

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DINÂMICO DAS RAQUETES DE TÊNIS EM CONDIÇÃO DE UTILIZAÇÃO

Nuno Viriato Marques Ramos

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial



Tese submetida em cumprimento parcial dos requisitos para obtenção do grau
de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador:

Professor Doutor Mário Augusto Pires Vaz, Professor Associado da
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Co-Orientador:

Professor Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes, Professor Adjunto do
Instituto Politécnico de Bragança

Porto, Setembro 2009

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para caracterizar o comportamento dinâmico de uma raquete de ténis. Foram utilizadas ferramentas e métodos da Engenharia Mecânica para avaliar o comportamento estrutural e sua influência no desempenho deste equipamento desportivo. Alguns equipamentos necessários para as medições foram concebidos e validados no âmbito deste trabalho.

Um modelo de raquete de produção recente e com uma característica estrutural utilizada na sua divulgação comercial foi estudado para averiguar o seu efeito no desempenho.

ABSTRACT

A methodology for the characterization of a tennis racket was developed and implemented in the scope of this work. Mechanical Engineering tools and methods were used to evaluate the racket structural behavior and its influence in the performance. Some new devices were design and constructed to be used in some parameters evaluation.

A recent model of a racket with a particular structural detail, which was claimed to influence the performance, was studied to verify its outcome.

AGRADECIMENTOS

Na elaboração desta dissertação gostaria, particularmente, de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Mário Vaz e Professor Doutor Hernâni Lopes, pelo precioso apoio, motivação, orientação, disponibilidade (muitas das vezes com um esforço adicional), ajuda e, especialmente, pela amizade.

Uma vez que os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental – LOME, gostaria, igualmente, de agradecer a todos os colegas, não deixando de referir o Mestre Jaime Monteiro e o Doutor João Ribeiro, pela amizade, tempo, apoio e disponibilidade demonstradas ao longo deste trabalho.

Ao Engenheiro Jorge de Matos Reis, técnico superior da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, a minha gratidão pelo apoio, disponibilidade, ajuda, amizade e pelos jogos de ténis realizados de forma a pôr em prática os conhecimentos adquiridos.

Ao Professor Doutor Nuno Rilo, professor auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, pela amizade, ajuda e equipamento disponibilizado.

Ao Professor Doutor João Paulo Vilas-Boas, director do laboratório de Biomecânica da Faculdade de Desporto da Universidade do Porto, pelo equipamento disponibilizado. De referir também a colaboração, sempre pronta, do Professor Filipe Conceição da mesma escola.

Aos Professores João Maio e Nuno Carvalho, professores de ténis da Escola de Ténis da Maia, gostaria de prestar toda a minha gratidão, por toda ajuda disponibilizada sobre questões técnicas e bem como pelo material fornecido para a realização dos ensaios.

Ao Sr. Francisco Vaz, técnico da serralharia Octacílio Magalhães Vaz e Filhos, pela rápida disponibilidade para a construção de peças utilizadas na realização deste trabalho.

Por último, gostaria de agradecer a uma pessoa que tem vindo a ser o meu apoio durante os últimos 7 anos, e que sem ela não seria possível ser o que sou hoje, tanto a nível profissional como a nível pessoal. Um grande beijinho!

Com aquele abraço especial, o meu muito obrigado!

Nuno Viriato Ramos

ÍNDICE

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
AGRADECIMENTOS	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Evolução do Tênis.....	1
1.2 O jogo	4
2 RAQUETE DE TÊNIS - ESTADO DE ARTE.....	6
2.1 Anatomia da Raquete.....	8
2.2 Evolução das Raquetes de Tênis.....	9
2.2.1 Raquetes de Madeira	9
2.2.2 Raquetes de Metal	10
2.2.3 Raquetes de Compósito	11
2.3 As Cordas.....	14
2.3.1 Cordas de Tripa Natural	14
2.3.2 Cordas Sintéticas	15
2.4 As Bolas.....	21
3 IDENTIFICAÇÃO E CÁLCULO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE UMA RAQUETE.....	29
3.1 Introdução	29
3.2 Caracterização dos Parâmetros	30
3.3 Caracterização de uma Raquete.....	31
3.4 Verificação dos Parâmetros	33
3.5 Sweet spot.....	34
3.5.1 Centro de Percussão – COP.....	35
3.5.2 Coeficiente de Restituição Aparente – ACOR	37
3.5.3 Ponto Nodal	41
3.5.4 Nova Proposta	42

4	MEDIÇÃO DAS FREQUÊNCIAS E MODOS DE VIBRAÇÃO	45
4.1	Frequências Naturais.....	45
4.2	Modos Naturais	48
5	CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO PARA MEDIÇÃO DO MOMENTO DE INÉRCIA	50
5.1	Introdução	50
5.2	Considerações Teóricas	50
5.2.1	Metodologia Adoptada	53
6	EFEITO FLEXPOINT™	61
7	CONCLUSÃO	65
8	TRABALHOS FUTUROS.....	67
9	LISTA DE REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA	68
9.1	Lista de Referência	68
9.2	Bibliografia	69
10	ANEXOS	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Evolução do material usado na construção das raquetes de ténis.....	6
Figura 2.2: Deformação da bola durante o contacto com o solo.	7
Figura 2.3: Anatomia da raquete.	8
Figura 2.4: Raquetes de madeira usadas na década de 60 e raquete usada nos finais da década de 70.	9
Figura 2.5: Encordoação num quadro de metal patenteado por Lacoste [2].....	10
Figura 2.6: Raquete de alumínio. Nesta figura podem ver-se os dois tubos que ligam ao cabo.....	10
Figura 2.7: Exemplo de uma raquete metálica de 1970 com perfil em I. Neste caso a ponte, peça de plástico, está fixa ao quadro através de parafusos.	11
Figura 2.8: Raquete de material compósito. Howard Head combinou o uso de materiais metálicos com materiais plásticos, desenvolvendo a primeira raquete em compósito em 1969, comercializada com o nome Arthur Ash Competition [4].....	12
Figura 2.9: Exemplo de produção de tecidos de pré-impregnados.	12
Figura 2.10: Molde de uma raquete de ténis.....	13
Figura 2.11: Corda de tripa natural ampliada 25x.	14
Figura 2.12: Vista da secção de uma corda de tripa natural (ampliação de 32x).....	15
Figura 2.13: Microscópio Bresser [®] utilizado para visualizar a constituição das diferentes cordas.	16
Figura 2.14: Vista da secção da corda Pro Redcode, da marca Tecnifibre [®] . Esta é uma corda com um monofilamento de co-poliéster revestida com poliéster (ampliação 10x).	16
Figura 2.15: Vista da secção da corda Sensation 16, da marca Wilson [®] . Esta é uma corda multifilamentar com enrolamento multifilamentar (ampliação 10x).....	16
Figura 2.16: Vista da secção da corda Synthetic Gut Extreme 16, da marca Wilson [®] . Esta é uma corda monofilamentar com enrolamento multifilamentar (ampliação 10x). Esta corda é também conhecida como tripa sintética.	17
Figura 2.17: Configuração do plano de cordas patenteada por Werner Fischer em 1981. Esta encordoação ficou conhecida por encordoação do tipo esparguete.	18
Figura 2.18: Encordoação do tipo Ventoinha.	19
Figura 2.19: encordoação do tipo Hexagonal.	19
Figura 2.20: encordoação do tipo Diagonal.....	20
Figura 2.21: Diferente tipo de furação para a fixação das cordas ao aro.	20
Figura 2.22: Encordoação com um tipo de espaçamento diferente.	20
Figura 2.23: Encordoação usada presentemente. Neste caso o padrão é 16x19.	21
Figura 2.24: Bolas de ténis do <i>Royal Tennis</i> , onde se podem ver as costuras (realizadas à mão).	21
Figura 2.25: Bola tradicional do <i>Lawn Tennis</i>	22
Figura 2.26: Bola de ténis usada presentemente.....	22
Figura 2.27: Bocados de borracha extrudidos e cortados.	24
Figura 2.28: Meias cascas esféricas do núcleo de borracha.....	24
Figura 2.29: Bordo da calote de borracha desgastada para colagem.	24
Figura 2.30: Núcleo de borracha.	25
Figura 2.31: Superfície após desbaste.	26

Figura 2.32: Cobertura do núcleo com uma solução de borracha.....	26
Figura 2.33: Forma da cobertura das bolas de ténis.	26
Figura 2.34: Bola de ténis revestida com tecido.....	27
Figura 2.35: Bola após vulcanização da camada de revestimento do núcleo e da ligação das tiras.	27
Figura 2.36: Aspecto final da bola de ténis.	28
Figura 3.1: Raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i>	31
Figura 3.2: Características da raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i> na zona da garganta.	32
Figura 3.3: Identificação das características da raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i>	32
Figura 3.4: Medição do peso da raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i>	33
Figura 3.5: Disposição dos elementos para a caracterização do centro de massa da raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i>	33
Figura 3.6: Avaliação do centro de massa da raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i>	34
Figura 3.7: Definições do <i>sweet spot</i> : COP, ponto nodal e COR [9].....	35
Figura 3.8: Centro de percussão de uma raquete de ténis.	36
Figura 3.9: Reacções no punho para diferentes impactos [12].	36
Figura 3.10: Sistema que permite a determinação do ACOR.....	38
Figura 3.11: Pontos de medida do ACOR e sistema de eixos utilizado.....	38
Figura 3.12: Representação das isolinhas do ACOR para raquete encastrada no punho.	39
Figura 3.13: Metodologia utilizada para a determinação do ACOR para a condição livre-livre.	40
Figura 3.14: Representação das isolinhas do ACOR para raquete livre-livre.....	41
Figura 3.15: Nós de vibração do 1º modo fundamental de vibração para uma raquete livre no espaço.....	42
Figura 3.16: Discretização dos pontos de medida para a determinação do COP.....	43
Figura 3.17: FRF's medidas experimentalmente ao longo do eixo longitudinal da raquete.....	44
Figura 3.18: Componente imaginária das FRF's medidas ao longo do eixo longitudinal da raquete.....	44
Figura 4.1: Montagem para análise modal experimental.....	45
Figura 4.2: Pontos de medição da raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i>	46
Figura 4.3: Analisador dinâmico de sinal Oros® (à esquerda) e amplificador B&K (à direita).....	46
Figura 4.4: Exemplo de uma FRF de um dos pontos de medida da raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i> . Condição livre-livre e com corda.	47
Figura 4.5: Modos naturais de vibração da raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i> , para a condição livre-livre com corda.	49
Figura 4.6: Modos naturais de vibração da raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i> , para a condição livre-livre sem corda.	49
Figura 4.7: Modos naturais de vibração da raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i> segura na mão e com corda.	49
Figura 4.8: Modos naturais de vibração da raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i> , para a condição encastrada pelo punho e com corda.	49
Figura 5.1: Sistema de fixação da raquete para medir o momento de inércia (unidades em mm).....	51
Figura 5.2: Modelo matemático para o modelo de viga apoiada-livre.	52
Figura 5.3: Diagrama de corpo livre para o modelo de viga apoiada-livre.	52
Figura 5.4: Caracterização dos parâmetros para o cálculo do momento de inércia.	53
Figura 5.5: Diagrama do corpo livre para as formas efectivas do sistema mais raquete.	53

Figura 5.6: Diagrama do corpo livre para as forças de inércia do sistema mais a raquete.	54
Figura 5.7: Sistema que permite a avaliação do momento de inércia de uma raquete de ténis.	56
Figura 5.8: Ampliação do sistema de fixação da raquete de ténis.	56
Figura 5.9: Sistema para calibração do sistema de fixação.	57
Figura 5.10: Montagem do sistema de calibração.	57
Figura 5.11: Medição da distância utilizada para o cálculo do momento de inércia do sistema de calibração.	58
Figura 5.12: Máquina Babolat® RDC. Nesta imagem pode visualizar um exemplo de uma medição de uma raquete.	59
Figura 6.1: Tecnologia <i>Flexpoint</i> ™.	61
Figura 6.2: Movimento de uma raquete durante o impacto de uma bola de ténis. Esquerda: raquete tradicional. Direita: raquete com o sistema <i>Flexpoint</i> ™.	61
Figura 6.3: Forma de “concha” do efeito <i>Flexpoint</i> ™.	61
Figura 6.4: Metodologia adoptada para visualizar o efeito <i>Flexpoint</i> ™ a alta velocidade.	62
Figura 6.5: Câmara de alta velocidade Redlake MotionScope®.	62
Figura 6.6: Sequência de imagens do impacto da bola de ténis com a raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i> no local do sistema <i>Flexpoint</i> ™.	63
Figura 6.7: Impacto mostrando o efeito do <i>dead spot</i>	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Escalas Europeia e Americana para os diferentes diâmetros de corda.	17
Tabela 4.1: Frequência e amortecimento da raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i> para as diferentes condições (corda com carga aplicada de 260 N).	47
Tabela 4.2: Modos naturais de vibração para a raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i>	48
Tabela 5.1: Valores finais para o momento de inércia e rigidez do sistema principal.	58
Tabela 5.2: Valor do momento de inércia para a raquete <i>Head Flexpoint Radical Tour</i>	60
Tabela 10.1: Especificações das bolas de ténis [4].	72
Tabela 10.2: Valores do momento de inércia e da rigidez do sistema principal.	82

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a	Distância entre o CM da raquete ao centro da mão
a_b	Distância da mola ao ponto O
a_x, a_y	Aceleração na direcção x, e direcção y
a_G	Aceleração no centro de massa da barra
A	Ponto de impacto da bola na raquete
b	Distância entre o ponto de impacto da bola ao CM da raquete
B	Ponto de fixação da mão ao punho da raquete
d	Distância do ponto O ao CM da raquete
e	Distância entre a peça “base varão” e a massa
f	Frequência
F	Força exterior aplicada à barra
F_{k1}, F_{k2}	Força da mola 1 e mola 2, respectivamente
G	Centro de massa da barra
H_G	Taxa de variação do momento angular da barra
I_{CM}	Momento de inércia no CM da raquete
I_i	Momento de inércia das massas na posição i
I_r	Momento de inércia da raquete
I_S	Momento de inércia do sistema de fixação
k, k₁, k₂	Rigidez da mola
k_{eq}	Rigidez equivalente do sistema de fixação
K_m	Rigidez equivalente das molas
L	Quantidade de movimento
L_b	Comprimento da barra
m	Massa da raquete
m_b	Massa da barra
m_{eq}	Massa equivalente do sistema de fixação mais raquete
M_O	Momento aplicado no ponto O
M_G	Momento aplicado no centro de massa da barra
r	Raio da polia
R_{Ox}, R_{Oy}	Reacções no ponto O na direcção x e na direcção y, respectivamente
T	Período de oscilação
T_i	Período de oscilação do sistema para as massas na posição i
V	Velocidade linear
\ddot{x}	Aceleração linear na direcção x
\ddot{y}	Aceleração linear na direcção y
θ	Ângulo
ω	Velocidade angular da raquete
ω_n	Frequência natural
$\ddot{\theta}, \ddot{\theta}_b$	Aceleração angular e aceleração angular da barra
ACOR	Coefficiente de restituição aparente
CM	Centro de massa
COP	Coefficiente de percussão
COR	Coefficiente de restituição
FRF	Função de resposta em frequência
H₁	Grau de confiança da FRF
<i>Swingweight</i>	Momento de inércia

1 INTRODUÇÃO

1.1 EVOLUÇÃO DO TÊNIS

O nome “Tênis” é derivado do velho nome francês dado ao jogo, *Tenezt*. Um jogo muito parecido com o tênis era jogado no século XIII na França, inicialmente em Paris pelas altas classes sociais. Alguns acreditam que o tênis foi ensinado aos franceses pelos italianos e os gregos que conheciam um jogo similar durante aquele período. Os franceses chamavam o jogo de *Jeu de Paume* (jogo da palma), uma vez que os jogadores utilizavam as palmas das mãos para bater na bola. Mais tarde, as raquetes permitiram que os jogadores obtivessem um maior alcance. Aproximadamente 100 anos depois, a aristocracia britânica começou a praticar este desporto. O jogo era jogado em ambientes fechados, com uma pesada e incômoda raquete, e com regras pouco definidas. Este jogo, que em alguns aspectos é similar ao badminton, é chamado pelos americanos de *Court Tennis* e pelos britânicos de *Real Tennis*.

Em 1873, o major Walter Clopton Wingfield, fazendo uso do seu conhecimento sobre o *Real Tennis* elaborou o chamado, pelos americanos, *Lawn Tennis*. Em Dezembro deste mesmo ano, Walter anunciou as regras do seu novo jogo com raquetes. O jogo era disputado em ambientes abertos, em campos de relva e com a rede muito mais alta que é hoje. Wingfield patenteou o desporto em Fevereiro do ano seguinte. O *Lawn Tennis* cresceu rapidamente em popularidade na Grã-Bretanha e dispersou rapidamente nos Estados Unidos da América.

Mar Ewing Outerbrigde, uma mulher rica que habitava uma ilha dos EUA, estava de férias nas Bermudas no começo de 1874 e observou alguns homens britânicos a jogar o recente jogo inventado por Walter Wingfield. Ela retornou à sua terra natal na primavera do mesmo ano e trouxe o equipamento de tênis com ela. O jogo foi brevemente difundido pelas outras partes do país. Foram construídos campos em Nahant, Massachusetts, Newport e Filadélfia.

O tênis continuou a prosperar e o primeiro Campeonato de Tênis dos Estados Unidos foi realizado em 1881 no Newport Casino em Newport. O campeonato foi para ser sediado em Forest Hills, Nova Iorque, e foram realizados lá jogos desde 1924 até 1977. Em 1978, o evento transferiu-se para o “Centro Nacional de Tênis da Associação de Tênis dos Estados Unidos” em Flushing Meadows, Nova Iorque.

Wimbledon (Inglaterra), o maior campeonato internacional, foi realizado pela primeira vez em 1877; o campeonato francês em 1891 e o Australiano em 1905. Estes três, mais o campeonato dos Estados Unidos, começaram a ser chamados de *Big Four*. Eles constituem os chamados *Grand Slams* do tênis. As equipas nacionais vêm competindo para a famosa *Davis Cup*, símbolo da supremacia do tênis internacional desde 1900.

Em 1880 tiveram lugar no nosso país os primeiros jogos de ténis, praticados entre os representantes da comunidade inglesa, que confraternizavam de raquete na mão, nos relvados do Porto, Cascais e Carcavelos.

O ténis foi, assim, tornando-se popular entre os abastados comerciantes ligados à exportação do Vinho do Porto. Os diplomatas, domiciliados na sua maioria na zona da vila piscatória dos arredores de Lisboa, não descuravam a possibilidade de experimentar a nova moda; e em Carcavelos eram os operários envolvidos na construção do cabo submarino que se divertiam com o novo desporto.

A modalidade praticada, em quase exclusivo pela comunidade anglófona, era o desporto preferido de uma parte significativa da aristocracia portuguesa, graças ao empenho de um comerciante de renome, Guilherme Ferreira de Pinto Basto.

Como praticante de ténis, conseguiu sagrar-se por nove vezes vencedor nos Campeonatos Internacionais de Portugal. Mas foi enquanto dirigente que a sua actividade deu maiores frutos, nomeadamente, com a fundação do Sporting Clube de Cascais. A sua capacidade organizativa levou-o a presidir à primeira direcção da Federação Portuguesa de *Lawn Tennis*, fundada a 16 de Março de 1925. Desempenhou o cargo até 1934, quando foi substituído pelo seu amigo, Rodrigo Castro Pereira. Em 1946, foi eleito Presidente Honorário da Federação, posição de que muito se orgulhou até à data do seu falecimento em 26 de Julho de 1957.

O Sporting Clube de Cascais foi o berço onde o “pai” do ténis português, Guilherme Pinto Basto, ensinou este desporto a dar os primeiros passos.

Popularmente conhecido pela denominação de “Club da Parada”, o Sporting cascalense atraiu o interesse de muita gente para o *Lawn Tennis*, surgindo como pioneiro na organização de campeonatos, juntamente com o Real Velo Clube do Porto.

Com o avançar do tempo e o forte crescimento do interesse à volta da modalidade, os torneios clubísticos iam aumentando de importância, à medida que as próprias associações iam nascendo. Clube Portuguesde *Lawn Tennis*, Grupo *Lawn Tennis* de Lisboa, Lisboa Cricket Club, Grupo de Matosinhos, Assembleia da Granja, Club da Foz, Grupo Nova Sintra, Oporto Cricket Club, Grupo de S. Roque da Lameira, Carcavelos Criket Club, Grupo *Lawn Tennis* do Prado (Porto) e Grupo *Lawn Tennis* da Parede foram os principais clubes que se juntaram ao Sporting Clube de Cascais e ao Real Velo Clube do Porto.

Com êxito das pequenas iniciativas vieram os grandes sonhos. E em 1902 foi possível tornar realidade a primeira edição dos Campeonatos Internacionais de Portugal, ainda e sempre no recinto do Sporting Clube de Cascais.

O *Lawn Tennis* parecia definitivamente lançado como modalidade desportiva. Mas nesse mesmo ano sofreria um forte revés a 5 de Outubro com a Implantação da República.

A aristocracia portuguesa tinha sido até aí interessada espectadora e entusiasmada participante nos torneios de ténis realizados nos clubes de Lisboa e Porto. Com a República, grande parte dos nobres seguem o caminho de D. Manuel II, exilando-se no estrangeiro.

Entre os que restaram, continuaram a disputar-se os campeonatos, mas em 1914, com a eclosão da Primeira Guerra Mundial, novo golpe se abate sobre o jovem desporto. Obrigados a alistar-se, portugueses e ingleses, residentes em Portugal, vão combater para as terras estrangeiras.

Terminada a guerra, recontaram-se as “espingardas” do ténis nacional, que então viu surgir novos valores. Ainda e sempre na primeira linha dos dinamizadores do ténis em Portugal, Guilherme Pinto Basto apela aos seus contactos internacionais e consegue trazer até ao nosso país as grandes figuras do ténis dos “Loucos Anos Vinte”.

Em meados da década de 20, deu-se outro passo de gigante no desenvolvimento do ténis em Portugal. Com a criação, a 16 de Março de 1925, da Federação Portuguesa de *Lawn Tennis*, estava criada a estrutura aglutinadora que permitiria uma mais correcta expansão da modalidade, bem como, a concretização de um sonho - a participação de Portugal na maior competição por equipas do calendário masculino, a Taça Davis.

Sem existir uma federação nacional, os tenistas nacionais viam-se impedidos de competir na já então famosa prova. Por isso, em 1924, nas instalações do Automóvel Clube de Portugal, os mais dinâmicos tenistas portugueses reuniram-se e lançaram as bases da Federação Portuguesa de Ténis, que entrou em funções no ano seguinte.

Em 1945, foi inaugurado o complexo do Estádio Nacional (Lisboa). Inaugurado com pompa e circunstância no dia 10 de Junho, este conjunto de infra-estruturas desportivas respondia ao desejo da Federação Portuguesa de Futebol de possuir um campo para acolher as selecções estrangeiras. Mas tornava igualmente possível uma maior divulgação da prática do ténis, pois do complexo faziam também parte 9 campos de ténis.

Em 1975, a Escola de Ténis João Lagos foi o embrião de um projecto que actualmente comporta mais de uma dezena de firmas distintas, todas dedicadas à área do desporto. A Sotenis iniciou pouco depois a sua actividade, começando por organizar torneios de *prize-money*, alargando depois o seu raio de acção aos Grande Prémios, circuitos satélites, competições internacionais de juniores e *challengers*, até chegar ao ambicionado grande torneio, tornado realidade em 1990 com a inclusão do Estoril Open no calendário oficial do *ATP Tour*, com a categoria *World Series*.

Em 1982 a ideia longamente amadurecida de trazer a Portugal uma grande figura do ténis mundial tornou-se possível. O mítico Bjorn Borg, retirado do circuito profissional no Outono de 1981, dedicava-se, então, apenas a encontros de exibição. As suas prestações em Cascais e Póvoa de Varzim, onde actuou ao lado de Vitas Gerulaitis, relançando o interesse pelo jogo do ténis. Com os pavilhões a abarrotar e a televisão a

permitir a milhões verem em actuação aquele que muitos consideravam o melhor jogador da história do ténis, deu-se início a um inesperado “boom” no número de praticantes, que fez com que no final da década de oitenta o ténis fosse a segunda modalidade desportiva com mais praticantes em Portugal.

Portugal em 1990, através da Sotenis, candidatou-se à organização de uma prova em piso de terra batida. Reconhecendo a capacidade organizativa da entidade portuguesa, que anteriormente levava a cabo dezenas de provas internacionais, o *ATP Tour* aceitou o pedido. O Estoril Open estava no ano zero.

Desde 1990, o Estoril Open teve já seis edições, com cinco vencedores - os espanhóis Emilio Sanchez (1990), Sergi Bruguera (1991) e Carlos Costa (1992 e 1994); o ucraniano Andrei Medvedev (1993), e o austríaco Thomas Muster (1995).

Em 1995 o Estoril Open passou a ter a companhia de outra prova portuguesa na categoria de World Series do ATP Tour. O Maia Open/Oporto Cup, depois de um longo percurso como *challenger*, chegou à divisão maior do ténis mundial. Com um *prize-money* de 328 000 dólares, jogou-se na semana a seguir a Roland Garros e foi ganho pelo espanhol Alberto Berasategui. Para 1996 ambas as provas continuam de pedra e cal no calendário do *ATP Tour*, aumentando mesmo os seus prémios monetários.

1.2 O JOGO

O jogo de ténis pode ser designado por singulares ou por pares, dependendo do número de jogadores que participam em cada lado do campo. No caso do jogo de singulares são adversários dois jogadores do mesmo sexo, contudo, no jogo de pares podem formar equipa de jogadores do mesmo sexo ou mistos.

O campo é dividido em dois meios campos por uma rede, e o objectivo é bater a bola de ténis além da rede, para o meio corte adversário, com a ajuda de uma raquete. Para marcar um ponto é preciso que a bola toque no solo de qualquer parte do campo do adversário, fazendo com que este não a consiga devolver, ou que devolva para fora dos limites do outro meio campo. O desporto possui assim aspectos de ataque, bater bem a bola de forma a dificultar a devolução do adversário, e defesa, bom posicionamento no campo para antecipar o ataque do adversário.

O ténis possui um intrincado sistema de pontuação, que subdivide o jogo em jogos e *sets*, onde um jogo é um conjunto de pontos e um *set* é um conjunto de jogos. Quando for atingido o número de *sets* requerido, o jogador vence a partida.

Um jogo consiste numa sequência de pontos jogados, com o mesmo jogador a realizar a batida inicial, chamado de serviço. O jogo é ganho pelo primeiro jogador que consiga conquistar, pelo menos, 4 pontos ou que haja uma diferença de dois pontos. A evolução do marcador avança desde zero até três pontos, e é descrito como zero (*love*), quinze, trinta, quarenta. Caso um dos jogadores tenha atingido o quarenta-zero (40-0) ou zero-quarenta (0-40), basta-lhe ganhar mais um ponto para conquistar o jogo. Se ambos os

jogadores tiverem ganho 3 pontos (equivalente a 40-40), o resultado é chamado de iguais (*deuce*). Nesta fase, se um dos jogadores alcançar mais um ponto que o adversário, está-se numa situação de vantagem, do serviço ou da resposta. Para o jogador que se encontra em vantagem basta-lhe ganhar mais um ponto para conseguir o jogo. Caso não o consiga concretizar, e seja o adversário a ganhar o ponto, volta-se à situação de iguais.

No final de cada ponto disputado, é sempre proferido em primeiro lugar a pontuação do jogador que realiza os serviços, seguido do adversário, para que a qualquer instante se possa saber, com relativa facilidade, o resultado do encontro. Após a conclusão da partida, o resultado é sempre anunciado tendo como referência o vencedor do jogo.

No ténis é comum que o jogador que efectua o serviço, para dar início à discussão do ponto, já tenha a vantagem de ataque, ditando o ritmo de andamento do ponto. Desta forma, uma das estratégias de jogo é inverter esta vantagem durante a troca de bola, isto é, durante a defesa fazer com que o adversário, através de erros, perca o ponto. Ganha a partida aquele que atingir o número de *sets* predefinidos – para os torneios masculinos pode ser à melhor de 5 *sets* ou à melhor de 3 *sets*, e para os torneios femininos são sempre à melhor de 3 *sets*.

Pode ainda referir-se algumas terminologias para a melhor compreensão do jogo de ténis:

- ponto de jogo, referente ao ponto que se for ganho pelo jogador que esteja em vantagem, lhe dá o jogo;
- ponto de *set*, caso consiga conquistar o *set* em questão;
- ponto de partida, quando possui o ponto que lhe dá obtenção da partida;
- e ponto de *break*, quando o resultado é favorável ao jogador que não está a servir, estando em 0-40.

2 RAQUETE DE TÊNIS - ESTADO DE ARTE

As raquetes usadas no tênis *Lawn Tennis* foram desenvolvidas a partir das raquetes usadas no *Real* ou *Royal Tennis*. Estas eram feitas de madeira e construídas individualmente, resultando de inúmeras ideias para a forma, robustez, massa e tipo de encordoação, muitas das quais convertidas em patentes.

A raquete de tênis é uma peça de equipamento necessária para se poder praticar/jogar o tênis, e é um dos equipamentos, ao nível de todos os desportos, aquele que atrai maior atenção em termos de avanços tecnológicos. Estes avanços acontecem uma vez que a raquete de tênis é um instrumento individual e pode ser personalizado por forma a adaptar-se à antropometria e estilo de jogo de cada atleta.

Os quadros das raquetes eram inicialmente construídos a partir da madeira do freixo (*ash*), devido à sua rigidez e resistência mecânica. Mais tarde, foi descoberto, que tubos de metal também poderiam ser usados para o mesmo fim [1]. Contudo, surgiram problemas ao nível das arestas vivas que se obtinham após a furação do quadro, para a passagem das cordas. Isto não acontecia para os, quadros de madeira e, como tal, os quadros metálicos foram postos de lado.

Após a resolução deste problema, foram colocadas no mercado as raquetes de alumínio, onde persistiram durante largos anos. Só a partir de 1960, as raquetes passaram a ser fabricadas em material compósito devido forte desenvolvimento de novas técnicas de fabrico. Estas são as raquetes utilizadas presentemente, Figura 2.1.

As raquetes em material compósito são 25-40 % mais leves do que as primeiras construídas à 30 anos atrás, mesmo possuindo uma maior área de cabeça. Estas mudanças nas características físicas das raquetes são apreciadas pelo atleta amador e não tanto pelos atletas profissionais, apesar de ambos beneficiarem com o aperfeiçoamento das propriedades mecânicas.



Raquete da Marca Dunlop[®],
de madeira¹



Raquete da Marca Donnay[®],
de alumínio¹



Raquete da Marca Head[®] de
material compósito

Figura 2.1: Evolução do material usado na construção das raquetes de tênis.

¹ Gentilmente cedidas pelo Engenheiro Jorge de Matos Reis.

Paralelamente ao desenvolvimento das raquetes, as cordas e as bolas de tênis também sofreram alterações. No que respeita às cordas, estas estão colocadas sob a forma de um padrão entrelaçado, onde se faz o contacto com a bola, e o quadro, onde estão fixas, actua como veículo para posicionamento, deste plano, à velocidade e direcção pretendidas.

Durante uma batida normal, a bola contacta com as cordas, originando uma forte deformação, tanto por parte das cordas como por parte da bola. Na Figura 2.2 seguinte mostra-se a deformação da bola durante um impacto com o solo. Esta imagem foi obtida com uma câmara de alta velocidade² a uma taxa de aquisição de 1000 imagens por segundo. No entanto, após cerca de 5 milissegundos, ambas voltam à sua forma original.



Figura 2.2: Deformação da bola durante o contacto com o solo.

Em 1920, a carga média aplicada às cordas era de, aproximadamente, 200 N (20 kg ou 44 lbs). Hoje, a carga aplicada aumentou para 250 N (25 kg ou 55 lbs), com alguns atletas profissionais a usarem na ordem de 350 N (35 kg ou 77 lbs). Muitas das antigas raquetes de madeira empenavam devido à carga usada. No entanto, as cordas estão sujeitas a quebrar e a perder as propriedades elásticas ao longo do tempo.

Quanto às bolas de tênis, estas têm de estar de acordo com as regras estabelecidas pela Federação Internacional de Tênis, permitindo desta forma, que as propriedades se mantenham durante o jogo.

Existe diferentes tipos de bolas de tênis consoante o local e tipo de campo. Bolas ligeiramente mais rápidas são usadas em campos “mais lentos”, enquanto bolas com um diâmetro maior e lentas são usadas em campos “mais rápidos”. No caso de o jogo decorrer em elevadas altitudes, existem bolas específicas para este efeito.

² Equipamento gentilmente cedido pelo Laboratório de Biomecânica da FADEUP.

2.1 ANATOMIA DA RAQUETE

Para a melhor compreensão da raquete de ténis é necessário conhecer em primeiro lugar, as diferentes partes/zonas que compõem, ver Figura 2.3.

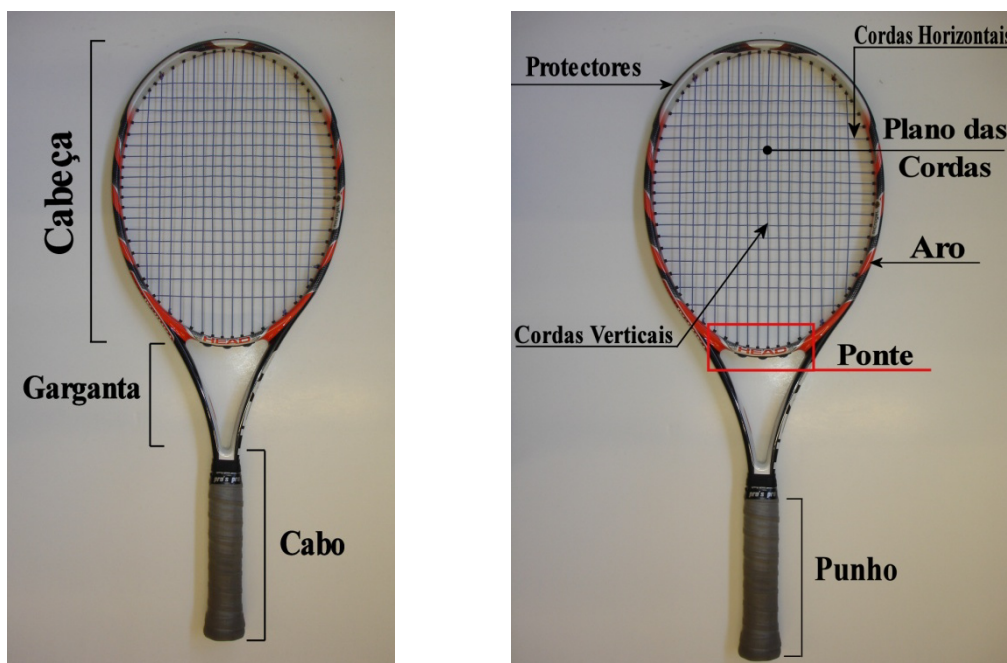


Figura 2.3: Anatomia da raquete.

Uma raquete de ténis é constituída essencialmente por 3 partes: *cabo*, *garganta* e *cabeça* (a grafia em itálico indica a tradução do autor dos termos anglo-saxónicos: *shaft*, *throat* e *head*). A cabeça da raquete corresponde à zona onde as cordas estão fixas. Nestas é realizada, através de dois ou quatro nós. Para evitar o contacto das cordas com as arestas vivas do aro são utilizados protectores. Os protectores são tiras de material plástico que contêm mangas que se inserem nos furos e servem de protecção.

O topo da cabeça da raquete, seguindo a disposição da Figura 2.3, designado por *extremidade livre da cabeça*; o mesmo acontece para base do cabo designada de *extremidade livre do punho*.

A *ponte* constitui a região do quadro no topo da garganta e completa o *aro* da cabeça.

A *garganta* é a zona de ligação entre a cabeça e o cabo. Por sua vez, o cabo integra o *punho*. Este último, uma peça de material plástico que se coloca por cima do cabo para lhe conferir a forma final seguido do chamado *grip*, uma fita de material esponjoso que protege a mão do atleta das arestas vivas e proporciona maior conforto quando se segura o cabo.

O *quadro* é constituído pelo aro, garganta e cabo ou seja, é a própria raquete sem as cordas, o punho e os protectores.

As *cordas* estão contidas na cabeça da raquete, formando o *plano das cordas*, e estão chamadas em cordas verticais (paralelas ao comprimento da raquete) e cordas horizontais (perpendiculares ao comprimento da raquete).

2.2 EVOLUÇÃO DAS RAQUETES DE TÉNIS

2.2.1 Raquetes de Madeira

Inicialmente as raquetes eram construídas a partir de uma ou várias tiras da madeira de freixo. Estas tiras eram dobradas de maneira a obter-se a forma pretendida e, por fim coladas com colas orgânicas. A mecanização deste processo em 1940 permitiu que as tiras fossem cada vez mais finas, as quais eram coladas com adesivos de uréia-formaldeído. Consequentemente, o fabrico da forma da raquete tornou-se mais fácil. Aumentando-se o número de tiras do quadro, consegue uma maior homogeneização das propriedades da madeira.

Além do freixo outros tipos de madeira foram usados, quer para a estrutura da raquete, quer para o seu revestimento. Na Figura 2.4 apresentam-se alguns modelos de raquetes de madeira.

Ao longo dos anos, a forma, o tamanho e o peso foram sendo normalizados em toda a indústria, embora não existisse uma autoridade para controlar, estes parâmetros. Até que, em 1979, a Federação Internacional de Ténis foi forçada a intervir devido à introdução de novos materiais no fabrico das raquetes, como o metal e os compósitos.



Figura 2.4: Raquetes de madeira usadas na década de 60 e raquete³ usada nos finais da década de 70.

³ Raquete gentilmente cedida pelo Professor João Maio.

2.2.2 Raquetes de Metal

O problema que existia na encordoação em raquetes de metal, como descrito no início do Capítulo 2, foi resolvido e patenteado por Lacoste [2] em 1953. Nesta solução as cordas eram fixas a um fio metálico enrolado à volta do quadro na cabeça da raquete, como se pode ver na Figura 2.5. Após a resolução deste problema, foi comercializada a primeira raquete em metal com o nome “Wilson T2000” que foi usada por Jimmy Connors durante muitos anos, com a qual ganhou o torneio de Wimbledon, singulares, em 1974 e 1981.

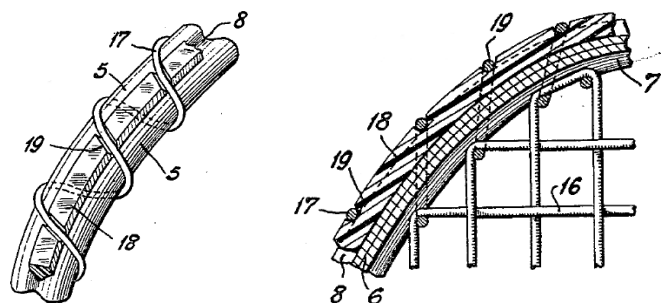


Figura 2.5: Encordoação num quadro de metal patenteado por Lacoste [2].

O sucesso comercial deste tipo de raquete, no início de 1970, encorajou a indústria a desenvolver raquetes noutros tipos de material tal como, por exemplo, aços e tubos metálicos baseados em ligas de alumínio. O uso de tubos metálicos instigou a que o cabo da raquete possuísse dois tubos em vez de um só (como acontecia para as raquetes de madeira), como acontecia para a raquete de madeira e se mostra na Figura 2.6. Devido a esta situação, a ponte tinha de ser incorporada entre os tubos para completar o aro da cabeça da raquete, fixando-se a ponte através do processo de soldadura ou, em alguns casos, era colocada uma peça de plástico com a forma da ponte fixa por parafusos, Figura 2.7.



Figura 2.6: Raquete de alumínio. Nesta figura podem ver-se os dois tubos que ligam ao cabo.



Figura 2.7: Exemplo de uma raquete metálica de 1970 com perfil em I. Neste caso a ponte, peça de plástico, está fixa ao quadro através de parafusos.

Mais tarde foram desenvolvidas as protecções de plástico utilizadas nos nossos dias para proteger as cordas das arestas vivas dos furos feitos na cabeça das raquetes metálicas. Desta forma as raquetes de madeira passaram a ser utilizadas cada vez menos. Com o avançar dos anos as raquetes de alumínio prevaleceram sobre as raquetes de aço devido ao processo de construção e ao custo de fabrico.

Devido às excelentes propriedades mecânicas dos metais, em meados da década de 70, a marca Prince[®] desenvolveu e patenteou uma raquete com uma área de cabeça acima do normal – *oversize head* [3]. Tal facto instigou outros fabricantes a produzir raquetes com diversos tamanhos de cabeça. Naquela altura a Federação Internacional de Ténis (*International Federation of Tennis – ITF*) não limitava o tamanho da cabeça da raquete, limite este que passou a existir a partir de 1979. Esta evolução permitiu aumentar a área de cabeça até 100%, comparando com uma raquete de madeira. Todavia, bastava um aumento da área de cabeça de 30-50% para obter um desempenho superior ao das raquetes de madeira.

2.2.3 Raquetes de Compósito

O sucesso das raquetes de metal, no início da década de 70, levou os fabricantes a experimentar materiais não muito tradicionais, particularmente a fibra de vidro e a recentemente desenvolvida fibra de carbono (vulgarmente conhecida como grafite na indústria do desporto). Apesar de ter um custo elevado a fibra de carbono passou a ser o material eleito devido às excelentes propriedades mecânicas superiores, até, às propriedades do aço. Tal facto possibilitou grandes perspectivas para o desenvolvimento futuro das raquetes.



Figura 2.8: Raquete de material compósito. Howard Head combinou o uso de materiais metálicos com materiais plásticos, desenvolvendo a primeira raquete em compósito em 1969, comercializada com o nome Arthur Ash Competition [4].

As fibras possuem por natureza propriedades mecânicas unidireccionais e por isso os tecidos têm que ser produzidos com uma determinada configuração de forma a garantir a isotropia das propriedades. Estes materiais permitem a utilização de processos de fabrico mais versáteis, com os quais se podem produzir formas mais complexas ou ajustar as propriedades globais.

O processo de construção de raquetes começa pelo enrolamento do tecido de material compósito, pré-impregnado, à volta de um tubo de plástico capaz de ser pressurizado pelo interior.



Figura 2.9: Exemplo de produção de tecidos de pré-impregnados.

Dependendo do estilo de raquete certas áreas podem ser reforçadas, de maneira a garantir a funcionalidade pretendida. De seguida, o conjunto é colocado dentro de um molde, Figura 2.10, e adicionada a ponte completando o aro da cabeça da raquete. Todo o conjunto é moldado debaixo de calor, aplicando-se ao mesmo tempo pressão interna ao tubo de plástico de maneira a curar o compósito.



Figura 2.10: Molde de uma raquete de ténis.

O processo de moldação foi desenvolvido e aperfeiçoado por diversos fabricantes, servindo de base ao actual fabrico de raquetes de ténis. Em certos casos a pressurização interna é obtida pela expansão de uma espuma, previamente introduzida dentro do tubo de compósito.

Uma vez que o fabrico do quadro requer algum trabalho manual, uma das vantagens deste trabalho, assenta no reforço de áreas específicas, efectuado antes da moldação. Isto permite especificar a rigidez e resistência que se pretende, e em que locais, se resultando num aumento das propriedades mecânicas, mantendo o mesmo peso ou até mesmo reduzi-lo. Em contrapartida, as raquetes de metal que usam secção constante específica, ou na forma de tubo, não possuem esta facilidade de adaptação sem comprometer o peso total.

Foram desenvolvidas diferentes técnicas para a construção dos quadros em compósito. Uma delas consiste na utilização de tecido “entrelaçado” enrolado à volta do tubo de plástico e posicionado no molde com a orientação pretendida. Seguidamente este é fechado e é injectada resina antes do tubo ser pressurizado e o molde aquecido. Outro método, muito utilizado, parte de dois semi-tubos em forma de “C” que são posteriormente, unidos através de adesivos para formar o tubo propriamente dito.

Outras técnicas usam resinas termoplásticas em vez de resinas termoendurecíveis. Neste método combina-se filamentos termoplásticos, normalmente nylon, com filamentos de

fibra de carbono, para se produzir, por exemplo, o entrelaçado atrás descrito. Ao aquecer e posteriormente arrefecer esta estrutura, o nylon derrete e funde-se às fibras de carbono, obtendo-se a estrutura desejada.

As técnicas que usam uma resina termoplástica divergem das anteriormente mencionadas. Neste caso são usadas fibras curtas de carbono, misturadas com uma matriz de nylon, e posteriormente injectadas num molde com a forma da raquete de ténis, onde solidifica. Para se formar a cavidade interna do tubo do quadro é colocado previamente no molde, um varão metálico. Este é posteriormente fundido. Este método, utilizado pela Dunlop® no período entre 1980 e 1990, foi depois abandonado, visto que dificultava a produção de raquetes com uma maior área de cabeça e formas mais arrojadas.

Em geral, o uso de fibras de carbono nos materiais compósito permitiu obter raquetes com uma maior área de cabeça, mais rígidas e leves do que as de madeira.

2.3 AS CORDAS

2.3.1 Cordas de Tripa Natural

As primeiras raquetes usadas no *Lawn Tennis*, em 1874, eram encordoadas com a pele exterior do intestino de ovelhas, conhecida como serosa, ver Figura 2.11. Na verdade a tripa de ovelha é um excelente material pois proporciona uma grande flexibilidade, elasticidade e capacidade para reter a mesma carga durante muito mais tempo. Apresenta uma estrutura fibrosa enroladas na direcção longitudinal, ver Figura 2.12.

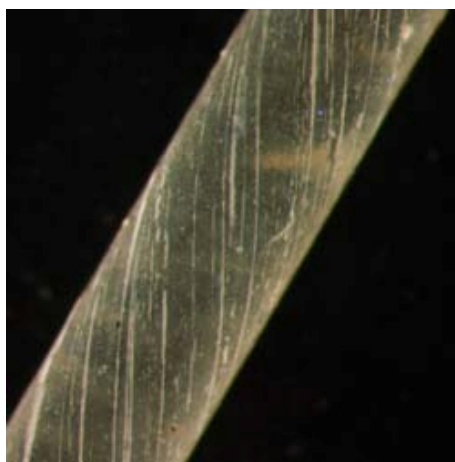


Figura 2.11: Corda de tripa natural ampliada 25x.



Figura 2.12: Vista da secção de uma corda de tripa natural (ampliação de 32x).

Após a Segunda Guerra Mundial verificou-se uma escassez de ovelhas e, como tal, forçou os fabricantes de cordas a procurarem alternativas à tripa de ovelha. O intestino de vaca foi o substituto para a tripa de ovelha, após se terem realizado experiências com tripa de porco e cavalo.

O número de animais necessário para fazer um conjunto de cordas foi reduzido para metade devido à utilização de tripa de vaca. Como são necessários 11 a 12 metros de corda para uma encordoação e o intestino de ovelha tem um comprimento inferior a 8 metros, são necessárias duas cordas. A utilização de duas cordas permite realizar encordoamentos híbridos, com cordas diferentes para a horizontal e vertical. No entanto, o maior comprimento do intestino de vacas, permitiu produzir uma só corda de tripa natural.

A produção de tripa natural consiste em colocar as tripas num banho químico para remover os contaminantes. São normalmente passadas por lixívia para se conseguir o aspecto transparente, embora alguns fabricantes preferirem não descolorar as suas cordas. As tripas são esticadas e secas lentamente, e as fibras resultantes são polidas para retirar todos os defeitos e alcançar o diâmetro pretendido. O passo final consiste na aplicação de uma camada protectora de poliuretano.

2.3.2 Cordas Sintéticas

As cordas sintéticas foram desenvolvidas devido ao elevado custo de produção de cordas de tripé e à sua baixa durabilidade.

As cordas sintéticas são constituídas essencialmente por nylon, poliéster ou kevlar, estas podem ser usadas individualmente ou combinadas com um ou vários filamentos. O processo utilizado no seu fabrico é a extrusão de uma fieira calibrada.

Os tipos de corda podem ser constituídos por: monofilamento e multifilamento. Estes, por sua vez, podem ser constituídos por um ou vários filamentos enrolados em torno do núcleo maciço ou enrolados em torno de um núcleo filamental.

Na Figura 2.13 mostra-se o Bresser[®], modelo Biological LCD Microscope utilizado para observar a secção das diversas cordas.



Figura 2.13: Microscópio Bresser[®] utilizado para visualizar a constituição das diferentes cordas.

As fotografias registadas das diferentes cordas mostram-se nas Figuras Figura 2.14 a Figura 2.16.

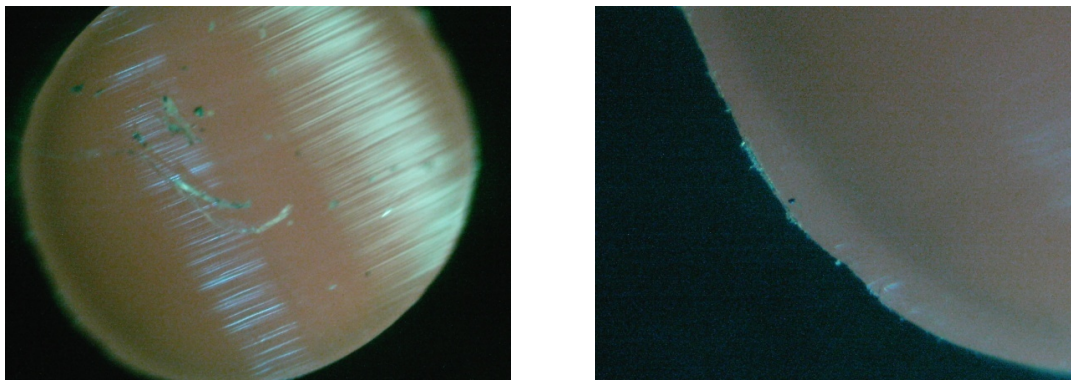


Figura 2.14: Vista da secção da corda Pro Redcode, da marca Tecnifibre[®]. Esta é uma corda com um monofilamento de co-poliéster revestida com poliéster (ampliação 10x).

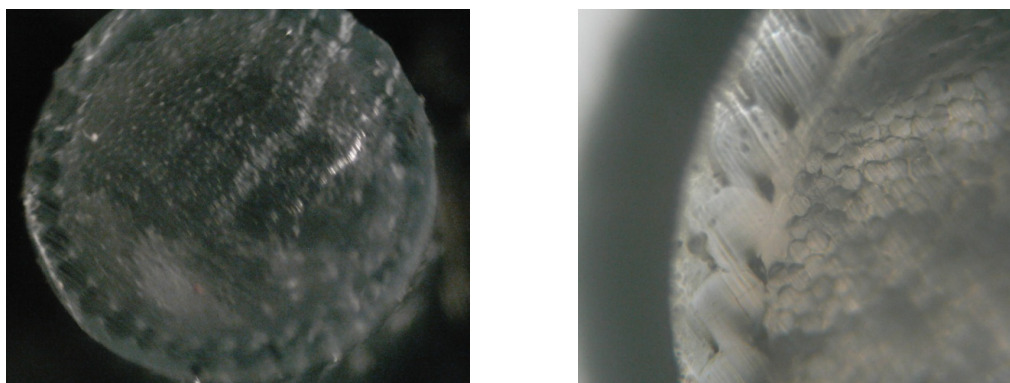


Figura 2.15: Vista da secção da corda Sensation 16, da marca Wilson[®]. Esta é uma corda multifilar com enrolamento multifilar (ampliação 10x).

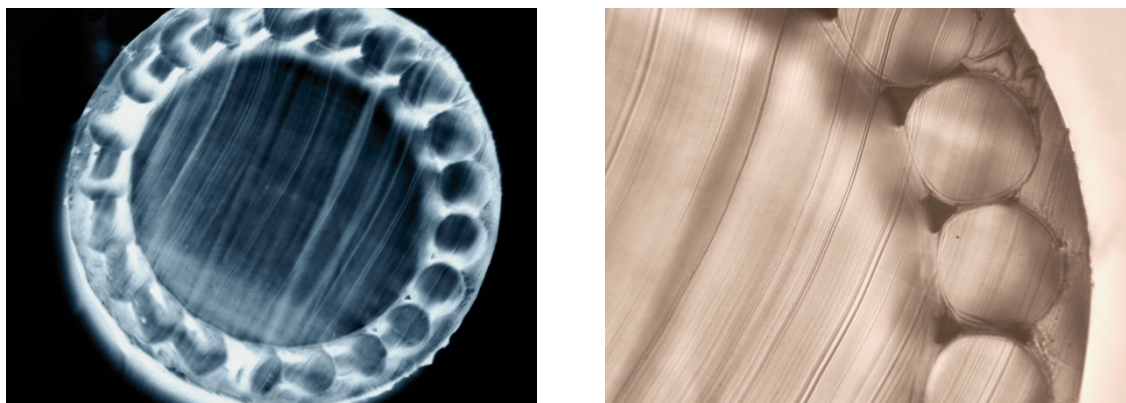


Figura 2.16: Vista da secção da corda Synthetic Gut Extreme 16, da marca Wilson[®]. Esta é uma corda monofilamentar com enrolamento multifilamentar (ampliação 10x). Esta corda é também conhecida como tripa sintética.

Independentemente da construção adoptada, as cordas sintéticas não possuem o amortecimento necessário para permitir uma batida suave equivalente à das cordas de tripa. O nylon é o material mais usado na construção de cordas, sendo o poliéster e o kevlar introduzidos para aumentar a durabilidade.

O diâmetro de corda mais utilizado situa-se entre 1-1,5 mm, ou 15-18 na escala americana (Tabela 2.1).

Uma corda com um diâmetro mais pequeno tem um comportamento mais flexível, mas reduz, ao mesmo tempo, a sua durabilidade. Pequenos movimentos entre as cordas causam atrito entre elas, o que leva a que as cordas partam no ponto da intersecção. Por sua vez, a textura exterior da corda condiciona o atrito com a bola e consequentemente os efeitos aplicados. Todavia, não existem provas científica que comprovem que cordas com menor diâmetro, quer ásperas ou polidas, tenham melhor desempenho.

Tabela 2.1: Escalas Europeia e Americana para os diferentes diâmetros de corda.

Escala Europeia	Escala Americana	Polegadas	Milímetros
12	13	0,065-0,071	1,65-1,8
11	14	0,059-0,065	1,50-1,65
9,5	15	0,056-0,059	1,41-1,50
9	15L	0,052-0,056	1,33-1,41
8,5	16	0,050-0,052	1,26-1,33
8	16L	0,048-0,050	1,22-1,26
7,5	17	0,046-0,048	1,16-1,22
7	18	0,042-0,046	1,06-1,16
4	19	0,035-0,042	0,90-1,06
3,5	20	0,031-0,035	0,80-0,90
3	21	0,028-0,031	0,70-0,80
2,5	22	0,024-0,028	0,60-0,80

Uma redução da carga nas cordas produz uma maior flexibilidade por parte do plano das cordas. Para as batidas do fundo do campo de ténis uma redução de 25% na carga corresponde a um aumento de 2% na velocidade da bola. Para a mesma redução de carga, e para os serviços, apenas existe um aumento de 1% na velocidade da bola [4].

A rigidez do plano das cordas é também afectada pela disposição das destas. Se o espaçamento entre as cordas for aumentado o plano torna-se mais flexível. O mesmo acontece se se aumentar o comprimento das cordas, pelo aumento da área da cabeça da raquete.

Existem diversos motivos propostos para explicar a diminuição da rigidez do plano das cordas [5]:

- O plano das cordas deforma-se mais durante o impacto com a bola, porém aumentando o cone de saída, ângulo formado com a perpendicular ao plano das cordas;
- A bola ao deformar-se menos produz e menor perda por histerese.

O aumento do tempo de contacto origina uma força de baixa intensidade que actua durante um longo período, resultando numa redução do choque no impacto entre a bola e as cordas.

De acordo com as regras do ténis, “a superfície de contacto com a bola deve ser plana e com uma configuração de cordas cruzadas ligadas ao aro da raquete e, alternativamente, entrelaçadas ou juntas onde as cordas se cruzam” (regra 4a da Federação Internacional de Ténis). Esta regra limita o movimento relativo das cordas e a rotação transmitida à bola. Esta regra foi introduzida em 1978 como resposta a uma configuração de cordas patenteada no ano anterior [6], que gerava o dobro da rotação do que uma raquete com a configuração das cordas nos nossos dias (Figura 2.17).

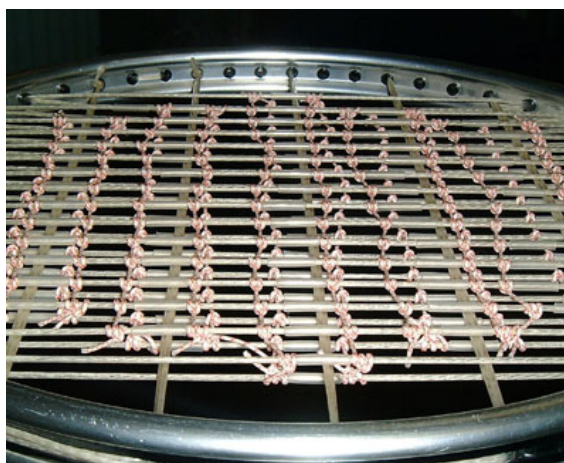


Figura 2.17: Configuração do plano de cordas patenteada por Werner Fischer em 1981. Esta encordoação ficou conhecida por encordoação do tipo espaguete.

A configuração da figura anterior foi considerada ilegal devido às cordas verticais e horizontais não estarem entrelaçadas (ou juntas, como prescreve a regra). Em vez disso, as cordas estão em planos paralelos e são capazes de se moverem com a ajuda de mangas tubulares, que actuam como rolamentos.

Esta liberdade de movimento permitia às cordas flectirem no plano em que se dá o contacto com a bola, e imprimir rotação à mesma quando as cordas recuavam. Desta forma os atletas com menor esforço obtêm maior rotação.

Nas figuras que se seguem (Figuras Figura 2.18 a Figura 2.23) podem ver-se os diferentes tipos de encordoamento que têm vindo a ser utilizados desde as raquetes de alumínio. De salientar que, presentemente, as raquetes utilizam, na sua maioria, os padrões 16x19, 16x20, 18x19 e 18x20. Isto significa que, e para o primeiro caso, existem 16 cordas verticais e 19 cordas horizontais, seguindo os outros padrões a mesma configuração.

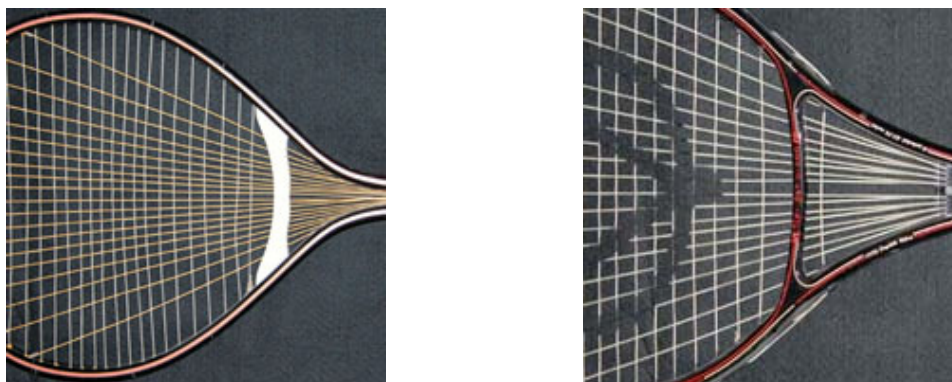


Figura 2.18: Encordoação do tipo Ventoinha.

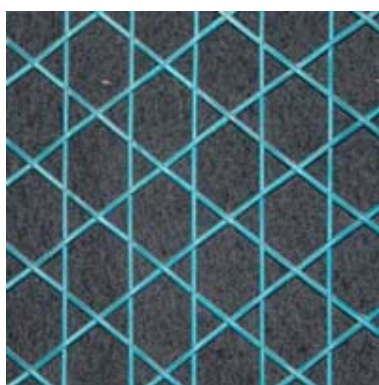


Figura 2.19: encordoação do tipo Hexagonal.

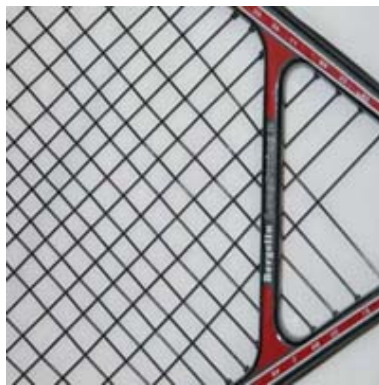


Figura 2.20: encordoação do tipo Diagonal.



Figura 2.21: Diferente tipo de furação para a fixação das cordas ao aro.

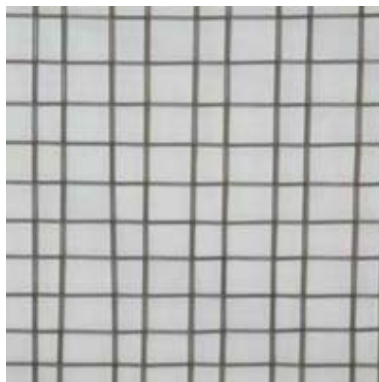


Figura 2.22: Encordoação com um tipo de espaçamento diferente.

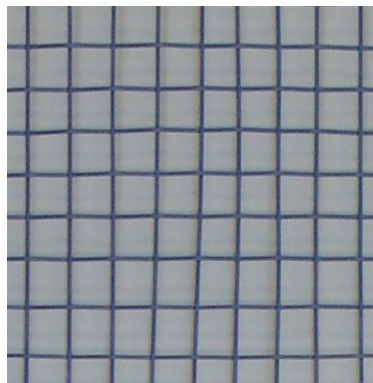


Figura 2.23: Encordoação usada presentemente. Neste caso o padrão é 16x19.

2.4 AS BOLAS

As bolas do antigo *Royal Tennis* eram tradicionalmente constituídas por tiras de couro cozidas entre si, possuindo no seu interior farrapos cabelo de cavalo ou material similar enquanto que as bolas de ténis dos nossos dias são fabricadas a partir de uma base de borracha.

Desde o início do *Lawn Tennis* as bolas de ténis eram feitas a partir da borracha indiana produzida a partir de um processo de vulcanização inventado por Charles Goodyear na década de 1850.

Originalmente, as bolas de ténis eram fabricadas somente de borracha, mas devido ao seu rápido desgaste e perda de propriedades, tiveram que ser aperfeiçoadas, e tal facto, originou a que fossem cozidas tiras de flanela à volta do núcleo de borracha, Figura 2.24.



Figura 2.24: Bolas de ténis do *Royal Tennis*, onde se podem ver as costuras (realizadas à mão).

Devido ao rápido desenvolvimento dos processos de fabrico, o núcleo de borracha passou a ser oco e pressurizado com um gás. Inicialmente a construção do núcleo assentava no princípio da forma de um trevo, onde uma camada de borracha era

prensada com uma forma semelhante a um trevo de 3 folhas e, seguidamente, lhe era dada a forma esférica. Químicos para gerar o gás pressurizado eram adicionados antes da forma esférica final e, posteriormente, activados no molde através do aquecimento deste para se obter a forma final da bola. Este processo foi utilizado durante muitos anos até que a evolução do jogo obrigou a uma uniformidade da bola (particularmente à esfericidade).

Actualmente, a bola é construída a partir de duas meias cascas de borracha que são fundidas entre si, de forma a produzir o núcleo. O tecido de flanela foi substituído por um tecido de lã chamado *Melton*, contendo grande percentagem de lã. Este tecido foi desenvolvido especialmente para as bolas de ténis. As costuras foram, por sua vez, substituídas por juntas de borracha vulcanizadas, como se mostra na Figura 2.25.



Figura 2.25: Bola tradicional do *Lawn Tennis*.

Inicialmente as bolas eram de cor branca ou preta, dependendo da cor do piso dos campos ténis. Mas, em 1972, a Federação Internacional de Ténis adoptou como regra bolas de cor amarela devido a um estudo que evidenciou que estas eram melhor vistas pelos telespectadores. Entretanto, em Wimbledon, mantiveram-se as tradicionais bolas brancas, até que em 1986 mudaram para as novas bolas amarelas, ver Figura 2.26.



Figura 2.26: Bola de ténis usada presentemente.

Até finais de 1980 apenas era admitido um tipo de bola. Após 1989 foram também aceites bolas para altas altitudes, em virtude das competições decorrerem em locais com pressões atmosféricas mais baixas. Bolas do Tipo 1 e Tipo 3 foram introduzidas nas regras de jogo em 2002 – no Anexo A pode ver-se uma tabela com os diferentes tipos de bolas.

Outras propriedades das bolas têm vindo a mudar ao longo do tempo. A propriedade que mais alterações sofreu foi a mudança de diâmetro sob carga aplicada. As trocas energéticas associadas à deformação e recuperação elástica da bola condicionam as perdas por histerese e os valores actualmente considerados foram estabelecidos em 1986.

Até recentemente, a maioria dos fabricantes de bolas situava-se na Europa e nos Estados Unidos da América. A maioria da produção, nos dias de hoje, ocorre no Extremo Oriente onde os custos salariais são mais baixos e as matérias-primas são mais baratas.

Os processos envolvidos na produção das bolas de ténis pouco mudaram ao longo dos últimos anos. Como tal, a borracha chega às fábricas em rolos. De seguida é amassada de forma a torná-la maleável, para poder ser trabalhada, e para as propriedades serem uniformizadas. São adicionados uma variedade de componentes para conferir as propriedades pretendidas: resistência, cor e propriedades de cura. O composto é colocado num tanque com um solvente à base de petróleo onde permanece durante várias horas para que este seja absorvido. Daqui, resulta uma “massa pegajosa” que posteriormente poderá ser novamente diluída com o mesmo solvente, até se obter a consistência pretendida.

Os constituintes das bolas pressurizadas têm por base borracha natural contendo um grande número de partículas muito finas para garantir a permeabilidade das bolas. Os constituintes, em partes por peso, são os seguintes:

- Borracha natural - 100
- GFC (*General purpose furnace' (GPF) black - a reinforcing filler*) - 30
- Argila - 32
- Óxido de zinco - 9
- Enxofre - 3,5
- Difenilguanidia (DPG) – um acelerador para o processo de cura – 2
- Ciclohexil benzil sulfonamida – também um acelerador – 1

Na produção das bolas de ténis, o composto de borracha é aquecido, extrudido na forma de varão e, posteriormente, cortado em partes mais pequenas, Figura 2.27, as quais são arrefecidos à temperatura ambiente.



Figura 2.27: Bocados de borracha extrudidos e cortados.

Os bocados de borracha, da Figura 2.27, são colocados numa prensa hidráulica onde se formam as duas meias partes da casca esférica e se curam parcialmente – tipicamente 2 minutos e 30 segundos a 150°C. De seguida, o excesso de material é removido, resultando, desta forma, duas cascas esféricas de borracha, Figura 2.28.



Figura 2.28: Meias cascas esféricas do núcleo de borracha.

Finalmente, a borda de cada meia casca é desgastada, de forma a obter uma superfície áspera para aplicação de um adesivo e também uma solução de borracha vulcanizada que se mostra Figura 2.29.



Figura 2.29: Bordo da calote de borracha desgastada para colagem.

Para a pressurização das bolas de ténis existem dois modelos. O primeiro consiste no uso de químicos. Este processo pode ser perfeitamente controlado e a pressurização ocorre depois da união das duas meias cascas de borracha, Figura 2.30. Os produtos químicos utilizados são normalmente o nitrato de sódio e o cloreto de amónio, que produzem nitrogénio durante o processo de moldação.

A pressurização com ar é um processo mais complexo. As duas meias cascas, ao ser unidas, vão aprisionar o ar dentro da casca final (Figura 2.30). O fecho da casca ocorre da seguinte forma:

- A prensa vai juntando as duas meias cascas até que fiquem quase unidas;
- Nesta posição as mesas da prensa são isoladas;
- De seguida é introduzido a pressão correcta de ar comprimido para dentro da mesa da prensa;
- A prensa continua o seu movimento de descida e une as duas meias cascas, aprisionando o ar comprimido dentro da casca de borracha formada;
- As mesas são aquecidas para vulcanizar a solução de borracha previamente adicionada e, seguidamente, arrefecidas após extracção do molde.

As bolas de ténis são normalmente pressurizadas a, aproximadamente, 82,7 kPa (0,827 bar ou 12 lb/sq.in).

Devido aos compostos de borracha serem permeáveis, a pressão vai diminuindo ao longo do tempo da vida da bola, que é de apenas de alguns meses. Como tal as bolas são vendidas em latas pressurizadas, de forma a garantir a pressão.



Figura 2.30: Núcleo de borracha.

A superfície externa do núcleo é desbastada de forma a produzir uma superfície rugosa, ver Figura 2.31, para poder ser aplicada uma solução de borracha. Normalmente esta solução é depositada num tambor rotativo juntamente com os núcleos, criando-se uma camada protectora uniforme, ver Figura 2.32.



Figura 2.31: Superfície após desbaste.



Figura 2.32: Cobertura do núcleo com uma solução de borracha

Para a cobertura do núcleo, existem dois tipos de material. Um deles é um tecido de lã chamado *Melton*, já referido anteriormente, e o outro é constituído por fibras sintéticas.

O tecido é fornecido em rolos de 1,5 m de largura (60 in) e 45,7 m de comprimento (150 feet). Posteriormente o tecido é revestido no seu verso com uma solução vulcanizante. De seguida são cortadas as tiras de tecido que envolvem a bola. Estas tiras têm a forma de palmilha, como se mostra na Figura 2.33. A fronteira das tiras são revestidas com uma solução vulcanizante que actua como as costuras das antigas bolas. Quando a solução estiver seca as coberturas estão prontas para ser colocadas na bola.



Figura 2.33: Forma da cobertura das bolas de ténis.

Para se produzir uma bola de tênis são necessárias duas coberturas, colocadas cuidadosamente no núcleo através de uma máquina dedicada para o efeito. Como tal, uma das coberturas é colocada ao longo da “costura” do núcleo de borracha, seguida da outra, como mostra a Figura 2.34.

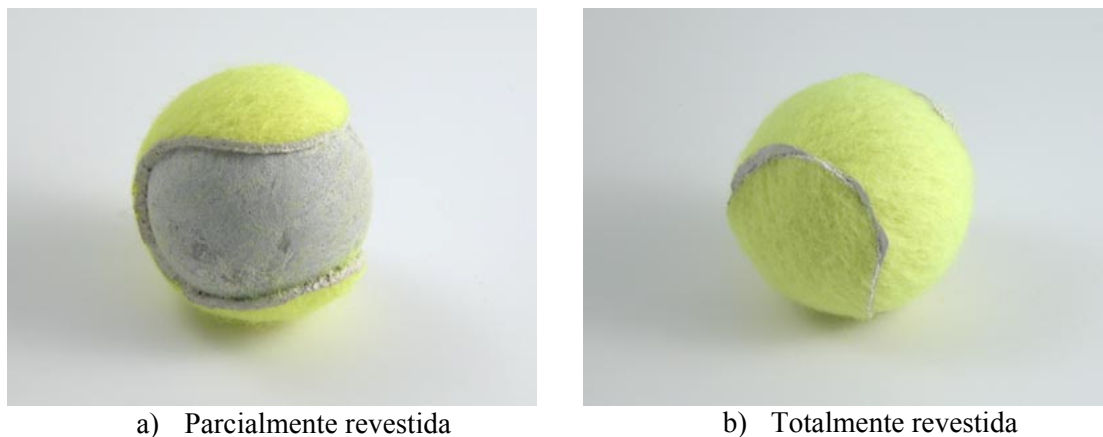


Figura 2.34: Bola de tênis revestida com tecido.

A bola é colocada numa prensa com a forma final e aquecida de forma a curar a solução de borracha e as “costuras” de borracha das tiras, deixando o pêlo com levantamento uniforme, ver Figura 2.35.



Figura 2.35: Bola após vulcanização da camada de revestimento do núcleo e da ligação das tiras.

No final para garantir uniformidade da superfície exterior, as bolas são passadas por uma atmosfera com vapor. O produto final mostra-se Figura 2.36.



Figura 2.36: Aspecto final da bola de ténis.

Finalmente as bolas são verificadas e testadas. Após estes processos, é transferida o nome da marca para a bola e empacotadas em latas de plástico pressurizadas.

3 IDENTIFICAÇÃO E CÁLCULO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE UMA RAQUETE

3.1 INTRODUÇÃO

Para caracterizar o comportamento de uma raquete existe um conjunto de parâmetros fundamentais. A massa da raquete assume uma importância predominante na caracterização das forças necessárias para a geração de movimentos de translação. No passado era normal que uma raquete tivesse uma massa próxima dos 0,400 kg. Com a introdução de novos materiais, existem actualmente raketes com massas inferiores a 0,350 kg.

Ainda que o peso seja importante, a distribuição de massa é preponderante na caracterização do movimento. A posição do centro de massa (CM) em relação ao punho é determinante na avaliação do esforço desenvolvido durante o movimento de batida. Este parâmetro influencia as características de inércia, as quais estão relacionadas com o movimento de rotação. Como a maior parte dos movimentos são preponderantemente de rotação, é o momento axial de inércia que caracteriza o seu desempenho dinâmico. É de referir que o momento axial de inércia varia linearmente com a massa e com o quadrado da distância entre o CM e o eixo de rotação pelo que, raketes mais leves podem apresentar inércias superiores.

A qualidade de uma raquete é avaliada pelo seu comportamento durante o impacto com a bola. O atleta realiza ao longo da sua vida desportiva milhões de batidas, procurando, sempre, o melhor desempenho, isto é, imprimir à bola a maior velocidade de saída e com grande precisão.

Para a caracterização dinâmica sob solicitação de impacto é necessário conhecer, também, as propriedades mecânicas da raquete. A sua rigidez global que depende do material utilizado na sua construção e da geometria, além de outros factores, como a tensão na corda e o tipo de encordoamento. O amortecimento interno, maioritariamente do tipo histerético, influencia o esforço induzido no atleta pelas vibrações provocadas pela batida. A este nível, são importantes o tempo de contacto entre a bola e a raquete e a região onde ele ocorre.

Finalmente deve referir-se a influência do escoamento do ar através da raquete. As atitudes da raquete durante o movimento condicionam a área exposta na direcção do escoamento e consequentemente a força de arrasto, a qual se opõe ao movimento e condiciona a batida. Actualmente, surgem no mercado algumas soluções que permitem melhorar o desempenho da raquete em movimentos com atitudes pouco vulgares.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS

Tendo em atenção as leis da física, o comportamento das raquetes é caracterizado pelas seguintes propriedades principais, definidas pelas respectivas matrizes:

- massa;
- rigidez; e
- inércia.

O peso da raquete é medido sem as cordas. Geralmente, as raquetes são classificadas em diferentes categorias, de acordo com o seu peso:

- ultra-leve – peso inferior a 2,40 N;
- leve – peso entre 2,40 N e 2,80 N;
- médio – peso entre 2,80 N a 3,20 N; e
- pesados – peso superior a 3,20 N.

A matriz de massa da raquete caracteriza a sua distribuição longitudinal, desde o punho até à extremidade livre da cabeça. Esta informação pode ser condensada nas coordenadas do centro de massa, medidas a partir do punho. De acordo com esta distribuição, as raquetes podem ser classificadas da seguinte forma:

- cabeça pesada (*head heavy* – HH);
- cabeça leve (*head light* – HL); e
- neutral (*even balance* – EB).

A rigidez na direcção longitudinal da raquete está relacionada com a flexão sofrida por esta sob a acção de uma carga perpendicular ao plano das cordas. Esta flexão permite, durante a batida, armazenar energia elástica de deformação que é devolvida à bola. Nas batidas fora do eixo longitudinal também é importante conhecer a rigidez torsional. De acordo com certos autores a rigidez longitudinal confere potência e a rigidez torsional confere controlo [7].

Para além destas propriedades, existem outros factores que influenciam o desempenho de uma raquete, tais como: o tamanho da cabeça, o comprimento, a secção, o tipo de quadro e o material. Finalmente, deve referir-se a corda e o encordoamento como factores com influência no desempenho da raquete.

Tendo em atenção os objectivos propostos para este trabalho, foi seleccionada uma raquete que apresenta-se inovação no sentido de utilizar novas combinações de parâmetros para otimizar um efeito específico. O modelo seleccionado foi apresentado pela marca Head[®] em 2008 com a designação de *Flexpoint Radical Tour*, reivindicando melhorar o controlo numa raquete de potência. Parâmetros normalmente tidos como de difícil conciliação.

A raquete seleccionada, que pode ser observada na Figura 3.1, apresenta uma característica geométrica na cabeça que supostamente condiciona a sua deformada durante a batida. Ao escolher este modelo é possível avaliar se a estratégia seguida pelo fabricante cumpre o efeito anunciado.



Figura 3.1: Raquete Head Flexpoint Radical Tour.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DE UMA RAQUETE

Existe actualmente uma infinidade de raquetes produzidas por cerca de duas dezenas de fabricantes dos quais se distinguem a Head[®], Babolat[®], Wilson[®], Prince[®], Dunlop[®] e Donnay[®]. Esta diversidade de modelos leva a que exista uma grande variedade de escolha. A selecção do modelo depende do nível de formação do atleta e das suas características físicas.

Para um atleta iniciado, a escolha é fortemente influenciada pela publicidade e recai, normalmente, em modelos de produção em série de menor custo. Para níveis de aprendizagem superiores já é importante conhecer com rigor os principais parâmetros da raquete. Nesta fase os atletas já conhecem as suas principais características e procuram o modelo mais adequado. Os fabricantes investem em estudos laboratoriais de forma a satisfazer esta procura e imprimem nos quadros das raquetes a informação necessária à sua selecção, ver Figura 3.2. Para os atletas de primeira linha, os fabricantes produzem raquetes por medida de forma a satisfazer todas as características antropométricas e de jogo. A este nível, existe um forte apoio laboratorial, quer na biomecânica de jogo, quer no estudo do desempenho das raquetes.



Figura 3.2: Características da raquete *Head Flexpoint Radical Tour* na zona da garganta.

Ampliando a zona da garganta, Figura 3.3, podem identificar-se os seguintes parâmetros anunciados pelo fabricante:

- carga recomendada sobre as cordas (*rec. string tension 26±2 kg 57±5 lbs*): $260 \text{ N} \pm 20 \text{ N}$;
- área da cabeça da raquete (*head size 645 cm²*): $0,0645 \text{ m}^2$;
- peso da raquete, sem cordas (*weight – unstrung 325 g*): $3,25 \text{ N}$;
- altura do quadro (*beam 21 mm*): $0,021 \text{ m}$;
- centro de massa sem corda (*balance – unstrung 315 mm*): $0,315 \text{ m}$;
- comprimento da raquete (*length 685 mm*): $0,685 \text{ m}$;
- padrão de encordoamento (*string pattern 16/19*): 16 horizontais / 19 verticais.



Figura 3.3: Identificação das características da raquete *Head Flexpoint Radical Tour*.

Geralmente todas as marcas apresentam os parâmetros acima identificados. Mas, por vezes, as marcas costumam apresentar mais um ou dois parâmetros, que são intrínsecos do próprio fabricante. Por exemplo no caso da marca Head[®], esta costuma fornecer o “*swing style rating*” que é uma medida do tempo de preparação para o movimento de batida (para o caso da raquete deste trabalho o fabricante diz que o *swing style* é o L4, isto é, necessita de uma preparação longa. Para o caso da marca Babolat[®], o mesmo parâmetro é apresentado com outro tipo de unidades, além de apresentar também a rigidez (*stiffness*) numa grandeza adimensional designada por RA. Nos modelos de topo é frequentemente indicado o momento de inércia (*swingweight*).

3.4 VERIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS

Depois de analisar cuidadosamente a informação fornecida pela Head® a propósito do modelo em estudo, foi necessário preparar um conjunto de testes que comprovem os valores indicados. Dos parâmetros mencionados, existem alguns que são de fácil determinação, a começar pelo peso que foi avaliado recorrendo a uma balança de precisão da marca Worten® B6182, existente no Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental. O peso da raquete, sem corda, foi medido, verificando-se o valor anunciado pelo fabricante, isto é, aproximadamente de 3,26 N (326 g), ver Figura 3.4.



Figura 3.4: Medição do peso da raquete *Head Flexpoint Radical Tour*.

Posteriormente, procedeu-se à determinação do centro de massa da raquete. Para a medição da distância da extremidade do cabo ao CM utilizou-se uma montagem que se apresenta na Figura 3.5. Para um maior rigor na medição recorreu-se a uma folha de papel milimétrico, sendo a raquete apoiada num rolo cilíndrico sobre uma superfície plana. Com a raquete na posição de equilíbrio horizontal, utilizou-se um esquadro para medir o braço.



Figura 3.5: Disposição dos elementos para a caracterização do centro de massa da raquete *Head Flexpoint Radical Tour*.

Após várias medições, verificou-se que o equilíbrio ocorria quando o braço da extremidade do punho tinha um comprimento de aproximadamente de 0,320 m, valor próximo dos 0,315 m anunciados pelo fabricante.

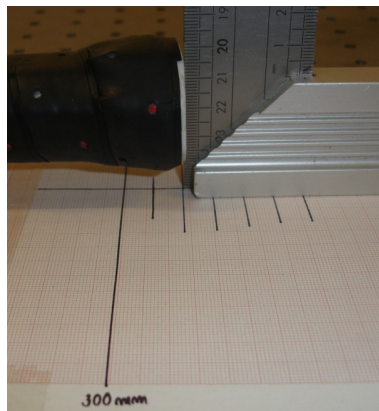


Figura 3.6: Avaliação do centro de massa da raquete *Head Flexpoint Radical Tour*.

3.5 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 bater 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 [8].

O COP é definido como a região 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.

Howard Head, na sua patente [3], define o *sweet spot* como a região onde o COR é máximo ou, por outras palavras, onde a velocidade de saída da bola é maximizada. Esta área é por vezes designada por “região de potência” e corresponde ao valor máximo do COR.

Por último, a terceira definição diz respeito à região de impacto onde as vibrações são mínimas ou inexistentes. Esta situação ocorre quando o impacto se dá próximo das linhas nodais de vibração.

Na Figura 3.7 apresentam-se esquematicamente as posições relativas das três regiões que, de acordo com os diversos autores, são designadas por *sweet spot*.

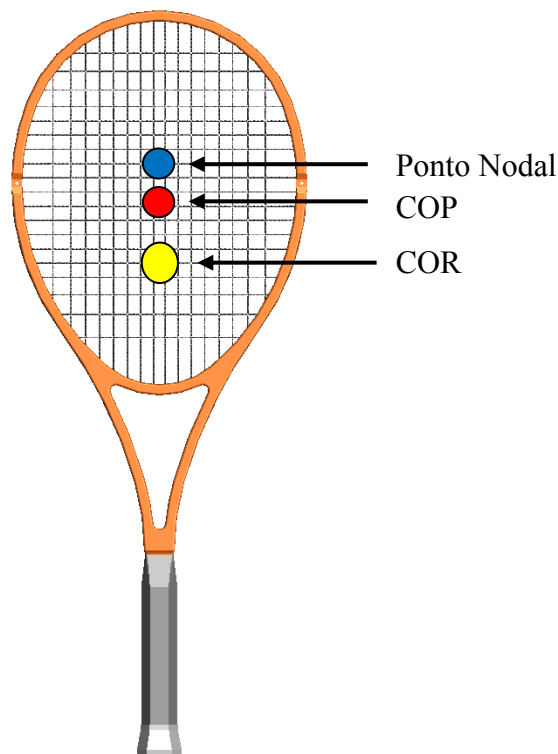


Figura 3.7: Definições do *sweet spot*: COP, ponto nodal e COR [9].

3.5.1 Centro de Percussão – COP

O COP representa a região de impacto da bola com as cordas para o qual o movimento de translação e rotação no punho da raquete se anula. A sua utilização depende da distribuição longitudinal 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 [8-[11]. A equação (3.1) permite determinar a distância do CM ao COP de forma expedita.

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

Nesta expressão I_{CM} representa o momento de inércia no CM, a a distância do punho ao CM e m a massa da raquete, ver Figura 3.8.

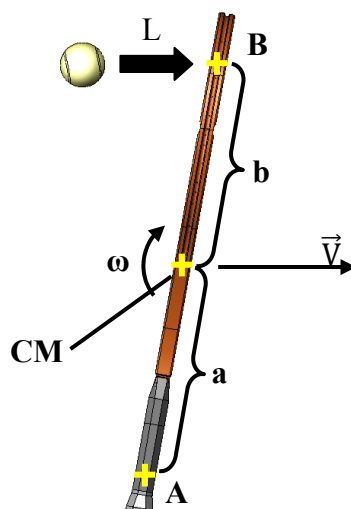


Figura 3.8: Centro de percussão de uma raquete de ténis.

Desta forma pode-se dizer que se trata de um parâmetro geométrico independente da quantidade de movimento da bola e da raquete. Contudo, a posição relativa do ponto de impacto assume uma importância determinante na eficiência da batida. Da Figura 3.9 pode avaliar-se a influência da posição do impacto da bola nas forças geradas no punho.

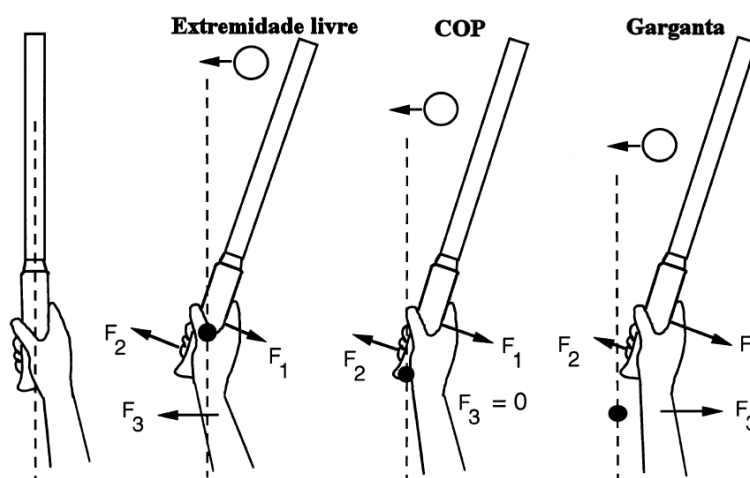


Figura 3.9: Reações no punho para diferentes impactos [12].

Uma bola que seja batida no COP não causa movimentos bruscos ao punho, mas a raquete e o punho do atleta sofrem rotação independentemente da posição de impacto. Se o contacto ocorrer junto à extremidade livre da cabeça, o punho da raquete tende a “fugir da mão”; caso o contacto seja na zona da garganta, o punho da raquete tende a “comprimir” a palma da mão. Um impacto no COP, é o desejado pois origina uma situação neutra.

Para o caso em estudo, a raquete *Head Flexpoint Radical Tour*, o centro da pega encontra-se a 7 cm da extremidade livre do punho. Neste caso, a distância a é igual a 32,1 cm. A massa da raquete é igual a 0,343 kg e o momento de inércia no CM é igual a 158,7 kg*cm², valor obtido através de medições experimentais. De acordo com a expressão (3.1), o COP encontra-se a uma distância do CM de 14,4 cm.

3.5.2 Coeficiente de Restituição Aparente – ACOR

A eficiência de uma raquete mede-se pela razão entre a energia fornecida pelo atleta e a quantidade de movimento da bola após a batida. De uma forma mais simples refere-se à razão entre a velocidade da bola e ao esforço que atleta realiza ao efectuar o movimento de batida. Apesar de este ser um aspecto relevante no estudo biomecânico do ténis, não será aqui abordado por se tratar um tema fora do âmbito deste trabalho.

Os fabricantes avaliam a eficiência de uma raquete através da medição da energia restituída às bolas que a atingem em diferentes pontos da cabeça. Recorrendo a ensaios experimentais com canhões pneumáticos são disparadas bolas e medidas as suas velocidades antes e após impacto. Este parâmetro é designado por coeficiente de restituição aparente – ACOR. Para a medição do coeficiente de restituição – COR – seria necessário, além da razão entre as velocidades da bola, ter em conta a velocidade de recuo da raquete.

Neste trabalho, para a determinação do ACOR, foi implementada uma metodologia semelhante à proposta por Wilson [13], ver Figura 3.10. Nesta, a raquete é montada na vertical encastrada pelo punho e a bola largada em pêndulo atingindo a raquete em diferentes pontos. Neste caso, a velocidade de recuo da raquete pode ser 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.

Para se poder medir com rigor a distância a velocidade da bola, antes e após impacto, utilizou-se um sistema de imagem capaz de capturar a posição da bola nos instantes extremos.

Utilizando como referência para a medição da altura um cenário realizado em papel milimétrico, conforme na Figura 3.10, foi possível medir as posições de largada e de máximo retorno da bola, com uma resolução de um milímetro. Esta montagem permitiu realizar os ensaios a velocidades baixas de forma a poder desprezar as perdas por efeitos aerodinâmicos.

O ACOR foi determinado pela expressão,

$$ACOR = \sqrt{\frac{1 - \cos \theta_2}{1 - \cos \theta_1}} \quad (3.2)$$

onde θ_1 é o ângulo inicial e θ_2 é o ângulo final do ressalto da bola [13].

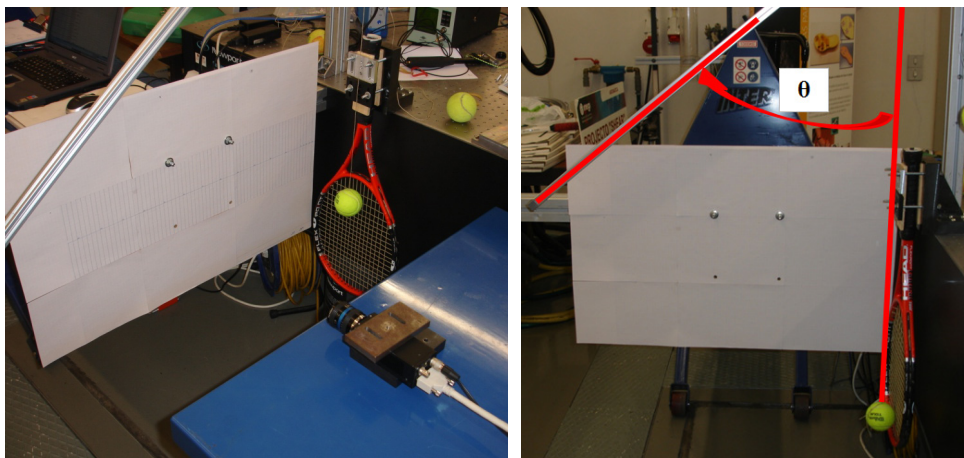


Figura 3.10: Sistema que permite a determinação do ACOR.

A medição do ACOR na cabeça da raquete foi realizada admitindo que esta apresenta uma distribuição simétrica em relação ao eixo longitudinal. Como tal, esta foi discretizada em 66 pontos de medição, conforme se apresenta na Figura 3.11. considerando a simetria, apenas foram medidos 42 pontos, correspondentes à metade direita da cabeça.

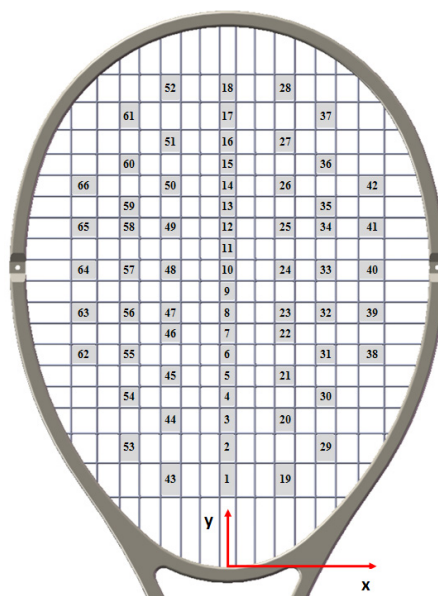


Figura 3.11: Pontos de medida do ACOR e sistema de eixos utilizado.

Na Figura 3.12 apresenta-se o mapa da distribuição do ACOR medido na raquete em estudo. Os valores medidos foram introduzidos no programa Surfer[®] utilizando o

método de interpolação Kriging, de forma a poder representar as isolinhas do ACOR [13]. A análise da distribuição do ACOR permite revelar que as regiões próxima da garganta e da extremidade livre da cabeça apresentam valores máximos. É também observável uma região de valores mínimos situada sensivelmente a 2/3 da altura. Estes resultados confirmam os obtidos por [13], contudo são inesperados visto que, surgem duas regiões com máxima restituição.

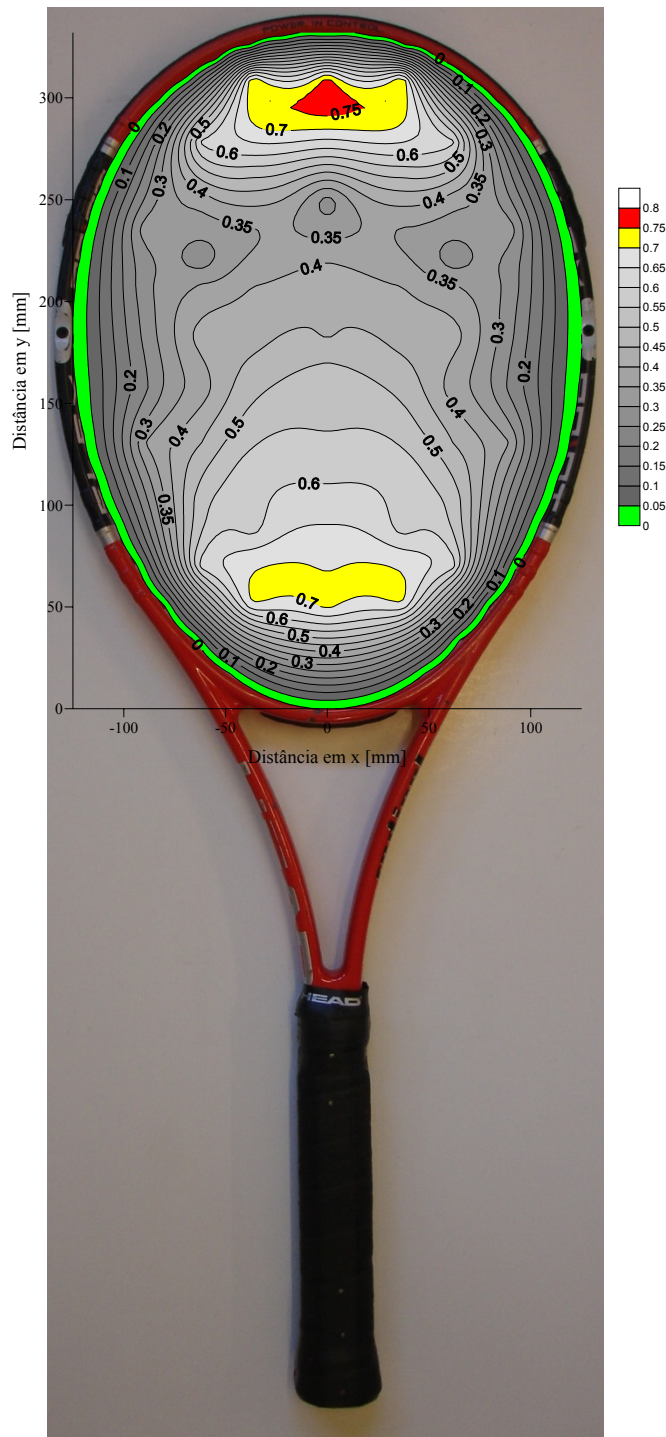


Figura 3.12: Representação das isolinhas do ACOR para raquete encastrada no punho.

Para esclarecer este fenómeno foi realizado um segundo ensaio com a raquete na condição livre-livre, sendo medido o ACOR ao longo do eixo longitudinal, isto é do ponto 1 ao 18, ver Figura 3.13.

A raquete foi suspensa por elásticos de elevada flexibilidade de forma a simular a condição livre-livre, ver Figura 3.13. Neste ensaio, a posição da bola foi definida por um pêndulo de comprimento constante que foi transladado paralelamente ao eixo da raquete. Recorreu-se ao sistema de imagem já referido para se adquirir as velocidades da bola. Na Figura 3.14 mostra-se o mapa do ACOR obtido segundo a metodologia descrita anteriormente.

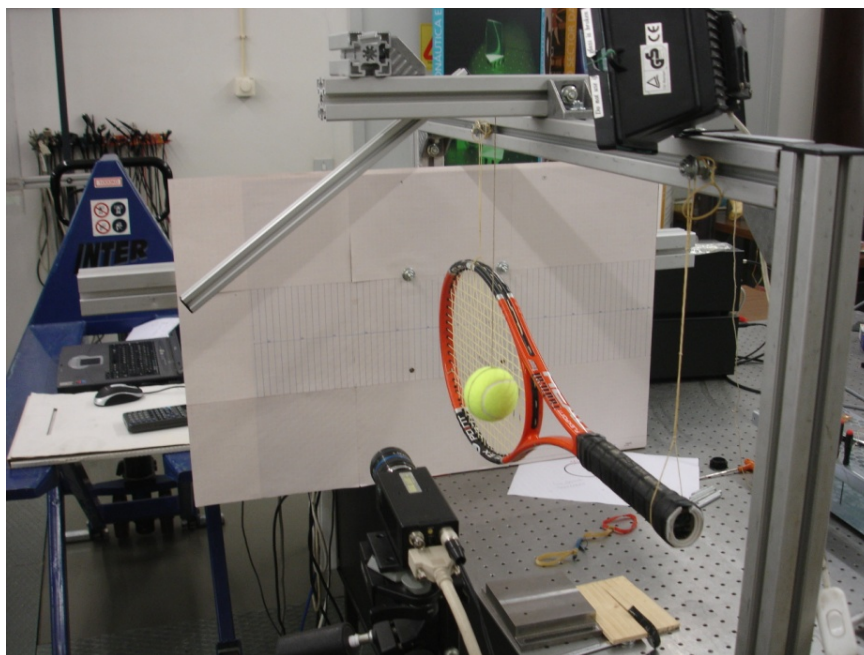


Figura 3.13: Metodologia utilizada para a determinação do ACOR para a condição livre-livre.

Como se pode observar apenas aparece uma região de máximo ACOR e este se situa próximo da garganta. Estando a raquete suspensa é possível observar o movimento desta após os impacto com a bola. Verificou-se que quando o impacto ocorria próximo da extremidade da cabeça o movimento final da raquete era fundamentalmente de rotação em torno do seu CM. Para regiões próximas da garganta prevalecia o movimento de translação. Todavia, os resultados obtidos não permitem explicar, em detalhe, as trocas de energia entre raquete e a bola e necessitam de maior estudo pelo que serão abordados mais adiante.

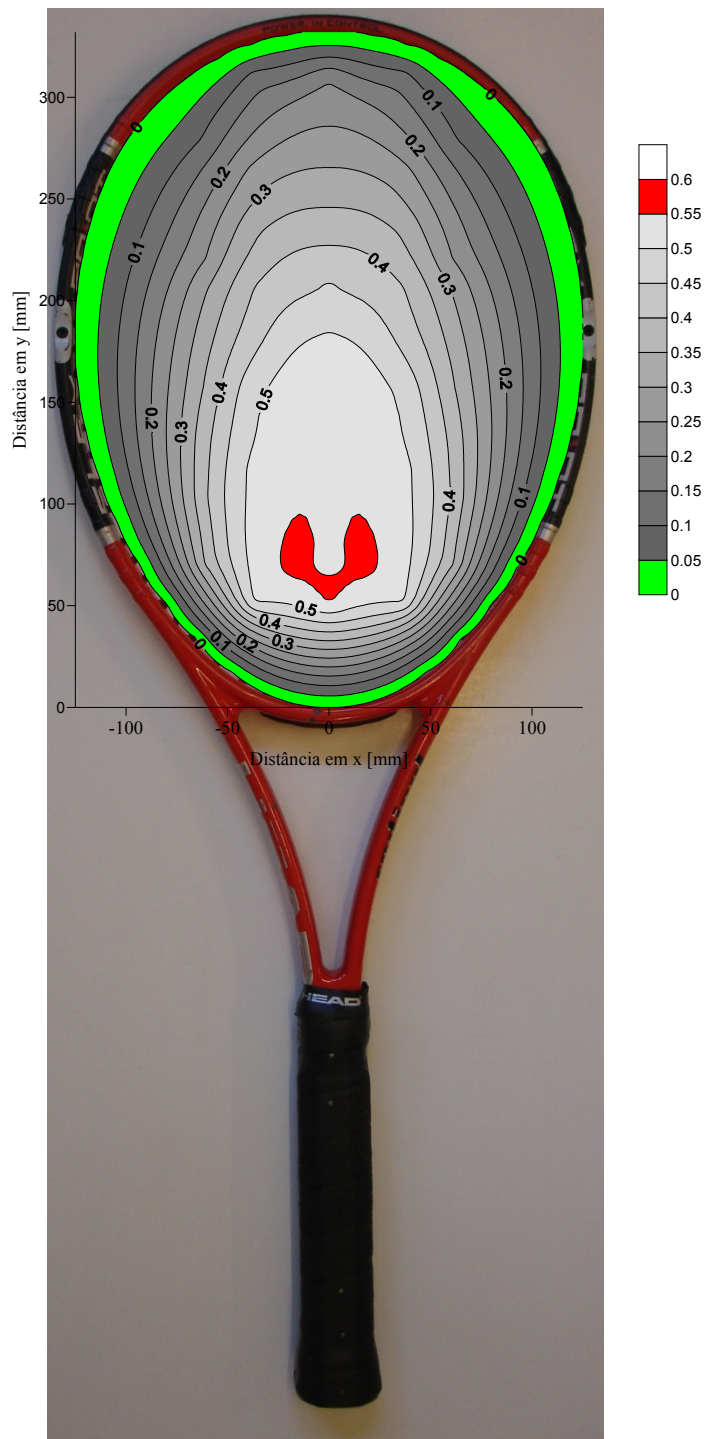


Figura 3.14: Representação das isolinhas do ACOR para raquete livre-livre.

3.5.3 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 activadas diversas frequências naturais da raquete. No entanto, estando a vibrar em regime livre à

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.

Pela sua distribuição de massa e rigidez a raquete pode ser aproximada pelo modelo de viga. Esta simplificação pode ser confirmada recorrendo ao cálculo numérico dos modos naturais de vibração dos dois modelos. Para a condição livre-livre de uma viga, o modo fundamental de vibração apresenta uma configuração geométrica com dois pontos nodais, ver Figura 3.15.

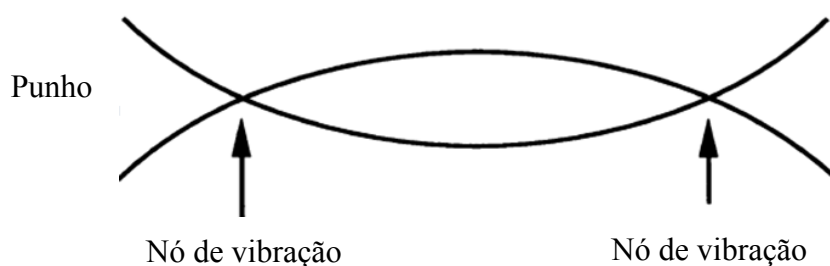


Figura 3.15: Nós de vibração do 1º modo fundamental de vibração para uma raquete livre no espaço.

Extrapolando esta distribuição para a geometria da raquete, é possível verificar que os dos nodos se situa na região do punho e ou outro 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 [8].

Do que acima foi dito, pode concluir-se que a região nodal desempenha um importante papel no comportamento dinâmico da raquete com influência na energia transmitida ao atleta através da pega. Esta situação justifica que muitos autores apontem a região nodal como sendo o *sweet spot*.

3.5.4 Nova Proposta

Devido existirem diferentes definições para o *sweet spot* e por não haver concordância na identificação desta região, foi decidido realizar um ensaio onde fosse medida a função transferência entre a carga aplicada em diversos pontos do eixo longitudinal e a força transmitida ao punho. Desta forma, seria identificado o ponto de impacto o qual a energia transferida é mínima.

Para esse efeito, a raquete foi montada na condição livre-livre, medindo-se a razão entre a aceleração no punho e a excitação nas cordas. A força de excitação foi introduzida através do martelo de impacto da marca Piezotronics[®], modelo 084A17 e a resposta foi medida com um acelerómetro da marca Brüel&Kjær[®], modelo 4393, com massa igual a

2,4 g. O impacto foi transmitido directamente às cordas nos 12 pontos assinalados na Figura 3.16.

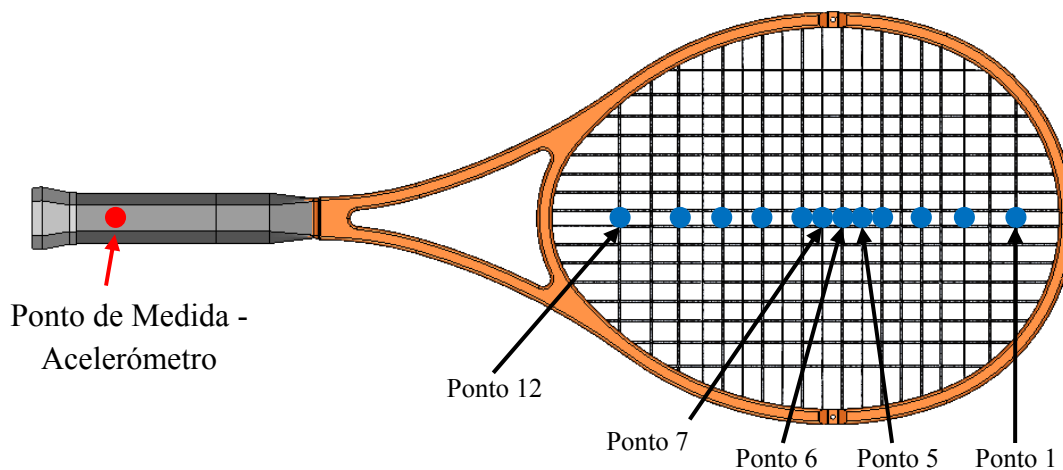


Figura 3.16: Discretização dos pontos de medida para a determinação do COP.

As magnitudes das FRF's obtidas para os diferentes pontos são apresentadas na Figura 3.17. Nesta figura é considerada apenas a primeira frequência de vibração da raquete e a distribuição de magnitude apresenta um valor mínimo na região definida no intervalo dos pontos 5 a 7. A análise da componente imaginária revela ainda que existe uma alteração na fase do movimento nessa região, ver Figura 3.18. Para regiões próximas da extremidade da cabeça, a excitação e a resposta estão em fase. Nas restantes a excitação e a resposta encontra-se em contra-fase. Da análise destas figuras pode concluir-se que existe um mínimo da função transferência na região em análise.

O tempo de contacto entre a bola e a raquete é normalmente de 5ms, gerando uma força de contacto na forma aproximada de meio seno. Tal significa que são predominantemente excitadas as frequências naturais da raquete mais próximas dos 100 Hz, como se confirmou nas medições efectuadas.

De acordo com a teoria das vigas [14] para a condição livre-livre existe um primeiro modo de vibração cujos nodos se situam a $0,2224*L$ e $0,776*L$, onde L representa o comprimento da viga. Considerando a posição da região nodal situada na cabeça da raquete e o comprimento da raquete igual a 0,6858 m (27 in), obtém-se uma distância de 0,532 m. Estas são as coordenadas do ponto 6 e coincidem com posição dos entalhes que esta possui no aro em posição simétrica relativamente ao eixo longitudinal.

Com esta medição constata-se que a região nodal obtida para a raquete com e sem cordas não é coincidente com o valor encontrado. Os modos de vibração obtidos, quer por simulação numérica quer por análise modal experimental, ainda que próximos entre si, possuem regiões nodais que não coincidem com nodo encontrado ao medir a resposta das cordas.

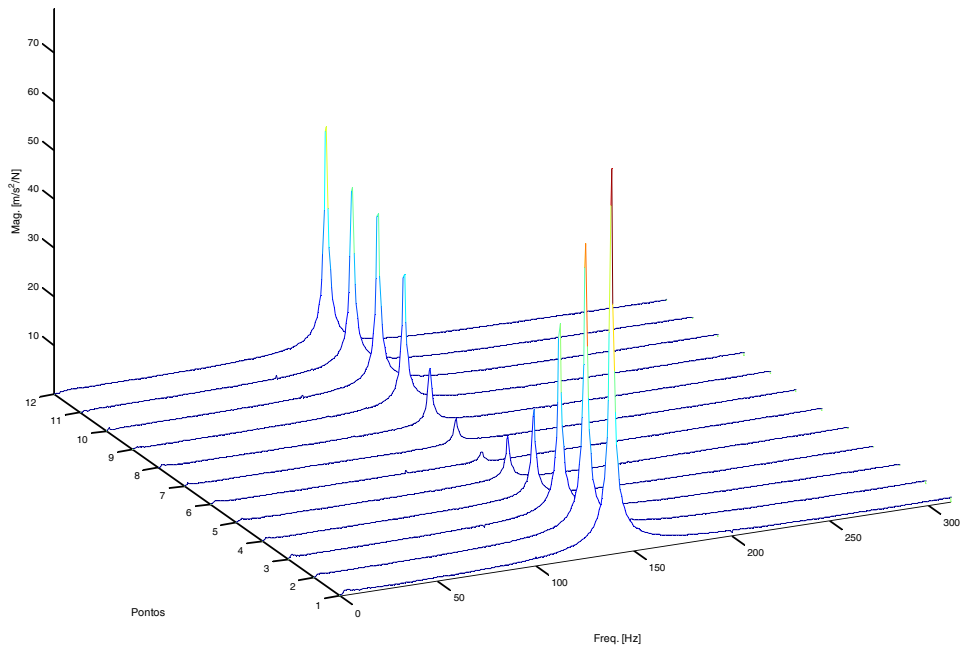


Figura 3.17: FRF's medidas experimentalmente ao longo do eixo longitudinal da raquete.

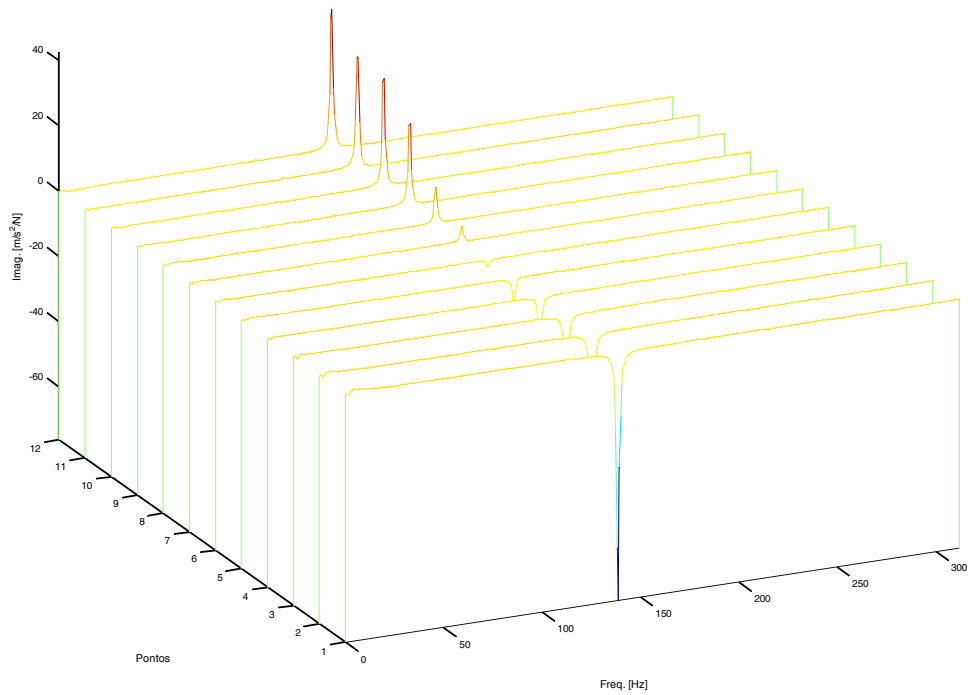


Figura 3.18: Componente imaginária das FRF's medidas ao longo do eixo longitudinal da raquete.

4 MEDIÇÃO DAS FREQUÊNCIAS E MODOS DE VIBRAÇÃO

Embora os fabricantes não dêem muita importância ao comportamento vibratório das raquetes, decidiu-se neste trabalho recorrer ao seu estudo para melhor compreender as forças geradas no punho do atleta pelo impacto da bola.

A caracterização da raquete em termos de frequência e modos naturais de vibração envolve uma análise modal experimental, cuja montagem se mostra na Figura 4.1. Nesta análise são medidas as FRF's, para determinar as propriedades intrínsecas do modelo em estudo, isto é, frequências, modos e amortecimentos modais.

Para esta análise tem especial interesse o comportamento vibratório da raquete à frequência natural fundamental nas condições livre-livre, encastrada e fixa na mão. Neste sentido, procedeu-se a conjunto de medições realizadas sobre raquetes sem e com cordas, sendo que nas últimas foi utilizado um tipo único de corda da marca Wilson[®], modelo Enduro Mono 1,28 mm de diâmetro e com uma carga aplicada de 260 N (26 kg).

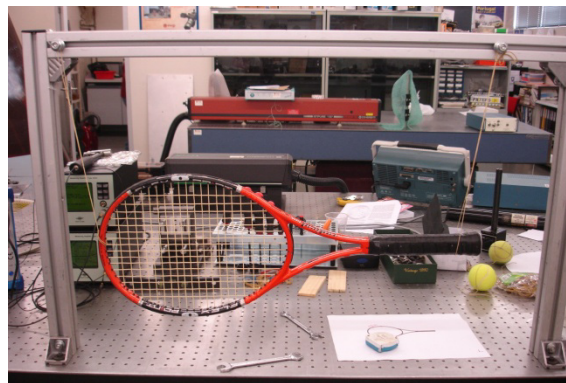


Figura 4.1: Montagem para análise modal experimental.

4.1 FREQUÊNCIAS NATURAIS

Para a determinação frequências naturais de vibração da raquete em estudo foi aplicada uma excitação, do tipo transiente, através do impacto de um martelo da marca Piezotronics[®], modelo 084A17, sendo a resposta, na forma exponencial negativa, medida por um acelerómetro de reduzida massa (2,4g), marca Brüel&Kjær[®] (B&K), modelo 4393.

Para se obter a representação dos modos de vibração da raquete esta foi discretizada em 29 pontos como se mostra na Figura 4.2. A resposta em aceleração é fixa e foi medida na extremidade livre da cabeça.

Uma vez que a sensibilidade do acelerómetro é elevada e susceptível a qualquer perturbação exterior, as medições foram realizadas numa mesa com suspensão anti-

vibratória da marca Newport[®]. Os sinais obtidos, depois de devidamente amplificados e condicionados no amplificador de medição B&K, modelo 2525, foram processados por um analisador de sinal, Oros[®] modelo OR35, ver Figura 4.3. A sua análise foi realizada para a banda de frequências de 0 a 1 kHz, com uma resolução de 156,25 mHz. Após a realização de três médias o grau de confiança das 3 FRF's, do tipo H_1 , foi garantido pela análise da função de coerência correspondente.

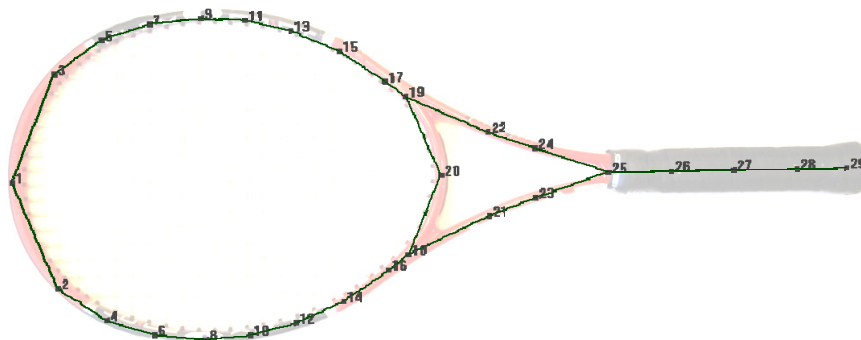


Figura 4.2: Pontos de medição da raquete *Head Flexpoint Radical Tour*.



Figura 4.3: Analisador dinâmico de sinal Oros[®] (à esquerda) e amplificador B&K (à direita).

A estimativa das frequências naturais de vibração foi realizada através da técnica poli-referência no domínio do tempo. Os respectivos modos naturais foram obtidos por ajuste do método dos mínimos quadrados, através da técnica multi-referência no domínio da frequência. Esta análise foi efectuada no programa comercial NVSolutions[®], usando as várias FRF's medidas, conforme se apresenta na Figura 4.4.

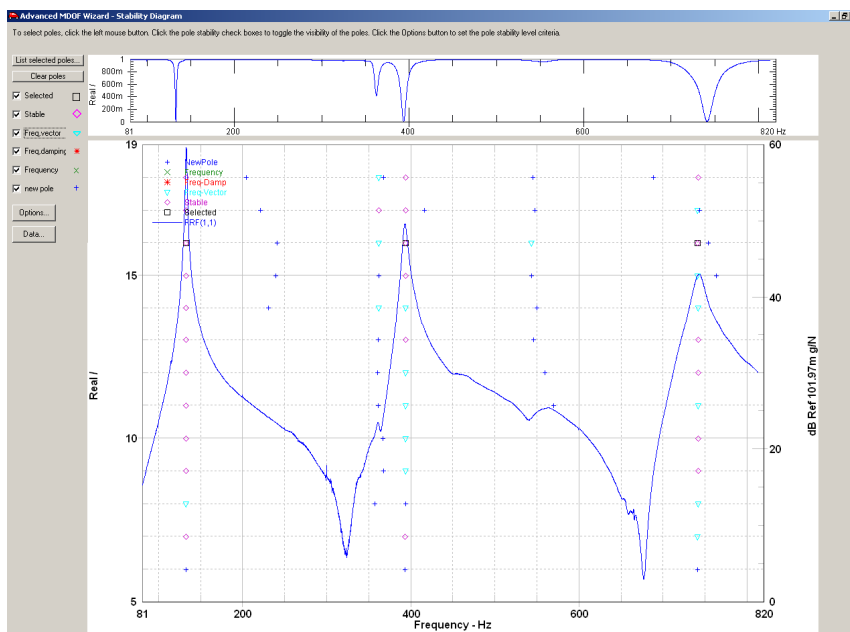


Figura 4.4: Exemplo de uma FRF de um dos pontos de medida da raquete *Head Flexpoint Radical Tour*. Condição livre-livre e com corda.

Para a banda de frequências em análise, foram identificadas três frequências e calculados os respectivos modos naturais de vibração. Na Tabela 4.1, apresentam-se as três frequências naturais identificadas para a raquete *Head Flexpoint Radical Tour* e os respectivos coeficientes de amortecimento, para a gama de frequências em análise e para as condições encastrada e livre-livre.

Tabela 4.1: Frequência e amortecimento da raquete *Head Flexpoint Radical Tour* para as diferentes condições (corda com carga aplicada de 260 N).

	Modo 1		Modo 2		Modo 3	
	Frequência [Hz]	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]	Amortecimento [%]
Livre-Livre com Corda	133,4	0,64	392,9	2,23	741,4	1,13
Livre-Livre sem Corda	145,0	0,39	411,7	0,43	753,9	0,92
Fixa na Mão sem Corda	136,0	6,43	401,1	4,32	744,4	5,5
Encastrada Punho com Corda	33,2	1,28	159,5	1,01	411,0	0,24

A análise das frequências naturais de vibração, apresentadas na Tabela 4.1, revela que estas são superiores na situação livre-livre em relação à condição de encastramento. Por

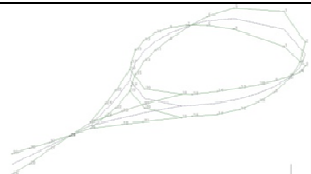
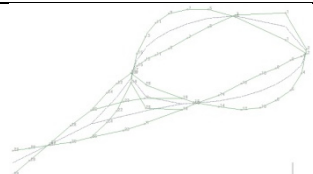
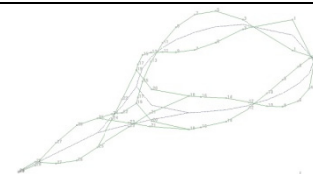
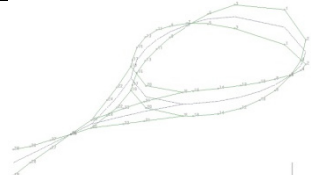
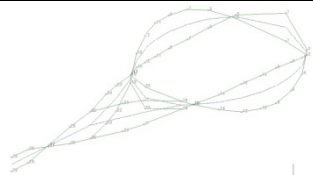
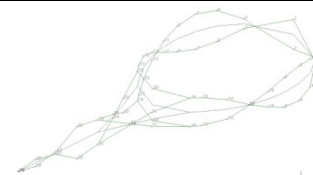
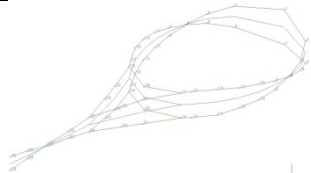
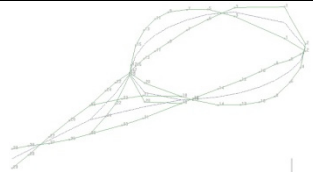
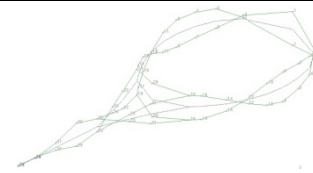
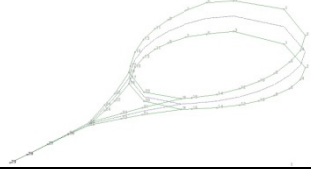
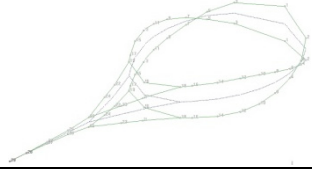
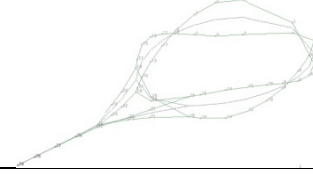
outro lado, verifica-se que a incorporação das cordas na raquete conduz a uma ligeira diminuição das suas frequências naturais. A introdução das cordas tensionadas induz no quadro da raquete tensões de compressão, levando a um aumento da sua flexibilidade. Esta conclusão é suportada com base na medição da frequência fundamental da raquete para diferentes cargas de encordoamento. Para a condição de fixa na mão, a raquete apresenta frequências naturais que estão muito próximas da situação livre-livre. Este resultado leva a concluir que o modelo mecânico que melhor se adapta à simulação real é a condição livre-livre. Em relação ao amortecimento modal, observa-se que este possui valores superiores para a condição fixa na mão. Este aumento é causado pela transmissão de parte da energia do impacto ao atleta [11].

Os parâmetros modais identificados podem ser usados para construir o modelo matemático, representativo do comportamento vibratório da raquete.

4.2 MODOS NATURAIS

Após se terem identificado os parâmetros necessários à construção do modelo matemático, é possível obter e visualizar, os modos naturais de vibração para cada uma das experiências realizadas. Na Tabela 4.2 podem observar-se os três primeiros modo de vibração para as quatro condições em análise da raquete [8]. Para facilitar a interpretação dos modos identificados mostram-se nas Figuras Figura 4.5 a Figura 4.7, uma vista de perfil de cada um dos modos.

Tabela 4.2: Modos naturais de vibração para a raquete *Head Flexpoint Radical Tour*.

	Modo 1	Modo 2	Modo3
Livre-livre com corda			
Livre-livre sem corda			
Fixa na Mão sem corda			
Encastrada Punho com Corda			

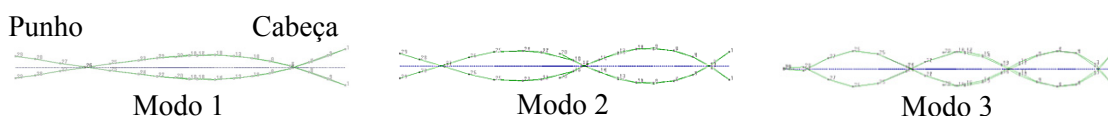


Figura 4.5: Modos naturais de vibração da raquete *Head Flexpoint Radical Tour*, para a condição livre-livre com corda.

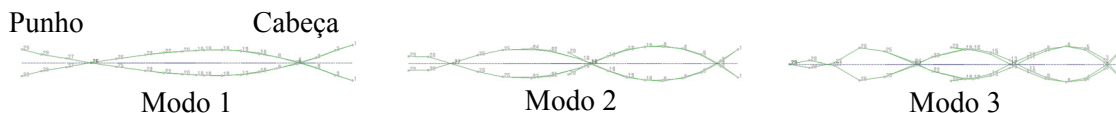


Figura 4.6: Modos naturais de vibração da raquete *Head Flexpoint Radical Tour*, para a condição livre-livre sem corda.



Figura 4.7: Modos naturais de vibração da raquete *Head Flexpoint Radical Tour* segura na mão e com corda.

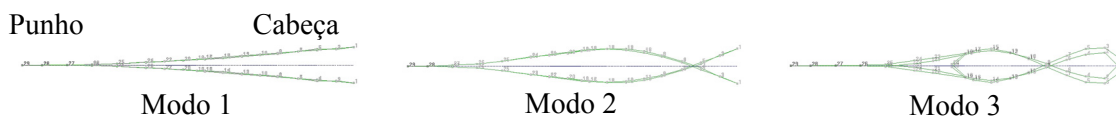


Figura 4.8: Modos naturais de vibração da raquete *Head Flexpoint Radical Tour*, para a condição encastrada pelo punho e com corda.

Observando os modos naturais de vibração é possível verificar que, globalmente, estes aumentam de complexidade com a sua ordem. Nas condições livre-livre e fixa na mão, os modos naturais de vibração apresentam uma configuração geométrica muito semelhante, observando-se, no segundo caso, pequenos desvios próximos da extremidade livre do punho.

Quanto aos modos naturais de vibração para a situação encastrada, constata-se que estes apresentam amplitudes nulas no punho e máximos junto à extremidade livre da cabeça da raquete. No que diz respeito ao segundo modo, este apresenta uma linha nodal que se situa próxima da linha definida para a condição livre-livre, tal como apresentado por Brody [8].

5 CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO PARA MEDIÇÃO DO MOMENTO DE INÉRCIA

5.1 INTRODUÇÃO

Do que atrás foi dito, pode inferir-se que para caracterizar o comportamento dinâmico de uma raquete é necessário o conjunto de medições que passam pela sua pesagem, pela medição das suas propriedades de inércia e pela avaliação das propriedades mecânicas globais. Para esse efeito alguns fabricantes colocaram no mercado equipamentos com os quais é possível caracterizar completamente uma raquete. Um destes equipamentos, produzido pela Babolat® e designado por RDC – *Rapid Diagnostic Center* – permite avaliar até cinco parâmetros tais como: posição do CM, momento de inércia, rigidez, tensão nas cordas e peso, fornecendo a informação em unidades próprias do fabricante.

Para este trabalho foi decidido construir um protótipo que permitisse avaliar os parâmetros característicos da raquete de forma neutra, isto é, de acordo com as leis da física e utilizando unidades do sistema internacional. Desta forma seria possível identificar devidamente os diversos parâmetros e descodificar as unidades fornecidas pelos equipamentos comercializados.

O protótipo construído permite avaliar o momento de inércia da raquete em diversas posições. Dada a diversidade de modelos foi concebido um suporte que permite fixar a raquete de forma aproximada à da sua utilização e que cumpre com as recomendações dos fabricantes, relativas aos equipamentos utilizados para este efeito.

A raquete estudada foi ainda desenhada num programa de CAD, SolidWorks® da Dassault Systèmes®, para gerar uma malha para cálculo com elementos finitos e obter um modelo numérico que caracteriza completamente a geometria. Este modelo permitiu determinar numericamente a posição do CM e a matriz de inércia, valores que foram utilizados na comparação com os valores medidos.

5.2 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

A utilização de uma raquete ocorre após movimentos rápidos e termina normalmente com um impacto. Os movimentos que resultam das situações de jogo incluem maioritariamente rotações com diferentes centros. Ainda que estes movimentos dependam fortemente do treino do utilizador como no âmbito deste trabalho não se estuda a biomecânica, será às características da raquete e a sua influência no movimento que será dedicada a principal atenção.

A massa e a inércia são os principais parâmetros que influenciam o movimento com repercussões no desempenho do atleta. Idealmente, a raquete deveria ter um peso mínimo e uma rigidez máxima, o primeiro seria importante da diminuição do cansaço, o

segundo facilitaria a transferência de energia para a bola. Contudo, uma elevada rigidez implica também momentos mais elevados para impor a mesma aceleração. Por isso a raquete ideal é sempre obtida de um compromisso entre características antagónicas procurando o atleta obter o melhor desempenho, quer em potência, quer em controlo de bola.

Para medir o momento de inércia das raquetes de ténis foi desenvolvido um protótipo laboratorial. Recorrendo a um sistema oscilatório composto por um par de molas idênticas utilizadas para gerar um movimento de rotação e um sistema electrónico para medir o período de oscilação [15], foi possível obter o momento axial de inércia para várias raquetes e em diferentes configurações destas. Desta forma, foi possível caracterizar o efeito que cada um dos elementos que a constituem provoca no seu desempenho.

Como o movimento de rotação da raquete ocorre segundo diferentes raios, era necessário definir com rigor qual o melhor eixo para medir as propriedades de inércia. Para isso, procurou-se junto dos utilizadores dos sistemas de diagnóstico de raquetes averiguar qual o modelo de pega mais utilizado para as caracterizar. Desta consulta resultou um sistema de fixação que apoia a raquete, por forma a que esta rode em torno de eixo paralelo ao plano das cordas que passa pelo punho a 10 cm da sua extremidade, ver Figura 5.1.

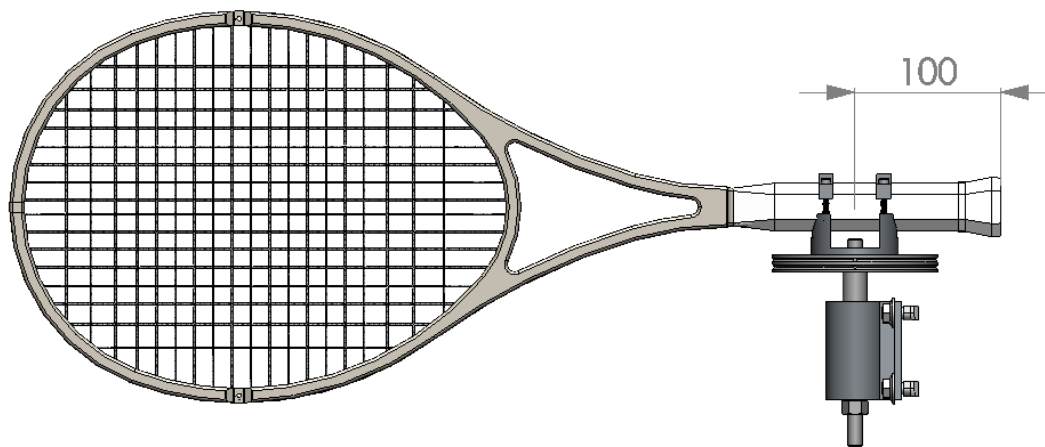


Figura 5.1: Sistema de fixação da raquete para medir o momento de inércia (unidades em mm).

Como se pode ver na figura anterior, a raquete é fixada a um suporte que permite a sua rotação cíclica em torno de um ponto de equilíbrio. A rigidez das molas foi adaptada para que o movimento ocorresse a velocidades baixas e os efeitos aerodinâmicos pudessem ser desprezados.

Com base nos pressupostos anteriormente referidos, foi construído um modelo simplificado do protótipo em que a raquete de ténis é descrita por uma barra simplesmente apoiada e suspensa por uma mola, ver Figura 5.2. As suas propriedades mecânicas foram determinadas a partir da análise do comportamento em regime estático e dinâmico deste modelo.

Considere-se uma barra de massa m_b e comprimento L_b que está fixa por um pino no ponto O (Figura 5.2). Esta barra é suportada por uma mola de rigidez k , fixa à distância a_m do ponto O e de massa desprezável.

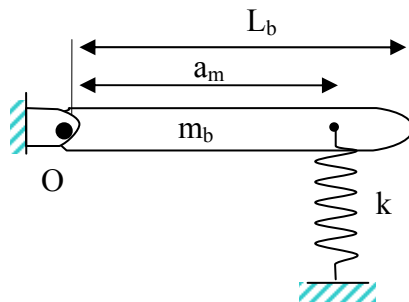


Figura 5.2: Modelo matemático para o modelo de viga apoiada-livre.

A equação diferencial do movimento oscilatório deste sistema a um grau de liberdade é determinada considerando que a oscilação angular em θ é pequena, Figura 5.3, e aplicando o princípio d'Alembert que apresenta as seguintes relações:

$$\sum \vec{F} - m_b \vec{a}_G = 0 \tag{5.1}$$

$$\sum \vec{M}_G - \dot{H}_G = 0 \tag{5.2}$$

Os termos destas equações podem ser escritos a partir da análise das forças representadas nos diagramas de corpo livre, como se mostra na Figura 5.3. Nesta representação estão envolvidas as forças exteriores, forças de ligação e forças desenvolvidas durante a oscilação.

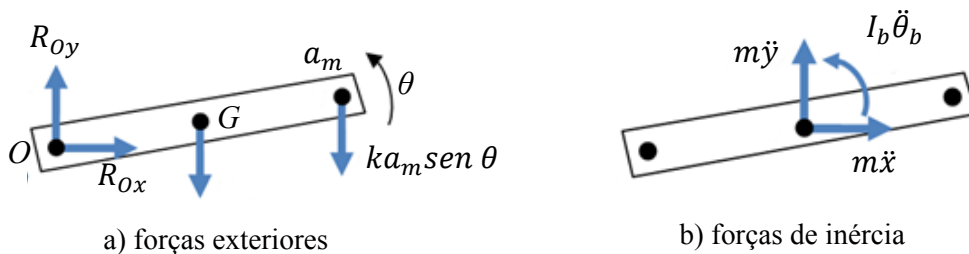


Figura 5.3: Diagrama de corpo livre para o modelo de viga apoiada-livre.

As equações (5.1) e (5.2) serão posteriormente utilizadas para caracterizar o comportamento dinâmico do protótipo.

5.2.1 Metodologia Adoptada

Após a identificação das forças exteriores e forças de inércia inerentes ao modelo de viga apresentado previamente, foi construído um sistema para caracterizar o momento de inércia de qualquer raquete de ténis, que se mostra na Figura 5.4.

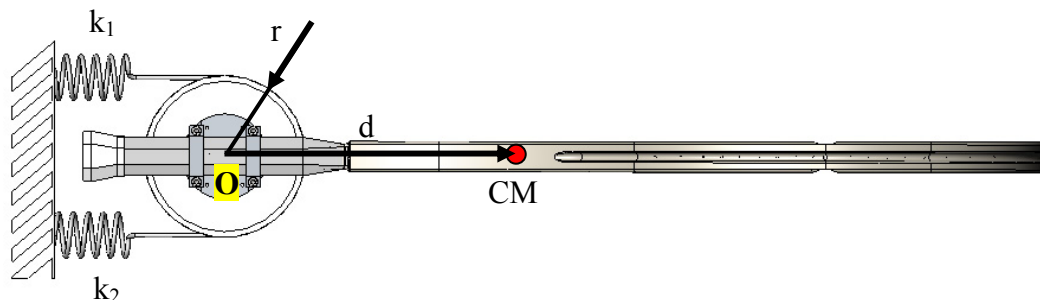


Figura 5.4: Caracterização dos parâmetros para o cálculo do momento de inércia.

Na figura anterior o eixo de do movimento passa pelo ponto O; uma polia de raio r e duas molas lineares, caracterizadas pela rigidez – k_1 e k_2 , geram movimento de rotação; o CM é o centro de massa da raquete e d é a distância entre o CM e o eixo de rotação.

Então, pelo princípio d’Alembert:

$$\sum (M_O)_{forças\ efectivas} = \sum (M_O)_{forças\ de\ inércia} \tag{5.3}$$

O diagrama de corpo livre para as forças efectivas é apresentado na Figura 5.5.

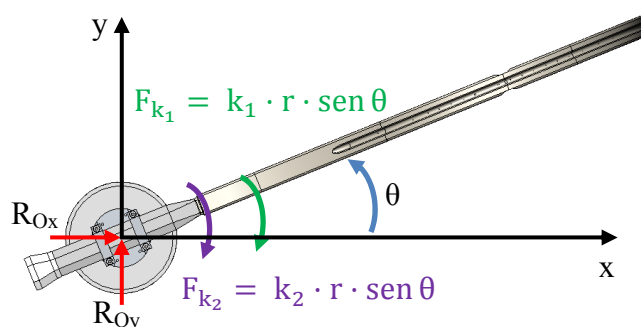


Figura 5.5: Diagrama do corpo livre para as formas efectivas do sistema mais raquete.

Após a identificação das forças aplicadas no sistema mais a raquete, o somatório dos momentos para as forças efectivas é dado por,

$$\begin{aligned}\sum (M_O)_{fe} &= -(r \cos \theta) * (k_1 r \sin \theta) - (r \cos \theta) * (k_2 r \sin \theta) \\ &= -r^2 \cos \theta \sin \theta (k_1 + k_2)\end{aligned}\quad (5.4)$$

O diagrama de corpo livre para as forças de inércia está representado na Figura 5.6.

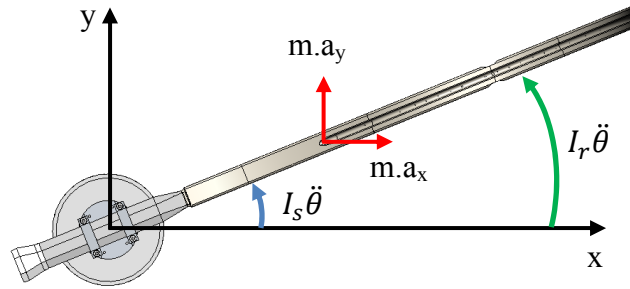


Figura 5.6: Diagrama do corpo livre para as forças de inércia do sistema mais a raquete.

Na figura anterior $\ddot{\theta}$ é a aceleração angular, m_r a massa da raquete, I_r o momento de inércia da raquete, I_s o momento de inércia do sistema de fixação. O somatório dos momentos das forças de inércia pode ser obtido pela seguinte equação:

$$\sum (M_O)_{fi} = (I_s)_o \ddot{\theta} + (I_r)_o \ddot{\theta} \quad (5.5)$$

Substituindo a equação (5.3) e (5.4) em (5.5), obtém-se,

$$[(I_s)_o + (I_r)_o] \ddot{\theta} + r^2 \cos \theta \sin \theta (k_1 + k_2) = 0 \quad (5.6)$$

Considerando que $\theta \ll 1$, então $\sin \theta \approx \theta$ e $\cos \theta \approx 1$, pelo que,

$$[(I_s)_o + (I_r)_o] \ddot{\theta} + r^2 (k_1 + k_2) \theta = 0 \quad (5.7)$$

A equação anterior descreve o movimento vibratório de um sistema não amortecido em regime livre, que numa forma simplificada conduz à expressão:

$$m_{eq} \ddot{\theta} + k_{eq} \theta = 0 \quad (5.8)$$

sendo,

$$m_{eq} = (I_s)_o + (I_r)_o \quad (5.9)$$

$$k_{eq} = r^2(k_1 + k_2) \quad (5.10)$$

A frequência natural do sistema, ω_n é dada por,

$$\begin{aligned} \omega_n &= \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} \\ &= \sqrt{\frac{r^2(k_1 + k_2)}{(I_s)_o + (I_r)_o}} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Relembrando que,

$$\omega_n = 2\pi f \quad (5.12)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (5.13)$$

onde f é a frequência e T o período de oscilação, a expressão (5.11) pode ser substituída por,

$$\begin{aligned} \frac{2\pi}{T} &= \sqrt{\frac{r^2(k_1 + k_2)}{(I_s)_o + (I_r)_o}} \\ \frac{4\pi^2}{T^2} &= \frac{r^2(k_m)}{(I_s)_o + (I_r)_o} \end{aligned} \quad (5.14)$$

sendo T expresso em segundos, r expresso em metros, k_m expresso em kg/m e os momentos de inércia expressos em kg*m².

Esta é a expressão que permite o cálculo do momento de inércia da raquete. Contudo, a expressão apresenta dois parâmetros fundamentais do sistema principal, que são necessário determinar - k_m e $(I_s)_o$, visto que apenas é medido o período de oscilação.

No âmbito deste trabalho foi projectado e construído, no Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental, um sistema representado na Figura 5.7 que permite medir experimentalmente o momento de inércia (*swingweight*). Na Figura 5.8 apresenta-se um detalhe do sistema de fixação da raquete. Os desenhos do projecto podem ser consultados no Anexo B.



Figura 5.7: Sistema que permite a avaliação do momento de inércia de uma raquete de ténis.

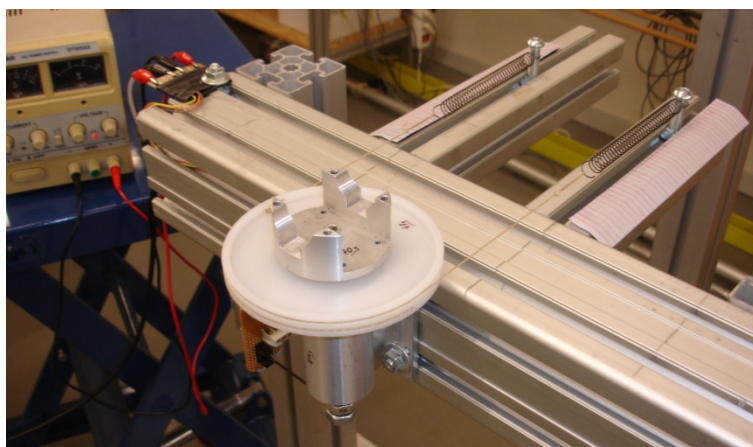


Figura 5.8: Ampliação do sistema de fixação da raquete de ténis.

Para a realização das medições foi necessário utilizar uma fonte de alimentação, da marca UniVolt[®] modelo DT305AS, um osciloscópio, da marca Tektronix[®] modelo TDS3014B e um sensor da marca Omron[®] modelo EE-SX1041. Tudo isto pode ser incluído num circuito electrónico que além do par emissor detector do movimento incluía micro processador e um *display*. Este sistema já foi projectado mas não foi construído em tempo útil para poder ser utilizado neste trabalho.

A calibração do sistema passa pela determinação do momento de inércia de um corpo com propriedades bem conhecidas. Para isso, construiu-se uma pequena estrutura constituída por um veio cilíndrico e duas massas cuja distância ao centro pode ser alterada. Na Figura 5.9 mostra-se a estrutura utilizada na calibração. A montagem da estrutura de calibração no protótipo encontra-se representada na Figura 5.10.

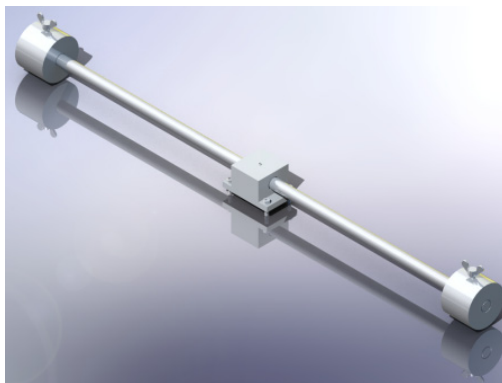


Figura 5.9: Sistema para calibração do sistema de fixação.

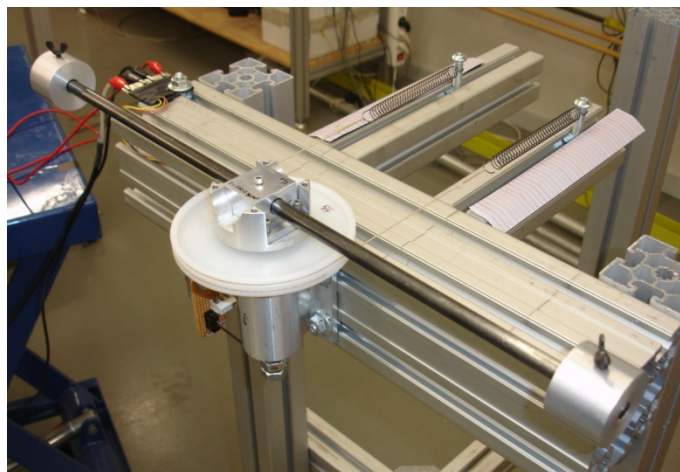


Figura 5.10: Montagem do sistema de calibração.

Para calibrar o sistema, as massas são colocadas em posições simétricas relativamente ao eixo de rotação e medido o tempo de oscilação. Numa segunda etapa as massas são deslocadas para uma posição diferente, mantendo a simetria, e é novamente medido o período de oscilação. Como a geometria e massa de cada um dos elementos é bem conhecida, é possível calcular a variação do momento de inércia que provoca a alteração no período de vibração. Embora as medições apresentassem uma boa repetibilidade cada período de oscilação considerado resultou de uma média de 6 oscilações.

Conhecidos os valores de inércia para as diferentes posições das massas, e utilizando a equação (5.14), pode determinar-se a rigidez e o momento de inércia do sistema principal. Para o cálculo destes parâmetros, a equação (5.14) pode ser rearranjada, obtendo-se, então,

$$I_s = \frac{\left(\frac{T_{i+1}}{T_i}\right)^2 \times I_i - I_{i+1}}{1 - \left(\frac{T_{i+1}}{T_i}\right)^2} \quad (5.15)$$

$$k_m = (I_s + I_i) \times \frac{4\pi^2}{r^2 T_i^2} \quad (5.16)$$

Das duas equações apresentadas acima, o índice i refere-se a cada uma das posições das massas. Assim, determina-se o momento de inércia do sistema principal pela equação (5.16) e, posteriormente, a rigidez do sistema, pela equação (5.15).

Sendo a peça central simétrica e por uma questão de facilitar a medição da sua posição utilizou-se uma das faces deste componente para posicionar cada uma das massas. Na Figura 5.11 mostra-se como é efectuada a medição.

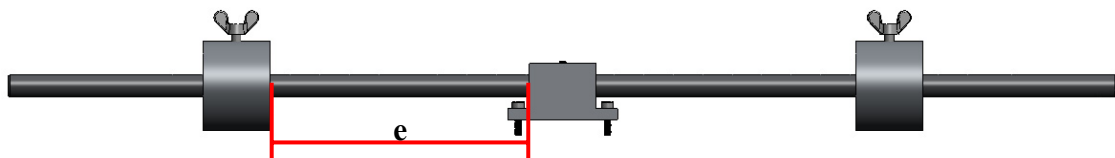


Figura 5.11: Medição da distância utilizada para o cálculo do momento de inércia do sistema de calibração.

A título de exemplo se as massas forem colocadas nas extremidades do varão, o sistema de calibração apresenta um momento de inércia (I_i) igual a $0,01755642 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, para uma distância de $0,2035 \text{ mm}$ entre cada massa e a peça central. O período de oscilação (T_i) é igual a $0,49655 \text{ s}$, valor obtido de uma média de 10 medições. Para as massas a uma distância $e = 0,150 \text{ m}$, o momento de inércia (I_{i+1}) é igual a $0,0129923 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ e $T_{i+1} = 0,4276 \text{ s}$.

Das expressões (5.15) e (5.16), obtém-se $I_s = 9,9049\text{E-}5$ e $k_m = 917,7 \text{ kg/m}$. De forma a garantir a repetibilidade e fiabilidade do sistema, foram realizadas várias medições com as massas colocadas em diferentes posições (Anexo C).

Os valores finais para o momento de inércia e a rigidez do sistema principal estão representados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Valores finais para o momento de inércia e rigidez do sistema principal.

I_s [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	k_m [kg/m]
1,6812 E -4	920,3

Rearranjando a expressão (5.14) em ordem ao momento de inércia da raquete, contabilizando os valores dos parâmetros apresentados na tabela anterior e considerando o raio da polia igual a 0,0555 m,

$$I_r = \frac{0,0555^2 \times 920,3}{4\pi^2} \times T^2 - 1,6812 * 10^{-4} \quad (5.17)$$

$$I_r = 7,1805 * 10^{-2} \times T^2 - 1,6812 * 10^{-4} \quad (5.18)$$

Assim, está definida a expressão para calcular o momento de inércia de uma raquete. Para averiguar a fiabilidade do sistema desenvolvido, a empresa Head[®] foi contactada para obter o momento de inércia referente a esta raquete. A resposta foi surpreendente pela amplitude do intervalo de tolerância, o momento de inércia da raquete é fornecido com o seguinte valor: 305 kg*cm² ± 10 kg*cm². O representante da Head[®], justificou este intervalo de variação com a variabilidade do processo de fabrico.

Uma pesquisa junto dos distribuidores de algumas escolas de ténis revelou para esta raquete valores com uma razoável dispersão variando entre 318 kg*cm² e 329 kg*cm². Para obter uma medição sobre a raquete em estudo, recorreu-se ao centro de diagnóstico da Babolat[®] que se encontra no estabelecimento El Corte Inglés em Vila Nova de Gaia. O valor obtido numa medição realizada no equipamento que se mostra na Figura 5.12 foi idêntico ao que se obteve com o protótipo.

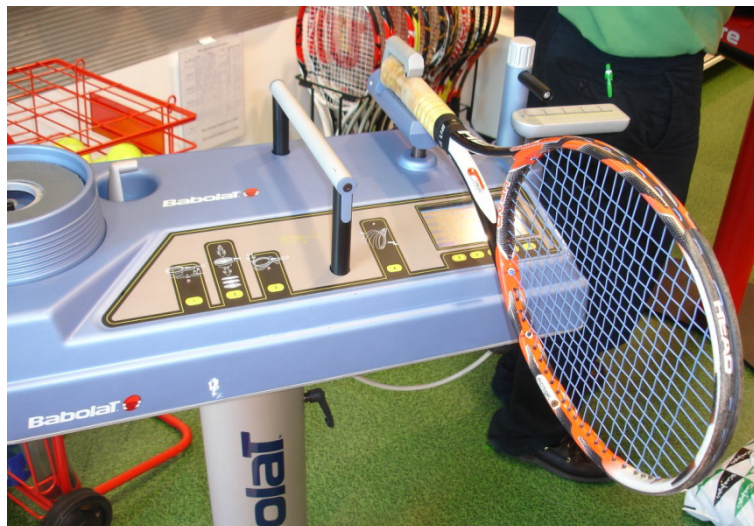


Figura 5.12: Máquina Babolat[®] RDC. Nesta imagem pode visualizar um exemplo de uma medição de uma raquete.

Os resultados obtidos nas diversas medições efectuadas demonstraram que a incerteza na medição do momento de inércia se situava em +/- 1 kg*cm². A título de exemplo mostra-se na Tabela 5.2 um conjunto de dez medições realizadas na raquete em estudo.

Tabela 5.2: Valor do momento de inércia para a raquete *Head Flexpoint Radical Tour*.

Período [ms]	Média [ms]	I [kg*cm ²]
685,1	685,72	335,96
684,8		
685,2		
685,1		
685		
685		
685,1		
685		
685,4		
685,3		
686,6		
686,4		
685,7		
685,8		
686,3		
686,4		
686,6		
686,6		
686,5		
686,4		

6 EFEITO FLEXPOINTTM

Uma das motivações que conduziu ao estudo deste modelo de raquete, *Flexpoint Radical Tour*, foi a averiguar se a tecnologia *Flexpoint*TM, publicitada como se mostra na Figura 6.1, e patenteada pela Head[®], resultava de um estudo científico ou de uma mera estratégia comercial. Com esta solução, o fabricante reivindica conseguir obter potência e controlo em simultâneo. Para obter esta combinação a solução proposta deverá alterar a deformada da raquete durante a forte batida, por forma a conseguir maior direccionalidade. Para isso o quadro foi debilitado no sentido de o tornar mais flexível ao longo de um eixo posicionado a meio da cabeça e perpendicular ao eixo longitudinal, como se pode ver nas Figuras Figura 6.1 e Figura 6.2.



Figura 6.1: Tecnologia *Flexpoint*TM.



Figura 6.2: Movimento de uma raquete durante o impacto de uma bola de ténis. Esquerda: raquete tradicional. Direita: raquete com o sistema *Flexpoint*TM.

A figura anterior mostra o movimento de uma raquete tradicional durante o impacto de uma bola de ténis e o movimento de uma raquete com o sistema *Flexpoint*TM. Esta deformada em forma de “concha”, como mostra a Figura 6.3, deverá, supostamente, aumentar o tempo de contacto maximizando o controlo.



Figura 6.3: Forma de “concha” do efeito *Flexpoint*TM.

Para averiguar a existência do efeito reivindicado foi realizada uma montagem experimental, que se mostra na Figura 6.4, em que a raquete foi encastrada pelo punho e batida por bolas de ténis lançadas a velocidades próximas de 95 km/h. Para conseguir lançar bolas a esta velocidade e com direcção bem definida foi construído um canhão pneumático que se mostra na imagem central.

Do lado oposto da batida foi colocado um radar de alta velocidade, da marca Stalker[®], modelo ATS, para poder medir a velocidade da bola de ténis. Perpendicularmente à raquete, foi colocada uma câmara de alta velocidade, da marca Redlake MotionScope[®], modelo PCI 8000 S, que se apresenta na Figura 6.5. Foram realizados vários ensaios com o sistema de imagem ajustado para adquirir 1000 imagens/s.

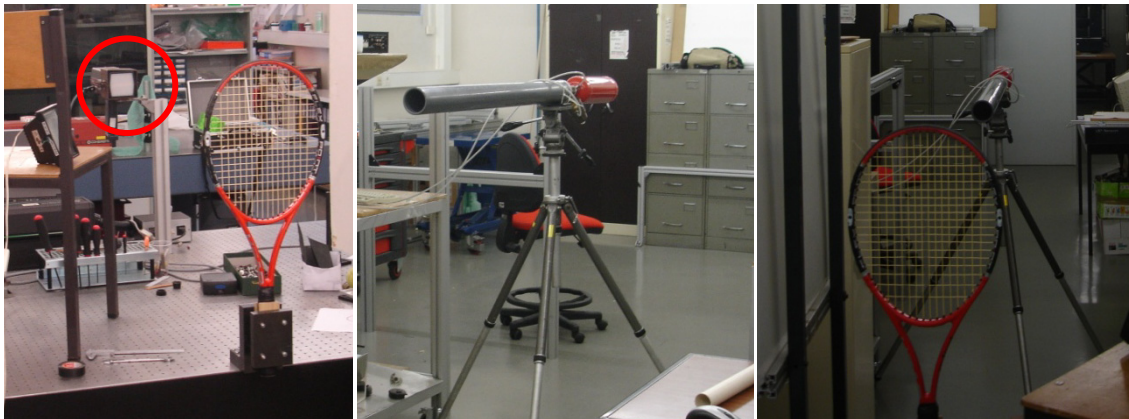


Figura 6.4: Metodologia adoptada para visualizar o efeito *Flexpoint*TM a alta velocidade.



Figura 6.5: Câmara de alta velocidade Redlake MotionScope[®].

Na figura seguinte apresenta-se uma sequência de imagens do impacto da bola de ténis com a raquete *Head Flexpoint Radical Tour* no local correspondente ao posicionamento do sistema *Flexpoint*TM.

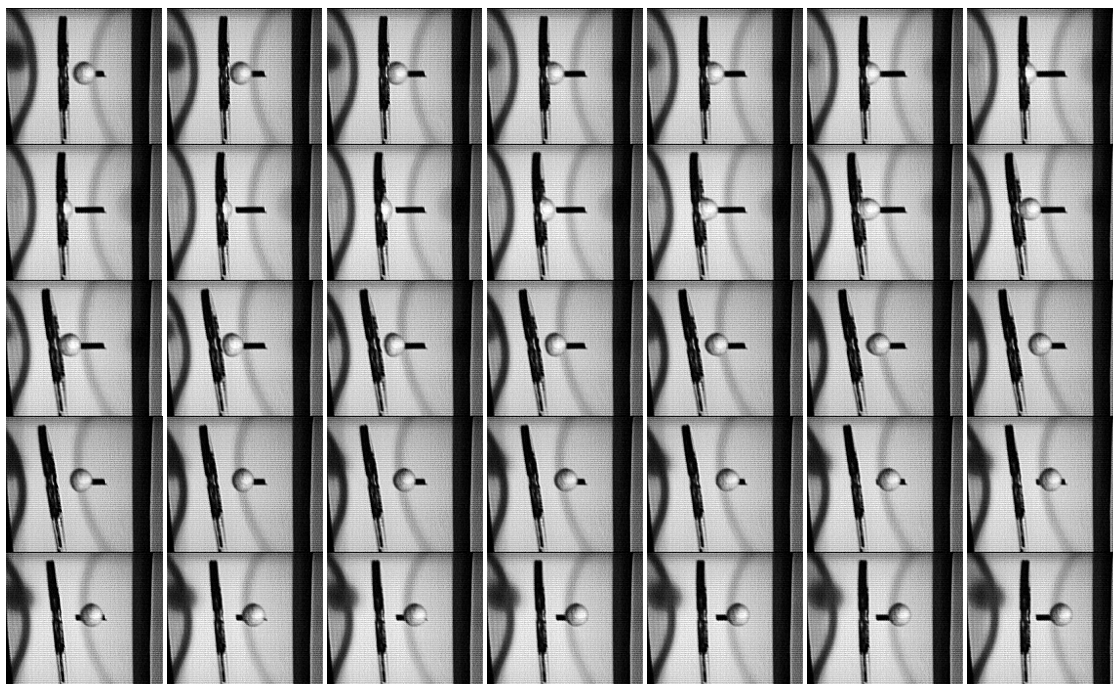


Figura 6.6: Sequência de imagens do impacto da bola de ténis com a raquete *Head Flexpoint Radical Tour* no local do sistema *Flexpoint™*.

Como se pode ver pela figura anterior, não se confirmou o efeito anunciado pelo construtor. Após o impacto a raquete deforma-se em flexão de forma global e sem manifestar de forma evidente qualquer efeito localizado.

As medições realizadas com a câmara de alta velocidade evidenciaram o efeito que se encontra descrito na literatura e que corresponde à existência de uma região designada por *dead spot* [10] situada próximo da extremidade livre da cabeça. Esse efeito que se evidencia na Figura 6.7 corresponde à existência de uma dupla batida na bola sempre que o impacto ocorre nessa região, isto é, após impacto a bola imobiliza-se no ar transferindo toda a sua energia cinética para a deformação da raquete. Posteriormente a energia elástica acumulada é devolvida à bola num segundo impacto. Embora neste caso a raquete se encontrasse parada e tal facto pudesse justificar esta situação, este efeito é conhecido dos tenistas pois também ocorre em situações normais de jogo.

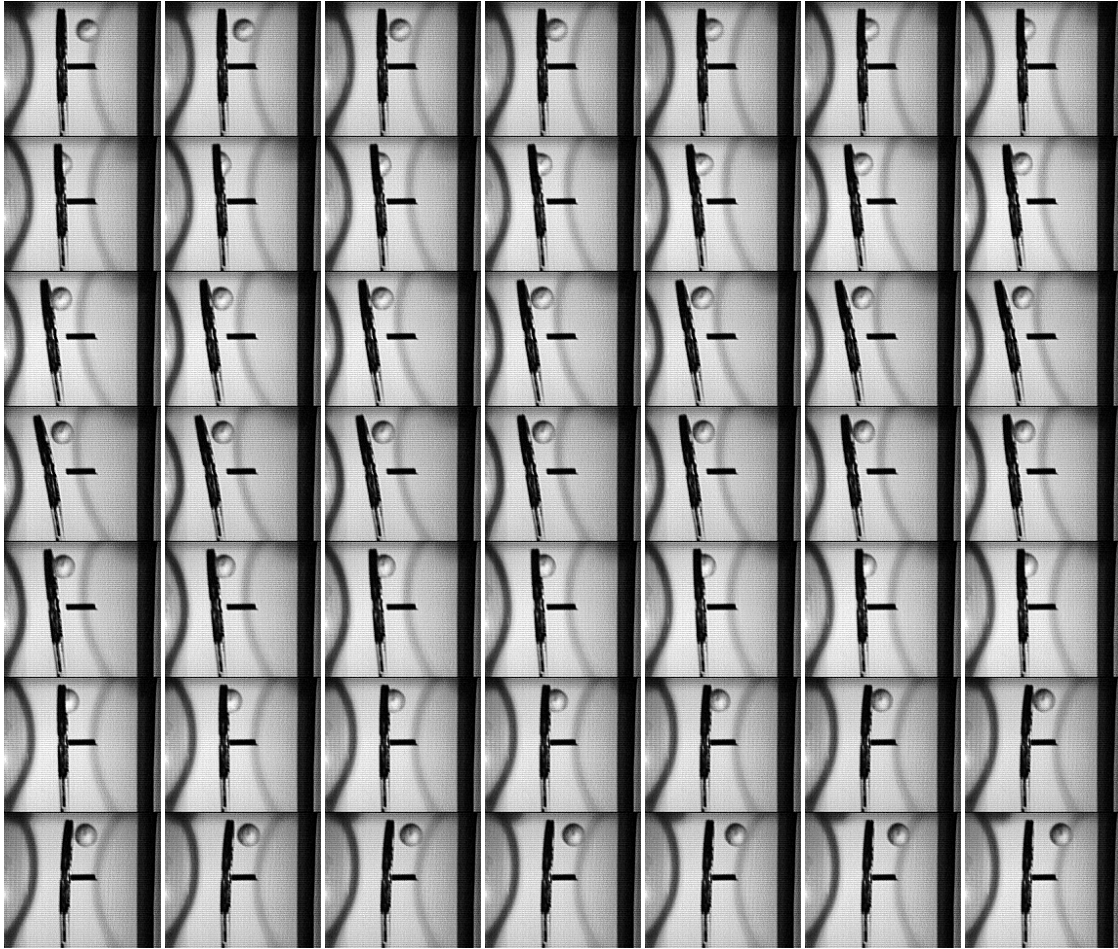


Figura 6.7: Impacto mostrando o efeito do *dead spot*.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho tem como principal objectivo desenvolver uma metodologia que permita caracterizar o desempenho de uma raquete de ténis. Numa primeira fase, foram identificados os principais parâmetros necessários à caracterização de uma raquete. Pretendia-se que a metodologia a seguir fosse baseada em ferramentas e métodos normalmente utilizados na caracterização de estruturas e componentes em Engenharia Mecânica.

Foi seleccionado um modelo recente com alguma inovação e cujo desempenho depende de um efeito estrutural. Para o seu estudo recorreu-se a um conjunto de ferramentas numéricas e métodos experimentais com os quais se avaliou o desempenho estático e dinâmico. Dada a grande variedade de raquetes existente, um estudo exaustivo estaria muito para além daquilo que é possível com um trabalho desta dimensão. Por isso, foi seleccionado um conjunto de principais parâmetros para averiguar a sua influência nas características globais da raquete.

O estudo deste tipo de estrutura comporta algumas dificuldades, não só pelo facto do seu desempenho ter que ser avaliado para uma utilização num curto intervalo de tempo, mas também por que o seu comportamento resulta de uma interacção complexa entre as propriedades do quadro, das cordas e do desempenho do atleta.

Grande parte dos equipamentos utilizados foram projectados, construídos e validados durante este trabalho. Dado que no nosso país não existe tradição neste tipo de estudos foi necessário tomar algumas decisões difíceis e procurar junto dos construtores, federações, clubes e alguns atletas consagrados a informação necessária.

Pode concluir-se que os equipamentos construídos desempenharam satisfatoriamente as tarefas para que foram concebidos. Os resultados obtidos foram sempre comparados com medições ou informação disponível na bibliografia.

A metodologia seguida revelou-se adequada e permitiu conhecer em profundidade o comportamento dinâmico de um elemento de alta tecnologia como é a raquete de ténis. Apesar do elevado desenvolvimento neste tipo de indústria pode concluir-se que é possível realizar investigação relevante para o desenvolvimento deste equipamento.

Finalmente pode concluir-se dos resultados obtidos que a agressividade comercial entre os diferentes fabricantes os leva a desenvolver estratégias comerciais sem suporte científico evidente. O efeito reivindicado no modelo estudado não se evidenciou de forma inequívoca tal como é anunciado. Ainda que as medições realizadas para avaliar o comportamento dinâmico das cordas tenham evidenciado um mínimo de transferência de energia na região do Flexpoint™, este efeito não surgiu na avaliação do comportamento dinâmico do quadro. Assim sendo não se mostrou necessário introduzir

a debilidade do quadro, certamente à custa de um aumento do custo de produção, para potenciar um efeito que se manifesta nas cordas e depende da geometria da cabeça.

8 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho permitiu conhecer em profundidade o comportamento de uma raquete de ténis. Os equipamentos experimentais construídos e as metodologias seguidas revelaram-se adequados e podem ser utilizadas sobre qualquer equipamento que se destine a uma utilização semelhante. A título de exemplo, pode citar-se o estudo dos bastões de basebol, tacos de golfe e sticks de hóquei no gelo e hóquei em campo. Contudo é a aplicação ao estudo dos sticks de hóquei em patins que se revela de maior importância dada a escassez de informação nesta área.

As ligações à biomecânica do movimento do atleta deverão ser futuramente detalhadas para compreender melhor a interacção do equipamento com o atleta. Neste campo revela-se de uma importância fundamental a prevenção de lesões devidas a impactos repetidos. Deve referir-se que existe uma lesão ao nível do cotovelo que é conhecida por “lesão dos tenistas” (*tennis elbow*).

Neste trabalho não ficou definitivamente resolvida a interacção entre as cordas e o quadro. Trata-se de um problema com alguma complexidade que exige o desenvolvimento de modelos numéricos adequados. Esta linha de investigação será privilegiada em projectos futuros dada a sua importância no desenvolvimento de novas soluções, envolvendo outras geometrias, novos materiais e diferentes soluções construtivas.

Finalmente deve referir-se que a experiência adquirida na construção de equipamentos experimentais será de grande utilidade para produzir novas soluções de apoio ao treino, isto é, novos canhões de bolas com e sem geração de efeitos (*spin*), centro de diagnóstico para avaliar os parâmetros/alterações realizadas sobre as raquetes.

9 LISTA DE REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA

9.1 LISTA DE REFERÊNCIA

- [1] S. Miller. *Modern tennis racket, balls and surfaces*. J. Sports Med. 2006. Vol. 40, 401-405.
- [2] Patente USP 3086777. Rene, Lacoste Jean, *Racket for Lawn-Tennis and similar games*. 1963.
- [3] Patente USP 3999756. Head, Howard, *Tennis racket*. 1976.
- [4] <http://www.itftennis.com> (Fevereiro de 2009).
- [5] H. Brody, *Physics of the tennis racket*. Am. J. Phys., 1979. Vol. 47(6): 482-487.
- [6] Patente USP 4273331. Fischer, Werner, *Tennis-racket*. 1981.
- [7] Nick Bolletieri, *Bolletieri's tennis handbook*. Revista. 2001. Editora Human Kinetics. 393-402.
- [8] H. Brody, *Physics of the tennis racket II: The "sweet spot"*. Am. J. Phys., 1981. Vol. 49(9): 816-819.
- [9] Howard Brody, Rod Cross & Crawford Lindsey, *The physics and technology of tennis*. 2002 USRA. Racquet Tech Publishing. p62.
- [10] Rod Cross. *The dead spot of a tennis racket*. American Journal of Physics. 1997. Vol. 65 (8), 754-764.
- [11] Brody, H., *The physics of tennis III. The ball-racket interaction*. American Journal of Physics. 1997. Vol. 65(10), 981-987.
- [12] Rod Cross. *The sweet spots of a tennis racquet*. Sports Engineering. 1998. Vol. 1, 63-78.
- [13] Wilson, J. F., Davis, J. S., *Tennis racket shock mitigation experiments*. Journal of Biomechanical Engineering, 1995. Vol. 117:479-484.
- [14] L. Meirovitch, *Elements of vibration analysis*. 1986. 2nd Ed. McGraw Hill.
- [15] H. Brody, *The moment of inertia of a tennis racket*. The Physics Teacher, 1985. Vol. 23(4): 213-216.

9.2 BIBLIOGRAFIA

- <http://www.itftennis.com> (Outubro 2008)
- <http://www.geocities.com/TimesSquare/Chasm/4131/historia.htm> (Março 2009)
- <http://www.tenis.pt/> (Junho 2009)
- www.head.com (Outubro 2009)
- Joel Engel, *The Journal of Hand Surgery*. 1995. Vol. 20A(2), nº3: S77-S81.
- Wilson, J. F., Davies, J. S., *Tennis racket shock mitigation experiments*. Journal of Biomechanical Engineering. 1995. Vol. 117(4): 479-484.
- Howard Brody. *How would a physicist design a tennis racket?*. Physics Today. 1995. Vol. 48 (26), 26-31.
- Claire L. Stroede, Larry Noble, Hugh S. Walker. *The effect of tennis racket vibration dampers on racket handle vibrations and discomfort following impacts*. Journal of Sports Sciences. 1998. Vol. 17, 379-385.
- Rod Cross. *Impact of a ball with a bat or racket*. American Journal of Physics. 1999. Vol. 67 (8), 692-702.
- Rod Cross. *The coefficient of restitution for collisions of happy ball, unhappy balls and tennis balls*. American Journal of Physics. 2000. Vol. 68(11), 1025-1031.
- Rod Cross. *Why bows get stiffer and rackets get softer when strings are added*. American Journal of Physics. 2001. Vol. 69(8), 907-910.
- Rod Cross. *Customizing a tennis racket by adding weights*. Sports Engineering. 2001. Vol. 4, 1-14.
- R. Cross, R. Bower. *Measurements of string tension in a tennis racket*. Sports Engineering. 2001. Vol. 4, 165-176.
- Rod Cross. *Center of percussion of hand-held implements*. Journal of Physics. 2004. Vol. 72(5), 622-630.
- Yao-dong Gu, Jian-she Li. *Dynamic simulation of tennis racket and string*. International Journal of Sports Science and Engineering. 2007. Vol. 1, 55-60.
- C. H. Yang, P. C. Lin, Y. J. Chiu, *The influence of vibration mode response on tennis racket*. Journal of Biomechanics. 2007. Vol. 40, S2.
- Youlian Hong, Roger Bartlett, *Handbook of biomechanics and human movement science*. 2008. Editora Routledge.

- Peter M. McGinnis, *Biomechanics of sport and exercise*. 2nd Edition. 2005. Human Kinetics

10 ANEXOS

Anexo A

Especificações das bolas de ténis.

As bolas de ténis foram desenvolvidas para que qualquer atleta, profissional ou amador, pudesse usufruir do jogo de ténis. Como tal, as bolas de ténis para iniciantes e amadores, foram desenvolvidas de maneira a aumentar-se a velocidade do jogo. Porém, e no caso dos atletas profissionais, as bolas são fabricadas de forma a se prolongar o tempo de jogo.

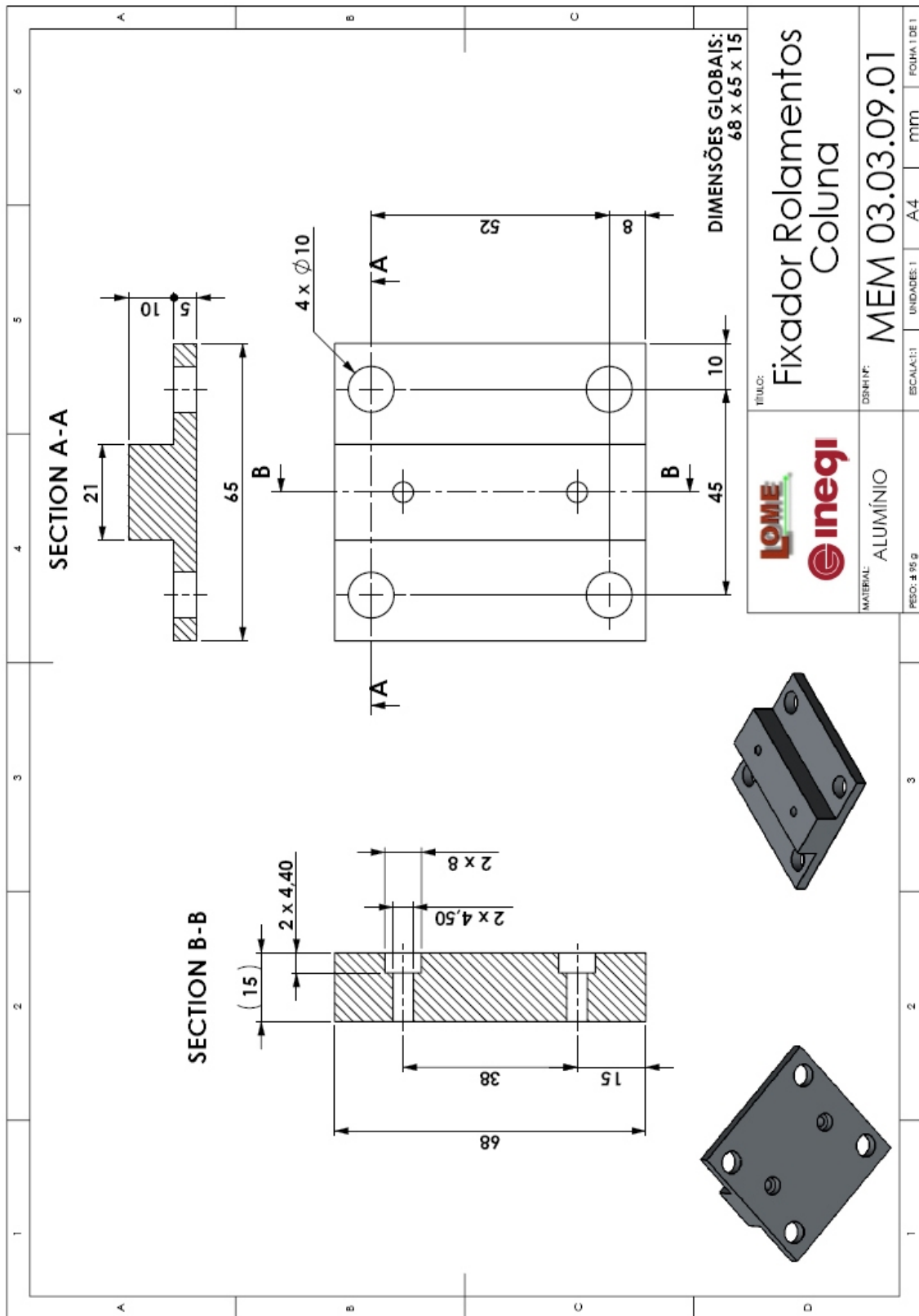
As bolas foram então divididas em três grupos: Tipo 3 (vermelhas), Tipo 2 (cor de laranja) e Tipo 1 (verdes). Estas especificações, que datam de Setembro de 2007 podem ser consultadas na Tabela 10.1.

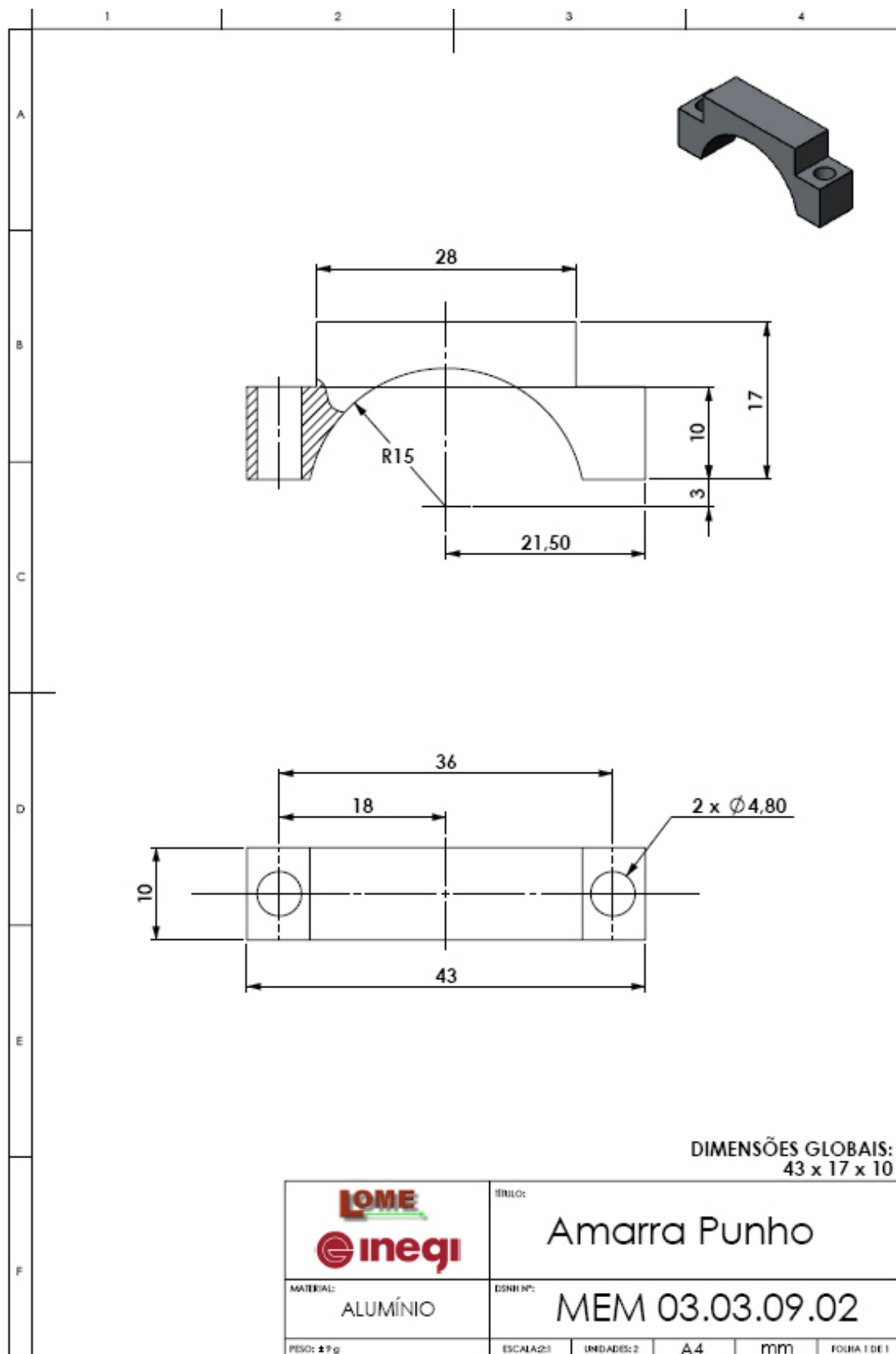
Tabela 10.1: Especificações das bolas de ténis [4].

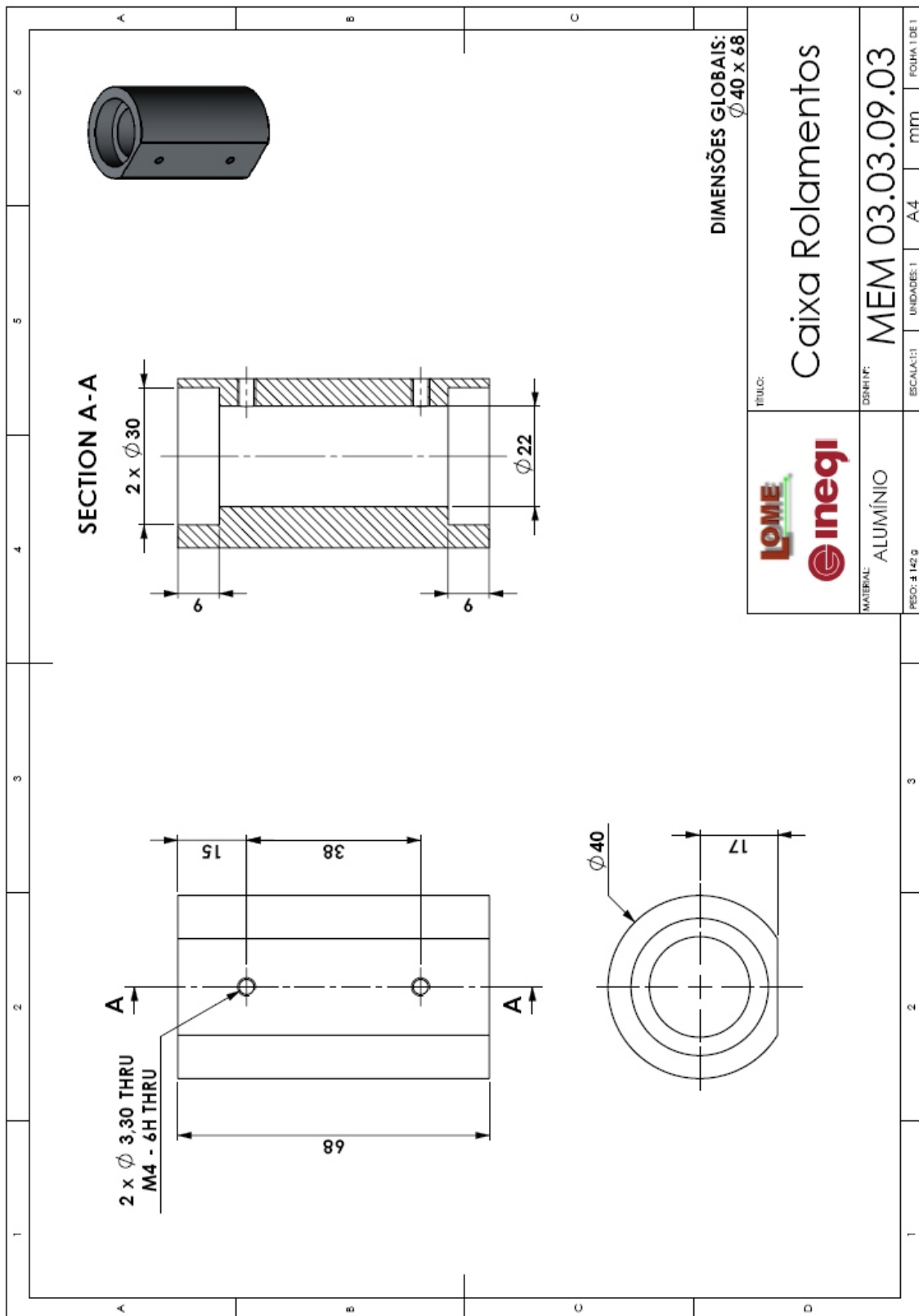
	Padrão de Construção			Bolas Padrão
	Tipo 3 (vermelha)	Tipo 2 (cor de laranja)	Tipo 1 (verde)	Tipo 2
Tamanho	6,90 – 8,00 cm (2,72 – 3,15 in)	6,000 – 6,858 cm (2,362 – 2,700 in)	6,300 - 6,858 cm (2,480 - 2,700 in)	6,541 - 6,858 cm (2,575 – 2,7 in)
Peso	32,0 – 42,0 g	36,0 – 46,9 g	47,0 - 51,5 g	56,0 - 59,4 g
Altura de Ressalto	95 – 110 cm (37,4 – 43,3 in)	100 - 115 cm (39,4 – 45,3 in)	118 - 132 cm (46,5 - 52,0 in)	135 - 147 cm (53 – 58 in)
Deformação no sentido de avanço	-----	1,400 – 1,650 cm (0,551 – 0,650 inches)	0,800 - 1,050 cm (0,315 - 0,413 inches)	0,220 - 0,290 in (0,559 - 0,737 cm)

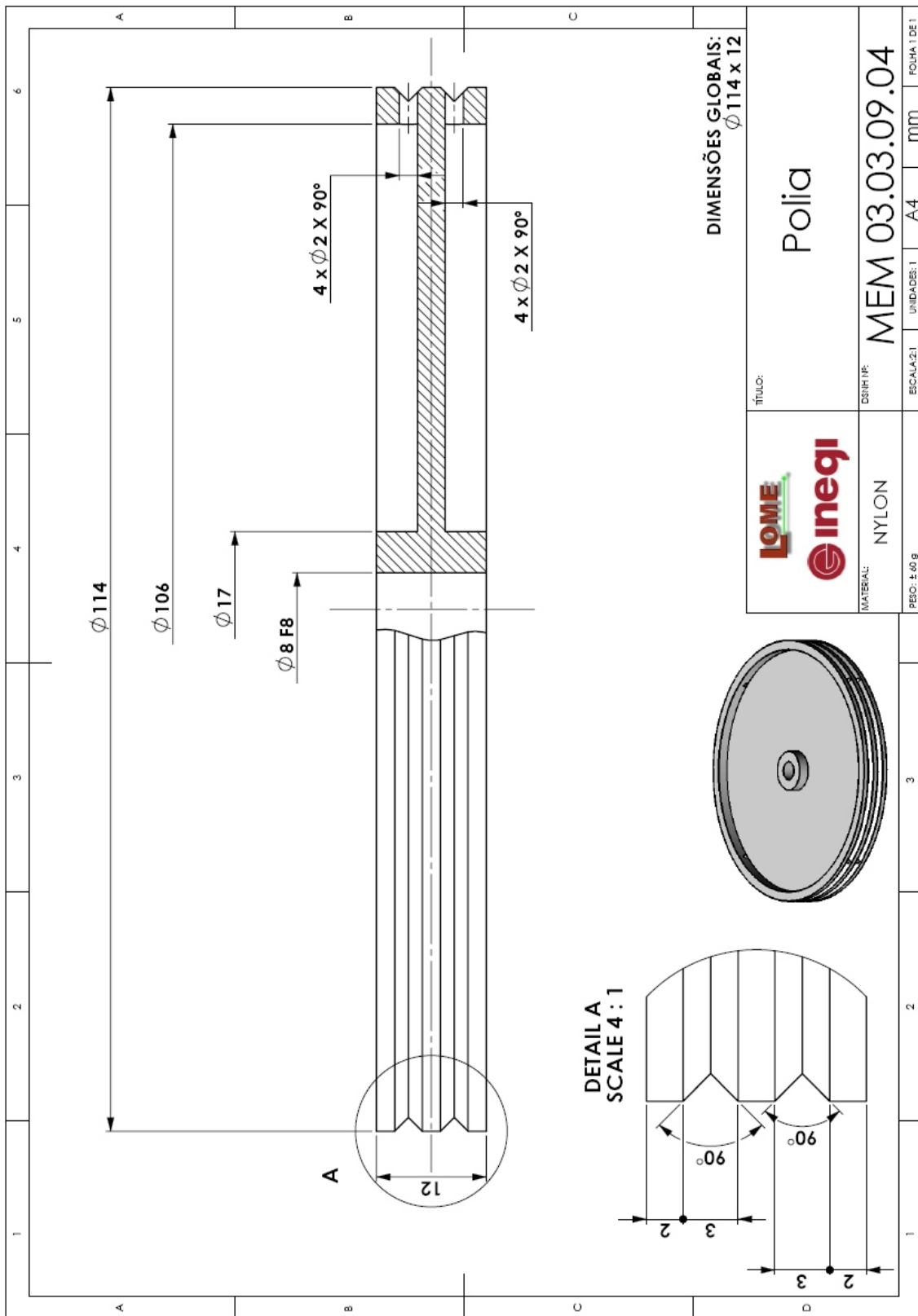
Anexo B

Desenhos do protótipo desenvolvido para medir o Swingweight



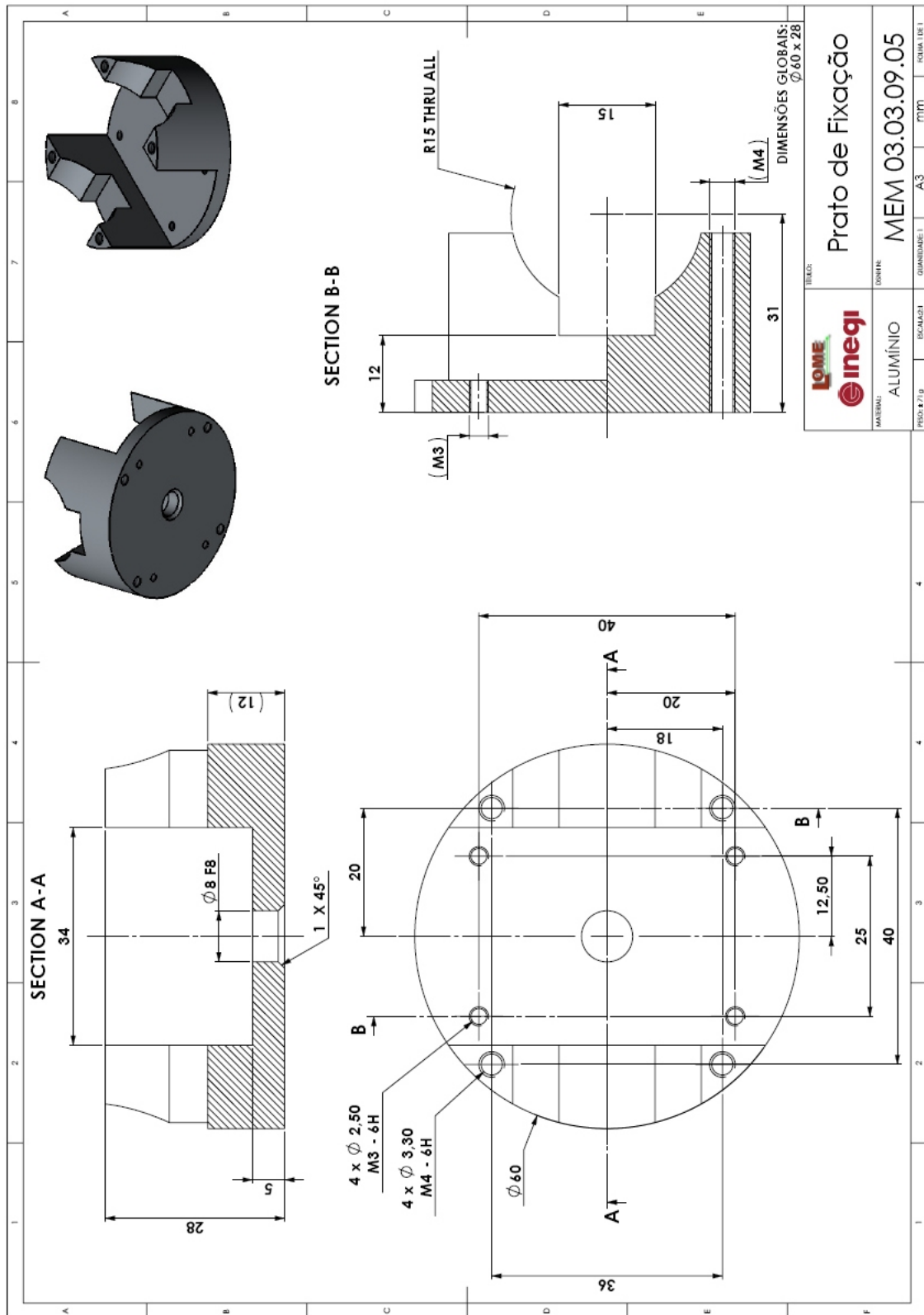


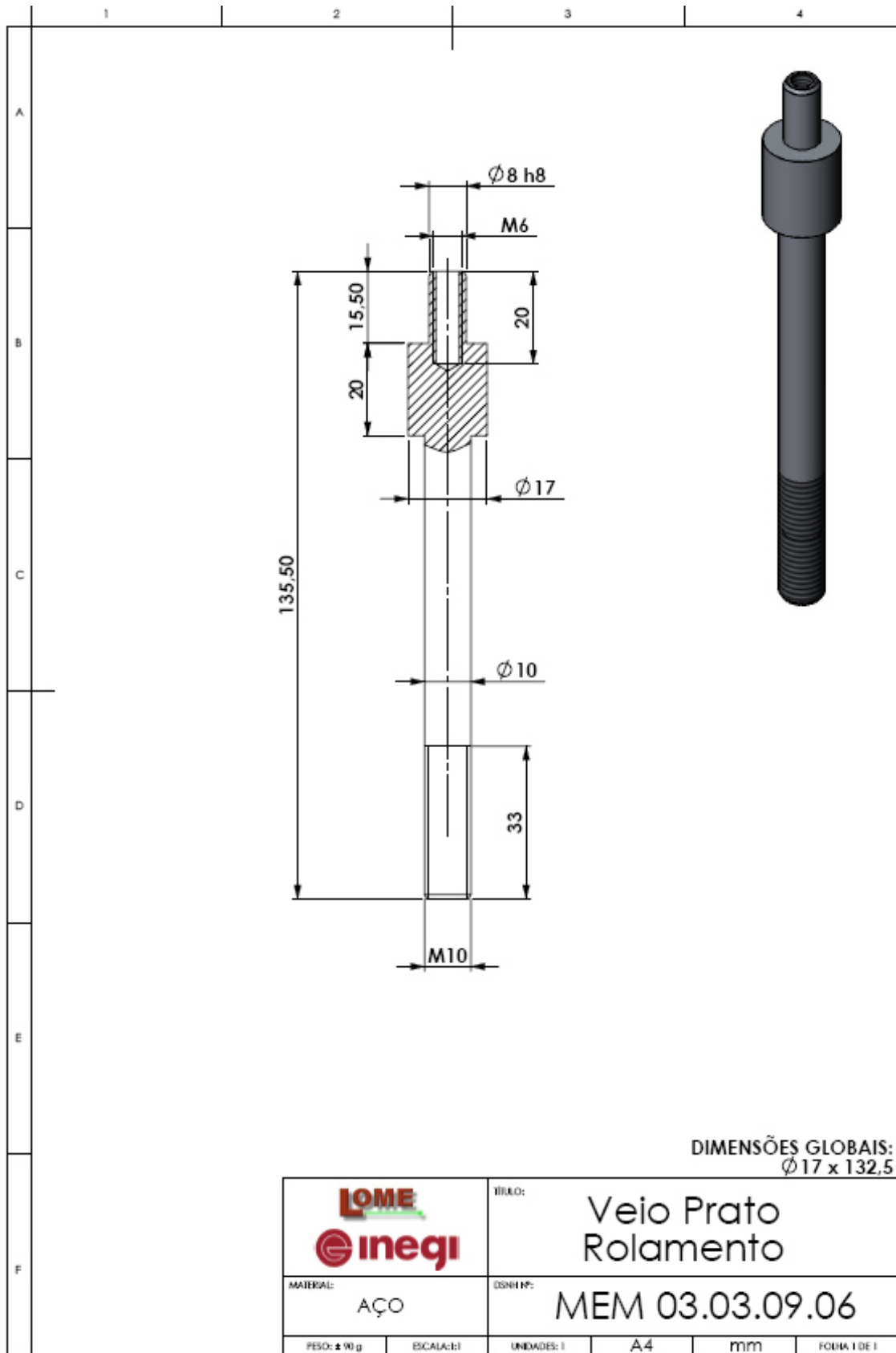


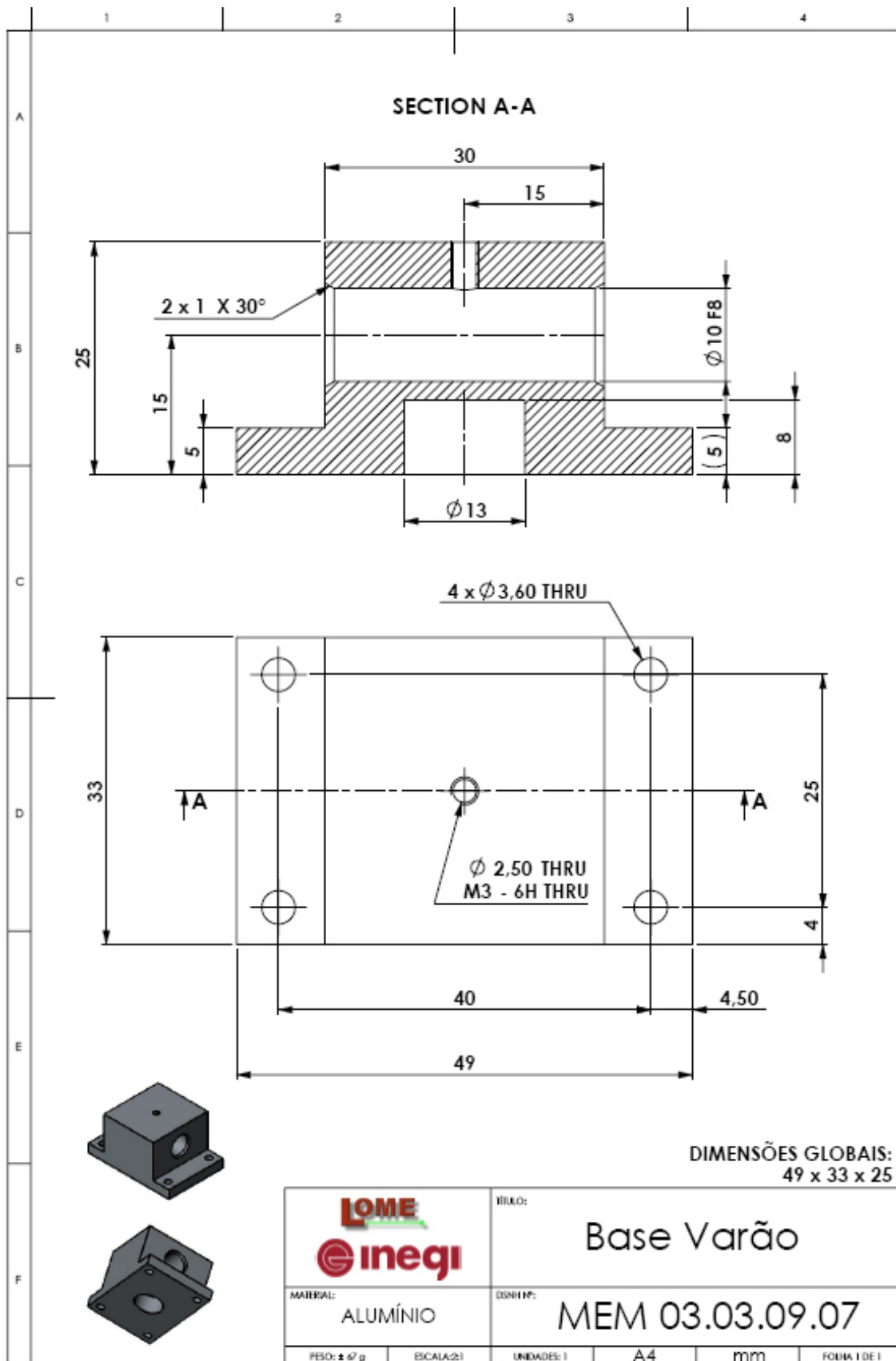


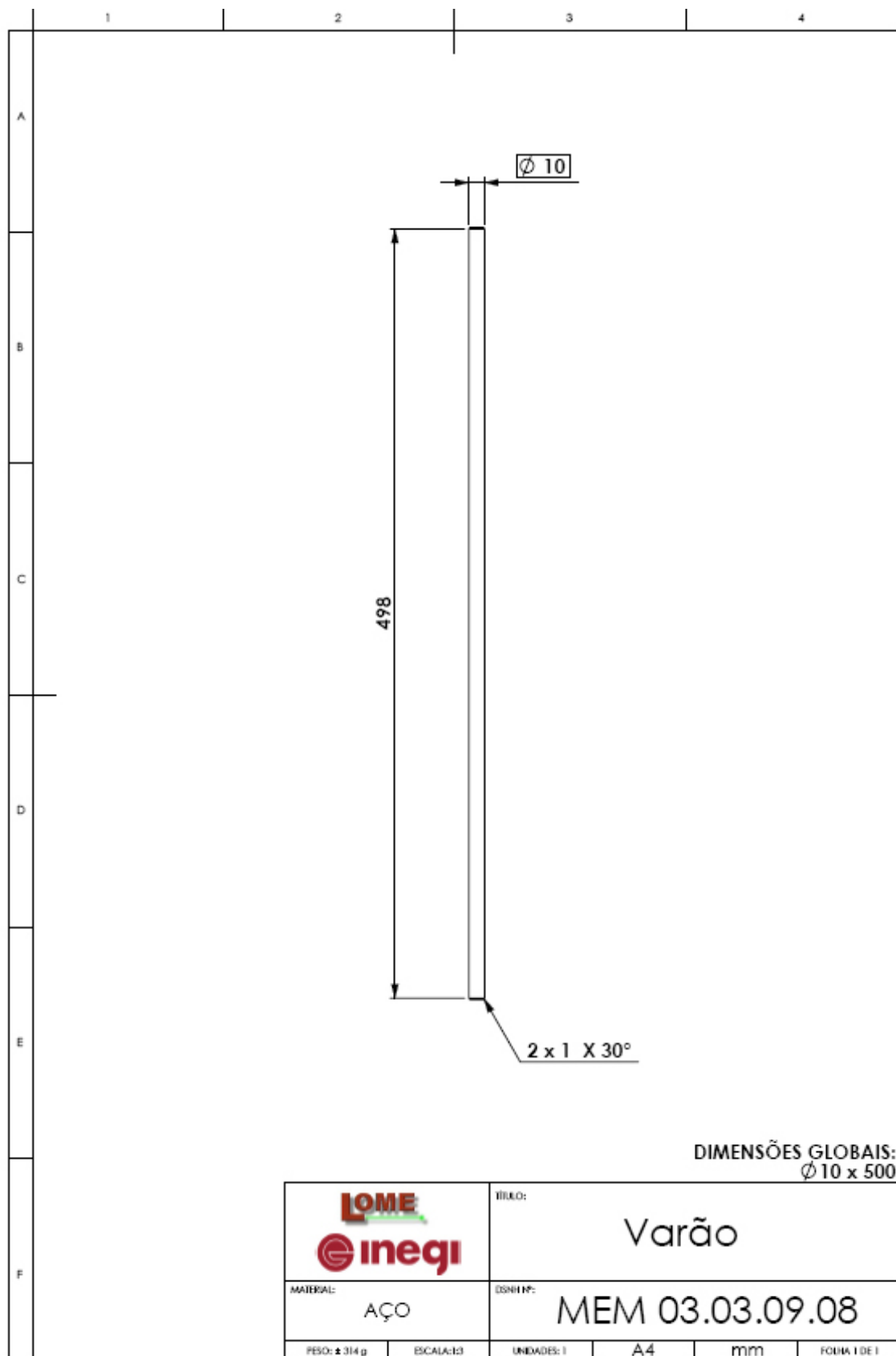
DIMENSÕES GLOBAIS:
 $\phi 114 \times 12$

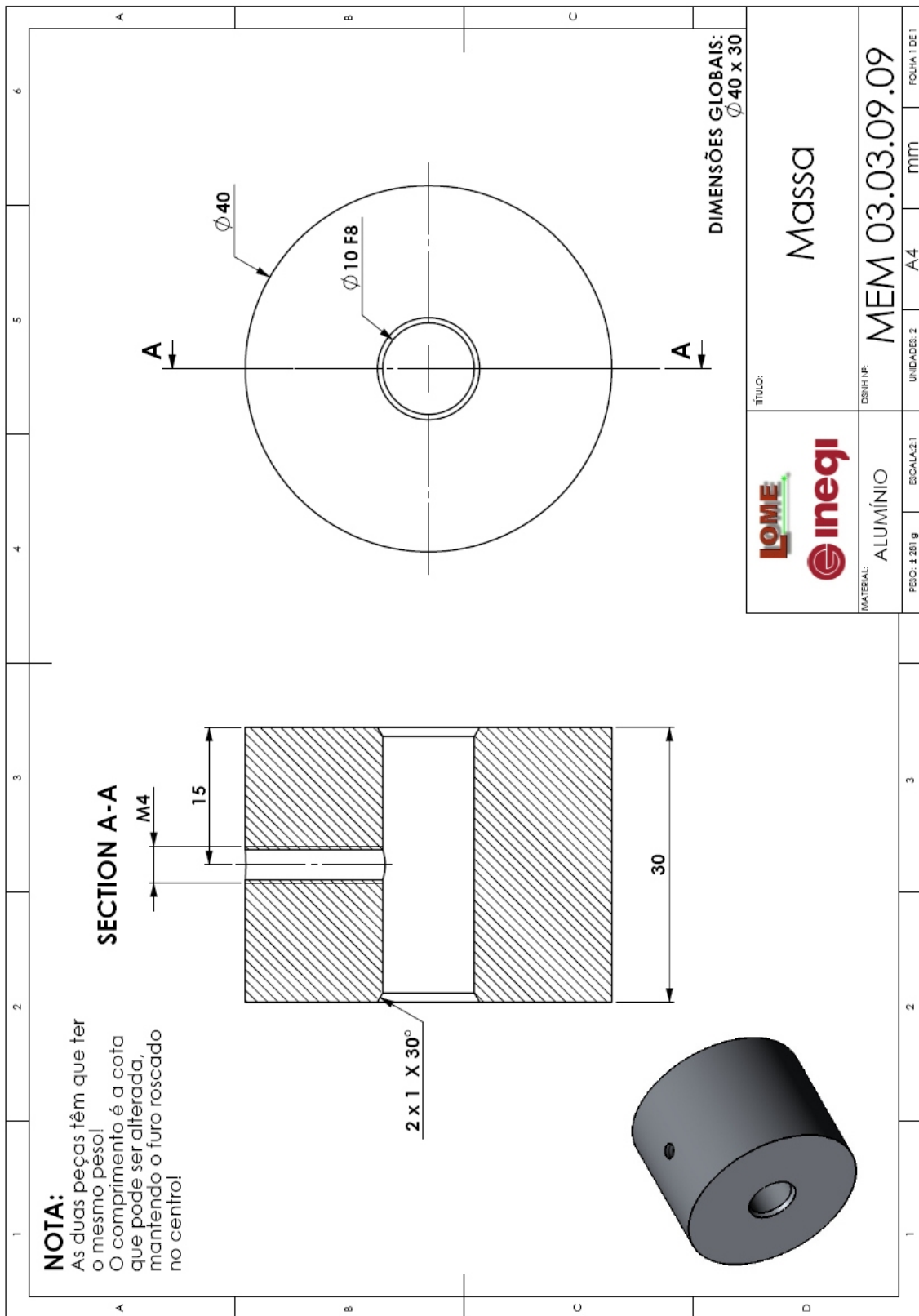
	TÍTULO:	Polia		
	ESCALA: 2:1	UNIDADES: 1	A4	MM
MATERIAL:	NYLON	MEM 03.03.09.04		
PESO: ± 60 g				











Anexo C

Determinação do momento de inércia, I_s , e da rigidez do sistema principal, k_m .

Tabela 10.2: Valores do momento de inércia e da rigidez do sistema principal.

e massas [mm]	T [ms]	I [kg.m ²] (Solidworks)	I_s [kg.m ²]	k_m [kg/m]	I_s [kg.m ²] Médio	k_m [kg/m] Médio	I_s [kg.m ²] Final	k_m [kg/m] Final	
203,5	496,55	0,01755462	9,9049E-05	917,7	1,6961E-04	921,3	1,6812E-04	920,3	
150	427,6	0,0129923		922,3					
203,5	496,55	0,01755462	922,7						
80	353,545	0,0088063	922,6						
203,5	496,55	0,01755462	920,7						
60	337,025	0,0079815	922,0						
203,5	496,55	0,01755462	927,4	2,1691E-04					925,9
40	323,115	0,0073216	927,3						
203,5	496,55	0,01755462	923,1						
30	316,83	0,0070535	925,2						
203,5	496,55	0,01755462	926,6						
15	309,965	0,0067288	924,1						
150	427,6	0,0129923	912,7		1,7657E-04	921,1			
80	353,545	0,0088063	920,8						
203,5	496,55	0,01755462	921,1						
60	337,025	0,0079815	900,7						
203,5	496,55	0,01755462	917,1						
30	316,83	0,0070535							
203,5	496,55	0,01755462							
15	309,965	0,0067288							