



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DIEGO SANTOS DE OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO DE CORDAS DE GUITARRAS ELÉTRICAS:
COMPORTAMENTO MECÂNICO, CORROSIVO E ACÚSTICO RELACIONADOS ÀS
CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS E QUÍMICAS

BELO HORIZONTE

2014

DIEGO SANTOS DE OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO DE CORDAS DE GUITARRAS ELÉTRICAS:
COMPORTAMENTO MECÂNICO, CORROSIVO E ACÚSTICO RELACIONADOS ÀS
CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS E QUÍMICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia de
Materiais.

Orientador: Nilton da Silva Maia

Coorientadora: Rachel Mary Osthues

BELO HORIZONTE

2014

DIEGO SANTOS DE OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO DE CORDAS DE GUITARRAS ELÉTRICAS:
COMPORTAMENTO MECÂNICO, CORROSIVO E ACÚSTICO RELACIONADOS ÀS
CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS E QUÍMICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia de
Materiais.

Aprovado em 26/02/2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. Nilton da Silva Maia

Prof. Rachel Mary Osthues

Prof. Ivan José de Santana

Prof. Wellington Lopes

Prof. Emerson Pedroso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
2	OBJETIVOS	7
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1	Som	8
3.1.1	Características do som.....	9
3.1.2	Decibel.....	9
3.2	Análise de um som musical	10
3.2.1	Períodos transientes e de estabilidade	11
3.2.2	Som puro, som complexo, harmônicos e sub-harmônicos	12
3.2.3	Espaços de representação	13
3.3	Propriedades Acústicas	15
3.4	Cordas: amortecimento, sustain e ataque	18
3.5	A guitarra elétrica	20
3.5.1	Técnicas: band e vibrato	21
3.6	Ciência dos materiais e acústica musical	22
3.6.1	Cordas de guitarra	23
3.6.2	Corrosão.....	26
4	METODOLOGIA	28
4.1	Seleção das amostras	28
4.2	Caracterização	28
4.2.1	Análise dimensional	29
4.2.2	Comportamento mecânico	30
4.2.3	Ensaio de corrosão	31
4.3.4	Análise microestrutural	32
4.3.5	Análise química.....	33
4.3.6	Análise acústica.....	34
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	Análise dimensional	37
5.2	Comportamento mecânico	37
5.3	Ensaio de corrosão	41
5.4	Análise microestrutural	41
5.5	Análise química	44

5.6	Análise acústica	50
6	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS	56

RESUMO

Perante a ciência dos materiais e a acústica musical, constata-se a indisponibilidade de um aporte satisfatório em quantidade e em conteúdo de dados ou bibliografias que correlacionem as propriedades acústicas de cordas de instrumentos musicais às propriedades dos materiais utilizados na sua produção. A determinação detalhada da referida correlação pode viabilizar e tornar mais eficaz a intervenção no processamento de cordas acústicas possibilitando que seu desempenho seja otimizado. Assim, esse trabalho teve como objetivo caracterizar por diferentes parâmetros (módulo de elasticidade, microestrutura, diâmetro médio, composição química qualitativa, tempo de decaimento e intensidade dos parciais harmônicos) cordas de diferentes marcas comerciais de guitarras elétricas, investigando a existência de possíveis correlações entre suas propriedades. Foram pré-selecionadas quatro amostras de diferentes marcas e caracterizadas por ensaios de tração, corrosão, EDS, FTIR, metalografia e análises acústicas devidamente fundamentadas e desenvolvidas. Foi possível caracterizar as quatro amostras selecionadas, sendo observada uma relação entre o tempo de decaimento e o módulo de elasticidade para as mesmas. Além disso, uma das amostras que apresentou o menor e mais discrepante valor para o módulo de elasticidade teve harmônicos menos intensos na faixa de médias-frequências que estão relacionadas à inteligibilidade do som. Espera-se dar continuidade a este estudo, já que os resultados aqui apresentados podem ser considerados como referência para o desenvolvimento de uma metodologia que possibilite a produção de resultados com menores desvios e menos fontes de incerteza utilizando-se amostras com características mais distintas, para conduzir a constatação de fato de uma correlação entre as propriedades acústicas e as propriedades intrínsecas dos materiais utilizados na produção de cordas para instrumentos musicais.

Palavras-chave: Cordas. Módulo de elasticidade. Corrosão. Decaimento. Harmônicos.

ABSTRACT

Before the materials science and musical acoustics, it appears the unavailability of a satisfactory supply in quantity and content of data or bibliographies correlating the acoustic properties of stringed musical material properties used in its production instruments. The detailed determination of that correlation can facilitate and make more effective intervention in the processing of acoustic strings enabling their performance is optimized. Thus, this study aimed to characterize by different parameters (elastic modulus, microstructure, mean diameter, qualitative chemical composition, decay time and intensity of the partial harmonics) strings of different brands of electric guitars, investigating the existence of possible correlations between their properties. Were pre-selected four samples of different brands and characterized by tests tensile, corrosion, EDS, FTIR, metallography and duly substantiated and developed acoustic analyzes. It was possible to characterize four selected samples was observed a relationship between the decay time of the elasticity module for the same. In addition, a sample that showed the lowest and most disparate value for the modulus of elasticity was less intense harmonics in the range of medium frequencies, which are related to the intelligibility of sound. It is expected to continue this study, since the results presented here can be considered as reference for the development of a method that allows to produce results with smaller deviations and less uncertainty sources using more samples with different characteristics, for lead to finding of fact a correlation between acoustic properties and the intrinsic properties of the materials used in the production of strings for musical instruments.

Key words: Strings. Modulus elasticity. Corrosion. Decay. Harmonics.

1 INTRODUÇÃO

Arte e ciência são dois conceitos que em determinados períodos tiveram um caráter de oposição, e em outros se complementaram como se pertencessem a um mesmo corpo de conhecimento. Conceitos como harmonia, proporção e simetria estão presentes em muitas obras de arte às quais se associa a beleza. Durante o Renascimento, Leonardo da Vinci, Alberti, Fra Luca Pacioli e outros, consideravam o conhecimento como condição prévia necessária para qualquer tipo de ação, inclusive o da criação artística. A noção de proporção aritmética era tida como regra essencial na música e na arquitetura, por exemplo, havendo também perfeita consciência de que a anatomia do corpo (aparelho auditivo) inclui essa harmonia de proporções. Na obra em latim *De Re Oedificatoria*, publicada em Florença em 1485, Alberti expõe as condições necessárias à criação do belo, e defende que os intervalos musicais agradáveis ao ouvido - 8ª, 5ª e 4ª - obtidos por divisão de uma corda ($1/2$, $2/3$, $3/4$), representam proporções que servem igualmente à arquitetura e às artes plásticas (HENRIQUE, 2007).

Como consequência dessas e de diversas outras correlações entre arte e ciência originou-se a acústica musical, uma área *sui generis*¹ relativamente recente, que estuda cientificamente todos os aspectos relacionados com a produção, propagação e recepção do som para fins essencialmente musicais (HENRIQUE, 2007).

Henrique (2007) relata que acerca da produção do som, compreender fisicamente o funcionamento dos instrumentos musicais é fundamental para intervir no sentido de aperfeiçoar ou modificar a afinação, corrigir defeitos e pontos críticos, proporcionar ergonomia na execução e aplicar novos materiais.

A tecnologia eletrônica tem sido extremamente utilizada no campo da música. Sinais sonoros podem ser convertidos em seus análogos elétricos por meio da utilização de transdutores como microfones e captadores. Essa conversão permite que os sinais sonoros possam ser transmitidos, registrados, processados, analisados, sintetizados, amplificados e reproduzidos (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2002).

¹ Termo utilizado por Henrique (2007) devido ao fato da acústica musical relacionar arte e ciência.

No ano de 2008, a Associação Brasileira da Música (ABEMÚSICA, 2008) encomendou uma pesquisa ao Instituto Datafolha para conhecer o perfil e os principais hábitos dos que tocam ou já tocaram algum instrumento musical. A pesquisa revelou que na época 13% dos entrevistados tocavam algum instrumento musical e aproximadamente 18% tinham a intenção de tocar nos próximos 12 meses onde o violão era o instrumento mais tocado e o que representava junto com a guitarra menores índices de desistência. Anualmente, com a finalidade de gerar base de dados e estudos estratégicos pesquisas de mercado para instrumentos musicais são realizadas em nível nacional (MÚSICA & MERCADO, 2011) e internacional (MUSIC TRADES, 2011). Um estudo feito por analistas da TechNavio, uma empresa especializada em estudos e tendências de mercado, prevê que o setor de instrumentos musicais irá crescer cerca de 2,62% ao ano até 2016 (MÚSICA & MERCADO, 2014)

Acerca do campo de pesquisa de instrumentos musicais, segundo Fuks² (2009), “há muito espaço ainda para pesquisas em materiais, com vista a substituir os materiais tradicionais por materiais de novas tecnologias”.

O processamento de materiais metálicos pode envolver diversas etapas relacionadas a diferentes processos, como beneficiamento/refino, formação e ajuste da composição das ligas, operações de conformação mecânica, tratamentos térmicos entre outros. As propriedades do produto acabado são consequentes da forma como é realizado esse processamento e da manipulação de seus respectivos parâmetros de controle. Assim é possível intervir de diversas e diferentes maneiras com a finalidade de obter propriedades específicas para um dado material. Porém, no caso de cordas utilizadas em instrumentos musicais a indisponibilidade de um aporte satisfatório em quantidade e em conteúdo de dados ou bibliografias que correlacionem as propriedades acústicas dessas cordas às propriedades dos materiais utilizados na sua produção é constatada. A determinação detalhada da referida correlação pode viabilizar e tornar mais eficaz a intervenção no processamento de cordas acústicas de materiais metálicos e possibilitar que seu desempenho seja otimizado.

² Professor Doutor Leonardo Fuks da Escola de Música da UFRJ, especialista e um dos mais conceituados pesquisadores brasileiros no campo da acústica musical.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivos:

1. Caracterizar cordas de diferentes marcas comerciais de guitarras elétricas, por meio dos seguintes parâmetros:
 - Módulo de elasticidade;
 - Microestrutura;
 - Diâmetro médio;
 - Composição química qualitativa;
 - Tempo de decaimento;
 - Intensidade dos parciais harmônicos.
2. Investigar a existência de correlações entre os parâmetros acústicos determinados (tempo de decaimento e intensidade dos parciais harmônicos) e características intrínsecas do material.

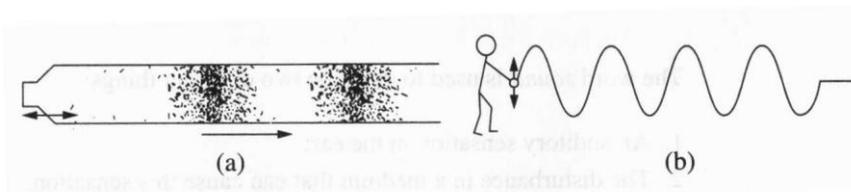
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Som

Segundo Rossing e colaboradores (2002) a palavra som pode ser usada para descrever uma sensação auditiva no ouvido ou um distúrbio em um meio que pode causar essa sensação. O distúrbio que proporciona essa sensação é caracterizado por movimentos periódicos de vibração ou oscilação de átomos, moléculas ou partículas de um meio material sólido ou fluido. A origem dessa perturbação pode ser a vibração de corpos como cordas ou membranas ou a variação de um fluxo de ar (no caso dos instrumentos de sopro), por exemplo. O meio onde esse fenômeno é observado irá funcionar como um suporte para a perturbação inicial provocada pela vibração da fonte sonora se propagar, o que possibilita que o movimento mencionado possa ser detectado por uma delicada membrana (tímpano) presente no ouvido humano, que passa a vibrar em uma determinada frequência e através de uma codificação de sinais transmite impulsos nervosos ao cérebro interpretados e traduzidos em sensações auditivas. A figura 1 ilustra os referidos fenômenos.

O som pode ser representado fisicamente através de ondas sonoras (ondas mecânicas longitudinais). Como o meio em que se manifestam a maioria dos fenômenos auditivos habitualmente é o ar, as ondas sonoras que nele se propagam designam-se ondas de pressão ou ondas de compressão/rarefação (HENRIQUE, 2007).

Figura 1 – Representações físicas do som.



(a) Movimento longitudinal das moléculas de ar em uma onda sonora gerada por um alto-falante, onde é possível perceber nitidamente as regiões de compressão e de rarefação; (b) movimento de uma onda transversal que se propaga em uma corda, que ao apresentar esse tipo de comportamento pode ser considerada uma fonte sonora.

Fonte: ROSSING; MOORE; WHEELER, 2002.

3.1.1 Características do som

Henrique (2007), afirma que as principais características do som são tradicionalmente classificadas em altura, intensidade e timbre.

A intensidade sonora é o valor médio da quantidade de energia transportada pelo som, e está relacionada à amplitude de vibração da fonte sonora. Como o som propaga-se no ar através de ondas esféricas³, a intensidade sonora deve ser considerada em uma região específica do espaço e é medida em watt por metro quadrado (W m^{-2}) (HENRIQUE, 2007).

A altura do som é a característica que permite classificá-lo em agudo ou grave. Essa característica está relacionada principalmente à frequência, qualitativamente, um som de alta frequência possivelmente será um som agudo, já um som de baixa frequência espera-se ser um som grave (HENRIQUE, 2007).

O timbre é uma característica subjetiva do som que possibilita a distinção entre sons de mesma altura e intensidade, sendo uma característica do instrumento ou da fonte sonora. Os músicos usam expressões que criam determinadas analogias com outras sensações (táteis e visuais) para descrever determinados timbres como: sons quentes, aveludados, metálicos, escuros, brilhantes, doces, etc (HENRIQUE, 2007).

3.1.2 Decibel

As ondas sonoras podem ser representadas e analisadas graficamente conforme a variação de alguns de seus parâmetros ao longo de sua propagação, como frequência e intensidade, por exemplo. É usual a aplicação de escalas logarítmicas na construção desses gráficos, já que a amplitude dos valores de frequência e intensidade sensíveis ao ouvido humano é relativamente elevada, conforme apresentado na figura 2. Esse tipo de escala permite observar mais detalhadamente variações nas grandezas representadas em um gráfico. Como consequência da utilização da escala logarítmica, o decibel (dB) é usualmente utilizada para representar a intensidade (energia) sonora (HENRIQUE, 2007).

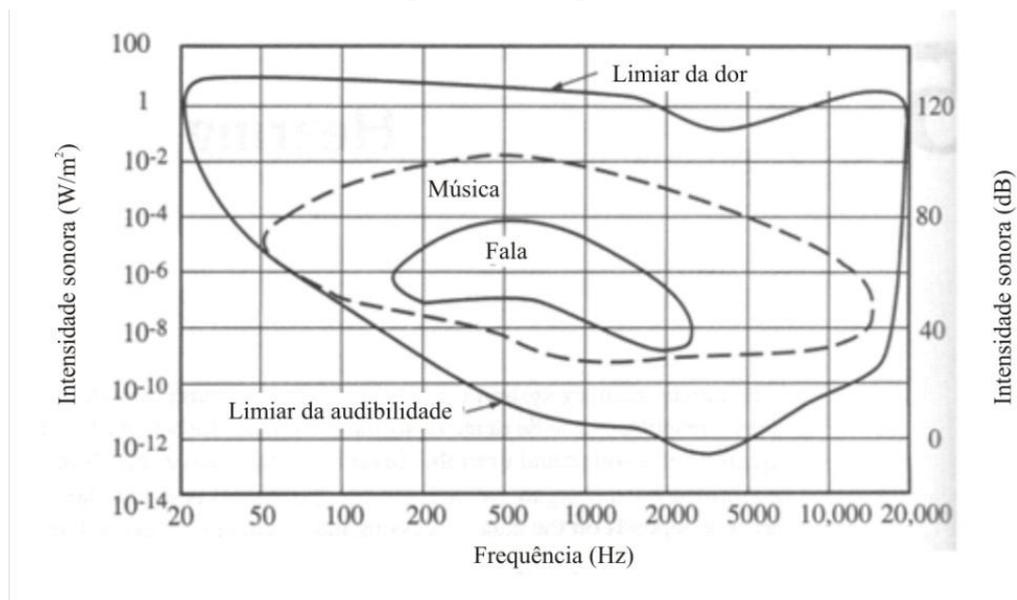
³ À grandes distâncias da fonte sonora, uma seção suficientemente pequena da frente de onda pode ser aproximada por uma superfície plana e ser considerada uma onda plana (TIPLER; MOSCA, 2009).

O decibel é expresso em função de um valor de referência, no caso da intensidade sonora esse valor geralmente é de 10^{-12} W/m^2 . Sendo assim, a intensidade sonora pode ser expressa em decibels através da equação 1 como:

$$I_{\text{dB}} = M \log I/I_0; \quad (1)$$

onde I_{dB} representa a intensidade sonora em decibels; M representa um fator multiplicativo, no caso da intensidade sonora M equivale a 10; I representa a intensidade sonora em W/m^2 e I_0 o valor de referência utilizado. É importante observar que a intensidade sonora em dB, pode assumir um valor negativo, desde que a intensidade sonora em W/m^2 seja menor que o valor de referência adotado.

Figura 2 – Gama de frequências e intensidades para as quais o sistema auditivo apresenta respostas.



Fonte: ROSSING; MOORE; WHEELER, 2002.

3.2 Análise de um som musical

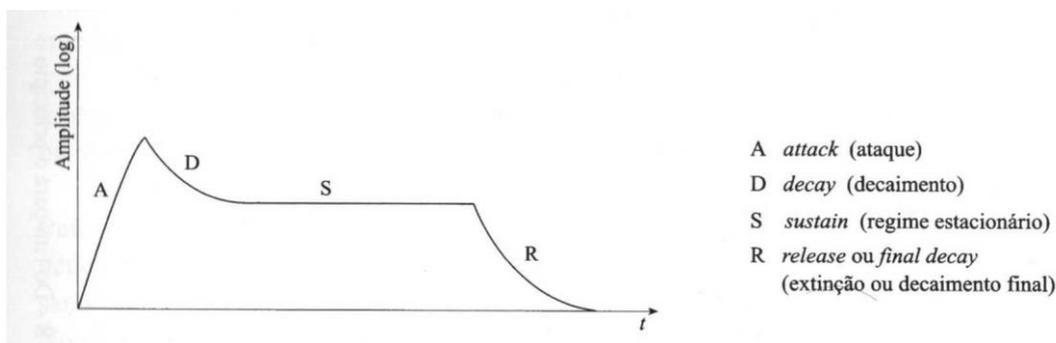
Segundo Henrique (2007), na última década os métodos de tratamento de sinais tiveram um incremento muito grande com a evolução dos computadores. Como atualmente toda a informação é manipulada por computador, o sinal é o conceito que está sempre presente. Um sinal é uma sequência de valores que transporta informação, uma mensagem a ser transmitida. É a variação de uma grandeza física, que pode ser armazenada, manipulada e transmitida por processos físicos. Existem diversos tipos de sinais: acústicos, áudio, vídeo, radar, dentre

outros, passíveis de várias formas de representação. Como exemplo, pode ser citado um instrumento musical que emite um som (sinal acústico), que pode ser captado por um microfone e convertido em um sinal elétrico, o qual pode ser convertido em um sinal digital. Nesse âmbito, a análise de sinais, conduz à extração da informação contida no som, sem, no entanto modificá-lo.

3.2.1 Períodos transientes e de estabilidade

Henrique (2007) afirma que em um som consideram-se três períodos distintos de duração: transiente inicial (ataque seguido de um decaimento), período de estabilidade (regime estacionário) e transiente de extinção (decaimento), conforme apresentado na figura 3. O transiente inicial corresponde à passagem do silêncio ao som, o transiente de extinção é o período em que o som se extingue, enquanto que o período de estabilidade é o período entre os dois anteriores. Quando, por exemplo, se põe uma corda a vibrar é necessário certo tempo para o estabelecimento do som. A passagem do estado de repouso ao estado vibratório não é instantâneo devido à inércia do material da corda. É durante o período de estabilidade que se fixam certas características do som tais como a altura e a intensidade. O que se passa entre os períodos transientes também é de máxima importância para o reconhecimento do timbre do som.

Figura 3 – Forma de onda idealizada (envelope ADRS) onde estão representados os períodos transientes e o período de estabilidade.



Fonte: HENRIQUE, 2007.

A duração do transiente inicial dos sons depende de três fatores: frequência, amortecimento do sistema e das condições de ataque do instrumento. Segundo Pollard e Jansson (1982, apud HENRIQUE, 2007, p. 173), o transiente inicial dura entre 5 a 350ms. Relativamente ao transiente de decaimento apenas os dois primeiros fatores devem ser considerados. A duração

temporal dos transientes aumenta quando as frequências e os amortecimentos modais diminuem. A influência das condições de ataque não são tão sistematizáveis, variando bastante e de forma não monotônica com os parâmetros de ataque. Na prática, cada um dos aspectos citados é ponderado de diferentes maneiras para os diferentes sons de cada instrumento (HENRIQUE, 2007).

3.2.2 Som puro, som complexo, harmônicos e sub-harmônicos

O som puro ou senoidal é o mais elementar dos sinais, e tem uma importância fundamental em acústica e no processamento de sinais em geral. A forma de onda de um som puro é a de um seno ou de um cosseno, constituída por uma única frequência. Pela análise de Fourier, uma onda periódica com uma frequência fundamental específica, pode decompor-se numa soma de senos e cossenos. Assim, qualquer som é constituído por sons senoidais (HENRIQUE, 2007).

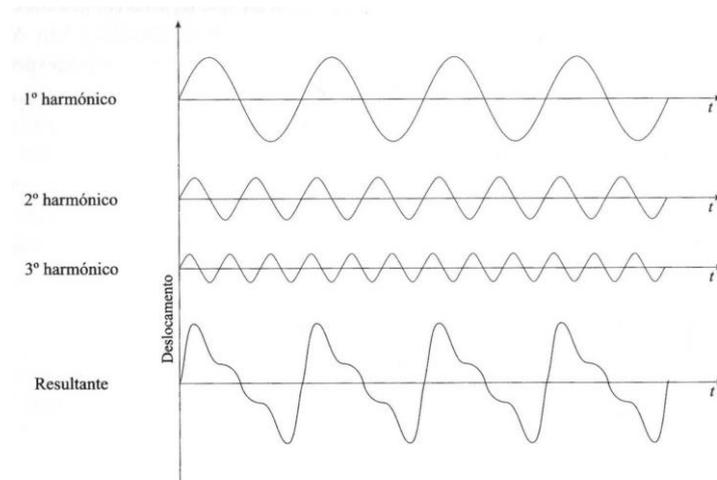
Opostamente aos sons puros, os sons complexos são constituídos por mais do que uma frequência, onde cada uma dessas frequências denomina-se componente ou parcial (figura 4). O primeiro dos parciais é denominado pelos músicos como som fundamental. Se um parcial tiver uma frequência que é um múltiplo inteiro da frequência do som fundamental (denominado harmônico fundamental em alguns casos), este parcial será denominado harmônico (HENRIQUE, 2007). A cada harmônico está associada uma ordem de grandeza (1^{o} , 2^{o} , 3^{o} ,...) que o relaciona ao harmônico fundamental, sendo o segundo harmônico com o dobro da frequência do harmônico fundamental, o terceiro o triplo da frequência e assim sucessivamente. Também é possível que um parcial seja sub-harmônico, que são componentes geradas por não linearidades do sistema correspondendo a frequências inferiores e/ou sub-múltiplas da frequência fundamental. Ao serem introduzidas pequenas diferenças em um sinal ciclo a ciclo, vão surgindo cada vez mais sub-harmônicos e múltiplos destes, que irão por fim implicar na perda da periodicidade do mesmo.

Instrumentistas de sopro e de cordas friccionadas e beliscadas utilizam frequentemente harmônicos em sua execução. Muitas vezes os músicos não sabem que os harmônicos são frequências múltiplas de uma frequência base, porém sabem quais os intervalos existentes entre eles.

Outro fator a ser considerado é a periodicidade do som. Se o som for constituído unicamente

por parciais harmônicos, é denominado periódico, se pelo menos um dos seus parciais for não-harmônico, o som será não-periódico. (HENRIQUE, 2007). Porém, em rigor, sistemas harmônicos não existem (FLETCHER e ROSSING, 1988, apud HENRIQUE, 2007, p. 188), assim, quando os parciais não são harmônicos, eles são mais ou menos harmônicos⁴.

Figura 4 – O som complexo (resultante) é constituído por três parciais: 1º, 2º e 3º harmônicos.



Fonte: HENRIQUE, 2007.

Henrique (2007) ainda afirma que quanto maior a rigidez de uma corda mais inarmônicos serão os parciais do som produzido pela sua vibração.

3.2.3 Espaços de representação

Conforme Henrique (2007) existem diversas formas de representação de sinais, designados espaços de representação. A escolha de uma determinada representação depende naturalmente do objetivo do estudo a ser desenvolvido.

O domínio temporal é o espaço de base, pois é nesse espaço que os fenômenos se produzem. A representação temporal é a representação básica dos sinais e consiste na relação entre uma determinada grandeza (parâmetro) e o tempo, representando assim valores instantâneos de uma variável, como por exemplo, na representação de uma forma de onda. Porém, não é habitual se fazer um registro direto desse tipo, mas sim a conversão dos parâmetros que

⁴ Quanto mais próxima à frequência de um parcial estiver da frequência de um dos harmônicos do sinal, mais harmônico esse parcial será.

interessam em sinais elétricos utilizando transdutores como microfones ou captadores no caso de análises acústicas (HENRIQUE, 2007).

Henrique (2007) afirma que embora não seja habitual, o domínio temporal é aplicado em alguns casos específicos:

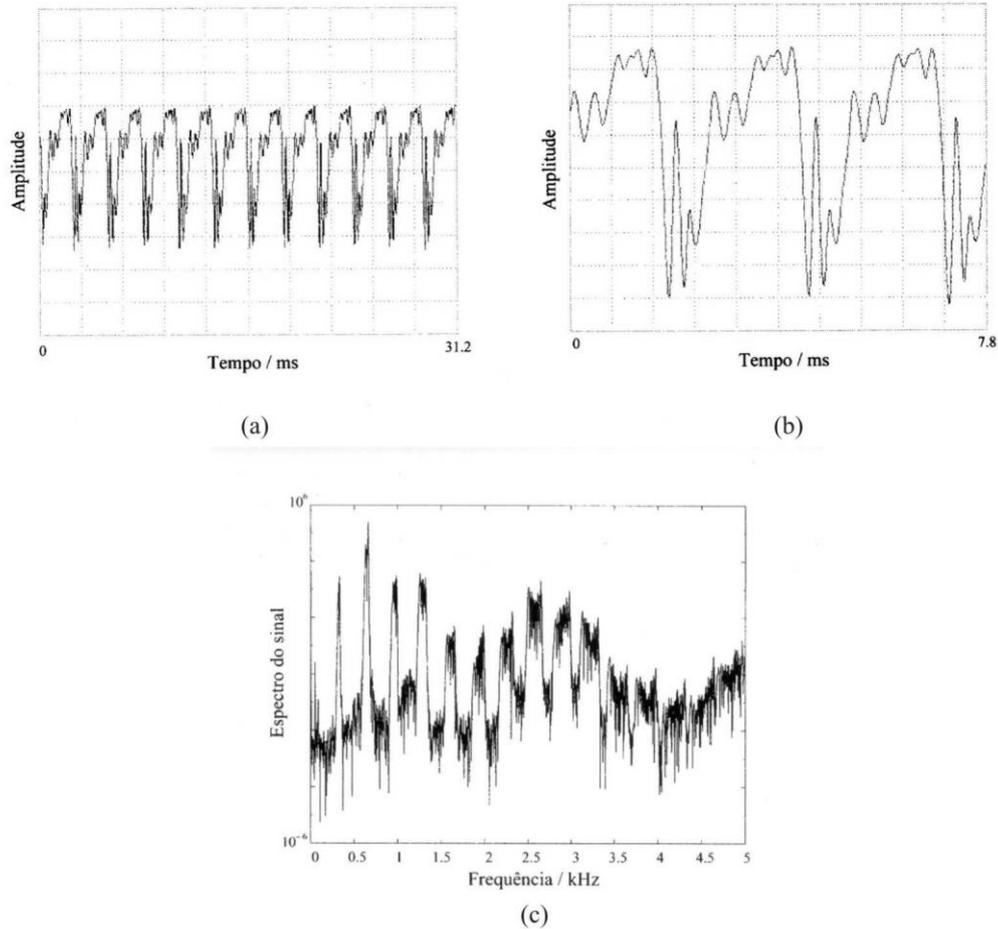
- para representar a totalidade do sinal adquirido ou parte dele, o que permite visualizar alguns detalhes;
- verificar a existência de periodicidade global do sinal;
- calcular a frequência fundamental do sinal;
- representar o transiente inicial.

O estudo de sinais ou sistemas exige outro tipo de representações que permitam visualizar melhor certas propriedades que não são postas em evidência no domínio temporal. Uma representação que habitualmente complementa a temporal é a representação espectral, ou espectro de sinal, definida no domínio frequencial. Neste espaço são evidenciadas as frequências em que o sinal contém energia, assim como as periodicidades existentes. Embora a representação temporal permita ver a periodicidade global, a representação frequencial permite verificar que relações existem entre os parciais contidos no sinal. A passagem do domínio temporal para o frequencial quando se trata de sinais periódicos é feita através da análise de Fourier (HENRIQUE, 2007).

Os sinais musicais são aparentemente estacionários, porém de fato não são, já que seu conteúdo espectral apresenta variações. As representações tempo/frequência foram introduzidas com o objetivo de representar a variação do conteúdo espectral no tempo para sons não estacionários. Essa representação é feita frequentemente através de espectrogramas que mostram a forma como a densidade espectral varia em função do tempo. A forma mais simples de obter esse tipo de representação é também através da aplicação da análise de Fourier (HENRIQUE, 2007).

Uma representação temporal e outra no domínio da frequência são apresentadas na figura 5. Na mesma figura é demonstrada a influência da escala utilizada na visualização dos detalhes de um sinal.

Figura 5 – Diferentes espaços de representação e influência da escala utilizada no espaço temporal.



(a) Janela temporal de 31.2 ms, onde a forma da onda está mais compacta. (b) Em uma escala de 7.8 ms alguns detalhes ficam mais evidenciados. (c) Espectro de sinal; domínio frequencial.

Fonte: HENRIQUE, 2007.

3.3 Propriedades Acústicas

Devido à subjetividade relacionada à percepção musical, torna-se difícil estabelecer propriedades acústicas desejáveis em um som produzido por um instrumento. Diferentes autores identificam distintos componentes do som.

Em um estudo Paté et al. (2012) solicitaram a 22 guitarristas (sendo 13 profissionais) de diversos estilos musicais (jazz, blues, música contemporânea, rock, hard rock, música clássica, punk rock) que escolhessem critérios para uma avaliação precisa de três guitarras diferentes. Os guitarristas tiveram total liberdade para escolherem o número de critérios que considerassem necessários para a avaliação do instrumento, desde que estes fossem relevantes

para os mesmos. As características mais citadas pelos músicos foram a agressividade nos agudos, sonoridade, equilíbrio e *sustain*, todos mencionados 5 vezes pelos guitarristas, além da facilidade de execução que foi mencionada por 6 guitarristas.

Conforme Paté et al. (2012) por se tratarem de características que apresentam um caráter subjetivo, podem ser identificados alguns “problemas” nesse levantamento. Primeiramente, as características mencionadas podem ser relacionadas ao timbre, sendo algo perceptível. Porém, de um ponto de vista semântico, o timbre continua a ser descrito (CASTELLENGO, 2007 apud PATÉ et al. 2012, p. 4), o que dificulta uma definição das propriedades relacionadas ao mesmo. Também, não é possível ter certeza de que dois guitarristas referem-se ao mesmo conceito ou sentimento ao usarem a mesma palavra. Sendo assim a determinação das grandezas físicas que podem estar relacionadas a tais características, deve ser delineada por tais considerações que possuem uma relevância significativa.

Segundo Pinheiro (2010) a inteligibilidade do som está relacionada aos sons médio-agudos e agudos (frequências acima de 2 kHz). Inteligibilidade quer dizer “clareza e definição”. Dela deriva o termo inteligível que pode ser compreendido como “o que é bem compreendido”, “de fácil entendimento”. São os sons médio-agudos e agudos os grandes responsáveis pela inteligibilidade do som, ou seja, pelos ouvintes conseguirem entender o que esta sendo falado, cantado e tocado. Os sons situados nessa faixa de frequência também são os responsáveis pelo sentido de direção do som. Evidentemente, nenhum leigo irá dizer que um som está sem “inteligibilidade”. Podem ser feitas considerações acerca do som como dizer que o mesmo esta “como som de lata” (excesso de médios) ou “sem corpo” (falta de médios); “sem brilho” (falta de agudos) ou “muito brilho” (excesso de agudos).

Tecnicamente, formantes são bandas de frequência onde se concentram a maior parte da energia de um som. Ching e Chung (2012) fazem uma analogia entre os formantes de violinos tidos como referência em termos de qualidade e os formantes da voz feminina. Ao longo dos dois últimos séculos violinos feitos por Antonio Stradivari (1644-1737) foram mais favoravelmente recebidos por violinistas de concerto e colecionadores de instrumentos, do que violinos de qualquer outro fabricante. Algumas pessoas sugerem que o sucesso de Stradivari pode ser atribuído a características tonais únicas, descritas como brilho. Uma possível explicação para esse tom brilhante é que eles simplesmente produzem energia de alta frequência mais do que outros violinos.

Moraes (2007) aplicou em sua tese de mestrado uma metodologia para definir um conjunto de parâmetros que melhor sintetizassem o tom de instrumentos de sopro (clarinete e oboé). Para isso, foram tocadas e gravadas algumas notas de uma escala musical, que foram analisadas isoladamente observando-se as amplitudes dos harmônicos de cada nota. As amplitudes de cada harmônico foram então obtidas através do analisador espectral existente no *software Adobe®Audition®*, que baseia-se na aplicação de transformadas rápidas de Fourier (FFT – do inglês *Fast Fourier Transform*) e possibilita visualizar com clareza os harmônicos do sinal e através do posicionamento do cursor, realizar a leitura da frequência e amplitude para o pico desse harmônico. Porém esse analisador fornece seus valores de intensidade em dBFS (*decibels Full Scale*), usada para medir intensidades de sinais digitais. Por comparação com valores fornecidos por um medidor de pressão sonora, chegou-se a conclusão que o nível de 0dBFS representava aproximadamente 70dB. Moraes (2007) ainda utilizou uma equação para a linearização dos resultados já que seu objetivo era desenvolver um algoritmo para sintetizar os sons desses instrumentos, chegando assim às amplitudes dos harmônicos de todas as notas da extensão do instrumento. Os referidos resultados foram linearizados através da equação 2:

$$A_k = 10^{\frac{L_k}{20}} \quad (2)$$

onde L_k é o nível de intensidade sonora em dBFS e A_k é o valor linear da amplitude de um harmônico k qualquer.

Em um estudo Pickering (1990) avaliou a qualidade tonal de diferentes cordas de violino associadas ao material do núcleo da corda. Para isso, foram selecionadas cordas que possuíam o núcleo de diferentes materiais, sendo as mesmas de aço, tripa e um tipo de polímero sintético não especificado. A parte experimental desse estudo foi desenvolvida com a padronização de uma forma de ataque com parâmetros bem definidos e controlados por uma máquina durante sua execução, produzindo um sinal que foi devidamente registrado. O processamento desses sinais possibilitou a determinação da intensidade relativa em dB, para os vinte primeiros harmônicos de cada sinal. Como resultados, foram observadas diferenças espectrais, onde as cordas de aço apresentavam maiores intensidades em altas frequências. Pickering relacionou o observado a oscilações de alta frequência e diferentes graus de amortecimento.

Na mesma linha de pesquisa, porém em outro estudo, Pickering (1986) avaliou a elasticidade de cordas de violino. Através de um ensaio de tração ele determina um parâmetro de elasticidade em Newtons/metro para diferentes cordas de violino, assim como o tempo para a estabilização da afinação, tensão normal de afinação e a redução de comprimento da corda (encurtamento) para que a nota tenha sua frequência reduzida em um semitom. Os resultados obtidos demonstraram que a elasticidade das cordas de violino é proporcional a frequência de afinação e inversamente proporcional ao encurtamento do semitom e ao tempo de estabilização. O encurtamento do semitom refere-se à redução do tamanho da corda (condição imposta pela posição do dedo ao pressionar a corda) para produzir uma alteração de um semitom na nota tocada, e o tempo de estabilização é o tempo necessário para que a corda estabilize sua afinação, já que a corda pode apresentar uma ligeira deformação devido à tensão aplicada.

3.4 Cordas: amortecimento, *sustain* e ataque

Segundo Henrique (2007), em acústica musical considera-se uma corda ideal uma corda perfeitamente uniforme e totalmente flexível. A rigidez a flexão de uma corda ideal, portanto é nula, e a força de restituição responsável pela sua vibração resulta inteiramente da força longitudinal (tensão) externa aplicada. Essa é uma idealização útil, mas que se afasta das características apresentadas pelas cordas reais, onde os efeitos da rigidez são muito significativos.

Uma corda pode vibrar segundo quatro modos vibratórios diferentes: transversal, longitudinal (ou axial), torcional ou de oitava. A cada um desses modos, está associada uma forma de vibração, uma frequência e um amortecimento específico. Lee e Rafferty (1983, apud HENRIQUE, 2007) realçam o fato de que os modos de vibração longitudinais de um violino cujas frequências variam aproximadamente entre 1 e 5 kHz tenham uma importância considerável, já que se encontram na zona de maior sensibilidade auditiva do homem.

Uma corda real é considerada um oscilador livre ou natural, já que após iniciado seu movimento (vibração) por uma dada perturbação, não existem forças externas atuando permanentemente sobre o sistema. Esse tipo de oscilação também apresenta a característica de amortecimento (figura 6), devido a sua perda gradativa de energia ou amplitude. Esse

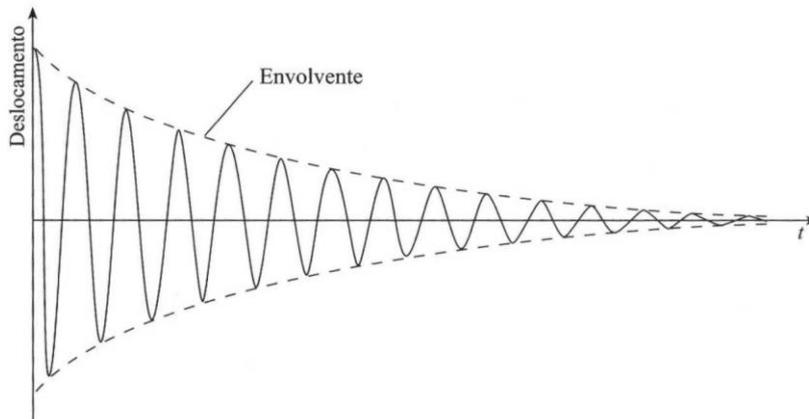
amortecimento se deve à ação de forças dissipativas, como o atrito e a viscosidade do ar (HENRIQUE, 2007).

A equação 3, segundo Henrique (2007) a expressão da envolvente da resposta de um sistema amortecido é dada por:

$$A(t) = A_0 e^{-\omega_0 \zeta_0 t} \quad (3)$$

onde $A(t)$ representa a amplitude da oscilação em função do tempo, A_0 é dado pela amplitude inicial das oscilações, ω_0 refere-se à frequência fundamental do sistema e ζ_0 é o coeficiente de amortecimento do sistema.

Figura 6 – Representação de um tipo de oscilação amortecida.



A linha tracejada observada denomina-se envolvente e representa a curva de decaimento da amplitude numa oscilação amortecida.

Fonte: HENRIQUE, 2007.

Uma maneira de quantificar o amortecimento é através do tempo de decaimento. Uma definição para o tempo de decaimento considera o tempo necessário para a amplitude das oscilações passar a metade de seu valor inicial (BENADE, 1990; HALL, 1991; STRONG E PLITNIK, 1992 apud HENRIQUE, 2007, p. 83). Esse tempo de decaimento também pode ser expresso em função da energia. Como a energia é proporcional ao quadrado da amplitude, o tempo de decaimento passa a ser o tempo necessário para a energia diminuir para $\frac{1}{4}$ da sua energia inicial (HENRIQUE, 2007).

Em um experimento baseado no ressonador de Helmholtz, Lima (2006) utiliza um método para a determinação do tempo de decaimento com a utilização do *software* Cool Edit. Nesse

método com o auxílio de ferramentas do programa são determinados os valores de amplitude máxima das oscilações em intervalos específicos em função do tempo. Esses dados (amplitude e tempo) definem a envolvente da oscilação amortecida, que através de uma regressão linear são utilizados para determinar o tempo de decaimento.

Sustain é um parâmetro de sons musicais dependente do tempo. Como o próprio nome indica, ele denota o período de tempo durante o qual o som permanece antes que se torne inaudível. Além disso, o *sustain* é o terceiro dos quatro segmentos em um envelope ADRS conforme já apresentado na forma de onda idealizada na figura 3. Instrumentos de corda apresentam um longo *sustain*. Como um indicativo da sua relevância, para guitarras elétricas, baixos, violões e pianos, estão disponíveis pedais de efeitos para prolongar o *sustain* de um tom. Cordas de maior calibre, também implicam em uma maior sustentação.

A qualidade do som produzido por uma corda depende essencialmente de alguns fatores, dentre eles a forma com que o ataque é realizado. O ataque é o estímulo ou perturbação imposta à corda que faz com que a mesma venha a vibrar produzindo o som. Em relação ao ataque alguns fatores devem ser considerados como: o ponto de ataque, já que o ataque realizado no meio da corda ou a $\frac{1}{4}$ do seu comprimento produzirá sons distintos; a forma de ataque seja através de uma palheta, com a unha ou com a polpa do dedo; a direção e intensidade do ataque (HENRIQUE, 2007).

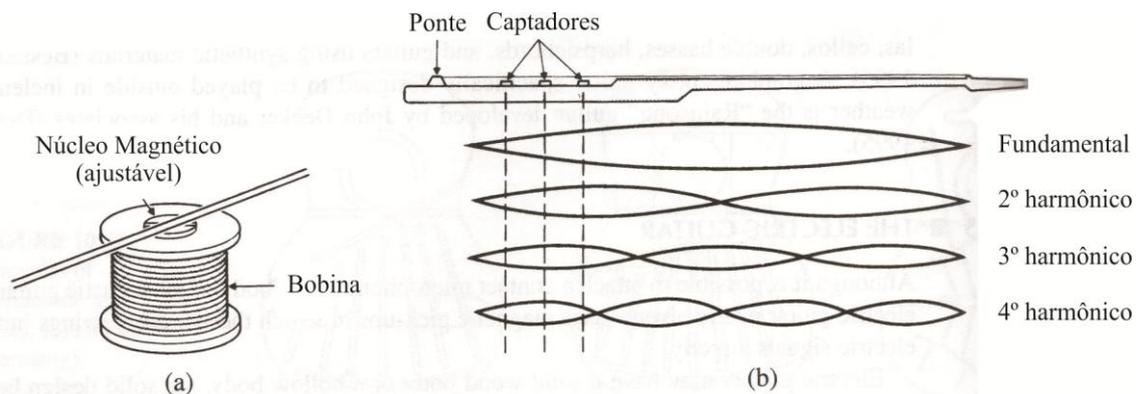
3.5 A guitarra elétrica

O corpo de uma guitarra elétrica pode ser oco ou maciço, sendo o modelo maciço mais comum. As vibrações do corpo do instrumento possuem uma influência muito menos significativa na guitarra elétrica do que em uma guitarra acústica (violão). As guitarras elétricas também são menos susceptíveis a realimentação acústica (do alto falante para a guitarra, fenômeno conhecido popularmente como microfonia) e também permite que as cordas possam vibrar durante um tempo maior (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2002).

As guitarras elétricas quase sempre utilizam captadores eletromagnéticos nos quais as cordas em vibração induzem diretamente sinais elétricos, conforme representado esquematicamente na figura 7. Os captadores eletromagnéticos consistem em uma bobina com um núcleo magnético. As vibrações das cordas geram mudanças no fluxo magnético através da bobina

que induzem um sinal elétrico em seu núcleo. A maioria das guitarras elétricas possuem dois captadores para cada corda, e algumas vezes até três para cada corda. Esses captadores estão localizados em diferentes pontos no corpo da guitarra, o que faz com que os mesmos experimentem diferentes intensidades sonoras e harmônicos de diferentes ordens. O captador da frente (mais próximo ao braço da guitarra) gera o sinal mais forte na frequência fundamental, o captador traseiro (mais próximo ao cavalete) é mais sensível aos harmônicos de maior ordem. A maioria dos captadores possuem uma peça que possibilita o ajuste de sua distância em relação às cordas. Ao se aproximar os captadores das cordas o volume sonoro é aumentado, porém, se essa aproximação exceder certo limite, podem ocorrer distorções devido a força exercida sobre as cordas pelo ímã dos captadores. Essa distorção é especialmente perceptível quando as cordas são dedilhadas além da 12ª casa, quando as cordas se aproximam dos captadores (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2002).

Figura 7 – Sistema de captação de uma guitarra elétrica.



(a) captador eletromagnético de uma guitarra; (b) arranjo de múltiplos captadores que experimentam diferentes modos de vibração da corda.

Fonte: ROSSING; MOORE; WHEELER, 2002.

Circuitos elétricos para captação de guitarras podem incorporar uma grande variedade de características diferentes. Muitas guitarras incluem controles de tom que se ajustam a respostas de alta frequência. Algumas possuem um interruptor para inversão de fase do sinal a partir de um captador em relação a outros (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2002).

3.5.1 Técnicas: band e vibrato

Técnica musical é a capacidade de músicos instrumentais e vocais exercerem um controle otimizado de seus instrumentos ou cordas vocais, a fim de produzir efeitos musicais precisos.

Melhorar a técnica de um modo geral implica na prática de exercícios que melhoram a sensibilidade muscular e a agilidade de execução. Técnica é independente de musicalidade (COAST, 2012).

Algumas técnicas são frequentemente utilizadas por guitarristas para obter determinado efeito expressivo durante suas execuções. Para um guitarrista solo, bends e vibratos são algumas das habilidades mais importantes para dominar e estão relacionadas ao tempo de duração do som ou tecnicamente ao seu *sustain*.

Fazer um bend é usar o dedo da mão que está segurando uma nota para puxar a corda para cima ou para baixo, ao mesmo tempo que se pressiona o corda contra o braço da guitarra. O efeito obtido é uma nota mais aguda, cuja intensidade é determinada pelo executante (bend de meio tom, um tom inteiro, um tom e meio...). Quanto maior for o bend, mais a corda deve ser puxada.

O vibrato é uma das técnicas básicas da guitarra, cujo objetivo é aumentar a intensidade de uma nota tocada na guitarra, principalmente em solos. Ele é composto por sucessivos mini-bends em torno de uma determinada nota. Sua execução pode ser realizada através de movimentos curtos do dedo que esta segurando a nota para cima e para baixo, ou mantendo o dedo fixo e girando o pulso.

3.6 Ciência dos materiais e acústica musical

Os instrumentos musicais foram criados historicamente, isto é, os primeiros instrumentos foram construídos com materiais que estavam prontamente disponíveis em um dado momento, e com um conjunto limitado de técnicas de construção conhecidas. Assim, as escolhas iniciais influenciaram a própria essência dos instrumentos. O que eles "devem" parecer e o mais importante, como eles "deveriam" soar foram estabelecidos no início do seu desenvolvimento. Mesmo em uma busca tecnológica moderna para definir as propriedades dos materiais que produzem o timbre "perfeito" em um instrumento, a percepção histórica do "melhor" instrumento conforme definido pela percepção subjetiva do complexo aparelho auditivo do ser humano e pela execução de um músico virtuoso, serão muito influentes (KITTO, 2003).

Os instrumentos musicais são plataformas ideais para aprender sobre a ciência dos materiais em um contexto. Qualquer pessoa curiosa pode ser contratada pela pergunta aparentemente simples de por que uma guitarra ou um violino produzem seus sons característicos. As respostas são realmente complicadas fundamentadas pela ciência dos materiais. Alunos matriculados em qualquer curso introdutório de ciência dos materiais podem ser, pela primeira vez confrontados com a integração de seus conhecimentos de matemática, química e física para resolver uma grande variedade de, às vezes, problemas abstratos (KITTO, 2003).

Enquanto o objetivo de um verdadeiro fabricante de instrumentos é produzir um instrumento de concerto altamente valorizado, o objetivo da maioria dos fabricantes é produzir muitos instrumentos de qualidade aceitável a preços acessíveis. A seleção dos materiais é fundamentalmente realizada com base em suas propriedades e custo. Neste sentido, as escolhas são como para qualquer produto e podem estar relacionadas a questões de um projeto básico de engenharia (KITTO, 2003).

3.6.1 Cordas de guitarra

As informações apresentadas nessa seção foram extraídas de um artigo escrito por Knight (2014) com base em informações fornecidas por uma série de fabricantes de cordas para instrumentos musicais.

Cordas para instrumentos musicais devem possuir uma uma série de propriedades. Elas devem possuir um limite de escoamento suficiente para permanecer no seu regime elástico durante o uso, ser uniforme em diâmetro e densidade e não ser afetada por temperatura e umidade. Elas ainda necessitam ser o mais flexíveis possível, resistindo ao desgaste por atrito e corrosão, além de possuírem propriedades acústicas específicas. Mesmo diante o desenvolvimento da ciência dos materiais, essa é uma lista de requisitos de difícil adequação, e obviamente, as cordas reais não são perfeitas conforme idealizado.

As cordas são a fonte de todo o som produzido por uma guitarra. O instrumento pode apenas modificar o som produzido, sem no entanto acrescentar algo que não esteja presente no som produzido pelas cordas. O conteúdo harmônico e a pureza do som produzido são drasticamente afetados pelo comprimento e diâmetro das cordas. Porém, essas são grandezas

físicas que não serão abordadas de forma detalhada nessa revisão bibliográfica, por não estarem presentes no escopo do trabalho.

As cordas da guitarra são feitas de um fio trefilado constituído de um único material homogêneo ou revestido. Porém, para maiores espessuras do fio, podem ocorrer perdas de afinação frequentes. Para se evitar esse tipo de problema, as cordas destinadas a produzir os sons mais graves, possuem um enrolamento ou bordão em volta de um fio de menor diâmetro (*wound strings*; ver figura 8), que aumenta a densidade linear no fio alterando de forma menos significativa sua rigidez se comparado a um fio homogêneo de mesmo diâmetro. Esses enrolamentos são aplicados por máquinas específicas desenvolvidas para essa finalidade. Os fios sob os quais são aplicados os enrolamentos, podem também ter sua seção transversal em formato hexagonal (figura 9), o que otimiza a fixação do enrolamento e proporciona uma maior estabilidade a corda.

Figura 8 – Cordas de guitarra com enrolamento.



Esse tipo de corda é comercialmente conhecido como *wound string*.

Fonte: KNIGHT, 2014.

Um segredo dos fabricantes de cordas é a razão entre o diâmetro do fio do enrolamento e o fio do núcleo. Utilizar o fio do núcleo com um maior diâmetro aumenta o volume e a sustentação das notas, porém também aumenta a rigidez da corda. Já o fio do núcleo de menor diâmetro aumentam a ergonomia durante a execução e a pureza dos harmônicos, porém reduzem a sustentação e volume das notas. De uma forma geral, quanto mais rígido o material da corda, mais brilhante é o som produzido pela mesma.

Atualmente, após anos de evolução, cordas para instrumentos musicais são feitas a partir de apenas alguns materiais. A grande mudança na produção de cordas para instrumentos musicais está relacionada à sua qualidade, precisão e consistência dos materiais utilizados,

assim como seu processo produtivo para obter o produto acabado. As cordas sem enrolamento (cordas primas), quase sem exceções são feitas de aço com um revestimento de estanho para minimizar sua corrosão. Em relação aos materiais utilizados na produção dos bordões, são usualmente utilizados materiais mais duros como o níquel, aço niquelado ou aço inoxidável, sendo também utilizadas ligas de cobre, bronze e prata.

Figura 9 – Corda com enrolamento e fio do núcleo com seção transversal em formato hexagonal.



Corda comercialmente conhecida como *hex core string*.

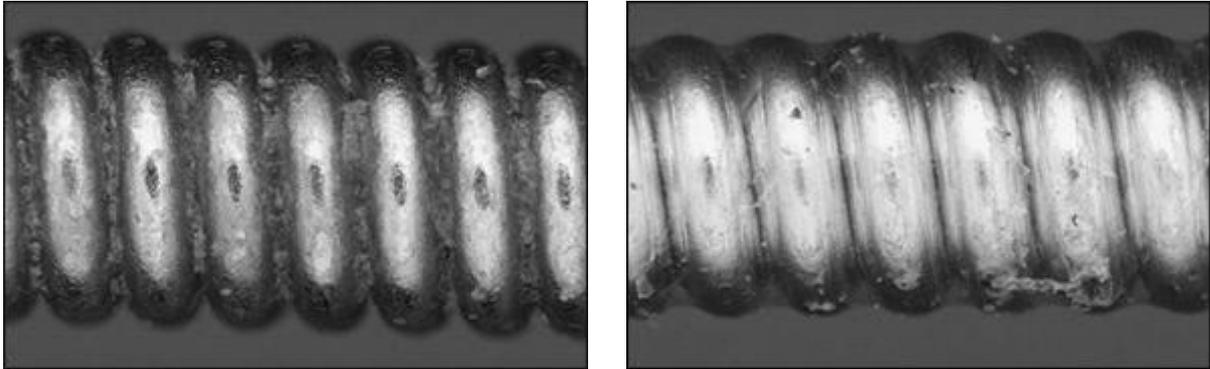
Fonte: DADDARIO, 2014.

Cordas de guitarra sofrem principalmente desgaste por corrosão, o que reduz consideravelmente sua vida útil. Devido ao contato direto das mãos do guitarrista com as cordas, ocorre o acúmulo de sais e umidade nos sulcos existentes no fio dos enrolamentos (ver figura 10), o que favorece a ocorrência de reações eletroquímicas resultando assim em corrosão acelerada do material. Como solução para esse problema, algumas empresas passaram a proteger as cordas contra o meio externo através da aplicação de um revestimento polimérico, que atua como uma barreira à corrosão prolongando sua vida útil. No entanto, cordas com esse tipo de revestimento, soam um pouco diferente. O timbre do som produzido por essas cordas são menos brilhantes se comparadas a cordas sem esse revestimento, porém, o mesmo é mantido por cerca de três a cinco vezes mais tempo.

Fabricantes de cordas para instrumentos musicais, geralmente não produzem os fios utilizados na confecção, sendo estes comprados de empresas específicas que comercializam esse produto como “fio de música”. Os fios de música utilizados para produzir as cordas primas e

o núcleo das cordas com enrolamentos são de aço temperado com elevado teor de carbono e muitas vezes referido como “aço sueco”.

Figura 10 – Revestimento em cordas de guitarra.



(a)

(b)

Na imagem (a) é apresentada uma corda sem revestimento polimérico, onde é possível visualizar o acúmulo de algum tipo de resíduo (oriundos do contato com a mão do guitarrista ou algum tipo de produto de corrosão, por exemplo) entre os segmentos do enrolamento. Na imagem (b) uma corda com revestimento polimérico onde o acúmulo do resíduo não é perceptível.

Fonte: ELIXIRSTRINGS, 2014.

3.6.2 Corrosão

Quando ocorre uma associação de meio corrosivo e sollicitação mecânica, determinado material pode sofrer um processo corrosivo acelerado, que mesmo sem perda de massa, pode levar a fratura e conseqüentemente a falha catastrófica do material. Na literatura essa ocorrência se distingue em casos onde a ação mecânica é de natureza dinâmica (corrosão sob fadiga) e nos casos onde a ação mecânica é de natureza estática (corrosão sob tensão fraturante). No caso da corrosão por fadiga, a ação do meio corrosivo reduz o número de ciclos ou oscilações que seriam suportados normalmente pelo material. Já na corrosão sob tensão fraturante, ocorre um efeito sinérgico da corrosão e da tensão aplicada ou residual, levando a falha em serviço antes do esperado pela ação isolada de alguma delas. A concentração de tensões ou a presença de entalhes são fatores críticos que agravam ainda mais os efeitos desse tipo de corrosão. Outro tipo de corrosão relevante para este estudo é a corrosão sob atrito, que ocorre quando duas superfícies em contato e sob carga (sendo pelo menos uma metálica) são submetidas a pequenos deslizamentos relativos. A corrosão sob atrito ocorre então nessa região de interface sendo caracterizada por descolorimentos da

superfície do metal, com a formação de produtos de corrosão e em alguns casos pites que podem servir de núcleos para a ocorrência de fraturas por fadiga (GENTIL, 1996).

4 METODOLOGIA

4.1 Seleção das amostras

A seleção foi conduzida de forma a obter amostras com diferentes características e propriedades, delineada pela expressividade no mercado e seus valores de comercialização, acreditando que tais fatores estivessem relacionados à “qualidade” do produto. Sendo assim, foram selecionados quatro encordoamentos distintos de três marcas comerciais de guitarras elétricas.

O encordoamento é identificado pelo diâmetro em polegadas da sua primeira corda (mi) contada debaixo para cima no braço da guitarra. As amostras selecionadas são de encordoamentos 0.010", devido ao fato deste ser um dos calibres mais utilizados por guitarristas.

As amostras foram identificadas por uma sigla contendo duas letras cada, baseada nas informações disponibilizadas pelos fabricantes. Essa identificação é apresentada a seguir:

1 - NW (*nickel wound*): cordas de aço niquelado.

2 - PN (*pure nickel*): Cordas de níquel puro.

3 - NR (nano revestida): cordas com um nano revestimento polimérico de tecnologia anti-ferrugem para aços.

4 - NP (*nickel plated*): cordas de aço niquelado.

É importante ressaltar que as amostras NW e PN pertencem ao mesmo fabricante.

4.2 Caracterização

A caracterização das amostras foi realizada utilizando-se somente as cordas primas de cada encordoamento. A presença dos bordões nas cordas destinadas a produzir sons mais graves introduziriam outras variáveis e elevariam consideravelmente o grau de complexidade das

análises. As cordas primas são as cordas mi, si e sol e os bordões são as cordas ré, lá e mi. Embora exista uma corda mi prima e bordão, elas diferenciam-se por sua afinação, estando o mi bordão afinado em duas oitavas acima da mi prima. Apenas o comportamento mecânico não será avaliado a partir da corda sol, pois a quantidade de material disponível durante o desenvolvimento do trabalho, não foi suficiente para que todas as análises fossem realizadas a partir de uma mesma corda. Porém acredita-se que essa condição não tenha uma influência significativa sobre as conclusões à serem apresentadas, já que o módulo de elasticidade é uma propriedade intrínseca do material, sendo bem razoável a consideração de que este seja o mesmo para todas as cordas primas de um mesmo encordoamento.

4.2.1 Análise dimensional

Essa análise foi realizada com o intuito de avaliar a uniformidade dimensional de cada encordoamento selecionado e produzir resultados para serem utilizados nos ensaios subsequentes. Os diâmetros das três cordas primas (mi, si e sol) de cada encordoamento foram medidos utilizando-se um micrômetro digital da marca Mitutoyo com resolução de 1 μ m. Foram realizadas cinco medições para cada corda em diferentes regiões selecionadas aleatoriamente ao longo da seção longitudinal, através das quais foi determinado o diâmetro médio com seu respectivo desvio padrão e a área da seção transversal. A figura 11 apresenta uma das medições sendo realizada.

Figura 11 – Medição do diâmetro de uma corda sol.



Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Comportamento mecânico

O comportamento mecânico das amostras foi avaliado por meio de ensaios de tração realizados conforme as especificações da norma NBR 6152 e teve como finalidade a determinação do módulo de elasticidade e do alongamento percentual de cada amostra.

Os ensaios foram realizados no laboratório de ensaios destrutivos do DEMAT-CEFET-MG em uma máquina de tração da marca Shimadzu modelo AG-10kNX com capacidade de 10KN, apresentada na figura 12.

Figura 12 – Máquina de tração utilizada nos ensaios.



Fonte: Próprio autor.

Foram realizados três ensaios para cada amostra (doze no total), utilizando-se corpos de prova não proporcionais⁵ com comprimento útil de 225mm. Os mesmos foram obtidos a partir da

⁵ Corpos de prova com área de seção transversal muito pequena em relação ao comprimento de medida original.

corda si de cada encordoamento, cuja área da seção transversal está devidamente especificada nos resultados da análise dimensional realizada. O parâmetro de controle utilizado foi a velocidade de deslocamento dos cabeçotes, sendo esta de 3mm/min.

Os resultados desses ensaios foram utilizados para a determinação do alongamento percentual e elaboração da curva tensão-deformação convencional, através da qual foi determinado o módulo de elasticidade para cada uma das quatro amostras. Acredita-se que as cordas primas sejam feitas todas do mesmo material para uma mesma amostra (hipótese fundamentada no artigo de Knight (2014)) diferenciando-se fundamentalmente pelos seus diâmetros. Sendo assim, embora o módulo de elasticidade tenha sido determinado a partir da corda si, esse parâmetro será utilizado para caracterizar o material das cordas primas de cada amostra selecionada.

4.2.3 Ensaio de corrosão

Para avaliar o potencial corrosivo de cada amostra, foi desenvolvido e padronizado um ensaio de corrosão acelerada por imersão conforme a norma NACE TM0169/G31. Os ensaios foram realizados no laboratório de química inorgânica do departamento de química do CEFET-MG.

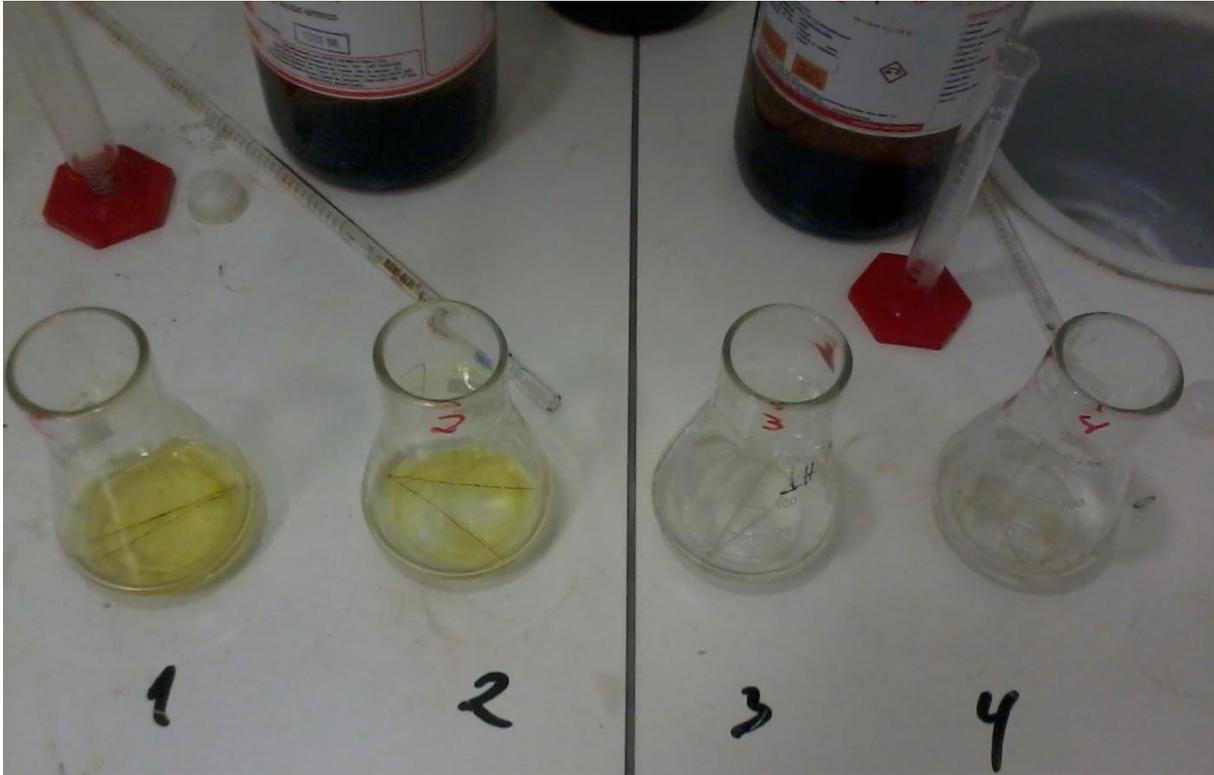
O meio corrosivo utilizado foi uma solução constituída de 10mL de água destilada, 1mL de ácido clorídrico 37% e 5mL de ácido nítrico 65%, sendo essas concentrações expressas em massa/massa. O tempo de imersão foi de 15min e o ensaio foi realizado em duplicata. A figura 13 apresenta o ensaio sendo realizado.

A taxa de corrosão do ensaio foi avaliada através da perda de massa das amostras após a imersão. As amostras utilizadas tinham aproximadamente comprimento de 100mm e suas respectivas massas foram medidas antes e após 15min de imersão em uma balança com resolução de 1mg.

A limpeza das amostras foi realizada antes da primeira pesagem utilizando-se álcool isopropílico aplicado com um pedaço de filtro de papel. Após os 15min de imersão, a limpeza foi realizada por imersão e agitação em álcool isopropílico para uma remoção mais efetiva dos produtos de corrosão e posterior secagem com filtro de papel. Durante os ensaios, os meios foram agitados manualmente assim que imersas as amostras e após 10min de imersão.

Os resultados desse ensaio possibilitaram a determinação da perda de massa percentual de cada amostra.

Figura 13 – Ensaio de corrosão realizado dentro de uma capela.



A coloração amarelada da solução é um indício da ocorrência de corrosão com a formação de íons Fe^{3+} .

Fonte: Próprio autor.

4.3.4 Análise microestrutural

Conforme as informações dos fabricantes, três entre as quatro amostras são de aço com algum tipo de revestimento. Para observar e avaliar as microestruturas dos aços dessas amostras e investigar de qual material seria de fato constituído a amostra PN foram realizados ensaios de micrografia (técnica metalográfica).

Cada uma das amostras foi cortada em pedaços de aproximadamente 15mm e posteriormente embutidas em baquelite. As amostras foram posicionadas de forma a possibilitar a análise da seção longitudinal das mesmas.

Após o embutimento as amostras foram lixadas em uma politriz com lixas de granulometria 120, 320, 600 e 1000mesh respectivamente, sempre alternando em 90° a direção de lixamento ao se passar de uma lixa a outra. Em seguida, as amostras foram polidas com suspensão (álcool etílico) e pasta de diamante de 9, 3 e 1µm. O reagente utilizado para o ataque das amostras foi o Nital 3%.

As imagens foram geradas com ampliações de 100, 200,400 e 800 vezes no microscópio óptico Fortel modelo Kontrol do Laboratório de Metalografia do DEMAT. Porém, as imagens produzidas não possibilitaram a identificação de suas respectivas microestruturas.

Com a finalidade de produzir uma microestrutura definida e visível ao microscópio óptico, foi realizado o tratamento térmico de recozimento pleno. As amostras foram posicionadas sobre um refratário e colocadas no forno a 900°C durante 30min. O tratamento térmico ocorreu simultaneamente para todas as amostras em um mesmo forno mufla seguido por resfriamento dentro do mesmo. Após o tratamento térmico, a preparação das amostras foi realizada conforme já descrito e suas micrografias serão apresentadas em imagens com aumento de 100 vezes.

4.3.5 Análise química

A fim de investigar uma possível diferença entre a composição química do revestimento e do metal base de cada amostra, foram realizadas microanálises qualitativas por EDS (espectroscopia de energia dispersiva) no laboratório de caracterização de materiais do DEMAT. O equipamento utilizado dói um EDS Shimadzu, modelo SSX 550, Superscan.

A análise do metal base foi realizada nas mesmas amostras preparadas para a metalografia. Para a análise do revestimento, foi utilizada a corda sol correspondente a cada uma das amostras em seu estado íntegro. Embora não estejam sendo caracterizadas as cordas com enrolamentos (bordões), nessa etapa foi necessária a análise das mesmas, o que será devidamente justificado com a apresentação dos resultados.

Na tentativa de melhor caracterizar o revestimento polimérico da amostra NR, foi realizada uma análise por FTIR (espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier). O equipamento utilizado na análise foi um IR Prestige 21, Shimadzu. O revestimento foi

removido mecanicamente por atrito, produzindo um material particulado que foi conduzido para a análise. Os resultados do ensaio foram expressos em função da transmitância percentual pelo número de onda, e analisados conforme o artigo publicado por Coates (2006).

4.3.6 Análise acústica

Com a finalidade de produzir parâmetros acústicos para caracterizar as quatro amostras selecionadas, um método de análise acústica foi desenvolvido baseado nas referências da seção 3.3.

Para cada uma das amostras foi produzido um sinal gerado pela corda sol tocada solta (nota sol, cuja frequência fundamental e de afinação é de 196Hz). As mesmas foram devidamente posicionadas (terceira corda de baixo para cima) uma de cada vez em uma guitarra elétrica e posteriormente afinadas através de um *software* instalado no PC do estúdio onde foram realizadas as gravações. Os softwares que usualmente são utilizados na afinação de instrumentos musicais, relacionam a nota tocada à uma determinada faixa de frequência, como uma espécie de tolerância para a afinação, sendo assim, a frequência de afinação pode não ser exatamente a frequência de 196Hz conforme consta na literatura para corda sol, mas um valor próximo a este, essa condição está exemplificada na figura 14. A gravação foi realizada em um estúdio musical profissional e acompanhada pelo produtor do mesmo que realizou a execução dos testes. Foram realizadas três gravações sequenciais para cada uma das amostras. Todos os parâmetros reguláveis tanto para a guitarra quanto para a instrumentação do estúdio foram os mesmos para todas as execuções. Embora essa seja uma variável de difícil controle, foi solicitado ao guitarrista (produtor) que realizasse todas as execuções da mesma forma, considerando como variáveis a intensidade, ponto e direção de ataque. Não houve nenhum tipo de amplificação ou processamento dos sinais.

Os resultados dos testes possibilitaram determinar a expressão da envolvente e do tempo de decaimento para cada uma das amostras. Os dados necessários foram obtidos através do processamento dos sinais com o *software Adobe® Audition®*. Esses dados foram utilizados para plotar um gráfico e através de uma regressão não-linear do mesmo, foi determinada a expressão da envolvente para cada uma das amostras. Através da manipulação algébrica da expressão da envolvente obtida para cada amostra, foi possível determinar seus respectivos tempos de decaimento. O tempo de decaimento foi considerado como o tempo necessário para

que a amplitude das oscilações sofresse uma redução para metade do valor da amplitude inicial. Sendo assim, foi determinado o tempo de decaimento para cada uma das três execuções das quatro amostras.

Figura 14 – Imagens registradas durante o procedimento de afinação das cordas.



(a)



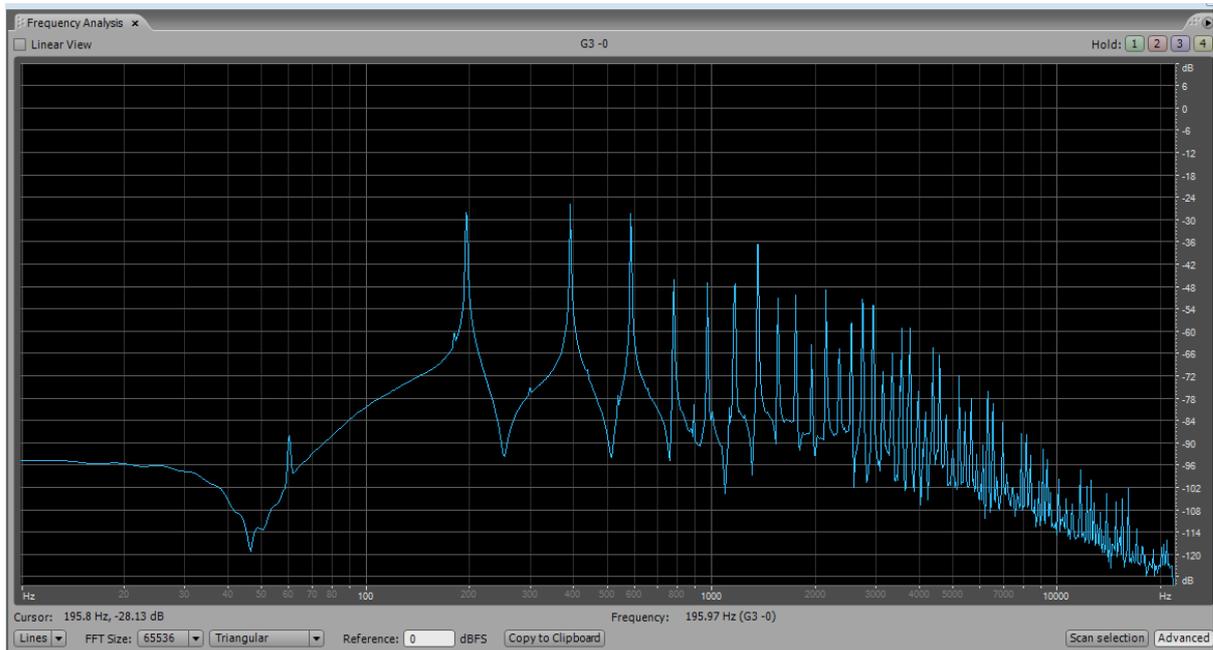
(b)

O cursor deve se aproximar do valor indicado como “0” pelo *software* que conforme uma determinada tolerância indica que a corda está afinada, ascendendo a ponta de seta localizada à direita da letra “G” nesse caso. A afinação está sendo realizada sequencialmente de (a) para (b).

Fonte: Próprio autor.

O processamento dos sinais obtidos ainda possibilitou a determinação dos valores de intensidade em dB dos harmônicos para cada um dos sinais. Os dados foram obtidos através do analisador de frequência do *software Adobe® Audition®* em um procedimento muito semelhante ao realizado por Moraes (2007) e está ilustrado na figura 15. Foram considerados somente os harmônicos cujos valores de intensidade estivessem acima de 0 dB, já que este é o limite da audibilidade humana.

Figura 15 – Analisador de frequências do *software Adobe® Audition®*.



A nota musical do sinal é mostrada na área situada sobre o gráfico, os números indicam a posição da nota na escala musical do teclado e a discrepância percentual de afinação, que nesse caso não existe, pois o valor indicado é “0”. “FFTSize” especifica o tamanho das transformações rápidas de Fourier, onde os tamanhos maiores apresentam resultados mais precisos; o parâmetro “Triangular” refere-se ao tipo de janela FFT utilizada e proporciona um cálculo de frequência também mais preciso. As frequências estão representadas em escala logarítmica e o cursor faz a leitura dos valores de frequência e amplitude em pontos específicos, nesse caso, a leitura indicada refere-se ao pico do primeiro harmônico do sinal (195,8Hz); a referência é de 0dBFS que corresponde a 70dB e os valores negativos da leitura nesse caso devem ser subtraídos de 70 para a conversão.

Fonte: Próprio autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise dimensional

Os resultados da análise dimensional são apresentados na tabela 1. Todas as cordas para as quatro amostras apresentaram uma excelente uniformidade dimensional sendo o desvio padrão para todas as medidas de 0,001mm. A maior diferença entre as mesmas cordas para diferentes encordoamentos foi de 0,01mm para as cordas si das amostras NP e PN.

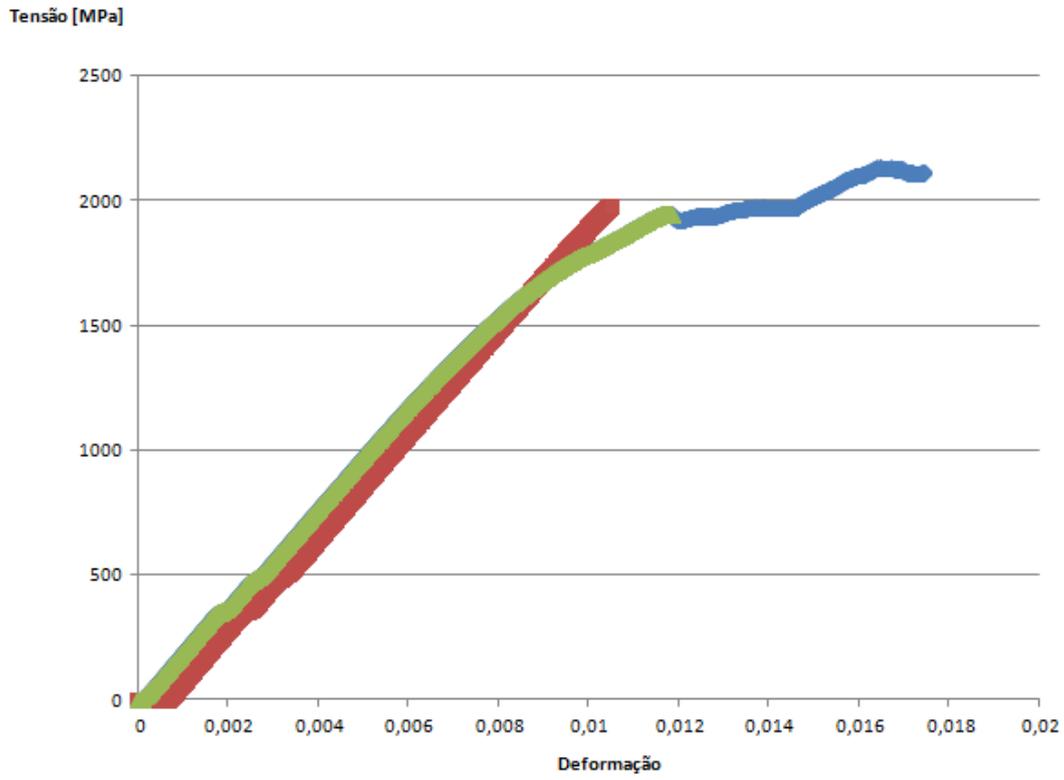
Tabela 1 – Resultados da análise dimensional

Amostra	corda	Média [mm]	Dp	Área [mm ²]
NP	mi	0,251	0,001	0,049
	si	0,329	0,001	0,085
	sol	0,433	0,001	0,147
NW	mi	0,249	0,001	0,049
	si	0,324	0,001	0,082
	sol	0,429	0,001	0,144
PN	mi	0,252	0,001	0,05
	si	0,319	0,001	0,08
	sol	0,429	0,001	0,145
NR	mi	0,257	0,001	0,052
	si	0,330	0,001	0,086
	sol	0,434	0,001	0,148

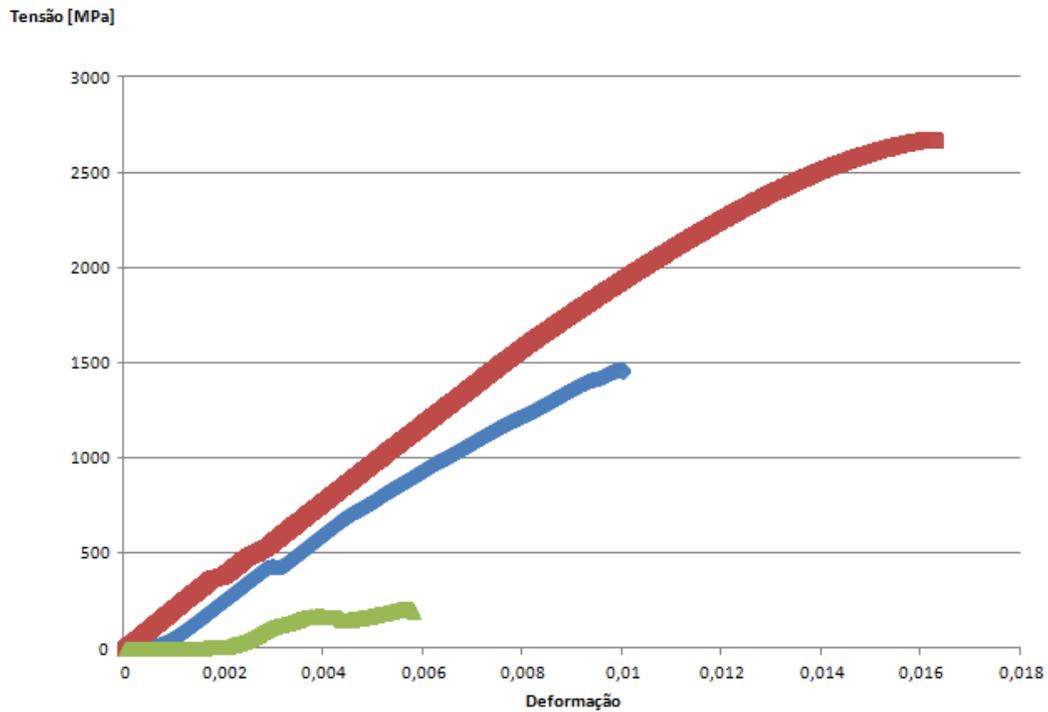
Fonte: Próprio autor.

5.2 Comportamento mecânico

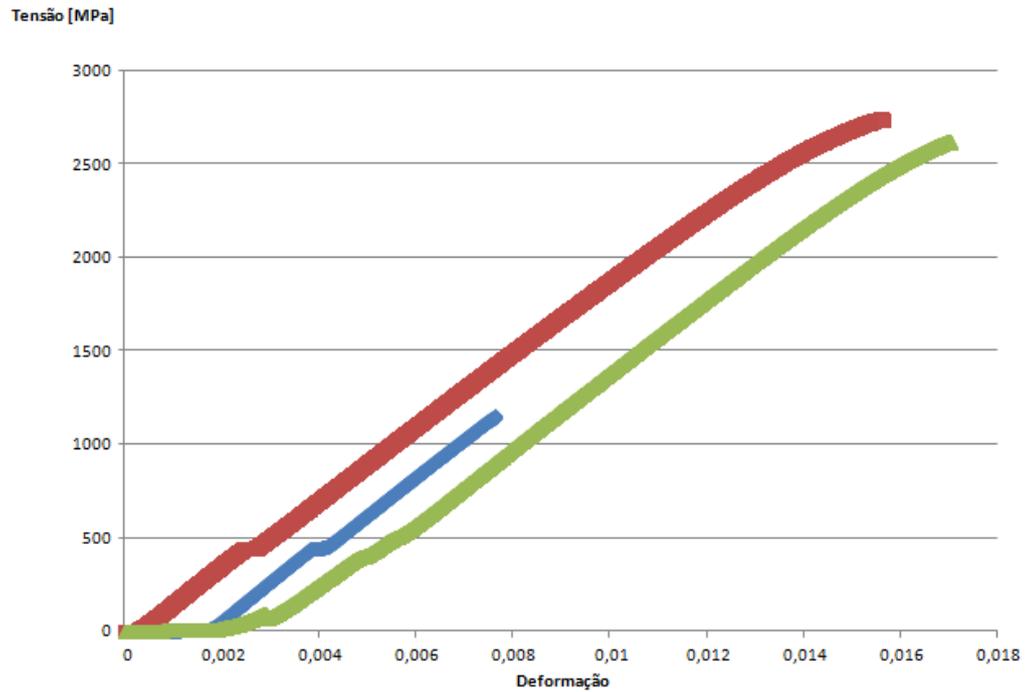
Os resultados do ensaio de tração foram utilizados para elaborar os gráficos apresentados na figura 16. As amostras NP e NR apresentaram uma boa reprodutibilidade dos resultados conforme pode ser visto nas imagens (a) e (d) respectivamente. Na imagem (b), para a amostra NW, ocorreu o rompimento em valores bem inferiores de tensão para os ensaios 1 e 3, o que pode estar relacionado à problemas de fixação das amostras ou outros fatores que possam ter conduzido à concentração de tensões durante o ensaio. Para a amostra PN, pode ser visto na imagem (c) que ocorre o deslocamento das curvas na direção horizontal para os ensaios 1 e 3, o que pode ter ocorrido devido ao fato das cordas não estarem totalmente esticadas no início do ensaio. Tais observações foram consideradas para a determinação do módulo de elasticidade das quatro amostras.

Figura 16 – Gráficos tensão-deformação para as quatro amostras ensaiadas.

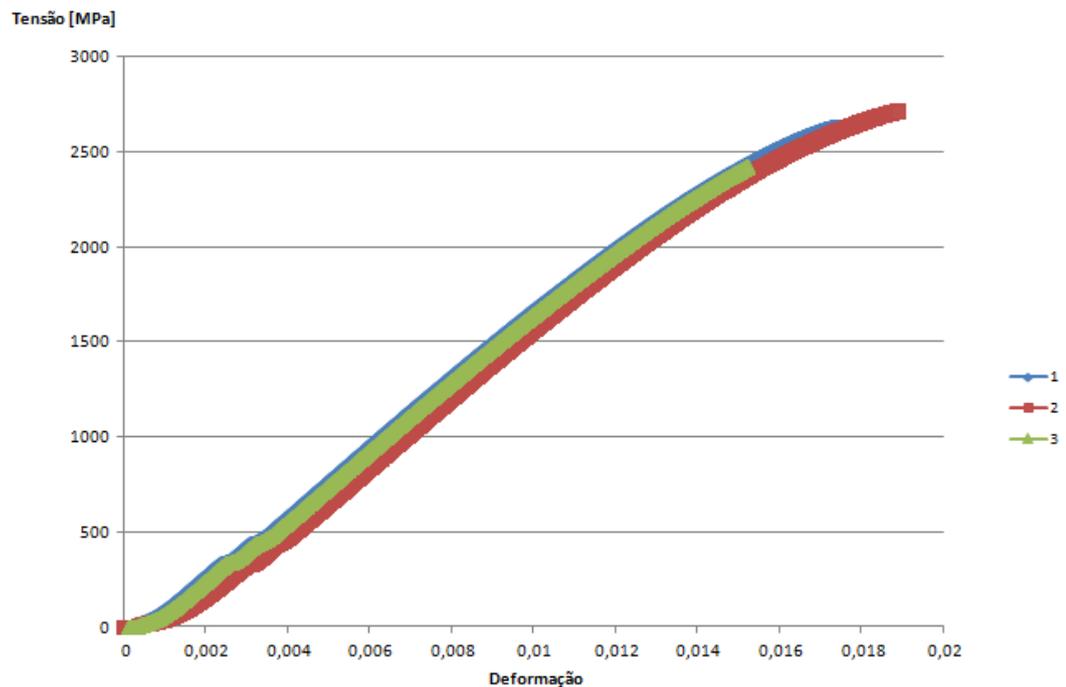
(a) NP



(b) NW



(c) PN



(d) NR

Fonte: Próprio autor.

O *software* utilizado para a realização dos ensaios considera como sendo negativos os valores de força antes que de fato ocorra a deformação do material, como por exemplo, enquanto a corda não está totalmente esticada, sendo essa a condição limite para o início do ensaio e

deformação do material de fato. Sendo assim, o efeito do deslocamento das curvas tensão-deformação observado para a amostra PN foi minimizado subtraindo-se do valor de deformação efetiva a deformação atingida até que o valor de força indicado fosse positivo. Devido ao fato de ter ocorrido o rompimento em valores bem inferiores de tensão se comparados aos demais em dois dos três ensaios realizados para a amostra NW, o módulo de elasticidade e o alongamento percentual para essa amostra foram determinados a partir de apenas uma curva, que corresponde ao ensaio 2 devidamente identificado na figura 16 (b). Tal consideração também justifica o fato de não terem sido determinado o desvio padrão para o alongamento percentual e para o módulo de elasticidade da amostra NW.

A tabela 2 apresenta os resultados do módulo de elasticidade e do alongamento percentual das quatro amostras. O módulo de elasticidade foi determinado a partir da média de 900 pontos pertencentes ao regime elástico de cada um dos gráficos tensão-deformação.

Tabela 2 – Módulo de elasticidade e alongamento percentual para as quatro amostras.

Amostra	E_m [GPa]	Dp	A%	Dp
NR	186,27	2,48	1,71	0,19
PN ²	201,29	5,22	1,63	0,09
NW ¹	204,17	-	1,63	-
NP	207,27	2,66	1,14	0,078

E_m - Módulo de elasticidade médio.

A% - Alongamento percentual.

Dp - Desvio padrão.

1 - resultados obtidos a partir de apenas uma curva.

2 - alongamento percentual determinado a partir de duas curvas.

Fonte: Próprio autor.

A amostra NR foi a que apresentou a maior discrepância para o módulo de elasticidade em relação às demais, sendo o valor de 186,272GPa o menor entre as quatro amostras. O baixo desvio padrão da amostra NW é decorrente do fato de o módulo de elasticidade para a mesma ter sido determinado apenas de uma curva tensão-deformação conforme já mencionado. Considerando a média e o desvio padrão para as amostras NP, NW e PN, observa-se que existe um intervalo comum para seus resultados que vai de 204,61GPa a 205,03GPa.

5.3 Ensaio de corrosão

Os resultados do ensaio de corrosão são apresentados na tabela 3. As quatro amostras tiveram comportamentos bem distintos para esse ensaio, sendo que a amostra NR apresentou a menor taxa de corrosão que é bem reduzida se comparada às demais. Um fato observado durante o ensaio que evidencia a resistência à corrosão dessa amostra, foi a formação do produto de corrosão de cor amarelada somente nas extremidades da corda imersa na solução, onde não existia o revestimento polimérico já que a corda foi seccionada. A amostra NW apresentou corrosão acentuada com uma perda de massa superior a 50% seguida pela amostra PN que pertence ao mesmo fabricante.

Tabela 3 – Resultados apresentados em duplicata para o ensaio de corrosão.

Amostra	M _i (mg)	M _f (mg)	Perda de massa (mg)	Percentual
NR	41	40	1	2%
	45	43	2	4%
NP	40	31	9	23%
	47	34	13	28%
PN	42	27	15	36%
	43	28	15	35%
NW	42	18	24	57%
	43	19	24	56%

M_i – Massa inicial.

M_f – massa final.

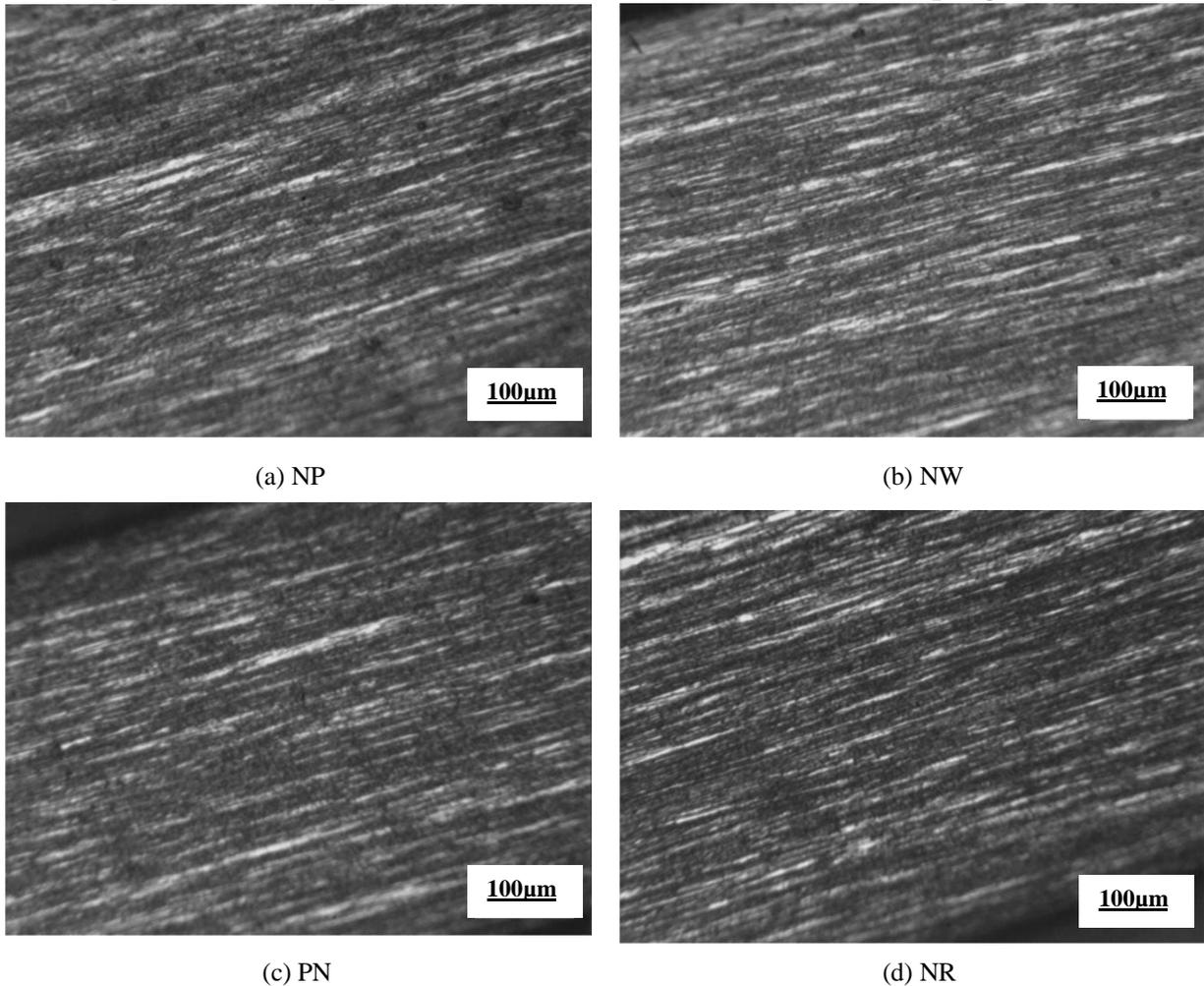
Percentual – Perda de massa percentual.

Fonte: Próprio autor.

5.4 Análise microestrutural

A figura 17 mostra as micrografias das quatro amostras antes da realização do tratamento térmico. Não foi possível distinguir ou identificar os microconstituintes de nenhuma das amostras, sendo percebida, apenas uma grande orientação da microestrutura na direção longitudinal. Tal fato pode estar relacionado ao fato do material estar em um estado de deformação bastante elevado decorrente da trefilação, se traduzindo em uma grande deformação dos grãos.

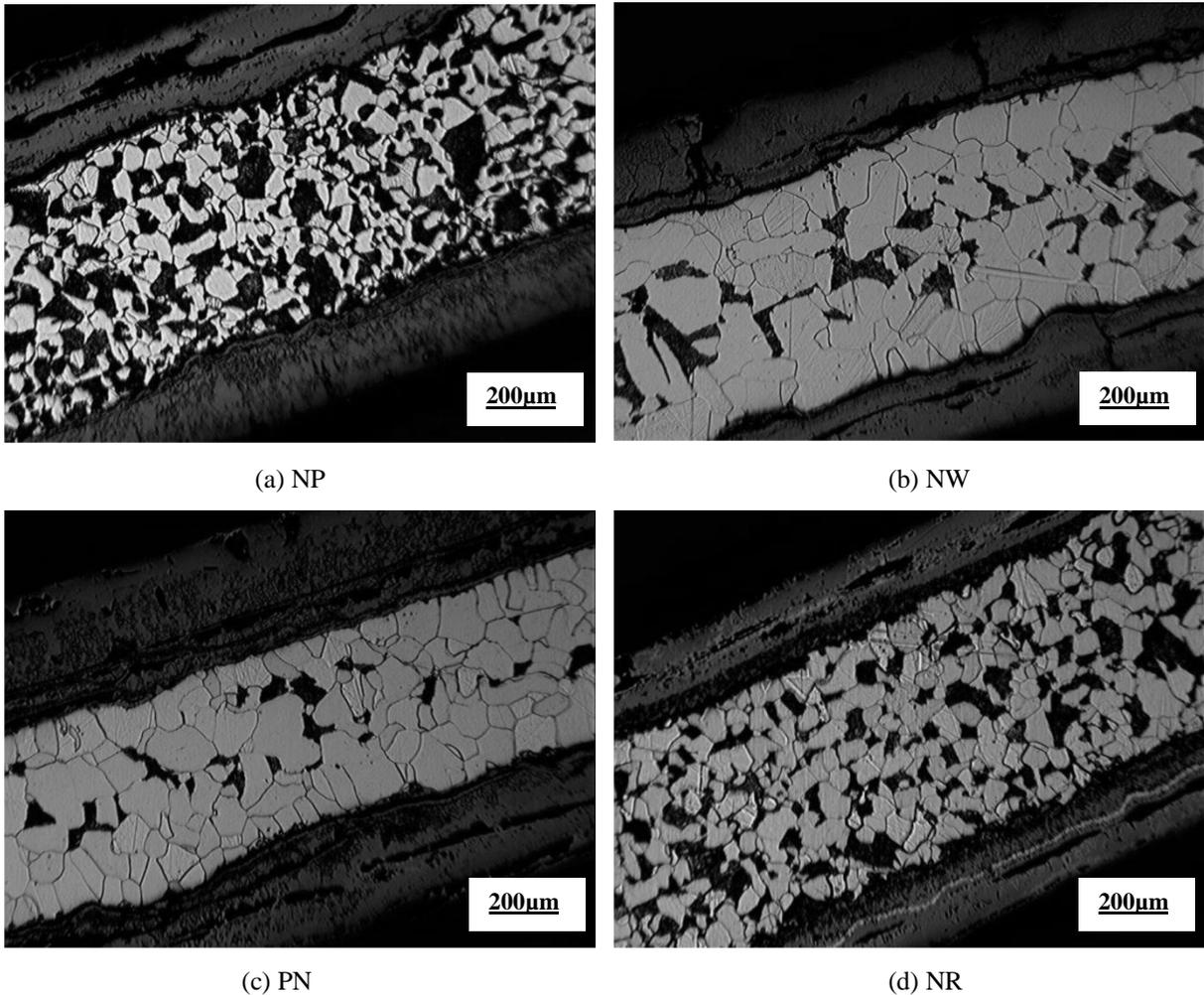
Figura 17 – Micrografias das amostras como recebidas com ampliação de 200x.



Fonte: Próprio autor.

A figura 18 apresenta as micrografias produzidas após a realização do recozimento, onde a microestrutura do material está bem definida para as quatro amostras. As microestruturas observadas não se apresentaram de forma homogênea, sendo as micrografias aqui apresentadas as que nitidamente se apresentaram em maior proporção para todas as amostras, onde as características mais evidentes retratam a microestrutura do material tratado termicamente. Os microconstituintes observados são perlita e ferrita, que caracterizam as quatro amostras como aços hipoeutetóides. Porém os referidos microconstituintes encontram-se em diferentes proporções e também com diferentes tamanhos de grão para cada uma das amostras. A maior quantidade de perlita na amostra NP da imagem (a) permite considerar que a mesma possui uma maior quantidade de carbono se comparada às demais, seguida pela amostra NR. As amostras NW e PN que pertencem ao mesmo fabricante apresentam microestruturas semelhantes, com uma maior quantidade de ferrita e maiores tamanhos de grão.

Figura 18 – Micrografias das amostras recozidas com ampliação de 100x.



Os microconstituintes perlita e ferrita são observados em diferentes proporções para as quatro amostras. A camada observada em torno das microestruturas é constituída de óxidos formados durante o tratamento térmico.

Fonte: Próprio autor

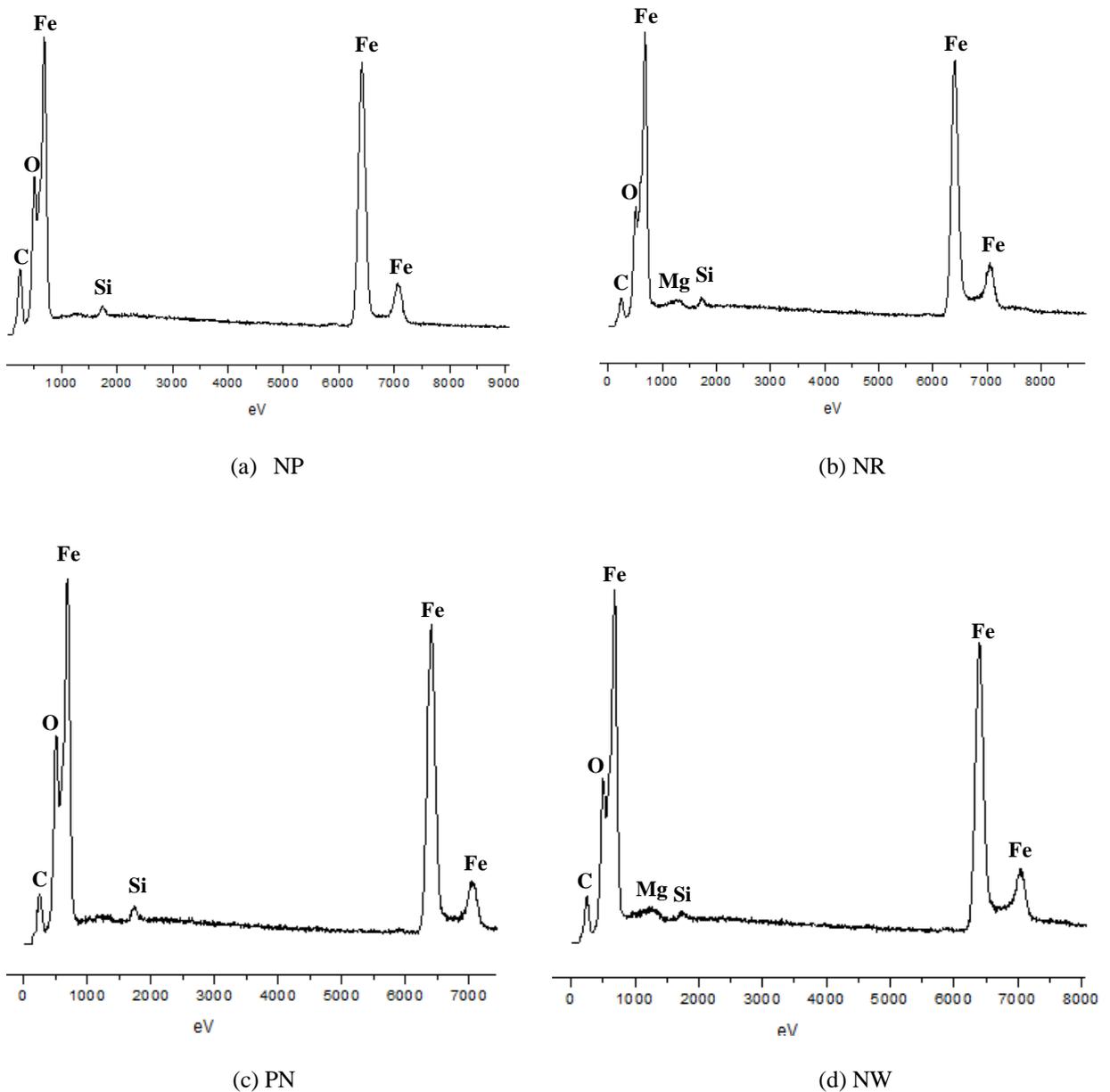
Seria possível a partir desses resultados por uma análise semi-quantitativa, quantificar o teor de carbono das amostras e ainda medir o tamanho de grão das mesmas. Porém as características microestruturais observadas a princípio, não retratam as propriedades mecânicas do material. Ao relacionar as microestruturas aos respectivos módulos de elasticidade das amostras (tabela 2), não é observada uma relação entre as mesmas, já que seria esperado que as amostras NW e PN que possuem maior quantidade de ferrita apresentassem um menor módulo de elasticidade. Tal fato pode estar relacionado a um elevado estado de encruamento do material, já que as microestruturas dos fios trefilados apresentam uma nítida orientação. Outro fator a ser considerado seria a presença de um revestimento nas quatro amostras. A condição de processamento dos materiais, como por

exemplo o número de passes de trefilação e a espessura e natureza do revestimento aplicado, possivelmente influenciam de forma significativa as propriedades do produto acabado.

5.5 Análise química

Os resultados da análise química serão apresentados nas figuras 19 e 20 que representam, respectivamente, os espectros de EDS para o metal base (núcleo da corda) e para o revestimento.

Figura 19 – Espectros de EDS do metal base das as quatro amostras.



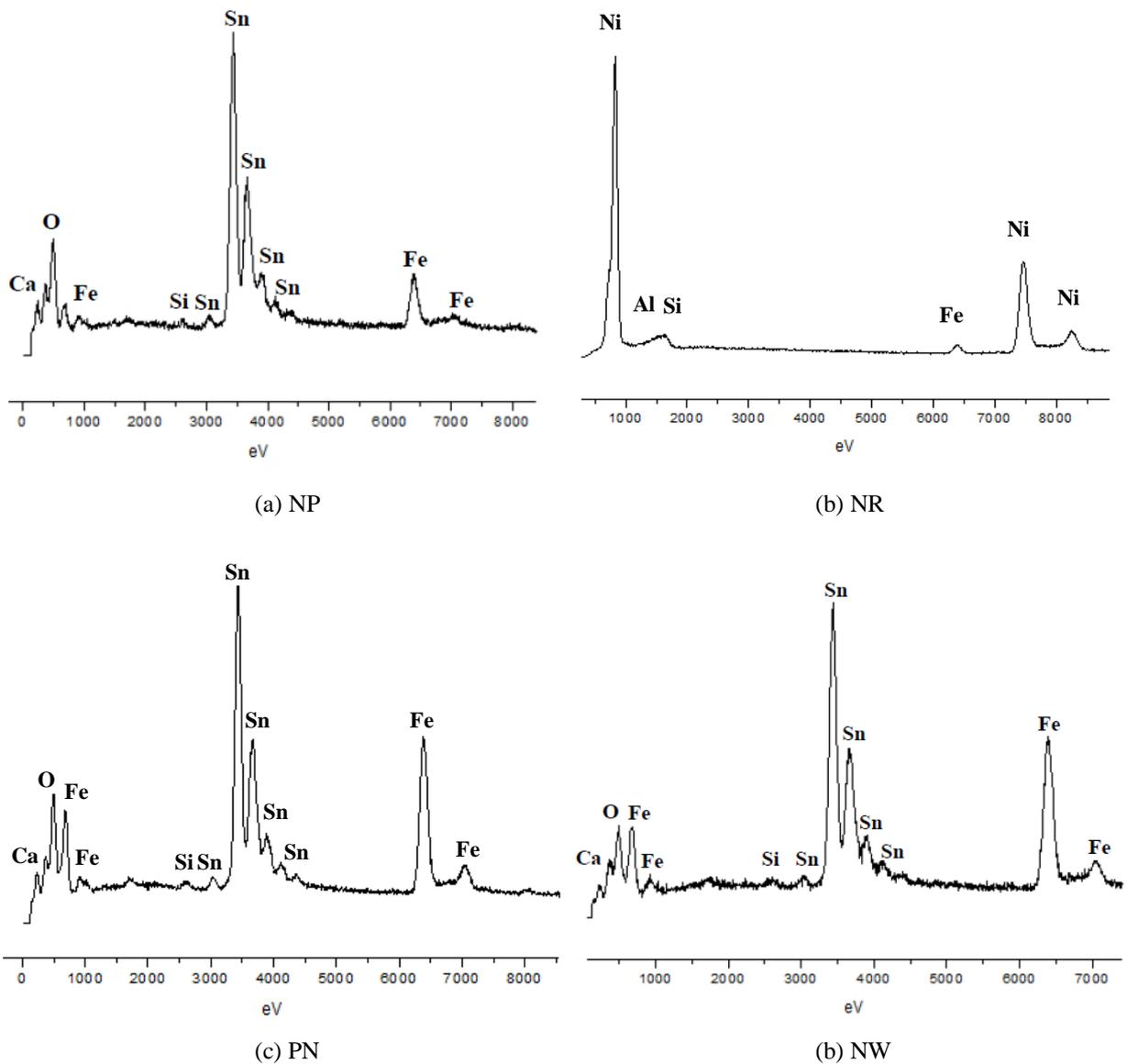
Os espectros apresentados na figura 19 possuem características bem semelhantes. As análises foram feitas a partir de maiores áreas com a finalidade de visualizar a dispersão dos elementos na microestrutura, já que as amostras onde foram realizadas estavam com suas microestruturas perfeitamente reveladas, conforme visto na figura 18. Tal fato possivelmente pode estar relacionado a presença do evidente pico de oxigênio em todas as amostras, já que dentro da janela de análise estava presente uma parte do óxido formado durante o tratamento térmico das amostras. Basicamente todas as amostras apresentaram uma composição de um aço carbono com adição de alguns elementos de liga, estando o silício presente em todas as amostras e o magnésio nas amostras NR e NW. O silício é usualmente utilizado como elemento de liga para aumentar a resistência mecânica de aços com baixo teor de elementos de liga e para o aumento da resistência à corrosão, além de ser utilizado como agente desoxidante. A utilização do magnésio como elemento de liga em aços não é muito usual, sendo mais comum sua presença em ferros fundidos nodulares. Sendo assim, a presença do magnésio nas amostras NR e NW pode ser proveniente do processo de desulfuração do aço ou a partir de uma contaminação do refratário das panelas onde o mesmo é produzido. Logicamente, essas são hipóteses para explicar o observado, que necessitam de uma análise mais detalhada para sua validação. Gradientes de concentração desses elementos na microestrutura não foram observados, já que os mesmos apresentaram-se dispersos de forma homogênea.

Observa-se a partir da figura 20 que as amostras NW, PN e NP apresentam espectros muito semelhantes com a presença de ferro, estanho e silício. Knight (2014) afirma que quase sem exceções, cordas sem enrolamento (cordas primas) são feitas de aço com um revestimento de estanho para minimizar sua corrosão. Tal consideração está de acordo com os resultados apresentados pelos espectros, onde vários picos identificam a presença de estanho o que possibilita afirmar que o mesmo está aplicado como um revestimento sobre as cordas das referidas amostras, comparando-se os espectros das figuras 19 e 20. A presença de cálcio nessas amostras possivelmente se deve ao contato com as mãos durante o manuseio das amostras, o que não foi considerado um fator crítico para a análise. Também não foi detectada a presença de níquel nessas amostras ao contrário do que era esperado, segundo as informações dos fabricantes.

O espectro de EDS da amostra NR (imagem (d) da figura 20) apresenta picos para elementos metálicos que não são característicos de polímeros, nesse caso os elementos detectados foram

o níquel, ferro, alumínio e silício. Embora o EDS seja uma técnica de análise superficial, acredita-se que durante a análise o feixe de elétrons possa ter transposto a camada do revestimento polimérico (que segundo o fabricante é de espessura nanométrica) e atingido a superfície do material metálico, onde estaria presente também outro tipo de revestimento possivelmente, uma liga de níquel como os resultados indicam.

Figura 20 – Espectros de EDS dos revestimentos das quatro amostras.

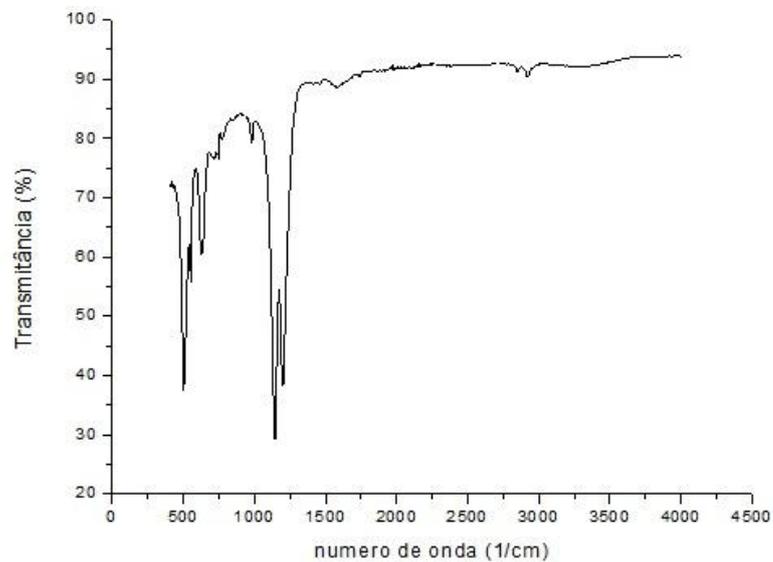


A figura 21, apresenta os resultados da análise de FTIR realizada para o revestimento da amostras NR. Na figura 21 (a) a banda situada entre 500 e 700cm^{-1} é característica de

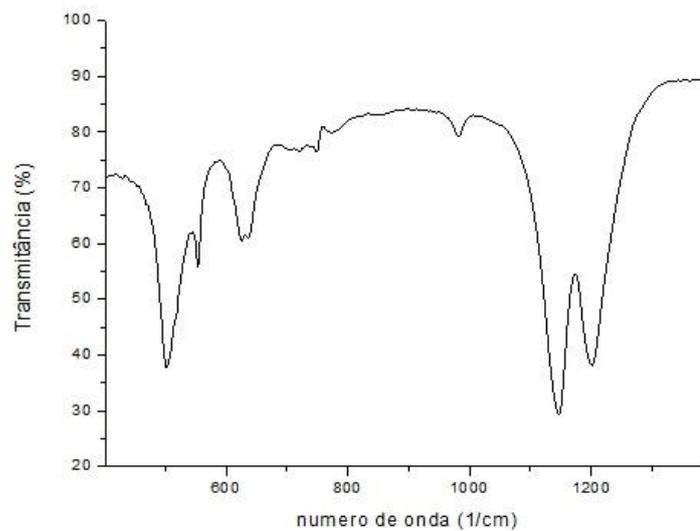
compostos alifáticos⁶ halogenados; em torno de $720-750\text{cm}^{-1}$ e $925-1005\text{cm}^{-1}$ são bandas respectivas para grupos metileno (CH_2) e ciclohexano para compostos alifáticos saturados; em aproximadamente 1150 e 1200cm^{-1} são bandas para o álcool terciário e fenol.

Na figura 21 (b) anéis aromáticos relacionam-se a banda entre 1580 e 1615cm^{-1} . Já na figura 21 (c), entre $2845-2865\text{cm}^{-1}$ e entre $2915-2935\text{cm}^{-1}$ novamente caracteriza-se o grupo metileno para compostos alifáticos saturados o que também foi observado na imagem (a) da figura 21, porém para outra banda.

Figura 21 – Espectro no infravermelho para o revestimento da amostra NR.

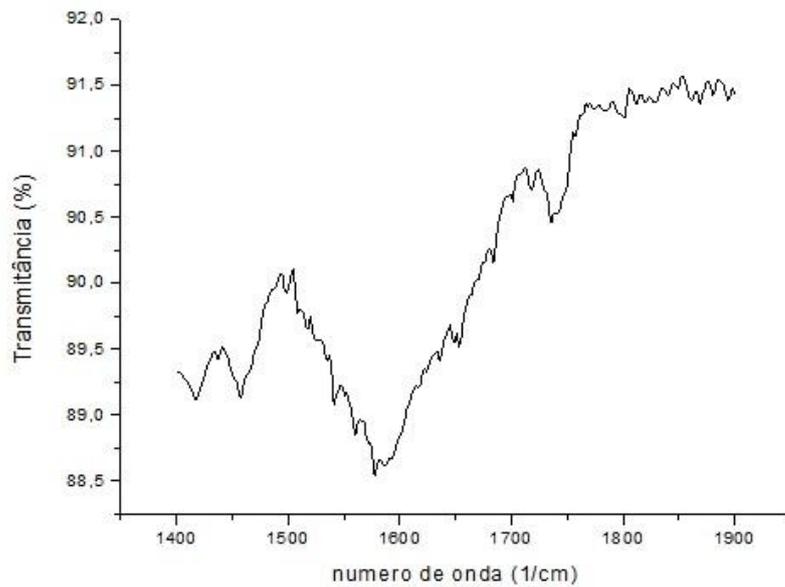


(a) Espectro total da amostra.

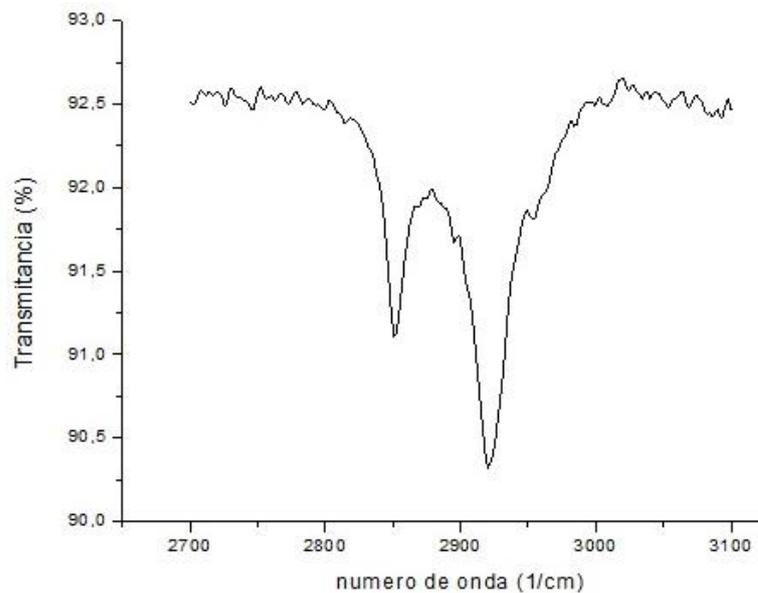


(b) Ampliação na faixa de 0 a 1300cm^{-1} .

⁶ Compostos orgânicos constituídos de carbono e hidrogênio que não contém anéis aromáticos.



(c) Ampliação na faixa de 1400 a 1900cm⁻¹.



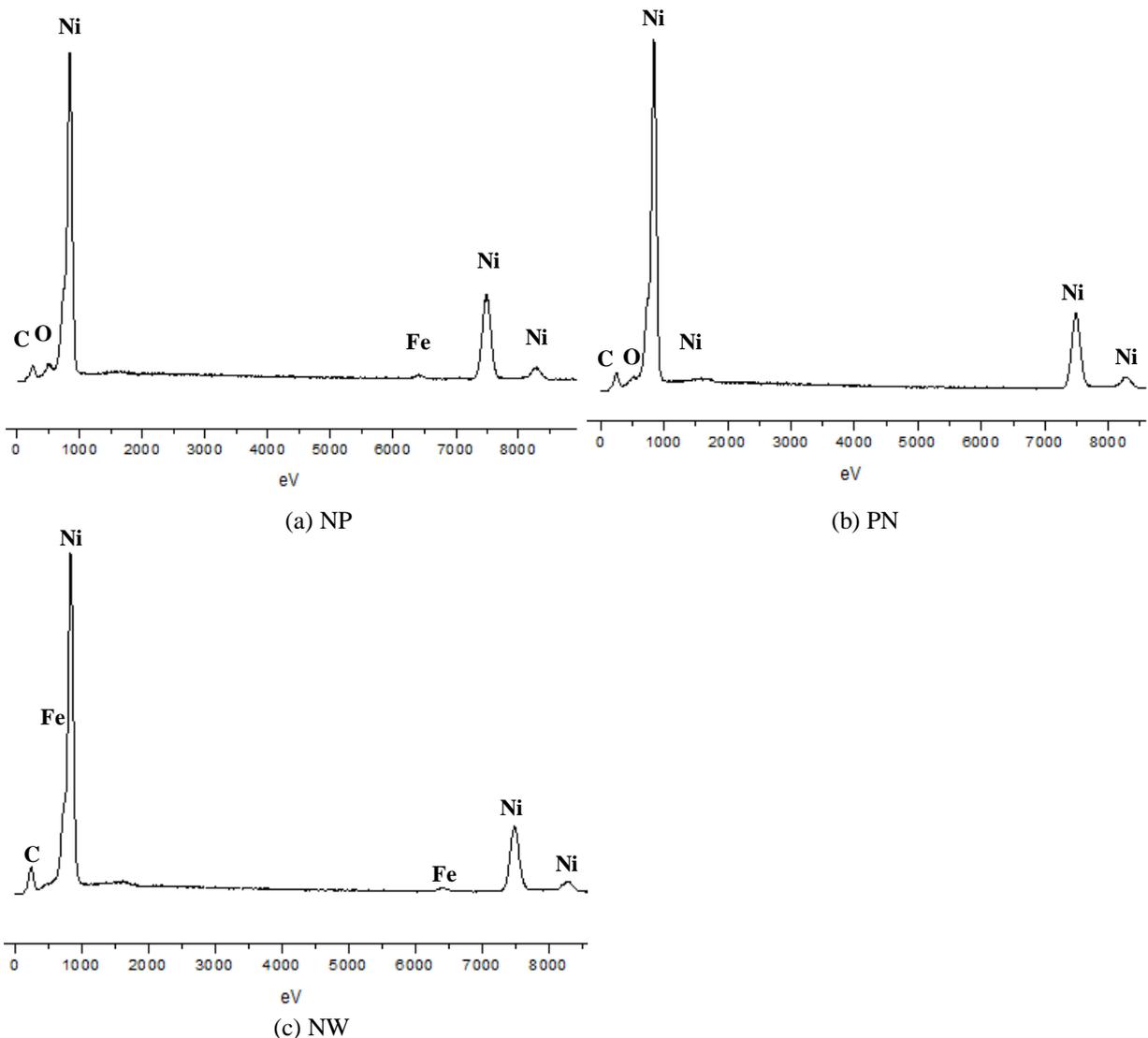
(d) Ampliação na faixa de 2700 a 3100cm⁻¹.

Fonte: Próprio autor.

Os grupos funcionais relacionados às referidas bandas possibilitam considerar a hipótese de que esse polímero seja algum tipo de hidrocarboneto halogenado aromático e/ou alifático. Tal hipótese é reforçada por relatos da utilização de polímeros com algumas dessas características como agente desengordurante e agentes de limpeza a seco e também como revestimento contra corrosão (THERMODYN, 2009).

Como não foi detectada a presença de níquel nas amostras NW, PN e NP, levantou-se hipótese da presença desse elemento como revestimento somente para as cordas com enrolamentos, o que motivou a análise por EDS das mesmas. Assim a análise da corda mi bordão de cada uma das amostras foi realizada e são apresentadas na figura 22. Os resultados apresentados corroboram a hipótese levantada, já que picos de níquel bem evidentes foram observados para as três amostras.

Figura 22 – Espectros de EDS para os bordões das amostras NW, PN e NP.

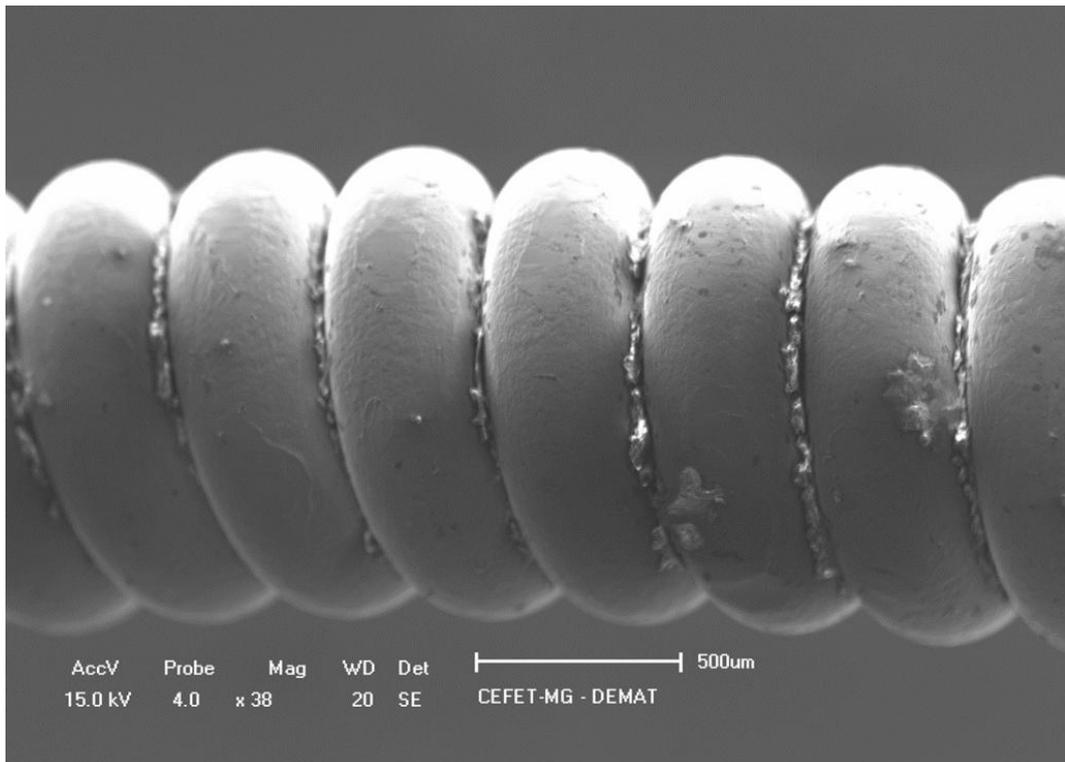


Fonte: Próprio autor.

Durante a análise por EDS, foi produzida uma imagem através do MEV (microscópio eletrônico de varredura) onde foi possível visualizar o acúmulo de algum tipo de resíduo entre os segmentos do enrolamento dos bordões. A imagem apresentada na figura 23 foi produzida

a partir da corda mi bordão utilizada apenas uma vez devidamente limpa com álcool etílico, que pode ser utilizada para se justificar a utilização de um revestimento para proteção das cordas.

Figura 24 – Imagem de uma corda mi bordão produzida com o MEV com ampliação de 38 vezes.



É possível visualizar nitidamente o acúmulo de resíduos entre os segmentos do enrolamento.

Fonte: Próprio autor.

5.6 Análise acústica

A expressão para a qual os parâmetros foram determinados por regressão linear é dada pela equação 4:

$$y = ab^x \quad (4)$$

O tempo de decaimento foi considerado como sendo o tempo necessário para que a amplitude do sinal fosse reduzida a metade do seu valor inicial, sendo esse valor dado pela variável “a” da equação (4). A manipulação algébrica da equação (4) através do operador logaritmo

possibilitou a determinação do tempo de decaimento para as quatro amostras, cujos resultados são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Tempo de decaimento

Amostras	NR	PN	NW	NP
Tempo de decaimento	1,09	1,13	1,15	1,17
Desvio Padrão	0,00	0,10	0,02	0,06

Fonte: Próprio autor

O tempo de decaimento foi diretamente proporcional ao módulo de elasticidade para todas as amostras analisadas, sendo que a amostra NR apresentou maior discrepância para esses dois parâmetros. O desvio padrão para os valores determinados podem ser considerados bem reduzidos, o que confere credibilidade aos resultados produzidos.

Na tabela 5, são apresentados os resultados das medições de intensidade sonora para os parciais harmônicos presentes nos sinais de cada amostra. Os resultados são apresentados como uma média dos três sinais produzidos para os valores acima do limite de intensidade crítico de 0dB, conforme já devidamente justificado na seção 4.3.6 da metodologia. As frequências apresentadas na tabela 5 são apenas uma referência para a ordem dos harmônicos baseada na revisão bibliográfica desse trabalho, já que foram observados alguns desvios nas frequências dos mesmos, sendo esse efeito mais acentuado quanto maior a ordem do harmônico. Devido ao fato desses desvios serem muito semelhantes para todas as amostras, seus efeitos não serão considerados na análise dos resultados.

As amostras PN e NP apresentaram a maior discrepância de afinação (5%) e também foram as que tiveram maior dispersão para os valores de desvio padrão apresentados. Entre os 23 harmônicos considerados a amostra NW foi a que apresentou mais harmônicos com valores máximos entre as médias das quatro amostras, totalizando 11 valores máximos entre harmônicos de mesma ordem. Em relação aos mesmos 23 harmônicos a amostra NR apresentou mais harmônicos com valores mínimos, sendo 9 harmônicos mínimos além de 3 harmônicos abaixo do limite de 0dB. Do 10º ao 23º harmônicos, a amostra NR não apresentou valores mínimos apenas para 4 parciais, o que permite considerar que entre as amostras selecionadas, a amostra NR apresenta menores intensidades para médias frequências

situadas entre 1960 e 4508Hz. Assim o fato de apresentar menores intensidades sonoras na referida faixa frequência, juntamente com um menor módulo de elasticidade, corrobora as teorias de Ching e Chung (2012) e Knight (2014).

Tabela 5 – Intensidade dos harmônicos em dB.

Harmônicos		NW - G3-1		PN - G3-5		NR - G3-2		NP - G3-5	
Ordem	Freq. (Hz)	Média (dB)	DP						
1	196	41,86	0,83	42,08	0,41	41,62	0,58	41,13	0,62
2	392	43,23	0,63	43,04	1,13	44,35	0,15	44,82	1,57
3	588	41,52	0,63	40,73	1,55	40,63	0,24	41,16	1,15
4	784	23,77	0,41	24,15	1,42	22,42	0,72	23,12	3,08
5	980	22,93	0,60	22,30	2,46	23,20	1,13	20,07	3,89
6	1176	22,62	1,62	21,69	1,37	22,95	1,41	27,95	21,64
7	1372	33,29	0,83	32,00	0,68	32,51	0,64	31,56	0,78
8	1568	18,78	0,15	17,23	0,99	17,44	1,01	16,61	2,04
9	1764	19,53	2,32	17,41	3,37	17,64	1,50	16,62	2,70
10	1960	6,14	1,60	8,58	4,54	5,42	2,52	8,11	9,61
11	2156	18,55	1,82	17,07	2,95	18,42	2,40	14,38	4,94
12	2352	2,84	1,45	3,20	3,13	1,85	0,44	1,755	1,49
13	2548	11,96	0,21	10,33	0,70	10,73	1,10	10,81	0,36
14	2744	19,40	0,89	19,17	6,76	13,26	4,87	19,76	2,00
15	2940	16,65	0,52	18,1	6,30	10,19	4,56	18,43	4,32
16	3136	-	-	2,19	0,14	3,22	2,18	2,60	4,06
17	3332	3,79	2,09	1,65	1,97	0,42	-	-	-
18	3528	10,68	0,72	8,31	3,23	5,09	-	5,80	2,83
19	3724	10,46	2,07	5,47	2,91	1,85	3,08	9,97	4,49
20	3920	-	-	3,12	-	-	-	3,25	-
21	4116	-	-	-	-	-	-	-	-
22	4312	2,69	1,70	2,52	0,94	-	-	-	-
23	4508	2,88	0,69	2,21	0,91	0,35	-	2,32	2,24

Ao lado da identificação das amostras está a discrepância percentual de afinação média. Nos parciais acima do 23º harmônico e nos campos onde não estão definidas as médias, não foram observados valores de intensidade superiores ao limite pré-determinado na metodologia do trabalho. Algumas médias foram obtidas a partir de apenas uma medição, pelo mesmo motivo do limite de intensidade já referido, sendo assim, algumas medidas não possuem desvio padrão.

Fonte: Próprio autor.

Knight (2014) relata que quanto menor a rigidez do material da corda, menor o *sustain* e a intensidade do som produzido. O módulo de elasticidade mensurado no trabalho é também uma medida da rigidez do material. O fato de a amostra NR apresentar o menor módulo de

elasticidade, o menor tempo de decaimento e menores intensidades sonoras na faixa de frequência de 1960 a 4508Hz, corroboram a teoria fundamentada no artigo de Knight.

Ching e Chung (2012) afirmam que o tom brilhante dos violinos Stradivari pode estar relacionado ao fato de simplesmente esses instrumentos produzirem energias de alta frequência e Knight (2014) considera que a presença do revestimento polimérico que tem como finalidade a proteção contra corrosão, torna menos brilhante o som produzido pela corda. Os resultados aqui apresentados podem ser utilizados para relacionar e complementar tais considerações, já que a amostra NR que possui um revestimento polimérico apresentou intensidades menores para as frequências situadas na faixa de 1960 a 4508Hz.

As variações de intensidade sonora entre diferentes execuções consecutivas para uma mesma amostra retratam a influência do ataque no sinal produzido. Um melhor controle dessa variável provavelmente produziriam resultados com menores dispersões, otimizando os resultados e viabilizando outras formas de análise. Outro fator importante não considerado foi o tempo de estabilização para a afinação das cordas, o que pode ter refletido nas discrepâncias de afinação observadas.

As amostras NP, NW e PN apresentaram valores relativamente próximos para o módulo de elasticidade, o que somado as fontes de incerteza dos ensaios de tração e acústico podem ter contribuído para a não constatação de uma relação evidente entre o módulo de elasticidade e a intensidade sonora dos parciais harmônicos para essas amostras. Tal fato pode ser reforçado pelas considerações feitas acerca da amostra NR, que apresentou maior discrepância de desempenho e no valor de seu módulo de elasticidade.

A tabela 6 apresenta de forma resumida os resultados de alguns dos ensaios entre os quais foram observadas algumas relações.

Tabela 6 – Resumo dos resultados

ID Amostra	Módulo de elasticidade (Gpa)	Corrosão (%)	Tempo de decaimento (s)	Intensidade dos harmônicos
NR	186,27	3	1,09	mínimos entre 1960 a 4508Hz
NP	207,27	25,5	1,17	reduzida até 2156Hz
NW	204,17	56,5	1,15	mais elevada a partir de 1372Hz
PN	201,29	35,5	1,13	-

Os resultados permitem considerar a existência de uma relação diretamente proporcional entre o módulo de elasticidade e o tempo de decaimento. A amostra NR que apresentou menor módulo de elasticidade foi a que também apresentou menores intensidades na faixa de médias-frequências que estão relacionadas à inteligibilidade do som. A amostra NP com maior módulo de elasticidade teve menores intensidades dos harmônicos em baixas frequências. Os resultados do ensaio de corrosão evidenciam o melhor desempenho da amostra NR.

6 CONCLUSÕES

Através dos resultados apresentados, foi possível caracterizar as quatro amostras selecionadas, evidenciando diferenças entre as mesmas.

A amostra NR foi a que apresentou maior diferença em termos desempenho, com maior resistência à corrosão, menor módulo de elasticidade, menor tempo de decaimento e intensidade dos harmônicos de média frequência. Sendo assim, os resultados apresentados pela amostra NR, podem ser utilizados como referência para trabalhos futuros, já que pode ser constatada a existência de uma correlação entre suas propriedades.

Apesar dos desvios dos resultados apresentados e das referidas fontes de incerteza colocadas durante a discussão dos mesmos, pode ser observada a relação entre o módulo de elasticidade e o tempo de decaimento para todas as amostras. Quanto à intensidade dos harmônicos uma relação direta não pôde ser observada, mas os resultados apresentados pela amostra NR, fornecem indícios e fomentam a continuidade do trabalho para a constatação dessa relação. Além disso, amostras com características mais distintas poderiam ter sido selecionadas, possibilitando a produção de resultados mais discrepantes, possivelmente tornando mais evidente a correlação entre os parâmetros determinados.

As cordas primas da amostra PN comercialmente conhecida como *pure nickel*, não são possuem níquel em sua composição.

Espera-se dar continuidade ao estudo apresentado, desenvolvendo uma metodologia que possibilite a produção de resultados com menores desvios e menos fontes de incerteza, utilizando-se amostras com características mais distintas, o que poderá evidenciar as possíveis correlações aqui consideradas.

REFERÊNCIAS

- ABEMÚSICA. **Pela evolução do mercado**. 2008. Disponível em: <<http://www.abemusica.com.br/informativos/informativo.asp?id=4791>>. Acesso em: 07 abr. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6152: materiais metálicos - ensaio de tração**. Rio de Janeiro, 2002.
- CHING, H; CHUNG, T. D. T. Stradivari violins exhibit formant frequencies resembling vowels produced by females. **Savart Journal**. Jun. 2012.
- COATES, C. **Interpretation of infrared spectra, a practical approach**. Encyclopedia of Analytical Chemistry. 2006.
- DADDARIO. **Hex core string**. Disponível em: <http://www.daddario.com/upload/exp_wire_bass_600X444_35971.jpg>. Acesso em 11 fev. 2014.
- ELIXIRSTRINGS. **Why coated strings**. Disponível em <<http://www.elixirstrings.co.uk/whycoatedstrings/index.html>>. Acesso em 11 fev. 2014.
- FUKS, L. **Som e Forma: entrevista**. [2009]. Instituto Ciência Hoje. Entrevista concedida a Fred Furtado. Disponível em: <<http://cienciahoje.uol.com.br/podcasts/041%20-%20Som%20e%20forma.mp3/view>>. Acesso em: 07 de abr. 2012.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 3. Ed. Rio de Janeiro: LTC. 1994
- GUITAR COAST. **Técnicas de guitarra**. Disponível em: <<http://www.guitarcoast.com/2008/02/tecnicas-de-guitarra.html>>. Acesso em: 15 de out. 2012.
- HENRIQUE, L. L. **Acústica musical**. 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 2007. 1130 p.
- KITTO, K. L. **Materials science in context using design parameters for musical instruments**. 33^{ed} ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference. 2003.
- KNIGHT, T. R. **More than you ever wanted to know about strings**. Disponível em: <http://www.acousticmasters.com/AcousticMasters_Strings2.htm>. Acesso em 30 jan. 2014.
- LIMA, N. F. **Experimentos com o ressonador de Helmholtz**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - IFBahia. Disponível em: <<http://www.ifba.edu.br/fisica/nfl/fge2/RessonadorDeHelmholtz/ExperimentoRessonadorDeHelmholtz.html>>. Acesso em: 17 de outubro de 2012.
- MORAES, R. B. **Análise e síntese de instrumentos musicais de sopro de madeira**. Rio de Janeiro: COPPE/UF RJ, 2007. 136 p.

MUSIC, trades. **Now available for the first time:** Consumer Research. 2011. Disponível em: <<http://www.musictrades.com/consumer.html>>. Acesso em: 07 abr. de 2012.

MÚSICA & MERCADO. **Setor de instrumentos musicai irá crescer 2,62% ao ano até 2016.** Disponível em: <<http://www.musicaemercado.com.br/pagina/3346/ate-2016-setor-de-instrumentos-musicais-ira-crescer-262-por-ano>>. Acesso em: 17 de jan. de 2012.

PATÉ, A; CARROU, J. L; NAVARRET, B. DUBOIS, D; FABRE, D. **A vibro-acoustical and perceptive Study of the neck-to-body Junction of a solid-body electric Guitar.** Acoustics 2012. Paris. 2012

PICKERING, N. C. Elasticity of violin strings. **JCAS**, nov. 1986.

PICKERING, N. C. String tone related quality related to core material. **CASJ**, mai. 1990.

PINHEIRO, F. A. B. **Dar um brilho no som.** Disponível em: <<http://forum.cifraclub.com.br/forum/16/243287/>>. Acesso em: 15 out. 2012.

ROSSING, T. D; MOORE, F. R; WHEELER, P. A. **The science of sound.** 3. ed. São Francisco: Addison Wesley. 2002. 783 p.

THE CORROSION SOCIETY. **NACE TM0169/G31:** standard guide for laboratory immersion corrosion testing of metals. 2012.

THERMODYN. **Coatings e adhesives.** Disponível em: <<http://www.thermodyn.com/products/coatings>>. Acesso em 18 fev. 2014.

TIPLER, P. A; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC. 2009.