

Análise Estrutural de um Kayak de Competição

Pedro Alexandre Ferreira Dias

Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. Mário Augusto Pires Vaz



FEUP

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho de 2011

Resumo

Algumas discussões em torno da investigação sobre canoagem têm sugerido que a otimização estrutural e da forma dos equipamentos, permite a obtenção de melhores desempenhos a nível competitivo. Com o intuito de contribuir para a compreensão do comportamento estrutural das embarcações, desenvolveu-se um estudo das tensões e deformações geradas na estrutura de um *kayak* de competição do tipo K1.

A análise estrutural foi efectuada por recurso ao método de elementos finitos, procurando-se criar um modelo numérico que permitisse uma boa aproximação ao comportamento real da embarcação. Este processo foi ainda acompanhado de um trabalho experimental, com a finalidade de ajustar o modelo de forma a torná-lo mais representativo do *kayak* em estudo. Em complementaridade, recorreu-se à técnica de *Shearography* para identificar possíveis defeitos na composição e fabrico da embarcação, que de algum modo pudessem interferir com os resultados obtidos.

Os resultados alcançados sugerem uma relação de tensão-deformação mais elevada na vizinhança da cavidade que permite a colocação do canoísta, o *cockpit*, região de maior momento flector. Tal foi corroborado na aplicação da técnica de *Shearography*, na medida em que os dados obtidos sinalizam a existência de imperfeições nesta mesma zona, que contribuem para uma diminuição da sua rigidez.

Daqui se depreende que a relação tensão-deformação encontrada, representa uma grandeza suficientemente elevada para influir no comportamento da embarcação e, por consequência interferir igualmente com a *performance* do atleta. A deformação da embarcação durante a pagaiada poderá alterar as condições de escoamento hidrodinâmico. Por conseguinte, sugere-se um aumento da rigidez estrutural em torno do *cockpit*, como forma de minimizar os possíveis efeitos adversos desta relação.

Structural Analysis of a Competition Kayak

Abstract

Some discussions of research on kayaking have suggested that the structural optimization of equipment and shape of equipment, allows us to obtain better performance at a competitive level. In order to contribute to the understanding of the structural behavior of the vessels, we developed a study of stresses and strains generated in the structure of a racing kayak K1 type.

The structural analysis was performed using the method of finite elements, seeking to create a numerical model that allows a good approximation to the actual behavior of the vessel. This process has been accompanied by an experimental work, in order to adjust the model to make it more representative of the kayak studied. Concurrently, we used the *Shearography* technique to identify possible defects in the composition and manufacture of the vessel, which otherwise could interfere with the results.

These results suggest a stress-strain relationship of the highest in the proximity of the cavity that allows the placement of the paddler, the cockpit, the region of greatest bending moment. This was corroborated in the application of the *Shearography* technique, to the extent that the data obtained indicate the existence of imperfections in the same area, causing a decrease in its stiffness.

It follows that the stress-strain relationship found, represents a quantity large enough to influence the behavior of the vessel, and thus also interfere with athletic performance. The deformation of the vessel during the rowing can change the hydrodynamic flow conditions. Therefore, it is suggested an increase in structural stiffness around the cockpit as a way to minimize the possible adverse effects of this relationship.

Agradecimentos

Que esta dedicatória seja o reflexo do meu agradecimento a todos quantos contribuíram directa ou indirectamente para a construção desta dissertação, nomeadamente:

Ao meu orientador, Professor Doutor Mário Vaz, por todos os conselhos e ensinamentos transmitidos, pelo estímulo e exigência crescente que foi impondo à medida que caminhávamos para a conclusão deste projecto.

Aos colaboradores do LOME/INEGI, Engenheiro Nuno Ramos e Doutor Jaime Monteiro, pela constante disponibilidade e pelas suas preciosas contribuições durante o processo de investigação.

À atleta Beatriz Gomes, grande campeã da canoagem nacional, pela colaboração e informações essenciais fornecidas sobre a canoagem.

Aos meus pais, pela dedicação e esforço que revelaram no decurso do meu percurso académico. Sem eles, certamente não teria chegado ao usufruto desta experiência fundamental para o meu crescimento profissional e pessoal.

Ao meu irmão e à minha cunhada, pelo apoio e incentivo demonstrado ao longo de todo o meu percurso académico.

Ao meu sobrinho, pelos momentos de diversão, pelos sorrisos sem reservas, importante incentivo nos momentos de maior desânimo.

À Helena, por todo o apoio desde o primeiro minuto, tornando-se num grande suporte de carinho, ânimo e fonte de inspiração. A ti, agradeço toda a compreensão e companhia, que se têm demonstrado imprescindíveis.

Ao meu colega de percurso académico e grande amigo José Ferreira, pelo companheirismo, pelos grandes momentos proporcionados ao longo destes anos e por toda a disponibilidade de ajuda e partilha demonstrada.

A ti João Sampaio, pela tua passagem na minha vida, por todos os momentos de amizade que vivemos juntos, por continuares a iluminar o meu caminho, de onde quer que estejas. Este trabalho também é em tua honra...

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do Estudo	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Estrutura da Dissertação	2
2. Considerações Históricas Relativas à Canoagem	4
3. Evolução das Embarcações de Canoagem	6
4. Canoagem — Modalidade Desportiva Multifacetada	7
4.1. Canoagem de Velocidade (Sprint)	7
4.2. Canoagem de maratona	9
4.3. Canoagem <i>Slalom</i>	10
4.4. Canoagem Estilo Livre (<i>Freestyle</i>)	11
4.5. Canoagem Pólo	12
4.6. Canoagem de Águas Bravas	13
4.7. Canoagem Barco- <i>Dragão (Dragonboat)</i>	14
4.8. Canoagem de Mar	14
4.9. Canoagem Adaptada	15
5. Estado da Arte	17
6. Método	21
6.1. Modelo de <i>Kayak</i> em Análise	21
6.2. Instrumentos	24
6.2.1. <i>SolidWorks® Premium</i> (v.2010)	24
6.2.2. <i>Ansys® Mechanical Workbench</i> (v.13.0)	25
6.2.3. Extensometria eléctrica	25
6.2.4. Sistema <i>Shear (Shearography Speckle)</i>	26
6.3. Procedimento de Obtenção das Propriedades Globais do <i>Kayak</i>	26
6.3.1. Selecção dos Pontos para Colagem dos Extensómetros com Recurso ao MEF	26
6.3.2. Montagem dos Extensómetros	29
6.3.3. Calibração dos Extensómetros com Apoios no Centro do <i>Kayak</i>	32
6.3.4. Calibração dos Extensómetros com Apoios nas Pontas do <i>Kayak</i>	33
6.3.5. Ajuste do Módulo de Young Através do MEF	34
6.3.6. Obtenção da Flecha a Meio Vão e Consequente Comparação com MEF	35
6.4. Procedimento de Estudo das Deformações e Tensões na Água	37
6.5. Procedimentos de análise mediante a técnica de <i>Shear</i>	42
7. Apresentação e Análise de Resultados	43
7.1. Obtenção e Validação do Módulo de Young	43
7.2. Análise de Deformações em Meio Aquático	51
7.3. Distribuição de Tensões na Estrutura do <i>Kayak</i>	57
7.4. Análise de Imperfeições através da Técnica de <i>Shear</i>	59

8. Discussão dos Resultados.....	62
9. Limitações da Investigação e Hipóteses para Futuros Estudos.....	64
10. Bibliografia.....	66

Índice de Figuras

Figura 1: Centro de Remo Eton Dorney, integrado no parque olímpico de Londres 2012.....	7
Figura 2: <i>Kayak</i> de velocidade modelo K1, K2 e K4.....	8
Figura 3: Canoa de velocidade modelo C1, C2 e C4.....	8
Figura 4: Atleta de Canoagem de Maratona, durante o percurso pedestre	9
Figura 5: Praticante de Canoagem <i>Slalom</i> durante uma prova.....	10
Figura 6: <i>Kayak</i> monolugar (K1) de canoagem <i>Slalom</i>	10
Figura 7: Canoa C1 e C2 de canoagem <i>Slalom</i>	11
Figura 8: Atleta de estilo livre a realizar uma acrobacia	11
Figura 9: Imagem histórica que representa um jogo de Pólo	12
Figura 10: Jogo de Canoagem Pólo	13
Figura 11: Atleta de Canoagem de Águas Bravas durante a descida do rio.....	14
Figura 12: Canoagem Barco-Dragão	14
Figura 13: Canoísta em alto mar, praticando canoagem de mar.....	15
Figura 14: Praticante de Canoagem Adaptada.....	16
Figura 15: Modelo de <i>kayak</i> em estudo	21
Figura 16: Vista do <i>cockpit</i> do <i>kayak</i>	21
Figura 17: Finca-pés colocado no interior do <i>kayak</i>	22
Figura 18: Secção de corte no <i>kayak</i>	22
Figura 19: Composição interna da estrutura do <i>kayak</i>	23
Figura 20: Esquema de flexão em três pontos	26
Figura 21: Modelo do <i>kayak</i> em CAD 3D.....	27
Figura 22: Detalhe da malha de elementos finitos.....	27
Figura 23: Localização dos apoios no <i>kayak</i> para análise no MEF.....	28
Figura 24: Local de aplicação do carregamento	28
Figura 25: Resultado da simulação MEF da deformação segundo o eixo do <i>kayak</i> e localização da área de colagem dos extensómetros	29
Figura 26: Localização de um dos extensómetros.....	30
Figura 27: Extensómetro colado no <i>kayak</i>	30
Figura 28: Aspecto final da montagem dos dois extensómetros no <i>kayak</i>	31
Figura 29: Sinal dos extensómetros após a montagem.....	31
Figura 30: Visão geral de um carregamento e sistema de aquisição de dados	32

Figura 31: Sinal dos extensómetros num carregamento com apoios no centro do <i>kayak</i> com indicação da zona de estabilização.....	33
Figura 32: Posicionamento dos apoios nas pontas do <i>kayak</i>	34
Figura 33: Sinal dos extensómetros num carregamento com apoios nas pontas do <i>kayak</i> com indicação da zona de estabilização.....	34
Figura 34: Pontos de obtenção da deformação no ANSYS®	35
Figura 35: Localização do comparador sob o <i>kayak</i>	36
Figura 36: Localização dos apoios: a) no centro da embarcação; b) nas pontas da embarcação	36
Figura 37: Modelo de elementos finitos com localização do ponto para obtenção da flecha, com apoios: a) no centro da embarcação; b) nas pontas da embarcação.....	37
Figura 38: <i>Kayak</i> colocado na água, com um indivíduo no seu interior	38
Figura 39: Definição da linha de água	39
Figura 40: Volume do <i>kayak</i> imerso na água.....	39
Figura 41: Divisão da zona imersa em várias partes	40
Figura 42: Distribuição das forças de impulso sobre o <i>kayak</i>	40
Figura 43: Localização do apoio simples sobre os carris do banco	41
Figura 44: Aquisição do sinal dos extensómetros com o <i>kayak</i> na água	41
Figura 45: Deformações na direcção do eixo do <i>kayak</i> com os apoios na zona central, após o carregamento	47
Figura 46: Deformações na direcção do eixo do <i>kayak</i> com os apoios nas pontas, após o carregamento	48
Figura 47: Deformações obtidas pelo MEF para um carregamento do impulso sobre a embarcação com um atleta de 61kg: a) Vista geral; b) Pormenor do <i>cockpit</i>	52
Figura 48: Registo experimental das deformações com o <i>kayak</i> na água	53
Figura 49: Resultado da tensão de von Mises para o caso de carregamento com indivíduo de 85kg: a) Vista geral; b) Pormenor do <i>cockpit</i>	58
Figura 50: Reforço na parte interior do <i>kayak</i> , na zona do vinco no <i>cockpit</i>	59
Figura 51: Mapa de fase correspondente ao campo de deslocamento para a solicitação térmica, vista de frente do <i>kayak</i>	59
Figura 52: Mapa de fase correspondente ao campo de deslocamento para a solicitação térmica, vista de topo do <i>kayak</i>	60
Figura 53: Mapa de fase correspondente ao campo de deslocamento para a solicitação térmica, vista de baixo do <i>kayak</i>	60

Índice de Tabelas

Tabela 1: Especificações para embarcações de velocidade	9
Tabela 2: Carregamento sobre o kayak com apoio no centro, para calibração do extensómetro da direita.....	43
Tabela 3: Carregamento sobre o kayak com apoio no centro, para calibração do extensómetro da esquerda	43
Tabela 4: Carregamento sobre o kayak com apoio nas pontas, para calibração do extensómetro da direita.....	44
Tabela 5: Carregamento sobre o kayak com apoio nas pontas, para calibração do extensómetro da esquerda	45
Tabela 6: Deformações obtidas pelo MEF e pelo extensómetro direito, ponderando o mesmo módulo de Young em todo o kayak, no caso de carregamento com apoios no centro.....	46
Tabela 7: Deformações obtidas pelo MEF e pelo extensómetro esquerdo, ponderando o mesmo módulo de Young em todo o kayak, no caso de carregamento com apoios no centro.	46
Tabela 8: Deformações obtidas pelo MEF e pelo extensómetro da direita, no caso de carregamento com apoios nas pontas.....	47
Tabela 9: Deformações obtidas pelo MEF e pelo extensómetro da esquerda, no caso de carregamento com apoios nas pontas.....	48
Tabela10:Comparação de valores para extensómetro da esquerda (apoio nas pontas).....	49
Tabela 11:Comparação de valores para extensómetro da direita (apoio nas pontas).....	49
Tabela 12: Comparação de valores para extensómetro da esquerda (apoio no centro)	49
Tabela 13: Comparação de valores para extensómetro da direita (apoio no centro).....	50
Tabela 14: Comparação da flecha obtida através dos métodos experimentais e do modelo de elementos finitos para apoios no centro	50
Tabela 15: Comparação da flecha obtida através dos métodos experimentais e do modelo de elementos finitos para apoios nas pontas.....	50
Tabela 16: Valor do impulso para cada parte, no caso de carregamento com um indivíduo de 61kg.....	51
Tabela 17: Comparação das deformações com o kayak na água obtidas pelo MEF e pelos resultados experimentais	53
Tabela 18: Comparação de novos valores para extensómetro da direita (apoio nas pontas)	54
Tabela 19: Comparação de novos valores para extensómetro da esquerda (apoio nas pontas)	54
Tabela 20: Comparação de novos valores para extensómetro da direita (apoio no centro).....	55
Tabela 21:Comparação de novos valores para extensómetro da esquerda (apoio no centro).....	55
Tabela 22: Comparação da nova flecha obtida através dos métodos experimentais e do modelo de elementos finitos para apoios no centro	55

Tabela 23: Comparação da nova flecha obtida através dos métodos experimentais e do modelo de elementos finitos para apoios nas pontas.....	56
Tabela 24: Nova comparação das deformações com o kayak na água obtidas pelo MEF e pelos resultados experimentais.....	56
Tabela 25: Valor do impulso para cada parte, no caso de carregamento com um atleta de 85kg.....	57
Tabela 26: Comparação da deformação entre o carregamento com um indivíduo de 61kg e de 85kg.....	57

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Desempenho dos atletas olímpicos de K1 1000m (1948-2008) e de K1 500m (1976-2008)	19
Gráfico 2: Recta de calibração do extensómetro da direita, para apoios no centro	44
Gráfico 3: Recta de calibração dos extensómetro da esquerda, para apoios no centro	44
Gráfico 4: Recta de calibração dos extensómetro da direita, para apoios nas pontas.....	45
Gráfico 5: Recta de calibração dos extensómetro da esquerda, para apoios nas pontas	45

1. Introdução

1.1. Enquadramento do Estudo

Os progressos recentes na Ciência dos Materiais e nos métodos de fabrico vierem revolucionar o projecto de Engenharia Mecânica. Na nova família de materiais criada destacam-se os materiais compósitos cujas propriedades têm permitido a sua rápida divulgação, quer em novas soluções construtivas, tornadas possíveis com o seu aparecimento, quer substituindo os materiais convencionais. A sua elevada resistência específica associada à versatilidade dos processos de fabrico, permite aliar a complexidade da forma a elevadas resistências mecânicas e baixo peso. Assim sendo, os materiais compósitos são seleccionados sempre que se procura otimizar uma geometria funcional, hidro ou aerodinâmica, a uma boa resistência estrutural e com peso reduzido. A aeronáutica foi das primeiras indústrias a tirar partido destas características na produção das estruturas para aeronaves. Actualmente, com a redução dos custos que resultou da divulgação dos materiais compósitos, muitas são as indústrias que beneficiaram também das propriedades destes materiais, tais como: a indústria automóvel e as indústrias ligadas ao desporto e lazer.

Na indústria do desporto, os objectivos a perseguir estão essencialmente associados ao triunfo desportivo. Salvaguardando o cumprimento dos valores do desportivismo, o que se destaca na competição é a obtenção da vitória, razão pela qual todos procuram uma optimização constante do seu desempenho. Quando se trata de alta competição, onde apenas são envolvidos atletas de elite, os custos com a preparação e o equipamento perdem aqui alguma importância relativa.

Um dos desportos em que Portugal tem sofrido uma notável evolução é a canoagem de competição. Designada internacionalmente por “flatwaters kayaking or racing” conta já com vários campeões europeus e mundiais de nacionalidade portuguesa. Nesta modalidade destaca-se também um fabricante nacional de *kayaks*, anunciada como o maior do planeta e com dezenas de campeões a utilizar os seus barcos, A empresa em causa, NELO, situa-se na região do grande Porto e facultou o modelo de *kayak* que foi utilizado neste estudo.

A motivação essencial para a realização deste trabalho prende-se com o facto de o DEMec prestar colaboração num projecto de doutoramento na área do desporto cujo tema central é a canoagem. Trata-se de uma recente campeã do mundo que se dispôs a associar um estudo científico à sua preparação olímpica e que utiliza *kayaks* NELO. Ao ser enquadrado na equipa de investigação que acompanha os estudos na canoagem, o autor deste trabalho teve acesso a importante informação que possibilitou a estruturação deste estudo. A investigação no âmbito da análise estrutural de *kayaks* tem sido escassa, pelo que se pretende contribuir de algum modo para o enriquecimento do conhecimento científico neste domínio.

1.2. Objectivos

Este trabalho centra-se na avaliação estrutural de um *kayak*, um dos modelos mais avançados da gama construída pela empresa NELO, o Vanquish III. Trata-se de um modelo construído em laminado compósito cuja forma final resulta da ligação entre uma parte superior e a quilha, estas obtidas por moldação em moldes obtidos por CAD/CAM. Este tipo de estrutura apresenta uma elevada resistência específica, uma vez que o seu comportamento de estrutura tipo casca eleva substancialmente a rigidez global. Uma vez que o processo de fabrico é individualizado, espera-se que exista alguma variabilidade nas características finais de cada embarcação.

Com o intuito de efectuar a referida avaliação estrutural, procurar-se-á compreender como a carga devida ao peso do remador é descarregada através da estrutura e compensada pelo impulso da água. Dado o tempo reservado para a realização deste trabalho apenas serão tidas em consideração cargas estáticas. Embora a consideração das cargas dinâmicas fosse um trabalho interessante, seria certamente um objectivo demasiado ambicioso, pois necessitaria de um estudo aprofundado da interacção da estrutura com o fluído envolvente.

No estudo do comportamento estático revelam-se também algumas dificuldades que deverão ser contornadas. Tratando-se de um material compósito multicamada cuja construção apresenta algumas descontinuidades, não é fácil criar modelos numéricos que reproduzam fielmente o seu comportamento real. Por isso procurar-se-á, com recurso a técnicas correntemente utilizadas em Engenharia que utilizam dados experimentais, criar um modelo numérico que permita uma boa aproximação.

A definição do carregamento será também uma tarefa importante pois o *kayak* durante a sua utilização comporta-se como uma viga em base elástica cuja carga, devida ao peso do canoísta, se encontra aplicada a meio vão. Numa descrição mais detalhada pode dizer-se que a principal carga estática aplicada é o peso do canoísta, que é equilibrado por uma pressão hidrostática que actua ao longo de toda a área molhada. Deste modo são esperadas tensões mais elevadas na vizinhança da cavidade que permite a colocação do canoísta, o *cockpit*, região de maior momento flector.

A criação do modelo numérico será pois acompanhada por um trabalho experimental que permita ajustar o modelo para o tornar mais representativo do *kayak* em estudo.

1.3. Estrutura da Dissertação

Para poder cumprir os objectivos acima descritos desenvolveu-se um trabalho de investigação que foi estruturado da seguinte forma:

No 1º Capítulo, desta dissertação tecem-se algumas considerações relativas ao crescente uso de materiais compósitos na indústria do desporto, nomeadamente no que se refere à sua aplicação na canoagem de competição. São ainda apresentados os objectivos deste estudo e o seu enquadramento nas actividades de investigação do laboratório do DEMec que foi envolvido

O 2º Capítulo contempla uma breve revisão da história da canoagem, não descurando a evolução e a situação actual da modalidade no nosso país.

Seguidamente é feita uma análise da evolução das embarcações, desde o seu aparecimento até aos nossos dias, que sucintamente se descreve no 3º capítulo.

O 4º capítulo foi reservado para uma breve descrição do espectro de disciplinas contempladas pela Federação Internacional de Canoagem, pois ainda que o modelo de *kayak* em estudo seja adequado para a canoagem de velocidade, existe grande variabilidade relativamente à prática desta modalidade.

Por fim, no 5º capítulo, apresenta-se o estado da arte na área de investigação em que este trabalho se enquadra. Expomos algumas conceptualizações que resultam de uma exaustiva revisão bibliográfica, e que pretendem sustentar teoricamente o estudo desenvolvido.

A segunda parte deste projecto centrou-se no desenvolvimento do estudo para a análise estrutural do *kayak*. No 6º capítulo descrevemos a organização e a metodologia utilizada na investigação. Pormenorizamos o modelo de *kayak* em estudo, os instrumentos utilizados, bem como todos os procedimentos envolvidos.

O 7º e 8º capítulo apresentam e discutem os resultados obtidos a partir das análises efectuadas, e finalmente no 9º capítulo é feita uma breve síntese das implicações desta investigação para o desempenho na modalidade de canoagem, e elaboradas cogitações acerca das limitações do estudo e subsequentes hipóteses para estudos futuros.

2. Considerações Históricas Relativas à Canoagem

De acordo com Merkle (1993), a canoagem consiste no acto de “conduzir qualquer objecto flutuante auxiliado por um remo, ou ainda o simples facto de andar de canoa”.

As canoas e *kayaks* foram desenvolvidos ao longo de um percurso de milhares de anos, iniciado pelos povos nativos da América do Norte. A canoa era utilizada primordialmente pelos povos indígenas no interior do continente, ao passo que o *kayak* era mais usado pelos esquimós para a pesca e o transporte entre pontos da costa. Os materiais empregues na sua fabricação eram a madeira, revestida com pele de foca e impermeabilizada com a gordura desses animais, (Kronhardt, 2002). É, portanto, no ambiente vasto e inóspito das terras do Alasca e Gronelândia que surgem os primeiros modelos deste tipo de embarcação.

A sua introdução na Europa remonta a 1865 pelo escocês John MacGregor, que fabricou um *kayak* com 4,57 metros de comprimento, 0,76 metros de largura e 30 kg de peso, que baptizou com o nome “Rob Roy” (Winning, 2002). A partir de então surgiram várias adaptações deste modelo, de modo a permitir descidas arriscadas e acidentadas dos rápidos e das pequenas cascatas dos rios, quer em termos competitivos, quer por mero lazer.

Em 1924 surgiu a *Internationella Representantskapet för Kanotidrott* (IRK), a primeira federação internacional de canoagem, a qual foi substituída, após a segunda guerra mundial, pela *International Canoe Federation* (ICF, 2011).

A nível competitivo, foi em 1924, que a canoagem surgiu nos jogos olímpicos como desporto de demonstração, sendo apenas considerado desporto olímpico em 1936, com provas em canoas e *kayaks*. Actualmente, esta modalidade é dividida em diversas competições, sendo praticada no contexto de inúmeras provas nacionais e internacionais.

Portugal, como país de marinheiros, cedo mostrou também interesse pela canoagem, uma vez que possui recursos hídricos excelentes para o exercício deste desporto. No entanto, poucos são os documentos que atestam o aparecimento da modalidade no nosso país. Ainda assim, alguns testemunhos apontam os anos 30 como um marco no nosso passado canoístico, tendo sido por esta altura que se difundiram as aventuras de descida dos rios. A partir de 1960, verifica-se um gradual incremento que culmina com a formação da Federação Portuguesa de Canoagem em 1979, que se tornaria membro de pleno direito da ICF a 28 de Junho de 1982, no Congresso de Belgrado (Monteiro, 2009).

Actualmente no nosso país estão reconhecidas 7 categorias de competição, diferenciadas pelo meio em que são praticadas – podendo ser em mares, rios, lagos e piscinas – bem como pelos diferentes regulamentos que as orientam.

Um pouco por todo o mundo a canoagem portuguesa tem vindo a afirmar-se desportivamente pelos resultados de excelência que tem conquistado internacionalmente, tais como um *record* absoluto de 14 medalhas advindas de campeonatos europeus e mundiais em 2009. Desta feita,

a federação internacional mostra confiança no trabalho que está a ser desenvolvido no nosso país, concedendo-nos inclusivamente a possibilidade de organização dos Europeus sub-23 e juniores em 2012, bem como dos Europeus absolutos e Taça do Mundo em 2013. Porém, não é só a nível dos resultados nacionais e internacionais que Portugal tem ganho expressividade, uma vez que para isso tem contribuído em larga medida a presença da sede de uma das melhores empresas de construção de *kayaks* – a M.A.R. Lda – fabricante dos *kayaks NELO*, utilizados pelas principais selecções mundiais de canoagem.

3. Evolução das Embarcações de Canoagem

No início do século XX, as canoas e *kayaks* eram praticamente desconhecidos do grande público. Eles eram normalmente concebidos e fabricados pelo seu utilizador, construídos à mão com materiais disponíveis localmente, sem seguirem uma estrutura padronizada. Nenhuma destas embarcações tradicionais teve sempre um leme, um assento, ou até mesmo um encosto, que são todas as adições modernas destinadas a resolver problemas característicos da actualidade (Rosen, 2008). Os povos nativos que usavam *kayaks* estreitos, muitas vezes denominados de “Eskimo Roll”, faziam-no tradicionalmente como uma forma de conseguir a sua sobrevivência. Mais tarde foram projectados *kayaks* mais amplos, para fornecer maior estabilidade, e assim proporcionar segurança aos tripulantes. Daqui se depreende que muitas das características básicas destas embarcações em estilo tradicional moderno, são o produto dos desenhos produzidos no final do século XX, e têm pouco a ver com a forma vernácula como os *kayaks* foram originalmente concebidos, construídos e utilizados. Com o surgimento de materiais modernos a canoagem sofreu uma grande especialização, sendo desenvolvidos diversos tipos de embarcações que procuram atender às necessidades de cada utilização. Hoje os *kayaks* e canoas modernos são construídos, na sua maioria, em resina de poliéster reforçada com fibra de vidro, ou mesmo em resina epóxido com kevlar e/ou fibra de carbono, e ainda plástico injectado ou rotomoldado – polietileno (Malato, 2009).

Actualmente, desenhar este tipo de embarcações tornou-se uma profissão e os *designers* usam sistemas de CAD (*Computer Aided Design*), muitas vezes em combinação com outro *software* especial de *design* de *kayaks*. Desta forma conseguem-se arrojadas geometrias que permitem otimizar o seu comportamento hidrodinâmico. Concebidos como produtos comerciais são objectos que devem ser reproduzidos várias vezes e vendidos a vários clientes. Como tal, não servem para ajustar a cada indivíduo em particular, mas sim a um grupo de clientes dentro de uma gama de atributos físicos, destreza, exigências e poder aquisitivo. Alguns fabricantes oferecem inclusivamente personalização de determinadas características, tais como acessórios e cores dos componentes.

4. Canoagem — Modalidade Desportiva Multifacetada

A canoagem, enquanto modalidade desportiva, engloba provas de pista, maratona, águas bravas, rios, *kayak* de mar, *kayak* pólo, turismo náutico e de expedição. A Federação Internacional de Canoagem (ICF – *International Canoe Federation*) reconhece actualmente várias modalidades oficiais e prevê, para cada uma delas, normas específicas relativas ao tipo de embarcação, bem como alguns indicadores que norteiam a prática de cada uma destas vertentes de competição. Deste modo, será apresentada de seguida uma breve descrição destes parâmetros.

4.1. Canoagem de Velocidade (Sprint)

Das diversas modalidades a canoagem de velocidade é a mais popular, tendo sido a primeira a ser introduzida nos Jogos Olímpicos, em 1936. As provas desenrolam-se em canais construídos artificialmente. Todo o percurso é balizado e dividido em nove pistas com nove metros de largura cada. Na figura 1 representa-se uma imagem aérea do centro de remo Eton Dorney, local onde serão disputadas, entre outras, as provas de canoagem de velocidade nos Jogos Olímpicos de 2012, em Londres.



Figura 1: Centro de Remo Eton Dorney, integrado no parque olímpico de Londres 2012

Fonte: <http://www.london2012.com/>

Em campeonatos mundiais e continentais as provas são disputadas em três distâncias: 200m, 500m e 1000m. Nos Jogos Olímpicos apenas se realizam competições de 500 e 1000m na categoria masculina, sendo que para as mulheres, as provas são realizadas somente na distância de 500m. As competições iniciam-se com provas eliminatórias que classificam os participantes para as semifinais e finais.

Nesta modalidade, a classe das embarcações é definida pelo número de tripulantes. Assim, no caso de se usar um *kayak* a denominação é K1, K2 ou K4, consoante a prova é disputada, por 1, 2 ou 4 atletas (ver figura 2), sendo que na mesma lógica, quando a embarcação é uma canoa a designação é C1, C2 ou C4 (Ver figura 3).



Figura 2: *Kayak* de velocidade modelo K1, K2 e K4

Fonte: <http://www.olympic.ca/>; <http://bbgomes.blogs.sapo.pt/>



Figura 3: Canoa de velocidade modelo C1, C2 e C4

Fonte: <http://www.vajdagroup.com/>; <http://www.bcu.org.uk/>; <http://www.life.com/>

Os *kayaks* possuem um apoio para os pés (finca pés), um assento, e um leme de direcção que é controlado pelo atleta que fica na parte da frente da embarcação. Os praticantes remam sentados (com remo (pagaia) de duas pás), e o convés da estrutura é fechado.

Nas canoas é utilizado um estrado onde se coloca um bloco de borracha que funciona como estrado, uma vez que os canoístas remam apoiados sobre um dos joelhos, utilizando um remo de uma única pá. No entanto, para estas embarcações não é permitido o uso de leme, o que exige que os tripulantes empreguem técnicas específicas de direcção.

O peso e comprimento das embarcações obedecem a critérios definidos pela Federação Internacional, estando em vigor os números apresentados na tabela 1:

Tabela 1: Especificações para embarcações de velocidade

Fonte: Canoe sprint competition rules, ICF, 2009

Embarcação	Comprimento máximo (cm)	Peso mínimo (kg)
K1	520	12
K2	650	18
K4	1100	30
C1	520	16
C2	650	20
C4	900	30

Para além disso, existem ainda determinadas regras relativas às embarcações, das quais se destacam: a necessidade da construção do *deck* (parte superior da embarcação) não ficar horizontalmente acima do ponto mais alto do bordo frontal do *cockpit*; a impossibilidade do casco apresentar linhas côncavas; e o impedimento de adição de qualquer objecto ou substância estranha, partes móveis ou outro dispositivo que conceda uma vantagem desleal na competição.

4.2. Canoagem de maratona

Na canoagem de maratona disputam-se provas em águas calmas de rios ou lagos, com distâncias entre 15 e 20 km. Ao longo do percurso os atletas têm de passar por portagens e percorrer uma determinada distância em terra, carregando a sua embarcação (ver figura 4), que em tudo se assemelha às que são utilizadas na canoagem de velocidade.



Figura 4: Atleta de Canoagem de Maratona, durante o percurso pedestre

Fonte: <http://www.canoeicf.com>

4.3. Canoagem *Slalom*

Esta é considerada uma das vertentes mais radicais da canoagem, pelo facto dos canoístas efectuarem um determinado percurso em águas bravas. Durante o trajecto o atleta deve atravessar sequencialmente vários portões, que podem ir de 18 a 25, os quais são definidos por dois postes suspensos por cabos (ver figura 5). Estes mesmos postes podem ser verdes ou vermelhos indicando, desta forma, se o portão é atravessado pela esquerda ou pela direita, respectivamente.



Figura 5: Praticante de Canoagem *Slalom* durante uma prova

Fonte: <http://globoesporte.globo.com/>

Ainda que a maioria das provas continue a ser disputada em cursos de água naturais, tem-se vindo a assistir a um aumento de percursos criados artificialmente, como é o caso do local onde se realizou a competição nos Jogos Olímpicos de 2008.

As embarcações utilizadas no *Slalom* são, quer os *kayaks* K1 (ver figura 6), para provas masculinas e femininas, quer as canoas C1 e C2 (ver figura 7), desta feita apenas para canoístas masculinos.



Figura 6: *Kayak* monolugar (K1) de canoagem *Slalom*

Fonte: <http://www.london2012.com/>



Figura 7: Canoas C1 e C2 de canoagem *Slalom*

Fonte: <http://www.duemstuff.com/>; <http://www.life.com/>

Comparando as embarcações desta vertente com as da canoagem de velocidade, verifica-se uma diminuição do comprimento e um aumento da largura da primeira face à segunda. Assim sendo, as embarcações de *Slalom*, apresentam uma extensão de 3,5m para K1 e C1, e de 4,1m para C2; bem como uma largura de 0,60m para K1 e C1, e 0,74m para C2. Com estas características, tornam-se claramente embarcações muito mais estáveis e mais fáceis de manobrar.

4.4. Canoagem Estilo Livre (*Freestyle*)

O estilo livre é uma das modalidades mais recentes no mundo da canoagem, sendo simplesmente reconhecida pela ICF em 2006. Existe uma grande diferença desta disciplina para todas as outras, a qual se prende com o facto da competição não envolver a necessidade de percorrer um determinado trajecto. Aqui, o objectivo é o atleta efectuar uma série de acrobacias e manobras contra uma onda ou rolo de água de um rio, num tempo e espaço definidos (ver figura 8). Quanto maior o número e dificuldade das manobras realizadas, maior será a pontuação atribuída, e melhor a classificação dos atletas.



Figura 8: Atleta de estilo livre a realizar uma acrobacia

Fonte: <http://www.canoekayakbc.ca/>

As embarcações utilizadas são *kayaks* K1 e as provas são disputadas por membros de ambos os sexos.

4.5. Canoagem Pólo

O aparecimento da canoagem pólo como hoje é praticada, aconteceu no ano de 1987, na Alemanha. Contudo, há mais de um século já se praticavam jogos que envolviam uma canoa, um remo e uma bola. Nessa altura, o jogo era bastante tranquilo e os praticantes procuravam apenas diversão e entretenimento (ver figura 9).



Figura 9: Imagem histórica que representa um jogo de Pólo

Fonte: <http://www.hickoksports.com/>

Durante muito tempo, foi uma modalidade de introdução à canoagem, onde se aperfeiçoava a técnica de remar. A área de jogo era grande, com um comprimento entre 99 e 120m, e uma largura de 50 a 90m. Cada uma das equipas tinham 11 atletas e o objectivo era marcar golos, existindo para tal uma baliza com 4m de largura e 1,5m de altura. Mais tarde, a área de jogo foi reduzida, assim como o número de atletas, que passaram a ser apenas 5.

No ano de 1966, Bert Keeble desenvolveu um *kayak* K1 específico para a canoagem pólo e a partir dessa altura os jogos começaram a ser disputados em piscinas com 25m de comprimento por 10m de largura. Muitos países não aceitaram essas alterações e continuaram a praticar a modalidade em rios, onde a área de jogo era substancialmente superior. Só em 1986 a ICF definiu regras específicas para a prática do pólo, determinando-se uma área de 35x23m, com uma baliza localizada a 2m de altura da água, com dimensão de 1m por 1,5m. (ver figura 10). O número de jogadores manteve-se em 5, e presentemente existem diversas equipas masculinas e femininas a praticarem a modalidade.



Figura 10: Jogo de Canoagem Pólo

Fonte: <http://www.kayak.im/>

Até aos nossos dias, esta forma de modalidade competitiva sofreu bastantes alterações, tornando-se progressivamente mais competitiva, convertendo-se num desporto de velocidade, habilidade e trabalho de equipa.

4.6. Canoagem de Águas Bravas

A canoagem de águas bravas tem sido considerada pela ICF como uma das disciplinas mais exigentes a nível físico, uma vez que o sucesso dos atletas depende da sua força e habilidade para passar sobre ondas, pedras e buracos do leito natural de um rio (ver figura 11).

Originalmente a canoagem de águas bravas dizia respeito a corridas de longa distância, aquilo que actualmente se denomina por canoagem de águas bravas clássica. No entanto, actualmente esta disciplina foi encurtada no percurso das provas, seguindo a tendência de introdução de formatos de “corridas rápidas”. Procurando dar resposta às apreensões de segurança, bem como aos elevados custos envolvidos nas provas mais longas, o Comité de canoagem de águas bravas da ICF decidiu acrescentar provas de velocidade a esta disciplina, promovendo anualmente três provas clássicas de canoagem de águas bravas, e três provas de canoagem em águas bravas de velocidade. De forma similar, o campeonato mundial da modalidade tem presentemente ambos os tipos de provas no programa, cujas categorias são K1 feminino e masculino, e C1 e C2 masculino.



Figura 11: Atleta de Canoagem de Águas Bravas durante a descida do rio

Fonte: <http://www.canoeicf.com>

4.7. Canoagem Barco-Dragão (*Dragonboat*)

Esta vertente da canoagem surge com inspiração oriental. As embarcações são grandes e abertas, frequentemente decoradas com dragões de madeira na proa (ver figura 12).

As corridas, são disputadas por equipas de 10 ou 20 remadores, além de um timoneiro e de outro elemento que dita o ritmo com um tambor. Usando remos de uma só pá, vence a equipa que percorrer o percurso estabelecido, normalmente de 500 a 1000 metros, no menor tempo possível.



Figura 12: Canoagem Barco-Dragão

Fonte: <http://www.abhkonline.com/>

4.8. Canoagem de Mar

A canoagem de mar é praticada em águas abertas, nas quais se desenvolvem provas de percurso, resistência e habilidade. A finalidade destas provas é percorrer em águas marinhas um determinado trajecto previsto na carta náutica (figura 13). A distância do percurso deve ser superior a 10000m, dividindo-se em etapas cujo número é determinado pelo Comité da competição, sendo que as categorias femininas e juniores podem ter provas mais curtas.

Pelo carácter incerto do ambiente em que se disputam estas competições, é permitido o uso de determinados utensílios como bússolas, remos de reserva e bombas e escoamento de água, além de ser exigido como medida de segurança que todas as embarcações possuam flutuadores e os atletas envergarem coletes salva-vidas.



Figura 13: Canoístas em alto mar, praticando canoagem de mar

Fonte: <http://www.mar-kayaks.pt/>

Nesta modalidade, todos os barcos devem apresentar largura mínima de 55 cm e peso mínimo de 140N, sendo que o que define a classe das embarcações é o seu comprimento, existindo portanto três categorias distintas:

Classe I: *kayaks* com comprimento mínimo de 4,60 m

Classe II: *kayaks* com comprimento entre 4,30 m e 4,59 m

Classe III: *kayaks* com comprimento mínimo de 4,00 m e máximo de 4,29 m.

4.9. Canoagem Adaptada

A canoagem adaptada é praticada por portadores de algum tipo de deficiência física (auditiva, visual, mental ou múltipla). Os atletas podem, consoante o tipo de incapacidade, utilizar equipamentos extra, que lhes permitam melhorar o seu rendimento desportivo de modo seguro (ver figura 14).



Figura 14: Praticante de Canoagem Adaptada

Fonte: <http://www.canoeicf.com/>

Em 2009, no Campeonato do Mundo de Canoagem de Velocidade disputado no Canadá, os eventos de canoagem adaptada foram recebidos com grande apoio e aclamação pela multidão. As provas incluíam 200 metros masculino e feminino nas categorias de “pernas, tronco e braços”, K2 200 metros nos grupos “tronco e braços” ou apenas “braços”, e C2 para atletas de qualquer das categorias.

O grande intuito do Programa de Canoagem Adaptada é tornar-se um desporto oficial com participação nos Jogos Paralímpicos de 2016. Para tal, tem-se tentado aumentar as participações em campeonatos mundiais, alargando-as a 24 países. No entanto, em 2010 o Campeonato do Mundo de Canoagem de Velocidade excedeu mesmo as expectativas, com a participação de 63 atletas provenientes dos 5 continentes.

Faz-se assim uma revisão do estado actual da canoagem de competição mostrando o amplo espectro das competições existentes que permitem, que uma população bastante alargada possa participar em actividades realizadas ao ar livre. Estas características da modalidade aliadas às belas paisagens que bordeiam os cursos de água do nosso país justificam a elevada aceitação de que tem beneficiado nos últimos anos.

No entanto, o objectivo deste trabalho consiste em estudar apenas um *kayak* concebido e construído especificamente para competição de velocidade em águas paradas, pelo que será nesse tipo de barco que se concentra a atenção deste trabalho.

5. Estado da Arte

Ao nível dos atletas de elite, muitas vezes torna-se difícil definir quais os parâmetros diferenciadores da sua qualidade funcional e competitiva. Por este motivo, a investigação no domínio da canoagem, tem sido tradicionalmente centrada no estudo de diversos factores que possam condicionar a *performance* (desempenho) dos desportistas. As perspectivas mais recentes neste campo, têm subjacente a ideia de que o controlo de vários indicadores relacionados com o rendimento desportivo permite a construção de programas de treino adequados, e revelam-se essenciais para um alcance seguro do sucesso pretendido (Bishop, 2000).

De entre os agentes que influem no desempenho do canoísta, a adequação do perfil antropométrico dos atletas às exigências específicas da modalidade, tem sido um dos grandes esforços dos investigadores. Gobbo e colaboradores (2002) analisaram o perfil antropométrico da selecção brasileira de canoagem, feminina e masculina, e demonstraram que os desportistas masculinos possuem um elevado peso corporal, com grande quantidade de massa magra e reduzidos depósitos de gordura subcutânea, pelo que consequentemente revelam uma baixa percentagem de gordura. As desportistas femininas, por sua vez, apresentam um perfil um pouco distinto dos atletas do sexo masculino, caracterizado principalmente pela heterogeneidade dos aglomerados de gordura subcutânea. Os autores associam o perfil morfológico encontrado ao treino de força e resistência muscular imposto pela modalidade, na medida em que este tipo de esforços parece desencadear processos de hipertrofia músculo-esquelética (Gobbo et al., 2002). Resultados semelhantes foram encontrados em 2003, no estudo de Ackland e colaboradores, o qual concluiu que os *kayakistas* olímpicos apresentam um somatótipo mesomorfo equilibrado, com maior representação da muscularidade corporal.

Outro dos factores de grande enfoque na literatura sobre o tema prende-se com a análise de parâmetros fisiológicos nos atletas de alta competição. Sousa (2008), investigou o perfil dos indicadores fisiológicos do metabolismo aeróbico de *kayakistas* de elite ao longo de uma época, através de dados referentes à frequência cardíaca, limiar anaeróbico e consumo máximo de oxigénio (VO_2max), concluindo que o processo de treino terá induzido nos *kayakistas* uma melhoria nos indicadores de composição corporal, e potenciando os mecanismos fisiológicos que evidenciam uma relação directa com os indicadores de *performance*. De igual forma, outras investigações revelam que as adaptações geradas pelo treino induzem alterações no sistema cardiovascular e respiratório. Bishop (2000) verificou que numa prova oficial feminina de K1 500 metros, as atletas possuíam grande actividade aeróbica (70.25 ± 5.61 %) que pode requerer uma inegável contribuição anaeróbica (29.75 ± 5.61 %). Ainda relativamente a este foco de pesquisa, revela-se pertinente referir um estudo levado a cabo por Michael e colaboradores (2008), que se propuseram a realizar uma revisão bibliográfica acerca de dados fisiológicos relativos a *kayakistas* masculinos e femininos. Desta investigação, pôde concluir-se que um *kayakista* de sucesso detém não somente um

grande poder aeróbico, como também uma elevada energia anaeróbica, além da sua força muscular ser igualmente importante.

A avaliação das variáveis biomecânicas associadas à prática da canoagem tem recebido atenção análoga aos restantes parâmetros supracitados. Tem sido largamente aceite pela comunidade científica, que o conhecimento dos aspectos cinéticos e cinemáticos permite a detecção de momentos em que está presente o efeito de fadiga, fornece indicações de como intervir a nível técnico na forma de aplicação da força, bem como auxilia na selecção de modelos de equipamento e de atletas que compõem as embarcações. Petrone e colaboradores (2006) efectuaram uma análise biomecânica das atletas de elite de *kayak* olímpico durante a remada em ergómetro (que padroniza o desenvolvimento da remada), tendo aferido que as melhores atletas foram capazes de realizar trajectórias de remada regulares em diversos ensaios. Já em 2009, Carneiro e Castro realizaram uma revisão dos aspectos biomecânicos associados à remada da canoagem com o intuito de incrementar o conhecimento na área. Mediante a análise de diferente documentação, os autores concluíram que na modalidade, um aumento no comprimento e frequência da remada são recomendáveis para o alcance de uma melhor velocidade de remada, e que um alto valor de frequência de remada e grande deslize são característicos de um melhor desempenho. Para além disso, foi ainda possível apurar que a aplicação da estratégia de início de prova rápido, mostra-se um padrão vantajoso utilizado na competição.

Todavia, a par do estudo das condicionantes atléticas dos praticantes, uma outra corrente de investigação tem aludido à importância dos equipamentos desportivos, considerando-os igualmente responsáveis por uma melhor performance. Assim, de entre as análises que têm incidido sobre esta vertente, destacam-se aquelas que têm como objecto de estudo a pagaia e o *kayak*.

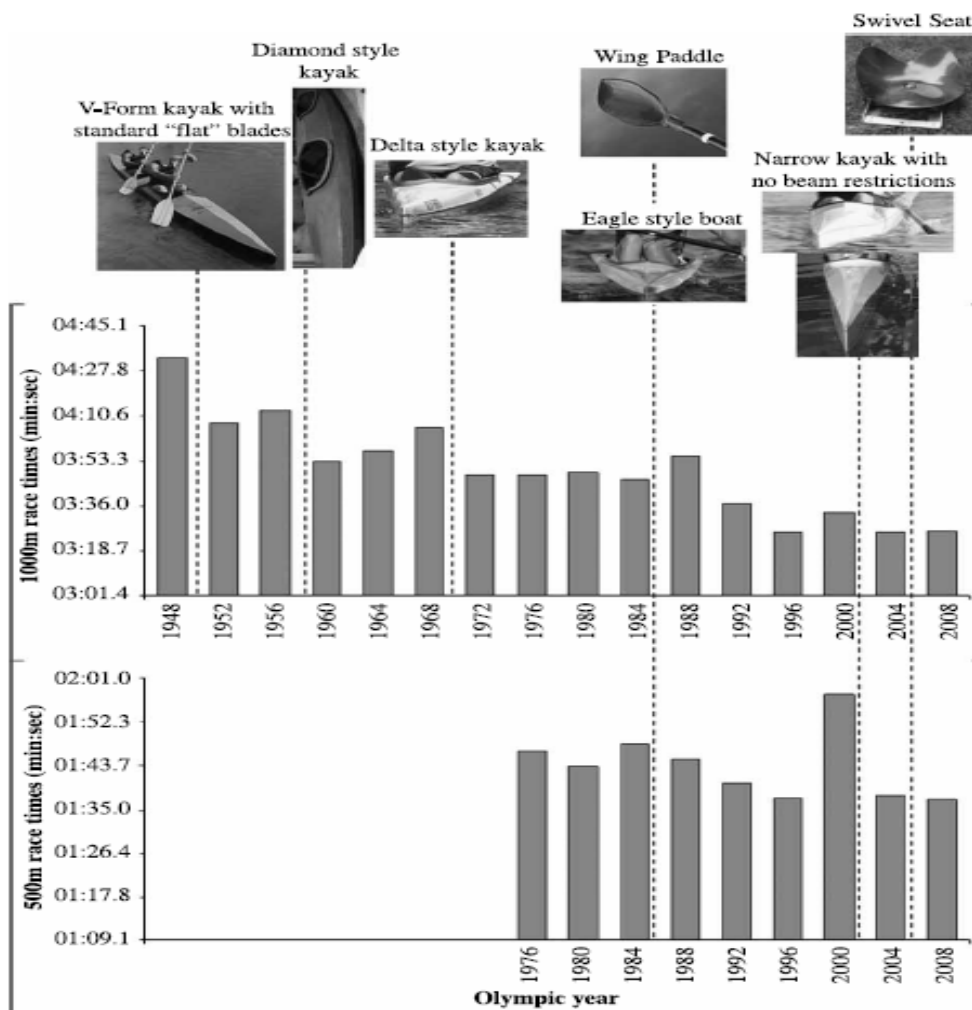
No que reporta à primeira, tem sido sugerido que as transformações no seu *design* constituem-se como um dos maiores avanços tecnológicos que originou melhorias nos tempos da remada (Robinson et al., 2002). Genericamente, o design da lâmina da pagaia pode ser simétrico ou assimétrico em relação ao eixo do cabo, e possuir um formato plano, curvo ou oval. De acordo com Brown (2002), grande parte dos desportistas têm actualmente optado por pagaias com lâminas assimétricas por considerarem que estas são mais eficientes face às simétricas, uma vez que minimizam a quantidade de torção descontrolada da lâmina. Além disso, aponta como mais vantajosas as lâminas curvas ou ovais, na medida em que a sua superfície côncava facilita a entrada da lâmina na água, proporcionando um melhor desempenho no início do curso da remada.

Sumner e colaboradores (2003) testaram três tipos de *design* de pagaia (Convencional, Norueguês e Turbo) num túnel de vento de baixa velocidade e mediram a força lateral média e a força de arrasto que actuava em cada lâmina. Estes resultados foram comparados com as medidas obtidas com uma placa rectangular plana. De acordo com o que apuraram os coeficientes de força adimensionalizados são em grande parte independentes do *design* da lâmina da pagaia, e comportam-se de forma semelhante a uma placa rectangular plana. No entanto, os mesmos autores afirmam que embora os benefícios dos diferentes tipos de lâmina não sejam muito visíveis considerando a força de arrasto, existem outras áreas que são influenciadas pelo formato da mesma sendo que de entre estas se destacam o retorno da lâmina para a posição inicial, a entrada e saída da lâmina da água e a interacção entre a lâmina e a superfície aquática.

Relativamente ao *kayak* existem diversas conceptualizações cuja tónica é colocada na importância do seu *design* e na relação intrínseca deste, com o desempenho óptimo do atleta (e.g. Robinson et al., 2002). Um estudo efectuado em 2009 por Michael e colaboradores apresentou uma representação gráfica do desempenho dos atletas olímpicos de K1 1000 metros no período de 1948 a 2008, e de K1 500 metros, de 1976 a 2008, cujos dados se coadunam com esta noção de que o constante aperfeiçoamento dos *kayaks* contribui para uma redução nos tempos da prestação dos atletas (ver gráfico 1).

Gráfico 1: Desempenho dos atletas olímpicos de K1 1000m (1948-2008) e de K1 500m (1976-2008)

Fonte: Michael, Smith & Rooney (2009).



Baseados nesta premissa, alguns investigadores têm reflectido acerca de diversas questões essenciais em torno da composição e funcionamento do *kayak*. Jackson (1994), por exemplo, procurou estabelecer os efeitos dos diferentes factores que determinam a velocidade do curso de *kayaks* e canoas, concluindo que relativamente ao casco, um aumento de apenas 1% de atrito na superfície, pode resultar numa redução de 0,27% na velocidade de uma embarcação do tipo K1. Por outro lado, não obstante à relevância dos aspectos hidrodinâmicos, têm surgido na literatura interessantíssimos estudos referentes à análise estrutural das embarcações.

Petrone e Quaresimin (2002) analisaram o comportamento à flexão de um *kayak* Olímpico construído em material compósito através de um Modelo de Elementos Finitos desenvolvido no ANSYS®, e da realização de testes experimentais de flexão no *kayak*, com o propósito de contribuir para a sua optimização estrutural. Comparando várias propostas de *design* para a construção da embarcação, ponderando para o efeito a rigidez à flexão, os autores constataram que em todas as soluções propostas se verificou um aumento da rigidez geral até ao máximo de 25%. Assim, foi sugerido que apenas o uso extensivo de um reforço de laminado de carbono permite aumentar a rigidez à flexão, embora isso possa diminuir a resistência da embarcação ao impacto (Petrone & Quaresimin, 2002).

Ainda neste âmbito Paradis e Gendron (2007) levaram a cabo a análise estrutural de uma canoa, estabelecendo para o efeito um Modelo de Elementos Finitos, que foi posteriormente validado com testes na própria canoa. Numa fase ulterior foram ainda realizados testes dinâmicos experimentais para avaliar qual o factor de amplificação que deveria ser aplicado à tensão estática, de modo a considerar possíveis efeitos dinâmicos. Sumariamente, os resultados demonstraram que em qualquer um dos casos de carregamento em suportes de apoio simples a canoa actua longitudinalmente como uma viga de secção em U de inércia variável e sujeita a cargas de flexão. A sua conduta com dois ou quatro remadores sujeita-se longitudinalmente à flexão negativa (alargamento da canoa), e transversalmente à flexão positiva (contração da canoa). Dependendo do peso da canoa e do peso dos remadores, qualquer um dos casos pode ser crítico, pela combinação da acção da gravidade e distribuição da pressão hidrostática, embora no que respeita à canoa em análise, o caso de carga de dois canoistas foi visivelmente mais crítico.

Quanto ao comportamento das subestruturas, o método de elementos finitos permitiu constatar que as *ripes* aumentavam consideravelmente a rigidez transversal e que o campo de tensões era de algum modo afectado pela presença das mesmas. De forma a complementar o estudo operaram-se testes dinâmicos que representaram a condição de corrida com dois canoistas, tendo-se apurado que as remadas induziam tensões de pequena amplitude no casco e nas subestruturas. Em última análise mostra-se pertinente referir as conclusões relativas ao estabelecimento do factor de amplificação e à medição do campo de tensões e subsequente determinação da resistência necessária. No que respeita às primeiras, os resultados indicaram que deveria ser aplicado na canoa um factor de amplificação dinâmica de 1.25, e nas *ripes* um factor de 2.2. Relativamente às segundas os testes efectuados revelaram que o casco deveria resistir a 4MPa de esforço de tensão de tracção e compressão em torno do local onde o remador apoia o joelho (Paradis & Gendron, 2007).

Centrando-se nesta linha de investigação, cuja proposta assenta no entendimento dos fundamentos estruturais dos equipamentos na modalidade desportiva de canoagem, a dissertação que aqui se apresenta tem como objectivo principal, contribuir para a compreensão do comportamento estrutural de um *kayak* de velocidade do tipo K1. Ainda que a forma e acabamento exteriores sejam importantes no escoamento hidrodinâmico e consequentemente na força de arrasto, só serão aqui tratadas as implicações da forma na resistência estrutural.

6. Método

6.1. Modelo de Kayak em Análise

Foi utilizado como objecto de estudo deste trabalho um *kayak* de canoagem de velocidade do tipo K1, disponibilizado pela empresa NELO ao Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental do DEMec/INEGI. Trata-se do modelo Vanquish III (designação comercial para este *kayak*) que tem sido largamente utilizado pelos melhores atletas da actualidade, pois apresenta um *design* otimizado a nível hidrodinâmico, o que lhes permite obter um alto desempenho. Contudo, a elevada eficiência hidrodinâmica exige que a sua largura seja reduzida ao valor mínimo regulamentar, de modo a diminuir o arrasto na água o que, inevitavelmente, o torna mais instável. Assim, apesar dos seus benefícios, mostra-se imprescindível que o atleta possua bastante experiência para a manter o equilíbrio adequado durante uma prova.

De forma a melhor explicitar a geometria da estrutura do *kayak* em causa, nas figuras 15, 16 e 17, apresentam-se as diferentes partes que o compõem.



Figura 15: Modelo de *kayak* em estudo



Figura 16: Vista do *cockpit* do *kayak*



Figura 17: Finca-pés colocado no interior do *kayak*

Este modelo corresponde ao tamanho L e possui, segundo o fabricante, um comprimento de 5,2m, largura de 0,41m e uma massa de 12kg com acessórios¹, sendo indicado para atletas com peso entre 75 a 85kg (M.A.R. Kayaks Lda).

Uma vez que se desconhecia, *à priori*, a estrutura interna da embarcação, mostrou-se pertinente pedir ao fabricante que efectuasse um corte em ambas as extremidades do *kayak* (ver figura 18). Desta forma foi possível aceder ao interior de ambos os extremos da quilha e analisar, ao longo da espessura, a sequência de camadas que constituem o compósito.



Figura 18: Secção de corte no *kayak*

Pela análise desta secção, foi possível identificar o tipo de materiais constituintes do modelo em estudo. Na figura 19 mostra-se uma fotografia tirada ao microscópio de reflexão com baixa ampliação.

¹ Para este estudo apenas se considerou a massa do *kayak* sem os acessórios, que equivale a uma massa de 9kg.

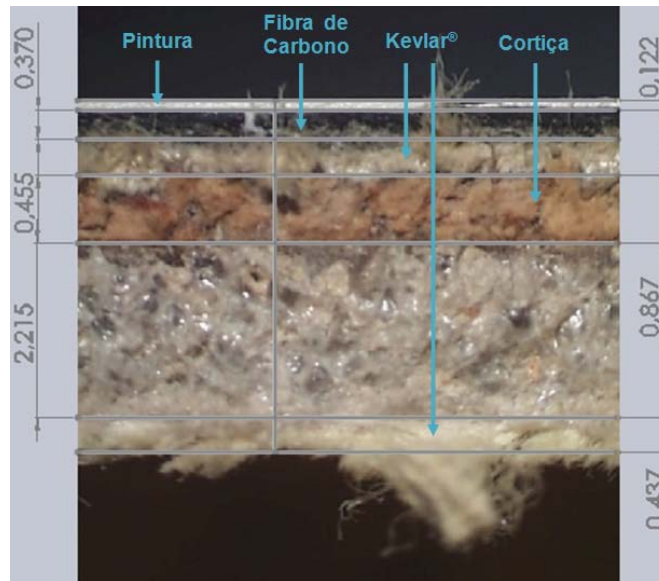


Figura 19: Composição interna da estrutura do *kayak*

Tal como se pode verificar na figura 19, ao longo da espessura total da embarcação que é de aproximadamente de 4,5 mm, conseguem identificar-se em primazia, três tipos de materiais: fibra de carbono, kevlar® e cortiça. Trata-se de uma construção em multi camada em que a matriz deste compósito é uma resina de epóxido, material que apresenta uma densidade de 1,2 a 1,4 kg/m³ e um módulo de elasticidade que está entre 2,1 e 5,5 GPa (Fischer, 2009).

Em toda a extensão da embarcação depreende-se a existência de duas camadas de resina de epóxido reforçada com fibra de carbono, na medida em que, na generalidade, cada camada tem em média 0,2 mm. Para além disso, observa-se a presença de um aglomerado de cortiça (0,867 mm), um composto de kevlar® que faz a ligação entre o carbono e a cortiça (0,455 mm) e ainda uma camada interior de kevlar (0,437 mm). É ainda de referir a presença de um material desconhecido, que se presume ser um composto semelhante a cartão que dá lastro à estrutura, de modo a cumprir o peso mínimo regulamentado para competição.

Note-se, que na parte central do *kayak* foram colocadas internamente algumas camadas adicionais de resina de epóxido reforçada com fibra de carbono, aumentando a rigidez neste local, o que se mostra que é necessário reforçar essa zona dada a descontinuidade geométrica existente no *cockpit*. A cavidade central que permite a entrada do canoista provoca um aumento da deformação nesta zona e consequentemente tensões mais elevadas.

Diante do exposto, conclui-se que a existência de diferentes materiais na estrutura, promove a interferência de cada um deles nas propriedades finais da mesma, pelo que cumpre aqui explicitar as propriedades mecânicas de cada material em particular, pois o comportamento global será um resultado da influência de todos os materiais que a constituem.

Fibra de carbono: De entre as propriedades mecânicas resultantes da conjugação da matriz de epóxido com a fibra de vidro, e considerando a sua utilização na construção de um *kayak*, importa referir a sua densidade específica, que varia entre 1550 e 1600 kg/m³, o módulo de elasticidade, que se situa entre 50 e 60 GPa e a tensão de rotura, cujos valores estão entre 500 e 1050 MPa (Ashby & Johnson, 2002). Como se percebe pelas referidas propriedades, este compósito apresenta um excelente compromisso entre baixo peso e elevada resistência

mecânica, sendo este o motivo da sua crescente utilização em equipamentos de alta competição.

Kevlar®: O Kevlar®, marca registada da empresa *DuPont*, é uma fibra sintética de aramida, que apresenta, tal como a fibra de carbono, excelentes propriedades mecânicas. Segundo a *DuPont*, o Kevlar 49® é o mais utilizado em embarcação e equipamentos desportivos, pelo que deduzimos que seja este o tipo de fibra de aramida utilizada no *kayak* apresentado. Para um compósito de resina de époxi reforçada com kevlar, a densidade específica é de 1400 kg/m³, que aliado a um módulo de elasticidade de 124 GPa e uma resistência à tracção de 3,6 GPa (DuPont, 2011), o torna um material com uma relação peso/resistência superior à fibra de carbono. É no entanto, de salientar que a utilização de um compósito constituído por fibra de carbono e Kevlar® é bastante usual, quando se pretende uma elevada resistência e boa capacidade de absorção de impactos.

Cortiça: Pela observação da estrutura do *kayak*, percebe-se que existe um aglomerado de cortiça cuja função é essencialmente fornecer espessura sem aumentar muito a densidade final do *kayak*. Dado que as propriedades mecânicas variam bastante com a pressão que é exercida sobre as partículas de cortiça para formar o aglomerado, não é possível conhecê-las com exactidão. Segundo Silva e colaboradores (2005) a densidade pode variar entre 120 e 240 kg/m³ e o módulo de elasticidade situa-se em torno de 38 MPa.

De entre os materiais supracitados a fibra de carbono e o kevlar são aqueles que contribuem para a estabilidade estrutural do *kayak*, pelo que é sobre estes que deve recair qualquer actuação no sentido de promover a sua optimização estrutural.

Por último deve referir-se que os *kayaks* NELO são obtidos por técnicas convencionais utilizadas com estes materiais. Trata-se de uma moldação em vácuo sobre moldes com as formas exteriores pré-definidas. Embora as técnicas de fabrico desta empresa sejam das mais avançadas, com níveis de acabamento próximos do que se utiliza em aeronáutica, as propriedades globais resultantes não são fáceis de obter sem a realização de um conjunto de ensaios mecânicos que estão para além do âmbito deste trabalho.

6.2. Instrumentos

Do universo de instrumentos e ferramentas disponíveis no âmbito da análise estrutural, elegemos os seguintes:

6.2.1. *SolidWorks® Premium (v.2010)*

O *SolidWorks®* é um software de CAD (*computer-aided design*) que se fundamenta na computação paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de formas geométricas elementares. A sua actuação tem por base as características e propriedades de cada elemento e acção, sendo exequível proceder a qualquer alteração durante toda a fase do processo de modelação (D.Planchard & M. Planchard, 2010).

O projecto em *SolidWorks®* compreende três etapas: a primeira diz respeito à concepção das peças em ficheiros disjuntos; a segunda refere-se à montagem destas mesmas peças num novo ficheiro; e a última prende-se com a criação de vistas das diversas peças e sua montagem.

6.2.2. *Ansys® Mechanical Workbench (v.13.0)*

Este sistema permite a construção de modelos computacionais ou a transferência de modelos de CAD das estruturas a serem analisadas, sendo que o seu uso possibilita a aplicação de cargas, o estudo de respostas físicas e o aperfeiçoamento de projectos de forma a reduzir custos relativos à fabricação de protótipos. De forma sucinta, o seu funcionamento assenta na realização de análises a partir da construção do modelo (*Preprocessor*), aplicação de cargas e obtenção da solução (*Solution*) chegando-se por fim à aquisição dos resultados (*Postprocessor*) (Monteiro, 2004).

O programa computacional *ANSYS®* viabilizou a aplicação do método de elementos finitos ao estudo em causa. Genericamente, este método numérico caracteriza-se pela utilização de polinómios para aproximação da solução de um determinado problema. O domínio a ser analisado é dividido em subdomínios – os “elementos finitos” – os quais se interceptam num número determinado de pontos ou nós, que resultam numa “malha” com n pontos nodais. É nesses nós que se supõe estarem concentradas as resultantes das forças aplicadas. Considerando as equações de equilíbrio e de compatibilidade em cada nó, daí resulta um conjunto de equações algébricas cujas incógnitas são os deslocamentos nodais, as forças internas ou ambos, dependendo da formulação do método de elementos finitos utilizada (Lotti et al., 2006).

6.2.3. Extensometria eléctrica

A fim de recolher os dados durante o procedimento de análise experimental, foi determinada a utilização de extensometria eléctrica, pelo facto de esta ser uma técnica aplicável a diversas condições de trabalho sem interferência no funcionamento da estrutura a analisar.

Os extensómetros eléctricos são dispositivos utilizados experimentalmente, para avaliar as deformações ocorridas num dado ponto de um corpo e segundo uma dada direcção. A medida é realizada colocando um condutor linear solidário com a superfície de uma estrutura, sendo que as variações da dimensão da mesma são transmitidas mecanicamente ao extensómetro, que transforma essas variações, em variações equivalentes da sua resistência eléctrica (Barreto, 2000).

No caso apresentado foi feita uma ligação em quarto de ponte com extensómetros do tipo “folha” da marca *HBM*, cujas características são:

- factor de sonda (GF): $2,0 \pm 1,5\%$.
- resistência nominal: 350Ω
- autocompensação térmica para compósito.

Para se obter o sinal dos extensómetros foi utilizada uma placa de aquisição de dados da *Nationals Instruments*, modelo NI 9219. Esta placa é ligada a um computador através de uma outra placa da mesma empresa, cujo modelo é NI USB-9162. O sinal foi visualizado no computador utilizando o *software LabView SignalExpress 2009 (v3.5.0)*, com uma frequência de aquisição de sinal de 7Hz, tratando-se de carregamentos estáticos, não se justifica a utilização de um valor superior.

6.2.4. Sistema *Shear* (*Shearography Speckle*)

O *Shear* (*Shearography*) é uma técnica interferométrica presentemente usada para inspeção não destrutiva de estruturas compósitas. É normalmente aplicada uma fonte térmica para excitação estrutural e, por alteração na forma resultante da expansão térmica do material, obtêm-se os deslocamentos internos (Hung, 1997). O interferómetro tem o mesmo princípio da interferometria de *Speckle*, à excepção de que neste as duas frentes de onda, referência e objecto, advêm ambas do objecto e são desviadas lateralmente (*Shear*) para criar um padrão de interferência.

Ao contrário de outras técnicas, o *Shear* só é sensível ao gradiente de deslocamentos fora-do-plano (alta insensibilidade aos movimentos de corpo rígido), de forma que o gradiente de deslocamentos medido constitui-se como uma boa aproximação ao campo de rotações da superfície (Kreis, 2005). Pode ainda referir-se que a forma mais compacta deste interferómetro garante a maior estabilidade nas medições, facilitando o isolamento das perturbações exteriores (Gomes, Monteiro & Vaz, 2000).

Por fim, importa salientar a simplificação da montagem óptica desta técnica que se tem mostrado bastante vantajosa, pois por não necessitar de feixe de referência, permite trabalhar com LASER de menor comprimento de coerência.

6.3. Procedimento de Obtenção das Propriedades Globais do *Kayak*

Apesar de serem conhecidos os materiais de construção do *kayak*, não se conseguiram identificar as suas propriedades globais, pois a direcção das fibras e a distribuição da quantidade de resina de epóxico são factores desconhecidos. Assim, a primeira etapa foi desvendar essas propriedades, porque só desta forma se pode partir para uma análise a nível estrutural. Foi com recurso aos elementos finitos e à extensometria que tal foi possível.

Estando o *kayak* sujeito, principalmente a esforços de flexão, optou-se pela realização de um carregamento de flexão em três pontos, que se mostra esquematicamente na figura 20.

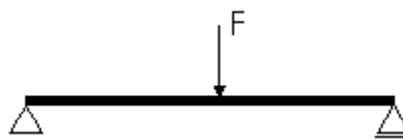


Figura 20: Esquema de flexão em três pontos

A reprodução deste carregamento no *software ANSYS*[®] e a sua posterior comparação com uma situação real são a base que permite o ajuste das propriedades globais da embarcação.

6.3.1. Selecção dos Pontos para Colagem dos Extensómetros com Recurso ao MEF

A forma do *kayak* foi desenhada em CAD 3D² no *SolidWorks*[®], tendo sido necessária a sua divisão em três partes, dada a existência do reforço na zona central, que lhe confere diferentes propriedades face às restantes zonas. Na figura 21 identificam-se as três partes, as pontas a vermelho e o centro a cinzento.

² Agradece-se ao Eng. Nuno Ramos, colaborador do LOME/INEGI, a disponibilização do desenho em CAD 3D do modelo do *kayak* em estudo.

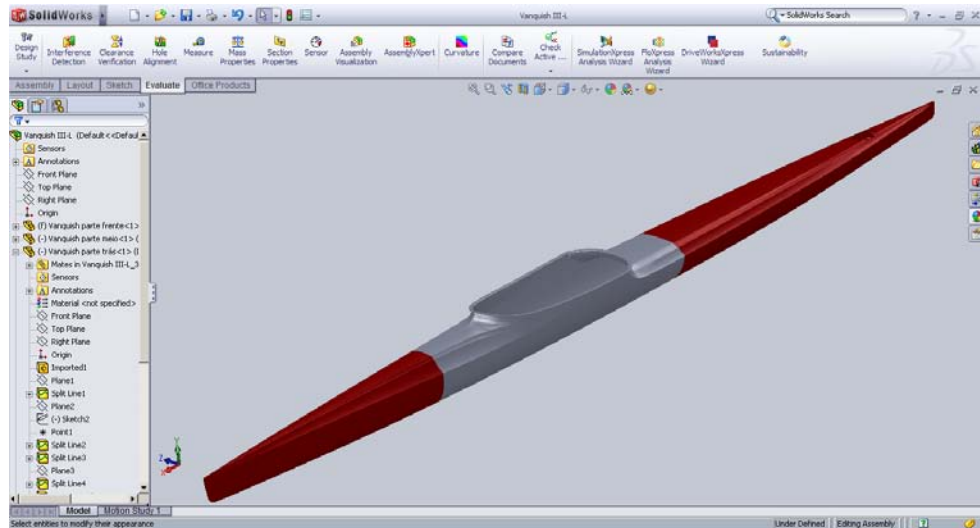


Figura 21: Modelo do *kayak* em CAD 3D

De seguida, foi feita uma exportação da geometria da embarcação para o software ANSYS®, para se simular a situação de carregamento mencionada anteriormente. Tratando-se de um carregamento estático, seleccionou-se por conseguinte uma “análise estática”.

Nesta etapa, tornou-se necessário definir um material para o *kayak*, tendo-se optado por principiar com um material, em que as propriedades mecânicas resultam da média aritmética dos valores que a literatura aponta para cada um dos materiais da sua composição.

- Módulo de Young: 58 GPa;
- Densidade: 361,5 kg/m³;
- Coeficiente de Poisson: 0,3.

A primeira aproximação utilizou estes valores para as três partes indiferenciadamente.

Decorridos estes aspectos, procedeu-se então à geração da malha, cuja distribuição pela estrutura do *kayak* se pode verificar na figura 22.

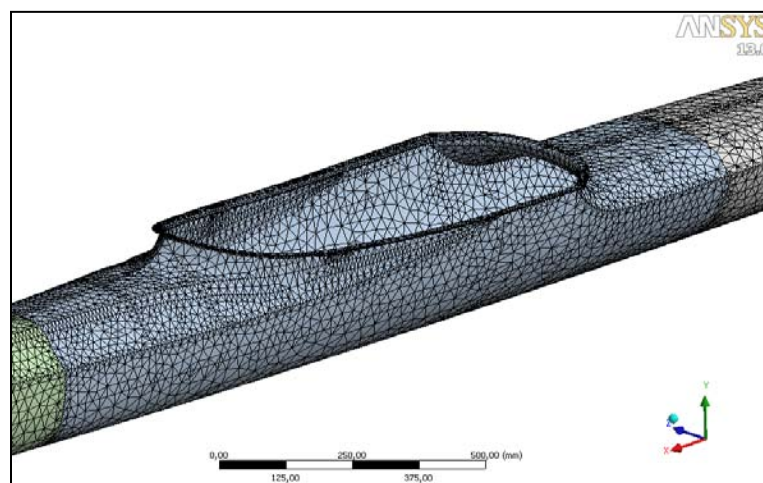


Figura 22: Detalhe da malha de elementos finitos

Esta malha contém 79533 elementos de casca triangulares e 160117 nós.

A etapa subsequente foi a definição das condições de fronteira. Como primeiro ensaio colocaram-se apoios simples com restrição na direcção vertical (eixo do 'y'), que se situaram nas delimitações da zona central do *kayak*, tal como se observa na figura 23.

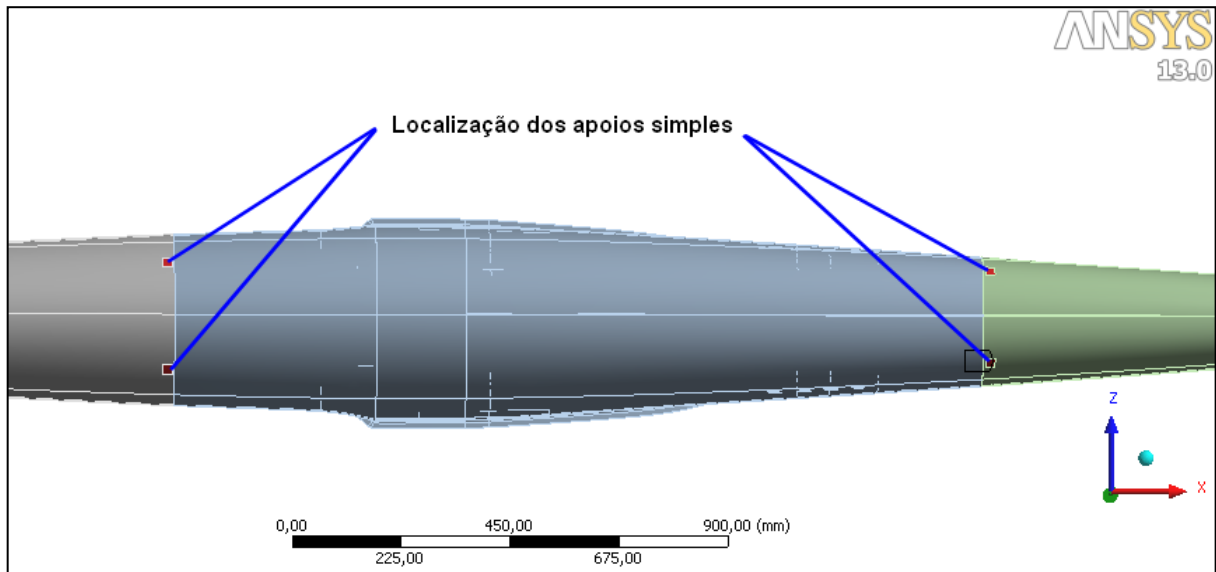


Figura 23: Localização dos apoios no *kayak* para análise no MEF

Ainda neste domínio, foi aplicada uma carga de 700N, sobre os carris que suportam o banco, valor correspondente ao peso de um atleta (ver figura 24). A força foi aplicada remotamente, situando-se aproximadamente no centro de gravidade do *kayakista*.

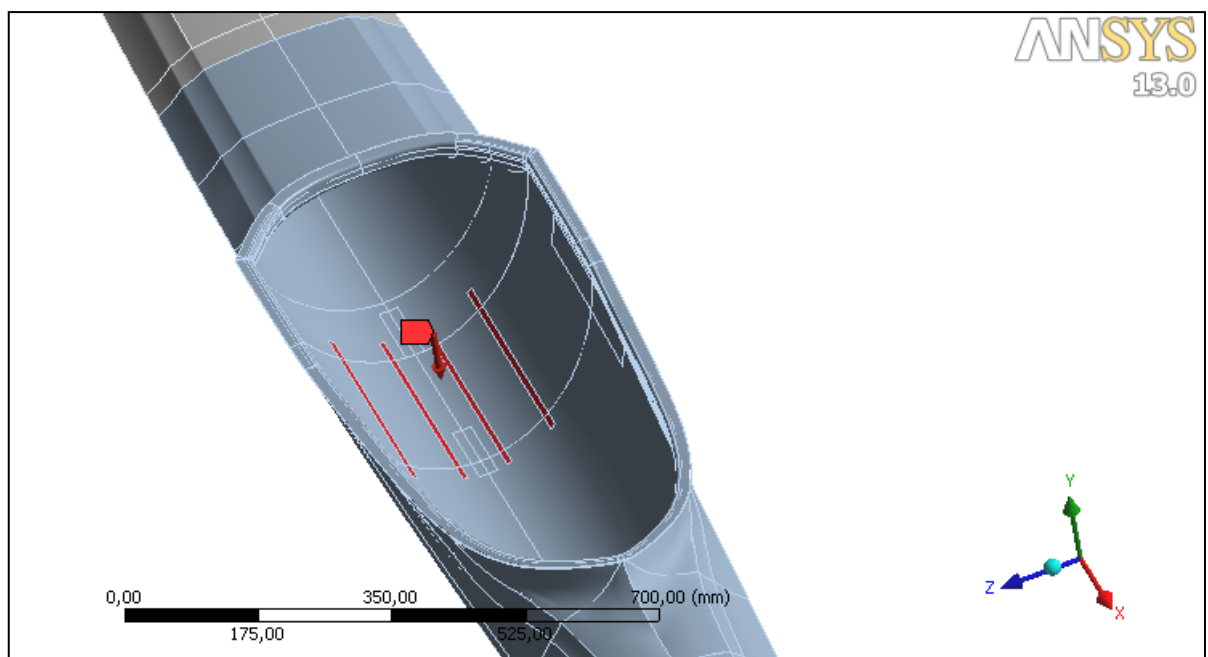


Figura 24: Local de aplicação do carregamento

Estando o *kayak* sobre esforço de flexão, a deformação que importa observar é ao longo do seu eixo, neste caso eixo do 'x'. A partir da deformação resultante do carregamento aplicado, escolheu-se o local para a colagem dos extensómetros, como se apresenta na figura 25.

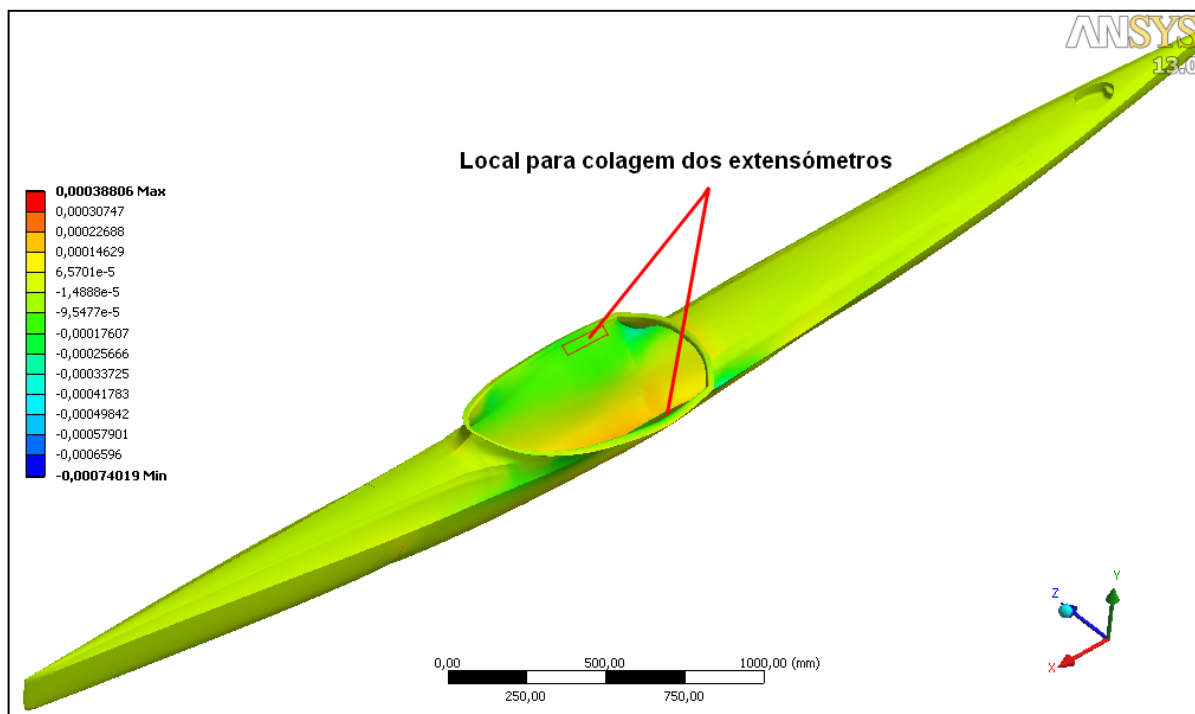


Figura 25: Resultado da simulação MEF da deformação segundo o eixo do *kayak* e localização da área de colagem dos extensómetros

Os critérios da selecção da área de colagem prenderam-se com a apresentação de deformações consideráveis, mensuráveis pelos extensómetros, e com a facilidade de acesso para se efectuar a colagem, privilegiando-se um local que preserva-se a integridade da embarcação, pelo que se optou então por um posicionamento interior. Procurou-se instrumentar numa região de comportamento homogéneo sem a presença de gradientes de deformação. Assim, foram posicionados dois extensómetros em locais simétricos. Esta redundância servirá para verificar a fidelidade do sinal e a simetria do carregamento.

6.3.2. Montagem dos Extensómetros

Após definido o local para a colagem de dois extensómetros, procedeu-se à preparação da superfície. Este é um passo fundamental para garantir a máxima aderência entre o extensómetro e o *kayak*. Para tal, foi efectuada uma remoção de incrustações de modo a regularizar a superfície, com recurso à lixagem. Uma vez feita a limpeza bruta, seguiu-se a parte em que a superfície começou realmente a ser preparada para a colocação dos extensómetros. Como poderiam existir fibras de carbono quebradas que interfeririam com a colagem, colocaram-se camadas de cola adicionais para criar uma superfície mais uniforme. Por fim, estas áreas foram lixadas com uma lixa fina, para criar alguma rugosidade, que garantisse a aderência da cola a aplicar para a colagem dos referidos extensómetros. Esta rugosidade é obtida através da lixagem em duas direcções com um ângulo de aproximadamente 45° entre elas. Por fim realizou-se uma limpeza com acetona para remover qualquer impureza da superfície.

Feito este procedimento, foi realizada a marcação do local onde ficarão os extensómetros, como se evidencia na figura 26, o que serve para alinhar os eixos deste, com os eixos traçados na peça. As marcas devem ser suficientemente visíveis, de modo a permitir o posicionamento correcto dos extensómetros aquando da colagem. Deve referir-se que a marcação deverá ser realizada sem tocar na região de colagem previamente preparada para não a contaminar.



Figura 26: Localização de um dos extensómetros

O primeiro passo para iniciar a aplicação do extensómetro consiste na sua colocação sobre uma tira de fita adesiva, para fixar a posição e orientação do mesmo na peça. Posteriormente, levantando uma das pontas da tira, coloca-se catalisador no extensómetro e na superfície do *kayak*, esperando que seque durante um minuto. Em seguida aplica-se cola ao longo da área de colagem e pressiona-se o extensómetro contra o *kayak*, para que a cola em excesso possa escoar. É necessário aguardar dois minutos, para que a cola seque na totalidade e de seguida retira-se com cuidado a tira de fita adesiva de cima do extensómetro. O movimento de arranque aplicado na fita adesiva não deverá evidenciar nenhuma região descolada no substrato do extensómetro.

Para estar completa esta etapa, é necessário soldar os fios aos terminais do extensómetro, para que se possa obter o sinal de saída. Na imagem 27, é dada uma perspectiva final de um dos extensómetros colados no *kayak*. De referir ainda, que foi colocado sobre o *kayak* um produto de isolamento do tipo elastómero líquido para prevenir que a humidade interfira com as medições.

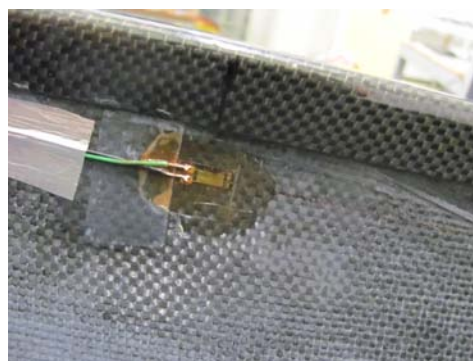


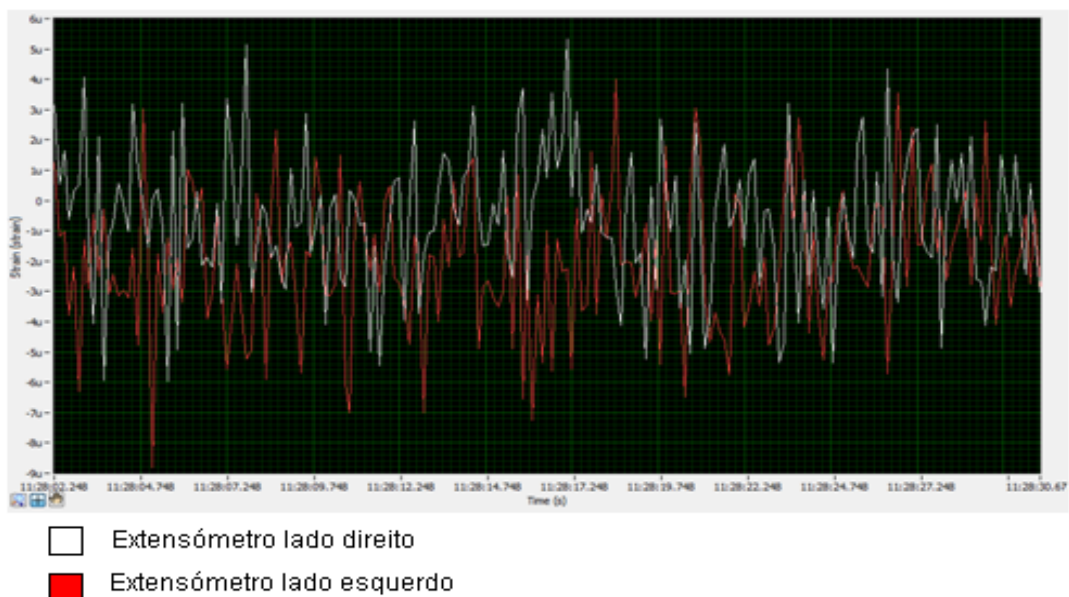
Figura 27: Extensómetro colado no *kayak*

Os dois extensómetros foram posicionados simetricamente na embarcação, o que permite verificar a coerência do sinal. Será de esperar que a deformação registada seja a mesma em ambos para cargas realizadas simetricamente. Na figura 28 mostra-se o aspecto final da montagem do par de extensómetros.



Figura 28: Aspecto final da montagem dos dois extensómetros no *kayak*

Pela análise dos dados provenientes do *LabView SignalExpress* (ver figura 29), pôde apurar-se que após a montagem dos extensómetros o sinal se apresentava estável, tal como pretendido. Certifica-se desta forma que a colagem estava bem efectuada e os extensómetros não sofriam variações devidas à influência da temperatura.



- Extensómetro lado direito
- Extensómetro lado esquerdo

Figura 29: Sinal dos extensómetros após a montagem

Deve referir-se que apesar do aspecto ruidoso dos sinais da figura anterior se estão a medir valores de apenas alguns $\mu\epsilon$ correspondentes à ausência de qualquer carga adicional sobre a estrutura da embarcação.

Posto isto, iniciou-se o ensaio de calibração dos extensómetros que será descrito nos passos seguintes. Pelo facto de existirem na embarcação duas zonas com distinto número de camadas, revelou-se necessário efectuar duas calibrações.

6.3.3. Calibração dos Extensómetros com Apoios no Centro do *Kayak*

A calibração consiste na aplicação de cargas conhecidas num ponto da estrutura, obtendo-se o respectivo valor da deformação do extensómetro. Posteriormente, elabora-se um gráfico, colocando no eixo das abcissas o valor da deformação e no eixo das ordenadas o valor da carga aplicada, de onde se obtém a recta de calibração do extensómetro. Neste caso, a carga foi aplicada sobre o banco da embarcação, que se encontrava colocada sobre dois apoios simples localizados na extremidade da zona central, como mostra a figura 30. Um dos apoios situava-se a 305mm da parte anterior do *cockpit*, e o outro localizava-se a 373mm da sua parte frontal.

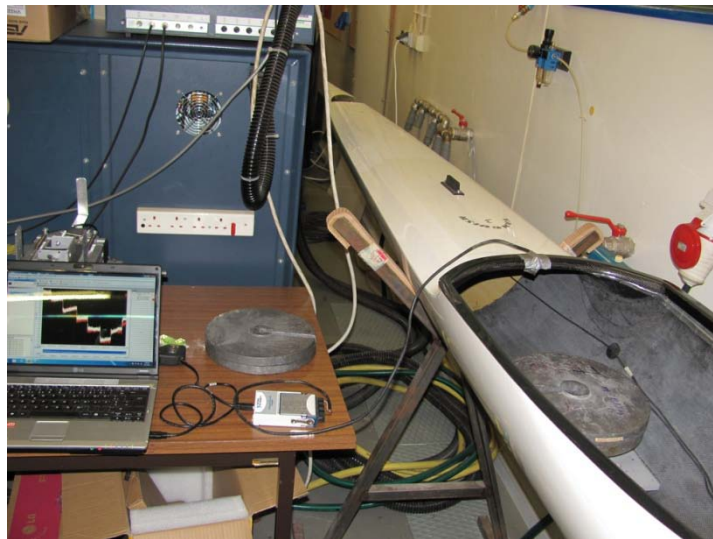


Figura 30: Visão geral de um carregamento e sistema de aquisição de dados

O carregamento foi realizado três vezes de modo a apurarem-se valores mais fidedignos e testar a repetibilidade do carregamento. Registaram-se ainda os valores durante o descarregamento, para se verificar o correcto funcionamento do sistema. A título de exemplo mostra-se na figura 31, as deformações obtidas num dos carregamentos/d Descarregamentos.

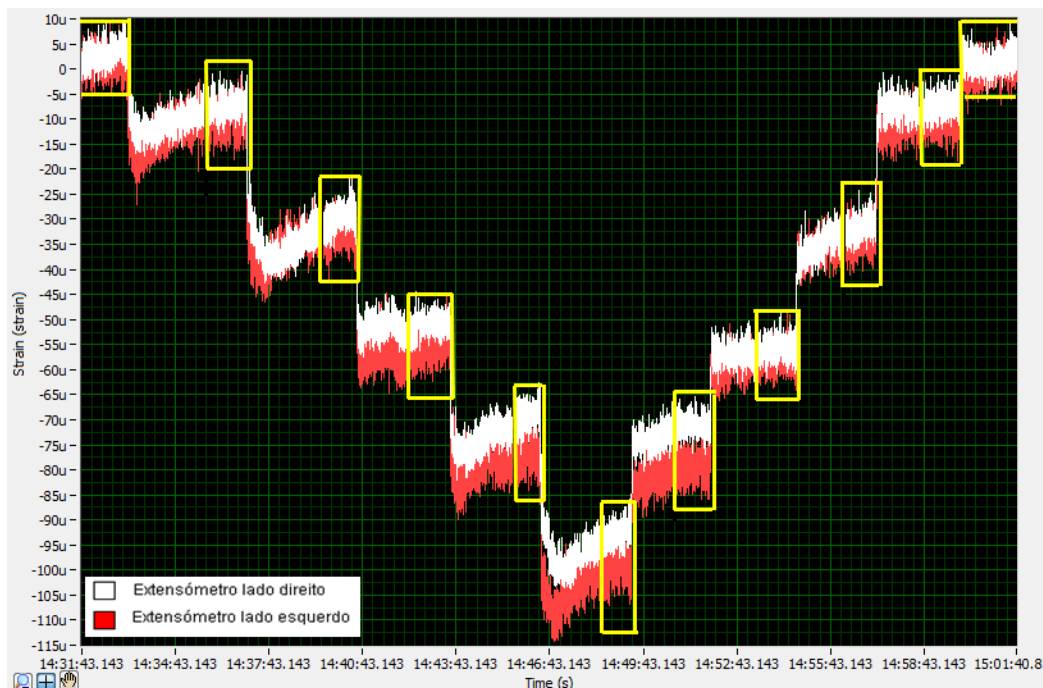


Figura 31: Sinal dos extensómetros num carregamento com apoios no centro do *kayak* com indicação da zona de estabilização

Como dados relevantes para cálculo, apenas se consideraram aqueles que resultaram depois de um intervalo de estabilização do sistema e que na figura acima se sinalizam a amarelo. Com base nestes valores calculou-se a média aritmética entre os três carregamentos repetidos.

Traçando-se um gráfico de carregamento em função da deformação, pode-se retirar a recta de calibração do extensómetro e a respectiva equação, podendo com isto calcular a deformação para qualquer carregamento. Nesta montagem o *kayak* encontra-se simplesmente apoiado nos suportes normalmente utilizados para a sua elevação. Estes suportes rígidos, construídos em aço, foram colocados nos extremos da zona reforçada do *cockpit*.

6.3.4. Calibração dos Extensómetros com Apoios nas Pontas do *Kayak*

O procedimento anterior foi repetido, desta vez para a calibração dos extensómetros com apoios nas pontas do *kayak*, tal como se observa na figura 32. Neste caso, o apoio da parte de trás estava colocado a 410mm da ponta traseira da embarcação, e o outro a 350mm da ponta frontal.



Figura 32: Posicionamento dos apoios nas pontas do *kayak*

De forma a espelhar as deformações obtidas nesta condição apresenta-se a figura 33. Apesar dos carregamentos se repetirem igualmente três vezes, verifica-se pela análise desta imagem que foram aplicadas apenas duas cargas, de forma a evitar danos no *kayak*, pois esta condição provoca deformações mais elevadas devido ao maior momento flector.

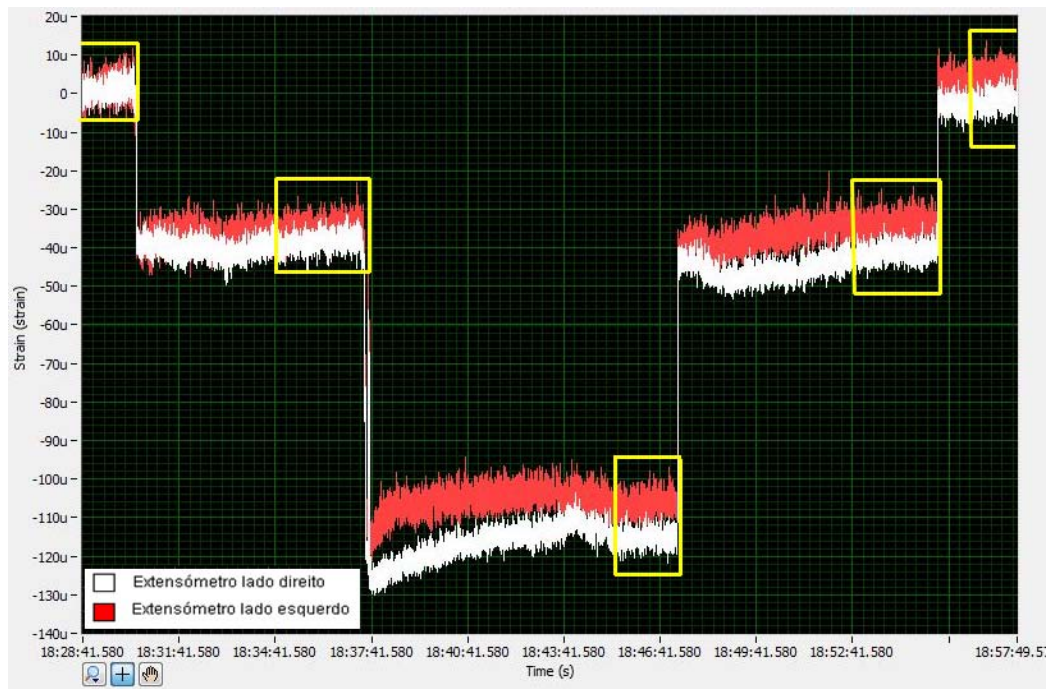


Figura 33: Sinal dos extensómetros num carregamento com apoios nas pontas do *kayak* com indicação da zona de estabilização

Finda esta fase, os passos que se seguem destinam-se à descrição do procedimento de ajuste de uma das propriedades mecânicas da estrutura, o módulo de Young global, pelo MEF.

6.3.5. Ajuste do Módulo de Young Através do MEF

Na análise de estruturas mecânicas, um dos critérios com maior influência no comportamento das mesmas é a sua rigidez final. Assim, neste estudo a propriedade que apresenta maior relevância é o módulo de Young, na medida em que este parâmetro interfere directamente com a rigidez da embarcação.

Através do *software ANSYS*[®], foi possível ajustar esta propriedade, que inicialmente apresentava um valor de 58 GPa, em toda a estrutura. Este processo consistiu na simulação da situação de carregamento apresentada no ponto 6.3.4., referente à calibração dos extensómetros com apoios na zona central do *kayak*.

Seguidamente, foram aplicados carregamentos sucessivos, obtendo-se para cada um deles a deformação nos pontos correspondentes aos da colagem dos extensómetros, como se apresenta na figura 34.

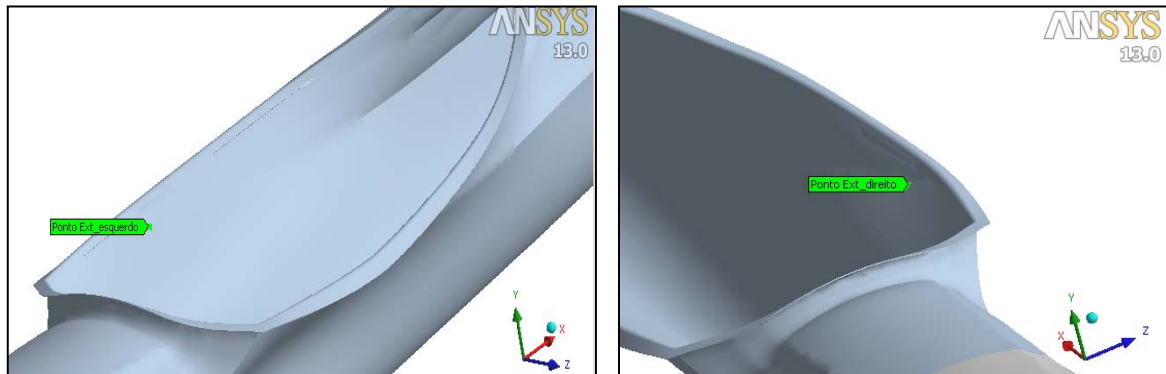


Figura 34: Pontos de obtenção da deformação no ANSYS[®]

Estes valores de deformação foram comparados com os retirados pela recta de calibração dos extensómetros, efectuando ajustes consecutivos do módulo de Young por um processo iterativo, a fim de se obter um erro inter-deformações inferior a 5%.

Foi ainda necessário efectuar o ajuste do módulo de Young para as pontas do *kayak*, pelas razões já referidas nos capítulos anteriores. Simulou-se a situação de carregamento descrita no ponto VI.3.5, e compararam-se os valores obtidos com os retirados da recta de calibração dos extensómetros, para o caso de carregamento com apoio nas pontas. Tal como no caso anterior fizeram-se ajustes no módulo de Young, até se atingir o erro admissível.

De notar que uma vez conhecido o módulo de Young para a zona central, primeiramente aplicou-se o mesmo valor para todas as zonas da estrutura. No entanto, verificamos que o módulo seria naturalmente inferior nas pontas, o que provocaria um aumento erróneo da deformação. Por este motivo, após alterações, mostrou-se necessário averiguar novamente se no caso de apoios no centro o erro entre a deformação esperada e a obtida pelo MEF, não ultrapassaria o estabelecido. Constatando-se que realmente se ultrapassava o ponto de corte considerado, foi necessário proceder a um ajuste em ambos os módulos, de modo a atingir valores aceitáveis para ambas as partes.

6.3.6. Obtenção da Flecha a Meio Vão e Consequente Comparação com MEF

Como a extensometria, tal como qualquer outro processo de medição, tem erros associados, que podem influenciar os resultados, e como a medição apenas num ponto da estrutura possui um carácter limitativo dada eventualidade de descorar aspectos importantes da construção do *kayak*, verifica-se necessário proceder a uma validação das propriedades conseguidas.

A estes factos acresce a impossibilidade de obtenção dos diferentes comportamentos estruturais das extremidades do *kayak* partindo da medição das deformações nos extensómetros, pois o facto de esta ter sido efectuada em dois pontos no centro do *cockpit*,

traduz somente a realidade relativa às deformações locais. Assim, realizou-se uma medição da flecha global a meio vão, que traduz o comportamento global das deformações na embarcação, com recurso a um comparador colocado sob a mesma (ver figura 35). Apoiando-se o *kayak* primeiramente no centro e depois nas pontas (ver figura 36), aplicou-se um carregamento conhecido, auferindo-se o valor do deslocamento num ponto a meio da estrutura. Situações semelhantes às descritas anteriormente a propósito da extensometria.

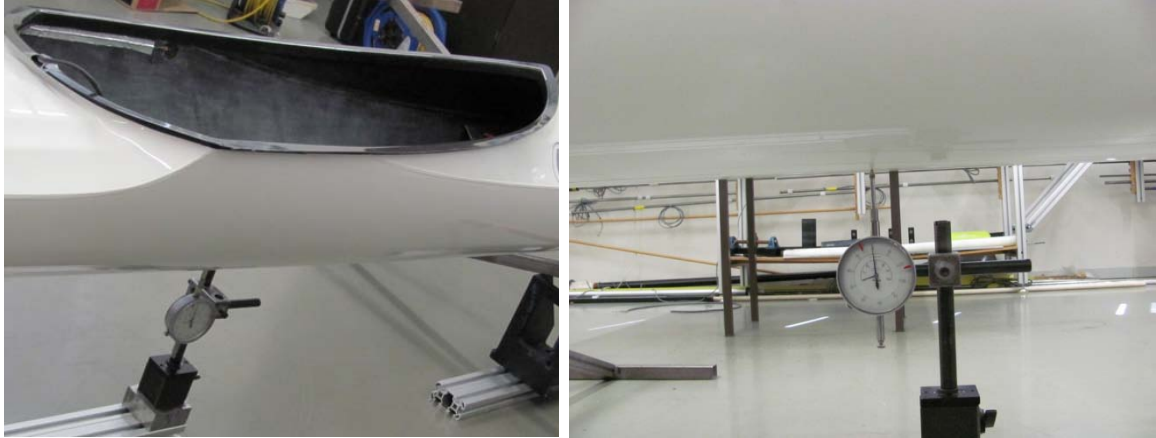


Figura 35: Localização do comparador sob o *kayak*



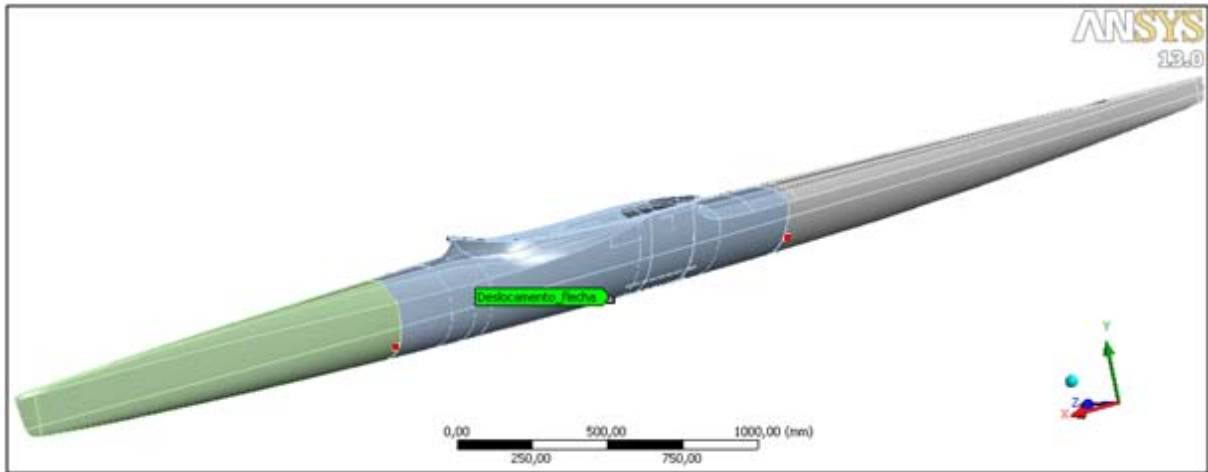
a)



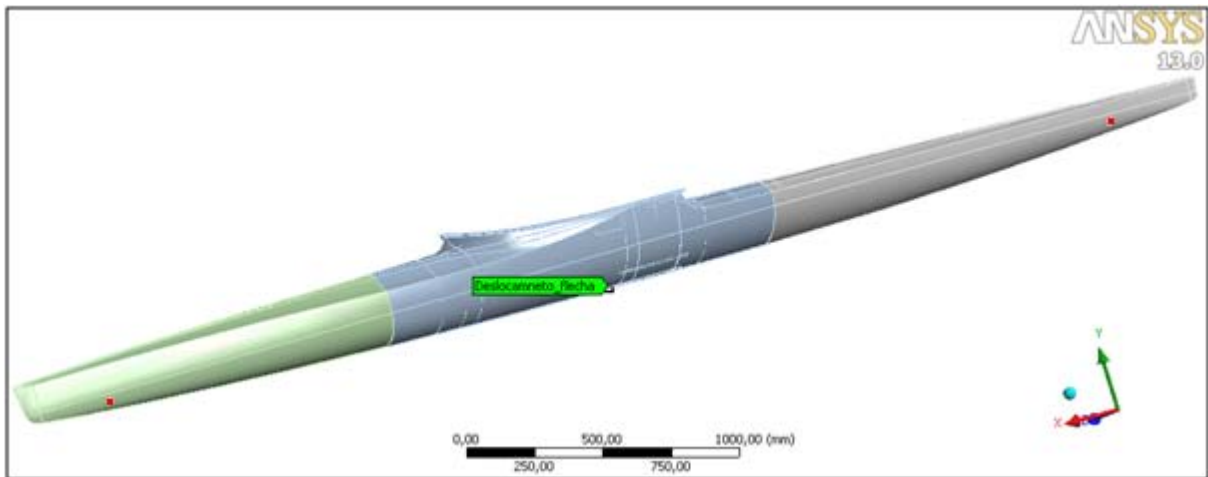
b)

Figura 36: Localização dos apoios: a) no centro da embarcação; b) nas pontas da embarcação

Posteriormente, no *software ANSYS*[®], representaram-se as mesmas situações (ver figura 37), para assim se poder comparar os resultados reais com os determinados pelo MEF, na tentativa de comprovar as propriedades atribuídas.



a)



b)

Figura 37: Modelo de elementos finitos com localização do ponto para obtenção da flecha, com apoios: a) no centro da embarcação; b) nas pontas da embarcação

Estas duas formas de determinar/confirmar o módulo de Young da estrutura do *kayak*, permitem avançar para uma análise estrutural da embarcação no meio para o qual foi concebida, a água.

6.4. Procedimento de Estudo das Deformações e Tensões na Água

Quando o *kayak* está a ser utilizado por um atleta na água, as principais forças que actuam sobre a sua estrutura são o impulso da água e a acção do *kayakista* sobre a embarcação. São

estas acções que é necessário conhecer e compreender o modo como influenciam o comportamento estrutural da embarcação.

O Princípio de Arquimedes diz-nos que, sobre um corpo mergulhado total ou parcialmente num fluído, actua uma força de impulsão vertical, de baixo para cima, cuja intensidade é igual ao peso volúmico de fluído deslocado pelo corpo (Hewitt, 2002). Esta relação traduz-se na seguinte equação:

$$I = \rho \cdot V \cdot g \quad (7.1)$$

É o impulso, a força que equilibra o peso da embarcação com o atleta, fazendo-a flutuar sobre a água. Para se determinar o seu valor é essencial de obter o volume de água deslocado. Com esse intuito, colocou-se o *kayak* sobre a água, na piscina da Faculdade de Desporto da Universidade do Porto, com um indivíduo de 61kg no seu interior (ver figura 38).



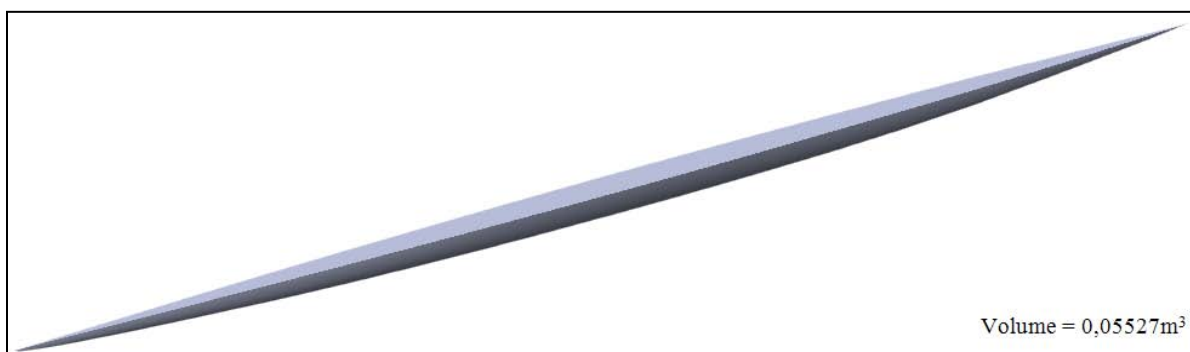
Figura 38: *Kayak* colocado na água, com um indivíduo no seu interior

A fim de identificar o volume imerso, importou-se a figura 38 para o *SolidWorks*[®] colocando sobre esta o modelo do *kayak* criado previamente em CAD 3D neste *software*. Desta forma foi traçada a linha de água sobre o casco do modelo, tal como se pode observar na figura 39.



Figura 39: Definição da linha de água

Utilizando as ferramentas disponíveis no *SolidWorks*[®], calculou-se o valor do volume de *kayak* imerso na água, que corresponde ao volume de água deslocado (ver figura 40).

Figura 40: Volume do *kayak* imerso na água

De modo a avaliar se esse valor estaria correcto utilizamos a equação 7.1 para determinar o impulso gerado, comparando-o com o peso total da embarcação com o atleta. Verificando-se que o valor do impulso era bastante inferior ao peso total, tornou-se necessário igualá-lo para se obter o volume correcto. Assim, com uma massa do conjunto de 70kg, multiplicando este valor pela aceleração da gravidade, obtém-se um impulso de 686,7N. Para uma temperatura da água de 20°C, considera-se uma densidade volúmica de 998,2, tal como sugerido por Hutter e colaboradores (2011). Daqui resulta um volume de:

$$V = \frac{686,7}{9,81 \times 998,2} = 0,070126 \text{ m}^3$$

O valor acima referido evidenciou a necessidade de subir a linha de água, aumentando o volume de *kayak* imerso na mesma. Este processo foi executado no *SolidWorks*[®], elevando a linha e verificando o volume até se atingir um valor próximo do pretendido.

Comparativamente à primeira linha, a segunda localiza-se 10mm acima. O erro cometido na primeira abordagem, torna-se compreensível considerando que a linha foi obtida pela sobreposição de duas imagens e que a fotografia tirada ao *kayak* não estava perfeitamente enquadrada.

Como se pretende mostrar que o modelo de elementos finitos é capaz de representar a situação de utilização da embarcação, o passo seguinte consistiu em aplicar no modelo criado, o impulso da água. Trata-se de uma sollicitação uniforme aplicada sobre todo o casco e a variação das forças ao longo do comprimento variará de acordo com a alteração de geometria existente no *kayak*, pois existe variação de volume. Assim, foi necessário dividir a zona imersa em várias partes (ver figura 41), obtendo-se o volume para cada uma delas, de forma a retratar o melhor possível a situação real, sendo de admitir algum erro de paralaxe.

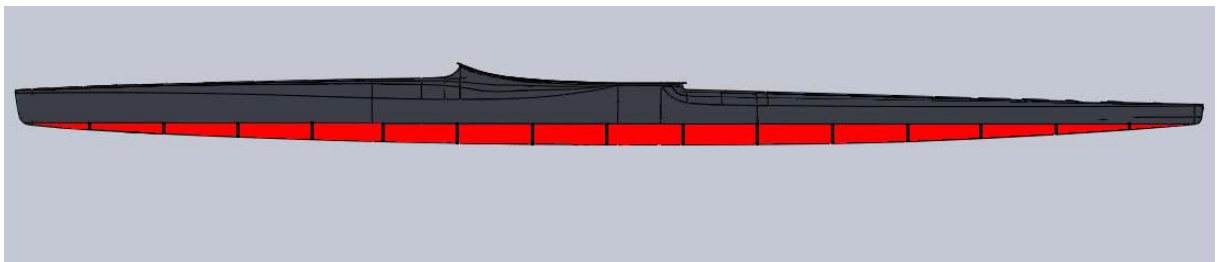


Figura 41: Divisão da zona imersa em várias partes

Para se proceder-se à criação do modelo em elementos finitos, é ainda essencial perceber de que forma se representará a acção do *kayakista*. Segundo Paradis e Gendron (2007), essa acção pode ser expressa através de um apoio simples no local onde o atleta está posicionado, sendo então desta forma que se decidiu representar a sua acção.

Apresenta-se na figura 42 o modelo de elementos finitos elaborado, onde se observa a aplicação das diversas forças distribuídas, correspondentes ao impulso sobre cada parte. Na figura 43 mostra-se a localização do apoio simples colocado nos carris do banco, que restringe o deslocamento na vertical.

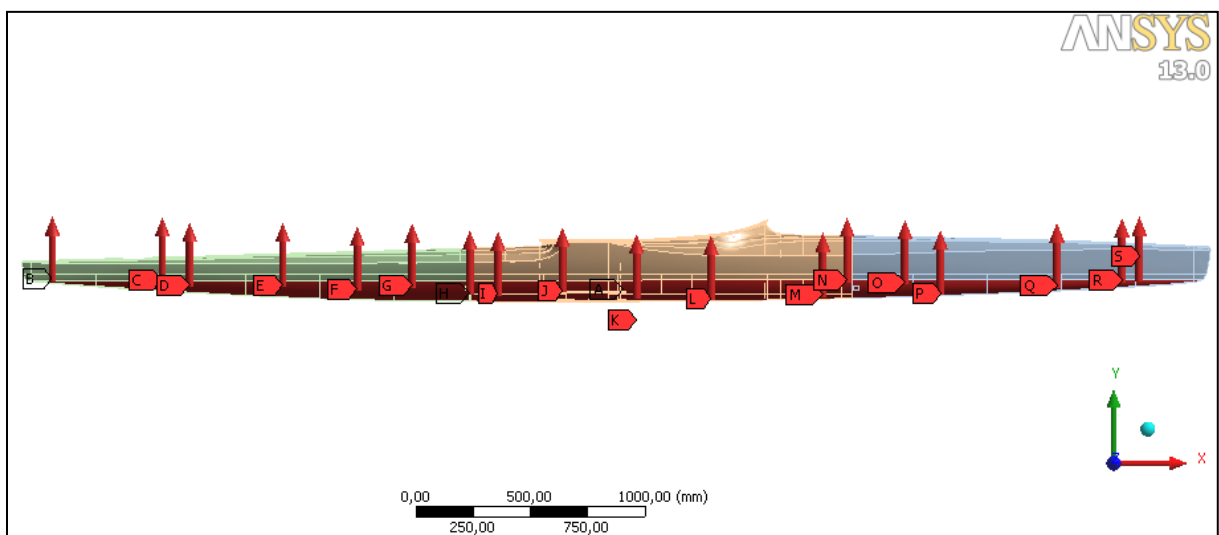


Figura 42: Distribuição das forças de impulso sobre o *kayak*

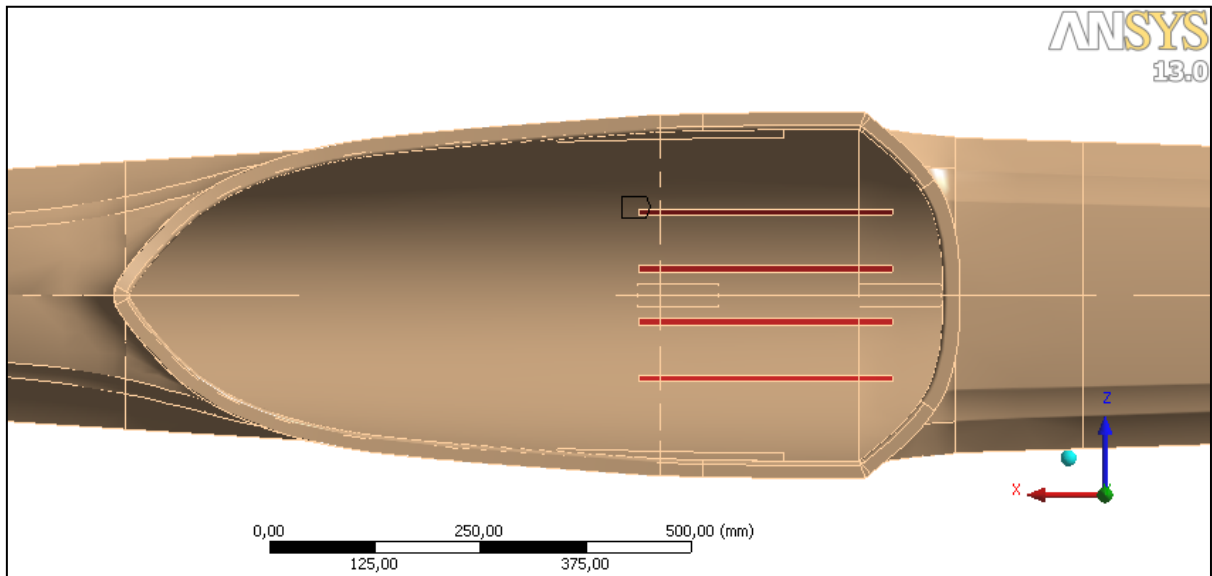
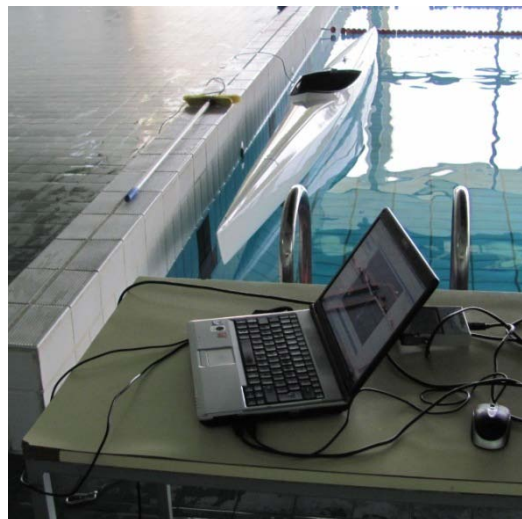


Figura 43: Localização do apoio simples sobre os carris do banco

Usufruindo do facto do *kayak* estar colocado em meio aquático, mediram-se também as deformações com os extensómetros previamente colocados (ver figura 44). Este registo de valores permitirá comparar os resultados experimentais com os obtidos pelo MEF, na tentativa de validar o mesmo.

Figura 44: Aquisição do sinal dos extensómetros com o *kayak* na água

Segundo dados do fabricante, o *kayak* em estudo destina-se a atletas com uma massa máxima de 85kg. Portanto, foi fundamental efectuar uma análise da estrutura pelo MEF, para um atleta desta envergadura, assegurando-se que o estudo compreenderia os esforços máximos aplicados à mesma. Assim, o procedimento referido anteriormente foi integralmente repetido, excepto no que respeita à massa do indivíduo considerado, que passou a ser de 85kg. Inevitavelmente, para que exista um equilíbrio de forças, teria de acontecer um aumento do impulso, e conseqüentemente um acréscimo do volume de *kayak* imerso na água. Para isso

mostrou-se necessário elevar a linha de água sobre o *kayak* para que o impulso fosse distribuído por toda a área submersa.

Através deste procedimento foi realizado para se poder efectuar uma análise de tensões na estrutura da embarcação, pois é esta análise que condiciona o projecto de componentes ou estruturas. Neste caso, considerou-se a tensão equivalente de von Mises, calculada no software ANSYS®.

6.5. Procedimentos de análise mediante a técnica de *Shear*

Sendo o *kayak* construído por um processo primordialmente manual e tratando-se de um laminado compósito é compreensível a existência de defeitos internos, os quais podem influenciar o comportamento da estrutura. Com o intuito de complementar este estudo, procuramos identificar esses possíveis defeitos usando a técnica de *Shear*. A técnica foi aplicada na zona central, parte mais crítica do *kayak*, onde se colocou uma lâmpada (fonte térmica), de modo a provocar uma expansão térmica na embarcação. Caso o laminado não esteja bem compactado, criar-se-ão no seu interior bolsas de ar que fragilizam a estrutura, constituindo-se como um defeito. Como a expansão térmica do ar é superior à da estrutura, visualizar-se-ão por conseguinte, maiores gradientes de deslocamento nesses locais. Esta técnica de inspecção não destrutiva foi concebida para inspeccionar componentes em matérias compósitos utilizados em aplicações aeronáuticas e é hoje aceite com tendo uma sensibilidade equivalente à inspecção por ultra-sons.

7. Apresentação e Análise de Resultados

Para uma melhor compreensão dos resultados desta investigação, apresenta-se primeiramente o produto do estudo do ajuste do módulo de Young, bem como os resultados referentes à sua validação através da medição da flecha a meio vão. Posto isto, são examinados os resultados relativos às deformações obtidas *in situ* e através da análise numérica, que permitem inferir a viabilidade do modelo de elementos finitos criado. Subsequentemente, apresenta-se uma análise descritiva da distribuição de tensões ao longo da estrutura da embarcação. Na fase final, são ainda expostos os dados relativos à técnica de *Shear*, que revelam os defeitos estruturais do modelo de *kayak* analisado.

7.1. Obtenção e Validação do Módulo de Young

A obtenção do módulo de Young envolveu a comparação dos valores de deformação apurados experimentalmente, com aqueles que se obtiveram pelo MEF. Este processo iniciou-se com a calibração dos extensómetros com apoios na zona central e nas pontas do *kayak*.

Nas tabelas 2 e 3, apresentam-se os valores das cargas aplicadas e as resultantes deformações registadas a partir dos extensómetros com a embarcação apoiada no centro.

Tabela 2: Carregamento sobre o *kayak* com apoio no centro, para calibração do extensómetro da direita

Carga Aplicada (kg)	Deformação
0	1,69E-06
5,28	-1,12E-05
15,22	-3,45E-05
25,02	-5,48E-05
35,14	-7,59E-05
44,88	-9,81E-05

Tabela 3: Carregamento sobre o *kayak* com apoio no centro, para calibração do extensómetro da esquerda

Carga Aplicada (kg)	Deformação
0	5,74E-07
5,28	-1,08E-05
15,22	-3,08E-05
25,02	-5,22E-05
35,14	-7,48E-05
44,88	-9,85E-05

Destes valores elaboram-se os gráficos 2 e 3, de onde é obtida a recta de calibração de cada um dos extensómetros, bem como as respectivas equações.

Gráfico 2: Recta de calibração do extensómetro da direita, para apoios no centro

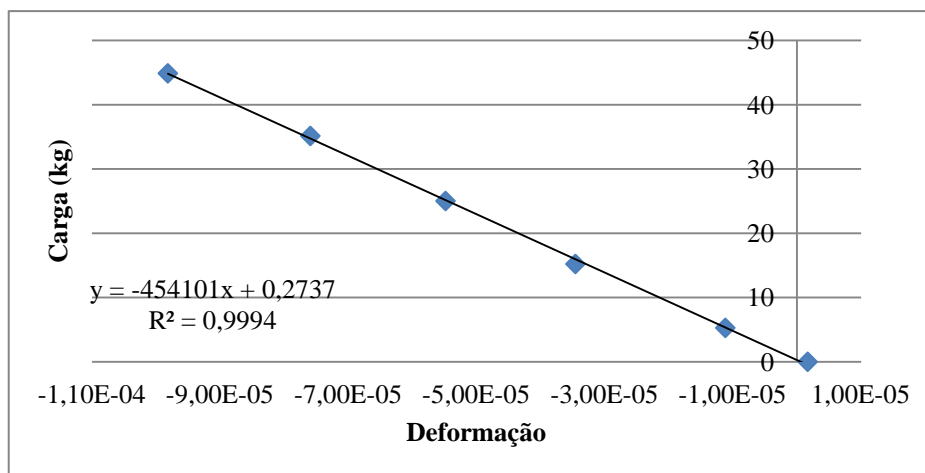
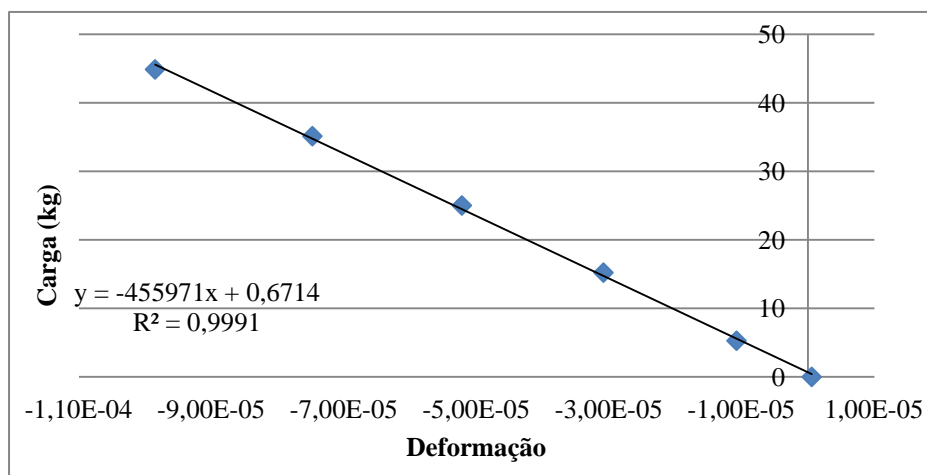


Gráfico 3: Recta de calibração dos extensómetro da esquerda, para apoios no centro



Relativamente à calibração dos extensómetros com o *kayak* apoiado nas pontas, apresentam-se nas tabelas 4 e 5 os valores das cargas aplicadas bem como as deformações obtidas.

Tabela 4: Carregamento sobre o *kayak* com apoio nas pontas, para calibração do extensómetro da direita

Carga Aplicada (kg)	Deformação
0	1,10E-06
5,28	-3,84E-05
15,22	-1,14E-04

Tabela 5: Carregamento sobre o *kayak* com apoio nas pontas, para calibração do extensómetro da esquerda

Carga Aplicada (kg)	Deformação
0	1,48E-06
5,28	-3,70E-05
15,22	-1,13E-04

Daqui criamos o gráfico 4 e 5, de onde obtemos a recta de calibração de cada um dos extensómetros assim como as equações correspondentes.

Gráfico 4: Recta de calibração dos extensómetro da direita, para apoios nas pontas

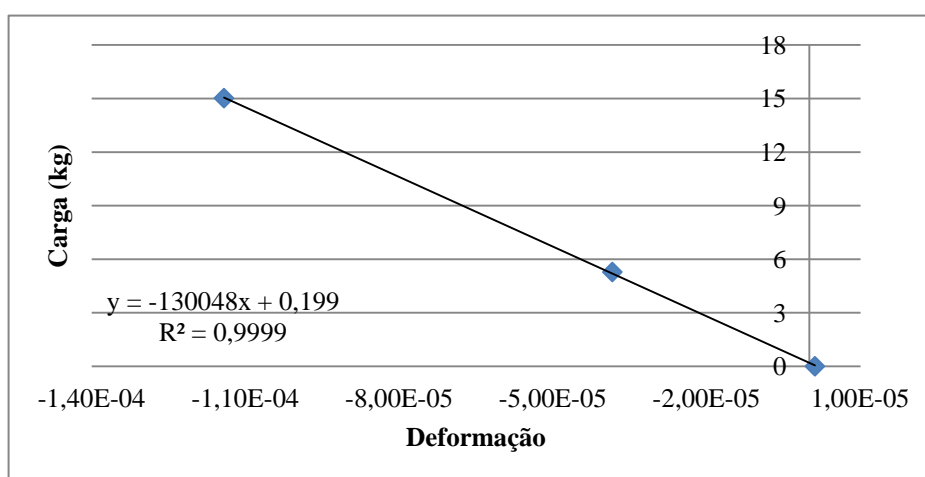
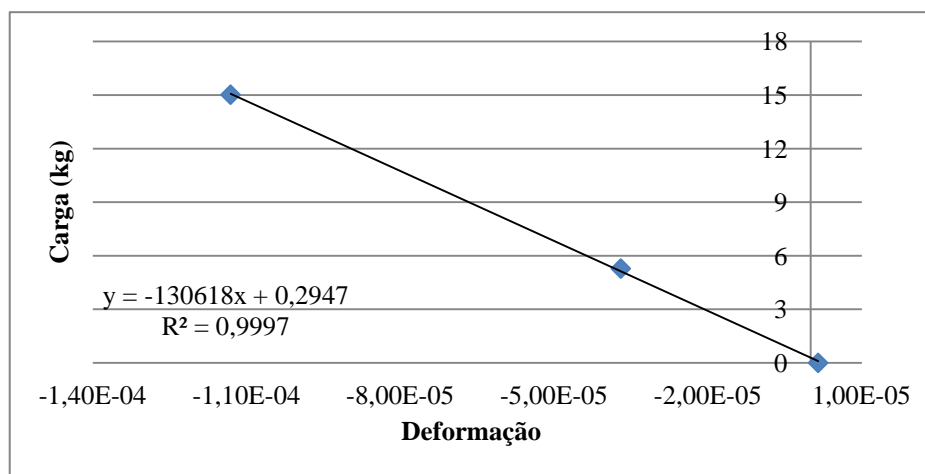


Gráfico 5: Recta de calibração dos extensómetro da esquerda, para apoios nas pontas



Pela análise global dos gráficos apresentados, pode verificar-se a existência de uma elevada linearidade entre os valores. Nos dois casos considerados, as deformações registadas com o

extensómetro do lado direito e do lado esquerdo, encontram-se bastante próximas, o que se configura como um resultado expectável dada a sua colocação simétrica na embarcação.

Da selecção de vários valores de carregamento a serem aplicados no modelo de elementos finitos, retirou-se a deformação respeitante a cada uma das condições de apoio. Já no que concerne às equações da recta de calibração dos extensómetros recolheu-se a deformação esperada nas mesmas circunstâncias.

O resultado da comparação das deformações no primeiro caso em que os apoios se localizam no centro foi de 9GPa, tendo-se, numa fase inicial, atribuído este valor a toda a estrutura. Nas tabelas 6 e 7 pode constatar-se o valor das deformações obtidas por cada um dos métodos utilizados, bem como a percentagem de erro.

Tabela 6: Deformações obtidas pelo MEF e pelo extensómetro direito, ponderando o mesmo módulo de Young em todo o *kayak*, no caso de carregamento com apoios no centro.

Massa (kg)	Carga a Aplicar (N)	Deformação Esperada	Deformação MEF	Erro (%)
10	98,1	-2,14E-05	-2,15E-05	0,50
20	196,2	-4,34E-05	-4,29E-05	1,35
30	294,3	-6,55E-05	-6,43E-05	1,81
40	392,4	-8,75E-05	-8,57E-05	2,03
50	490,5	-1,09E-04	-1,07E-04	2,17
60	588,6	-1,32E-04	-1,29E-04	2,26
70	686,7	-1,54E-04	-1,49E-04	2,32
80	784,8	-1,76E-04	-1,71E-04	2,37

Tabela 7: Deformações obtidas pelo MEF e pelo extensómetro esquerdo, ponderando o mesmo módulo de Young em todo o *kayak*, no caso de carregamento com apoios no centro.

Massa (kg)	Carga a Aplicar (N)	Deformação Esperada	Deformação MEF	Erro (%)
10	98,1	-2,05E-05	-2,14E-05	4,54
20	196,2	-4,24E-05	-4,28E-05	0,91
30	294,3	-6,43E-05	-6,42E-05	0,24
40	392,4	-8,63E-05	-8,56E-05	0,81
50	490,5	-1,08E-04	-1,07E-04	1,15
60	588,6	-1,30E-04	-1,28E-04	1,37
70	686,7	-1,52E-04	-1,49E-04	1,53
80	784,8	-1,74E-04	-1,71E-04	1,65

Como se pode verificar, os erros não excedem os 5% tal como pretendido, denotando-se a existência de proximidade favorável entre as propriedades reais e as do modelo criado em ANSYS®. A figura 45 dá conta do aspecto das deformações no eixo longitudinal do *kayak* após o carregamento efectuado.

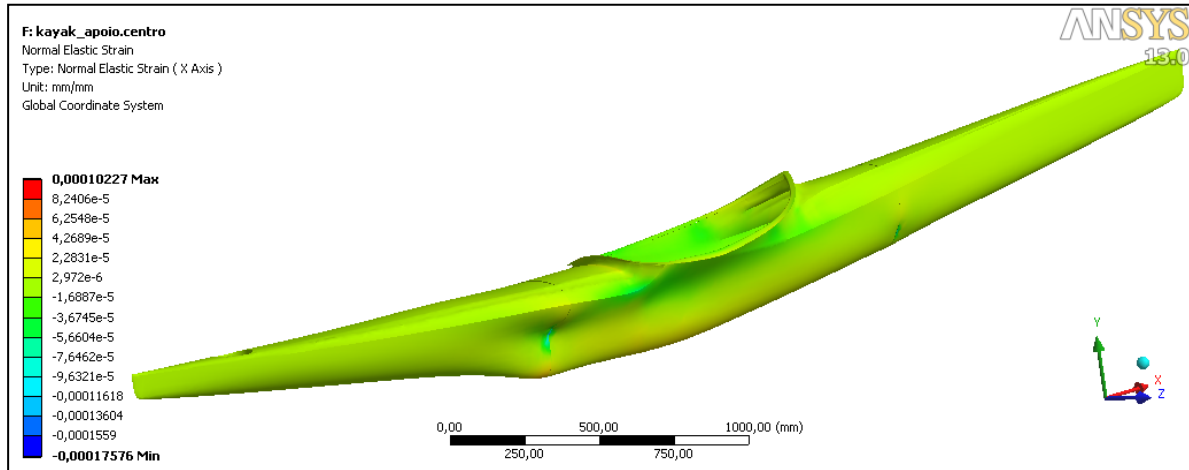


Figura 45: Deformações na direcção do eixo do *kayak* com os apoios na zona central, após o carregamento

Analisando a figura anterior, constata-se que as maiores deformações se concentram no local do apoio situado na parte traseira do *kayak*. Este resultado é explicável atendendo-se ao facto de que a força está apoiada sobre o banco e este localiza-se contiguamente à parte anterior da embarcação.

No que respeita à comparação das deformações no segundo caso com localização dos apoios nas pontas, o valor obtido foi de 7,2GPa para as duas extremidades. Nas tabelas 8 e 9 estão sumariados os valores das deformações obtidas pelo MEF e pela extensometria, e indicados os respectivos erros.

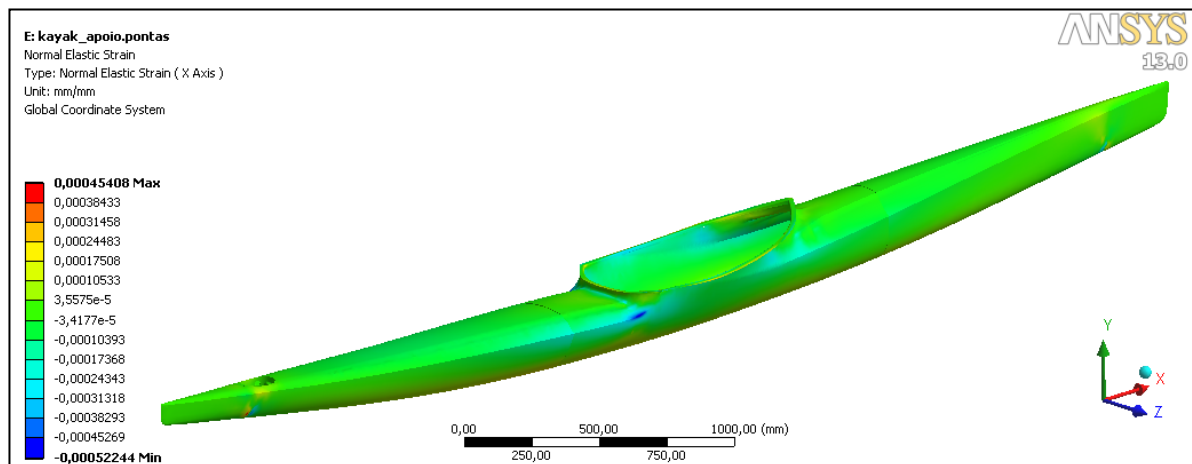
Tabela 8: Deformações obtidas pelo MEF e pelo extensómetro da direita, no caso de carregamento com apoios nas pontas.

Massa (kg)	Carga a Aplicar (N)	Deformação Esperada	Deformação MEF	Erro (%)
10	98,10	-7,54E-05	-7,87E-05	4,39
20	196,20	-1,52E-04	-1,58E-04	3,83
30	294,30	-2,29E-04	-2,36E-04	3,03
40	392,40	-3,06E-04	-3,16E-04	3,31
50	490,50	-3,83E-04	-3,95E-04	3,21
60	588,60	-4,59E-04	-4,74E-04	3,14
70	686,70	-5,37E-04	-5,53E-04	3,09
80	784,80	-6,14E-04	-6,31E-04	2,89

Tabela 9: Deformações obtidas pelo MEF e pelo extensómetro da esquerda, no caso de carregamento com apoios nas pontas.

Massa (kg)	Carga a Aplicar (N)	Deformação Esperada	Deformação MEF	Erro (%)
10	98,10	-7,43E-05	-7,79E-05	4,87
20	196,20	-1,51E-04	-1,58E-04	4,63
30	294,30	-2,27E-04	-2,37E-04	4,10
40	392,40	-3,04E-04	-3,16E-04	3,85
50	490,50	-3,81E-04	-3,95E-04	3,69
60	588,60	-4,57E-04	-4,74E-04	3,59
70	686,70	-5,34E-04	-5,52E-04	3,52
80	784,80	-6,10E-04	-6,31E-04	3,46

À semelhança do que acontece na condição anterior, verifica-se uma proximidade entre os valores das deformações obtidas pelos dois métodos de análise. No entanto, como neste segundo caso existe um maior momento flector, os valores de deformação registados apresentam-se substancialmente mais elevados comparativamente aos precedentes. Examinando a figura 46, ressalta-se a concentração das deformações máximas em torno do *cockpit*, pelo que se presume, que este resultado se relacione igualmente com o acréscimo do momento flector.

Figura 46: Deformações na direcção do eixo do *kayak* com os apoios nas pontas, após o carregamento

Uma vez que se verificou uma redução considerável do módulo de Young nas pontas, ajustaram-se conjuntamente as propriedades das três secções (as duas extremidades e o centro), de forma a satisfazer o erro admissível em ambos os casos de carregamento, obtendo-se o valor de 9,3 GPa para a zona central e de 5,8 GPa nas restantes partes.

A comparação de resultados para esses mesmos casos está expressa nas tabelas 10, 11, 12 e 13.

Tabela10: Comparação de valores para extensômetro da esquerda (apoio nas pontas)

Massa (kg)	Carga a Aplicar (N)	Deformação Esperada	Deformação MEF	Erro (%)
10	98,10	-7,43E-05	-7,77E-05	4,53
20	196,20	-1,51E-04	-1,57E-04	4,16
30	294,30	-2,27E-04	-2,36E-04	3,64
40	392,40	-3,04E-04	-3,14E-04	3,39
50	490,50	-3,81E-04	-3,93E-04	3,24
60	588,60	-4,57E-04	-4,71E-04	3,14
70	686,70	-5,34E-04	-5,51E-04	3,23
80	784,80	-6,10E-04	-6,29E-04	3,17

Tabela 11: Comparação de valores para extensômetro da direita (apoio nas pontas)

Massa (kg)	Carga a Aplicar (N)	Deformação Esperada	Deformação MEF	Erro (%)
10	98,10	-7,54E-05	-7,87E-05	4,42
20	196,20	-1,52E-04	-1,57E-04	3,37
30	294,30	-2,29E-04	-2,36E-04	3,03
40	392,40	-3,06E-04	-3,15E-04	2,86
50	490,50	-3,83E-04	-3,93E-04	2,75
60	588,60	-4,59E-04	-4,72E-04	2,68
70	686,70	-5,37E-04	-5,50E-04	2,47
80	784,80	-6,14E-04	-6,29E-04	2,60

Tabela 12: Comparação de valores para extensômetro da esquerda (apoio no centro)

Massa (kg)	Carga a Aplicar (N)	Deformação Esperada	Deformação MEF	Erro (%)
10	98,1	-2,05E-05	-2,11E-05	3,14
20	196,2	-4,24E-05	-4,22E-05	0,44
30	294,3	-6,43E-05	-6,33E-05	1,58
40	392,4	-8,63E-05	-8,44E-05	2,14
50	490,5	-1,08E-04	-1,06E-04	2,47
60	588,6	-1,30E-04	-1,27E-04	2,69
70	686,7	-1,52E-04	-1,48E-04	2,85
80	784,8	-1,74E-04	-1,69E-04	2,97

Tabela 13: Comparação de valores para extensómetro da direita (apoio no centro)

Massa (kg)	Carga a Aplicar (N)	Deformação Esperada	Deformação MEF	Erro (%)
10	98,1	-2,14E-05	-2,11E-05	1,33
20	196,2	-4,34E-05	-4,23E-05	2,70
30	294,3	-6,55E-05	-6,34E-05	3,15
40	392,4	-8,75E-05	-8,45E-05	3,37
50	490,5	-1,09E-04	-1,06E-04	3,50
60	588,6	-1,32E-04	-1,27E-04	3,59
70	686,7	-1,54E-04	-1,48E-04	3,65
80	784,8	-1,76E-04	-1,69E-04	3,70

Observando cada uma das tabelas acima apresentadas, pode concluir-se que em nenhum dos carregamentos se ultrapassa o erro de 5%, sendo que se obteve um valor máximo de 4,53% na condição de apoio nas pontas, e de 3,70% na condição de apoio no centro.

Pretendendo validar os últimos resultados através da medição da flecha a meio vão, registaram-se os valores obtidos experimentalmente e pelo MEF, relativos ao deslocamento de um ponto do casco do *kayak*. A comparação destes valores é apresentada nas tabelas 14 e 15.

Tabela 14: Comparação da flecha obtida através dos métodos experimentais e do modelo de elementos finitos para apoios no centro

Carga (N)	Valor Real (mm)	Valor MEF (mm)	Erro (%)
148,82	0,25	0,23	8,00
244,96	0,42	0,39	7,14
341,19	0,61	0,56	8,19
440,47	0,79	0,73	7,59

Tabela 15: Comparação da flecha obtida através dos métodos experimentais e do modelo de elementos finitos para apoios nas pontas

Carga (N)	Valor Real (mm)	Valor MEF (mm)	Erro (%)
148,82	3,05	2,83	7,21
244,96	4,98	4,66	6,43
341,19	7,11	6,49	8,72
440,47	9,06	8,38	7,51

Pela análise das referidas tabelas, observa-se que o erro é inferior a 10%, considerando-se portanto que os valores são aceitáveis. Desta feita, os resultados obtidos sugerem que as propriedades conseguidas são razoáveis.

7.2. Análise de Deformações em Meio Aquático

No seguimento do procedimento que foi descrito para esta análise, apresenta-se aqui o cálculo do impulso para a primeira etapa referente à sobreposição das imagens de onde se retirou a linha de água, cujo volume resultante foi de $0,05527\text{m}^3$.

$$I = 998,207 \times 0,05527 \times 9,81 = 541,23 \text{ N}$$

Para que a embarcação esteja em equilíbrio, é necessário que o impulso iguale o peso do *kayak* com o indivíduo de 61 kg, que é de 686,7 N. Daqui se constata uma diferença significativa entre o peso e o impulso, pelo que se mostrou fulcral obter o valor de volume que viabilizasse a manutenção do equilíbrio. Para a sua consecução, procedeu-se ao seguinte cálculo:

$$686,7 = 998,207 \times V \times 9,81(=) V = \frac{686,7}{998,207 \times 9,81} = 0,07013\text{m}^3$$

O conseqüente ajuste da linha de água efectuado no *SolidWorks*[®] originou um volume de $0,07358\text{m}^3$ que contém um erro de 4% face ao estipulado no cálculo anteriormente apresentado.

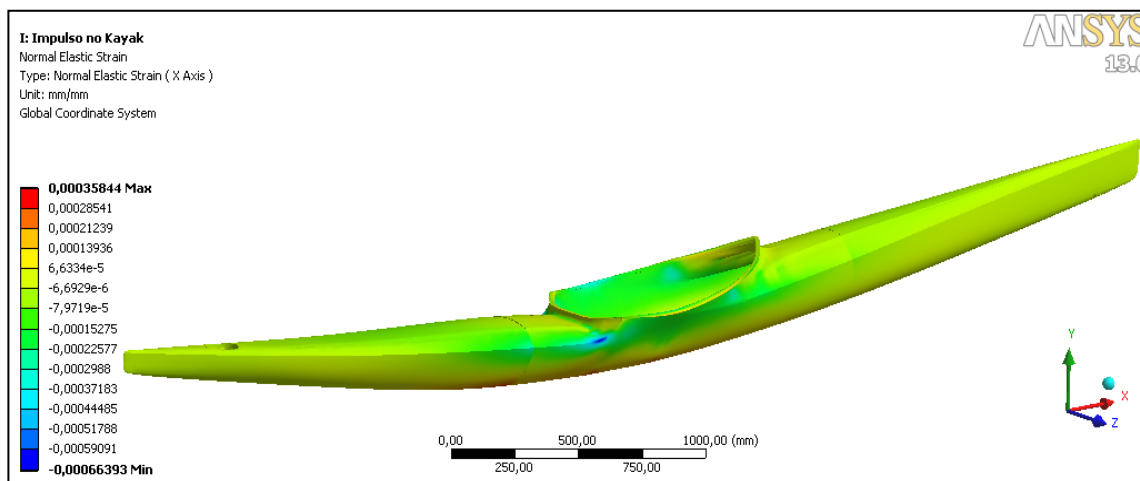
A aplicação do impulso no modelo de elementos finitos exige a divisão da zona imersa do *kayak* em várias partes, sendo que no presente estudo foram definidas 16. Na tabela 16 estão representados o volume e impulso correspondentes a cada uma das divisões, que se distribuem da parte de trás para a frente do *kayak*.

Tabela 16: Valor do impulso para cada parte, no caso de carregamento com um indivíduo de 61kg.

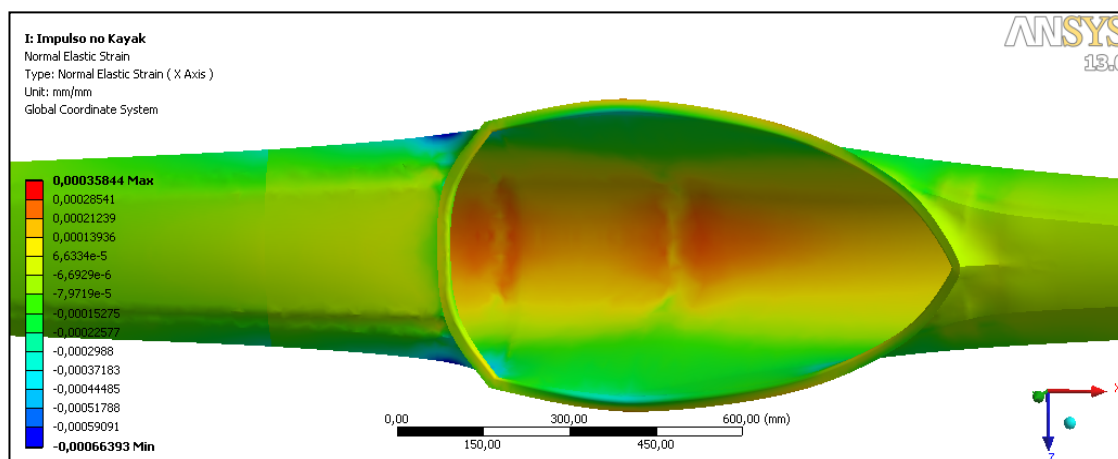
Parte	Volume (m ³)	Impulso (N)
1	0,00033	3,959
2	0,00144	16,078
3	0,00308	33,158
4	0,00466	49,319
5	0,00582	61,220
6	0,00663	69,561
7	0,00717	75,095
8	0,00741	77,513
9	0,00725	75,893
10	0,00674	70,604
11	0,00595	62,461
12	0,00467	49,171
13	0,00362	38,420
14	0,00222	23,976
15	0,00103	11,410
16	0,00022	2,655

Da análise da figura 47 que representa as deformações obtidas pelo MEF, relativamente à vista geral pôde apurar-se a ocorrência de flexão em torno do apoio simples, local onde está sentado o indivíduo. As deformações mais elevadas situam-se em torno da região do *cockpit*.

Uma observação mais detalhada da imagem de pormenor revela que as deformações positivas ocorrem junto dos carris do banco, o que é esperado, dado que a flexão existente, provoca um alongamento da estrutura. O vinco quase transversal disposto na parte de trás do *cockpit* origina elevada deformação de contracção negativa.



a)



b)

Figura 47: Deformações obtidas pelo MEF para um carregamento do impulso sobre a embarcação com um atleta de 61kg: a) Vista geral; b) Pormenor do *cockpit*.

Foram igualmente analisadas as deformações obtidas experimentalmente, aproveitando-se o facto de *kayak* estar colocado na água (ver figura 48).

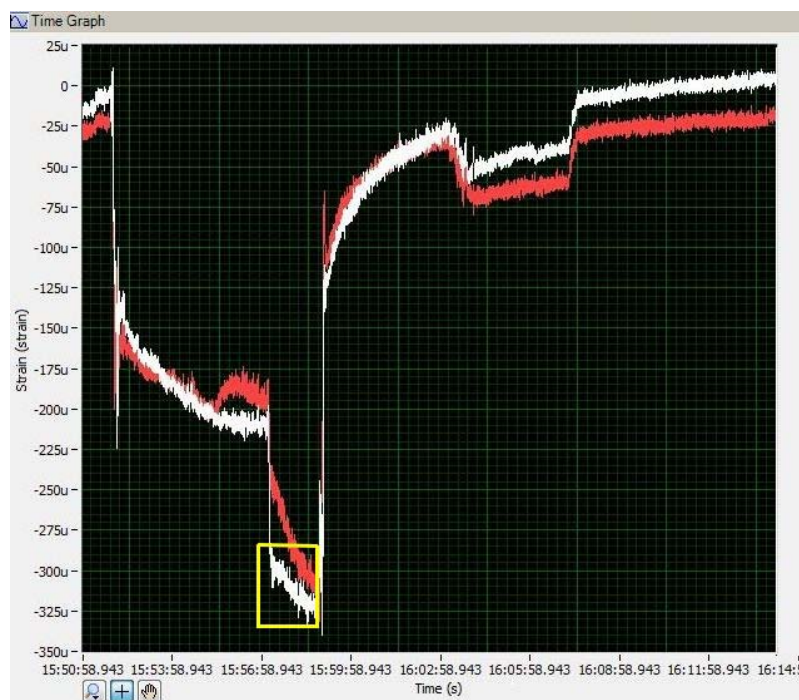


Figura 48: Registo experimental das deformações com o *kayak* na água

Na imagem acima apresentada, identifica-se a amarelo a região onde o indivíduo estava sentado e apoiado sobre uma vara, de modo a equilibrar-se. Tal situação assemelha-se àquela que foi anteriormente mencionada relativamente ao registo pelo MEF. Efectuando-se uma média de valores dentro da região sinalizada, obteve-se um valor médio da deformação apurado em cada um dos extensómetros.

A análise comparativa dos valores da deformação obtidos quer experimentalmente, quer pelo modelo de elementos finitos criado, permitiu concluir acerca da legitimidade deste último. Neste sentido, observe-se a tabela 17 para uma melhor compreensão da relação entre os valores alcançados.

Tabela 17: Comparação das deformações com o *kayak* na água obtidas pelo MEF e pelos resultados experimentais

Extensómetro	Ensaio Experimental	Valor MEF	Erro (%)
Esquerdo	-3,02E-04	-2,18E-04	27,71
Direito	-2,98E-04	-2,19E-04	26,45

Nesta tabela os valores de erro alcançados denunciam a possibilidade de as propriedades não estarem perfeitamente conseguidas, pois as percentagens de erro são bastante mais elevadas do que seria de esperar. Sendo assim, entendeu-se pertinente privilegiar a obtenção das propriedades a partir do ensaio com o *kayak* na água, pois pelo facto de toda a estrutura estar a ser solicitada nesta situação, a influência da variabilidade inerente às propriedades globais sentir-se-á de forma mais acentuada nos resultados. No entanto, considerando a validade das formas de obtenção das propriedades que foram primeiramente utilizadas, optou-se por incluir

no novo ajuste os resultados obtidos pelos extensômetros referentes ao carregamento com apoios no centro e nas pontas e também a flecha obtida para as duas localizações de apoios. Desta forma, as propriedades finais que se pretendem alcançar, serão o produto do ajuste global entre as três formas consideradas.

Assim, o novo módulo de Young resultante foi de 8,6 GPa para a zona central e 4 GPa para as pontas do *kayak*.

Nas tabelas 18, 19, 20 e 21 mostra-se a comparação entre resultados experimentais e os obtidos pelo MEF para as condições de apoios nas pontas e no centro da embarcação, usando desta vez os valores supracitados.

Tabela 18: Comparação de novos valores para extensômetro da direita (apoio nas pontas)

Massa (kg)	Carga a Aplicar (N)	Deformação Esperada	Deformação MEF	Erro (%)
10	98,10	-7,54E-05	-8,78E-05	16,53
20	196,20	-1,52E-04	-1,76E-04	15,36
30	294,30	-2,29E-04	-2,63E-04	14,98
40	392,40	-3,06E-04	-3,51E-04	14,78
50	490,50	-3,83E-04	-4,39E-04	14,67
60	588,60	-4,59E-04	-5,27E-04	14,59
70	686,70	-5,37E-04	-6,15E-04	14,54
80	784,80	-6,14E-04	-7,03E-04	14,50

Tabela 19: Comparação de novos valores para extensômetro da esquerda (apoio nas pontas)

Massa (kg)	Carga a Aplicar (N)	Deformação Esperada	Deformação MEF	Erro (%)
10	98,10	-7,43E-05	-8,77E-05	18,01
20	196,20	-1,51E-04	-1,75E-04	16,25
30	294,30	-2,27E-04	-2,63E-04	15,67
40	392,40	-3,04E-04	-3,51E-04	15,38
50	490,50	-3,81E-04	-4,38E-04	15,21
60	588,60	-4,57E-04	-5,26E-04	15,10
70	686,70	-5,34E-04	-6,14E-04	15,02
80	784,80	-6,10E-04	-7,01E-04	14,95

Tabela 20: Comparação de novos valores para extensómetro da direita (apoio no centro)

Massa (kg)	Carga a Aplicar (N)	Deformação Esperada	Deformação MEF	Erro (%)
10	98,1	-2,14E-05	-2,31E-05	8,08
20	196,2	-4,34E-05	-4,63E-05	6,58
30	294,3	-6,55E-05	-6,94E-05	6,09
40	392,4	-8,75E-05	-9,26E-05	5,84
50	490,5	-1,09E-04	-1,16E-04	5,69
60	588,6	-1,32E-04	-1,39E-04	5,60
70	686,7	-1,54E-04	-1,62E-04	5,53
80	784,8	-1,76E-04	-1,85E-04	5,48

Tabela 21: Comparação de novos valores para extensómetro da esquerda (apoio no centro)

Massa (kg)	Carga a Aplicar (N)	Deformação Esperada	Deformação MEF	Erro (%)
10	98,1	-2,05E-05	-2,31E-05	12,99
20	196,2	-4,24E-05	-4,62E-05	9,07
30	294,3	-6,43E-05	-6,94E-05	7,82
40	392,4	-8,63E-05	-9,25E-05	7,21
50	490,5	-1,08E-04	-1,16E-04	6,85
60	588,6	-1,30E-04	-1,39E-04	6,60
70	686,7	-1,52E-04	-1,62E-04	6,43
80	784,8	-1,74E-04	-1,85E-04	6,30

Relativamente aos resultados anteriormente apresentados para as situações de carregamento com apoios no centro e nas pontas da embarcação, verifica-se um aumento das deformações obtidas. Da mesma forma, registou-se um acréscimo no valor da flecha a meio vão, para estes mesmos casos de carregamento (ver tabelas 22 e 23). Estes novos resultados justificam-se pela diminuição do módulo de Young.

Tabela 22: Comparação da nova flecha obtida através dos métodos experimentais e do modelo de elementos finitos para apoios no centro

Carga (N)	Valor Real (mm)	Valor MEF (mm)	Erro (%)
148,82	0,25	0,29	-16,00
244,96	0,42	0,48	-14,29
341,19	0,61	0,67	-9,84
440,47	0,79	0,87	-10,13

Tabela 23: Comparação da nova flecha obtida através dos métodos experimentais e do modelo de elementos finitos para apoios nas pontas

Carga (N)	Valor Real (mm)	Valor MEF (mm)	Erro (%)
148,82	3,05	3,45	-13,11
244,96	4,98	5,67	-13,86
341,19	7,11	7,89	-10,97
440,47	9,06	10,19	-12,47

Comparando-se de seguida os valores obtidos pelos métodos experimentais com os que se registaram pelo MEF na situação do *kayak* na água, sinaliza-se o decréscimo acentuado do erro entre ambos os valores, aproximando-se actualmente de valores mais aceitáveis (ver tabela 24).

Tabela 24: Nova comparação das deformações com o *kayak* na água obtidas pelo MEF e pelos resultados experimentais

Extensómetro	Ensaio Experimental	Valor MEF	Erro (%)
Esquerdo	-3,02E-04	-2,56E-04	15,14
Direito	-2,98E-04	-2,56E-04	13,99

Posto isto, reporta-se agora a análise do *kayak* considerando que dentro dele está sentado um atleta de 85 kg, massa máxima suportada pela embarcação segundo dados do fabricante. Uma vez aumentada a massa do atleta, o peso total do conjunto passou a ser de 922,14 N, pelo que se torna necessário calcular o volume capaz de gerar um impulso que equilibre este peso.

$$I = P = 922,14$$

$$922,14 = 998,207 \times V \times 9,81(=) V = \frac{922,14}{998,207 \times 9,81} = 0,09417\text{m}^3$$

Determinou-se então o impulso correspondente a este carregamento para cada uma das partes consideradas, o qual é exposto na tabela 25. De notar que numa fase posterior, este impulso foi aplicado no modelo de elementos finitos criado.

Tabela 25: Valor do impulso para cada parte, no caso de carregamento com um atleta de 85kg.

Parte	Volume (m ³)	Impulso (N)
1	0,0007402	7,2482343
2	0,0025185	24,6619898
3	0,0046904	45,9306161
4	0,0066216	64,8417768
5	0,0080488	78,8167537
6	0,0090634	88,7524194
7	0,0097418	95,3954692
8	0,0100342	98,2591236
9	0,0098186	96,1481842
10	0,0091415	89,5177889
11	0,0081213	79,5274008
12	0,0064687	63,3443550
13	0,0051718	50,6440803
14	0,0033734	33,0332610
15	0,0017412	17,0509940
16	0,0004806	4,7065841

Com o aumento do impulso, verifica-se inevitavelmente um aumento das deformações obtidas pelo MEF. Na tabela 26 compara-se para um mesmo ponto, as deformações obtidas para os casos de carregamento com um indivíduo de 61kg e de 85kg respectivamente, verificando-se um aumento de cerca de 25% do primeiro para o segundo caso.

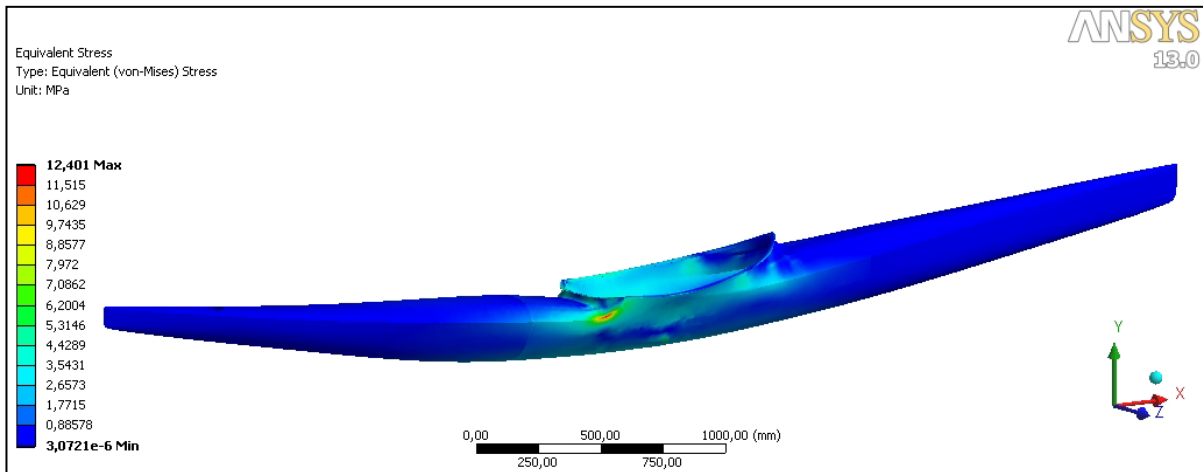
Tabela 26: Comparação da deformação entre o carregamento com um indivíduo de 61kg e de 85kg

Deformação para 61 kg	Deformação para 85 kg	Aumento (%)
-2,56E-04	-3,44E-04	25,37

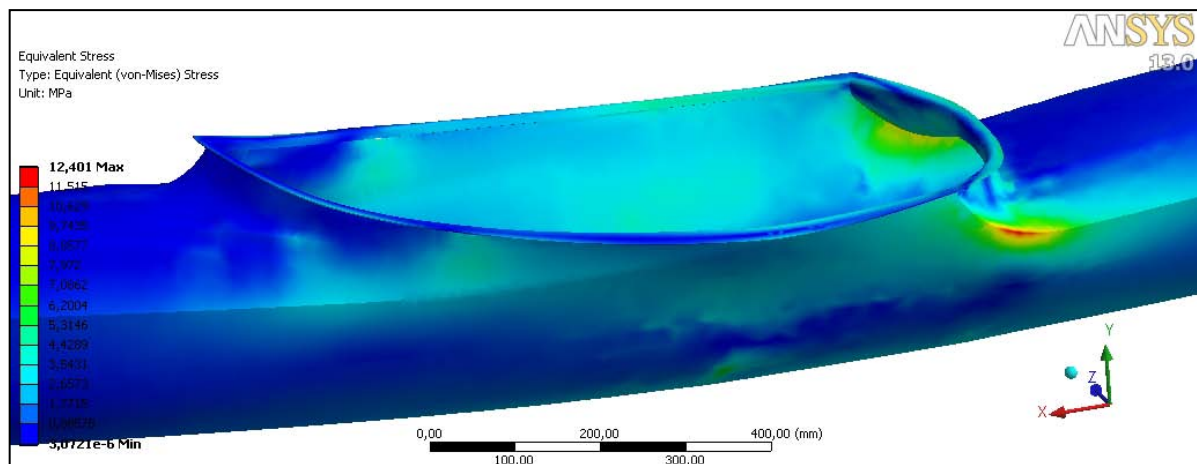
Este aumento justifica que se proceda à análise de tensões na estrutura do *kayak* para um carregamento com um indivíduo de 85kg. Os resultados desta análise são apresentados no ponto seguinte.

7.3. Distribuição de Tensões na Estrutura do *Kayak*

A análise da distribuição de tensões na estrutura implicou a sua simulação no *software ANSYS®*. Na figura 49 visualizamos a distribuição das tensões equivalente de von Mises ao longo da estrutura do *kayak*.



a)



b)

Figura 49: Resultado da tensão de von Mises para o caso de carregamento com indivíduo de 85kg:
a) Vista geral; b) Pormenor do *cockpit*

Da observação da figura 49 a) percebe-se claramente que as tensões mais elevadas se situam em torno do *cockpit*, apresentando um valor máximo de 12,401MPa. Nas regiões mais afastadas do centro registam-se valores entre 1 e 2 MPa. Na figura 49 b) visualizamos mais ao pormenor a zona do *cockpit*, percebendo que na área de tensões máximas se localizam num vinco que introduz um factor de concentração de tensões.

Na figura 50 pode ver-se que o fabricante já possui informação sobre este facto pois são visíveis alguns reforços nestas zonas.



Figura 50: Reforço na parte interior do kayak, na zona do vinco no cockpit

7.4. Análise de Imperfeições através da Técnica de *Shear*

A última etapa constituinte deste estudo consistiu na utilização da técnica de *Shear* para análise de imperfeições da embarcação na zona mais crítica, o *cockpit*. A este respeito mostram-se nas figuras 50, 51 e 52 os resultados apurados através desta técnica.

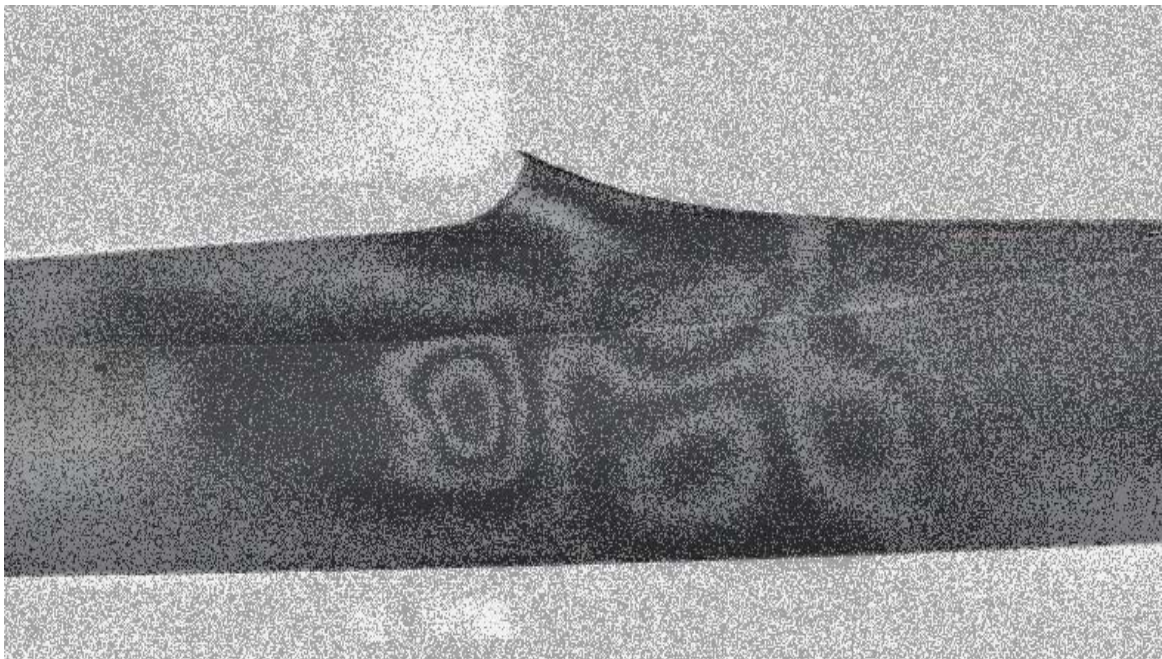


Figura 51: Mapa de fase correspondente ao campo de deslocamento para a solicitação térmica, vista de frente do *kayak*

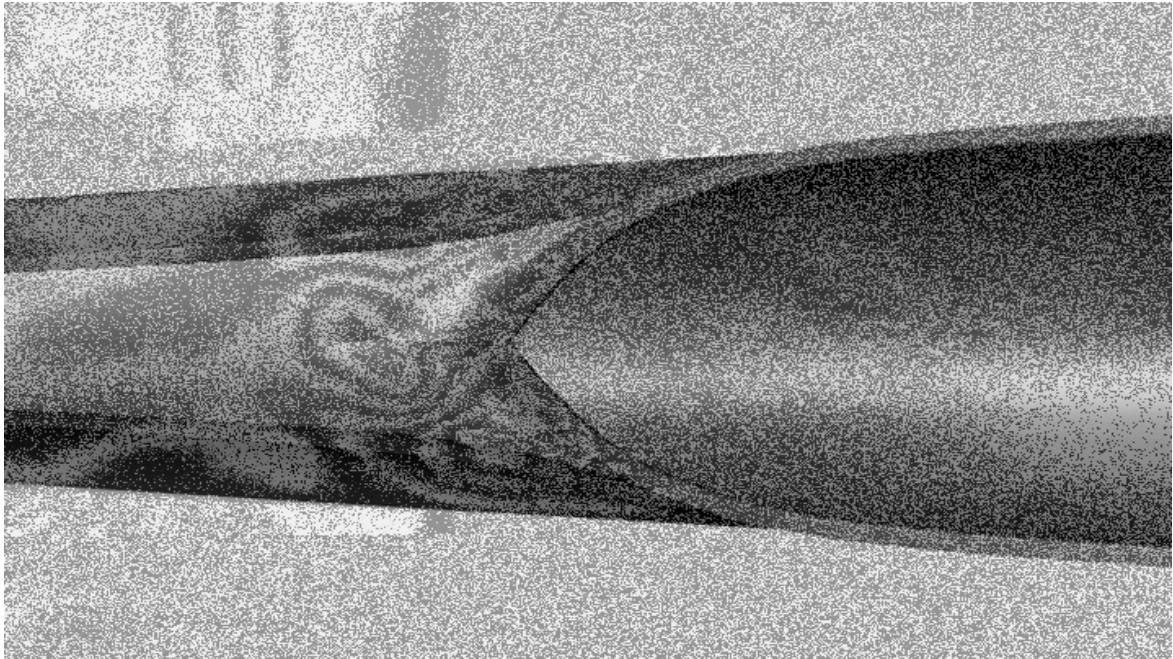


Figura 52: Mapa de fase correspondente ao campo de deslocamento para a solicitação térmica, vista de topo do *kayak*

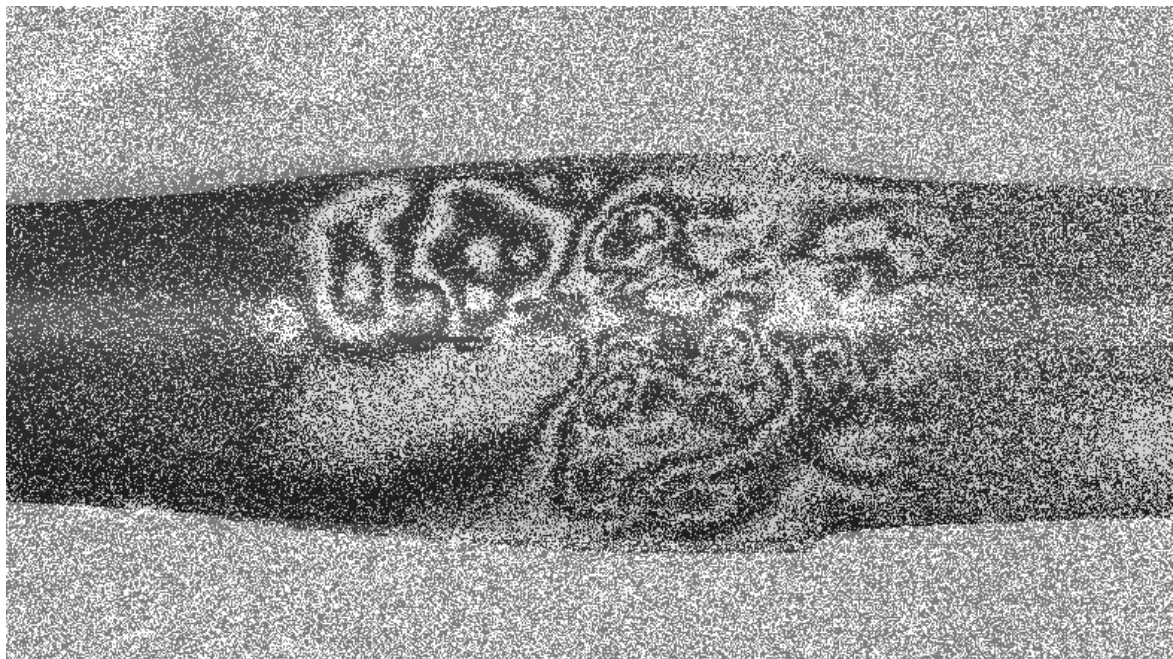


Figura 53: Mapa de fase correspondente ao campo de deslocamento para a solicitação térmica, vista de baixo do *kayak*

Observando as imagens anteriores, verifica-se a existência de algumas regiões que apresentam uma forma circular. Dado que a técnica é apenas sensível aos gradientes de deformação segundo a direcção do *shear* estas geometrias indicam a formação de uma deformada, concava ou convexa, com deslocamentos perpendiculares à superfície. Este comportamento

era esperado pois trata-se de um a estrutura tipo casca com elevada rigidez e reduzida espessura. O aparecimento de padrões irregulares e com maior número de formas pode indicar a existência de bolsas de ar, deslocamentos ou delaminação internas, pois nesses locais ocorre um maior gradiente de deslocamento, provocado por dilatação térmica. Assim, pode atestar-se que podem existir defeitos na estrutura do *kayak*, ou ainda que a inclusão de alguns acessórios para fixação do banco e finca-pés, que têm uma influência directa nos resultados, já que aumentarão a deformação da mesma ou alteram o comportamento estrutural esperado.

Na figura 52 em particular, observa-se uma maior concentração de defeitos, pensamos que tal decorra, não só da construção da embarcação, mas também da sua utilização, já que é no fundo do *kayak* que se situa o banco do *kayakista*, que com a utilização pode provocar delaminagens no compósito. Deve ainda referir-se que nesta região se encontram embebidos no compósito alguns acessórios de fixação do banco que decerto contribuem para um comportamento estrutural mais complexo.

8. Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos ao longo desta dissertação ilustram determinados aspectos que importa aqui discutir, num cruzamento com algumas alusões da literatura no âmbito da análise estrutural.

Começando pelos resultados relativos à obtenção das deformações por recurso à extensometria, a comparação entre os valores advindos dos extensómetros esquerdo e direitos, nos vários casos de carregamento efectuados ao longo da investigação, permite constatar a proximidade entre estes. Daqui se depreende que a intenção de colocar os instrumentos em locais simétricos de modo a nos certificarmos da correcta realização das medições, foi conseguida com sucesso. Desta forma é também possível detectar a simetria do carregamento durante uma carga estática. Esta funcionalidade poderá ser muito importante no caso de estudos dinâmicos a realizar posteriormente.

No que se refere ao estudo das propriedades da embarcação, este mostrou-se bastante proveitoso e imprescindível para o desenvolvimento dos objectivos deliberados. De facto, a avaliação da rigidez de um material é importante quer durante o processo de montagem/fabricação, quer durante a sua vida útil, para que haja controlo da estabilidade dimensional do componente. Assim, dos resultados relativos à determinação do módulo de elasticidade, critério preponderante como medida da rigidez do material compósito, parece pertinente referir que os primeiros valores obtidos, 9,3 GPa para a zona central e 5,8 GPa para as pontas, revelaram-se incorrectos, pois a comparação dos dados resultantes do ensaio *in situ*, com os determinados pelo MEF, apresentaram um erro que ronda os 27%. Uma análise reflexiva deste resultado, permite levantar a hipótese de que a origem do erro esteja relacionada com a condução dos ensaios realizados para a obtenção das propriedades. Apesar do procedimento de comparação entre os resultados experimentais e a calibração no modelo de elementos finitos ser correntemente utilizada em diversas investigações neste domínio (e.g. Petrone e Quaresimin, 2002) o facto de estarmos a carregar o *kayak* num ponto e esse carregamento ser descarregado em dois apoios, poderá não conseguir traduzir o comportamento da estrutura na sua totalidade. Baseando-nos nesta premissa, procurámos obter resultados mais fidedignos relativos às propriedades finais, utilizando os valores do carregamento na água, conjuntamente com os restantes ensaios anteriormente realizados, considerando que desta forma se colmataria a falha anteriormente referida. Como o novo ensaio se estenderia a toda a estrutura, entendeu-se que a influência das propriedades da mesma seria agora mais notada, o que acabou por se revelar de facto. Desta feita, os valores finais registados foram de 8,6 GPa para a zona central e 4,0 GPa para as pontas do *kayak*. Reconhece-se que ainda foram registados erros mais elevados do que o desejável entre os valores experimentais e os obtidos pelo MEF (na ordem dos 15%), contudo, considera-se estar um pouco mais próximos das propriedades reais. Além disso, é de salientar que os resultados expostos poderão ter sofrido interferência quer das limitações inerentes a qualquer

processo experimental (erros humanos e de equipamentos), quer do facto de o modelo de elementos finitos ser apenas um método numérico aproximado.

Para além destes aspectos, é importante mencionar que os valores das deformações registadas aquando da colocação do *kayak* na água, foram superiores àqueles que se obtiveram a partir do MEF para o mesmo caso de carregamento, o que de certa forma evidencia que a rigidez real pode ser ligeiramente inferior à calculada. Assim, pensa-se que os defeitos visíveis nas figuras 50, 51 e 52, adquiridas através da técnica de *Shear*, se relacionem com este aumento do valor da deformação apresentado no ensaio experimental, uma vez que teoricamente se considera que as imperfeições na estrutura provocam uma diminuição da sua rigidez. Deve ainda referir-se a possibilidade dos acessórios e posições colocados na estrutura do *kayak* interferirem no seu comportamento estrutural e o seu efeito não ter sido considerado durante a construção do modelo numérico.

E porque para projectar qualquer componente, se deve considerar sempre o carregamento máximo a que este estará sujeito, torna-se relevante discorrer sobre os resultados da análise estrutural que considera a colocação de um atleta de 85 kg dentro do *kayak*. Face ao anterior carregamento com um indivíduo de 61kg, regista-se um significativo aumento das deformações, em cerca de 25%, o que denuncia de forma mais clara, a necessidade de se efectuar uma análise de tensões para esta condição de carregamento. Decorre da referida análise que existe uma região atrás do *cockpit* que merece mais cuidado, na medida em que ali se concentram os valores de tensões mais elevados. A existência de um vinco nesse mesmo lugar introduz um factor de concentração de tensões que, com a fadiga pode provocar o colapso na estrutura. Por este motivo, entendemos que seria pertinente a colocação de um reforço neste ponto, e ao que pudemos apurar junto da própria embarcação, já foi um aspecto ponderado pelo fabricante, pois este introduziu camadas adicionais de fibra de carbono para aumento da resistência do local.

Finalmente, mostra-se relevante constatar que o facto de os valores máximos de tensão se situarem em torno do *cockpit* (ver figura 49) configura uma situação previsível, na medida em que existe uma descontinuidade na estrutura tipo casca, e é nesta zona que o *kayakista* se senta. Compreende-se portanto, que o fabricante tenha colocado nesta região camadas adicionais de fibra de carbono na parte interior, criando assim uma estrutura *sandwich*, de forma a aumentar a resistência de todo o *cockpit*.

Estas considerações relativas aos dados que emergem do nosso estudo, permitem-nos afirmar que o modelo criado em elementos finitos é capaz de traduzir correctamente os esforços a que a embarcação está sujeita, corroborando o que tem sido feito pelo fabricante no sentido de melhorar a resistência do *kayak*. Desta forma, as conclusões da investigação sugerem a pertinência dos estudos centrados nesta linha de pesquisa, de modo a propiciar a optimização das embarcações utilizadas na modalidade de canoagem.

9. Limitações da Investigação e Hipóteses para Futuros Estudos

A investigação que foi desenvolvida procurou construir conhecimento acerca do comportamento estrutural dos *kayaks* de competição, tendo como horizonte a sua viabilidade e utilidade no progresso dos atletas ao nível do seu desempenho. Porém, é possível encontrar algumas limitações que exigem precaução na interpretação dos resultados.

Um dos primeiros aspectos a ter em conta relaciona-se com o facto de se desconhecerem, à partida, as propriedades reais dos materiais utilizados no fabrico do *kayak* em estudo. A caracterização de um material exige idealmente a realização de diversos ensaios mecânicos com recurso a provetes do material em causa, no entanto a sua aquisição em tempo útil mostrou-se inviável. Assim, tornou-se mais difícil a obtenção das propriedades mecânicas da estrutura, sobretudo porque se trata de um material compósito cujas propriedades dependem, quer da natureza dos materiais usados, quer do grau de ligação entre eles através da *interface*.

Outra das limitações deste estudo prende-se com o facto de, para facilitar a análise estrutural da embarcação, tratarmos o laminado como um material isotrópico, quando na realidade ele é ortotrópico. Nos materiais ortotrópicos não é uma tarefa trivial determinar as verdadeiras relações tensão-deformação, pois estes caracterizam-se por possuir propriedades únicas e independentes nas três direcções mutuamente ortogonais. Por este motivo, optou-se por atribuir as mesmas propriedades nas três direcções consideradas, ainda que se reconheça o carácter pouco correcto desta decisão.

Em termos metodológicos, importa dizer-se que teria sido enriquecedor para esta investigação o uso de uma roseta em vez da utilização unitária dos extensómetros, na medida em que tal possibilitaria a obtenção da matriz de tensões. É também de referir que os dados recolhidos experimentalmente, dependeram da capacidade do indivíduo inexperiente se equilibrar no *kayak*, o que pode ter sido igualmente um entrave à obtenção de dados fidedignos. Todavia, o impacto desta limitação tentou ser contornado através do uso de uma vara que facilitasse a manutenção da sua estabilidade.

Pretende-se ainda sugerir algumas indicações para pesquisa futuras. Por exemplo, a necessidade de desenvolver novas investigações no sentido de estudar diferentes materiais compósitos que pudessem ser empregues na construção de *kayak*. Para além disso, salienta-se a importância da inclusão de estratégias metodológicas que envolvessem a colocação de extensómetros em vários pontos da embarcação, para uma melhor compreensão do comportamento estrutural da mesma, bem como para a confirmação da viabilidade das propriedades conseguidas. Estes sensores poderiam ser do tipo sensores de Bragg gravados em fibra de vidro e incluídos no interior da estrutura durante o seu fabrico. Desta forma ficariam incluídos na casca que constitui o *kayak* e fariam parte integrante da sua estrutura.

Por fim, mostra-se importante mencionar a relevância do estudo de fenómenos dinâmicos durante uma prova de canoagem, que englobasse a comparação de estudos experimentais com

o método dos elementos finitos. Esta estratégia estará já, por ventura delineada, dado que durante a realização deste trabalho o autor teve a oportunidade de acompanhar alguns dos estudos realizados no âmbito da tese de Doutoramento da nossa campeã e actual atleta olímpica em K4, Beatriz Gomes.

10. Bibliografia

- Ackland, T., Ong, K., Kerr, D. & Ridge, B. (2003). Morphological characteristics of Olympic Sprint Canoe and kayak paddlers. *J Sci Med Sport*, 6, 285-294.
- Ashby, M. & Johnson, K. (2002). *Materials and Design: the art and science of material selection in product design*. Oxford: Elsevier.
- Barreto Jr, E. (2000). *Conhecendo o extensômetro eléctrico de resistência*. Manual Técnico.
- Bishop, D., (2000). Physiological predictors of flat-water kayak performance in women. *European Journal of Applied Physiology*, 7, 82-91.
- Brown, G. (2002). Sea Kayaking. In *Canoe and kayak handbook*. British Canoe Union.
- Carneiro, M. & Castro, F. (2009). Cinemática da canoagem: revisão. *Revista Brasileira Ciência e Movimento*, 17, 114-122.
- Fischer, T. (2009). *Material Science for Engineering Students*. California: Elsevier.
- Gobbo, L., Papst, R., Carvalho, F., Sousa, C., Cuatrin, S. & Cyrino, E. (2002). Perfil Antropométrico da Seleção Brasileira de Canoagem. *Revista Brasileira de Ciência e Movimento*, 10, 7-12.
- Gomes, J., Monteiro J. & Vaz, M. (2000). NDI of interfaces in coating systems using digital interferometry. *Mechanics of Materials*, 32, 837-843.
- Hung, Y. (1997). Digital shearography versus TV-holography for non-destructive evaluation. *Optics and Lasers in Engineering*, 26, 421-436.
- International Canoe Federation (2009). *Canoe Sprint, Competition Rules*.
- Jackson, P. (1994). Performance Prediction for Olympic Kayaks. *Journal of Sports Sciences*, 13, 239-245.
- Kreis, T. (2005). *Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods*. Weinheim: Wiley.
- Kronhardt, J. (2002). *Canoagem adaptada*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Educação Física) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Lotti, R., Machado, A., Mazzeiro, E. & Landre Jr, J. (2006). Aplicabilidade Científica do Método de Elementos Finitos. *R Dental Press Ortop Ortop Facial*, 11, 35-43.
- M.A.R Kayakers Lda. <http://www.mar-kayaks.pt/> (acedido em Março de 2011).
- Malato, E. (2009). *A Canoagem como Manifestação Esportiva de Identidade Cultural do Estado do Pará*. Dissertação de Mestrado da Universidade Castelo Branco. Rio de Janeiro.
- Merkle, L. (1993). *O que é canoagem: Apostila Técnica*. Curitiba.

- Michael, J., Smith, R. & Rooney, K. (2009). Determinants of Kayak Paddling Performance. *Sports Biomechanics*, 8, 167-179.
- Michael, J., Rooney, K. & Smith, R. (2008). The metabolic demands of Kayaking: a review. *Journal of Sports Science and Medicine*, 7, 1-7.
- Monteiro, F. (2004). *Análise de Falhas em Eixo de Laminadora*. Dissertação de Mestrado da Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá. S. Paulo.
- Monteiro, M. (2009). *As Organizações e o Desenvolvimento do Desporto: a Canoagem no Marco de Canaveses*. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Desporto da Universidade do Porto.
- Paradis, F. & Gendron, G. (2007). Structural modeling and testing of a concrete canoe. *Ocean Engineering*, 34, 206-217.
- Planchard, D. & Planchard, M. (2010). *Commands Guide Tutorial for SolidWorks 2010*. SDC Publications.
- Petrone N., Isotti, A. & Guerrini, G. (2006). Biomechanical analysis of olympic kayak athletes during indoor paddling. In *Proceedings of 6th international conference on the engineering of sport*. Munich Technical University, Springer, 1, 413–418.
- Petrone, N., & Quaresimin, M. (2002). Structural optimisation of an olympic kayak. In Found, M. (2002). *Experimental Techniques and Design in Composit Materials 4*. Swets & Zeitlinger Publishers. Netherlands.
- Robinson, M., Holt, L. & Pelham, T. (2002). The technology of sprint racing canoe and kayak hull and paddle designs. *International Sports Journal*, 6, 68–85.
- Silva., S., Sabino, M., Fernandes, E., Correlo, V., Boesel, L. & Reis, R. (2005). Cork: properties, capabilities and applications. *International Material Review*, 50, 345-365.
- Sousa, J. (2008). *Estudo da Evolução do VO₂max, Limiar Anaeróbio e Composição Corporal no decurso de uma época em kayakistas de elite*. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Desporto da UP. Porto.
- Sumner, D., Sprigings, E., Bugg, J. & Heseltine, J. (2003). Fluid forces on kayak paddle blades of different design. *Sports Engeneering*, 6, 11-20.
- Winning, D. (2002). A short history of paddlesport in Britain. In *Canoe and kayak handbook*. British Canoe Union.

Sítios electrónicos consultados

- Associação Brasil Hong Kong - <http://www.abhkonline.com/> (acedido em Maio de 2011).
- British Canoe Union - <http://www.bcu.org.uk/> (acedido em Maio de 2011).
- Canadian Olympic Committee - <http://www.olympic.ca/> (acedido em Abril de 2011).
- CanoeKayak BC - <http://www.canoekayakbc.ca/> (acedido em Maio de 2011).
- Duem - <http://www.duemstuff.com/> (acedido em Maio de 2011).
- DuPont (2011) - http://www2.dupont.com/DuPont_Home/en_US/index.html (acedido em Abril de 2011).

Esporte Mundial - <http://globoesporte.globo.com/> (acedido em Maio de 2011).

Hickok Sports - <http://www.hickoksports.com/> (acedido em Maio de 2011).

International Canoe Federation - <http://www.canoeicf.com/icf/> (acedido em Abril e Maio de 2011).

KAYAK - <http://www.kayak.im/> (acedido em Maio de 2011).

Life, your world in pictures - <http://www.life.com/> (acedido em Maio de 2011).

Jogos Olímpicos de Londres 2012 - <http://www.london2012.com/> (acedido em Maio de 2011).

Página oficial da atleta Beatriz Gomes - <http://bbgomes.blogs.sapo.pt/> (acedido em Maio de 2011).

Vajda Group - <http://www.vajdagroup.com/> (acedido em Maio de 2011).