

PROJECTO E CONCEPÇÃO DE UM DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA
MEDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS ESFORÇOS APLICADOS NO FINCA-PÉS
DE UM CAIAQUE DE PISTA

Investigação, desenho e desenvolvimento

Miguel Sousa

Tese de Mestrado
Porto, 2012

Resumo

Após o enquadramento da canoagem, como modalidade Olímpica, verificou-se um aumento significativo de estudos e pesquisas acerca da biomecânica da modalidade, o que contribuiu para uma diminuição dos tempos na competição. Contudo poucos foram os que se focaram nas forças desenvolvidas e aplicadas ao caiaque através do finca-pés, criando assim oportunidade de desenvolvimento de dispositivos para a medição das mesmas.

Assim, o objectivo primordial é desenvolver um sistema experimental capaz de quantificar as forças geradas em cada um dos lados do finca-pés (esquerdo e direito). Este, deverá não só ser passível de se utilizar em caiaque ergómetro como também num caiaque de pista, permitindo avaliar as forças aplicadas durante o ciclo de pagaiada, tanto em compressão como em tracção. A sua concepção baseou-se num modelo de finca-pés já existente, tornando-o compatível com os caiaques de competição mais comercializados, e permitindo que no futuro se possa utilizar na água, bastando para isso apenas possuir um caiaque e embarcar o sistema de medição. Este sistema experimental foi testado em caiaque ergómetro por 7 (sete) sujeitos com níveis distintos: seis homens (um atleta olímpico medalhado e cinco de nível nacional) e uma mulher (de nível de selecção Portuguesa) que, entre outros, realizaram um plano definido por 60s a uma frequência de 75 pagaiadas por minuto, seguido de uma intensa mudança de ritmo e força (*Sprint*). Após análise dos dados obtidos em cada um dos diferentes sujeitos, conseguimos identificar algumas das suas características, tais como: esforço assimétrico dos membros inferiores; utilização de forma heterogénea da fita do finca-pés; diferença de forças máximas aplicadas entre atletas (Ex.: para um atleta olímpico as forças medidas (Min; Max): Pé Esquerdo (- 444; 1087) N e Pé Direito (- 476; 1068) N); etc. Os resultados não só são bastante promissores como também são motivantes e congruentes com estudos anteriores, nomeadamente Begon et al. 2008 e Sturm 2010 e 2012.

Finalmente, consegue-se afirmar, com segurança, que foram alcançados os objectivos propostos com a concepção deste dispositivo de medição de forças. Este permite caracterizar os esforços desenvolvidos no finca-pés por cada membro inferior, com ou sem a fita de suporte, possibilitando aos treinadores e atletas uma visão, para muitos desconhecida, das forças transmitidas e das suas assimetrias. No final, este conhecimento permitirá aos atletas melhorar o seu desempenho desportivo bem como

facilitar a gestão desportiva, com base nos principais princípios mecânicos inerentes ao movimento dos atletas desde desporto Olímpico.

Abstract

After being classified as an Olympic Sport, the increase in the number of studies and research of the biomechanics in Canoeing has contributed to the continuous reduction of time in the competition. However, few have focused on the amount of force applied on kayak through the foot rest, creating therefore the opportunity to develop devices that could measure it.

Thus, the primary goal is to develop an experimental system that is capable of quantifying the force generated on each side of the foot rest (left and right). The device should be capable of not only be used in an ergometer kayak, but also be compatible with a regular flat-water kayak, with the purpose of evaluating the amount of force applied during each stroke cycle, both in compression and tension. Its design was based on an already existing foot rest, making it compatible with the most sold competition kayaks, allowing its future usage afloat. Therefore, one should only need to own a kayak and install the measurement system. This experimental system was tested in an ergometer kayak by 7 (seven) different individuals: six males (one medalled Olympic athlete and five national level ones) and one female (top-national level) that, among others, performed during a 60-second period at a frequency of 75 strokes per minute, followed by an intense change on strength and speed (Sprint). After the analysis of the acquired data for all the different individuals, we were able to identify some of their characteristics such as: lower limbs asymmetric effort; heterogeneous use of the footstrap on the foot rest; difference between maximum force applied by different athletes (i.e. for the Olympic athlete the maximum measured force (Min, Max): left foot (- 444, 1087) N and right foot (- 476; 1068) N); among others. The results were not only very encouraging but also highly motivating and congruent with previous studies, namely Begon et al. 2008 and Sturm 2010 and 2012.

In the final analysis, we are able to assure, with a high level of trust, that the primary goal of this work was effectively achieved with the creation of this force-measuring device. This will allow athletes and coaches to have an overall perspective, to many even uncrowned, of the asymmetrical efforts developed on the foot rest, with or without the footstrap, for each leg independently. In the end, this knowledge will allow athletes to improve performance, as well as facilitate sport management, based on the primary mechanical principals inherent to the movement of the athletes in this Olympic sport.

Índice

Índice de Figuras	6
Índice de Tabelas	8
Índice de Gráficos.....	9
Agradecimentos	10
1 - Introdução.....	12
2 - A Canoagem.....	14
2.1 - A História da canoagem	14
2.2 - Caracterização da Modalidade	18
2.2.1 - Pagaia	21
2.2.2 - Técnica de pagaiada	22
2.2.3 - Frequência e ritmo da pagaiada.....	25
2.2.4 - Caiaque.....	27
2.2.5 - Caiaque Ergómetro.....	29
3 - Objectivos de Estudo.....	31
4 - Projecto e Desenvolvimento de Finca-pés Instrumentado	33
4.1 – Estado de Arte	33
4.2 - Concepção do Dispositivo Experimental	37
4.3 - Construção do Dispositivo Experimental.....	41
4.4 - Desenvolvimento da Célula de Carga	42
4.4.1 - Extensometria Eléctrica.....	42
4.4.2 - Células de Carga Unitárias	45
4.5 - Posição de Medição/Testes	51
4.6 - Armazenamento, Processamento e Transmissão	55
4.7 - Procedimento Experimental	57
5 - Teste em Caiaque Ergómetro	58
5.1 - Sincronização e Aquisição de Dados	59
6 - Discussão de Resultados	62
7 - Conclusão	65
8 - Trabalhos Futuros.....	66
9 - Referências Bibliográficas:	67
10 - Anexos.....	71
Anexo A – Alguns gráficos e ensaios dos Sujeitos não mencionados.	71

Índice de Figuras

Figura 1– Canoas indígenas (adaptado ICF, 2012)	14
Figura 2 – Caiaque construído pelo escocês John MacGregor.....	15
Figura 3 – 1ª Prova de caiaque em 1867, noticiada nos jornais da época.	15
Figura 4 – As embarcações mistas tipo “Rob Roy” 4s (adaptado de ICF, 2012).....	16
Figura 5 – Embarcação K2 usada pelos atletas lusos, Fernando Pimenta e Emanuel Silva, na medalha de prata nos Jogos Olímpicos de Londres 2012, na distância de 1000m.	17
Figura 6 – a) diagrama cinético do sistema; b)Diagrama cinético do conjunto canoista+pagaia e c) diagrama cinético do caiaque.....	19
Figura 7 – Algumas das pás típicas usadas em competição nos dias de hoje	21
Figura 8 – Posição do canoista no caiaque de pista.....	22
Figura 9 – Técnica de pagaiada. Divisão da fase aquática em três posições: ataque, pagaia na vertical e saída (adaptado de Plagenhoef, 1979).....	23
Figura 10 – Ritmo de pagaiada, duração relativa (%) das fases da pagaiada (adaptado de Cox 1992, citado em Gomes 2008)	25
Figura 11 – Vista geral de um finca-pés fixo ao casco do caiaque.	26
Figura 12 – Tempos de vitória nos JO para competições de 500m e 1000m Homens, com as modificações mais significativas representadas graficamente (adaptado de Jacob et al. 2009).	27
Figura 13 – Arranque de uma competição do campeonato nacional de fundo K1. (por José de Oliveira e Sousa, 2011).....	28
Figura 14 – Caiaque ergómetro (Dansprint, Denmark).....	29
Figura 15 – Caiaque ergómetro com carrinho corredeço (adaptado de Begon et al., 2008)	33
Figura 16 – Curvas das forças médias, medidas pelos sensores, da população de atletas de elite (linhas negras) com 95% de confiança, acima e abaixo (linhas finas). No topo curvas para o finca-pés esquerdo e direito; no meio, as forças aplicadas no banco e em baixo forças da pagaiada. As figuras do atleta e as linhas interrompidas indicam as três fases características (entrada, vertical e saída) para a pagaiada direita e esquerda (adaptado de Begon et al., 2008).	34
Figura 17 – Fita (footstrap) utilizada por alguns atletas de canoagem.....	36
Figura 18 – Evolução do desenho CAD e localização das células de carga unitárias....	38
Figura 19 – Evolução do desenho de conjunto na fixação das células de carga unitária.	39
Figura 20 – Evolução do desenho na fixação das células de carga.	39
Figura 21 – Pormenor de ligação e transmissão da célula de carga do pé direito, a uma das células de carga unitárias.....	40
Figura 22 – Desenhos CAD finais com células de carga incorporadas.....	40
Figura 23 – Desenhos de conjunto 3D finais.....	41
Figura 24 – Concepção do finca-pés em alumínio e as células de carga esquerda e direita.	41
Figura 25 – Ponte Wheatstone (adaptado de Portela, 1996)	43
Figura 26 – Ponte de Wheatstone – Ponte Completa (Adaptado de Portela, 1996).....	44
Figura 27 – Tipo de extensómetro usado na célula de carga.....	46
Figura 28 – Linha de eixo criada na célula de carga unitária e desenho 3D.	46
Figura 29 – Deformação na direcção dos extensómetros (YY) da célula de carga unitária	47

Figura 30 – Valores de tensão da célula de carga unitária	47
Figura 31 – Valores de Deformação e Tensão resultantes da força aplicada á célula de carga unitária	48
Figura 32 – Pormenor do posicionamento das células de carga unitárias.....	49
Figura 33 – Pormenor dos condutores eléctricos das células de carga unitárias.....	49
Figura 34 – Ponte completa de Wheatstone usada neste estudo.	50
Figura 35 – Pormenor das ligações para a criação da ponte completa de Wheatstone. .	50
Figura 36 – a) Ilustração de ligação à ponte completa (adaptado de Vishay Instruction Manual), b) Ligação das células de carga esquerda e direita ao indicador de deformações.....	51
Figura 37 – Verificação da sensibilidade com uma força de aproximadamente 220N. .	52
Figura 38 – Posição da verificação da independência de resultados.....	53
Figura 39 – Condicionador de Sinal, Spider 8 - HBM.	55
Figura 40 – Ligação a 4 fios a uma tomada de 15 pinos.	56
Figura 41 – Tomada de 15 pinos.	56
Figura 42 – Finca Pés Instrumentado: Célula de carga para o Pé Esquerdo e Pé Direito.	57
Figura 43 – Célula de carga montada no caiaque ergómetro.	58

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Forças aplicadas no finca-pés (medidas efectuadas anteriormente a este estudo).	35
Tabela 2 – Sensibilidade do sistema para um fim de escala de $\approx 220\text{N}$	52
Tabela 3 – Independência da posição da força, média, erros e desvios padrão.....	54
Tabela 4 – Erro relativo do sistema e da célula de carga comercial.....	57

Índice de Gráficos

Gráfico 1 – Coeficiente de correlação para célula de carga esquerda.	52
Gráfico 2 – Coeficiente de correlação para célula de carga direita.	53
Gráfico 3 – Representação da força aplicada por atleta júnior de selecção portuguesa. Sujeito B	59
Gráfico 4 – Representação de dois ciclos de pagaiadas a 75 rpm do Sujeito B	60
Gráfico 5 – Representação de dois ciclos de pagaiadas em <i>sprint</i> , Sujeito B.	60
Gráfico 6 – Representação da força aplicada por atleta medalhado olímpico, Sujeito F	61
Gráfico 7 – Representação de dois ciclos de pagaiadas aproximadamente a 75 rpm do Sujeito F.....	61
Gráfico 8 – Representação de dois ciclos de pagaiadas em <i>sprint</i> , Sujeito F.....	62
Gráfico 9 – Representação de dois ciclos de pagaiadas a 75 rpm do Sujeito A.....	63
Gráfico 10 – Representação de dois ciclos de pagaiadas em <i>sprint</i> , Sujeito A.....	63
Gráfico 11 – Detalhe de dois ciclos de pagaiadas a 75 rpm. Sujeito C.....	64
Gráfico 12 – Representação da força aplicada em <i>sprint</i> por atleta de nível nacional a uma frequência de 75 pagaiadas por minuto, Sujeito D.....	71
Gráfico 13 – Representação da força aplicada por atleta de nível nacional, com potência de 75W seguido de <i>sprint</i> , Sujeito E	71
Gráfico 14 – Representação da força aplicada por atleta medalhado olímpico, com potência de 75W seguido de <i>sprint</i> , Sujeito F.....	72
Gráfico 15– Representação da força aplicada por atleta feminina de nível de selecção portuguesa, com potência de 75W seguido de <i>sprint</i> , Sujeito G.....	72

Agradecimentos

Na realização de trabalhos que se estendem por longos períodos de tempo, é natural contactar com numerosas pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para o desenvolvimento do mesmo. Este trabalho não fugiu a esta regra e por esse facto quero deixar aqui expresso o meu agradecimento a todos que ajudaram a construir esta dissertação, mesmo não sendo uma tarefa fácil. O maior perigo que se coloca para o agradecimento selectivo não é decidir quem incluir, mas decidir quem não mencionar.

Em primeiro lugar, agradecer ao meu orientador Eng.º Fernando Ferreira, por toda a confiança em mim depositada, encorajamento, apoio e orientação prestada ao longo destes quase dois anos de trabalho. Não queria ainda deixar passar em claro a preciosa ajuda e perseverança do Eng.º Jorge Justo.

Ao Cristiano Oliveira, pela paciência e pela disponibilidade, fundamental para o resultado final.

À Falual, particularmente ao meu amigo Marco Carvalho, pela cedência de recursos e principalmente pela sua amizade.

À brilhante atleta e pessoa, Beatriz Gomes, pelos dados bibliográficos facultados, pelas linhas orientadoras e pelo entusiasmo demonstrado durante o decorrer do trabalho.

Aos fantásticos e dedicados atletas de canoagem, que despenderam e dedicaram um pouco do seu valioso tempo aos testes realizados.

À Federação Portuguesa de Canoagem, principalmente o presidente Dr. Mário Santos.

Aos meus amigos de estudo e da canoagem, que de uma forma ou de outra, contribuíram com sua amizade e com sugestões técnicas e efectivas para a realização deste trabalho.

Às pessoas que têm um lugar especial no meu coração, por terem sido o contínuo apoio em todos estes anos, ensinando-me, principalmente, a importância da

construção e coerência dos meus próprios valores: ao meu pai, à minha irmã, aos meus avós maternos e à minha mãe mesmo já não estando presente.

Finalmente, mas não menos importante, à Diana, que me acompanhou e incentivou nesta viagem, que soube compreender, as fases pelas quais eu passei durante a realização deste trabalho, sempre tentou entender as minhas dificuldades e as minhas ausências, procurando aproximar-se de mim através da própria dissertação. Agradeço-lhe, carinhosamente, por tudo isto.

1 - Introdução

Desde a sua existência, o homem sempre teve a necessidade de dominar a água, até por que $\frac{3}{4}$ da superfície terrestre são ocupados por ela, tornando o acto de remar uma actividade por conveniência (Lemos et al. 2008). Os primeiros caiaques são provavelmente originários da Gronelândia, usados pelos esquimós para caçar, pescar e transportar (www.olympic.org, 2012).

A canoagem usa a força do homem para mover o barco através da água e com o decorrer dos anos passou a ser um desporto muito competitivo.

Existem diferentes tipos de canoagem: o recreativo, caiaque pólo, maratonas, fundo, caiaque surf, caiaque mar e as duas disciplinas Olímpicas na vertente de Slalom e Pista (águas lisas) com as embarcações canoa e caiaque respectivamente. Nesta tese, apenas será focado o caiaque de pista, em que os atletas competem nos Jogos Olímpicos em 200m, 500m e 1000m, onde para vencer é cada vez mais determinante o detalhe, dado que as vitórias são discutidas até ao milésimo de segundo.

No caiaque de pista, o atleta está sentado com os membros inferiores semi-fletidos por baixo do “deck “ e usa uma pagaia dupla para fazer movimentar o caiaque através da água. A canoa, pelo contrário é um barco aberto, em que o atleta apoiado no joelho, usa apenas uma pagaia simples para fazer propulsionar o barco.

Da pouca literatura disponível, podemos verificar o interesse ao longo dos anos em desenvolver a modalidade, com estudos teóricos e práticos, desenvolvimento de metodologias de treino, alterações da técnica, e claro está, a procura de novas linhas e materiais dos equipamentos (caiaques, canoas, pagaias simples e duplas, bancos, finca-pés, entre outros).

A forma como as forças são aplicadas nas diferentes fases da pagaiada é um factor crucial para a optimização do desempenho. Sistemas de medição para quantificar as forças aplicadas no caiaque têm sido utilizados por: Aitken and Neal, 1992; Sperlich and Baker, 2002; Sturm et al., 2010 e Gomes et al., 2011.

Evidências recolhidas pelos treinadores envolvidos nas pesquisas, sugerem várias teorias sobre o melhor perfil do atleta, sincronização da pagaiada e a força aplicada no finca-pés. Deverá ser extremamente útil para os atletas, treinadores e investigadores medir estas forças em tempo real e de preferência na água, com um sistema de sensores como o apresentado por Sturm, 2010.

A análise durante uma competição pode ser usada, não só para perceber o comportamento do atleta no que diz respeito ao seu desempenho e estratégia, mas também para planejar outras competições (Sperlich and Baker, 2002).

Sturn, 2010, não conseguiu identificar nenhum estudo anterior que se focasse nas forças aplicadas na pagaia e finca-pés em simultâneo, embora Jacob et al. 2009, Petrone et al., 1998 o tenham sugerido.

2 - A Canoagem

2.1 - A História da canoagem

Desde os tempos mais remotos que os Homens têm utilizado distintas formas de embarcações para navegar nos rios, lagos e mares. O testemunho mais antigo remonta a mais de seis mil anos, representada num túmulo de um rei Sumério. Para além deste, em muitas regiões do planeta encontram-se vestígios de canoas utilizadas A.C..

No período pré-histórico ou mesmo na época dos esquimós, a necessidade de sobrevivência foi o único motivo que existiu para iniciar esta prática náutica. Porém, mesmo sem a utilização de nenhuma metodologia/técnica específica, os conhecimentos e a aprendizagem iam passando de geração em geração, aperfeiçoando a prática, o que levou ao surgimento da canoagem.



Figura 1– Canoas indígenas (adaptado ICF, 2012)

Para a prática da canoagem, o objecto utilizado pelo homem é a canoa criada pelos indígenas (fig.1) ou o caiaque criado pelos esquimós. Este é o meio de locomoção aquático mais antigo de que se tem memória, desde o tempo pré-histórico, quando troncos de árvores se transformavam em embarcações, que eram extremamente úteis ao encurtar distâncias nas travessias. Com o passar dos anos e a evolução das ferramentas e técnicas de construção, os índios norte americanos, face à necessidade de deslocações rápidas, inerentes às suas actividades, como a pesca, a caça e a fuga aos predadores, desenvolveram com materiais mais leves barcos bastante sofisticados para a época. Os materiais utilizados resumiam-se a armações de madeira ou cana, unidos com tendão,

cobertos com pele de animais (como a de focas) e impermeabilizado com gordura de baleias (Kronhardt, 2002).



Figura 2 – Caiaque construído pelo escocês John MacGregor.

No século XIX, o que é considerado o pai da canoagem, o escocês John MacGregor, construiu a primeira embarcação competitiva, chamada de "Rob Roy" (fig. 2). Esta foi construída baseada em lembranças da viagem ao continente americano, quando descobriu a modalidade. Esse barco assumiu-se como um marco para este desporto, dando origem, em 1866, à fundação da primeira associação de canoagem na cidade de Londres – o *Royal Canoe Club*. A partir dessa data, a modalidade começou a expandir-se por todo o mundo (fig.4), surgindo também as primeiras competições de canoagem de que se tem relato (Kronhardt, 2002 e www.olympic.org 2012) (fig.3).

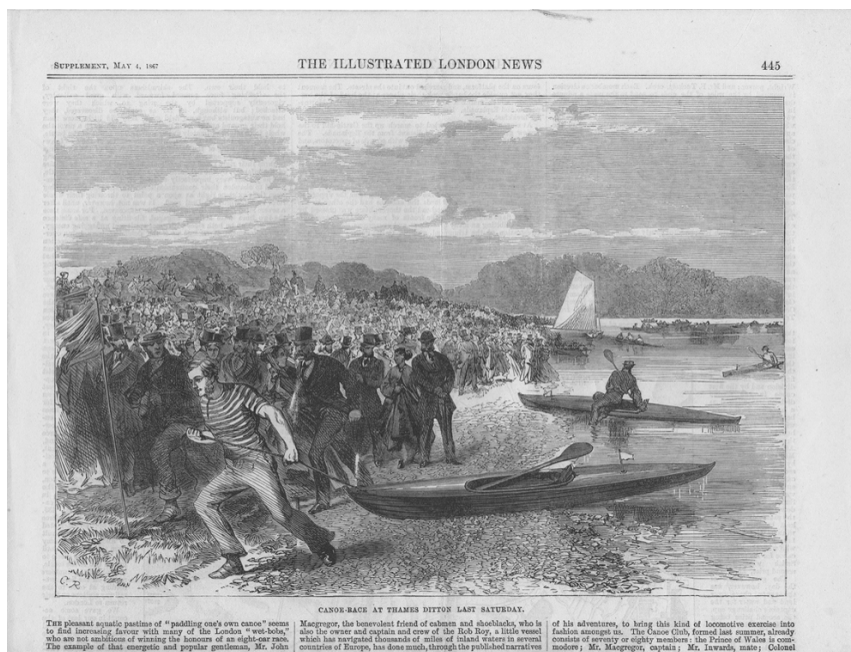


Figura 3 – 1ª Prova de caiaque em 1867, noticiada nos jornais da época.

A primeira demonstração da canoagem como desporto nos Jogos Olímpicos (JO) data de 1924 e tornou-se, finalmente, uma modalidade olímpica, em Berlim em 1936. Desde então a Europa tem assumido uma forte posição mundial, ao vencer cerca de 90% das medalhas em campeonatos do Mundo. As mulheres, por sua vez, iniciaram a competição nos JO de Londres em 1948, apenas em caiaque.

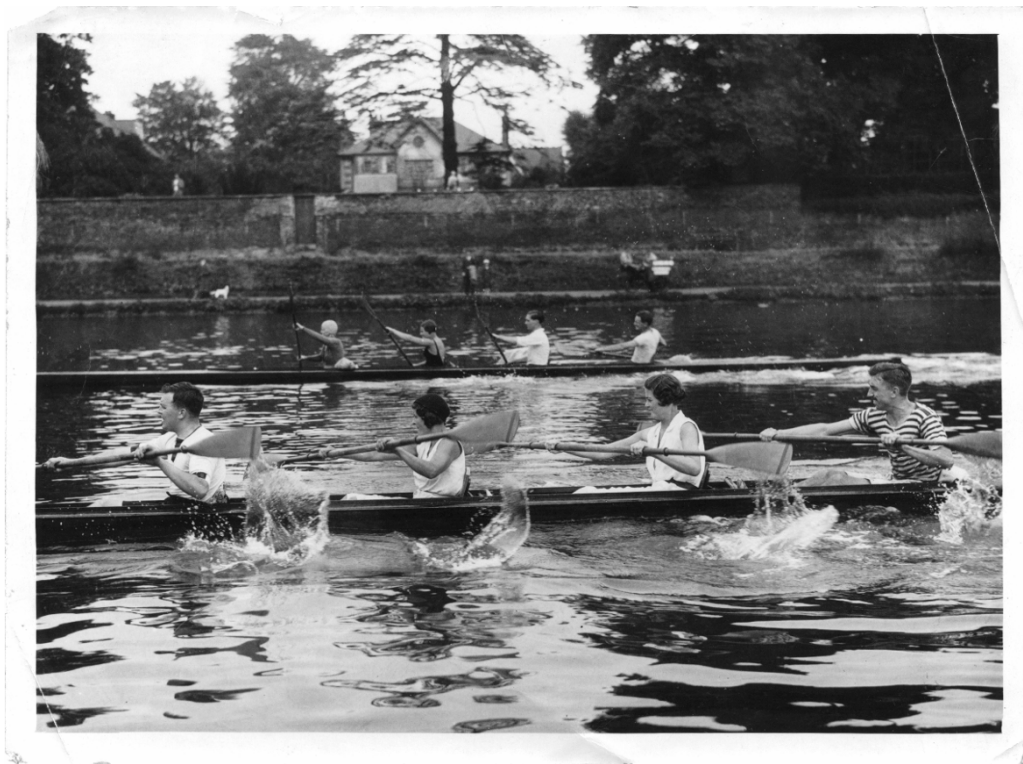


Figura 4 – As embarcações mistas tipo “Rob Roy” 4s (adaptado de ICF, 2012)

A tendência recente aponta no sentido de reduzir a distância de competição. No início, em Campeonatos do Mundo, as provas eram organizadas com distâncias de 1.000 e 10.000 metros para homens e 5.000 metros para mulheres. Hoje, competem nas distâncias de 200, 500 e 1.000 metros respetivamente. Nos JO realizam-se provas de 500 e 1.000 metros, contudo nos últimos JO em Londres 2012, as três distâncias de 500 metros Homens (K1, K2 e K4) deram lugar às provas de 200 metros e 100 metros.

Actualmente, a vontade de aprender canoagem não está associada a uma necessidade vital, mas sim ao gosto por desportos náuticos, pela busca de uma melhor qualidade de vida, pela prática competitiva e, até mesmo, pelas vivências ambientalistas.

O mundo actual impõe determinadas tendências e um estilo de vida frenético que obriga ao desenvolvimento de métodos sistematizados capazes de conduzir a uma melhoria significativa na aprendizagem da canoagem. O que se pretende é que, no menor tempo possível, se desenvolva a prática, com o máximo de segurança, e se atinjam os objectivos pretendidos. Não obstante, é notório o aumento do interesse da modalidade nos últimos anos, o qual tem permitido um crescimento e um desenvolvimento da mesma, principalmente em Portugal (fig.5).

Apesar dessa evolução e da popularização da canoagem, este desporto é ainda bastante complexo, no sentido em que são reduzidos os estudos que demonstrem a melhor avaliação e controlo de treino, ou mesmo a análise e avaliação da técnica na canoagem. Os ensinamentos práticos, as informações adquiridas em literaturas especializadas, os relatos que passam de geração em geração, contribuem para engrossar o referencial teórico para o ensino da modalidade, mas muito há que fazer...



Figura 5 – Embarcação K2 usada pelos atletas lusos, Fernando Pimenta e Emanuel Silva, na medalha de prata nos Jogos Olímpicos de Londres 2012, na distância de 1000m.

2.2 - Caracterização da Modalidade

Actualmente, as competições de velocidade da ICF- *International Canoe Federation* (Jogos Olímpicos, Campeonatos do Mundo, Taças do Mundo, Campeonatos da Europa, entre outros) para atletas masculinos e femininos compreendem os 200, 500 e 1.000 metros. Estas provas têm a duração média, em K1, de 40 segundos, 110 segundos e 210 segundos para competições de 200, 500 e 1.000 metros respectivamente. Sendo que nos jogos olímpicos, os 500 metros apenas são realizados pelas atletas femininas.

Para que o treino esteja correctamente direccionado para as diferentes distâncias é necessário caracterizar o tipo de esforço para que o treinador possa planear e criar no atleta as alterações fisiológicas e metabólicas necessárias capazes de melhorar o seu desempenho (Cox, 1992). As necessidades energéticas que o atleta deve cobrir variam em função da duração, ritmo e intensidade da pagaiada, dependendo estas por sua vez:

- Distância de competição (200, 500 ou 1.000 metros);
- Modalidade (caiaque K1, K2, K4, ou canoa C1, C2, C4);
- Categoria do canoísta (iniciado, experiente);
- Idade e sexo do canoísta;
- Técnica de pagaiada do canoísta (estilo).

Begon et al., 2008 define a mecânica da canoagem, composta por um movimento cíclico alternado entre a pagaiada do lado direito e esquerdo. A pagaiada começa quando a pá da pagaia contacta com a água e termina com o contacto da pá do lado oposto. Por essa razão, temos em cada remada a fase de propulsão (fase aquática) seguida da fase aérea, envolvendo movimentos assimétricos do lado direito e esquerdo dos membros. A propulsão envolve uma acção muscular de rotação do tronco com o membro inferior estendido realizando esforço sobre o finca-pés, enquanto o membro inferior oposto da fase aérea é flectido, terminando quando se inicia o contacto com a água do lado oposto. Para estas acções é necessário uma complexa coordenação dos músculos dos membros inferiores, superiores e tronco (Begon et al., 2008).

O equilíbrio cinético do sistema deve ser verificado, assim a aceleração sofrida pelo conjunto caiaque+canoísta+pagaia, depende da resultante de forças aplicadas a este. As forças exteriores aplicadas ao sistema são: a força de arrasto da pagaia na água

e as forças de resistência (aerodinâmicas e hidrodinâmicas). As forças aplicadas ao finca-pés e ao banco são consideradas por Begon et al., 2008, forças internas do sistema, não considerando óbvio, a sua relação com o desempenho.

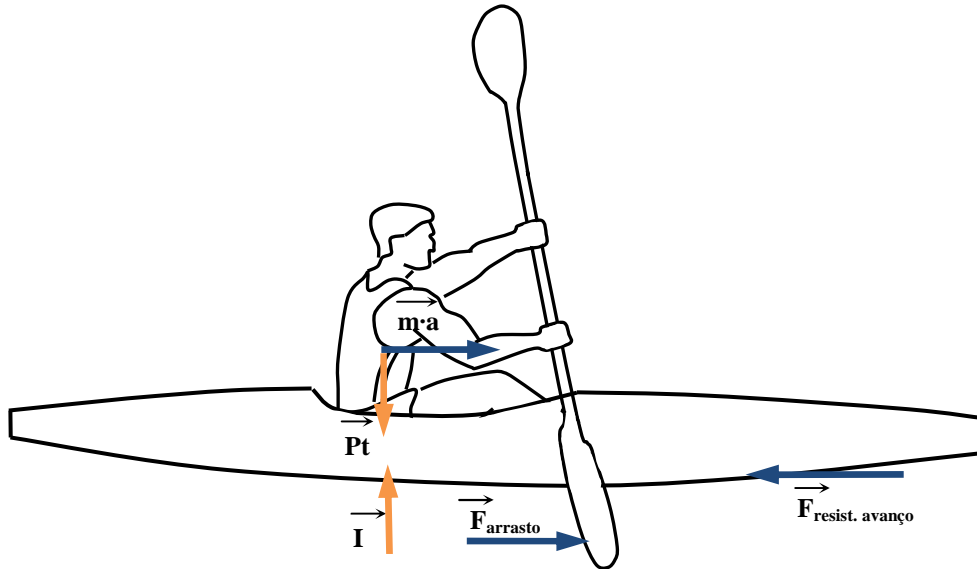


Figura 6 – a) diagrama cinético do sistema; b) Diagrama cinético do conjunto canoista+pagaia e c) diagrama cinético do caiaque

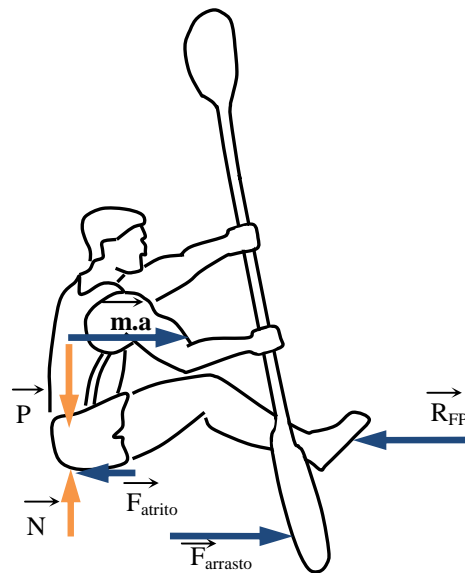


Figura 6 – b) Diagrama cinético do conjunto canoista + pagaia

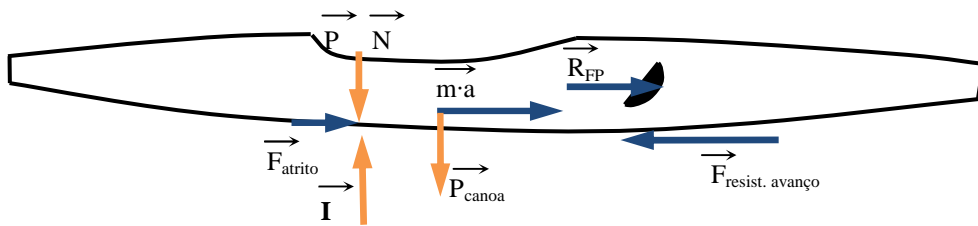


Figura 6 – c) Diagrama cinético do caiaque

Outra forma de analisar o problema em causa é separá-los em dois conjuntos: canoista + pagaia e caiaque. A análise isolada de cada um deles mostra que o finca-pés é a zona por onde o canoista ‘empurra’ a canoa no seu movimento para a frente. As figuras 6 a), b) e c) mostram os diagramas cinéticos de ambos os conjuntos referidos.

Torna-se assim evidente a correcta caracterização das forças exercidas no finca-pés pelo canoista.

2.2.1 - Pagaia

Antes de 1985 não havia dúvidas que a propulsão na canoagem era dominada pelas forças de arrasto. A pagaia plana era puxada para trás paralelamente ao barco, conduzindo o barco para a frente (Mann e Kearney, 1980). No ano de 1980 uma nova pagaia foi desenhada, a “*wing blade*”, de origem sueca e concebida com a forma de um perfil alar. Esta originou uma revolução na técnica da pagaiada em canoagem e uma melhoria do desempenho dos atletas, tornando a pagaia de pá plana (*laminare*) obsoleta. A razão deste desenvolvimento foi, presumidamente pelas forças de sustentação serem mais eficientes que as forças de arrasto. Face à remada directamente para trás com a pagaia plana, a pagaia com perfil alar (*wing blade*), baseada na forma de asa de um avião, era movimentada para trás relativamente ao barco, mas também lateralmente. As pagaias mais recentes, são literalmente a “*wing with a twist*”, isto é uma pagaia também com perfil alar, mas com uma torção aplicada, baseada na geometria de uma hélice, permitindo ao canoista uma pagaiada mais limpa e solta na saída, minimizando as forças e maximizando o desempenho, comparativamente aos outros modelos (Sanders, 1998).

Desde a entrada da pagaia “*Wing*” (fig. 7) nos meados dos anos 80, a disciplina de velocidade na canoagem, tem sofrido evolução na técnica. Da pagaia simples (“*flat*”) à pagaia usada nos dias de hoje com perfil alar, produzida por processos técnicos mais evoluídos, permitiu que a mudança de pagaia “*flat*” para “*wing*”, tenha sido o maior sucesso tecnológico para a diminuição dos tempos e responsável por mais 15% de eficiência quando comparando com a pagaia “*flat*” (Jackson, 1995; Sanders e Baker, 1998; Robinson et al., 2002 citado em Baker, Rath, Sanders and Kelly, 1999).



Figura 7 – Algumas das pás típicas usadas em competição nos dias de hoje
a) Bracsa; b) Epic e c) Jantex

A selecção da pagaia é muito subjectiva para o atleta, dada a enorme variedade de modelos, estilos e tamanhos existentes no mercado (Braça-Sport, Jantex, Epic,

Lettman, entre outras). Normalmente a escolha é feita com base no conforto e na experiência de cada um, o que não significa que seja, necessariamente, a escolha acertada para maximizar a força e minimizar a resistência do barco ou da pagaia (Ong *et al.*, 2005)

2.2.2 - Técnica de pagaiada

A canoagem, tal como a maioria dos desportos aquáticos não motorizados, envolve força muscular para gerar a produção de energia e fazer progredir um corpo num fluido de resistência média (Hay e Yanai, 1995). A força muscular desenvolvida pelo canoísta é aplicada no tubo da pagaia que a transmite às pagaias da mesma e, por sua vez, é transmitida à água. A eficácia desta série de transmissões é avaliada pela aceleração que é imprimida à embarcação e pelo dispêndio energético do atleta.

Na posição base do caiaque, o canoísta vai sentado no banco que se encontra logo acima do casco e com os membros inferiores unidos e flectidos. Os únicos pontos de contacto do atleta com o caiaque são o banco, o finca-pés (fig. 11) e os calcanhares em contacto com o casco do caiaque (fig. 8).

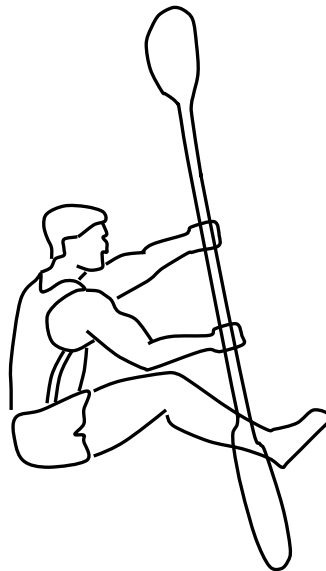


Figura 8 – Posição do canoísta no caiaque de pista

A técnica de pagaiada é um gesto cíclico que está dividido em dois ciclos, esquerdo e direito. Tal como para outros gestos desportivos, e de forma a facilitar a sua análise, cada ciclo do gesto da pagaiada é usualmente dividido em duas fases, a aquática e a aérea, sendo que a primeira é dividida em três posições. A primeira posição

corresponde ao momento em que pá entra em contacto com a água - ataque (posição 1 – fig. 9), a segunda posição corresponde ao momento em que a pagaia se encontra na vertical (posição 2 – fig. 9) e a terceira posição à saída da pá da água (posição 3 – fig. 9). A posição dois, segundo Toro (citado em Mann e Kearney, 1980), é o momento de maior eficiência da pagaiada, podendo ser mantida durante mais tempo se for aumentada a rotação do tronco. Enquanto a fase aquática vai desde a posição um à posição três, a fase aérea corresponde ao intervalo de tempo entre a saída da pá da água (posição 3) e o contacto da mesma pá novamente à frente (posição 1) (Hernández e Marcos, 1993).

Segundo Hernández e Marcos, 1993, a selecção adequada do equipamento é fundamental para permitir a transmissão de força à embarcação através do banco e finca-pés, evitar movimentos que perturbem o deslocamento da embarcação e gerar o máximo de impulso.

Estando o desempenho do atleta dependente da interacção entre um número alargado de variáveis, determinar qual o elemento da técnica que mais importa para o resultado final é uma tarefa difícil, sem ter em conta a relação entre os vários elementos (Hernández e Marcos, 1993).

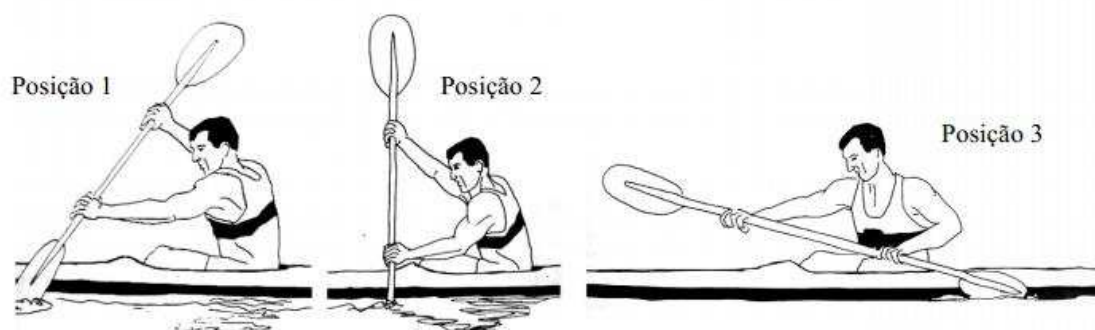


Figura 9 – Técnica de pagaiada. Divisão da fase aquática em três posições: ataque, pagaia na vertical e saída (adaptado de Plagenhoef, 1979)

Plagenhoef utilizou, em 1979, análise cinematográfica para estudar a técnica de pagaiada, tendo para isso analisado, durante oito anos, os melhores atletas de canoagem mundiais. O objectivo do estudo era perceber o que distingue, em termos técnicos, os melhores atletas dos restantes. Concluiu que as variáveis que mais contribuíram para que assim fosse eram a análise da frequência e ritmo de pagaiada, ângulos da pagaiada e posição corporal, o traçado do deslocamento dos centros articulares e o traçado do movimento da pagaia dentro de água (Plagenhoef, 1979).

Segundo Hernández e Marcos 1993, os parâmetros que determinam a qualidade da pagaiada são a máxima utilização da rotação do tronco, o trabalho dos membros inferiores, o movimento da cintura pélvica, a redução das oscilações laterais da embarcação e a máxima transmissão de força à embarcação e à pagaia, entre outros.

Já Baker et al., 1999, basearam a sua selecção de variáveis cinemáticas que melhor representam a pagaiada, com o objectivo de determinar se existem diferenças na técnica de pagaiada entre indivíduos do sexo masculino e feminino. Na opinião de dois treinadores de alta-competição e na literatura Sanders e Kendal, 1992 e Hay e Hanay, 1995, concluíram que a análise do ângulo de entrada e saída da pagaia (Sanders e Baker, 1998), analisado a 2D e 3D, e a rotação do tronco (Shephard, 1987) eram os melhores indicadores de desempenho.

Sanders e Kendal, 1992, num estudo realizado com o objectivo de descrever a técnica de pagaiada em competições de pista e comparar entre dois modelos de pagaia (*laminare* e *wing*), seleccionaram as seguintes variáveis cinemáticas: frequência de pagaiada; ritmo de pagaiada (duração da fase aquática e fase aérea); deslocamento por pagaiada e o traçado do deslocamento da pagaia, como aspectos fundamentais a analisar na técnica de pagaiada. Este é um dos poucos estudos da literatura que pretendeu investigar alterações no desempenho com a utilização de diferentes modelos de equipamentos de canoagem.

Na maioria dos estudos de análise da pagaiada em caiaque, a técnica de pagaiada tem sido dividida em fases, de forma a facilitar a sua análise. Assim, nos estudos cinemáticos de Plagenhoef, 1979, Mann e Kearney, 1980, Sanders e Kendal, 1992, Baker et al., 1999, Begon et al., 2003 e Begon e Colloud, 2007, o ciclo de pagaiada foi dividido em três posições, nomeadamente: ataque, pagaia na vertical e saída (fig. 9). No estudo de Begon et al., 2003 esta divisão, em três posições, foi utilizada para comparar a cinemática da pagaiada entre o caiaque-ergómetro e a água.

2.2.3 - Frequência e ritmo da pagaiada

Segundo Plagenhoef, 1979, a análise da frequência de pagaiada é um importante indicador biomecânico, no entanto, ao analisar vários canoístas de elite, observou que os que apresentam frequências de pagaiada mais elevados não eram necessariamente aqueles que movimentavam o caiaque com maior velocidade. Já Sanders e Kendal, 1992, ao estudarem canoístas de nível regional e internacional, encontraram uma correlação altamente significativa entre a frequência de pagaiada e a velocidade da embarcação.

Após a análise em competição da duração de cada ciclo de pagaiada verificaram que em média os atletas demoravam entre 0,8 a 1,2 segundos para cumprir um ciclo de pagaiada (Plagenhoef, 1979). Num estudo realizado com o objectivo de analisar a 3D a técnica de pagaiada de canoístas de pista, verificaram que a frequência de pagaiada média durante a prova de 500m era de 1,05 segundos por ciclo (Baker et al. 1999). Segundo Sanders e Kendal, 1992, a frequência de pagaiada está dependente da duração da fase aquática e da fase aérea, definindo-se o ritmo de pagaiada como a alteração da duração destas duas fases, mantendo-se o tempo total.

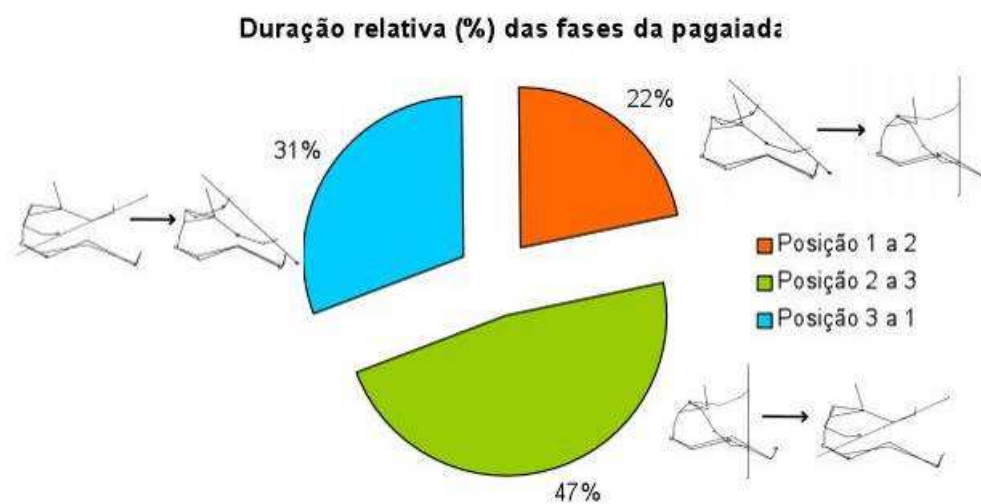


Figura 10 – Ritmo de pagaiada, duração relativa (%) das fases da pagaiada (adaptado de Cox 1992, citado em Gomes 2008)

A análise do ritmo de pagaiada apresenta-se como fundamental para a análise de variações técnicas (Plagenhoef, 1979), estando, segundo Cox, 1992, o ritmo independente da frequência de pagaiada, já que com o seu aumento, o atleta poderá manter a percentagem de tempo que leva a realizar cada uma das fases e sub-fases. No estudo de Plagenhoef, 1979, os melhores atletas realizavam a fase aérea em aproximadamente 31% do tempo total da pagaiada e a fase aquática durante os restantes 69% da duração total do ciclo de pagaiada (Fig. 10).



Figura 11 – Vista geral de um finca-pés fixo ao casco do caiaque.

2.2.4 - Caiaque

Na canoagem, as margens para ganhar são muito pequenas, decidem-se os vencedores por fracções de milésimos de segundo. No sentido de melhorar o desempenho dos atletas, aliado ao desenvolvimento da tecnologia, muitos avanços foram feitos ao desenho dos barcos, sempre baseados nos regulamentos do ICF (*International Canoe Federation*), permitindo uma redução do tempo total para completar os 200, 500 e 1000m em K1 (singular), K2 (duplo) ou K4 (quatro pessoas) ao longo dos anos. Jacob et al. 2009, representa graficamente (fig. 12) as principais alterações no desenvolvimento da geometria dos caiaques da história da canoagem até aos Jogos Olímpicos de 2008 em Pequim.

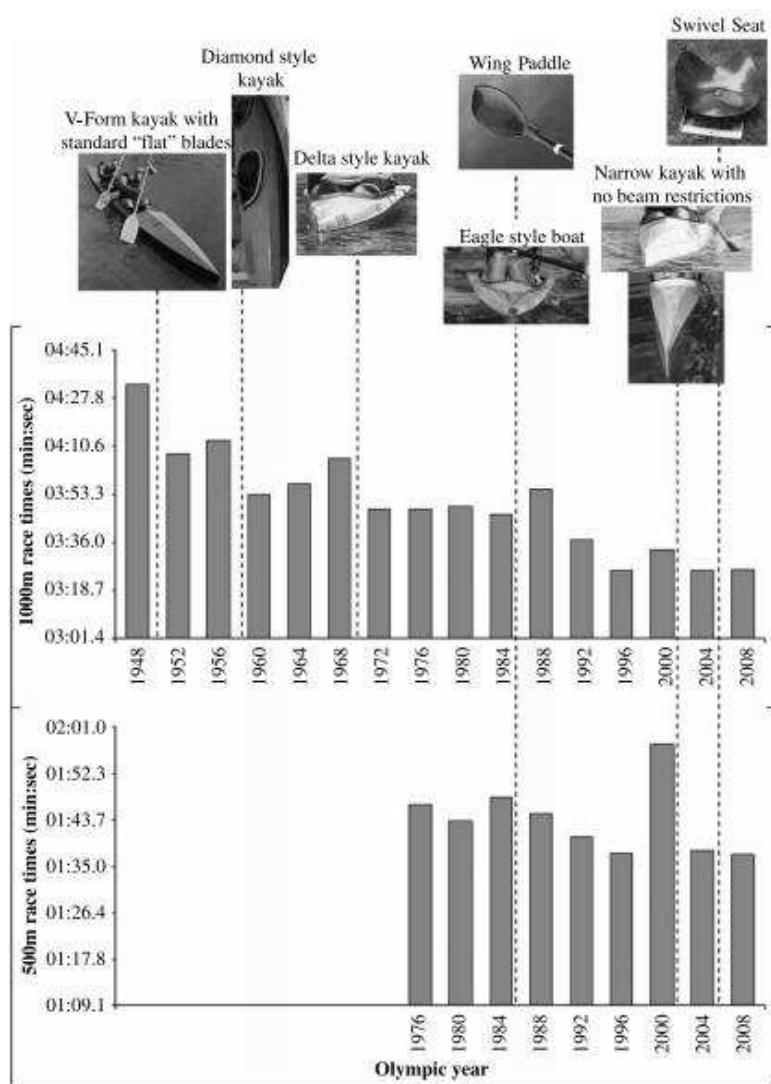


Figura 12 – Tempos de vitória nos JO para competições de 500m e 1000m Homens, com as modificações mais significativas representadas graficamente (adaptado de Jacob et al. 2009).

Após o ano 2000, verificou-se uma alteração dos regulamentos relativos à geometria do caiaque, que deixaram de ter uma largura mínima, privilegiando os cascos estreitos dos barcos correntes, permitindo, assim uma diminuição da superfície em contacto com a água e uma frontal mais estreita (fig.13). Contudo, há que referir que quanto mais estreita for, maior é a instabilidade do atleta (Begon et al. 2009). O *deck* foi actualizado, dadas as alterações das dimensões pelo ICF, permitindo uma geometria e projecções mais aero e hidrodinâmicas.

Na perspectiva de completar a distância de uma competição de canoagem no menor tempo possível, podemos, segundo Begon et al., 2009, melhorar dois mecanismos: aumentar a potência de propulsão, ou diminuir as forças de arrasto aplicadas a um caiaque durante o ciclo da pagaia. A potência de propulsão pode ser aumentada, melhorando a eficiência e/ou aumentando a potência de saída. Dadas as restrições impostas pelo ICF na geometria dos caiaques, as forças de arrasto só podem ser reduzidas minimizando a aceleração do caiaque e as rotações ao longo de todos os eixos e optimizando o rácio potência/peso do atleta.

Em relação à eficiência, surge então a questão levantada por Begon et al., 2009, a propósito de se perceber se as forças aplicadas dentro do caiaque e à pagaia são todas dirigidas à propulsão do caiaque. Para além disso, o mesmo autor, questionou qual o equilíbrio ideal das forças situadas dentro do caiaque, do banco e do finca-pés e se seria necessário mais extensão dos joelhos.

Tratam-se, indubitavelmente, de questões pertinentes, embora considere que o sistema agora estudado, desenvolvido e objectivo desta dissertação, juntamente com sistemas já analisados para a pagaia, caiaque e banco, poderão responder a estas questões e a outras a que, de forma empírica, se tem tentado obter resposta.



Figura 13 – Arranque de uma competição do campeonato nacional de fundo K1. (por José de Oliveira e Sousa, 2011)

2.2.5 - Caiaque Ergómetro

Sendo a prática da canoagem um desporto praticado no exterior, está, não raras vezes, sujeito a condições climáticas desfavoráveis, por isso, existe no mercado o caiaque-ergómetro, o qual possibilita o cumprimento do programa de treino, permite a treinadores e atletas obter dados fiáveis e comparáveis em ambientes controlados (sem influência de ventos e correntes aquáticas ou temperatura da água) e de controlo e avaliação de treino. Para além das vantagens enunciadas, permite obter dados tais como a força aplicada em cada lado da pagaia, a frequência de pagaiada (dificilmente obtidos com a mesma facilidade na água) e, por último, um equilíbrio que não carece de compensação devido aos efeitos da instabilidade que a água causa durante a prática da modalidade. Segundo Dal Monte e Mirri (citado em Gomes, 2008) o aparecimento do caiaque-ergómetro impulsionou de forma decisiva a avaliação fisiológica e biomecânica em canoístas.

Apesar de serem reconhecidos como importantes princípios de treino desportivo, os ergómetros específicos são actualmente desenhados de forma a activar os grupos musculares mais solicitados em determinado desporto e a simular, a nível fisiológico e biomecânico, os gestos realizados na situação real de prática (Derham e Reilly, 1990 citado em Gomes, 2008).



Figura 14 – Caiaque ergómetro (Dansprint, Denmark).

Os caiaques ergómetros (fig. 14) são formados por um banco e um finca-pés estático, em que o esforço realizado na simulação da pagaiada não produz aceleração do sistema, mas produz forças superiores no banco e finca-pés (Begon e Colloud, citado

em Begon et al., 2008) comparada a pagaiada na água e no caiaque ergómetro, concluindo que a maior diferença reside nas forças de contacto, que no caiaque ergómetro não são possíveis de reproduzir.

3 - Objectivos de Estudo

O sucesso de um canoísta exige uma boa condição física e uma técnica otimizada, fazendo uso de uma embarcação e pagaia apropriados, que maximize o movimento através da água, dando propulsão ao caiaque e minimize as forças de arrasto (Jacob et al., 2009).

O nível de desempenho em alta competição implica uma abordagem sistemática não só ao treino, mas também, às ciências que suportam o desporto, Lenz (citado em Sperlich and Baker, 2002), referiu que os sucessos das associações desportivas eram aqueles que utilizavam bases científicas no desenvolvimento e na análise do seu desempenho.

Desde a entrada da canoagem, como um desporto Olímpico, em 1936 nos Jogos Olímpicos de Berlim (ICF 2012) que aumentaram os estudos e pesquisas da biomecânica da canoagem em pista, os quais contribuíram para a diminuição dos tempos de competição, para o desenvolvimento específico dos programas de treino, para o desenvolvimento da pagaia e para a evolução dos barcos, como aliás é referido por Jacob et al., 2009. Contudo, poucos foram os que estudaram as forças desenvolvidas e aplicadas ao caiaque através do banco e finca-pés, sendo necessário, por isso, criar dispositivos de medição destas forças.

A propulsão é realizada, fundamentalmente, pela força aplicada na pagaia e transmitida ao caiaque através do banco e finca-pés. Na pagaia o atleta puxa a pagaia no sentido contrário ao movimento e, como resultado, ocorre a propulsão. Esta interacção da pagaia com a água é a resultante de forças de arrasto e impulsão. Durante a pagaia, a força desenvolvida pelo atleta é transferida ao caiaque através de forças aplicadas ao finca-pé e ao banco (Shephard, 1987).

Segundo Jacob et al. 2009, os sistemas de medição de forças foram desenhados e utilizados noutros desportos aquáticos, como o remo. Nestes estudos, os sistemas de medição utilizavam células de carga instrumentadas e extensómetros posicionados no caiaque ergómetro (dispositivo mecânico que simula os movimentos da pagaia), concluindo que as forças aplicadas ao finca-pés do barco de remo (*skiff*) durante as competições, afectavam a eficácia da remada e, portanto, o desempenho do *skiff*, relacionando-se directamente com a força produzida na pá do remo. Contudo, as aplicações das forças são distintas. Enquanto na canoagem a força é transmitida à água

totalmente do corpo do atleta, no remo existe um apoio mecânico entre o remo e o *skiff*, permitindo imergir o *skiff* da água durante cada remada.

No caiaque de pista, o banco é fixo na direcção da propulsão e a força no finca-pés é feita no mesmo sentido (para frente do atleta), contribuindo para a força resultante de propulsão, enquanto a força aplicada no finca-pés do barco de remo, é oposta ao movimento (costas do atleta).

Para Begon et al. 2008, a instrumentação adequada para o estudo completo das forças aplicadas no caiaque (pá, finca-pés e banco) em laboratório ou água ainda não foi desenvolvida, apesar das investigações em ergómetro levadas a cabo por Mann and Kearney, 1980 e Campagna et al., 1982, Begon et al. 2008, prevê como desafio futuro, um sistema de aquisição de dados de repetidos ciclos dos membros inferiores em canoagem.

A tese que agora se apresenta tem, então, como objectivo primordial desenvolver um sistema experimental capaz de quantificar as forças geradas em cada lado do finca-pés (esquerdo e direito). Este sistema, deverá não só ser passível de se utilizar em caiaque ergómetro como também num caiaque de pista, permitindo avaliar as forças aplicadas durante o ciclo de pagaiada, tanto em compressão como em tracção.

4 - Projecto e Desenvolvimento de Finca-pés Instrumentado

4.1 – Estado de Arte

Os primeiros sistemas biomecânicos a medir as forças aplicadas na canoagem, foram originários e desenvolvidos na Alemanha, neste caso sistemas aplicados à pagaia instrumentada. Os transdutores de força aplicados nas pagaias ligados a um sistema de armazenamento de dados ou por uma unidade de telemetria incorporada no caiaque, permitiam o armazenamento de dados num sistema instalado no caiaque, ou no computador do barco de apoio (Sperlich and Baker, 2002).

Petrone et al., 1998, desenhou um sistema para o finca-pés de quatro componentes dinamométricos e outro sistema de seis componentes dinamométricos para o banco, testando os dois na água e no ergómetro, medindo as forças aplicadas nos três pontos de contacto com o caiaque (os dois pés e o banco) com os valores médios da força máxima (min, max) de -152 N a 444 N no finca-pés e -128 N a 6 N no banco a 90 remadas por minuto (rpm).

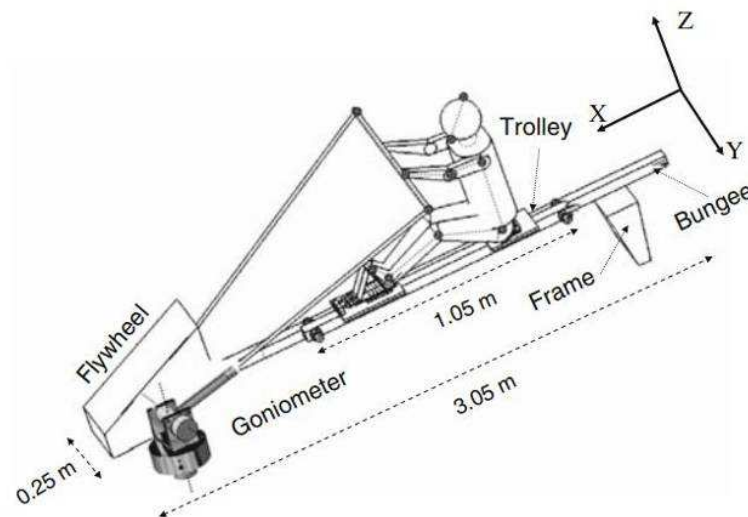


Figura 15 – Caiaque ergómetro com carrinho corredeira (adaptado de Begon et al., 2008)

Begon et al., 2008, desenvolveu um caiaque ergómetro com um carrinho que se movimenta nos dois sentidos ao longo da calha fixa (fig. 15). Este carrinho inclui o finca-pés e o banco, cada um instrumentado e dividido por lado esquerdo e direito de forma independente. Alguns dos atletas participantes dos ensaios realizados, utilizaram uma fita (*footstrap*) no finca-pés (fig. 17), permitindo melhorar os movimentos contra

laterais dos membros inferiores (Logan and Holt, 1985; Sanders and Baker, 1998 (citado em Fleming et al., 2012)) sendo assim possível avaliar as forças de compressão e tracção. As curvas das forças geradas no lado esquerdo e direito, da pagaia, do finca-pés e do banco, mostram padrões antissimétricos. Contudo, os valores médios das forças máximas (min, max) foram maiores no finca-pés (aplicado por pé), seguido do banco e por último na pagaia: (-300; 865), (-590; 145) e (-576; 50) N respectivamente (fig.16). Begon et al., 2008.

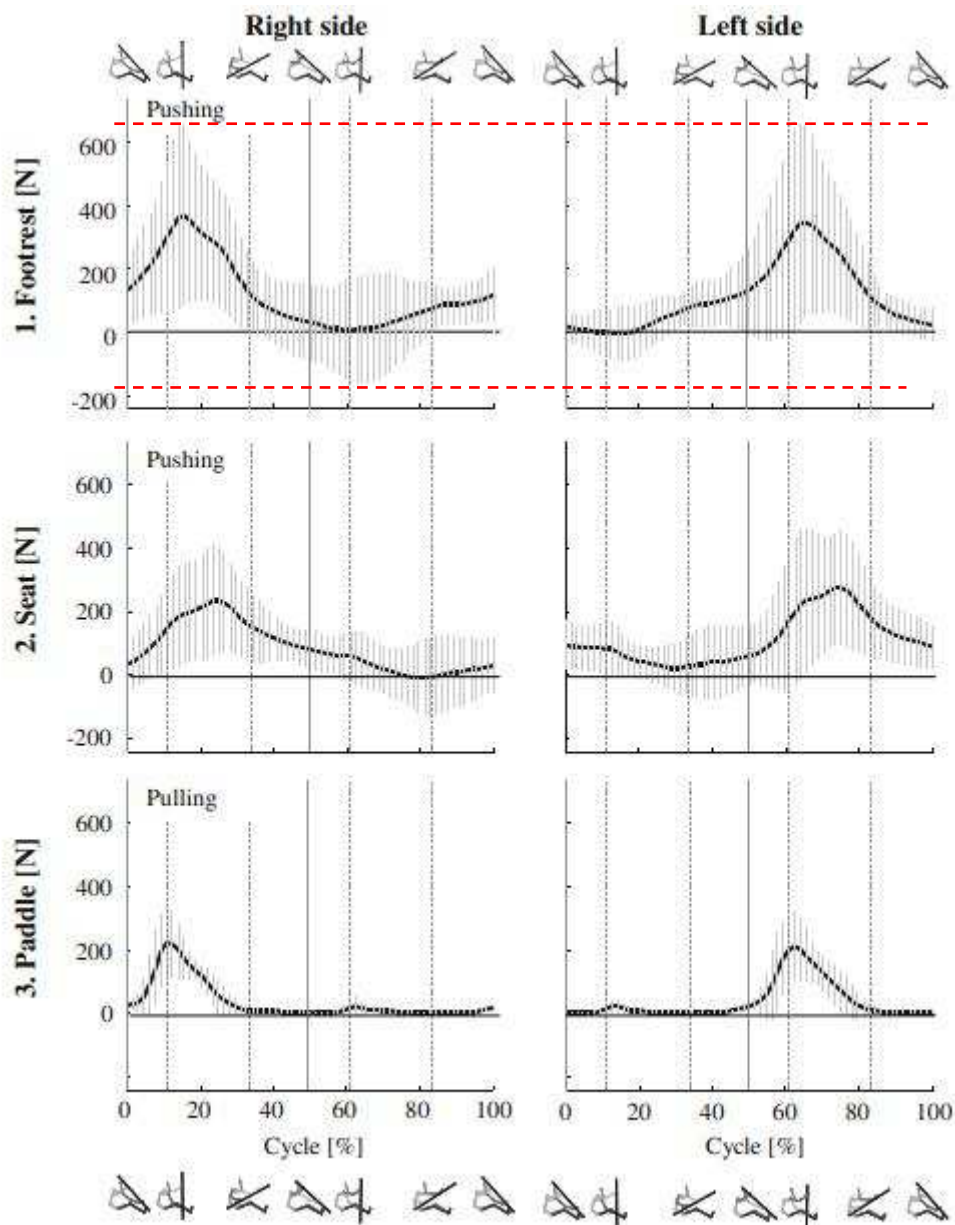


Figura 16 – Curvas das forças médias, medidas pelos sensores, da população de atletas de elite (linhas negras) com 95% de confiança, acima e abaixo (linhas finas). No topo curvas para o finca-pés esquerdo e direito; no meio, as forças aplicadas no banco e em baixo forças da pagaia. As figuras do atleta e as linhas interrompidas indicam as três fases características (entrada, vertical e saída) para a pagaia direita e esquerda (adaptado de Begon et al., 2008).

O principal objectivo do desenvolvimento deste finca-pés experimental é a sua utilização em laboratório, no caiaque ergómetro, com o intuito de medir o desempenho em tempo real, em termos da força de compressão (+) e tracção (-) (opcional através de uma fita que prende o pé ao finca-pés instrumentado, esta fita foi dividida a meio de forma a poder avaliar a força em cada pé, simulando a situação real de prática de um atleta, que normalmente a utiliza em treino e competição) tornando o sistema flexível. Foi também equacionado não como primeiro objectivo, mas como um estudo futuro, a compatibilidade com um caiaque de competição, para possíveis ensaios na água.

Após um período de treino, o que se pode esperar de um atleta é um aumento de desempenho, confirmando-se, não só recorrendo à avaliação da performance mas também a um sistema de medição de forças. Será extremamente útil obter estas informações durante o treino em tempo real ou para análise posterior do desempenho, armazenando os dados. Assim, o atleta ou o treinador estará disponível para reagir imediatamente ao treino menos conseguido. Se ao treinador for dada a possibilidade de verificar os dados em tempo real, facilmente os interpretará, dando sugestões de melhoria e uma motivação acrescida ao atleta (Sturm et al., 2010). Contudo, dos estudos analisados, poucos são os que se dedicam especificamente à força aplicada no finca-pés em caiaque-ergómetro ou na água (Petrone et al., 1998; Sperlich and Baker, 2002; Begon et al., 2008 e Sturm et al., 2010).

Dada à rotação do tronco e movimento pélvico durante cada pagaiada, é aplicada uma força de compressão ao finca-pés através do pé do mesmo lado, enquanto o pé oposto, simultaneamente, executa o movimento contrário, criando uma força de tracção.

É demonstrado, resumidamente na tabela 1, as forças máxima de compressão e de tracção medidas em estudos prévios sobre o finca-pés.

<i>Referência Bibliográfica</i>	Força no Finca-pés	
	Mínimo	Máximo
Sturm et al. 2010	---	140 N
Begon et al. 2008	-300 N	865 N
Petrone et al. 1998	-152 N	444 N

Tabela 1 – Forças aplicadas no finca-pés (medidas efectuadas anteriormente a este estudo).



Figura 17 – Fita (footstrap) utilizada por alguns atletas de canoagem

4.2 - Concepção do Dispositivo Experimental

Da ideia...

O desenvolvimento foi conduzido em cooperação entre o professor orientador e atletas. A intenção foi desenhar um dispositivo experimental de medição de forças aplicadas a um finca-pés – normalmente designado por célula de carga, capaz de ser usado por um atleta durante o treino, isto é, um finca-pés instrumentado para analisar as tensões no corpo elástico do finca-pés.

O finca-pés utilizado como referência equipa os caiaques de competição mais vendidos do mundo, de construção portuguesa. Estes caiaques representam 75% dos caiaques presentes nos JO de Londres 2012 e dos quais resultaram 25 medalhas em 36 possíveis (www.mar-kayaks.pt, 2012).

O objectivo de trabalhar sobre um modelo de finca-pés já existente, é permitir a sua perfeita adaptabilidade e compatibilidade aos caiaques de competição mais comercializados, tornando mais flexível a sua utilização e permitir que no futuro se possa ensaiar na água, bastando para isso possuir um caiaque NELO e embarcar o sistema de medição.

Na actualidade, os finca-pés que equipam os caiaques de competição são constituídos de material compósito substituindo a madeira, que apresentava alguns inconvenientes devido à natureza anisotrópica, resultando numa resistência pouco uniforme e uma grande absorção de humidade, proporcionando várias deformações. Posteriormente, os materiais compósitos com fibras de vidro e carbono e com matriz polimérica do tipo epóxida, entre outros polímeros, substituíram os materiais naturais e os metálicos.

Quanto ao material base para conceber o sistema, optou-se pelo alumínio, dada a estarmos perante uma peça única devido à facilidade de obtenção, maquinagem, rigidez e resistência. O facto de termos de fixar diferentes partes, executar rebaixos, saliências e furação, tomou a opção por uma material metálico evidente.

A principal desvantagem da utilização do finca-pés em alumínio face ao material compósito utilizado nos finca-pés reside no peso, com uma diferença de aproximadamente 3,5 kg para o mesmo em material compósito. No entanto, este equipamento não se destina a competição, mas sim ao treino e caracterização dos esforços aplicados durante a pagaiada, pelo que o factor peso não foi determinante.

A sua concepção base foi fixar dois meios finca-pés (direito e esquerdo) numa estrutura com a forma semelhante ao finca-pés original, por quatro pontos de apoio – células de carga unitárias. Estas células de carga unitárias foram seleccionadas de forma a serem distribuídas no espaço existente e proporcionar uma montagem compacta. Outro factor decisivo para a escolha das células unitárias foi a possibilidade de funcionarem nos dois sentidos.

...ao desenho

Para obtenção do desenho 3D do finca-pés, optou-se por engenharia inversa, contemplando a digitalização do finca-pés, controlo e tratamento das superfícies. As alterações ao desenho inicial foram realizadas em Auto CAD (*Autodesk, Inc., USA*) de acordo com as modificações ocorridas durante o estudo da parte experimental (fig.18, 19 e 22), a qual será analisada em capítulo próprio.

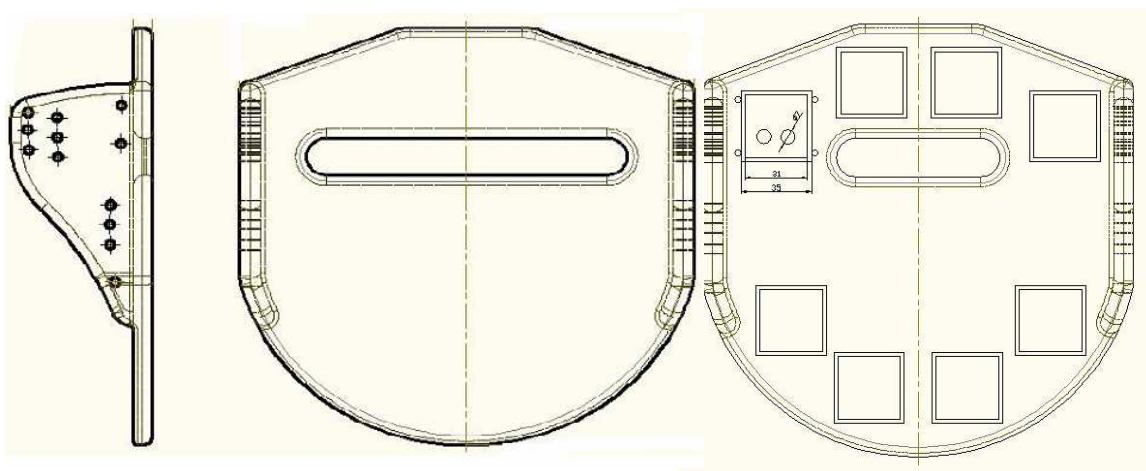


Figura 18 – Evolução do desenho CAD e localização das células de carga unitárias.

Para uma visualização 3D, usou-se o SolidWorks (Waltham, Massachusetts, USA), permitindo ter uma ideia da apresentação final, dos conflitos, erros e omissões (fig. 20 a 23). Dai surgiu a restrição à janela para utilização do leme (uma vez que em competições de velocidade não é comum utilizar o curso completo do leme), permitindo uma distribuição das células de carga unitárias junto das maiores áreas de contacto com os pés.

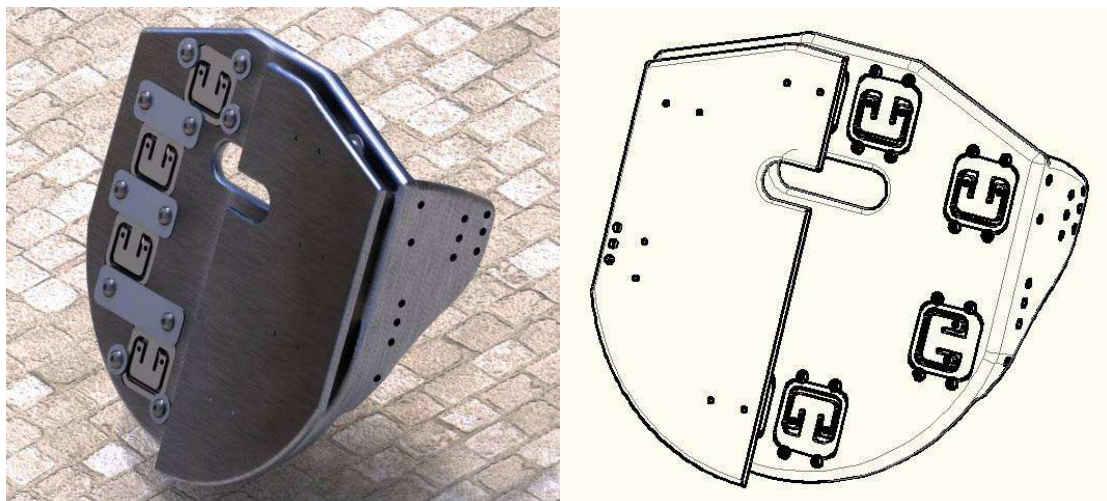


Figura 19 – Evolução do desenho de conjunto na fixação das células de carga unitária.

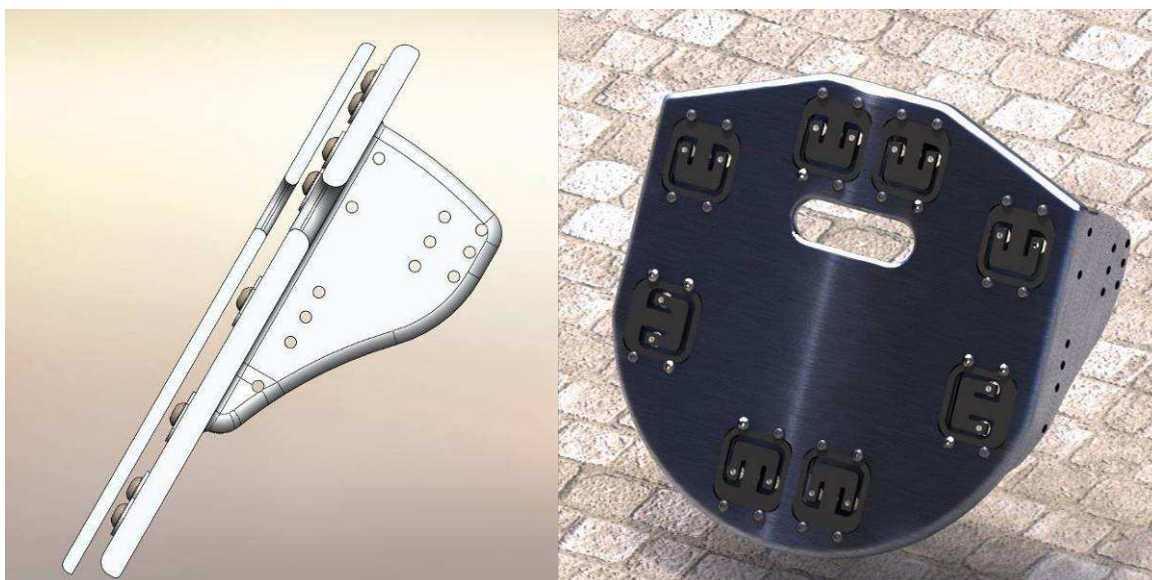


Figura 20 – Evolução do desenho na fixação das células de carga.

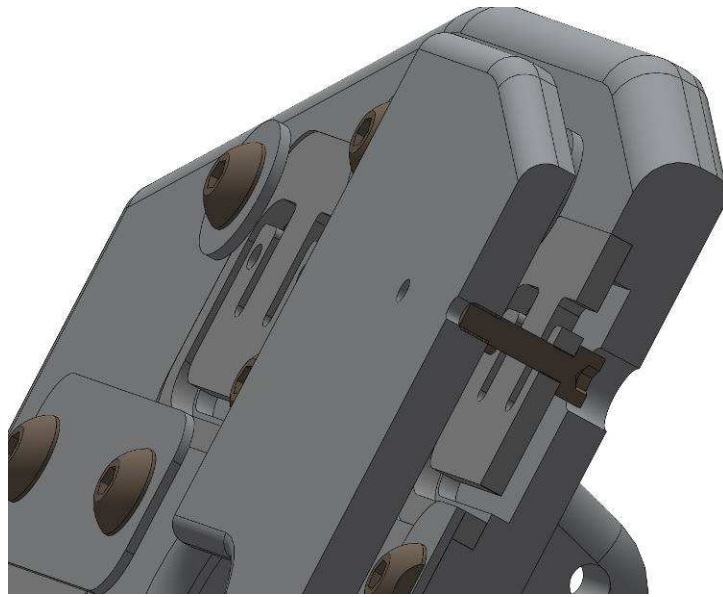


Figura 21 – Pormenor de ligação e transmissão da célula de carga do pé direito, a uma das células de carga unitárias.

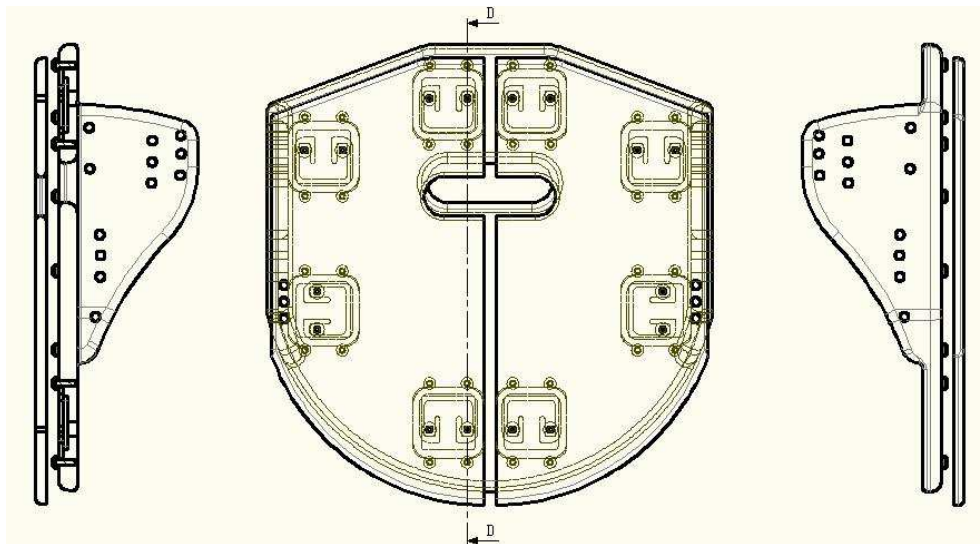


Figura 22 – Desenhos CAD finais com células de carga incorporadas

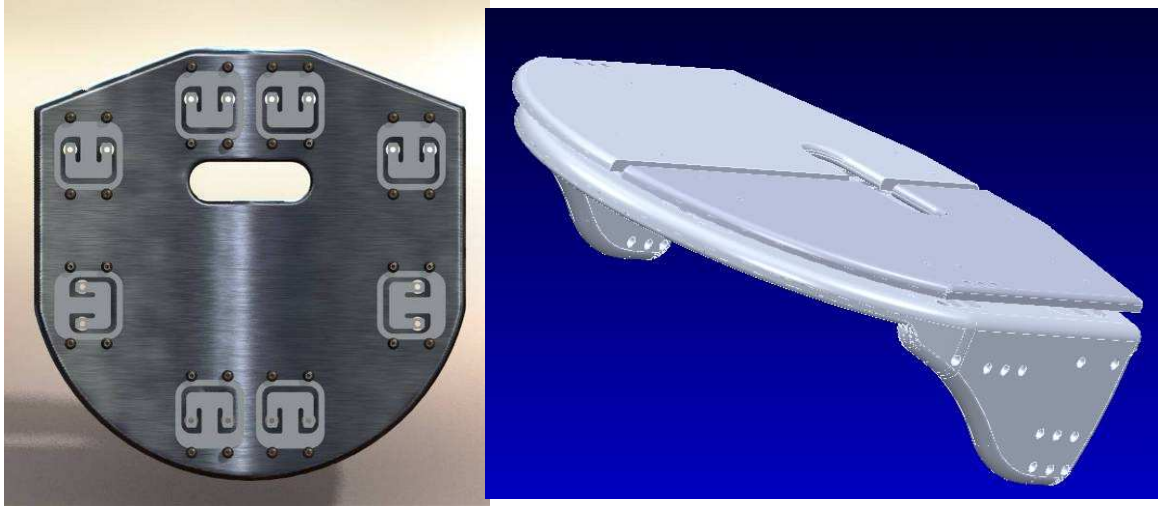


Figura 23 – Desenhos de conjunto 3D finais.

4.3 - Construção do Dispositivo Experimental

O dispositivo experimental para medição e caracterização dos esforços aplicados num finca-pés foi concebido de um bloco em alumínio de dimensões 300*300*120 mm³, maquinado por CNC (Controlo Numérico Computorizado), após definida a programação de maquinagem. Os furos para fixação, ajuste de ângulo e altura do finca-pés, seguem o finca-pés original, permitindo uma utilização de forma intuitiva (fig. 24).

Após definição das posições das células de carga unitárias no dispositivo experimental (fig. 22), foi necessário proceder a furação e fresagem para criar um sistema adequado de fixação.



Figura 24 – Concepção do finca-pés em alumínio e as células de carga esquerda e direita.

Para a transmissão de forças das células de carga do pé direito e do pé esquerdo para as células de carga unitárias encastradas no finca-pés, criaram-se 16 tubos de $\Phi_{\text{exterior}} = 6\text{mm}$ e $\Phi_{\text{interior}} = 3\text{mm}$ por 15mm de comprimento, fixos à célula de carga direita e esquerda, por 16 parafusos M3*25. O princípio de funcionamento assemelha-se aos apoios de uma balança, tornando-se responsáveis pela força aplicada às células de carga unitárias e por sua vez aos extensómetros, deformando-os.

4.4 - Desenvolvimento da Célula de Carga

4.4.1 - Extensometria Eléctrica

A extensometria é um conjunto de técnicas que permitem determinar o estado de deformação num ponto de um corpo, a partir da medição das deformações em várias direcções nesse ponto.

No caso da deformação num ponto da superfície de uma peça, onde a técnica é aplicável, basta o conhecimento das deformações em três direcções distintas, para que fique completamente definido o estado de deformação nesse ponto.

Para se obter o conhecimento das deformações em determinadas direcções utilizam-se extensómetros. Estes sensores são utilizados, experimentalmente, para avaliar as deformações ocorridas num dado ponto e numa dada direcção numa peça ou provete. Se for identificada a variação de distância (ΔL) entre dois pontos inicialmente afastados de L , distância essa que se designa por base de medida, a deformação será dada por:

$$\varepsilon = \Delta L/L_0$$

Existem vários tipos de extensómetros para medir as deformações à superfície de um corpo, podendo classificar-se em função do fenómeno em que se baseia o princípio de funcionamento: extensómetros mecânicos; ópticos; eléctricos de resistência; acústicos ou de corda vibrante; eléctricos de indução; semi-condutores e foto-elásticos. O que nos interessa neste estudo é o extensómetro eléctrico de resistência que se baseia na variação da resistência eléctrica de um condutor quando submetido a uma deformação. É o processo mais utilizado na indústria e na investigação, devido à sua

simplicidade, baixo custo, precisão de resultados e campo de aplicação (dado que permite a utilização directa na própria estrutura ou peça), (Branco, 1996).

Em 1843, o físico Sir Charles Wheatstone inventou uma ponte para medição de resistências eléctricas. Essa ponte, hoje conhecida como ponte de Wheatstone, é ideal para a medição de pequenas variações de resistência, como é o caso da variação de resistência de um extensómetro (Portela, 1996).

Como já havia sido referido, um extensómetro transforma uma deformação, numa variação proporcional da sua resistência eléctrica. A relação entre a deformação aplicada ($\varepsilon = \Delta L/L_0$) e a variação de resistência de um extensómetro é dada por:

$$\Delta R/R_0 = k\varepsilon$$

$$E = \sigma / \varepsilon \quad \text{Lei de Hooke para um estado uniaxial de tensão}$$

$$\sigma = F / A$$

onde (R_0) é a resistência inicial do extensómetro, (ΔR) a variação dessa resistência por deformação e (k), vulgarmente conhecido como factor do extensómetro, é um valor característico deste, que é verificado experimentalmente.

Os quatro braços da ponte contêm quatro resistências, R_1 a R_4 . Se os nós 2 e 3 forem ligados a uma fonte de tensão de valor conhecido (V_E), aparecerá uma outra diferença de potencial (V_A), entre os nós 1 e 4. O valor de V_A depende dos quocientes entre resistências R_1/R_2 e R_4/R_3 . Tem-se então a seguinte equação (Portela, 1996):

$$V_A/V_E = R_1 / (R_1+R_2) - R_4/(R_3+R_4) = (R_1 * R_3 - R_2 * R_4) / [(R_1+R_2) * (R_3+R_4)]$$

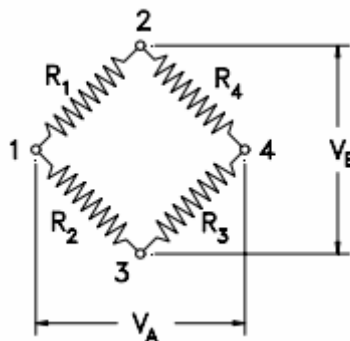


Figura 25 – Ponte Wheatstone (adaptado de Portela, 1996)

A ponte de Wheatstone diz-se equilibrada quando se tem:

$$V_A/V_E = 0$$

Para a ponte ser equilibrada é necessário que se verifique que:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \text{ ou } R_1 / R_2 = R_4 / R_3$$

Partindo então do princípio que uma dada ponte de Wheatstone está equilibrada, qualquer variação de resistência em uma ou mais resistências da ponte, provocará uma diferença de potencial (V_A) diferente de zero.

Quando se utiliza extensometria eléctrica para a medição de deformação apenas uma das resistências pode ser um extensómetro activo, em casos específicos podem usar-se dois ou mais extensómetros activos.

A extensometria eléctrica tem sido utilizada de forma generalizada na instrumentação de células de carga. Neste caso não estamos interessados em medir deformação, mas apenas relacionar um valor de tensão lida na ponte de Wheatstone com uma carga aplicada a célula de carga, de forma precisa, fiável e com repetibilidade. Para a maximização da sensibilidade (mV/V), geralmente são usados valores de $a=R_2/R_1$ elevados (sendo “a” a relação de resistência na ponte). Porém como estamos interessados em utilizar quatro pontos de apoio para cada meio finca-pé, a montagem que se afigura adequada é em ponte completa.

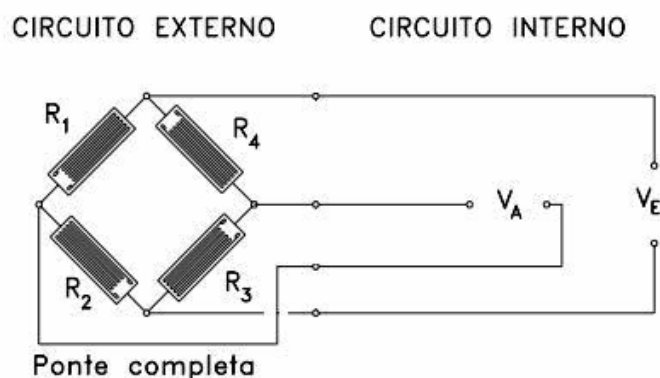


Figura 26 – Ponte de Wheatstone – Ponte Completa (Adaptado de Portela, 1996)

A opção por ponte completa, quatro extensómetros activos, permite aumentar o ganho da ponte. Assim como posicionar cada um dos extensómetros nos extremos de

cada meio finca-pés. De facto, utilizaram-se oito extensómetros, dois em cada braço da ponte.

4.4.2 - Células de Carga Unitárias

Por definição, uma célula de carga é uma peça à qual são colados extensómetros eléctricos e que é utilizada fundamentalmente para leitura de forças (Branco, 1996).

Os principais aspectos a ter em conta na construção de uma célula de carga são:

- Material de elevada resistência com boa qualidade térmica e dimensional;
- Extensómetros de boa qualidade;
- Precisão e boa qualidade de colagem;
- Alinhamento rigoroso dos extensómetros;
- Sistemas adequados de fixação, aplicação de cargas e protecção.

As células de carga são utilizadas, não só como instrumento de leitura de forças em máquinas de ensaio de materiais, como também nas modernas balanças e básculas electrónicas de pesagem, substituindo com grande vantagem e com maior precisão os sistemas convencionais de pesagem mecânica.

No início do estudo do finca-pés experimental, a ideia base recaía sobre a construção de uma célula de carga com os respectivos extensómetros. Após análise mais pormenorizada do mercado e dadas as dificuldades inerentes às características das células de carga, referidas anteriormente, optou-se por células de carga já existentes, fiáveis, com uma gama de carga pretendida, mais baratas, mostrando ser muito competitivas face à relação qualidade preço, tornando a concepção do sistema mais barata. Analisamos, assim, as células de carga unitárias que equipam as balanças de pesagem, onde cada balança/célula de carga possui quatro células de carga unitárias e cada célula unitária uma grelha de dois extensómetros, cada extensómetro com resistência de $1k\Omega$, (fig. 27).

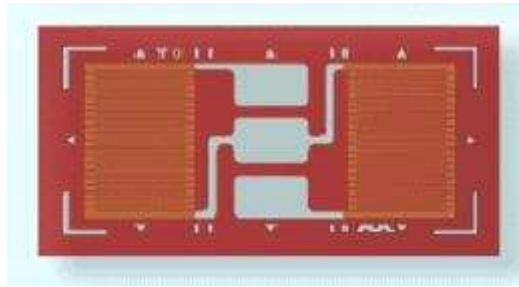


Figura 27 – Tipo de extensómetro usado na célula de carga.

A roseta de extensómetros é colada sobre sentidos opostos, mas na mesma direcção, com três terminais, um em comum e dois separados. Para além disso, estão divididos pela linha de eixo (fig. 28) criada pela furação existente das células unitárias e estão protegidos com um termoplástico especial.

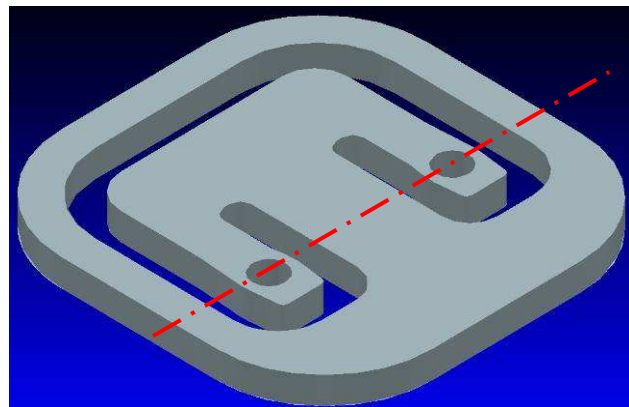


Figura 28 – Linha de eixo criada na célula de carga unitária e desenho 3D.

De forma a evidenciar a conveniência de utilizar o posicionamento da grelha de extensómetros e entender a forma geométrica da célula de carga existente no mercado, foi realizada uma análise estrutural (análise linear estática - *HiperWorks, USA*) á célula de carga unitária. Esta análise consistiu na criação de um modelo em elementos finitos, considerando todas as condições de fronteira existentes: constrangimento da base da célula de carga e aplicação de uma carga de 200N distribuída pelos dois furos existentes.

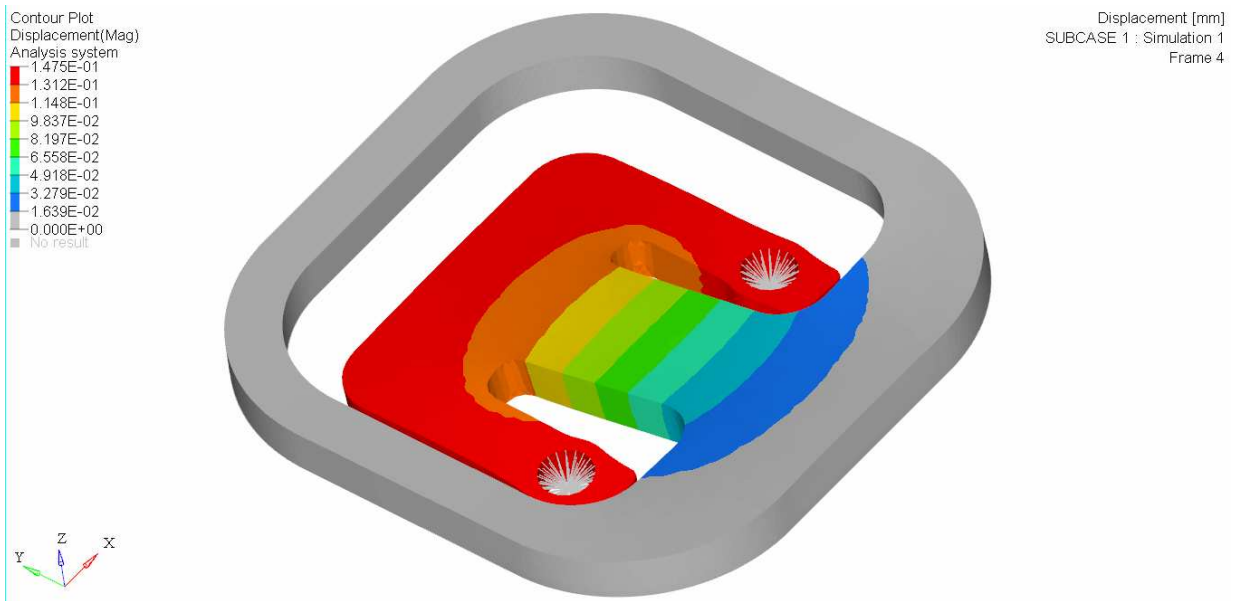


Figura 29 – Deformação na direcção dos extensómetros (YY) da célula de carga unitária

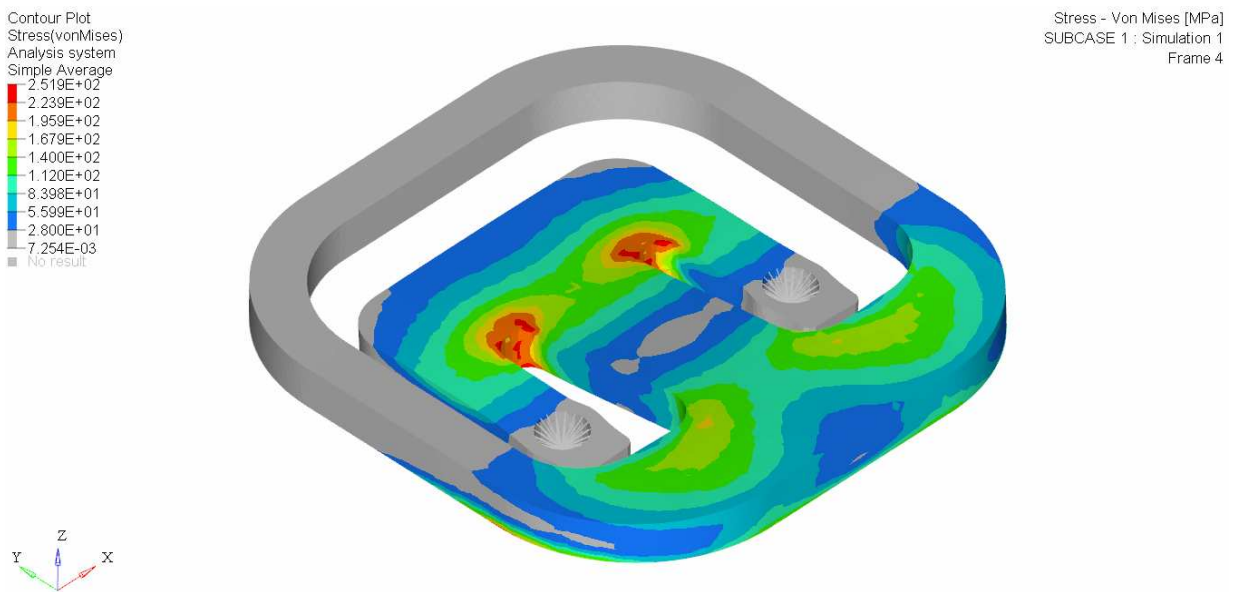


Figura 30 – Valores de tensão da célula de carga unitária

Os resultados obtidos deste estudo numérico (deslocamentos e tensões) representados na figura 29, 30 e 31, permitiram demonstrar quais os locais mais críticos da célula, assim como a verificação de tensão nula sobre a linha de eixo criada pelos dois pontos onde é aplicada a força.

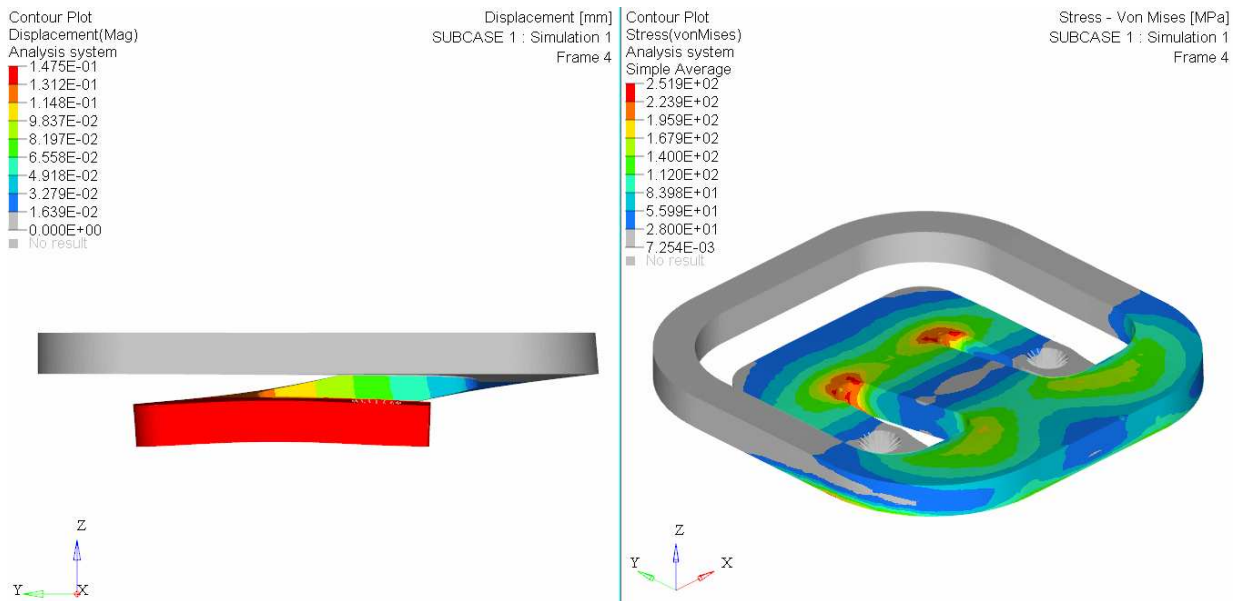


Figura 31 – Valores de Deformação e Tensão resultantes da força aplicada á célula de carga unitária

A disposição das células de carga unitárias cumpriu com o demonstrado na figura 32, em que dois extensómetros com direcção longitudinal na parte superior do finca-pés, um extensómetro transversal, no apoio da planta do pé e outro longitudinal no apoio ao calcanhar mas com sentido contrário aos do topo do finca-pés.



Figura 32 – Pormenor do posicionamento das células de carga unitárias.

Como se pode verificar pela figura 33, cada célula de carga unitária possui três condutores eléctricos, soldada aos três terminais dos extensómetros (condutor preto e branco soldado a um terminal cada e o vermelho ao terminal em comum dos dois extensómetros).

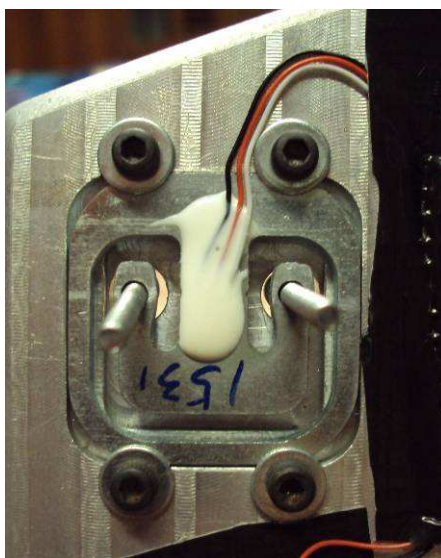


Figura 33 – Pormenor dos condutores eléctricos das células de carga unitárias.

Das quatro células de carga unitária que integram cada uma das células de carga direita e esquerda, criou-se a ponte completa de Wheatstone, como apresentado no desenho eléctrico simplificado na figura 34.

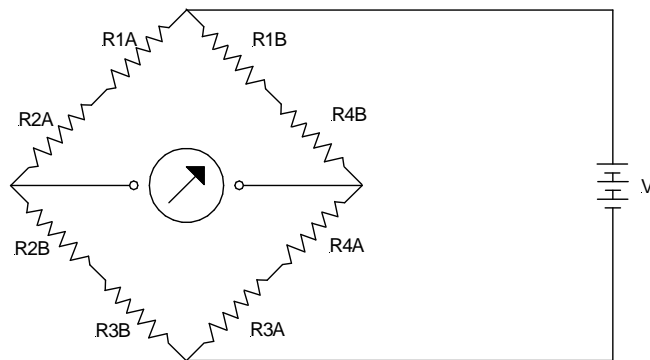


Figura 34 – Ponte completa de Wheatstone usada neste estudo.

A utilização dos dois extensómetros em cada perna da ponte permite aumentar a resistência eléctrica do circuito e assim um consumo de corrente mais baixo, requisito muito importante para células que equipam, entre outros, balanças que usam uma fonte de alimentação de 3V provenientes de pilhas. Esta disposição também permite promover uma melhor repetibilidade e independência do ponto de carga sobre o finca-pés.

A ligação dos terminais foi realizada com soldadura a estanho, de forma manual, utilizando uma estação de soldadura de brasagem.

Os condutores pretos e brancos dos extensómetros foram conectados por grupos de dois da mesma cor, funcionando como as resistências de cada tramo (R_{1A} , R_{1B} , R_{2A} , R_{2B} , R_{3A} , R_{3B} , R_{4A} e R_{4B}). Os isolados, os vermelhos, são os responsáveis pela fonte de potência e a diferença de potencial (P+, P-, S+ e S-), criando assim a ponte completa de Wheatstone, representada na figura 34 e 35. Os terminais da excitação e sinal de leitura (P+, P-, S+ e S-) de cada célula de carga do finca-pés estão conectados por um cabo múltiplo a uma tomada de 15 pinos.

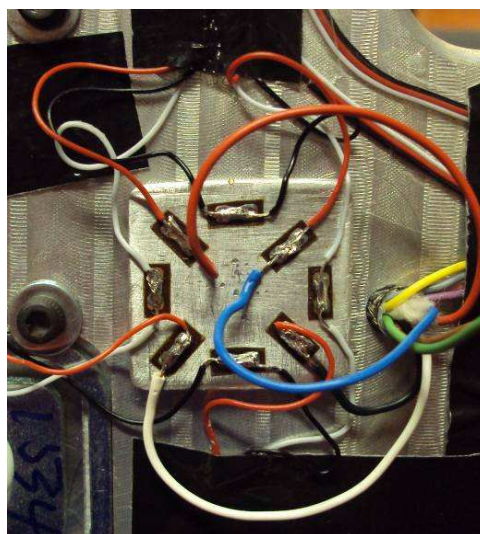


Figura 35 – Pormenor das ligações para a criação da ponte completa de Wheatstone.

4.5 - Posição de Medição/Testes

As primeiras verificações das células de carga foram realizadas com um indicador de deformações da *VISHAY, Raleigh USA Model P3*, impedância 60 a 2000 Ω , resolução 24 bits, filtro com programação decimal, factor de deformação $\pm 31000 \mu\epsilon$ em $GF = 2,000$. ($\pm 15,5 \text{ mV/V}$) e resolução $\pm 1 \mu\epsilon$ em $GF = 2,000$ ($\pm 0,0005 \text{ mV/V}$). É um equipamento de precisão, alimentado por bateria, aceita $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e ponte completa, resistente ao pó e à humidade, de utilização simples e intuitiva, que elimina o ruído através da tecnologia de processamento digital, permitindo uma óptima estabilidade.

Utilizou-se o seguinte esquema representado na figura 36, para a ponte completa de Wheatstone:

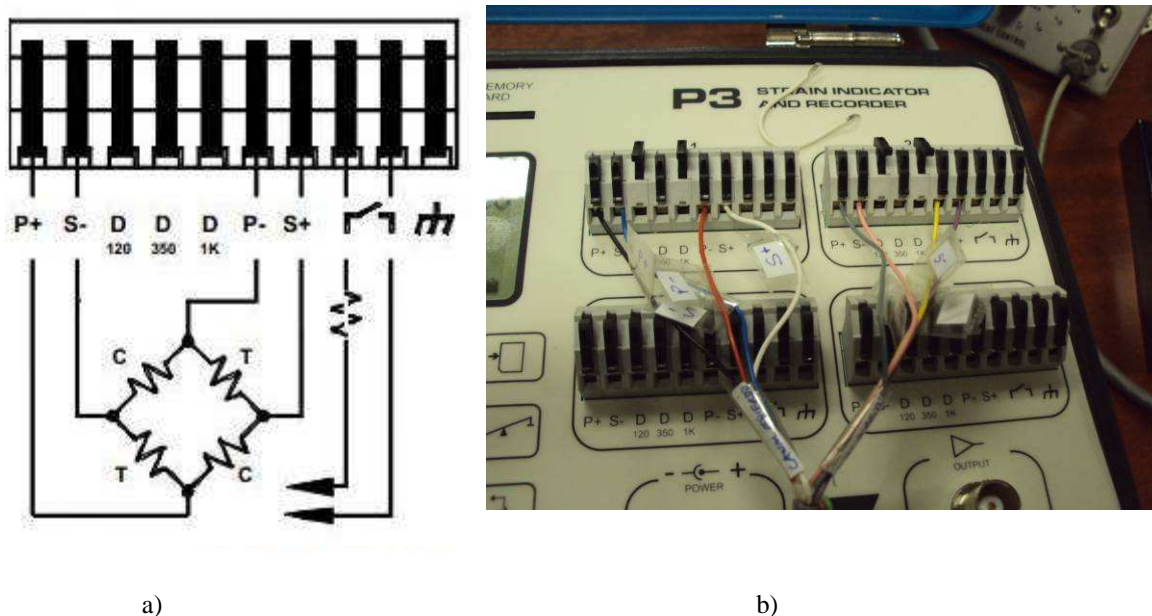


Figura 36 – a) Ilustração de ligação à ponte completa (adaptado de Vishay Instruction Manual), b) Ligação das células de carga esquerda e direita ao indicador de deformações.

Para verificar a sensibilidade (mV/V) do finca-pés instrumentado, utilizaram-se pesos calibrados de 219,580N na totalidade. As nove leituras para cada célula de carga foram efectuadas adicionando aproximadamente 25N por cada medição. As medições foram realizadas com o finca-pés nivelado e os pesos colocados no centro das células de carga (fig. 37).



Figura 37 – Verificação da sensibilidade com uma força de aproximadamente 220N.

Ensaio		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso (N)		25,092	50,078	74,671	99,684	124,659	149,918	174,513	199,196	219,580
Leitura	Esquerdo (mV/V)	0,025	0,050	0,074	0,099	0,124	0,149	0,173	0,197	0,218
	Direito (mV/V)	0,025	0,049	0,074	0,098	0,123	0,147	0,173	0,197	0,217

Tabela 2 – Sensibilidade do sistema para um fim de escala de $\approx 220\text{N}$.

Dos valores medidos, o coeficiente de correlação foi de 0,9996 (gráfico 1 e 2) para as células de carga, estando de acordo com os requisitos de linearidade de um método analítico.

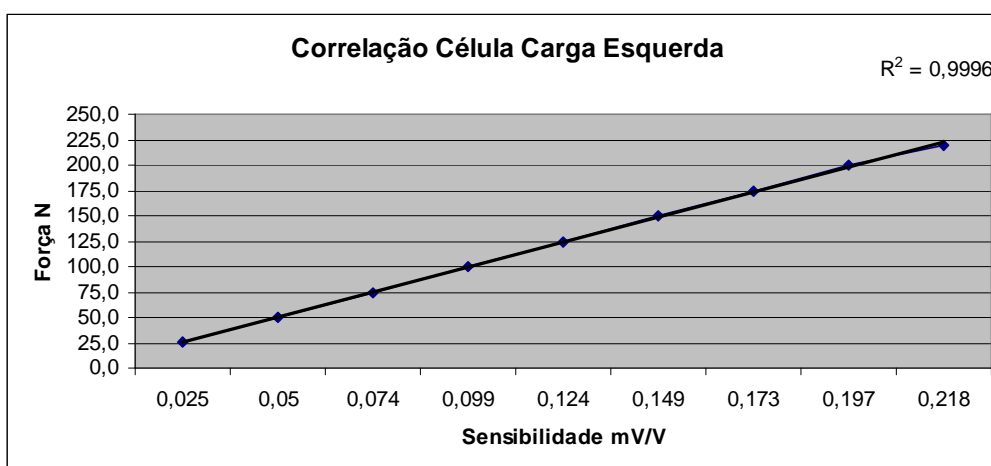


Gráfico 1 – Coeficiente de correlação para célula de carga esquerda.

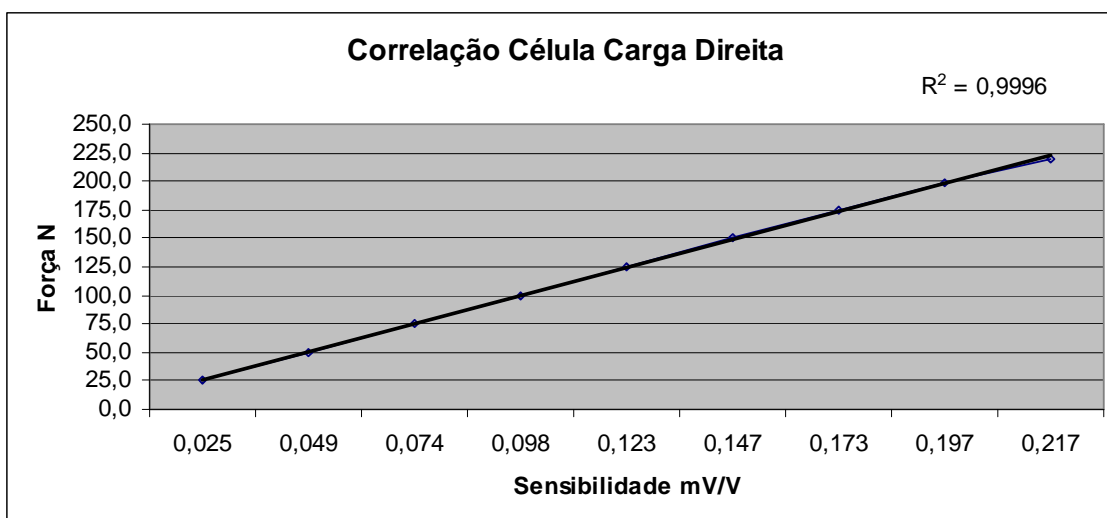


Gráfico 2 – Coeficiente de correlação para célula de carga direita.

Após verificação da sensibilidade do sistema, com resultados ótimos de correlação, o passo seguinte consistiu em verificar a independência de posição da força. Para realizar esta etapa, usamos um peso de 110,3 N, colocado em seis zonas distintas em cada célula de carga, conforme o esquema da figura 38. O ensaio foi repetido três vezes. Na tabela 3, encontram-se os valores obtidos, designadamente a média, o desvio padrão de cada posição e a média e erro relativo de todas as medições de cada célula de carga, salientando, porém, o erro relativo da célula de carga esquerda de 0,5% e 0,2% da célula de carga direita.

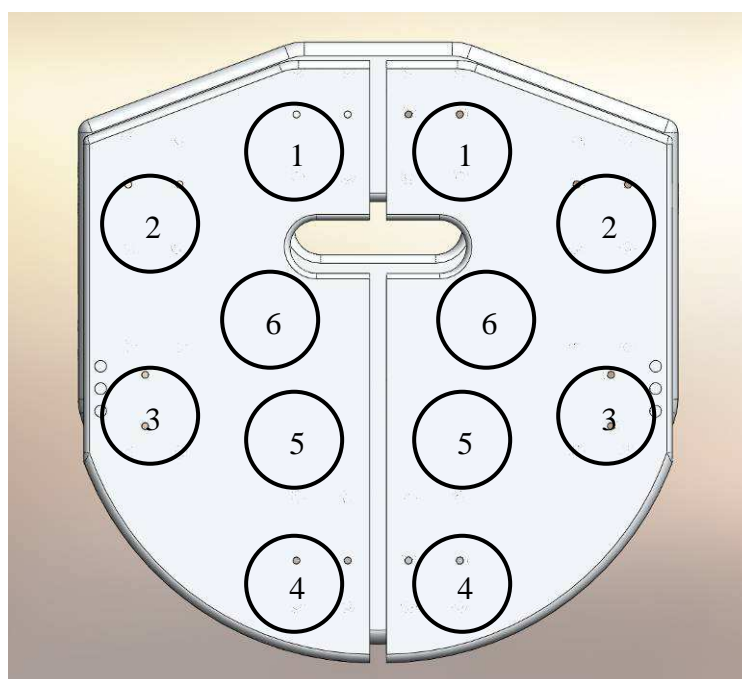


Figura 38 – Posição da verificação da independência de resultados.

Posição	Ensaio célula Esquerda (N)			Média (N)	Desvio Padrão
	Nº1	Nº2	Nº3		
1	106,9	107,0	107,2	107,0	0,2
2	108,5	108,9	109,6	109,0	0,6
3	110,9	111,5	111,4	111,3	0,3
4	110,7	110,9	111,3	111,0	0,3
5	110,6	110,9	110,9	110,8	0,2
6	109,4	109,4	109,4	109,4	0,0
Média	109,5	109,8	110,0	N	
Média Total	109,7			N	
Peso real	110,3			N	
Erro relativo	0,5			%	

Posição	Ensaio célula Direita (N)			Média (N)	Desvio Padrão
	Nº1	Nº2	Nº3		
1	110,2	109,5	109,4	109,7	0,4
2	107,8	108,6	108,5	108,3	0,4
3	110,1	110,8	110,4	110,4	0,4
4	111,7	112,0	111,9	111,9	0,2
5	111,0	111,4	111,2	111,2	0,2
6	109,2	109,0	108,7	109,0	0,3
Média	110,0	110,2	110,0	N	
Média Total	110,1			N	
Peso real	110,3			N	
Erro relativo	0,2			%	

Tabela 3 – Independência da posição da força, média, erros e desvios padrão.

4.6 - Armazenamento, Processamento e Transmissão

Uma vez calibrado o finca-pés, com o conhecimento da sensibilidade e da verificação de independência de resultados, passamos para o processamento e armazenamento de dados, que foi conseguido pelo condicionador de sinal *HBM Spider8* (Darmstadt, Alemanha). *Spider8* (fig. 39) é um sistema de medição electrónico para PC's, de medição eléctrica de variáveis mecânicas tais como: tensão, força, pressão e aceleração.



Figura 39 – Condicionador de Sinal, Spider 8 - HBM.

Todo o condicionamento de sinal e excitação de transdutores passivos e de amplificação, digitalização, interface do computador e tecnologia de conexão, para um máximo de oito canais é combinado num só equipamento. *Spider8* usa uma tecnologia de frequência 4,8 kHz para extensometria ou para transdutores.

Spider8 é conectado ao computador através da porta de impressora ou através de uma interface RS-232 estando, então, pronto para utilizar. Todos os ajustes necessários são feitos no computador através de comandos, não existindo potenciômetros, interruptores e terminais de soldadura.

À ponte completa do finca-pés instrumentado estão ligados quatro fios eléctricos de cada célula de carga, representando a excitação e o sinal de medição. Como as ligações são de quatro fios eléctricos, foi necessário ligar o sensor do circuito (-) ao circuito da excitação da ponte (-) e o sensor do circuito (+) ao circuito da excitação da ponte (+), para poder conectar conforme o demonstra a figura 40.

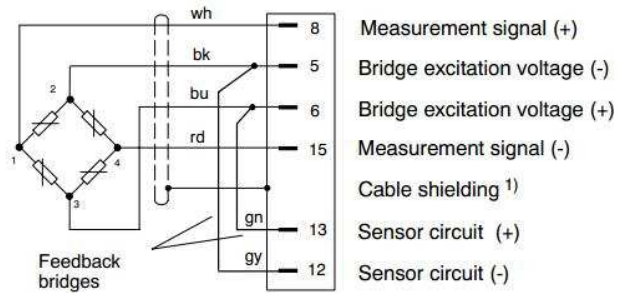


Figura 40 – Ligação a 4 fios a uma tomada de 15 pinos.

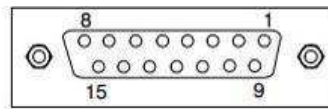


Figura 41 – Tomada de 15 pinos.

As ligações foram soldadas a uma tomada de 15 pinos, conforme demonstra a figura 41.

Com o *hardware* supracitado, utilizamos o *software CATMAN 4.5 HBM SOFTWARE (Darmstadt, Alemanha)*. Este conjunto permitiu configurar o amplificador, definir os parâmetros de medição, a frequência e seleccionar a visualização preferida. Os dados podem, posteriormente, ser apresentados graficamente, analisados e exportados, usando formatos como Excel ou ASCII.

Para os ensaios, em particular, seleccionamos uma frequência de amostragem de 50 Hz, uma vez que produz os pontos suficientes para analisar correctamente o perfil da força do ciclo de uma pagaiada.

4.7 - Procedimento Experimental

O estudo e aprendizagem do *software* foram realizados com duas células de carga: U10M/25KN n.º de série 012475S com sensibilidade de +2,0834 mV/V à tracção e -2,0839 mV/V à compressão e um S9M/2KN da HBM com o n.º de série 30948806, com sensibilidade 1,99815 mV/V, uma célula de deslocamento WA 20mm da HBM (Darmstadt, Alemanha), n.º de série 012475S com sensibilidade 2,0834 mV/V e, claro, com o finca-pés instrumentado separado pelas duas células de carga: a direita e a esquerda (fig. 42).

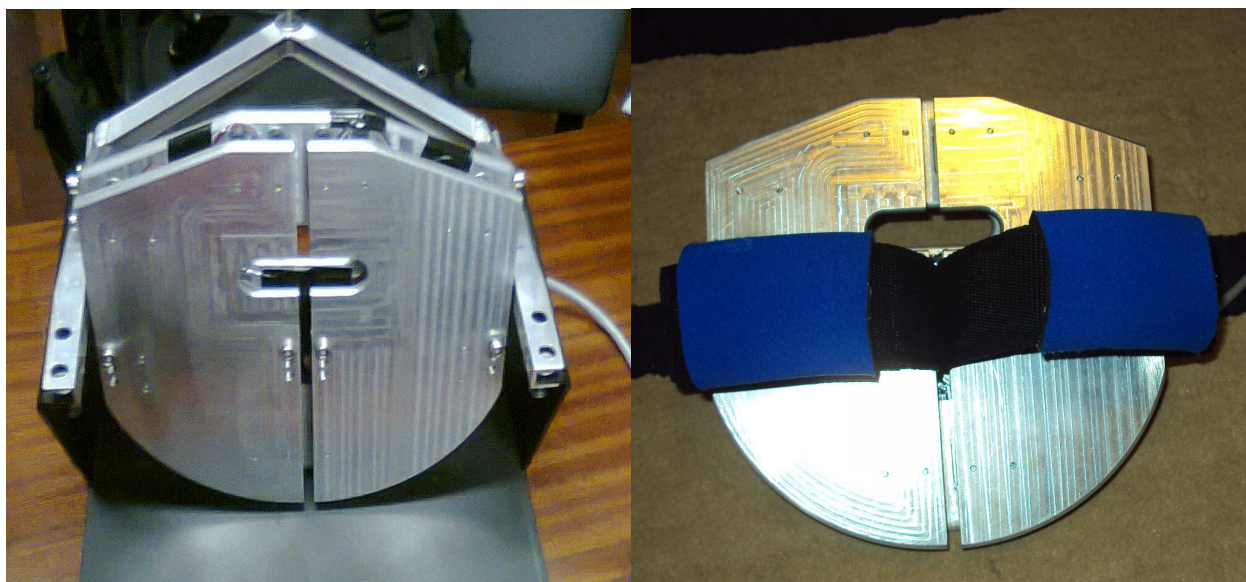


Figura 42 – Finca Pés Instrumentado: Célula de carga para o Pé Esquerdo e Pé Direito.

Para uma força de 25,112 N quisemos comparar os valores obtidos com uma célula de carga comercial e com as células de carga desenvolvidas, com resultados satisfatórios na parte experimental, sendo apresentado o erro relativo na tabela 4.

	Força Teórica (N)	Força Medida (N)	Erro Relativo %
Célula carga Direita	25,112	24,150	3,831
Célula carga Esquerda	25,112	24,670	1,760
Célula S9M/2kN	25,112	24,980	0,526

Tabela 4 – Erro relativo do sistema e da célula de carga comercial.

5 - Teste em Caiaque Ergómetro

O sistema foi testado no caiaque-ergómetro (*Dansprint, Hvidrove Denmark*) (fig. 43) com a análise de 7 (sete) canoistas com níveis distintos: 1 (um) atleta júnior de nível de selecção portuguesa (sujeito B), 4 (quatro) homens de nível nacional (sujeito A, C, D e E), 1 (um) atleta medalhado nos Jogos Olímpicos de Londres 2012 (sujeito F) e 1 (uma) mulher de nível de selecção portuguesa (sujeito G).

Após uma adaptação ao caiaque-ergómetro, o teste inicial realizou-se durante 60s a uma frequência de 75 pagaiadas por minuto, controladas por um metrónomo a 5 (cinco) sujeitos (A, B, C, D e F), , seguido de uma intensa mudança de ritmo e força (*Sprint*). A resistência da *flywheel* (ventilador) manteve-se no nível 5 de resistência. Num outro teste, testou-se também o esforço realizado pelos membros inferiores, nos seguintes dois tipos de ensaio: 1º – Aumento gradual de potência, a cada 30s a, 50W, 75W, 100W, 125W, 150W e 200W para sexo masculino, enquanto o sexo feminino ficou pelos 150W e o ensaio 2º – 30s a 75W seguido de 10s de *sprint*.



Figura 43 – Célula de carga montada no caiaque ergómetro.

5.1 - Sincronização e Aquisição de Dados

Após configuração do interface do finca-pés instrumentado com o *hardware* e o *software*, definindo frequências, pontes, filtros, sensibilidades, apresentação gráfica e armazenamento de dados testamos, com sucesso, o finca-pés com um atleta de nível nacional (sujeito A), com e sem fita de fixação nos pés.

Foram realizados ensaios com mais atletas de níveis variados como descrito anteriormente.

Apesar das células estarem calibradas, antes de cada medição fez-se o “zero”, garantindo que nenhum ruído anterior pudesse afectar a medição seguinte. O zero é feito sem aplicação de força, isto é sem qualquer pé a pressionar as células de carga, sendo expectável que ao retirar os pés no fim do ensaio, ambas as linhas dos gráficos tendam para próximo de zero.

Os valores apresentados acima do eixo das abcissas são o de compressão, sinal (+), e os valores com sinal (-) os de tracção. Esta arbitrariedade foi definida no sentido das forças aplicadas sobre o finca pés, tornando assim as forças aplicadas no sentido do movimento as forças de compressão e as forças de tracção no sentido oposto.

No gráfico 3, o canoista homem de nível nacional e com experiência em caiaque ergómetro sujeito B, pagaiou durante 60s a uma frequência de 75 pagaiadas por minuto e um *sprint* durante aproximadamente 10s, seguido de relaxe e abandono do caiaque ergómetro, com as linhas referentes à leitura das células de carga do pé direito e esquerdo a voltar ao zero como o esperado.

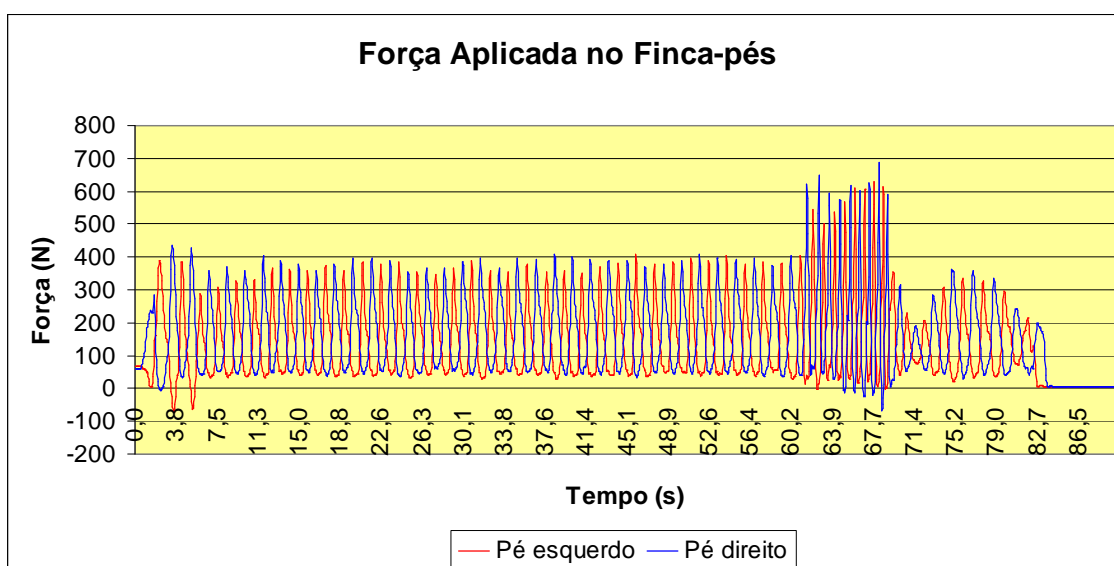


Gráfico 3 – Representação da força aplicada por atleta júnior de selecção portuguesa. Sujeito B

No gráfico 4, apresenta-se um pormenor da pagaiada à frequência de 75 rpm, em que o mesmo canoista atinge uma força máxima próxima de 400N nos dois pés e parece não aplicar força contrária à força realizada de compressão sobre o finca-pés, uma vez que não ignoramos o peso dos pés quando em contacto com as células de carga.

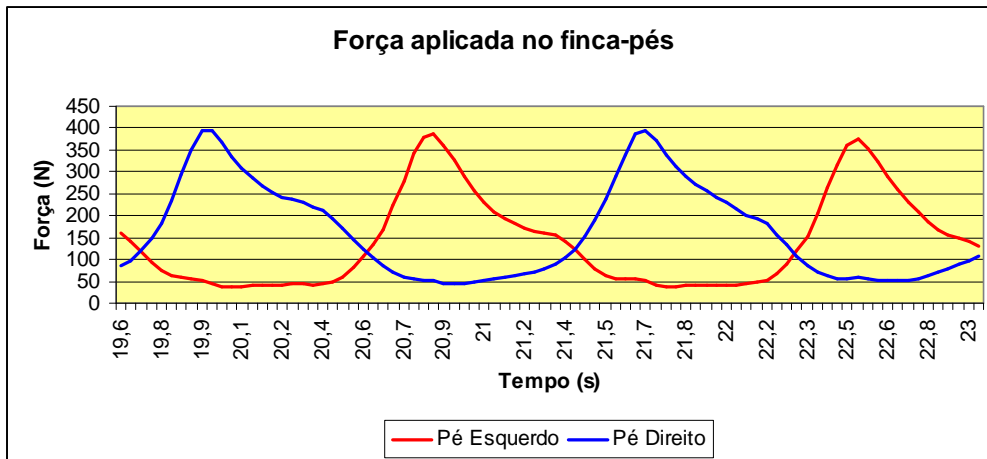


Gráfico 4 – Representação de dois ciclos de pagaiadas a 75 rpm do Sujeito B

No gráfico 5, por sua vez, mostra-se um resumo da pagaiada à frequência de prova de velocidade, superior a 120 rpm, em que o sujeito B atinge uma força máxima, próxima de 600N em cada pé e aplica uma pequena força contrária à força realizada de compressão sobre o finca-pés.

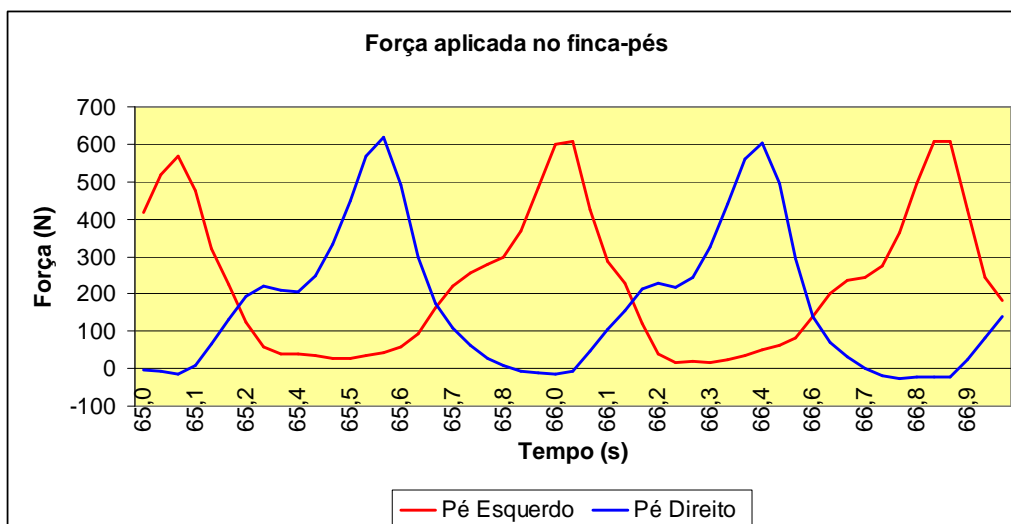


Gráfico 5 – Representação de dois ciclos de pagaiadas em *sprint*, Sujeito B.

No gráfico 6, 7 e 8 é apresentado o gráfico do sujeito F (atleta medalhado olímpico em Londres 2012), referente ao esforço de cada pé na célula de carga, durante uma frequência de 75 rpm, seguido de um *sprint*. No gráfico 6, temos uma vista geral, no gráfico 7, uma representação gráfica a uma frequência de 75 rpm durante dois ciclos de pagaiadas de cada lado, e por ultimo no gráfico 8, uma representação gráfica durante o *sprint*, em que o sujeito F atinge uma força máxima de compressão de 1037N no pé esquerdo e 1039N no pé direito. A força máxima atingida de tracção durante o *sprint* é de (-) 432N para o pé esquerdo e (-) 480 para o pé direito.

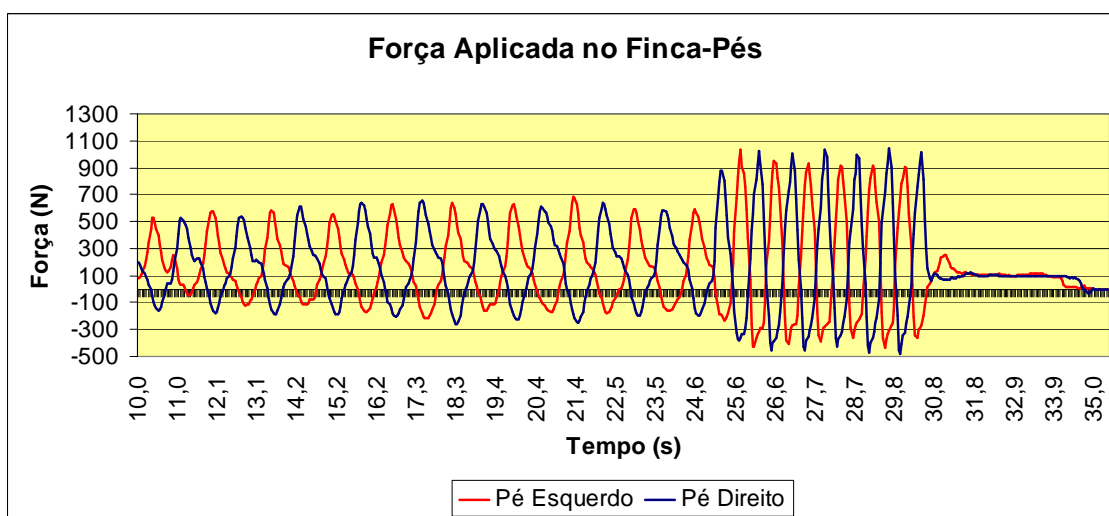


Gráfico 6 – Representação da força aplicada por atleta medalhado olímpico, Sujeito F

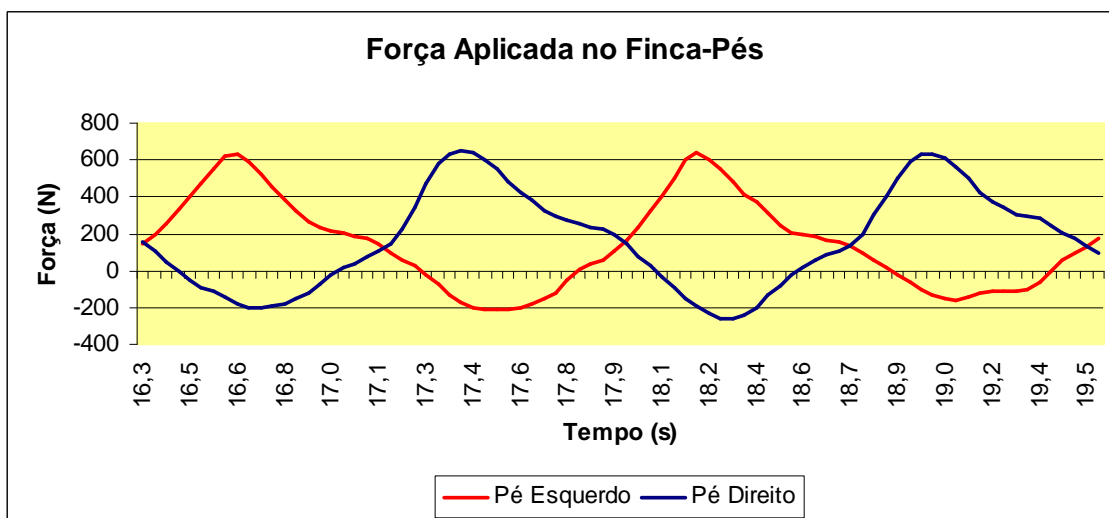


Gráfico 7 – Representação de dois ciclos de pagaiadas aproximadamente a 75 rpm do Sujeito F

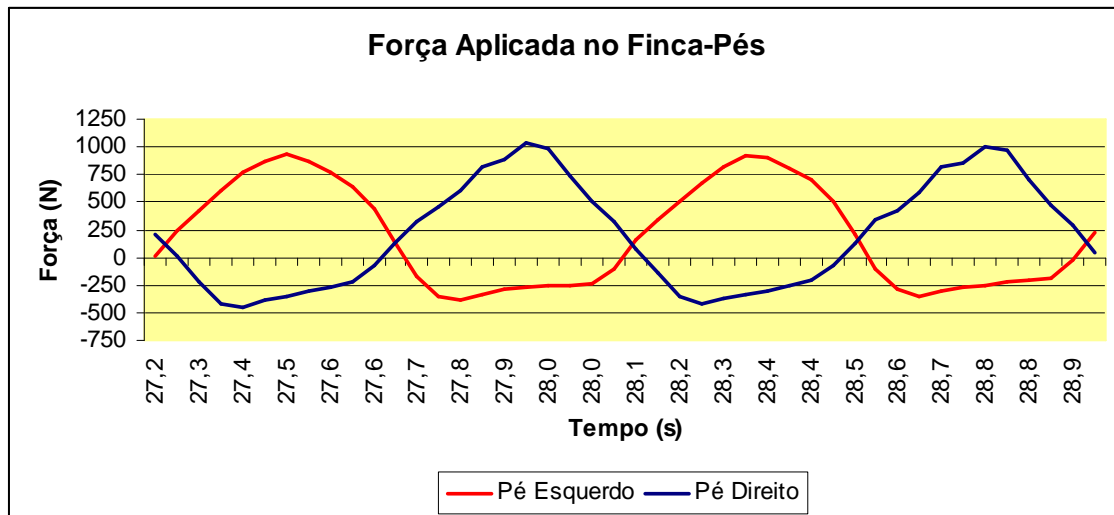


Gráfico 8 – Representação de dois ciclos de pagaiadas em *sprint*, Sujeito F.

6 - Discussão de Resultados

Da análise efectuada aos ensaios dos atletas, identificamos algumas das suas características, como o esforço assimétrico, a utilização de forma heterogénea da fita do finca-pés, diferença de forças máximas aplicadas entre atletas e, com recurso a duas câmaras de vídeo, uma a filmar o jogo de pés e outra a pagaiada, pudemos confirmar algumas conclusões da leitura gráfica efectuada.

Analisando o sujeito A, desta feita, um homem de nível nacional, sem experiência de pagaiada em caiaque ergómetro (gráfico 9 e 10), verificamos que as forças se apresentam distintas do atleta com um nível competitivo mais alto (gráfico 3 a 5). Não obstante, é notória uma força superior tanto na compressão como na tracção relativamente ao atleta Júnior de selecção (sujeito B). Na frequência de pagaiada mais elevada, obtivemos mais 40% de força de compressão, e na força de tracção mais 92% comparativamente ao tipo B. Contudo se compararmos o sujeito A (nível nacional) com o sujeito F (medalhado olímpico) encontramos semelhanças na relação de forças de compressão e tracção máximas com o sujeito A que aplica uma força máxima de compressão de 1087N no pé esquerdo e 1068N no pé direito. A força máxima aplicada de tracção durante o *sprint* é de -444N para o pé esquerdo e -476 para o pé direito.

Poderemos verificar que nas análises efectuadas, se o sujeito aplicar mais força de compressão com o pé direito, a força de tracção será mais elevada no pé contrário

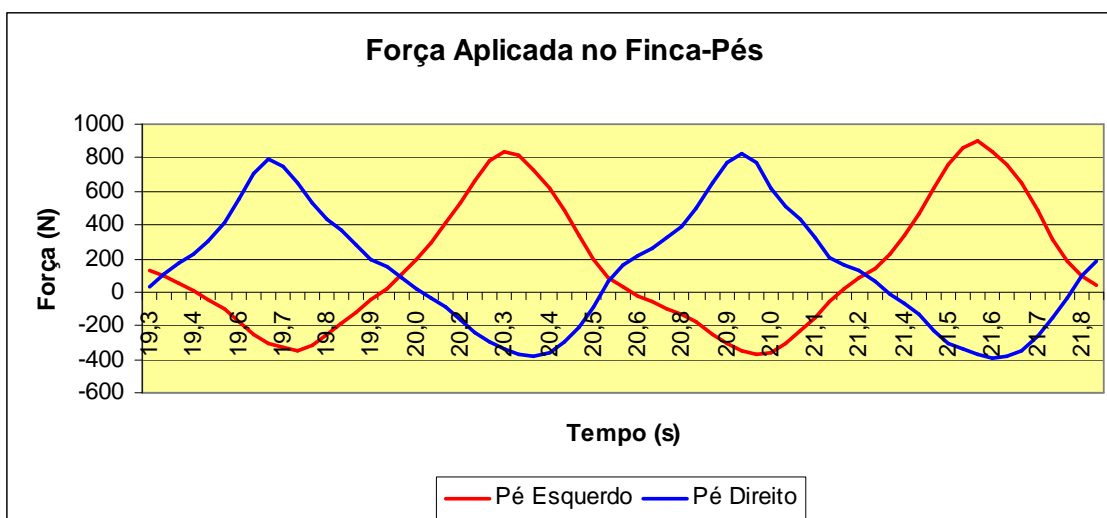


Gráfico 9 – Representação de dois ciclos de pagaiadas a 75 rpm do Sujeito A

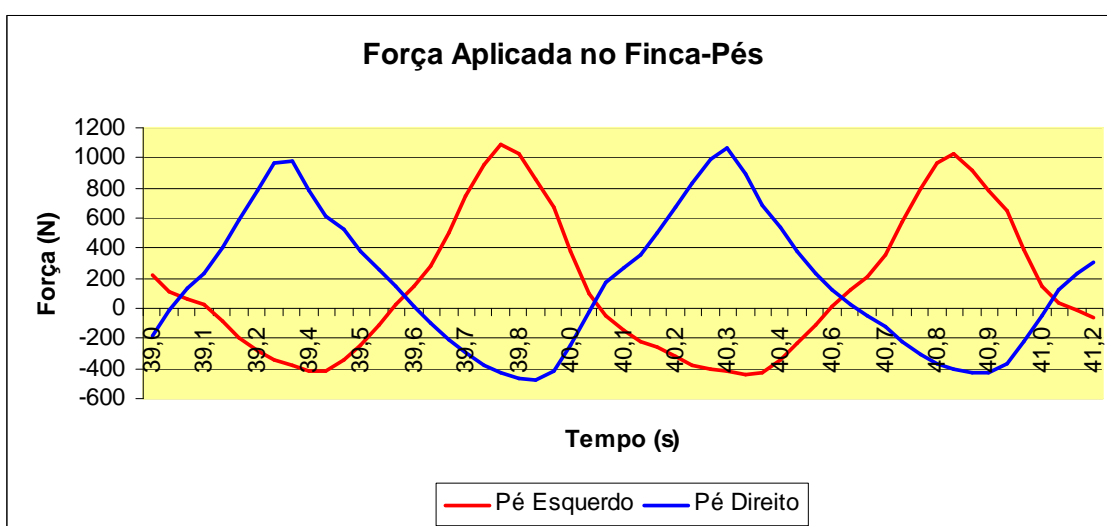


Gráfico 10 – Representação de dois ciclos de pagaiadas em *sprint*, Sujeito A.

Alguns resultados poderão ter uma pequena variação na transição compressão tracção, uma vez que a fita que segura o pé poderá não estar completamente apertada, ou mesmo devido à sua elasticidade, permitindo umas pequenas folgas não quantificadas. Verifica-se também, que o cruzamento da pagaiada, isto é a transição da fase de saída do lado direito para a fase de entrada do lado esquerdo, é feito acima do valor zero, podendo justificar-se pela compressão (peso dos pés) constante sobre o finca-pés durante o ciclo da pagaiada.

Da análise dos sujeitos A, B, C e F, poderemos observar que o sujeito A, numa frequência de pagaiada de 75 rpm (gráfico 9), precisa aproximadamente do mesmo tempo para chegar ao máximo da força, como para iniciar a próxima pagaiada do lado

oposto, enquanto os sujeitos B (gráfico 4), C (gráfico 11) e F (gráfico 7), atingem o máximo de força mais célere e prolongam a saída até iniciar a próxima pagaiada, permitindo alargar a propulsão. Esta característica parece estar associada a atletas com duração da fase aquática maior e com frequências de pagaiada mais baixas, permitindo uma propulsão mais alargada e mais homogênea. Para além deste fenómeno, é notório na visualização gráfica (gráficos 5, 8 e 10) das áreas de cada ciclo de pagaiada, a diferença no impulso de cada sujeito. Avaliando a força * tempo deparamo-nos com forças de impulso mais altas do atleta medalhado nos Jogos Olímpicos, face a todos os outros sujeitos.

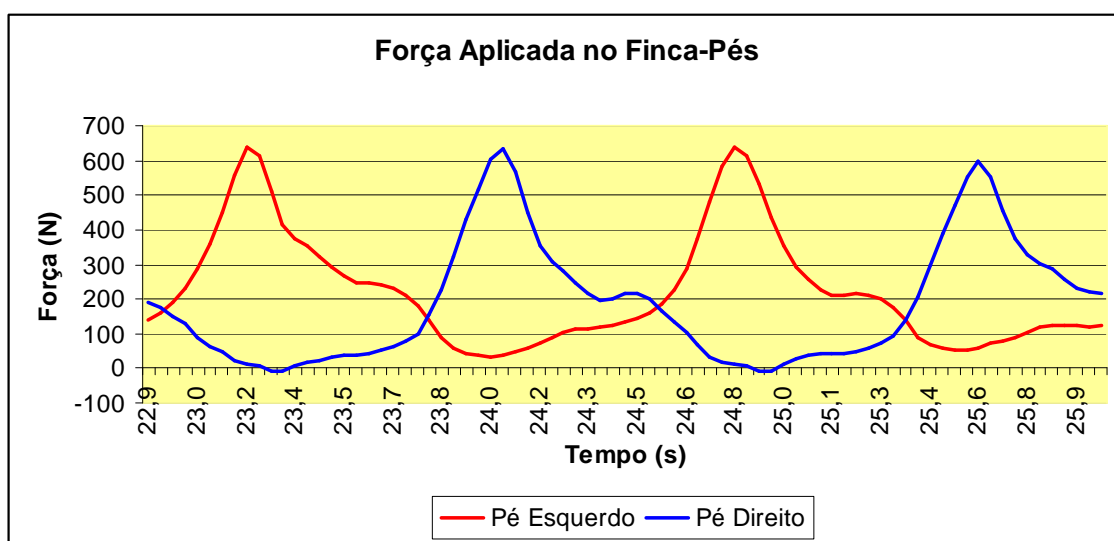


Gráfico 11 – Detalhe de dois ciclos de pagaiadas a 75 rpm. Sujeito C

Os resultados são muito promissores e motivantes, o finca-pés instrumentado usado neste estudo permitirá ao atleta ou treinador explorar a biomecânica do jogo de pés e ter uma nova perspectiva.

7 - Conclusão

Chegado ao fim deste estudo, a primeira conclusão a que se chega é que, efectivamente, se conseguiram alcançar os objectivos a que nos havíamos proposto, ao conseguirmos desenvolver um sistema de medição das forças aplicadas num finca-pés, testado em laboratório com recurso a um caiaque ergómetro e a atletas de elite.

De realçar que os resultados encontrados são congruentes com outros estudos, nomeadamente Begon et al. 2008 e Sturm 2010 e 2012. No entanto são notórias diferenças como: a forma da curva, valores de pico maiores e a observância de valores negativos respeitantes à tracção exercida pela utilização do *footstrap*.

A utilização de células de carga individuais provenientes de balanças comerciais revelou-se uma escolha acertada e proporcionou a construção de uma plataforma de carga compacta. O desenho alcançado é em tudo semelhante a um finca-pés normal, pelo que pode ser utilizado embarcado em qualquer caiaque com o mesmo sistema de fixação.

Este dispositivo de medição de forças permite caracterizar os esforços desenvolvidos no finca-pés de forma distinta por cada membro inferior, com ou sem a fita de suporte, possibilitando aos treinadores e atletas uma visão, para muitos desconhecida, das forças transmitidas e das suas assimetrias. Este conhecimento permitirá aos atletas melhorar o seu desempenho desportivo bem como facilitar a gestão desportiva, com base nos principais princípios mecânicos inerentes ao movimento dos atletas deste desporto Olímpico.

A análise de resultados daria, com certeza, outra dissertação tal é a diferença entre atletas e respectivas variações gráficas, quando avaliados apenas sete sujeitos.

8 - Trabalhos Futuros

- Não poderemos afirmar que as forças desenvolvidas e medidas no caiaque ergómetro, serão as mesmas que as que se poderão verificar com o caiaque na água, tal a diferença de, estabilidade, das condições ambientais, da diferença da aceleração e das forças extras produzidas no banco e finca-pés. Contudo este estudo apresenta um dispositivo instrumentado que possibilita a medição de forças no finca-pés, cumprindo todos os requisitos para ser usado em água, para tentar entender as diferenças face ao caiaque ergómetro, desde que se implemente um sistema sem fios (*wireless*), ou numa perspectiva experimental (dado ao volume e peso extra), poder-se-á, com recurso a uma bateria de 12V, para alimentação do sistema e protegendo hermeticamente o condicionador de sinal e o computador, verificar as forças exercidas em tempo real na água.
- Desenvolver um sistema mais leve ou reduzir a espessura, para não interferir com o peso total do caiaque, e conseqüente decréscimo do desempenho.
- Todas as ligações existentes no sistema serem resistentes à água conforme normas em vigor.
- Avaliar as variações gráficas de um grupo mais alargado e mais homogéneo.
- Estudar o efeito da pagaia com e sem apoio do *foot-strap*.
- Associar este sistema de medição de forças no finca-pés, a sistemas que meçam a força aplicada na pagaia e a sistemas de medição da força aplicada no banco, para realmente conhecer todas as forças inerentes à canoagem e que papel desempenham na performance de um atleta de alta competição.

9 - Referências Bibliográficas:

BAKER, J.; RATH, D.; SANDERS, R. and KELLY, B. - **A Three-dimensional analysis of male and female elite sprint kayak paddlers.** Australian Institute of Sport, Biomechanics Department, Canberra, ACT, Australia. 1999, p. 53-56.

BEGON, Michael; COLLOUD, F. - **A kayak ergometer using a sliding trolley to reproduce accurate on-water mechanical conditions.** J Biomech 40 (S2) XXI ISB Congress. 2007.

BEGON, Michael; [et al.] - **Comparison of kayak stroke kinematics on ergometer and in situ.** Archives of Physiologie and Biochemistry – XXVIIIèmes Congres de la société de biomécanique, Valenciennes, 2003, p. 16.

BEGON, Michael; COLLOUD, Floren; LACOUTURE, Patrick;. **Measurement of contact forces on a kayak ergometer with a sliding footrest-seat complex.** Sports Engineering, 2008,11:67-73.

CAMPAGNA, P. [et al.] – **A biomechanical comparison of Olympic flatwater kayaking and a dry-land kayak ergometer.** Canadian Journal of Applied Sport Sciences, 1981, 7:242.

COX, R. W.; - **The Science of Canoeing.** Great Britain, 1992. ISBN 0951893114.

DE MOURA BRANCO, Carlos A. G. - **Mecânica dos Materiais.** 3ª Edição, Fundação Calouste Gulbenkian, 1998.

FIBRENAMICS Website: <http://www.fibrenamics.com/pt/areas/sports/page/sports-equipment>. Ultima visita 19-09-2012

FLEMING, N.; [et al.] – **A Biomechanical assessment of ergometer task in elite flatwater kayakers.** Journal os sports Science and Medicine 11, 2012, p 16-25.

GOMES, Beatriz; VIRIATO Nuno; SANDERS, Ross; CONCEIÇÃO Filipe; VILAS-BOAS, João e VAZ, Mário; - **Analysis of the on-water paddling force profile of an elite kayaker**, *Portuguese Journal of Sports Sciences* 11 (Suppl.2), 2011, p. 259-262

GOMES, Beatriz; – **Análise das alterações fisiológicas e cinemáticas, associadas à utilização de banco fixo ou rotativo em caiaque-ergómetro, em canoista de elite.** 2008.

HAY, J.G; YANAI, T. - **Predicting the under-water motions of a blade of a kayak paddle from the above-water motion of its shaft.** Reports to U.S. Olympic Committee and U.S. Canoe and Kayak team. 1995.

HERNÁNDEZ, J. L. S. ; MARCOS, S. M. - **La Técnica Piraguismo I.** Madrid. COE 101-386. 1993.

IMBRIACO, P. J. - **Técnica de remada em caiaque canoagem velocidade.** Monografia de Graduação. Universidade de Santa Cruz. Santa Cruz, 2001

International Canoe Federation. **The history of canoeing.** Website, 2012. <http://www.canoeicf.com/icf/AboutICF/History.html>. Última visita em 14-09-2012.

International Olympic Committee. Canoe/Kayak sprint equipment and history. Website, 2012. <http://www.olympic.org/canoe-kayak-sprint-equipment-and-history?tab=History>. Última visita em 14-09-2012.

JACOB S. Michael; Smith Richard; Rooney, Kieron B.; – **Determinants of kayak paddling performance.** *Sports Biomechanics*, June 2009; 8(2): 167-179.

KRONHARDT, J. S. - **Canoagem Adaptada.** Monografia de graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

LEMOS, Luiz [et al.] – **Análise do equilíbrio de canoistas na posição anatômica e na posição sentada, conforme a técnica da modalidade.** *R. Min. Educ. Fís., Viçosa*, 2009, v.17, n. 1, p. 7-20.

MANN, R.; KEARNEY, J.; - **A biomechanical analysis of the Olympic style flatwater kayak stroke.** *Medicine and Science in Sport and Exercise*, 1980, 12: 183-188.

NELO Website:http://www.markayaks.pt/pt/news/article/olympic_games_2012_report/.
Ultima visita 18-09-2012

ONG, K. B.; [et al.] – **Equipment Set-up among Olympic Sprint and Slalom Kayak Paddlers.** *Sports Biomechanics* vol.4 (1) 47-58. [2005?]

PETRONE, N.; QUARESIMIN, M. & SPINA S., **A load acquisition device for the paddling action on Olympic Kayak,** In: Alison (ed.) *Experimental mechanics, advances in design, testing and analysis proceedings of XI ICEM*, 1998, 2, 817-822.

PLAGENHOEF, S. - **Biomechanical Analysis of Olympic Flatwater Kayaking and Canoeing.** *Res Q* 50 (3): 443-459. 1979.

PORTELA, A. ; SILVA, A. – **Mecânica dos Materiais**, Editora Plátano, Lisboa, Portugal, 1996.

SANDERS, R. H. - **Lifting Performance in Aquatic Sports.**
Cowan University, Joondalup, Western Austrália. 1998, p. 25-39.

SANDERS, R. H.; KENDAL, S. J.; - **A Description of Olympic Flatwater Kayak Stroke Technique.** *Australian Journal Science and Medicine in Sports* 24(1): 25:30, 1992.

SHEPHARD, R. J. - **Science and medicine of canoeing and kayaking.** *Sports Medicine* 1987, 4, p. 19-33.

SPERLICH, Jurgen and BAKER, John. **Biomechanical Testing In Elite Canoeing.**
Australian Institute of Sport, Canberra, Australia
ISBS 2002, Cáceres – Extremadura - Spain p. 44-47.

STURM, Dennis; YOUSAF, Khurram and ERIKSSON, Martin; - **A kayak training system for force measurement on-water**. Department for medical engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2010 Sweden.

STURM, Dennis; YOUSAF, Khurram and ERIKSSON, Martin. - **A Wireless, unobtrusive Kayak Sensor Network enabling Feedback Solutions**. International Conference on Body Sensor Networks, 2010, p 159-163.

STURM, Dennis; - **Wireless Multi-Sensor Feedback Systems for Sports Performance Monitoring**. Doctoral Thesis, Stockholm, Sweden 2012.

VAUGHAN, John – **Strain Measurements**, Bruel & Kjaer, October 1975, ISBN 87 87355 08 6.

10 - Anexos

Anexo A – Alguns gráficos e ensaios dos Sujeitos não mencionados.

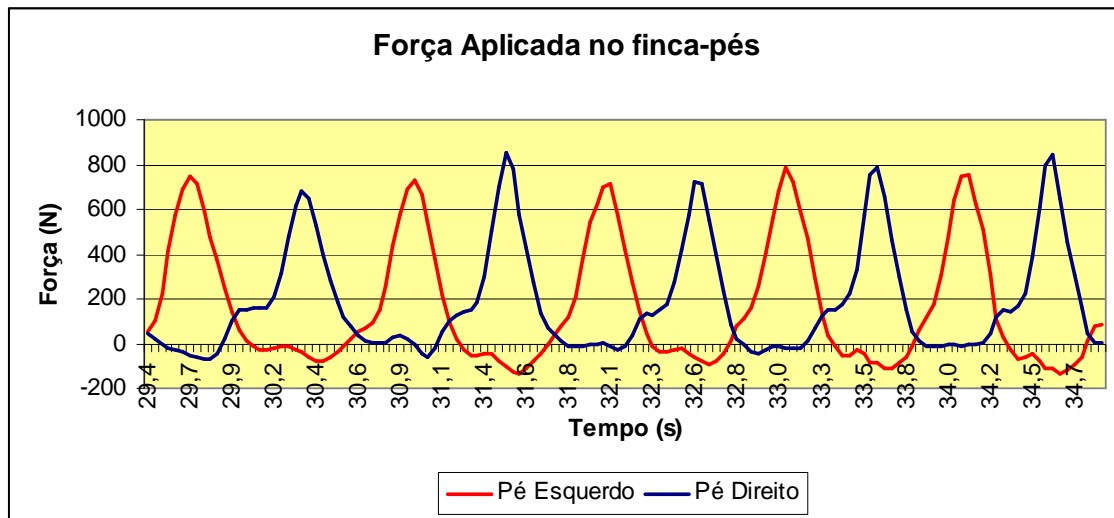


Gráfico 12 – Representação da força aplicada em *sprint* por atleta de nível nacional a uma frequência de 75 pagaiadas por minuto, Sujeito D

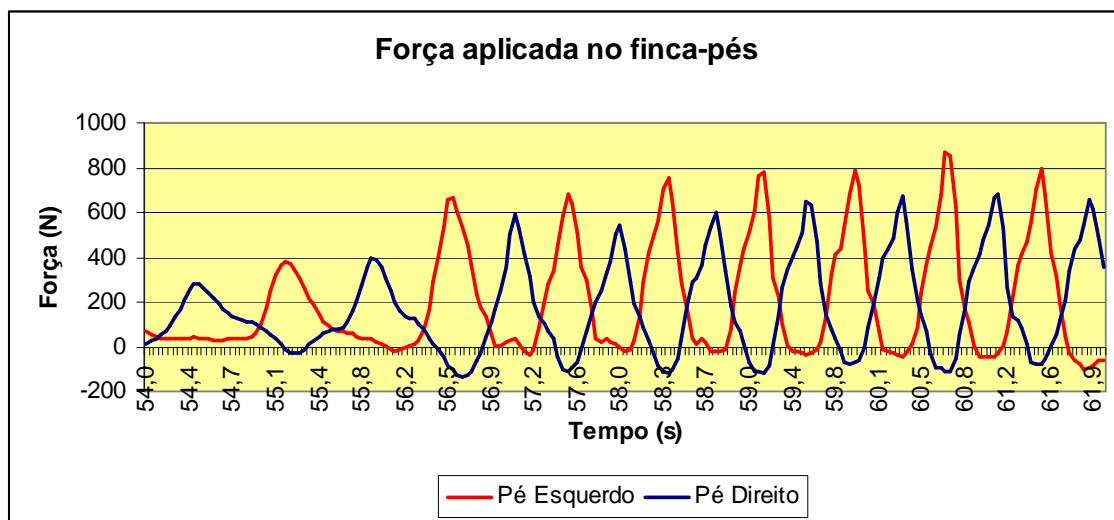


Gráfico 13 – Representação da força aplicada por atleta de nível nacional, com potência de 75W seguido de *sprint*, Sujeito E

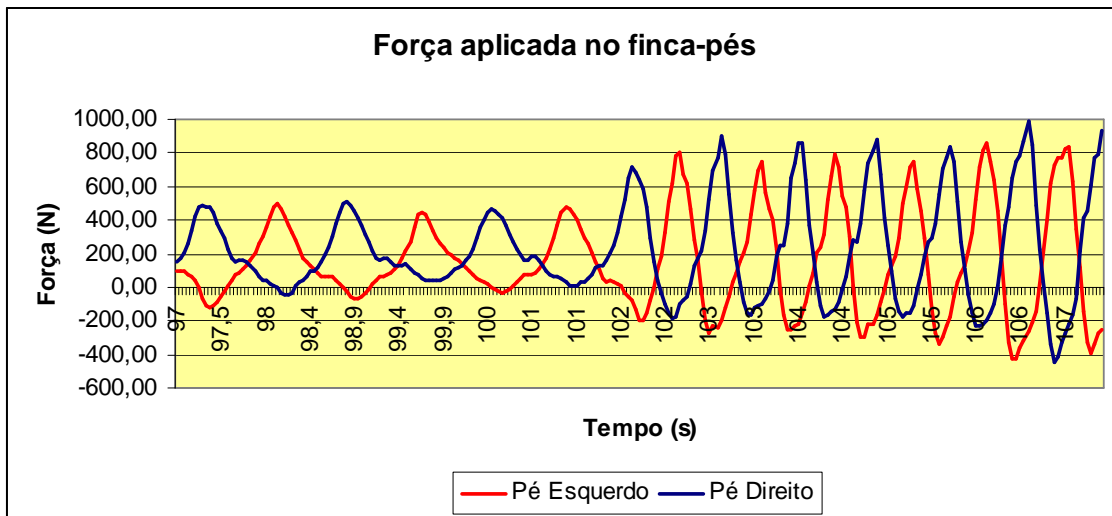


Gráfico 14 – Representação da força aplicada por atleta medalhado olímpico, com potência de 75W seguido de *sprint*, Sujeito F

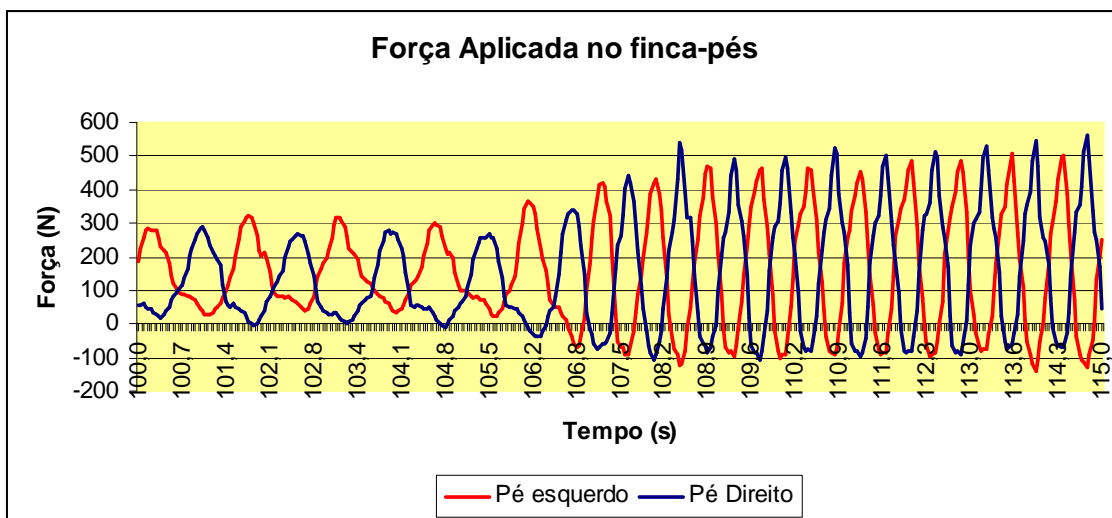


Gráfico 15– Representação da força aplicada por atleta feminina de nível de selecção portuguesa, com potência de 75W seguido de *sprint*, Sujeito G