



João Maria Nunes da Silva Nobre

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Caracterização do comportamento dinâmico de uma raquete de Padel

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor, António Urgueira,
Professor associado, Faculdade de Ciências e
Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2019

Caracterização do comportamento dinâmico de uma raquete de Padel

Copyright © João Maria Nunes da Silva Nobre, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Resumo

Neste trabalho foi realizada uma análise ao comportamento estático e dinâmico de alguns modelos de raquete de Padel. Utilizando conceitos e métodos da Engenharia Mecânica, foi estudado o comportamento dos modelos de raquete e o modo como os diferentes comportamentos alteram a percepção do jogador sobre o respetivo modelo de raquete. Foram estudados vários parâmetros tais como, centro de massa, momentos de inércia e a transferência de energia dada ao longo dos vários pontos da zona de impacto, entre a raquete e a bola. Na determinação destes parâmetros foram utilizados os conceitos de pêndulo composto, pêndulo simples e pêndulo bifilar, assim como o do coeficiente de restituição aparente. Cada um destes parâmetros possui um efeito diferente sobre o comportamento da raquete, que pode ter uma vertente mais de “Potência”, ou de “Controlo”. Estes parâmetros alteram a sensação do jogador sobre o modelo de raquete, sendo utilizados dois conceitos principais para descrição do seu comportamento, como a “Potência” e o “Controlo”. Foi realizada uma modelação teórica do modelo da raquete de Padel, para obter resultados das suas propriedades inerciais.

Palavras chave: Centro de massa, Momentos de inércia, pêndulo composto, pêndulo simples, pêndulo bifilar, coeficiente de restituição aparente, Potência e Controlo.

Abstract

In this study an analysis was performed to the static and dynamic behavior of some Padel racket models. Using concepts and methods of Mechanical Engineering, we studied the behavior of racket models and how different behaviors can change the player's perception of their racket model. Several parameters were studied, such as, center of mass, moment of inertia and energy transfer between the ball and racket along several impact points of the racket. To determine these parameters we used concepts such as compound pendulum, simple gravity pendulum and bifilar pendulum and also the coefficient of apparent restitution. These parameters alter the player's feeling about the racket model, using two main concepts to describe its behavior, such as "Power" and "Control". The inertial properties of Padel racket models as well as their dynamic impact response were studied. A numerical modeling of the Padel racket model was created to obtain results of its inertial properties.

Keywords: Center of mass, moment of inertia, compound pendulum, simple gravity pendulum, bifilar pendulum, coefficient of apparent restitution, Power and Control.

Agradecimentos

Na elaboração desta dissertação gostaria, particularmente, de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor António Urgueira, por ter aceite este desafio proposto por mim. Agradecer pela motivação dada ao longo do estudo, pelas ideias, orientação e pela amizade desenvolvida. Agradecer-lhe também pela disponibilização do Laboratório de Mecânica Estrutural e pelos equipamentos utilizados neste trabalho.

Ao Professor Tiago Silva, Professor Auxiliar pela ajuda prestado na criação do modelo teórico, e pelo tempo despendido.

Agradecer ao meu grande amigo, Rodrigo Correia, pela contribuição no aumento do número de amostras estudadas, pela amizade e apoio. A todos os amigos que de alguma maneira estiveram relacionados comigo durante este tempo.

Um obrigado especial aos meus pais, pelo apoio, motivação e acima de tudo paciência durante não só este trabalho, como durante toda a minha formação.

Ao meu irmão, Sebastião Nobre, pelo apoio prestado nos ensaios, nas ideias e na montagem.

Por fim um obrigado á minha menina Jessica Gomes, pelo apoio, motivação, paciência e pela ajuda em algumas ilustrações presentes neste trabalho. Um beijinho!

Obrigado a todos, forte abraço!

Cumprimentos,

João Maria Nobre

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de tabelas	xiii
1. Introdução	1
1.1. Introdução e motivação	1
1.2. Considerações sobre a raquete e a bola.....	2
1.3. Principais parâmetros da raquete	4
1.4. Objetivo	6
1.6. Estado de Arte.....	8
2. Determinação das propriedades inerciais	11
2.1. Modelação teórico.....	11
2.2. Estudo experimental.....	13
2.2.1. Massa e distribuição da massa	13
2.2.2. Momentos de inércia.....	15
2.2.2.1 Momentos J_{xx} e J_{zz}	17
2.2.2.2 Momento J_{yy}	21
2.2.3 Cálculo do momento de inércia.....	22
2.2.3.1 Raquete 1 (Dunlop Blast [Gama pro] 2017)	22
2.2.3.2 Raquete 2 (Nox ML Attack Pro P.1.).....	24
2.2.3.3 Raquete 3 (Bullpadel Vertex Avantline 2017)	26
2.2.3.4 Raquete 4 (Bullpadel Vertex Tournament 2015)	27
2.2.3.5 Raquete 5 (Bullpadel Vertex 2 Proline 2017)	29
2.2.3.6 Raquete 6 (Wilson Force Lite).....	30
2.2.4 Comparação resultados teóricos e práticos (Raquete 2).....	32
3. Determinação da resposta dinâmica	35
3.1. Conceitos mais relevantes	35
3.1.1 Coeficiente de Restituição Aparente – ACOR	37
3.2. Estudo experimental.....	40
3.2.1 Pontos de impacto estudados	40
3.2.2 Nox ML Attack pro P.1. – Raquete equilibrada.....	41
3.2.2.1 Ensaio pontos de impacto nos eixos centrais (18 pontos).....	41
3.2.2.2 Ensaio malha total dos pontos (45 pontos)	45
3.2.2.3 Mapa de distribuição valores ACOR – Surfer®	47
3.2.2.4 Comparação de valores ACOR ao longo do eixo Y	50
3.2.2.5 Comparação de valores ACOR ao longo do eixo Y	52
3.2.3 Wilson Force Lite – Raquete de controlo	56
3.2.3.1 Ensaio pontos de impacto nos eixos centrais (18 pontos).....	56
3.2.3.2 Ensaio malha total dos pontos (45 pontos)	60

3.2.3.3	Comparação de valores ACOR segundo o eixo Y.....	63
3.2.3.4	Comparação de valores ACOR segundo o eixo X	65
3.2.4	Bullpadel Vertex Tournament 2015 – Raquete de potência	68
3.2.4.1	Ensaio pontos de impacto nos eixos centrais (18 pontos)	68
3.3.	Comparação entre as raquetes estudadas	73
4	<i>Conclusão</i>	79
4.1.	Conclusões	79
4.2	Trabalhos futuros	80
5.	<i>Referências e Bibliografia</i>.....	81

Lista de Figuras

Figura 1.1- Ilustração de um campo de Padel	1
Figura 1.2- Nomenclatura das diferentes zonas da raquete	2
Figura 1.3- Nomenclatura das diferentes zonas da raquete (2)	2
Figura 1.4- Bola Head Pro	3
Figura 1.5- Bola Head Pro S	3
Figura 1.6- Diferenças existentes na forma das raquetes e respetiva localização do centro de massa	4
Figura 2.1- Modelo teórico e identificação do centro de massa	11
Figura 2.2- Modelo teórico SOLIDWORKS®	11
Figura 2.3- Punho e ponto de origem do referencial	11
Figura 2.4- Dados SOLIDWORKS	13
Figura 2.5- Balança de precisão	13
Figura 2.6- Nox ML, sistema de eixos e origem do referencial	13
Figura 2.7- Perfil Triangular e eixo perpendicular ao perfil	14
Figura 2.8- Perfil triangular para medição CM	14
Figura 2.9 - Ensaio para localização do CM	14
Figura 2.10- Simetria corpo 2D	17
Figura 2.11- Sistema de eixos e distâncias relevantes	18
Figura 2.12- Montagem determinação Jzz	18
Figura 2.13- Montagem determinação Jxx	18
Figura 2.14- Conceito teórico ensaio bifilar	21
Figura 2.15- Montagem para medição Jyy	21
Figura 3.1- Identificação das três definições Sweet Spot	35
Figura 3.2- Ilustração efeito de impacto, COP	36
Figura 3.3- Ilustração do comportamento da raquete após impacto em 3 zonas	36
Figura 3.4- Ilustração de ensaio para determinação ACOR	38
Figura 3.5- Montagem para ensaios da raquete em modo Livre	39
Figura 3.6 - Montagem para ensaios da raquete em modo Encastrado	40
Figura 3.7- Distribuição de pontos de impacto (18)	40
Figura 3.8- Pontos de impacto testados (49)	41
Figura 3.9 - Distribuição pontos impacto Nox (18)	42
Figura 3.10- Nox- Gráfico de valores ACOR - Livre	42
Figura 3.11 - Nox – Gráfico de valores ACOR - Encastrado	43
Figura 3.12- Nox - Comparação valores ACOR em ambos os modelos de ensaio	44
Figura 3.13- Nox - Distribuição pontos de impacto (45)	45
Figura 3.14- Nox - Gráfico dos valores de ACOR - Livre e Encastrado	46
Figura 3.15 - Pontos fronteira de valor ACOR=0	48
Figura 3.16- Imagem de Surfer® - Mapa de distribuição dos valores de ACOR - Livre	48
Figura 3.17- Imagem de Surfer® - Mapa de distribuição dos valores de ACOR - Encastrado	49
Figura 3.18 - Nox- Distribuição pontos de impacto para comparação ao longo do eixo Y	50
Figura 3.19- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Livre	51

Figura 3.20- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Encastrado	52
Figura 3.21- Nox - Distribuição dos pontos de impacto para comparação ao longo do eixo X	53
Figura 3.22- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Livre	54
Figura 3.23- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Encastrado	55
Figura 3.24- Distribuição pontos impacto Wilson (18).....	56
Figura 3.25- Wilson - Gráfico de valores ACOR - Livre.....	57
Figura 3.26- Wilson- Gráfico de valores ACOR – Encastrado	59
Figura 3.27- Wilson - Comparação de valores ACOR em ambos os modelos de ensaio	60
Figura 3.28- Wilson - Distribuição pontos de impacto (45).....	60
Figura 3.29- Wilson - Distribuição pontos de impacto para comparação ao longo do eixo Y	63
Figura 3.30- Wilson- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Livre..	64
Figura 3.31- Wilson- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Encastrado	65
Figura 3.32- Wilson - Distribuição dos pontos de impacto para comparação ao longo do eixo X	66
Figura 3.33- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Livre	67
Figura 3.34- Wilson- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Encastrado	68
Figura 3.35- Distribuição pontos impacto Bullpadel (18).....	69
Figura 3.36- Bullpadel - Gráfico de valores ACOR - Livre.....	70
Figura 3.37- Bullpadel - Gráfico de valores ACOR - Encastrado.....	72
Figura 3.38 - Bullpadel - Comparação de valores ACOR em ambos os modelos de ensaio	73
Figura 3.39- Distribuição pontos impacto para comparação de raquetes (18) - Livre ...	74
Figura 3.40– Gráfico de comparação valores ACOR entre raquetes – Livre.....	75
Figura 3.41- Distribuição pontos impacto para comparação de raquetes (18) - Encastrado	76
Figura 3.42– Gráfico de comparação valores ACOR entre raquetes - Encastrado	77

Lista de tabelas

Tabela 1.1 - Modelo das raquetes em estudo.....	7
Tabela 2.1- Partes da raquetes e respetivo peso	12
Tabela 2.2- Massa e localização CM das raquetes	15
Tabela 2.3- Distâncias Z e d em que raquetes utilizadas.....	20
Tabela 2.4- Dunlop - Medição ciclos para obter Jxx.....	22
Tabela 2.5- Dunlop - Medição ciclos para obter Jyy.....	23
Tabela 2.6- Dunlop - Medição ciclos para obter Jzz	23
Tabela 2.7- Nox - Medição ciclos para obter Jxx.....	24
Tabela 2.8- Nox - Medição ciclos para obter Jyy.....	25
Tabela 2.9- Nox - Medição ciclos para obter Jzz	25
Tabela 2.10- Bullpapel 2017 - Medição ciclos para obter Jxx	26
Tabela 2.11- Bullpapel 2017 - Medição ciclos para obter Jyy	26
Tabela 2.12- Bullpapel 2017 - Medição ciclos para obter Jzz.....	27
Tabela 2.13- Bullpapel 2015 - Medição ciclos para obter Jxx	27
Tabela 2.14- Bullpapel 2015 - Medição ciclos para obter Jyy	28
Tabela 2.15- Bullpapel 2015 - Medição ciclos para obter Jzz.....	28
Tabela 2.16- Bullpapel Proline 2017 - Medição ciclos para obter Jxx	29
Tabela 2.17- Bullpapel Proline 2017 - Medição ciclos para obter Jyy	29
Tabela 2.18- Bullpapel Proline 2017 - Medição ciclos para obter Jzz.....	30
Tabela 2.19- Wilson - Medição ciclos para obter Jxx	31
Tabela 2.20- Wilson - Medição ciclos para obter Jyy	31
Tabela 2.21- Wilson - Medição ciclos para obter Jzz.....	31
Tabela 2.22 - Resultados CM e Momentos de inércia.....	32
Tabela 2.23- Comparação resultados teóricos e práticos	32
Tabela 3.1 - Nox - Valores ACOR - Livre	42
Tabela 3.2- Nox - Valores ACOR - Encastrado	43
Tabela 3.3- Nox - Comparação de valores ACOR em ambos os modelos de ensaio.....	44
Tabela 3.4 - Nox – Valores ACOR para a malha total do modo livre e encastrado.....	46
Tabela 3.5- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Livre.....	51
Tabela 3.6- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Encastrado.....	52
Tabela 3.7- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Livre.....	53
Tabela 3.8- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Encastrado.....	55
Tabela 3.9- Wilson - Valores ACOR - Livre.....	56
Tabela 3.10- Wilson- Tabela de valores ACOR - Encastrado.....	58
Tabela 3.11- Wilson - Comparação de valores ACOR em ambos os modelos de ensaio	59
Tabela 3.12- Wilson – Valores ACOR para a malha total do modo livre e encastrado .	61
Tabela 3.13- Wilson - Gráfico dos valores de ACOR - Livre e Encastrado	62
Tabela 3.14- Wilson- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Livre .	63
Tabela 3.15- Wilson- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Encastrado	64
Tabela 3.16- - Wilson- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Livre.....	66
Tabela 3.17- Wilson- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Encastrado	67

Tabela 3.18- Bullpadel - Valores ACOR - Livre	70
Tabela 3.19- Bullpadel - Tabela de valores ACOR - Encastrado.....	71
Tabela 3.20- Bullpadel - Comparação de valores ACOR em ambos os modelos de ensaio	72
Tabela 3.21 – Tabela de comparação valores ACOR entre raquetes - Livre	74
Tabela 3.22– Tabela de comparação valores ACOR entre raquetes – Encastrado.....	76

1. Introdução

1.1. Introdução e motivação

O Padel é um desporto de raquetes disputado entre duplas utilizando apenas raquetes e bola.

O espaço de jogo tem 20 metros de comprimentos por 10 metros de largura, com paredes/vidros de fundo e laterais, malhas/redes de metal de fundo e laterais, e ainda uma rede a meio do comprimento e ao longo de toda a largura, como ilustrado na figura 1.1.

O Padel tem como característica principal a interação da bola com as paredes e a malha, o que dificulta à equipa atacante terminar a jogada e facilita à equipa defensora a devolução da bola para ao outro lado da rede.

Como praticante e amante da modalidade o autor achou pertinente a análise e a caracterização do comportamento dinâmico de uma raquete, nas quais se prevê elevada possibilidade de evolução, devido ao facto, de as raquetes de Padel serem causadoras ainda de algumas dores musculares comparativamente com raquetes de ténis. Embora o Padel já exista há algum tempo, apenas recentemente é que teve maior divulgação e tem havido uma grande adesão á modalidade, justificada pela facilidade na aprendizagem técnica em níveis mais baixos e pela sua componente social.



Figura 1.1- Ilustração de um campo de Padel

1.2. Considerações sobre a raquete e a bola

O modelo regulamentar da raquete

Será jogado com a raquete de Padel regulamentar, de acordo com a homologação da Federação Internacional de Padel (FIP). De acordo com a FIP, as medidas máximas são 45,5 centímetros de comprimento, 26 centímetros de largura e 38 milímetros de espessura^[1].

A raquete será perfurada por um número ilimitado de furos de 9 a 13 mm de diâmetro em toda a área central, exemplificado nas figuras 1.2 e 1.3. Em uma área periférica máxima de 4 cm medida a partir da borda externa da lâmina, os furos podem ter outra forma ou tamanho, desde que não afetem a essência do jogo.

A superfície de impacto pode ser plana, lisa ou áspera, não excedendo 30 cm de comprimento e 26 cm de largura. A armação, incluindo a alça, estará livre de objetos acoplados e outros dispositivos, além daqueles usados sozinhos e especificamente para limitar ou impedir a deterioração, vibração e distribuição de peso.

Qualquer objeto ou dispositivo deve ser razoável em medições e posicionamento para tais fins. A raquete não pode ser uma fonte de distração ou aborrecimento para os outros jogadores, por isso não pode ter elementos reflexivos ou sonoros que de alguma forma alterem ou possam alterar o desenvolvimento normal do jogo.

O punho deve ter um comprimento máximo de 20 cm, uma largura máxima de 50 mm, e uma espessura máxima também de 50 mm. É também obrigatório ter um cordão ou pulseira para proteção contra acidentes, tendo este um comprimento máximo de 35 cm.

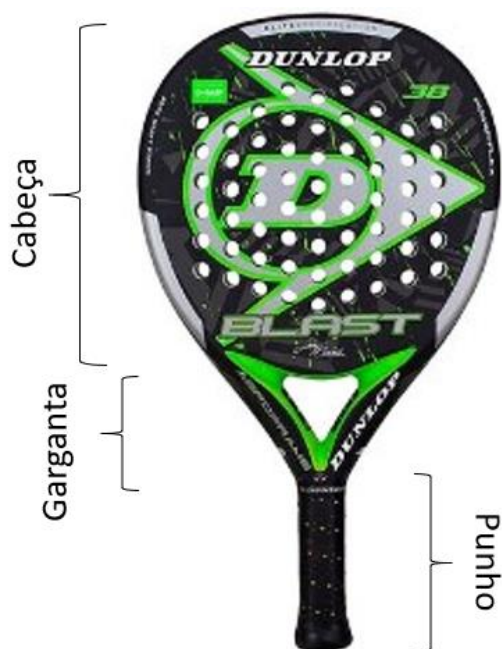


Figura 1.2-Nomenclatura das diferentes zonas da raquete

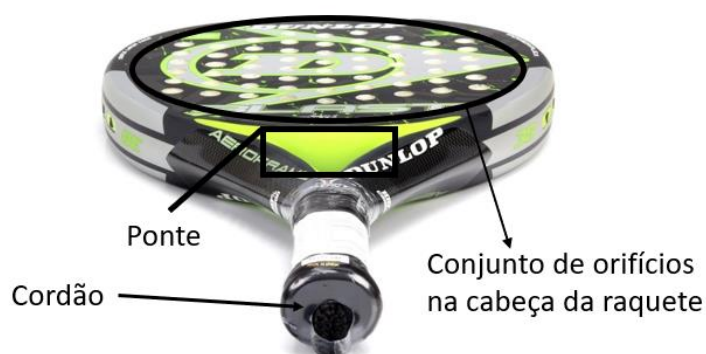


Figura 1.3- Nomenclatura das diferentes zonas da raquete (2)

O modelo regulamentar da bola

No que diz respeito a bola de Padel, já foram alteradas as suas características diversas vezes ao longo dos anos. No entanto, atualmente, existem normas muito bem definidas, que têm de ser respeitadas.

Segundo o regulamento da FIP (Federação Internacional de Padel), a bola deve ser uma esfera de borracha com uma superfície exterior uniforme amarela, em que o seu diâmetro deve ser entre 6,35 cm e 6,77 cm, e o seu peso entre 56,0 e 59,4 gramas.^[1] A bola deve ter um ressalto entre 135 cm e 145 cm quando embate numa superfície dura a uma altura de 2,54 m. A bola deve ter uma pressão interna entre 4,6 kg e 5,2 kg para cada 2,54 cm².

Ao jogar a mais de 500 m de altitude acima do nível do mar, podem ser utilizados outros tipos de bolas, sendo idênticos ao tipo descrito acima, exceto em que o ressalto deve ser maior que 121,92 cm e menor que 135 cm. Oficialmente são utilizados dois tipos de bola, a escolha entre elas tem em consideração a temperatura e altura em relação ao nível do mar, figura 1.4 e figura 1.5 representam os dois tipos de bolas.



Figura 1.5- Bola Head Pro S



Figura 1.4- Bola Head Pro

1.3. Principais parâmetros da raquete

Na análise aos modelos de raquete os parâmetros a estudar vão estar relacionados com várias características dos modelos de raquete, e a comparação entre os resultados das várias amostras irá proporcionar uma melhor percepção da relação entre as propriedades da raquete e as suas características, catalogadas pelos fabricantes.

Existem diversos fatores na composição da raquete que podem influenciar o movimento e consequentemente a velocidade da cabeça da raquete no impacto.

A massa total da raquete afeta a sua maneabilidade global e é um fator predominante na força necessária para o movimento da mesma. A massa é muito importante não só pelo peso em geral da raquete, mas também pela distribuição da mesma em torno dos seus eixos. Esta distribuição terá impacto sobre a localização e os valores do Centro de Massa, deslocando o mesmo de posição e, por consequência, afetando os momentos de inércia.

A distribuição da massa é a principal propriedade que leva à classificação das raquetes em três principais categorias, sendo elas as raquetes de “Potência”, “Controlo” e “Equilibradas”. A principal distinção nestes três tipos, é, a localização do centro de massa, que varia com a distribuição da massa. Na figura 1.6, mostra-se três tipos diferentes de formas de raquete. Quanto mais afastado o CM estiver do punho, maior será o momento de inércia e maior será a velocidade gerada para o impacto.

- Potência tem CM mais afastado do punho
- Controlo tem CM mais próximo do punho
- Equilibrado tem CM num local entre os últimos dois.



Figura 1.6- Diferenças existentes na forma das raquetes e respetiva localização do centro de massa

O comprimento afeta a facilidade com que um atleta executa o golpe. As raquetes mais compridas, em geral, apresentam um momento de inércia mais elevado devido ao facto do seu centro de massa estar mais afastado do seu eixo de rotação. Que por consequência, vai afetar a facilidade com que iniciamos o movimento da raquete.

Em conjunto com o comprimento está relacionado também a dimensão da cabeça da raquete (área de impacto). Esta última, afeta a dimensão do “Sweet spot”, que corresponde ao local “ideal” onde a bola deve impactar na raquete. Quanto maior é a dimensão da cabeça da raquete, maior a área em que se pode dar o impacto com a bola com menor sensação de vibração.

A percepção de um jogador profissional em relação às características da raquete é feita pela sua utilização, com base na experiência de jogo. No entanto, o processo de escolha de uma raquete tem por base estes parâmetros, porque através da sua experiência profissional conseguem “sentir” o peso, a distribuição da massa e os momentos de inércia.

Na zona de impacto existe outro fator determinante para o resultado, sendo este a rigidez desta parte da raquete. Quanto mais deformável é a raquete na zona de impacto, maior quantidade de energia é perdida no impacto, diminuindo a velocidade de saída da bola e também menor será a vibração da raquete no impacto. Uma raquete que se deforma menos quando entra em contacto com a bola perde menos energia na deformação, sendo essa energia transferida para a bola aumentando a velocidade da mesma.

Durante a utilização da raquete existem vários movimentos de translação e rotação, por norma rápidos, de modo a adaptar a raquete da melhor maneira possível para o impacto. A inércia da nossa raquete tem uma grande relevância na rapidez com que é possível, em curtos intervalos de tempo, colocá-la na posição ideal.

Em teoria, a raquete ideal teria uma massa mínima e uma rigidez máxima de modo a transferir a maior quantidade de energia para a bola com o mínimo de esforço. No entanto, para existir maior quantidade de energia é necessário um maior valor de massa e rigidez da raquete, o que vai requerer maior esforço por parte do jogador para manter a mesma aceleração de movimento.

Segundo Cross ^[2], Cross and Bower ^[3], quando considerando a massa e momentos de inércia da raquete, uma mais pesada e com maiores momentos de inércia será mais potente, mas necessita de maior esforço para a manobrar. Raquetes leves e com momentos de inércia baixos são mais manobráveis, mas menos estáveis.

Assim, a raquete ideal é variável consoante o utilizador e as suas características físicas e de jogo, de modo, a conseguir ter o melhor desempenho na sua utilização. Objetivamente deve-se procurar as propriedades físicas que permitam, utilizando as características pessoais, ter um equilíbrio entre potência e controlo de bola.

1.4. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo o estudo de vários modelos de raquete de Padel tentando explicar com base científica o comportamento dinâmico e a influência das várias características que cada uma possui, assim como a influência de cada parâmetro no resultado final.

Inicialmente serão estudadas as propriedades inerciais do corpo rígido de vários modelos de raquetes escolhidos para o estudo. Tentando perceber as diferenças nas suas características estáticas, como na massa, na localização do centro de massa e nos momentos de inércia. Estes resultados serão comparados com os de um modelo teórico que foi produzido para apenas uma raquete em específico.

Após este estudo, é analisada e estudada a resposta dinâmica de uma raquete ao impacto em vários pontos diferentes da raquete. Este estudo foi realizado em duas montagens distintas com diferentes objetivos. Com estes ensaios irá ser possível determinar o ponto de máxima restituição da bola, determinando assim o sweet spot da raquete em estudo. Esta análise não foi feita para todas as amostras como no estudo estático, foram selecionadas três de seis possíveis raquetes.

Cada uma das três raquetes escolhidas continha uma característica diferente, segundo as informações dadas pelas marcas das raquetes.

1.5. Modelos das raquetes em estudo

Para a realização deste trabalho foram utilizados seis modelos de raquetes, distintos e diferentes entre si por forma a obter um conjunto de resultados experimentais interessantes, modelos esses representados na tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Modelo das raquetes em estudo

Nº	Nome/Modelo da Raquete	Imagem
1	Dunlop Blast (Gama pro) 2017	
2	Nox ml attack pro P.1	
3	Bullpadel Vertex Avantline 2017	
4	Bullpadel Vertex Tournament 2015	
5	Bullpadel Vertex 2 Proline 2017	
6	Wilson Force Lite	

Destas seis amostras, nem todas se incluem na mesma categoria de raquete. Na informação dada pelas respetivas marcas, as raquetes classificam-se:

1) Raquetes “Equilibrada”

- a) Nox ml Attack Pro P.1 (Raquete 2)
- b) Bullpadel Vertex Avantline 2017 (Raquete 3)

2) Raquetes “Controlo”

- a) Dunlop Blast (Gama pro) 2017 (Raquete 1)
- b) Wilson Force Lite (Raquete 6)

3) Raquetes “Potência”

- a) Bullpadel Vertex Tournament 2015 (Raquete 4)
- b) Bullpadel Vertex 2 Proline 2017 (Raquete 5)

1.6. Estado de Arte

Na arte do desporto, que é o Padel, ainda não existem, praticamente, estudos científicos em que o objeto de estudo seja, especificamente, a raquete, como acontece com o ténis. Por este motivo foi observado todo o trabalho já realizado sobre corpos rígidos de outros desportos, por forma a conseguir estudar de modo correto e interessante a raquete de Padel.

Na vertente do estudo de raquetes de ténis temos estudos feitos como o de Linder^[4], onde este estuda o comportamento estático da raquete, as cordas, e os efeitos de maior e menor tensão das mesmas, assim como a oscilação após impacto.

Existe ainda o estudo de Spurr, Goodwill, Kelley, and Haake^[5], que é uma análise específica às propriedades inerciais de uma raquete de ténis.

O estudo de Brody, Cross, Lindsey^[6], que se focou no desenvolvimento das raquetes de ténis e nas suas propriedades físicas, concluiu que não existia uma raquete perfeita. Defendia através do seu estudo que para cada atleta com certas características existia uma raquete ideal.

No Baseball também existem estudos ao corpo rígido que é o “Baseball Bat”, como o de Russell^[7], em que estuda os momentos de inércia, a distribuição da massa do mesmo e o seu centro de massa.

Cross, e Nathan^[8], realizaram um estudo mais amplo no que toca a equipamentos desportivos. Estes focaram o seu estudo em duas características para três desportos distintos. Estudaram a influência que a massa e os momentos de inércia têm sobre a velocidade do objeto em que embate, e o swing proporcionado pelo atleta consoante o

tipo de raquete, taco ou bastão que estejam a utilizar. Analisaram assim estes dois parâmetros para raquetes de Ténis, tacos de Baseball e tacos de Golf.

Banwell ^[9], estudou as raquetes de Ténis a um nível de vibrações. O seu estudo consistiu em sujeitar a raquete, suspensa livremente, a um conjunto de situações semelhantes de jogo, medindo assim as suas vibrações. Simulou ainda o efeito de uma raquete na mão do atleta através de alterações de massa no seu modelo de análise, verificando que muitas das vibrações eram reduzidas devido a presença de uma “mão” no punho da raquete.

Após se terem identificado, as principais características analisadas noutros trabalhos já realizados no mesmo âmbito, existiu uma tentativa de estudar um novo objeto, a raquete de Padel, com o objetivo de enriquecer as informações sobre este equipamento. Com o propósito, de ser possível caracterizar e estudar a raquete de Padel, assim como foram estudados outros corpos rígidos, utilizados pelos atletas na prática de vários desportos.

2. Determinação das propriedades inerciais

2.1. Modelação teórica

Para este estudo estático das raquetes de Padel foi elaborado um modelo teórico para avaliar o seu comportamento. Foi utilizado o programa SOLIDWORKS®, para produção deste elemento de estudo.

Embora o presente trabalho seja focado sobretudo nos resultados experimentais e práticos, seria interessante ter um modelo teórico para comparar alguns valores.

Este modelo foi reproduzido através do modelo real, sendo assim, uma aproximação, tornando o modelo teórico num corpo muito semelhante, mas não garantidamente igual.

Na execução do modelo dividiu-se a raquete em três partes com materiais distintos, sendo elas o punho, a cabeça da raquete que corresponde à parte interior da raquete que não consegue ser visualizada, exceto nas paredes laterais dos furos, e a crosta/cobertura da cabeça da raquete que inclui a zona da garganta da raquete e toda a cobertura da cabeça.



Figura 2.2- Modelo teórico SOLIDWORKS®

Na figura 2.2, acima, está uma imagem do modelo teórico pelo seu plano frontal, e na figura 2.1 identificado, com um ponto branco, o centro de massa do modelo teórico.

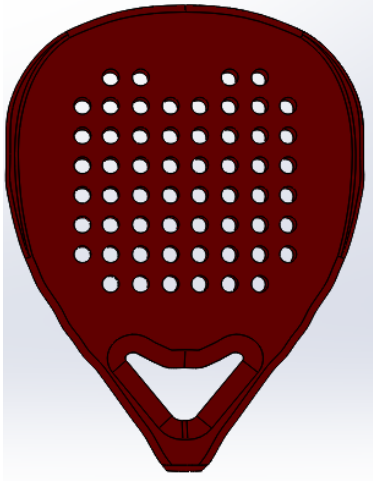
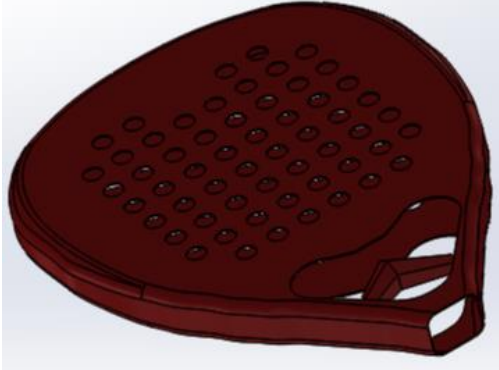
A origem do sistema de eixos utilizado para referência nos cálculos efetuados pelo programa, é o ponto central da base do punho, identificado a branco como mostra a figura 2.3.



Figura 2.3- Punho e ponto de origem do referencial

Na tabela 2.1, foi feita uma separação dos vários corpos em que se subdividiu a raquete de modo a conseguir avaliar individualmente cada um.

Tabela 2.1- Partes da raquetes e respetivo peso

Parte do corpo da raquete	Imagem	Massa (g)
Cabeça da raquete (Goma)		159g
Crosta da cabeça da raquete		99g
Punho		116g

Os resultados de momento de inércia e de centro de massa estão apresentados na figura 2.4.

Mass properties of Raquete Nox SolidWorks Final		
Configuration: Default		
Coordinate system: Origem referencial		
Density varies		
Mass = 0.37407 kilograms		
Volume = 2.0226e+06 cubic millimeters		
Surface area = 0.53314 square meters		
Center of mass: (meters)		
X = 5e-05		
Y = 0.26239		
Z = 2e-05		
Principal axes of inertia and principal moments of inertia(user-overridden): (		
Taken at the center of mass.		
lx = (0.00018, 1, -4e-05)	Px = 0.00146	
ly = (-1, 0.00018, 3e-05)	Py = 0.00756	
lz = (3e-05, 4e-05, 1)	Pz = 0.00895	
Moments of inertia: (kilograms * square meters)		
Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.		
Lxx = 0.00756	Lxy = 0	Lxz = 0
Lyx = 0	Lyy = 0.00146	Lyz = 0
Lzx = 0	Lzy = 0	Lzz = 0.00895
Moments of inertia: (kilograms * square meters)		
Taken at the output coordinate system.		
lxx = 0.03331	lxy = 1e-05	lxz = 0
lyx = 1e-05	lyy = 0.00146	lyz = 0
lzx = 0	lzy = 0	lzz = 0.03471

Figura 2.4- Dados SOLIDWORKS

2.2. Estudo experimental

2.2.1. Massa e distribuição da massa

Dos parâmetros mencionados, existem uns em que a sua obtenção é mais facilitada, como é o caso da massa e da sua respetiva distribuição.

Através da utilização de uma balança de precisão, figura 2.5, existente no Laboratório de Mecânica Estrutural da FCT-UNL, foi efetuada a pesagem dos modelos de raquetes. As pesagens incluíram a raquete juntamente com o cordão de segurança, sem acessórios acoplados ou outros objetos utilizados, ocasionalmente, para complementar a raquete.

Verificou-se que todas as pesagens apresentavam valores coincidentes aos exibidos nos catálogos das respetivas raquetes.



Figura 2.5- Balança de precisão



Figura 2.6-Nox ML, sistema de eixos e origem do referencial

No que diz respeito à distribuição da massa, sabe-se que existem dois planos de simetria e que a massa em ambos os lados é a mesma. Considerou-se assim, que a raquetes são simétricas em relação aos planos YOZ e XOY.

Assumindo os planos de simetria referidos, e o sistema de eixos indicado na figura 2.6, os valores de massa apresentam simetria YOZ e YOX, por este motivo é apenas necessário determinar a coordenada Y do ponto de centro de massa.



Figura 2.7- Perfil Triangular e eixo perpendicular ao perfil

De modo a calcular a coordenada Y do nosso CM foi utilizado um método simples mas fiável e com precisão aceitável. Consistiu este método na utilização de um perfil triangular, figura 2.8, onde foi colocada a raquete de modo ao eixo do perfil ficar perpendicular ao eixo Y da raquete, como apresentado na figura 2.9.



Figura 2.8- Perfil triangular para medição CM



Figura 2.9 - Ensaio para localização do CM

Foi possível a utilização deste método, devido ao facto de o objeto em estudo, ter uma superfície plana, caso contrário não seria possível equilibrar o corpo no perfil de modo a determinar o CM.

Utilizando pequenos ajustes de posição foi descoberto o ponto de perfeito equilíbrio, ponto esse que foi registado com um marcador na própria raquete. Seguidamente, foi

efetuada a medição da distância desse ponto até à base do punho da raquete, sendo esse o valor da coordenada Y do CM.

Na tabela 2.2 tem-se os valores das medições da massa e da coordenada do CM das seis amostras estudadas.

Tabela 2.2- Massa e localização CM das raquetes

Raquete	Massa (kg)	Coordenada Y CM (m)
1	0,374	0,274
2	0,374	0,262
3	0,389	0,262
4	0,389	0,259
5	0,386	0,260
6	0,361	0,258

2.2.2. Momentos de inércia

A inércia rotacional, ou o momento de inércia (MOI), é uma medida de quão difícil é alterar a velocidade de rotação de um objeto que está a girar em torno do seu eixo de rotação. Quanto maior o momento de inércia, mais difícil é alterar a velocidade de rotação do objeto. O valor do MOI depende da massa total do objeto, bem como da maneira como essa massa é distribuída sobre o eixo de rotação. ^[10]

O Momento de Inércia de uma partícula de massa Δm em relação a uma reta (ou eixo) r é definido como $I = \Delta m \cdot d^2$, sendo que d é a distância da partícula ao eixo. Pelo processo de discretização e limites, apropriado às integrais, podemos definir o momento de inércia em relação à reta r de um sólido S , cuja densidade é dada pela função $\delta : S \rightarrow \mathbb{R}$, e denotando a distância de um ponto $P = (x, y, z)$ à reta r por $d_r(x, y, z)$, como sendo a integral. ^[11]

$$I_r = \iiint_S d_r^2(x, y, z) \delta(x, y, z) dx dy dz \quad (2.1)$$

Ou de um modo mais simples, com $dm = \delta(x, y, z) dx dy dz$

$$I_r = \iiint_S d_r^2(x, y, z) dm \quad (2.2)$$

Pela escolha de um vetor unitário como vetor diretor da reta, a função $d_r^2(x, y, z)$ é igual ao quadrado do módulo do produto vetorial de $\vec{v}$ por $\overrightarrow{OP} = (x, y, z) - (0, 0, 0) = (x, y, z)$ ou seja, $d_r^2(x, y, z) = (bz - cy)^2 + (cx - az)^2 + (ay - bx)^2 = a^2(y^2 + z^2) + b^2(x^2 + z^2) + c^2(x^2 + y^2) - 2(abxy + acxz + bcyz)$.

$$I_r = a^2 \iiint_S (y^2 + z^2) dm + b^2 \iiint_S (x^2 + z^2) dm + c^2 \iiint_S (x^2 + y^2) dm - 2ab \iiint_S xy dm - 2ac \iiint_S xz dm - 2bc \iiint_S yz dm \quad (2.3)$$

As integrais, equação 2.4 são os momentos de inércia de S em relação aos eixos coordenado.

$$I_{xx} = \iiint_S (y^2 + z^2) dm, I_{yy} = \iiint_S (x^2 + z^2) dm, I_{zz} = \iiint_S (x^2 + y^2) dm \quad (2.4)$$

As integrais, equação 2.5, 2.6 e 2.7, são os produtos de inércia (de S em relação aos planos coordenados).

$$I_{xy} = I_{yx} = - \iiint_S xy dm \quad (2.5)$$

$$I_{xz} = I_{zx} = - \iiint_S xz dm \quad (2.6)$$

$$I_{yz} = I_{zy} = - \iiint_S yz dm \quad (2.7)$$

A matriz $II = (I_{m,n})_{1 \leq m,n \leq 3}$ é a Matriz de Inércia do sólido S, equação 2.8 (em alguns livros é chamada de tensor de inércia).

$$II = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Observe-se que o momento de inércia em relação à reta r , dada pela equação $(x, y, z) = t\vec{v}$, equação 2.3, pode ser escrito matricialmente como a equação 2.9.

$$I_r = \begin{bmatrix} a & b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Para corpos com dois planos de simetria, o momento de inércia pode ser obtido por integração simples, escolhendo como elemento de massa dm uma fatia delgada perpendicular aos planos de simetria ^[12].

Define-se o produto de inércia de uma figura plana de massa M relativamente aos eixos x e y como a equação 2.10.

$$I_{xy} = \int_M xy dM \quad (2.10)$$

Observe que, I_{xy} pode assumir valores positivos e negativos, equação 2.11.

$$I_{yx} = I_{xy} = \int_M xy dM \quad (2.11)$$

Se uma figura tem pelo menos um eixo de simetria, por exemplo y, então o produto de inércia é nulo.



Figura 2.10- Simetria corpo 2D

Utilizando a figura 2.10, e pela propriedade de adição, obtemos a equação 2.12.

$$I_{xy} = \int_M xy dM = \int_{M'} xy dM' + \int_{M''} xy dM'' = \int_{M'} xy dM' + \int_{M'} -xy dM' = 0 \quad (2.12)$$

Existem ainda duas distintas definições de simetria, a simetria material e a simetria geométrica.

Segundo Mesquita ^[13], a simetria material existe quando um ponto, eixo ou plano e cujas partes geometricamente simétricas têm massas específicas iguais. Um corpo que possua simetria material terá o centro de massa no elemento espelho.

A simetria geométrica existe se um ponto, suponhamos, P corresponde um ponto P' tal que o segmento PP' seja ortogonal ao elemento “espelho”. Um corpo que possua simetria geométrica terá o centroide no elemento espelho.

2.2.2.1 Momentos J_{xx} e J_{zz}

Dado que o cálculo analítico do momento de inércia para corpos com geometrias complexas apresenta elevada dificuldade, optou-se por colocar o corpo rígido, em estudo, a oscilar em torno de vários eixos. Medindo os seus períodos de oscilação, é possível calcular o valor de J através das equações para o pêndulo composto e o pêndulo bifilar.

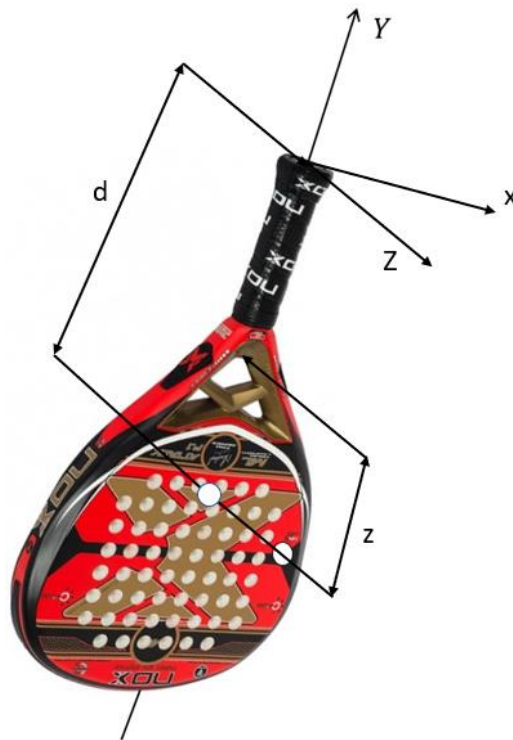


Figura 2.11- Sistema de eixos e distâncias relevantes

Um pêndulo composto é um sistema em que um corpo rígido oscila em torno eixo de rotação que passe pelo seu centro de massa, ou seja, em torno de um eixo fixo, pela ação da força gravitacional.

Utilizou-se este método, Urgueira^[14], com montagem para determinar os momentos de inércia segundo o eixo X, figura 2.13 e com montagem para o eixo Z, figura 2.12.



Figura 2.13- Montagem determinação J_{xx}



Figura 2.12- Montagem determinação J_{zz}

A equação de equilíbrio de um pêndulo composto é a equação 2.13.

$$J_0 \ddot{\theta} + mgd \sin(\theta) = 0 \quad (2.12)$$

Sendo que:

- J_0 = momento de inércia em relação ao eixo de rotação.
- $mgd \sin(\theta)$ = momento de restituição.

Para ângulos de rotação pequenos podemos aproximar que $\sin(\theta) = \theta$, obtendo, equação 2.14.

$$J_0 \ddot{\theta} + mgd \theta = 0 \quad (2.13)$$

Sabemos então que a frequência natural é dada pela equação 2.15.

$$\omega_n = 2\pi f = \frac{2\pi}{T_n} = \sqrt{\frac{mgd}{J_0}} \quad (2.14)$$

- T_n = período de oscilação.

Logo:

$$J_0 = \frac{mgd}{\omega_n^2} = \frac{T_n^2 mgd}{4\pi^2} \quad (2.15)$$

O Teorema dos Eixos Paralelos é um teorema que permite calcular o momento de Inércia de um corpo rígido relativo a um eixo de rotação que passa num ponto O quando são conhecidos o momento de inércia relativo a um eixo paralelo ao anterior (que passa pelo centro de massa do sólido) e a distância entre os eixos, através da equação 2.17.

$$J_z = J_{CM} + md^2 \quad (2.16)$$

- J_{CM} = momento de inércia do corpo sobre o centro de massa.
- d = distância perpendicular entre os dois eixos.

Nem todas as amostras permitiram a mesma montagem de medição para os ciclos de tempo de oscilação no eixo Z.

Nas amostras 5 e 6 devido à impossibilidade de realizar o ensaio de forma a manter a oscilação estável foi alterada a montagem. Colocou-se o modelo de raquete a oscilar em torno de um eixo Z a uma distância d do centro de massa, semelhante à da montagem para

medição dos ciclos de tempo de oscilação do eixo X, mas com a orientação da vara metálica alinhada com o eixo Z.

As distâncias Z e d, referidas na tabela 2.3, encontram se representadas na figura 2.11. Foram assim utilizadas estas duas situações para determinação de J_{zz} .

Tabela 2.3- Distâncias Z e d em que raquetes utilizadas

Raquete	Medida utilizada J_{zz}
1	Z
2	Z
3	Z
4	Z
5	d
6	d

2.2.2.2 Momento J_y

Para calcular o momento de inércia segundo o eixo y , recorreremos à teoria do pêndulo bifilar de Fauteux-Brandt ^[15].

Foram utilizados dois fios de nylon, que foram colados à raquete de maneira simétrica em relação ao eixo de simetria Y , figura 2.15.

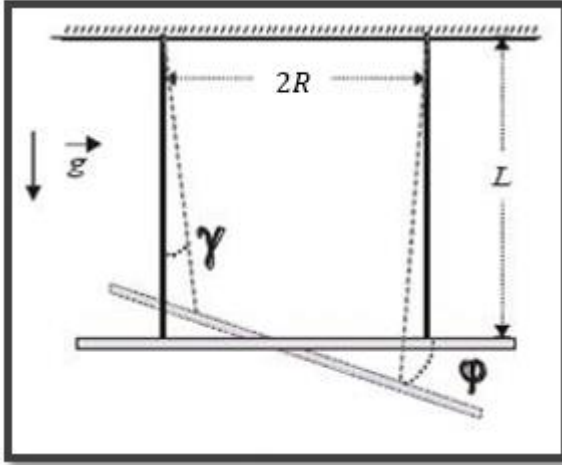


Figura 2.14- Conceito teórico ensaio bifilar



Figura 2.15- Montagem para medição J_y

Neste caso, a raquete é colocada a oscilar em torno do eixo y , que passa pelo seu centro de massa. O corpo está a ser suportado por dois fios equidistantes do eixo de rotação (R) e ambos os fios têm o mesmo comprimento (L).

Considerando o ângulo φ da figura 2.14 como o nosso ângulo θ , a equação de equilíbrio do pêndulo bifilar é a equação 2.18.

$$J_y \ddot{\theta} + Mr = 0 \quad (2.17)$$

- Mr = momento de restituição:

$$Mr = \frac{mgR^2 \sin(\theta)}{L \cos(\gamma)} \quad (2.18)$$

- Para ângulos θ e γ pequenos, obtém-se a equação 2.20.

$$\omega_n = 2\pi f = \frac{2\pi}{T_n} = \sqrt{\frac{mgR^2}{J_y L}} \quad (2.19)$$

Então:

$$J_y = \frac{T_n^2 R^2 m g}{4\pi^2 L} \quad (2.20)$$

2.2.3 Cálculo do momento de inércia

O cálculo dos valores de momento de inércia, das seis amostras foram obtidos do mesmo modo.

2.2.3.1 Raquete 1 (Dunlop Blast [Gama pro] 2017)

Dados:

- $z = 0.124$ metros
- $d = 0.274$ metros
- $L = 0.338$ metros
- $m = 0.374$ quilogramas
- $2R = 0.110$ metros

Tabela 2.4- Dunlop - Medição ciclos para obter J_{xx}

Eixo X			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	23.18	23.1	23.09
Período [s]	1.159	1.115	1.1545
Média [s]	1.1562		
Desvio [s]	0.0028	- 0.0012	-0.0017
Desvio padrão da amostragem [s]	0.002466		

Explicando os dados da tabela 2.4, o “Tempo”, tem o valor, em segundos, de 20 ciclos de oscilação. Quanto mais ciclos de oscilação forem utilizados, menor será o erro de medição de um só tempo de oscilação da raquete em torno do eixo X.

Foram efetuadas as medições de 20 ciclos e posteriormente dividiu-se esse valor por 20 para obter o tempo de ciclo de oscilação de 1 ciclo, em segundos.

Este processo foi realizado 3 vezes para cada amostra por forma a minimizar erros de medição, que se pudessem manifestar no resultado final.

Posteriormente dos 3 valores finais de tempo de oscilação, foi feita uma média, em segundos, sendo esse o valor final utilizado para o tempo de um ciclo de oscilação da raquete.

$$T_{xn} = 1.1562 \text{ s}$$

Tabela 2.5- Dunlop - Medição ciclos para obter J_{yy}

Eixo Y			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	26.87	26.77	26.78
Período [s]	1.3435	1.3385	1.339
Média [s]	1.340		
Desvio [s]	0.0032	- 0.0018	-0.0013
Desvio padrão da amostragem [s]	0.002754		

$$T_{yn} = 1.340 \text{ s}$$

Tabela 2.6- Dunlop - Medição ciclos para obter J_{zz}

Eixo Z			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	20.87	20.81	20.98
Período [s]	1.0435	1.0405	1.049
Média [s]	1.044		
Desvio [s]	-0.0008	-0.0038	0.0047
Desvio padrão da amostragem [s]	0.004311		

$$T_{zn} = 1.044 \text{ s}$$

$$J_x = \frac{T_{xn}^2 \times mgd}{4\pi^2} - md^2 = \frac{1.1562^2 \times 0.374 \times 9.81 \times 0.274}{4\pi^2} - 0.374 \times 0.274^2 \quad (2.21)$$

$$J_x = 0.00596 \text{ kg.m}^2$$

No cálculo do J_{zz} , o valor utilizado como d , distância do centro de massa ao eixo de rotação, é o referido como Z , na figura 2.11.

$$J_z = \frac{T_{zn}^2 \times m g d}{4\pi^2} - m d^2 = \frac{1.044^2 \times 0.374 \times 9.81 \times 0.124}{4\pi^2} - 0.374 \times 0.124^2 \quad (2.22)$$

$$J_z = 0.006818 \text{ kg.m}^2$$

$$J_y = \frac{T_{yn}^2 R^2 m g}{4\pi^2 L} = \frac{1.340^2 \times \left(\frac{0.11}{2}\right)^2 \times 0.374 \times 9.81}{4\pi^2 \times 0.338} \quad (2.23)$$

$$J_y = 0.001494 \text{ kg.m}^2$$

2.2.3.2 Raquete 2 (Nox ML Attack Pro P.1.)

Dados:

- $z = 0.106$ metros
- $d = 0.262$ metros
- $L = 0.314$ metros
- $m = 0.374$ quilogramas
- $2R = 0.110$ metros

Tabela 2.7- Nox - Medição ciclos para obter J_{xx}

Eixo X			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	22.89	23	22.97
Período [s]	1.1445	1.15	1.1285
Média [s]	1.138		
Desvio [s]	-0.0032	0.0023	0.0008
Desvio padrão da amostragem [s]	0.002843		

$$T_{xn} = 1.138 \text{ s}$$

Tabela 2.8- Nox - Medição ciclos para obter J_{yy}

Eixo Y			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	25.4	25.29	25.3
Período [s]	1.27	1.2645	1.265
Média [s]	1.267		
Desvio [s]	0.0035	-0.002	-0.0015
Desvio padrão da amostragem [s]	0.003041		

$$T_{yn} = 1.267 \text{ s}$$

Tabela 2.9- Nox - Medição ciclos para obter J_{zz}

Eixo Z			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	21.29	21.27	21.25
Período [s]	1.0645	1.0635	1.0625
Média [s]	1.064		
Desvio [s]	0.0010	0	-0.001
Desvio padrão da amostragem [s]	0.001		

$$T_{zn} = 1.064 \text{ s}$$

$$J_x = 0.006398 \text{ kg.m}^2$$

$$J_z = 0.00694 \text{ kg.m}^2$$

$$J_y = 0.001436 \text{ kg.m}^2$$

2.2.3.3 Raquete 3 (Bullpadel Vertex Avantline 2017)

Dados:

- $z = 0.115$ metros
- $d = 0.262$ metros
- $L = 0.355$ metros
- $m = 0.389$ quilogramas
- $2R = 0.110$ metros

Tabela 2.10- Bullpadel 2017 - Medição ciclos para obter J_{xx}

Eixo X			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	23.11	22.98	23.11
Período [s]	1.1555	1.149	1.1555
Média [s]	1.153		
Desvio [s]	0.0022	-0.004	0.0022
Desvio padrão da amostragem [s]	0.003753		

$$T_{xn} = 1.153 \text{ s}$$

Tabela 2.11- Bullpadel 2017 - Medição ciclos para obter J_{yy}

Eixo Y			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	28.65	28.44	28.52
Período [s]	1.4325	1.422	1.426
Média [s]	1.427		
Desvio [s]	0.0057	-0.005	-0.0008
Desvio padrão da amostragem [s]	0.005299		

$$T_{yn} = 1.427 \text{ s}$$

Tabela 2.12- Bullpadel 2017 - Medição ciclos para obter Jzz

Eixo Z			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	22.25	22.24	22.22
Período [s]	1.1125	1.112	1.111
Média [s]	1.112		
Desvio [s]	0.0007	0	-0.0008
Desvio padrão da amostragem [s]	0.000764		

$$T_{zn} = 1.112 \text{ s}$$

$$J_x = 0.006985 \text{ kg.m}^2$$

$$J_z = 0.008597 \text{ kg.m}^2$$

$$J_y = 0.001677 \text{ kg.m}^2$$

2.2.3.4 Raquete 4 (Bullpadel Vertex Tournament 2015)

Dados:

- z = 0.109 metros
- d = 0.259 metros
- L = 0.38 metros
- m = 0.389 quilogramas
- 2R = 0.110 metros

Tabela 2.13- Bullpadel 2015 - Medição ciclos para obter Jxx

Eixo X			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	23.09	23.15	22.97
Período [s]	1.1545	1.1575	1.1485
Média [s]	1.154		
Desvio [s]	0.0010	0.004	-0.005
Desvio padrão da amostragem [s]	0.004583		

$$T_{xn} = 1.154 \text{ s}$$

Tabela 2.14- Bullpadel 2015 - Medição ciclos para obter Jyy

Eixo Y			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	29.56	29.46	29.5
Período [s]	1.478	1.473	1.475
Média [s]	1.475		
Desvio [s]	0.0027	-0.002	-0.0003
Desvio padrão da amostragem [s]	0.002517		

$$T_{yn} = 1.475 \text{ s}$$

Tabela 2.15- Bullpadel 2015 - Medição ciclos para obter Jzz

Eixo Z			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	22.43	22.37	22.37
Período [s]	1.1215	1.1185	1.1185
Média [s]	1.120		
Desvio [s]	0.002	-0.001	-0.001
Desvio padrão da amostragem [s]	0.001732		

$$T_{zn} = 1.120 \text{ s}$$

$$J_x = 0.007217 \text{ kg.m}^2$$

$$J_z = 0.008583 \text{ kg.m}^2$$

$$J_y = 0.001675 \text{ kg.m}^2$$

2.2.3.5 Raquete 5 (Bullpadel Vertex 2 Proline 2017)

Dados:

- $z = 0.26$ metros
- $d = 0.26$ metros
- $L = 0.345$ metros
- $m = 0.386$ quilogramas
- $2R = 0.110$ metros

Tabela 2.16- Bullpadel Proline 2017 - Medição ciclos para obter J_{xx}

Eixo X			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	22.99	23.08	23.22
Período [s]	1.1495	1.154	1.161
Média [s]	1.155		
Desvio [s]	-0.0053	-0.001	0.0062
Desvio padrão da amostragem [s]	0.005795		

$$T_{xn} = 1.155 \text{ s}$$

Tabela 2.17- Bullpadel Proline 2017 - Medição ciclos para obter J_{yy}

Eixo Y			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	28.88	28.73	29.04
Período [s]	1.444	1.4365	1.452
Média [s]	1.444		
Desvio [s]	-0.0002	-0.008	0.0078
Desvio padrão da amostragem [s]	0.003464		

$$T_{yn} = 1.444 \text{ s}$$

Tabela 2.18- Bullpadel Proline 2017 - Medição ciclos para obter J_{zz}

Eixo Z			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	23.52	23.52	23.4
Período [s]	1.176	1.176	1.17
Média [s]	1.174		
Desvio [s]	0.002	0.002	-0.004
Desvio padrão da amostragem [s]	0.003464		

$$T_{zn} = 1.174 \text{ s}$$

$$J_x = 0.007165 \text{ kg.m}^2$$

$$J_z = 0.008279 \text{ kg.m}^2$$

$$J_y = 0.001754 \text{ kg.m}^2$$

2.2.3.6 Raquete 6 (Wilson Force Lite)

Dados:

- $z = 0.258$ metros
- $d = 0.258$ metros
- $L = 0.450$ metros
- $m = 0.361$ quilogramas
- $2R = 0.110$ metros

Tabela 2.19- Wilson - Medição ciclos para obter Jxx

Eixo X			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	23	23.16	23.08
Período [s]	1.15	1.158	1.154
Média [s]	1.154		
Desvio [s]	-0.004	0.004	0
Desvio padrão da amostragem [s]	0.004		

$$T_{xn} = 1.154 \text{ s}$$

Tabela 2.20- Wilson - Medição ciclos para obter Jyy

Eixo Y			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	32.52	32.29	32.15
Período [s]	1.626	1.6145	1.6075
Média [s]	1.616		
Desvio [s]	0.01	-0.001	-0.0085
Desvio padrão da amostragem [s]	0.009341		

$$T_{yn} = 1.616 \text{ s}$$

Tabela 2.21- Wilson - Medição ciclos para obter Jzz

Eixo Z			
Número de Oscilações	20		
Medição	1	2	3
Tempo [s]	23.54	23.59	23.46
Período [s]	1.177	1.1795	1.173
Média [s]	1.177		
Desvio [s]	0.0005	0.003	-0.0035
Desvio padrão da amostragem [s]	0.003279		

$$T_{zn} = 1.177 \text{ s}$$

$$J_x = 0.006791 \text{ kg.m}^2$$

$$J_z = 0.008005 \text{ kg.m}^2$$

$$J_y = 0.001575 \text{ kg.m}^2$$

Foram calculadas as propriedades físicas, massa e os três momentos de inércia, dos seis modelos de raquete.

Das quatro incógnitas iniciais, massa, J_{xx} , J_{yy} e J_{zz} , apresentam-se os resultados na tabela 2.22, abaixo.

Tabela 2.22 - Resultados CM e Momentos de inércia

Categoria	Raquete	CM (m)	Jxx [kg,m^2]	Jyy [kg,m^2]	Jzz [kg,m^2]
Controlo	1	0,274	0,00596	0,00149	0,00682
	6	0,258	0,00679	0,00157	0,00801
Equilibrada	2	0,262	0,00640	0,00144	0,00694
	3	0,262	0,00699	0,00168	0,00860
Potência	4	0,259	0,00722	0,00167	0,00858
	5	0,26	0,00717	0,00175	0,00828

2.2.4 Comparação resultados teóricos e práticos (Raquete 2)

Tabela 2.23- Comparação resultados teóricos e práticos

RESULTADOS									
Teóricos (SOLIDWORKS)					Experimentais				
Massa[kg]	CM [m]	Jxx[kg.m^2]	Jyy[kg.m^2]	Jzz[kg.m^2]	Massa[kg]	CM[m]	Jxx[kg.m^2]	Jyy[kg.m^2]	Jzz[kg.m^2]
0,37407	0,26239	0,00756	0,00146	0,00895	0,37400	0,26200	0,00640	0,00144	0,00694

Verifica-se, na comparação dos resultados obtidos pelo modelo teóricos e, pelos ensaios práticos da raquete 2 (Nox ML Attack Pro P.1.), tabela 2.23, uma proximidade de valores.

Contudo, no momento de inércia segundo o eixo Z, existe uma diferença de 22,46% no resultado final. Uma das razões para esta diferença de valores poderá estar na existência de maior valor de massa nas extremidades do modelo teórico da raquete, quer no punho quer na cabeça da raquete. No modelo teórico considera-se o material uniforme ao longo de toda a sua utilização, facto que não se conseguiu corroborar ao longo dos ensaios práticos. Devido ao facto dos valores de massa e centro de massa serem praticamente idênticos, a distribuição da massa ao longo da raquete é o único parâmetro que pode afetar este valor.

Segundo os mesmos argumentos pode ser justificada a discrepância de valores para o momento de inércia segundo o eixo X , que se encontra nos 15,45%. Nesta situação o aumento da massa na extremidade do punho não alteraria o momento de inércia segundo o eixo X , do mesmo modo como alteraria o momento de inércia segundo o eixo Z . Já uma ligeira alteração da distribuição da massa na extremidade da cabeça da raquete, seria suficiente, para obter um valor de momento de inércia segundo o eixo X , superior.

Esta análise aos modelos de raquete de Padel tem como objetivo o estudo por via experimental e não através de modelos teóricos. No entanto foi de interesse ter um modelo teórico para comparação de resultados e verificação de diferenças em relação à via experimental.

3. Determinação da resposta dinâmica

3.1. Conceitos mais relevantes

Sweet spot

O termo “Sweet spot” serve para indicar uma região ideal para a batida da bola. Este termo é aplicado para definir um ponto ou região onde a bola deverá impactar para minorar a energia transferida ao braço do atleta. Todavia não existe consenso quanto à definição física deste conceito, razão pela qual são aceites três definições para esta região, isto é, centro de percussão (COP), máximo coeficiente de restituição (COR) e a linha nodal ^[16], figura 3.1.



Figura 3.1- Identificação das três definições Sweet Spot

Centro de Percussão

O COP é definido como o ponto de impacto para o qual o movimento da raquete tem um centro instantâneo de rotação no centro da pega, isto é, no impacto a velocidade de translação mais rotação da raquete apresenta uma distribuição linear de velocidade cujo centro se situa na pega.

O COP representa a região de impacto da bola com a cabeça da raquete para o qual o movimento de translação e rotação no punho da raquete se anula. A sua utilização depende da distribuição ao longo do eixo Y da massa. O eixo de rotação é designado pelo ponto conjugado em relação à região de impacto, sendo este designado por COP para um determinado eixo de rotação. Este eixo de rotação e o COP constituem um par conjugado de pontos.

A determinação deste ponto, b, pode ser realizada com base no valor do momento de inércia axial no CM, da massa da raquete e da distância do CM ao punho.^[16] Através da equação 3.1, determina-se a distância do CM ao COP.

$$b = \frac{I_{CM}}{a.m} \quad (3.1)$$

A figura 3.2 explicita a que valores corresponde as incógnitas da equação 3.1.

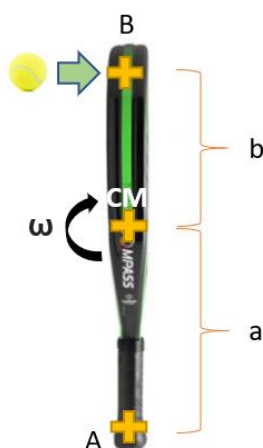


Figura 3.2- Ilustração efeito de impacto, COP

A posição do ponto de impacto é um dos fatores determinantes para a perfeição da pancada, dependentemente da posição, a bola irá provocar uma reação no punho da raquete diferente. A figura 3.3 mostra resumidamente o resultado dessas mesmas reações.

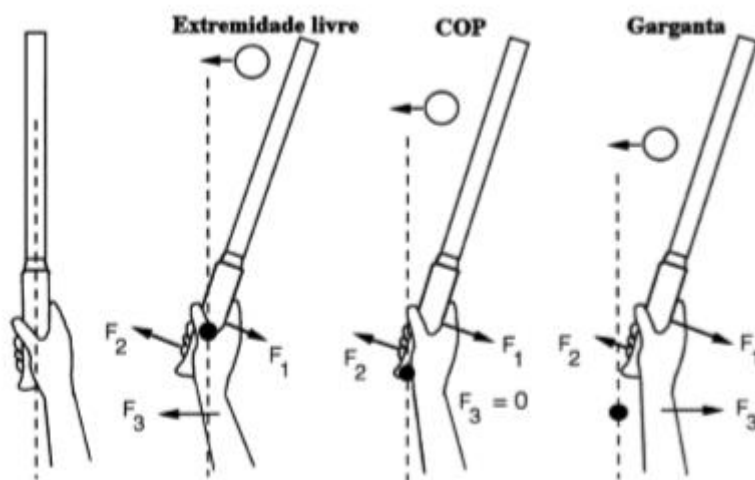


Figura 3.3- Ilustração do comportamento da raquete após impacto em 3 zonas

Fisicamente, o ponto ideal dos três exemplos que estão representados acima, seria aquele em que a região de impacto coincide com o COP. No entanto, os três tipos de impacto são utilizados para situações distintas durante um jogo.

O impacto na extremidade da cabeça da raquete utiliza-se normalmente quando é necessário imprimir também uma rotação à própria bola, o chamado “Top Spin”, para que, tanto no chão como nos vidros do campo, ela ganhe um maior ressaltito. O impacto na extremidade da cabeça da raquete é, portanto, o tipo de impacto mais utilizado para terminar os pontos, simultaneamente utilizando potência e rotação ao golpe, com uma componente tangencial sobre a bola. É maioritariamente utilizado, quando existe necessidade de imprimir uma elevada rotação da bola, de modo a esta ter um maior ressaltito tanto no chão como nos vidros do campo. Também é na extremidade que a velocidade tangencial é maior, o que proporciona também um forte impacto na bola.

Quando o impacto é dado no COP, corresponde ao impacto desejado em 90% das circunstâncias, pelo facto de ser o ponto mais regular e que ajuda o atleta a controlar a bola o melhor possível, tanto no fundo do campo, como à rede.

O impacto que é dado mais perto da garganta da raquete é o mais irregular, utilizado em situações em que é necessário imprimir a máxima velocidade à bola sem qualquer efeito de “top spin”.

Ponto Nodal

Sendo a raquete um corpo elástico, tem capacidade para armazenar e restituir energia na sua deformação. Esta é induzida, ou transmitida, através de trocas energéticas durante os impactos com a bola. Do impacto resultam fenómenos de vibração da raquete que se transmitem ao punho do atleta. Como a excitação é do tipo impulsivo, são ativadas diversas frequências naturais da raquete.

No entanto, estando a vibrar em regime livre há prevalência do modo de mais baixa energia, correspondente à frequência fundamental. Quando a raquete vibra num dos seus modos, há uma redistribuição espacial da energia que tem em conta as suas propriedades de massa e de rigidez. Nestas distribuições surgem regiões de máxima amplitude e outras de amplitude nula, estas últimas designadas por regiões nodais.

Extrapolando esta distribuição para a geometria da raquete, é possível verificar que os dois nodos se situam, na região do punho e na cabeça da raquete. Este último terá grande importância no comportamento vibratório pós-impacto, visto que não será excitado o modo fundamental, sempre que o impacto ocorra nesta região.^[16]

3.1.1 Coeficiente de Restituição Aparente – ACOR

Coeficiente de Restituição Aparente é o parâmetro que representa a transferência de energia da raquete para a bola, é a razão entre a velocidade da bola e a força aplicada pelo praticante.

Este parâmetro relaciona a proporcionalidade direta entre o esforço do atleta e a velocidade da bola. Ou seja, é uma razão de eficiência entre a energia fornecida pelo humano e a quantidade de movimento da bola.

Para medir este coeficiente, que será diferente em vários pontos da raquete, foram utilizadas duas montagens distintas em três das nossas amostras.

O Coeficiente de restituição aparente é calculado com base na equação 3.2, sendo esta uma aproximação, pelo facto de ser desprezável a movimentação após impacto da raquete.

$$ACOR = \sqrt{\frac{1 - \cos(\theta_{final})}{1 - \cos(\theta_{inicial})}} \quad (3.224)$$

Esta equação relaciona o angulo inicial de lançamento da bola e o angulo máximo atingido pela bola após impacto num dos pontos da raquete. Este conceito para medição encontra-se mais explicito na figura 3.4, abaixo.

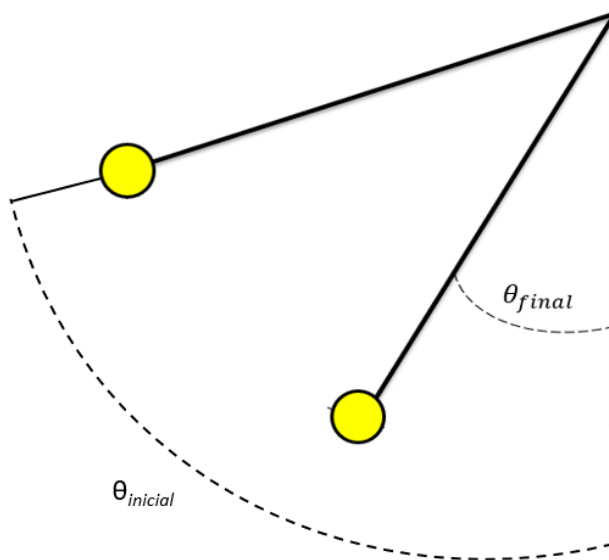


Figura 3.4- Ilustração de ensaio para determinação ACOR

Na realização deste ensaio para determinação do coeficiente de restituição aparente foram realizadas duas montagens distintas. Em ambas as montagens, nos ensaios foram medidos o angulo inicial de largada da bola e o angulo máximo que a bola atingiu após o impacto com a raquete. A bola nem sempre foi largada do mesmo angulo, tendo sido variado num intervalo entre os 25° e os 50°.

A montagem denominada de ensaio livre cujo interesse é analisar a raquete no seu modo natural sem quaisquer influências de fatores exteriores.

A raquete foi suspensa por fios de nylon de forma a simular a condição livre-livre, ver Figura 3.5. Neste ensaio, a posição da bola foi definida por um pêndulo de comprimento variável, ao longo do eixo Y, consoante os pontos de impacto a medir.

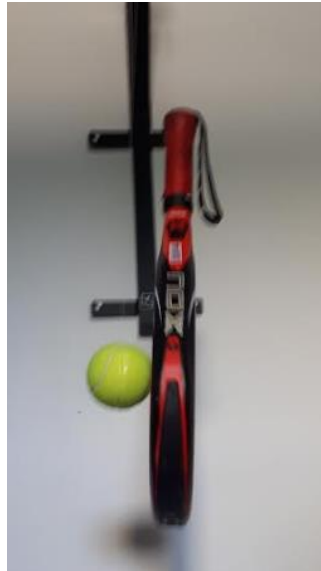


Figura 3.5- Montagem para ensaios da raquete em modo Livre

Na segunda montagem a raquete encontra-se encastrada pelo punho, de modo a simular a pega do atleta. Este encastramento foi efetuado na zona onde se encontram os dedos indicador e polegar. Da mesma maneira que a montagem anterior será largada uma bola em pêndulo de maneira a medir a sua restituição em vários pontos da raquete. O encastramento foi efetuado pela utilização de um fio, de massa desprezável, a uma estrutura de massa suficientemente alta para suportar o impacto dado pela bola na raquete.

A raquete é, portanto, montada na vertical encastrada pelo punho e a bola largada em pêndulo impactando a raquete em diferentes pontos. Neste caso, a velocidade de recuo da raquete é desprezável quando comparada com a razão entre as velocidades da bola. Esta última foi determinada a partir da medição da altura máxima da bola antes e após impacto. Esta montagem tem como objetivo, a simulação da pega na raquete por parte de um jogador.



Figura 3.6 - Montagem para ensaios da raquete em modo Encastrado

Neste estudo, para a determinação do ACOR, foi implementada uma metodologia semelhante à proposta por Wilson ^[17], pensada para uma raquete de ténis que resulta do mesmo modo para uma de Padel.

3.2. Estudo experimental

3.2.1 Pontos de impacto estudados

Em todas estes ensaios foram definidos 18 pontos principais, situados nos eixos X e Y, como mostra a figura 3.6.

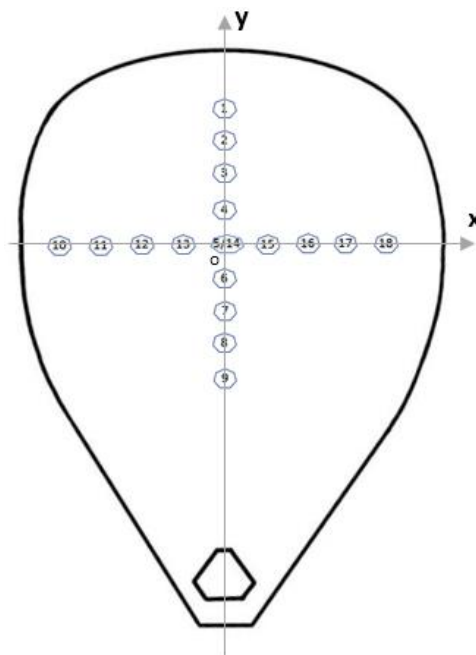


Figura 3.7- Distribuição de pontos de impacto (18)

O ponto 5 representa as coordenadas (0,0) do referencial. Os restantes pontos da raquete estão a uma distância horizontal entre si de 2,2 cm e a uma distância vertical de 2,1 cm.

As montagens referidas, foram aplicadas a três das nossas amostras, Nox ML Attack Pro P.1, Wilson Force Lite e Bullpadel Vertex Tournament 2015.

Para as raquetes Nox ML Attack pro P.1 e Wilson Force Lite foram feitos ensaios a uma malha de pontos ao longo de toda a raquete, pontos esses identificados na figura 3.7.

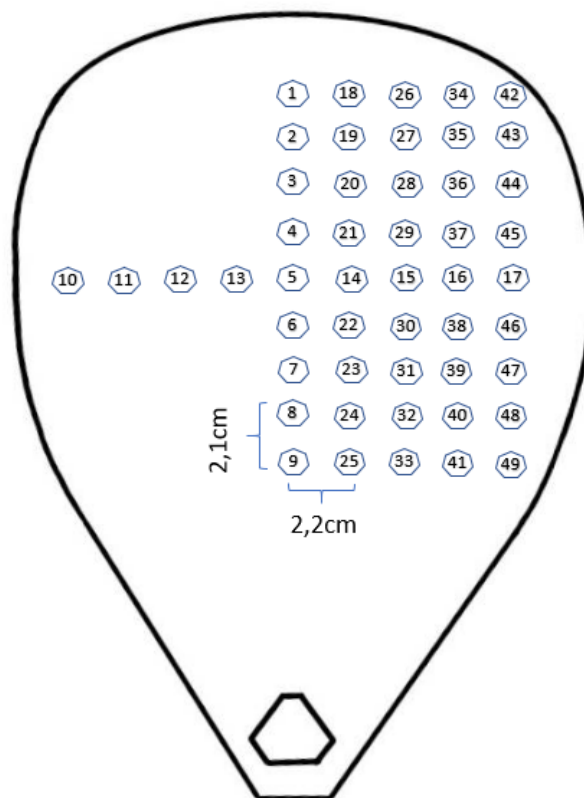


Figura 3.8- Pontos de impacto testados (49)

Inicialmente vão ser analisados os resultados de cada raquete individualmente, para se entender melhor qual o comportamento da bola nos vários pontos de impacto definidos. Posteriormente, iremos comparar os resultados das três amostras experimentadas para analisar as diferenças que existem entre elas.

Durante a apresentação dos resultados irão ser ligeiramente alterados os números dos pontos de impacto por forma a facilitar a interpretação dos mesmos. Cada tabela far-se-á acompanhar de uma figura, de modo a explicitar a que impactos correspondem os valores apresentados.

3.2.2. Nox ML Attack pro P.1. – Raquete equilibrada

3.2.2.1 Ensaio pontos de impacto nos eixos centrais (18 pontos)

Começando pela raquete Nox ML Attack pro P.1. apresentamos os seguintes resultados do ensaio em modo raquete livre, apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Nox - Valores ACOR - Livre

Pontos Impacto	X	Y	ACOR
1	0	8,4	0,22638
2	0	6,3	0,30885
3	0	4,2	0,34108
4	0	2,1	0,45738
5	0	0	0,48717
6	0	-2,1	0,41089
7	0	-4,2	0,36368
8	0	-6,3	0,33098
9	0	-8,4	0,32931
10	-8,8	0	0,16506
11	-6,6	0	0,28837
12	-4,4	0	0,35632
13	-2,2	0	0,41323
14	0	0	0,48717
15	2,2	0	0,45027
16	4,4	0	0,37607
17	6,6	0	0,27315
18	8,8	0	0,17849

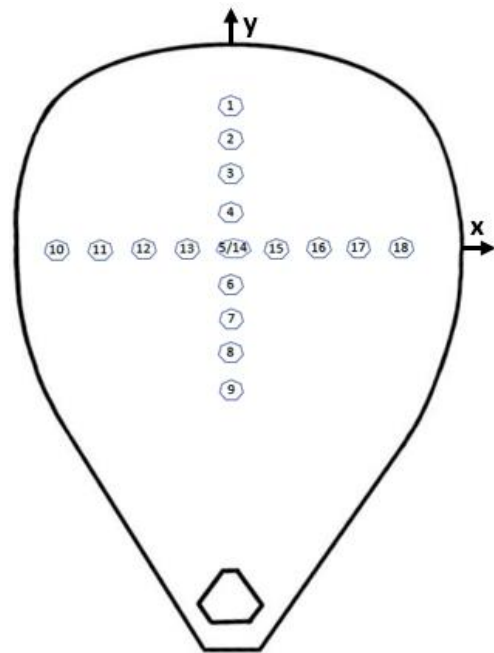


Figura 3.9 - Distribuição pontos impacto Nox (18)

Nestes 18 impactos, representado na figura 3.8, o ponto com maior restituição foi o ponto 5 de coordenadas (0 ,0) com uma razão de 0,48717.

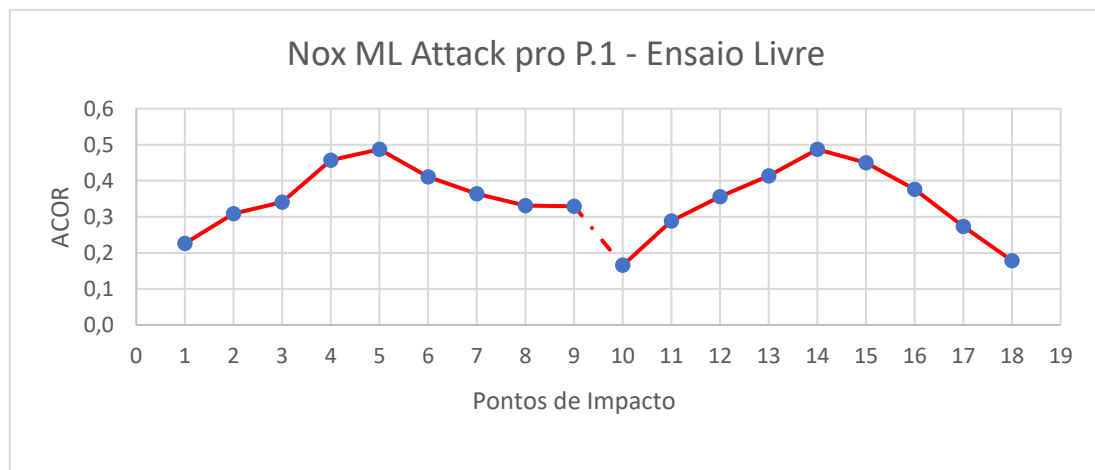


Figura 3.10- Nox- Gráfico de valores ACOR - Livre

Relativamente aos mesmos pontos de impacto, mas com a raquete em modo encastrado, obtiveram-se os resultados apresentados na tabela 3.2

Tabela 3.2- Nox - Valores ACOR - Encastrado

Pontos Impacto	X (cm)	Y (cm)	ACOR
1	0	8,4	0,11398
2	0	6,3	0,20623
3	0	4,2	0,30140
4	0	2,1	0,36368
5	0	0	0,43177
6	0	-2,1	0,68718
7	0	-4,2	0,71153
8	0	-6,3	0,70508
9	0	-8,4	0,49196
10	-8,8	0	0,13221
11	-6,6	0	0,25483
12	-4,4	0	0,29581
13	-2,2	0	0,37016
14	0	0	0,43177
15	2,2	0	0,39466
16	4,4	0	0,30885
17	6,6	0	0,22775
18	8,8	0	0,12384

Neste ensaio o valor máximo de restituição é no ponto 7 de coordenadas (0,-4.2). O ponto 7 é o mais próximo do CM da raquete que se encontra entre os pontos 7 e 8, sendo por isso, nesse local que se apresentam os valores mais elevados de restituição.

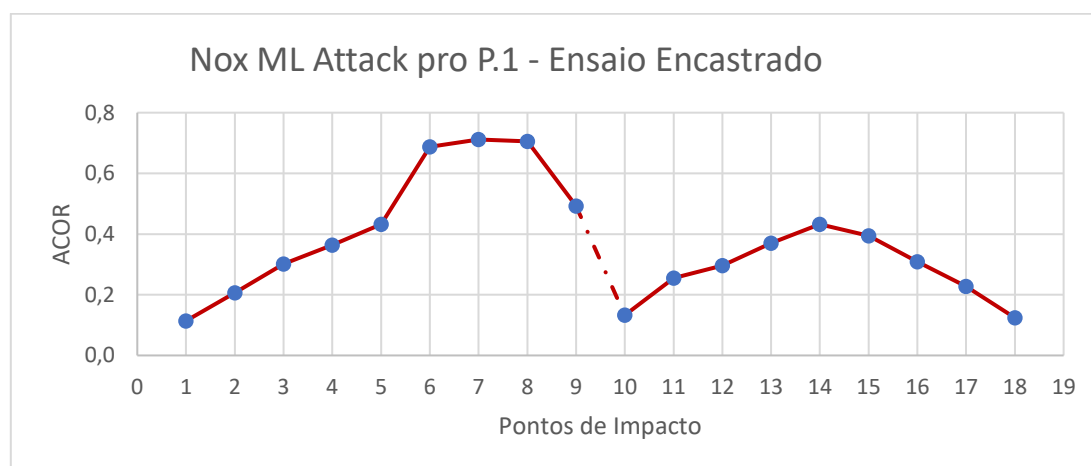


Figura 3.11 - Nox – Gráfico de valores ACOR - Encastrado

Da figura 3.10, é possível identificar uma zona de impacto em que os valores de restituição são muito mais elevados que nos restantes pontos. A zona em que os pontos de impacto estão próximo do centro de massa da raquete são os que apresentam esses valores elevados.

Na ótica de demonstração das diferenças existentes entre valores de ACOR do ensaio em modelo livre e ensaio em modelo encastrado, apresenta-se na tabela 3.3 os valores de ambos os ensaios.

Tabela 3.3- Nox - Comparação de valores ACOR em ambos os modelos de ensaio

Pontos Impacto	Livre	Encastrado
1	0,22638	0,11398
2	0,30885	0,20623
3	0,34108	0,30140
4	0,45738	0,36368
5	0,48717	0,43177
6	0,41089	0,68718
7	0,36368	0,71153
8	0,33098	0,70508
9	0,32931	0,49196
10	0,16506	0,13221
11	0,28837	0,25483
12	0,35632	0,29581
13	0,41323	0,37016
14	0,48717	0,43177
15	0,45027	0,39466
16	0,37607	0,30885
17	0,27315	0,22775
18	0,17849	0,12384

Dos valores da tabela 3.3 acima, foi concebido o gráfico, figura 3.11, da comparação de ambas as curvas de valores.

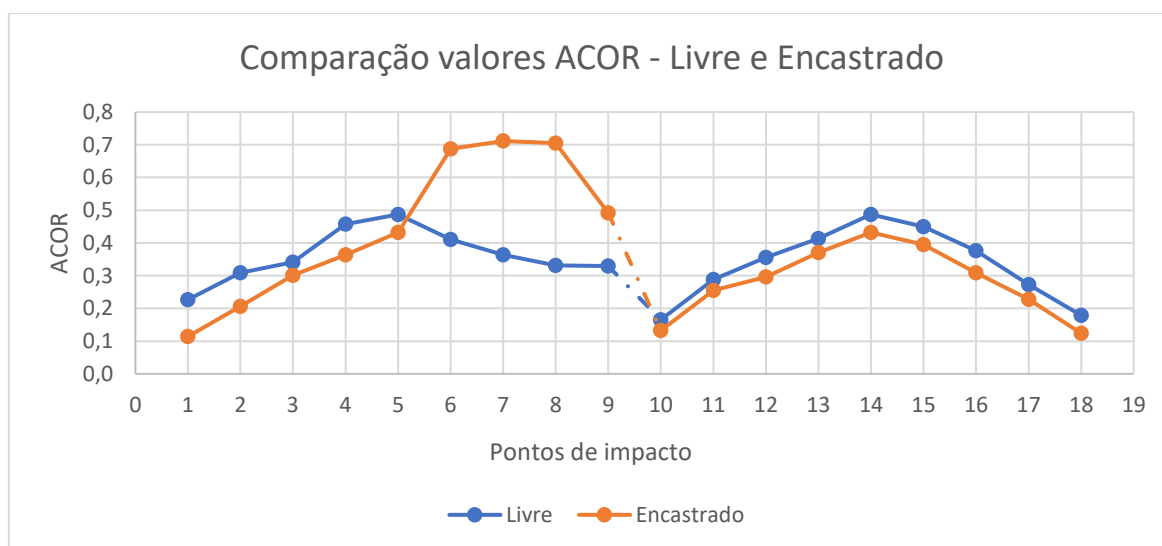


Figura 3.12- Nox - Comparação valores ACOR em ambos os modelos de ensaio

Como seria de esperar, devido ao efeito do encastramento, os valores máximos de ACOR, na montagem em modo encastrado, são aproximadamente 46% superiores aos obtidos no ensaio em modo livre.

3.2.2.2 Ensaio malha total dos pontos (45 pontos)

Como foi referido, anteriormente no estudo, os modelos de raquete foram considerados simétricos segundo o eixo Y, o que facilita os ensaios. É necessário apenas testar um dos lados do modelo de raquete para ser obtida uma aproximação de todos os pontos relevantes ao nosso estudo.

Vai ser utilizada a seguinte distribuição de pontos, como está indicado na figura 3.12.

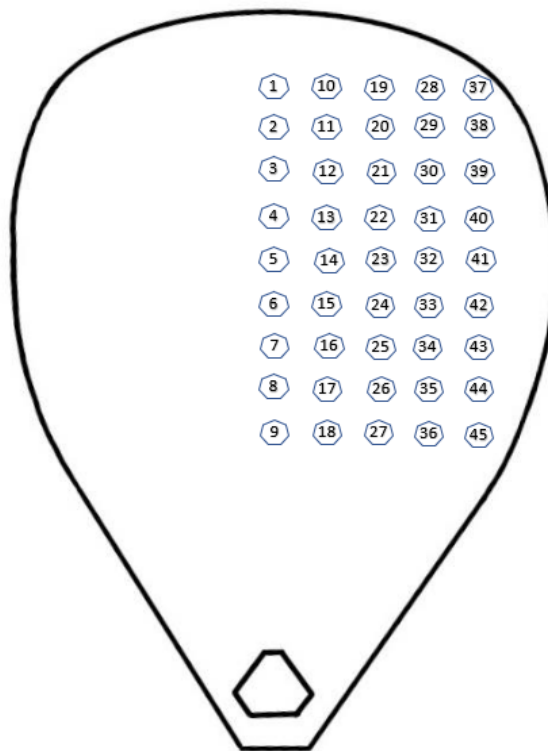


Figura 3.13- Nox - Distribuição pontos de impacto (45)

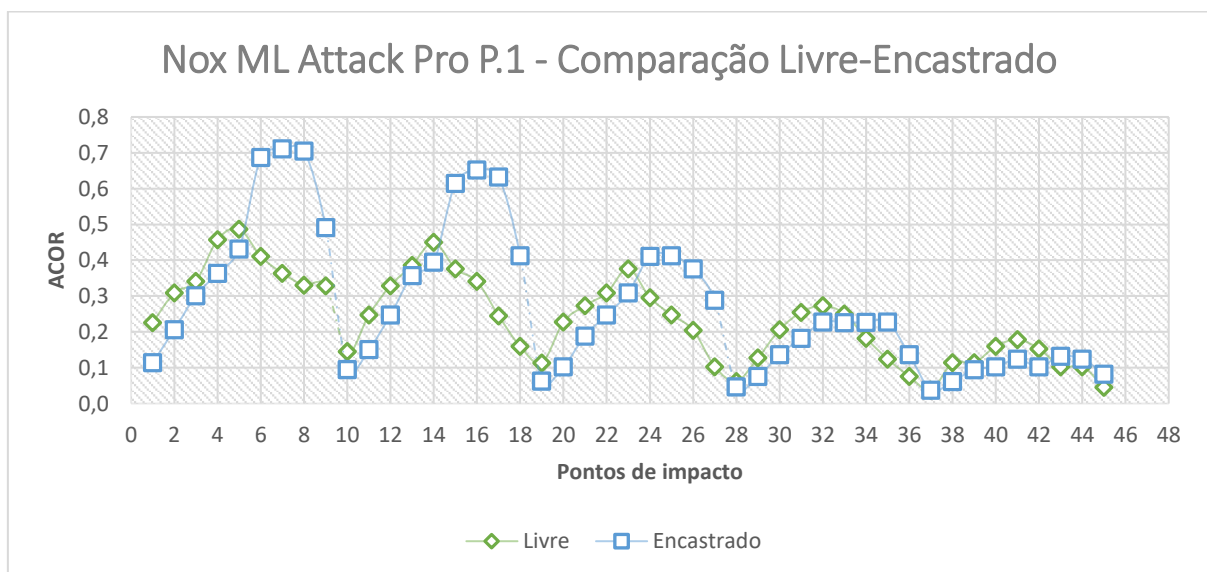
Esta disposição dos pontos irá permitir uma melhor análise dos resultados por forma a identificar padrões e comportamento ao longo da variação das distâncias.

Na tabela 3.4, estão apresentados os valores resultantes de ambas as montagens (Modelo Livre e Modelo Encastrado), na totalidade dos pontos de impacto estudados.

Tabela 3.4 - Nox – Valores ACOR para a malha total do modo livre e encastrado

Pontos Impacto	Livre	Encastrado	Pontos Impacto	Livre	Encastrado
1	0,22638	0,11398	24	0,29581	0,41089
2	0,30885	0,20623	25	0,24734	0,41323
3	0,34108	0,30140	26	0,20502	0,37607
4	0,45738	0,36368	27	0,10321	0,28837
5	0,48717	0,43177	28	0,06194	0,04561
6	0,41089	0,68718	29	0,12753	0,07558
7	0,36368	0,71153	30	0,20623	0,13676
8	0,33098	0,70508	31	0,25483	0,18228
9	0,32931	0,49196	32	0,27315	0,22775
10	0,14445	0,09447	33	0,25046	0,22638
11	0,24734	0,15107	34	0,18228	0,22679
12	0,32931	0,24734	35	0,12384	0,22775
13	0,38624	0,35744	36	0,07558	0,13676
14	0,45027	0,39466	37	0,03780	0,03780
15	0,37607	0,61509	38	0,11398	0,06194
16	0,34108	0,65221	39	0,11398	0,09447
17	0,24516	0,63234	40	0,15953	0,10321
18	0,15953	0,41323	41	0,17849	0,12384
19	0,11334	0,06194	42	0,15302	0,10321
20	0,22775	0,10321	43	0,10321	0,13221
21	0,27315	0,18875	44	0,10321	0,12384
22	0,30885	0,24734	45	0,04561	0,08258
23	0,37607	0,30885			

Verifica-se que à medida que o número do ponto de impacto aumenta, os valores de restituição tendem a diminuir. Este facto indica que quanto mais distantes estão os pontos de impacto do eixo Y, menor o valor de ACOR.



A figura 3.13, representa os valores de restituição, da montagem em modo livre e da montagem em modo encastrado, por forma a comparar as diferenças que existem ao longo dos pontos de impacto. Nesta comparação podem ser observados alguns padrões de interesse.

Notemos como foi referido anteriormente que ambas as linhas têm tendência a diminuir com o afastamento do eixo Y e, por consequência, isso equivale a um menor valor de restituição nas regiões mais afastadas do centro.

É possível também identificar máximos e mínimos relativos em ambas as montagens. O modo livre apresenta um padrão de subida e descida de valores muito regular, em que os pontos máximos de cada ciclo correspondem aos pontos de impacto cuja coordenada em Y tem o valor 0. Apresentando os valores mínimos nas extremidades da raquete, onde os valores da coordenada X são, em valor absoluto, mais elevados, pontos (8.8, y) e (-8.8, y).

No modo encastrado embora ocorram algumas semelhanças com o modo livre, existem também algumas particularidades interessantes de especificar. Assim como no modo livre, também existe no modo encastrado a tendência a diminuir com o afastamento do eixo Y, ou seja, menores valores de restituição para pontos mais afastados do centro da raquete.

No entanto, os máximos relativos existentes neste modelo não correspondem aos mesmo pontos que no modelo livre. Neste caso, o valor máximo corresponde a pontos próximos do CM do modelo de raquete, nomeadamente, aos pontos cuja coordenada Y está entre -2.1 e -6.3. Também se verifica um padrão crescente e decrescente ao longo da linha, no entanto estas subidas e descidas são bastante mais acentuadas que as anteriores. Significando que, no modo encastrado existe maior variação de valores ao longo dos pontos com máximos relativos maiores e mínimos relativos menores.

3.2.2.3 Mapa de distribuição valores ACOR – Surfer®

Foi realizado ainda outra ilustração para representar o comportamento destes dois modelos de montagem e, para expressão dos seus resultados. Para tal foi utilizado um programa com o nome de Surfer®. Este programa foi utilizado para obter um mapa de impactos, cujos valores vão ser expressos por cores, de modo a entender quais as zonas de impacto mais relevantes.

Nesta representação foram introduzidos os 49 pontos de impacto diferentes que experimentamos e ainda tiveram de ser definidas fronteiras. As fronteiras foram definidas como o limite exterior da cabeça da raquete, considerando assim, que estes pontos têm um coeficiente de restituição aparente de valor 0.

Na figura 3.14, estão explícitos os pontos utilizados como valor nulo e de fronteira para introdução de dados no programa Surfer®.

Pontos de Fronteira			
Coordenadas X e Y		Coordenadas X e Y	
0	11,5	-4,4	10,8
0	-11,5	-4,4	-10,6
11,5	0	-6,6	10,4
-11,5	0	-6,6	-9,8
2,2	11,2	-8,8	9,4
2,2	-11,2	-8,8	7,8
4,4	10,8	11,6	2,1
4,4	-10,6	-11,6	2,1
6,6	10,4	11,4	4,2
6,6	-9,8	-11,4	4,2
8,8	9,4	10,9	6,3
8,8	7,8	-10,9	6,3
-2,2	11,2	9,4	8,4
-2,2	-11,2	-9,4	8,4

Figura 3.15 - Pontos fronteira de valor ACOR=0

De modo a obter as isolinhas dos valores de ACOR na figura 3.15, o programa utilizou o método de interpolação Kriging ^[17].

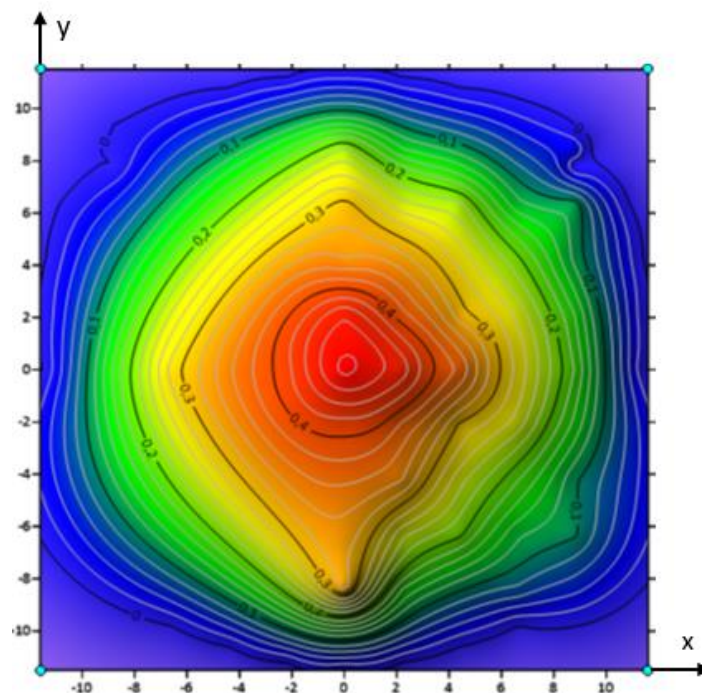


Figura 3.16- Imagem de Surfer® - Mapa de distribuição dos valores de ACOR - Livre

A figura 3.15, acima, representa a distribuição dos valores ACOR na cabeça da raquete, relativa à montagem em modo livre da raquete. A análise da distribuição do ACOR permite entender que as regiões mais centrais da raquete são as que apresentam valores mais elevados, representados a vermelho. Já as extremidades da cabeça da raquete são as que apresentam os valores mínimos de ACOR para este modelo de raquete.

Utilizando o mesmo programa e os mesmos pontos de fronteira foi também obtida uma figura para análise para o modelo de montagem em modo encastrado do mesmo modelo de raquete, ilustrado na figura 3.16.

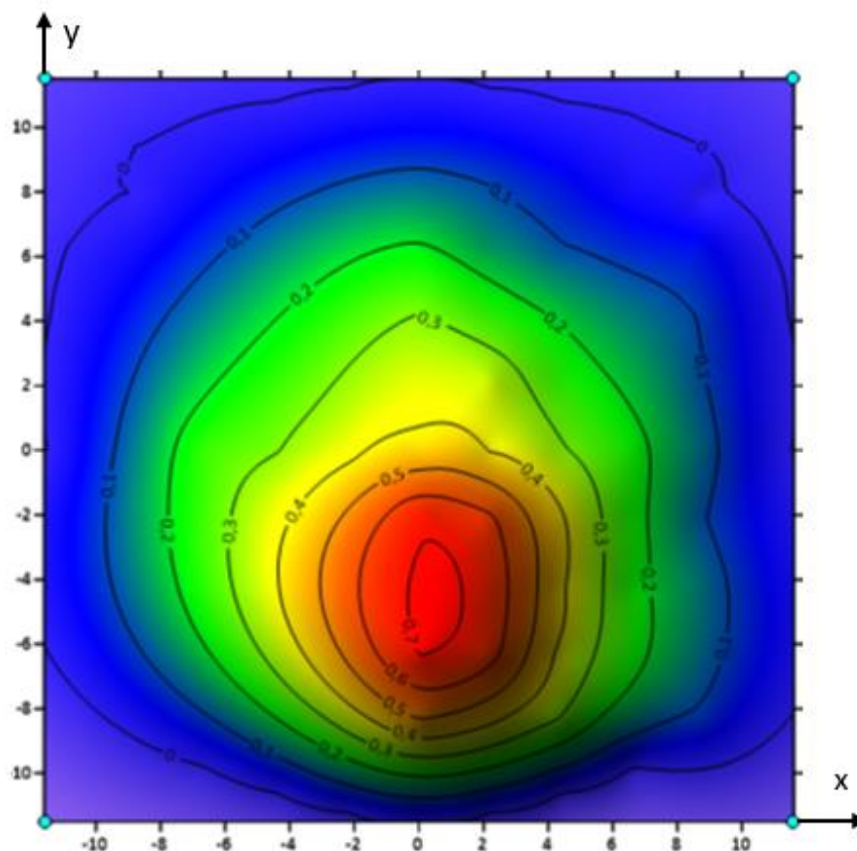


Figura 3.17- Imagem de Surfer® - Mapa de distribuição dos valores de ACOR - Encastrado

É possível entender que em relação ao modelo em modo livre, os pontos de maior valor de ACOR estão localizados, aproximadamente, 5 cm abaixo do centro da raquete, ponto 5 de coordenadas (0,0).

Após análise das três formas de tratamento de dados, em tabela, em gráfico e em mapa de distribuição de dados, as conclusões retiradas foram idênticas. No entanto, alguns aspetos foram mais fáceis de identificar numas formas de tratamento de dados do que noutras. Na forma de gráfico é mais fácil de identificar a existência de mínimos e máximos relativos, assim como, padrões de crescimento de valores. Enquanto que, no mapa de distribuição de dados é dada uma perspectiva mais clara do local onde se localizam os valores mais elevados de ACOR e os mínimos. Através da utilização de uma escala de cores entende-se o nível de decréscimo de valores ao longo do afastamento do epicentro de valores de ACOR.

3.2.2.4 Comparação de valores ACOR ao longo do eixo Y

De modo a entender melhor o comportamento da raquete, foram comparados valores de ACOR apenas variando um dos valores das coordenadas dos pontos de impacto. Comparando assim os valores ao longo do eixo Y em várias coordenadas X, e vice-versa.

Para esta comparação foi utilizado esta distribuição de pontos, para facilitar a comparação e percepção dos valores em estudo, figura 3.17.

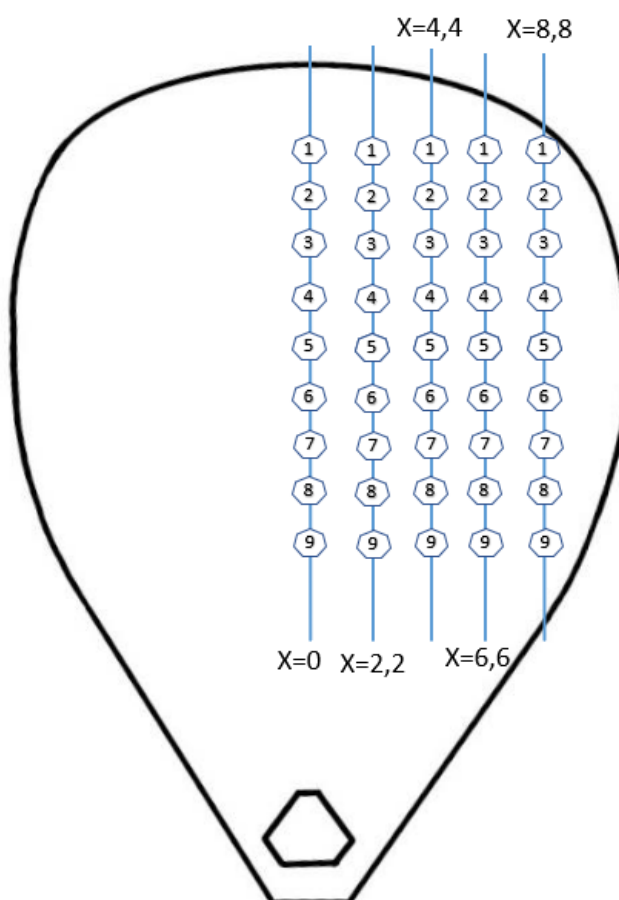


Figura 3.18 - Nox- Distribuição pontos de impacto para comparação ao longo do eixo Y

Com esta distribuição de pontos de impacto será possível comparar qual o efeito, qualitativo e quantitativo, do afastamento de um ponto com a mesma coordenada Y, ao longo do eixo X.

Esta comparação foi realizada para ambos os modelos de montagem, com o mesmo objetivo.

Na tabela seguinte estão representados os valores obtidos nos ensaios, tabela 3.5.

Tabela 3.5- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Livre

Pontos impacto	X=0	X=2,2	X=4,4	X=6,6	X=8,8
1	0,22638	0,14445	0,11334	0,06194	0,03780
2	0,30885	0,24734	0,22775	0,12753	0,11398
3	0,34108	0,32931	0,27315	0,20623	0,11398
4	0,45738	0,38624	0,30885	0,25483	0,15953
5	0,48717	0,45027	0,37607	0,27315	0,17849
6	0,41089	0,37607	0,29581	0,25046	0,15302
7	0,36368	0,34108	0,24734	0,18228	0,10321
8	0,33098	0,24516	0,20502	0,12384	0,10321
9	0,32931	0,15953	0,10321	0,07558	0,04561

A partir desta tabela de valores, foi composto este gráfico, figura 3.18.

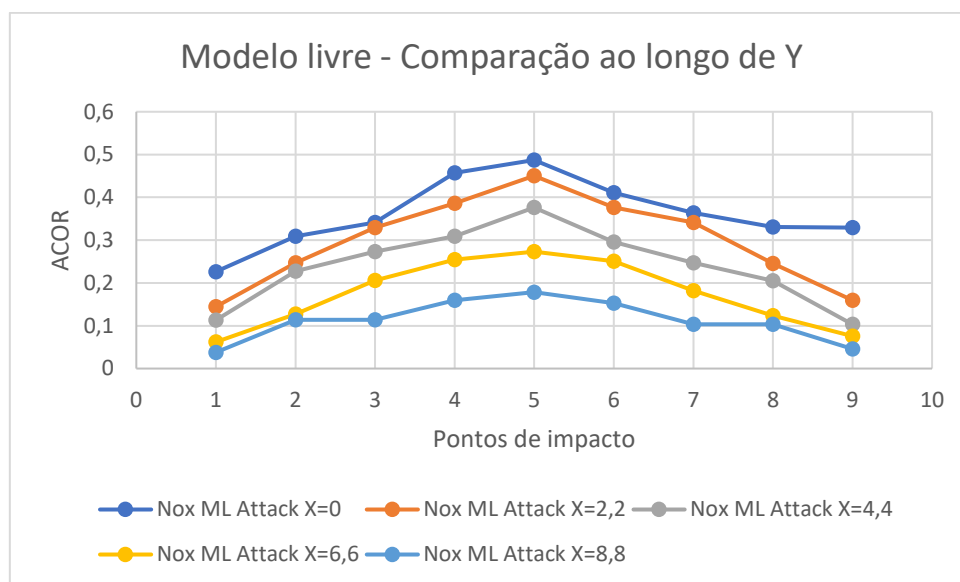


Figura 3.19- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Livre

Verifica-se assim que seja qual for a coordenada X dos nossos pontos de impacto, o comportamento ao longo do eixo Y é muito semelhante em todos os casos.

Na semelhança com outros estudos de resultados, verificamos que com afastamento dos eixos, diminuem os valores de ACOR, e com a ajuda deste gráfico entende-se que diminuem de um modo regular em todas as coordenadas estudadas.

Aplicando o mesmo estudo, mas agora para o modelo em modo encastrado obteve-se a seguinte tabela de valores, tabela 3.6.

Tabela 3.6- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Encastrado

Pontos impacto	X=0	X=2,2	X=4,4	X=6,6	X=8,8
1	0,11398	0,09447	0,06194	0,04561	0,03780
2	0,20623	0,15107	0,10321	0,07558	0,06194
3	0,30140	0,24734	0,18875	0,13676	0,09447
4	0,36368	0,35744	0,24734	0,18228	0,10321
5	0,43177	0,39466	0,30885	0,22775	0,12384
6	0,68718	0,61509	0,41089	0,22638	0,10321
7	0,71153	0,65221	0,41323	0,22679	0,13221
8	0,70508	0,63234	0,37607	0,22775	0,12384
9	0,49196	0,41323	0,28837	0,13676	0,08258

A partir desta tabela de valores, foi composto este gráfico, figura 3.19.

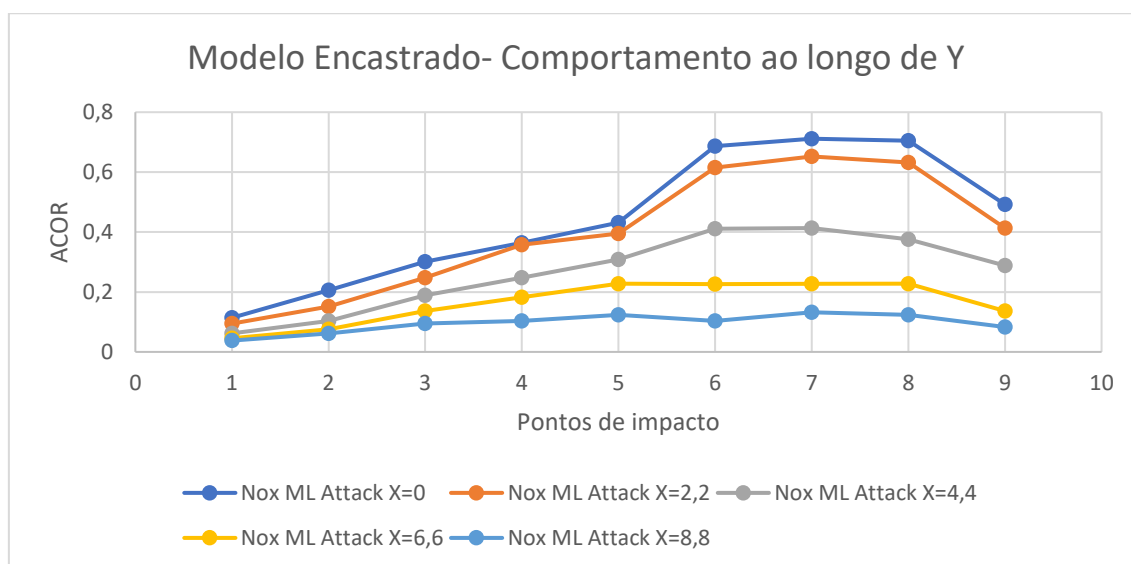


Figura 3.20- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Encastrado

Do mesmo modo que no modelo em modo livre, existe semelhança nos intervalos de crescimento e decréscimo dos valores de ACOR. Os valores máximos de restituição são atingidos nos mesmos pontos, até a uma distância de 6,6 cm.

A partir daí os valores de ACOR são muito semelhantes e baixos, não apresentando crescimentos e decréscimos significantes para retirarmos a mesma conclusão que no modelo em modo livre.

3.2.2.5 Comparação de valores ACOR ao longo do eixo Y

Após a comparação de valores ao longo do eixo Y, alternando a coordenada X, foi realizada o oposto. Neste caso foi comparado os valores ao longo do eixo X, alternando a coordenada Y.

Para esta comparação foi utilizado esta distribuição de pontos, para facilitar a comparação e percepção dos valores em estudo, figura 3.20.

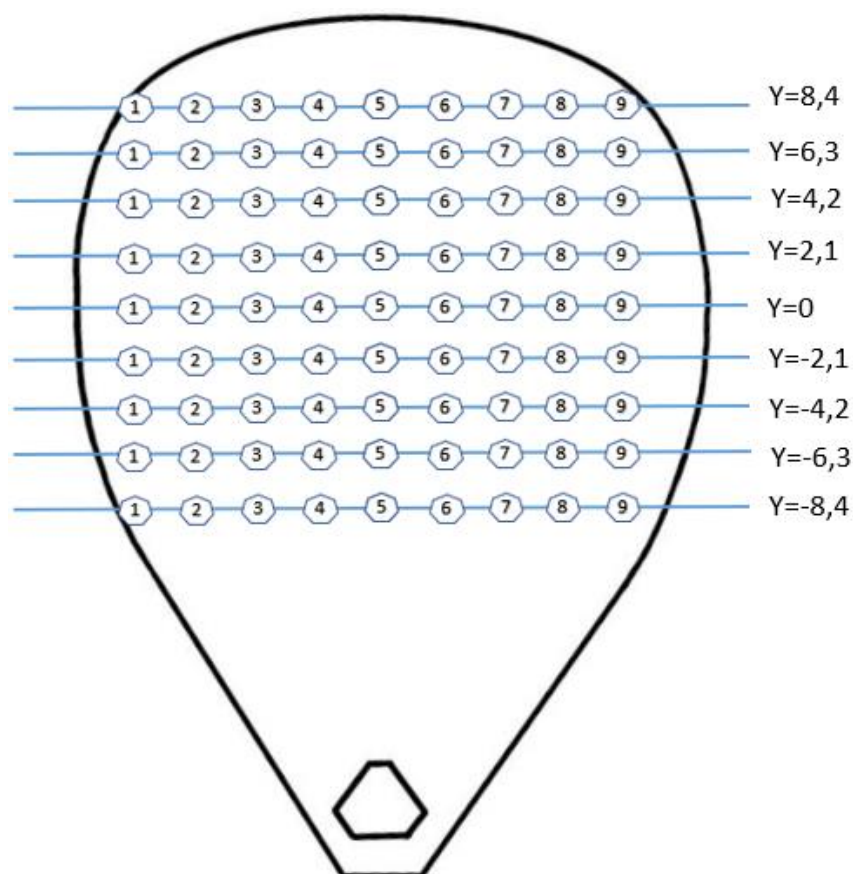


Figura 3.21- Nox - Distribuição dos pontos de impacto para comparação ao longo do eixo X

De modo igual ao anterior, esta distribuição de pontos de impacto, irá facilitar a comparação dos vários valores de restituição ao longo do eixo pretendido, eixo X neste caso.

Tabela 3.7- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Livre

Ponto impacto	Y=8,4	Y=6,3	Y=4,2	Y=2,1	Y=0	Y=-2,1	Y=-4,2	Y=-6,3	Y=-8,4
1	0,03780	0,11398	0,11398	0,15953	0,16506	0,15302	0,10321	0,10321	0,04561
2	0,06194	0,12753	0,20623	0,25483	0,28837	0,25046	0,18228	0,12384	0,07558
3	0,11334	0,22775	0,27315	0,30885	0,35632	0,29581	0,24734	0,20502	0,10321
4	0,14445	0,24734	0,32931	0,38624	0,41323	0,37607	0,34108	0,24516	0,15953
5	0,22638	0,30885	0,34108	0,45738	0,48717	0,41089	0,36368	0,33098	0,32931
6	0,14445	0,24734	0,32931	0,38624	0,45027	0,37607	0,34108	0,24516	0,15953
7	0,11334	0,22775	0,27315	0,30885	0,37607	0,29581	0,24734	0,20502	0,10321
8	0,06194	0,12753	0,20623	0,25483	0,27315	0,25046	0,18228	0,12384	0,07558
9	0,03780	0,11398	0,11398	0,15953	0,17849	0,15302	0,10321	0,10321	0,04561

A partir da tabela 3.7, de valores ACOR, foi composto este gráfico, figura 3.21.

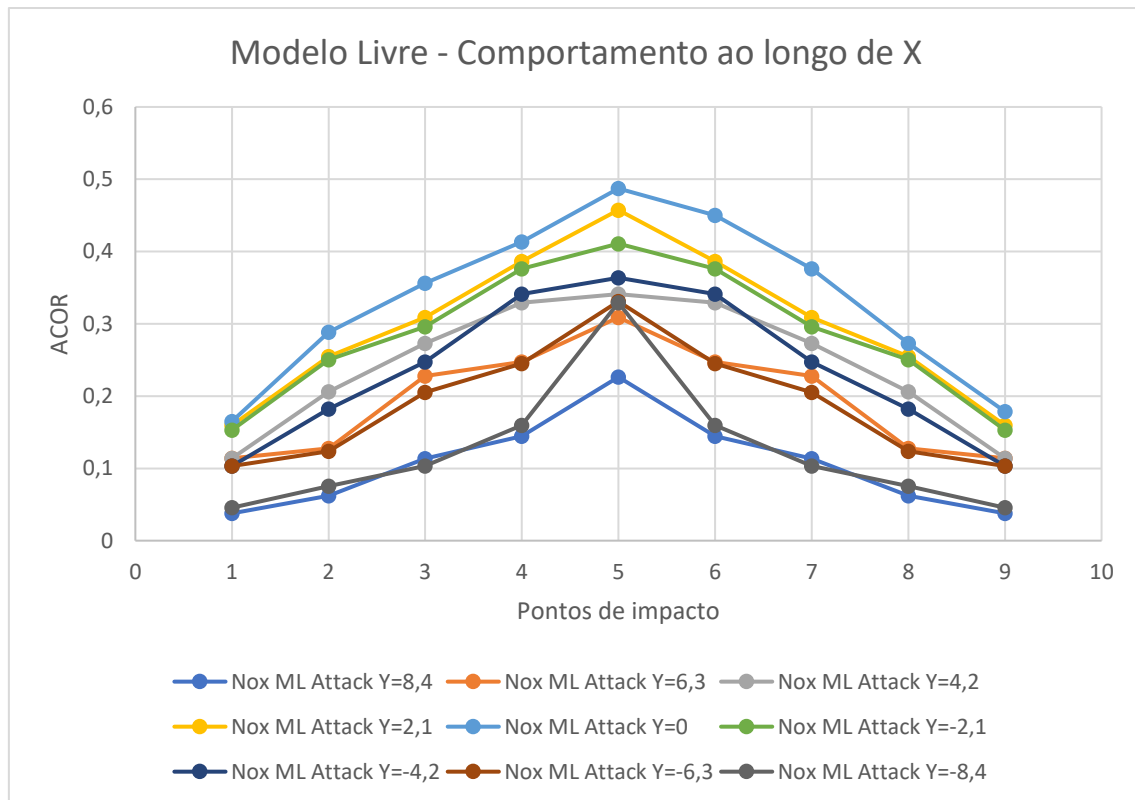


Figura 3.22- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Livre

Conclui-se assim que, o máximo relativo ao longo do eixo X, é sempre o ponto central 5 de coordenadas (0, y) e que os mínimos relativos são sempre os pontos de impacto 1 e 9, mais distantes do centro da raquete, cujas coordenadas são (-8.4, y) e (8.4, y).

Verificam-se também padrões muito semelhantes em todas as variações, com exceção da curva $Y = -8.4$, na qual existe um máximo relativo mais acentuado que nas restantes curvas em estudo.

Outra informação que conseguimos retirar desta comparação ao longo do eixo X no modelo livre é, a possibilidade de emparelhar curvas muito semelhantes. Por exemplo, as curvas em que $Y = 2.1$ e $Y = -2.1$ são muito semelhantes no que diz respeito aos valores apresentado ao longo dos nove pontos de impacto. Aplicando-se o mesmo aos pares $Y = 4.2$ e $Y = -4.2$, $Y = 6.3$ com $Y = -6.3$ e ainda a $Y = 8.4$ e $Y = -8.4$. Este último par com exceção do ponto de impacto 5 é um ótimo exemplo da aproximação de valores da parte superior e inferior da cabeça da raquete.

Aplicando o mesmo estudo, mas agora para o modelo em modo encastrado vamos obter a seguinte tabela de valores, tabela 3.8.

Tabela 3.8- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Encastrado

Pontos impacto	Y=8,4	Y=6,3	Y=4,2	Y=2,1	Y=0	Y=-2,1	Y=-4,2	Y=-6,3	Y=-8,4
1	0,03780	0,06194	0,09447	0,10321	0,13221	0,10321	0,13221	0,12384	0,08258
2	0,04561	0,07558	0,13676	0,18228	0,25483	0,22638	0,22679	0,22775	0,13676
3	0,06194	0,10321	0,18875	0,24734	0,29581	0,41089	0,41323	0,37607	0,28837
4	0,09447	0,15107	0,24734	0,35744	0,37016	0,61509	0,65221	0,63234	0,41323
5	0,11398	0,20623	0,30140	0,36368	0,43177	0,68718	0,71153	0,70508	0,49196
6	0,09447	0,15107	0,24734	0,35744	0,39466	0,61509	0,65221	0,63234	0,41323
7	0,06194	0,10321	0,18875	0,24734	0,30885	0,41089	0,41323	0,37607	0,28837
8	0,04561	0,07558	0,13676	0,18228	0,22775	0,22638	0,22679	0,22775	0,13676
9	0,03780	0,06194	0,09447	0,10321	0,12384	0,10321	0,13221	0,12384	0,08258

A partir desta tabela de valores, foi composto este gráfico, figura 3.22.

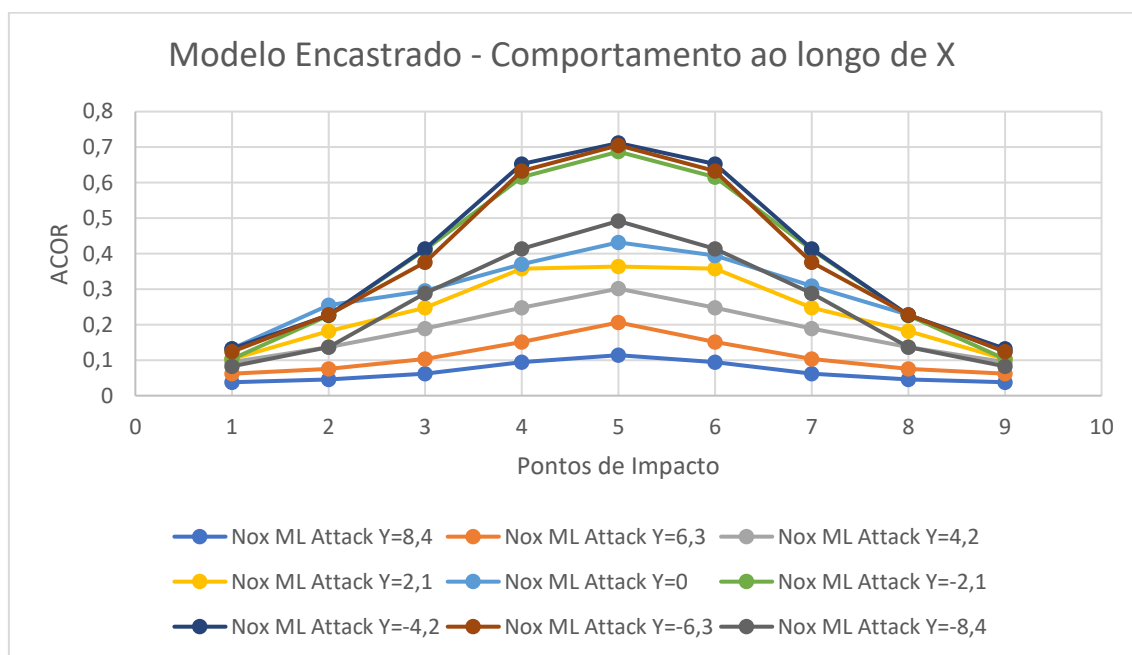


Figura 3.23- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Encastrado

Muito diferente do modelo livre, o modelo encastrado possui características bastante distintas. Através destas curvas identifica-se claramente uma divisão de valores da parte superior da cabeça da raquete para a inferior. Neste caso a parte inferior apresenta valores bastante superiores aos da parte superior da raquete. Esta situação ocorre mais especificamente nos pontos de impacto mais próximos de $X=0$. No entanto nas extremidades da raquete este padrão já não se verifica, apresentando-se os valores muito semelhantes entre eles.

3.2.3 Wilson Force Lite – Raquete de controlo

3.2.3.1 Ensaio pontos de impacto nos eixos centrais (18 pontos)

Os mesmos ensaios foram realizados para esta raquete (Wilson Force Lite), com exceção do mapa de distribuição de valores. Utilizando a mesma distribuição que na amostra anterior, figura 3.23.

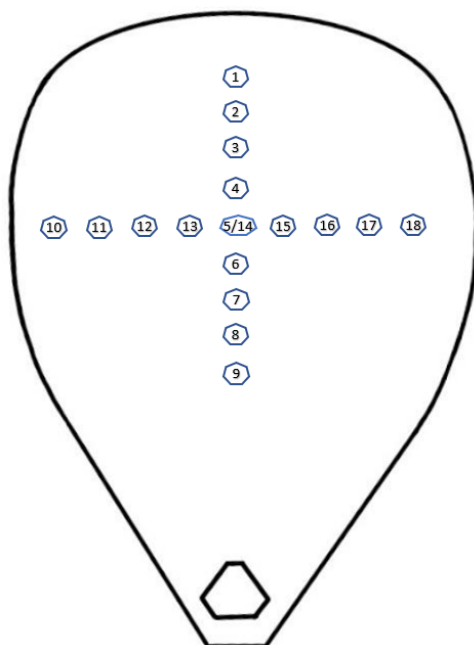


Figura 3.24-Distribuição pontos impacto Wilson (18)

Os resultados do modelo em modo livre são os apresentados na tabela 3.9.

Tabela 3.9- Wilson - Valores ACOR - Livre

Ponto Impacto	Coordenada X	Coordenada Y	ACOR
1	0	8,4	0,24734
2	0	6,3	0,29581
3	0	4,2	0,31846
4	0	2,1	0,40878
5	0	0	0,43121
6	0	-2,1	0,39054
7	0	-4,2	0,30562
8	0	-6,3	0,28023
9	0	-8,4	0,26393
10	-8,8	0	0,24734
11	-6,6	0	0,26786
12	-4,4	0	0,33098
13	-2,2	0	0,40878
14	0	0	0,43121
15	2,2	0	0,40691
16	4,4	0	0,34108
17	6,6	0	0,27315
18	8,8	0	0,24516

Verifica-se que o valor máximo se encontra no ponto 5 de coordenada (0, 0) e tem o valor de 0,43121. Embora o ponto de valor máximo seja o mesmo que na raquete anteriormente estudada, o valor é aproximadamente 10% mais baixo.

A figura 3.24, representa um gráfico dos valores da tabela 3.9.

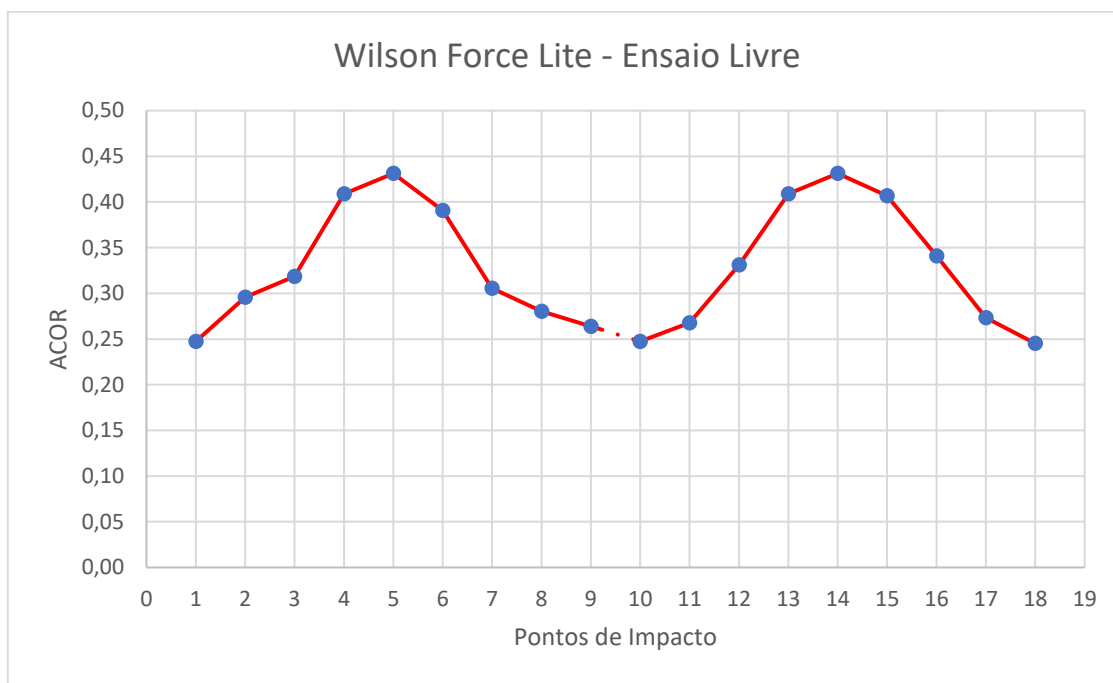


Figura 3.25- Wilson - Gráfico de valores ACOR - Livre

Analisando a curva de valores do modelo em modo livre da raquete Wilson Force Lite, é possível identificar os máximos e mínimos relativos da raquete, localizados nos pontos próximos do centro da raquete e nas extremidades da mesma, respetivamente.

A curva apresenta semelhanças nas zonas de crescimento e decréscimo de valores, no entanto, são variações notoriamente baixas. Pode concluir-se que este modelo de raquete tem uma cabeça de raquete mais regular, devido à menor variação de valores.

Analisando, os valores de restituição com os mesmos pontos de impacto para o modelo em modo encastrado da raquete Wilson Force Lite, tabela 3.10.

Tabela 3.10- Wilson- Tabela de valores ACOR - Encastrado

Pontos impacto	Coordenada X	Coordenada Y	ACOR
1	0	8,4	0,11398
2	0	6,3	0,20502
3	0	4,2	0,26393
4	0	2,1	0,33879
5	0	0	0,39054
6	0	-2,1	0,67204
7	0	-4,2	0,67633
8	0	-6,3	0,70508
9	0	-8,4	0,47620
10	-8,8	0	0,11334
11	-6,6	0	0,18228
12	-4,4	0	0,26786
13	-2,2	0	0,34108
14	0	0	0,39054
15	2,2	0	0,37607
16	4,4	0	0,27315
17	6,6	0	0,22775
18	8,8	0	0,13221

Neste modelo em modo encastrado, o valor máximo de restituição encontra-se no ponto 8 de coordenadas (0, -6.3) com o valor de 0,70508. Existindo uma diferença para a raquete anterior em que o ponto máximo de restituição foi registado no ponto 7 de coordenadas (0, -4,2).

A existência desta diferença nas coordenadas do ponto máximo, indica como causa, a diferença na posição do centro de massa das raquetes. Sabendo que o centro de massa da raquete anterior, Nox ML Attack Pro P.1, está 0,4 cm acima, do centro de massa da Wilson Force Lite, apontamos esta distinção de características como causa da mudança de coordenadas do ponto onde se regista o maior valor de ACOR.

O esperado teoricamente seria que as raquetes de controlo tivessem um centro de massa localizado mais próximo do punho da raquete, o que se verifica nas amostras analisadas. A raquete Nox, que está categorizada como uma raquete equilibrada, possui um centro de massa mais afastado do punho que a raquete Wilson, estando esta categorizada como uma raquete de controlo.

Abaixo, tem-se um gráfico, figura 3.25, da tabela 3.10.

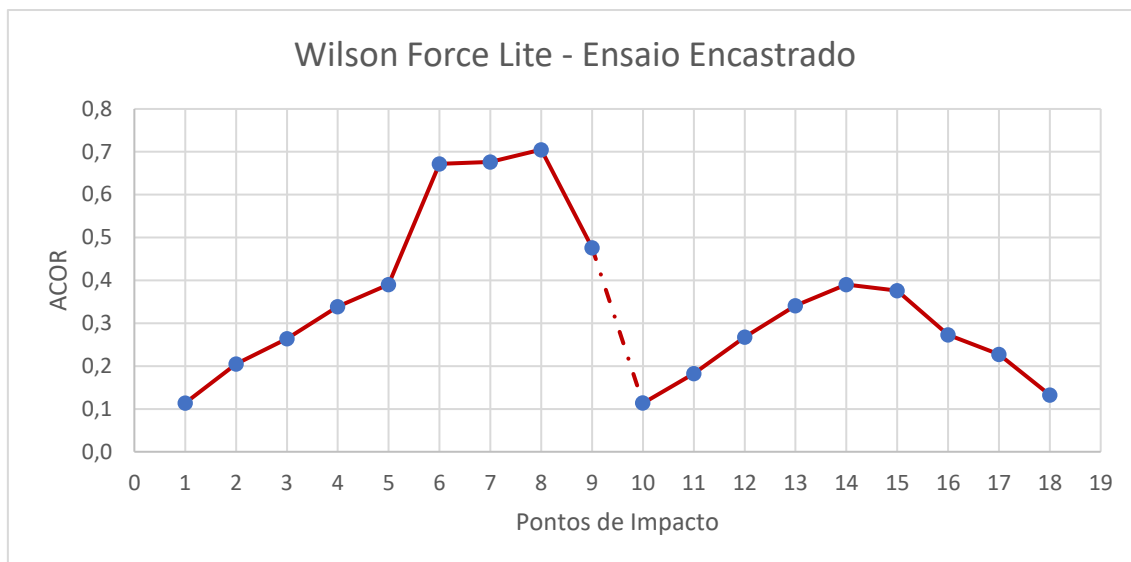


Figura 3.26- Wilson- Gráfico de valores ACOR – Encastrado

Assim como na raquete anterior, a figura 3.25, permite entender que quando a raquete está em modo encastrado, o principal fator de contribuição para o valor de ACOR é a localização do CM. Uma vez que quando os pontos de impacto se vão afastando dessa região os valores de restituição tendem a diminuir abruptamente.

Na ótica de demonstração das diferenças existentes entre valores de ACOR do ensaio em modelo livre e ensaio em modelo encastrado, apresenta-se na tabela 3.11 os valores de ambos os ensaios.

Tabela 3.11- Wilson - Comparação de valores ACOR em ambos os modelos de ensaio

Ponto Impacto	Livre	Encastrado
1	0,24734	0,11398
2	0,29581	0,20502
3	0,31846	0,26393
4	0,40878	0,33879
5	0,43121	0,39054
6	0,39054	0,67204
7	0,30562	0,67633
8	0,28023	0,70508
9	0,26393	0,47620
10	0,24734	0,11334
11	0,26786	0,18228
12	0,33098	0,26786
13	0,40878	0,34108
14	0,43121	0,39054
15	0,40691	0,37607
16	0,34108	0,27315
17	0,27315	0,22775
18	0,24516	0,13221

Dos valores da tabela 3.11 acima, foi concebido o gráfico, figura 3.26, da comparação de ambas as curvas de valores.

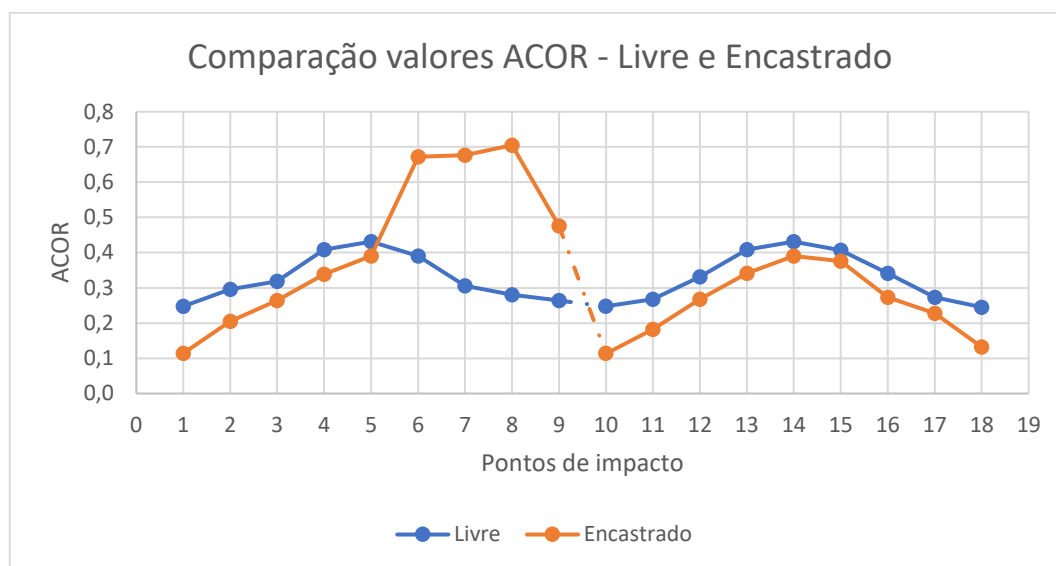


Figura 3.27- Wilson - Comparação de valores ACOR em ambos os modelos de ensaio

3.2.3.2 Ensaio malha total dos pontos (45 pontos)

Na raquete Wilson Force Lite, também foram realizados os ensaios para a malha total da raquete. Como explicado anteriormente, vão ser ensaiados todos os pontos de impacto da raquete segundo a seguinte distribuição de pontos, figura 3.27.

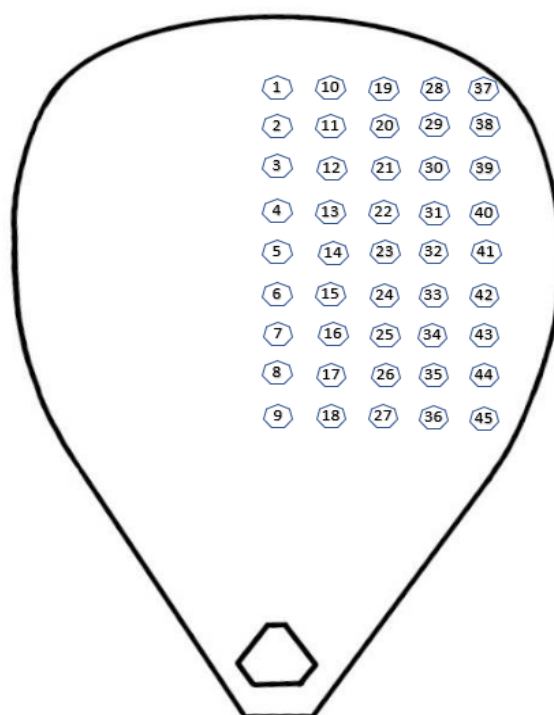


Figura 3.28- Wilson - Distribuição pontos de impacto (45)

Na tabela 3.12, abaixo, estão apresentados os valores resultantes de ambas as montagens (Modelo Livre e Modelo Encastrado), na totalidade dos pontos de impacto estudados.

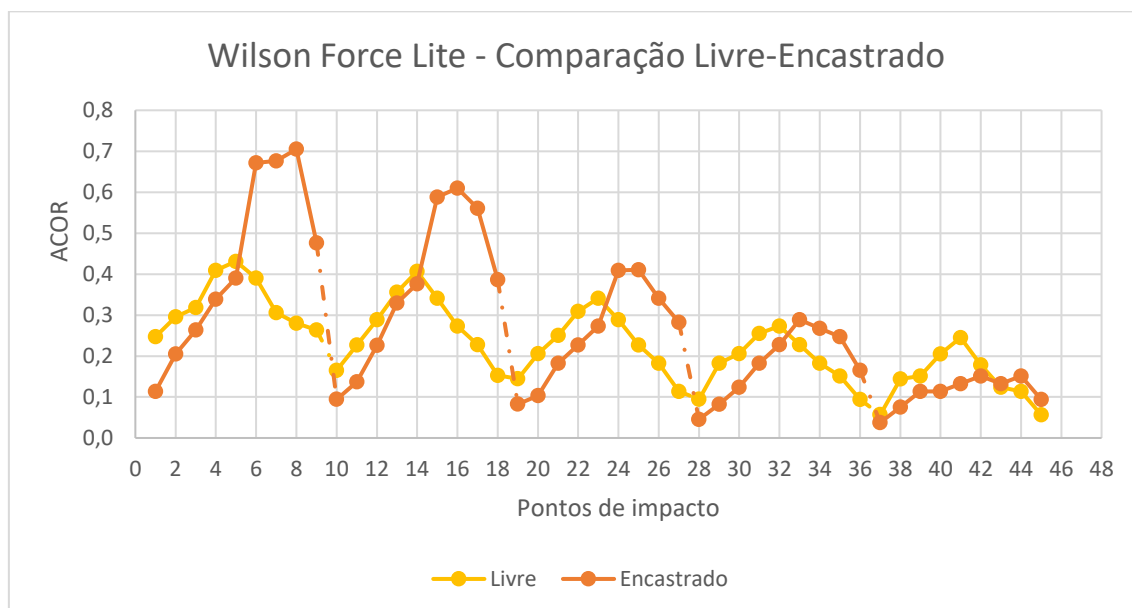
Tabela 3.12- Wilson – Valores ACOR para a malha total do modo livre e encastrado

Pontos impacto	Livre	Encastrado	Pontos impacto	Livre	Encastrado
1	0,24734	0,11398	24	0,28837	0,40878
2	0,29581	0,20502	25	0,22679	0,41089
3	0,31846	0,26393	26	0,18228	0,34108
4	0,40878	0,33879	27	0,11398	0,28268
5	0,43121	0,39054	28	0,09447	0,04561
6	0,39054	0,67204	29	0,18228	0,08258
7	0,30562	0,67633	30	0,20623	0,12384
8	0,28023	0,70508	31	0,25483	0,18228
9	0,26393	0,47620	32	0,27315	0,22775
10	0,16506	0,09447	33	0,22775	0,28837
11	0,22679	0,13676	34	0,18228	0,26786
12	0,28837	0,22638	35	0,15107	0,24734
13	0,35632	0,32931	36	0,09447	0,16506
14	0,40691	0,37607	37	0,05669	0,03780
15	0,34108	0,58783	38	0,14445	0,07558
16	0,27315	0,61002	39	0,15107	0,11334
17	0,22775	0,56052	40	0,20502	0,11334
18	0,15302	0,38624	41	0,24516	0,13221
19	0,14445	0,08258	42	0,17849	0,15107
20	0,20623	0,10321	43	0,12384	0,13221
21	0,25046	0,18228	44	0,11334	0,15107
22	0,30885	0,22679	45	0,05669	0,09447
23	0,34108	0,27315			

À semelhança dos estudos anteriores, neste também existe uma notória diminuição do valor de ACOR com o aumento do número de ponto de impacto, devido ao facto de este estar a afastar-se do centro da raquete e do centro de massa.

Obteve-se o gráfico abaixo, figura 3.13, através da tabela 3.12, acima.

Tabela 3.13- Wilson - Gráfico dos valores de ACOR - Livre e Encastrado



Da observação das curvas de dados obtidos, é possível reparar no desnível de valores existentes de ACOR em certas zonas, entre os ensaios em modo livre e em modo encastrado. Ciclicamente existe, principalmente nos primeiros 2 ciclos de pontos de impacto, uma grande diferença em 3-4 pontos de impacto. Nestes pontos os valores de ACOR são 80% mais elevados, para o modo encastrado comparando com o modo livre.

O mesmo não se verifica nos restantes pontos do ciclo, onde os valores do modo livre são maioritariamente superiores, embora não tão superiores.

Este gráfico apoia a conclusão tirada dos valores da tabela 3.12, onde é visível a diminuição dos valores de ACOR com o aumento do número do ponto de impacto.

Outro aspeto a realçar do gráfico, é a existência nos 3 primeiros ciclos de pontos, ciclos de 9 pontos de impacto, a existência do máximo relativo no modo livre em cada ciclo corresponder ao ponto intermedio, ou seja, ponto 5 de cada ciclo. Já no modo encastrado, o máximo relativo de cada ciclo corresponde sempre a um ponto distinto. Explicitando melhor, no primeiro ciclo o máximo relativo encontra-se no ponto de impacto 8, penúltimo do primeiro ciclo de 9 pontos de impacto. No entanto, no segundo ciclo o máximo relativo encontra-se localizado no ponto de impacto 16, que corresponde ao ponto de impacto 7 do segundo ciclo. E no terceiro ciclo o máximo relativo corresponde ao sexto ponto de impacto desse ciclo, ponto de impacto 24.

Em termos de mínimos relativos, ambos os modos coincidem em metade deles, dado que no modo livre estes correspondem ao primeiro e último ponto de cada ciclo. No entanto, no modo encastrado o mínimo relativo é sempre o primeiro ponto do ciclo que corresponde aos pontos de impacto de coordenadas (0, 8.8).

3.2.3.3 Comparação de valores ACOR segundo o eixo Y

Assim como na amostra anterior utilizou-se o mesmo método de comparação, apenas variando um dos valores das coordenadas dos pontos de impacto. Comparando assim os valores ao longo do eixo Y em várias coordenadas X, e vice-versa.

Para esta comparação foi utilizado esta distribuição de pontos, para facilitar a comparação e percepção dos valores em estudo, figura 3.28.

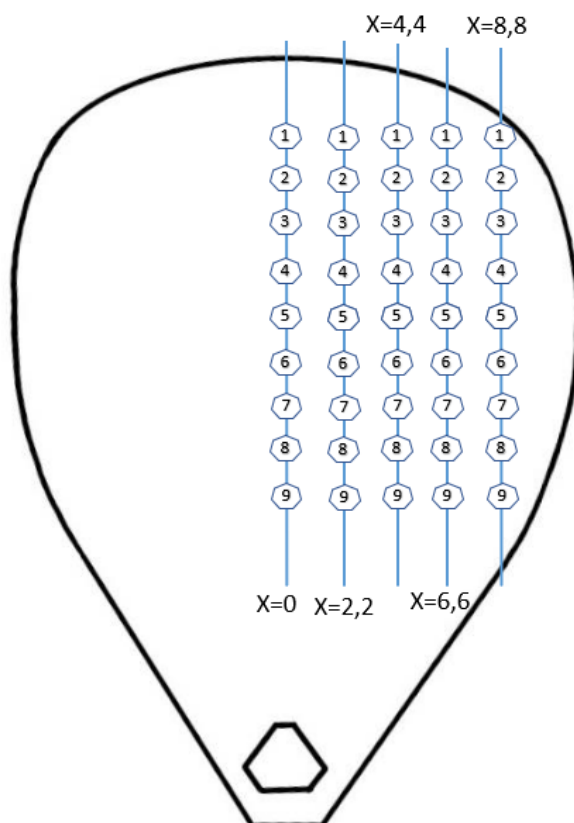


Figura 3.29- Wilson - Distribuição pontos de impacto para comparação ao longo do eixo Y

Na tabela seguinte estão representados os valores obtidos nos ensaios, tabela 3.14.

Tabela 3.14- Wilson- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Livre

Pontos impacto	X=0	X=2,2	X=4,4	X=6,6	X=8,8
1	0,24734	0,16506	0,14445	0,09447	0,05669
2	0,29581	0,22679	0,20623	0,18228	0,14445
3	0,31846	0,28837	0,25046	0,20623	0,15107
4	0,40878	0,35632	0,30885	0,25483	0,20502
5	0,43121	0,40691	0,34108	0,27315	0,24516
6	0,39054	0,34108	0,28837	0,22775	0,17849
7	0,30562	0,27315	0,22679	0,18228	0,12384
8	0,28023	0,22775	0,18228	0,15107	0,11334
9	0,26393	0,15302	0,11398	0,09447	0,05669

A partir da tabela acima, foi obtido o seguinte gráfico, figura 3.29.

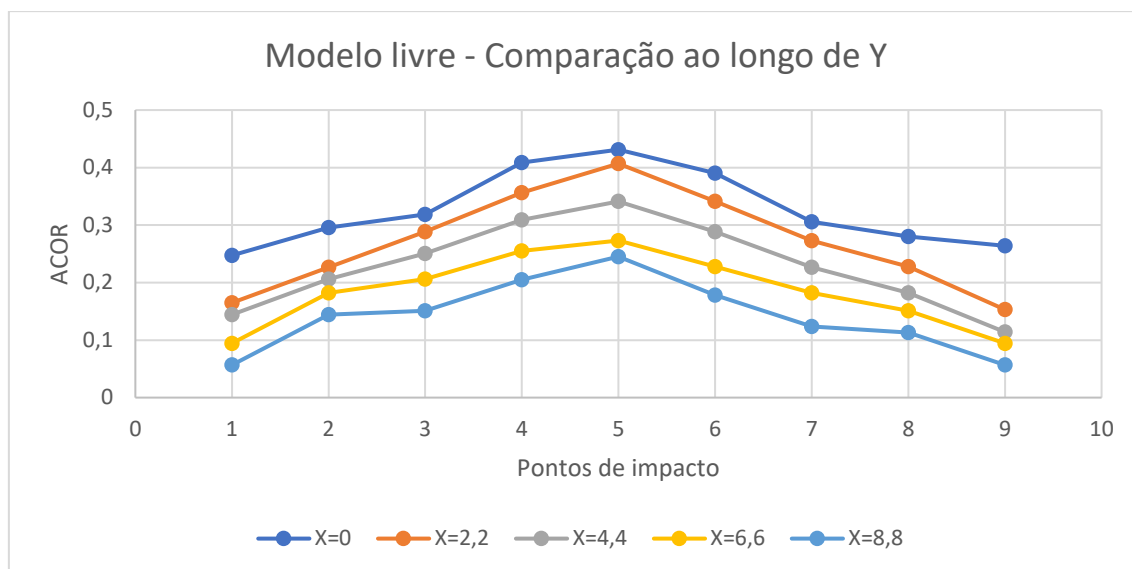


Figura 3.30- Wilson- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Livre

Analisando o gráfico, figura 3.29, encontra-se em todas as variações da coordenada Y um padrão de subida e descida de valores, que nunca se cruzam. Todas as curvas apresentam comportamentos semelhantes, tendo como diferença, a diminuição do valor de ACOR com a distância ao eixo Y.

Aplicando o mesmo estudo, mas agora para o modelo em modo encastrado vamos obter a seguinte tabela de valores, tabela 3.15.

Tabela 3.15- Wilson- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Encastrado

Pontos impacto	X=0	X=2,2	X=4,4	X=6,6	X=8,8
1	0,11398	0,09447	0,08258	0,04561	0,03780
2	0,20502	0,13676	0,10321	0,08258	0,07558
3	0,26393	0,22638	0,18228	0,12384	0,11334
4	0,33879	0,32931	0,22679	0,18228	0,11334
5	0,39054	0,37607	0,27315	0,22775	0,13221
6	0,67204	0,58783	0,40878	0,28837	0,15107
7	0,67633	0,61002	0,41089	0,26786	0,13221
8	0,70508	0,56052	0,34108	0,24734	0,15107
9	0,47620	0,38624	0,28268	0,16506	0,09447

Da tabela 3.15, foi obtido o gráfico, figura 3.30.

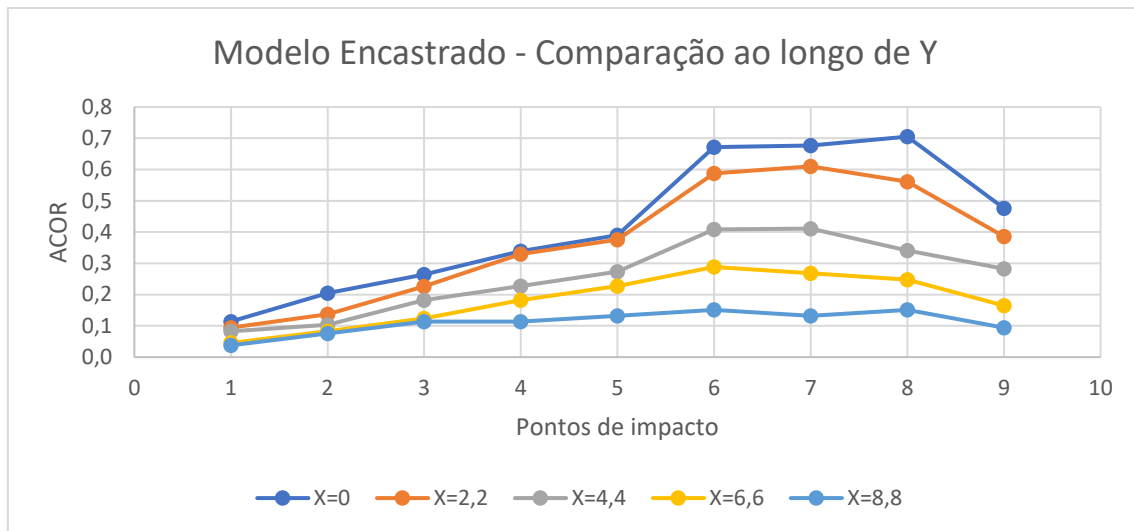


Figura 3.31- Wilson- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo Y - Encastrado

As curvas do gráfico apresentam os resultados semelhantes, á comparação efetuada na raquete anterior, pode-se assim denotar que o comportamento de uma raquete para outra, não muda drasticamente.

As curvas que mais se identificam com a análise feita anteriormente, são $X=0$ e $X=2,2$, onde se consegue identificar claramente os três pontos com os valores de ACOR bastante mais elevados.

3.2.3.4 Comparação de valores ACOR segundo o eixo X

Assim como na amostra anterior, irá ser realizada a comparação oposta. Assim, comparado os valores ao longo do eixo X, alternando a coordenada Y.

Para esta comparação foi utilizada esta distribuição de pontos, para facilitar a comparação e percepção dos valores em estudo, figura 3.31.

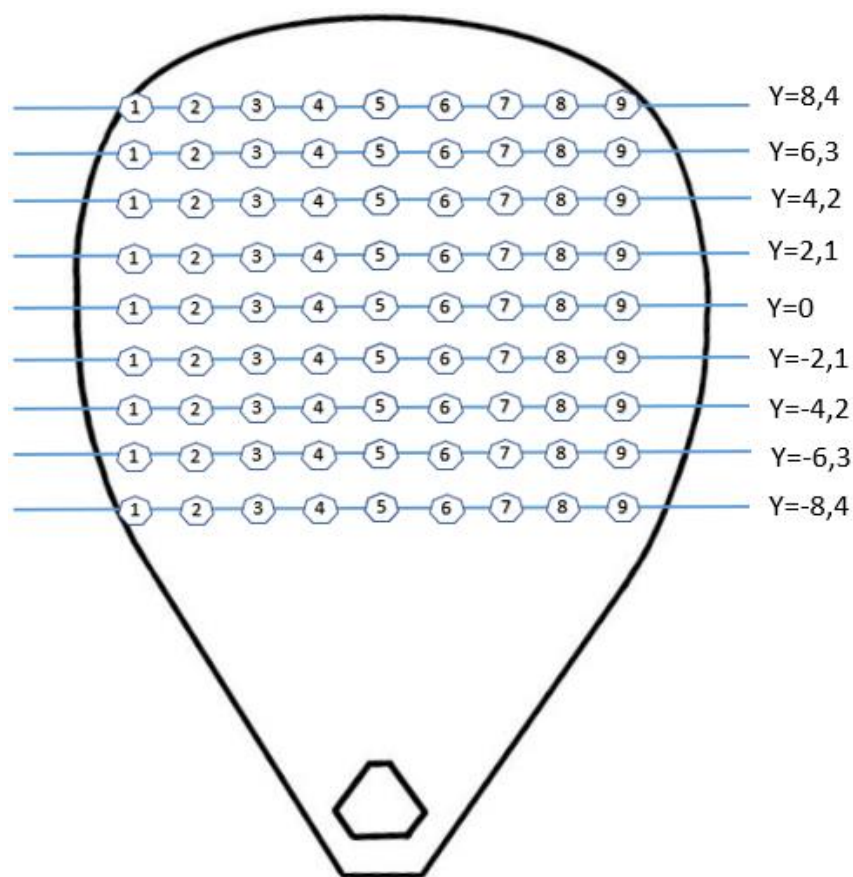


Figura 3.32- Wilson - Distribuição dos pontos de impacto para comparação ao longo do eixo X

De modo igual ao anterior, esta distribuição de pontos de impacto, irá facilitar a comparação dos vários valores de restituição ao longo do eixo X pretendido. Dados apresentados na tabela 3.16.

Tabela 3.16- - Wilson- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Livre

Pontos impacto	Y=8,4	Y=6,3	Y=4,2	Y=2,1	Y=0	Y=-2,1	Y=-4,2	Y=-6,3	Y=-8,4
1	0,05669	0,14445	0,15107	0,20502	0,24734	0,17849	0,12384	0,11334	0,05669
2	0,09447	0,18228	0,20623	0,25483	0,26786	0,22775	0,18228	0,15107	0,09447
3	0,14445	0,20623	0,25046	0,30885	0,33098	0,28837	0,22679	0,18228	0,11398
4	0,16506	0,22679	0,28837	0,35632	0,40878	0,34108	0,27315	0,22775	0,15302
5	0,24734	0,29581	0,31846	0,40878	0,43121	0,39054	0,30562	0,28023	0,26393
6	0,16506	0,22679	0,28837	0,35632	0,40691	0,34108	0,27315	0,22775	0,15302
7	0,14445	0,20623	0,25046	0,30885	0,34108	0,28837	0,22679	0,18228	0,11398
8	0,09447	0,18228	0,20623	0,25483	0,27315	0,22775	0,18228	0,15107	0,09447
9	0,05669	0,14445	0,15107	0,20502	0,24516	0,17849	0,12384	0,11334	0,05669

Utilizando os valores da tabela 3.16, obteve-se o gráfico para comparação das curvas de valores ACOR, figura 3.32.

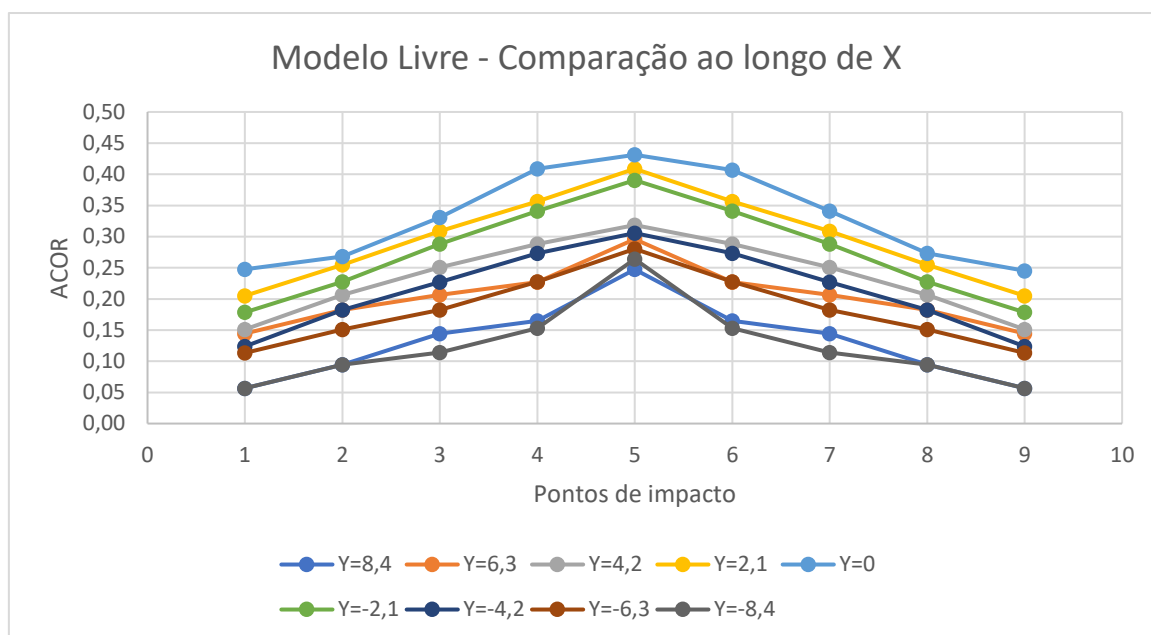


Figura 3.33- Nox- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Livre

Conclui-se assim que em o máximo relativo ao longo do eixo X, é sempre o ponto central 5 de cada curva, cujas coordenadas são (0, y) e que os mínimos relativos são sempre os pontos de impacto mais distantes do centro da raquete, 1 e 9 em cada nível de Y analisado, cujas coordenadas são sempre (-8.4, y) e (8.4, y).

Verifica-se também padrões muito semelhantes em todas as variações, com exceção de quando $Y = -8.4$, em que existe um máximo relativo bastante mais acentuado que nas restantes curvas em estudo.

Nesta amostra de raquete existe cruzamento das curvas com níveis de Y diferentes o que dificulta a percepção nítida para emparelhamento das curvas, cujas coordenadas de Y em valor absoluto são iguais.

De seguida, analisou-se a mesma comparação para o modelo em modo encastrado, dados apresentados na tabela 3.17.

Tabela 3.17- Wilson- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Encastrado

Pontos impacto	Y=8,4	Y=6,3	Y=4,2	Y=2,1	Y=0	Y=-2,1	Y=-4,2	Y=-6,3	Y=-8,4
1	0,03780	0,07558	0,11334	0,11334	0,11334	0,15107	0,13221	0,15107	0,09447
2	0,04561	0,08258	0,12384	0,18228	0,18228	0,28837	0,26786	0,24734	0,16506
3	0,08258	0,10321	0,18228	0,22679	0,26786	0,40878	0,41089	0,34108	0,28268
4	0,09447	0,13676	0,22638	0,32931	0,34108	0,58783	0,61002	0,56052	0,38624
5	0,11398	0,20502	0,26393	0,33879	0,39054	0,67204	0,67633	0,70508	0,47620
6	0,09447	0,13676	0,22638	0,32931	0,37607	0,58783	0,61002	0,56052	0,38624
7	0,08258	0,10321	0,18228	0,22679	0,27315	0,40878	0,41089	0,34108	0,28268
8	0,04561	0,08258	0,12384	0,18228	0,22775	0,28837	0,26786	0,24734	0,16506
9	0,03780	0,07558	0,11334	0,11334	0,13221	0,15107	0,13221	0,15107	0,09447

A partir da tabela 3.17 obtemos o gráfico seguinte, figura 3.33.

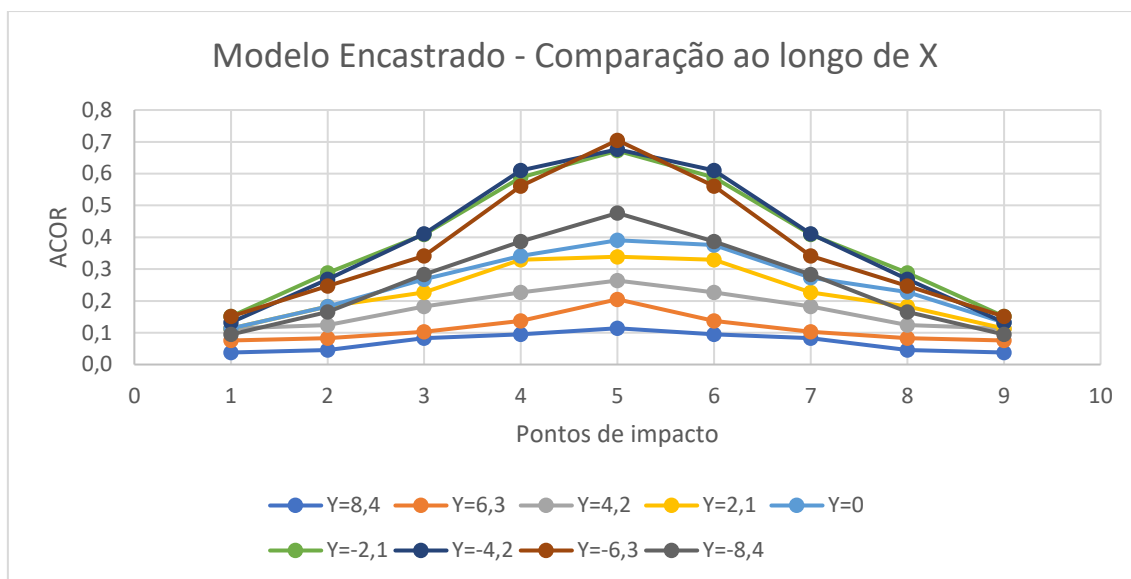


Figura 3.34- Wilson- Comparação dos valores de ACOR ao longo do eixo X - Encastrado

À semelhança da amostra anterior, a comparação ao longo do eixo X do modelo em modo encastrado é bastante distinta do modelo em modo livre, por razões semelhantes, como a existência de valores de ACOR muito mais elevados na zona negativa do eixo Y. Inclusive o facto dos valores de $Y=-8,4$ nas zonas mais próximas do eixo Y serem superiores aos valores de $Y=0$, algo que no modelo em modo livre seria o oposto.

Nas extremidades da cabeça da raquete, qualquer que seja a coordenada Y em análise os valores tendem a variar pouco, devido ao valor mais alto das curvas ser 0,15107 em $Y=-2,1$.

3.2.4 Bullpadel Vertex Tournament 2015 – Raquete de potência

3.2.4.1 Ensaio pontos de impacto nos eixos centrais (18 pontos)

Para esta terceira e última amostra, apenas foram realizados ensaios para analisar os pontos de impacto diretamente por cima dos eixos X e Y. Realizados para ter mais uma amostra de comparação com as restantes.

A inclusão desta raquete, faz com que fosse analisada uma raquete de cada categoria, feito no início do nosso estudo, raquetes de potência, equilibradas e de controlo.

Utilizando a mesma distribuição que na amostra anterior, figura 3.34.

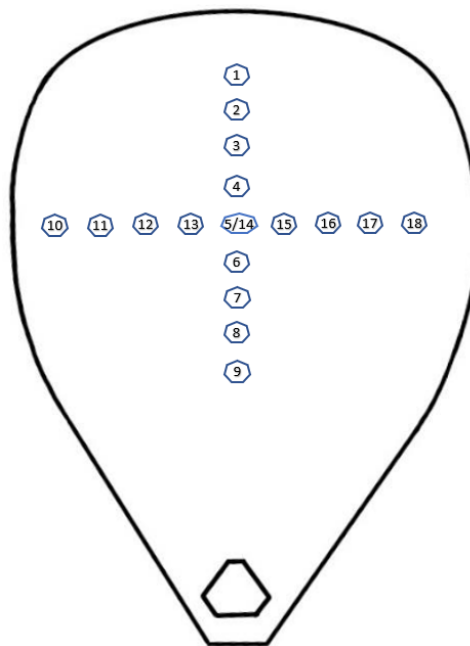


Figura 3.35-Distribuição pontos impacto Bullpadel (18)

Sendo esta raquete classificada como uma raquete de “Potência”, os valores de ACOR máximos, teoricamente, deveriam ser mais elevados nos locais de impacto ideais, neste caso, o mais próximo possível da zona do ponto de impacto 5, para o modelo livre.

No modelo encastrado, devido ao facto de esta raquete ter um momento de inércia superior às anteriores e ter um peso superior, espera-se valores de restituição mais elevados nas proximidades do centro de massa da raquete.

Os valores de ACOR para o modelo em modo livre da raquete Bullpadel Vertex Tournament 2015, foram os indicados na tabela 3.18, abaixo.

Tabela 3.18- Bullpadel - Valores ACOR - Livre

Pontos impacto	Coordenada X	Coordenada Y	ACOR
1	0	8,4	0,20502
2	0	6,3	0,26393
3	0	4,2	0,32931
4	0	2,1	0,46874
5	0	0	0,49196
6	0	-2,1	0,41323
7	0	-4,2	0,37016
8	0	-6,3	0,30885
9	0	-8,4	0,26393
10	-8,8	0	0,15953
11	-6,6	0	0,3014
12	-4,4	0	0,34975
13	-2,2	0	0,43121
14	0	0	0,49196
15	2,2	0	0,4762
16	4,4	0	0,37016
17	6,6	0	0,30885
18	8,8	0	0,15953

Verifica-se que o valor máximo se encontra no ponto 5 de coordenada (0, 0) e tem o valor de 0,49196. Confirmando assim o esperado, o ponto de impacto máximo é o ponto 5 e o seu valor de ACOR superior ao da amostra anterior.

A figura 3.35, representa um gráfico dos valores acima, tabela 3.18.

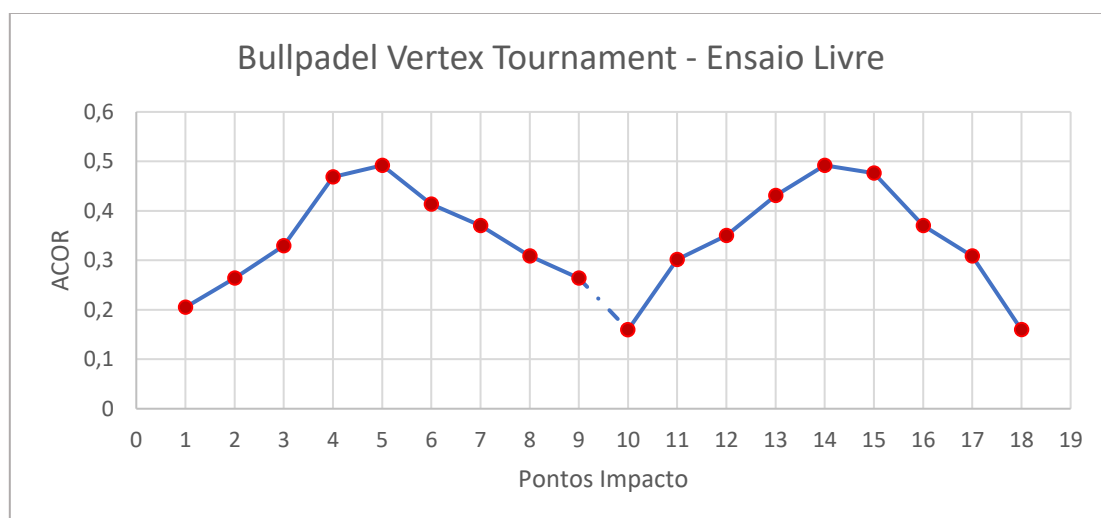


Figura 3.36- Bullpadel - Gráfico de valores ACOR - Livre

Analisando a curva de valores do modelo em modo livre da raquete Bullpadel Vertex Tournament 2015, é possível identificar os máximos e mínimos relativos da raquete, localizados nos pontos próximos do centro da raquete e nas extremidades da mesma, respetivamente.

Analisando agora, os valores de restituição com os mesmos pontos de impacto para o modelo em modo encastrado da raquete Bullpadel Vertex Tournament 2015, tabela 3.19.

Tabela 3.19- Bullpadel - Tabela de valores ACOR - Encastrado

Pontos impacto	Coordenada X	Coordenada Y	ACOR
1	0	8,4	0,13221
2	0	6,3	0,22638
3	0	4,2	0,30885
4	0	2,1	0,41089
5	0	0	0,47620
6	0	-2,1	0,69833
7	0	-4,2	0,75081
8	0	-6,3	0,71153
9	0	-8,4	0,49861
10	-8,8	0	0,16992
11	-6,6	0	0,27315
12	-4,4	0	0,30140
13	-2,2	0	0,36368
14	0	0	0,47620
15	2,2	0	0,40878
16	4,4	0	0,32931
17	6,6	0	0,24734
18	8,8	0	0,13676

Verifica-se que o valor máximo se encontra no ponto 7 de coordenada (0, 0) e tem o valor de 0,75081. Era expectável que uma raquete de potência tenha o seu centro de massa ligeiramente mais afastada do pulso. Seria um péssimo indicativo se o valor máximo de ACOR fosse registado no ponto de impacto 8 como na raquete anterior, que pertencia a categoria de raquetes de controlo.

A figura 3.36, representa um gráfico dos valores acima, tabela 3.19.

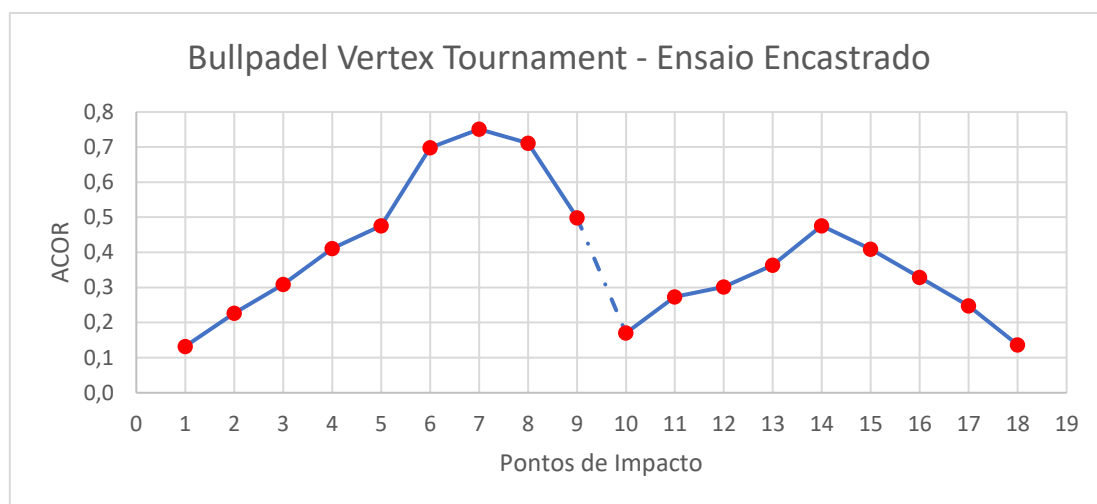


Figura 3.37- Bullpadel - Gráfico de valores ACOR - Encastrado

De notar novamente, a diferença de valores de restituição entre os pontos de impacto 13 e 14, que também existe no modelo em modo encastrado. Embora não seja tão evidente como no modelo em modo livre, é um detalhe a ter em consideração.

Na ótica de demonstração das diferenças existentes entre valores de ACOR do ensaio em modelo livre e ensaio em modelo encastrado, apresenta-se na tabela 3.20 os valores de ambos os ensaios.

Tabela 3.20- Bullpadel - Comparação de valores ACOR em ambos os modelos de ensaio

Pontos impacto	Livre	Encastrado
1	0,20502	0,13221
2	0,26393	0,22638
3	0,32931	0,30885
4	0,46874	0,41089
5	0,49196	0,47620
6	0,41323	0,69833
7	0,37016	0,75081
8	0,30885	0,71153
9	0,26393	0,49861
10	0,15953	0,16992
11	0,30140	0,27315
12	0,34975	0,30140
13	0,43121	0,36368
14	0,49196	0,47620
15	0,47620	0,40878
16	0,37016	0,32931
17	0,30885	0,24734
18	0,15953	0,13676

Dos valores da tabela 3.20 acima, foi concebido o gráfico, figura 3.37, da comparação de ambas as curvas de valores.

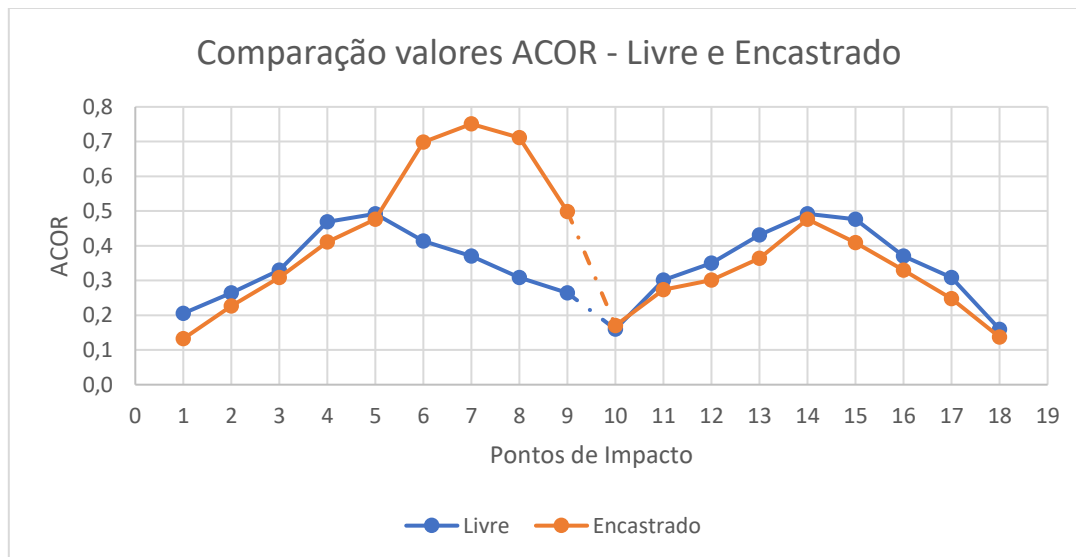


Figura 3.38 - Bullpadel - Comparação de valores ACOR em ambos os modelos de ensaio

3.3. Comparação entre as raquetes estudadas

As três raquetes escolhidas foram estudadas detalhadamente, seguidamente, serão realizadas comparações entre elas, de modo a ser possível identificar semelhanças e diferenças.

Espera-se encontrar diferenças que as distingam em termos de categoria, e resultados experimentais coerentes com as suposições feitas anteriormente.

Como para a raquete Bullpadel Vertex Tournament 2015 apenas foi efetuado o estudo para os 18 pontos de impacto principais, essa foi a primeira comparação a ser efetuada. Comparação entre os 18 pontos de impacto colocados ao longos dos eixos X e Y, tanto no modelo em modo encastrado como no modelo em modo livre.

A distribuição de pontos utilizada foi a seguinte, figura 3.38.

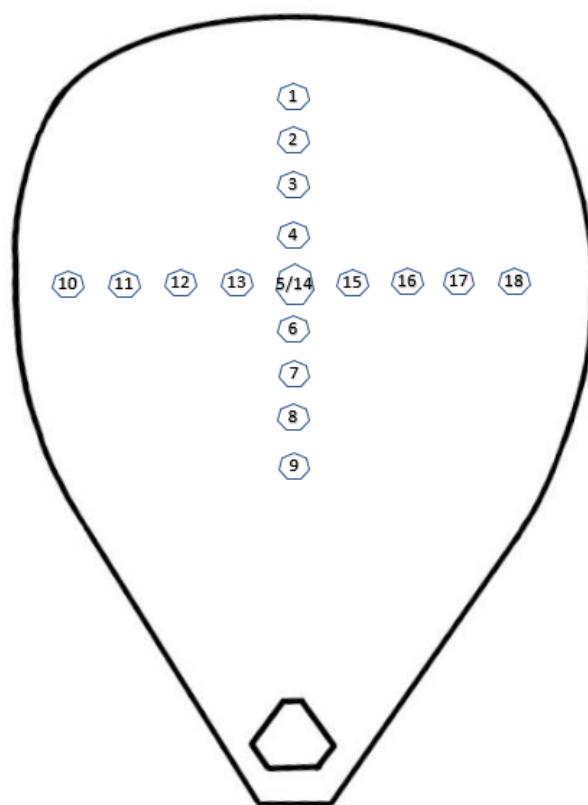


Figura 3.39- Distribuição pontos impacto para comparação de raquetes (18) - Livre

A tabela seguinte, tabela 3.21, contém os valores de ACOR das três raquetes, nos pontos de impacto, na figura acima indicada, figura 3.38.

Tabela 3.21 – Tabela de comparação valores ACOR entre raquetes - Livre

Pontos Impacto	Nox ML	Wilson Force	Bullpadel
1	0,22638	0,24734	0,20502
2	0,30885	0,29581	0,26393
3	0,34108	0,31846	0,32931
4	0,45738	0,40878	0,46874
5	0,48717	0,43121	0,49196
6	0,41089	0,39054	0,41323
7	0,36368	0,30562	0,37016
8	0,33098	0,28023	0,30885
9	0,32931	0,26393	0,26393
10	0,16506	0,24734	0,15953
11	0,28837	0,26786	0,30140
12	0,35632	0,33098	0,34975
13	0,41323	0,40878	0,40878
14	0,48717	0,43121	0,49196
15	0,45027	0,40691	0,47620
16	0,37607	0,34108	0,37016
17	0,27315	0,27315	0,30885
18	0,17849	0,24516	0,15953

O gráfico, figura 3.39, foi obtido utilizando os valores da tabela 3.21.

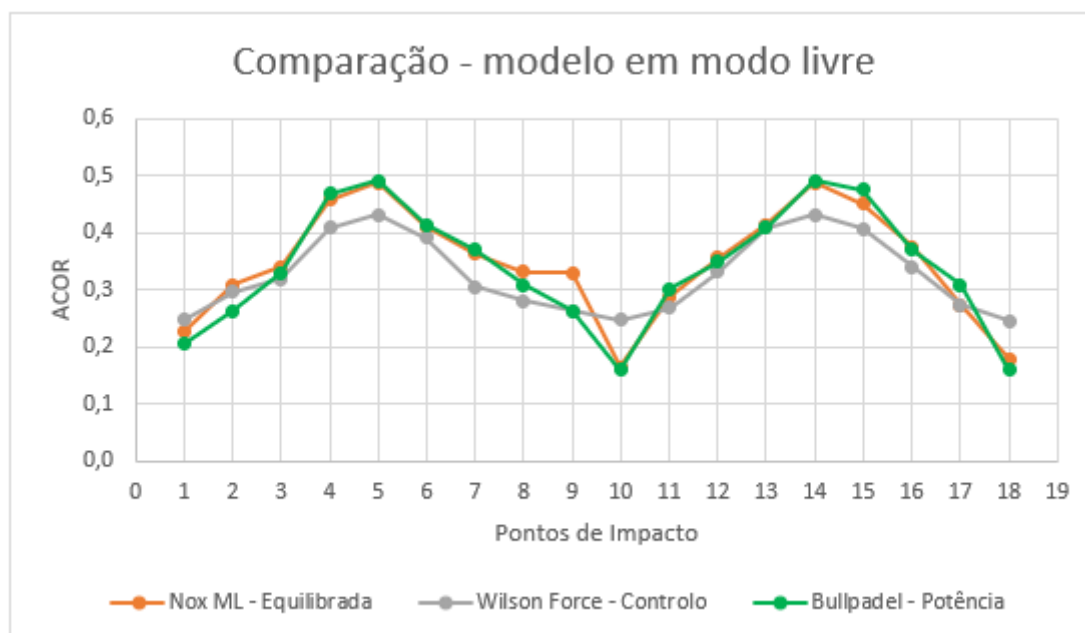


Figura 3.40– Gráfico de comparação valores ACOR entre raquetes – Livre

É possível através do gráfico, figura 3.39, verificar que a raquete Bullpadel e a raquete Nox ML são bastante semelhantes ao longo de todos os pontos de impacto estudados. Existe uma discrepância de valores apenas nos pontos de impacto 2 e 9.

De um modo geral as três raquetes apresentam um comportamento semelhante ao longo de todos os pontos, embora em termos de valores de ACOR existam diferenças, as zonas de crescimento e decréscimo são as mesmas.

De notar também que nos pontos em que se regista o aparecimento de valores máximos e mínimos relativos, a raquete Bullpadel é a que apresenta tanto os valores mais altos como os valores mais baixos nesses mesmo pontos.

A raquete Wilson Force é a que apresenta maior estabilidade na cabeça da raquete, sendo esta a que apresenta menor variação de valores e uma curva menos variável ao longo de toda a zona de impacto.

Nos três casos estudados, é possível interpretar que os valores de ACOR diminuem mais rapidamente quando o ponto de impacto é afastado do eixo Y do que quando é afastado do eixo X. No entanto este caso é bastante menos notório na raquete Wilson Force, do que nas restantes amostras.

Como o ponto de impacto 5 não é um mínimo nem um máximo relativo no modelo em modo encastrado, utilizamos a distribuição de pontos normal, utilizada no estudo individual das raquetes, figura 3.40.

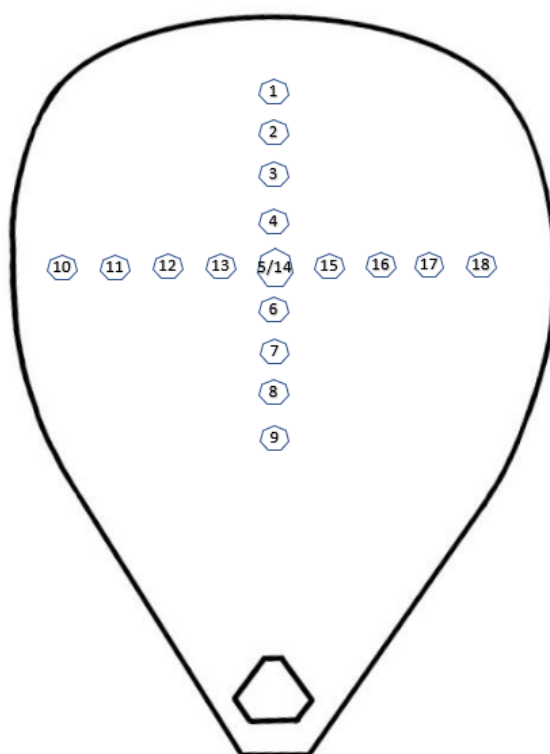


Figura 3.41- Distribuição pontos impacto para comparação de raquetes (18) - Encastrado

Agora comparando as raquetes no modelo em modo encastrado, após os ensaios obtivemos os valores da tabela 3.22.

Tabela 3.22– Tabela de comparação valores ACOR entre raquetes – Encastrado

Pontos Impacto	Nox ML	Wilson Force	Bullpadel
1	0,11398	0,11398	0,13221
2	0,20623	0,20502	0,22638
3	0,30140	0,26393	0,30885
4	0,36368	0,33879	0,41089
5	0,43177	0,39054	0,47620
6	0,68718	0,67204	0,69833
7	0,71153	0,67633	0,75081
8	0,70508	0,70508	0,71153
9	0,49196	0,47620	0,49861
10	0,13221	0,11334	0,16992
11	0,25483	0,18228	0,27315
12	0,29581	0,26786	0,30140
13	0,37016	0,34108	0,36368
14	0,43177	0,39054	0,47620
15	0,39466	0,37607	0,40878
16	0,30885	0,27315	0,32931
17	0,22775	0,22775	0,24734
18	0,12384	0,13221	0,13676

Da tabela 3.22, obteve-se o gráfico, figura 3.41.

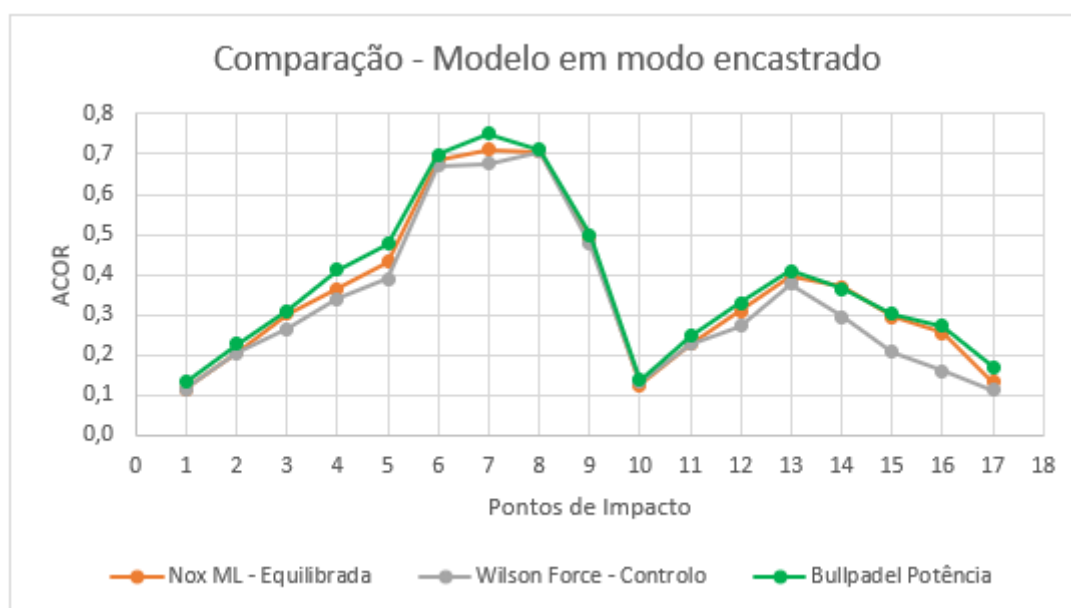


Figura 3.42– Gráfico de comparação valores ACOR entre raquetes - Encastrado

Neste gráfico é possível identificar o modelo de raquete com maiores valores de ACOR e o modelo de raquete com menores valores de ACOR. Ao longo dos 17 pontos de impacto identifica-se facilmente a raquete Bullpadel como a que apresenta maiores valores em todos os pontos, exceto no ponto de impacto 14. Por outro lado, a raquete Wilson Force é a que apresenta os valores mais baixos de ACOR ao longo de todos os pontos de impacto.

Verifica-se assim, que no estudo do modelo em modo encastrado, a raquete categorizada como de “potência” é a que possui valores de restituição mais elevados. A raquete categorizada de “Controlo” é a que possui valores mais reduzidos e a raquete “Equilibrada” está em termos de valores, no intermédio das restantes, salvo eventuais exceções.

4 Conclusão

4.1. Conclusões

Este trabalho tem como objetivo entender primeiro quais são as características de uma raquete de Padel. Inicialmente, foram identificados os principais parâmetros que influenciam o comportamento da raquete, para de seguida ser encontrada uma metodologia adequada ao seu estudo. Era do interesse do estudo que fossem utilizadas ferramentas e métodos semelhantes a outros estudos de caracterização de estruturas.

Com a ajuda de estudos realizados tanto em raquetes de Ténis, como em corpos rígidos de outros desportos como o Baseball e o Hóquei, foi possível elaborar com maior sucesso este estudo.

Das raquetes selecionadas para o nosso estudo, houve um cuidado na sua escolha para não serem estudadas somente modelos de raquete muito idênticos, tentando assim alargar o estudo a diferentes tipos de raquete, conforme catalogadas pelas marcas fabricantes.

Após visualização dos resultados do estudo, é de referir que as metodologias utilizadas satisfizeram o seu objetivo, com resultados coerentes. Estes apresentaram valores dentro dos intervalos esperados, comparando com outros estudos de raquetes.

A argumentação comercial e especificações técnicas utilizadas pelas marcas fabricantes manifesta-se, segundo os parâmetros estudados, no que diz respeito às duas características mais referenciadas pelas mesmas, sendo elas, “potência” e “controlo”. É importante notar que existe bastante ênfase, por parte das marcas, às diferentes “performances” dos vários modelos de raquete que comercializam, mas o presente estudo efetuado não regista uma evidência tão marcante como a transmitida ao consumidor.

Este estudo vem ainda contribuir para a divulgação científica de modelos de raquetes de Padel.

4.2 Trabalhos futuros

O trabalho realizado permitiu o estudo do comportamento estático e da resposta dinâmica de uma raquete de Padel. Foram utilizadas metodologias adequadas e que podiam ser utilizadas para o estudo de qualquer corpo com destino de utilização semelhante.

Num futuro seria interessante entender melhor a interação do equipamento com o atleta. As ligações a biomecânica dos movimentos do atleta seria um estudo muito útil para entender melhor a importância da interação entre o atleta e o equipamento. Assim como, quais as características que se devem melhorar tanto na raquete como nos movimentos dos atletas. É também um estudo que iria ajudar a entender as lesões tanto nos ombros como nos cotovelos, que por tantas vezes ocorrem nos atletas ao longo da prática desportiva.

Neste trabalho foi criado um modelo teórico com o objetivo de determinar as propriedades inercias da raquete. No entanto, futuramente, será do interesse procurar criar um modelo teórico para a determinação da resposta dinâmica de modo a ter outra via de comparação com a experimental.

Foram estudados alguns parâmetros da raquete de Padel, no entanto, em trabalhos futuros seria de interesse estudar o “swing” de cada raquete. Isto é, a facilidade com que cada raquete consegue gerar velocidade antes do impacto com a bola e o efeito que tem sobre a bola após o impacto. A análise deste parâmetro requer um estudo diferente, com outro tipo de montagens e metodologias, não tendo por isso sido alvo de estudo deste trabalho.

5. Referências e Bibliografia

- [1] https://www.padelfip.com/wp-content/uploads/2018/02/Annex-to-FIP-Padel-Game-Regulations_13.10.17.pdf (Agosto 2019)
- [2] R. Cross, 2006. Raw racquet power, Racquet Sports Industry, February, p16-17.
- [3] Cross R, Bower R. 2006. Effects of swing-weight on swing speed and racket power. Journal of sports sciences, p. 23-30.
- [4] Linder, T. Mechanics of a Tennis Racket. 2014. KAU Department of Physics and Electrical engineering
- [5] Spurr, James, Goodwill, Simon, Kelley, John and Haake, Steve. 2014. Measuring the inertial properties of a tennis racket. Procedia Engineering, 72, p569-574.
- [6] Brody, H., Cross, R., Lindsey, C. 2002. The Physics and Technology of Tennis. Racquet Tech Publishing, Solana Beach, CA,
- [7] Russell, Daniel A Ph.D. 2007. Physics and Acoustics of Baseball & Softball Bats. Applied Physics, Kettering University, Flint, MI 48504-4898
- [8] Cross, R. and Nathan. 2009. Alan M. Performance versus moment of inertia of sporting implements. Sports technology.
- [9] Banwell, G. 2014. Understanding the dynamic behaviour of a tennis racket under play conditions. Experimental Mechanics, 54(4), 527-537.
- [10] Russell, Daniel A Ph.D. 2007. Physics and Acoustics of Baseball & Softball Bats. Applied Physics, Kettering University, Flint, MI 48504-4898
- [11] Bianconi, R., 2008, Apontamentos de Matriz de inércia, Texto não publicado, USP.
- [12] Beer, F.; Johnston, E.; Russel, J. N.; Mazurek. 2019. D. Mecânica vetorial para engenheiros: estática. 11 ed. Porto Alegre: AMGH, 632 p
- [13] Mesquita, L. 2005, Apontamentos mecânica aplicada I, capítulo 6, Texto não publicado, Instituto Politécnico de Braga.
- [14] Professor Doutor Urgueira, António, Apontamento da cadeira de Métodos Experimentais em Engenharia Mecânica, FCT-UNL
- [15] Fauteux-Brault. 2012. S. Methods for modelling and validating stress distribution in cricket bats using finite element. Research project manuscript, centre for Sports Engineering Research, Sheffield Hallam University
- [16] Brody, H. 1981. Physics of the tennis racket II: The “sweet spot”. Am. J. Phys. Vol. 49(9): 816-819
- [17] Wilson, J. F., Davis, J. S. 1995. Tennis racket shock mitigation experiments. Journal of Biomechanical Engineering, 1995. Vol. 117, 479-484.
- [18] <https://www.worldpadeltour.com>

- [19] <https://www.padelfip.com>
- [20] <https://www.dunloppadel.com/>
- [21] <https://www.noxsport.es>
- [22] <https://www.wilson.com/en-gb/padel>
- [23] <https://www.head.com/en-GB/sports/padel/>
- [25] Cross, R. 2004. Center of percussion of hand-held implements. *Journal of Physics*. Vol. 72(5), 622-630
- [26] Cross, R. 1999. Impact of a ball with a bat or racket. *American Journal of Physics*. Vol. 67 (8), 692-702
- [27] Cross, R. 2000. The coefficient of restitution for collisions of happy ball, unhappy balls and tennis balls. *American Journal of Physics*. Vol. 68(11), 1025-1031.
- [28] Ramos, N.V.M, Avaliação do desempenho dinâmico das raquetes de ténis em condição de utilização. 2009. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [29] Brody, H. 1981. Physics of the tennis racket II: The “sweet spot”. *Am. J. Phys.* Vol. 49(9): 816-819
- [30] Brody, H. 1997. The physics of tennis III. The ball-racket interaction. *American Journal of Physics*. Vol. 65(10), 981-987.
- [31] Brody, H., Cross, R., Lindsey, C., 2002. *The Physics and Technology of Tennis*, Racquet Tech Publishing, Solana Beach, CA