foi também usada no recheio de lares, naquilo a que hoje chamamos mobiliário, nomeadamente em reforços móveis simples, e em objetos como berços, caixas, cofres, leitos, forros de arcas e portas, etc. [4]

Porém, a sua utilização para o engarrafamento só foi desenvolvida a preceito no século XVII, por sinal numa abadia, sendo utilizada ainda na atualidade. Aliás, ainda hoje não é conhecido material melhor, quando se trata do engarrafamento e maturação do vinho em condições ideais.

A cortiça extraída do sobreiro corresponde ao tecido denominado por felema na histologia botânica. São muitos os fatores que interferem na produção da cortiça, a citar: a idade da árvore, volume da copa, densidade do povoamento, condições vegetativas como a fertilidade do solo e fatores ambientais, etc.

Na produção normal, a cortiça diminui acentuadamente em qualidade e espessura nos sobreiros com mais de 150-200 anos, por vezes antes, que se pode considerar como idade limite para a cultura económica do sobreiro. Com este limite de idade efetua-se entre 13 a 18 descortiçamentos por árvore.[4]

No processo de descortiçamento a retirada de cortiça, deixa exposto os tecidos do entrecasco, com dilaceração das células de cortiça mais recentemente formadas, que

rompem mais facilmente por terem paredes mais finas. Este processo origina uma ferida e um posterior processo de cicatrização de modo a proteger os tecidos vivos expostos ao exterior.

O descortiçamento não é benéfico para os sobreiros, pois perturba os processos fisiológicos da árvore fazendo com que retarde o crescimento em altura e largura. Por isso, essa operação é executada com moderação e o máximo cuidado.

A sua constituição química é referida com os seguintes compostos: suberina (45%); lenhina (27%); polissacáridos (12%); taninos (6%); ceróides (5%); cinzas (5%). [4]

Os grupos são assim considerados face ao conjunto de componentes que incluem e ao seu modo de obtenção. Os valores médios indicados podem ter variâncias, o que está relacionado com o fato da cortiça ser um produto natural, cuja constituição é influenciada por diversos fatores.

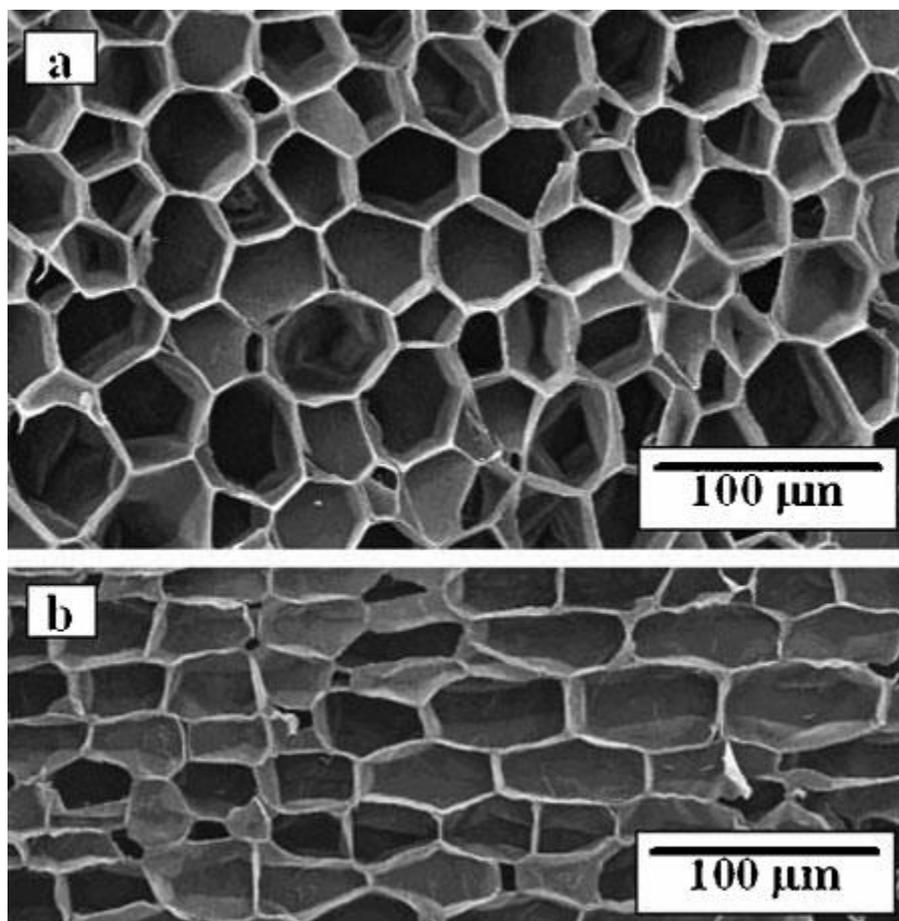


Figura 1 - Imagem microscópica da cortiça natural. a) secção radial, b) secção tangencial. [5]

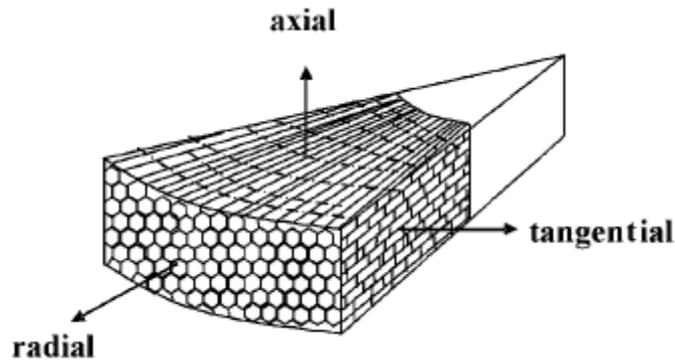


Figura 2 - Representação esquemática da disposição celular da cortiça. [6]

A cortiça pode ser considerada como um tecido homogêneo de células de paredes finas, dispostas regularmente sem espaço intercelular. Possui configuração alveolar, análoga a um favo de mel, sem espaços vazios entre células adjacentes. [6]

Como as paredes laterais são orientadas aleatoriamente, paralelas a direção radial, numa aproximação inicial a cortiça pode ser considerada transversalmente como um material isotrópico, o que implica que todas as direções perpendiculares a direção radial, isto é a direção axial e tangencial, são praticamente equivalentes. [6]

2.2. Propriedades da cortiça

2.2.1. Propriedades mecânicas

A cortiça é um material com propriedades mecânicas bastante particulares, o seu comportamento mecânico revela-se inferior em relação as espumas sintéticas, ainda que, para algumas aplicações, a cortiça consegue competir com este tipo de materiais. De facto, a cortiça possui melhor comportamento mecânico face as espumas rígidas e flexíveis, quando comparado o módulo específico (E/ρ) com a resistência à compressão específica (σ_c/ρ). [7]

A curva de tensão de compressão apresenta três regiões distintas, relacionadas com os três mecanismos responsáveis pelas propriedades de materiais celulares flexíveis.

A primeira região, que vai até cerca de 7% da deformação, corresponde à zona elástica em que as células mantem a sua forma hexagonal. A segunda região estende-se até cerca de 70% da deformação, devido a progressiva deformação das células. Ao ultrapassar este valor, estas

colapsam fazendo com que a sua estrutura seja destruída e tenha um comportamento não linear elástico, como mostra a Figura 3. [8]

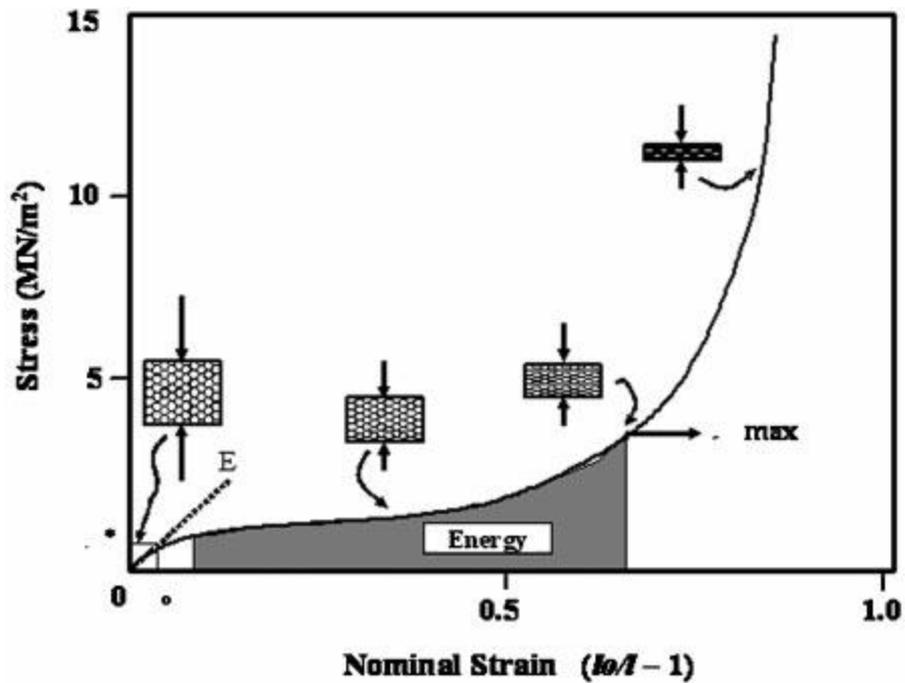


Figura 3 - Curva típica tensão-deformação da cortiça à compressão. [8]

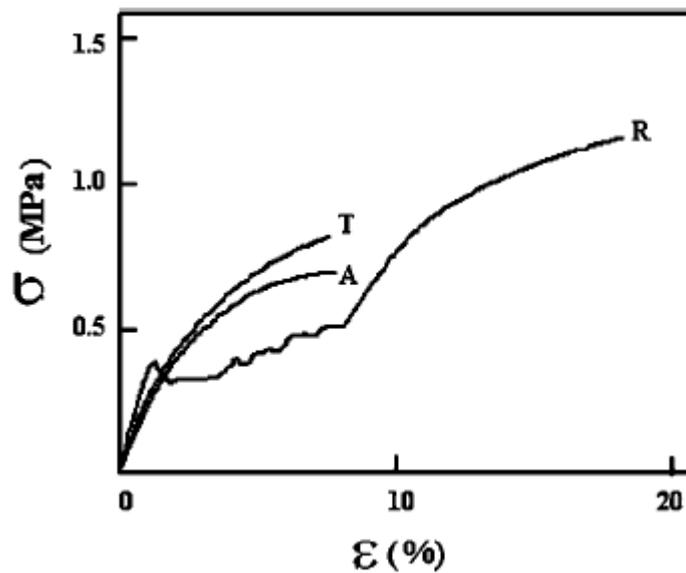


Figura 4 - Curva típica tensão-deformação da cortiça à tração, T é a direção tangencial; A é a direção axial e R é a direção radial. [8]

O arranjo escalonado e aleatório das células e a corrugação das paredes laterais influenciam o coeficiente de Poisson, o que fornece propriedades interessantes à cortiça, que leva à sua diversidade de aplicações.

Comprimindo a cortiça no sentido radial, as paredes das células deformam e encolhem devido às corrugações. A amplitude das corrugações aumenta e as células perpendiculares à direção tangencial alinham-se. Ambos estes efeitos resultam num pequeno valor do coeficiente de poisson, devido a uma pequena expansão na direção axial. Quando a compressão é feita no sentido não-radial as paredes curvas das células laterais endireitam-se e a elevadas deformações invertem o padrão de ondulação, o que leva ao encolhimento na direção tangencial, e portanto a um coeficiente de poisson negativo em elevadas deformações. [8]

A Figura 3 representa um exemplo da curva tensão-deformação da cortiça, com a tensão a ser aplicada na direção tangencial.

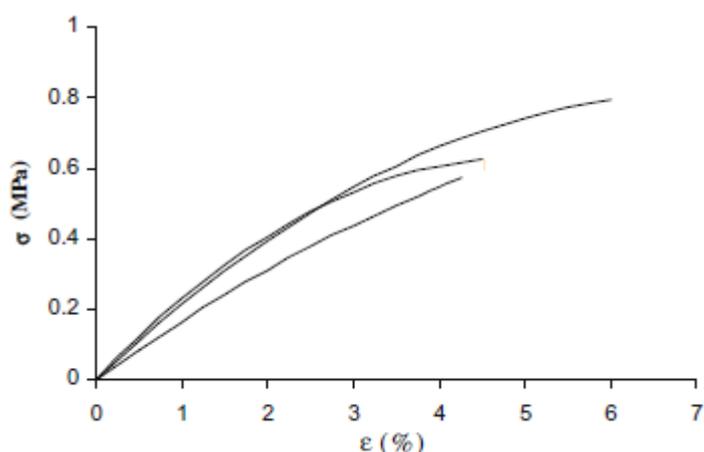


Figura 5 - Curva tensão-deformação para a tração da cortiça aplicada na direção tangencial. [9]

A curva mostra uma região linear elástica inicial até cerca de 2% da deformação e 0,4MPa da tensão, seguida de uma região com o decréscimo do declive correspondendo a cedência gradual da cortiça até à rutura. A rutura ocorre aproximadamente a 5% de deformação e a 0,6MPa de tensão.

O comportamento da cortiça a tração tem uma grande dependência do tipo e dimensão dos seus defeitos estruturais. A resistência a tração de um *honeycomb* com uma fenda ou um entalhe é superior a resistência a tração de um *honeycomb* intacto. Na cortiça a ocorrência de defeitos é muito variável entre amostras, o que torna muito difícil prever o seu comportamento mecânico. [9]

De uma forma geral a cortiça tem um comportamento diferente a tração e a compressão. O módulo de Young à compressão é sensivelmente menor que à tração. O módulo ser superior à tração pode ser explicado em termos da rigidez da ondulação das células das paredes, o que

aumenta á medida que a amplitude das ondulações diminui. Na compressão com o aumento da amplitude das ondulações o valor da tensão diminui. [10]

A Tabela 1 apresenta alguns valores das propriedades mecânicas da cortiça.

| Property | Value |
|--|--|
| Compressive modulus, natural cork, unboiled, MPa | 8–20 (R) 13–15 (NR) |
| Compressive modulus, boiled, MPa | 6 (R) 8–9 (NR) |
| Compressive modulus, heat treated at 100°C, 28 days, MPa | 11 (R) 11 (NR) |
| Compressive modulus, heat treated at 150°C, 28 days, MPa | 15 (R) 14 (NR) |
| Tensile modulus, boiled, MPa | 38 (R) 24–26 (NR) |
| Collapse (buckling) stress, boiled, MPa | 0.75–0.8 (R) 0.6–0.7 (NR) |
| Collapse (buckling) strain, % | 4 (R) 6 (NR) |
| Fracture stress under tension, MPa | 1.0 (R) 1.1 (NR) |
| Fracture strain under tension, % | 5 (R) 9 (NR) |
| Fracture toughness, boiled, MPa m ^{1/2} | 60–130 |
| Poisson's ratio, boiled | 0–0.097 ($\nu_{R/NR}$) 0–0.064 ($\nu_{NR/R}$) 0.26–0.5 ($\nu_{NR/NR}$) |
| Loss coefficient at 0.01 Hz | 0.1–0.3 |

Tabela 1 - Propriedades mecânicas gerais da cortiça, R corresponde à direção radial e NR corresponde a direção não radial. [8]

2.2.2. Propriedades de amortecimento

Uma das características interessantes da cortiça traduz-se também pelas suas propriedades viscoelásticas, tendo estas um papel preponderante na capacidade de dissipação de energia e supressão vibrática e acústica.

No gráfico da Figura 6 é possível observar-se a influência temporal que existe na resposta tensão-extensão para um caso genérico de um material viscoelástico, onde é evidente um desfasamento entre a curva σ e ϵ que traduzem assim a capacidade de amortecimento do material.

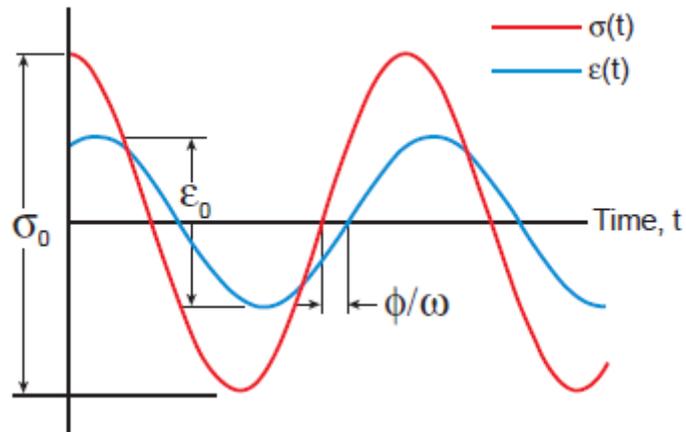


Figura 6 - Curvas tensão-extensão em função do tempo para um material viscoelástico. [11]

Esta capacidade de amortecimento de energia é evidenciada pela área que está compreendida entre as curvas de carregamento/relaxamento na Figura 7, que representa o ciclo de histerese da energia dissipada por transferência de calor. Por isso, assim que o carregamento cessa o material exibe um atraso temporal em retornar a sua forma inicial, como consequência do mecanismo de perda de energia.

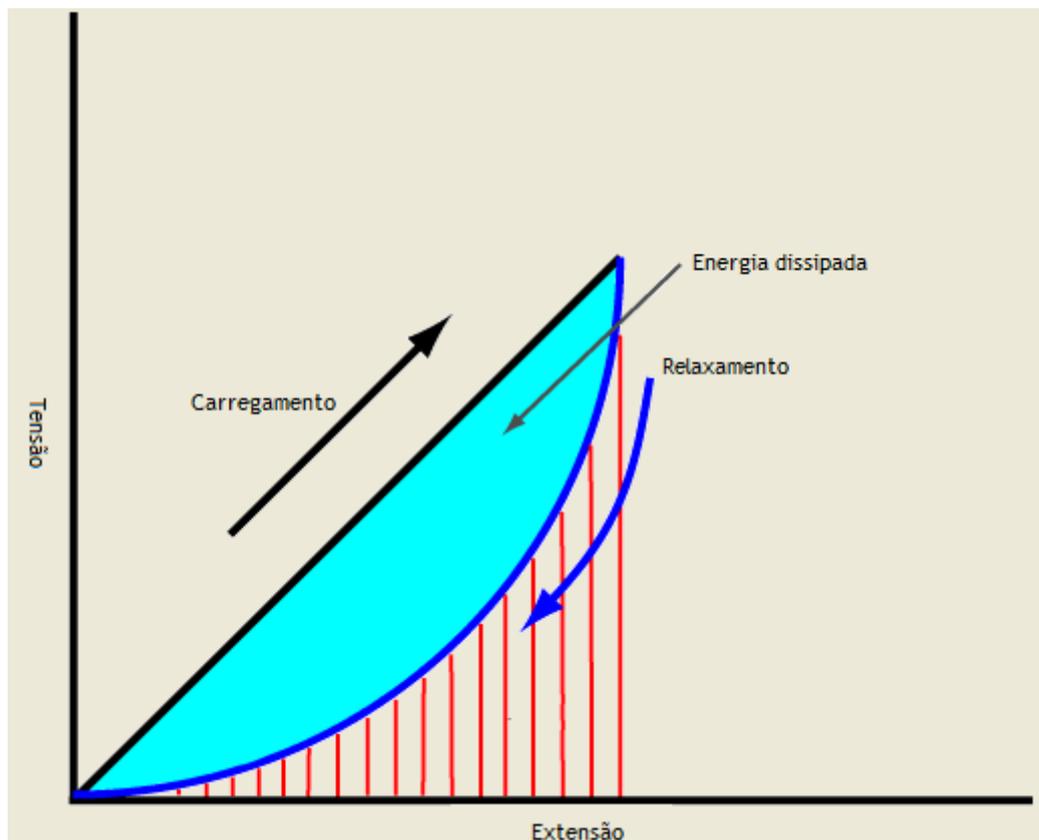


Figura 7 - Gráfico tensão-extensão para um material viscoelástico. [12]

2.3. Estruturas sandwich

As estruturas sandwich apresentam como principal vantagem a elevada relação resistência/peso. A sua estrutura é composta por uma ou mais camadas internas, com baixas densidades e espessuras consideráveis, denominado núcleo. Por sua vez o mesmo é envolvido por uma ou mais camadas finas exteriores de material de elevada resistência, denominadas faces.

Neste tipo de estruturas, quando submetidas à flexão, as faces são responsáveis por suportar os esforços axiais resultantes (tração e compressão), enquanto que o núcleo suporta os esforços de corte gerados pela tendência do deslizamento entre as duas peles. [13]

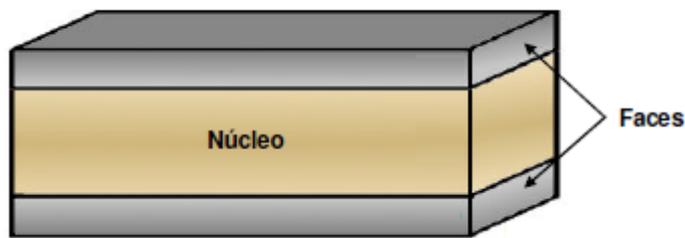


Figura 8 - Estrutura sandwich

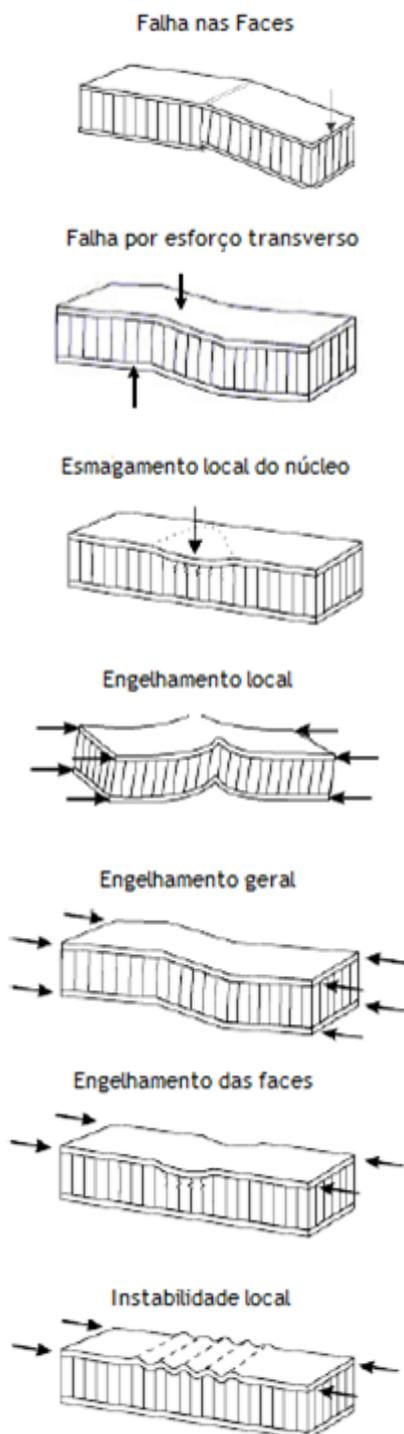
Este tipo de configuração permite assim promover uma resistência e rigidez à flexão considerável, sem comprometer demasiado o peso final da estrutura. Tal se deve à elevada espessura do núcleo que é assim capaz de promover ou aumentar o momento de inércia do componente, ainda que o material do núcleo apresente baixa densidade.

2.4. Modos de falha

De um modo geral uma falha é a reação que o provete tem à ação de uma força externa, sendo classificada como dúctil ou frágil, dependendo das propriedades do material em causa, assim como dos fatores externos, tais como: temperatura e carregamento.

2.4.1. Falhas em *sandwich*

Independentemente do material utilizado numa estrutura sandwich, tanto as faces como o núcleo, estarão sujeitos a vários modos de falha de acordo com as forças externas aplicadas, como se visualiza na Figura 9.



Insuficiência da espessura/resistência das faces pode ocorrer a falha tanto na face sujeita à compressão como na da tração.

A falha por esforço transverso é causada pela insuficiência da espessura da sandwich ou da resistência ao corte.

Ocorre quando a resistência à compressão do núcleo é baixa.

Acontece quando a espessura da sandwich ou a rigidez do núcleo ao corte são demasiado baixas.

Pode ser consequência do engelhamento local, sendo causada pelos baixos valores do módulo de corte do núcleo ou da resistência ao corte do adesivo.

A falha do núcleo à compressão ou dos adesivos, depende da resistência relativa do núcleo à compressão, em comparação com a resistência dos adesivos a tração *flatwise*.

Aplicada apenas no núcleo e ocorre onde as faces são muito finas e o tamanho das células grandes. Este efeito pode causar falha, propagando-se através das células adjacentes.

Figura 9 - Modos de falha de uma estrutura sandwich. [14]

O modo de falha de uma estrutura sandwich é um tema muito vasto. O seu comportamento depende tanto do material utilizado no núcleo, como da densidade do mesmo. Por esse motivo irei apresentar o exemplo de uma estrutura sandwich, em que o núcleo é um *honeycomb* de *Nomex* e as faces são GFRP (*glass fiber reinforced plastic*), como mostra a Figura 10.

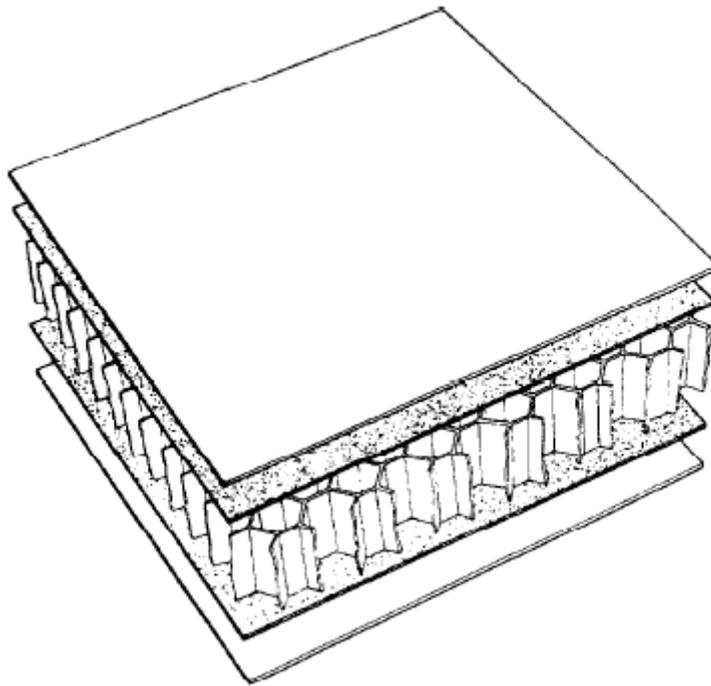


Figura 10 - Estrutura sandwich com núcleo em honeycomb. [15]

Ao submeter esta estrutura a esforços de flexão poderá surgir falha nas faces, no núcleo e por encurvatura intracelular.

Falha na face - Consegue-se prever de imediato um enrugamento do material num determinado ponto, sendo este muito próximo do limite da deformação da face, como podemos visualizar na Figura 11. [15]

Falha no núcleo - Para núcleos com densidades elevadas a falha previsível será por esmagamento, enquanto que, para núcleos com densidades baixas. será a falha por corte. [15]

Falha por encurvatura intracelular - Para todas as estruturas em que possuem grandes dimensões de célula exibem uma flambagem intracelular elástica. No entanto, a falha final não ocorre de imediato, acontecendo posteriormente por esmagamento do núcleo ou delaminação da face superior à compressão.

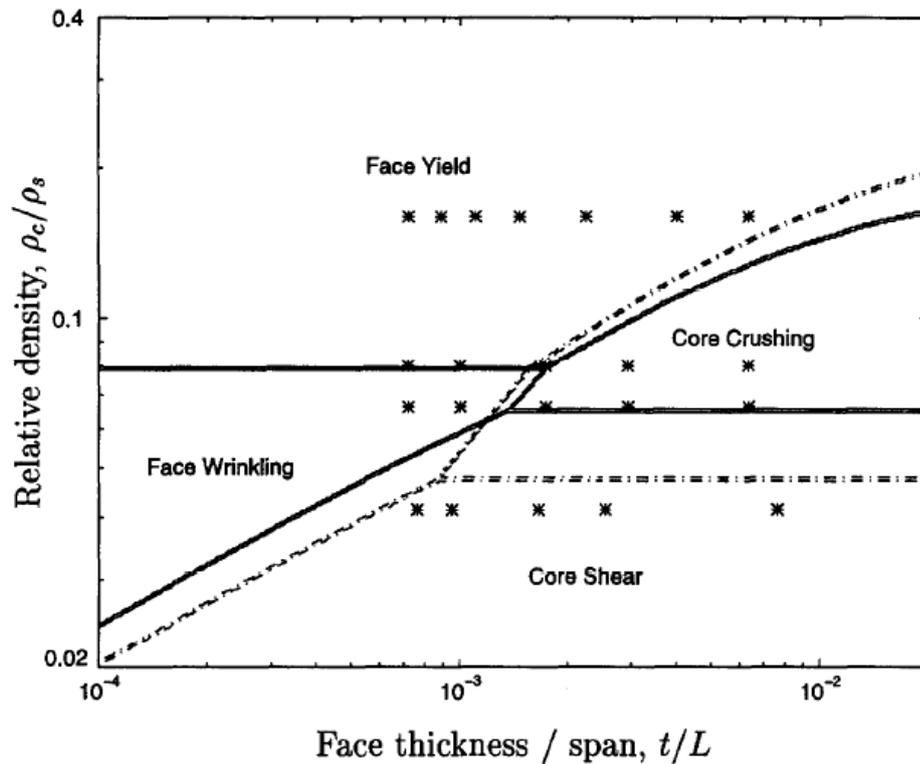


Figura 11 - Mapa dos modos de falha a flexão. ρ_c – densidade do *honeycomb*, ρ_s – densidade do material do *honeycomb*. [15]

2.4.2. Falhas de materiais usados em núcleos

Uma estrutura simples, como o próprio nome indica, é constituída apenas por um material. Esta terá vários modos de falha que irão depender diretamente das propriedades do material. Como por exemplo, utilizando um determinado material para diferentes tipos de carregamento, nomeadamente, compressão e corte.

- Carregamento à compressão (Espumas vs *honeycombs*) [16]

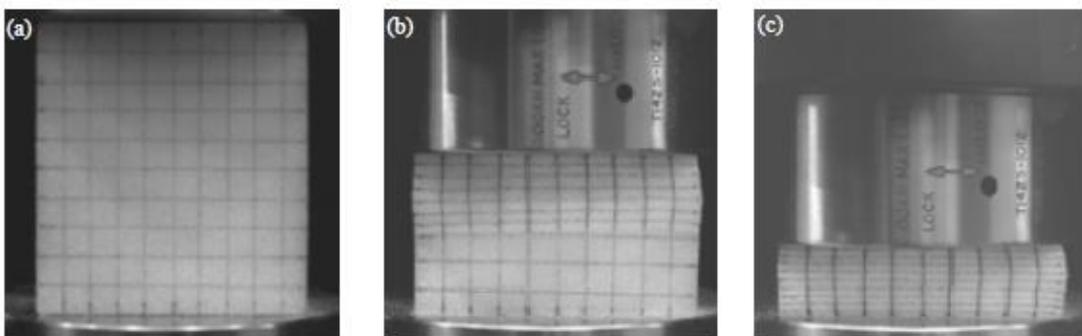


Figura 12 - Deformação do Rohacell 51 WF, a) sem compressão, b) compressão a 0,45 da deformação, c) compressão a 0,75 da deformação. [16]

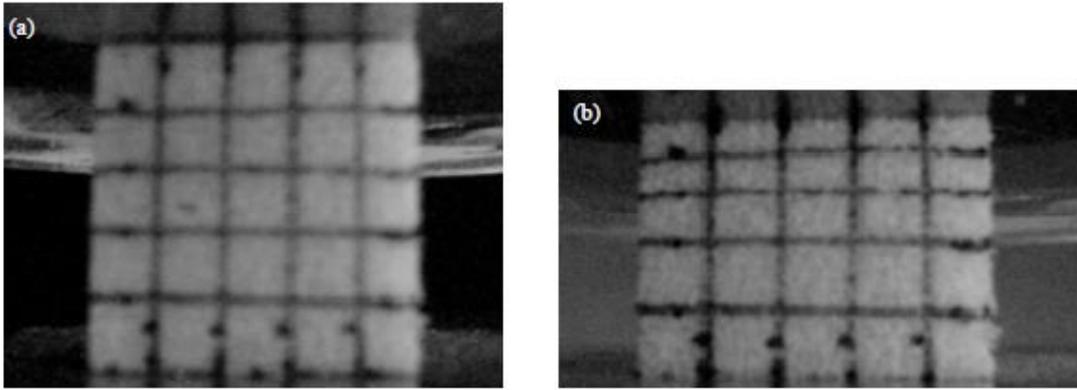


Figura 13 - Deformação do *Divinycell* H100, a) sem compressão, b) compressão a 0,3 da deformação. [16]



Figura 14 - Deformação do alumínio em *honeycomb* na direção L, a) sem compressão, b) compressão a 0,3 da deformação, c) compressão a 0,6 da deformação. [16]



Figura 15 - Deformação do alumínio em *honeycomb* na direção W, a) sem compressão, b) compressão a 0,3 da deformação, c) compressão a 0,6 da deformação. [16]

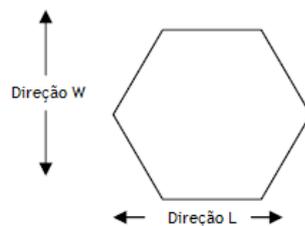


Figura 16 - Direções L e W no plano para o *honeycomb*. [16]

No caso das espumas das Figuras 12 e 13, repare-se que o esmagamento é progressivo com o carregamento aplicado, enquanto que, nas Figuras 14 e 15, em relação ao *honeycomb* de alumínio, se verificam padrões de deformação nas direções L e W diferentes do padrão de deformação das espumas.

- Carregamento ao corte (Espuma)

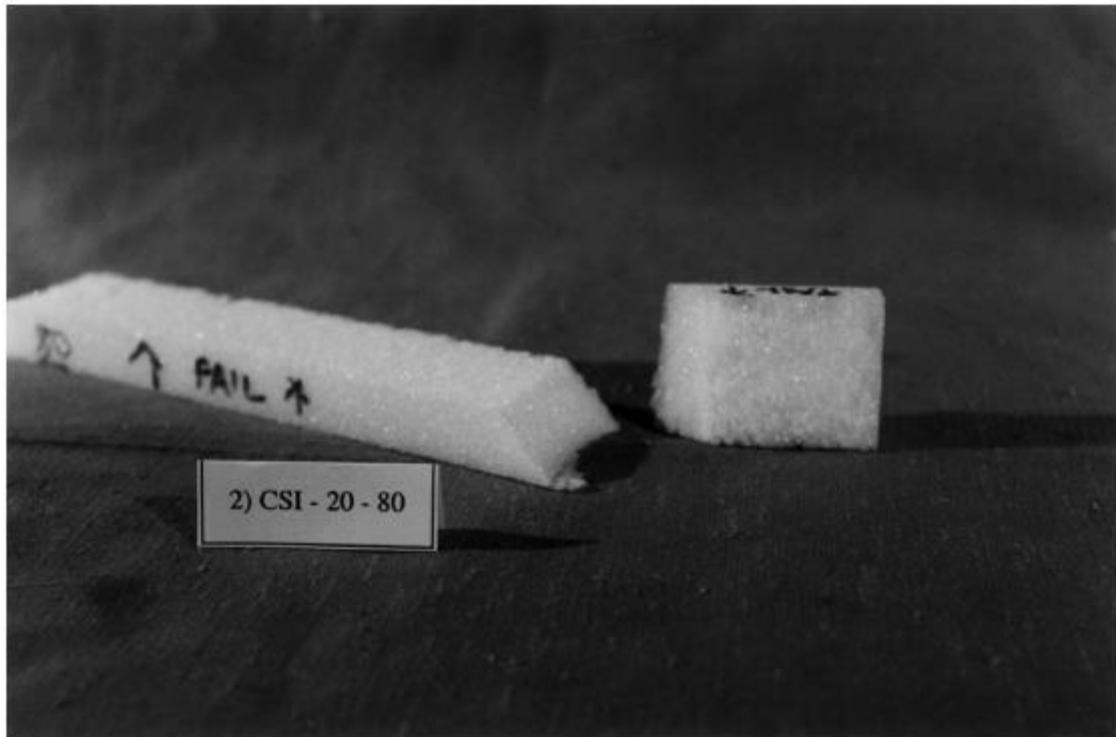


Figura 17 - Modo de falha ao corte. [17]

Como é possível visualizar na Figura 17, a falha ocorre a 45° da direção ao corte, o que implica que a tensão máxima da tração controle a falha. A espuma é bastante frágil mostrando pouco deformação plástica depois da falha.

2.5. Aplicações de compósitos de cortiça em aeronáutica

A cortiça é um material natural utilizado já há imenso tempo, sendo dos poucos materiais sobreviventes à competição dos substitutos desenvolvidos pelo homem.

Como descrito anteriormente no subcapítulo 2.1, poderemos aplicar a cortiça na indústria aeronáutica/aeroespacial.

Uma das aplicações mais úteis e já utilizada é o revestimento térmico aplicado na estrutura de um veículo espacial de modo a proteger a grande variação térmica na fase mais crítica de uma missão, que será a reentrada na atmosfera terrestre, devido à fricção das partículas na estrutura e à alta velocidade.

Ou seja, a cortiça é aplicada na estrutura de acordo com a visualização da Figura 18.

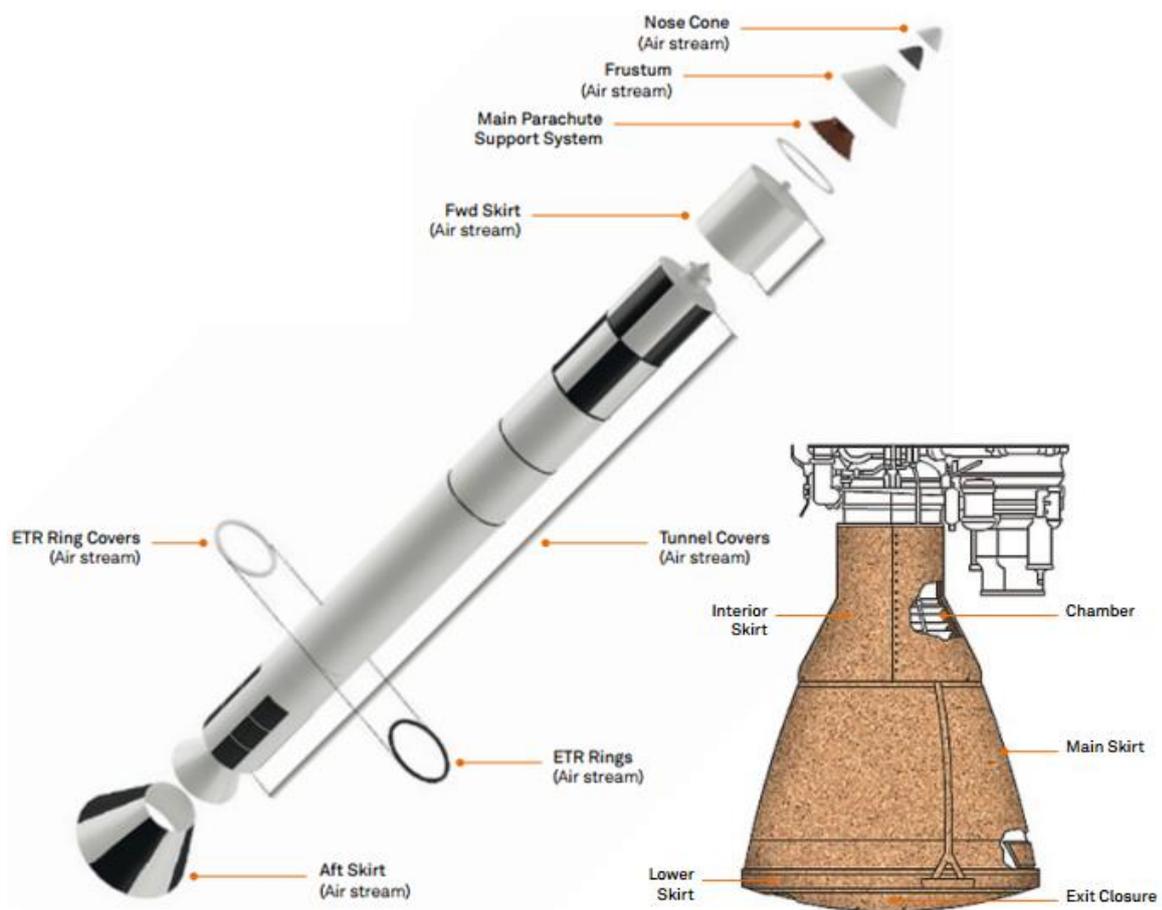


Figura 18 - Exemplos de aplicação de cortiça no sistema de propulsão de veículos espaciais. [18]

Capítulo 3 - Metodologia experimental

3.1. Materiais e parâmetros de estudo

3.1.1. Materiais

Para o fabrico de todos os provetes é utilizado o aglomerado de cortiça, **NL-10**, da *Amorim Cork Composites*. Este aglomerado é um material composto por grânulos de cortiça com densidade controlada e por um agente de ligação específico. A identificação do material é feita através dos números presentes na sigla, identificando assim o calibre e a qualidade do granulado [19]. A Tabela 1 mostra as suas propriedades.

| Propriedades | NL-10 |
|--------------------------------|-------|
| Densidade [Kg/m ³] | 167* |
| Resistência à compressão [MPa] | 0,3 |
| Módulo de compressão [MPa] | 5,1 |
| Resistência à tração [MPa] | 0,6 |
| Resistência ao corte [MPa] | 0,9 |
| Módulo de corte [MPa] | 5,9 |

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do material **NL-10**. [20] * A densidade é obtida das placas utilizadas na produção das amostras.

Para realizar os ensaios de flexão criou-se uma estrutura sandwich com o núcleo em NL-10 e as faces em tecido de fibra de vidro, da marca Rebelco 1280P. No Anexo 1 apresenta-se a ficha técnica deste tecido.

Foi também utilizada resina epoxy da marca Sicomin[®] SR 1500, com o endurecedor da mesma marca com referência SD 2503. Foi utilizada a mistura para fazer a união dos provetes a todos os diferentes suportes necessários para realizar os ensaios mecânicos. As características de ambos encontram-se no Anexo 2.

3.1.2. Parâmetros de estudo

As variáveis em estudo são a dimensão do furo, o espaçamento de parede dos furos e o padrão da furação, ou seja, a forma como são dispostos os furos. Consoante o teste, e de modo a cumprir todas as imposições feitas pelas normas de ensaio da ASTM (American Society for Testing Materials), as dimensões dos provetes variam consoante o ensaio, mas mantendo uma espessura de 15mm.

Realizaram-se três tipos de furações circulares, uma furação com 3mm de diâmetro, outra com 5mm de diâmetro e por último uma furação com 7mm de diâmetro. Em cada delas utilizou-se espaçamentos de parede das furações de 3mm, 5mm e 7mm.

Realizaram-se dois tipos de padronização de furos, em ambos foram realizados todas as furações e respetivos espaçamentos mencionados no parágrafo anterior. O primeiro, padrão linear, consiste no posicionamento dos furos em linhas retas, o segundo, padrão triangular, dispõe-se a furação em triângulos equiláteros.

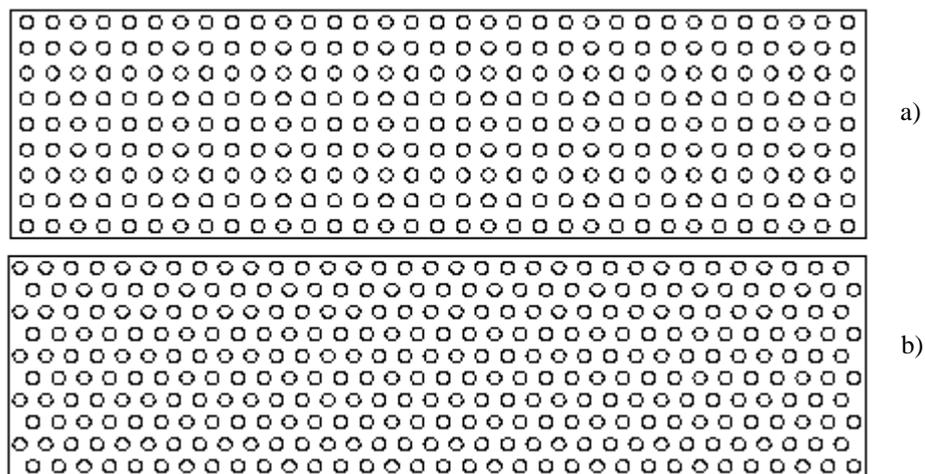


Figura 19 - Provetes de ensaio com furação de 3mm e espaçamento de parede de 3mm. a) padrão linear, b) padrão triangular.

A Tabela 3 identifica o código usado para identificar os provetes.

| Parcelas | Significado |
|----------------|--|
| 1 ^a | Diâmetro do furo: F3 - Furo 3mm F5 - Furo 5mm F7 - Furo 7mm |
| 2 ^a | Espaçamento de parede: EP3 - Espaçamento de parede de 3mm EP5 - Espaçamento de parede de 5mm EP7 - Espaçamento de parede de 7mm |
| 3 ^a | Tipo de padrão: PL - Padrão linear PT - Padrão triangular |

Tabela 3 - Código de nomenclatura dos provetes.

Utilizando os exemplos da Figura 19, a nomenclatura para o exemplo a) será F3_EP3_PL e para o exemplo b), F3_EP3_PT.

3.2. Processos de fabrico e equipamento

O método de fabrico dos provetes para cada ensaio mecânico é idêntico, pois, como o NL-10 é fornecido em placas de 1000x500mm, só é necessário cortar e furar o material de acordo com o ensaio pretendido. O corte e a furação dos provetes são realizados com o auxílio de uma CNC router, com vista a otimizar a qualidade dos provetes, podendo assim obter provetes com o mesmo padrão, a mesma furação e com o mesmo espaçamento de parede entre furação, fazendo com isto ser possível uma comparação entre si. A programação numérica é feita através do software Aspire 3.0. As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam a relação entre a densidade nominal, ρ_n , obtida através da relação de áreas da furação, e a densidade real, ρ_r , calculada com a medição e pesagem individual de cada provete.

| Amostra | ρ_n [Kg/m ³] | ρ_r [Kg/m ³] | ρ_n/ρ_r | Média ρ_n/ρ_r |
|-----------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|--------------------------|
| F3_EP3_PL | 134 | 140 | 0.96 | 0.96 |
| | | 143 | 0.94 | |
| | | 138 | 0.97 | |
| F3_EP5_PL | 148 | 144 | 1.03 | 1.02 |
| | | 148 | 1.01 | |
| | | 145 | 1.03 | |
| F3_EP7_PL | 155 | 159 | 0.97 | 0.98 |
| | | 161 | 0.97 | |
| | | 154 | 1.00 | |
| F3_EP3_PT | 129 | 130 | 0.99 | 1.01 |
| | | 128 | 1.01 | |
| | | 124 | 1.04 | |
| F3_EP5_PT | 146 | 148 | 0.98 | 0.98 |
| | | 147 | 0.99 | |
| | | 150 | 0.97 | |
| F3_EP7_PT | 153 | 151 | 1.01 | 1.02 |
| | | 154 | 0.99 | |
| | | 146 | 1.05 | |

Tabela 4 - Relação entre a densidade nominal e a densidade real, para furação de 3mm.

| Amostra | ρ_n [Kg/m ³] | ρ_r [Kg/m ³] | ρ_n/ρ_r | Média ρ_n/ρ_r |
|-----------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|--------------------------|
| F5_EP3_PL | 116 | 108 | 1.07 | 1.08 |
| | | 107 | 1.08 | |
| | | 106 | 1.09 | |
| F5_EP5_PL | 134 | 119 | 1.13 | 1.12 |
| | | 121 | 1.11 | |
| | | 119 | 1.13 | |
| F5_EP7_PL | 144 | 132 | 1.09 | 1.13 |
| | | 126 | 1.14 | |
| | | 126 | 1.14 | |
| F5_EP3_PT | 108 | 95 | 1.14 | 1.14 |
| | | 95 | 1.14 | |
| | | 95 | 1.14 | |
| F5_EP5_PT | 129 | 119 | 1.08 | 1.09 |
| | | 118 | 1.09 | |
| | | 119 | 1.08 | |
| F5_EP7_PT | 141 | 131 | 1.08 | 1.10 |
| | | 130 | 1.08 | |
| | | 124 | 1.14 | |

Tabela 5 - Relação entre a densidade nominal e a densidade real, para a furação de 5mm.

| Amostra | ρ_n [Kg/m ³] | ρ_r [Kg/m ³] | ρ_n/ρ_r | Média ρ_n/ρ_r |
|-----------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|--------------------------|
| F7_EP3_PL | 103 | 94 | 1.10 | 1.10 |
| | | 94 | 1.10 | |
| | | 94 | 1.10 | |
| F7_EP5_PL | 122 | 108 | 1.13 | 1.14 |
| | | 107 | 1.14 | |
| | | 107 | 1.14 | |
| F7_EP7_PL | 134 | 117 | 1.15 | 1.11 |
| | | 119 | 1.13 | |
| | | 126 | 1.06 | |
| F7_EP3_PT | 93 | 88 | 1.06 | 1.05 |
| | | 88 | 1.06 | |
| | | 89 | 1.04 | |
| F7_EP5_PT | 115 | 107 | 1.07 | 1.09 |
| | | 105 | 1.10 | |
| | | 104 | 1.11 | |
| F7_EP7_PT | 129 | 114 | 1.13 | 1.09 |
| | | 122 | 1.06 | |
| | | 120 | 1.08 | |

Tabela 6 - Relação entre a densidade nominal e a densidade real, para a furação de 7mm.

Como foi referido anteriormente, para a realização dos ensaios de flexão é necessário colocar faces no provete para não danificar o núcleo durante o ensaio. Para o fabrico das faces procede-se inicialmente ao corte manual do tecido de fibra de vidro que está entrelaçado nas direções de 0° e 90° com dimensões semelhantes às da placa de NL-10. A razão pela qual se cortou o tecido com dimensões semelhantes às do material foi a simplicidade do corte do tecido nas dimensões do provete, podendo assim utilizar a mesma programação numérica para o núcleo e para as faces. Após a finalização desta tarefa, procedeu-se à laminação manual das faces procedendo ao empilhamento de seis camadas de tecido de vidro – reforço – com a adição da mistura de resina epoxy/endurecedor – matriz. Na Tabela 7 são apresentadas as especificações das faces.

| | |
|-------------------------------|------|
| Comprimento [mm] | 900 |
| Largura [mm] | 500 |
| Massa total [g] | 1050 |
| Massa do reforço [g] | 730 |
| Massa da matriz [g] | 320 |
| Fração volumétrica de reforço | ≈48% |

Tabela 7 - Dados das faces dos provetes para ensaios de flexão.

Esta fração percentual de reforço foi cuidadosamente respeitada para existir uma igualdade na comparação dos provetes. Após a conclusão desta fase é criado o saco de vácuo para realizar uma cura inicial de oito horas à temperatura ambiente até a resina solidificar.

O vácuo é criado para eliminar a resina em excesso e realizar pressão sobre o tecido. A figura 20 ilustra o processo de laminação manual e a preparação do saco de vácuo.

Para a realização dos ensaios mecânicos utilizaram-se duas máquinas instaladas na Universidade da Beira Interior. Os ensaios de corte e flexão foram realizados na máquina de ensaios Shimadzu, Figura 21a), com uma célula de carga de 50KN, o ensaio é controlado pelo software Trapezium X. Já os ensaios de tração *flatwise* foram realizados na máquina universal Instron 1341, Figura 21b, com uma célula de carga de 100KN. O controlo dos ensaios é feito com o software WaveMatrix.

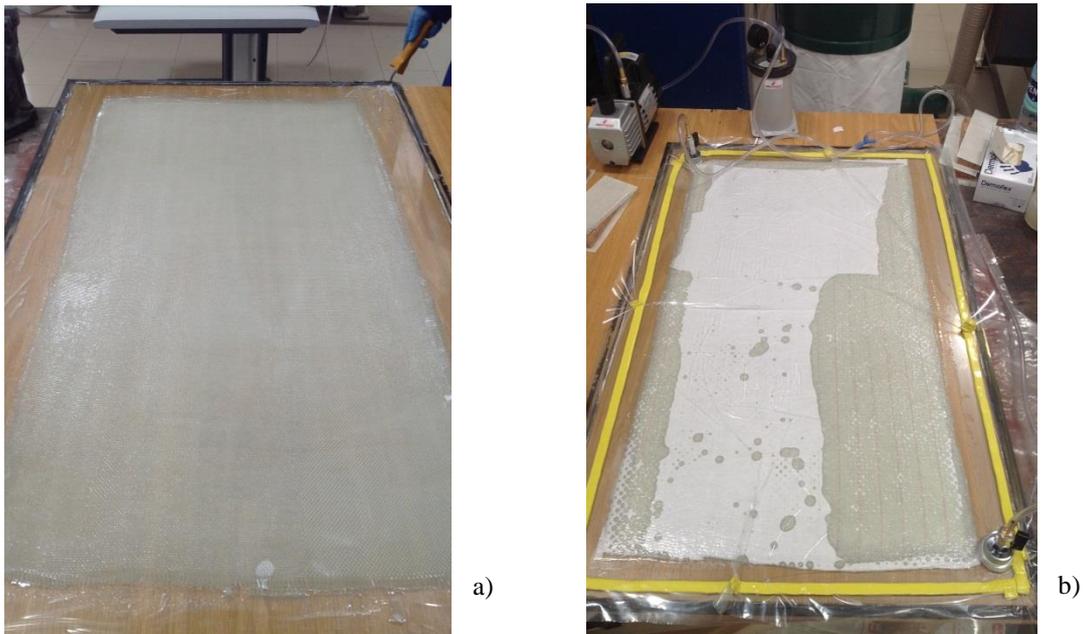


Figura 20 - Etapas do processo de fabrico das faces. a) laminação manual, b) saco de vácuo.

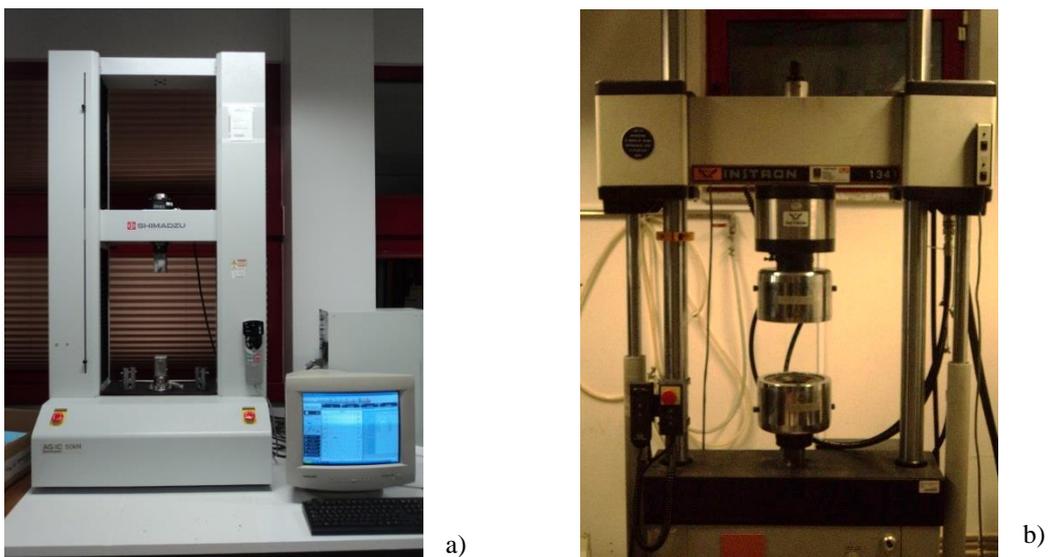


Figura 21 - Máquinas de ensaios. a) Shimadzu AG-IC, b) Instron 1341.

3.3. Ensaio mecânicos

3.3.1. Ensaio de flexão em quatro pontos

Estes ensaios são realizados para obter a resistência ao corte e o módulo de corte do núcleo. Pode-se também obter a resistência à compressão e à tração das faces, respectivamente da face superior e inferior, no caso deste estudo interessam apenas as propriedades relativas ao núcleo.

A norma pela qual se regem os ensaios é a ASTM C393/C393M: Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure [21]. Os ensaios podem ser realizados em três pontos de contato invés de quatro, mas a norma adverte para, em provetes com núcleos de baixa espessura e faces finas, a possibilidade de concentração de tensões, de forma que se optou por realizar os ensaios com quatro pontos de contato com os travessões moveis a 1/3 dos suportes da medida do vão. Para não danificar as faces, colocaram-se calços de borracha nas zonas de contato entre o provete e máquina. Para a velocidade de ensaio, a norma dita que a carga máxima deve ocorrer entre os 3 e os 6 minutos do ensaio.

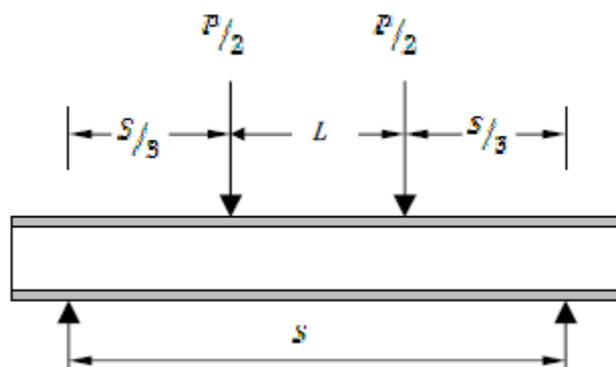


Figura 22 - Representação esquemática de ensaios de flexão a quatro pontos, com travessões a 1/3 dos suportes da medida do vão

P - Carga aplicada [N]

S - Vão [mm]

L - Distância entre travessões [mm]

b - Largura do provete [mm]

Em relação à geometria dos provetes é necessário respeitar os seguintes parâmetros:

1. Os provetes devem ter secção retangular;
2. A largura deve ser maior que duas vezes a espessura da sandwich, $b > 2d$;
3. A largura deve ser maior que três vezes a espessura do núcleo, $b > 3c$;
4. A largura deve ser menor que metade do vão, $b > \frac{1}{2}S$;
5. O comprimento do provete deve ser igual à distância do vão mais 50 mm ou mais metade da espessura da sandwich, escolhendo sempre a maior destas medidas.

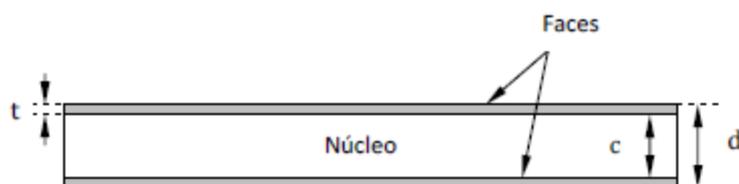


Figura 23 - Nomenclatura das dimensões.

| Amostras | Largura b [mm] | Comprimento L [mm] |
|-----------|----------------|--------------------|
| F3_EP3_PL | 54,0 | 200 |
| F3_EP5_PL | 56,0 | 200 |
| F3_EP7_PL | 60,0 | 200 |
| F3_EP3_PT | 51,9 | 200 |
| F3_EP5_PT | 56,5 | 204 |
| F3_EP7_PT | 62,0 | 205 |
| F5_EP3_PL | 56,0 | 200 |
| F5_EP5_PL | 60,0 | 200 |
| F5_EP7_PL | 60,0 | 204 |
| F5_EP3_PT | 56,5 | 204 |
| F5_EP5_PT | 62,0 | 205 |
| F5_EP7_PT | 64,0 | 210 |
| F7_EP3_PL | 60,0 | 200 |
| F7_EP5_PL | 60,0 | 204 |
| F7_EP7_PL | 70,0 | 210 |
| F7_EP3_PT | 62,0 | 205 |
| F7_EP5_PT | 64,0 | 210 |
| F7_EP7_PT | 62,5 | 203 |

Tabela 8 - Geometria das amostras de ensaio de flexão em quatro pontos.

A medida do vão, S , é de 150mm.

Para efeitos de ensaios são utilizados 4 provetes por amostra. Como referido anteriormente em 3.1.2 a espessura do núcleo das amostras, c , é de 15mm, e a espessura total, d , é de 17,8mm. Para assegurar que a teoria de flexão de vigas seja válida para casos com quatro pontos de contacto, uma regra de ouro é que o rácio entre a espessura da face e a espessura do núcleo sejam menor que 0,1, $t/c < 0,1$. Como $t=1,3\text{mm}$, $t/c=0,087$.

3.3.2. Ensaios ao corte

Este ensaio é usual para determinar as propriedades ao corte do núcleo de materiais sandwich. Abrange também a determinação da resistência ao corte paralela ao plano da *sandwich*.

A norma seguida para a realização deste ensaio é a ASTM C273/C273M: Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials [22]. O ensaio pode ser realizado de duas formas: à tração ou à compressão. O método escolhido foi a tração por uma maior facilidade na criação dos suportes de ensaio. O principal cuidado a ter ao realizar os ensaios é garantir que o suporte inferior e superior, que estão ligados à máquina de ensaio, estejam no mesmo plano para evitar existência de esforços de torção. A velocidade de ensaio é definida da mesma forma que para o ensaio de flexão em quatro pontos.

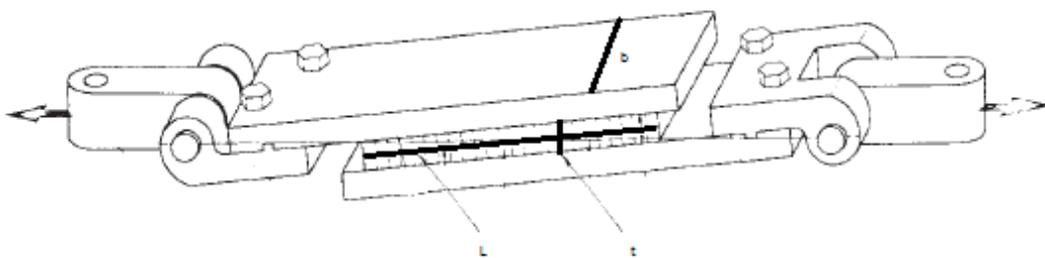


Figura 24 - Representação esquemática do ensaio de corte.

b - Largura do provete [mm]

L - Comprimento do provete [mm]

t - Espessura do provete [mm]

A geometria dos provetes é decidida pelos parâmetros da norma:

1. A largura deve ser maior que 50mm, $b > 50\text{mm}$;
2. O comprimento não deve ser menor que doze vezes a espessura (t), $L > 12t$.

| Amostras | Largura b [mm] | Comprimento L [mm] |
|-----------|----------------|--------------------|
| F3_EP3_PL | 54,0 | 200 |
| F3_EP5_PL | 56,0 | 200 |
| F3_EP7_PL | 60,0 | 200 |
| F3_EP3_PT | 51,9 | 200 |
| F3_EP5_PT | 56,5 | 204 |
| F3_EP7_PT | 62,0 | 205 |
| F5_EP3_PL | 56,0 | 200 |
| F5_EP5_PL | 60,0 | 200 |
| F5_EP7_PL | 60,0 | 204 |
| F5_EP3_PT | 56,5 | 204 |
| F5_EP5_PT | 62,0 | 205 |
| F5_EP7_PT | 64,0 | 210 |
| F7_EP3_PL | 60,0 | 200 |
| F7_EP5_PL | 60,0 | 204 |
| F7_EP7_PL | 70,0 | 210 |
| F7_EP3_PT | 62,0 | 205 |
| F7_EP5_PT | 64,0 | 210 |
| F7_EP7_PT | 62,5 | 203 |

Tabela 9 - Geometria das amostras de ensaio de corte.

A espessura do núcleo, t , é igual a 15mm, como é referido anteriormente.

Como é possível verificar, as amostras do ensaio de flexão em quatro pontos e as do ensaio ao corte são iguais. Neste ensaio decidiu-se reduzir um provete em cada amostra, ficando assim com três provetes por amostra. Esta decisão foi tomada porque só existiam seis placas para fixar os provetes à máquina e cada provete necessita de duas, pelo que só é possível ensaiar três provetes em simultâneo.

3.3.3. Ensaios de tração

Neste tipo de ensaio pretende-se quantificar as propriedades à tração *flatwise* do material. A norma pela qual se rege o ensaio é a ASTM C297/C297M: Standard Test Method for *Flatwise* Tensile Strength of Sandwich Constructions [23].

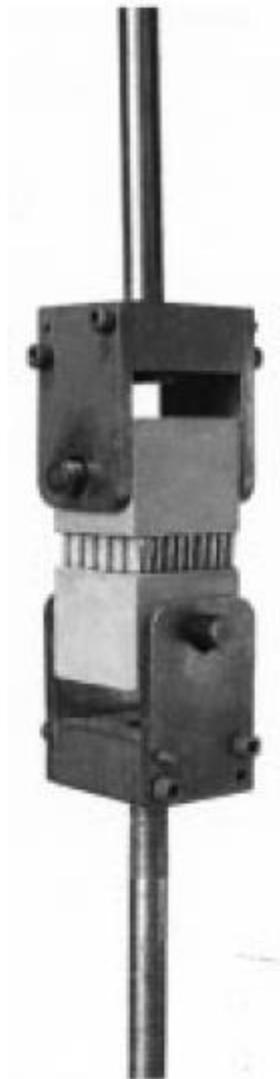


Figura 25 - Esquema do ensaio de tração *flatwise*.

Esta norma permite, como foi dito anteriormente determinar a resistência à tração *flatwise*. Os materiais que se podem utilizar são materiais com faces contínuas – balsa, madeira e espumas – e também com faces de ligações descontínuas, tal como “honeycomb”. Para realizar os ensaios é necessário usarem-se blocos de carregamento que devem ser suficientemente rígidos para manter o núcleo plano durante o carregamento. Sobre a velocidade de ensaio a norma dita que a rutura total do núcleo deve ocorrer entre os 3 e os 6 minutos.

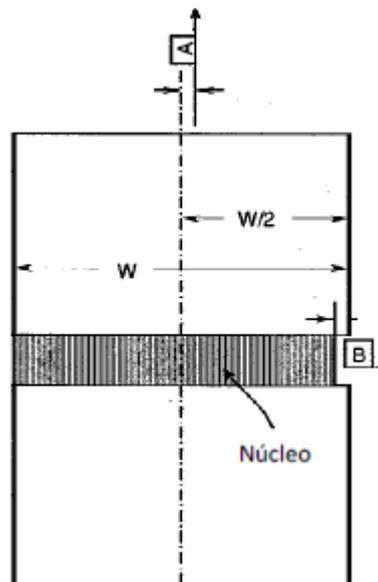


Figura 26 - Representação esquemática do ensaio de tração *flatwise*.

A - Linha de ação da força

B - Tolerância entre o núcleo e as fixações de carregamento

W - Largura e comprimento do bloco

Outro aspecto a ter em conta é que B seja inferior a 0,013 do comprimento e da largura do provete. Para garantir que tal suceda, dimensionaram-se os blocos com as medidas exatas dos provetes. Também é necessário assegurar que a linha de ação da força tem um desvio máximo de 0,025mm em relação ao eixo central do núcleo.

Para a não existência de momentos torsores é necessário garantir que a linha de ação da força inferior e superior estejam coincidentes com o mesmo eixo. Para que tal seja possível recorre-se à peça da Figura 27. Esta foi criada com o propósito de garantir que a imposição feita pela norma referida anteriormente seja cumprida.



Figura 27 - Peça utilizada para o alinhamento das fixações de carregamento.

Relativamente à geometria dos provetes com superfícies descontínuas, os seguintes parâmetros devem ser respeitados:

1. Número de células deve ser superior a 60;
2. A secção transversal deve ser retangular ou circular;
3. Tabela 10.

| Dimensão mínima da célula [mm] | Dimensão máxima da célula [mm] | Área mínima [mm ²] |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| - | 3 | 625 |
| 3 | 6 | 2500 |
| 6 | 9 | 5625 |

Tabela 10 - Área mínima recomendada.

Na Tabela 11 apresenta-se as dimensões das amostras.

| Amostras | Largura b [mm] | Comprimento L [mm] | Área [mm ²] |
|-----------|----------------|--------------------|-------------------------|
| F3_EP3_PL | 42,0 | 54,0 | 2268 |
| F3_EP5_PL | 56,0 | 72,0 | 4032 |
| F3_EP7_PL | 70,0 | 90,0 | 6300 |
| F3_EP3_PT | 36,3 | 57,0 | 2073 |
| F3_EP5_PT | 48,5 | 76,0 | 3686 |
| F3_EP7_PT | 60,6 | 95,0 | 5759 |
| F5_EP3_PL | 56,0 | 72,0 | 4032 |
| F5_EP5_PL | 70,0 | 90,0 | 6300 |
| F5_EP7_PL | 84,0 | 108,0 | 9072 |
| F5_EP3_PT | 48,5 | 76,0 | 3686 |
| F5_EP5_PT | 60,6 | 95,0 | 5759 |
| F5_EP7_PT | 72,7 | 114,0 | 8293 |
| F7_EP3_PL | 70,0 | 90,0 | 6300 |
| F7_EP5_PL | 84,0 | 108,0 | 9072 |
| F7_EP7_PL | 98,0 | 126,0 | 12348 |
| F7_EP3_PT | 60,6 | 95,0 | 5759 |
| F7_EP5_PT | 72,7 | 114,0 | 8293 |
| F7_EP7_PT | 84,9 | 133,0 | 10889 |

Tabela 11 - Geometria das amostras de ensaio de tração *flatwise*.

Importa ainda salientar a forma de ligação das fixações aos cubos de madeira, de mogno sapel: utilizaram-se quatro parafusos para cada fixação.

Capítulo 4 - Análise e discussão dos resultados

4.1. Características à flexão

Para este tipo de ensaio utilizaram-se provetes sandwich. É a sandwich que é testada e não apenas o núcleo de aglomerado de cortiça como acontece nos ensaios seguintes. Foram realizados ensaios de flexão em quatro pontos para todas as diferentes amostras. Para efeitos comparativos, efetuou-se o mesmo ensaio para o material em estudo, sem furação, material base NL-10. A Figura 28 evidencia uma curva típica de flexão de estruturas sandwich com núcleo em aglomerado de cortiça. Observa-se muito facilmente que este exibe um comportamento dúctil, apresentando uma zona de cedência e uma deformação considerável.

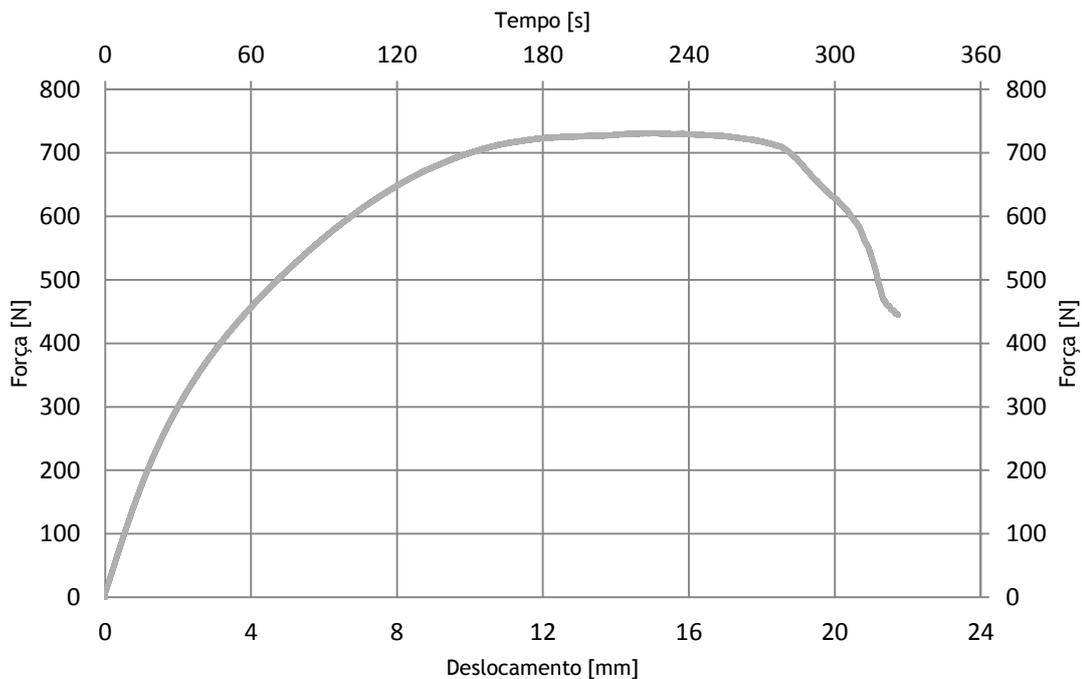


Figura 28 - Curva força-deslocamento e força-tempo, no ensaio de flexão para a amostra F5_EP5_PL.

Todas as amostras apresentaram o mesmo tipo de falha, uma fenda em diagonal desde o ponto de carregamento inferior atravessando a espessura total do provete, como se visualiza na Figura 29.

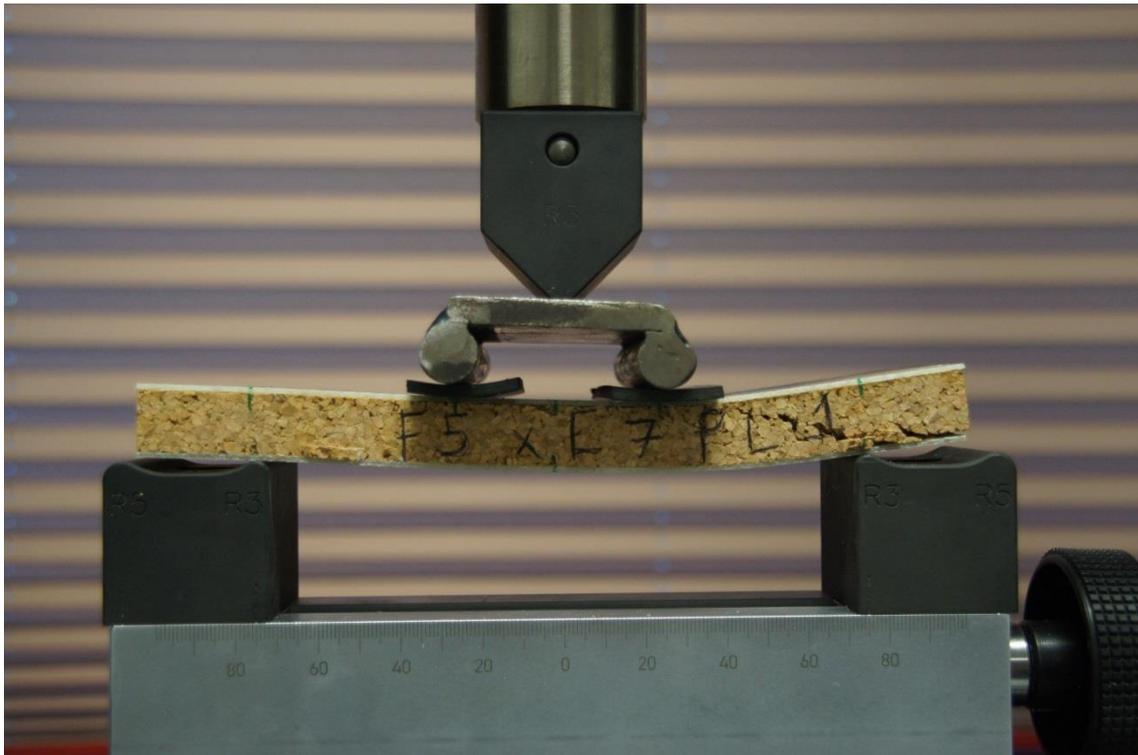


Figura 29 - Mecanismo de falha da sandwich de cortiça à flexão.

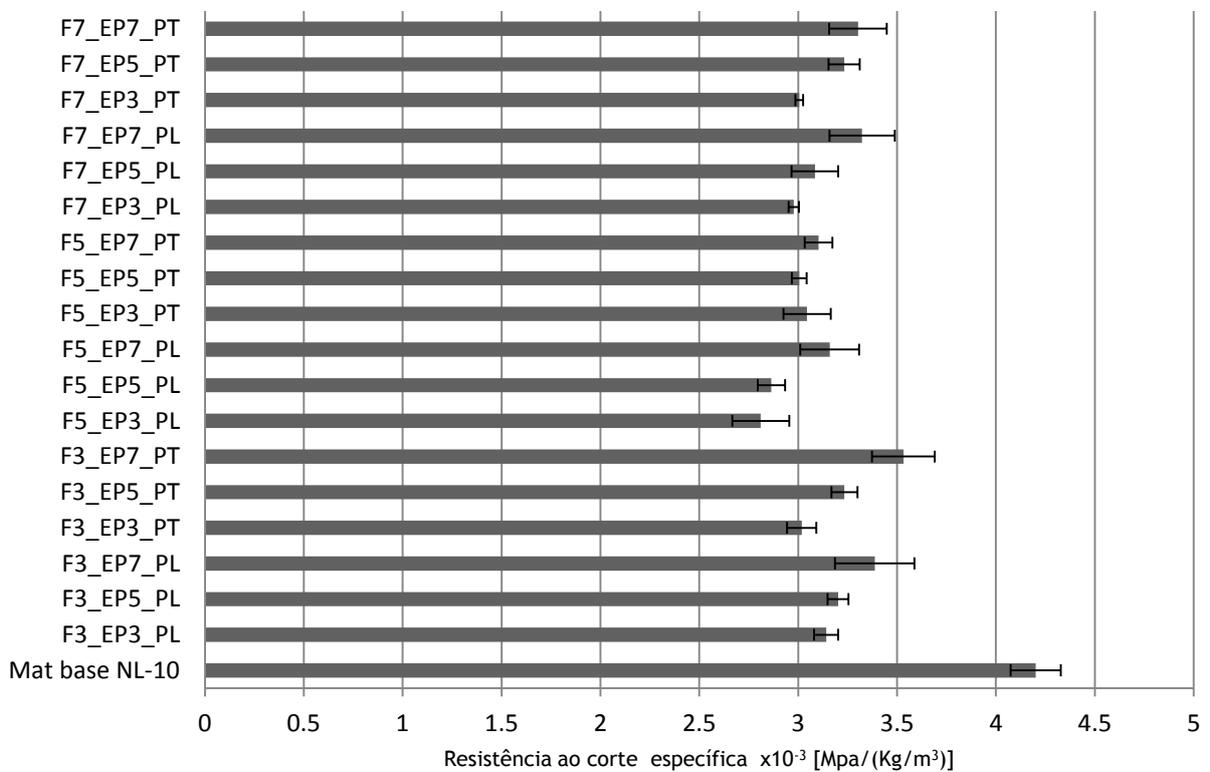


Figura 30 - Resistência ao corte específica para ensaios de flexão em quatro pontos.

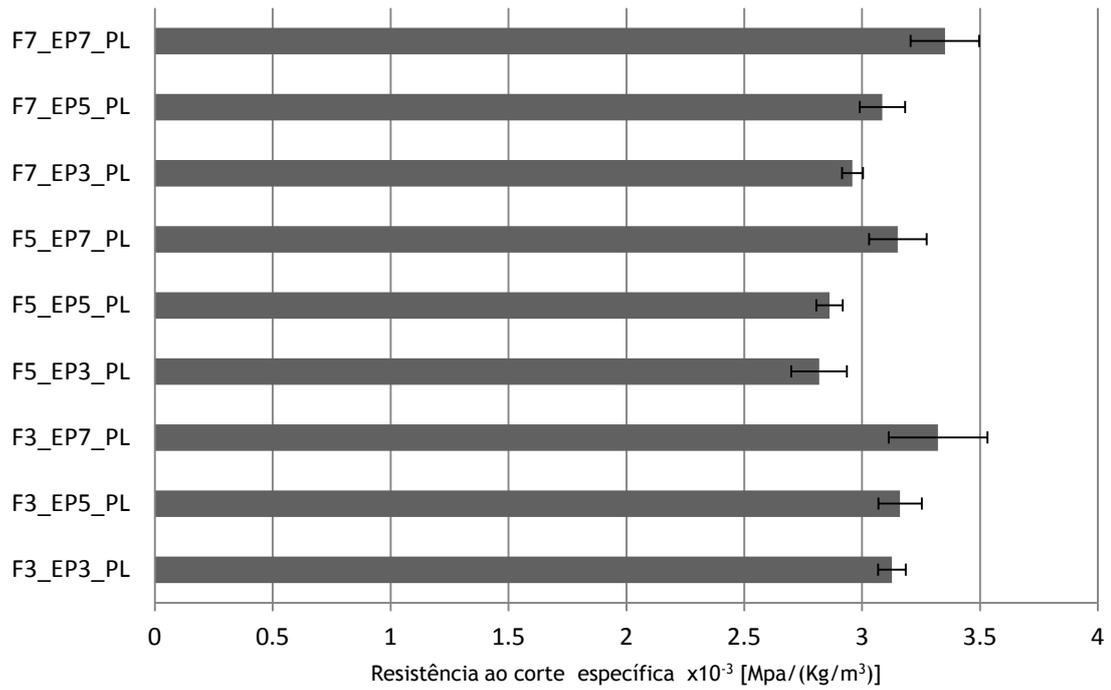


Figura 31 - Resistência ao corte específica para ensaios de flexão em quatro pontos, com padrão linear.

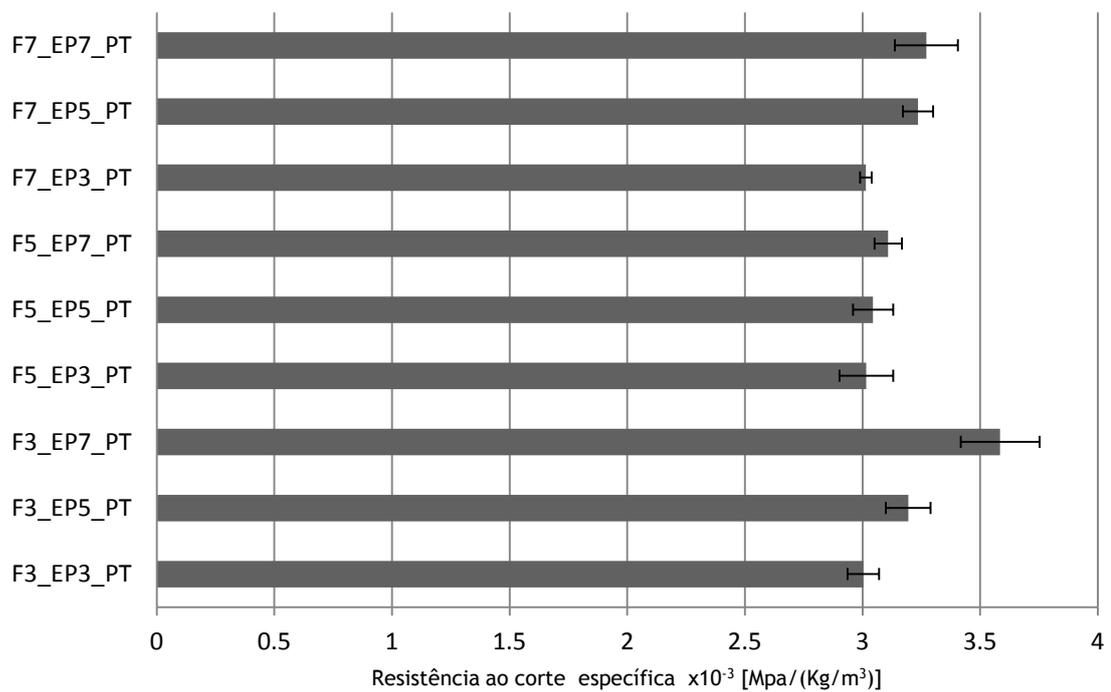


Figura 32 - Resistência ao corte específica para ensaios de flexão em quatro pontos, com padrão triangular.

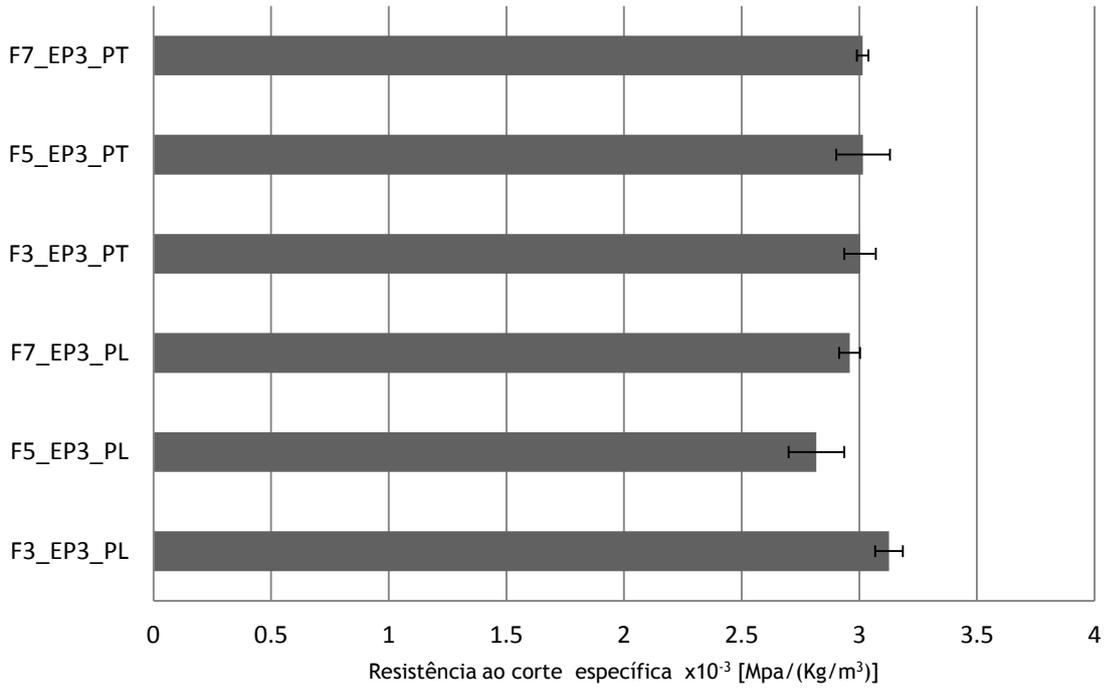


Figura 33 - Resistência ao corte específica para ensaios de flexão em quatro pontos, com espaçamento de parede de 3mm.

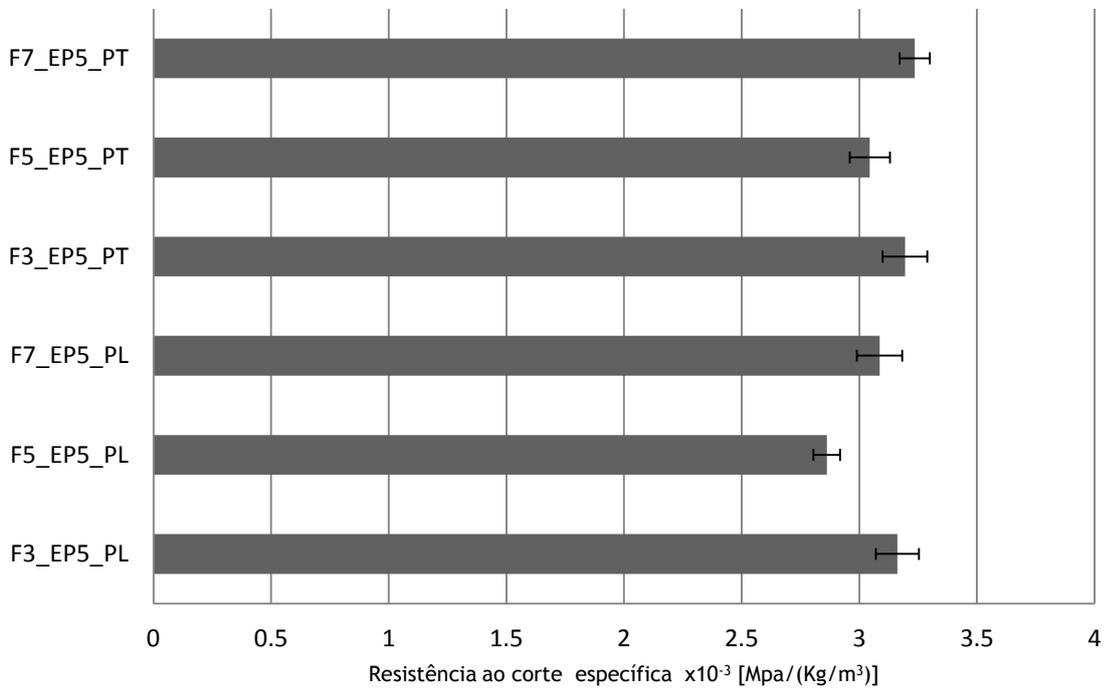


Figura 34 - Resistência ao corte específica para ensaios de flexão em quatro pontos, com espaçamento de parede de 5mm.

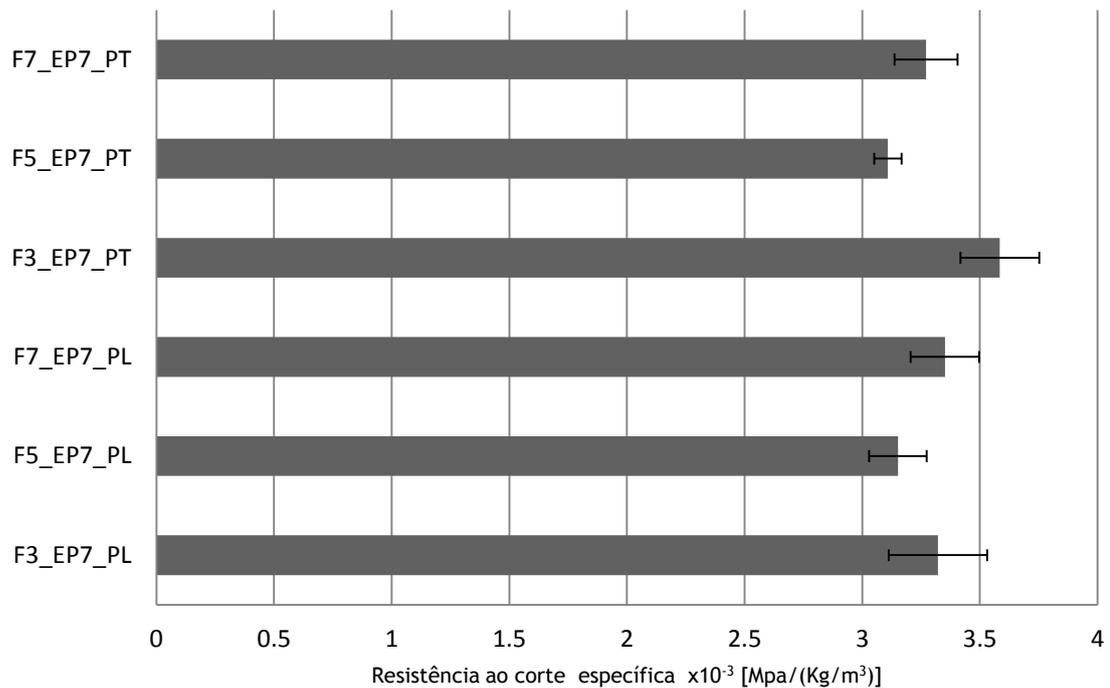


Figura 35 - Resistência ao corte específica para ensaios de flexão em quatro pontos, com espaçamento de parede de 7mm.

A resistência ao corte foi dividida pela respectiva densidade nominal da amostra para efeitos comparativos. Deste modo, apesar de as amostras possuírem geometrias diferentes relativamente ao comprimento e à largura é possível fazer uma comparação direta entre elas e os parâmetros de estudo.

A resistência ao corte é obtida através da equação recomendada pela norma da ASTM C393/C393M [21].

$$\tau = \frac{P}{(d + c)b}$$

τ - Resistência ao corte

P - Carga aplicada

d - Espessura da sandwich

c - Espessura do núcleo

b - Largura da sandwich

Na Tabela 12 compilam-se os valores médios das tensões de corte no núcleo específicas de cada uma das amostras juntamente com o respetivo desvio padrão.

| Amostras | τ_{med}^p $\times 10^{-3}$ [MPa/(Kg/m ³)] | Desvio Padrão $\times 10^{-3}$ [MPa/(Kg/m ³)] |
|------------------------|---|--|
| Material Base NL-10 | 4,20 | 0,13 |
| F3_EP3_PL | 3,14 | 0,06 |
| F3_EP5_PL | 3,20 | 0,05 |
| F3_EP7_PL | 3,39 | 0,20 |
| F3_EP3_PT | 3,02 | 0,07 |
| F3_EP5_PT | 3,23 | 0,07 |
| F3_EP7_PT | 3,53 | 0,16 |
| F5_EP3_PL | 2,81 | 0,14 |
| F5_EP5_PL | 2,86 | 0,07 |
| F5_EP7_PL | 3,16 | 0,15 |
| F5_EP3_PT | 3,04 | 0,12 |
| F5_EP5_PT | 3,00 | 0,04 |
| F5_EP7_PT | 3,10 | 0,07 |
| F7_EP3_PL | 2,98 | 0,03 |
| F7_EP5_PL | 3,08 | 0,12 |
| F7_EP7_PL | 3,32 | 0,16 |
| F7_EP3_PT | 3,00 | 0,02 |
| F7_EP5_PT | 3,23 | 0,08 |
| F7_EP7_PT | 3,30 | 0,15 |

Tabela 12 - Valores médios da resistência ao corte específica e do seu desvio padrão, para ensaios de flexão em quatro pontos.

Analisando os gráficos das Figuras 31 e 32 onde os padrões são constantes visualiza-se que com o aumento do espaçamento, para a mesma dimensão de furo aumenta a resistência. Já nos gráficos das Figuras 33, 34 e 35 onde se mantém o espaçamento de parede constante, é possível verificar que com furação de 5mm as resistências tendem a ser menores quando comparadas diretamente com o mesmo espaçamento de parede e o mesmo padrão. Exceto para o caso EP3_PT em que se mantém constante. Importante de salientar é que a redução da resistência ao corte é superior a redução da densidade. A redução da resistência ao corte é em média cerca de 25%.

4.2. Características ao corte

Para os ensaios ao corte procedeu-se de forma semelhante aos ensaios de flexão. Realizaram-se os ensaios para cada amostra e para o material base NL-10. A Figura 36 mostra uma curva típica do ensaio corte para estruturas com núcleo de aglomerado de cortiça.

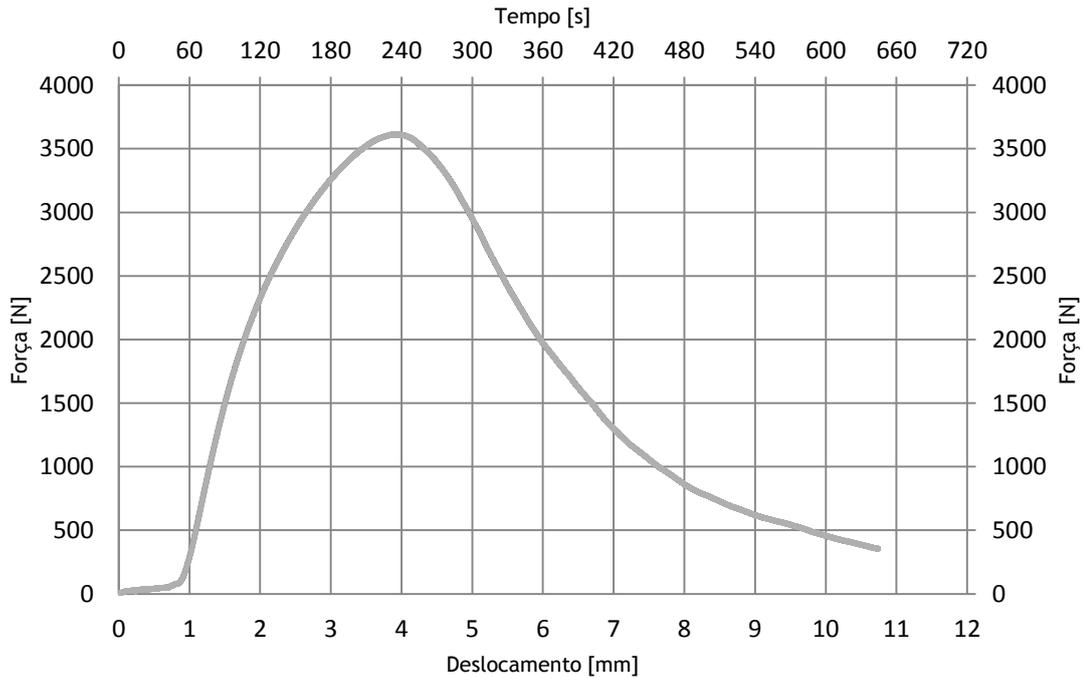


Figura 36 - Curva força-deslocamento e força-tempo, no ensaio de corte para a amostra F5_EP5_PL.

Nota-se que o início da curva não representa o corte, mas sim a extensão inicial da máquina pois quando a amostra é colocada na máquina de ensaio não se encontra imediatamente em esforço de tração. Inicialmente procede-se ao alinhamento dos suportes. As amostras apresentaram o mesmo tipo de falha: fendas a 45° , como mostra a Figura 37.

Através da análise da Figura 37, deduz-se que a amostra não rompe devido ao esforço de corte mas sim por arrancamento do material. Neste ensaio como no anterior os gráficos são apresentados com a resistência específica, em função do espaçamento de parede e do padrão.

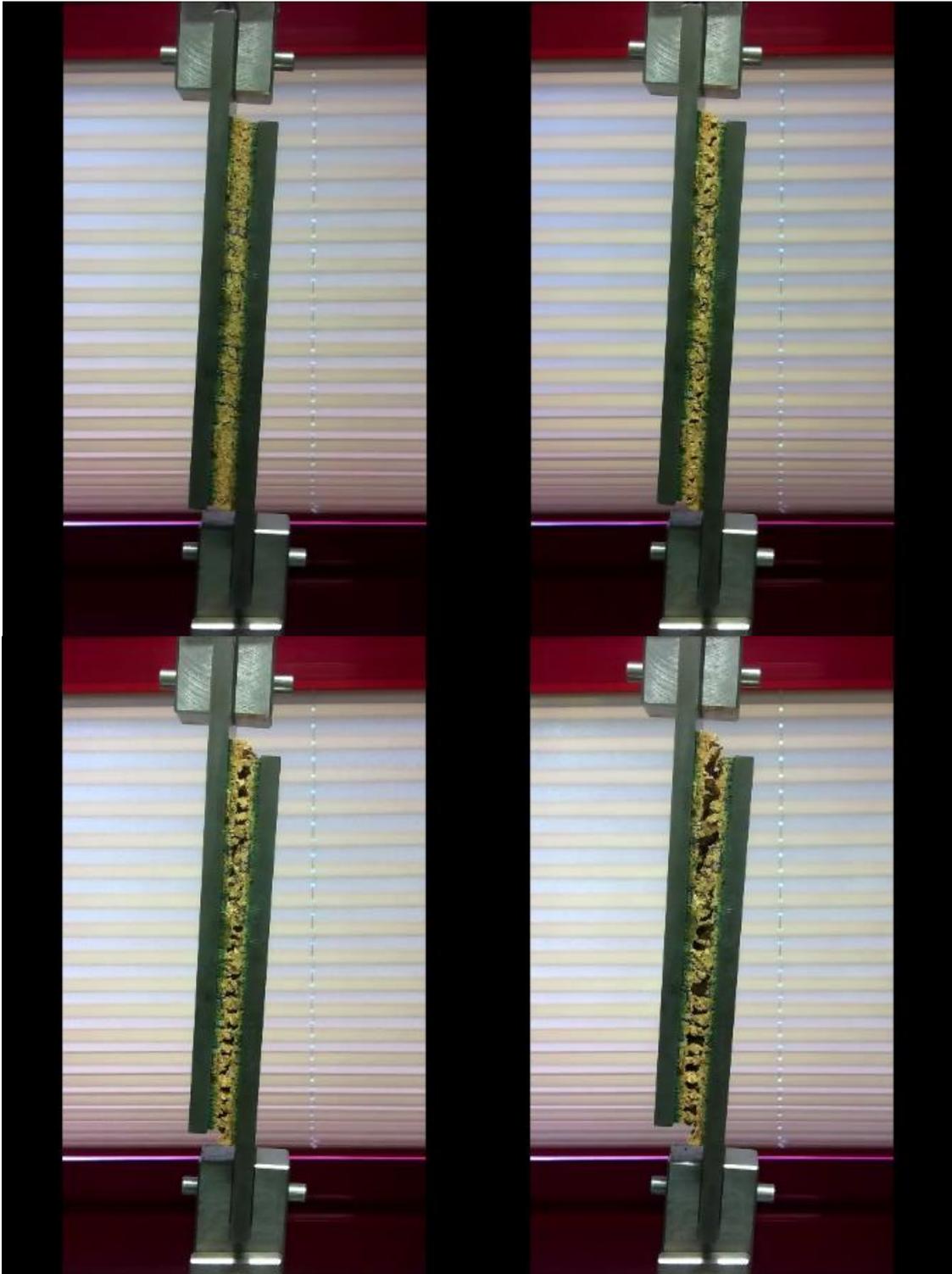


Figura 37 - Etapas de carregamento ao corte.

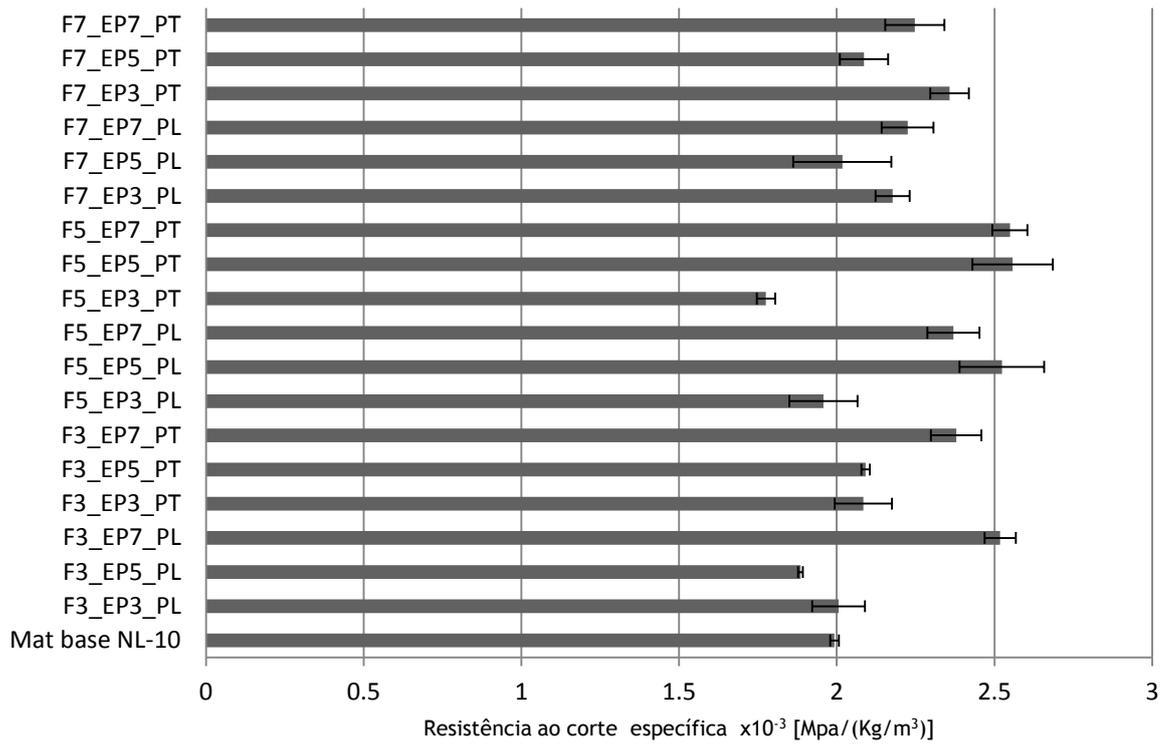


Figura 38 - Resistência ao corte específica para ensaios de corte.

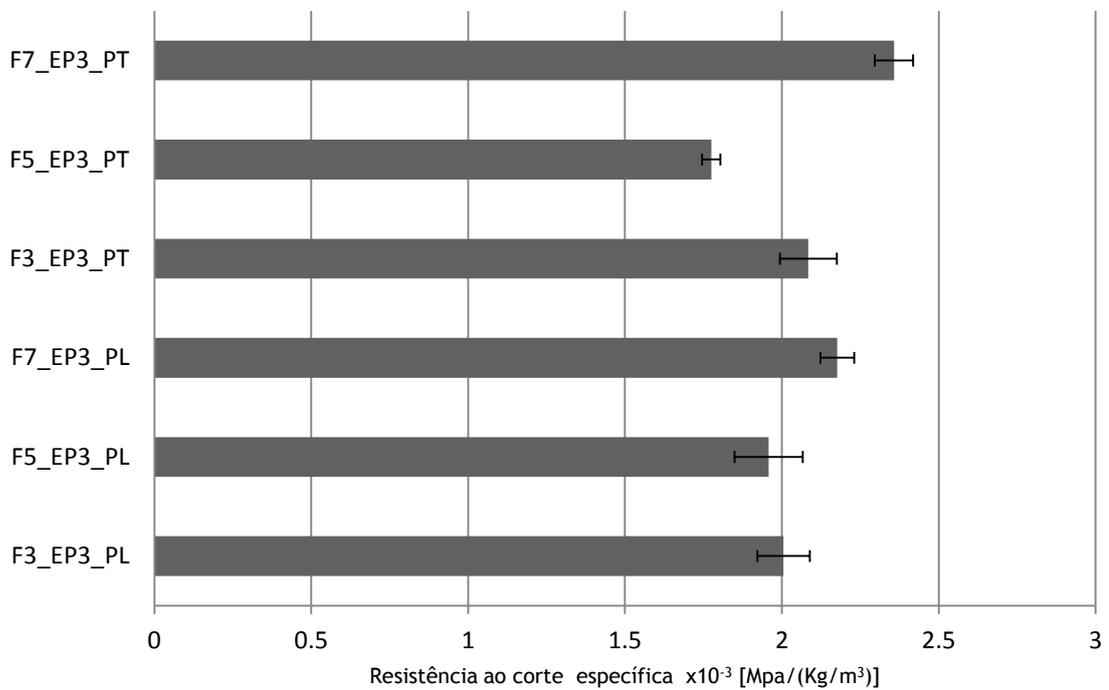


Figura 39 - Resistência ao corte específica para ensaios de corte, com espaçamento de parede de 3mm.

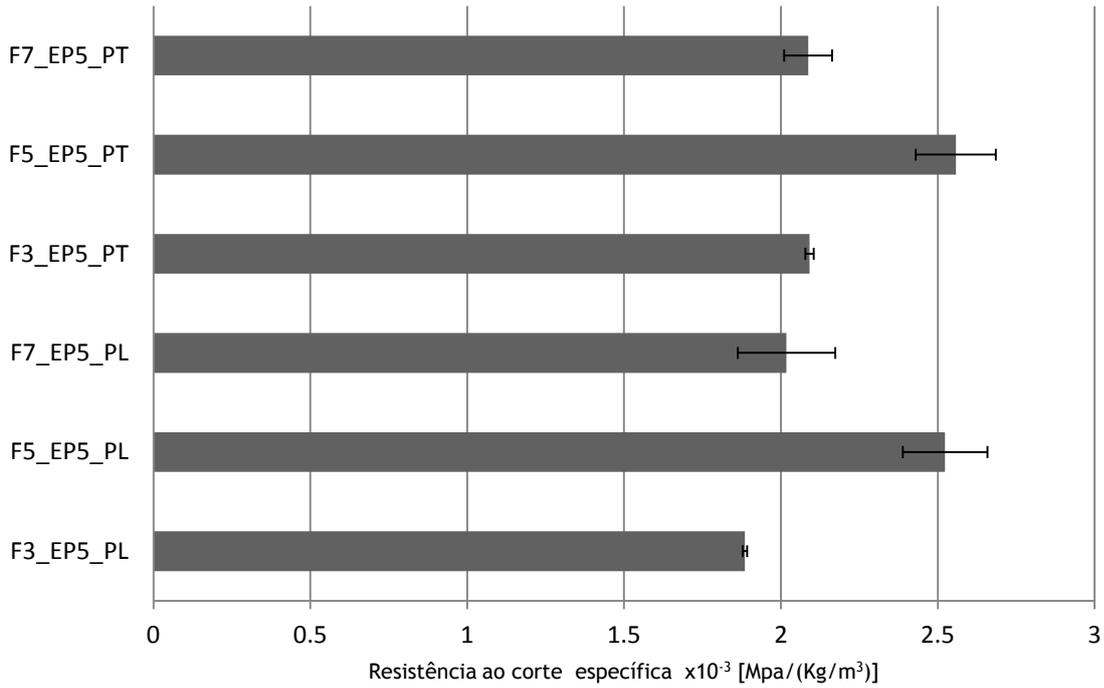


Figura 40 - Resistência ao corte específica para ensaios de corte, com espaçamento de parede de 5mm.

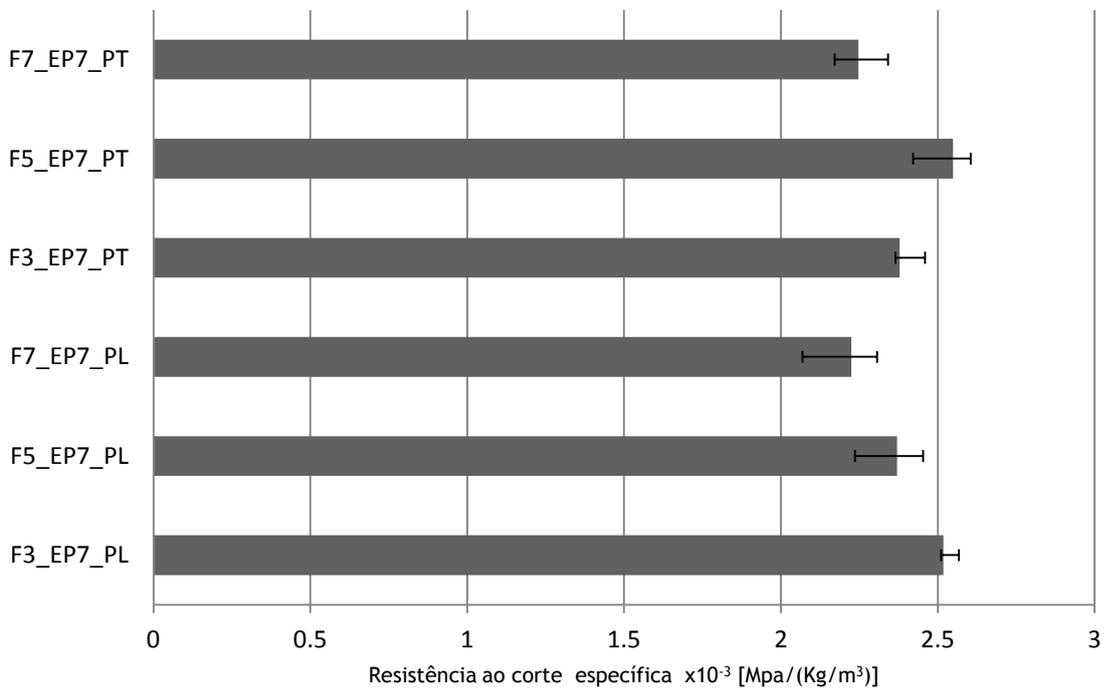


Figura 41 - Resistência ao corte específica para ensaios de flexão a quatro pontos, com espaçamento de parede de 7mm.

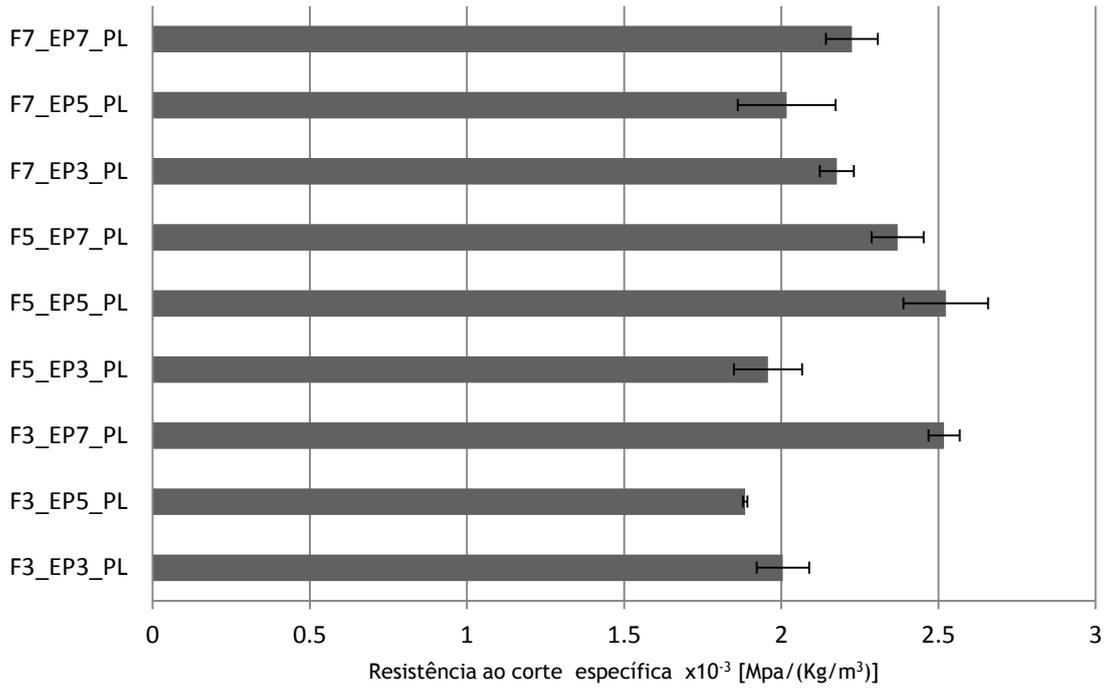


Figura 42 - Resistência ao corte específica para ensaios de corte, com padrão linear.

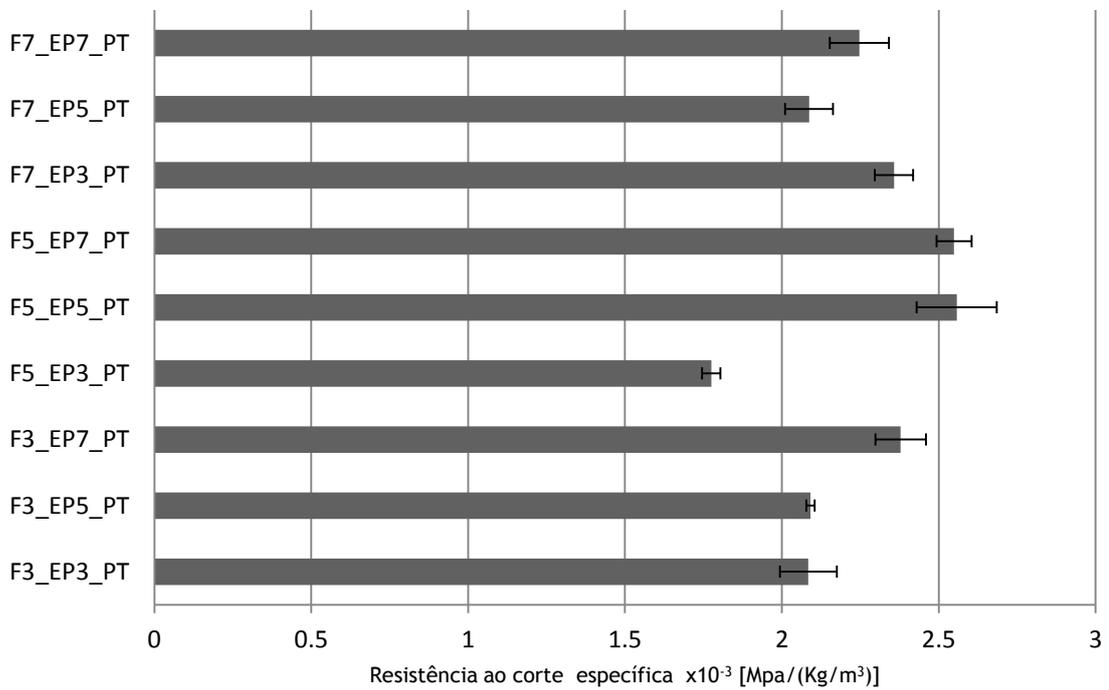


Figura 43 - Resistência ao corte específica para ensaios de corte, com padrão triangular.

A fórmula utilizada para o cálculo da resistência ao corte é definida pela norma ASTM C273/C273M: Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials [22].

$$\tau = \frac{P}{Lb}$$

τ - Resistência ao corte

P - Carga aplicada

L - Comprimento

b - Largura

Na tabela 13 apresenta-se os valores médios das tensões de corte específicas de cada uma das amostras e o respetivo desvio padrão.

| Amostras | τ_{med}^p $\times 10^{-3}$ [MPa/(Kg/m ³)] | Desvio Padrão $\times 10^{-3}$ [MPa/(Kg/m ³)] |
|------------------------|---|--|
| Material base NL-10 | 1,99 | 0,01 |
| F3_EP3_PL | 2,01 | 0,08 |
| F3_EP5_PL | 1,89 | 0,01 |
| F3_EP7_PL | 2,52 | 0,05 |
| F3_EP3_PT | 2,08 | 0,09 |
| F3_EP5_PT | 2,09 | 0,01 |
| F3_EP7_PT | 2,38 | 0,08 |
| F5_EP3_PL | 1,96 | 0,11 |
| F5_EP5_PL | 2,52 | 0,13 |
| F5_EP7_PL | 2,37 | 0,08 |
| F5_EP3_PT | 1,78 | 0,03 |
| F5_EP5_PT | 2,56 | 0,13 |
| F5_EP7_PT | 2,55 | 0,06 |
| F7_EP3_PL | 2,18 | 0,05 |
| F7_EP5_PL | 2,02 | 0,16 |
| F7_EP7_PL | 2,22 | 0,08 |
| F7_EP3_PT | 2,36 | 0,06 |
| F7_EP5_PT | 2,09 | 0,08 |
| F7_EP7_PT | 2,25 | 0,09 |

Tabela 13 - Valores médios da resistência ao corte específica e do seu desvio padrão, para ensaios ao corte.

Analisando os gráficos em que o espaçamento é constante e no caso com espaçamento de 3mm acontece algo semelhante aos ensaios de flexão, isto é, a furação de 5mm apresenta valores de resistência inferiores em relação à furação de 3mm e 7mm. Já nos casos com espaçamento de 5mm e 7mm acontece exatamente o contrário.

Olhando agora para os gráficos das Figuras 42 e 43, facilmente se observa o estranho fenômeno em que as amostras com espaçamento de parede de 5mm têm uma menor resistência específica à exceção do caso com furação de 5mm, em que a resistência é superior. Referindo agora casos particulares, comparando diretamente o F3_EP3_PT com F3_EP5_PT e F5_EP5_PT com F5_EP7_PT, repara-se que o aumento do espaçamento não tem influência na resistência.

Para o caso de espaçamento de parede de 3mm a furação de 5mm origina uma menor resistência ao corte, enquanto que nos outros casos a furação de 5mm origina uma maior resistência, à exceção do caso com espaçamento de 7mm e padrão linear, em que a variação é contínua com o diâmetro do furo: quanto menor o furo maior a resistência específica ao corte.

Importante referir que a maior parte das amostras possui valores de resistência específica superior ao material base NL-10, como se vê na Figura 38, atingindo algumas destas valores superiores em mais de 25%.

4.3. Características à tração

Procedeu-se ao ensaio das amostras e do material base NL-10, para assim se fazerem comparações. Na Figura 44 apresenta-se uma curva de ensaio à tração para o material em estudo.

Repara-se que que o gráfico começa logo com esforço à tração, pois a máquina de ensaio Instron permite o ajuste do deslocamento para a posição zero.

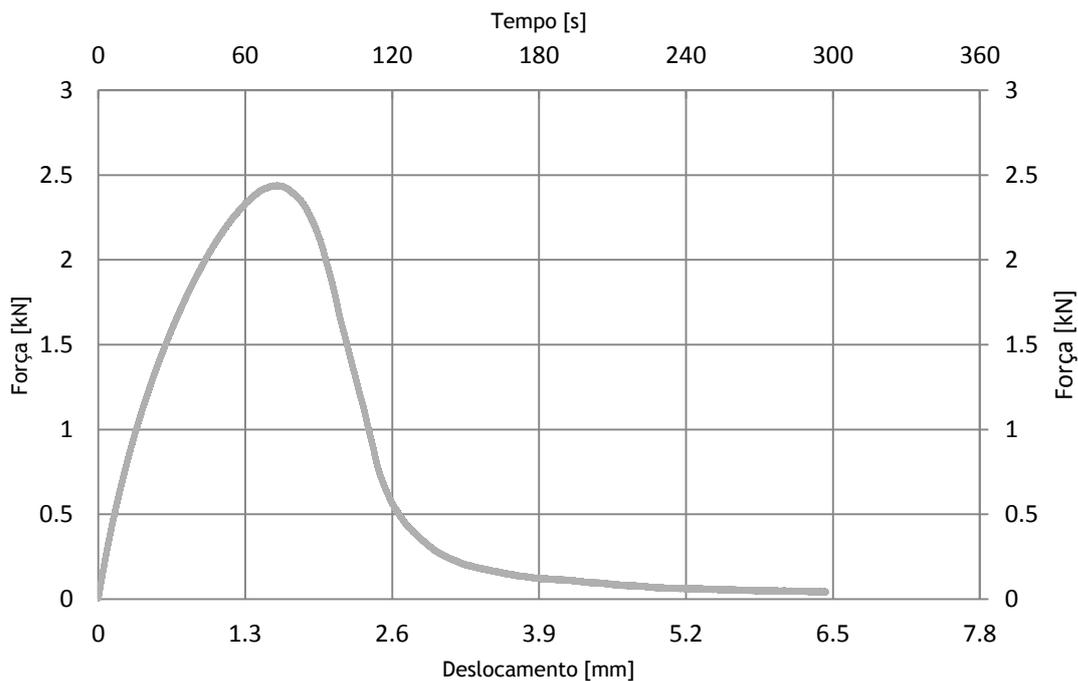


Figura 44 - Curva força-deslocamento e força-tempo, no ensaio à tração *flatwise* para a amostra F5_EP5_PL.

Para o cálculo da resistência à tração *flatwise* utilizou-se a fórmula recomendada pela norma ASTM C297/C297M: Standard Test Method for *Flatwise* Tensile Strength of Sandwich Constructions [23].

$$F^{flt} = \frac{P}{A}$$

F^{flt} - Resistência à tração *flatwise*

P - Carga aplicada

A - Área da secção transversal

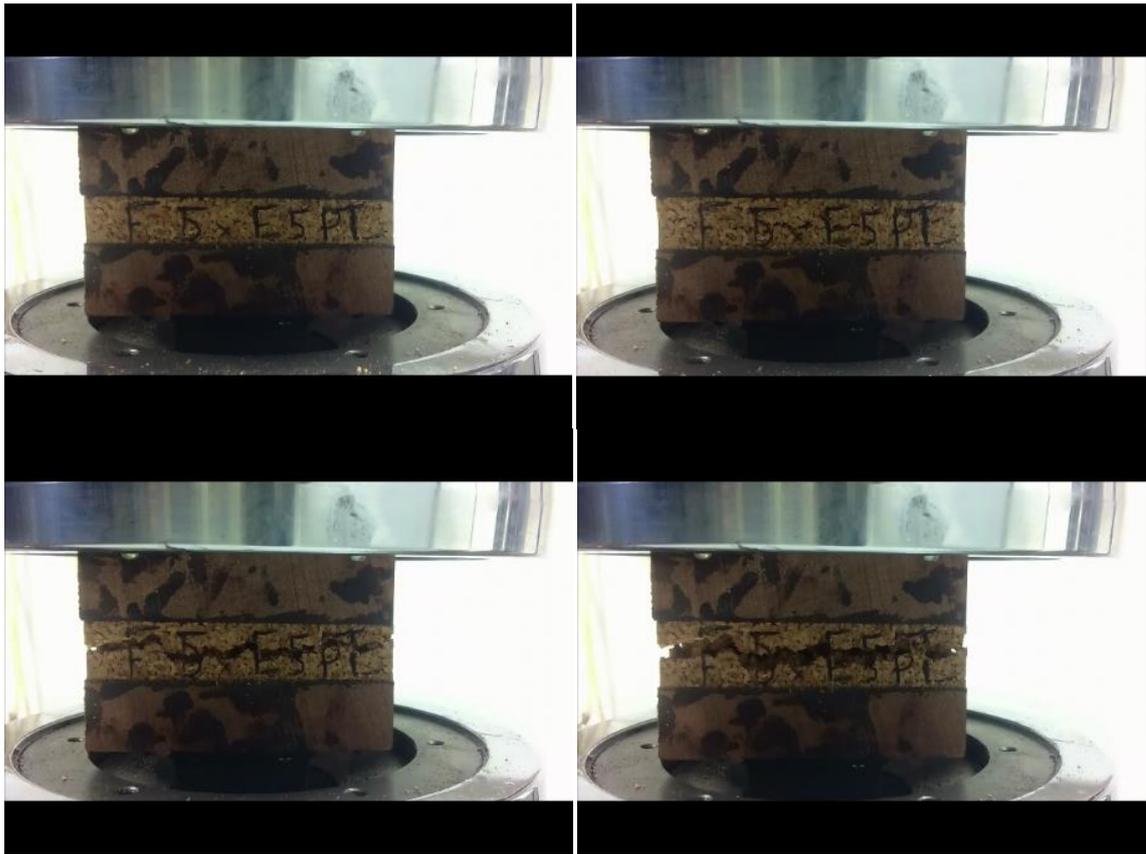


Figura 45 - Etapas de ensaio a tração *flatwise*.

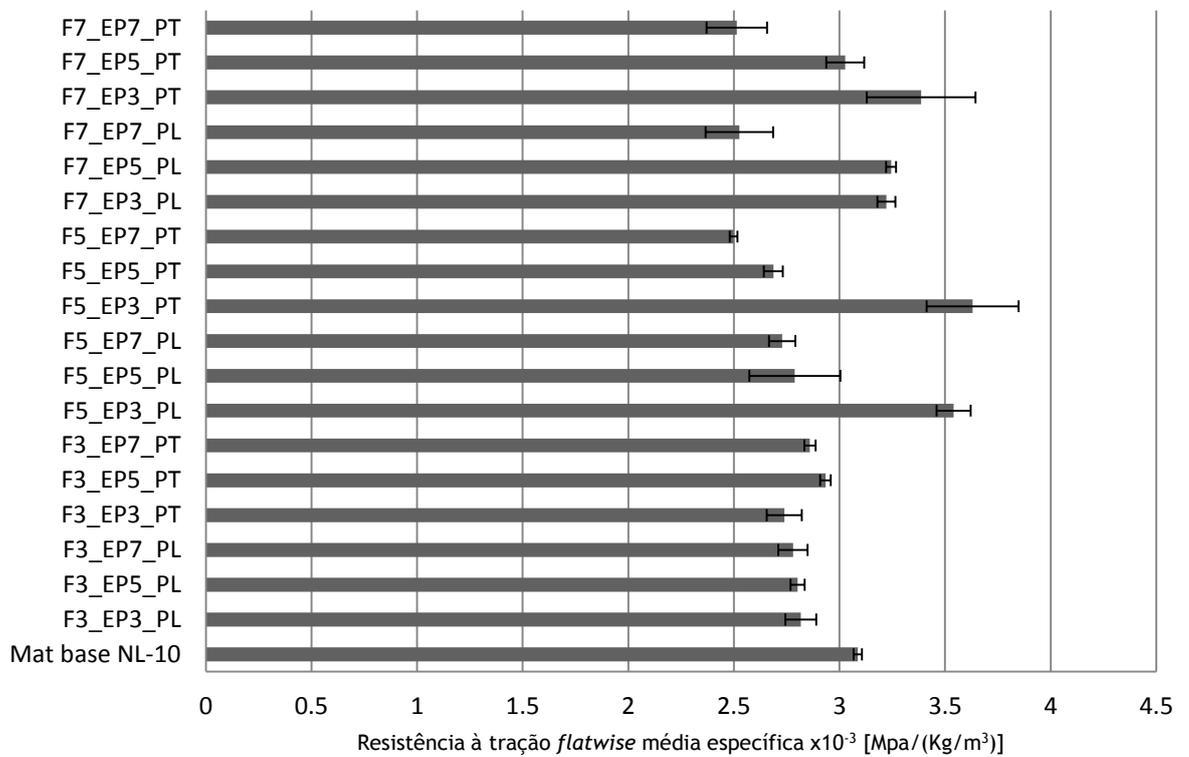


Figura 46 - Resistência à tração específica *flatwise*.

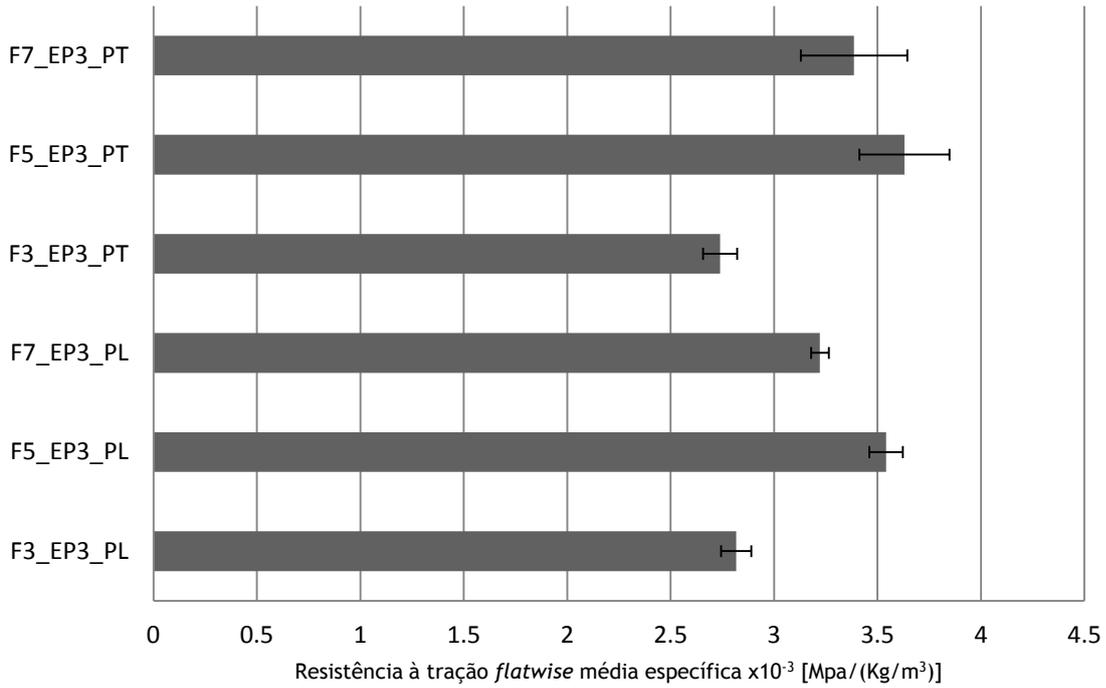


Figura 47 - Resistência à tração específica *flatwise*, com espaçamento de parede de 3mm.

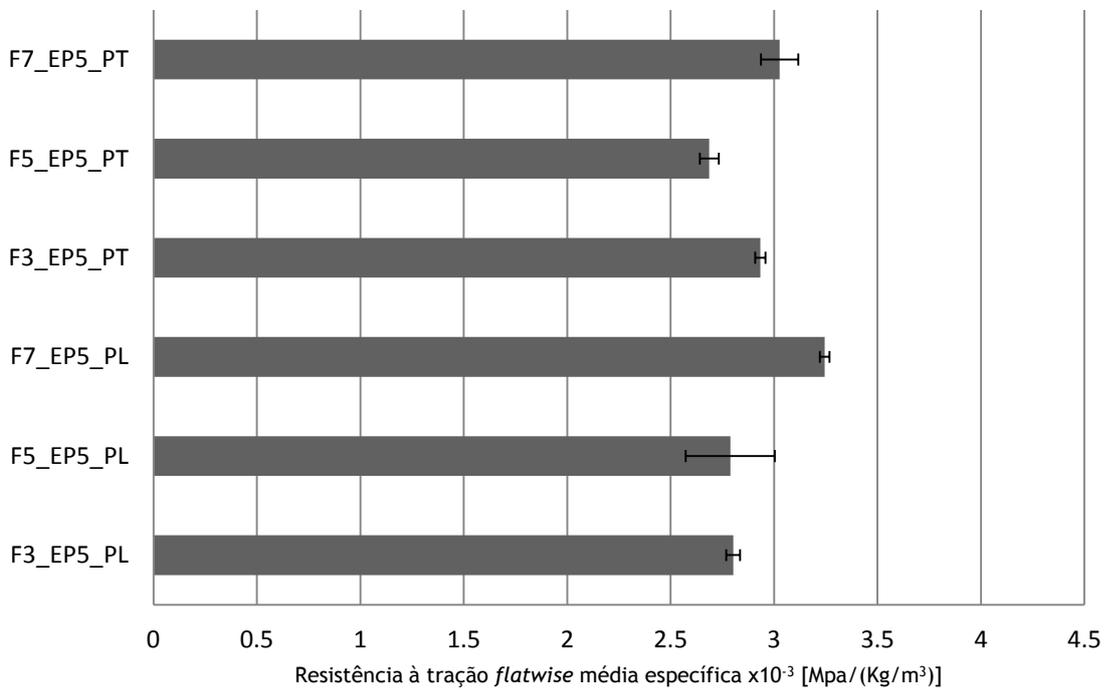


Figura 48 - Resistência à tração específica *flatwise*, com espaçamento de parede de 5mm.

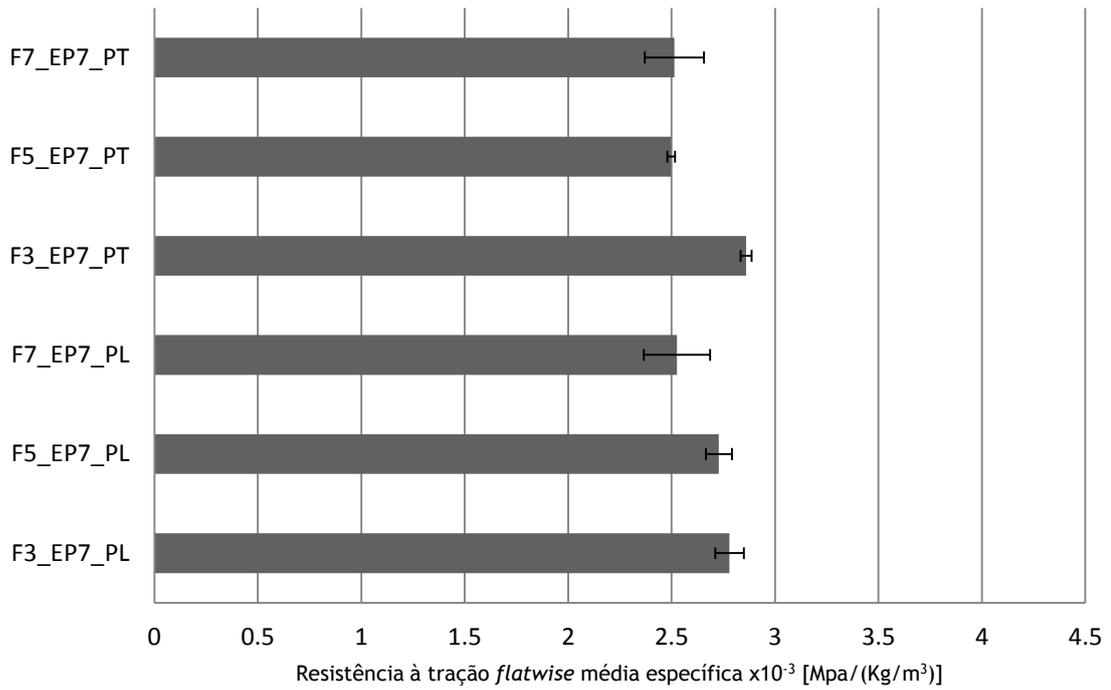


Figura 49 - Resistência à tração específica *flatwise*, com espaçamento de parede de 7mm.

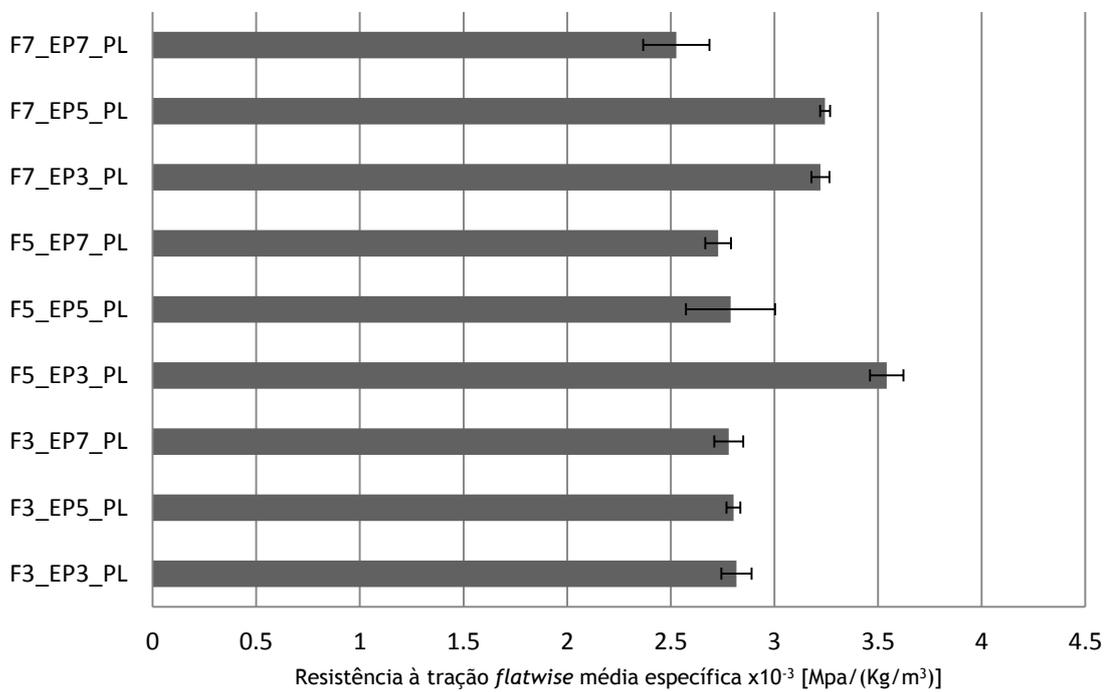


Figura 50 - Resistência à tração específica *flatwise*, com padrão linear.

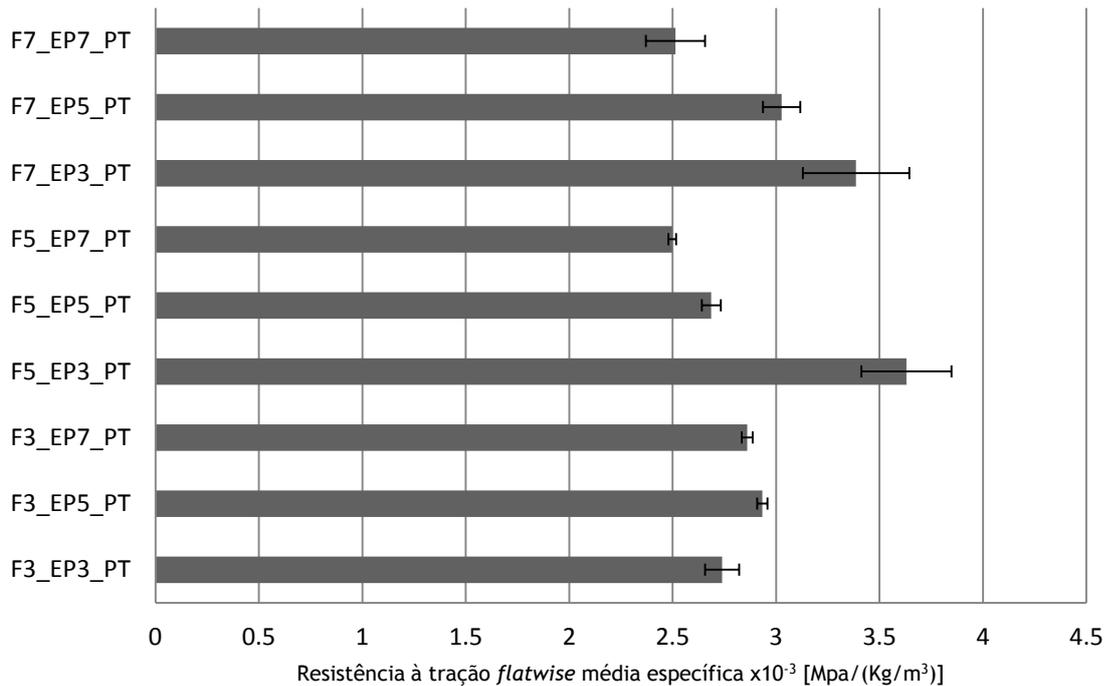


Figura 51 - Resistência à tração específica *flatwise*, com padrão triangular.

Analisando as Figuras 47, 48 e 49, verifica-se, para o espaçamento de parede 3mm, a furação que apresenta uma resistência superior é a de 5mm. Já no caso do espaçamento de parede de 5mm a furação com a resistência mais elevada é a de 7mm. Por fim, no exemplo com 7mm de espaçamento de parede, a furação que possui resistências superiores é a de 3mm.

No caso da Figura 47, onde temos espaçamento de parede de 3mm, visualiza-se uma repetição da distribuição de resistências entre os dois tipos de padrão, sendo a resistência menor para a furação de 3mm, sendo maior para a furação de 5mm e voltando a diminuir para a furação de 7mm.

Já na Figura 48, com espaçamento de parede de 5mm e com o mesmo padrão repara-se que a resistência à tração é agora inferior para a furação de 5mm. Para a Figura 49, onde o espaçamento de parede é de 7mm, verifica-se que para o caso do padrão linear, com o aumento do furo diminui a resistência. No caso do padrão triangular o fenômeno é semelhante à exceção da furação de 7mm onde volta a aumentar o valor da resistência. Neste caso, da Figura 49, a resistências mais elevadas verificam-se na furação de 3mm.

Analisando as Figuras 50 e 51, repara-se que no caso do padrão linear os valores das resistências são semelhantes a exceção dos casos particulares F5_EP3_PL, F7_EP3_PL e F7_EP5_PL, em que os valores são superiores. No caso do padrão triangular a semelhança nos valores das tensões já não é notória, mas como no caso anterior os casos particulares F5_EP3_PL, F7_EP3_PL e F7_EP5_PL também possuem resistências superiores.

Na Tabela 14 apresenta-se os valores médios da resistência à tração *flatwise*, juntamente com o respetivo desvio padrão.

| Amostras | $F_{ft.med}^p$ $\times 10^{-3}$ [MPa/(Kg/m ³)] | Desvio Padrão $\times 10^{-3}$ [MPa/(Kg/m ³)] |
|------------------------|---|--|
| Material base NL-10 | 3,09 | 0,02 |
| F3_EP3_PL | 2,82 | 0,07 |
| F3_EP5_PL | 2,80 | 0,03 |
| F3_EP7_PL | 2,78 | 0,07 |
| F3_EP3_PT | 2,74 | 0,08 |
| F3_EP5_PT | 2,93 | 0,02 |
| F3_EP7_PT | 2,86 | 0,03 |
| F5_EP3_PL | 3,54 | 0,08 |
| F5_EP5_PL | 2,79 | 0,22 |
| F5_EP7_PL | 2,73 | 0,06 |
| F5_EP3_PT | 3,63 | 0,22 |
| F5_EP5_PT | 2,69 | 0,05 |
| F5_EP7_PT | 2,50 | 0,02 |
| F7_EP3_PL | 3,22 | 0,04 |
| F7_EP5_PL | 3,24 | 0,02 |
| F7_EP7_PL | 2,53 | 0,16 |
| F7_EP3_PT | 3,39 | 0,26 |
| F7_EP5_PT | 3,03 | 0,09 |
| F7_EP7_PT | 2,51 | 0,14 |

Tabela 14 - Valores médios da resistência à tração específica e do seu desvio padrão, para ensaios de tração *flatwise*.

Capítulo 5 - Conclusões

Relativamente aos ensaios de flexão, os provetes furados apresentam, na generalidade, uma resistência específica inferior em cerca de 25% à do material base, sem furação, NL-10. As furações e os espaçamentos de parede superiores mostram resistências específicas superiores (7mm e 5mm) quando se comparam provetes de densidades iguais, isto é, com a mesma relação entre parede e furo. Pode-se afirmar que, para obter uma determinada densidade, é mais vantajoso um menor número de furos mas de dimensões superiores em vez de mais furos de dimensões mais pequenas.

Nos ensaios ao corte para o espaçamento de parede de 5mm verificam-se resistências específicas inferiores à exceção da furação de 5mm, que por sua vez possui os valores mais altos de resistência específica. Na grande maioria dos casos a redução do material beneficia a sua resistência específica, chegando a atingir em alguns casos incrementos da resistência específica em cerca de 30%.

No caso dos ensaios de tração a furação de 3mm apresenta uma resistência específica bastante uniforme, independente do espaçamento de parede e do padrão, ao contrário das furações superiores onde a resistência específica varia muito em função da espessura da parede. Um exemplo disto é o aumento da resistência específica em cerca de 40% ao passar o espaçamento de parede de 7mm para 3mm, nos casos da furação de 5mm e 7mm. Também neste ensaio verificámos casos em que a furação beneficiou bastante (20%) a resistência específica, relativamente ao material base NL-10.

De uma forma geral não é possível ditar qual a melhor furação, ou espaçamento e até mesmo padronização. Como se vê nos resultados obtidos não existem relações diretas entre as mesmas. É possível que haja influência de outros fatores tais como a dimensão do grânulo e o agente de ligação utilizado.

Conclui-se que a redução de densidade do aglomerado de cortiça através deste método é perfeitamente viável na medida em que nunca existe uma degradação excessiva das propriedades mecânicas específicas obtendo-se mesmo em muitos casos uma melhoria dessas propriedades.

Assim, seria interessante estender este estudo para a influência do grânulo, como também a influência da inclinação do padrão relativamente as direções de solicitação. Em termos numéricos seria interessante um estudo em elementos finitos com base nestes resultados para assim existir maior facilidade em estudar novas geometrias.

Referências

- [1] A. P. da Cortiça, “<http://www.apcor.pt/artigo.php?art=292>,” *Consultado em Dezembro de 2013*. .
- [2] A. P. da Cortiça, “<http://www.apcor.pt/artigo/o-que-e-cortica.htm>,” *Consultado em Dezembro de 2013*. .
- [3] A. C. Composites, “<http://www.amorimcork.com/pt/natural-cork/cork-and-other-applications/>,” *Consultado em Dezembro de 2013*. .
- [4] L. Gil, *Cortiça: Produção, Tecnologia e Aplicação*. 1998.
- [5] L. J. Gibson, “Biomechanics of cellular solids,” *J. Biomech.*, vol. 38, no. 3, pp. 377-99, Mar. 2005.
- [6] B. Soares, L. Reis, and L. Sousa, “Cork composites and their role in sustainable development,” *Procedia Eng.*, vol. 10, pp. 3214-3219, Jan. 2011.
- [7] O. Castro, J. M. Silva, T. Devezas, A. Silva, and L. Gil, “Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 425-432, Jan. 2010.
- [8] S. P. Silva, M. a. Sabino, E. M. Fernandes, V. M. Correlo, L. F. Boesel, and R. L. Reis, “Cork: properties, capabilities and applications,” *Int. Mater. Rev.*, vol. 50, no. 6, pp. 345-365, Dec. 2005.
- [9] O. Anjos, H. Pereira, and M. E. Rosa, “Tensile properties of cork in the tangential direction,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 4, pp. 2085-2090, Apr. 2010.
- [10] M. E. Rosa and M. a. Fortes, “Deformation and fracture of cork in tension,” *Journal of Materials Science*, vol. 26, no. 2, pp. 341-348, 1991.
- [11] P. Macioce, “Viscoelastic Damping 101,” pp. 1-3.
- [12] U. of T. Arlington, “<http://www.uta.edu/faculty/ricard/Classes/KINE-3301/Notes/Lesson-14.html>,” *Consultado em Março de 2014*. .
- [13] P. Miguel and R. Carvalho, “Análise do comportamento mecânico e identificação do tipo de falha em estruturas sandwich com núcleos de cortiça,” 2008.
- [14] W. R. Broughton, L. E. Crocker, and M. R. L. Gower, “Design Requirements for Bonded and Bolted Composite Structures,” *NPL Rep. MATC(A)65*, no. January, 2002.
- [15] A. Petras and M. P. F. Sutcliffe, “Composite failure mode maps for honeycomb,” vol. 44, pp. 237-252, 1999.
- [16] E. a. Flores-Johnson, Q. M. Li, and R. a. W. Mines, “Degradation of Elastic Modulus of Progressively Crushable Foams in Uniaxial Compression,” *J. Cell. Plast.*, vol. 44, no. 5, pp. 415-434, Sep. 2008.
- [17] Q. M. Li, R. a. W. Mines, and R. S. Birch, “The crush behaviour of Rohacell-51WF structural foam,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 37, no. 43, pp. 6321-6341, Oct. 2000.

- [18] A. C. Composites,
“<http://www.corkcomposites.amorim.com/images/livraria/TPS%20brochure.pdf>,”
Consultado em Março de 2014. .
- [19] A. C. Composites, “Composites Technology Core Cork,” vol. 37, 2009.
- [20] A. C. Composites, “Technical Data Core Cork,” vol. 3, 2009.
- [21] C393/C393M, “Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure,” *ASTM*, 2011.
- [22] C273/C273M, “Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials,” *ASTM*, 2011.
- [23] C297/C297M, “Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions,” *ASTM*, 2004.

Anexos

Anexo 1

Ficha técnica tecido de vidro 1280P

Peso (Total) : 282 g/m² (± 4 %)

Fio (Teia) : EC 11-204

Fio (Trama) : EC 11-204

Espessura : 0,28 mm (+ 15 %)

Fio/cm (Teia) : 8,0

Fio/cm (Trama) : 6,00

Malha : Tafetá

Anexo 2

Ficha técnica Resina/Endurecedor

| Componentes | SR 1500 | SD 2503 |
|--------------------------------|---------|---------|
| Densidade a 20 °C | 1,13 | 1 |
| Aspeto | Líquido | Líquido |
| Viscosidade a 20 °C (Cps) | 2100 | 180 |
| Relação de mistura (em peso) | 100 | 33 |
| Relação da mistura (em volume) | 100 | 37 |

| Mistura | |
|---|------------|
| Densidade 20 °C | 1,00 |
| Aspeto | Líquido |
| Viscosidade da mistura a 20 °C (mPa) | 700 |
| Pot life 500g a 20 °C | 1H00 |
| Pico exotérmico 100g a 20 °C | 215 |
| Tempo de gel em filme a 20 °C (500 microns) | 3H15 |
| Polimerização total a 20 °C | 14 dias/TA |