

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANAEL PEREIRA FILHO

**ANÁLISE DE MODOS DE FALHA EM COMPÓSITOS DE
CARBONO/EPÓXI SUBMETIDOS A CARREGAMENTOS DE
TRAÇÃO E COMPRESSÃO E MONITORADOS POR
EMISSÃO ACÚSTICA**

Itajubá

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANAEL PEREIRA FILHO

**ANÁLISE DE MODOS DE FALHA EM COMPÓSITOS DE
CARBONO/EPÓXI SUBMETIDOS A CARREGAMENTOS DE
TRAÇÃO E COMPRESSÃO E MONITORADOS POR
EMISSÃO ACÚSTICA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de *Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica*.

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Ancelotti Júnior

Itajubá

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANAEL PEREIRA FILHO

**ANÁLISE DE MODOS DE FALHA EM COMPÓSITOS DE
CARBONO/EPÓXI SUBMETIDOS A CARREGAMENTOS DE
TRAÇÃO E COMPRESSÃO E MONITORADOS POR
EMISSÃO ACÚSTICA**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 20 de fevereiro de 2017, conferindo ao autor o Título de *Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antônio Carlos Ancelotti Júnior
(Orientador)

Prof. Dr. Sebastião Simões da Cunha Júnior

Prof. Dr. Lincoln Cardoso Brandão

Itajubá

2017

DEDICATÓRIA

A minha mãe Edna, pela imensa e incondicional dedicação, amor e carinho na educação e formação dos filhos.

A minha esposa Mônica, por todo seu amor, carinho, companheirismo e especial compreensão durante esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me dar forças para seguir o meu caminho, sempre me concedendo tranquilidade e me direcionando durante todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, Antônio Carlos Ancelotti Júnior, pela orientação dada na execução deste trabalho.

Agradeço a todos os colegas do NTC – Núcleo de Tecnologia em Compósitos, que se mostraram amigos e companheiros durante o período em que trabalhamos juntos.

Agradeço aos técnicos da UNIFEI que contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço a todos que, de alguma forma, puderam contribuir para que este trabalho fosse realizado.

Agradeço a CAPES pela bolsa concedida para a realização do mestrado.

Agradeço também, a todos os integrantes da banca examinadora por aceitarem o convite de participação.

RESUMO

PEREIRA FILHO, A. (2017), Análise de Modos de Falha em Compósitos de Carbono/Epóxi submetidos a Carregamentos de Tração e Compressão e Monitorados por Emissão Acústica, Itajubá, 113 p. Dissertação, Mestrado em Projeto e Fabricação – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Em diversos setores industriais o uso de materiais compósitos tem crescido de forma considerável nos últimos tempos. Um importante desenvolvimento tem sido a utilização de matrizes poliméricas reforçadas com fibras de carbono, para fabricação de próteses de membros inferiores. A indústria da reabilitação está seguindo uma forte tendência de utilizar cada vez mais esta classe de materiais. Entretanto, para se produzir e utilizar componentes feitos com este tipo de material, antes de mais nada, seu comportamento em serviço no que diz respeito ao processo de falhas a que se está sujeito, deve ser muito bem explorado e conhecido. A técnica de Emissão Acústica (também conhecida por EA) atualmente tem sido alvo de vários estudos, e vem atuando como forte aliada na detecção de danos estruturais em materiais compósitos, de forma muito eficaz. Com a utilização desta técnica o início do processo de danos, bem como os mecanismos de sua propagação podem ser investigados e atuar como ferramenta para caracterização de falhas nestes materiais. O presente estudo se propôs a analisar os mecanismos de falha que ocorrem em compósitos de carbono/epóxi quando sujeitos a carregamentos de tração e compressão, através de resultados gerados pela técnica de EA e aplicação de reconhecimento de padrões. Laminados unidirecionais de fibras de carbono pré-impregnado foram fabricados utilizando bolsa de vácuo. As amostras foram fabricadas para testes de tração com orientações a 0° , 90° e $\pm 45^\circ$. Durante os ensaios de tração, cada amostra foi monitorada por EA e os dados foram coletados para posteriormente serem aplicadas técnicas de reconhecimento de padrões através do algoritmo k-médias, para caracterização dos modos de falha de cada amostra ensaiada. Como estudo de caso neste trabalho, foi efetuado o mesmo procedimento descrito para as amostras unidirecionais, objetivando caracterizar os modos de falhas de uma prótese transtibial, também fabricada em CFRP, submetida a cargas de compressão. Durante os testes, todas as amostras tiveram mapeadas suas faixas de amplitude, frequência, energia, tempo de subida e duração, sendo que as amostras unidirecionais também tiveram mapeados seus níveis de carga e instante de início e término de cada modo de falha, identificado de acordo com a metodologia proposta neste trabalho. Os resultados mostraram que cada modo de falha a que o material está sujeito, pode ser mapeado com precisão, e que esta metodologia pode trazer excelentes resultados para a previsão de falhas, inclusive em produtos acabados, fabricados em materiais compósitos.

Palavras chave: Emissão Acústica, reconhecimento de padrões, k-médias, materiais compósitos, modos de falhas, próteses transtibiais.

ABSTRACT

PEREIRA FILHO, A. (2017), Failure Mode Analysis in Carbon Epoxy Composites under Tension and Compression Loads and Acoustic Emission Monitoring, Itajubá, 113 p. Dissertation, Master in Mechanical Engineering - Institute of Mechanical Engineering, Federal University of Itajubá.

In several industrial sectors the use of composite materials has grown considerably in recent times. An important development has been the use of carbon fiber reinforced polymer matrices, for the manufacture of lower limb prostheses. The rehabilitation industry is following a strong trend of increasingly using this class of materials. However, in order to produce and use components made with this type of material, first of all, its behavior in service with regard to the process of failure to which it is subjected, must be very well explored and known. The Acoustic Emission technique (also known as AE) has been the subject of several studies, and has been acting as a strong ally in the detection of structural damage in composite materials, very effectively. With the use of this technique the beginning of the damage process, as well as the mechanisms of its propagation can be investigated and act as a tool for characterization of failures in these materials. The present study proposes to analyze the failure mechanisms that occur in carbon/epoxy composites when subjected to tensile and compression loads, through results generated by the AE technique and pattern recognition application. Unidirectional laminates of pre-impregnated carbon fibers were fabricated using vacuum bag. The samples were manufactured for tensile tests with orientations at 0° , 90° and $\pm 45^\circ$. During the tensile tests, each sample was monitored by AE and the data were collected to later apply standards recognition techniques through the k-means algorithm, to characterize the failure modes of each sample tested. As a case study in this work, we performed the same procedure described for the unidirectional samples, aiming to characterize the failure modes of a transtibial prosthesis, also made in CFRP, subjected to compression loads. During the tests all samples were mapped to their amplitude, frequency, energy, rise time and duration, and the unidirectional samples also mapped their load levels and start and stop times of each failure mode, identified from according to the methodology proposed in this work. The results showed that each failure mode to which the material is subjected can be accurately mapped and that this methodology can yield excellent results for failure prediction, even in finished products made from composite materials.

Keywords: Acoustic emission, pattern recognition, k-means, composite materials, failure modes, transtibial prosthesis.

SUMÁRIO

<u>1 INTRODUÇÃO.....</u>	<u>10</u>
<u>1.1- Considerações Iniciais.....</u>	<u>10</u>
<u>1.2- Objetivos do Trabalho.....</u>	<u>12</u>
<u>1.3- Justificativas.....</u>	<u>12</u>
<u>1.4- Organização do Trabalho.....</u>	<u>13</u>
<u>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</u>	<u>14</u>
<u>2.1- Materiais Compósitos.....</u>	<u>14</u>
<u>2.1.1- Danos em laminados CFRP.....</u>	<u>16</u>
<u>2.2- Ensaio de Emissão Acústica.....</u>	<u>19</u>
<u>2.3- Aplicações do Ensaio de Emissão Acústica.....</u>	<u>21</u>
<u>2.4- Relação entre a Emissão Acústica e os demais métodos.....</u>	<u>22</u>
<u>2.5- Instrumentação da Emissão Acústica (Equipamentos Utilizados na Emissão Acústica).....</u>	<u>23</u>
<u>2.6- Características do Sinal de Emissão Acústica.....</u>	<u>25</u>
<u>2.7- Ondas de Emissão Acústica e Propagação.....</u>	<u>26</u>
<u>2.7.1- Ondas Longitudinais.....</u>	<u>27</u>
<u>2.7.2- Ondas Transversais.....</u>	<u>28</u>
<u>2.7.3- Ondas Superficiais (Ondas de Rayleigh).....</u>	<u>29</u>
<u>2.7.4- Ondas de Lamb.....</u>	<u>30</u>
<u>2.8- Atenuação.....</u>	<u>31</u>
<u>2.9- Parâmetros do Sinal de Emissão Acústica.....</u>	<u>32</u>
<u>2.10- Fontes de Emissão Acústica.....</u>	<u>33</u>
<u>2.11- Localização de Eventos de Emissão Acústica.....</u>	<u>34</u>
<u>2.12- Efeitos Kaiser e Felicity.....</u>	<u>36</u>
<u>2.13- Emissão Acústica em Compósitos Poliméricos.....</u>	<u>37</u>
<u>2.14- Agrupamento de Dados.....</u>	<u>40</u>
<u>2.15- Classificação de Agrupamentos.....</u>	<u>42</u>
<u>2.16- Algoritmo k-médias e Seleção de Parâmetros de Emissão Acústica.....</u>	<u>44</u>
<u>2.17- Silhueta do Agrupamento.....</u>	<u>45</u>
<u>2.18- Medida de Similaridade.....</u>	<u>48</u>
<u>2.19- Ensaio de Líquido Penetrante (LP).....</u>	<u>49</u>
<u>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</u>	<u>51</u>
<u>3.1- Materiais.....</u>	<u>51</u>

3.2- Metodologia Experimental.....	52
3.2.1- Fabricação das Amostras.....	53
3.2.2- Dados de Fabricação das Próteses.....	56
3.2.3- Processo de Corte das Amostras.....	57
3.2.4- Ensaio de Tração.....	59
3.2.5- Ensaio de Compressão.....	60
3.2.6- Equipamento de Emissão Acústica.....	61
3.2.7- Instalação da Emissão Acústica.....	61
3.2.8- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das Amostras Unidirecionais.....	65
3.2.9- Líquido Penetrante (LP) das Próteses Transtibiais.....	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
4.1- Laminado Carbono/Epóxi [90°] ₁₀	67
4.1.1- Dados Resumidos dos Sinais de Emissão Acústica (EA) sob Cargas de Tração.....	67
4.1.2- Cálculo do Número de Agrupamentos através do Algoritmo k-Médias.....	69
4.1.3- Distribuição de intervalos de parâmetros de Emissão Acústica.....	71
4.1.4- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das Amostras 90° (FN).....	75
4.2- Laminado Carbono/Epóxi [0°] ₁₀	76
4.2.1- Dados Resumidos dos Sinais de Emissão Acústica (EA) sob Cargas de Tração.....	76
4.2.2- Cálculo do Número de Agrupamentos através do Algoritmo k-Médias.....	78
4.2.3- Distribuição de intervalos de parâmetros de Emissão Acústica.....	80
4.2.4- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das Amostras 0° (FZ).....	84
4.3- Laminado Carbono/Epóxi [(±45°) ₂] _s	86
4.3.1- Dados Resumidos dos Sinais de Emissão Acústica (EA) sob Cargas de Tração.....	86
4.3.2- Cálculo do Número de Agrupamentos através do Algoritmo k-Médias.....	88
4.3.3- Distribuição de intervalos de parâmetros de Emissão Acústica.....	90
4.3.4- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das Amostras ±45° (FQ).....	94
4.4- Prótese Transtibial (Prótese do Pé).....	97
4.4.1- Dados Resumidos dos Sinais de Emissão Acústica sob Cargas de Compressão na Região do Calcâneo da Prótese Transtibial.....	98
4.4.1.1- Carga variando de 0 a 260 kg.....	98
4.4.1.1.1- Distribuição de intervalos de parâmetros de Emissão Acústica.....	100
4.4.1.2- Carga variando de 0 a 500 kg.....	103
4.4.1.2.1- Distribuição de intervalos de parâmetros de Emissão Acústica.....	105
4.4.2- Análise das Falhas encontradas na Região do Calcâneo na Prótese.....	107

4.4.3- Planar (Região total do solado = solado frontal + calcanhar).....	111
4.4.3.1- Carga de 0 a 260 Kg.....	111
4.4.3.1.1- Distribuição de intervalos de parâmetros de Emissão Acústica.....	112
4.4.3.2- Carga de 0 a 500 kg.....	115
4.4.3.2.1- Distribuição de intervalos de parâmetros de Emissão Acústica.....	117
4.4.4- Análise das Falhas encontradas na Região Planar (Região Total do Solado) da Prótese	
.....	119
4.4.5- Ensaio de Líquido Penetrante (LP) nas Próteses Transtibiais.....	121
4.4.5.1- Ensaio de Líquido Penetrante (LP) no Componente do Calcanhar.....	121
4.4.5.2- Ensaio de Líquido Penetrante (LP) no Componente do Solado.....	123
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	125
5.1- Conclusões.....	125
5.2- Sugestões para Trabalhos Futuros.....	129
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130

1 INTRODUÇÃO

1.1- Considerações Iniciais

Compósitos poliméricos apresentam como algumas de suas vantagens baixa densidade e alta resistência mecânica. Devido a estas características, eles têm sido cada vez mais utilizados em vários segmentos, incluindo os setores aeroespacial, automotivo, de transporte, esportivo, além de outros (WANG *et al.*, 2015; MOUTRILLE *et al.*, 2009).

Materiais compósitos também têm sido identificados como uma nova classe de materiais utilizados para a fabricação de próteses. Um importante desenvolvimento tem sido a utilização de matrizes poliméricas reforçadas com fibras de carbono para fabricação de próteses de membros inferiores. A indústria da reabilitação está seguindo uma forte tendência de utilizar cada vez mais esta classe de materiais, devido a serem mais fáceis de trabalhar durante o processo de fabricação, além de possuírem maior durabilidade, e principalmente devido a sua leveza, requerendo menores gastos com energia durante as atividades físicas, fatores estes que são extremamente importantes na concepção de uma prótese.

Como pode-se perceber, o espectro de aplicações coberto pelos compósitos, e em particular pelos compósitos de matriz polimérica, abrange desde empregos não estruturais, até aplicações com alto comprometimento mecânico como, por exemplo, na empenagem vertical de grandes aviões de transporte de passageiros que é fabricada em epóxi reforçado por fibras de carbono e/ou aramida (GIBSON, 1994; CHAWLA, 1987; MCCARTY, 1993).

Qualquer que seja a aplicação desejada, a estrutura ou o componente estará submetida a esforços que podem resultar em danos que levem o material a falhas prematuras. Portanto, para se produzir e utilizar componentes feitos com compósitos, o conhecimento sobre o comportamento dos danos a que estará sujeito, deve ser muito bem explorado e conhecido para evitar falhas durante a vida em serviço (KEMPF *et al.*, 2014).

Neste contexto, a técnica de Emissão Acústica (EA) atualmente tem sido alvo de vários estudos, e vem atuando como forte aliada na detecção de danos estruturais em materiais

compósitos, de forma muito eficaz. Fenômenos de EA são referenciados a ondas elásticas geradas pela liberação de energia mecânica dinâmica, portanto o método de EA é uma técnica não-destrutiva totalmente capaz de determinar micro danos durante um processo de falha. (SURGEON; WEVERS, 1999; SACHSE *et al.*, 1991).

Com a utilização desta técnica, além do início do processo de danos, os mecanismos de sua propagação podem ser investigados e atuar como ferramenta para caracterização dos danos nestes materiais.

No entanto, as técnicas de EA, precisam ser adaptadas por conter características de propagação de ondas mais complexas (PAGET, 2009), causadas pela natureza ortotrópica dos materiais compósitos, e permitir a identificação de uma maior variedade de modos de falha.

Mostra-se que, num processo de falha com uma condição de medição idêntica, os sinais de EA associados com o mesmo mecanismo de falha são semelhantes, mas os sinais provenientes de diferentes mecanismos de falha são distintamente diferentes. Assim, é possível discriminar os tipos de falhas através da análise de similaridade dos sinais de EA (YANG *et al.*, 2015).

O presente estudo propõe-se a analisar os mecanismos de falha que ocorrem em compósitos de carbono/epóxi sujeitos a carregamentos de tração e compressão, através da análise dos resultados gerados por técnicas de reconhecimento de padrões utilizando-se de aplicação de métodos de similaridade de sinais de EA.

O algoritmo k-médias foi utilizado como ferramenta para a aplicação do reconhecimento de padrões utilizado neste trabalho. Este algoritmo é uma técnica iterativa que tem como objetivo particionar um conjunto de dados em grupos separados. Estes grupos são portanto, correlacionados com os mecanismos de danos do material que se está analisando, e confrontados com outras técnicas de ensaios não destrutivos para validação dos resultados obtidos.

1.2- Objetivos do Trabalho

O Objetivo Geral deste trabalho é analisar os modos de falha de compósitos de fibra de carbono/epóxi submetidos a cargas de tração e compressão, com base em dados obtidos pela técnica de EA, utilizando o algoritmo k-médias como ferramenta para a aplicação do reconhecimento de padrões e agrupamento de dados.

Como objetivos específicos pode-se mencionar os seguintes:

- ✓ Verificar quais parâmetros de aquisição de sinais de EA terão maior influência na análise e caracterização dos modos de falha apresentados para o compósito de carbono/epóxi;
- ✓ Correlacionar os parâmetros dos sinais gerados nos ensaios de EA com os mecanismos/modos de falha associados aos esforços de tração aplicados a espécimes fabricados em compósitos unidirecionais de carbono/epóxi com diferentes orientações de fibra;
- ✓ Correlacionar os parâmetros dos sinais gerados nos ensaios de EA com os mecanismos/modos de falha associados aos esforços de compressão aplicados a uma prótese transtibial fabricada em material compósito CFRP (do inglês *Carbon Fiber-Reinforced Polymer – Polímero Reforçado com Fibra de Carbono*);

1.3- Justificativas

- ✓ O estado da arte nos testes mecânicos de materiais compósitos tem apenas limitado poder explicativo sobre a evolução de danos até a falha final;

- ✓ A técnica de EA se encontra bem fundamentada em materiais isotrópicos, porém em materiais compósitos, principalmente no Brasil, ainda existe necessidade de maiores estudos/experimentos;
- ✓ Melhoria da confiabilidade e da segurança voltados para a utilização de próteses transtibiais fabricadas em compósitos de carbono/epóxi;
- ✓ Carência de informações, relacionadas a aplicação de metodologias similares, em produtos finais, fabricados em compósitos.

1.4- Organização do Trabalho

Este trabalho foi estruturado como a seguir:

- ✓ No Capítulo 2: Revisão Bibliográfica - é feita uma apresentação sobre os tipos básicos de falhas a que os compósitos estão sujeitos, além do uso da técnica de emissão acústica para detecção de falhas em compósitos, procurando abordar seus princípios, aplicações, a utilização do agrupamento de dados e do algoritmo k-médias como ferramenta para classificação e obtenção de falhas para estes materiais.
- ✓ No Capítulo 3: Materiais e Métodos – são apresentados os materiais e a metodologia utilizada na execução deste trabalho.
- ✓ No Capítulo 4: Resultados e Discussões – são apresentados os resultados e as discussões envolvendo estes resultados.
- ✓ No Capítulo 5: Conclusões - são apresentadas as conclusões dos resultados obtidos no Capítulo 4.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Materiais Compósitos

Compósitos, especialmente compósitos com base de resina tem muitas vantagens, incluindo baixa densidade e alta resistência mecânica. Como tal, eles têm sido largamente utilizados numa variedade de campos, incluindo aeroespacial, automotiva, transporte e esportes (WANG *et al.*, 2015; HART-SMITH, 1973; MOUTRILLE *et al.*, 2009).

Materiais compósitos são materiais constituídos por duas ou mais fases que exibem uma proporção significativa de propriedades das fases que o constituem, de forma a obter um desempenho superior se comparado a cada material constituinte de forma individual (CALLISTER, 2007).

Segundo Silva (2014) estruturalmente os compósitos são formados por uma matriz e um reforço. A matriz, geralmente é composta por um material com tenacidade e ductilidade maiores e resistência mecânica e rigidez menores. O reforço, por outro lado, é formado por um material mais rígido e resistente, porém, com menores propriedades relativas à tenacidade e ductilidade. Em virtude de interações químicas ou outros efeitos do processo, é verificada uma fase adicional, denominada interface, responsável pela transferência de cargas das fibras para a matriz. A Figura 2.1 mostra a estrutura resultante do material compósito, bem como cada componente utilizado na sua formação.



Figura 2.1: Composição do material compósito.

As propriedades dos compósitos, são funções das propriedades das fases constituintes, de suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa. A geometria da fase reforço

significa a forma e o tamanho das partículas, assim como a distribuição e orientação das mesmas (CALLISTER, 2007).

Estes materiais podem ser classificados de acordo com o tipo de matriz, com o tipo de material de reforço, com a distribuição do reforço e também sua orientação, de acordo com as propriedades mecânicas e também com a forma de processamento a que são submetidos (BOWER, 1992).

O foco deste trabalho é dirigido a compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de carbono, também referenciado como compósito polimérico reforçado com fibras de carbono (CFRP, do inglês *Carbon Fiber-Reinforced Polymer – Polímero Reforçado com Fibra de Carbono*), o qual tem sido bastante utilizado em diversos setores industriais devido às suas elevadas propriedades de resistência, durabilidade, além de suas propriedades estruturais.

As propriedades de uma resina epóxi são vastamente diferentes das fibras de carbono. Daí, as propriedades de um compósito de carbono/epóxi podem ser separadas em propriedades no domínio da matriz e no domínio da fibra. Muitas das importantes propriedades de um compósito são determinadas pela matriz. A matriz transfere cargas internamente para todas as fibras, determina a temperatura máxima de trabalho, suporta fibras sob compressão e oferece resistência ao crescimento de danos (REINHART, 1998). Além disso, a matriz oferece tolerância ao cisalhamento interlaminar e ao impacto (KUNAR *et al.*, 2002; NUTT, 2001). A propriedade no domínio fibra é a resistência à tração (NUTT, 2001). Daí, a matriz domina as propriedades transversais e compressivas, mas a fibra domina as propriedades de tensão axial.

Segundo Hergenrother (2000) e Costa *et al.*, (2001) o termo pré-impregnado (também conhecido como prepreg) é aplicado a todo produto intermediário, o qual já vêm pronto para moldagem, podendo ser definido como sendo uma composição de fibras de reforço com um determinado polímero, termorrígido formulado ou termoplástico, em uma particular fração em massa.

De acordo com Hergenrother, (2000) e Jenninger, *et al.* (2000) o pré-impregnado oferece uma combinação de consistência e processabilidade de produto, isto pela quantidade controlada de resina, no entanto tem como requisito a aplicação de vácuo e pressão durante a etapa de cura. As matérias-primas básicas para se produzir pré-impregnados são a matriz polimérica e as fibras de reforço, que podem ser na forma de tecido ou fitas unidirecionais. A fibra de carbono é um dos reforços de maior módulo e resistência disponíveis para aplicações

estruturais. Já a resina epóxi termorrígida utilizada no pré-impregnado vem com um sistema conhecido como estágio B, que é um sistema que já vem pré-catalizado.

Os pre-impregnados são desenvolvidos para transpor um dos aspectos mais complicados da manufatura em materiais compósitos: a impregnação do reforço com a resina, o que torna mais complexo à medida que a viscosidade aumenta. Impregnações imperfeitas podem levar à fibras secas e aprisionamento de ar, deixando vazios no produto final, o que afeta significativamente suas propriedades mecânicas (REINFORCED PLASTICS, 2003).

2.1.1- Danos em laminados CFRP

Como o foco deste trabalho é tentar correlacionar dados de sinais gerados por EA com os modos de falha associados a carregamentos de tração/compressão em amostras de CFRP, vamos apresentar as fontes potenciais de danos a que os experimentos estarão sujeitos.

Ruptura de fibra. Em laminados CFRP, fibras de carbono usualmente mostram o máximo de tensão pressupondo que a falha do laminado usualmente virá a partir da ruptura da fibra. Quando carregamento é aplicado ao longo da direção da fibra em um compósito que contém camadas a 0°, as fibras individuais falharão em seu ponto mais fraco. A concentração de carga na fibra adjacente irá rompê-la, aumentando assim a probabilidade da segunda fibra romper. Este evento aumentará a probabilidade de fibras adicionais se romperem e assim por diante (MATERIALS HANDBOOK, 2002). Segundo Tita (2003) os modos de ruptura da fibra dependem do diâmetro e comprimento da fibra, fração volumétrica, orientação das fibras na lâmina, etc. Todavia, os seus modos de ruptura estão associados também aos tipos de cargas aplicadas. Cargas de compressão podem induzir a falha da fibra através de microflambagem ou cisalhamento das mesmas. Em contrapartida, cargas de tração podem provocar ruptura das fibras, o que dependerá, de forma determinante do grau de adesão entre as fibras e a matriz polimérica.

Descolamento entre a Fibra e a Matriz. Este é o descolamento interfacial entre fibras e a matriz (conforme mostrado pela Figura 2.2). Embora a escala de descolamento entre fibra-matriz seja muito pequena, isto induz a uma concentração de tensões na matriz vizinha, tornando possível o crescimento de uma trinca grande (MATERIALS HANDBOOK 2002).

Esta é a razão porque as macrotrincas tais como trincas transversais, sempre se iniciam com um descolamento interfacial acumulativo. Este é o principal mecanismo, o cisalhamento das camadas sob carregamento nos quais a difusão dos danos podem multiplicar durante um longo período sem percorrer em direção a trinca transversal. No que diz respeito aos modos de falha interfaciais, tem-se que os mesmos dependem da interação físico-química entre a fibra e a matriz. Portanto, compósitos que possuem uma frágil interação fibra-matriz sofrerão a quebra interfacial, proporcionando o descolamento entre a fibra e matriz (*debonding*) como mostra a Figura 2.3 (mecanismo (3)). Entretanto, para os compósitos com uma forte interação, haverá possivelmente o rompimento da fibra que acarretará assim o mecanismo de *Pull-Out* (conforme Figura 2.3 - mecanismo (1)), que se caracteriza pelo arrancamento da fibra de dentro da matriz, o que geralmente ocorre após a propagação de uma fissura. Antes da ocorrência do *Pull-Out* pode haver a formação do mecanismo de *Fiber-Bridging* (mecanismo (2)), desde que o compósito possua fibras frágeis com alta resistência, matrizes dúcteis e interface forte. Neste caso, a trinca se propaga pela matriz, e a fibra forma uma ponte interligando as duas superfícies da matriz fraturada. Em contrapartida, a fronteira da trinca dá origem a regiões com concentração de tensão até mesmo fora do plano de propagação. A região localizada à frente da trinca, que está se propagando, concentra altas tensões, podendo também levar à *Fratura da Fibra* (4) devido a sua alta fragilidade, ou à *Danificação da matriz* (5) (HULL, 1981).

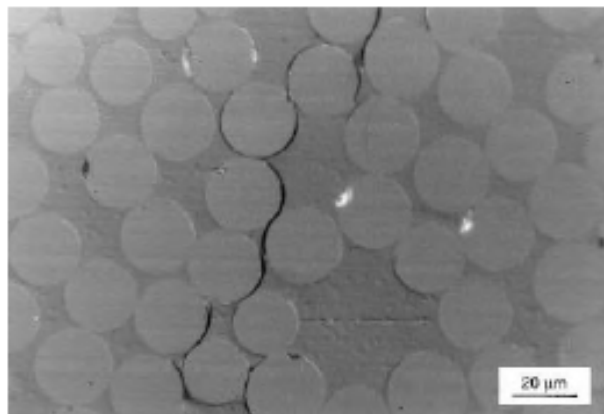


Figura 2.2: Descolamento fibra-matriz (GMSTEDT; SJÖGREN, 1999).

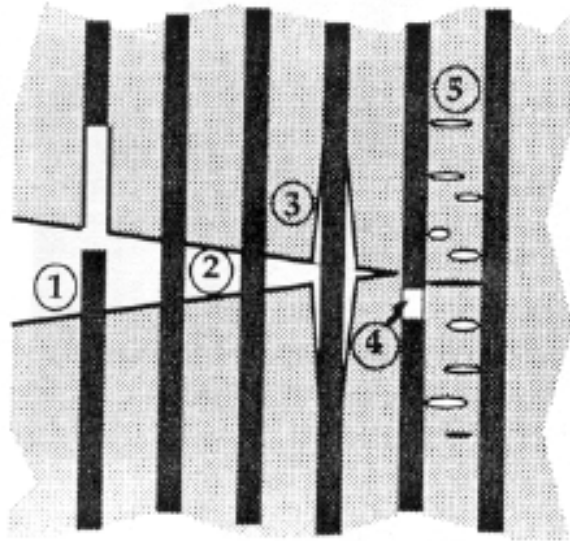


Figura 2.3: Mecanismos de danos intralaminares em CPR (Compósitos Poliméricos Reforçados) (ANDERSON, 1995).

Microtrincas na matriz. Laminados CFRP tem alta resistência e dureza na direção longitudinal. Mas as propriedades nas direções transversais são geralmente baixas. Por esta razão, microtrincas na matriz ao longo das fibras são facilmente desenvolvidas (MATERIALS HANDBOOK, 2002). Estas trincas são usualmente iniciadas por defeitos (tais como vazios e descolamento interfacial) em uma determinada camada. Quando o carregamento é aplicado na direção transversal, estas trincas podem crescer transversalmente à espessura da camada e correndo paralelamente em direção às fibras naquela camada. Segundo Tita (2003) com relação ao modo de ruptura da matriz, a literatura tem mostrado que de maneira geral, independente do tipo de carregamento aplicado, a ruptura da matriz ocorre na vizinhança de uma fibra rompida ou na vizinhança de um vazio criado por uma bolha de ar durante a moldagem. Essas regiões são concentradoras de tensão e tendem redistribuir os carregamentos para o volume de resina mais próximo, levando muitas vezes à fratura precoce da matriz.

Delaminação interlaminar. A delaminação interlaminar é gerada por uma trinca no plano da interface entre camadas vizinhas em um laminado. Em laminados *cross-ply* (laminado cujo ângulo do reforço de cada lâmina alterna entre 0° e 90°) sob carregamentos de tração, é geralmente iniciado por uma trinca transversal (Figura 2.4). Em um $[+45/-45]_{ns}$ laminado, a

delaminação é direcionada por uma tensão de cisalhamento no plano da interface (MATERIALS HANDBOOK, 2002).

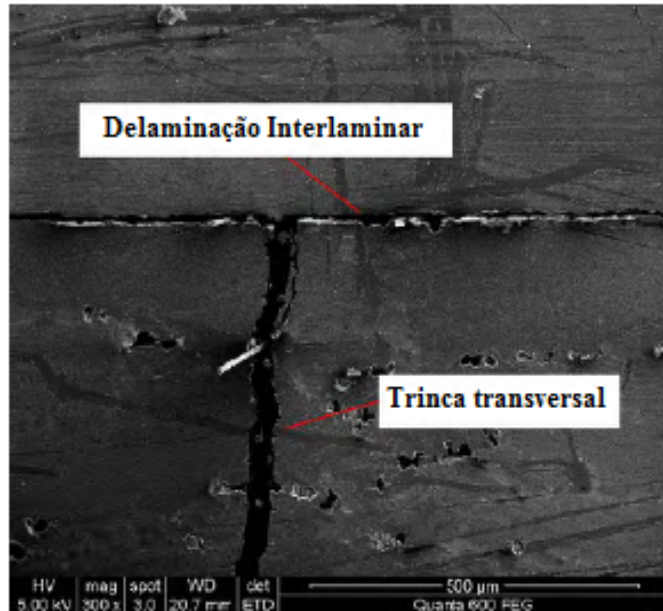


Figura 2.4: Micrografia (MEV) de uma trinca transversal e delaminação interlaminar em um laminado *crossply* CFRP (ZHOU, 2015).

Várias técnicas de ensaios não-destrutivos podem ser utilizadas para monitoramento de danos em materiais compósitos. Este trabalho aborda a técnica de emissão acústica, por se tratar de uma técnica que consegue, além da detecção dos danos em sua fase inicial, detectar também os mecanismos de propagação destes danos.

2.2- Ensaio de Emissão Acústica

Emissão Acústica (EA) é o fenômeno em que ondas elásticas transientes são geradas por uma rápida liberação de energia a partir de fontes localizadas em um material ensaiado. Embora emissão acústica seja a denominação mais comum, o fenômeno também é

denominado por emissão de ondas de tensão, atividade microssísmica, ou emissão acústica com outros qualificativos (ABENDI, 2003).

Emissão Acústica (EA - é algumas vezes chamada de emissão de onda de tensão) é o termo utilizado para descrever o resultado de ondas acústicas de tensão quando a energia é desprendida rapidamente devido à ocorrência de microalterações estruturais em um material (COLE, 1985).

Pode-se também definir EA, como o fenômeno que ocorre quando uma descontinuidade é induzida a “excitações” mecânicas e/ou térmicas. Essa região que contém descontinuidades em um material é considerada uma região de concentração de tensões que, quando recebe um estímulo origina uma redistribuição das tensões localizadas. Por consequência há uma liberação de ondas de tensões na forma de ondas mecânicas transientes (SILVA, F.E.,2002).

Existem relatos do uso da EA para detectar danos, em 6500 AC, onde artesãos eram conhecidos por escutar sons audíveis durante o resfriamento das suas cerâmicas, significando falha estrutural. Embora tenha havido muitas referências feitas a artesãos que usam sons para identificar danos, a primeira utilização documentada do uso da EA foi feita no século VIII, onde o alquimista árabe Jabir Ibn Hayyan relatou que estanho e ferro emitiam sons diferenciados durante o seu forjamento (GAUTSCHI, 2002). Na atualidade, estudos de testes de EA são reconhecidos como tendo se iniciado em 1950 quando Joseph Kaiser escreveu sua tese de doutorado: "Resultados e conclusões a partir de medições de som em Materiais Metálicos por tração" (DROUILLARD, 1996).

A EA tem o potencial de detectar e localizar fontes de danos continuamente e de forma não destrutiva (MARIN-FRANCHA *et al.*, 2002). Durante a propagação de trincas em um material, estando este sujeito a cargas de tensão, uma determinada quantidade de energia que é transportada na forma de ondas mecânicas de tensão é liberada, a uma frequência e uma velocidade determinadas. Como pode ser observado na Figura 2.5, estas variações são então captadas por sensores piezelétricos, acoplados de forma estacionária na estrutura a qual está sendo efetuada a análise, que as convertem em uma tensão elétrica, sendo portanto amplificada e processada como um sinal de EA (POLLOCK, 1989).

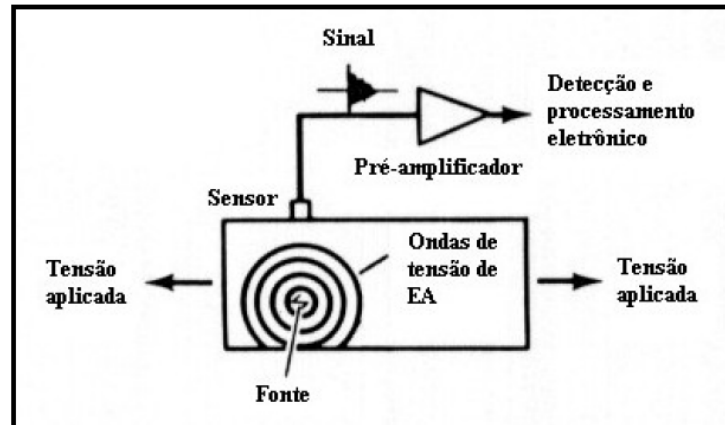


Figura 2.5 – Princípio básico do método de EA (POLLOCK, 1992).

2.3- Aplicações do Ensaio de Emissão Acústica

O ensaio de Emissão Acústica (EA) pode ser aplicado em várias situações, dentre as quais pode-se citar (PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, 2007):

- ✓ No comportamento de materiais tais como metais, cerâmicas, compósitos e concreto, podem ser detectados propagação de trincas, escoamento, fadiga, corrosão, fratura de fibra e delaminação;
- ✓ Nos testes não-destrutivos durante processos de fabricação, podem ser detectadas transformação de fase em metais e ligas (por exemplo transformações martensíticas), falhas como porosidades e inclusões, deformações durante processos de laminação, forjamento e extrusão por exemplo e também podem ser detectados defeitos (inclusões, trincas e falta de penetração) durante os processos de soldagem;
- ✓ No monitoramento contínuo de estruturas, tais como: estruturas metálicas;
- ✓ Em testes periódicos de vasos de pressão, tubulações, pontes, cabos, etc.;
- ✓ Na detecção de vazamentos;

- ✓ No Setor Químico e Petroquímico: utilizado em tanques de armazenamento, vasos de reatores, plataformas *offshore*, dutos, sondas petrolíferas, válvulas, etc;
- ✓ Em utilidades elétricas, tais como vasos de reatores nucleares, tubulações, geradores de vapor, isolantes cerâmicos, transformadores, instrumentos aéreos;
- ✓ Em aeronaves e naves espaciais podem ser detectadas trincas de fadiga, corrosão, falhas em estruturas de compósito;
- ✓ Em eletrônica podem ser encontradas partículas soltas em componentes eletrônicos, falhas em ligações elétricas, etc.

2.4- Relação entre a Emissão Acústica e os demais métodos

Devido principalmente a duas questões, pode-se dizer que a Emissão Acústica (EA) se diferencia dos demais ensaios não-destrutivos. A primeira questão é que na EA o sinal tem origem no próprio material, e a segunda questão é que a EA detecta movimento enquanto a maioria dos outros métodos detectam descontinuidades geométricas (PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, 2007).

A Tabela 2.1 faz uma comparação entre a EA e demais métodos de END's (Ensaio Não-Destrutivo), como exemplo desses métodos pode-se mencionar a técnica de inspeção por líquido penetrante, que de acordo com Andreucci (2008) é um método de ensaio não-destrutivo desenvolvido especialmente para a detecção de descontinuidades superficiais, e que ainda estejam abertas na superfície do material. Outra técnica que a ser comparada com a EA seria o ensaio por ultrassom (US), que também é um ensaio não-destrutivo, onde um feixe sônico é introduzido no material a ser inspecionado por meio de um sensor, também conhecido como transdutor, que por sua vez, é acoplado ao aparelho de US, com o objetivo de detectar descontinuidades internas e superficiais (SANTIM, 2003).

Pode-se resumir na Tabela 2.1, as conseqüências para estas fundamentais diferenças.

Tabela 2.1: Características da emissão acústica quando comparada aos demais métodos de ensaios não-destrutivos

Emissão Acústica	Demais Métodos de END's
Detecta movimento de defeitos	Detecta a forma geométrica dos defeitos
Necessita de estímulo externo	Não necessita de estímulo externo
Cada carga é única	Admite repetitividade
Mais sensível ao material	Menos sensível ao material
Menos intrusivo na planta/processo	Mais intrusivo na planta/processo
Necessita de acesso somente para instalação dos sensores	Necessita de acesso em toda a área a ser inspecionada
Testa toda a estrutura de uma única vez	Efetua varredura de regiões/áreas em sequência
Principal Problema encontrado: ruído	Principal problema encontrado: geometria da estrutura/peça a ser inspecionada

Fonte: PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION (2007)

2.5- Instrumentação da Emissão Acústica (Equipamentos Utilizados na Emissão Acústica)

Dependendo da estrutura a ser inspecionada e da complexidade envolvida na realização do ensaio, existe uma enorme variedade de formas e capacidades dos equipamentos de Emissão Acústica (EA). No entanto, alguns componentes são comuns a todos os equipamentos para realização de inspeções que utilizem EA, tais como: sensores, pré-amplificadores, amplificadores e filtros. A Figura 2.6 apresenta o diagrama de blocos de um sistema de EA com 4 canais.

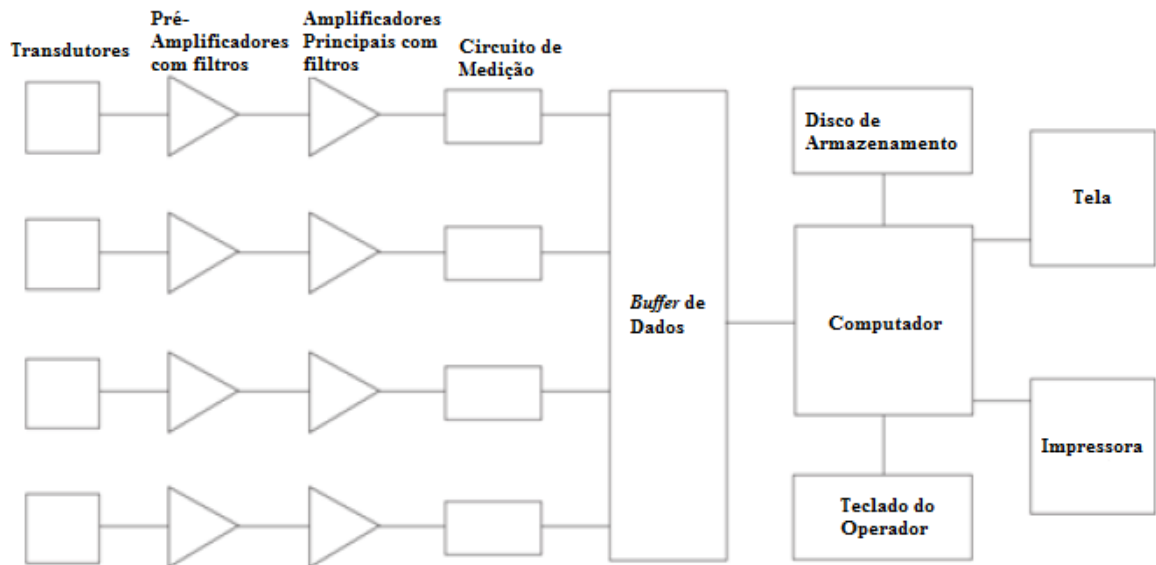


Figura 2.6: Representação de um sistema básico de EA com 4 canais (NDT, 2015).

A função dos sensores é a detecção de pequenos movimentos mecânicos da superfície da estrutura durante o teste e sua conversão em sinais elétricos. Normalmente os sensores utilizados para detectar sinais de emissão acústica são os piezelétricos, devido ao seu custo mais acessível. A Figura 2.8 mostra o sensor modelo R15I fornecido pela Physical Acoustics e a Figura 2.7 mostra os componentes internos que fazem parte de um sensor piezoelétrico. A piezeletricidade é definida como um fenômeno que alguns materiais possuem em gerar uma tensão elétrica quando submetidos a uma deformação e, como reação, se deformam quando um potencial elétrico é aplicado. A frequência de ressonância de um sensor é identificada pela frequência onde uma maior resposta em relação a amplitude ocorre (SOARES, 2008).

Para que haja uma compensação de eventuais perdas, a partir dos cabos até os pontos (instrumentos) de processamento, determinados sensores piezoelétricos apresentam pré-amplificadores embutidos em seus cabeçotes.

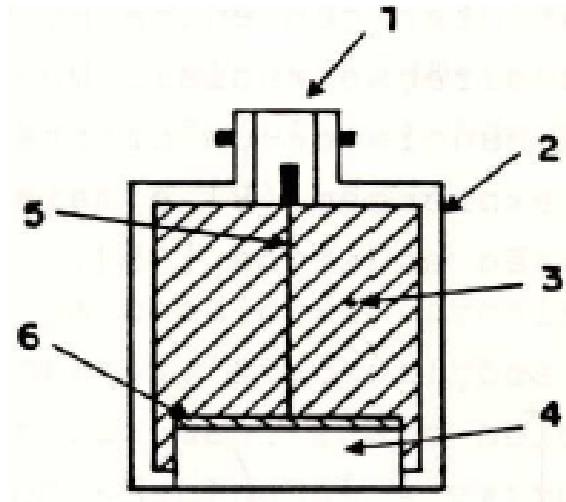


Figura 2.7: Componentes de um sensor de EA: (1) conector; (2) carcaça; (3) material de amortecimento; (4) cristal piezelétrico; (5) condutores e (6) eletrodos (CAMERINI, 1990).



Figura 2.8: Sensor de EA modelo R15I da Physical Acoustics (NICÁCIO, 2010).

2.6- Características do Sinal de Emissão Acústica

A Emissão Acústica (EA) como método de análise e eventual diagnóstico de uma estrutura compreende, de forma essencial, a detecção das ondas elásticas, que são geradas durante o carregamento e a sua conseqüente conversão em sinais elétricos. Estas ondas

apresentam uma geometria esférica e se propagam através da estrutura até chegarem a sua superfície, dando lugar a ondas de superfície – ondas Lamb ou ondas de Rayleigh – podendo ser então captadas por sensores apropriados (FERNANDES, 1987).

“A emissão acústica produz um sinal do tipo senoidal amortecido, de duração extremamente curta. Cada sinal é denominado um pulso ou, mais comumente, um evento.” (ALLEVATO e RAMOS, 1980).

De acordo com Soares (2001) um sinal ideal de EA pode ser descrito conforme a Equação (2.1), a qual descreve a forma de onda de tipo senoidal amortecida, com decaimento exponencial. Na Figura 2.9 é apresentado um típico sinal produzido segundo esta equação.

$$V = V_0 \cdot \exp(-B.t) \cdot \sin(w.t) \quad (2.1)$$

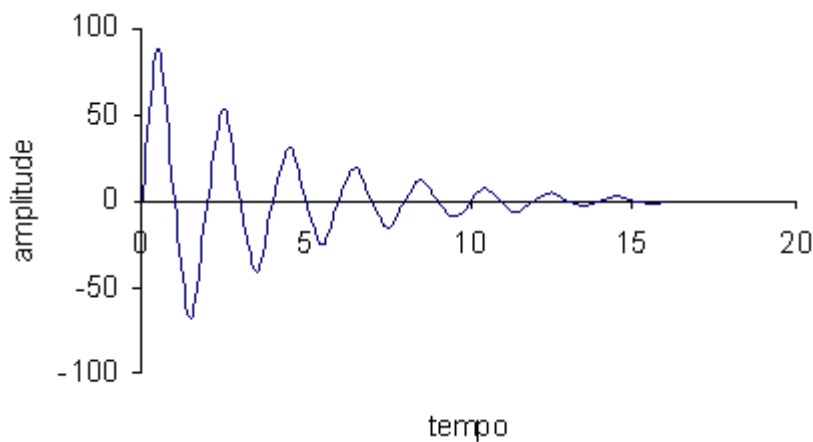


Figura 2.9– Sinal típico de emissão acústica (SOARES, 2001).

2.7- Ondas de Emissão Acústica e Propagação

Quando um átomo é deslocado de sua posição de equilíbrio pela ação de uma força externa, ele gera um desequilíbrio de forças em relação aos seus vizinhos que possuem uma tendência a restituí-lo à sua posição original. Esta situação provoca o deslocamento de átomos

vizinhos gerando então uma onda, também chamada oscilação, que se propaga em todo o material. A amplitude, a velocidade e os modos de vibração diferem nos sólidos, líquidos e gases, devido justamente as diferenças na distância média entre as partículas em cada caso. Assim as ondas terão maior velocidade em sólidos e menor velocidade em gases (JAQUES, 2009).

Existe uma relação entre a velocidade da onda em um sólido, o seu comprimento de onda e a frequência da onda. Como na maioria dos casos, a velocidade da onda no material não varia, frequências maiores geram comprimento de ondas menores, e frequências menores estão associadas a comprimentos de ondas maiores.

A Equação 2.2 está de acordo com o que foi relatado no parágrafo anterior:

$$V = \lambda \cdot f \quad (2.2)$$

Onde: V é a velocidade (em m/s), f é a frequência (em Hertz) e λ é o comprimento da onda (em m) (JAQUES, 2009).

2.7.1- Ondas Longitudinais

As ondas longitudinais também são conhecidas como ondas de compressão, e tem a característica de se propagarem em um corpo na forma de uma sequência de compressões e rarefações nas quais as partículas que transmitem a onda vibram nas mesmas direções em que ocorre o deslocamento da onda. Este tipo de onda pode se propagar nos sólidos, líquidos e gases. São as mais velozes dentre os tipos de onda (JACQUES, 2009). A Figura 2.10 mostra o esquema das ondas longitudinais evidenciando em a) a oscilação de rarefação e compressão da partícula e em b) é mostrado a Amplitude do deslocamento da partícula em função da distância de propagação.

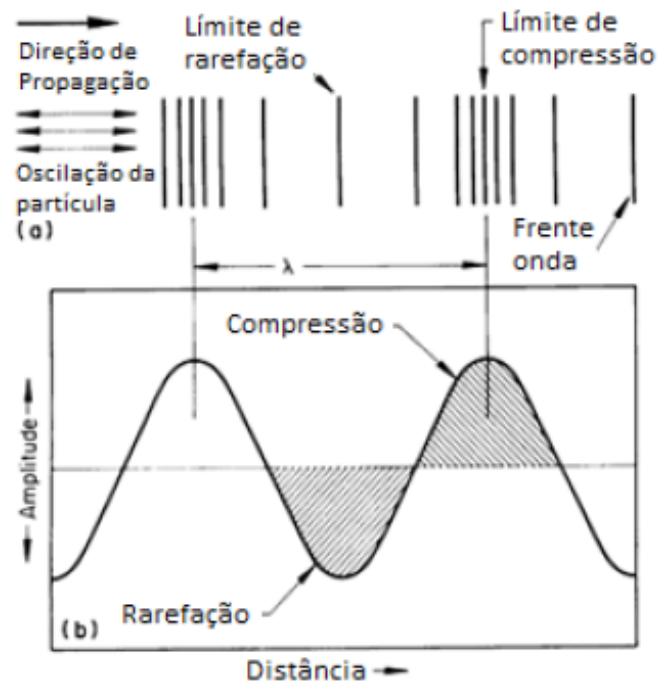


Figura 2.10: Esquema das ondas Ultrassônicas Longitudinais (POLLOCK, 1989).

2.7.2- Ondas Transversais

Nas ondas transversais as partículas vibram de forma perpendicular a direção de propagação da onda. Esta condição é mostrada pela Figura 2.11. Uma diferença entre as ondas longitudinais e transversais, é que esta última não pode se propagar em líquidos e gases. Sua velocidade de propagação fica em torno de 55% da velocidade longitudinal para um mesmo material (JACQUES, 2009).

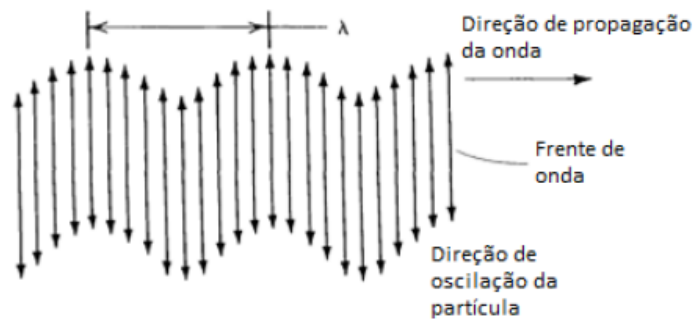


Figura 2.11: Esquema das ondas transversais, o comprimento da onda λ é a distância correspondente a um ciclo completo (POLLOCK, 1989).

2.7.3- Ondas Superficiais (Ondas de Rayleigh)

Este tipo de onda se propagam em superfícies planas e curvas, ligadas de um lado, por fortes forças elásticas de um material sólido e por outro lado por forças elásticas mais fracas, como por exemplo moléculas de um gás, conforme mostrado na Figura 2.12 (MEINL, 2014). A velocidade desse tipo de onda é de aproximadamente 90% da velocidade de uma onda transversal para um mesmo material (JACQUES, 2009).

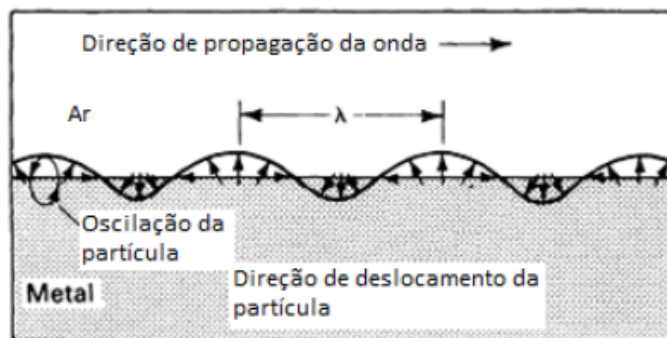


Figura 2.12: Esquema de uma onda de superfície se propagando através de uma superfície metal/ar (POLLOCK, 1989).

2.7.4- Ondas de Lamb

Ondas de Lamb são ondas que se propagam através de chapas muito finas de um material, especificamente na ordem de alguns comprimentos de onda, conforme pode-se observar na Figura 2.13, a qual apresenta o diagrama de padrões de ondas com características a) extensionais e b) flexurais. Se caracteriza por uma forma de vibração mais complexa que ocorre na espessura de um material (JACQUES,2009). Suas características de propagação dependem de fatores como densidade, propriedades elásticas, geometria (espessura, diâmetro, etc) e frequência.

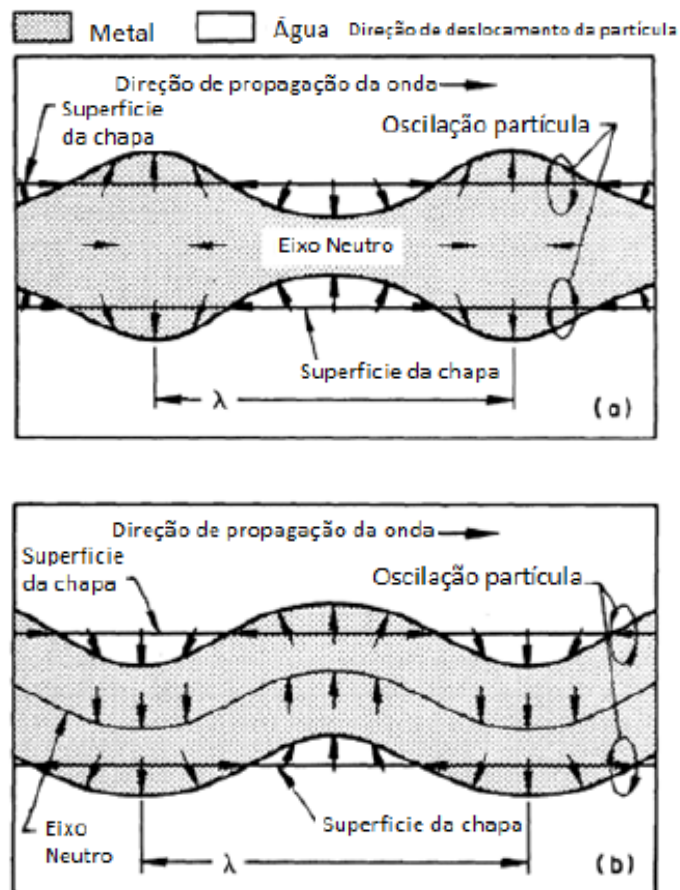


Figura 2.13: Diagrama de padrões básicos de ondas de Lamb a) extensional e b) flexural (POLLOCK,1989).

2.8- Atenuação

A medida que uma onda é transportada através de um meio, sua amplitude de pico tende a diminuir. Isto significa que ondas mais distantes entre o ponto de emissão até o ponto de coleta (sensor) são mais difíceis de serem detectadas. As causas predominantes deste fenômeno, chamado de atenuação são os seguintes (SILVA, 2002):

- ✓ Difusão geométrica da frente da onda;
- ✓ Absorção e amortecimento no meio de propagação;
- ✓ Fuga de energia da onda dentro de meios adjacentes, tal como fluidos armazenados.

Com relação a difusão da frente da onda, sua amplitude se reduz de forma inversamente proporcional à distância em meios tridimensionais e inversamente com a raiz quadrada da distância em meios bidimensionais (chapas e cascos de vasos de pressão). Perto da fonte geradora este efeito é considerado dominante (SILVA, 2002).

Já com relação à absorção (ou em relação ao amortecimento) no meio de propagação, sua amplitude é reduzida de forma exponencial em relação à distância. Afastado da fonte geradora de emissão acústica este efeito é dominante. A taxa de redução é uma propriedade do material e é também dependente da frequência (SILVA, 2002).

Compósitos possuem um amortecimento elevado se comparado a materiais metálicos, de tal forma que, neste caso, a faixa de detecção de um sensor fica bastante reduzida. Para se avaliar e/ou validar um plano de acoplamento de um sensor ou frequência de operação, em muitas situações, as medidas de atenuação são feitas como um teste preliminar ao teste de EA (SILVA, 2002).

Conforme afirmação feita por Pollock (1989) a atenuação pode ser definida como a perda de amplitude do sinal, ocasionada por fatores geométricos e também fatores referentes ao tipo de material. Os fatores responsáveis pela perda de intensidade podem ser classificados como perdas por transmissão, por interferência e por espalhamento. Dispersão, absorção e impedância acústica estão incluídas nas perdas por transmissão. Já a difração e outros efeitos como troca de fase ou de frequência são incluídas nas perdas por interferência. A atenuação define a distância de detecção dos sensores, sendo considerado fator de importância na adequada seleção de posicionamento e espaçamento dos sensores.

A Equação 2.3 mostra o efeito da atenuação na intensidade de ondas sonoras. Nesta se observa que a atenuação tem a forma de uma exponencial com sinal negativo (GOMEZ, 2005):

$$A=A_0 e^{(-\alpha x)} \quad (2.3)$$

Sendo: A_0 (dB) a amplitude na origem, α a atenuação por unidade de comprimento (dB/cm) e x o comprimento (cm).

2.9- Parâmetros do Sinal de Emissão Acústica

Segundo Pollock (2007) os parâmetros de sinal mais importantes e utilizados para o processamento de sinais de emissão acústica (EA) são:

- ✓ Amplitude (A): é o máximo valor de tensão obtida pelo sinal de EA;
- ✓ Contagem (N): é o número de vezes em que o sinal ultrapassa o limiar de referência durante o teste;
- ✓ MARSE (E): é a medida de área retificada do sinal. Este parâmetro representa a energia do sinal;
- ✓ Duração (D): é o tempo desde que o sinal ultrapassa o limite, até que o sinal atravesse o limite pela última vez;
- ✓ Tempo de Subida (R): é o tempo entre o primeiro valor de sinal que ultrapassa o limite até o valor máximo de amplitude.

A Figura 2.14 apresenta a representação dos principais parâmetros de sinais envolvidos no processo de EA.

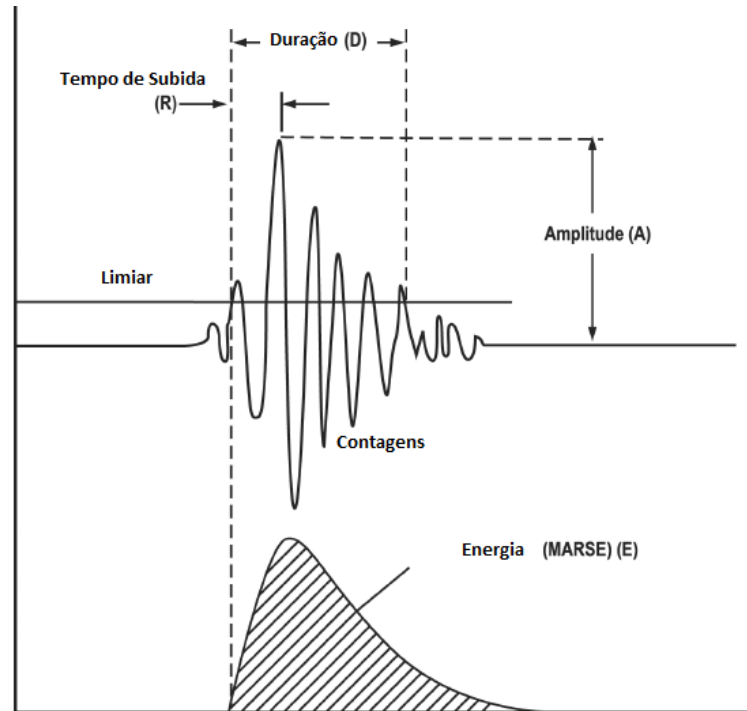


Figura 2.14: Parâmetros obtidos de um ensaio de emissão acústica (Adaptado de PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, 2007).

2.10- Fontes de Emissão Acústica

As emissões acústicas têm como fontes discontinuidades relacionadas aos processos de deformação, como por exemplo, nucleação de trincas e deformações plásticas. Os sinais de EA podem ser classificados genericamente em dois tipos: sinais contínuos e abruptos (MAIA, 2005).

Os sinais contínuos são originados nos deslocamentos de discordâncias e deslizamentos que ocorrem no material e se caracterizam por apresentarem um longo tempo de atividade, característica que, muitas vezes, leva a se considerar estes sinais como sendo ruídos mecânicos externos à peça (CAMERINI, 1990).

Os sinais isolados e abruptos possuem tempo de ocorrência bem definido e apresentam maiores amplitudes em relação aos sinais contínuos. Estes sinais estão relacionados aos grandes deslocamentos de discordâncias, quebra de inclusões e outros mecanismos que envolvem taxas consideráveis de deformação. Alguns fatores influenciam no tipo e na forma

dos sinais, tais como: taxa de deformação, espessura do material, homogeneidade da microestrutura, histórico do material (CAMERINI, 1990).

De acordo com Camerini (1990), de forma generalizada, os efeitos mecânico-metalúrgicos que influenciam na geração de sinais acústicos de grande amplitude são: altas taxas de deformação; aços de elevada resistência; heterogeneidades; grandes espessuras; fraturas frágeis; baixas temperaturas; presença de transformações martensíticas; propagação de trincas; materiais fundidos e granulação grosseira. Em contrapartida, efeitos que influenciam na geração de sinais acústicos de baixa amplitude são: reduzidas taxas de deformação; aços de baixa resistência; homogeneidades; pequenas espessuras; fraturas dúcteis; temperaturas elevadas; transformações de fase por difusão; materiais forjados e laminados e granulação fina.

Conforme Maia (2005) são consideradas pseudofontes de EA: vazamento de gás ou líquido, atrito, fechamento de trincas, partículas perdidas e componentes perdidos (impacto), cavitação, descarga elétrica, transformação de fase, reação química (corrosão) e aquecimento.

Fontes de EA relacionadas a materiais compósitos são o destacamento de juntas coladas (VALLEN, 2007), quebra de fibras (DRUMMOND, 2007; VALLEN, 2007), e fricção entre elementos de cabos (CASEY, 1985; DRUMMOND, 2007). Outros pesquisadores também encontraram outras fontes de EA em materiais compósitos, como exemplo pode-se citar El Mahi *et al.* (2010) que em seu trabalho encontrou faixas de amplitudes para diversos modos de falha em materiais compósitos com resina epóxi. Os modos de falha encontrados foram micro-trincas na matriz (42-60 dB), descolamento interfacial (60-70 dB) e ruptura de fibras (70-100 dB).

2.11- Localização de Eventos de Emissão Acústica

A localização das fontes de EA muitas vezes são feitas com apenas um sensor, porém este tipo de prática somente é utilizada quando amostras/peças pequenas são ensaiadas. Entretanto, tem-se motivos para a utilização de vários sensores, são eles (SILVA, 2002):

- ✓ Se uma estrutura a ser ensaiada possuir dimensões consideráveis, um único sensor não terá sensibilidade adequada para detectar fontes de EA mais afastadas, justamente devido à atenuação;
- ✓ A localização de uma falha é o foco do trabalho em muitos testes estruturais e esta prática requer vários sensores;
- ✓ Se houver várias fontes de EA ativas sobre uma mesma estrutura, um único sensor poderia ocasionar resultados contraditórios. A correta localização da fonte é a mais importante ferramenta para se separar os dados obtidos;
- ✓ Técnicas que se utilizam de vários sensores podem ser extremamente importantes para eliminação de ruídos.

Existem duas formas de localização de fontes de EA contínuas que são praticadas de forma mais comum, são elas (SILVA, 2002):

- ✓ Método da Localização Zonal: onde é considerada somente a sequência de chegada, atribuindo o evento a uma região do espaço (também chamada zona) que dependerá de quais sensores são acionados de forma sequencial.
- ✓ Método de mensuração da amplitude do sinal: neste método determina-se a diferença de rendimento de dois sensores que são acionados pela fonte de EA, comparando-se então as características de atenuação do componente.

Existem também formas de localização de fontes discretas, as quais se seguem (SILVA, 2002):

- ✓ Método Linear: suas principais aplicações são em tubulações, oleodutos e em amostras que possuem formas longas e delgadas. Neste tipo de aplicação geralmente a fonte encontra-se ao longo de uma linha reta entre dois sensores e a distância entre o sensor que estiver mais próximo da fonte e a fonte é dada pela Equação 2.4:

$$y = \frac{(x - \Delta T \cdot v)}{2} \quad (2.4)$$

Em que 'x' é considerado a distância entre os sensores, ΔT é considerada a diferença nos tempos de chegada dos sinais aos sensores e 'v' é a velocidade do som no material.

- ✓ Método Planar e Espacial: neste método existe a necessidade de utilização de, no mínimo, três sensores para localizar as fontes no plano e de quatro sensores para se localizar a fonte no espaço. O princípio de utilização é o mesmo da localização linear, ou seja, utiliza-se o levantamento dos tempos de chegada nos diversos sensores utilizados para aquele ensaio.

2.12- Efeitos Kaiser e Felicity

Os metais, durante o ensaio de EA, apresentam um comportamento característico de emitirem ondas de emissão acústica somente quando a descontinuidade é estimulada (uma força é aplicada) acima do carregamento máximo submetido anteriormente. Esta característica conhecida como “Efeito Kaiser”, que pode ser encontrado quando um material é carregado até um nível de tensão e descarregado, sem nenhuma emissão de EA no carregamento subsequente, até a tensão prévia tenha sido excedida (PINTO *et al.*, 2014), embora seja definida como um fenômeno irreversível apresenta reversibilidade para materiais que possuem capacidade de recozimento (retirada de tensões oriundas de tratamentos mecânicos e eliminação do efeito de quaisquer tratamentos térmicos ou mecânicos submetidos anteriormente) em temperatura ambiente (GÉA, 2015).

Alguns materiais e ligas metálicas podem não apresentar qualquer efeito Kaiser mensurável de nenhuma forma (MILLER; MCINTIRE, 1987).

Na Figura 2.15 a emissão é observada sobre o carregamento inicial de A a B, mas não sobre o descarregamento de B a C. Quando a carga é repetida, não existirá emissão até que B seja alcançado novamente; isto é o efeito Kaiser. A carga é aumentada para D, com mais emissão, e um outro ciclo de descarregamento é aplicado. Desta vez, devido a níveis de

tensões superiores, defeitos significantes iniciam emissão no ponto F, abaixo da carga máxima prévia. Este comportamento é conhecido como o efeito Felicity. A Figura 2.15 também mostra o aspecto da emissão continuando durante um período de carga mantida (G a H) (POLLOCK, 1992).

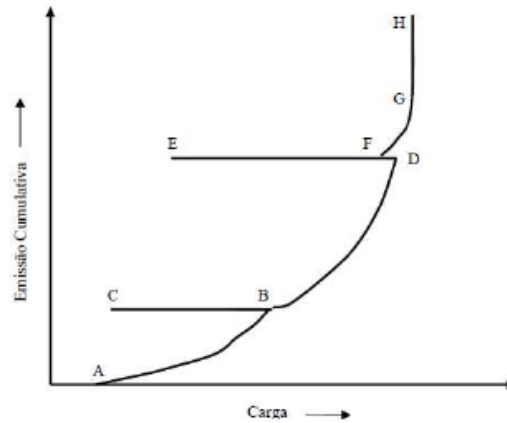


Figura 2.15: Efeitos Kaiser e Felicity (Pollock, 1992).

A atividade de emissão acústica está relacionada à ocorrência de fenômenos de natureza irreversíveis. O efeito Kaiser, o qual é característico desta irreversibilidade, nos informa que uma estrutura ou componente, somente poderá gerar emissão acústica quando estiver sofrendo carregamento acima do valor máximo anteriormente atingido. Este efeito não é universal. No caso de compósitos com reforço por fibras, eles emitem com solicitações abaixo do valor máximo preliminarmente atingido (MAGALHÃES, 1999).

2.13- Emissão Acústica em Compósitos Poliméricos

Nas últimas décadas o uso de compósitos reforçados com fibras em aplicações referentes a área de engenharia vem aumentando de forma significativa. Isto é devido principalmente, as suas propriedades referentes a força específica e rigidez. Desde a indústria espacial e aeronáutica, compósitos são atualmente utilizados para aplicações em estruturas automotivas mais leves, em estruturas marítimas e também na fabricação de turbinas eólicas.

Um fator fundamental, é que para a concepção de componentes/estruturas feitas em compósitos, existe a necessidade de um apurado conhecimento sobre o comportamento dos danos, justamente para se evitar falhas durante a vida em serviço. De forma geral, os métodos de ensaios mecânicos são utilizados para verificar o desempenho e suas características de falha, no entanto, a maioria dos métodos de ensaio estáticos somente trazem informações sobre a falha funcional sem contudo, fornecer informações precisas sobre a iniciação dos processos de danos bem como suas formas de propagação (KEMPF *et al.*, 2014).

Neste contexto a técnica de EA pode ser uma forte aliada, pois através da sua utilização a iniciação da trinca e sua propagação podem ser detectados *on line* durante testes mecânicos. Alguns pesquisadores vem desenvolvendo trabalhos interessantes utilizando esta técnica. Dentre estes pode-se citar:

Meraghni e Mullin (1995) em seu trabalho obtiveram faixas de amplitudes para vários modos de falha conseguidos pelo modelamento micromecânico de matrizes de epóxi sob degradação.

Laksimi *et al.* (1999) em seu trabalho fizeram uma investigação experimental das características de falha de compósitos de polipropileno reforçados com fibra de vidro sob carregamento de tração e monitorados através de EA. Uma avançada técnica de processamento de sinais digitais foi empregada para identificar falhas nas fibras e na matriz, delaminação, trincas ao longo das fibras e fricção. Foram utilizados diferentes parâmetros de avaliação de EA, porém em sua pesquisa, três dos parâmetros avaliados na aquisição de dados (amplitude de pico, duração e energia) revelaram maior influência na caracterização de mecanismos de danos.

Rebello *et al.* (2004) avaliou os mecanismos de falhas em compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibras de vidro sujeitas a cargas de tração e flexão. Em seu trabalho foram analisados os mecanismos de falhas nos compósitos mencionados, no domínio de frequência pela técnica da transformada de Fourier e no domínio tempo frequência pela transformada da forma de onda. Ambas as técnicas foram avaliadas em termos de caracterização de mecanismos de falhas e os resultados obtidos atestaram eficiência de ambas as técnicas utilizadas.

Jaques (2009) estudou a resposta acústica de tiras retiradas de risers flexíveis para realizar ensaios de tração e risers em escala real sob cargas de tração e fadiga. Os resultados obtidos mostraram que é possível se detectar a ruptura dos arames, e que alguns parâmetros como Contagens e Duração são influenciados pelo ruído de forma significativa. Neste

trabalho, foi também criado um limite de confiança para tempo de subida e duração, de forma a poder avaliar se os parâmetros de aquisição estão ou não adequados.

Passos (2010) em seu trabalho, correlacionou danos típicos em um ensaio esfera contra plano com sinais de vibração e EA, com objetivo de prever o momento exato em que o dano presente na pista de rolamento ultrapassa o limite aceitável, caracterizando deste forma, o fim da sua vida útil e portanto o término do ensaio. Neste trabalho foram capturados os sinais de vibração e os dados foram tratados com duas abordagens, uma determinística (utilizando o “fator de crista”, que é definido como um fator busca relacionar a presença de picos ou cristas acima da média de potência do sinal) e outra estatística (utilizando a “curtose”, que é definida como o grau de “achatamento” de uma distribuição de frequências, geralmente unimodal, medido em relação ao de uma distribuição normal (de Gauss) que é tomada como padrão). Foram também capturados sinais pela técnica da EA durante os ensaios. Concluiu-se que do ponto de vista dos sinais de vibração, a análise por curtose mostrou ser mais sensível para detectar o dano provocado na trilha de desgaste, em relação à análise pelo fator de crista. Para os sinais de EA, a taxa de “hits” (sinais de EA) mostrou-se mais significativa para detectar alteração na pista de desgaste, em relação ao RMS (do inglês - *Root Mean Square* – que é a raiz quadrada da integral dos valores de tensão ao quadrado, dividida pelo intervalo de tempo dado pela diferença de tempo entre os limites superior e inferior de integração (SOARES, 2008)) do sinal.

El Mahi *et al.* (2010) também trabalhando com resina epóxi obteve as faixas de amplitudes relacionadas aos respectivos modos de falha, os quais são: Micro-trincas na matriz (42–60 dB), descolamento (60–70 dB) e para ruptura de fibra (70–100 dB).

Gutkin *et. al* (2011) que investigou falhas em compósitos CFRP submetidos a cargas de tração e monitorados por EA, nos ensaios de amostras submetidas a cargas de tração transversal encontrou como principal modo de falha microfissuras na matriz. Algumas destas microfissuras se aglutinaram em uma fenda/trinca macroscópica levando a separação final da amostra. Algumas fibras abriram caminho a macro-trincas, que induziram a escorregamentos entre a fibra e a matriz, e, eventualmente, ocasionaram insuficiência da fibra até a ruptura final. Em seu trabalho, foi investigado também outras formas de carregamentos, todos monitorados por EA, aliados a utilização de diversas técnicas de reconhecimento de padrões.

Mais recentemente, Albouy e Vieille (2014) também utilizaram as faixas de amplitudes, além de características relativas a duração e número de contagens de sinais para identificar variadas formas de mecanismos de falhas. Em seu trabalho uma medição *in situ* de EA foi aplicada para monitoramento de danos durante testes de tração gradual em laminados

carbono/PPS (compósito termoplástico Poli(sulfeto de fenileno) reforçado com fibras de carbono) a temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea (T_g) do material. Neste trabalho foi também utilizado técnicas de agrupamento como forma de reconhecimento de padrões através do Mapa Auto-Organizável de Kohonem, que é um tipo de RNA (Rede Neural Artificial).

Kempf *et al.* (2014) também investigaram mecanismos de falhas microscópicas de compósitos de resina reforçados com fibra de vidro e fibra de carbono com dois tipos de matrizes poliméricas (poliuretano e epóxi). As amostras foram submetidas a carregamentos quase estáticos, bem como carregamentos dinâmicos. Neste trabalho, além de outras conclusões importantes, foram obtidos resultados com relação a predominância de cada mecanismo de dano e sua influência a medida que se varia a orientação das fibras em relação a força aplicada nos ensaios.

Lomov *et al.* (2015) em seu trabalho investigaram os mecanismos de danos durante cargas de tração em laminados de fibra de vidro/epóxi. Os danos nas amostras foram correlacionados aos danos reais através de observação ótica durante o carregamento. Neste trabalho além de outros parâmetros, a amplitude foi utilizada como parâmetro de classificação na identificação de modos de falha e foram encontradas fronteiras de valores para os danos observados no material.

Michalcová e Kadlec (2016) investigaram o crescimento de delaminação em compósitos de carbono/epóxi monitoradas por EA. Uma relação entre energia acumulada de EA, localização de eventos, agrupamentos e crescimento de trinca em um compósito de carbono/epóxi foi investigado sob variações significativas de temperatura e utilizando taxa de carregamento e deformação constantes durante os ensaios. Os resultados obtidos mostraram que a temperatura elevada causou uma diminuição na taxa de liberação de energia de EA, e que o crescimento da trinca no material causou um aumento da taxa de liberação de EA.

2.14– Agrupamento de Dados

Segundo os pesquisadores (Everitt *et al.*, 2001; Kaufman e Rousseeuw, 1990) o agrupamento de dados pode ser conceituado como uma tarefa que tem como objetivo,

determinar um conjunto finito de categorias para descrever uma base de dados de acordo com as similaridades entre seus objetos.

O agrupamento de dados é uma técnica fundamental e que tem aplicações em diversas áreas. Como exemplos pode-se mencionar:

- ✓ No comércio, o agrupamento pode ajudar o departamento de publicidade de uma empresa a descobrir grupos relevantes nos bancos de dados de seus clientes e caracterizá-los baseando-se em padrões de compras (THEODORIDIS e KOUTROUMBAS, 2006);
- ✓ Na biologia, o agrupamento pode ser usado para categorizar genes com funcionalidade similar e ganhar conhecimento das estruturas inerentes de uma população (THEODORIDIS e KOUTROUMBAS, 2006).;
- ✓ Na ecologia, análise de agrupamento é usado para descrever e fazer comparações espaciais e temporais de comunidades (conjuntos) de organismos em ambientes heterogêneos. Ele também é usado na sistemática vegetal para gerar filogenias artificiais ou grupos de organismos (indivíduos) na espécie, gênero ou nível superior que compartilham uma série de atributos;
- ✓ No setor farmacológico, ligado a análise de atividade antimicrobiana, a análise de agrupamento pode ser usado para analisar os padrões de resistência a antibióticos, para classificar os compostos antimicrobianos de acordo com o seu mecanismo de ação, para classificar os antibióticos de acordo com a sua atividade antibacteriana;
- ✓ Devido a grande quantidade de dados espaciais que pode ser obtido de imagens de satélite, equipamento médico, Sistema de Informação Geográfica (SIG) etc., torna-se caro e difícil para os usuários examinarem esses dados em detalhes. Por meio do agrupamento, a análise e o entendimento dos dados podem ser simplificados (THEODORIDIS e KOUTROUMBAS, 2006);
- ✓ No setor de negócios e de marketing, com foco em pesquisa de mercado a análise de agrupamento é amplamente utilizada quando se trabalha com dados multivariados de inquéritos e painéis de teste. Pesquisadores de mercado usam a análise de agrupamento para particionar uma população generalizada de consumidores em segmentos de mercado e para melhor compreender as relações entre os diferentes grupos de consumidores / potenciais clientes, e para uso em segmentação de mercado, posicionamento de produto, desenvolvimento de novos produtos e seleção de mercados de teste;

- ✓ No estudo e análise de redes sociais, o agrupamento pode ser utilizado para reconhecer comunidades dentro de grandes grupos de pessoas;
- ✓ Muito utilizado também na segmentação de imagens, onde agrupamentos podem ser utilizados para dividir uma digital de imagem em regiões distintas para detecção de bordas ou reconhecimento de objetos; (BEWLEY e UPCROFT, 2013).
- ✓ Na Climatologia, para encontrar regimes meteorológicos ou padrões atmosféricos de pressão preferida do nível do mar (HUTH *et al.*, 2008).
- ✓ Na mineração da Web, o agrupamento é usado para descobrir grupos significativos de documentos contidos na Web. Esta categorização dos documentos auxilia no ganho de conhecimento por parte do usuário (THEODORIDIS e KOUTROUMBAS, 2006).

Em decorrência dessa ampla variedade de aplicações e da necessidade de algoritmos eficientes, vários algoritmos de agrupamentos de dados foram desenvolvidos nas últimas décadas (vide os levantamentos (XU e WUNSCH, 2005; JAIN *et al.*, 1999)); um dos exemplos mais proeminentes é o algoritmo *k-médias* e suas variantes (MACQUEEN, 1967; STEINLEY, 2006; WU *et al.*, 2007).

Na seção 2.16 será descrito algumas aplicações do agrupamento de dados para compósitos.

2.15- Classificação de Agrupamentos

Segundo Mingoti (2005), a Análise de Agrupamentos é também conhecida como Análise de Conglomerados ou Análise de Classificação ou *Cluster Analysis*.

A análise de agrupamentos tem como objetivo a organização dos dados em um pequeno número de grupos, também denominados *clusters*, de forma que os elementos similares estejam alocados no mesmo grupo e os padrões muito distintos (dissimilares) estejam em grupos diferentes (PETRÓVIC, 2006; JAIN *et al.*, 1999).

Mesmo existindo diversos algoritmos capazes de realizar esta tarefa, existem dois aspectos que estão ligados à natureza dos métodos de agrupamento que devem ser sempre considerados (KASK, 1997). São eles:

- ✓ o método é não supervisionado, ou seja, os exemplos são organizados na forma de agrupamentos considerando que os grupos não são conhecidos inicialmente; não há uma pré-classificação dos dados nem diferenciação entre as variáveis dependentes ou independentes. O método trabalha diretamente com os dados, objetivando definir a estrutura dos padrões.
- ✓ a definição referente a escolha da distância a ser utilizada para determinar a similaridade entre os elementos. A similaridade entre os padrões é essencialmente realizada por suas distâncias, onde a função de distância é a quantificação da similaridade, ou seja, quanto menor a distância, maior a similaridade. Para Mingoti (2005), é imprescindível decidir à priori, qual a medida de similaridade será utilizada para dar prosseguimento ao agrupamento de elementos. Para isto, existem medidas adequadas para análise de variáveis qualitativas e quantitativas. As medidas mais adequadas para variáveis quantitativas também são ditas ‘de dissimilaridade’. Nesta situação, quanto menores os seus valores, mais similares serão os elementos que estão sendo comparados. Como exemplos dessas medidas de similaridade podemos citar: Distância Euclidiana, Distância Generalizada (ou Ponderada) e Distância de Minkowsky.

Os algoritmos podem ser classificados basicamente de duas formas (FERNANDES, 2010):

- ✓ agrupamento hierárquico;
- ✓ agrupamento não-hierárquico (particional).

O primeiro tipo de agrupamento (hierárquico) procura reunir de forma sucessiva pequenos grupos, formando então grupos maiores, ou através da divisão de grandes grupos em outros de maior similaridade interna. Os métodos se diferenciam pela regra adotada objetivando decidir quais grupos devem ser reunidos ou divididos. O resultado do algoritmo é um gráfico tipo árvore chamado de “dendrograma” que mostra como os grupos se inter-relacionam. A Figura 2.16 mostra o agrupamento hierárquico de um conjunto de dados e sua representação em dendrograma. Para compreender como é a hierarquia, observe o corte (linha tracejada) do dendrograma ilustrado em (a). Esse corte resulta na partição ilustrada em (b). Outras partições são possíveis de se obter por meio de outros cortes em níveis hierárquicos diferentes (FERNANDES, 2010).

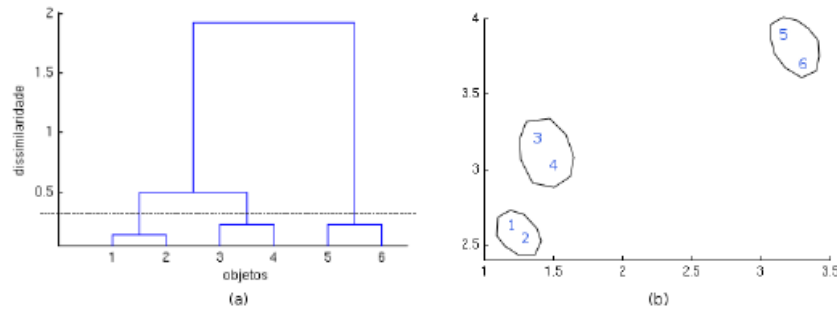


Figura 2.16: Exemplo da organização de um dendrograma (Horta, 2010).

O principal objetivo do agrupamento não-hierárquico (particional) é dividir o conjunto de dados em um conjunto de grupos distintos entre si, maximizando as dissimilaridades dos diferentes grupos. A ideia principal é escolher uma partição inicial dos objetos e, em seguida, alterar os grupos visando uma maior similaridade entre os grupos (FERNANDES, 2010).

Os métodos não-hierárquicos possuem vantagens em aplicações com grandes conjuntos de dados, nos quais a construção de um dendrograma é computacionalmente mais demorada (JAIN *et al.*, 1999). Entretanto, antes do início do processo é necessário determinar o número k de agrupamentos.

Geralmente, os métodos por partição são baseados na otimização de uma função definida que envolve, por exemplo, a minimização do erro quadrático, e são de natureza combinatorial buscando formação dos grupos com elementos mais similares (FERNANDES, 2010).

Na prática, a repetição dos algoritmos com diferentes “sementes” converge para a solução ótima (JAIN *et al.*, 1999).

2.16- Algoritmo k-médias e Seleção de Parâmetros de Emissão Acústica

O algoritmo k-médias é um método de agrupamento que tem como objetivo o particionamento de n vetores de entrada em k agrupamentos. Cada vetor de entrada é

atribuído ao agrupamento com a média mais próxima. Para agrupar um conjunto de n vetores de entrada (x_1, x_2, \dots, x_n) são divididos em k grupos com seus centros (C_1, C_2, \dots, C_k) (GUTKIN, 2011). Utilizando a média mais próxima, cada vetor de entrada é atribuído a um agrupamento, conforme descrito a seguir:

- 1- Inicializar aleatoriamente os centros dos agrupamentos C_i ;
- 2- Calcule a distância de cada vetor de entrada para o centro dos agrupamentos e atribua os vetores de entrada para o seu agrupamento mais próximo, de uma só vez;
- 3- Recalcular a localização do centro dos agrupamentos, de modo a que a Equação 2.5 seja minimizada.

$$\sum_{i=1}^k \sum_{X_j \in C_i} \|X_j - C_i\|^2 \quad (2.5)$$

- 4- Repita os passos 2 e 3 até que a localização dos centros não mudem mais.

Existem duas fases deste algoritmo. Numa primeira fase, os cálculos nos passos 2 e 3, são efetuados para cada vetor de entrada e para cada centro, respectivamente, de uma só vez. Na segunda fase, a redistribuição feita no passo 2 é feita individualmente e se reduz à soma, conforme Equação (2.5). Os centros são então atualizados após cada mudança. O algoritmo k -médias é um método robusto e eficiente para o agrupamento de dados.

Neste trabalho o valor de k é escolhido para cada ensaio realizado dentro de uma faixa de k variando de 2 até 10, através da maximização do valor de silhueta.

2.17- Silhueta do Agrupamento

Silhueta é definido como o índice que mostra quais objetos se posicionam bem dentro do agrupamento e quais ficam em uma posição intermediária. Este índice é baseado na coesão individual e na separação entre agrupamentos.

É definido conforme a Equação (2.6):

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\min[(b(i,k) - a(i))]}{\max[a(i), \min(b(i,k))]} \quad (2.6)$$

onde: $b(i,k)$ é a distância média do i -ésimo vetor aos vetores dos demais agrupamentos k e $a(i)$ é a distância média entre o i -ésimo vetor e os demais vetores dentro do mesmo agrupamento.

Geralmente, quanto maior for o valor de silhueta, melhor o efeito de aglomeração será. Caso o valor de silhueta seja superior a 0,6, o agrupamento terá uma boa qualidade.

Os valores da silhueta média podem ser interpretados conforme a Tabela 2.2:

Tabela 2.2 – Valores da Silhueta Média $S(X_i)$

$S(X_i)$	Descrição
0,71 – 1,00	Estrutura forte
0,51 – 0,70	Estrutura razoável
0,26 – 0,50	Estrutura fraca (Aconselhável utilização de outros métodos)
$\leq 0,25$	Sem estrutura substancial

Fonte: Adaptação de Vale (2006)

Na Figura 2.17, temos um gráfico da silhueta, para uma população que foi subdividida em quatro agrupamentos - *clusters*. O eixo vertical representa as n observações enquanto o eixo horizontal representa o valor da silhueta para cada observação.

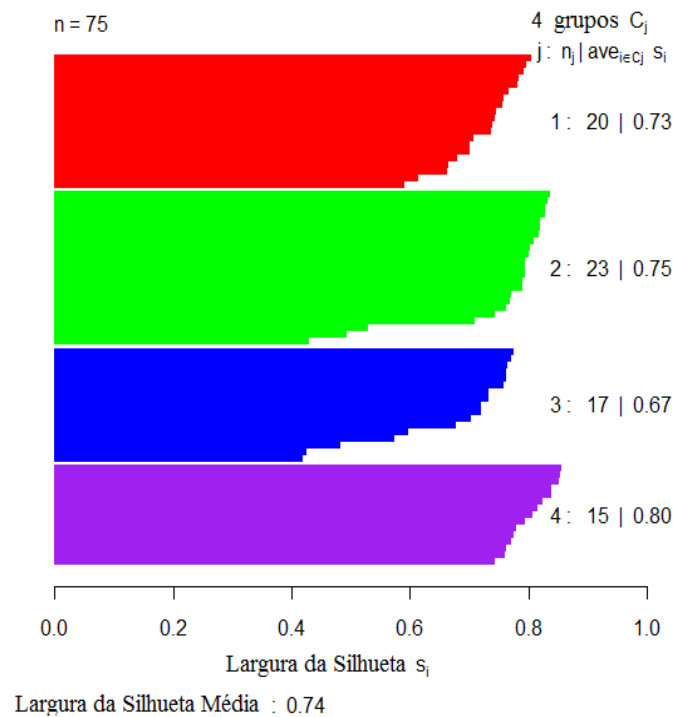


Figura 2.17: Gráfico da Silhueta (Adaptado de Ruspini, 1970).

Como muitos dos problemas de minimização, a solução encontrada pelo método das k -médias, geralmente depende do ponto de partida, pois o algoritmo encontra um mínimo local (VALE, 2005).

Este método é prático e computacionalmente eficiente, porém é suscetível a ruídos e *outliers*, também não é indicado a agrupamentos não convexos.

Na análise de agrupamento, os sinais de EA são tratados como vetores de teste padrão, os quais são difíceis para descrever pelas suas formas de onda não-estacionárias, e assim, uma série de parâmetros de EA são extraídos para caracterizar a função dos sinais. Informações sobre as atividades de EA, como o comprimento, número e tipo de trincas podem ser refletidas através dos parâmetros de seus sinais. Comumente, as contagens e os hits refletem o número de trincas, enquanto que a amplitude, tensão eficaz ou média, e energia são usados para descrever a força dos sinais de EA, que estão associados ao comprimento e/ou o tipo de trinca. Apesar de ainda não existir um claro significado físico, a duração e o tempo de subida são importantes para o tamanho e/ou tipo de fissuras (OHIRA e PAO *et al.*, 1989). Os parâmetros no domínio da frequência, tais como a frequência de pico (YANG *et al.*, 2007) e coeficiente de energia wavelet (YANG *et al.*, 2011) e (YANG *et al.*, 2008) também têm

provado conter informações de tipos de trincas. Antes do agrupamento, estes parâmetros com diferentes dimensões físicas são normalizados no intervalo $[-1, 1]$ para construir o vetor padrão e eliminar o efeito de dimensão física sobre a classificação. Um dos métodos mais utilizados na normalização de dados é a normalização da variância média, e o seu princípio consiste em transformar os dados de uma distribuição normal padrão com o valor da média de 0 e o desvio padrão de 1. Para obter uma amostra com N sinais de EA, a normalização da variância média para parâmetro i -ésimo pode ser definida pela Equação 2.7:

$$X_i' = \frac{X_i - X}{\sigma} \quad (2.7)$$

onde X_i e X_i' são parâmetros originais e padronizados dos sinais de EA e X e σ são respectivamente, sua média e desvio-padrão.

2.18- Medida de Similaridade

A semelhança das amostras deverá ser determinada antes da partição dos sinais de EA. A seleção de uma medida de similaridade adequada é a base para garantir a eficiência da análise de agrupamento. A distância e coeficiente de similaridade são as duas métricas mais comumente usadas para medir a semelhança entre os sinais e variáveis (YANG *et al.*, 2015). Para medir a semelhança dos mecanismos de falha entre os sinais de EA, por conseguinte, a distância Euclidiana é adotada e definida num espaço com cinco variáveis, conforme apresentado na Equação 2.8:

$$d_w^2(X^l, X^m) = \sum \lambda_j (X_j^l - X_j^m)^2 \quad (2.8)$$

Onde λ_j é o j -ésimo valor próprio, X_j^l e X_j^m são as j -ésimas coordenadas dos vetores X^l e X^m , respectivamente. Quanto menor for a distância Euclidiana, o mais semelhante são os sinais no espaço. Portanto, para um determinado parâmetro de EA que é apropriado para a classificação do tipo de falha, o resultado de agrupamento pode ser, obviamente, distinguido do recurso de distribuição dos sinais de EA. Os sinais com o mesmo tipo de dano irão se reunir em uma região densa, e em contraste, os sinais a partir de diferentes tipos de danos separaram-se uns dos outros. (YANG *et al.*, 2015)

Os resultados gerados nos ensaios de EA usualmente combinam informações sobre diferentes tipos de mecanismos de danos., especificamente para laminados de CFRP. É necessário portanto separar os eventos de EA dentro de vários agrupamentos de forma a classificar os mecanismos de danos.. Uma vez que os sinais de EA são representados no espaço multiparamétrico por um vetor de características do sinal, frequentemente chamados descritores, sua classificação deverá ser baseada em mais de dois descritores, ou seja, classificações baseadas em apenas uma ou duas características são inadequadas para este tipo de análise. Classificação multiparamétrica utilizando uma técnica de reconhecimento de padrões é usualmente o melhor caminho. Sendo o método de agrupamento (clusterização) através do algoritmo k-médias uma destas ferramentas de classificação (ZHOU, 2015).

2.19- Ensaio de Líquido Penetrante (LP)

O ensaio por líquidos penetrantes é um método desenvolvido especialmente para a detecção de descontinuidades essencialmente superficiais, e que ainda estejam abertas na superfície do material (ANDREUCCI, 2008).

Este tipo de ensaio é muito utilizado em materiais não-magnéticos (nos quais correntes parasitas e partículas magnéticas não podem ser empregados), além dos materiais magnéticos. Também é aplicado em cerâmica vitrificada, vidros, plásticos, podendo ser utilizados também em materiais compósitos.

O método basicamente, consiste em se fazer penetrar um líquido na abertura de uma descontinuidade, sendo que, após a remoção do excesso deste líquido da superfície inspecionada, força-se a porção retida de líquido na descontinuidade a sair da mesma através

do uso de uma substância reveladora. Os contornos de eventuais descontinuidades são então revelados na superfície inspecionada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1- Materiais

Segue abaixo listagem dos materiais que foram utilizados no desenvolvimento experimental deste trabalho:

- ✓ tecido de fibra de carbono pré-impregnado de cura rápida da fabricante Hexcel Composites - Hexply™ M77;
- ✓ Desmoldante Chemlease-44, fornecido pela Redelease;
- ✓ Bloco de alumínio 7075;
- ✓ Consumíveis para o processo de infusão a vácuo:
 - ✓ Tecido Peel-ply;
 - ✓ Tecido Bleeder;
 - ✓ Metil Etil Cetona (Mekplus);
 - ✓ Mangueira espiral;
 - ✓ Filme plástico;
 - ✓ Fita selante resistente a alta temperatura;
 - ✓ Kit para líquido penetrante – METAL-CHECK;

A Tabela 3.1 apresenta as propriedades do pré-impregnado Hexply M77//39/UD150/CHS e seus constituintes (HEXCEL COMPOSITES, 2016).

Tabela 3.1: Propriedades Hexply M77//39/UD150/CHS e seus constituintes

	Propriedades	Valores
Propriedades do sistema de resina	T_g (°C)	135
	Densidade (g/cm ³)	1,1-1,2
Propriedade das fibras	Densidade (g/cm ³)	1,78
	Gramatura do tecido (g/m ²)	150
Propriedades dos pré-impregnados	Massa do pré-impregnado (g/m ²)	242 ± 12
	Concentração de resina (%)	39 ± 1

Fonte: HEXCEL COMPOSITES (2016)

Foram utilizados alguns equipamentos para o desenvolvimento experimental deste trabalho, os quais pertencem à Universidade Federal de Itajubá - Campus Prof. José Rodrigues Seabra, os quais estão descritos a seguir:

- ✓ Estufa modelo MA035/1600/EPO – MARCONI;
- ✓ Mesa de usinagem ROUTER CNC – *Excitech*[®] - modelo SHG1212
- ✓ Máquina Servo-Hidráulica Universal – INSTRON - Modelo 8801;
- ✓ Vídeo extensômetro avançado (AVE – Advanced Vídeo Extensometer);
- ✓ Câmera digital com processamento de imagem em alta resolução;
- ✓ Sistema de aquisição de sinais – desktop e placa de aquisição de sinais - PAC (*Physical Acoustics Corporation*) e Sensores - modelo R15I;
- ✓ Microscópio Eletrônico de Varredura - ZEISS - modelo EVO MA-15;
- ✓ Bomba de vácuo Fibermaq, BUSCH R5;
- ✓ Máquina de corte Norton, modelo Clipper TR 201 E.

3.2- Metodologia Experimental

A Figura 3.1 apresenta a metodologia experimental utilizada para a realização deste trabalho.

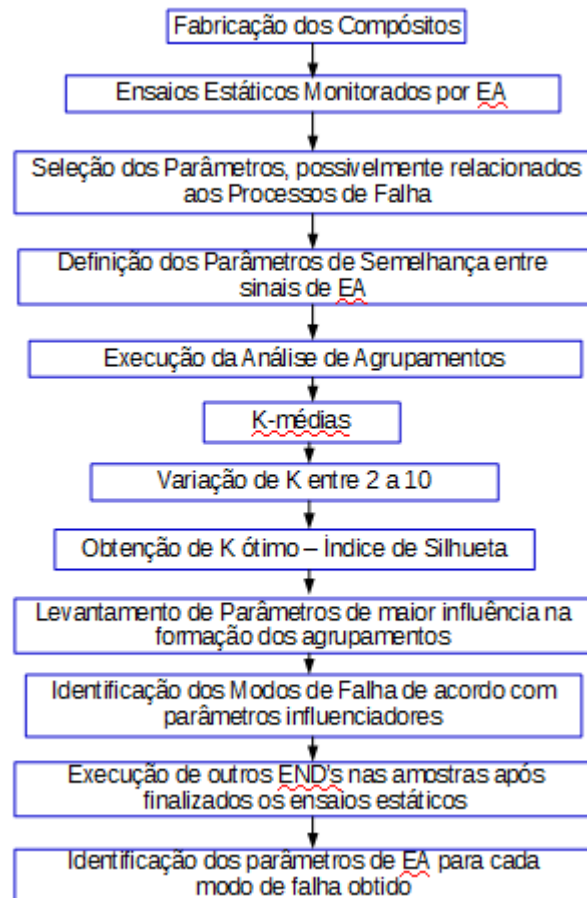


Figura 3.1: Metodologia Experimental.

3.2.1- Fabricação das Amostras

O rolo de tecido de fibra de carbono pré-impregnado foi removido do ambiente refrigerado onde o mesmo é mantido há uma temperatura de -18°C , e deixado em uma sala a temperatura controlada a 20°C . Este procedimento deve ser efetuado a aproximadamente 4 horas antes do seu manuseio. O mesmo deve permanecer embalado durante o período de homogeneização da temperatura, com o intuito de se evitar a condensação de água no tecido (conforme mostrado na Figura 3.2).

Após este passo, foi então efetuado o corte do tecido com o auxílio de uma cortadora de tecidos utilizando disco de corte de 4". Foram laminadas três placas com as seguintes sequências de empilhamento $[0]_{10}$, $[(\pm 45)_2]_8$ e $[90]_{10}$, com o total de 10, 8 e 10 camadas, respectivamente para as amostras 0° , $\pm 45^\circ$ e 90° . A Figura 3.3 mostra a etapa de medição e corte do pré-impregnado.



Figura 3.2: Rolo de tecido de fibra de carbono pré-impregnado antes do processamento, à temperatura ambiente.

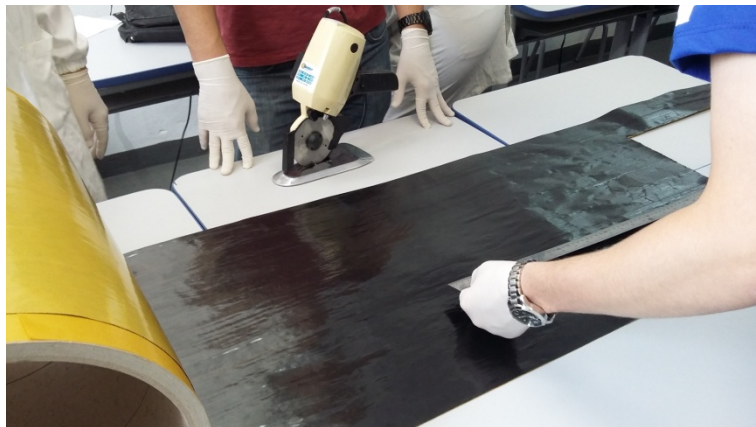


Figura 3.3: Medição e corte do tecido de carbono pré-impregnado.

O próximo passo foi a preparação do molde (limpeza da face do molde na região onde seria realizada a laminação da placa de tecido de fibra de carbono pré-impregnado e aplicação de desmoldante) onde foi montada a bolsa de vácuo.

Na etapa de laminação, foi realizado o empilhamento das camadas de tecido de fibra de carbono pré-impregnado com sentido 0° de orientação da fibra, $\pm 45^\circ$ de orientação e também o empilhamento das camadas de tecido de fibra de carbono com sentido 90° de orientação da fibra de carbono.

Os dois laminados (0° e 90°) foram posicionados no molde onde posteriormente foi feito todo o procedimento para montagem da bolsa de vácuo. Antes da colocação dos dois laminados foi colocado o selante de vedação na face do molde, e cada laminado foi empilhado e posicionado a uma distância de aproximadamente 50 mm um do outro. Posteriormente, foi feito o posicionamento de uma camada de filme perfurado sobre os dois laminados empilhados e posicionado uma camada de tecido *bleeder* sobre o filme perfurado. Em seguida, foi posicionado o flange de conexão da mangueira de vácuo sobre o tecido *bleeder*.

Dando prosseguimento ao processo, foi posicionado então uma camada de filme plástico sobre o *bleeder* e selante de vedação. Foi usada então, uma fita de silicone resistente a alta temperatura para selar a bolsa de vácuo e, em seguida, foi efetuado a aplicação do vácuo e verificado a perfeita vedação da câmara de vácuo, conforme mostrado na Figura 3.4.

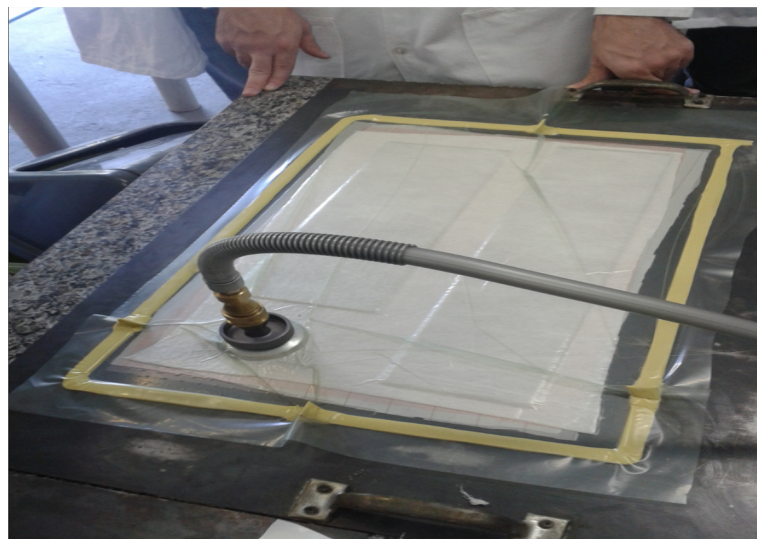


Figura 3.4: Bolsa de vácuo com os laminados $[0]_{10}$ e $[90]_{10}$.

O processo de cura foi efetuado em uma estufa modelo MA035/1600/EPO do fabricante MARCONI a uma temperatura de 150°C durante 30 minutos.

O mesmo processo foi efetuado para preparação do laminado $[(\pm 45)_2]_8$.

3.2.2- Dados de Fabricação das Próteses

Para a fabricação das próteses transtibiais, salvo a utilização de blocos de alumínio 7075 para a fabricação das matrizes utilizadas como moldes para laminação dos componentes da prótese, foi executado o mesmo procedimento que para a fabricação das amostras unidirecionais, conforme descrito no início desta seção, ou seja, com mesmo material, temperatura e tempo de cura, sendo que para estes dois últimos seguindo inclusive recomendações do fabricante.

Na Tabela 3.2 segue *lay-up* da prótese:

Tabela 3.2: *Lay up* da prótese transtibial.

Componente	Região	Sequência de Empilhamento	Número de Camadas
Calcânhar	Calcânhar	$[\pm 45/0_{10}/\pm 45_2/0_2/90_2]_S$	40
Planta	Base Superior	$[\pm 45/0_{13}/\pm 45_2/0_7/90_2]_S$	56
	Base Intermediária	$[\pm 45/0_{10}/\pm 45_2/0_2/90_2]_S$	40
	Base Inferior	$[\pm 45/0_9/\pm 45/90]_S$	28

A Figura 3.5 mostra cada região dos componentes mencionados na Tabela 3.2.

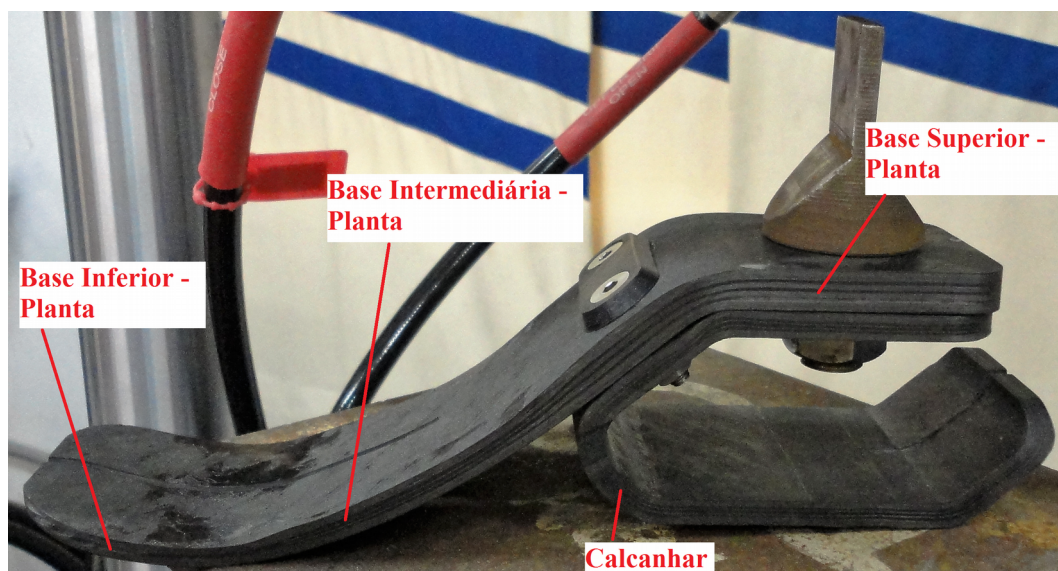


Figura 3.5: Vista lateral da Prótese Transtibial e cada região.

3.2.3- Processo de Corte das Amostras

Conforme mostrado na Figura 3.6, as placas e os componentes da prótese foram cortadas em uma mesa de usinagem ROUTER CNC, marca *Excitech*[®], modelo SHG1212. Antes da utilização do equipamento, foi necessário a elaboração de um projeto das amostras nas medidas requeridas, com o auxílio do software Catia V5.

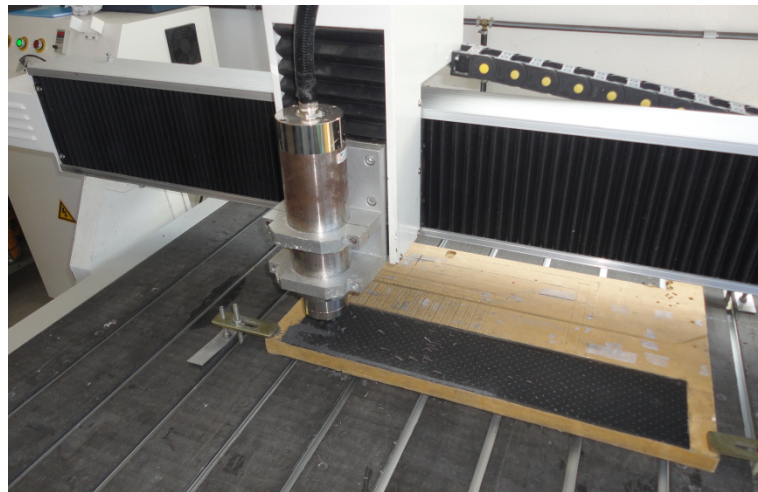


Figura 3.6: Corte das amostras na mesa de usinagem ROUTER CNC.

Foram então, obtidas 3 amostras de cada uma das placas. Cada amostra com as medidas de 300 mm x 30 mm, respectivamente para comprimento e largura das mesmas, nomeadas conforme descrito na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Dados das amostras unidirecionais.

Direção das Fibras	Número da Amostra	Codificação Utilizada
[0] ₁₀	1	FZ1
	2	FZ2
	3	FZ3
[(±45) ₂] ₈	1	FQ1
	2	FQ2
	3	FQ3
[90] ₁₀	1	FN1
	2	FN2
	3	FN3

As Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 mostram as amostras FZ, FN e FQ, respectivamente, já cortadas e prontas para serem ensaiadas.

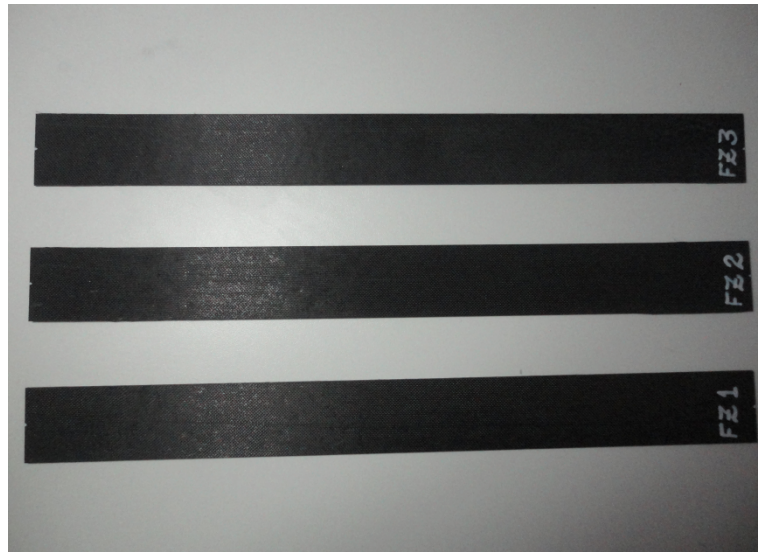


Figura 3.7: Corpos de prova para ensaio de tração a 0°.

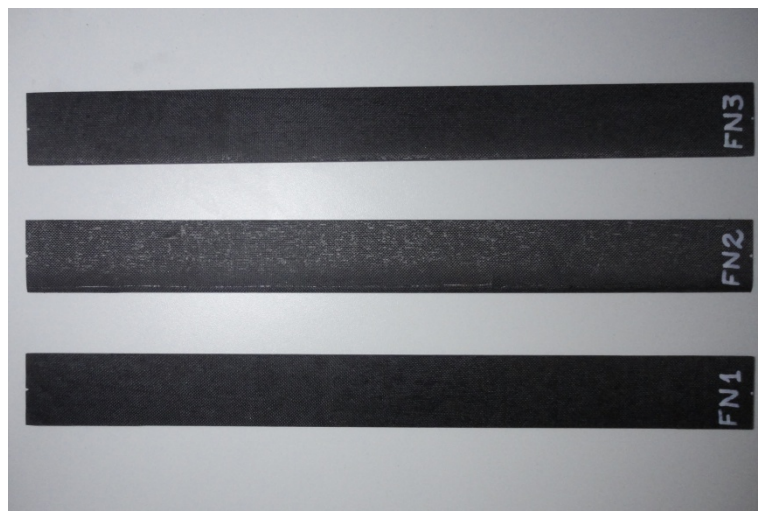


Figura 3.8: Corpos de prova para ensaio de tração a 90°.



Figura 3.9: Corpos de prova para ensaio de tração a $\pm 45^\circ$.

As placas obtidas para montagem das próteses transtibiais também foram usinadas na ROUTER CNC, e foram fabricadas 02 (duas) amostras, as quais seguiram o *lay-up* mencionado na seção 3.2.2. As amostras das próteses foram codificadas como N1 e N2 para as próteses 1 e 2, respectivamente. A Figura 3.10 (a) e (b) mostram o “pé” da prótese transtibial.

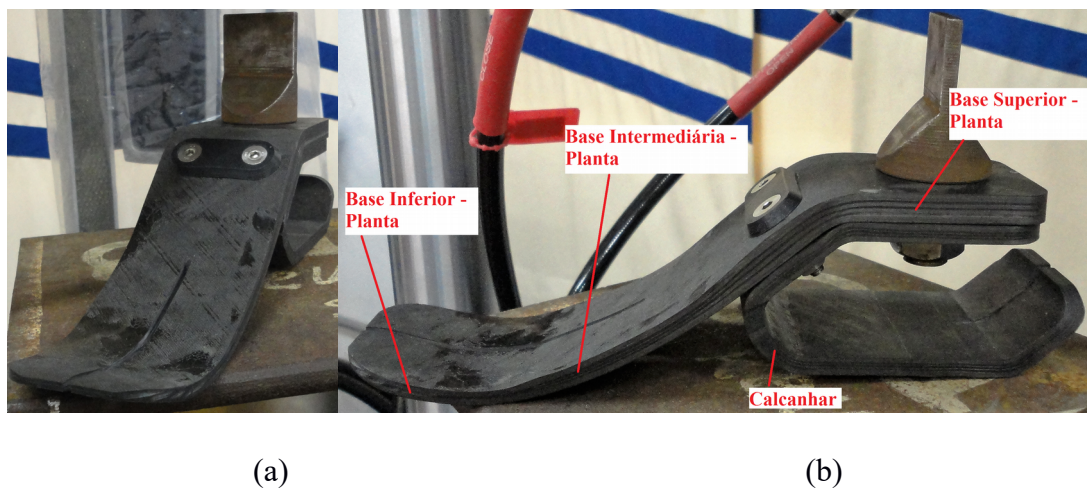


Figura 3.10: “Pé” da prótese transtibial em compósito pré-impregnado de carbono/epóxi.

3.2.4- Ensaio de Tração

Testes estáticos de tração foram realizados em uma máquina servo-hidráulica de Teste Universal da Marca INSTRON, Modelo 8801. Para se obter a deformação dos corpos de

prova, o equipamento conta com o auxílio de um vídeo extensômetro avançado (denominado AVE – Advanced Vídeo Extensometer), que utiliza uma câmera digital com processamento de imagem em alta resolução e em tempo real, dispensando a utilização de extensômetro de contato para efetuar medições. Os ensaios foram conduzidos a uma velocidade de 2 mm/min até a ruptura das amostras.

Os ensaios foram conduzidos em conformidade com as normas ASTM – D3039:2014 (Tração) e D3518:2013 (Cisalhamento no Plano).

3.2.5- Ensaios de Compressão

Os testes de compressão também foram executados conforme descrito no item 3.2.4. Os ensaios foram conduzidos em conformidade com as normas ASTM – D3410:2016 e ISO 10328. A velocidade utilizada foi de 5 mm/min até a ruptura das amostras.

Para a execução destes ensaios, a estrutura da prótese foi subdividida em 2 (duas) regiões (conforme pode ser visto na Figura 3.11 (a) e (b)), as quais são descritas a seguir:

- ✓ Calcanhar;
- ✓ Solado Total (Solado Frontal + Calcanhar).



(a)

(b)

Figura 3.11: Ensaio de compressão nas regiões do calcanhar e solado total da prótese.

3.2.6- Equipamento de Emissão Acústica

Todo o equipamento para aquisição dos sinais, tais como placa de aquisição de sinais e /sensores utilizados foram adquiridos da PAC (*Physical Acoustics Corporation*).

A PAC fornece um software chamado AEWIn para se executar a aquisição e tratamento dos dados coletados. Os dados obtidos foram tratados utilizando este software e também foram exportados para serem trabalhados em outros softwares como o Origin, Excel e Stata.

Os sensores utilizados foram do modelo R15I, conforme também é mostrado na Figura 2.8, que corresponde a um sensor ressonante com resposta de frequência máxima próxima dos 150 kHz. Este modelo de sensor também possui um pré-amplificador embutido que apresenta um ganho de 40 dB ao sinal.

3.2.7- Instalação da Emissão Acústica

Durante os ensaios, cada amostra unidirecional foi monitorada utilizando-se a técnica de emissão acústica, onde 2 sensores modelo R15I foram posicionados em sua superfície (conforme mostrado na Figura 3.12) a uma distância de 136 mm de centro a centro. Os sinais de EA foram detectados com AE-System PCI-2 e software AEWIn.

Para a realização dos ensaios da prótese, devido a sua geometria e espaço disponível na superfície das próteses, foi utilizado somente 01 sensor para captação dos sinais de emissão acústica, conforme Figuras 3.13 e 3.14.

Na Tabela 3.4 segue a configuração dos parâmetros utilizados para ensaio de emissão acústica. Demais parâmetros foram utilizados conforme orientação do fabricante do equipamento:

Tabela 3.4: Parâmetros utilizados para ensaio de Emissão Acústica.

Parâmetro	Valor
Limiar de Sensibilidade	40 dB
Taxa de Amostragem	1 MSPS
Faixa de Frequência	1-1000 kHz
Ganho	-
Pré-amplificador	40 dB
Lower Analog Filter	1 kHz
Upper Analog Filter	1 MHz

Através de parâmetros utilizados na emissão acústica, serão avaliados os mecanismos de falha associados aos compósitos avaliados e quais parâmetros terão maior influência nestes mecanismos.

Para realização dos ensaios das amostras FZ e N foi utilizado um limiar de 48 dB, sendo que os demais parâmetros foram os mesmos, conforme descrito na Tabela 3.4.

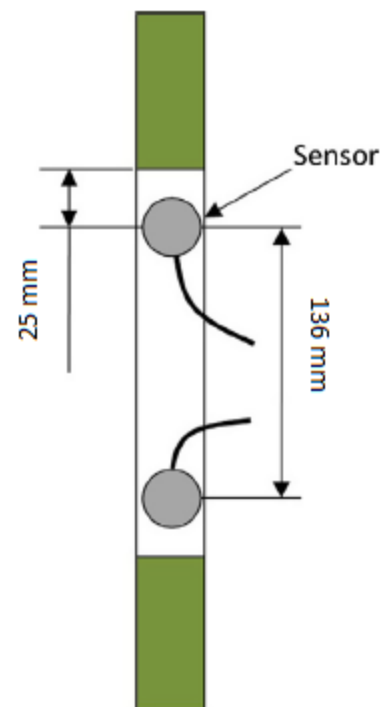
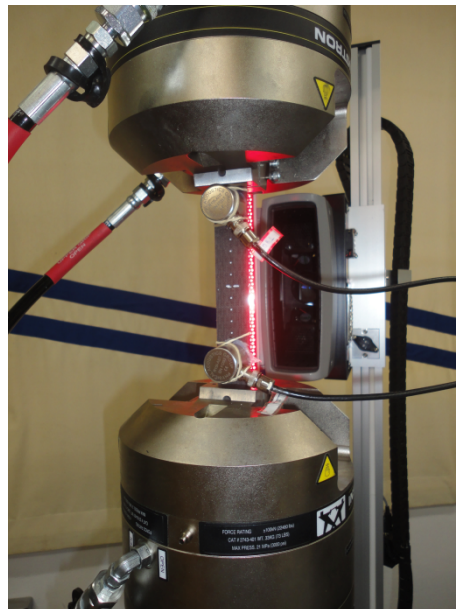


Figura 3.12: Ensaio de tração dos corpos de prova (amostras unidirecionais) sendo monitorado por EA.



Figura 3.13: Ensaio de compressão na região do calcanhar da prótese transtibial.



Figura 3.14: Ensaio de compressão em todo o solado da amostra N (prótese transtibial).

Após a realização dos ensaios de tração e compressão monitorados por EA, os dados coletados no AEWIn, referentes a cada amostra ensaiada (conforme Tabela 3.2), foram extraídos na forma de arquivos.dta. Na análise de agrupamento, os sinais de EA são considerados vetores de teste, que pelas suas formas de onda são extremamente complexos de serem descritos, desta forma uma série de variáveis de EA são extraídas de maneira a caracterizar a função dos sinais.

Estas variáveis foram selecionadas por estarem diretamente associadas a obtenção de informações relacionadas a características de falha. A amplitude e a energia são usados para descrever a força dos sinais de EA, que estão associados à dimensão (tamanho) e/ou tipo de trinca (OHIRA *et al.*, 1989). A frequência de pico também tem mostrado conter importantes informações sobre os tipos de trincas (YANG *et al.*, 2007).

Neste trabalho, de cada ensaio foram selecionadas e extraídas as seguintes variáveis: Amplitude, Frequência de Pico, Energia, Duração e Tempo de Subida.

O software *Stata*® foi utilizado para se efetuar o processamento e agrupamento dos sinais, obtidos durante os ensaios de EA, através da função análise de agrupamentos.

A semelhança das amostras deverá ser determinada antes de iniciado o particionamento dos sinais de EA. Para a execução da medida de similaridade foi utilizada a distância euclidiana, que quanto menor for, o mais semelhante serão os sinais no espaço.

Antes da aplicação do reconhecimento de padrões através da aplicação do algoritmo k-médias, os dados foram então normalizados, conforme procedimento descrito na seção 2.17, e obtidos, para cada amostra, os valores de k variando de 2 até 10. Após esta etapa, para cada uma das amostras, foram obtidos os valores de silhueta para cada valor de k. Dando prosseguimento, foi feita a determinação do valor ótimo de k para cada amostra, obtido através da escolha do seu máximo valor de silhueta.

Posteriormente, é feita a análise dos dados gerados e de quais variáveis tiveram maior influência na caracterização dos modos de falha para as amostras.

Os resultados para as amostras unidirecionais, são então confrontados com informações presentes na literatura, através de trabalhos já realizados utilizando-se material e técnica similares; e também confrontados com informações obtidas pela análise fractográfica das superfícies fraturadas das amostras, utilizando-se microscopia eletrônica de varredura (MEV), sobre o qual será tratado de forma mais detalhada no capítulo 4 deste trabalho.

Conforme já mencionado, como estudo de caso neste trabalho, foi efetuado o mesmo procedimento descrito no parágrafo anterior, para quantificação e análise dos modos de falhas no “pé” de uma prótese transtibial submetida a cargas de compressão, para a qual os dados gerados pela técnica de EA após aplicação do reconhecimento de padrões, também foram confrontados com informações obtidas por outra técnica de ensaio não-destrutivo, desta vez utilizando-se líquido penetrante, para detecção de suas falhas, após carregamento. Dois exemplares similares (N1 e N2) foram fabricados e analisados nesta etapa do trabalho.

3.2.8- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das Amostras Unidirecionais

Para verificação da eficácia do método apresentado (utilizando os dados de EA e posterior aplicação do reconhecimento de padrões para caracterização dos modos de falha apresentados nas amostras unidirecionais sob carregamentos de tração) foi feita uma análise de MEV nas amostras para identificação das falhas e comparação com os resultados obtidos neste trabalho. Foram obtidas micrografias das superfícies de fratura das amostras, utilizando-se um equipamento da marca ZEISS modelo EVO MA-15 do Laboratório de Caracterização de Materiais da UNIFEI. Este equipamento utiliza um detector de elétrons secundários para identificação da morfologia das superfícies a serem analisadas, possibilitando a indicação da morfologia e verificação dos tipos de falhas apresentadas na estrutura analisada

O microscópio eletrônico de varredura é capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. Devido a maneira com que as imagens de MEV são criadas, elas tem uma aparência tridimensional característica e são úteis para avaliar a estrutura superficial de uma dada amostra.

A técnica se baseia na incidência de um feixe de elétrons na superfície da amostra, que são posteriormente emitidos dessa superfície e geram um sinal para a definição da imagem.

As amostras foram cortadas de maneira a preservar a região de fratura e preparadas com a aplicação de uma fina camada de Ouro.

3.2.9- Líquido Penetrante (LP) das Próteses Transtibiais

Neste trabalho o ensaio de líquidos penetrantes foi aplicado em estruturas correspondentes ao “pé” de próteses transtibiais, para comparação com os resultados obtidos pela técnica de aplicação de reconhecimento de padrões nos dados obtidos dos sinais de EA durante os carregamentos de compressão.

O ensaio de LP foi efetuado conforme orientações do fabricante.

É importante mencionar que o ideal para correlacionar os danos obtidos em cada faixa de carga (variando de 0 até 260kg e de 0 até 500kg), seria após a aplicação de cada

carregamento, retirarmos a amostra e efetuarmos sua análise, no caso, através do LP, porém não teríamos como garantir as mesmas condições de ensaio (temperatura, umidade relativa, acoplamento de sensores, e demais condições obtidas no primeiro ensaio) podendo gerar resultados discrepantes. Foi portanto, feita a opção de somente se analisar as amostras das próteses após o término dos ensaios.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1- Laminado Carbono/Epóxi [90°]₁₀

4.1.1- Dados Resumidos dos Sinais de Emissão Acústica (EA) sob Cargas de Tração

De acordo com o método de agrupamento, a amplitude de EA, frequência de pico, energia, tempo de subida e duração dos sinais das amostras FN sob tração foram extraídos como os parâmetros de recursos para formar os vetores padrão. Estes dados foram normalizados (conforme descrito na seção 2.17).

Em seguida, a análise de agrupamento foi feita para estes vetores para obter os k-grupos ligados, com os seus mecanismos de falha.

Nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 se encontra o resumo dos dados obtidos do ensaio de EA para as amostras FN1, FN2 e FN3, respectivamente. Estes dados foram apresentados de forma resumida em virtude da elevada quantidade de observações obtidas no ensaio de cada amostra.

Na primeira linha de cada tabela pode-se observar as variáveis correspondentes à Amplitude, Frequência de Pico, Energia, Tempo de Subida e Duração e na primeira coluna se encontra a Média dos Valores, o Desvio Padrão (DP), o Valor Mínimo para a Variável Analisada (Mín), o Valor Máximo para a Variável Analisada (Máx) e a faixa correspondente aos valores entre os mínimos e máximos para cada variável (Faixa).

Tabela 4.1: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra FN1.

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	49	160	3	18	146
	DP	8	15	17	26	138
	Mín	40	85	0	0	4
	Máx	97	312	330	397	1817
	Faixa	57	227	330	397	1813

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

Tabela 4.2: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra FN2.

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	48	173	1	12	94
	DP	7	38	3	13	79
	Mín	40	144	0	0	3
	Máx	76	311	31	110	530
	Faixa	36	167	31	110	527

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

Tabela 4.3: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra FN3.

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	49	158	2	11	78
	DP	8	9	5	10	75
	Mín	40	117	0	0	0
	Máx	78	173	34	39	500
	Faixa	38	56	34	39	500

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

4.1.2- Cálculo do Número de Agrupamentos através do Algoritmo k-Médias

Como os dados apresentados possuem escalas diferenciadas, estes foram então normalizados (conforme processo descrito nas seções de 2.14 a 2.18) e foi dado início ao processo de aplicação do reconhecimento de padrões através do algoritmo k-médias. Conforme mencionado na seção 2.16 o algoritmo k-médias tem como objetivo identificar em cada ensaio, dados com características similares e dados com características distintas, agrupando os dados similares formando agrupamentos com características semelhantes. Estes agrupamentos serão tratados como os modos de falha para o respectivo ensaio, e analisados conforme suas características.

No Stata, o algoritmo é então executado, onde é feita a distribuição dos agrupamentos para cada valor de k, e a partir daí é efetuado o cálculo do valor de silhueta, também para cada valor de k, ou seja, para cada situação de distribuição dos agrupamentos. Isto é feito para os dados obtidos nos ensaios de EA de cada amostra ensaiada.

Foi adotado para o cálculo de k um intervalo variando de 2 até 10. A Figura 4.1 mostra o valor de silhueta e de erro em relação ao número de classificação k. Quando os sinais de EA foram divididos em duas categorias, o valor silhueta assume seu máximo de 0,5375. Portanto, o número de classificação ótima para k é 2 para as amostras FN sob tração, indicando que há dois tipos de falhas.

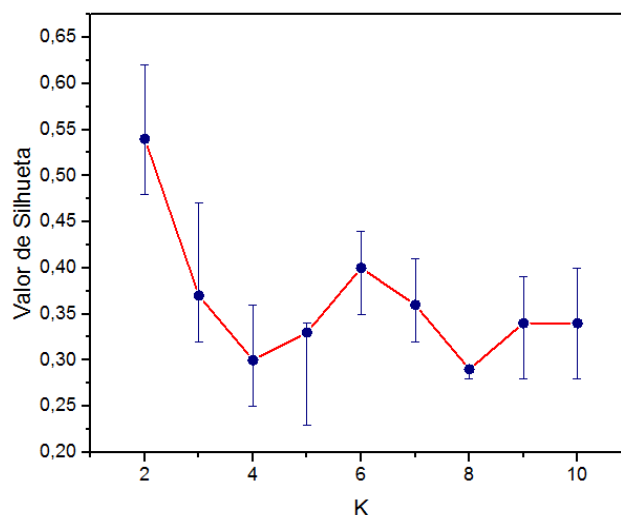


Figura 4.1: Valor de erro e de Silhueta em relação ao número de classificação k (amostras FN).

O valor máximo de silhueta encontrado, corresponde a uma estrutura de agrupamento razoável, conforme mencionado na seção 2.17 - Tabela 2.2.

De acordo com os dados obtidos, o valor ótimo de k demonstrou coerência com dados encontrados na literatura para a quantidade de modos de falha obtidos em compósitos unidirecionais submetidos a cargas de tração transversal à direção de orientação da fibra.

Segundo Miriyala e Liaw (1996) fibras orientadas perpendicularmente à direção do carregamento comportam-se como concentradores de tensão na matriz e na interface, provocando falhas no compósito quando, no primeiro caso, o limite de resistência à tração é atingido, e no segundo caso, provocando deslocamento do elemento de reforço quando o limite de resistência da interface é superado.

Gutkin *et. al* (2011) que investigou falhas em compósitos CFRP submetidos a cargas de tração e monitorados por EA, nos ensaios de amostras submetidas a cargas de tração transversal (fibras a 90° da direção do carregamento) encontrou como principal modo de falha microfissuras na matriz. Algumas destas microfissuras se aglutinaram em uma fenda/trinca macroscópica levando a separação final da amostra. Algumas fibras abriram caminho a macro-trincas, que induziram a escorregamentos entre a fibra e a matriz, e, eventualmente, ocasionaram insuficiência da fibra até a ruptura final. Em seu trabalho, foi investigado também outras formas de carregamentos, todos monitorados por EA, aliados a utilização de diversas técnicas de reconhecimento de padrões.

A Figura 4.2 apresenta as amostras FN após serem realizados os ensaios. As setas em azul, na lateral das amostras, indicam a região onde ocorreu a fratura em cada amostra.

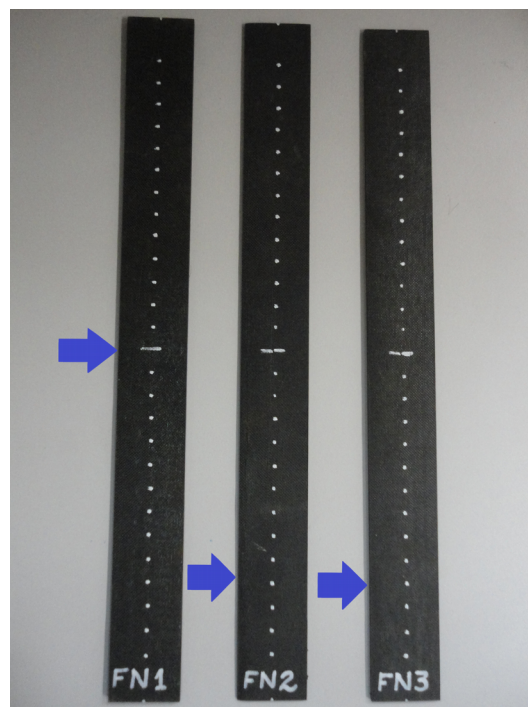


Figura 4.2: Amostras de pré-impregnado de carbono/epóxi com orientação a 90° .

4.1.3- Distribuição de intervalos de parâmetros de Emissão Acústica

Na Figura 4.3 tem-se a distribuição dos parâmetros avaliados neste trabalho, para as amostras FN submetidas a carregamentos de tração. São apresentados os dados correspondentes a amostra FN2, justamente por corresponder ao valor intermediário e estar portanto, mais próximo da média dos valores obtidos.

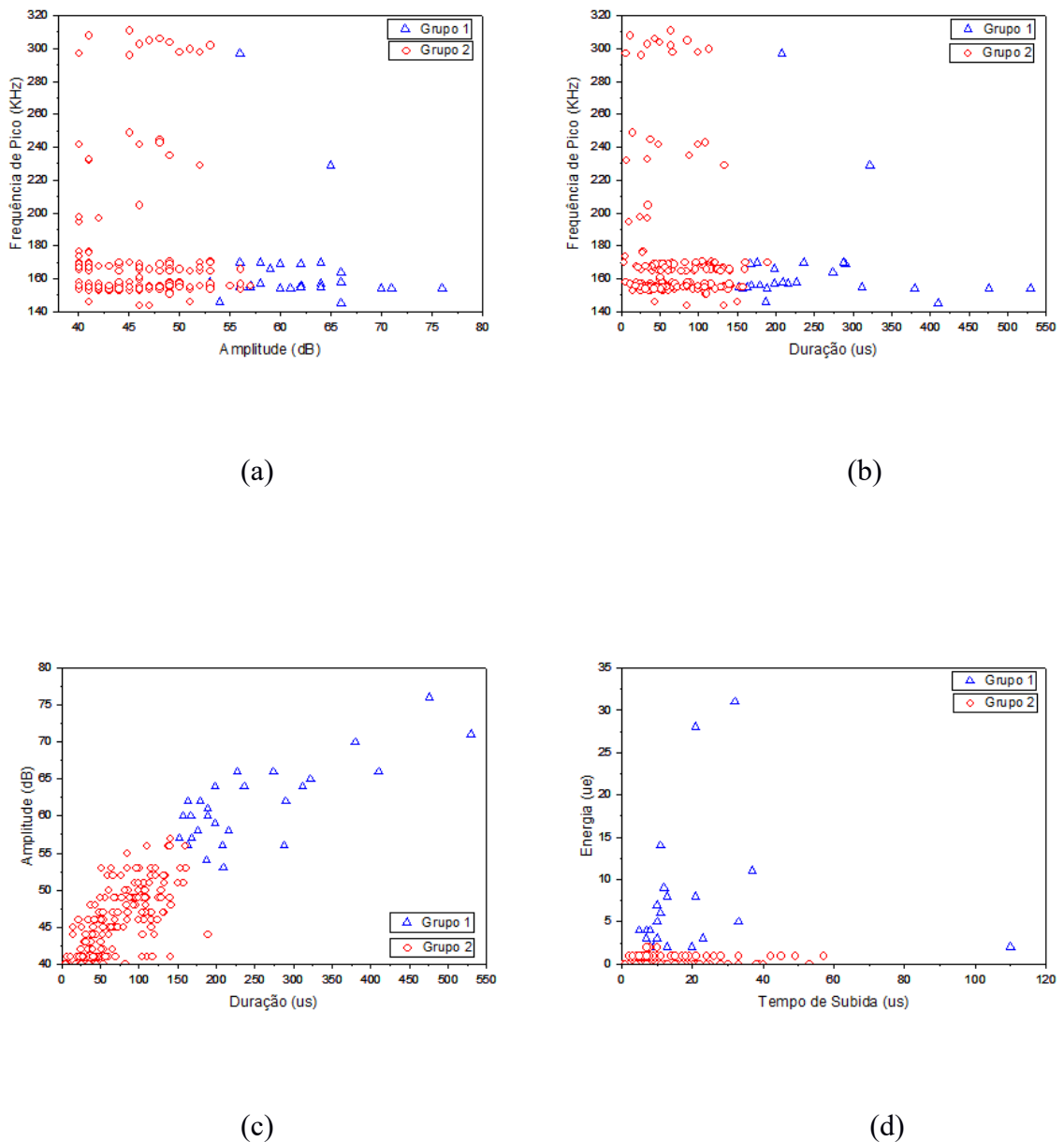


Figura 4.3: Distribuição dos dois grupos de sinais de EA, a partir de amostras FN sob tração em: (a) um espaço de frequências de pico em função da amplitude, (b) um espaço de frequências de pico em função da duração, (c) um espaço de amplitude em função da duração, e em (d) no espaço de energia em função do tempo de subida.

As distribuições destes dois agrupamentos dos sinais de EA (representados como grupos 1 e 2, respectivamente) em vários espaços de parâmetros são mostrados na Figura 4.3. Os sinais a partir das frequências de pico apresentam distribuições nas faixas de 145 – 297 kHz para o grupo 1 e na faixa de 144 – 311 kHz para o grupo 2, sendo que, para este último grupo houve uma ligeira variação nos valores mais altos de frequência de pico, atingindo limites superiores de até 311 kHz, isto quando obviamente comparados aos do primeiro grupo (conforme Figura 4.3(a)). Em relação ao agrupamento 1 a maioria dos sinais se concentra na região que varia de 145 kHz a aproximadamente 170 kHz. Pelo exposto, conclui-se que os sinais não apresentaram uma distribuição clara e são difíceis de classificar. Entretanto, em uma distribuição de amplitude houve a caracterização de dois grupos distintos. No grupo 1, foram obtidos sinais com amplitudes mais elevadas, onde nas regiões de maior concentração estes sinais variaram na faixa de 56 – 76 dB e para o segundo agrupamento na faixa de 40 – 53 dB com valores mais baixos, se comparado ao primeiro agrupamento. Apesar de alguns sinais terem se confundido, em uma pequena região, compreendida pela faixa de amplitude de 53 a 57 dB, na qual característica de amplitudes referentes aos dois agrupamentos terem sido representadas, este indicador se mostrou bastante útil na caracterização de grupos, com características distintas.

A Figura 4.3(b) mostra a distribuição dos dois agrupamentos dos sinais de EA em um espaço de frequência de pico em função da duração. De forma semelhante ao que foi apresentado para a distribuição de amplitude, as distribuições de duração apresentam características que evidenciam a formação de grupos distintos, sendo que o grupo 1 apresenta valores mais elevados, na faixa de 152 – 530 μ s. Já para o grupo 2, estes valores se situam, em maior concentração, na faixa entre 3 – 150 μ s, com características de valores menos elevados. Para a grande maioria dos sinais encontrados, a duração do sinal se mostrou como um indicador eficiente na classificação de agrupamentos, encontrando claramente grupos com bandas bastante distintas.

A Figura 4.3(c) evidencia o que foi mencionado no parágrafo anterior, de que tanto os parâmetros de amplitude como os de duração, apresentaram características de sinais diferenciados e mostraram-se como classificadores eficientes na formação de agrupamentos.

A Figura 4.3(d) mostra dados relacionados a distribuição de energia em função do tempo de subida. Com relação ao tempo de subida, os grupos apresentaram características de distribuição na faixa de 0 – 57 μ s para o agrupamento 2, sendo que para o agrupamento 1 apresentou valores na faixa de 5 – 110 μ s, entretanto, a grande maioria dos sinais concentrou-se na faixa de 5 a aproximadamente 39 μ s. Portanto, este parâmetro não foi considerado como

tendo tido uma eficiente classificação, de forma a encontrar grupos claramente separados. Em relação a energia de EA, os dados encontrados mostraram-se bastante eficientes na classificação dos sinais, uma vez que através deste parâmetro, foram encontrados grupos claramente distintos e que foram classificados com faixas de energia variando de 0 – 2 e de 2 – 31 para os grupos 2 e 1, respectivamente.

De forma resumida, alguns dados de EA mostrados na Figura_4.3 não se apresentam de forma muito clara. Sinais relacionados a frequência de pico se sobrepõem nas Figuras (a) e (b). No entanto, informações importantes podem ser extraídas no que diz respeito ao parâmetro ser ou não adequado para discriminar os tipos de falhas. Para as distribuições feitas, conforme evidenciado pela Figura 4.3(a), (b), (c) e (d), o parâmetro que se apresentou como melhor classificador para os tipos de trincas provenientes do material, pelo fato de ter apresentado faixas quase que completamente distintas, foi a energia do sinal, seguido pela amplitude e pela duração.

A Figura 4.4 apresenta nos eixos verticais os valores de carga (em Newton - N) e os dados de energia acumulada (em unidade de energia – u.e.) obtidos no ensaio de tração, em função do tempo (em segundo – s) representado no eixo horizontal. Cada modo de falha é representado por um grupo – indicado pela letra G.

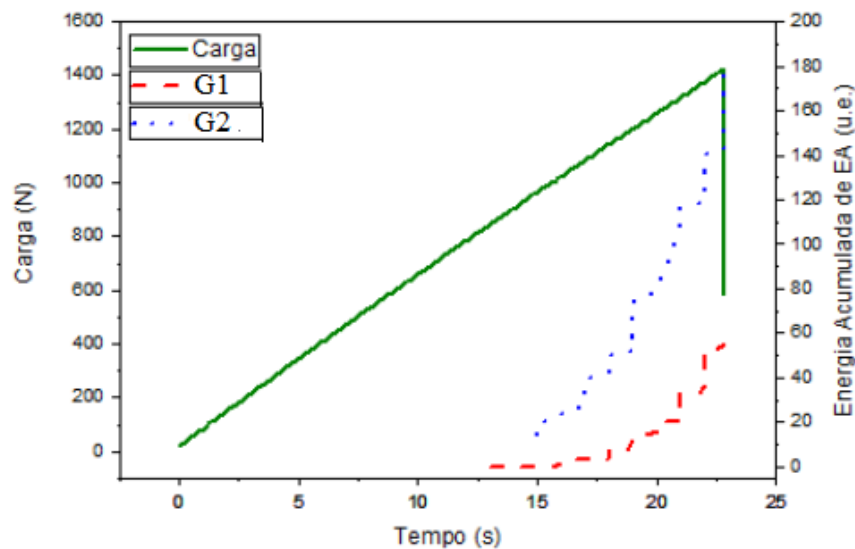


Figura 4.4: Distribuição de Carga e Energia Acumulada de EA em função do Tempo para a amostra FN2.

Pelas características referentes a amplitude, duração e, principalmente pela faixa de energia desprendida e confrontando estas informações com a literatura, com relação as falhas encontradas em materiais compósitos unidirecionais sujeitos a carregamentos de tração

transversal, chega-se à conclusão de que os dois modos de falha apresentados são a falha na matriz, que corresponde ao grupo 1 (G1) com menores valores de energia, amplitude e duração, seguido pelo descolamento entre a fibra e a matriz para o grupo 2 (G2) com energia, amplitude e duração mais elevados.

Diversos pesquisadores (Gong *et al.*, 1998; Meraghni *et al.*, 1995; Wadin, 1978; Willian e Jonathan, 1986) salientam em seus trabalhos os quais tratam de diferentes compósitos com diferentes fibras e resinas, que as faixas de amplitudes de EA correspondem a diferentes mecanismos de falhas, o que reforça a teoria utilizada para caracterizar os modos de falhas encontrados, conforme Figura 4.5.

Sabe-se que a resina utilizada nas amostras tratadas neste trabalho, é um termorrígido, porém assumiremos que não exista diferenças significativas na distribuição de amplitudes em relação aos modos de falha, uma vez que as faixas de cada modo foi levantada através de dados reais obtidos de monitoramento de EA, e tratados através do reconhecimento de padrões, utilizando-se a técnica descrita neste trabalho.

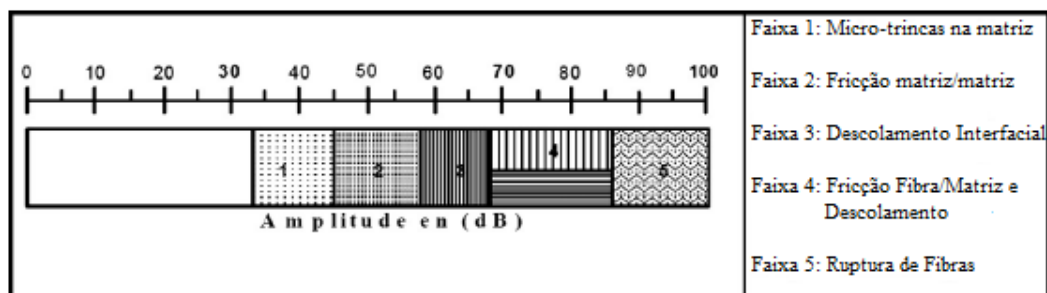


Figura 4.5: Distribuição de amplitude típica associada aos mecanismos de falhas em laminados baseados em TP (termoplásticos de fibra contínua) (Wisnom, 1995).

Mais recentemente, Albouy e Vieille (2014) também utilizaram as faixas de amplitudes, para identificar variadas formas de mecanismos de falhas. Em seu trabalho uma medição “*in situ*” de emissão acústica foi aplicada para monitoramento de danos durante testes de tração gradual em laminados carbono/PPS (compósito termoplástico do tipo Poli (sulfeto de fenileno) reforçado com fibras de carbono) à temperaturas superiores a T_g do material.

Como mostrado na Figura 4.4, os sinais de EA associados as falhas nas amostras FN se iniciam a cerca de 13 segundos após o início dos ensaios, o que corresponde a uma carga em torno de 843,05 N (≈ 14 MPa), persistindo obviamente até o término dos ensaios, ou seja, próximo dos 22,8 segundos quando efetivamente a amostra evolui à sua falha funcional. Nesta

condição a carga é de 1.419,2 N (\approx 23 MPa). Este é o agrupamento mais ativo desse processo até a fratura das amostras que corresponde a trincamento na matriz.

O segundo modo de falha, correspondendo ao descolamento entre a fibra e a matriz, se inicia a cerca de 15 segundos após início dos ensaios, a uma carga de 966,65 N (\approx 16 MPa) e persiste até o final dos ensaios, o que corresponde ao instante 22,8 segundos e uma carga de 1.419,2 N (\approx 23 MPa).

4.1.4- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das Amostras 90° (FN)

As amostras FN apresentaram diversas regiões de micro-trincamento na matriz e impressões/canaletas de fibras caracterizando falhas na interface na forma de descolamento interfacial, conforme pode ser observado nas Figuras 4.6 e 4.7, respectivamente para o primeiro e segundo modos de falha aqui apresentados, totalizando assim 02 (dois) modos de falha.

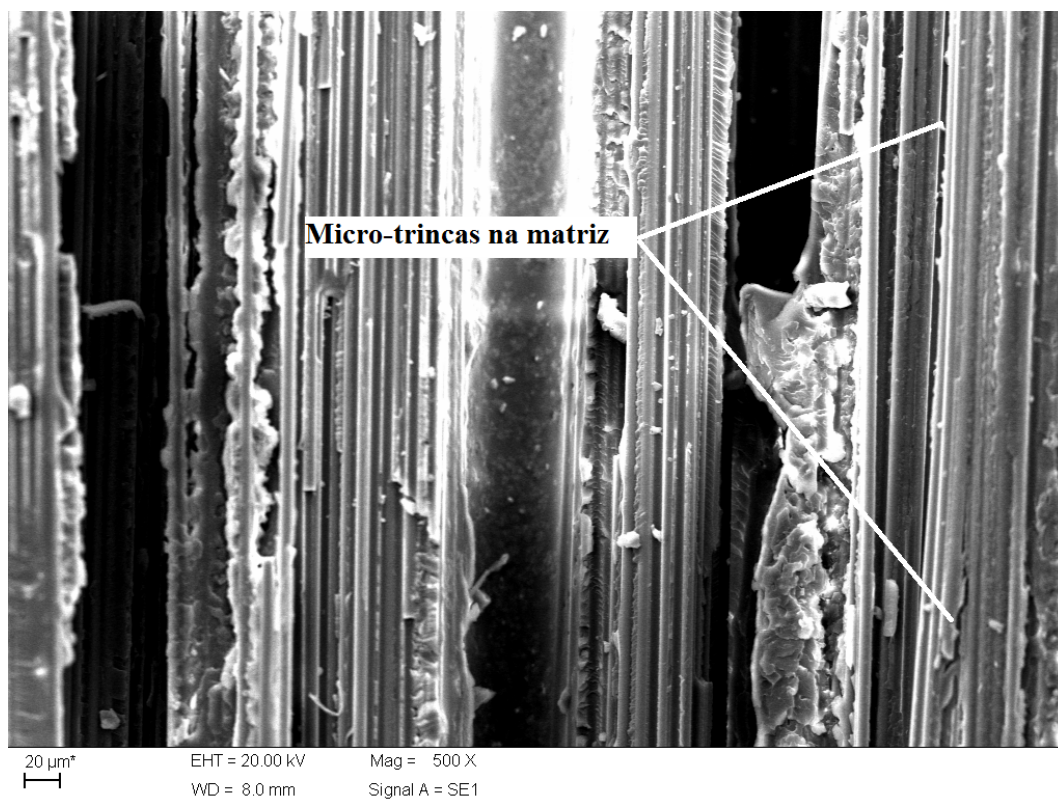


Figura 4.6: Micrografia das amostras FN obtida por MEV evidenciando micro-trincas na resina.

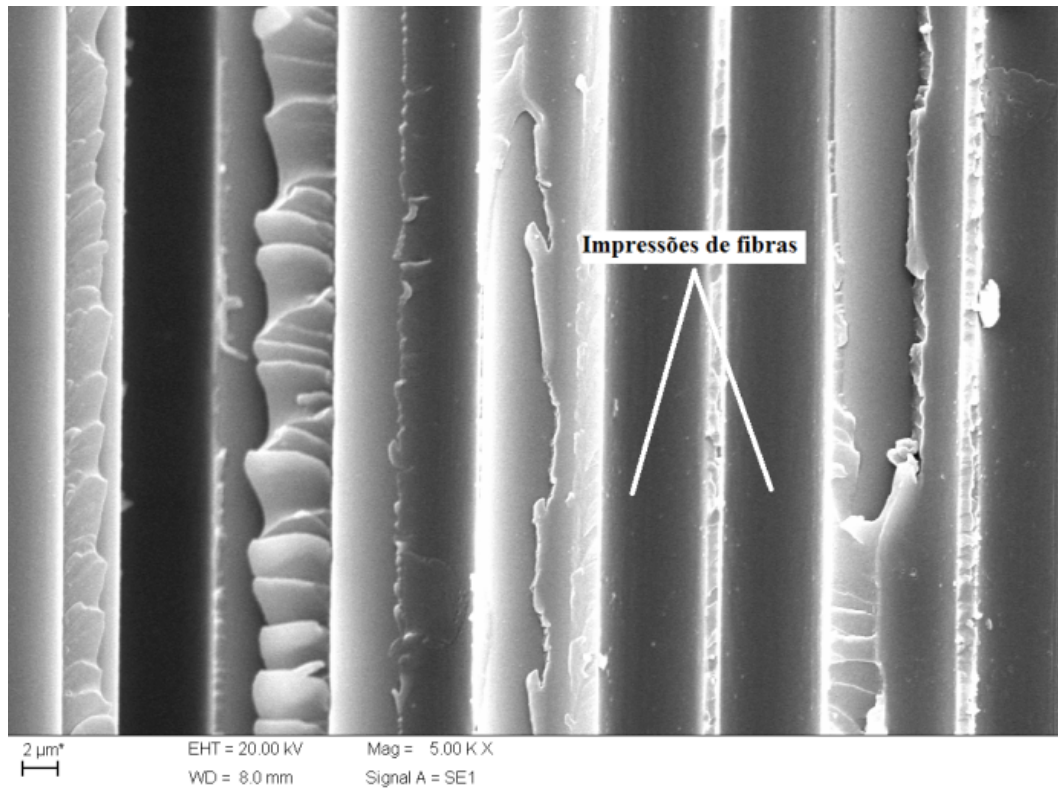


Figura 4.7: Micrografia de uma amostra FN obtida por MEV evidenciando impressões de fibras na resina (descolamento interfacial).

4.2- Laminado Carbono/Epóxi [0°]₁₀

4.2.1- Dados Resumidos dos Sinais de Emissão Acústica (EA) sob Cargas de Tração

Conforme mencionado na seção 4.1.1, a amplitude de EA, frequência de pico, energia, tempo de subida e duração dos sinais das amostras FZ sob tração foram extraídos como os parâmetros de recursos para formar os vetores padrão. Os demais passos também foram seguidos conforme mencionado no mesmo item.

Devido à quantidade de dados obtidos nos ensaios de EA das amostras FZ serem significativamente superiores à quantidade de dados obtidos nos ensaios das amostras FN, houve necessidade de se utilizar um processo de filtragem visando a diminuição da quantidade desses dados. Esta filtragem teve como objetivo a redução do número de dados,

sem contudo, que ocorresse a perda de sinais importantes aos objetivos do trabalho. A redução do número de dados é uma necessidade, visto que, em determinadas situações, tais como em testes de fadiga, por exemplo, podem ser demandados maiores tempos de ensaio, e conseqüentemente uma maior quantidade de dados gerados, exigindo assim maiores recursos computacionais e dificultando os trabalhos de tratamento e processamento dos sinais gerados. Portanto, os dados com amplitudes abaixo de 45 dB foram descartados. Este filtro não comprometeu os resultados obtidos, uma vez que, a menor faixa de amplitude nos ensaios das amostras FN, foi obtida no intervalo entre 40 e 57 dB para a amostra FN2. Logo, mesmo utilizando, após a filtragem, somente amplitudes superiores a 45 dB, ainda haveria condições de captação de dados para a menor faixa de amplitude de sinais, correspondente a falhas nas matrizes das amostras.

Nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 é apresentado o resumo dos dados obtidos para as amostras FZ1, FZ2 e FZ3, respectivamente. Conforme já informado na seção 4.1.1 estes dados foram apresentados de forma resumida em virtude da elevada quantidade de observações obtidas no ensaio de cada amostra.

Tabela 4.4: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra FZ1.

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	49	193	5	32	232
	DP	4	59	220	88	310
	Mín	45	0	0	0	32
	Máx	99	449	16306	6343	18010
	Faixa	54	449	16306	6343	17978

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx;
u.e.= unidade de energia.

Tabela 4.5: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra FZ2.

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	49	162	24	62	342
	DP	5	17	726	418	1334
	Mín	45	61	0	0	32
	Máx	99	458	36504	16985	73417
	Faixa	54	397	36504	16985	73385

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

Tabela 4.6: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra FZ3.

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	50	161	24	48	277
	DP	6	17	342	185	958
	Mín	45	0	0	0	10
	Máx	99	339	11010	6834	28375
	Faixa	54	339	11010	6834	28365

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

4.2.2- Cálculo do Número de Agrupamentos através do Algoritmo k-Médias

Os dados foram normalizados e todos os passos foram realizados conforme descrito na seção 4.1.1.

A Figura 4.8 mostra o valor de silhueta e de erro em relação ao número de classificação k. Quando os sinais de EA foram divididos em duas categorias, o valor silhueta assume seu máximo de 0,6672. Portanto, com a aplicação desta metodologia, o número de classificação ótima para k é 2 para as amostras FZ sob tração, indicando que há dois tipos de

falhas. O valor máximo de silhueta encontrado, também apresenta uma estrutura razoável, conforme Tabela 2.2 da seção 2.16.

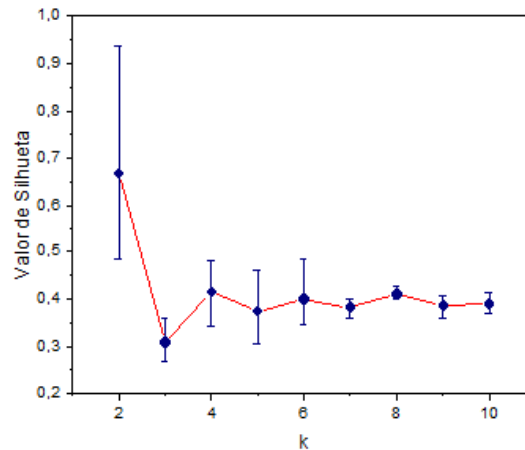


Figura 4.8: Valor de erro e de Silhueta em relação ao número de classificação k (amostras FZ).

Alguns pesquisadores (Yang *et al.*, 2015) consideram que valores de silhueta acima de 0,6 garantem a eficiência do agrupamento.

De acordo com Marinucci (2001) uma lâmina submetida a tensões longitudinais (fibra a 0° da direção de carregamento) de tração pode apresentar pelo menos três características de falha: i) frágil; ii) frágil com arrancamento de filamentos da matriz (*pull-out*); iii) frágil com falhas irregulares e descolamento (*debonding*) e/ou cisalhamento da matriz acompanhadas de arrancamento dos filamentos da matriz.

Gutkin *et. al* (2011) que investigou falhas em compósitos CFRP submetidos a cargas de tração e monitorados por EA, encontrou 3 modos de falha para amostras submetidas a carregamentos longitudinais, dentre elas: micro-trincas na matriz, seguidas por descolamento entre a fibra e a matriz e finalmente, falha na fibra.

Portanto, pelas informações obtidas da literatura para este tipo de carregamento de tração longitudinal em compósitos unidirecionais teríamos tradicionalmente modos de falhas relacionados a falhas na matriz, falhas na interface sob a forma de descolamento interfacial, finalizando com rupturas nas fibras, porém mais adiante serão tratadas informações obtidas de uma análise fractográfica detalhada das amostras, o que irá nos permitir assumir informações mais contundentes sobre a eficácia da metodologia apresentada.

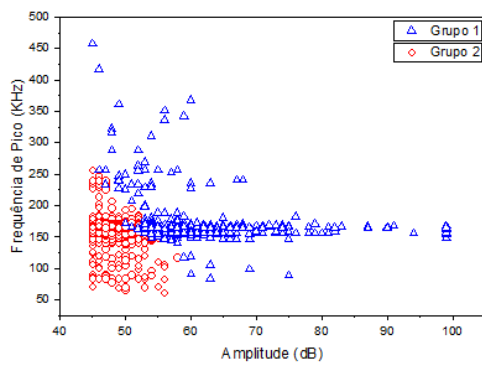
A Figura 4.9 mostra as amostras FZ após serem realizados os ensaios.



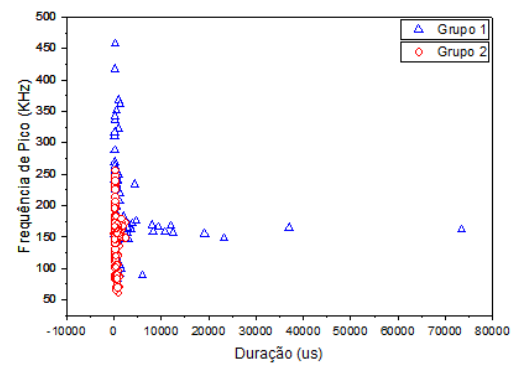
Figura 4.9: Amostras FZ após realizado ensaio de tração.

4.2.3- Distribuição de intervalos de parâmetros de Emissão Acústica

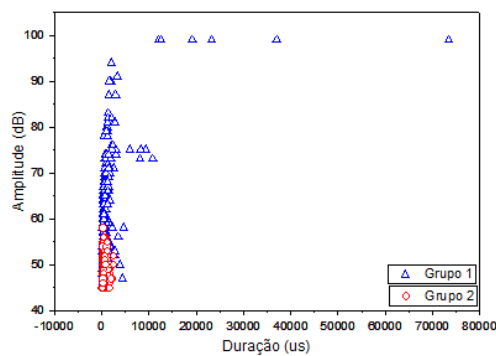
Na Figura 4.10 se encontra a distribuição dos parâmetros avaliados neste trabalho, para as amostras FZ submetidas a carregamentos de tração. Serão apresentados os dados correspondentes a amostra FZ2, justamente por estar mais próximo ao valor intermediário e estar portanto, mais próximo da média dos valores obtidos.



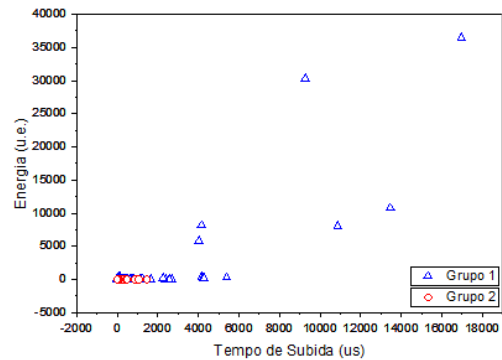
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.10: A distribuição dos dois grupos de sinais de EA, a partir de amostras FZ sob tração em: (a) um espaço de frequências de pico em função da amplitude, (b) um espaço de frequências de pico em função da duração, (c) um espaço de amplitude em função da duração, e em (d) no espaço de energia em função do tempo de subida.

As distribuições dos dois agrupamentos dos sinais de EA (representados como grupos 1 e 2) em vários espaços de parâmetros são mostrados na Figura 4.10. Os sinais a partir das frequências de pico apresentam distribuições nas faixas de 84–458 kHz para o grupo 1, e na faixa de 61–257 kHz para o grupo 2. O Grupo 1 assume uma faixa de frequências bem mais extensa se comparada a região de concentração do grupo 2. Os dois agrupamentos dividem a mesma região na faixa que varia de 84 a 257 kHz, conforme mostrado pela Figura 4.10(a). O agrupamento 2 assume uma região onde os sinais se encontram bastante concentrados e sem a presença de sinais muito isolados. Já o grupo 1, principalmente na região em que assume

frequências superiores a 200 kHz apresenta menor concentração de sinais, entretanto, sem a ocorrência de sinais muito dispersos. Os dois agrupamentos, apresentam uma maior concentração de sinais entre as faixas que variam de 140 kHz a aproximadamente 190 kHz. Portanto, para a frequência de pico os sinais não apresentaram uma distribuição de classificação muito separada e, como já mencionado se sobrepõem em algumas regiões. Já com relação a distribuição de amplitude, a mesma se mostra como um bom indicador na classificação dos sinais de EA uma vez que apresenta regiões bastante distintas. Os sinais correspondentes ao agrupamento de número 2 assumem valores em maior concentração na faixa de 45-53 dB e o agrupamento de 1 assume valores de maior concentração na faixa de 53-99 dB, o que também pode ser observado na Figura 4.10(a).

A Figura 4.10(b) mostra a distribuição dos dois agrupamentos dos sinais de EA em um espaço de frequência de pico em função da duração. Na faixa que varia de aproximadamente 100 a 240 kHz os sinais de frequência de pico dos dois grupos se confundem, no entanto com relação a distribuição de duração o comportamento é de que o grupo 2 assume faixas mais baixas de 32 μ s a aproximadamente 2000 μ s sendo que para o agrupamento de número 1 assume valores de maior concentração, que vão desde 2000 μ s a 73417 μ s. Portanto, a duração apresenta-se como um bom indicador na classificação dos modos de falha, apresentando faixas de sinais em regiões de forma mais definida.

A Figura 4.10(c) também mostra que tanto os parâmetros de amplitude como os de duração apresentaram características de sinal que podem ser tratados como bons classificadores na determinação e caracterização de falhas.

A Figura 4.10(d) mostra dados relacionados a distribuição de energia versus o tempo de subida. Nesta distribuição tanto sinais de energia quanto de tempo de subida mostram regiões que podem ser interpretadas como bem definidas apresentando regiões distintas. O agrupamento 2 assume valores mais baixos que variam de 0-1472 μ s para o tempo de subida e de 0-15 u.e. para a energia. Já o grupo 1 atinge faixas mais elevadas de sinais, variando em maior concentração de aproximadamente 1475-16985 μ s para o tempo de subida e de 15-36504 u.e. para sinais de energia.

A Figura 4.11 apresenta nos eixos verticais os valores de carga (em Quilo-Newton - kN) e os dados de energia acumulada (em unidade de energia $\times 10^3$ - u.e.) obtidos no ensaio de tração, em função do tempo (em segundo - s) representado no eixo horizontal. Cada modo de falha é representado por um grupo - indicado pela letra G.

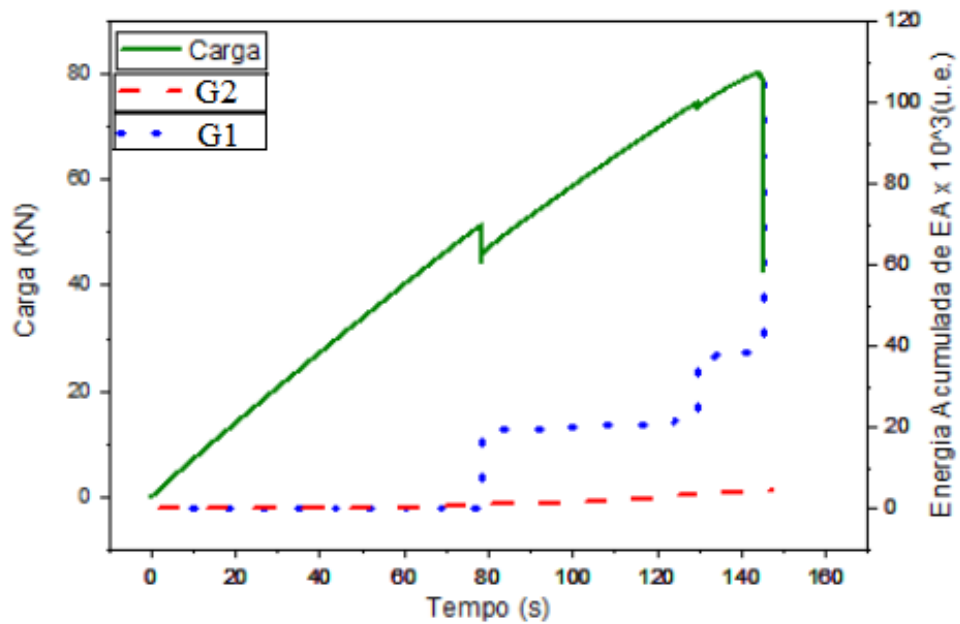


Figura 4.11: Distribuição de Carga e Energia Acumulada de EA em função do Tempo para a amostra FZ2.

Conforme foi visto no item anterior (seção 4.2.3), pelas características referentes a amplitude, duração, energia e tempo de subida podemos encontrar regiões características onde cada agrupamento se concentra. As informações obtidas nos ensaios realizados nas amostras FN também servirão de embasamento nesta análise.

No que diz respeito as faixas de energia foi encontrado um agrupamento, correspondendo ao de número 2 variando de 0 a 15 u.e., confrontando estas informações com os dados obtidos para as amostras FN, foi observado que os agrupamentos correspondentes a trincamento na matriz das amostras encontraram faixas de energia variando entre 0 a 3, 0 a 2 e 0 a 6, respectivamente para as amostras FN1, FN2 e FN3. O que corresponde a uma variação de 150% se considerarmos o maior limite superior de energia encontrado para a amostra FN3 em relação ao valor de energia, também considerando o limite superior, encontrado para a amostra FZ2. No entanto, comparando-se as faixas de amplitude encontradas para as amostras FN com a faixa encontrada para FZ, observamos que estas se apresentam na mesma faixa de valores, ou seja, temos que as faixas de amplitudes correspondentes a falhas na matriz para as amostras FN, foram de 40 a 60 dB, 40 a 57 dB e de 40 a 65 dB, respectivamente para as amostras FN1, FN2 e FN3, sendo que foi encontrado para este grupo de FZ2 uma faixa de amplitude que varia de 45 a 58 dB. Portanto, baseado neste dado, concluímos que o grupo 2 (G2) corresponde ao surgimento de trincas na matriz.

Conforme já foi mencionado ao longo deste trabalho, diversos pesquisadores (Gong *et al.*, 1998; Meraghni *et al.*, 1995; Wadin, 1978; Willian e Jonathan, 1986) salientam em seus trabalhos, os quais tratam de diferentes compósitos com diferentes fibras e resinas, que as faixas de amplitudes de EA correspondem a diferentes mecanismos de falhas, o que reforça a teoria utilizada para caracterizar os modos de falhas encontrados, conforme Figura 4.5.

Conforme mencionado no item 4.1.3, Albouy e Vieille (2014) também utilizaram as faixas de amplitudes, para identificar variadas formas de mecanismos de falhas.

Também baseado nas informações de energia e amplitude, foi considerado que o grupo 1 por apresentar uma faixa de energia que vai desde zero a valores extremamente elevados (de 16.985 u.e.), o mesmo acontecendo para a faixa de amplitude obtida para este modo de falha, foi considerado que este apresenta tanto características de rompimento de fibras quanto de descolamento interfacial, conforme mostrado na Figura 4.11.

Portanto, na Figura 4.11, os sinais de EA associados as falhas nas amostras FZ se iniciam a cerca de 4 segundos após o início dos ensaios, o que corresponde a uma carga em torno de 2,89 kN (≈ 51 MPa), persistindo obviamente até o término dos ensaios, ou seja, próximo dos 143,89 segundos quando efetivamente a amostra evolui à falha funcional. Nesta condição a carga de 79,95 kN (≈ 1400 MPa). Este é o agrupamento mais ativo desse processo até a fratura das amostras que corresponde a trincamento na matriz.

O segundo modo de falha, correspondendo ao descolamento entre a fibra e a matriz e a ruptura das fibras, se inicia a cerca de 9 segundos após início dos ensaios, a uma carga de 6,43 kN (≈ 113 MPa) e persiste até o final dos ensaios, o que corresponde ao instante 143,89 segundos e uma carga de 79,95 kN (≈ 1400 MPa).

4.2.4- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das Amostras 0° (FZ)

As amostras FZ apresentaram 03 (três) modos de falha, que passam por micro-trincamento na matriz, características que demonstram descolamento interfacial na forma de canaletas de assentamento de fibras, como pode ser observado na Figura 4.12, além de ter sido evidenciado uma significativa quantidade de fibras rompidas, como se observa na Figura 4.13.

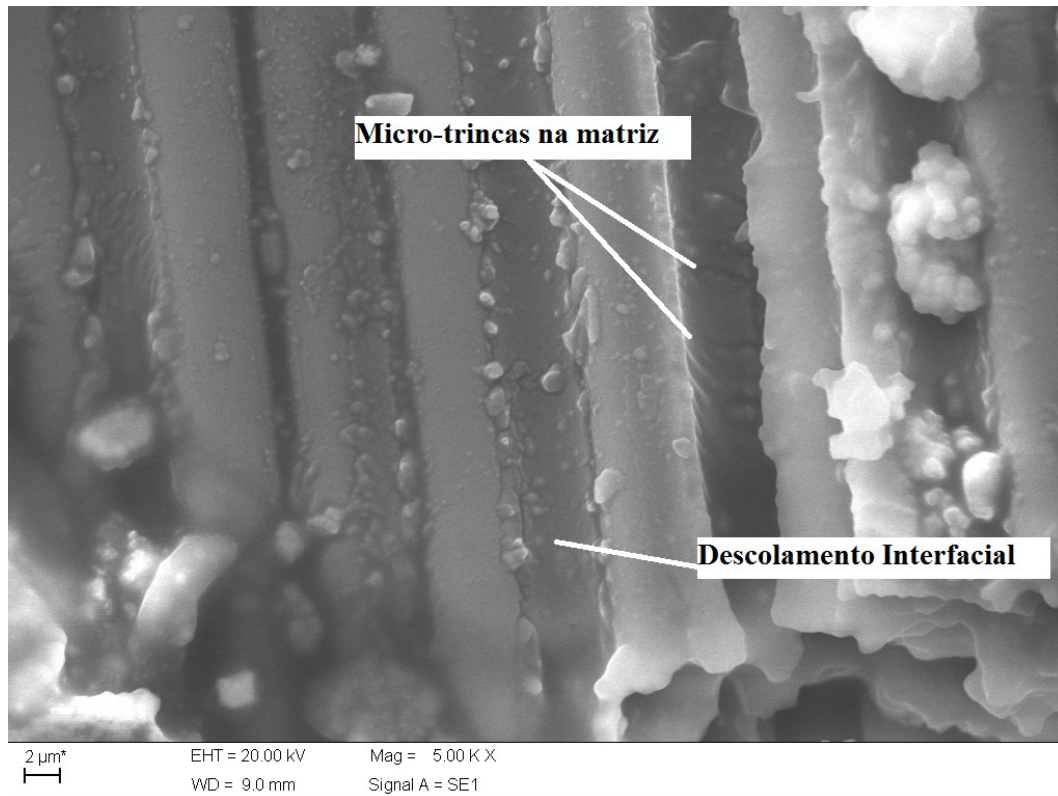


Figura 4.12: Micrografia das amostras FZ obtida por MEV evidenciando micro-trincas na matriz e características de descolamento interfacial.

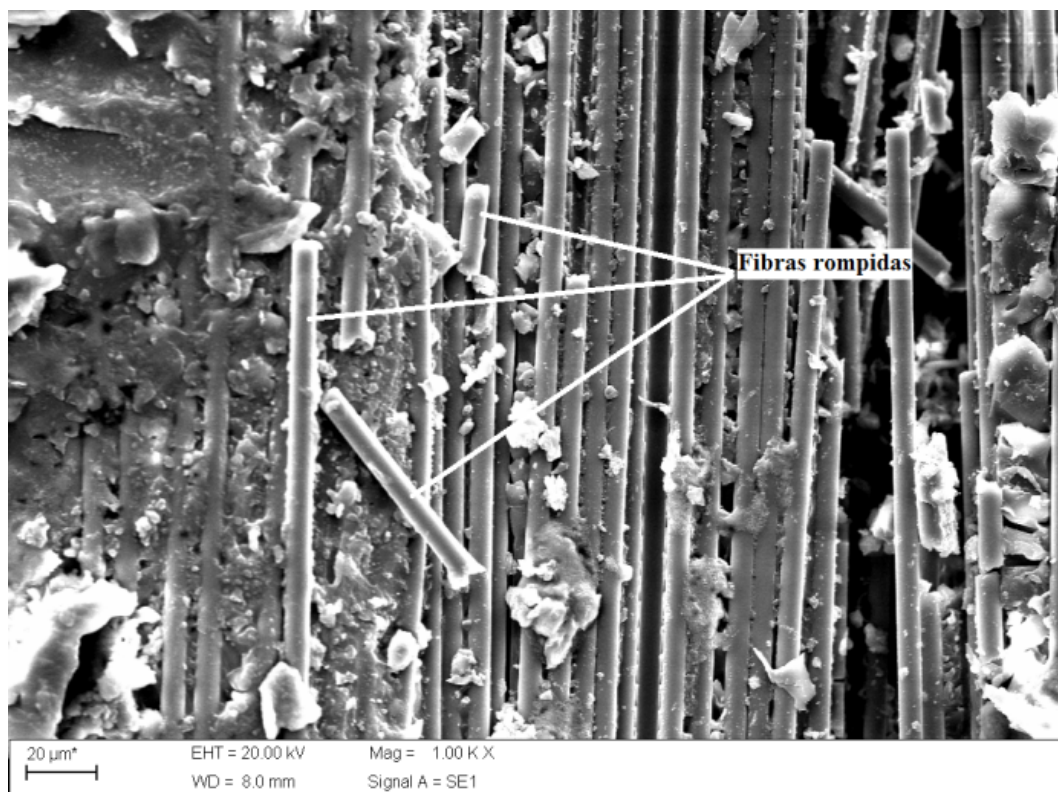


Figura 4.13: Micrografia das amostras FZ obtida por MEV evidenciando ruptura de fibras.

Conforme dados obtidos pelo MEV, foram observados 03 (três) modos de falha para as amostras FZ. Desta forma, deveremos então considerar para cada modo de falha os seguintes intervalos de amplitudes:

- ✓ Grupo 1 – micro-trincas na matriz (de 45 a 58 dB);
- ✓ Grupo 2 – falhas na interface (de 45 a 99 dB);
- ✓ Grupo 3 – ruptura de fibras (de 50 a 99 dB).

4.3- Laminado Carbono/Epóxi $[(\pm 45^\circ)_2]_s$

4.3.1- Dados Resumidos dos Sinais de Emissão Acústica (EA) sob Cargas de Tração

De forma análoga ao que aconteceu com as amostras FZ, em virtude da quantidade de dados obtidos nos ensaios de EA das amostras FQ serem significativamente superiores, mesmo quando comparadas à quantidade de dados obtidos nos ensaios de FZ, houve necessidade de se utilizar um processo de filtragem visando a diminuição da quantidade desses dados. Portanto, os dados com amplitudes abaixo de 53 dB foram descartados. Este filtro não comprometeu os resultados obtidos, uma vez que, a menor faixa de amplitude nos ensaios das amostras FN, foi obtida no intervalo entre 40 e 57 dB para a amostra FN2. Logo, mesmo utilizando, após a filtragem, somente amplitudes superiores a 53 dB, ainda há condições de captação de dados para a menor faixa de amplitude de sinais, correspondente a falhas nas matrizes das amostras.

Nas Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 se encontra o resumo dos dados obtidos para as amostras FQ1, FQ2 e FQ3, respectivamente.

Tabela 4.7: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra FQ1.

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	59	172	8	60	312
	DP	5	38	109	922	2140
	Mín	54	53	0	0	23
	Máx	99	464	8493	57793	100000
	Faixa	45	411	8493	57793	99977

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

Tabela 4.8: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra FQ2.

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	59	169	8	39	254
	DP	5	31	41	419	580
	Mín	54	60	0	0	24
	Máx	99	462	3355	37929	42514
	Faixa	45	402	3355	37929	42490

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

Tabela 4.9: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra FQ3.

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	58	169	14	115	627
	DP	5	32	160	1348	2765
	Mín	54	61	0	0	105
	Máx	99	369	6821	59759	100000
	Faixa	45	308	6821	59759	99895

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

4.3.2- Cálculo do Número de Agrupamentos através do Algoritmo k-Médias

Os dados foram normalizados e foi dado início ao processo de aplicação do reconhecimento de padrões através do algoritmo k-médias.

No Stata, o algoritmo foi então executado, onde foi feita a distribuição dos agrupamentos para cada valor de k, e a partir daí foi efetuado o cálculo do valor de silhueta, também para cada valor de k, ou seja, para cada situação de distribuição dos agrupamentos.

Novamente foi adotado para o cálculo de k um intervalo variando de 2 até 10. A Figura 4.14 mostra o valor de silhueta e de erro em relação ao número de classificação k. Quando os sinais de EA foram divididos em cinco categorias, o valor silhueta assume seu máximo de 0,5928. Portanto, o número de classificação ótima para k é 5 para as amostras FQ sob tração, indicando que há cinco tipos de falhas.

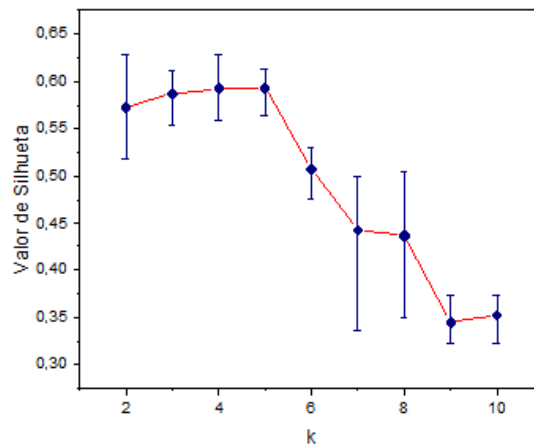


Figura 4.14: Valor de erro e de Silhueta em relação ao número de classificação k (amostras FQ).

O valor máximo de silhueta encontrado, corresponde a uma estrutura de agrupamento razoável, conforme mencionado na seção 2.16 – Tabela 2.2.

Para Marinucci (2001), em se tratando de cisalhamento intralaminar, a falha poderá ocorrer apresentando algumas características quando a lâmina estiver submetida a tensão cisalhante no plano (*in-plane shear stress*), são elas: i) falha da matriz por cisalhamento intralaminar e ii) falha da matriz associada ao descolamento da fibra.

Gutkin *et. al* (2011) investigou falhas em compósitos CFRP submetidos a cargas de tração e monitorados por EA. Nos ensaios das amostras a $[(\pm 45^\circ)_8]_s$ submetidas a cisalhamento, como resultado foram encontrados 03 modos de falhas, dentre eles microfissuras na matriz por entre as fibras (nas quais as microfissuras se aglutinavam para dividir a interface fibra/matriz) e algumas delaminações entre as camadas $+45^\circ$ e -45° , que surgiram próximo ao fim do teste. Alguns sinais de escorregamento e delaminação foram detectados pela técnica de Ultrassom C-Scan.

Mais recentemente, Albouy e Vieille (2014) também utilizaram as faixas de amplitudes, além de características relativas a duração e número de contagens de sinais para identificar variadas formas de mecanismos de falhas. Em seu trabalho uma medição *in situ* de EA foi aplicada para monitoramento de danos durante testes de tração gradual em laminados carbono/PPS (compósito termoplástico do tipo Poli(sulfeto de fenileno) reforçado com fibras de carbono) a temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea (T_g) do material. Neste trabalho foi também utilizado técnicas de agrupamento como forma de reconhecimento de padrões através do Mapa Auto-Organizável de Kohonem, que é um tipo de RNA (Rede Neural Artificial).

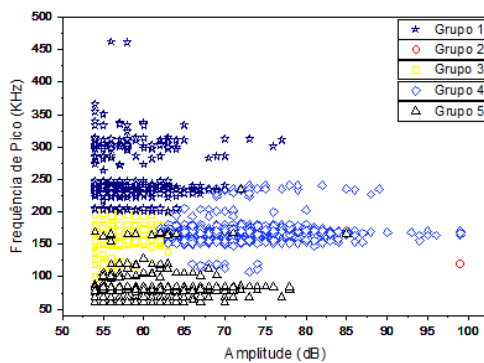
A Figura 4.15 mostra as amostras FQ após serem realizados os ensaios.



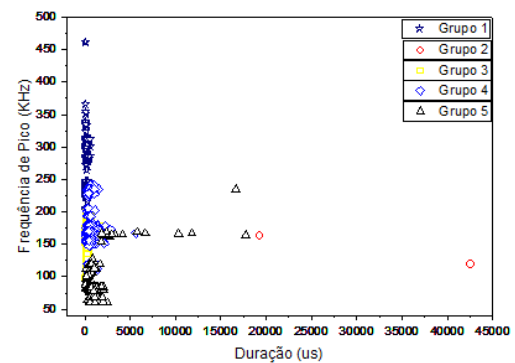
Figura 4.15: Amostras FQ após serem realizados os ensaios de tração.

4.3.3- Distribuição de intervalos de parâmetros de Emissão Acústica

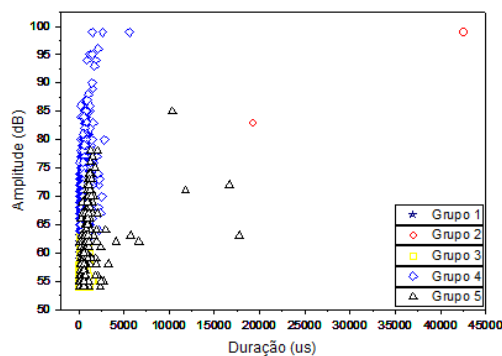
Na Figura 4.16 temos a distribuição dos parâmetros avaliados neste trabalho, para as amostras FQ submetidas a carregamentos de tração. Serão apresentados os dados correspondentes a amostra FQ2, justamente por corresponder ao valor intermediário e estar portanto, mais próximo da média dos valores obtidos.



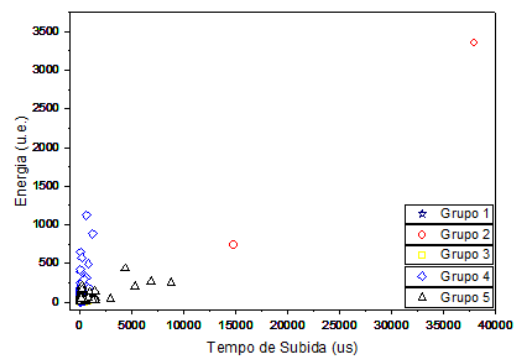
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.16: A distribuição dos cinco grupos de sinais de EA, a partir de amostras FQ sob tração em: (a) um espaço de frequências de pico em função da amplitude, (b) um espaço de frequências de pico em função da duração, (c) um espaço de amplitude em função da duração, e em (d) no espaço de energia em função do tempo de subida.

As distribuições destes cinco agrupamentos dos sinais de EA (representados como grupos 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente) em vários espaços de parâmetros são mostrados na

Figura 4.16. Os sinais a partir das frequências de pico apresentam distribuições distintas para alguns grupos. Na faixa de 60 kHz a aproximadamente 125 kHz estão alocados os agrupamentos de números 2 e 5. Já na faixa aproximadamente 126 a 200 kHz se encontram alocados também dois grupos de sinais, representados pelos agrupamentos de número 3 e 4. E na faixa que varia de aproximadamente 200 a 462 kHz o agrupamento 1 atua de forma isolada. Os agrupamentos que se sobrepuseram nas mesmas faixas, apresentaram entretanto, distribuições distintas quando observamos a amplitude dos sinais, na qual o agrupamento 5 apresenta maior concentração de distribuição entre 54 a 82 dB, e nas faixas de 83 a 99 dB, 54 a 62 dB e de 62 a 99 dB, para os grupos 2, 3 e 4, respectivamente. Apesar de em algumas regiões, a frequência de pico ter apresentado distribuições correspondentes a mais de um agrupamento esse indicador não se mostra ruim, pois para as regiões que apresentaram mais de um agrupamento, as mesmas podem ser diferenciadas através de suas distribuições de amplitude. Portanto, conseguimos através da utilização destas duas variáveis, identificar de forma clara cada região de atuação de cada grupo, mostrando que a frequência de pico e a amplitude são classificadores úteis na caracterização dos modos de falha neste material, conforme mostrado pela Figura 4.16(a).

As Figuras 4.16(b) e (c) mostram respectivamente a distribuição dos cinco agrupamentos dos sinais de EA em um espaço de frequência de pico em função da duração, e uma distribuição de amplitude em função da duração. Na distribuição de duração os sinais assumem faixas de valores que vão de 31-832 μs , 24-2.058 μs , 79-5.644 μs , 87-17.749 μs e 19.294-42.514 μs , para os agrupamentos 1, 3, 4, 5 e 2, respectivamente, variando das faixas com menores valores até faixas que assumem valores mais elevados. Os agrupamentos 1, 3 e 4 não apresentam uma faixa diferenciada e se sobrepõem em relação as suas distribuições de duração, o grupo 5 apresenta sinais com valores mais elevados e separados dos demais, sendo que apenas o agrupamento 2 apresenta uma faixa de valores característicos e claramente diferenciada dos demais.

A Figura 4.16(d) mostra dados relacionados a distribuição de energia em função do tempo de subida dos sinais. Para o tempo de subida os grupos apresentaram uma distribuição assumindo valores, na escala do menor para o maior, na faixa de 1-507 μs , 0-789 μs , 0-1.272 μs , 0-8.761 μs e finalmente 14.751-37.929 μs , para os grupos 1, 3, 4, 5 e 2, respectivamente. Somente o agrupamento 2 assume uma faixa de valores clara e diferenciada dos demais. Em relação a energia, os dados encontrados mostraram que os agrupamentos assumem valores nas faixas de 0-28 u.e., 0-36 u.e., 1-436 u.e., 3-1.125 u.e. e 747-3.355 u.e., para os agrupamentos de números 3, 1, 5, 4 e 2, respectivamente, e praticamente todas as faixas de distribuições se

sobrepõem em determinados intervalos de sinais. Portanto, com relação a energia, nenhum dos parâmetros de EA se apresentou com faixas claras e diferenciadas em relação aos demais, conseqüentemente a energia não pode ser considerada como um bom parâmetro classificador.

Logo, para amostras FQ a frequência de pico e a amplitude se apresentaram como os melhores classificadores, no que diz respeito ao parâmetro ser ou não adequado para discriminação de tipos de falhas. A duração apesar de não ter apresentado papel fundamental, apresentou-se útil, principalmente na identificação do agrupamento 2, porém, em relação aos demais grupos não exerceu nenhuma influência na identificação de regiões distintas, conforme evidenciado pela Figura 4.16(a), (b), (c) e (d).

Se considerarmos dados de frequência de pico representados pelos seus limites superiores teremos a seguinte ordem de classificação (que vai do menor ao maior valor): grupo 2, grupo 3, grupo 5, grupo 4 e grupo 1, que assumem os valores de 164 kHz, 202 kHz, 235 kHz, 241 kHz e 462 kHz, respectivamente. No entanto, caso consideremos os valores de amplitude teremos a seguinte ordem de classificação (variando do menor para o maior): grupos 3, 1, 5, 4 e 2, respectivamente. Esta última ordem de classificação também representa a escala de variação de energia (não-acumulada).

Li *et al.*, (2015) em seu trabalho investigaram os mecanismos de danos durante cargas de tração em laminados de fibra de vidro/epóxi. Os danos nas amostras foram correlacionados aos danos reais através de observação ótica durante o carregamento. Neste trabalho, além de outros parâmetros, a amplitude foi utilizada como parâmetro classificador na identificação de modos de falha e foram encontradas fronteiras, onde trincas transversais foram encontradas para amplitudes abaixo de 55 dB e acima deste valor foi encontrado delaminação no material, relacionadas aos agrupamentos. O estudo valida o uso da análise de *cluster* da EA, para a identificação de modelos de danos em laminados reforçados com tecido de fibra de vidro.

Como nossa análise até então, tem sido baseada na amplitude de sinal, parâmetro este que se mostrou um bom classificador dos modos de falha e esteve presente em todas as análises para cada orientação de amostra, não teria sentido utilizarmos uma variável diferente para classificação. Consideraremos então, a amplitude de sinal como o parâmetro a ser seguido e, portanto a ordem de classificação (em ordem crescente) será respectivamente para os grupos 3, 1, 5, 4 e 2.

A Figura 4.17 apresenta nos eixos verticais os valores de carga (em Quilo-Newton – kN) e os dados de energia acumulada (em unidade de energia x 10^3 – u.e.) obtidos no ensaio de tração, em função do tempo (em segundo – s) representado no eixo horizontal. Cada modo de falha é representado por um grupo – indicado pela letra G.

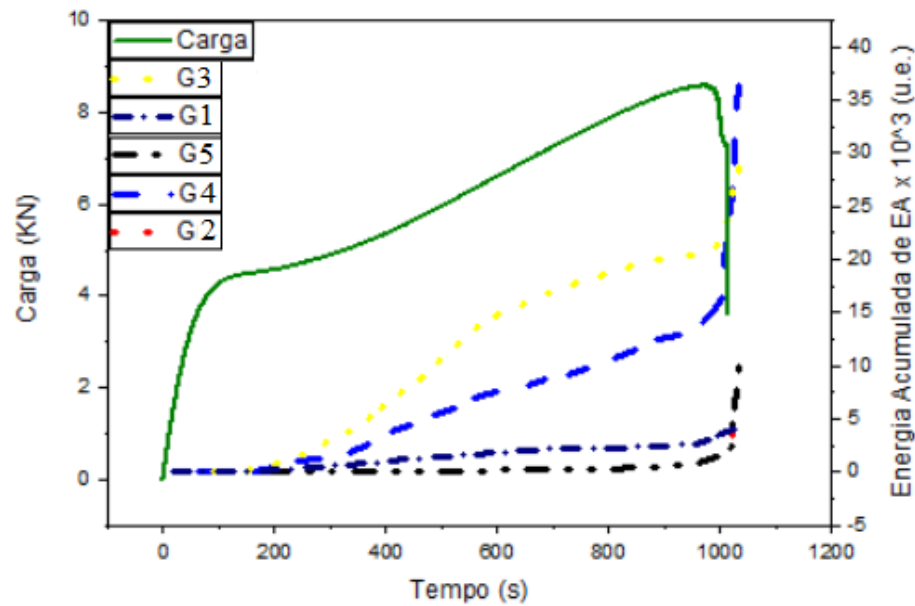


Figura 4.17: Distribuição de Carga e Energia Acumulada de EA em função do Tempo para a amostra FQ2.

Fazendo uma análise mais específica no que diz respeito as faixas de amplitude apresentadas nesta situação, verifica-se que, os sinais dos agrupamentos tiveram suas maiores concentrações de distribuição nas faixas que variam de 54 a 62 dB, 54 a 70 dB, 54 a 82 dB, 62 a 99 dB e 83 a 99 dB, respectivamente para os grupos 3, 1, 5, 4 e 2. Segundo Meraghni e Mullin (1995), que em seu trabalho obtiveram faixas de amplitudes para vários modos de falha obtidos do modelamento micromecânico de matrizes de epóxi sob degradação, a faixa correspondente a falha na matriz, tais como micro-trincas e fricção entre matriz/matriz varia até aproximadamente 60 dB, a região onde predomina falhas associadas à interface varia entre aproximadamente 60 a 82 dB e regiões acima de 82 dB predomina falhas associadas às fibras. El Mahi et al. (2010) também obtiveram para materiais similares, as faixas de amplitudes relacionadas aos respectivos modos de falha, conforme a seguir:

- ✓ Micro-trincas na matriz – 42 a 60 dB;
- ✓ Descolamento – 60 a 70 dB;
- ✓ Ruptura de fibras – 70 a 100 dB;

Confrontando as informações obtidas no parágrafo anterior com as faixas de amplitude encontradas e seus respectivos agrupamentos para as amostras a $\pm 45^\circ$, podemos concluir que os sinais correspondentes a cada grupo estão relacionados aos seguintes modos de falha:

- ✓ Grupo 3 – deformação plástica da matriz;
- ✓ Grupo 1 – divisão intra-feixes;
- ✓ Grupo 5 – divisão entre a matriz e feixes de fibras;
- ✓ Grupo 4 – delaminação;
- ✓ Grupo 2 – arrancamento de fibra (*pull-out*).

Estes modos de falha são validados pela análise fractográfica com utilização de imagens MEV, as quais são apresentadas mais adiante.

É importante comentar que, na pesquisa realizada por Albouy e Vieille (2014) foram encontrados 4 (quatro) modos de falha, os quais foram nomeados da seguinte forma: plastificação da matriz + rotação das fibras (fricção), divisão intra-feixes, descolamento entre a matriz/pacotes de fibras e *pull-out* + delaminação.

4.3.4- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das Amostras $\pm 45^\circ$ (FQ)

As amostras FQ apresentaram 04 (quatro) modos de falha, os quais passam pela divisão dentro de feixes de fibras que foram separadas, e divisão entre a matriz e pacotes de fibras (conforme pode ser observado pelas Figuras 4.18 e 4.19), uma quantidade considerável de fibras sem resina aderida nas suas superfícies, indicando que as mesmas sofreram um processo de arrancamento (*pull-out*), conforme pode ser observado na Figura 4.21, e finalizando com a delaminação entre camadas (conforme mostrado na Figura 4.20).

A deformação plástica da matriz e a rotação de fibras não foram encontrados durante a micrografia das regiões de fratura das amostras.



Figura 4.18: Micrografia das amostras FQ obtida por MEV evidenciando a divisão intra-feixes e divisão entre a resina e pacotes de fibras.

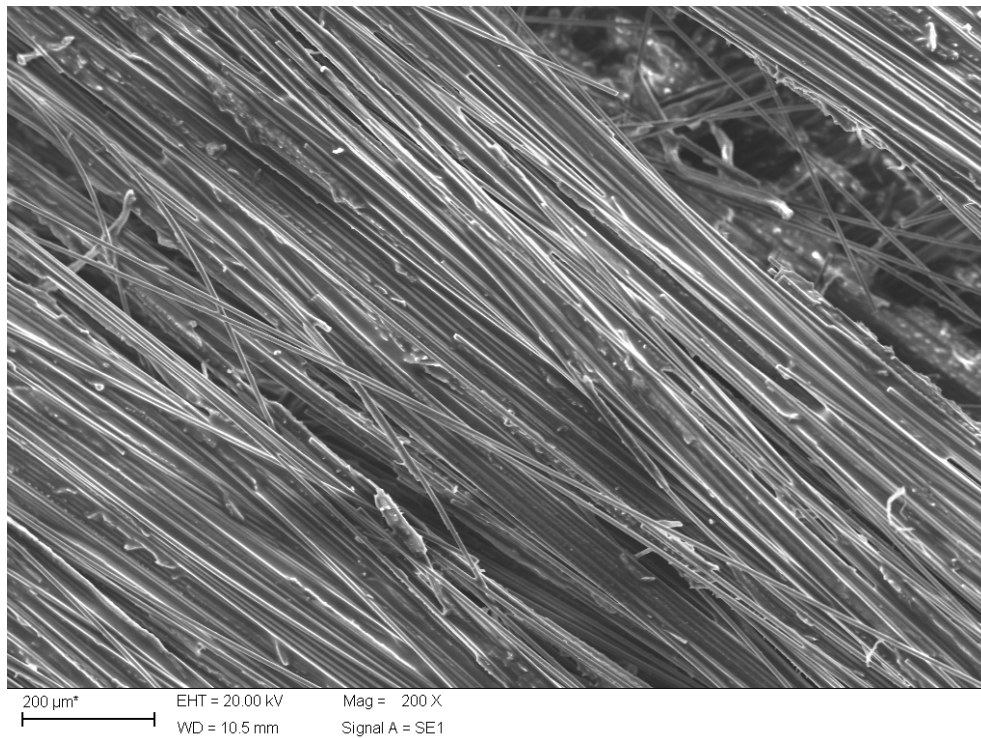


Figura 4.19: Micrografia das amostras FQ obtida por MEV – ampliação da região que contém a divisão intra-feixes.

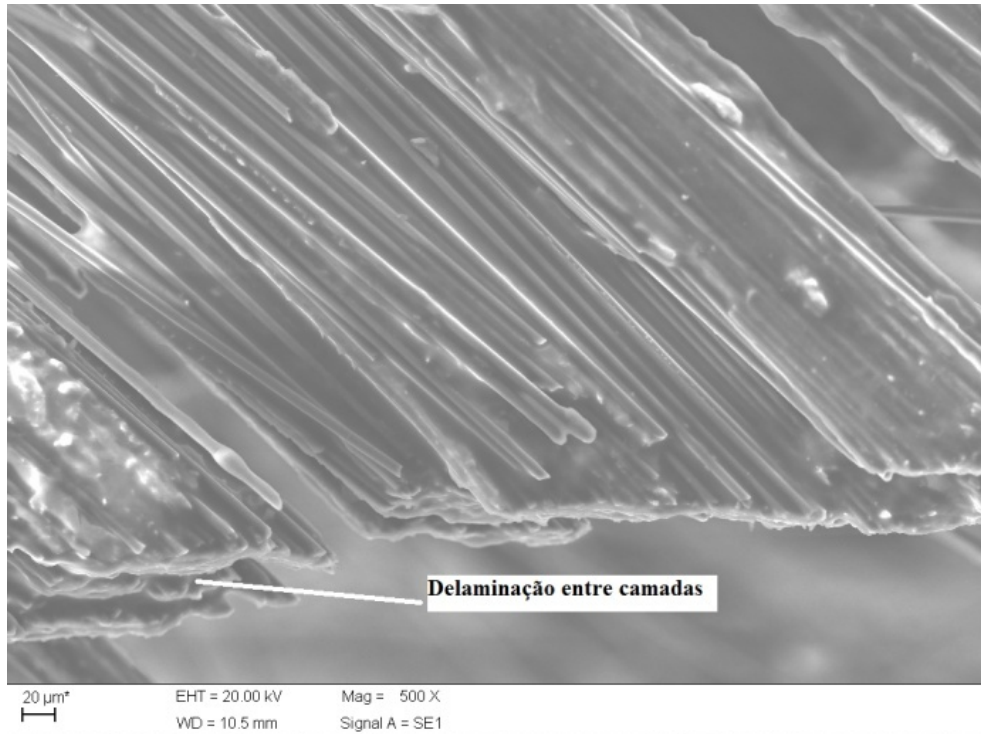


Figura 4.20: Micrografia das amostras FQ obtida por MEV evidenciando delaminação entre camadas.

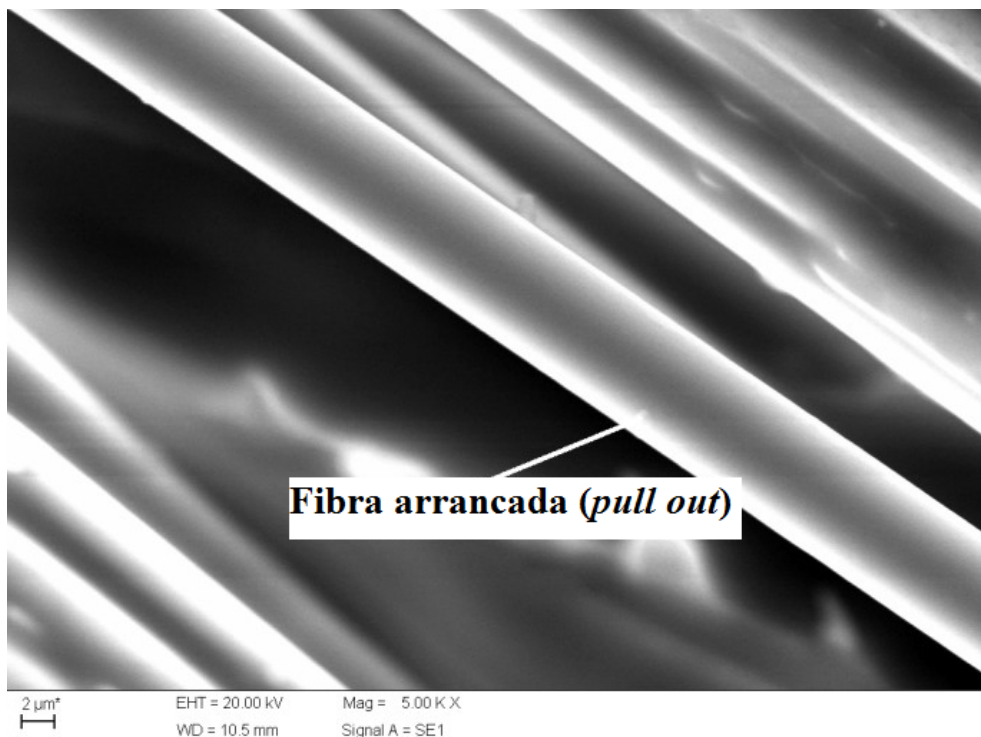


Figura 4.21: Micrografia das amostras FQ obtida por MEV evidenciando fibras arrancadas.

Portanto, temos que, para a situação em questão o modelo apresentado para quantificação e caracterização dos modos de falha se mostrou eficaz.

Como mostrado na Figura 4.17, os sinais associados as falhas nas amostras FQ se iniciam a cerca de 28 segundos após o início do teste de tração, correspondendo neste instante a uma carga de 2,1 kN (≈ 47 MPa), persistindo até o fim do teste, atingindo então um carregamento de 8,57 kN (≈ 193 MPa). Este modo de falha está associado à deformação plástica da resina, no entanto, não foi encontrado evidências de sua ocorrência nas análises de MEV. A divisão dentro dos feixes de fibras se inicia próximo dos 16 segundos a uma carga de 1,2 kN (≈ 29 MPa) evoluindo até o instante 969,1 segundos, o que corresponde ao carregamento máximo do ensaio, ou seja, 8,57 kN (≈ 193 MPa). Os sinais que formam o agrupamento 5 associado a divisão entre a matriz e pacotes de fibras de inicia a aproximadamente 185 segundos após o início do ensaio, o que corresponde a um carregamento de 4,5 kN (≈ 102 MPa) persistindo até o fim do carregamento de tração. Já o modo de falha associado a delaminação entre as camadas se inicia a aproximadamente 62 segundos, o que corresponde a um carregamento de 3,6 kN (≈ 81 MPa), também persistindo até o final do ensaio. Finalmente, o agrupamento 2 que corresponde ao modo de falha associado a arrancamento de fibras (*pull-out*) foi registrado a 1022 segundos após o início do ensaio, sendo capturado pela emissão acústica. Porém neste exato instante, a amostra já se encontrava descarregada, ou seja, o teste de tração já havia finalizado.

Conforme dados obtidos pelo MEV, foram observados 04 (quatro) modos de falha para as amostras FQ. Desta forma, deveremos então considerar para cada modo de falha os seguintes intervalos de amplitudes:

- ✓ Grupo 1 – divisão intra-feixes (de 54 a 77 dB);
- ✓ Grupo 2 – delaminação (de 58 a 99 dB);
- ✓ Grupo 3 – arrancamento de fibras (de 83 a 99 dB);
- ✓ Grupo 4 - divisão entre a matriz e pacotes de fibras (de 54 a 64 dB).

4.4- Prótese Transtibial (Prótese do Pé)

Como estudo de caso, é efetuado o mesmo procedimento descrito na seção 3.2 para que sejam analisados os mecanismos de falha, bem como sua quantificação, em protótipos de

próteses transtibiais, nas quais devido à quantidade de camadas utilizadas, orientações de fibra e também à sua geometria, apresenta uma estrutura bem mais complexa, o que induz a um maior grau de dificuldade na identificação e quantificação dos mecanismos de falha presentes nesta estrutura. Neste caso, foram utilizadas 2 (duas) amostras para demonstrar a repetibilidade nos resultados dos ensaios.

As próteses são submetidas a ensaios de compressão e monitoradas por EA.

Para a execução destes ensaios, a estrutura da prótese foi subdividida em 2 (duas) regiões, conforme já mencionado nas seções 3.2.5 a 3.2.7 (Figuras 3.11 e 3.12), e descrito novamente (conforme Figura 4.22) a seguir:

- ✓ Calcanhar;
- ✓ Solado Total (Solado Frontal + Calcanhar).

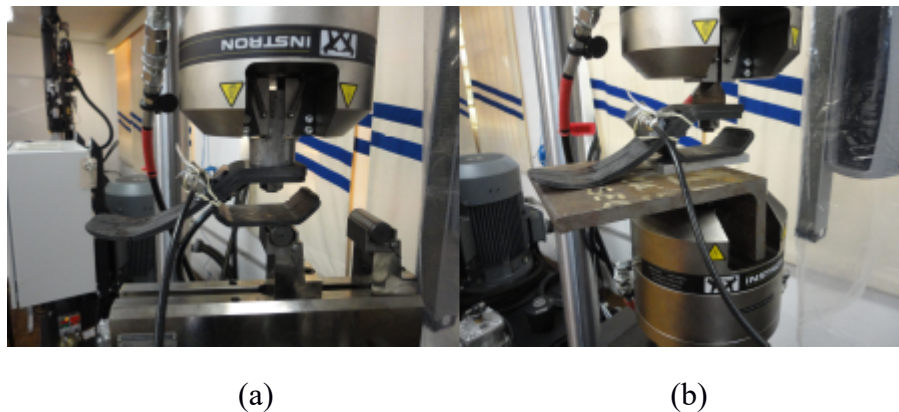


Figura 4.22: Ensaio de compressão da prótese transtibial nas regiões (a) do calcanhar e (b) área total do solado.

4.4.1- Dados Resumidos dos Sinais de Emissão Acústica sob Cargas de Compressão na Região do Calcanhar da Prótese Transtibial

4.4.1.1- Carga variando de 0 a 260 kg

Nas Tabelas 4.10 e 4.11 se encontra o resumo dos dados obtidos para as amostras N1 e N2, respectivamente.

Tabela 4.10: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra N1.

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	55	150	18	42	170
	DP	8	17	93	50	237
	Mín	48	0	0	0	0
	Máx	99	182	1586	547	2125
	Faixa	51	182	1586	547	2125

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

Tabela 4.11: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra N2.

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	53	149	14	38	171
	DP	10	24	52	47	232
	Mín	45	66	0	0	0
	Máx	92	181	511	228	1604
	Faixa	47	115	511	228	1604

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

A Figura 4.23 mostra o valor de silhueta e de erro em relação ao número de classificação k. Quando os sinais de EA foram divididos em três categorias, o valor silhueta assume seu máximo de 0,527. Portanto, o número de classificação ótima para k é 3 para a região do calcanhar da prótese sob carga de compressão variando de 0 a 260 kg, indicando que há três tipos de falhas.

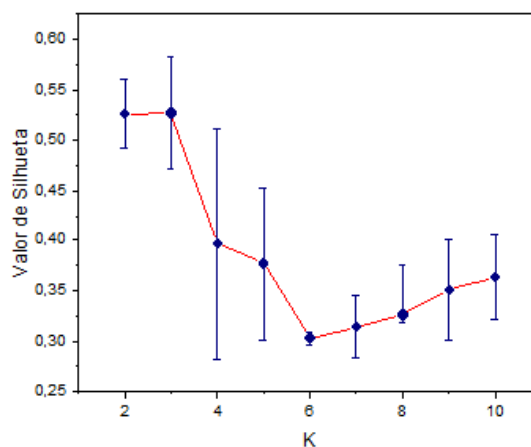


Figura 4.23: Valor de erro e de Silhueta em relação ao número de classificação k (Calcanhar Prótese – carga de 0 a 260 kg).

O valor máximo de silhueta encontrado, corresponde a uma estrutura de agrupamento razoável, conforme mencionado na seção 2.16 – Tabela 2.2.

4.4.1.1.1- Distribuição de intervalos de parâmetros de Emissão Acústica

Na Figura 4.24 temos a distribuição dos parâmetros avaliados neste trabalho, para as próteses submetidas a carregamentos de compressão, variando de 0 a 260 kg. Serão apresentados os dados correspondentes a amostra N2, justamente por ter apresentado a mesma quantidade de agrupamentos que a média dos valores obtidos e também um comportamento mais claro com relação a distribuição dos sinais de EA.

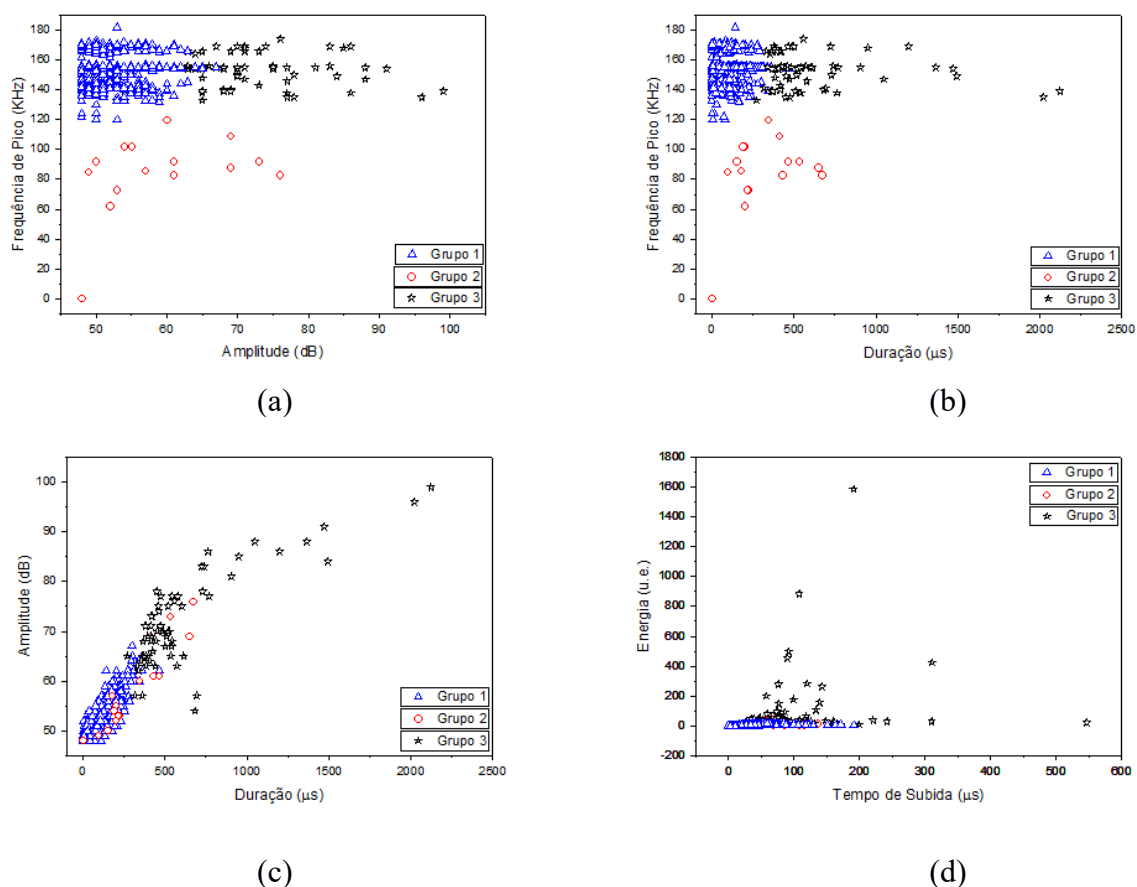


Figura 4.24: A distribuição dos três grupos de sinais de EA, a partir das próteses transtibiais sob cargas de compressão variando de 0 a 260 kg na região do calcanhar em: (a) um espaço de frequências de pico em função da amplitude, (b) um espaço de frequências de pico em função da duração, (c) um espaço de amplitude em função da duração, e em (d) no espaço de energia em função do tempo de subida.

As distribuições dos três agrupamentos dos sinais de EA (representados como grupos 1, 2 e 3, respectivamente) em vários espaços de parâmetros são mostrados na Figura 4.24. Os sinais originados a partir da frequência de pico apresentam distribuições nas faixas de 0-120 kHz para o agrupamento 2, e nas frequências variando de aproximadamente 125-180 kHz os grupos 1 e 3 dividem o mesmo espaço. Entretanto, a distribuição de amplitudes já mostra as regiões características para os dois agrupamentos que se sobrepuseram na distribuição de frequência de pico), ou seja, o grupo 1 assume valores que variam de 48 kHz a aproximadamente 65 kHz, e o grupo 3 assume valores variando de aproximadamente 65 kHz a 99 kHz. Logo, a distribuição de amplitudes aliada a distribuição de frequência de pico se mostraram bons indicadores com regiões bem definidas para a caracterização de modos de falha, conforme mostrado pela Figura 4.24(a).

A Figura 4.24(b) mostra a distribuição dos dois agrupamentos dos sinais de EA em um espaço de frequência de pico em função da duração. De forma semelhante ao que apresentado para a distribuição de amplitude, as distribuições de duração apresentam características que evidenciam a formação de grupos distintos, sendo que o grupo 1 apresenta valores compreendidos entre 0 μ s a aproximadamente 450 μ s, e para o grupo 3 existe uma maior concentração de sinais na faixa de 450 μ s a 2125 μ s. Já o grupo 2 concentra-se em uma faixa de 0 μ s a 671 μ s, se sobrepondo com parte dos outros 2 grupos. Entretanto, pela distribuição de frequência de pico conseguimos separar o agrupamento 2. Portanto, a distribuição de frequência de pico aliada a distribuição de duração realmente se mostram como bons indicadores na separação de agrupamentos para classificação dos modos de falha.

A Figura 4.24(c) apresenta uma distribuição de amplitude em função da duração dos sinais. A distribuição de amplitude evidencia de forma clara a formação dos agrupamentos 1 e 3, que variam respectivamente, em maior concentração, de 48 dB a aproximadamente 65 dB, e na faixa de 65 dB a 99 dB. Já o agrupamento 2 não apresenta uma região de atuação diferenciada. A distribuição de duração segue conforme já mencionado, ou seja, de 0 μ s a 450 μ s e de 450 μ s a 2125 μ s, respectivamente para os agrupamentos 1 e 3.

A Figura 4.24(d) mostra dados relacionados a distribuição de energia em função do tempo de subida. Com relação ao tempo de subida os grupos não apresentaram boas características de distribuição, apresentando grande concentração de faixas sobrepostas. Com relação a energia, o agrupamento 3 apresenta faixas variando de 7 u.e. a 1586 u.e. e os agrupamentos 1 e 2 apresentam faixas variando respectivamente, de 0-191 e de 0-136, se sobrepondo na faixa que varia de 0-136 u.e.

Portanto, alguns dados de EA mostrados na Figura 4.24 estão se sobrepondo, principalmente quando se observa a distribuição de energia. Entretanto, sinais de frequência de pico aliados a distribuições de amplitudes e de duração se mostram como os parâmetros de melhor classificação para os tipos de trincas provenientes do material.

A Figura 4.25 apresenta os valores de carga (em Newton - N) e dados de energia acumulada (em unidade de energia – u.e.) obtidos no ensaio de compressão, em função do tempo (em segundo – s). Os modos de falha são representados por cada grupo – indicado pela letra G.

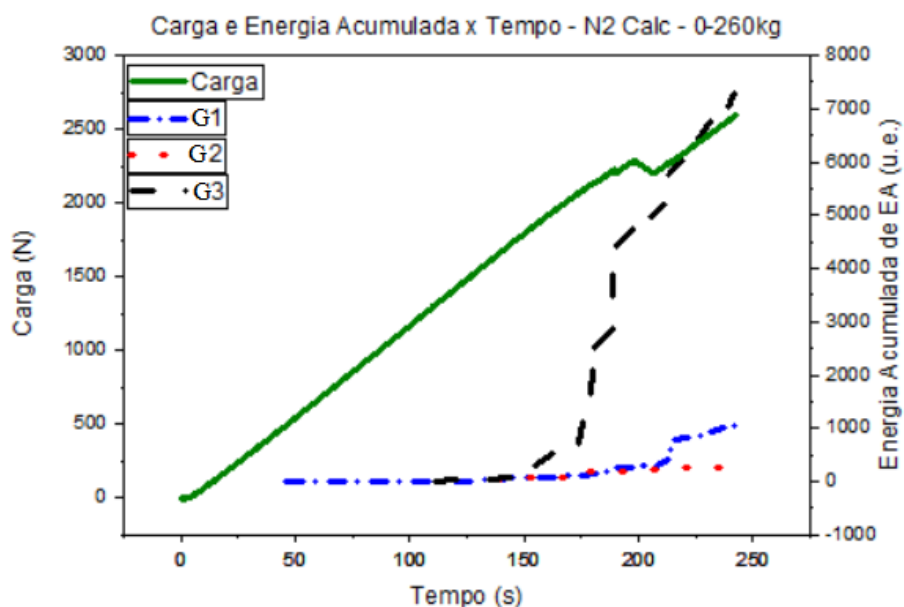


Figura 4.25: Distribuição de Carga e Energia Acumulada de EA em função do Tempo – Prótese transtibial sob cargas de compressão de 0 a 260 kg na região do calcanhar.

4.4.1.2- Carga variando de 0 a 500 kg

Nas Tabelas 4.12 e 4.13 se encontra o resumo dos dados obtidos para as amostras N1 e N2, respectivamente.

Tabela 4.12: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra N1.

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	54	159	9	26	109
	DP	7	13	68	41	181
	Mín	48	0	0	0	0
	Máx	99	313	3073	694	2538
	Faixa	51	313	3073	694	2538

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

Tabela 4.13: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra N2.

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	55	158	20	40	148
	DP	8	18	196	94	273
	Mín	48	0	0	0	0
	Máx	99	297	9446	4967	8832
	Faixa	51	297	9446	4967	8832

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

A Figura 4.26 mostra o valor de silhueta e de erro em relação ao número de classificação k. Quando os sinais de EA foram divididos em duas categorias, o valor silhueta assume seu máximo de 0,728. Portanto, o número de classificação ótima para k é 2 para a região do calcanhar da prótese sob carga de compressão variando de 0 a 500 kg, indicando que há dois tipos de falhas.

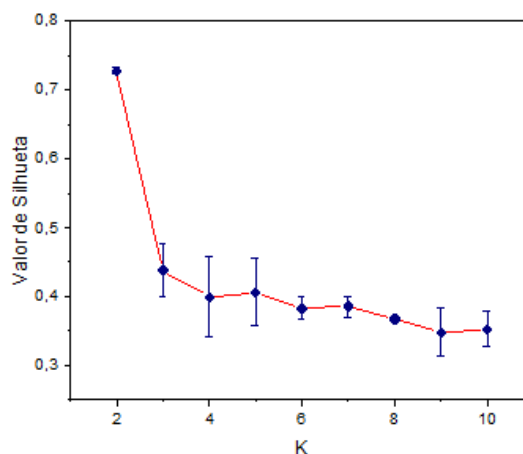


Figura 4.26: Valor de erro e de Silhueta em relação ao número de classificação k (Calcanhar Prótese – Carga de 0 a 500 kg).

O valor máximo de silhueta encontrado, corresponde a uma estrutura de agrupamento forte, conforme mencionado na seção 2.16 – Tabela 2.2.

4.4.1.2.1- Distribuição de intervalos de parâmetros de Emissão Acústica

Na Figura 4.27 temos a distribuição dos parâmetros avaliados neste trabalho, para as próteses submetidas a carregamentos de compressão, variando de 0 a 500 kg. Serão apresentados os dados correspondentes a amostra N2, justamente por ter apresentado um comportamento mais claro com relação a distribuição dos sinais de EA.

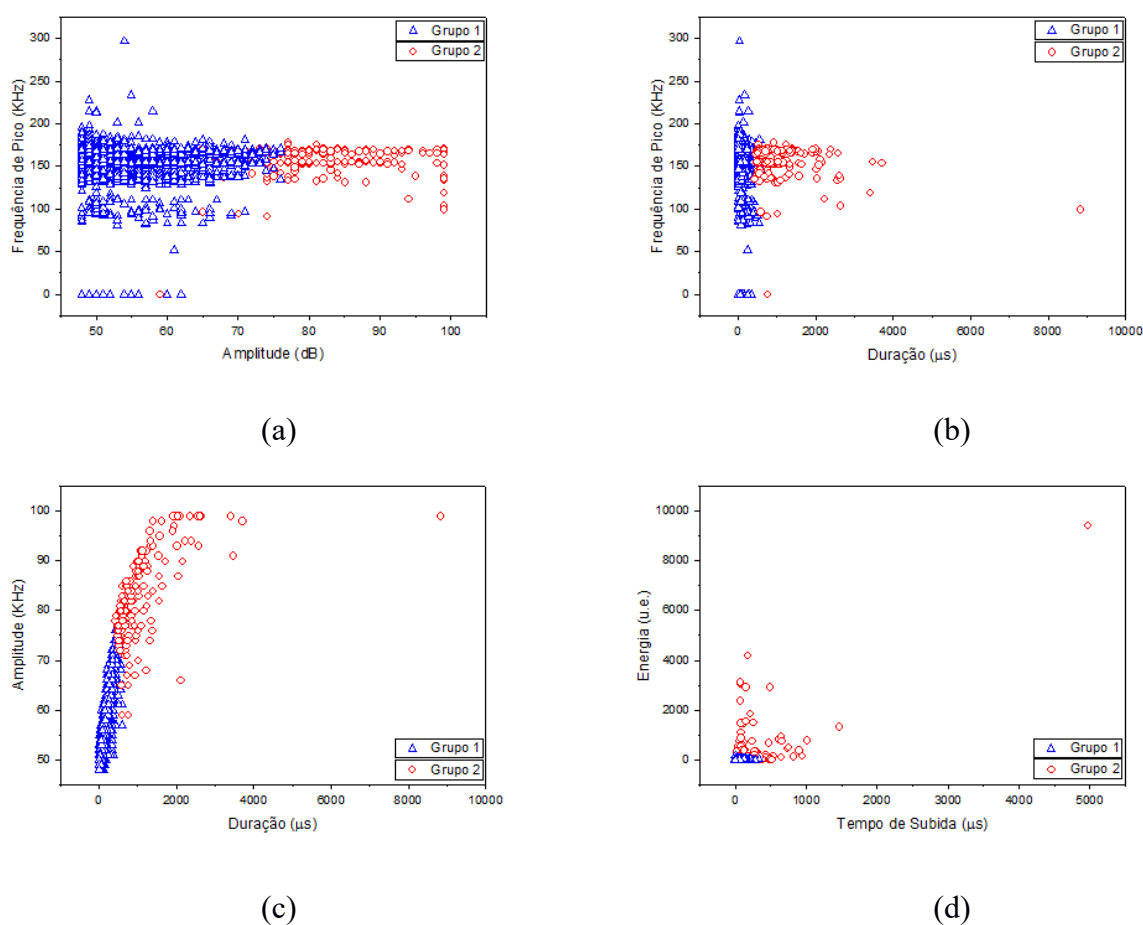


Figura 4.27: A distribuição dos dois grupos de sinais de EA, a partir das próteses transtibiais sob cargas de compressão variando de 0 a 500 kg na região do calcanhar em: (a) um espaço de frequências de pico em função da amplitude, (b) um espaço de frequências de pico em função da duração, (c) um espaço de amplitude em função da duração, e em (d) no espaço de energia em função do tempo de subida.

Na Figura 4.27(a) temos a distribuição de frequência de pico em função da amplitude. Nesta figura podemos observar, que a distribuição de amplitudes fornece regiões bem distintas correspondentes a área de atuação de cada agrupamento. O grupo 1 assume valores correspondentes a maior concentração de sinais na faixa de 48-74 dB, e o grupo 2 assume maior concentração na faixa que varia de 74-99 dB. Para a distribuição de frequências de pico

os dois agrupamentos se sobrepõem principalmente entre aproximadamente 130 kHz a 178 kHz, sendo que assumem valores entre 0-297 kHz e 0-178 kHz, respectivamente para os agrupamentos de números 1 e 2.

Na distribuição de frequência de pico em função da duração, temos uma situação análoga para a frequência de pico, na qual as distribuições se sobrepõem em grande parte das regiões entre os dois grupos. Já a distribuição de duração apresenta duas regiões bem distintas, nas quais os agrupamentos assumem valores de maior concentração variando entre 0 μ s a 410 μ s e de 410 μ s a 8832 μ s, para os agrupamentos 1 e 2, de forma respectiva (conforme podemos observar na Figura 4.27(b)).

A Figura 4.27(c) apresenta uma distribuição de amplitude em função da duração de sinais, e de forma análoga ao que foi apresentado pelas Figuras 4.27(a) e (b), estas duas variáveis se mostram como bons indicadores para a caracterização de modos de falhas no material.

Na Figura 4.27(d) podemos observar dados relacionados a distribuição de energia em função do tempo de subida. A distribuição de energia apresenta valores assumindo faixas de 0-157 u.e. para o grupo 1 e de 19-9446 u.e. para o grupo 2, sendo que regiões se sobrepõem entre os valores de 19 u.e a 157 u.e.. Para o tempo de subida, temos distribuições que variam entre 0-336 μ s e 3-4967 μ s, respectivamente para os grupos 1 e 2. A distribuição de tempo de subida também se sobrepõe na faixa que varia de 3 μ s a 336 μ s.

Levando-se em consideração o que foi observado nas Figuras 4.27(a), (b), (c) e (d), temos que as variáveis que melhor se apresentaram como classificadores para se determinar os modos de falha foram a amplitude e a duração. Para as demais variáveis, grandes regiões de sobreposição apareceram, demonstrando que as variáveis relacionadas a este tipo de distribuição não se mostraram como boas classificadoras.

A Figura 4.28 apresenta os valores de carga (em Quilo-Newton - kN) obtidos no ensaio de compressão com os dados de energia acumulada (em unidade de energia $\times 10^3$ – u.e.) de cada modo de falha (representado por cada grupo (G)), em função do tempo (em segundo – s).

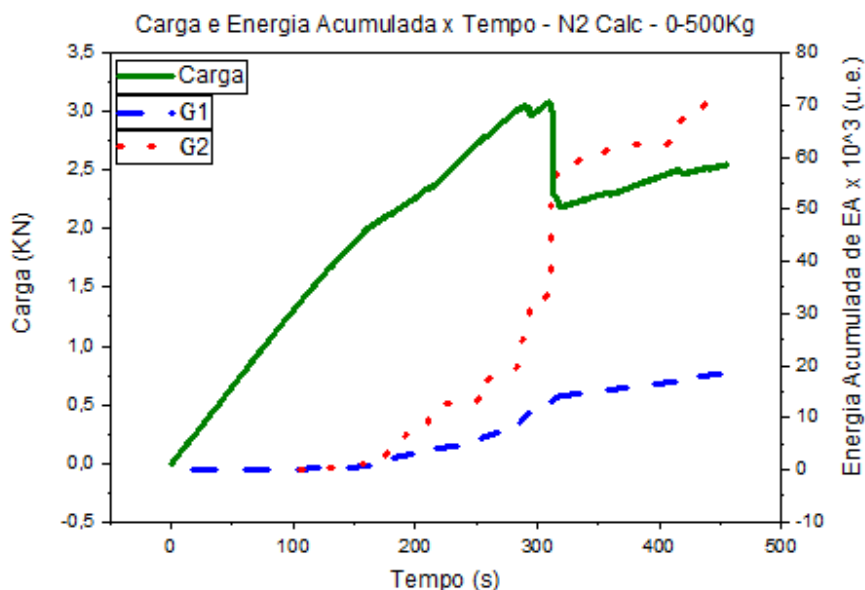


Figura 4.28: Distribuição de Carga e Energia Acumulada de EA em função do Tempo – Prótese transtibial sob cargas de compressão de 0 a 500 kg na região do calcanhar.

4.4.2- Análise das Falhas encontradas na Região do Calcanhar na Prótese

As faixas de sinais de amplitude, encontradas para as amostras quando carregadas de 0 a 260 kg, apresentaram maior concentração de 48 a 65 dB, de 48 a 76 dB e de 65 a 99 dB, respectivamente para os grupos 1, 2 e 3. As maiores concentrações de sinais quando o carregamento foi de 0 a 500 kg, assumiram as faixas que variaram de 48 a 74 dB e de 74 a 99 dB, respectivamente para os grupos 1 e 2.

Antes de se efetuar as análises, as seguintes considerações foram assumidas:

- ✓ foi utilizado o sentido de orientação das fibras, conforme esquema mostrado na Figura 4.29;
- ✓ a perda de sinal (atenuação), entre os componentes da prótese foi considerada desprezível;
- ✓ os efeitos da influência da geometria da peça nos sinais de EA, foram considerados desprezíveis.



Figura 4.29: Eixos de orientação das fibras na prótese.

Chang e Springer (1986 apud CANDEIAS, 2009) estudaram o comportamento de uma viga curva em forma de L feita em material compósito, quando fixada por uma extremidade e aplicada uma carga na outra, induzindo um momento fletor. Dentre algumas das conclusões que obtiveram neste trabalho, foi que o modo de falha por delaminação dependia da variação do raio interno da zona curva, denominado R_i . Concluíram também que a sequência de empilhamento tem um papel fundamental na resistência mecânica dos elementos curvos. Como exemplo foi mencionado o caso de uma viga com o empilhamento $[0/90/0]$ ser muito mais resistente que uma viga curva com o empilhamento $[90/0/90]$.

Sun e Kelly (1988 apud CANDEIAS, 2009) estudaram a mesma configuração geométrica analisada por Chang e Springer em 1986 (conforme Figura 4.30) e focaram o seu estudo em três sequências de empilhamento distintas e convenientemente dispostas de forma a isolar um dos modos de falha: falha transversal na matriz devido a tensões de flexão e falha por delaminação devido as tensões de tração verificadas ao longo da espessura na região curva (tensões radiais). Foram fabricadas dois tipos de vigas, as quais fabricadas em grafite/epóxi e fibra de vidro/epóxi, orientadas a 0° e 90° . Neste trabalho, foram utilizados corpos de prova fabricadas por empilhamento manual sobre um molde de aço, posteriormente colocado em bolsa de vácuo e curado em autoclave. Ensaíram os corpos de prova fabricados, em uma máquina de ensaios com aplicação manual da carga para facilitar a identificação dos modos de falha, podendo assim parar a carga a qualquer instante. Esta identificação era feita por um microscópio posicionado lateralmente a máquina. Experimentalmente observaram que os dois laminados que estavam projetados para falharem por tensões de flexão, falharam como previsto, verificando-se que a falha se originava na matriz e ocorria sempre nas

camadas a 0° . Entretanto, a falha última, era sempre por delaminação. O outro laminado dos três construídos falhou, como esperado, logo por delaminação, sendo esta logo a falha última.

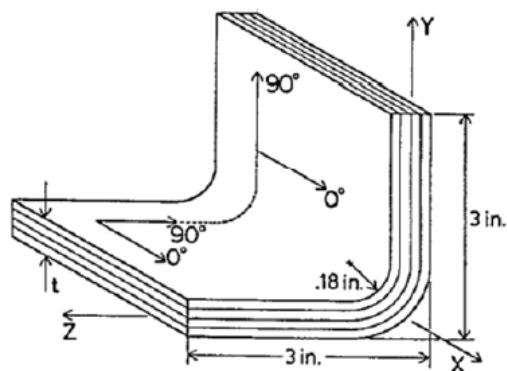


Figura 4.30: Viga curva em forma de L estudada por Sun e Kelly (1988) (Candeias, 2009).

Martin (1990 apud CANDEIAS, 2009), fez uma análise baseada na mecânica da fratura para determinar a propagação da falha após ter ocorrido a primeira fissura por delaminação. Foi verificado ainda de forma experimental que, enquanto a delaminação inicial cresce à volta da região curva devido a um aumento da carga aplicada, a tensão radial máxima verificada no raio interno da zona curva aumentava para um nível suficiente, de modo a causar uma nova delaminação que, para ser iniciada nessa região, não haveria necessidade de um aumento da carga aplicada.

Martin e Jackson (1993 apud CANDEIAS, 2009) fizeram um trabalho analítico e experimental necessário para prever a delaminação inicial num compósito curvo laminado, sujeito a cargas estáticas e de fadiga. O corpo de prova usado tinha a mesma configuração do usado por Martin (1990) e o material utilizado na sua fabricação era, grafite/epóxi, porém com camadas a 0° e 90° de orientação. Foi escolhida uma sequência de empilhamento que originasse a falha na matriz das lâminas dispostas a 90° , originando assim a delaminação numa camada adjacente. Neste trabalho, foi observado que uma falha na matriz pode ser evitada se o empilhamento é escolhido de modo que as tensões tangenciais nas lâminas a 90° não sejam muito elevadas. Durante os ensaios, apuraram que a primeira falha verificada no corpo de prova era a perda de rigidez na região curva à flexão. Verificaram, de forma macroscópica, que a falha na matriz ocorria realmente nas camadas a 90° mais afastadas da fibra neutra devido a tensões circunferenciais, e posteriormente delaminação.

Considerando as informações dos estudos efetuados por Chang e Springer (1986), Sun e Kelly (1988), Martin (1990) e Jackson (1993), pode-se concluir que as falhas na prótese sob carregamento até 260 kg, ocorrem primeiramente na matriz das camadas a 90° (a qual predomina a resistência da matriz), evoluíram para camadas adjacentes (incluindo camadas a $\pm 45^\circ$) gerando então a delaminação entre as camadas, e possivelmente culminando, em virtude da alta energia obtida dos sinais de EA desta amostra, em alguma ruptura nas fibras das camadas a 0°.

Sob carregamento até 500 kg, baseando nos sinais de amplitudes alcançadas nos ensaios, e considerando supostamente que já houve danos na matriz das camadas a 90° no primeiro carregamento, iniciou-se diretamente com a delaminação entre camadas adjacentes às camadas 90°, evoluindo para ruptura de fibras nas camadas a 0°.

De acordo com El Mahi *et al.* (2010), Meraghni e Mullin (1995) e Wisnom (1995), e com base na distribuição de parâmetros de EA mostrados pelas Figuras 4.24 e 4.27, podemos concluir que os sinais correspondentes a cada grupo estão relacionados aos seguintes modos de falha:

Carregamento de 0 a 260 kg:

- ✓ Grupo 1 – surgimento de trincas na matriz das camadas a 90°;
- ✓ Grupo 2 – delaminação das camadas a 90° com camadas adjacentes;
- ✓ Grupo 3 – ruptura de fibra das camadas a 0°.

Carregamento de 0 a 500 kg:

- ✓ Grupo 1 – delaminação das camadas a 90° com camadas adjacentes;
- ✓ Grupo 2 – ruptura de fibra das camadas a 0°.

Vale ressaltar, que os grupos correspondentes à delaminação, assumiram faixas de amplitude relativamente similares, entretanto os valores correspondentes a energia de sinal aumentaram substancialmente quando o carregamento foi até 500 kg, variando de 0 – 75 u.e. para 0 – 157 u.e.. O mesmo aconteceu para o modo de falha correspondente a ruptura de fibras para cargas até 500 Kg, o qual variou de 7 - 1586 u.e. para 19 - 9446 u.e., reforçando serem provenientes do mesmo modo de falha, porém com características de falha mais severas.

4.4.3- Planar (Região total do solado = solado frontal + calcanhar)

4.4.3.1- Carga de 0 a 260 Kg

Nas Tabelas 4.14 e 4.15 se encontra o resumo dos dados obtidos para as amostras N1 e N2, respectivamente.

Tabela 4.14: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra N1 (carga 0 a 260 Kg – região total do solado).

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	54	135	12	39	151
	DP	7	37	126	46	234
	Mín	48	0	0	0	0
	Máx	99	316	5133	1013	7049
	Faixa	51	316	5133	1013	7049

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

Tabela 4.15: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra N2 (carga 0 a 260 Kg – região total do solado).

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	57	164	20	47	202
	DP	9	13	61	43	235
	Mín	48	53	0	0	0
	Máx	94	181	699	220	1667
	Faixa	46	128	699	220	1667

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

A Figura 4.31 mostra o valor de silhueta e de erro em relação ao número de classificação k . Quando os sinais de EA foram divididos em quatro categorias, o valor silhueta assume seu máximo de 0,467. Portanto, o número de classificação ótima para k é 4 para a região do calcanhar da prótese sob carga de compressão variando de 0 a 260 kg, indicando que há três tipos de falhas.

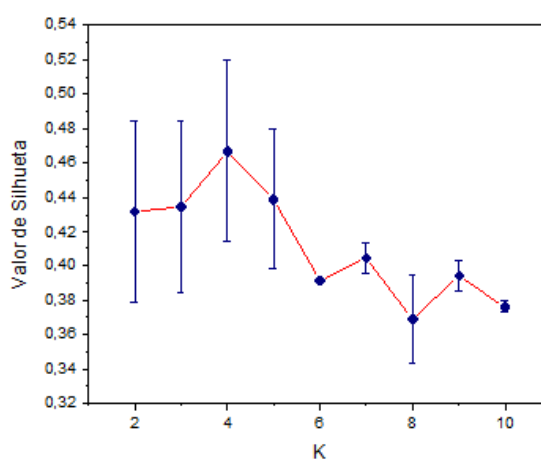


Figura 4.31: Valor de erro e de Silhueta em relação ao número de classificação k (Região Total Solado Prótese – Carga de 0 a 260 kg).

O valor máximo de silhueta encontrado, corresponde a uma estrutura de agrupamento fraca, conforme mencionado na seção 2.16 – Tabela 2.2.

4.4.3.1.1- Distribuição de intervalos de parâmetros de Emissão Acústica

Na Figura 4.32 temos a distribuição dos parâmetros avaliados neste trabalho, para as próteses submetidas a carregamentos de compressão, variando até 260 kg. Serão apresentados os dados correspondentes a amostra N1, justamente por ter apresentado um comportamento mais claro com relação a distribuição dos sinais de EA.

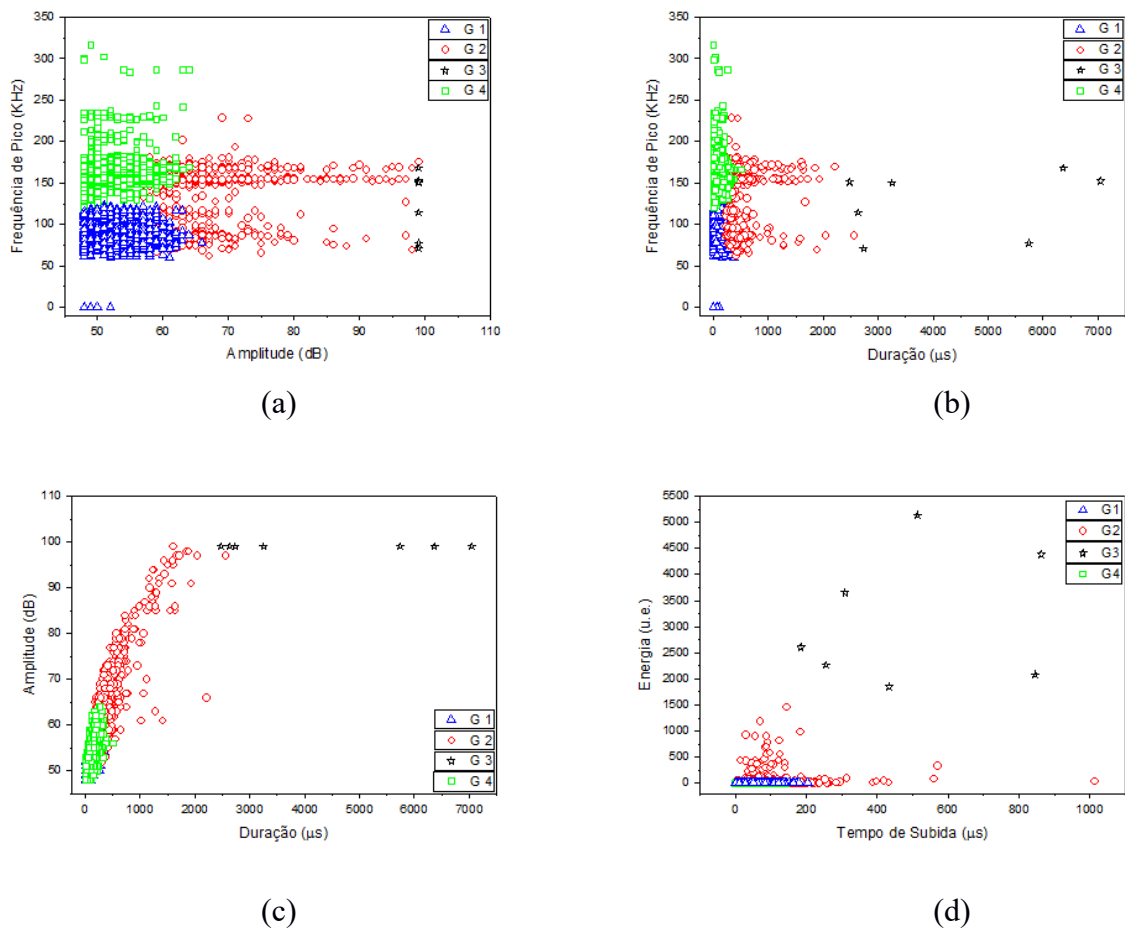


Figura 4.32: A distribuição dos quatro grupos de sinais de EA, a partir das próteses transtibiais sob cargas de compressão variando de 0 a 260 kg na região total do solado em: (a) um espaço de frequências de pico em função da amplitude, (b) um espaço de frequências de pico em função da duração, (c) um espaço de amplitude em função da duração, e em (d) no espaço de energia em função do tempo de subida.

Na Figura 4.32(a) temos a distribuição de frequência de pico em função da amplitude. Podemos observar que, os agrupamentos 1 e 4 assumem regiões bastante distintas, variando de 0-120 kHz para o grupo 1, e de 120-316 kHz para o grupo 4. Os agrupamentos 2 e 3 se sobrepõem na mesma região, assumindo faixas que variam de 62-229 kHz e de 71-168 kHz, respectivamente. Estes últimos agrupamentos, entretanto, podem ser bem diferenciados quando observamos suas distribuições de amplitudes, que variam de 52-99 dB para o grupo 2, e o grupo 3 assume sua distribuição em 99 dB. Para os agrupamentos 1 e 4, a amplitude não atua como um bom classificador, uma vez que assume valores sobrepostos variando entre 48-66 dB e 48-64 dB, respectivamente.

Para a distribuição de frequência de pico em função da duração de sinal, temos que a primeira variável atua como uma boa classificadora para os grupos 1 e 4, conforme já foi mencionado no parágrafo anterior. Já a distribuição de duração é considerada uma boa classificadora para os agrupamentos 2 e 3, que assumem faixas variando de 138 μs a aproximadamente 2400 μs e de 2482 μs a 7049 μs , respectivamente, considerando suas regiões de maior concentração. Para os agrupamentos 1 e 4, apresenta grandes regiões de sobreposição, as quais variam de 0-432 μs e de 0-510 μs , respectivamente, conforme evidenciado pela Figura 4.32(b).

A Figura 4.32(c) apresenta uma distribuição de amplitude em função da duração de sinais, sendo que estas duas variáveis se mostram como bons indicadores para a caracterização de modos de falhas no material.

Na Figura 4.32(d) temos a distribuição de energia em função do tempo de subida. Para a distribuição de energia, podemos observar que o único grupo que assume uma região completamente distinta das demais é o grupo 3. O grupo 2, apresenta uma pequena região de sobreposição. Este grupo assume valores de 4 u.e. até 1491 u.e.. Os demais agrupamentos possuem faixas de sobreposição, sendo que seus valores de energia se situam entre 0-14 u.e. e 0-19 u.e., respectivamente para os grupos 4 e 1.

Logo, observando-se as Figuras 4.32(a), (b), (c) e (d), temos que as variáveis que melhor se apresentaram como classificadores para se determinar os modos de falha foram a amplitude, frequência de pico e a duração, sendo que, para as demais variáveis grandes regiões de sobreposição se apresentaram.

A Figura 4.33 apresenta os valores de carga (em Quilo-Newton - kN) obtidos no ensaio de compressão com os dados de energia acumulada (em unidade de energia $\times 10^3$ – u.e.) de cada modo de falha (representado por cada grupo (G)), em função do tempo (em segundo – s).

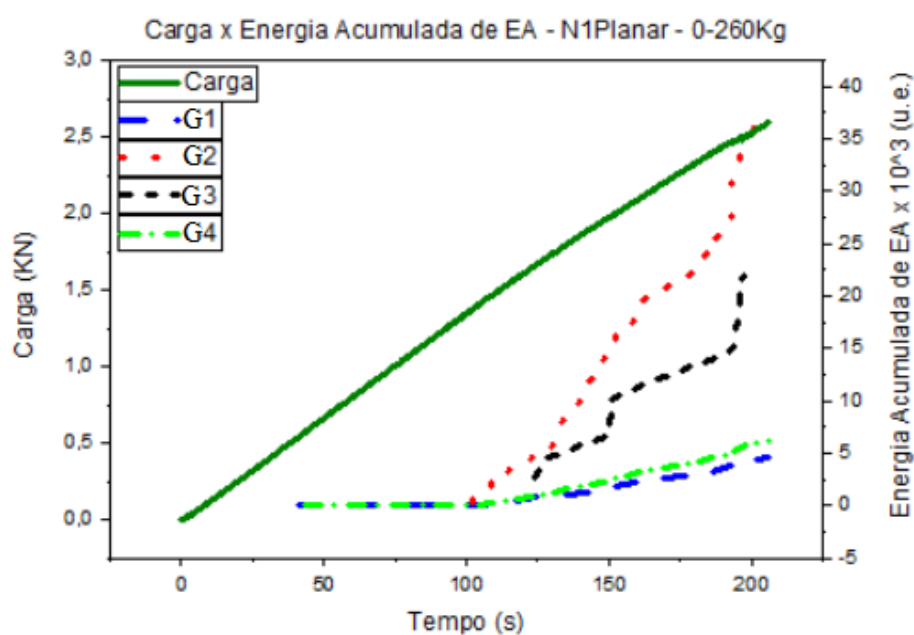


Figura 4.33: Distribuição de Carga e Energia Acumulada de EA em função do Tempo – Prótese transtibial sob cargas de compressão de 0 a 260 kg na região total do solado.

4.4.3.2- Carga de 0 a 500 kg

Nas Tabelas 4.16 e 4.17 se encontra o resumo dos dados obtidos para as amostras N1 e N2, respectivamente.

Tabela 4.16: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra N1 (carga 0 a 500 kg – região total do solado).

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	55	147	19	41	158
	DP	7	31	222	66	251
	Mín	48	0	0	0	0
	Máx	99	337	9059	2397	7041
	Faixa	51	337	9059	2397	7041

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

Tabela 4.17: Dados resumidos obtidos do ensaio de EA para a amostra N2 (carga 0 a 500 kg – região total do solado).

		Variáveis de Emissão Acústica				
		Amplitude (dB)	Frequência de Pico (kHz)	Energia (u.e.)	Tempo de Subida (μ s)	Duração (μ s)
Dados Estatísticos	Média	58	163	87	70	293
	DP	11	27	614	119	602
	Mín	48	0	0	0	0
	Máx	99	297	6994	1116	5623
	Faixa	51	297	6994	1116	5623

DP = desvio padrão; Mín = valor mínimo; Máx = valor máximo; Faixa = intervalo entre valores Mín e Máx; u.e.= unidade de energia.

A Figura 4.34 mostra o valor de silhueta e de erro em relação ao número de classificação k. Quando os sinais de EA foram divididos em duas categorias, o valor silhueta assume seu máximo de 0,732. Portanto, o número de classificação ótima para k é 2 para a região do calcanhar da prótese sob carga de compressão variando de 0 a 500 kg, indicando que há três tipos de falhas.

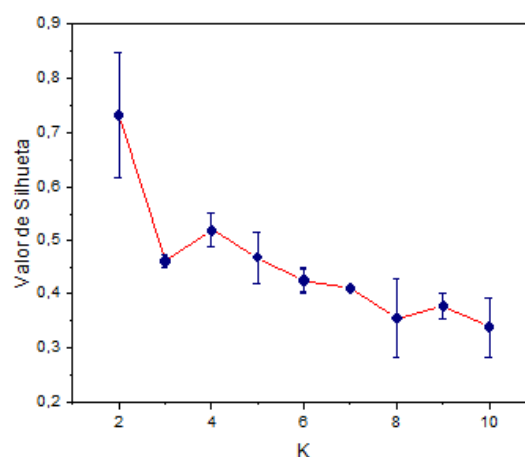


Figura 4.34: Valor de erro e de Silhueta em relação ao número de classificação k (Região Total Solado Prótese – Carga de 0 a 500 kg).

O valor máximo de silhueta encontrado, corresponde a uma estrutura de agrupamento forte, conforme mencionado na seção 2.16 – Tabela 2.2.

4.4.3.2.1- Distribuição de intervalos de parâmetros de Emissão Acústica

Na Figura 4.35 temos a distribuição dos parâmetros avaliados neste trabalho, para as próteses submetidas a carregamentos de compressão, variando até 500 kg. Serão apresentados os dados correspondentes a amostra N1, justamente por ter apresentado um comportamento mais claro com relação a distribuição dos sinais de EA.

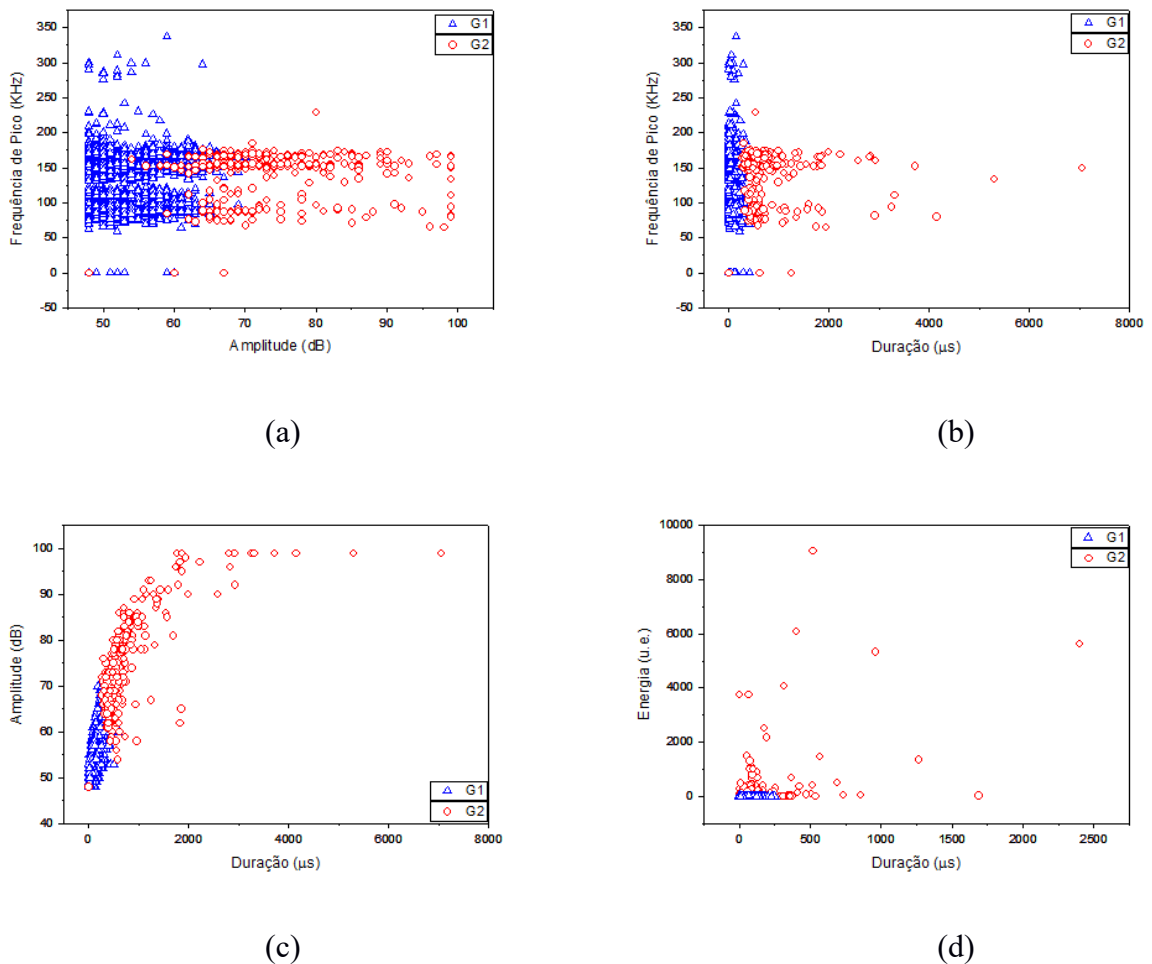


Figura 4.35: A distribuição dos dois grupos de sinais de EA, a partir das próteses transtibiais sob cargas de compressão variando de 0 a 500 kg na região total do solado em: (a) um espaço de frequências de pico em função da amplitude, (b) um espaço de frequências de pico em função da duração, (c) um espaço de amplitude em função da duração, e em (d) no espaço de energia em função do tempo de subida.

As distribuições destes dois agrupamentos dos sinais de EA (representados como grupos 1 e 2, respectivamente) em vários espaços de parâmetros são mostrados na Figura 4.35. Os sinais a partir das frequências de pico, apresentam distribuições nas faixas de 0-337 kHz para o grupo 1 e na faixa de 0-229 kHz para o grupo 2. Estes sinais se sobrepõem em maior concentração na faixa que varia de aproximadamente 70 kHz a 185 kHz. A distribuição de amplitude, no entanto, apresenta-se como boa classificadora, uma vez que apresenta regiões de concentração de valores de cada agrupamento, bem definidas, nas quais o agrupamento 1 assume valores em maior concentração na faixa que varia de 48 dB a 64 dB, e para o agrupamento 2 na faixa que varia de 64 dB a 99 dB, também correspondente a região de maior concentração, conforme podemos observar na Figura 4.35(a).

A Figura 4.35(b) mostra a distribuição dos dois agrupamentos dos sinais de EA em um espaço de frequência de pico versus duração. Também nesta figura, podemos observar a ausência de regiões claras, quando verificamos suas distribuições de amplitude. Entretanto, as distribuições de duração apresentam características que evidenciam a formação de grupos distintos, sendo que o grupo 1 apresenta valores, que em sua maior concentração de sinais varia de 0-600 μ s, e para o grupo 2 valores que variam entre 600- 7041 μ s.

A Figura 4.35(c) evidencia o que foi mencionado no parágrafo anterior, de que tanto os parâmetros de amplitude como os de duração apresentaram características de sinal diferenciados e mostraram-se como classificadores eficientes na formação de agrupamentos.

A Figura 4.35(d) mostra dados relacionados a distribuição de energia versus o tempo de subida. Com relação ao tempo de subida, os grupos apresentaram características de distribuição na faixa de 0 – 251 μ s para o agrupamento 1, e na faixa de 0-2397 μ s para o agrupamento 2, sendo que o grupo 1 concentra toda a sua faixa de valores em parte da região do grupo 2, a qual corresponde a menor faixa de valores para este último.

Portanto, com base na análise feita nas distribuições da Figura 4.35(a), (b), (c) e (d), temos que as variáveis correspondentes às distribuições de amplitude e duração, se mostraram com maior eficiência na classificação dos tipos de trincas neste material, e as demais variáveis não se mostraram muito eficientes nesta classificação.

A Figura 4.36 apresenta os valores de carga (em Quilo-Newton - kN) com os dados de energia (em unidade de energia $\times 10^3$ – u.e.) de cada modo de falha (representado por cada grupo (G)), em função do tempo (em segundo – s), para a prótese transtibial sob cargas de compressão, variando de 0 a 500 kg na região total do solado.

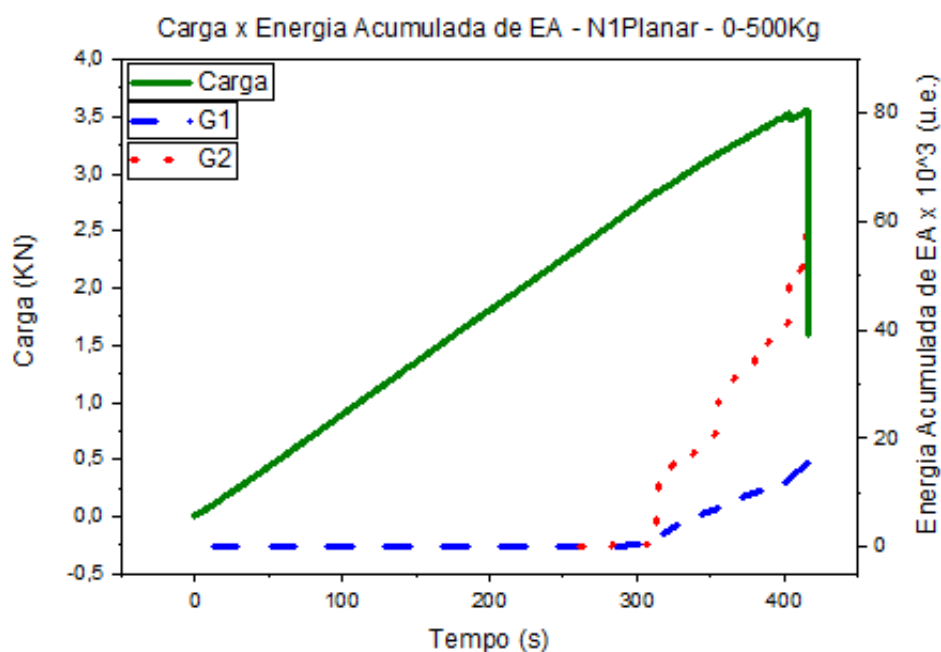


Figura 4.36: Distribuição de Carga e Energia Acumulada de EA em função do Tempo – Prótese transtibial sob cargas de compressão de 0 a 500 kg na região total do solado.

4.4.4- Análise das Falhas encontradas na Região Planar (Região Total do Solado) da Prótese

Aqui também vamos assumir as mesmas considerações feitas na seção 4.4.3, as quais seguem:

- ✓ foi utilizado o sentido de orientação das fibras, conforme esquema mostrado na Figura 4.29;
- ✓ a perda de sinal (atenuação), entre os componentes da prótese foi considerada desprezível;
- ✓ os efeitos da influência da geometria da peça nos sinais de EA, foram considerados desprezíveis.

Nesta análise também vamos considerar os resultados obtidos dos estudos efetuados feitos por Chang e Springer (1986), Sun e Kelly (1988), Martin (1990) e Jackson (1993). Podemos também concluir, que as falhas na prótese sob carregamento até 260 kg, ocorrem primeiramente na matriz das camadas a 90°(a qual predomina a resistência da matriz),

evoluíram para camadas adjacentes (incluindo camadas a $\pm 45^\circ$) gerando então a delaminação entre as camadas, e possivelmente culminando, em virtude da alta energia obtida dos sinais de EA desta amostra, em alguma ruptura nas fibras das camadas a 0° . É interessante salientar, que foram encontradas 2 faixas de amplitude com pouca variação nos seus valores, e que correspondem a faixas relacionadas ao mesmo tipo de modo de falha, ou seja, sinais característicos de falha na matriz. Este fato nos leva a concluir que possivelmente o componente de junção localizado na região frontal da prótese, que tem a função de ligação entre os dois componentes, e que é fabricada em ABS (do inglês “acrylonitrille butadiene styrene”- acrilonitrila butadieno estireno) (que é uma resina termoplástica rígido e leve, e possui um grau de flexibilidade e resistência na absorção de impacto, e é muito comum na fabricação de produtos moldados para usos diversos) falhou durante o carregamento da prótese até 260 kg.

Sob carregamento até 500 kg, baseado nos sinais de amplitudes alcançadas nos ensaios, e considerando supostamente que já houve a falha do componente ABS no primeiro carregamento, houve continuidade do processo de falha da matriz, provavelmente nas camadas a 90° , evoluindo com a delaminação entre camadas adjacentes às camadas 90° , com a ruptura de fibras nas camadas a 0° .

De acordo com El Mahi el al. (2010), Meraghni e Mullin (1995) e Wisnom (1995), podemos concluir portanto, que os sinais correspondentes a cada grupo estão relacionados aos seguintes modos de falha:

Carregamento de 0 a 260 kg:

- ✓ Grupo 1 – surgimento de trincas na matriz das camadas a 90° ;
- ✓ Grupo 2 – trincas na matriz das camadas a 90° + delaminação das camadas a 90° com camadas adjacentes + ruptura de fibras nas camadas a 0° ;
- ✓ Grupo 3 – ruptura de fibra das camadas a 0° ;
- ✓ Grupo 4 – surgimento de trincas no componente de junção em ABS.

Carregamento de 0 a 500 kg:

- ✓ Grupo 1 – surgimento de trincas na matriz das camadas a 90° ;
- ✓ Grupo 2 – delaminação das camadas a 90° com camadas adjacentes + ruptura de fibra das camadas a 0° .

4.4.5- Ensaio de Líquido Penetrante (LP) nas Próteses Transtibiais

Para a realização do ensaio, foi primeiramente feita uma limpeza minuciosa nas amostras com posterior secagem das mesmas, para somente então fazer a aplicação do líquido penetrante. Aguardou-se aproximadamente 15 minutos, para que ocorresse a penetração do líquido. Posteriormente, foi efetuada a remoção do penetrante da superfície da amostra e aplicado o revelador.

Após a ação do revelador, as áreas que apresentam descontinuidades são representadas por cores mais avermelhadas, evidenciando falha nestes locais.

4.4.5.1- Ensaio de Líquido Penetrante (LP) no Componente do Calcanhar

Uma característica percebida no componente do calcanhar é que a grande maioria das falhas por delaminação ocorreram nas regiões de curvatura da peça, justamente por esta região sofrer grande concentração de tensões durante o carregamento. A delaminação na realidade, ocorre num processo secundário, após a fratura na matriz, primeiramente nas camadas orientadas a 90° , seguido pelas camadas orientadas a $\pm 45^\circ$.

Conforme mostrado na Figura 4.38(a) foram observados modos de falha correspondentes a delaminações próximo às furações do componente. Além dessas regiões, também foram observadas delaminações principalmente nas regiões de curvatura do componente (conforme Figura 4.37), mostrando que algumas destas delaminações se deram ao longo de toda a extensão da peça, conforme Figura 4.38(b) que mostra a parte interna do componente, localizada logo abaixo da região de furação.

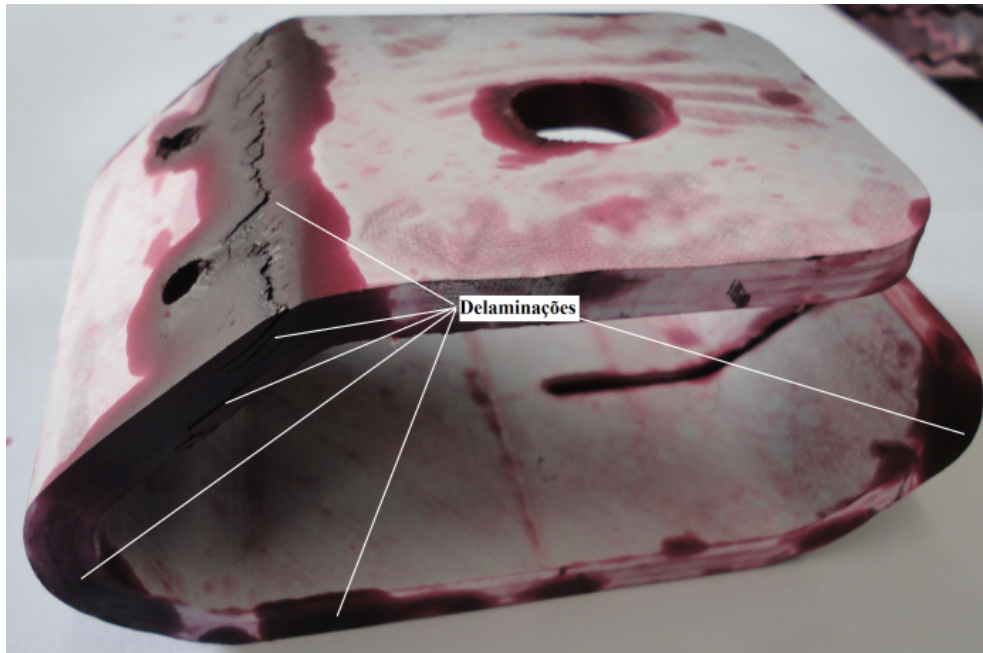


Figura 4.37: Componente do calcanhar da prótese após realização do LP evidenciando delaminações.

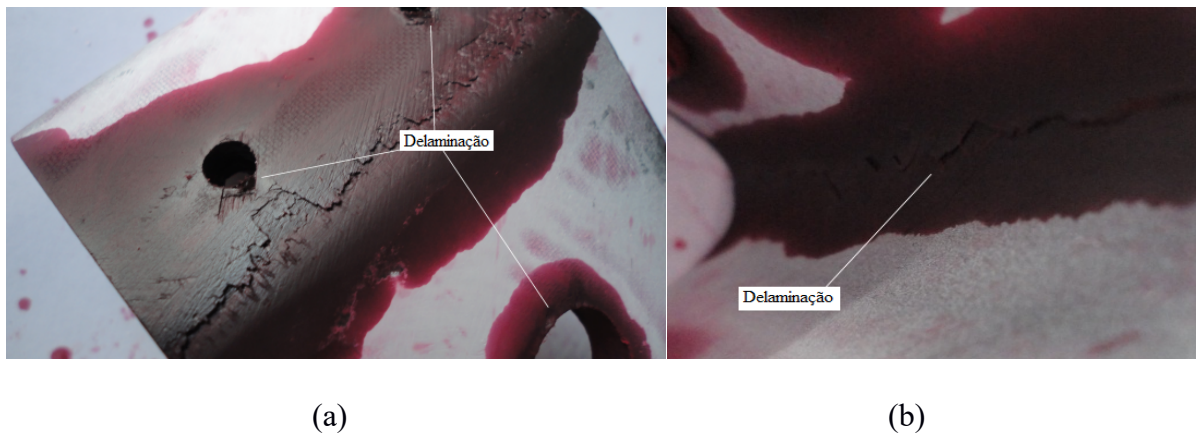


Figura 4.38: Componente do calcanhar após realização do LP evidenciando delaminação (a) próximo à região dos furos e (b) na região de curvatura interna.

4.4.5.2- Ensaio de Líquido Penetrante (LP) no Componente do Solado

Similar ao que ocorreu no componente do calcanhar, também na região do solado, a grande maioria das falhas ocorreram por delaminação e principalmente nas regiões curvas da peça (conforme Figura 4.39) e nas regiões de furação (conforme mostrado na Figuras 4.40). Já a Figura 4.41 apresenta o componente de junção em ABS que apresentou falhas na estrutura, conforme mostrado pela região avermelhada na peça.



Figura 4.39: Componente da prótese após realização do LP, evidenciando delaminação nas regiões de curvatura.

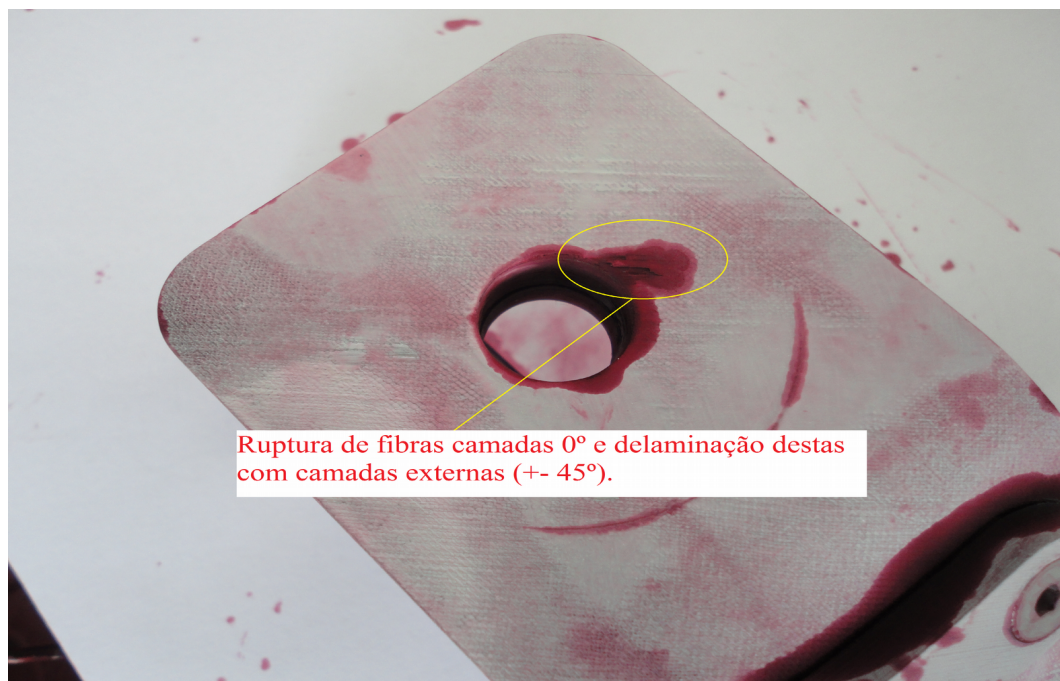


Figura 4.40: Componente da prótese após realização do LP evidenciando a formação de delaminações próximo à região do furo.



Figura 4.41: Falhas no componente de junção em ABS.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1- Conclusões

Neste trabalho foram analisados os modos de falha de compósitos de fibra de carbono/epóxi submetidos a cargas de tração e compressão, baseando-se em dados obtidos de ensaios de emissão acústica, utilizando como ferramenta para aplicação do reconhecimento de padrões e agrupamento de dados, o algoritmo k-médias. Os seguintes resultados foram obtidos:

Para as amostras unidirecionais:

Amostras FN

- ✓ Os parâmetros que se apresentaram como melhores classificadores para os tipos de trincas provenientes do material, pelo fato de terem apresentado faixas quase que completamente distintas, foram a energia do sinal, seguido pela amplitude e pela duração;
- ✓ Pelas características referentes a amplitude, duração e, principalmente pela faixa de energia desprendida e confrontando estas informações com a literatura, com relação as falhas encontradas em materiais compósitos unidirecionais sujeitos a carregamentos de tração transversal, chega-se à conclusão de que os dois modos de falha apresentados são a falha na matriz, com menores valores de energia, amplitude e duração seguido pelo descolamento entre a fibra e a matriz, com energia, amplitude e duração mais elevados.

Amostras FZ

- ✓ As distribuições de amplitude, duração, energia e tempo de subida se mostraram como bons indicadores na classificação dos sinais de EA;
- ✓ Mesmo apresentando valores divergentes referentes a quantidade de modos de falha (quando se compara dados de MEV e através da aplicação da técnica de reconhecimento de padrões em dados de EA) foi observado que um dos agrupamentos

encontrados apresentou características correspondentes a 02 modos de falha em um mesmo grupo;

- ✓ Baseado nas informações de energia e amplitude, foi considerado que o grupo 1 por apresentar uma faixa de energia que vai desde zero a valores extremamente elevados (de 16.985 u.e.), o mesmo acontecendo para a faixa de amplitude obtida para este modo de falha, foi considerado que este apresenta tanto características de rompimento de fibras quanto de descolamento interfacial;
- ✓ Após a separação dos dados, obtidos no agrupamento que continha sinais correspondentes a mais de um modo de falha, temos que foram observados 03 (três) modos de falha para as amostras FZ, micro-trincas na matriz, falhas na interface e finalizando com a ruptura das fibras.

Amostras FQ

- ✓ Para amostras FQ a frequência de pico e a amplitude se apresentaram como os melhores classificadores para discriminação de tipos de falhas;
- ✓ A duração apesar de não ter apresentado papel fundamental, apresentou-se útil, principalmente na identificação do agrupamento de número 2, porém em relação aos demais grupos não exerceu nenhuma influência na identificação das regiões;
- ✓ As amostras FQ apresentaram 04 (quatro) modos de falha, os quais passam pela divisão dentro de feixes que foram separados, divisão entre a matriz e pacotes de fibras, uma quantidade considerável de fibras sem resina aderida nas suas superfícies, indicando que as mesmas sofreram um processo de arrancamento (*pull-out*), e finalizando com a delaminação entre camadas;
- ✓ Durante a verificação das amostras fraturadas com o MEV, foram encontrados 04 (quatro) modos de falha, sendo que o método apresentado indicou 05 (cinco) modos de falha, porém vale ressaltar que os valores de silhueta obtidos foram muito próximos, ou seja, 0,5928 e 0,5926, respectivamente para cinco e quatro agrupamentos.

Para a Prótese Transtibial:

Região do Calcânhar

Carga de 0 a 260 kg

- ✓ O número de classificação pela aplicação da técnica de reconhecimento de padrões apresentada neste trabalho indicou que há três tipos de falhas, as quais passam por trincamento na matriz das camadas a 90°, delaminação das camadas a 90° com as camadas adjacentes e finalizando com a ruptura de fibra nas camadas a 0°;
- ✓ Na região do calcanhar da prótese transtibial com carregamento de 0 a 260 kg a distribuição de amplitudes aliada a distribuição de frequência de pico e de duração se mostraram como os melhores indicadores para a caracterização de modos de falha;

Carga de 0 a 500 kg

- ✓ O número de classificação ótima para k indicou que há dois tipos de falhas, as quais passam por delaminação das camadas a 90° com as camadas adjacentes finalizando com a ruptura de fibras das camadas a 0°;
- ✓ As variáveis que melhor se apresentaram como classificadores para se determinar os modos de falha foram a amplitude e a duração;
- ✓ Os grupos que correspondem à delaminação, assumiram faixas de amplitude relativamente similares, entretanto os valores correspondentes a energia de sinal aumentaram substancialmente quando o carregamento foi de até 500 Kg. O mesmo aconteceu para o modo de falha correspondente a ruptura de fibras para cargas até 500 Kg, para o qual houve um aumento significativo, reforçando serem provenientes do mesmo modo de falha, porém com características de falha mais severas;

Região Total do Solado (solado frontal + calcanhar)

Carga de 0 a 260 kg

- ✓ O número de classificação ótima indicou que há quatro tipos de falhas, sendo que as mesmas se apresentaram da seguinte forma:
 - Grupo 1 – surgimento de trincas na matriz das camadas a 90° ;
 - Grupo 2 – trincas na matriz das camadas a 90° + delaminação das camadas a 90° com camadas adjacentes + ruptura de fibras nas camadas a 0° ;
 - Grupo 3 – ruptura de fibra das camadas a 0° ;
 - Grupo 4 – trincas no componente de junção em ABS;
- ✓ As variáveis que melhor se apresentaram como classificadores para se determinar os modos de falha foram a amplitude, frequência de pico e a duração;

Carga de 0 a 500 kg

- ✓ O número de classificação ótima indicou dois tipos de falhas, as quais se apresentaram da seguinte forma:
 - Grupo 1 – surgimento de trincas na matriz das camadas a 90° ;
 - Grupo 2 – delaminação das camadas a 90° com camadas adjacentes + ruptura de fibra das camadas a 0° ;
- ✓ As variáveis correspondentes às distribuições de amplitude e duração se mostraram com maior eficiência na classificação dos tipos de falhas;

Como resultados gerais, temos que:

- ✓ Para as amostras a 0° (FZ), apesar do coeficiente de silhueta não ter sido assertivo na indicação do número de agrupamentos, durante a análise das variáveis, o grupo 1 apresentou características correspondentes a mais de um modo de falha, sendo portanto, claramente identificado a presença de um total de 03 (três) modos de falha, o que de fato, foi confirmado pela análise de MEV;
- ✓ Foram levantados diversos bons parâmetros de classificação de modos de falha de cada tipo de amostra, dentre estes a amplitude de sinal se mostrou o melhor;

- ✓ Os objetivos do trabalho foram alcançados, visto que se obteve êxito no levantamento dos parâmetros de classificação e correlação destes aos modos de falha para os compósitos analisados.

5.2- Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se mencionar:

- ✓ Utilizar outras técnicas de reconhecimento de padrões (como por exemplo, redes neurais) para identificação de falhas em compósitos;
- ✓ Utilizar outras técnicas não-destrutivas (como por exemplo, Ultrassom) para validação dos modos de falha encontrados;
- ✓ Além da quantificação e caracterização dos modos de falha, explorar também a sua localização;
- ✓ Utilizar a metodologia explorada neste trabalho para levantamento de modos de falha em diversos tipos de compósitos, formando um banco de dados, para desenvolvimento de um software de identificação de falhas em compósitos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics – fundamentals and applications**. 2nd. ed. New York: CRC Press, 1995.

AGUIAR, Juliano. **Caracterização de Sinais de Emissão Acústica em Ensaio CTOD por Análise Fractal**. Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica e de Produção - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza 2004.

ALBOUY, W.; VIELLE, B. Determination of the damage threshold in woven-ply thermoplastic laminates at $T > T_g$: Acoustic emission and microscopic damage analysis. **Composites: Part B**, v. 64, p. 138–146, 2014.

ALLEVATO, Cláudio; RAMOS, Márcio de Almeida. **Aplicações da Técnica de Emissão Acústica em Ensaio de Corrosão**. Petrobras. RJ. pp. 258-265. 1980.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por líquidos penetrantes**. ABENDE Associação Brasileira de Ensaio não Destrutivos. São Paulo, p.68, 2008.

ANDREUCCI, R. **Aplicação Industrial Ensaio por Ultrassom**. ABENDE, Julho, 2008.

ASP, L. E., NILSSONS, S., SINGH, S. An experimental investigation of the influence of delamination growth on the residual strength of impacted laminated. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 32, n. 9, pp. 1229-1235, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **PR-048: Ensaio por emissão acústica – Terminologia**. São Paulo, 2003.

BEWLEY, A.; UPCROFT, B. Vantagens de explorar Estrutura projeção para segmentar densas 3D Ponto nuvens. **Na Conferência Australiana em Robótica e Automação**. 2013.

BOWER, D. **Composite Materials**, Hunstville, University of Alabama, 1992.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**, 7^a ed., Jhon Wiley & Sons, New York, 2007.

CAMERINI, Cláudio Soligo. **Relação entre emissão acústica e CTOD para um aço estrutural**. Dissertação de Mestrado, COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro 1990.

CANDEIAS, D. M. Q. **Estudo das Tensões Interlaminares e Rotura de Elementos Curvos em Materiais Compósitos**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa 2009.

CASEY, N. F. et al. Frequency analysis of the signals generated by the failure of constituent wires of wire rope. **NDT International**, v.18, n.6, December 1985.

CHANG, Fu-Kuo; SPRINGER, George S. The Strengths of Fiber Reinforced Composite Bends. **Journal of Composites Materials**, v. 20, p. 30-45, 1986 apud CANDEIAS, D. M. Q. **Estudo das Tensões Interlaminares e Rotura de Elementos Curvos em Materiais Compósitos**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa 2009.

CHAWLA, K. K. **Composite Materials - Science and Engineering**, Springer-Verlag, Berlin, 1987.

COLE, P. T. Using Acoustic Emission (AE) to Locate and Identify Defects in Composite Structures. **Composite Structures**, v. 3, p. 59-267, 1985.

COLLINS, David John. **Damage Detection in Composite Materials using Acoustic Emission and Self-Sensing Fibres**. 121f. Department of Metallurgy and Materials School of Engineering The University of Birmingham. Birmingham 2009.

COSTA, M. L.; ALMEIDA, S. F. M.; REZENDE, M. C. **Composite Science and Technology**, 61, p.2101, 2001.

DROUILLARD, T. F. A history of acoustic emission. **Journal of Acoustic Emission**, v. 14, p. 1-34, 1996.

DRUMMOND, G.; WATSON, J. F.; ACARNLEY, P. P. Acoustic emission from wire ropes during proof load and fatigue testing. **NDT&E International**, v. 40, p. 94-101, 2007.

EL MAHI, Abderrahim et al. **Analyse par émission acoustique de l'endommagement des matériaux éco-composites**. Paper presented at the 10^{ème} Congrès Français d'Acoustique, 2010.

FERNANDES, A. J. A. **Técnicas de controlo não destrutivo dos materiais compósitos**. Dissertação de Mestrado, FEUP-DEMEGI, Julho, 1987.

FERNANDES, Roberta Cândido de Souza. **Análise de Aglomerados das Sequências da Protease do HIV-1 de Indivíduos Infectados Utilizando Mapa Auto Organizável e K-Médias**. Dissertação de Mestrado, COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro 2010.

GAMSTEDT, E.; SJÖGREN, B. Micromechanisms in tension-compression fatigue of composite laminates containing transverse plies. **Composites Science and Technology**, vol. 59, n. 2, pp. 167-178, 1999.

GAUTSCHI, G. **Piezoelectric Sensorics Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers**. *Springer*, 2002.

GÉA, Orlando. **Monitoramento da Propagação de Defeitos em Dutos Rígidos por Redes Neurais: Estudo da Emissão Acústica Baseado na Forma de Onda**. Tese de Doutorado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE. Programa de Engenharia Elétrica – PEE. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro 2015.

GIBSON, R. F. *Principles of Composite Materials Mechanics*, McGraw-Hill, Singapore, 1994.

GÓMEZ, M. P. et al. Ultrasonic attenuation in Zircaloy-4. CP760. **Review of Quantitative Nondestructive Evaluation**, American Institute of Physics, v. 24, 2005.

GONG, X. L.; LAKSIMI, A.; BENZEGGACH, M. L. Nouvelle approche de l'émission acoustique et son application à l'identification des mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites. **Revue des composites et des matériaux avancés**, v. 8, n.1, 1998.

GUTKIN, R.; GREEN, C. J.; VANGRATTANACHAI, S.; PINHO, S. T.; ROBINSON, P.; CURTIS, P. T. On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v.25, p. 1393–1407, 2011.

HART-SMITH, L. J. **Adhesive bonded double-lap joints**, NASA Report CR112235, 1973.

HERGENROTHER, P. M. *SAMPE Journal*, 36, p.30, 2000.

HORTA, D. **Abordagens Evolutivas para Agrupamento Relacional de Dados**, USP - São Carlos, 2010.

HULL, D. **An Introduction to composite materials**. London: Cambridge University Press, 1981.

HUTH, R. et al. Classificações de padrões de circulação atmosférica: Recent Advances and Applications. **Ann. NY Acad. Sci.** , p. 1146 – 105152, 2008.

JACQUES, R. C. **Avaliação de Parâmetros de Emissão Acústica para Monitoramento de Risers Flexíveis**. 114f. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre 2009.

JENNINGER, W.; SCHAWWE, J. E. K. & ALIG, I. **Polymer**, 41, p.1577, 2000.

KEMPF, M.; SKRABALA, O.; ALTSTADT, V. Reprint of: Acoustic emission analysis for characterization of damage mechanisms in fibre reinforced thermosetting polyurethane and epoxy. **Composites: Part B**, v. 65, p. 117–123, 2014.

KUNAR, B. G.; SINGH, R. P.; NAKAMURA, T. Degradation of carbon ber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation. **Journal of Composite Materials**, vol. 36, n. 24, pp. 2713 - 2733, 2002.

LAKSIMI, A.; BENMEDAKHENE, S.; BOUNOUAS, L. **Monitoring Acoustic Emission During Tensile Loading of Thermoplastic Materials**. LG2mS URA CNRS UPRES A 6066, Devisions Polymères et Composites. Université de Technologie de Compiègne (UTC). Centre de recherche Royallieu. 1999.

LI, Li; LOMOV, Stepan V; YAN, Xiong. Correlation of acoustic emission with optically observed damage in a glass/epoxy woven laminate under tensile loading. **Composite Structures**, v.123, p. 45–53, 2015.

MCCARTY, IE. *Composites*, vol.24, p.361, 1993.

MAGALHÃES, A. G. Aplicação das técnicas de Emissão Acústica e Radiografia na Caracterização do Dano Produzido por Fluência em Juntas de Materiais Compósitos sujeitas a diferentes Condições Ambientais. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto - Portugal 1999.

MAIA, Nilton da Silva. **Utilização da emissão acústica para detecção de danos em componentes metálicos ferrosos**. 161 p. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 2005.

MARIN-FRANCHA, P. et al. PTCa/PEKK piezo-composites for acoustic emission detection. **Sensors and Actuators A**, v. 99, p. 236–243, 2002.

MARINUCCI, Gerson. **Desenvolvimento, Fabricação e Análise de Falha e Fratura de Cilindros de Fibra de Carbono Colapsados por Pressão Interna**. Tese de Doutorado, IPEN – Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo 2001.

MARTIN, Roderick H. Delamination Failure in a Unidirectional Curved Composite Laminate. **NASA Contractor Report**, Vol. 182018, 1990 apud CANDEIAS, D. M. Q. **Estudo das Tensões Interlaminares e Rotura de Elementos Curvos em Materiais Compósitos**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa 2009.

MARTIN, Roderick H.; JACKSON, Wade C. Damage Prediction in Cross-Plied Curved Composite Laminates. **Composites Materials: Fatigue and Fracture, Fourth Volume, ASTM STP 1156**, W. W. Stinchcomb and N. E. Ashbaugh, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 105-126, 1993 apud CANDEIAS, D. M. Q. **Estudo das Tensões Interlaminares e Rotura de Elementos Curvos em Materiais Compósitos**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa 2009.

M. handbook, **Composite Materials Handbook**, Department of Defense, USA, 2002, v.3.

MEINL, Cristian Martin. **Avaliação de Algoritmos de Localização Planar de Fontes de Emissão Acústica em Chapas de Aço com e Sem Acessórios**. 94f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2014.

MERAGHNI, F.; BENMEDAKHENE, S.; BENZEGGAGH, M. L. **Identification and modeling of damage mechanisms in short glass fiber reinforced polypropylene composite**, Proc.ICCM 10, Vancouver, Aug 1995.

MERAGHNI, Fodil; BENZEGGAPH, M. L. Micromechanical Modelling of Matrix Degradation in Randomly Oriented Discontinuous-Fibre Composites. **Composites science and technology**, v. 55, n.2, p. 171-86, 1995.

MICHALCOVÁ, Lenka; KADLEC*, Martin. **Carbon/epoxy composite delamination analysis by acoustic emission method under various environmental conditions**. VZLU (Aerospace Research and Test Establishment), Beranovych 130, Prague–Letnany 199 05, Czech Republic. 2016.

MILLER, R. K. & MCINTIRE, P. “**Nondestructive Testing Handbook – Acoustic Emission**”, vol.5, 2ed., USA, ASNT, 1987.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, p.297, 2005.

MIRIYALA, N.; LIAW, P. K. The monotonic and fatigue behavior of C F C C ' s. **JOM-Journal of Minerals, Metals and Materials**, pág. 44, 1996.

MOUTRILLE, M. P. et al. Through-thickness strain field measurement in a composite/aluminum adhesive joint. **Composites Part A**, v. 40, p. 985 -996, 2009.

NDT Resource Center. Disponível em: <<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE>>. Acesso em: 07/11/2015.

NICÁCIO, Jancler Adriano Pereira. **Aplicação da Técnica de Emissão Acústica na Detecção de Danos por Corrosão Alveolar em Chapa de Aço Carbono**. 108f. Belo Horizonte, fevereiro de 2010. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp140889.pdf>>. Acesso em: 26/10/2015.

NUTT, S. R. Introduction to Constituent Materials, in Composites (D. Miracle and S. Donaldson, eds.), vol. 21 of ASM Handbook, pp. 21 □ 22, Material Park, OH: ASM International, 2001.

OHIRA, T; PAO, Y. H. **Metall. Mater. Trans**, A 20, p. 1105–1114, 1989.

PAGET, C. A. Delamination location and size by modified acoustic emission on cross-ply CFRP laminates during compression–compression fatigue loading, in: Proceedings of the 17th International Conference on Composite Materials, 2009.

PASSOS, A. G. et al. Análise de Sinais de Vibração e Emissão Acústica para a Detecção de Danos em Ensaios de Fadiga de Contato do Tipo Esfera contra Plano. **VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**. Campina Grande – Paraíba – Brasil. Agosto, 2010.

PEVZNER, P.; WELLER, T.; BERKOVITS, A. A novel fiber Bragg grating acoustic emission sensor head for mechanical tests. **Scripta Materialia**, v. 53, p. 1181–1186, 2005.

PEVZNER, P.; WELLER, T.; BERKOVITS, A. Use of heat emitted by broken optic fibers: A new approach for damage detection in composites. **Engineering Failure Analysis**, v. 12, p. 860–874, 2005.

PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION. **PCI2 Based AE System**. April 2007.

PHYSICAL ACOUSTICS SOUTH AMERICA (PASA), “**Seminário: Novas Tecnologias para Racionalização de Inspeção, Manutenção e Controle de perdas**”, São Paulo, 12 de novembro de 2001.

PINTO, C. F. C. et al. Probability of defect propagation in pipelines (POP curves). **Insight**, 56 (4), pp 1-7, 2014.

POLLOCK, A. A., “**Nondestructive Evaluation and Quality Control – Acoustic Emission Inspection**”, vol.17, 2ed, USA, ASM handbook, 1992.

POLLOCK, Adrian. Acoustic Emission Inspection. In: ASM Handbook. **Non Destructive Evaluation and Quality control**. Vol.17. 9th Edition. ASM International. 1989.

PROSSER, Willian H. Acoustic Emission. In: SCHULL, Peter J. **Nondestructive Evaluation. Theory, Techniques and Applications**. Altoona Pennsylvania. Marcel Dekker, Cap.6, 369-446, 2001.

PURSLOW, D., Matrix fractography of fibre-reinforced thermoplastics, part 2: shear failures. **Composites Science and Technology**, v. 19, n. 2, pp. 115, 1988.

REBELLO, J. M. A. et al. Failure Mechanism Characterization in Composite Materials using Spectral Analysis and the Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals. **Insight, Inglaterra**, v. 46, n. 5, p. 282-289, 2004.

REINFORCED PLASTICS. Technology update: prepregs. **Reinforced Plastics**, vol 47(6), pp. 20-21, 2003.

REINHART, T. J. **Overview of Composite Materials**, In: Handbook of Composites. S. Peters, (ed.), London: Chapman & Hall, 2nd ed., pp. 21 – 34, 1998.

RUSPINI, H. R. Numerical method for fuzzy clustering. **Information Sciences**, v. 2, p. 310-350, 1970.

SACHSE, W., YAMAGUCHI, K., ROGET, J., Acoustic Emission: Current Practice and Future Directions, ASTM, Philadelphia, 1991.

SANTIM, J. L. **Ultra-som: Técnica e Aplicação**, 2003.

SHINDO, S., SHINOHE, D. Analysis and testing of mixed-mode interlaminar fracture behavior of glass-cloth/epoxy laminates of cryogenic temperature. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 127, n. 4, pp. 468-476, October 2005.

SILVA, Francisco Estênio da. **Análise da Integridade Estrutural de Compósitos Através da Caracterização Fractal de Sinais de Emissão Acústica**. 102f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE 2002.

SILVA, Henrique Pereira. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE VIDRO/EPOXY NANO-REFORÇADOS**. Tese de Doutorado, Engenharia Mecânica - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra 2014.

SILVA, M. A. C. **Caracterização do Sinal Gráfico de Emissão Acústica (EA) para Avaliação de Integridade Estrutural do Aço ASTM A 516 / A 516 M - Grau 60**, Dissertação de Mestrado., PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil 2010 apud GÉA, Orlando. **Monitoramento da Propagação de Defeitos em Dutos Rígidos por Redes Neurais: Estudo da Emissão Acústica Baseado na Forma de Onda**. Tese de Doutorado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE. Programa de Engenharia Elétrica – PEE. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.. Rio de Janeiro 2015.

SOARES, Sergio Damasceno. **Emissão Acústica – Apostila**. Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção – ABENDI. São Paulo. 2001.

SOARES, Sergio Damasceno. **Correlações entre emissão acústica de defeitos e parâmetros de mecânica da fratura na avaliação da integridade de dutos**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola de Engenharia. Rio de Janeiro 2008.

SOUZA FERNANDES, R. C., **Análise de Aglomerados das Sequências da Protease do HIV1 de Indivíduos Infectados Utilizando Mapa Auto Organizável e k-Médias**. Dissertação de Mestrado, COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro 2010.

SUN, C. T.; KELLY, S. R. Failure in Composite Angle Structures. Part I: Initial Failure. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 7, p. 220-232, 1988 apud CANDEIAS, D. M. Q. **Estudo das Tensões Interlaminares e Rotura de Elementos Curvos em Materiais Compósitos**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa 2009.

SURGEON, M., WEVERS, M., Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates, *NDT&E Int.* 32, p. 311–322, 1999.

TITA, V., **Contribuição ao estudo de danos e falhas progressivas em estruturas de material compósito polimérico**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos 2003.

VALE, M. N. **Agrupamentos de dados: Avaliação de Métodos e Desenvolvimento de Aplicativo para Análise de Grupos**. 120 f. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2005.

WADIN, J. R. **Acoustic Emission Applications.**, Dunegan Endevco, San Juan, Capistrano CA, 1978.

WANG, X. et al. Effect of forming parameters on electron beam Surfing-Sculpt protrusion for Ti-6Al-4V. **Mater. Des.**, v.76, p. 202 – 206, 2015.

WILLIAM, E. E.; JONATHAN, A. Monitoring acoustic emission in cross-ply graphite/epoxy laminates during fatigue loading. **Second International Symposium on Acoustic Emission From Reinforced Composites**, Montreal, Canada, pp.78- 84, 1986.

WISNOM, M. R. The effect of fibre rotation in ± 45 tension tests on measured shear properties. **Composites**, v. 26, p. 25–32, 1995.

YANG, L. et al. **Frequency as a key parameter in discriminating the failure types of thermal barrier coatings: Cluster analysis of acoustic emission signals**, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.01.014>

YANG, L. et al. **Surf. Interface Anal**, v. 39, p. 761 – 769, 2007.

YANG, L. et al. **Appl. Phys. Lett**, v. 93, 231 - 906, 2008.

YANG, L.; KANG, H. S.; ZHOU, Y. C.; ZHU, W.; CAI, C. Y.; LU, C. Frequency as a key parameter in discriminating the failure types of thermal barrier coatings: Cluster analysis of acoustic emission signals. **Surface & Coatings Technology**, v. 264, p. 97–104, 2015.

YANG, L.; ZHOU, Y. C.; LU, C. S. **Acta Mater**, v. 59, p. 6519 – 6529, 2011.

ZHOU, Wei. **Electrical Resistance and Acoustic Emission Measurements for Monitoring the Structural Behavior of CFRP Laminate**; King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia; July, 2015.