

O arco de violino

The violin bow

Igor Mottinha Fomin^{1,2}, Lucas Guilherme Schafhauser³, Jorge Luis Monteiro de Matos², Silvana Nisgoski², Thiago Corrêa de Freitas^{*1}

¹Universidade Federal do Paraná, Curso Superior de Tecnologia em Luteria, Curitiba, PR, Brasil

²Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Curitiba, PR, Brasil

³Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Sociedade, Curitiba, PR, Brasil

Recebido em 06 de Março, 2018. Aceito em 29 de Março, 2018.

Neste artigo será feita uma discussão sobre alguns dos principais aspectos do arco de violino. Uma descrição da sua evolução histórica justifica a atual forma geométrica e a sua estrutura é descrita na seção que trata do arco moderno. Os materiais, aqueles historicamente utilizados e as possibilidades alternativas, são tema de seção específica. A última seção trata das propriedades físicas do arco e de como este pode ser caracterizado em função destas, trazendo uma relação entre conceitos físicos e a sua aplicação no arco de violino.

Palavras-chave: arco, violino, acústica, física e música.

In this article a discussion will be made about some of the main aspects of the violin bow. A description of its historical evolution justifies the present geometrical shape and its structure is described in section which deals with the modern bow. The materials, those historically used and alternative possibilities, are the subject of a specific section. The final section deals with the physical properties of the bow and how it can be characterized by these properties, bringing a relationship between physical concepts and their application on the violin bow.

Keywords: bow, violin, acoustics, physics and music.

1. Introdução

A partir do séc. XVIII, orquestras têm desempenhado um importante papel social, artístico e até mesmo civilizador em nossa sociedade, sendo um fenômeno histórico observado em várias cidades que as constituíram em decorrência do seu desenvolvimento econômico [1]. Desde o surgimento das primeiras formações orquestrais no séc. XVII, o violino exerce importante papel dentro delas. Permanece ainda hoje com presença numerosa em relação ao total de instrumentos de uma orquestra, sendo que para cada violino há um arco sendo usado durante a execução de uma obra musical. O arco possui fundamental importância, pois permite a produção contínua de som ao mesmo tempo em que é possível variar sua intensidade e duração [2]. Com ele o músico realiza diversas nuances, acentuações e articulações que permitem produzir sonoridades específicas em instrumentos de cordas friccionadas [3], o que teria contribuído para manter o violino em posição de destaque ao longo de séculos [4].

Huber [5] salienta que houve aumento expressivo do valor dos arcos de violino nos últimos 50 anos devido à escassez e encarecimento¹ da matéria prima e à adoção da música europeia pelo mundo não europeu. Isso teria

criado grande demanda por arcos, especialmente pelo mercado asiático. Atualmente a maioria dos arcos profissionais são feitos de madeira de pau-brasil, antes *Caesalpinia echinata*, agora *Paubrasilia echinata* [6]. Embora essa espécie esteja com restrições comerciais internacionais e protegida por lei em virtude do risco de extinção [7, 8], sua demanda mundial para produção de arcos é estimada em 200 m³ anuais [9].

Na sua História da pesquisa sobre o violino, Hutchins [12] mostrou que este instrumento tem sido objeto de pesquisa há um século e meio, porém, o mesmo interesse e volume de trabalho não é observado quando se trata do arco. Um dos primeiros trabalhos modernos que trata de propriedades físicas do arco de violino remonta a década de 1970, na proposta de Reder [13], onde centro de massa e raio de giração, entre outras propriedades, são apontados como possíveis indicadores de qualidade do arco. Pode-se destacar o conjunto de estudos de Askenfelt [14–17] que trata de avaliar as técnicas de utilização do arco, as medidas do seu movimento, a força aplicada sobre a corda e também comparativos entre arcos de boa e má qualidade. O movimento do tipo agarra-desliza, que resulta em uma oscilação de relaxação [18] infligido pelo arco na corda é explicado de maneira introdutória, com diferentes graus de complexidade, nas referências [2, 19, 20]. Cabe frisar que não existe um modelo fechado que descreva completamente

*Endereço de correspondência: tcf@ufpr.br.

¹Uma vareta de pau-brasil, suficiente para fazer um arco, custa de US\$ 60,00 a US\$ 300,00 nos EUA [10] e de € 30 a € 290 na Europa [11], de acordo com o nível de qualidade.

a interação do arco com a corda, apesar da sofisticação obtida nos trabalhos de McIntery [21–24], Cremer [25] e Woodhouse [26]. Recentemente Gough [27] debruçou-se no estudo dos modos normais de vibração do arco de violino, revelando um conjunto amplo e complexo do comportamento vibracional do arco.

Dadas as restrições legais em relação ao uso do pau-brasil e, seu valor simbólico como árvore nacional [28], pesquisadores brasileiros [29] têm dedicado tempo à procura de espécies similares a fim de comparar suas características anatômicas, físicas e químicas e analisar a viabilidade de sua utilização como arcos para instrumentos musicais². Poucas espécies com características semelhantes ao pau-brasil também apresentam a viabilidade técnica necessária. Entre essas está a madeira de ipê (*Handroanthus* spp.) estudada por Longui *et al.* [30,31] cuja análise de propriedades da madeira, construção de arcos e análise subjetiva por músicos foi o tema da dissertação de Fomin [32]. Materiais além de madeira [4,33,34], como fibra de vidro e fibra de carbono por exemplo, já foram utilizados.

No presente artigo trata-se do arco de violino como um objeto musical que forma um conjunto com o violino, mas que possui certo grau de independência deste. As mudanças sofridas pelo arco ao longo da história até atingir a sua forma moderna, a descrição da funcionalidade de suas partes e os materiais utilizados são apresentados na seção 2. As propriedades físicas mais relevantes do arco e o seu comportamento vibracional são o assunto da seção 3, que encerra o trabalho.

2. O arco de violino

2.1. Evolução histórica

O arco de violino do séc. XVI era uma haste de madeira convexa ou quase reta, tensionada por um feixe de fios de rabo de cavalo presos em suas extremidades, muito semelhante a um arco para atirar flechas [35]. Não apresentava padrão estabelecido em relação ao comprimento, forma e estética, podendo variar bastante nessas características dependendo do tipo de música para a qual ele era usado³. Através de pinturas da época estima-se que alguns arcos teriam o comprimento aproximado de 380 mm e os mais longos teriam em torno de 630 mm. Além disso, a crina aparentava ser fixa em ambas as extremidades do arco, não permitindo ajustes de tensão.

Estando a arte de tocar instrumentos de corda no séc. XVII em constante aperfeiçoamento [36], houve necessidade de controlar o nível de tensão na crina dos arcos conforme o tipo de música tocada. As necessidades mu-

sicais levaram à procura de madeiras mais apropriadas para a vareta, houve a redução da sua convexidade e também, através de sua configuração geométrica, buscou-se harmonizar a resistência à flexão e a elasticidade da madeira nos arcos [35]. Além disso, alguns sistemas de dispositivos com parafusos tornaram-se conhecidos e utilizados no final do séc. XVII, permitindo regular com facilidade a tensão desejada para a crina. Fétis [36] apresenta arcos datados de 1620 a 1790 como prova visual de que não houve alteração em sua forma, argumentando inclusive que estes eram grosseiros. Porém, fontes consideradas confiáveis, como Mersenne [37], deixam claro que o arco era totalmente satisfatório para o músico e a música da época, sendo alguns desses arcos mostrados na figura 1. Se comparado com o arco moderno, os antigos eram ligeiramente mais curtos e mais leves e tinham uma faixa de crina mais estreita.

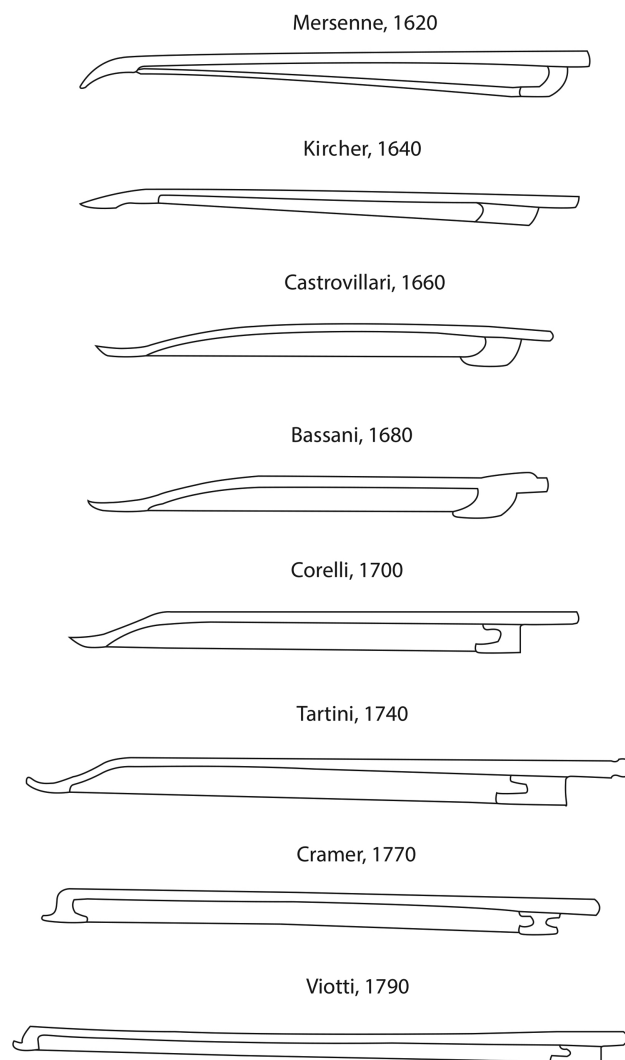


Figura 1: Cronologia das alterações da forma do arco de violino entre 1620 e 1790. As associações são feitas tanto aos autores que reportaram tais arcos como aos violinistas que os utilizaram, segundo representação apresentada por Boyden [35], o qual apresenta uma imagem a partir da qual criou-se esta figura.

²Embora o tema seja o arco do violino especificamente, o conteúdo deste trabalho é extensivo, com poucas alterações, aos arcos de demais instrumentos musicais.

³Ao tocar o violino, o arco pode ser usado de diversas maneiras e o que caracteriza o início do movimento da corda, impondo-lhe diferentes condições, pode ser chamado de “golpes de arco”. Estes estão descritos detalhadamente na obra de Mariana Salles [3].

David Boyden [35] sugere que as alterações nas características físicas do arco de violino iniciam-se com o violinista italiano Arcangelo Corelli (1653-1713), ao redor de 1700, até chegar a Tourte em 1800. Corelli e seus pupilos violinistas Pietro Antonio Locatelli (1695-1764), Francesco Saverio Geminiani (1687-1762), Francesco Maria Veracini (1690-1768), Gaetano Pugnani (1731-1798) e Giuseppe Tartini (1692-1770), desenvolveram um arco que pode ser caracterizado como modelo Corelli-Tartini [38, 39]. De acordo ainda com Fétis [36], Tartini melhorou o arco de Corelli ao redor de 1730-1740 fazendo uso de madeiras mais leves e de uma vareta mais reta. Este foi utilizado na música italiana na primeira parte do séc. XVIII, medindo normalmente de 610 mm a 710 mm em comprimento total, apresentando vareta convexa e talão fixo. Alguns mais avançados eram ajustados por mecanismos de parafusos.

Pode-se também identificar o “arco alemão”, como um modelo mais pesado e que geralmente usava uma vareta convexa, foi considerado de certo modo primitivo, com uma ponta volumosa como foi ilustrada por Leopold Mozart [40]. Porém, na cronologia segue o “arco de Cramer”, associado ao violinista Wilhelm Cramer (1745-1799) que viveu a maior parte de sua vida em Mannheim (Alemanha) e depois de 1772 em Londres (Reino Unido). Esse modelo pode ser considerado decisivo em direção ao arco moderno, porém prevalecendo como arco transitório entre os modelos Corelli-Tartini e Tourte.

O arco usado por Cramer é um modelo único, a partir da extremidade delgada do arco, sua ponta se estende para duas direções lembrando a forma de um machado. Esse modelo ficou conhecido como “machado de batalha”. O talão é cortado à frente e atrás, o que torna esse modelo de talão particularmente leve - e parece ter sido relativamente pouco usado antes de existirem nos arcos de Cramer - faz uso de um moderno mecanismo de parafusos, um dispositivo de aperto encontrado nos melhores arcos do fim do séc. XVII. A vareta levemente mais comprida que o modelo de Corelli-Tartini e um pouco maior que o de Tourte. Porém, o mais significativo nessa vareta é a curvatura côncava, isso implica na crina ceder menos quando o arco está pressionando a corda e, como consequência, obtém-se uma resposta sonora mais imediata a partir do ataque do violinista até a produção da nota. Finalmente, a largura da faixa da crina desse arco pode ser ligeiramente maior do que 6 mm, típica dos arcos de Corelli-Tartini, porém mais estreito que os 11 mm atuais.

O último modelo é o famoso arco de Tourte, aperfeiçoado em 1785. É o arco que permanece sendo usado universalmente até hoje, sendo o mais apropriado para músicas depois do séc. XVIII, tardiamente com Mozart e Haydn, Viotti e Beethoven. François Xavier Tourte (1747-1835), relojoeiro francês e exímio conhecedor de materiais, juntamente com Giovanni Battista Viotti (1755-1824), violinista italiano, são tidos como responsáveis pela con-

solidação do arco moderno, cuja principal diferença é a curva inversa em relação ao arco antigo [33].

O modelo de arco desenvolvido por Tourte e Viotti tornou-se referência para as gerações posteriores de *archetiers*.⁴ Teóricos como Woldemar [38] e Fétis [36] chamam o arco de Tourte de arco Viotti, por causa do violinista Viotti que foi um dos pioneiros em usar o arco de Tourte. Um fator que dificulta conhecer por quem e quando foi construído determinado arco é que tradicionalmente, ao contrário do luthier, o archetier não identificava a sua autoria nos arcos. François Tourte raramente estampou seu nome em seus arcos, mesmo ele tendo sido um famoso archetier. Dourado [41] aponta que não só a forma mas também a madeira que ele utilizou naquele momento, o pau-brasil, continuam sendo utilizadas hoje. Stowell [42] salienta que, do ponto de vista técnico musical, Tourte teria conseguido reunir no seu modelo de arco de pau-brasil, alguns aspectos fundamentais para os músicos contemporâneos dele, como: leveza, resistência e elasticidade necessárias para a execução da crescente variedade de golpes de arco exigidos pela variação do gosto musical.

Em um tratado do séc. XVII, segundo François Lesure⁵ consta a indicação de que a madeira pau-brasil já era usada para este fim um século e meio antes de Tourte. Fato é que pau-brasil tornou-se um material tradicionalmente empregado na construção de arcos e o modelo desenvolvido por Tourte possibilitou o enriquecimento da técnica de arco para as novas tendências musicais surgidas na época, sendo que desde o séc. XVIII, o pau-brasil é conhecido, por causa de suas características, como o material ideal para construção de arcos para instrumentos de corda [43].

Tourte padronizou e aprimorou o arco em sua melhor forma, combinando as melhores características dos arcos anteriores. Fixou o comprimento total do arco de violino, incluindo o botão do parafuso com cerca de 740 mm a 750 mm; a extensão útil da crina com 650 mm e a largura da faixa da crina com cerca de 11 mm. A aparição do arco de Tourte em Paris é geralmente considerada como sendo o fim da história evolutiva do arco mas, houve ainda um desenvolvimento paralelo na Inglaterra. Os arcos de John Dodd, o “Tourte” inglês, tinham qualidades comparáveis aos de François Tourte, embora fossem menos elegantes e mais curtos.

Além de ser muito importante na construção de arcos no final do séc. XVIII [34], Paris foi também o centro de um recém despertado interesse na construção de violinos e técnicas de execução violinística. Pela primeira vez na França aparece um grande construtor de violino, Nicholas Lupot (1758-1824). O desenvolvimento em Paris da técnica do tocar violino avançou tão rápido que a Escola Francesa tornou-se a principal para toda a Europa no séc. XIX. Assim, a liderança nas técnicas de violino e constru-

⁴Termo em francês que significa: artesão que cria e constrói arcos novos ou restaura arcos antigos.

⁵François Lesure, *Le Traité des Instruments de Musique de Pierre Trichet, Annales musicologiques, Vol. III, 1955, Paris.*

ção de arcos e violinos passou da Itália para a França no final do séc. XVIII. Com isso, uma nova geração de violinistas franceses como Pierre Baillot (1771-1842), Pierre Rode (1774-1830) e Rodolphe Kreutzer (1766-1831) (pupilos e colegas de Viotti) espalhados por toda a Europa levaram o arco de Tourte com eles.

François Tourte foi o archetier que mais recebeu louvor ao longo do tempo, mas essa fama é devida também ao empenho de outras pessoas que participaram ativamente na história do arco. A forma final do arco de Tourte foi alcançada por um processo de evolução e não de revolução, durante um período de 40 ou 50 anos. Isso requereu um esforço de dezenas de artesãos como John Dodd, o pai de François e outros incluindo o projetista do arco de Cramer, que tinham tanto talento quanto François e ainda permanecem anônimos [35].

Com a possibilidade de novos materiais sintéticos no séc. XX, manteve-se a forma do arco Tourte, porém construído com fibra de carbono. Esses arcos podem variar tanto em qualidade quanto em valor e atualmente sua aceitação ainda não é tão ampla, embora estejam no mercado desde a década de 1960. Arcos de fibra de carbono, ainda que funcionais, são demasiado recentes para que se possa dizer que são o próximo passo evolutivo do arco Tourte.

2.2. Forma contemporânea

Um arco côncavo como os antigos, ao ser utilizado, pode ter a mesma tensão nas crinas e, aplicar a mesma força sobre as cordas que um arco convexo⁶ moderno do tipo Tourte. A completa descrição da diferença de resposta entre os dois tipos de curvatura só pode ser alcançada através de uma teoria dinâmica do arco, a qual foge do escopo deste trabalho porém, algumas considerações podem ser feitas. Para um arco côncavo, a condição de sustentação da crina pode apresentar mais variações dependendo da localização do ponto de contato com a corda, enquanto que no arco convexo essa variação é menor. No caso do arco côncavo, as extremidades da vareta aproximam-se na medida em que a crina é tensionada

quando se aumenta a força que esta aplica na corda. Já no caso do arco do tipo Tourte, com o aumento da tensão na crina, a aproximação das extremidades da vareta é muito pequena, permanecendo estas praticamente estáticas dentro de certos limites de funcionamento do arco. Uma demonstração visual desse comportamento é feita pelo Dr. C. R. Ervin [44] que também atua como luthier e archetier. Esse comportamento diferenciado do arco moderno está ligado a sua curvatura convexa (*camber*, em inglês) e também à variação de espessura em diferentes pontos do arco (*tapering*, em inglês) [45].

Segundo Lehmann [46] um arco é uma vareta curvada feita em madeira de pau-brasil, em que são esticadas crinas recobertas com fina camada de breu, também chamado de colofone geralmente composto de resina extraída de coníferas [2], usado para vibrar as cordas de instrumentos musicais friccionados (violino, viola, violoncelo, contrabaixo, etc.). A haste de madeira inteiriça, curvada, possui comprimento aproximado de 726 mm a 736 mm (sem o botão), como ilustrado na figura 2, onde estão representadas suas dimensões aproximadas e partes principais. A haste do arco pode ser dividida em três partes [33] principais: I - Uma ponta, ou cabeça, com cerca de 22 mm a 25 mm de comprimento, conforme a figura 3; II - Um segmento de haste curva, que pode ter forma cilíndrica ou prismática, de diâmetro variável ao longo do comprimento, com cerca de 595 mm, a qual é

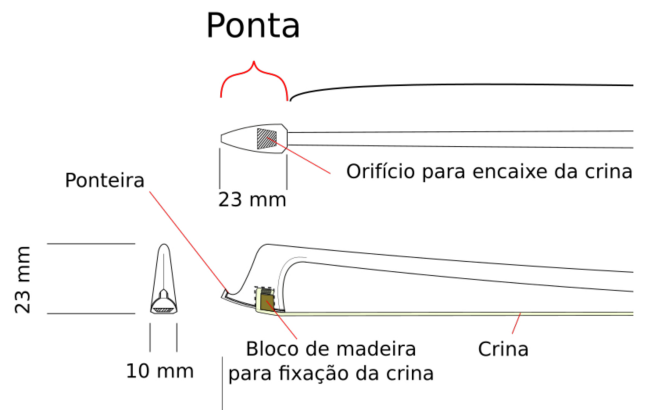


Figura 3: Detalhes da ponta do arco e da fixação da crina.

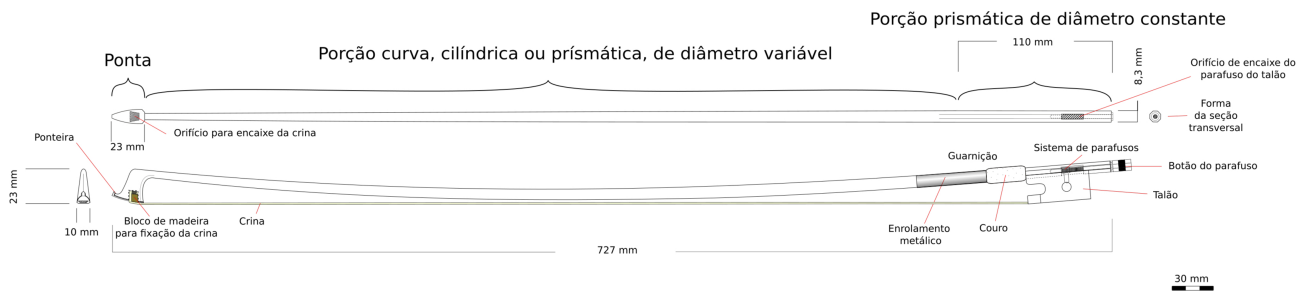


Figura 2: Arco de violino moderno em visão geral, onde são apresentadas as principais partes e dimensões. A divisão em ponta, porção de diâmetro variável e porção de diâmetro constante da vareta é mostrada junto com alguns detalhes da fixação da crina nas extremidades da ponta e talão.

mostrada no centro da figura 2; III - Outro segmento de haste de forma cilíndrica ou prismática, com aproximadamente 110 mm de comprimento e geralmente 8 mm de diâmetro constante, localizado na extremidade oposta à ponta e detalhada na figura 4.

Os detalhes da estrutura da ponta são mostrados na figura 3. No lado oposto à ponta do arco há um componente chamado talão, detalhado na figura 4, que geralmente é feito de madeira de ébano (*Diospyros ebenum*) onde a outra extremidade da crina é fixada. O detalhamento das partes que compõem o arco é feito na figura 5, sendo que a descrição das funções e materiais associados a cada parte, a se iniciar pela vareta, são agora descritas de maneira sintética. A vareta é o principal elemento do arco, responsável por manter o efeito de arqueamento e a parte que mais influencia na eficiência do arco. A ponta é o local onde se prende a crina, também um ponto de apoio para o efeito de arqueamento, na qual está localizado o encaixe da crina ou *mortasa*, que consiste no orifício onde a crina é fixada. A ponteira tem por função prevenir a quebra da ponta da vareta e em caso de queda reforçar a estrutura da ponta. Pode ser feita de osso, marfim ou metal (era usada também para encontrar o equilíbrio de massa do arco). Já o taquinho é uma pequena peça de madeira cortada em forma trapezoidal que é encaixado na *mortasa* para a fixação da crina, a qual, por sua vez, é o material natural que entrará em contato com as cordas do violino e através do atrito vai gerar o som no instrumento.

Passando para a região do talão, um canal escavado no arco serve de encaixe para o parafusinho do talão. Rosqueado no talão, este parafusinho é ao mesmo tempo a peça que pode prender o talão ao arco e também é a porca que se conecta ao parafuso que entra pela extremidade do arco através de um furo na vareta. Em conjunto, esse sistema de parafusos mantém o talão preso à vareta e permite movimentá-lo para aumentar ou diminuir a tensão da crina. O botão do arco serve para girar o

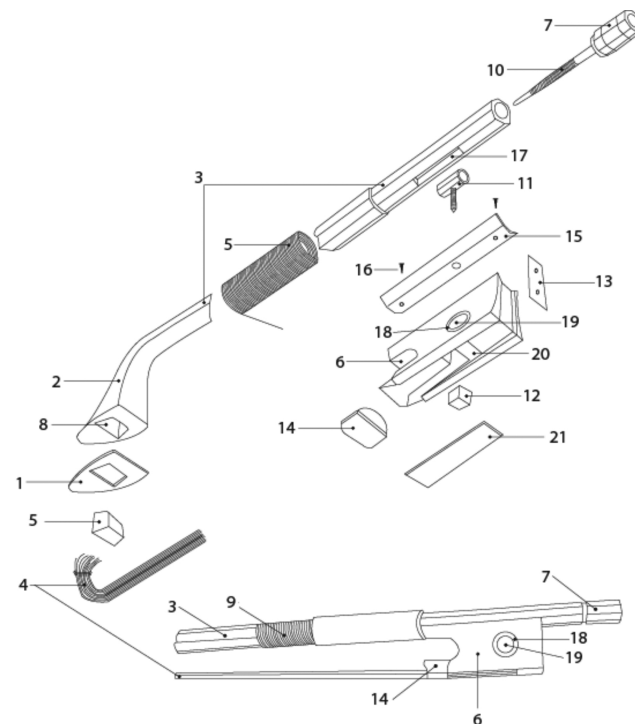


Figura 5: Visão explodida do arco de violino, sendo as partes indicadas: 1 ponteira, 2 ponta, 3 vareta, 4 crina, 5 taquinho da ponta, 6 talão, 7 botão, 8 encaixe da crina ou *mortasa*, 9 guarnição ou *fasciatura*, 10 parafuso do botão, 11 parafusinho do talão, 12 taquinho do talão, 13 chapa traseira do talão, 14 anel, 15 chapa da base do talão, 16 prego de fixação da chapa da base do talão, 17 encaixe do parafusinho do talão, 18 anel do olho, 19 olho, 20 *mortasa* do talão, 21 lingueta de madrepérola.

parafuso ao qual ele está fixado e movimentar o talão. A guarnição ou *fasciatura* consiste em um pedaço de couro com um enrolamento metálico logo à frente do talão. Serve de apoio para o dedo indicador e evita o desgaste da madeira da vareta [33]. A chapa da base do talão evita

Porção prismática de diâmetro constante

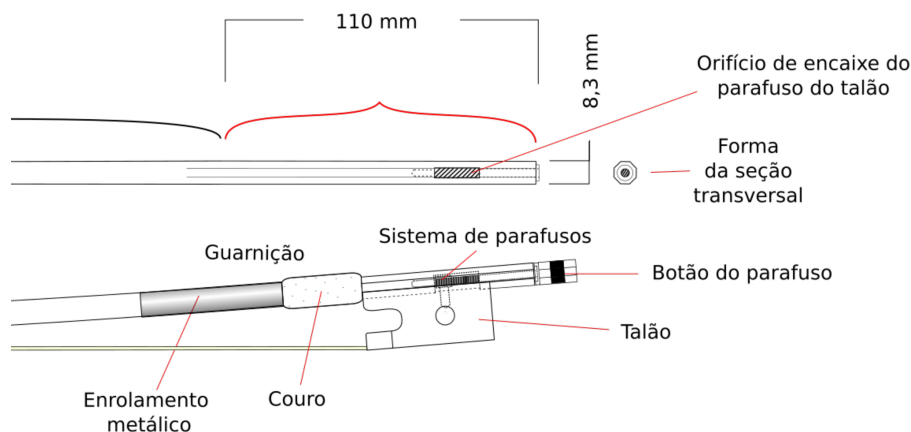


Figura 4: Detalhes da porção com diâmetro constante do arco, mostrando o sistema de parafusos que permite a regulação de tensão da aplicada na crina através da movimentação do talão.

o desgaste exagerado da vareta e do talão nesse ponto, bem como evita que este se movimente lateralmente.

Essa chapa, assim como outras partes de metal no talão, já foi utilizada anteriormente para equilibrar o peso do arco, mas hoje está muito associada à estética. Geralmente é afixada ao talão com cola e também com pregos de fixação.

O anel do olho, normalmente composto de algum metal como prata, níquel ou ouro, serve para ornamentação, assim como o olho, que normalmente é composto de madrepérola. Quando é usado um anel de prata e um olho de madrepérola, o modelo é chamado de olho parisiense. Esse é o elemento de maior liberdade artística, onde o archetier pode intervir no arco, sendo comum a realização de outras figuras além do olho. O talão tem a função de manter presa uma das extremidades da crina e se acoplar a vareta, de forma que quando movimentado, permite tensionar ou relaxar a crina. A *mortasa* do talão, assim como a *mortasa* da ponta, é um orifício escavado, que serve para prender a crina - que tem suas extremidades amarradas - e é mantida fixa, sob pressão, por meio de um taquinho de madeira. O anel tem como função segurar a pressão da cunha que por sua vez distribui uniformemente a crina na largura determinada. Por fim, a lingueta de madrepérola serve para dar acabamento cobrindo a crina do talão.

De acordo com Huber [5], apesar de existirem diferenças entre as dimensões dos arcos modernos, elas se restringem a uma pequena amplitude de variação. A sensação de equilíbrio nas mãos e a distribuição do peso do arco ao longo do comprimento são de grande importância para o músico. Segundo o autor, a largura, o afunilamento e a tensão uniforme da fita de crina que faz contato com as cordas do instrumento, também são relevantes para o músico. Entretanto, os fatores determinantes para a qualidade de funcionamento do arco são a elasticidade da madeira e a distribuição da rigidez e tensão ao longo do seu comprimento.

3. Aspectos físicos do arco

3.1. A vareta: materiais e forma

De acordo com Beament [4], algumas varetas de arcos antigos eram feitas de pau-cobra (*Brosimum guianense*) e acredita-se que essa era a espécie mais usada antes do advento do arco moderno [35]. Algumas espécies de madeiras utilizadas pelos europeus na confecção de arcos eram conhecidas como: *brazilwood*, *brazilette*, *Brasileinhholz*, *brésil*, etc. Estes são termos genéricos que antigamente podiam se referir à espécie *Caesalpinia sappan* conhecida na Europa em virtude do uso para tingimento [43] e que até o ano de 2016 era do mesmo gênero do pau-brasil. Entretanto, o termo em língua estrangeira que pela literatura está mais associado à madeira de pau-brasil (*Paubrasilia echinata*) é uma tradução da expressão “madeira de Pernambuco”, a qual aparece nas variantes *Per-*

nambuco wood, *Fernambuk*, *Pernambukholtz*, *le bois de Pernambouc* etc. como utilizado nas Refs. [46–48].

Essas madeiras parecidas com o verdadeiro pau-brasil foram muito usadas na fabricação de arcos baratos especialmente na Alemanha e França no final do séc. XVIII e início do séc. XIX, mas não apresentavam firmeza e flexibilidade extraordinárias se comparados ao pau-brasil (*Paubrasilia echinata*) [33]. Atualmente arcos produzidos em larga escala com baixo custo [4] continuam tendo sua madeira denominada *brazilwood*, mas geralmente se refere à maçaranduba (*Manilkara* spp.) [48].

Carvalho [49] indica que o pau-brasil apresenta crescimento muito lento e irregular, levando décadas para chegar ao ponto ideal de corte para construção de arcos. No entanto, essa madeira continua sendo utilizada para a confecção de arcos no mundo todo [9]. Por essa razão medidas para a conservação produtiva e uso sustentável já estão em execução no Brasil como o projeto Pau-brasil [50] e outros com apoio internacional como *The International Pernambuco Conservation Initiative* (IPCI). Assim sendo, alguns pesquisadores têm dedicado tempo à procura de espécies similares a fim de comparar suas características e analisar a viabilidade de sua utilização como vareta nos arcos para instrumentos musicais. Algumas madeiras já foram estudadas, apesar disso, ainda são poucas espécies que apresentaram características semelhantes à *Paubrasilia echinata* e que, além disso, também apresentam viabilidade técnica. Entre essas está a madeira de ipê (*Handroanthus* spp.) estudada por [51]. Fomin [32] obteve uma avaliação satisfatória por parte de músicos profissionais para arcos de alta qualidade construídos a partir de madeira de ipê.

Em estudos realizados por Alves *et al.* [52] com a madeira de pau-brasil classificada por archetiers em níveis de qualidade potencial para confecção de arcos, amostras foram analisadas anatômica, física e quimicamente. Dentre as características daquelas madeiras, foi possível concluir que amostras classificadas como melhores tinham as seguintes características físicas: valores de módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática acima de 17.650 MPa, valores de módulo de ruptura (MOR) à flexão estática acima de 196 MPa, velocidade de propagação sonora estimada por ondas de tensão acima de 4300 m/s e, velocidade de propagação sonora estimada por ondas de ultrassom acima de 5300 m/s.

Uma análise mais sofisticada [30, 53] permite estabelecer um “índice de desempenho” (*Performance Index - PI*) para as madeiras usadas em arcos de instrumentos de cordas através da eq. (1), onde ρ é a densidade volumétrica da madeira. Para o material de confecção do arco, duas destacadas características são a densidade e a resistência à flexão, a qual está diretamente ligada ao módulo de elasticidade da madeira ou material utilizado. A massa da vareta e a resistência à flexão se acoplam pois, a massa depende do conjunto de espessuras da vareta, as quais estão intrinsecamente ligadas a resistência à flexão. Quanto mais fino for um arco, menos massa ele terá e

menos resistente à flexão ele será. Como alterações nas espessuras interferem ao mesmo tempo na massa e na resistência do arco - e a partir dessa relação - é possível inferir que dentro de uma faixa considerada adequada de peso (58 g a 62 g) deve haver também faixas de densidade e de módulo de elasticidade ótimas que deveriam ser procuradas nas madeiras para varetas de arco. Desta forma, o índice de desempenho serve para estimar o potencial da madeira a partir da relação entre essas propriedades, salientando que este pode ser obtido por método não destrutivo, antes mesmo da uma madeira ser destinada à construção de um arco.

Para a sua determinação, o material precisa estar nas mesmas condições de umidade e temperatura, para que possam ser devidamente obtidos os valores da densidade ρ e do módulo de elasticidade MOE . A sugestão dos autores é de que a madeira deveria estar dentro da faixa $1.000 \text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 1.100 \text{ kg/m}^3$. Já os valores recomendados para o MOE são acima de 17.650 MPa, segundo Alves *et al.* [52]. Estando ρ acima do valor recomendado, a vareta pode ter que ser afinada para diminuir a massa e conseqüentemente perderá resistência. E no caso de ρ estar abaixo da faixa sugerida, apresentando alta resistência à flexão, a madeira pode ter que ser deixada com mais massa, resultando em firmeza excessiva. Com esses dados obtêm-se um índice que permite estabelecer um ordenamento entre o material analisado, classificando-o hierarquicamente, em termos de provável qualidade, aumentando as chances de se produzir um arco com propriedades e características equilibradas. Os valores do índice encontram-se ao redor de 0,1, sendo que quanto maior o índice, maior o potencial da madeira. É comum a venda de madeiras para arcos com valores que variam em função da velocidade de propagação do som, sendo o valor de venda proporcional a velocidade mensurada. Ao se adicionar ao cálculo de PI a densidade do material, aumenta-se a precisão na classificação do potencial de qualidade da madeira para arcos, destacando a importância deste índice.

$$PI = \frac{\sqrt{MOE}}{\rho} \tag{1}$$

Partindo da parte cilíndrica ou prismática do arco, o diâmetro da vareta decresce de aproximadamente 8,0 mm para 5,0 mm imediatamente antes da cabeça do arco. Supondo que essa porção seja dividida em 10 pontos, o diâmetro decai 0,3 mm por segmento. Saint George [33], aponta que se expressado matematicamente, o perfil das espessuras do arco é representado por uma curva onde o eixo das ordenadas, representando as espessuras, aumenta em progressão aritmética enquanto o eixo das abscissas, representando as distâncias entre as espessuras, aumenta em progressão geométrica. Essa variação logarítmica do diâmetro d da vareta do arco já havia sido observada anteriormente pelo luthier francês Jean Baptiste Vuillaume (1798-1875) e, pode ser expressa, segundo Ablitzer *et al.* [54], por

$$d(x) = d_0 \left[1 + \epsilon \ln \left(\frac{x_\infty - x}{x_\infty} \right) \right], \tag{2}$$

onde os parâmetros da eq. (2) são $d_0=8,77 \text{ mm}$, $\epsilon=0,255$ e $x_\infty=825 \text{ mm}$. Nessa descrição, a porção inicial de 110 mm comprimento, com seção transversal constante, não é considerada e, a função é satisfatória até a posição $x=650 \text{ mm}$, depois dessa posição, o diâmetro previsto é menor que o real, conforme mostra a figura 6. Dada a forma diferenciada da ponta, não é possível atribuir um diâmetro a mesma. A curvatura da vareta do arco depende da tensão aplicada na crina, de forma que a discussão de forma matematizada envolveria descrever a curva em função da posição, parametrizada com a tensão aplicada na crina.

Materiais além de madeira já foram utilizados como tubos de aço, alumínio, fibra de vidro e fibra de carbono por exemplo, [4, 33, 34]. Em estudo realizado por Caussé *et al.* [55], músicos foram convidados a testar vários arcos de violino feitos em fibra de carbono e, a partir de um arco de pau-brasil, eles expressaram dissimilaridades entre os arcos. O resultados indicaram que os feitos de material sintético se distanciam na avaliação dos músicos em critérios mais subjetivos como o tipo de som produzido pelo arco e, apesar de serem tecnicamente eficientes, não foi possível associar propriedades físicas ou mecânicas às preferências dos músicos neste estudo.

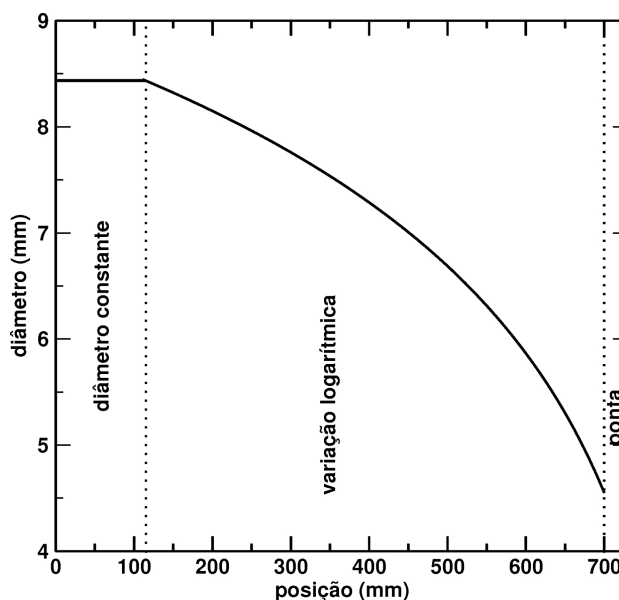


Figura 6: Variação do diâmetro da vareta do arco de violino segundo Ablitzer [54] *et al.*, a qual é satisfatória até aproximadamente a posição 650 mm, a partir deste ponto, o diâmetro previsto é menor que os 5mm que geralmente se verificam nos arcos. A origem é tomada como sendo a extremidade oposta a ponta, sem considerar o parafuso, resultando em uma vareta de 723 mm.

3.2. Caracterização e propriedades físicas

O arco de violino começa a ser caracterizado pela identificação do archetier que o produziu, informação que se encontra estampada na vareta, numa região próxima ao talão, entre o couro e o parafuso. Sendo possível, deve-se obter a informação de quando aquele arco específico foi produzido [13]. A coloração aparente do arco também advém da identificação visual e está sujeita a subjetividade, mas é uma característica estética relevante. Convém observar que a coloração pode ter sua origem em um processo de tingimento e, não representar a real tonalidade da madeira utilizada [32]. A identificação do material utilizado na confecção da vareta já traz informações iniciais sobre o arco, que no caso de ser de fibra de carbono é de fácil identificação. No caso de uma vareta de madeira, pode ser conveniente uma análise mais aprofundada para se obter a correta identificação, a qual não necessariamente demanda ferramental complexo [56]. Salienta-se que na região das *mortasas* geralmente a madeira não recebe nenhum tratamento como tingimento ou vernizamento, expondo as suas características naturais.

Com a utilização de uma balança de precisão, obtém-se a massa m do arco completo, a qual deve estar compreendida entre 60 ± 2 g, sendo que violinistas podem considerar um arco com massa de 58 g como sendo muito “leve” e outro com 62 g, muito “pesado”. Para o conjunto de características geométricas do arco, inicia-se com a identificação visual do perfil da seção transversal da vareta, a qual pode ser circular ou octogonal e, na sequência, com a ajuda de um paquímetro, obtém-se o valor do diâmetro máximo da vareta d_{max} . O comprimento ℓ da vareta, por definição, deve ser medido entre a extremidade da ponta e a extremidade do talão sem a presença do parafuso conforme demonstrado na figura 7 quadro superior. Da mesma forma, obtém-se o ponto x onde ocorre a maior deflexão da vareta sem carga aplicada e o valor y_0 entre esse ponto e a linha que une a ponta à extremidade oposta do arco.

A posição s do centro de massa do arco do arco completo pode ser determinada com a ajuda de um pequeno sólido de seção triangular, como um escalímetro, fazendo com que este fique equilibrado conforme a figura 7 quadro inferior. Embora a medida seja com o arco completo, toma-se por referência para a posição do centro de massa a extremidade da vareta [13] sem considerar o botão⁷. Também é definido raio do centro de massa, o qual é medido a partir⁸ do talão do arco e será utilizado para a determinação de outro parâmetro que se mostrou relevante.

⁷O botão pode ser substituído ao longo da vida útil de um arco, podendo apresentar variações em suas dimensões, o que justifica a escolha de Reder.

⁸Toma-se como referência a posição do talão sem que haja tensão aplicada nas crinas, o que traz certa imprecisão uma vez que o comprimento da crina apresenta variações principalmente com a umidade relativa do ar. Porém, convém ressaltar que o mesmo arco é utilizado com diferentes tensões na crina em situações distintas, implicando em diferentes posições do talão.

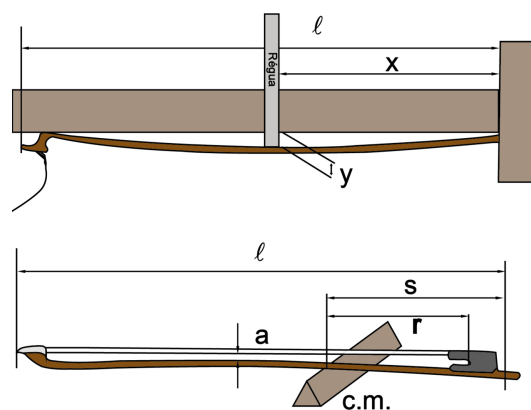


Figura 7: Superior: Esquema para medir o comprimento ℓ da vareta, na ausência do parafuso, e também do ponto x onde ocorre a maior curvatura da vareta e, para este ponto, a distância entre o mínimo e a linha que une as extremidades do arco. O comprimento da vareta, denotado por ℓ , e o ponto onde está a maior curvatura y em relação à posição x tendo como origem a extremidade da vareta oposta a ponta. Inferior: A menor distância entre a crina e o arco, denotada por a . Posição do centro de massa, denotado por s . Raio do centro de massa, denotado por r .

As propriedades elásticas da vareta do arco são um fator relevante na qualidade do mesmo e a forma mais simples de ser avaliada, sem ensaios destrutivos, consiste em avaliar a deflexão da vareta suspensa em um suporte em função da carga aplicada em seu meio geométrico, conforme mostrado na figura 8, em esquema idealizado a partir da proposta de Reder [13]. A quantidade obtida nesse ensaio é o deslocamento da vareta, em relação a posição de equilíbrio sem carga, como função da força peso aplicada por cargas L de 200 g, 400 g e 600 g.

O momento de inércia I de um objeto é sempre igual a sua massa m multiplicada pelo quadrado de um comprimento k , tal que $I = mk^2$. A esse comprimento k dá-se o nome de raio de giração do objeto com relação a determinado eixo. A interpretação física do raio de giração é que este corresponde à distância do eixo na qual devemos concentrar toda a massa para obtermos o mesmo momento de inércia do objeto [57]. O processo de obtenção do raio de giração do arco se dá conforme o esquema do painel direito da figura 8, onde o arco é suspenso pela cela do talão para que se movimente como um pêndulo. Ao seu lado, é colocado um pêndulo simples, cujo comprimento do fio é ajustado até que o arco e o pêndulo possuam mesmo período e o comprimento k do pêndulo é tomado como raio de giração do arco com relação ao eixo que passa pela cela do talão.

Dados os movimentos realizados pelo violinista ao mudar de corda e também ao realizar os diversos golpes de arco, a posição do centro de massa e do raio de giração são indicadores de como será a resposta dinâmica de um arco. Reder propõem que a razão entre o raio de giração k e o raio do centro de massa r é um parâmetro

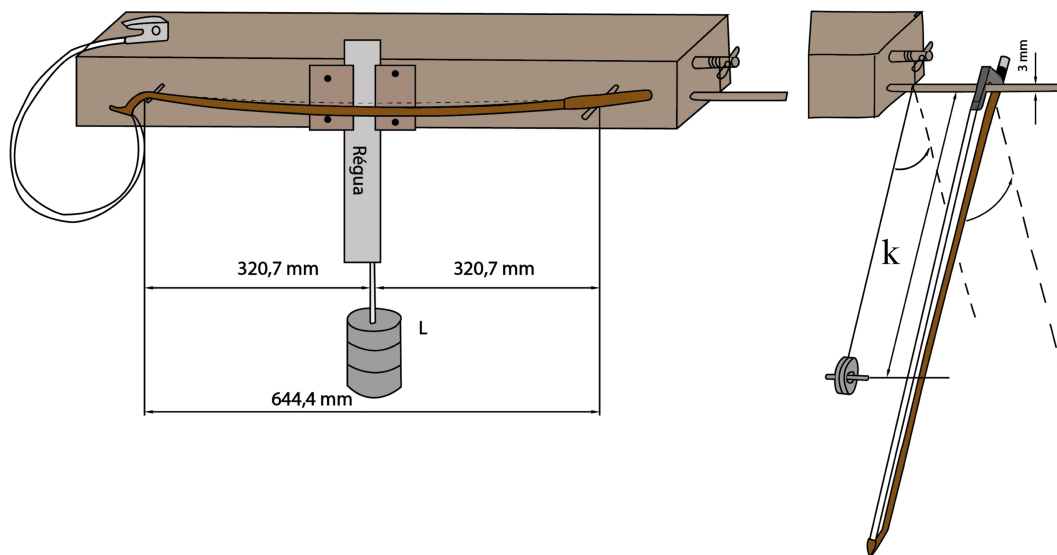


Figura 8: Esquerda: Esquema para a determinação da deflexão da vareta em função da carga aplicada. O arco fica apoiado em dois pontos, um próximo a ponta e outro próximo a região do talão e são aplicadas cargas de 200 g, 400 g e 600 g no meio geométrico entre os pontos de apoio, onde também é medida a deflexão. Direita: Esquema para a determinação do raio de gição. O arco é suspenso pelo talão em um pivô, posto a oscilar junto a um pêndulo simples, o qual tem seu comprimento ajustado até que as suas oscilações coincidam com as do arco. Esse comprimento do pêndulo corresponde ao raio de gição k do arco.

adimensional que pode indicar a qualidade esperada de um arco.

Na tabela 1 são reproduzidos resultados obtidos por Reder para quatro arcos, onde o mesmo incluiu um campo qualidade Q em escala de 1 a 5, sendo 1 a menor qualidade e 5 a maior qualidade. De maneira geral, dos dados de Reder pode-se traçar algumas características físicas gerais dos arcos de violino para além das suas características geométricas e sua massa. Iniciando com a posição do centro de massa s , este localiza-se ao redor de 24,0 mm a partir da extremidade da vareta, enquanto que o raio do centro de massa r , medido a partir da cela do talão,

localiza-se a cerca de 20,0 mm. O raio de gição k obtido conforme o método apresentado na figura 8 ficou localizado a cerca de 44,0 mm com relação a cela do talão. A razão k/r aparentemente tende à média de 2,16 para os arcos que obtiveram a maior qualidade Q . Já o arco considerado com menor qualidade apresentou razão maior que 2,20. A proposta é válida porém, convém observar a necessidade de uma maior amostragem para que se possa tomar essa razão como um (dentre outros) parâmetro confiável para a avaliação de um arco de violino e, que a subjetividade envolvida na avaliação pode conter fatores de preferências pessoais do violinista. Este grupo pretende reconstruir a proposta de Reder utilizando de recursos mais sofisticados e realizar estudos sistemáticos em arcos de violino.

Tabela 1: Compilação de dados obtidos por Reder para quatro arcos de violino. Legenda: ST - seção transversal, ME - marrom escuro, MA - marrom avermelhado, PB - pau brasil, m massa do arco completo, d maior diâmetro da vareta, ℓ comprimento da vareta, s posição do centro de massa, r raio do centro de massa, k raio de gição, Q - qualidade subjetiva atribuída aos arcos por O. Reder [13], sendo 1 a menor qualidade e 5 a maior qualidade. A discussão detalhada é apresentada no texto.

Arco	1	2	3	4
Ano	1968	1920	1920	1870
ST	⬡	⬡	⬡	⬡
Cor	ME	ME	ME	MA
Material	PB	PB	PB	PB
m (g)	64	58	53	67,5
d (mm)	8,1	8,0	8,05	8,9
ℓ (mm)	727,7	727,7	727,7	719,0
s (mm)	248	252	239	250
r (mm)	204	210	201	204
k (mm)	445	441	450	437
k/r	2,18	2,10	2,24	2,14
Q	5	4	3	5

No entanto, algumas destas propriedades podem ser obtidas de maneira bastante simples, permitindo uma primeira avaliação e observação direta de algumas características físicas dos arcos. Para a obtenção do centro de massa e do raio do centro de massa de um arco de violino, pode-se utilizar uma régua e um escalímetro em forma de prisma triangular. O escalímetro é utilizado para sustentar o arco, ajustando-se a posição deste até atingir-se o equilíbrio. Uma régua posicionada perpendicular ao escalímetro, cuja origem coincida com a cela do talão permite verificar a posição r do raio do centro de massa.

A obtenção do raio de gição pode ser feita com placa de madeira, cujas dimensões sejam da ordem de 1000 mm de comprimento, 100 mm de largura e 10 mm de espessura, junto a um pino de madeira de 150 mm de comprimento e 6 mm de diâmetro. O pino é fixado na placa de madeira, no meio geométrico da largura, a

uma distância de 70 mm de uma extremidade e, deve transpassar a placa de forma a ficar com metade do seu comprimento em cada lado da mesma. O pêndulo simples pode ser construído utilizando uma massa do tipo chumbada para pesca, de aproximadamente 100 g, com formato preferencialmente esférico ou elipsoidal, o que facilita a determinação de seu centro de massa, ponto considerado como extremidade do pêndulo para as medidas. Linha de pesca também pode ser utilizada para suspender esta massa, dada a sua resistência e facilidade de ser encontrada. Um pequeno furo da ordem de 1 mm precisa ser feito no pino de madeira para que se passe a linha que suspende a massa, formando assim o pêndulo. A placa de madeira deve ser fixa em um suporte com o seu comprimento na vertical e, para a determinação do raio de giração, suspende-se o arco, pela cela do talão, no pino, no lado oposto ao pêndulo. Ambos são colocados para oscilar com pequena amplitude e, o comprimento do pêndulo deve ser ajustado até que arco e pêndulo possuam o mesmo período. Quando ambos possuírem o mesmo período, o comprimento do pêndulo corresponde ao raio de giração k do arco.

A análise da deformação do arco em função da carga aplicada utiliza a mesma placa de madeira, a qual passa a ter dois pinos de 6 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento fixados em uma das suas laterais mais longa. Estes devem estar distantes 645 mm entre si e, serem fixos em furos justos de 20 mm de profundidade, podendo ser colados para garantir maior firmeza do conjunto quando da aplicação de carga. Agora, a placa deve ser fixada horizontalmente, o arco deve ter o talão desparafusado e, a vareta ser suspensa nos dois pinos. Aplica-se sobre o arco, na posição central entre os dois pinos, cargas de 2 N, 4 N e 6 N, as quais podem ser obtidas com a utilização de um dinamômetro ou de massas como as chumbadas para pesca. Para cada carga aplicada, mede-se a deflexão y da vareta - com relação a posição sem carga y_0 - também no ponto médio entre os dois pinos. Pode-se aproximar o arco por um sistema que responda como uma mola, de maneira que para cada carga aplicada, verifique-se a deflexão e, obtenha-se a constante elástica equivalente $\kappa = \frac{F}{y}$.

Este procedimento foi realizado para os arcos construídos por Fomin [32], usando madeira de ipê na vareta, os quais estão acessíveis aos autores, visando obter o valor médio de κ , o qual é um indicador das propriedades elásticas da vareta de um arco. As deflexões foram da ordem de 2 mm a 3 mm para carga de 2 N, 4 mm a 6 mm para 4 N e, entre 7 mm e 9 mm quando aplicados 6 N. Também foram obtidos os raio do centro de massa r , o raio de giração k , dados que são apresentados na tabela 2 junto à outras informações. Pode-se observar que a razão k/r foi menor para os arcos classificados como os três mais preferidos e, maior para os classificados nas duas últimas opções de preferência, indicando acordo qualitativo entre a avaliação pelos instrumentistas e a classificação por esta razão. Com relação a constante elás-

Tabela 2: Compilação de dados obtidos na versão simplificada do experimento de Reder para os arcos construídos em madeira de ipê por Fomin [32]. Legenda: ST - seção transversal, ME - marrom escuro, MA - marrom avermelhado, IP - ipê, m massa do arco completo, d maior diâmetro da vareta, ℓ comprimento da vareta, r raio do centro de massa, k raio de giração, κ constante elástica equivalente, \mathcal{P} é a ordem de preferência em teste subjetivo realizado por Fomin com músicos profissionais, sendo 1º o mais preferido e 5º o menos preferido. A discussão detalhada é apresentada no texto.

Arco	A	B	C	D	E
Ano	2016	2016	2016	2016	2016
ST	○	○	⊙	○	○
Cor	MA	ME	MA	ME	ME
Material	IP	IP	IP	IP	IP
m (g)	61,6	60,6	59,4	60,9	59,6
d (mm)	8,20	8,30	8,00	8,35	8,15
ℓ (mm)	727	727	727	727	727
r (mm)	194	192	197	194	196
k (mm)	447	439	447	450	442
k/r	2,30	2,28	2,26	2,31	2,25
κ (N/m)	602	697	815	774	716
\mathcal{P}	5º	2º	1º	4º	3º

tica κ , observou-se que o arco **C**, que foi o mais preferido, apresentou um maior valor de κ e, o arco **A** - menos preferido - apresentou constante elástica com o menor valor, indicando novamente um acordo qualitativo com o resultado de preferência dos violinistas.

De maneira geral a razão k/r e a constante elástica κ obtidas para os cinco arcos apresentaram concordância qualitativa com os resultados da avaliação pelos violinistas [32], mostrando-se válidos como parâmetros auxiliares na determinação da qualidade de um arco, da mesma maneira que o índice PI é para a seleção da madeira para a vareta.

3.3. O tocar do ponto de vista da Física

Durante a utilização do arco, o violinista percebe uma variação dinâmica do peso que precisa sustentar com a mão direita. Szende e Nemessuri [58] apontam que o violinista percebe um peso⁹ entre 0,17 N, quando o arco está com a crina próxima à ponta apoiada sobre as cordas, até cerca de 2,65 N quando o contato com as cordas passa para a região próxima ao talão. Apesar de não demandar esforço muscular considerável, a movimentação do arco exige um trabalho contínuo para que se obtenha uma força controlada, seja ela constante ou variável, das crinas sobre a corda.

Outro parâmetro relevante - que na prática acaba sendo dependente da força aplicada pela crina na corda e vice versa - é a velocidade imposta pelo instrumentista ao arco, medida em relação a corda, que possui uma gama de variação estimada entre 5 cm/s e 100 cm/s [59]. O início da produção de som implica que a força aplicada para

⁹No sentido de força que precisa ser aplicada para a sustentação dinâmica do arco e não no sentido convencional da palavra.

movimentar o arco supere a força de atrito estático entre a crina e a corda, sendo que o coeficiente de atrito estático μ_s entre crina e corda é da ordem de 0,8 enquanto que o dinâmico passa a ser $\mu_d=0,3$ [60]. Vencer o atrito estático para que o arco entre no regime de atrito dinâmico é uma das dificuldades do tocar violino, a qual, em particular para iniciantes, leva a produção de um som arranhado característico [2]. Essa situação ocorre quando a força aplicada pela crina sobre a corda é excessiva e a corda segue agarrada à crina, não permitindo a estabilização do movimento periódico [61]. Considerando, por exemplo, que a força F aplicada pela crina na corda seja de 1 N (peso do arco acrescido de pequena força aplicada), a força de atrito estático é $F_s=\mu_s F=0,8$ N, a qual passa para apenas $F_d=\mu_d F=0,3$ N quando no regime de atrito dinâmico.

Para a produção de som contínuo, usando todo o arco, com nível de intensidade sonora mediana (*mezzoforte*), a força exercida pela crina sobre a corda precisa ser da ordem de 0,6 N, independente de onde esteja o ponto de contato entre crina e corda. No caso de sons intensos (*forte*) tem-se da ordem de 1,2 N e, para sons pouco intensos (*piano*) 0,3 N [58]. A tensão aplicada pelo talão à crina do arco também é um parâmetro utilizado pelos instrumentistas, permitindo obter resultados distintos, na manipulação do arco. Os valores característicos de tensão variam de 30 N até 60 N, quando a crina é tensionada no seu limite superior de utilização [62].

A força aplicada pela mão direita para o devido controle e sustentação do arco deve mudar constantemente, assim como muda o fulcro da alavanca formada pelo arco com o ponto de contato na corda e a mão direita do violinista. O seu controle ocorre essencialmente de duas maneiras, a primeira sendo ação combinada do polegar e do indicador, que infligem uma força da crina sobre as cordas maior que o peso do arco e a ação combinada do polegar e do dedo mínimo tal que a força resultante passa a ser menor que o peso do arco. Os demais dedos, médio e anelar possuem papéis no equilíbrio e condução do arco. Convém observar que esta análise não incluiu que o arco muda de cordas de maneira continuada durante a execução musical, o que implica em uma mudança no plano formado pelas duas extremidades da corda e um ponto qualquer da crina, o que aumenta a complexidade do uso do arco, uma vez que cada corda possui respostas diferentes às arcadas e golpes de arco. Assim, para que a execução musical por parte do violinista seja facilitada, é preciso que o arco possua boa distribuição de massa que contribua não só com a translação do arco sobre a corda, mas também na mudança de cordas e nos demais movimentos envolvidos nas arcadas.

A análise feita até agora considera o arco como um sistema sem graus de liberdade internos. Porém, o mesmo possui modos normais de vibração [63], que são excitados durante o seu uso e, afetam a qualidade do som obtido e/ou a maior ou menor facilidade de manipulação do arco por parte do violinista. Gough [27] avaliou o espectro de

modos de vibração do arco de violino em um estudo combinando análise computacional via método dos elementos finitos com medidas diretas no arco. Esses modos são afetados pela tensão aplicada nas cordas e, podem ser divididos em dois grupos: movimento da vareta ocorrendo no plano longitudinal que passa pelo meio da vareta e forma um ângulo reto com o plano formado pela crina; movimento da vareta ocorrendo fora do plano longitudinal que passa pelo meio da vareta e um ângulo reto com o plano formado pela crina. Os primeiros modos no plano, para o arco completo, apresentaram frequências de 50,7 Hz, 141 Hz, 280 Hz, 468 Hz, 698 Hz, 979 Hz e 1288 Hz. Já os sete primeiros modos fora do plano, na mesma condição, possuem frequências de 56 Hz, 142 Hz, 296 Hz, 468 Hz, 710 Hz, 901 Hz e 1400 Hz. Tais valores variam entre arcos diferentes mas, de maneira geral, as frequências características permanecem no entorno destas.

4. Conclusões

O arco de violino foi apresentado e descrito a partir do ponto de vista de que é um objeto musical, que forma um conjunto com o violino, mantendo relativa independência. Uma ampla descrição histórica das modificações que ocorreram em sua forma foi realizada, mostrando como essas mudanças ocorreram em função das demandas musicais de cada período. Os principais materiais utilizados na confecção da vareta e das demais partes do arco, assim como as principais partes do arco, foram apresentados de maneira sintética. Um conjunto de propriedades geométricas e físicas que caracterizam o arco do ponto de vista mecânico e, eventualmente, são determinantes das qualidades do arco, foram apresentadas, fazendo a ligação entre conceitos da Física e seu ensino através do arco de violino.

5. Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal do Paraná pelo apoio à realização deste trabalho, no âmbito do Programa Institucional de Iniciação Científica, no que tange a contribuição de LGS sob orientação de TCF. Também agradecemos ao Programa Pós-graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, onde IMF, sob a orientação de JLMM, SN e TCF, realizou seu mestrado sobre a utilização de madeira de ipê na confecção de varetas de arco de violino. IMF agradece a todos que de alguma maneira colaboraram com as atividades da sua dissertação. TCF, LGS e IMF agradecem ao Setor de Educação Profissional e Tecnológica da UFPR, onde desenvolveram grande parte deste trabalho.

Referências

- [1] C. Lawson, *The Cambridge Companion to The Orchestra*. (Cambridge University Press, Nova Iorque, 2003).

- [2] J. P. Donoso, A. Tannús, F. Guimarães e T. C. Freitas, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **30**, 2305 (2008).
- [3] M. I. Salles, *Arcadas e Golpes de Arco* (Thesaurus, Brasília, 1998).
- [4] J. Beament, *The violin explained components mechanism and sound* (Oxford University Press, Nova Iorque, 1997).
- [5] J. Huber, *Der Geigenmarkt: ein Führer zum Instrumentenkauf* (E. Bochinsky, Frankfurt am Main, 1995).
- [6] E. Gagnon, A. Bruneau, C. E. Hughes, L. P. Queiroz and G. P. A. Lewis, *Phyto Keys* **71**, 1 (2016).
- [7] IBAMA. *Portaria IBAMA N. 06-N, de 15 de janeiro de 1992*. Brasília, 1992. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/179/_arquivos/179_05122008033646.pdf
- [8] MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Portaria MMA N° 443, de 17 de dezembro de 2014*. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/static/pdf/portaria_mma_443_2014.pdf. 2014. Brasília, Diário Oficial da União.
- [9] MÉXICO, in Fourteenth meeting of the Conference of the Parties, Haia, 2007 (CITES, Haia, 2017), p.4.
- [10] M. Raposo, *Pernambuco Wood - CITES certified Pernambuco wood for bows of the violin family*. 2007. Disponível em: <http://www.pernambucowood.com> Acesso em: 12 outubro de 2017.
- [11] Walter Paulus GmbH. *Price List*. (Walter Paulus GmbH, Hottenbach, 2006), 25 p.
- [12] C. M. Hutchin, *J. Acoust. Soc. Am.* **73**, 1421 (1983).
- [13] O. Reder, *J. Catgut Acoust. Soc.* **13**, 21 (1970).
- [14] A. G. Askenfelt, *Proceedings of SMAC* **83**, **46**, 123, (1985).
- [15] A. G. Askenfelt, *J. Acoust. Soc. Am.* **80**, 1007 (1986).
- [16] A. G. Askenfelt, *J. Acoust. Soc. Am.* **86**, 503 (1989).
- [17] A. G. Askenfelt, *Proceedings of SMAC* **93**, **79**, 341, (1994).
- [18] R. L. Viana, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **33**, 3304 (2011).
- [19] N. H. Fletcher and T. D. Rossing, *The physics of musical instruments* (Springer-Verlag, Nova Iorque, 1991).
- [20] L. Henrique, *Acústica musical* (Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2011).
- [21] M. E. McIntyre and J. Woodhouse, *Interdiscipl. Sci. Rev.* **3**, 157 (1978).
- [22] M. E. McIntyre and J. Woodhouse, *Acustica* **43**, 93 (1979).
- [23] M. E. McIntyre and J. Woodhouse, *Acustica* **49**, 13 (1981).
- [24] M. E. McIntyre, R. T. Schumacher and J. Woodhouse, *J. Acoust. Soc. Am.* **74**, 1325 (1983).
- [25] L. Cremer. *The Physics of the violin* (MIT Press, Cambridge, 1984).
- [26] J. Woodhouse, R. T. Schumacher and S. Garrof, *J. Acoust. Soc. Am.* **108**, 357 (2000).
- [27] C. Gough, *J. Acoust. Soc. Am.* **130**, 4105 (2011).
- [28] BRASIL. *Lei nº 6.607, 7 de dezembro de 1978*. Brasília, 1978. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1970-1979/lei-6607-7-dezembro-1978-366455-publicacaooriginal-1-pl.html>
- [29] V. Angyalossy, E. Amano and E. S. Alves, *Acta Botânica Brasileira* **19**, 819 (2005).
- [30] E. L. Longui, T. Yojo, D. R. Lombardi and E. S. Alves, *Iawa Journal* **31**, 149 (2010).
- [31] E. L. Longui, I. Brémaud, F. G. da S. Júnior, D. R. Lombardi and E. S. Alves, *Iawa Journal* **33**, 141 (2012).
- [32] I. M. Fomin. A madeira de ipê (*Handroanthus spp.*) para arcos de violino: propriedades e avaliação de desempenho técnico. Dissertação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- [33] H. Saint-George, *The bow, its history, manufacture and use* (Projeto Gutenberg, Londres, 1922).
- [34] W. Kolneder, *The Amadeus Book of the Violin; Construction, History and Music*, (Amadeus Press, Portland, 1998.)
- [35] D. D. Boyden, *The History of violin playing from its origins to 1761*, (Oxford University Press, Nova Iorque, 2002).
- [36] F. Fétis, *Notice of Anthony Stadivari, The Celebrated Violin-Maker Known By The Name of Stradivarius* (Robert Cocks, Londres, 1864).
- [37] M. Mersenne, *Harmonie Universalle* (Sebastien Cramoisy, Paris, 1636).
- [38] M. Woldemar, *Grande Méthode de Violon* (Cochet, Paris, 1798)
- [39] P. Baillot, *L'art du violon* (Depôt Central de Musique, Paris, 1834).
- [40] L. Mozart, *Versuch einer grundlicher Violinschule* (Johann Jacob Lotter, Augsburg, 1756).
- [41] H. A. Dourado, *O arco dos instrumentos de corda*. (Edicon, São Paulo, 1999), 2ª. ed.
- [42] R. Stowell, *Violin Technique and Performance Practice in the Late Eighteenth and Early Nineteenth Centuries* (Cambridge University Press, Cambridge, 1990).
- [43] J. Bernardino, *O Pau-brasil na História Nacional* (Companhia Editora Nacional, São Paulo, 1939).
- [44] *The Tourte Bow*. Disponível em: <https://youtu.be/aEu06-zzyDI>. Acesso em: 01 mar. 2018.
- [45] B. Rolland, *The Strad* **114**, 614 (2003).
- [46] E. Lehmann, *Dictionnaire de la lutherie et de l'archèterie* (Les Amis de la Musique, Spa, 2006).
- [47] L. R. Schimleck, C. Espey, C. R. Mora, R. Evans, A. Taylor and G. Muñoz, *Holzforschung*, **63**, 457 (2009).
- [48] B. Planta, *Elemente zur Wahl eines Geigen-bogens* (Verlag das Musikinstrument, Frankfurt am Main, 1980).
- [49] P. E. R. Carvalho, *Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira* (Embrapa-CNPQ, Colombo, 1994).
- [50] <http://www.fcav.unesp.br/#!//extensao/pau-brasil/>. Acesso em: 15 out. 2016.
- [51] E. L. Longui, T. Yojo, D. R. Lombardi and E. S. Alves, *Iawa Journal* **31**, 149 (2010).
- [52] E. S. Alves, E. L. Longui and E. Amano, *Iawa Journal* **29**, 323 (2008).
- [53] U. G. K. Wegst, *Am. J. Botany* **93**, 1439 (2006).
- [54] F. Ablitzer, J.-P. Dalmont and N. Dauchez. *HAL id : hal-00586680*, 2010.
- [55] R. Caussé, J. Maigret, C. Dichtel and J. Bensoam, in: *Study of violin bow quality. International Symposium on Musical Acoustics*. (Perugia, Itália, 2001).
- [56] R. B. Hoadley, *Identifying wood: accurate results with simple tools* (The Taunton Press, Newtown, 1990).
- [57] H. M. Nussenzeig, *Curso de física básica - 1 Mecânica* (Edgard Blücher, São Paulo, 2013), 5ª. ed.

- [58] O. Szende and M. Nemessuri, *The physiology of violin playing* (Collet's, Londres, 1971).
- [59] E. Schoonderwalt. Mechanics and acoustics of violin bowing: Freedom, constraints and control in performance. Tese de Doutorado, Kungliga Tekniska Högskolan, 2009.
- [60] R. Pitteroff and J. Woodhouse, *Acustica* **84**, 744 (1998).
- [61] H. Massmann and R. Ferrer Instrumentos Musicales: Artesanía y Ciencia (Dolmen, Chile, 1993).
- [62] J. Regh, *J. Violin Soc. Am.: Proc. Summer* **23**, 142 (2011).
- [63] R. Schumacher, *Catgut Acoust. Soc. Newsl.* **24**, 5 (1975).