

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**ANGÉLICA BORDIN COLPO**

**ANÁLISE DO EFEITO DE ESCALA EM MATERIAIS QUASE FRÁGEIS**

**Alegrete  
2014**

**ANGÉLICA BORDIN COLPO**

**ANÁLISE DO EFEITO DE ESCALA EM MATERIAIS QUASE FRÁGEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Luis Eduardo Kostas

**Alegrete  
2014**

**ANGÉLICA BORDIN COLPO**

**ANÁLISE DO EFEITO DE ESCALA EM MATERIAIS QUASE FRÁGEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 10/03/2014.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Luis Eduardo Kostaschi  
Orientador  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Luis Ernesto Roca Bruno  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Wang Chong  
(UNIPAMPA)

"Se enxerguei mais longe, foi por me erguer sobre os ombros de gigantes."

Isaac Newton

Dedico este trabalho aos gigantes que com muito amor e dedicação, nunca negaram seus ombros para me erguer: meu pai Sérgio e minha mãe Maria Gorete.

## **AGRADECIMENTO**

Primeiramente devo agradecer a Deus e a Virgem Maria por terem me concedido saúde e persistência, sempre iluminando meu caminho.

Ao professor Luis Eduardo Kostaski por ter me acolhido como orientador, transmitindo seus conhecimentos. Por sua dedicação, paciência e incentivo ao longo da elaboração deste trabalho. Muito obrigada!

Aos meus pais pelas palavras de incentivo e conforto, conselhos em horas de incerteza e de tristeza. Pela disposição em me ajudar a conquistar os meus objetivos. Eu amo muito vocês!

À minha irmã Gracieli, pelo amor, carinho e confiança.

Ao colega Leandro pela dedicação e amizade.

Ao professor Ignácio Iturrioz pelo auxílio nos ensaios de emissão acústica e pelos ensinamentos transmitidos.

A todos os colegas de curso por terem me acolhido como uma família, não sendo apenas colegas, mas também amigos. Muito obrigada!

## RESUMO

O efeito de escala estrutural estuda a variação no comportamento de estruturas quando estas mudam de tamanho. Este efeito está presente em diversos tipos de materiais, condições de contorno e geometrias. Sem dúvida este fenômeno, não pode ser ignorado ao ser realizado o estudo do comportamento não linear de sólidos até a ruptura. No presente trabalho é apresentado, primeiramente, o estudo experimental de ensaios de tração simples e ensaios de emissão acústica em corpos de prova de poliestireno expandido de diferentes tamanhos. São obtidos resultados em termos de tensão, deformação, eventos acústicos e configurações finais. Esses resultados são comparados com os simulados empregando uma versão do método dos elementos discretos formado por barras. Esse método consiste na representação do meio contínuo através de um arranjo regular de barras de treliça onde as massas são concentradas em nós e a rigidez das barras representa o comportamento da porção do contínuo que se deseja modelar. São obtidas as configurações finais, assim como as curvas tensão-deformação, em forma numérica (esta informação pode ser diretamente comparada com os valores experimentais obtidos). É possível também apresentar resultados em termos do balanço de energia durante o processo de ruptura, assim como simular medições de sinais de emissão acústica (as acelerações emitidas em diferentes locais do modelo) durante a simulação. Os parâmetros obtidos permitem calcular índices específicos que possibilitam monitorar o processo de ruptura. Os resultados experimentais e numéricos obtidos são comparados e discutidos focando a atenção para o efeito de escala que as informações obtidas apresentam.

**Palavras-chave:** Método dos elementos discretos, Materiais quase frágeis, Efeito de escala, Emissão acústica.

## ABSTRACT

The structural size effect studies the variation in the behaviour of structures when they change size. This effect appears in various types of materials, geometries and boundary conditions. No doubt, this phenomenon cannot be ignored when the nonlinear behaviour study of solids is carried out until fracture. In this work, the experimental study of simple tension tests and acoustic emission tests in samples of expanded polystyrene with different sizes is first analyzed. Results in terms of stress, strain, acoustic events and final configurations are obtained. These results are compared with the simulated ones obtained using a version of the truss-like discrete element method. This method consists of a representation of the continuum through a regular lattice arrangement of uniaxial elements where the masses are concentrated on the nodes and the element stiffness represents the behaviour of the portion of continuum modeled. Final configurations, as well as the stress-strain curves, are obtained in numerical form (this information can directly be compared with the obtained experimental values). It is also possible to present results in terms of energy balance during the fracture process, as well as simulate measurements of acoustic emission signals (accelerations issued in different places of the model) during the simulation. The obtained parameters allow calculating specific indicators which allow monitoring the fracture process. The experimental and numerical results are compared and discussed focusing attention to the size effect that the obtained information presents.

**Keywords :** Truss-like discrete element method, Almost brittle materials, Size effect, Acoustic emission.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Discretização utilizada no DEM: a) modelo cúbico básico; b) geração do corpo prismático .....	24
Figura 2. 2 - a) sólido cúbico de dimensões $L \times L \times L$ ; b) módulo do DEM de dimensões $L \times L \times L$ .....	24
Figura 2. 3 - Relação constitutiva elementar do DEM: Modelo de Hillerborg .....	27
Figura 2. 4 - Comparação entre técnicas não-destrutivas ativas e passivas .....	31
Figura 2. 5 - (a) sinal típico de emissão acústica (b) emissão contínua .....	31
Figura 2. 6 - Diagrama do gráfico referente ao coeficiente $b$ .....	33
Figura 3. 1 – Máquina universal de ensaios Shimadzu .....	36
Figura 3. 2 – Configuração dos corpos de prova e condições de contorno .....	36
Figura 3. 3 - Exemplo do modelo simulado no DEM .....	38
Figura 3. 5 – Máquina de ensaios Emic DL-2000.....	39
Figura 3. 4 - Microfones Bruel & Kjaer modelo 4198-A-021.....	39
Figura 3. 6 - Amplificador de sinais de 6 canais modelo 3035 e Microcomputador com Software Pulse para controle do Amplificador, ambos da marca Bruel & Kjaer.....	39
Figura 3. 7 – Corpos de prova instrumentados .....	40
Figura 3. 8 – Corpo de prova simulado no DEM, e a localização dos sensores.....	41
Figura 4. 1 - Um dos retângulos de poliestireno expandido utilizado para calcular a densidade .....	42
Figura 4. 2 - a) Trincas provenientes dos ensaios experimentais com o corpo de prova C. b) Trincas obtidas durante as simulações numéricas com o corpo de prova C.....	50
Figura 4. 3 - Configuração das trincas obtidas durante as simulações .....	51
Figura 4. 4 - Histórico da aceleração de um dos pontos de controle.....	55
Figura AP-A. 1 - Configuração das trincas resultantes dos ensaios de tração com os corpos de prova tipo D.....	77
Figura AP-A. 2 - Configuração das trincas resultantes das simulações numéricas com os corpos de prova tipo D .....	78

Figura AP-A. 3 - Configuração das trincas resultantes dos ensaios de tração com os corpos de prova tipo E .....	78
Figura AP-A. 4 - Configuração das trincas resultantes das simulações numéricas com os corpos de prova tipo E.....	79
Figura AP-A. 5 - Configuração das trincas resultantes dos ensaios de tração com os corpos de prova tipo F.....	79
Figura AP-A. 6 - Configuração das trincas resultantes das simulações numéricas com os corpos de prova tipo F .....	80
Figura AP-A. 7 - Configuração das trincas resultantes dos ensaios de tração com os corpos de prova tipo G.....	80
Figura AP-A. 8 - Configuração das trincas resultantes das simulações numéricas com os corpos de prova tipo G .....	81

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 2. 1 - Esquema de funcionamento do DEM .....	26
---	----

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4. 1 – Gráfico de dispersão para determinar o $E$ do corpo de prova F, ensaio 2.....	43
Gráfico 4. 2 – Variação do módulo de elasticidade com o tamanho do corpo de prova.....	44
Gráfico 4. 3 - Lei constitutiva não linear do material.....	46
Gráfico 4. 4 - Tensão <i>versus</i> deformação dos corpos de prova A e B.....	47
Gráfico 4. 5 - Tensão <i>versus</i> deformação dos corpos de prova C, D, E e F.....	48
Gráfico 4. 6 - Gráficos amplitude <i>versus</i> tempo: microfones 3 e 4 instrumentados no corpo de prova, c) microfone 5 utilizado para captar os ruídos do ambiente.....	54
Gráfico 4. 7 - Gráficos amplitude <i>versus</i> tempo: microfones 1, 2, 3e 4 instrumentados no corpo de prova, c) microfone 5 utilizado para captar os ruídos do ambiente.....	54
Gráfico 4. 8 - Números de eventos acústicos obtidos durante os ensaios com os corpos de prova C e G.....	56
Gráfico 4. 9 - Amplitude dos eventos de emissão acústica durante os ensaios com os corpos de prova C e G.....	57
Gráfico 4. 10 - Mapeamento das microtrincas e macrotrincas no domínio do tempo.....	58
Gráfico 4. 11 - Valor b referente aos modelos ensaiados.....	59
Gráfico 4. 12 - Energias envolvidas durante as simulações.....	61
Gráfico 4. 13 - Amplitude <i>versus</i> tempo da simulação de emissão acústica com o corpo de prova tipo C.....	62
Gráfico 4. 14 - Amplitude <i>versus</i> tempo da simulação de emissão acústica com o corpo de prova tipo G.....	62
Gráfico 4. 15 - Números de eventos acústicos obtidos durante as simulações com os corpos de prova C e G.....	63
Gráfico 4. 16 - Amplitudes dos eventos de emissão acústica durante as simulações dos corpos de prova C e G.....	64
Gráfico 4. 17 - Mapeamento das microtrincas e macrotrincas no domínio do tempo.....	66
Gráfico 4. 18 - Valor b referente aos modelos simulados.....	67
Gráfico 4. 19 - Comparação entre o valor b e o tamanho dos corpos de prova C e G.....	68
Gráfico AP-B. 1 - Gráfico amplitude <i>versus</i> tempo durante o primeiro minuto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova C.....	82

Gráfico AP-B. 2 - Gráfico amplitude <i>versus</i> tempo durante o segundo minuto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova C.....	83
Gráfico AP-B. 3 - Gráfico amplitude <i>versus</i> tempo durante o terceiro minuto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova C.....	83
Gráfico AP-B. 4 - Gráfico amplitude <i>versus</i> tempo durante o segundo quarto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova C.....	84
Gráfico AP-B. 5 - Gráfico amplitude <i>versus</i> tempo durante o segundo quinto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova C.....	84
Gráfico AP-B. 6 - Gráfico amplitude <i>versus</i> tempo durante o sexto minuto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova C.....	85
Gráfico AP-B. 7 - Gráfico amplitude <i>versus</i> tempo durante o primeiro minuto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova G.....	85
Gráfico AP-B. 8 - Gráfico amplitude <i>versus</i> tempo durante o segundo minuto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova G.....	86
Gráfico AP-B. 9 - Gráfico amplitude <i>versus</i> tempo durante o terceiro minuto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova G.....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Dimensões e velocidades dos corpos de prova .....	37
Tabela 4. 1 - Densidade do material .....	42
Tabela 4. 2 - Valores módulo de elasticidade.....	44
Tabela 4. 3 - Parâmetros utilizados nas simulações .....	46
Tabela 4. 4 - Valores obtidos nos ensaios de tração experimentais e nas simulações numéricas .....	49
Tabela 4. 5 - Propriedades dos corpos de prova simulados.....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$a$  - Comprimento da fissura

$A$  - Amplitude

$A_l$  - Área da seção transversal do elemento longitudinal

$A_d$  - Área dos elementos diagonais

$A_t^f$  - Área de fratura equivalente do elemento

$b$  - Dimensão de referência que define a escala global da amostra

$C_p$  - Velocidade de propagação da onda longitudinal

CV - Coeficiente de variação

DEM - Método dos Elementos Discretos

$E$  - Módulo de elasticidade

EA - Emissão acústica

$\varepsilon$  - Deformação específica

$\varepsilon_r$  - Deformação limite

$\varepsilon_p$  - Deformação crítica de falha

$F$  - Força axial no elemento

$G_f$  - Energia dissipada para abrir uma trinca

$\delta$  - Deslocamento

$K_r$  - Constante que relaciona a deformação limite com a deformação crítica de falha

$L_{co}$  - Comprimento do módulo cúbico

$m$  - Magnitude

MEF - Métodos dos elementos finitos

MEC - Método dos elementos de contorno

$N$  - Número acumulado de picos

RCE - Relação constitutiva elementar

$R_f$  - Fator de falha

$\rho$  - densidade

$t$  - Tempo

$\sigma$  - Tensão

$\nu$  - Coeficiente de Poisson

$\gamma$  - Coeficiente de segurança

$Y$  - Parâmetro adimensional que é dependente das dimensões da amostra e da trinca.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1 Contextualização .....	17
1.2 Objetivos .....	18
1.3 Justificativa.....	18
1.4 Estruturação do trabalho.....	19
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	20
2.1 Efeito de escala.....	20
2.2 O método dos elementos discretos formado por barras .....	22
2.3 Lei constitutiva não linear .....	27
2.4 Emissão Acústica .....	30
2.4.1 <i>Valor b</i> .....	32
2.4.2 Caracterizações numérica e experimental do processo de dano com aplicações de técnicas emissão acústica.....	33
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	34
3.1 Parâmetros Mecânicos do Material Estudado .....	34
3.1.1 Parâmetros mecânicos do material: ensaios experimentais.....	34
3.1.2 Parâmetros do material utilizados nas simulações .....	34
3.2 Ensaio de tração .....	35
3.2.1 Ensaio experimental .....	35
3.3 Emissão Acústica .....	38
3.3.1 Ensaio experimental .....	38
3.2.2 Simulação numérica dos ensaios de emissão acústica .....	40
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	42
4.1 Parâmetros Mecânicos do Material Estudado .....	42
4.1.1 Determinação experimental dos parâmetros mecânicos do material .....	42
4.1.2 Determinação dos parâmetros do material utilizados nas simulações .....	45
4.2 Ensaio de tração .....	46
4.2.1 Ensaio experimental .....	46
4.2.2 Simulação Numérica dos Ensaio de Tração .....	47

4.2.3	Análise do efeito de escala estrutural .....	51
4.2.4	Análise do DEM como ferramenta de simulação.....	52
4.3	Ensaio de emissão acústica .....	53
4.3.1	Ensaio experimental .....	53
4.3.2	Simulação numérica .....	60
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE A - ENSAIOS DE TRAÇÃO.....</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICE B - ENSAIOS DE EMISSÃO ACÚSTICA.....</b>	<b>82</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

O efeito de escala vem sendo observado a bastante tempo, antes mesmo do surgimento da mecânica dos materiais, da Vinci em 1500 afirmou que "entre cordões de igual espessura, o mais curto é o mais forte". Porém de acordo com Bazant e Chen (1997) este princípio implica na proporcionalidade inversa entre a força nominal e o comprimento de um cabo, o que se torna um grande exagero em relação à realidade.

Griffith (1921) ao criar a mecânica da fratura, introduz o efeito de escala nessa teoria, afirmando que "a fraqueza de sólidos isotrópicos ocorre devido à presença de descontinuidades ou defeitos. A força efetiva de um material técnico poderia aumentar 10 ou 20 vezes se essas falhas forem eliminadas".

O interesse pelo efeito de escala em materiais quase frágeis começou em meados dos anos 80 e teve um aumento considerável nos anos seguintes, tornando-se um tema importante em conferências sobre fraturas no concreto.

Os materiais quase frágeis são caracterizados por apresentarem a ruptura ainda na fase de deformação elástica, como exemplo, pode-se citar o concreto, a rocha, o acrílico e vários polímeros. Métodos numéricos que possibilitam simular a ruptura de materiais quase frágeis podem ser utilizados na análise do efeito de escala, dentre eles pode-se citar o método dos elementos discretos formado por barras (DEM). Este método é apto para simular a fratura de sólidos, pois existe a possibilidade de realizar a representação dessa fratura desativando as barras que tenham atingido seus limites de resistência, o que resulta em uma operação bastante simples, sempre levando em conta o balanço das energias envolvidas no processo. O DEM também permite simular eventos de emissão acústica.

A emissão acústica é uma técnica que está sendo utilizada para avaliar a evolução do dano e sua localização, as fontes emissoras são as rupturas, que originam ondas elásticas quando surgem e se propagam em corpos submetidos a cargas. Essa técnica também pode ser utilizada para analisar o efeito de escala, Rodrigues (2012).

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar o efeito de escala em materiais quase frágeis e realizar simulações utilizando o DEM para avaliar sua capacidade e desempenho neste campo de pesquisa.

Como objetivos específicos, podem-se citar:

- a) Determinar experimentalmente os parâmetros que definem o comportamento do material utilizado.
- b) Realizar ensaios de tração e medições de eventos de emissão acústica para analisar o efeito de escala no material.
- c) Simular a falha de materiais quase frágeis sob campos de tensões utilizando o DEM.
- d) Realizar a comparação entre os resultados experimentais e os obtidos com as simulações no DEM.

## 1.3 Justificativa

Em materiais quase frágeis o efeito de escala é considerado um fator crítico e, conseqüentemente, esse fenômeno deve receber grande enfoque durante a realização de um projeto. Para verificar o efeito de escala, é necessário que sejam realizados sempre os mesmos tipos de ensaios, alterando apenas o tamanho do corpo de prova. Deste modo, será possível a verificação da variação das propriedades do material com o tamanho do mesmo. Porém, nem sempre essas condições podem ser atendidas, pois há limitações nas máquinas de ensaios e, em alguns casos, existe a dificuldade para aquisição de corpos de prova no tamanho necessário. Nestes casos a simulação numérica torna-se uma importante alternativa.

O método dos elementos discretos formado por barras é hábil na simulação de fratura e fragmentação do sólido, pois quando uma barra do modelo atinge seu limite de resistência, ela é retirada do mesmo, o que configura uma operação bastante simples.

Atualmente a técnica de emissão acústica apresenta uma metodologia que permite avaliar e entender os processos de dano em estruturas. Essa técnica enquadra-se como sendo um ensaio não destrutivo. A emissão acústica pode ser utilizada em materiais com diferentes tipos de comportamento como estruturas metálicas, concreto, rocha ou plásticos.

A simulação correta do efeito de escala diminui os custos e os equipamentos necessários para a realização de testes e ensaios laboratoriais, sendo possível também verificar a eficiência e segurança de estruturas mais complexas ou submetidas a carregamentos combinados.

#### **1.4 Estruturação do trabalho**

O trabalho desenvolvido é apresentado em cinco capítulos. No primeiro capítulo, a introdução, apresenta-se uma breve contextualização para proporcionar uma melhor compreensão do tema abordado, expondo o problema de pesquisa, bem como os objetivos sobre a realização deste trabalho. A fundamentação teórica, segundo capítulo, exhibe os conceitos necessários à aquisição de embasamento teórico para o desenvolvimento do tema de pesquisa. Neste tópico são explanados os conceitos básicos sobre efeito de escala, DEM e emissão acústica. O terceiro capítulo, metodologia, explica como ocorre a determinação dos parâmetros mecânicos do material e como são realizados os ensaios de tração e emissão acústica, bem como suas simulações no DEM. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos com os ensaios de tração e emissão acústica. O quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas com este trabalho bem como sugestões para trabalhos futuros. No final do trabalho encontram-se as referências bibliográficas utilizadas e também os anexos A e B.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Efeito de escala

O efeito de escala vem sendo observado a bastante tempo, antes mesmo do surgimento da mecânica dos materiais. Esse fenômeno foi discutido por da Vinci em 1500, onde afirmou que "entre cordões de igual espessura, o mais curto é o mais forte". Ele também escreveu que "um fio é muito mais forte como é mais curto". Segundo Bazant e Chen (1997, p. 593), esta regra implica na proporcionalidade inversa entre a força nominal e o comprimento de um cabo, sendo isto naturalmente, um grande exagero em relação à realidade. Mais de um século depois, a regra exagerada de da Vinci, foi rejeitada por Galileu Galilei (1638), em seu famoso livro "*Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a due Nuove Scienze*", no qual ele instituiu a mecânica dos materiais.

Meio século mais tarde, um grande avanço foi feito por Mariotte (1686), ao realizar um experimento utilizando cordas, papel e estanho. Através deste experimento foi possível fazer uma observação relacionada com o efeito de escala estudado atualmente. Segundo Mariotte, "se uma corda longa e uma corda curta apoiarem sempre o mesmo peso, caso a corda longa tenha algum lugar defeituoso, ela irá romper mais cedo que a corda curta". Ele propôs que isto resulta do "princípio da desigualdade da matéria, cuja resistência absoluta é menor em um lugar do que em outro". Em termos qualitativos, ele assim iniciou a teoria estatística do efeito de escala.

O próximo grande avanço foi realizado por Griffith (1921), onde ele não apenas criou a mecânica da fratura, mas também introduziu o efeito de escala nessa teoria. Griffith concluiu que "a fraqueza de sólidos isotrópicos ocorre devido à presença de descontinuidades ou defeitos. A força efetiva de um material técnico poderia aumentar 10 ou 20 vezes se essas falhas forem eliminadas". Com a exceção de Griffith, quase nenhum teórico da mecânica dos materiais deu importância a questão do dimensionamento e sua relação com o efeito de escala, atitude que persistiu até 1980, ano em que surgiu a teoria estatística Weibull (1939).

De acordo com Bazant e Chen (1997, p. 595), a teoria estatística de Weibull para o efeito de escala aplica-se as estruturas que:

1. Não rompem logo no início da fratura macroscópica.

2. Tem por falha apenas uma pequena zona de processo de fratura, causando insignificante redistribuição de tensões, caso de estruturas metálicas fragilizadas por fadiga.

A teoria estatística de Weibull (1939) citada acima não se aplica a materiais quase frágeis, pois esses materiais possuem uma grande zona de fratura com o processo de danos distribuídos.

O material quase frágil mais utilizado é o concreto. Devido a este fato, Kaplan (1961, p. 58) iniciou o estudo da mecânica da fratura para esse tipo de material, verificando que havia um diferente tipo de efeito de escala. Mais tarde, Kesler, Naus e Lott (1972, p. 113) concluíram que a mecânica da fratura linear elástica não se aplicava ao concreto.

Poucos anos depois, Hillerborg et al. (1976, p. 773) deram um passo importante no estudo do efeito de escala, eles formularam o modelo fictício (ou coesivo) de fratura, inspirado nos modelos de amolecimento da zona plástica durante o processo de fratura propostos por Barenblatt (1962, p. 55) e Dugdale (1960, p. 100). Além disso, através da análise de elementos finitos, eles mostraram que a falha em uma superfície plana de uma viga de concreto submetida à flexão, apresenta um efeito de escala que não é do tipo de Weibull. Ao mesmo tempo, Bazant (1976, p. 501) demonstrou analiticamente que o modo de localização do dano em bandas gera um efeito de escala em deformações pós-pico e na energia de dissipação das estruturas. No início de 1980 Bazant (1984, p. 518), com base em uma análise aproximada da liberação de energia, derivou uma fórmula simples para o efeito de escala e descreveu esse efeito sobre a força nominal em estruturas que falham após um grande e estável crescimento da trinca.

O interesse pelo efeito de escala em materiais quase frágeis começou em meados dos anos 80 e teve um aumento considerável nos anos seguintes. Muitos pesquisadores fizeram contribuições notáveis, como exemplo: Petersson (1981, p. 92), Carpinteri (1986, p. 132), Planas e Elices (1993, p. 173). O efeito de escala tornou-se um tema importante em conferências sobre as fraturas no concreto: Bazant (1992), Mihashi et al. (1994) e Wittmann (p. 515, 1995).

Na mecânica dos sólidos, é necessário que se faça uma distinção entre o efeito de escala estrutural e o efeito do tamanho nas quantidades mecânicas (aparentes). No primeiro efeito, a transição do comportamento dúctil para o frágil é evidenciada quando o tamanho da estrutura aumenta. Segundo Kosteski (2012, p. 26) em materiais utilizados na engenharia, este tipo de efeito é sempre detectado (por exemplo, estruturas

de aço com grandes dimensões apresentam um comportamento frágil e pequenos filamentos de vidro exibem ductilidade). Quando há um acréscimo no tamanho das estruturas, é esperado que ocorra uma falha catastrófica, desde que a taxa de liberação de energia ao decorrer da fratura seja progressivamente maior que a taxa de energia consumida na superfície da fissura. Apesar de que, na realidade, a energia acumulada em um sólido muda proporcionalmente ao volume [ $L^3$ ], e a energia dissipada para abrir uma trinca ( $G_f$ ) muda proporcionalmente em relação à área [ $L^2$ ]. Carpinteri e Chiaia (1996, p. 1343) demonstraram que esta concorrência dimensional pode ser suavizada quando a dissipação da energia ocorre também no volume, como é o caso de uma zona onde acontecem dano e plasticidade, ou quando ocorre dentro dos domínios com dimensão fractal maior que dois (conjuntos intermediários entre superfícies e volumes). Em todos estes casos ocorre um colapso mais dúctil.

O efeito de escala que apresenta a maior importância referente às propriedades nominais dos materiais é o efeito do tamanho da estrutura sobre a resistência aparente (BAŽANT; CHEN, 1997, p. 600). A abordagem estatística moderna é baseada no conceito do elo mais fraco, originalmente proposto por Weibull (1939), e posteriormente desenvolvido por Freudenthal (1968 p. 591), Carpinteri (1986), entre outros. Neste contexto, o efeito do tamanho da estrutura sobre a resistência aparente é fornecido pela probabilidade de encontrar um defeito mais crítico (dependendo do seu tamanho e orientação), o que obviamente aumenta com o acréscimo do tamanho da estrutura.

## **2.2 O método dos elementos discretos formado por barras**

Os métodos dos elementos finitos (MEF) e dos elementos de contorno (MEC) são métodos clássicos na resolução de problemas na área de mecânica, também empregados na simulação de problemas de fratura e de dano. No entanto, esses métodos se baseiam em uma abordagem contínua e, assim, a modelagem de nucleação e propagação da trinca pode ser uma tarefa complicada. Existem alguns conceitos que trabalham com fratura e fragmentação no âmbito da mecânica do contínuo, pode-se citar a teoria da mecânica do dano contínuo apresentada por Kachanov (1966, p. 135). No entanto, segundo Rios (2002, p. 151), em pesquisas utilizando materiais suscetíveis à fratura, torna-se interessante usar uma teoria que não envolva a hipótese do meio contínuo.

O método dos elementos discretos (DEM) sugere a representação do meio contínuo através de um arranjo regular de barras de treliça. As massas são concentradas em nós e a rigidez das barras representa o comportamento da porção do contínuo que se deseja modelar. São estabelecidas assim, em cada um dos vértices, as correspondentes equações de equilíbrio, e integrando numericamente em relação ao tempo, é possível obter o comportamento do corpo sólido em um determinado período. Rios (2002) ainda afirma que, devido a esta condição, a formulação do DEM é muito vantajosa para situações que envolvam a fratura de materiais frágeis, pois existe a possibilidade de realizar a representação dessa fratura desativando as barras que tenham atingido seus limites de resistência, o que resulta em uma operação bastante simples. Rios ainda destaca que, o uso do DEM não é limitado apenas para materiais frágeis. Esse método já apresentou eficiência para materiais com comportamento dúctil e também em materiais heterogêneos, como é o caso do concreto reforçado com fibras.

A representação de um sólido contínuo por meio de elementos discretos foi primeiramente apresentada no trabalho de Hrenikoff (1941, p. 169), que utiliza um arranjo de barras sólidas com essa finalidade. Outro trabalho semelhante foi o de Absi (1971, p. 83) o qual empregou um conjunto de barras para simular as fundações elásticas e paredes estruturais em edifícios altos. Cundall e Strack (1979, p. 65) representaram um meio contínuo através de elementos discretos durante a simulação do comportamento de solos granulares em problemas geotécnicos.

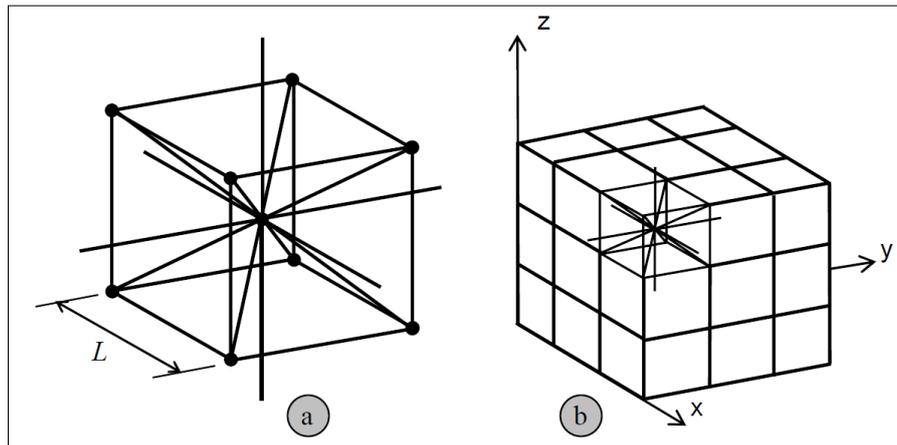
A formulação do DEM utilizado neste trabalho baseia-se em relações de rigidez, dos elementos de um arranjo cúbico de um contínuo ortotrópico. Esta relação foi apresentada por Nayfeh e Hefzy (1978, p. 779). Eles determinaram as propriedades de um contínuo elástico ortotrópico equivalente para modelar painéis de aeronaves consistentes num grande número de pequenas barras interconectadas.

Utilizando uma lei uniaxial de dano, baseada na lei proposta por Hillerborg (1978, p. 1), que permite modelar fratura e dano anisotrópico com relativa facilidade, Riera e Rocha (1991, p. 217) introduziram uma lei constitutiva de dano anisotrópico na formulação do DEM para resolver vários problemas estruturais não lineares.

O método dos elementos discretos é baseado na representação do sólido por intermédio de um arranjo 3D de elementos capazes de suportar somente cargas axiais. A equivalência entre o contínuo elástico ortotrópico e a treliça espacial de elementos uniaxiais, formada pela replicação de uma célula cúbica básica com oito nós nas

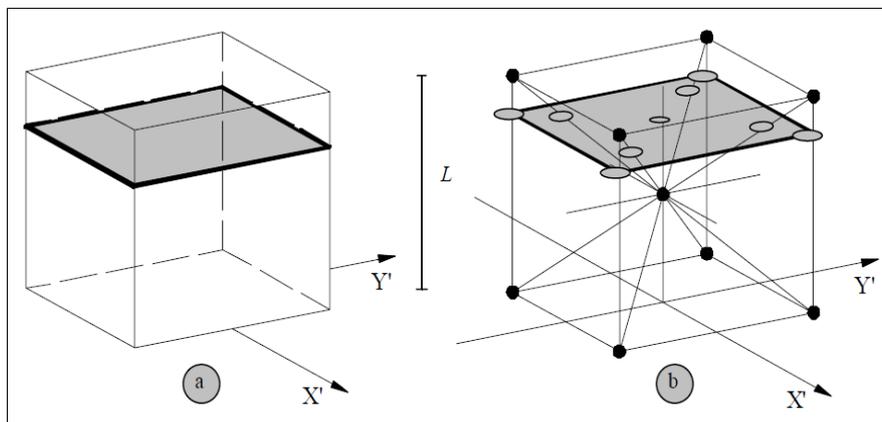
extremidades e um nó central, Figura 2.1. Na Figura 2.2 é mostrada a comparação entre um sólido cúbico e um módulo do DEM, ambos com as mesmas dimensões.

Figura 2. 1 - Discretização utilizada no DEM: a) modelo cúbico básico; b) geração do corpo prismático



Fonte: Kostas (2012, p. 37)

Figura 2. 2 - a) sólido cúbico de dimensões  $L \times L \times L$ ; b) módulo do DEM de dimensões  $L \times L \times L$



Fonte: Maders (2012, p. 1860)

A representação de elementos discretos foi adotada para resolver problemas da dinâmica estrutural através da integração numérica explícita da equação de movimento, que é resultante da discretização espacial proposta. É admitido que as massas são concentradas em nós. Cada nó tem três graus de liberdade, correspondentes aos deslocamentos nas direções das três coordenadas espaciais. Em um material elástico isotrópico, a área da seção transversal do elemento longitudinal (aquelas que definem os

eixos do módulo e aquelas que conectam os nós internos) no modelo discreto equivalente,  $A_b$  é representada pela Equação 2.1.

$$A_l = \emptyset L^2 \quad (2.1)$$

onde  $L$  é o comprimento do módulo cúbico. De forma similar, a área dos elementos diagonais,  $A_d$ , é representada pela Equação 2.2.

$$A_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \delta \emptyset L^2 \quad (2.2)$$

o coeficiente  $2/\sqrt{3}$  leva em conta a diferença no comprimento entre os elementos diagonais e longitudinais. Para sólidos isotrópicos,  $\emptyset = (9 + 8\delta)/(18 + 24\delta)$  e  $\delta = 9\nu(4 - 8\nu)$ , onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson do sólido. É importante salientar que para  $\nu = 0,25$  a equivalência com o contínuo isotrópico é completa. Por outro lado, surgem diferenças nos termos de cisalhamento para  $\nu \neq 0,25$ , esse fato foi explicado por Kosteski (2012, p. 132). Os detalhes do cálculo da seção transversal equivalente por unidade de comprimento das barras longitudinais e diagonais das equações 2.1 e 2.2 podem ser encontradas nos trabalhos de Nayfeh e Hefzy (1978, p. 779) e Dalguer *et al.* (2001, p. 1112).

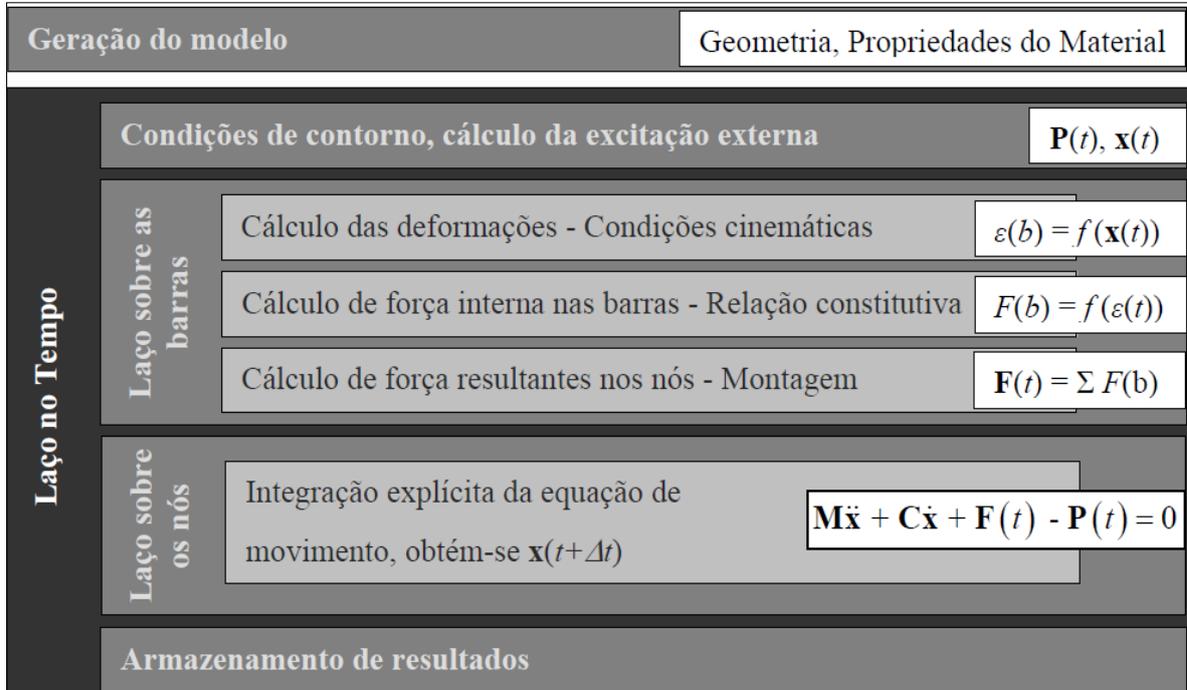
Como explicado anteriormente, a massa do corpo simulado é discretizada e colocada nos nós da treliça, sendo o valor da mesma correspondente ao volume de influência de cada nó. O sistema de equações resultante da aplicação da segunda lei de Newton em cada nó é dado por:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + F(t) - P(t) = 0 \quad (2.3)$$

sendo  $x$ ,  $\dot{x}$  e  $\ddot{x}$  os vetores deslocamento, velocidade e aceleração nodais, e  $M$  e  $C$  as matrizes de massa e amortecimento respectivamente. Os vetores  $F(t)$  e  $P(t)$  contêm as forças internas e externas que atuam nas massas nodais. Como as matrizes  $M$  e  $C$  são diagonais, as Equações 2.3 não são acopladas. Para integrá-las no domínio do tempo é utilizado um esquema de integração explícita de diferenças finitas. É interessante notar que, desde que as coordenadas nodais sejam atualizadas a cada passo de tempo, grandes

deslocamentos são contabilizados naturalmente. O Quadro 2.1 mostra o esquema de funcionamento do DEM.

Quadro 2. 1 - Esquema de funcionamento do DEM



Fonte: Kostascki (2012, p. 38)

Seguindo o critério de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), Bathe (1996, p. 42) afirma que a estabilidade do esquema de integração é assegurada limitando o incremento de tempo. Para a presente implementação, os elementos em piores condições (isto é, aqueles que requerem um  $\Delta t$  menor) são os diagonais. Assim, considerando a relação entre os comprimentos dos dois tipos de barras, a limitação do incremento de tempo é apresentada na Equação 2.4.

$$\Delta t \leq \frac{0,6L}{C_p} \quad (2.4)$$

onde  $C_p$  é a velocidade de propagação da onda longitudinal.

$$C_p = \sqrt{E/\rho} \quad (2.5)$$

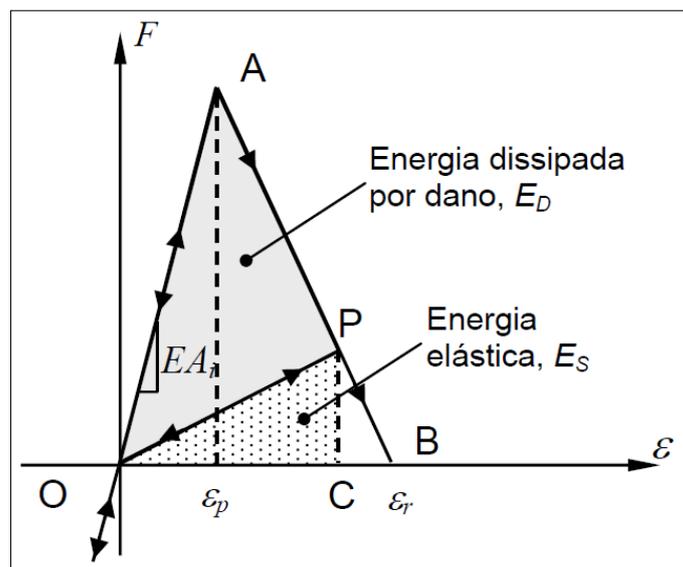
Quando uma barra da treliça espacial rompe, é gerada uma área de fratura equivalente, isso faz com que energia de fratura seja liberada. Esta energia é dependente

da área de fratura e da equação constitutiva do material. Riera (1984) e Riera e Rocha (1991, p. 230) seguiram a lei proposta por Hillerborg (1978) para materiais quase frágeis como relação constitutiva elementar (RCE), ampliando assim o DEM para problemas de fratura frágil.

### 2.3 Lei constitutiva não linear

A lei bilinear ou de Hillerborg, apresentada na Figura 2.3, foi extensamente utilizada para simular o comportamento de materiais quase frágeis. Esta lei leva em conta a fratura frágil e também permite capturar os efeitos irreversíveis da nucleação e propagação de fissuras. Sendo assim, a lei bilinear considera a redução na capacidade de carregamento do elemento.

Figura 2. 3 - Relação constitutiva elementar do DEM: Modelo de Hillerborg



Fonte: Kostascki (2012, p. 40)

Os parâmetros constitutivos e símbolos utilizados na definição do modelo constitutivo são: força axial no elemento ( $F$ ), função da deformação específica ( $\varepsilon$ ) no mesmo, rigidez do elemento definida pelo produto do módulo de elasticidade do material ( $E$ ) pela área da seção transversal ( $A$ ).

A presente lei cumpre com a condição necessária de que a área debaixo da curva força-deformação (área do triângulo OAB na Figura 2.3), seja a densidade de energia necessária para fraturar a área de influência do elemento. Sendo assim, para um ponto P

na curva força-deformação, a área do triângulo OPC representa a densidade de energia elástica armazenada no elemento. No entanto, a área do triângulo OAP é a densidade de energia dissipada por fratura. Uma vez que a densidade de energia dissipada por dano é igual à energia de fratura, o elemento falha e perde sua capacidade de carga. A descarga se realiza linearmente até a origem, como mostrado na Figura 2.3, sendo esta mesma a inclinação utilizada em um novo carregamento. O elemento perde sua capacidade de carregamento quando a  $\varepsilon_r$  é atingida (ponto B da Figura 2.3). Na formulação do DEM utilizada, admitem-se unicamente falhas por tração. Em contrapartida, sob tensões de compressão o material se comporta como elástico linear. Assim, a falha é induzida por tração indireta (KOSTESKI 2012, p. 41). Esta suposição é razoável para materiais quase frágeis, nos quais a tensão última sob compressão uniaxial é usualmente de cinco a dez vezes maior que sob tração uniaxial (KUPFER; GERSTLE, 1973, p. 853).

Segundo Kostascki (2012, p. 41), é importante esclarecer que cada elemento é caracterizado por duas áreas, uma relacionada a sua rigidez e outra a área de fratura equivalente. Estas duas áreas são funções exclusivas da discretização, ou seja, da forma do módulo básico do DEM e do seu comprimento  $L$ . A energia específica de fratura ( $G_f$ ), assim como  $E$ , são características do material. A deformação limite ( $\varepsilon_r$ ) é o valor da deformação axial para o qual o elemento perde sua capacidade de carga. Este valor deve ser calculado para satisfazer a condição de que, quando ocorrer a falha do elemento, a densidade de energia dissipada seja igual ao produto da área de fratura equivalente do elemento  $A_i^f$ , vezes a energia específica de fratura, dividida pelo comprimento do elemento, sendo assim, obtêm-se a Equação 2.6:

$$\int_0^{\varepsilon_r} F(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{G_f A_i^f}{L_i} \quad (2.6)$$

onde os sub-índices  $i$  têm que ser substituídos por  $l$  ou  $d$ , dependendo se o elemento em causa é longitudinal ou diagonal, respectivamente.

A Equação 2.7 mostra a relação constitutiva do modelo de Hillerborg, onde  $\varepsilon_p$  e  $\varepsilon_r$ , respectivamente, as deformações crítica de início de falha e limite.

$$\begin{cases} EA_i \varepsilon & \text{se } \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ EA_i \varepsilon_p \frac{\varepsilon_r - \varepsilon}{\varepsilon_r - \varepsilon_p} & \text{se } \varepsilon_p < \varepsilon \leq \varepsilon_r \\ 0 & \text{se } \varepsilon > \varepsilon_r \end{cases} \quad (2.7)$$

A deformação crítica de falha  $\varepsilon_p$ , foi definida por Rocha (1989, p. 52), como sendo a deformação máxima atingida pelo elemento antes da iniciação do dano (ponto A na Figura 2.3). A relação entre  $\varepsilon_p$  e a energia específica de fratura  $G_f$  é dada em termos da Mecânica de Fratura Elástica Linear segunda a Equação 2.8:

$$\varepsilon_p = R_f \sqrt{\frac{G_f}{E}} \quad (2.8)$$

sendo  $R_f$  o fator de falha, o qual leva em conta a presença de um defeito intrínseco de tamanho  $a$ , expresso pela Equação 2.9:

$$R_f = \frac{1}{Y\sqrt{a}} \quad (2.9)$$

sendo  $Y$  um parâmetro adimensional que é dependente das dimensões da amostra e da trinca, ou seja, função que estabelece como a trinca de tamanho  $a$  está distribuída dentro do elemento de tamanho  $Lco$ . Kostascki (2012, p. 42) destaca que o tamanho do defeito intrínseco  $a$  é pré-determinado e pode ser considerado como sendo uma propriedade do material. Sendo assim, qualquer desordem nas propriedades do material é introduzida no modelo, e isto indicará uma distribuição aleatória na energia de fratura específica,  $G_f$ .

Utilizando a Equação 2.6, obtém-se a deformação  $\varepsilon_r$ . Esta deformação limite pode ser relacionada com a deformação crítica de falha por intermédio da constante  $K_r$ , conforme a Equação 2.10.

$$\varepsilon_r = K_r \varepsilon_p \quad (2.10)$$

O coeficiente  $K_r$  é uma função das propriedades do material e do comprimento  $L_i$  do elemento, como mostra a Equação 2.11.

$$K_r = \left( \frac{G_f}{E\varepsilon_p^2} \right) \left( \frac{A_i^f}{A_i} \right) \left( \frac{2}{L_i} \right) \quad (2.11)$$

Para se garantir a estabilidade do algoritmo, deve-se cumprir a condição de que  $k_r \geq 1$  (RIERA; ROCHA, 1991, p. 230).

Os parâmetros utilizados para definir a relação constitutiva elementar, são propriedades dependentes somente do material, da discretização ou de ambos. Sendo assim,  $G_f$  e  $E$  são propriedades do material,  $A_i^f$  e  $L$  dependem unicamente da discretização do modelo e  $\varepsilon_p$ ,  $R_f$  e  $\varepsilon_r$  dependem tanto das propriedades do material como da discretização. Além disso, é importante notar que, embora o DEM use uma lei de dano escalar para descrever o comportamento uniaxial dos elementos, o modelo global leva em conta dano anisotrópico, uma vez que possui elementos orientados nas diferentes direções espaciais.

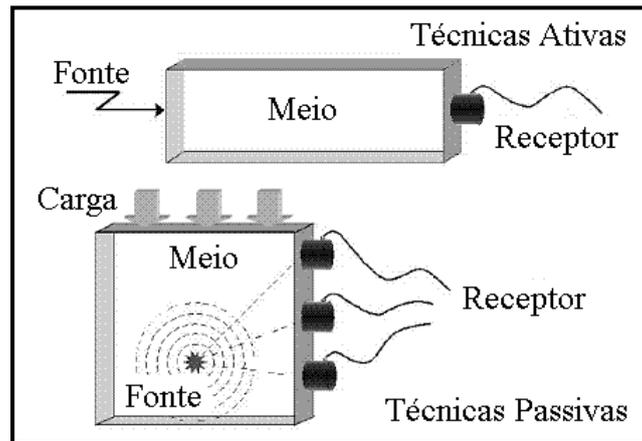
## 2.4 Emissão Acústica

A emissão acústica (EA) é um fenômeno que ocorre quando há a liberação rápida de energia provocada pela modificação estrutural no sólido, no qual ondas elásticas são geradas, ou seja, ocorre uma transformação de energia mecânica em energia sonora.

As técnicas de emissão acústica são consideradas não destrutivas (GROSSE *et al.*, 2008), pois os ensaios são geralmente realizados durante funcionamento, ou carregamento, da estrutura analisada. Além disso, a EA pode detectar a fratura nos primeiros estágios de ocorrência, muito antes que a estrutura venha a falhar completamente.

A EA capta ondas elásticas originadas pela nucleação e pela propagação de algum defeito na estrutura, como ela mesma é a fonte geradora dos sinais, sem haver a necessidade de um equipamento emissor externo (emissão artificial). Devido a este fato, a EA é considerada um ensaio não destrutivo passivo. Uma técnica ativa utiliza uma fonte externa para gerar um sinal que, depois de passar pelo material, chega a algum receptor. A distinção entre técnicas passivas e ativas pode ser observada na Figura 2.4.

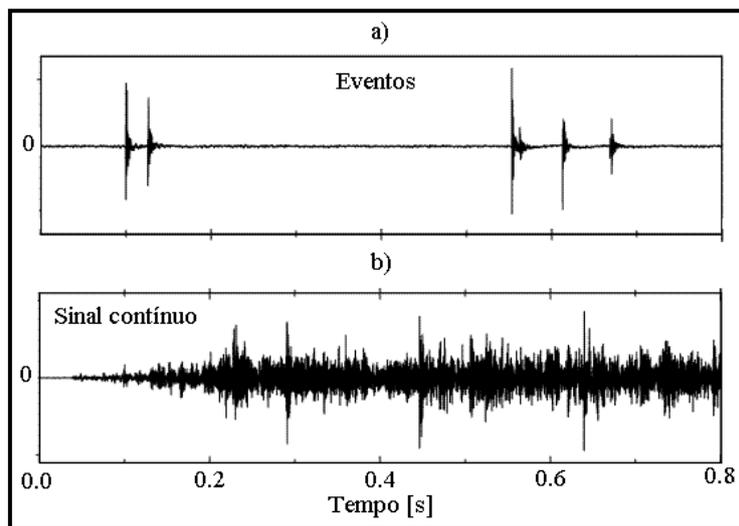
Figura 2. 4 - Comparação entre técnicas não-destrutivas ativas e passivas



Fonte: Grosse.C. U. Ohtsu M (2008)

A Figura 2.5a mostra um registro típico de emissão acústica. Por exemplo, emissões contínuas produzidas durante o corte de metal ou pela fricção na rotação de rolamentos, Miller e McIntire, 1987, exemplo de registros deste tipo de sinal pode ser encontrado na Figura 2.5b. O monitoramento contínuo de emissões acústicas pode ser usado para controlar a operação de máquinas, embora muitas vezes seja difícil de localizar a origem da emissão.

Figura 2. 5 - (a) sinal típico de emissão acústica (b) emissão contínua



Fonte: Grosse *et. al* (2008)

Na realização de ensaios utilizando técnicas de emissão acústica deve-se levar em conta sua vantagem e desvantagem:

- *Vantagem:* facilidade em realizar o ensaio no ambiente de trabalho da estrutura, até mesmo durante o serviço. Além disso, de acordo com Grosse *et al.* (2008), este método só é capaz de detectar a formação de novas trincas e a progressão de fissuras existentes ou processos de fricção.

- *Desvantagem:* mesmo possuindo amostras com as mesmas geometrias, dimensões, propriedades e submetidas aos mesmos carregamentos, é quase impossível reproduzir os mesmos sinais. Este fato ocorre devido à heterogeneidade presente em todos os materiais, o que resulta somente em sinais similares.

Em materiais utilizados em construções (concreto, madeira, metais pedras e compósitos) os sinais de EA possuem baixas amplitudes e elevadas frequências, segundo Carpinteri *et al.* (2008, 2009) geralmente na faixa de kHz e MHz. Esse fato faz com que sejam necessários sensores com elevada sensibilidade, que por sua vez, estão sujeitos ao ruído ambiente. Devido a isto, é necessária a aplicação de métodos de amplificação do sinal e de filtragem deste ruído.

#### 2.4.1 Valor $b$

O *valor  $b$*  ou *coeficiente  $b$*  é um parâmetro que permite descrever o comportamento da fissura durante todo o processo de fratura de um corpo. A magnitude ( $m$ ) é definida como sendo um quantidade em escala logarítmica que é muitas vezes utilizada para medir a amplitude de um sinal elétrico gerado por um evento de emissão acústica, Equação 2.12.

$$m = \log_{10}A \quad (2.12)$$

A Equação 2.13, apresenta a expressão de Gutenberg-Richter (GR) a qual permite relacionar o número de eventos com a magnitude dos mesmos.

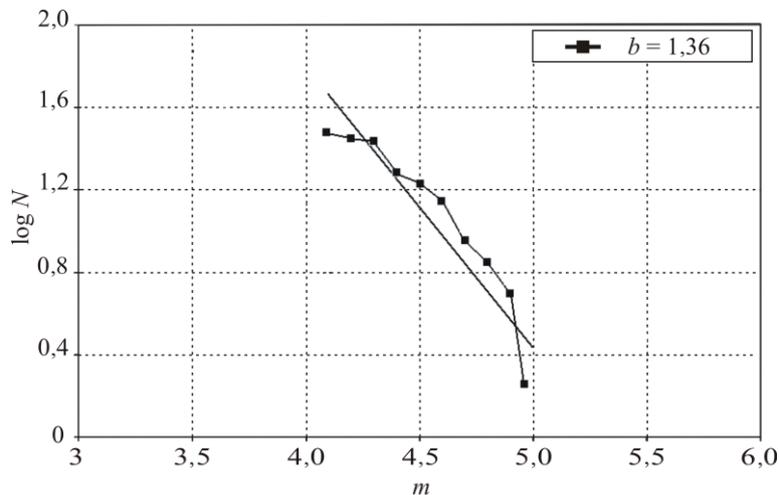
$$\log N(\geq m) = a - bm \quad (2.13)$$

Onde  $N$  é o número de eventos (sinal) com magnitude maior ou igual a  $m$ . O *valor  $b$*  possui inclinação negativa no gráfico  $\log N$  versus  $m$ . Sendo que, as microtrincas correspondem às amplitudes  $< m$  e as macrotrincas as amplitudes  $\geq m$ .

#### 2.4.2 Caracterizações numérica e experimental do processo de dano com aplicações de técnicas emissão acústica

A Equação 2.13 é descrita por Carpinteri *et al* (2008), sendo que o número acumulado de eventos em uma especificada área e período de tempo é denominado  $N$ ,  $b$  e  $a$  são constantes positivas que variam de região para região. Na Figura 2.6 Carpinteri *et. al* (2008) apresenta os resultados obtidos em laboratório com diferentes tipos de corpos de prova, assim como, ensaios experimentais revelaram que o  $b$  é aproximadamente igual a 1,5 quando a carga aplicada é igual ou próxima a carga última. Em estágios avançados de dano onde a falha é eminente  $b$  tende a ficar próximo de 1.

Figura 2. 6 - Diagrama do gráfico referente ao coeficiente  $b$



Rao e Prasanna Lakshmi (2005) avaliam que o alto *valor*  $b$  corresponde a um grande número de eventos de pequena amplitude, os quais representam a formação e o crescimento de forma lenta de uma nova trinca, no entanto *coeficientes*  $b$  baixos indicam crescimento rápido e instável de trincas acompanhadas de altas amplitudes de emissão acústica.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Parâmetros Mecânicos do Material Estudado

##### 3.1.1 Parâmetros mecânicos do material: ensaios experimentais

O poliestireno expandido é escolhido devido ao seu comportamento frágil, ter baixo custo de aquisição e apresentar baixa rigidez se comparado com materiais convencionais, como aço e concreto.

O módulo de elasticidade ( $E$ ) e a densidade ( $\rho$ ) são os parâmetros determinados experimentalmente.

A  $\rho$  é encontrada de maneira simples, relacionando a massa e o volume de uma amostra do material, é feita a medição das dimensões de uma amostra do material e posteriormente essa amostra é pesada utilizando uma balança de precisão de 0,1 gramas. Esse procedimento é realizado utilizando três amostras de diferentes dimensões.

O  $E$  é obtido através do coeficiente angular da reta linear do gráfico tensão *versus* deformação proveniente do ensaio de tração.

##### 3.1.2 Parâmetros do material utilizados nas simulações

Para realizar as simulações numéricas é necessário o conhecimento de determinadas propriedades do material. Os valores de algumas propriedades como a energia específica de fratura ( $G_f$ ) e o fator de falha ( $R_f$ ) são extraídos do trabalho de conclusão de curso de Rodrigues (2012, p. 11), pois nesse trabalho são realizados ensaios, também utilizando poliestireno expandido, que possibilitam a aquisição dessas propriedades.

Os demais parâmetros são determinados no momento da simulação, fazendo algumas simulações iniciais para definir quais os valores que apresentam melhores resultados, por exemplo, o comprimento característico do módulo cúbico ( $L_{co}$ ) dentre outros.

## 3.2 Ensaios de tração

### 3.2.1 Ensaios experimentais

Para realizar o estudo da resposta até a fratura de materiais quase frágeis são utilizados corpos de prova de poliestireno expandido, com diferentes tamanhos e submetidos a ensaios de tração, sendo estes realizados pela máquina de ensaios universais Shimadzu AGS - X 5 kN, Figura 3.1, no laboratório de mecânica aplicada da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete.

Para todos os corpos de prova são aplicados o mesmo tipo de ensaio e a mesma taxa de deformação (deformação por unidade de tempo  $\dot{\epsilon}$ ), para assim obter de maneira correta o efeito de escala nesse material. São utilizados sete tipos de corpos de prova, Figura 3.2, no formato de placas de nove milímetros de espessura, mas de tamanhos diferentes e nomeados de A, B, C, D, E, F e G. Para cada tamanho são realizados quatro ensaios para validação do modelo, ao total são realizados vinte e oito ensaios.

Os corpos de prova são fixados na parte superior e inferior pelas garras da máquina de ensaios, sendo que a garra inferior permanece estática e a garra superior se desloca de acordo com a velocidade definida para a realização do experimento. É importante salientar que não é controlada a força no corpo de prova, somente a taxa deslocamento ( $\delta_z$ ).

Figura 3. 1 – Máquina universal de ensaios Shimadzu

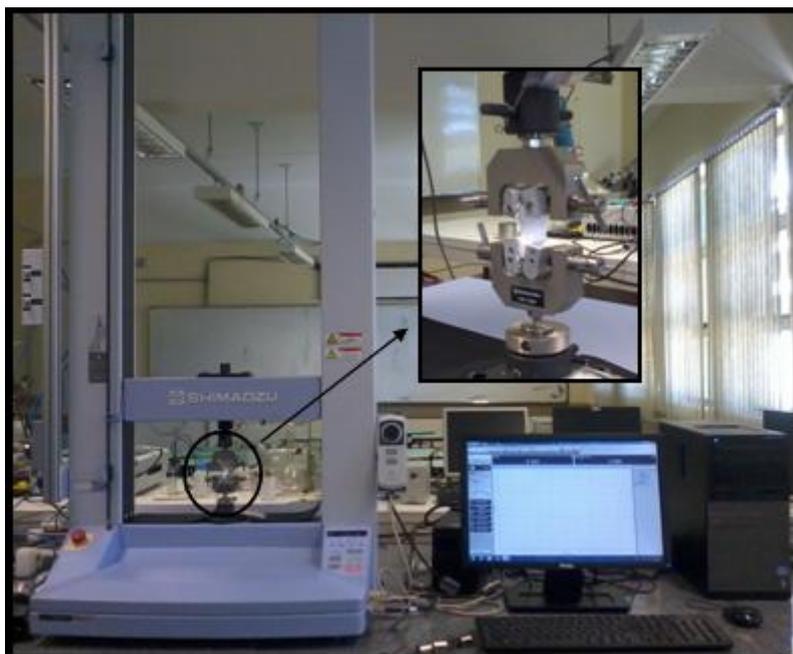
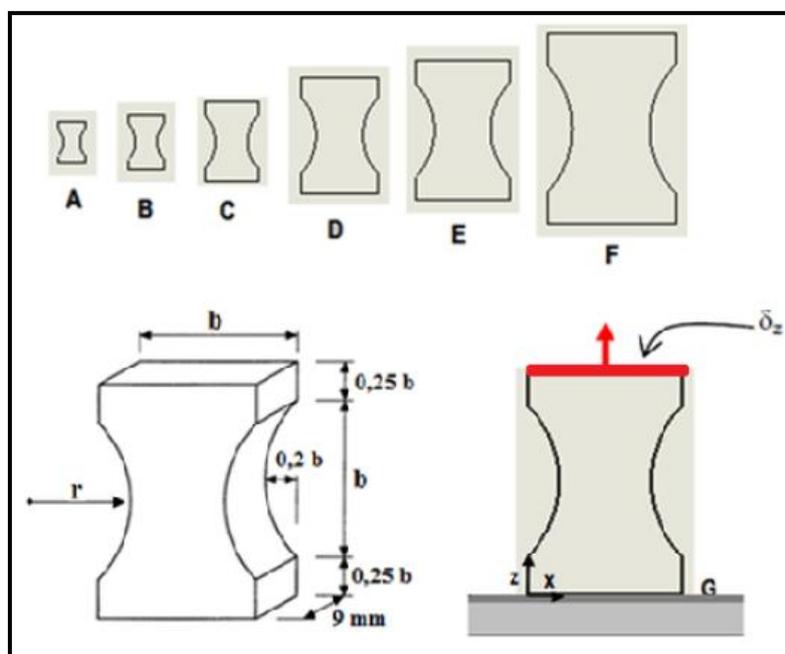


Figura 3. 2 – Configuração dos corpos de prova e condições de contorno



As dimensões de cada corpo de prova assim como a velocidade utilizada são mostradas na Tabela 3.1. Para todos os ensaios utilizou-se uma taxa de deformação de 0,03 [mm/mm.s]. A partir desta metodologia é possível obter a curva tensão deformação e assim encontrar o módulo de elasticidade do material.

Tabela 3. 1 - Dimensões e velocidades dos corpos de prova

<b>Tipo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>
<b><i>b</i> [mm]</b>	30,00	60,00	90,00	120,00	150,00	180,00	210,00
<b><i>r</i> [mm]</b>	21,75	43,50	65,25	87,00	108,75	130,50	152,25
<b><i>V</i>[mm/min]</b>	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00

### 3.2.2 Simulação Numérica dos Ensaio de Tração

Através dos ensaios de tração iniciais, são determinados o menor e o maior arranjo possível que conduz a resultados satisfatórios, definindo assim os tamanhos dos módulos cúbicos (*Lco*).

São definidos no DEM o módulo de elasticidade obtido no ensaio e a velocidade utilizada no mesmo. É imposta uma porcentagem de aleatoriedade na energia de fratura, a qual irá representar os defeitos, as discontinuidades e as propriedades distintas ao longo do material. Para a obtenção do valor dessa porcentagem, são realizadas quatro simulações para um mesmo corpo de prova, porém em cada simulação é aplicada uma porcentagem de aleatoriedade diferente. Por fim, é analisada qual porcentagem de aleatoriedade que melhor representa o comportamento do material durante o ensaio de tração, sendo esse valor utilizado nas simulações com os demais tipos de corpos de prova. Esse acréscimo de aleatoriedades fará com que a malha se deforme descontinuamente, caracterizando assim, a realidade da microestrutura imperfeita de um material quase frágil. Essa aleatoriedade imposta na energia de fratura faz com que seja possível realizar quatro simulações para cada tipo de corpo de prova, podendo posteriormente comparar os dados das simulações com os obtidos experimentalmente.

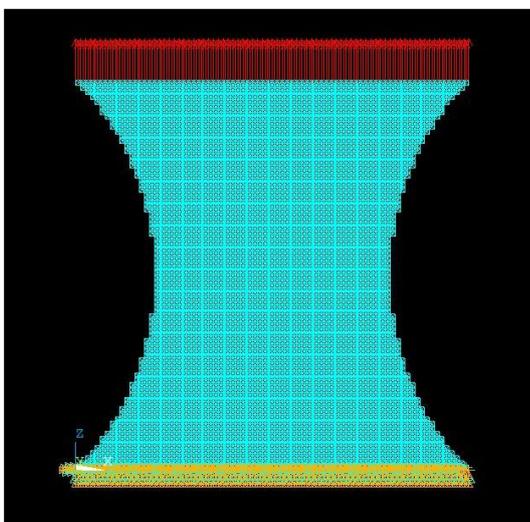
Para estabelecer as mesmas geometrias dos corpos de prova, bem como as condições de contorno as quais estes são submetidos nos ensaios (velocidade e restrições de deslocamento), são realizadas modificações no programa base do DEM através de algoritmos, em linguagem de programação Fortran, utilizando o compilador g95.

Cada corpo de prova tem seu comprimento efetivo modelado, ou seja, uma área de  $b \times b$  com espessura de 9 milímetros, devido ao fato de que é somente nessa região onde ocorre a ruptura e que interessa para a simulação. Os módulos cúbicos têm 1,5

milímetros. Um dos modelos simulados é mostrado na Figura 3.3, às restrições de movimento são as mesmas do experimental.

São programadas sub-rotinas no DEM, as quais fazem com que o algoritmo principal cumpra as condições de contorno necessárias para a obtenção dos valores como tensões, deformações e reações sofridas pelo corpo de prova durante a simulação. Posteriormente, é realizada a comparação dos valores obtidos no DEM com os valores dos ensaios.

Figura 3. 3 - Exemplo do modelo simulado no DEM



### 3.3 Emissão Acústica

#### 3.3.1 Ensaio experimentais

Os ensaios de emissão acústica foram realizados no laboratório experimental do Grupo de Mecânica Aplicada (GMAp) da UFRGS. Buscando evidenciar o efeito de escala estrutural foram escolhidos dois corpos de prova, tipo C e tipo G, isto porque teoricamente o efeito de escala fica mais evidente utilizando corpos de prova com grandes variações dimensionais, foram realizados dois ensaios para cada tipo de corpo de prova.

Os corpos de prova são instrumentados com mais de 1 microfone para assim poder analisar a propagação da trinca ao longo da amostra. O tipo C é instrumentado com dois microfones, devido ao seu tamanho, já o corpo de prova do tipo G é

instrumentado com 4 microfones Bruel & Kjaer modelo 4198-A-021. Em todos os ensaios um microfone é utilizado para captar os ruídos do ambiente.

Logo após a instrumentação, os corpos de prova são ensaiados na máquina de tração Emic DL-2000, a coleta de dados é feita através do amplificador de sinais e do software Pulse ambos da Bruel & Kjaer, todos os equipamentos na ordem citada são mostrados nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6.

Figura 3. 4 - Microfones Bruel & Kjaer modelo 4198-A-021



Figura 3. 5 – Máquina de ensaios Emic DL-2000



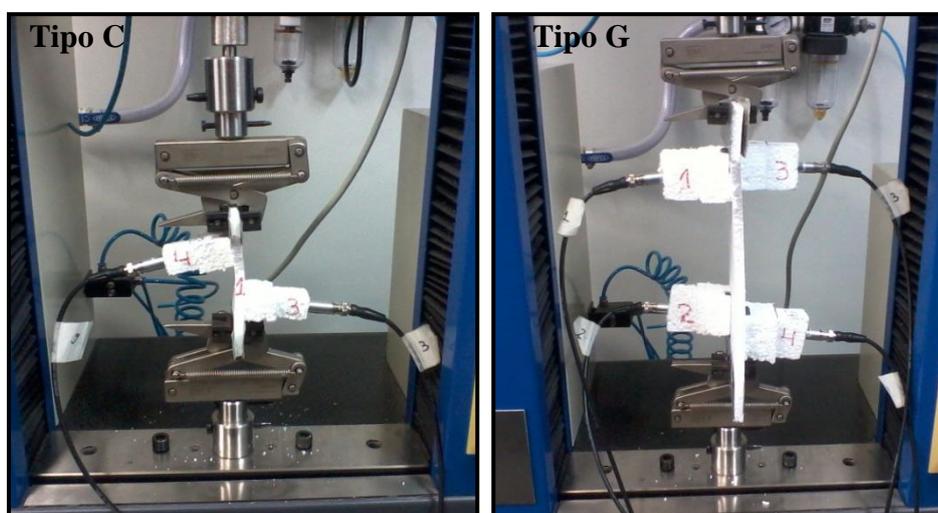
Figura 3. 6 - Amplificador de sinais de 6 canais modelo 3035 e Microcomputador com Software Pulse para controle do Amplificador, ambos da marca Bruel & Kjaer



Os dados adquiridos no ensaio de emissão acústica são pressão sonora (Pa) pelo tempo ( $t$ ), através da análise dos sinais é possível determinar parâmetros que caracterizam a falha e sua evolução. A frequência máxima em que opera o equipamento de aquisição de dados é de 65 KHz, ideal para este tipo de material. Os arquivos gerados são salvos em ASCII exportados pelo software Pulse, captados com intervalos entre pontos de aquisição de cerca de 1.52E-5 segundos, ou seja, aproximadamente 65 KHz.

Os corpos de prova instrumentados com os microfones são mostrados na Figura 3.7, assim como a localização dos mesmos.

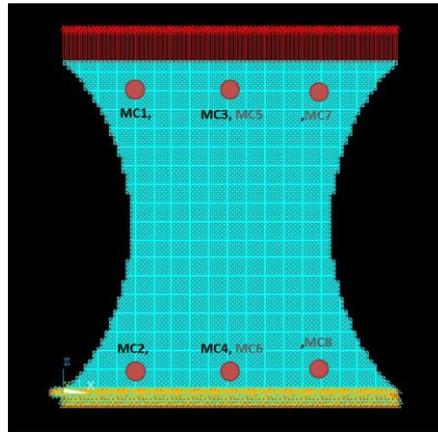
Figura 3. 7 – Corpos de prova instrumentados



### 3.2.2 Simulação numérica dos ensaios de emissão acústica

Nos modelos numéricos foram definidos seis pontos de controle com o propósito de captar as acelerações provenientes das ondas geradas no interior do corpo. Essas ondas são criadas quando algum elemento no interior do corpo rompe e libera certa quantidade de energia cinética. Essa energia cinética se transforma em onda que percorre todo o corpo e é captado, em termos de aceleração, pelos pontos de controle pré-definidos no modelo em DEM. A Figura 3.8 mostra os pontos de controle e os oito microfones inseridos nesses locais, os microfones a esquerda da vírgula estão posicionados na parte frontal do corpo de prova e os localizados a direita estão na parte posterior

Figura 3. 8 – Corpo de prova simulado no DEM, e a localização dos sensores



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Parâmetros Mecânicos do Material Estudado

#### 4.1.1 Determinação experimental dos parâmetros mecânicos do material

➤ Densidade ( $\rho$ )

Como descrito no item 3.1.1, são utilizados três retângulos de poliestireno expandido, exemplo Figura 4.1, com diferentes dimensões para realizar o cálculo da densidade do material. Primeiramente é feita a medição das dimensões dos retângulos para calcular o volume ( $v$ ) e posteriormente é realizada a pesagem dessas amostras obtendo assim a massa ( $m$ ), como dito anteriormente a balança possui uma precisão de 0,1 gramas. Utilizando a Equação 4.1 é obtido o valor da densidade para as três amostras, a Tabela 4.1 apresenta os resultados.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4.1)$$

Figura 4. 1 - Um dos retângulos de poliestireno expandido utilizado para calcular a densidade



Tabela 4. 1 - Densidade do material

	<b>Volume [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Massa [Kg]</b>	<b>Densidade [Kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Amostra 1</b>	0,00035	0,00030	0,85227
<b>Amostra 2</b>	0,00025	0,00020	0,80000
<b>Amostra 3</b>	0,00011	0,00010	0,89847
	<b>Média</b>		<b>0,85025</b>
	<b>Coefficiente de variação (CV)</b>		<b>5,79 %</b>

Como pode ser visto na Tabela 4.1 o CV do cálculo da densidade é de 5,79% e o valor da densidade do material é admitido como sendo  $8,50E-1 \text{ Kg/m}^3$ .

➤ Módulo de Elasticidade ( $E$ )

Como explicado no item 3.1.1 para obter o  $E$  do material é necessário realizar primeiramente os ensaios de tração. Aqui são apresentados os resultados obtidos para o  $E$  do material, porém as curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de tração para os diferentes tipos de corpos de prova são apresentadas posteriormente no item 4.2.1.

É possível calcular os valores do  $E$  a partir do coeficiente angular da curva tensão *versus* deformação do gráfico obtido no ensaio de tração, exemplo Gráfico 4.1. Os valores do  $E$  obtidos para todos os tipos de corpos de prova são apresentados na Tabela 4.1.

Gráfico 4. 1 – Gráfico de dispersão para determinar o  $E$  do corpo de prova F, ensaio 2

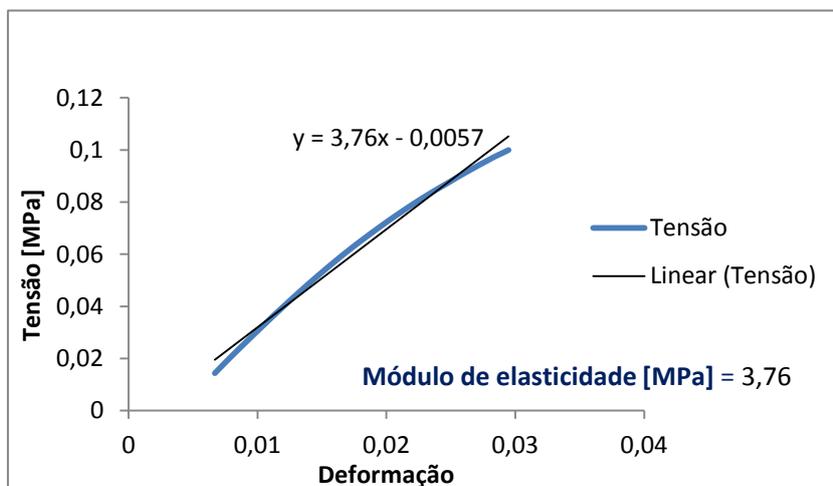


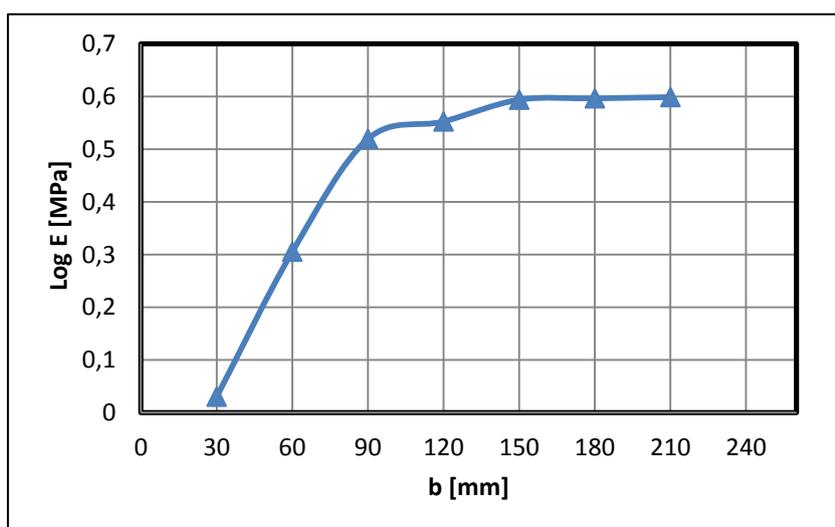
Tabela 4. 2 - Valores módulo de elasticidade

	Ensaio 1 [Mpa]	Ensaio 2 [Mpa]	Ensaio 3 [Mpa]	Ensaio 4 [Mpa]	Média Ensaios [Mpa]	Coefficiente de variação [%]
<b>Tipo A</b>	1,12	0,98	0,90	1,14	1,03	10,98
<b>Tipo B</b>	2,45	1,91	1,96	1,77	2,02	14,68
<b>Tipo C</b>	3,53	3,23	3,21	3,27	3,31	4,53
<b>Tipo D</b>	3,40	3,72	3,72	3,64	3,62	4,22
<b>Tipo E</b>	4,10	3,72	3,88	3,80	3,88	4,20
<b>Tipo F</b>	3,88	3,76	4,02	4,14	3,95	4,13
<b>Tipo G</b>	3,91	4,06	3,86	4,05	3,97	2,61
<b><i>E</i> médio de todos os ensaios</b>					<b>3,11</b>	36,72
<b><i>E</i> médio dos ensaios de C a G</b>					<b>3,75</b>	7,50

Analisando a Tabela 4.2, pode-se verificar que os ensaios com os corpos de prova dos tipos A e B apresentaram uma discrepância nos valores do  $E$  em relação aos demais tipos de corpos de prova, conseqüentemente o CV possui um valor elevado como mostrado na última coluna da tabela.

O Gráfico 4.2 apresenta a variação do  $E$  (em escala logarítmica) com o tamanho do corpo de prova (b).

Gráfico 4. 2 – Variação do módulo de elasticidade com o tamanho do corpo de prova



É possível observar, como já foi mencionado, a existência de uma grande variação dos valores do módulo de elasticidade dos corpos de prova A e B. Pode ser que

grande parte dessa variação ocorre pelo mal posicionamento desses corpos de prova nas garras da máquina devido ao fato destes serem muito pequenos, dificultando a fixação dessas amostras pelas garras e, conseqüentemente, os resultados obtidos podem apresentar erros. Por esse motivo não são utilizados neste trabalho os resultados dos corpos de prova A e B. Ainda assim no Gráfico 4.2, pode-se observar um possível efeito de escala que afeta o módulo de elasticidade do material. Isto é, a medida que diminui o tamanho do corpo de prova o módulo de elasticidade também diminui. Também é possível observar um tamanho de corpo de prova crítico que separa dois tipos de comportamentos diferentes, sendo que um é influenciado pela microestrutura e o outro não. Esse mesmo comportamento já foi observado por Carpinteri, Chiaia e Ferro (1995), nas tensões de ruptura e nas energias de fratura.

Sendo assim, como os coeficientes de variação dos demais corpos de prova possuem valores menores, é admitido o  $E$  médio dos ensaios de C a G (3,75 MPa) como sendo o módulo de elasticidade do material.

#### 4.1.2 Determinação dos parâmetros do material utilizados nas simulações

Para realizar as simulações no DEM é necessário definir alguns parâmetros iniciais. Os valores do  $E$  e da  $\rho$  são definidos no item 4.1.1. Já a energia específica de fratura ( $G_f$ ) e o fator de falha ( $R_f$ ) são extraídos do trabalho de conclusão de curso de Rodrigues (2012, p. 11).

A porcentagem de aleatoriedade imposta na malha, ou seja, o coeficiente de variação da energia de fratura ( $CVG_f$ ) é obtido como explicado no item 3.2.2, já o comprimento do módulo cúbico ( $Lco$ ) é definido conforme o item 3.1.2. Por fim, a deformação crítica de falha ( $\epsilon_p$ ) é calculada de acordo com a Equação 2.8 e a constante que relaciona a deformação limite com a deformação crítica de falha ( $K_r$ ) é obtida pela Equação 2.11.

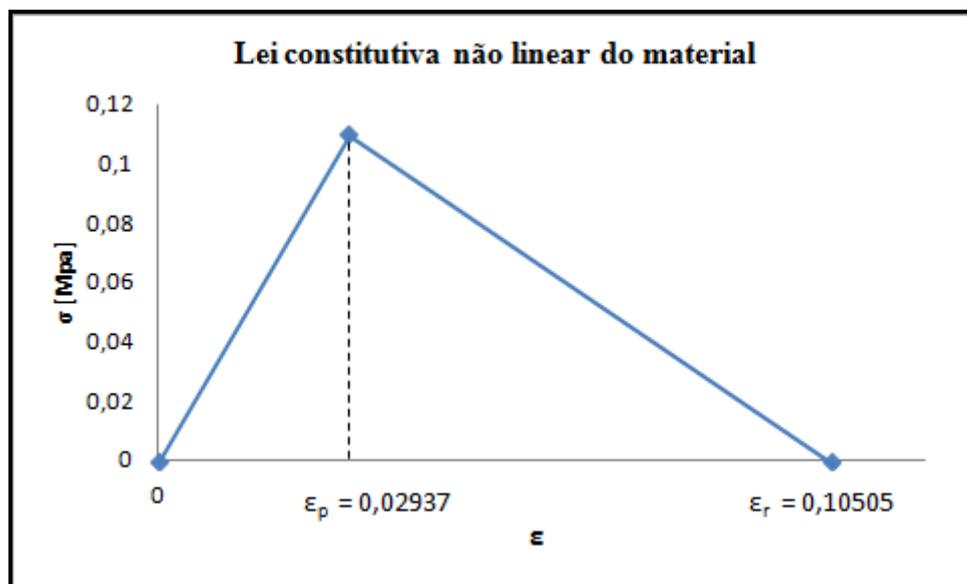
Os valores desses parâmetros citados a cima são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Parâmetros utilizados nas simulações

Parâmetros	
$E$ [Mpa]	3,75
$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	8,50
$G_f$ [N/m]	26,80
$R_f$ [m <sup>-1/2</sup> ]	11,10
CVG <sub>f</sub> [%]	50,00
$L_{co}$ [mm]	1,5
$\epsilon_p$	0,02937
$K_r$	3,58

Também a partir dos dados da Tabela 4.3 é possível obter a lei constitutiva não linear do material, Gráfico 4.3.

Gráfico 4.3 - Lei constitutiva não linear do material



## 4.2 Ensaios de tração

### 4.2.1 Ensaios experimentais

Os ensaios de tração são realizados conforme é explicado no item 3.2.1, esses ensaios fornecem as curvas tensão *versus* deformação para os quatro ensaios com cada tipo de corpo de prova. O Gráfico 4.4 apresenta as curvas dos ensaios com os corpos de

prova dos tipos A e B. Já o Gráfico 4.5 apresenta as curvas para os ensaios com os corpos de prova C, D, E, F e G. As curvas provenientes dos ensaios com os corpos de prova são denominadas por ensaio 1, ensaio 2, ensaio 3 e ensaio 4. É importante salientar que o mecanismo de fixação das garras possui uma pequena folga, sendo assim as curvas tensão *versus* deformação apresentam inicialmente um deslocamento. Esse valor é praticamente constante em todos os ensaios, devido a este fato realizou-se a subtração desse valor para os dados obtidos em todos os ensaios de tração, adquirindo assim a verdadeira inclinação das curvas tensão *versus* deformação.

#### 4.2.2 Simulação Numérica dos Ensaio de Tração

Utilizando os dados da Tabela 4.3 e realizando os procedimentos explicados no item 3.2.2 são realizadas as simulações para os corpos de prova C, D, E, F e G, devido ao problema com os ensaios dos corpos de prova A e B descrito no item 4.1.1, não são realizadas simulações para esses dois tipos de amostras. As curvas tensão *versus* deformação obtidas com as simulações são apresentadas no Gráfico 4.5. Essas curvas são denominadas nos gráficos como DEM1, DEM2, DEM3 e DEM4, referindo-se a cada simulação realizada para um determinado tipo de corpo de prova.

Gráfico 4. 4 - Tensão *versus* deformação dos corpos de prova A e B

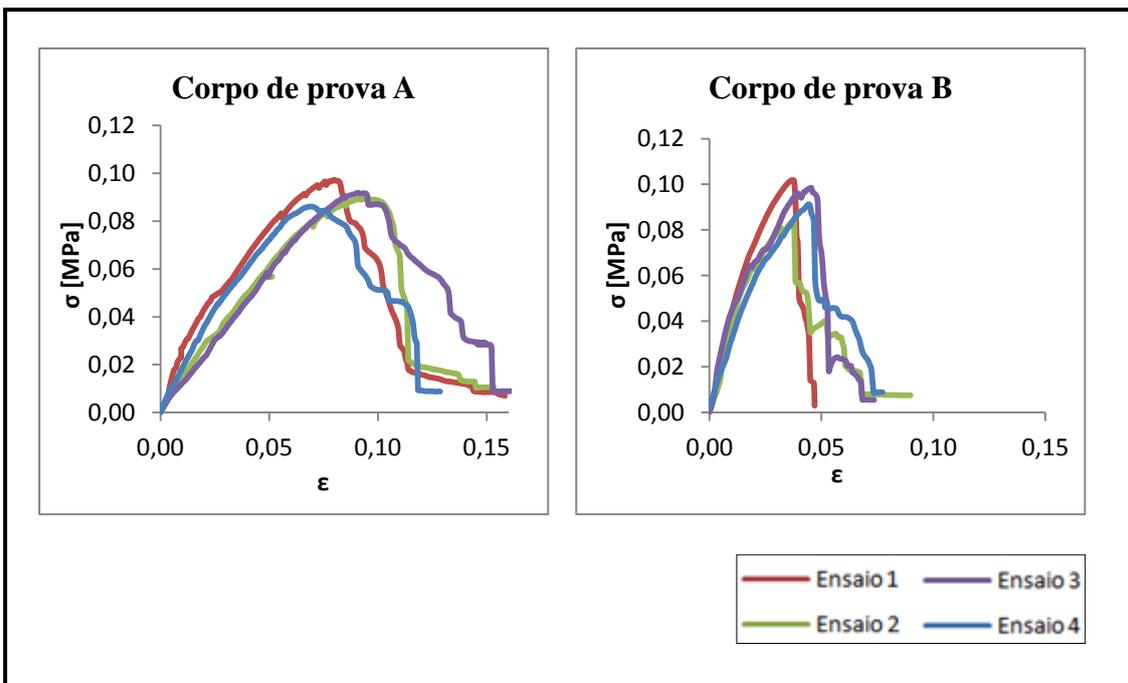
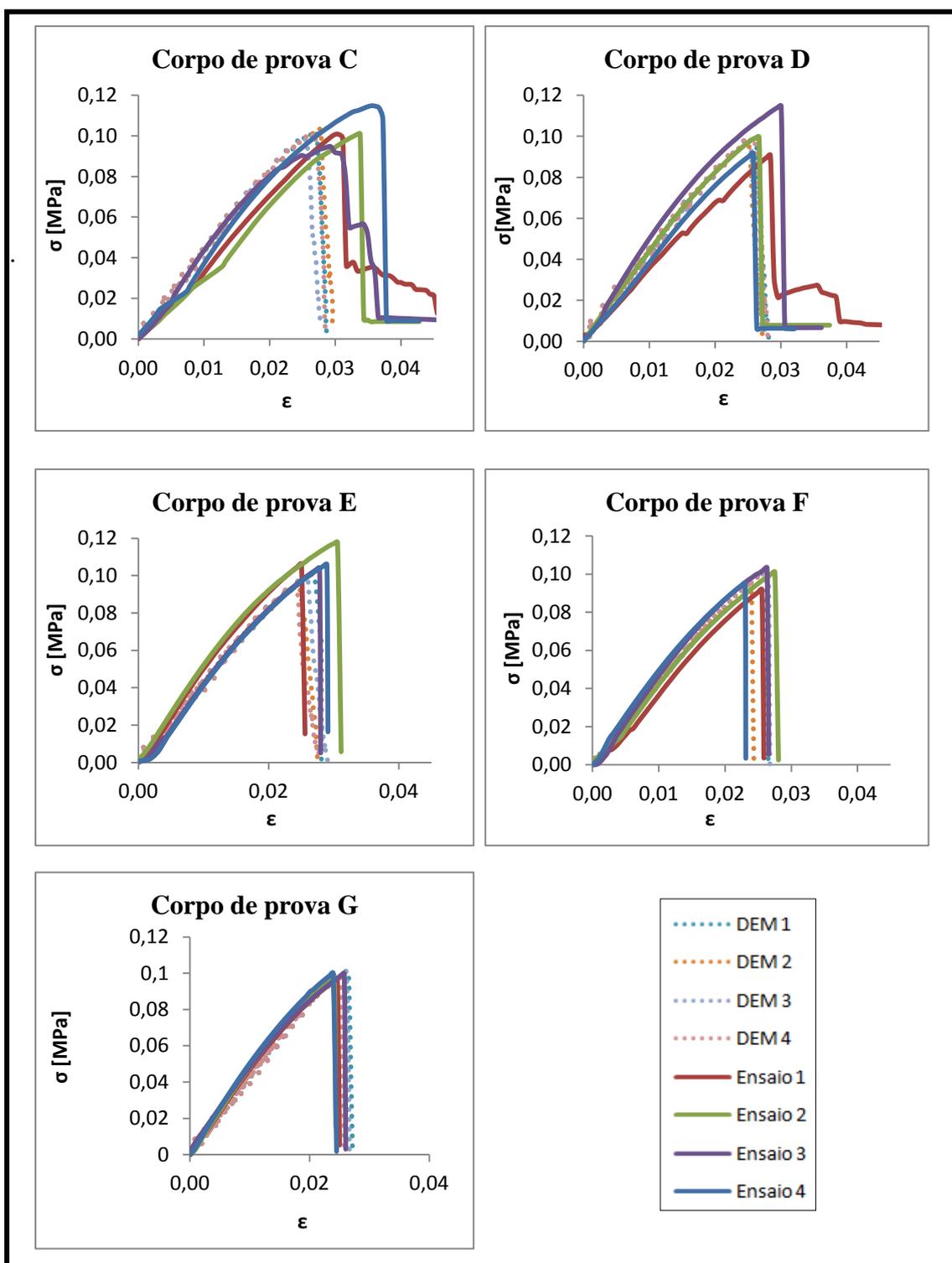


Gráfico 4. 5 - Tensão *versus* deformação dos corpos de prova C, D, E e F



Para facilitar a análise dos resultados obtidos a Tabela 4.4 apresenta a média dos valores da tensão de ruptura ( $\sigma$ ), a média da máxima deformação atingida até a ruptura ( $\epsilon$ ) e o coeficiente de variação dos ensaios experimentais e das simulações numéricas.

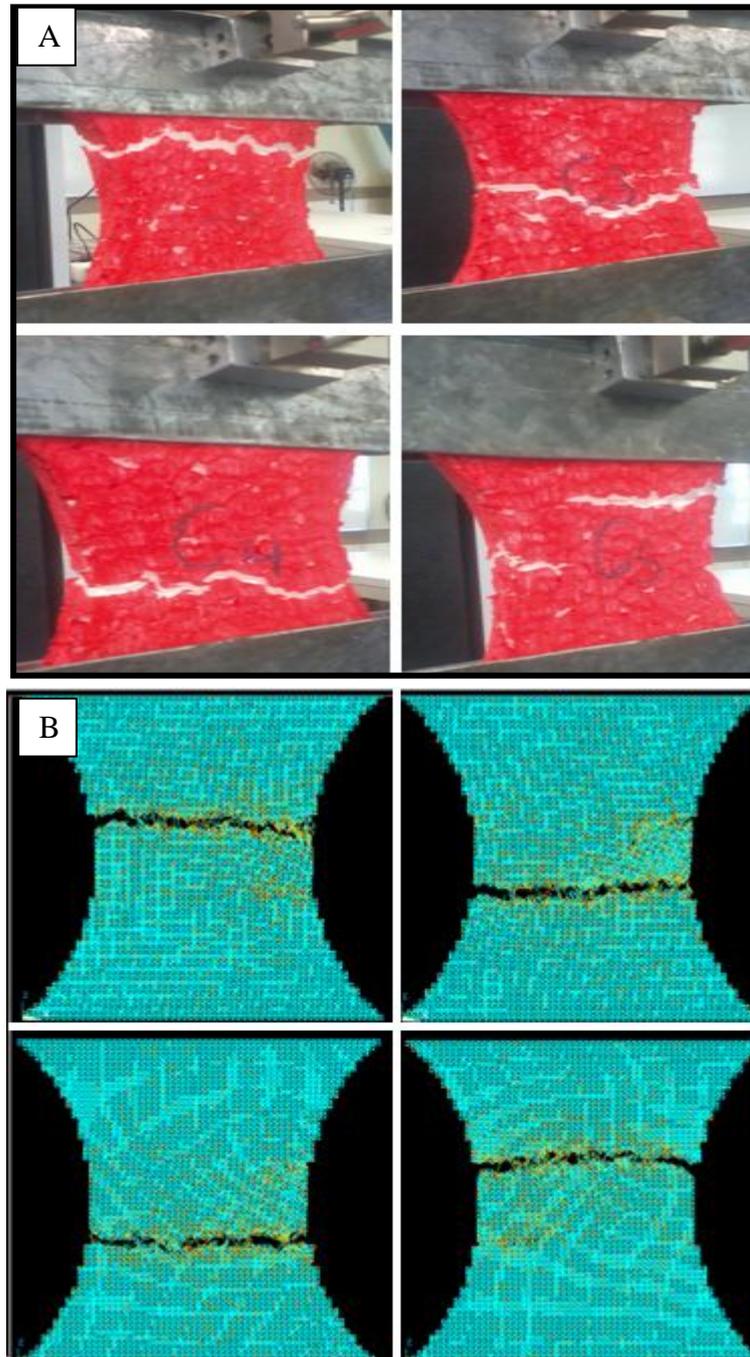
Tabela 4. 4 - Valores obtidos nos ensaios de tração experimentais e nas simulações numéricas

Corpo de prova A			Corpo de prova B	
	Média ensaios	CV ensaios [%]	Média ensaios	CV ensaios [%]
$\sigma$ [Mpa]	0,091	5,181	0,094	8,601
$\epsilon$	0,083	12,535	0,041	10,956
Corpo de prova C				
	Média ensaios	CV ensaios [%]	Média simulações	CV simulações [%]
$\sigma$ [Mpa]	0,103	8,318	0,102	2,478
$\epsilon$	0,032	9,310	0,026	3,500
Corpo de prova D				
	Média ensaios	CV ensaios [%]	Média simulações	CV simulações [%]
$\sigma$ [Mpa]	0,099	11,172	0,099	1,260
$\epsilon$	0,028	6,822	0,025	3,775
Corpo de prova E				
	Média ensaios	CV ensaios [%]	Média simulações	CV simulações [%]
$\sigma$ [Mpa]	0,108	5,804	0,099	2,590
$\epsilon$	0,027	8,310	0,025	4,018
Corpo de prova F				
	Média ensaios	CV ensaios [%]	Média simulações	CV simulações [%]
$\sigma$ [Mpa]	0,098	5,465	0,099	2,590
$\epsilon$	0,026	7,442	0,025	4,018
Corpo de prova G				
	Média ensaios	CV ensaios [%]	Média simulações	CV simulações [%]
$\sigma$ [Mpa]	0,099	1,464	0,100	2,525
$\epsilon$	0,025	3,399	0,025	3,341

A Figura 4.2A mostra as trincas geradas nos quatro corpos de prova do tipo C quando estes são submetidos ao ensaio de tração. Já a Figura 4.2B apresenta as trincas nos quatro corpos de prova do tipo C provenientes das simulações numéricas, as comparações com os demais tipos de corpos de prova são mostradas no Apêndice A. A

Figura 4.3 apresenta uma configuração de ruptura para cada tipo de corpo de prova obtida durante as simulações numéricas.

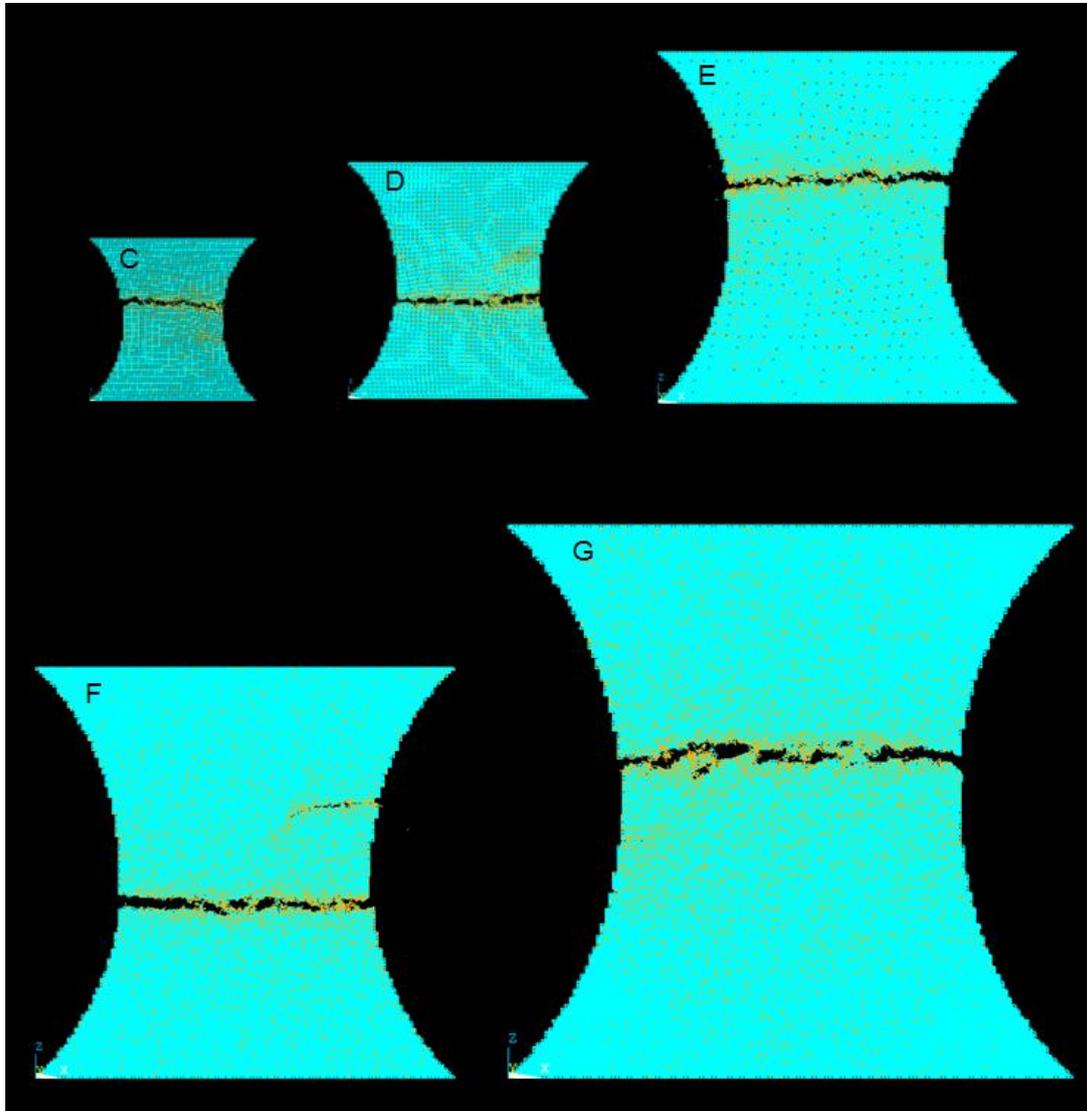
Figura 4. 2 - a) Trincas provenientes dos ensaios experimentais com o corpo de prova C. b) Trincas obtidas durante as simulações numéricas com o corpo de prova C



Como se pode observar na Figura 4.2 as simulações no DEM apresentaram propagações de trincas semelhantes aos dos ensaios experimentais, por exemplo, em um dos corpos de provas ensaiados, Figura 4.2A ocorreu o surgimento de duas trincas que

se propagaram em direções contrárias, esse fato também ocorreu em algumas simulações.

Figura 4.3 - Configuração das trincas obtidas durante as simulações



#### 4.2.3 Análise do efeito de escala estrutural

##### ➤ Ensaio experimentais

Analisando a Tabela 4.4 é possível notar que à medida que os tamanhos dos corpos de prova aumentam os valores das deformações de ruptura diminuem, o que caracteriza uma redução na ductilidade do material, conseqüentemente, o coeficiente de variação é maior para as deformações do que para as tensões. Essa variação dos valores

da deformação é pequena, esse fato pode ocorrer devido à pequena diferença entre os tamanhos dos corpos de prova, o esperado é que quanto maior for a diferença entre os tamanhos das amostras maior será a variação da deformação de ruptura.

➤ Simulação numérica

Os valores obtidos nas simulações numéricas em geral não apresentam o efeito de escala estrutural, pois há uma redução da deformação de ruptura somente do corpo de prova do tipo C para o tipo D, posteriormente a deformação permanece aproximadamente constante, como pode ser visto na Tabela 4.4. Esse fato pode ocorrer devido aos valores de  $G_f$  e  $R_f$  que são extraídos do trabalho de conclusão de curso de Rodrigues (2012, p. 11) e não estão ajustados adequadamente. Como já foi citado, esses parâmetros possuem um coeficiente de variação de 16% e 8,87%, respectivamente, e estes influenciam na lei constitutiva não linear do material, Gráfico 4.3. Sendo assim esses valores estão totalmente relacionados com o valor de  $\varepsilon_p$ , como mostra a Equação 2.8. Apesar disso, é importante notar que os coeficientes de variação provenientes das simulações possuem valores aceitáveis.

#### 4.2.4 Análise do DEM como ferramenta de simulação

Como pode ser observado no Gráfico 4.5 o DEM mostrou-se ser uma boa ferramenta para a simulação da ruptura de materiais quase frágeis, pois as curvas obtidas com as simulações coincidem com as curvas experimentais. As variações entre os valores numéricos e experimentais da tensão e deformação do material podem ocorrer, devido à definição do valor inicial de  $G_f$  que foi extraído da bibliografia, não sendo realizado um ensaio com o material estudado para obter esse valor que possui uma grande influencia nos valores das simulações. A Figura 4.2 mostra que as trincas obtidas nas simulações com o DEM obtiveram configurações bem próximas as obtidas nos ensaios experimentais. Este fato comprova que o valor escolhido para o coeficiente de variação da energia de fratura foi adequado.

### 4.3 Ensaaios de emissão acústica

#### 4.3.1 Ensaaios experimentais

Conforme explanado anteriormente, foram realizados dois ensaios para cada tipo de corpo de prova (C e G) porque como já foi visto nos ensaios de tração o efeito de escala estrutural fica mais evidente utilizando corpos de prova com grandes variações dimensionais. Através desses ensaios, foram obtidos os gráficos da amplitude *versus* tempo e o de espectro de frequência.

Para a realização das análises são utilizados apenas um ensaio de cada tipo de corpo de prova, sendo escolhidos os que fornecem um maior número de picos no gráfico amplitude *versus* tempo.

Os ensaios dos corpos de prova C e D tem uma taxa de deformação de 0,02. Para a gravação dos dados captados pelos microfones são gerados arquivos a cada 60 segundos. Os Gráficos 4.6 e 4.7 mostram as partes finais dos ensaios, C e G respectivamente, onde acontece o maior número de ocorrências de eventos de emissão acústica, ou seja, alguns segundos antes da ruptura total dos corpos de prova, os gráficos com o restantes dos ensaios são mostrados no Apêndice B. Estas análises são realizadas com o uso de um filtro passa alta com limite mínimo de frequências de 6000 Hz. Para o corpo de prova C, Gráfico 4.6, o canal (ch) 3 e 4 são os microfones instrumentados no corpo de prova e o canal 5 é o microfone utilizado para captar os ruídos do ambiente, já para o corpo de prova G, Gráfico 4.7, os canais 1, 2, 3 e 4 são os microfones instrumentados no corpo de prova e o canal 5 continua sendo o microfone utilizado para captar os ruídos do ambiente

Gráfico 4. 6 - Gráficos amplitude *versus* tempo: microfones 3 e 4 instrumentados no corpo de prova, microfone 5 utilizado para captar os ruídos do ambiente

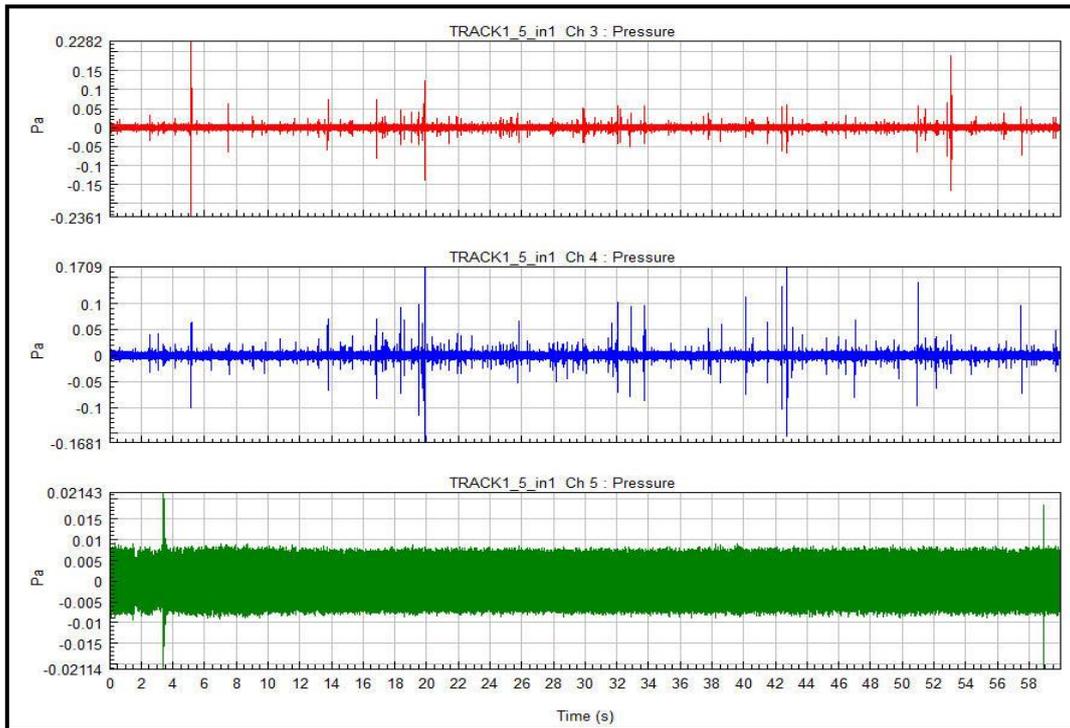


Gráfico 4. 7 - Gráficos amplitude *versus* tempo: microfones 1, 2, 3e 4 instrumentados no corpo de prova, microfone 5 utilizado para captar os ruídos do ambiente

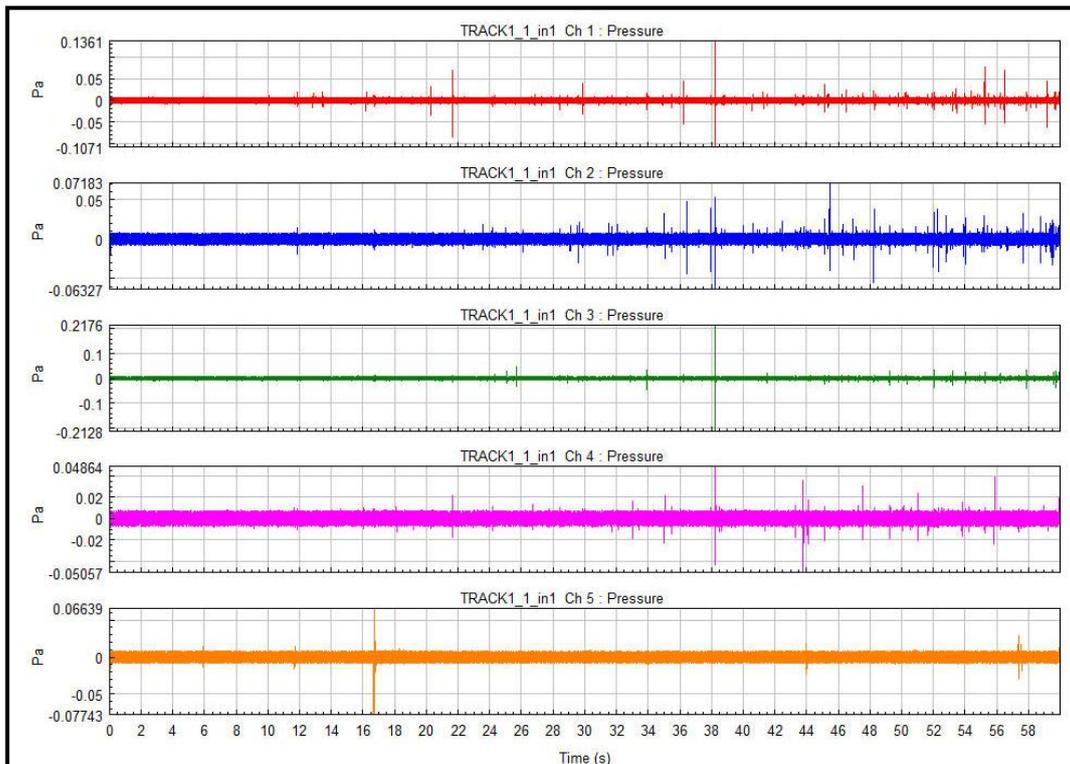
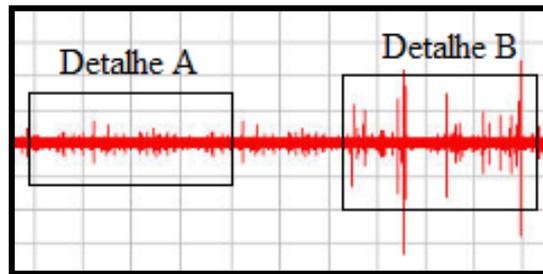


Figura 4. 4 - Histórico da aceleração de um dos pontos de controle



A Figura 4.4 mostra as amplitudes no domínio do tempo gravado por um ponto de controle. Essas amplitudes são provenientes do avanço de trincas geradas no interior do modelo durante o ensaio numérico realizado. O Detalhe A da Figura 4.4 apresenta uma maior quantidade de eventos de pequena amplitude que podem ser relacionados com a formação de microtrincas no interior do modelo. No Detalhe B ocorreu a coalescência das microtrincas desenvolvidas no estágio inicial. No estágio final do processo de fratura, as amplitudes dos eventos são maiores e o número de ocorrências é menor quando comparado com o estágio inicial do processo.

A partir dos Gráficos 4.6 e 4.7, é escolhido o canal que apresenta maior número de picos (eventos acústicos) e, posteriormente é realizada a contagem desses picos, obtendo assim o Gráfico 4.8 onde é apresentado os números acumulados de picos ( $N$ ) *versus* o tempo normalizado, para os ensaios com os corpos de prova C e G.

O Gráfico 4.9 mostra a amplitude dos picos ( $A$ ) *versus* o tempo normalizado ( $t/t_{máx}$ ) durante os ensaios de emissão acústica.

Gráfico 4. 8 - Números de eventos acústicos obtidos durante os ensaios com os corpos de prova C e G

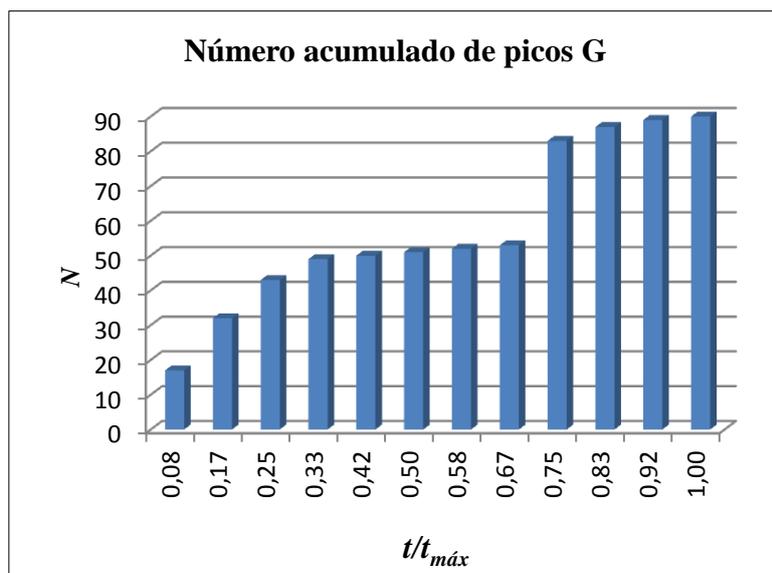
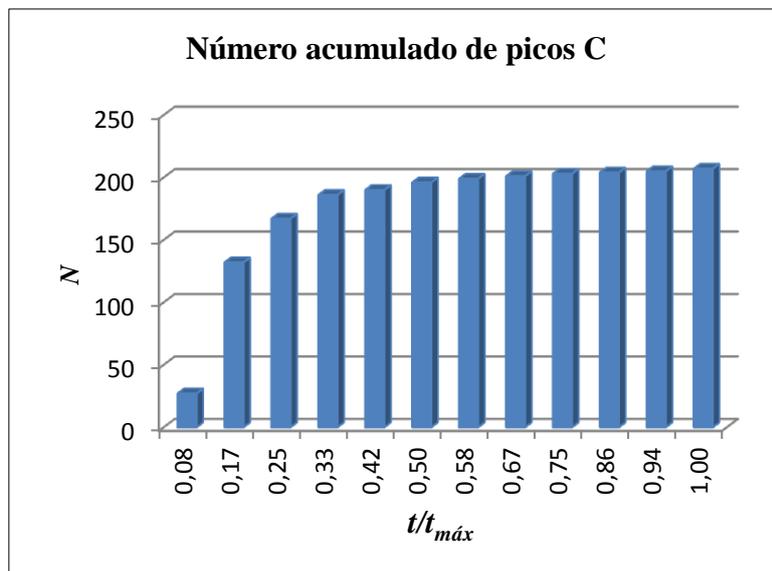
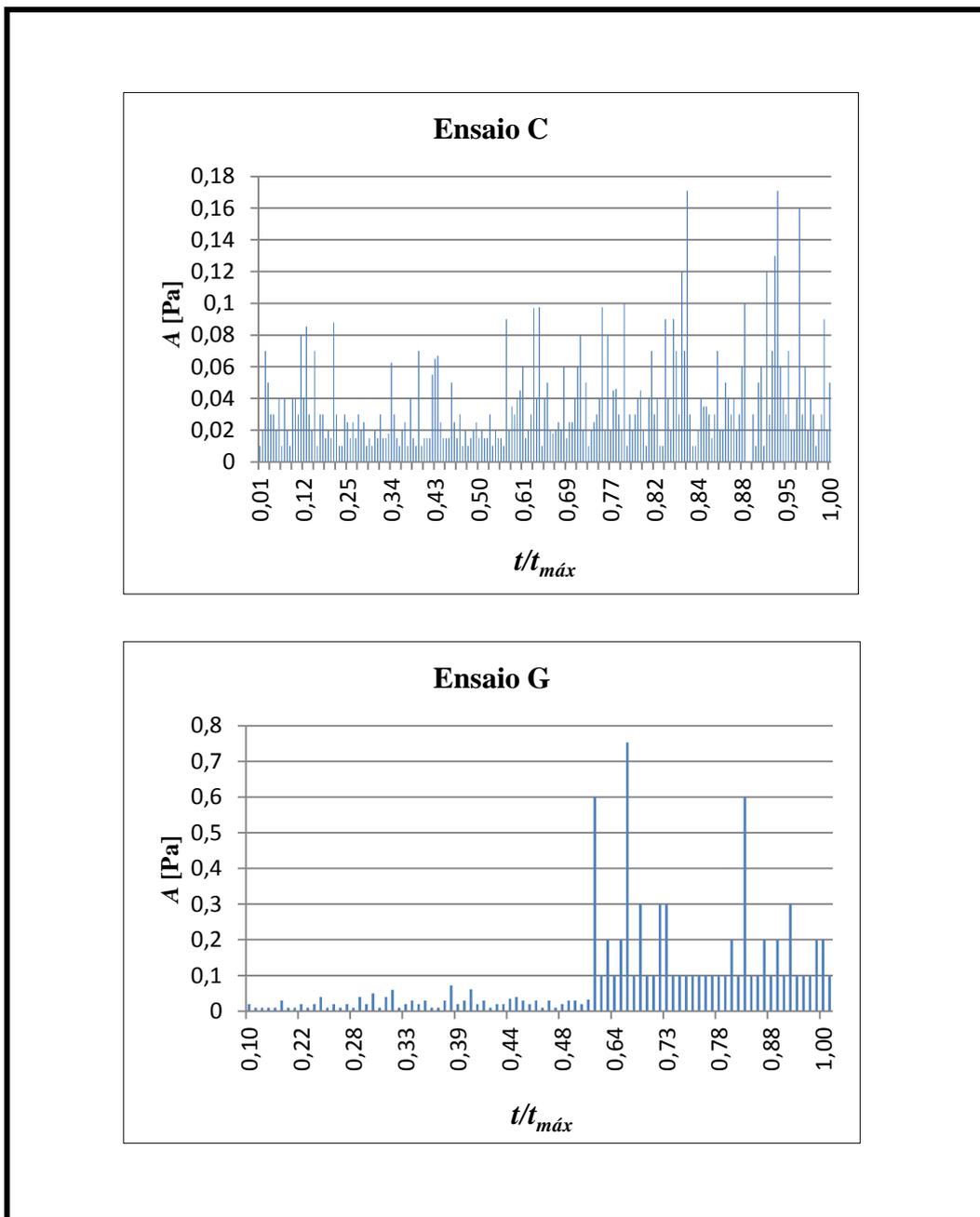


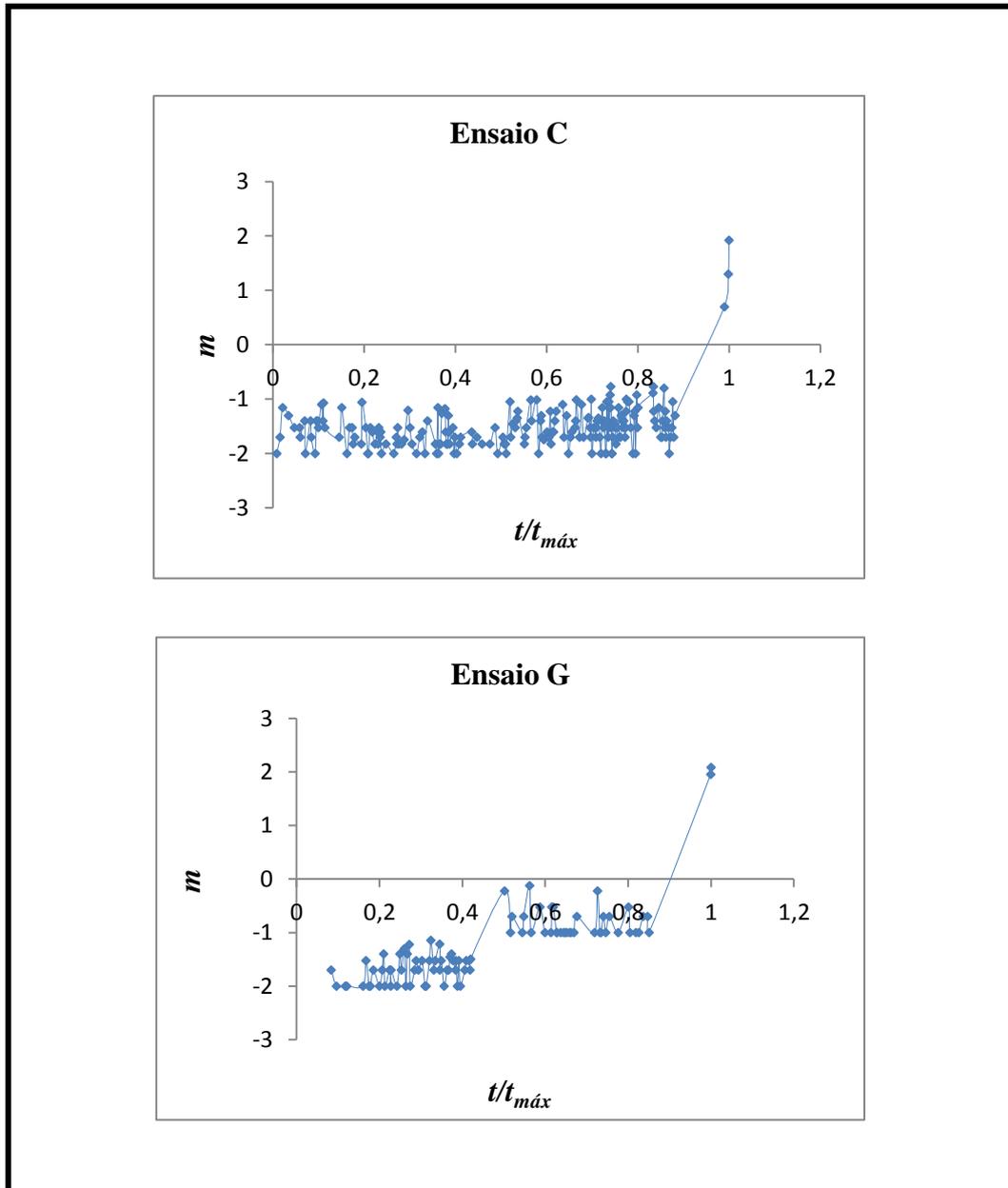
Gráfico 4. 9 - Amplitude dos eventos de emissão acústica durante os ensaios com os corpos de prova C e G



Analisando o Gráfico 4.8 pode-se verificar que o ensaio com o corpo de prova C apresenta um maior número de picos. Porém ao avaliar o Gráfico 4.9 é possível notar que o ensaio realizado com o corpo de prova G apresenta valores de amplitude para seus eventos acústicos mais elevados dos que os obtidos para o ensaio com o corpo de prova C. Esse fato caracteriza o efeito de escala estrutural, pois o corpo de prova menor (C) é mais dúctil, apresentando picos de menor amplitude, já o corpo de prova G que possui dimensões maiores é mais frágil, sendo assim os picos gerados nesse ensaio apresentaram amplitudes maiores.

O Gráfico 4.10 mostra o comportamento das magnitudes  $m$  dos eventos nos eixos dos tempos normalizados.

Gráfico 4. 10 - Mapeamento das microtrincas e macrotrincas no domínio do tempo



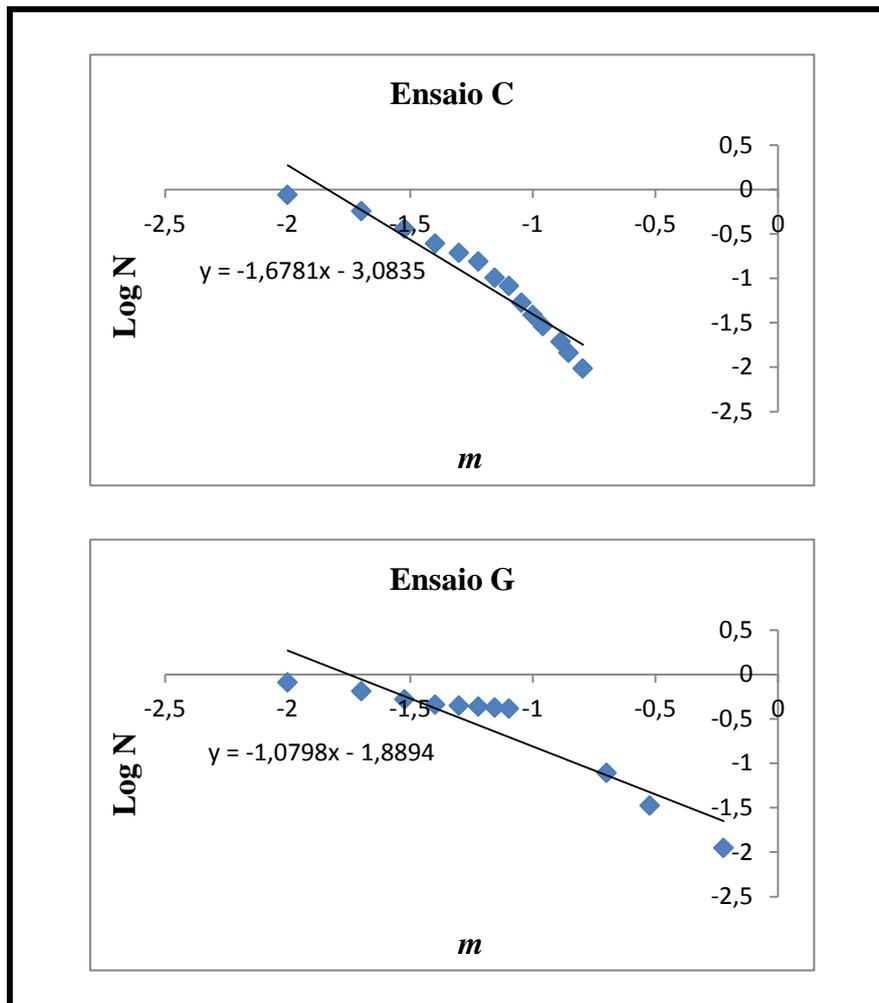
Analisando o Gráfico 4.10 pode-se verificar para o ensaio com o corpo de prova C, que no início do processo de fratura até o  $t/t_{máx} = 0,6$  existe uma menor concentração dos eventos num determinado intervalo de magnitude,  $m$  de -2 a -1. Estes eventos podem ser relacionados ao surgimento de microtrincas. Com o avanço do processo de fratura, há uma maior concentração surgindo eventos de maior magnitude. No final do

ensaio surge um evento com escala próximo de 2. Esse evento, caracterizado em escala próxima a 2, pode ser relacionado com a formação de trincas de comportamento instável.

Já para o ensaio com o corpo de prova G pode-se verificar que no início do processo de fratura até o  $t/t_{m\acute{a}x} = 0,4$  existe uma maior concentração dos eventos num determinado intervalo de magnitude,  $m$  de -2 a -1. Estes eventos podem ser relacionados ao surgimento de microtrincas. Com o avanço do processo de fratura, há uma menor concentração surgindo eventos de maior magnitude,  $m$  de -1 a -0,1. No final do ensaio também surge um evento com escala próximo de 2. Esse evento, caracterizado em escala próxima a 2, pode ser relacionado com a formação de trincas de comportamento instável.

O Gráfico 4.11 apresenta o *valor b* que é proveniente dos corpos de prova ensaiados.

Gráfico 4. 11 - Valor b referente aos modelos ensaiados



Como pode ser observado no Gráfico 4.11 o *valor b* obtido no ensaio com o corpo de prova C possui um valor de 1,6781 e no ensaio com o corpo de prova G o valor é de 1,0798. Esses valores seguem a descrição do *valor b* definida por Rao e Prasanna Lakshmi (2005), na qual eles afirmam que o alto valor de *b* corresponde a um evento de pequena amplitude, os quais representam a formação e o crescimento de forma lenta de uma nova trinca, e um baixo *valor b* indicam crescimento rápido e instável de trincas acompanhadas de altas amplitudes de emissão acústica. Sendo assim, esse fato apresenta um possível efeito de escala estrutural entre os corpos de prova C e G.

#### 4.3.2 Simulação numérica

Como descrito no item 3.2.2 nas simulações numéricas de emissão acústica são definidos seis pontos de controle com o propósito de captar as acelerações provenientes das ondas geradas no interior do corpo.

A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros utilizados nas simulações de emissão acústica.

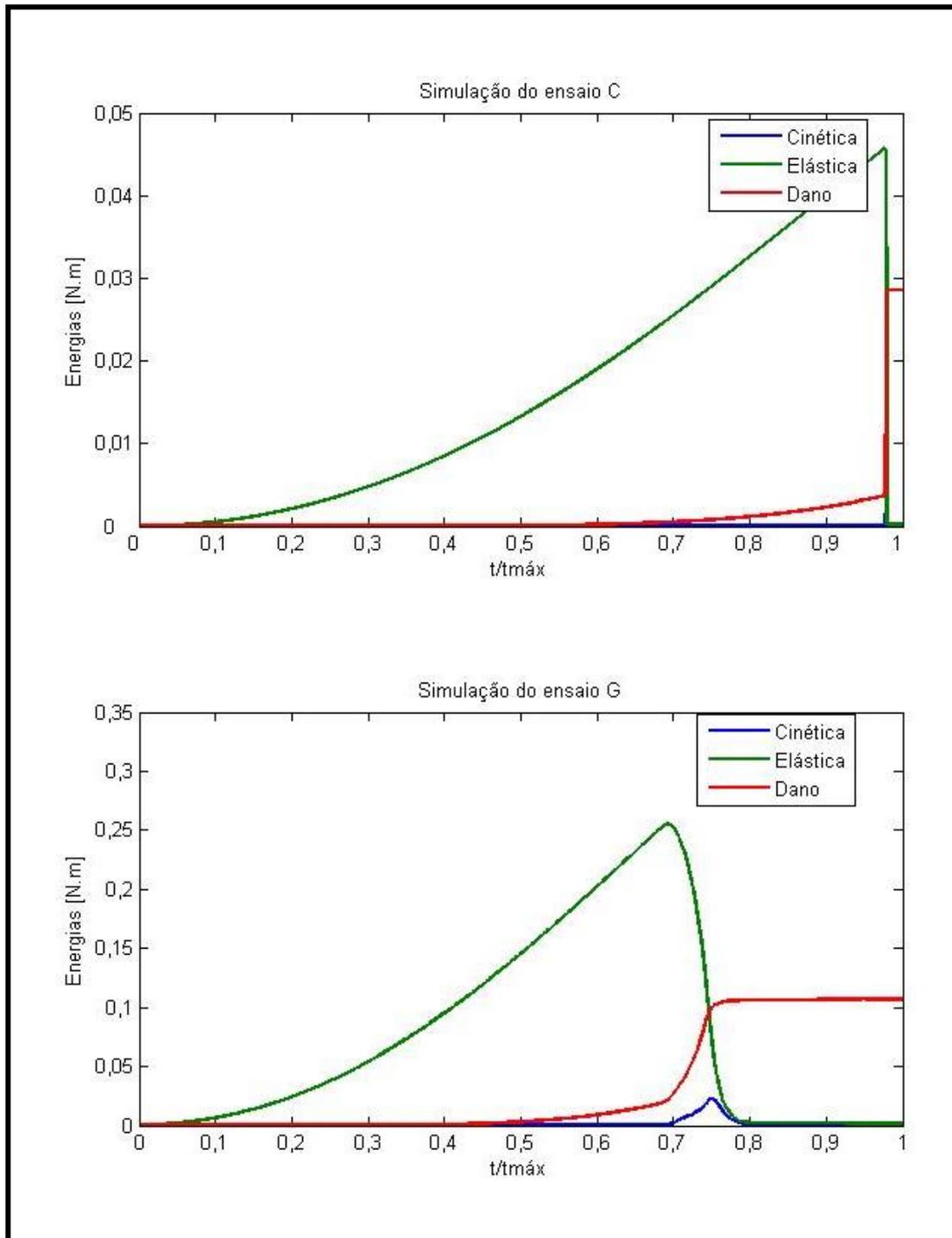
Tabela 4. 5 - Propriedades dos corpos de prova simulados

<b>Parâmetros</b>	
<b>Amortecimento</b>	160
<b><math>E</math> [Mpa]</b>	3,75
<b><math>\rho</math> [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	8,50
<b><math>G_f</math> [N/m]</b>	26,80
<b><math>R_f</math> [m<sup>-1/2</sup>]</b>	11,10
<b>CVG<sub>f</sub> [%]</b>	50,00
<b><math>L_{co}</math> [m]</b>	0,0015
<b><math>\epsilon_p</math></b>	0,03
<b><math>K_r</math></b>	3,58

Durante as simulações as condições de carregamento devem ser quase estáticas, para poder representar de forma correta as reais deformações sofridas pela estrutura,

essas condições de carregamento podem ser verificadas durante o processo da aplicação do deslocamento prescrito, onde as energias cinéticas se mantiveram em patamares muito inferiores aos das outras energias envolvidas (dano e elástica), Gráfico 4.12.

Gráfico 4. 12 - Energias envolvidas durante as simulações



Os Gráficos 4.13 e 4.14 mostram as amplitudes ( $A$ ) dos eventos de emissão acústica durante as simulações com os corpos de prova do tipo C e G, respectivamente.

Gráfico 4. 13 - Amplitude *versus* tempo da simulação de emissão acústica com o corpo de prova tipo C

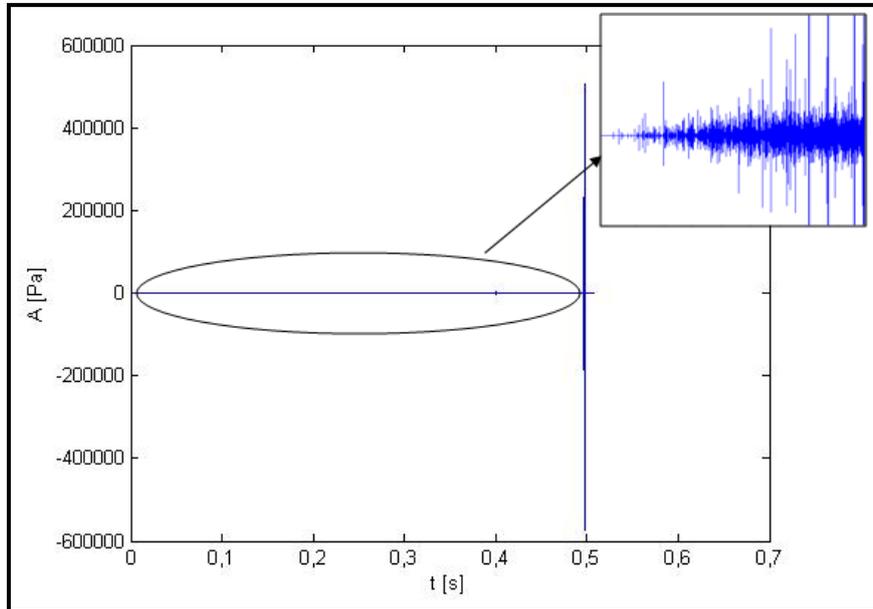
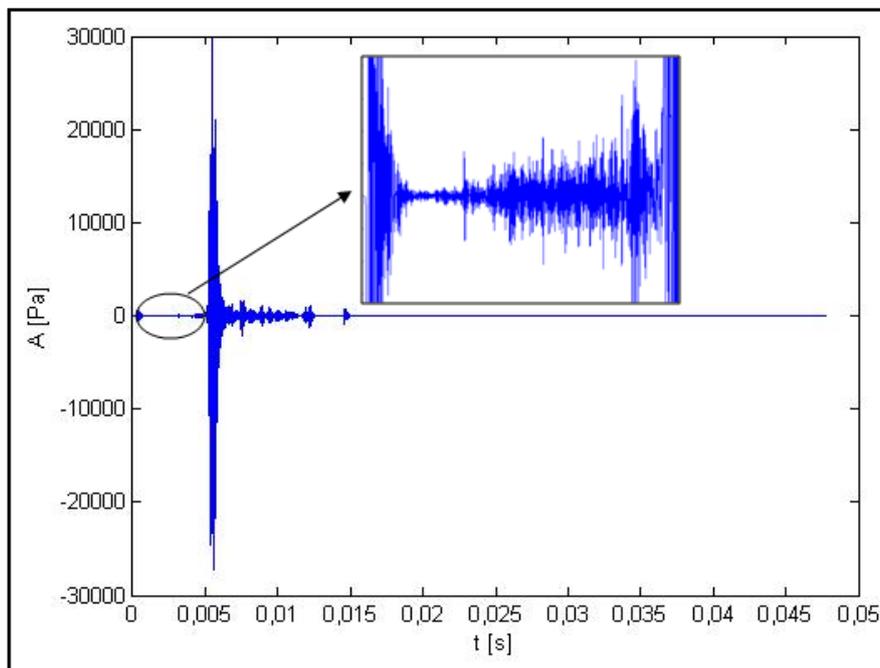


Gráfico 4. 14 - Amplitude *versus* tempo da simulação de emissão acústica com o corpo de prova tipo G



A partir dos Gráficos 4.13 e 4.14 é realizada a contagem dos eventos de emissão acústica, obtendo assim o Gráfico 4.15 onde são apresentados os números acumulados

de picos (NA) *versus* tempo normalizado. O Gráfico 4.16 mostra a amplitude dos picos (A) durante os ensaios de emissão acústica.

Gráfico 4. 15 - Números de eventos acústicos obtidos durante as simulações com os corpos de prova C e G

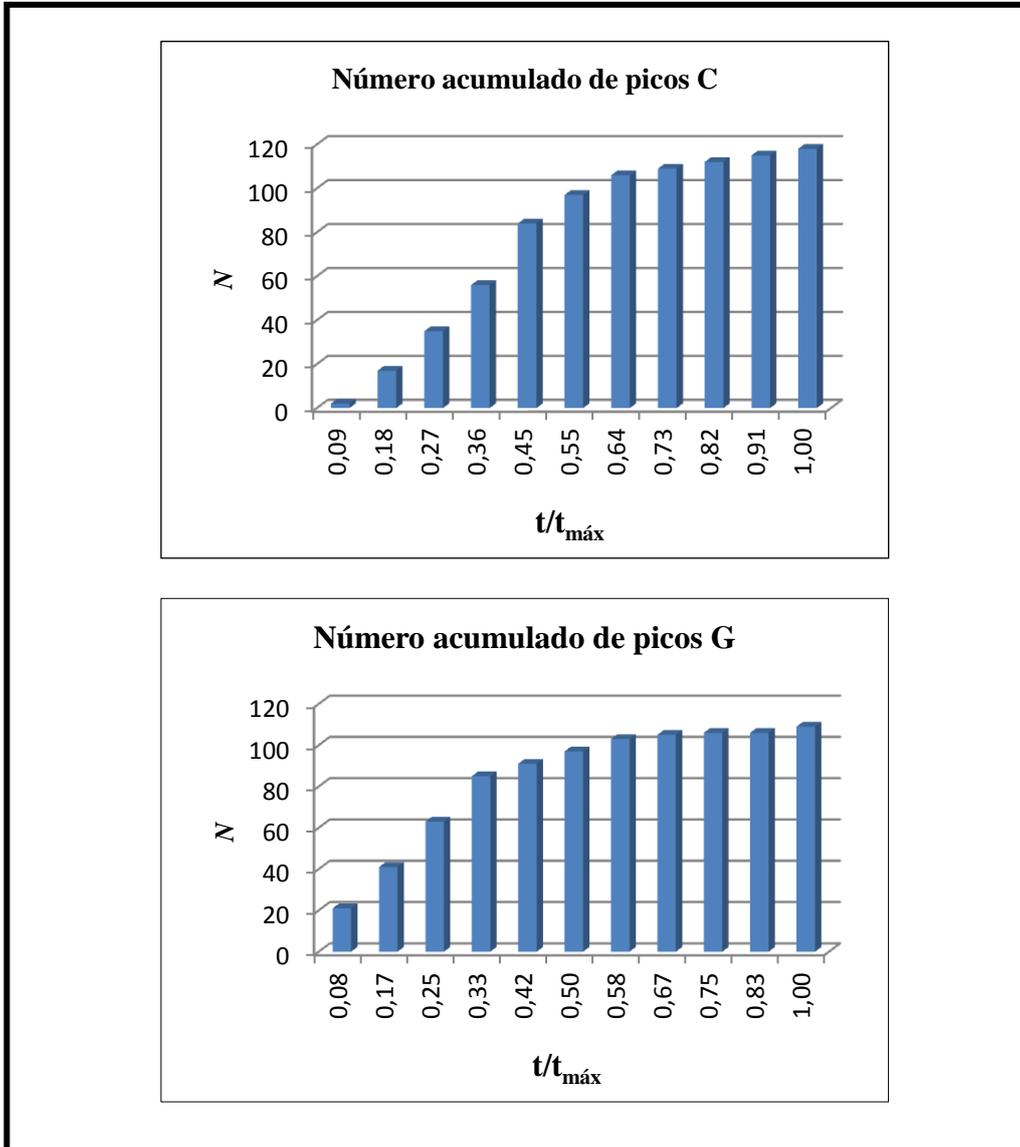
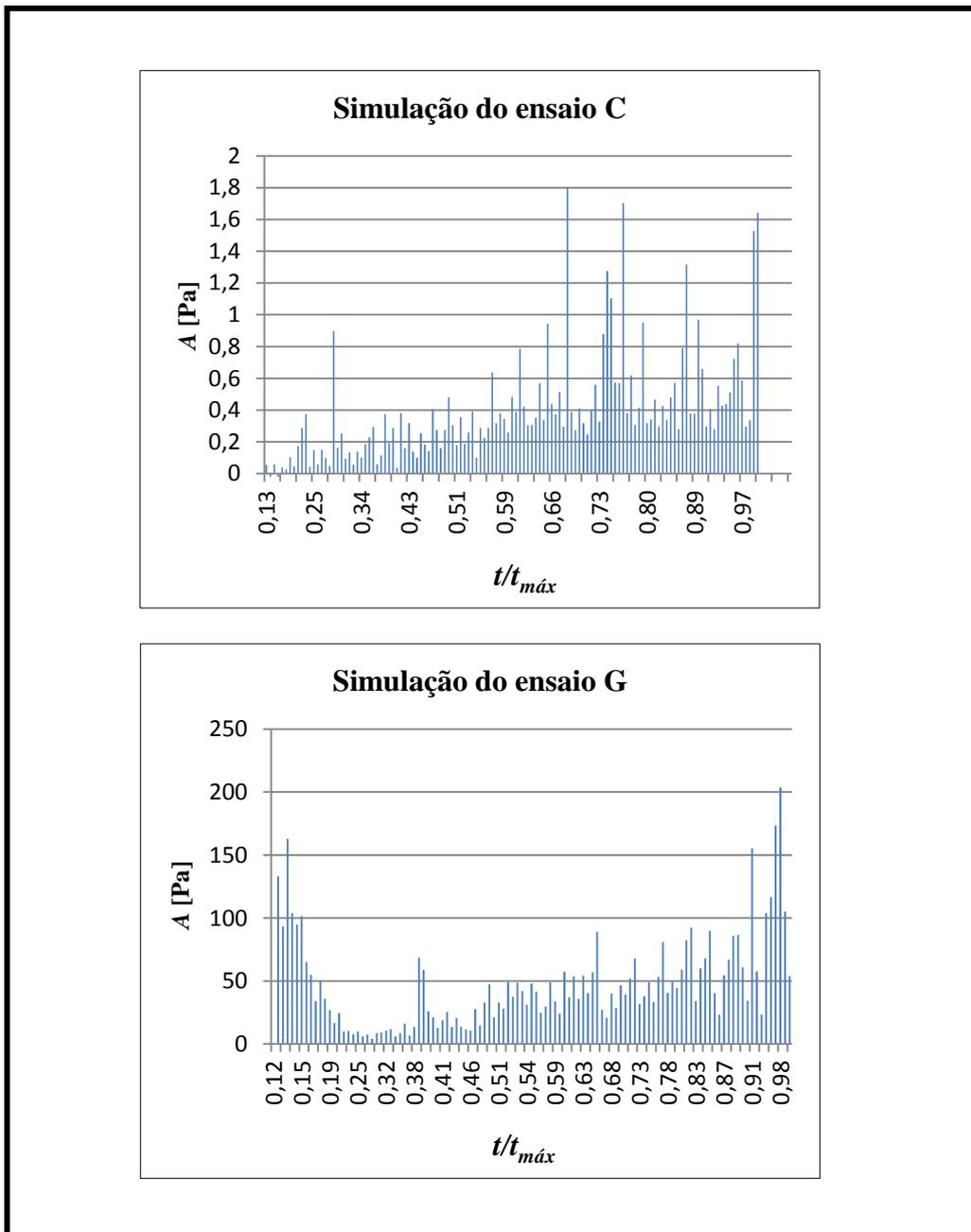


Gráfico 4. 16 - Amplitudes dos eventos de emissão acústica durante as simulações dos corpos de prova C e G



Analisando o Gráfico 4.15 pode-se verificar que ambas as simulações, com o corpo de prova C e G, apresentam aproximadamente o mesmo número de picos. Porém ao avaliar o Gráficos 4.16 é possível notar que a simulação realizada com o corpo de prova G apresenta valores de amplitude para seus eventos acústicos bem mais elevados dos que os obtidos para a simulação com o corpo de prova C, fato que também ocorreu com os ensaios experimentais, porém em proporções bem menores. A diferença entre as

amplitudes máximas obtidas nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas para o corpo de prova do tipo C é de 4 vezes já para o tipo G é de 111 vezes. Essa diferença entre os valores experimentais e numéricos pode ter ocorrido devido ao valor escolhido para o coeficiente de amortecimento. Tanto para a simulação com o corpo de prova C quanto para o G é utilizado um mesmo valor para o coeficiente de amortecimento, porém como mostra a Equação 4.2 o coeficiente de amortecimento está relacionado com a massa do corpo de prova, sendo assim esses valores deveriam ser diferentes, pois o corpo de prova C possui uma massa menor que o corpo de prova G.

$$C = MD_f \quad (4.2)$$

Sendo  $D_f$  uma constante vinculada ao coeficiente de amortecimento crítico, como mostra a Equação 4.3:

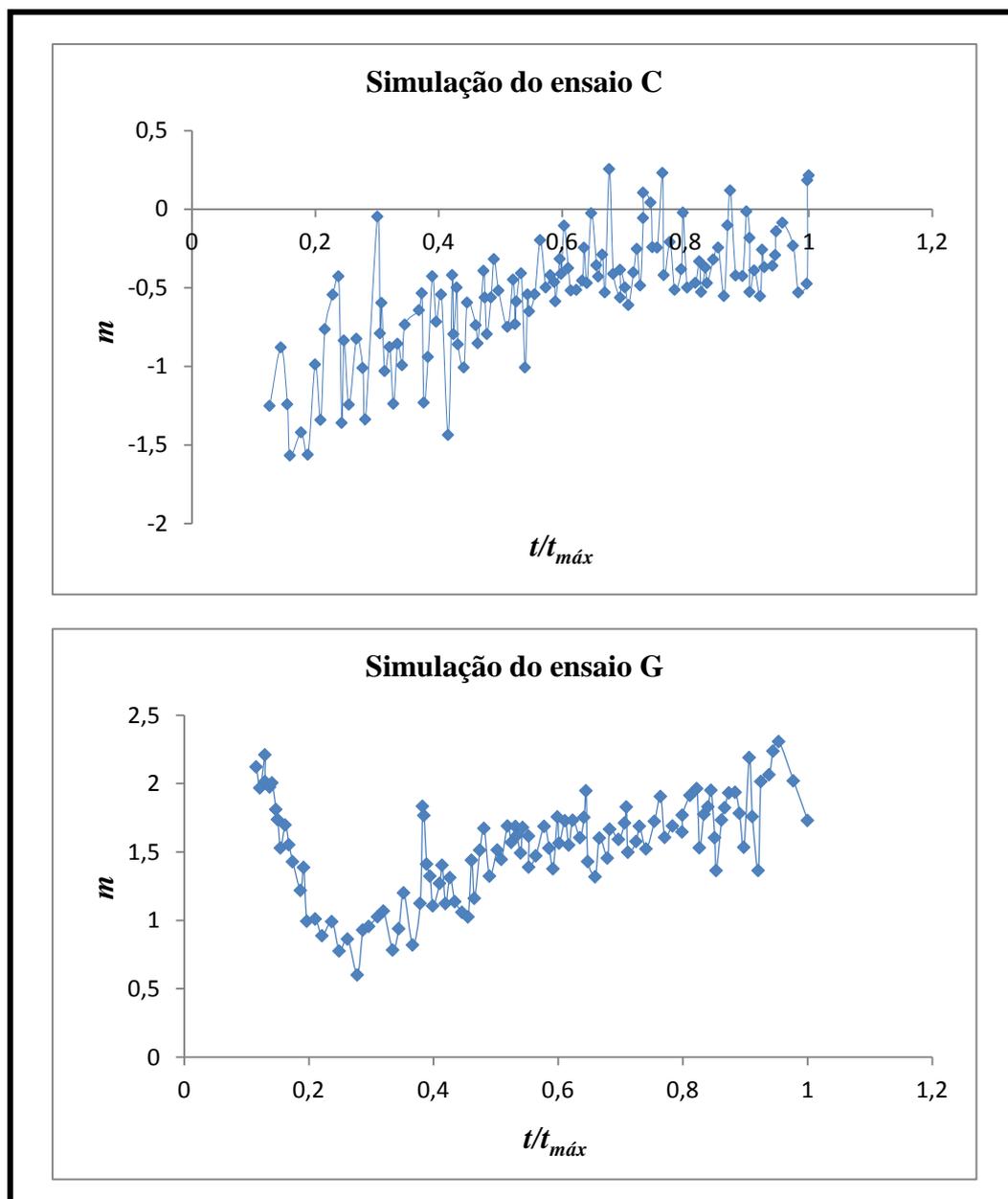
$$D_f = \xi_n 2\pi f_n \quad (4.3)$$

onde  $f_n$  representa a frequência natural de vibração no modo  $n$  expressada em [Hz].

Para definir corretamente o valor do coeficiente de amortecimento utilizado na simulação numérica, deve-se primeiramente ser realizado um ensaio experimental de viga em balanço para obter o valor da frequência natural de amortecimento do material.

O Gráfico 4.17 mostra o comportamento das magnitudes  $m$  dos eventos nos eixos dos tempos normalizado.

Gráfico 4. 17 - Mapeamento das microtrincas e macrotrincas no domínio do tempo



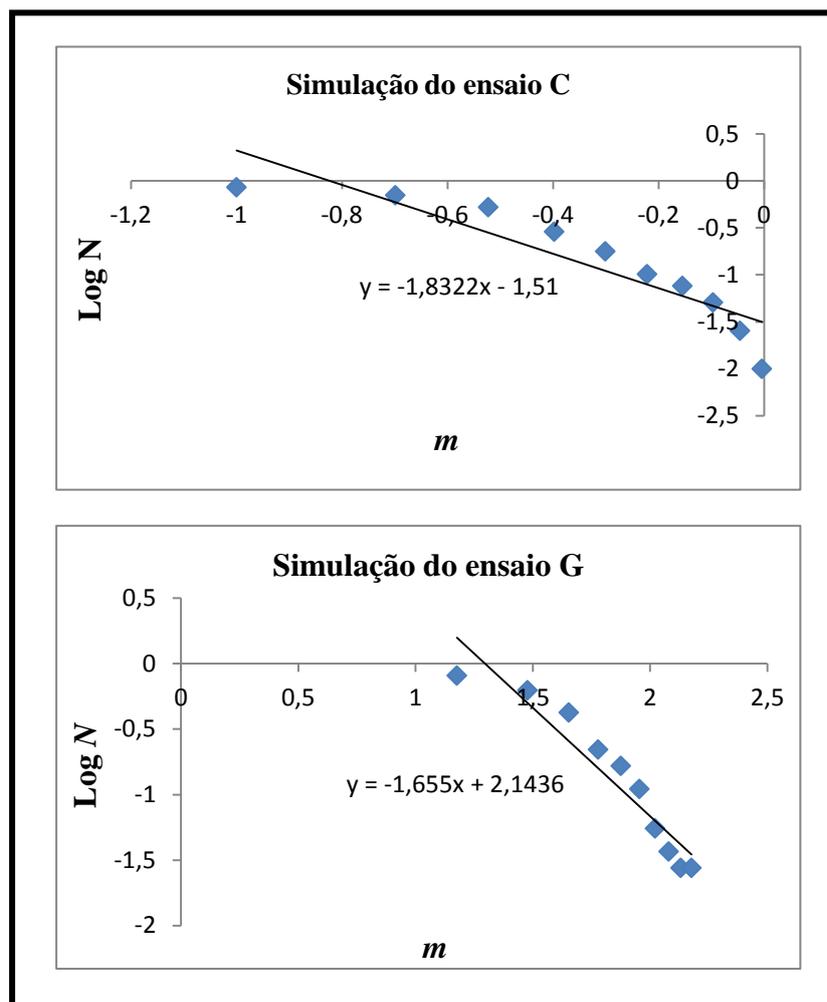
Analisando o Gráfico 4.17 pode-se verificar para a simulação com o corpo de prova C, que no início do processo de fratura até o  $t/t_{m\acute{a}x} = 0,4$  existe uma menor concentração dos eventos num determinado intervalo de magnitude,  $m$  de -1,5 a -0,5. Estes eventos podem ser relacionados ao surgimento de microtrincas. Com o avanço do processo de fratura, há uma maior concentração surgindo eventos de maior magnitude,  $m$  de -0,4 a -0,1. No final do ensaio surgem eventos com escalas próximo de 0,4. Esses

eventos, caracterizados em escala próxima a 0,4, podem ser relacionados com a formação de trincas de comportamento instável.

Já para a simulação com o corpo de prova G pode-se verificar que no início do processo de fratura até o  $t/t_{máx} = 0,2$  existe uma menor concentração dos eventos com magnitudes elevadas,  $m$  de 2,3. Estes eventos podem ser relacionados ao surgimento de macrotrincas no início da simulação. Porém isto não foi observado nas configurações relacionadas com esses tempos da simulação. Com o avanço do processo de fratura, há uma maior concentração surgindo eventos de menor magnitude,  $m$  de 1 a 2. No final do ensaio também surgem eventos com escalas próximo de 2,5. Esses eventos, caracterizados em escala próxima a 2,5 podem ser relacionados com a formação de trincas de comportamento instável.

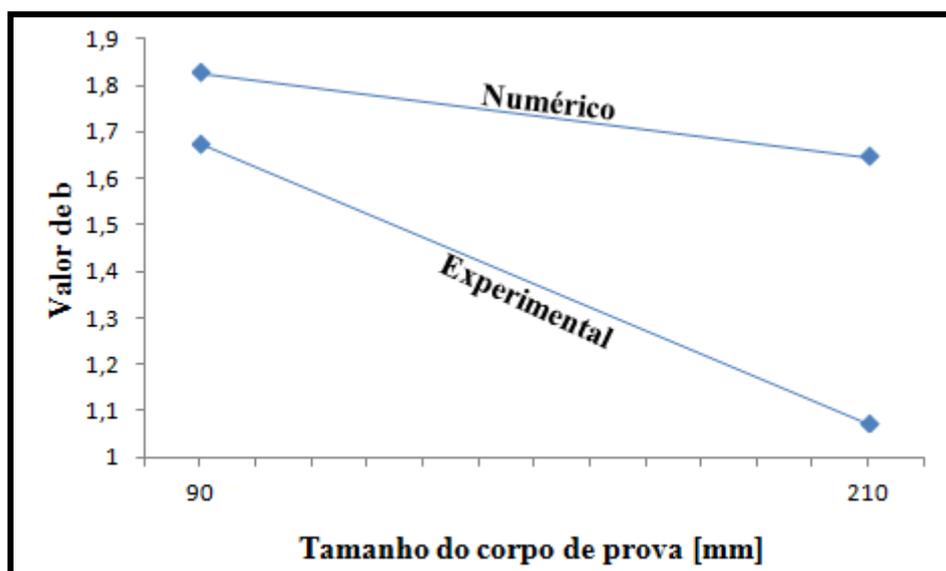
O Gráfico 4.18 apresenta o *valor b* que é proveniente dos corpos de prova simulados.

Gráfico 4. 18 - Valor b referente aos modelos simulados



Como pode ser observado no Gráfico 4.18 o *valor b* obtido na simulação com o corpo de prova C possui um valor de 1,8322 e na simulação com o corpo de prova G o valor é de 1,655. Pode-se notar que para o corpo de prova G o *valor b* encontra-se no quarto quadrante, isso ocorre devido as elevadas amplitudes obtidas durante as simulações, como já foi explicado esse fato pode ter ocorrido devido ao valor de amortecimento escolhido, apesar disso é possível notar que a forma da curva obtida para a simulação de G é semelhantes a obtida para a simulação com o corpo de prova C.

Gráfico 4. 19 - Comparação entre o valor b e o tamanho dos corpos de prova C e G



Analisando o Gráfico 4.19 é possível notar que os resultados obtidos nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas seguem a descrição do *valor b* definida por Rao e Prasanna Lakshmi (2005), na qual eles afirmam que o alto *valor b* representam a formação e o crescimento de forma lenta de uma nova trinca, e um baixo *valor b* indicam crescimento rápido e instável de trincas. Sendo assim, esse fato apresenta um possível efeito de escala estrutural entre os corpos de prova C e G. Além disso esses resultados estão de acordo com os obtidos por Carpinteri (2008) quando este realizou ensaios em concreto, a partir dos quais ele afirma que o *valor b* varia de 2,5 no estágio inicial até 1,5 no estágio final, sendo que em alguns casos no estágio final do processo (onde ocorrem macrotrincas) o *valor b* pode ficar próximo de 1.

## 5. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi realizado um estudo experimental e numérico do efeito de escala em materiais quase frágeis. O material dos corpos de prova foi escolhido devido ao seu comportamento frágil, ter baixo custo de aquisição e apresentar baixa rigidez se comparado com materiais convencionais, como aço e concreto. A partir dos ensaios experimentais e das simulações numéricas foi possível obter as seguintes conclusões:

### ➤ *Ensaaios experimentais:*

- Através dos ensaios experimentais é possível definir os parâmetros que definem o comportamento do material. Um dos parâmetros obtidos é o módulo de elasticidade do material, sendo que o conhecimento desse valor é de extrema importância para a aquisição da curva tensão *versus* deformação durante a simulação numérica, fato que torna possível realizar a comparação entre os resultados experimentais e numéricos.

- Através dos ensaios experimentais de tração foi possível observar o efeito de escala estrutural no material testado, pois a medida que o corpo de prova apresentava dimensões maiores a sua deformação de ruptura diminuía. Essa redução no valor da deformação de ruptura foi bem pequeno, porém é possível que caso a diferença entre os tamanhos dos corpos fosse maior, essa variação da tensão de ruptura também seria.

- Os ensaios experimentais de emissão acústica também mostraram que o material sofre o efeito de escala estrutural, pois o menor corpo de prova apresentou eventos acústicos com menores amplitudes, o que caracteriza um material mais dúctil, já o corpo de prova maior apresentou eventos acústicos com amplitudes mais elevadas, caracterizando um material mais frágil.

### ➤ *Simulações numéricas:*

- A simulação numérica no DEM dos ensaios de tração apresentou resultados satisfatórios para as curvas tensão *versus* deformação, porém nessas simulações não foi possível observar o efeito de escala estrutural, pois a deformação de ruptura permaneceu constante a medida que o tamanho do corpo de prova aumentava. Esse fato pode ter

ocorrido pela obtenção do valor de  $G_f$  a partir da bibliografia e não pela realização de um ensaio com o material estudado. O valor de  $R_f$  também foi definido segundo a bibliografia, deve-se fazer análises paramétricas para encontrar o valor adequado para ser utilizado nas simulações desse material.

- A simulação numérica no DEM dos ensaios de emissão acústica não apresentaram resultados satisfatórios, pois os dados obtidos para as amplitudes dos eventos acústicos possuem valores muito elevados em comparação aos ensaios experimentais de emissão acústica. Esse fato pode ter ocorrido devido as simulações numéricas serem realizadas com o mesmo valor de amortecimento, tanto para o corpo de prova com menor quanto para o com maior dimensão. Porém após a obtenção desses resultados, foi analisado que o amortecimento depende da massa do corpo de prova simulado, sendo assim os valores de amortecimento para cada tipo de corpo de prova deveriam ser diferentes.

A seguir são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros:

- ❖ Realizar ensaios utilizando poliestireno expandido com diferentes densidades, para analisar como é o comportamento do efeito de escala estrutural com a variação da densidade e microestrutura do material.

- ❖ Realizar os ensaios experimentais de tração com uma maior diferença entre os tamanhos dos corpos de prova, para ver se o efeito de escala é perceptível.

- ❖ Fazer um ensaio para a obtenção da  $G_f$  do poliestireno expandido utilizado nos ensaios de tração, o que possibilitaria a definição de um valor correto na simulação numérica para, conseqüentemente, obter resultados mais satisfatórios. O valor de  $G_f$  pode ser obtido realizando um ensaio com uma viga de poliestireno expandido com uma pré-trinca sendo carregado até que está trinca se propague de forma instável. Analisar a variação espacial das propriedades do material, especificamente o  $G_f$ . Pode-se fazer, por exemplo, um ensaio utilizando um microdurômetro em vários pontos do corpo de prova.

❖ Fazer um ensaio com um corpo de prova de poliestireno expandido utilizado nos ensaios de emissão acústica para obter o valor da frequência natural de amortecimento do material, e conseqüentemente utilizar esse valor nas simulações numéricas.

## REFERÊNCIAS

ABSI, E. Théorie des equivalences-determination de quelques éléments types. **Proceedings of L'institut Technique Du Balument el des Travau Publics**, No 281, p. 83-86, 1971.

BARENBLATT, I. Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. **Adv Appl Mech** 7, p. 55-129, 1962.

BATHE, J. **Finite element procedures**, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1996.

BAŽANT, P. Instability, ductility, and size effect in strain-softening concrete. **J Eng Mech Div** 102, p. 501-502, 1976.

\_\_\_\_\_. Size effect in blunt fracture: Concrete, rock, metal. **J Eng Mech**, p. 518-535, 1984.

\_\_\_\_\_. Fracture Mechanics of Concrete Structures. Proc First Intern Conf (FraMCoS-I). **Elsevier**, London, june 1992. Não paginado.

BAŽANT, P.; ASCE, F. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal. **Mater Struct**, v. 16, p. 518-535, 1984.

BAŽANT, P.; CHEN, P. Scaling of structural failure. **Appl. Mech**, rev. 50, p. 593-627, 1997.

CARPINTERI A. **Mechanical Damage And Crack Growth In Concrete**. Martinus Nijhoff Publishers, 1986.

CARPINTERI, A.; CHIAIA, B. Power scaling laws and dimensional transitions in solid mechanics. **Chaos, Solitons & Fractals**, v. 7, p. 1343-1364, 1996.

CARPINTERI, A.; CHIAIA, B.; FERRO, G. Size effects on nominal tensile strength of concrete structures: multifractality of material ligaments and dimensional transition from order to disorder. **Mater Struct**, v. 28, p. 311-317, 1995.

CARPINTERI, A.; FERRO, G.; INVERNIZZI, S. The nominal tensile strength of disordered materials: a statistical fracture mechanics approach. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 58, p. 421-435, 1997.

CARPINTERI A., LACIDOGNA G., NICCOLINI G. **Fractal analysis of damage detected in concrete structural elements under loading**. *Chaos, Solutions and Fractals*, 42: 2047–2056, 2009.

CARPINTERI A.; LACIDOGNA, G; PUZZI, S. **From criticality to final collapse: Evolution of the “b-value” from 1.5 to 1.0**, *Chaos, Solutions & Fractals*. Volume 41, Issue 2, Pages 843–853, 2008.

CUNDALL, A.; STRACK L. A distinct element model for granular assemblies. **Geotechnique**, v. 29:47, p. 65, 1979.

DALGUER, A.; IRIKURA, K.; RIERA, D.; CHIU, C. The importance of the dynamic source effects on strong ground motion during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: Brief interpretation of the damage distribution on buildings. **Bull. Seismol. Soc. Am.**, v. 91, p. 1112-1127, 2001.

DUGDALE, S. Yielding of steel sheets containing slits. **J Mech Phys Solids**, p. 100-108, 1960.

FREUDENTHAL, A.M. Statistical approach to brittle fracture. **In Fracture (ed.) H Liebowitz** (New York: Academic Press), p. 591-619, 1968.

GRIFFITH, A. Phenomena of rupture and now in solids, **Phil. Trans. R. Soc. Lond**, p. 179-180, 1921.

GROSSE, C. U.; OHTSU, M. **Acoustic Emission Testing**. Springer, 2008.

HILLERBORG, A. A Model for Fracture Analysis. **Cod LUTVDG/TV BM-3005**, p.1-8, 1978.

HILLERBORG, A.; MODEER, M.; PETERSSON, E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. **Cement Concrete Res** 6, p. 773-782, 1976.

HRENNIKOFF A. Solution of problems of elasticity by the framework method. **Journal of Applied Mechanics**, v. 12, p. 169-175, 1941.

KACHANOV, M. Introduction to continuum damage mechanics. **Martin Nyhoff Publishes**, p. 135, 1966.

KANNINEN, M. F.; POPELAR, C. H. **Advanced Fracture Mechanics**. New York: Oxford University Press, 1985.

KAPLAN, F. Crack propagation and the fracture concrete. **ACI J**, p. 11-58, 1961.

KESLER, E.; NAUS, J.; LOTT, L. **Fracture mechanics**: Its applicability to concrete, Proc Int Conf on the Mechanical Behavior of Materials. Kyoto: Soc of Mat Sci, 1972.

KOSTESKI, L. **Aplicação do método dos elementos discretos formado por barras no estudo do colapso de estruturas**. 2012. 6-59 f. Tese (Doutorado em engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

KUPFER, B.; GERSTLE, H. Behavior of concrete under biaxial stresses. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, American Society of Civil Engineers, v. 99, No. 4, p. 853-866, 1973.

MADERS, L.; KOSTESKI, L.; ITURRIOZ, I. Estudo do efeito de escala no método dos elementos discretos formado por barras. **Asociación Argentina de Mecánica Computacional Vol XXXI**, p. 1857-1876, 2012.

MARIOTTE, E. (1686). Traile du mouvernement des eaux, English transl by Desvaguliers. **Hire M**, p. 248-450, 1718.

MIHASHI, H.; OKAMURA, H.; BAŽANT, P. Size effect in concrete structures. Proc Japan Concrete Ins! Int Workshop. Sendai. Japan. Oct 31 - Nov 2. **E&FN Spon**, London-New York, 1994. Não paginado.

MILLER, R.K.; McIntire P. Acoustic emission testing. Nondestructive testing handbook, Vol. 5. **American Society for Nondestructive Testing**. 2. Edition, 1987.

NAYFEH, H.; HEFZY, S. Continuum modeling of three-dimensional truss-like space structures. **AIAA Journal**, v. 16(8), p. 779-787, 1978.

PETERSSON E. Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials. **Div of Building Materials LTH, Lund university**, p. 92, 1981.

PLANAS J.; ELICES M. Cohesive cracks vs nonlocal models: Closing the gap. **Int J Fracture** **63**, p. 173-187, 1993.

POLLOCK, A. A. **Acoustic emission: acoustic emission amplitudes.** **Non-Destruct. Test**, 6: 264–9, 1973;

RAO, M. V. M. S.; LAKSHMI, K. J. P.; **Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture**, vol. 89, n<sup>o</sup>9, pp. 1577-1582 Current Science Association, Bangalore, 2005

RIERA, D. **Local Effects In Impact Problems In Concrete Structures**. In: proceedings, Conf. on Structural Analysis & Design of Nuclear Power Plants, UFRGS, 1984. Porto Alegre, 1984. Não paginado.

RIERA, D.; ROCHA, M. **A note on velocity of crack propagation in tensile fracture**. Revista Brasileira de Ciências Mecânicas. v. XII/3, p. 217-240, 1991.

RIOS, R. D. **Aplicações do Método dos Elementos Discretos em Estruturas de Concreto**. 2002. 151 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, 2002.

ROCHA, M. **Ruptura e Efeitos de Escala em Materiais não Homogêneos**. Tese (Mestrado), CPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

RODRIGUES, R. **Aplicação das técnicas de emissão acústica na localização de dano em estrutura**. 2012. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

WEIBULL, W. Phenomenon of rupture in solids. **Proc Royal Swedish Inst of Eng Res**, p. 153, 1939.

WITTMANN, F.H. Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proc 2nd Int Conf on Fracture Mech of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-2), **ETH, Zurich, Aedificatio Publ**, Freiburg, Germany, p. 515-534, 1995.



## APÊNDICE A - ENSAIOS DE TRAÇÃO

A seguir são mostradas as configurações das trincas obtidas nos ensaios experimentais de tração e nas simulações numéricas no DEM.

➤ Corpo de prova D:

Figura AP-A. 1 - Configuração das trincas resultantes dos ensaios de tração com os corpos de prova tipo D

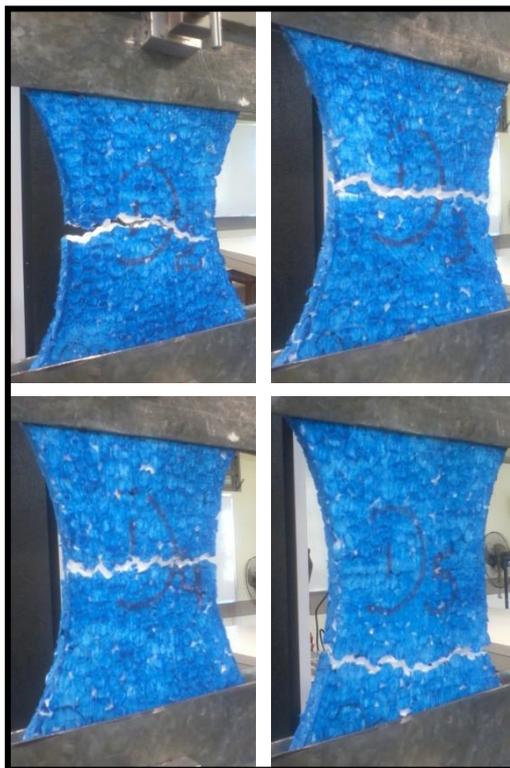
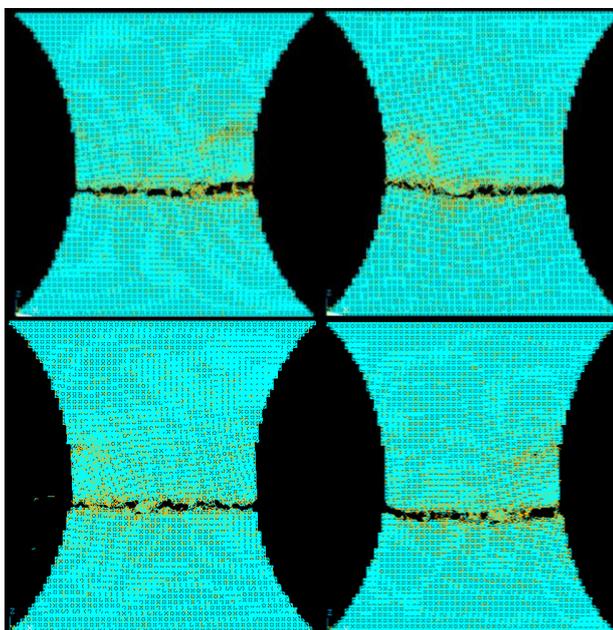


Figura AP-A. 2 - Configuração das trincas resultantes das simulações numéricas com os corpos de prova tipo D

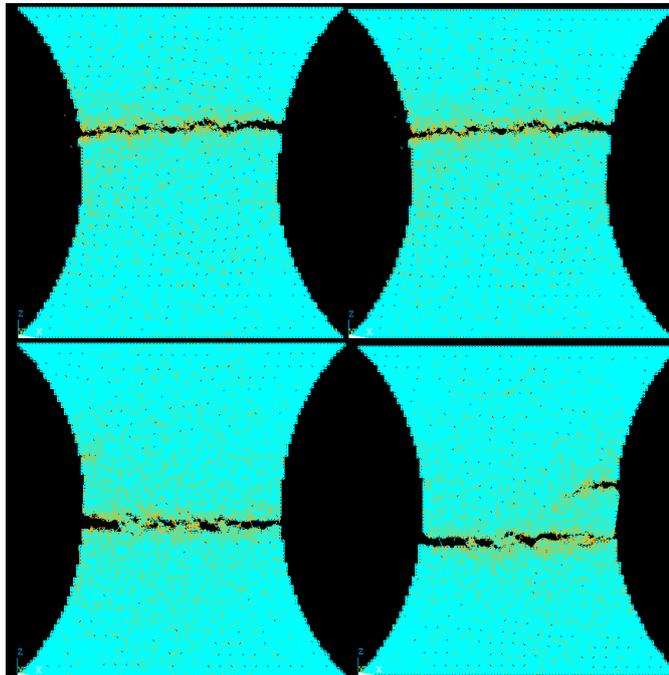


➤ Corpo de prova E

Figura AP-A. 3 - Configuração das trincas resultantes dos ensaios de tração com os corpos de prova tipo E



Figura AP-A. 4 - Configuração das trincas resultantes das simulações numéricas com os corpos de prova tipo E



➤ Corpo de prova F

Figura AP-A. 5 - Configuração das trincas resultantes dos ensaios de tração com os corpos de prova tipo F

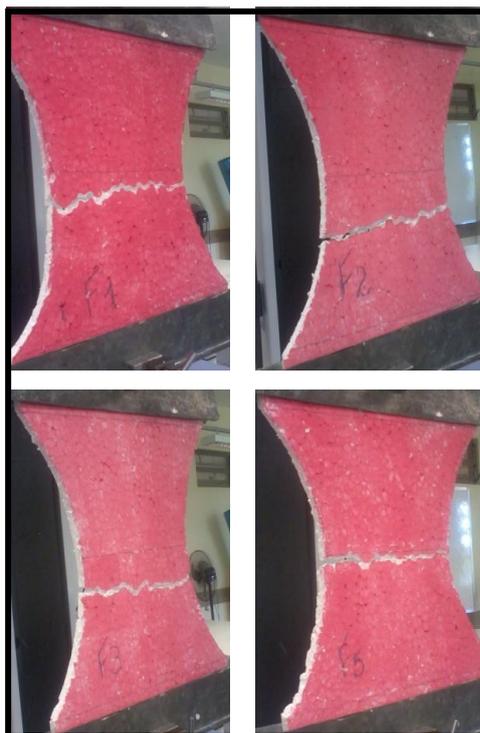
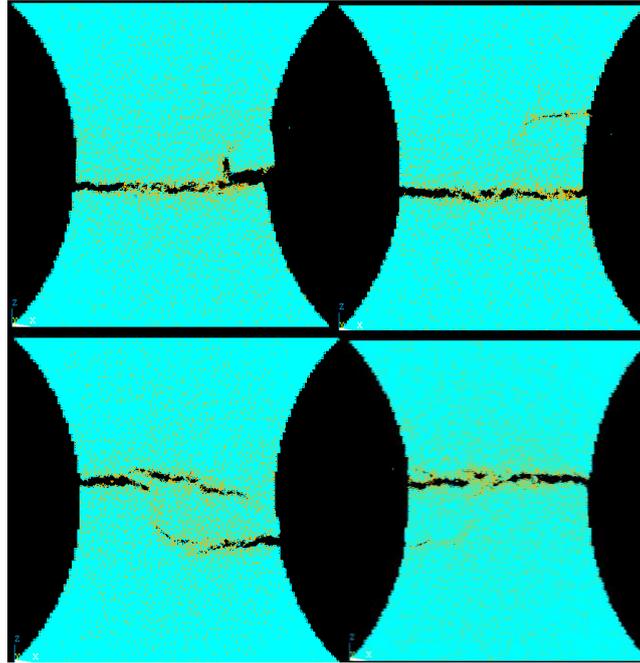


Figura AP-A. 6 - Configuração das trincas resultantes das simulações numéricas com os corpos de prova tipo F



➤ Corpo de prova G

Figura AP-A. 7 - Configuração das trincas resultantes dos ensaios de tração com os corpos de prova tipo G

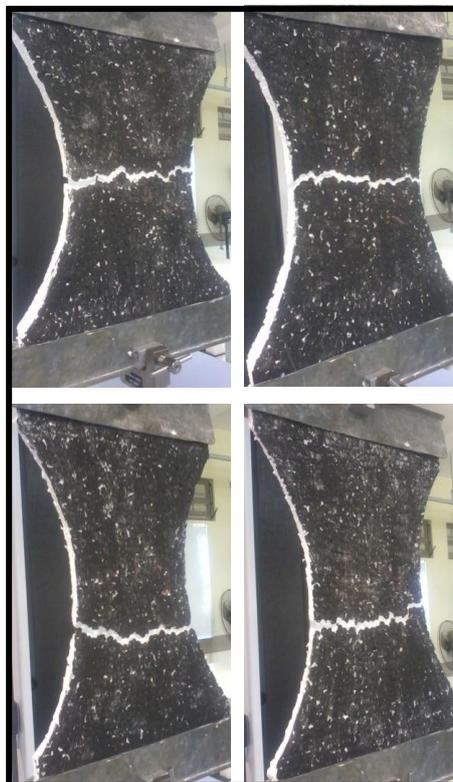
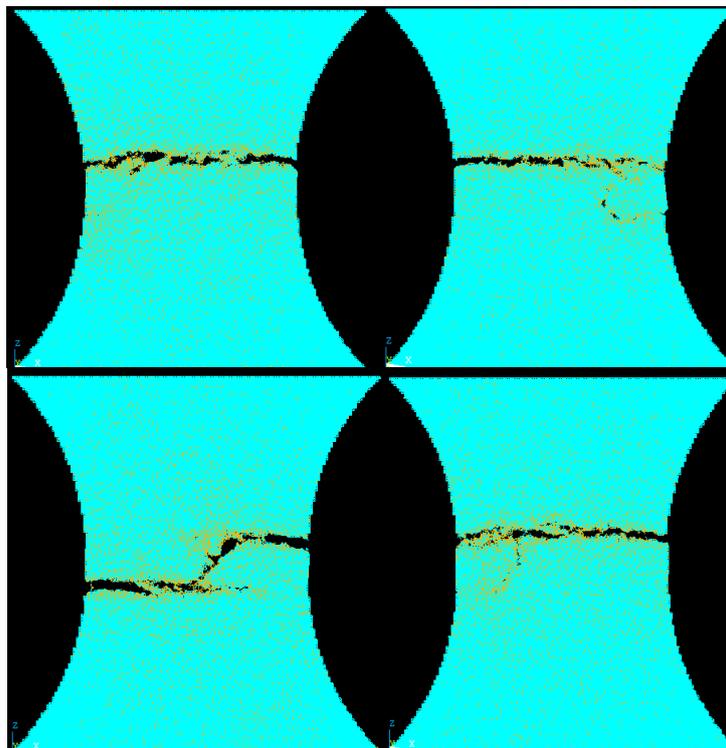


Figura AP-A. 8 - Configuração das trincas resultantes das simulações numéricas com os corpos de prova tipo G



## APÊNDICE B - ENSAIOS DE EMISSÃO ACÚSTICA

A seguir são mostrados todos os arquivos gerados durante os ensaios de emissão acústica com os corpos de prova C e G, esses arquivos são gravados a cada 60 segundos.

### ➤ Corpo de prova C

Gráfico AP-B. 1 - Gráfico amplitude *versus* tempo durante o primeiro minuto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova C

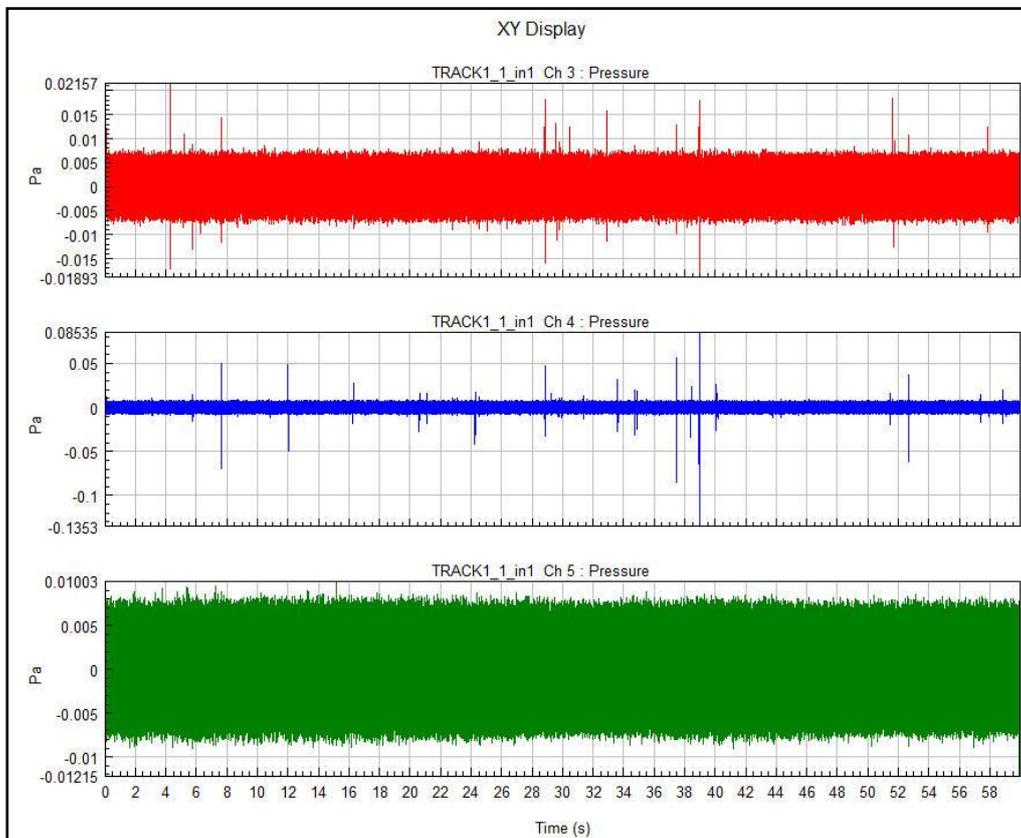


Gráfico AP-B. 2 - Gráfico amplitude *versus* tempo durante o segundo minuto do ensaio de emissão acústica do corno de prova C

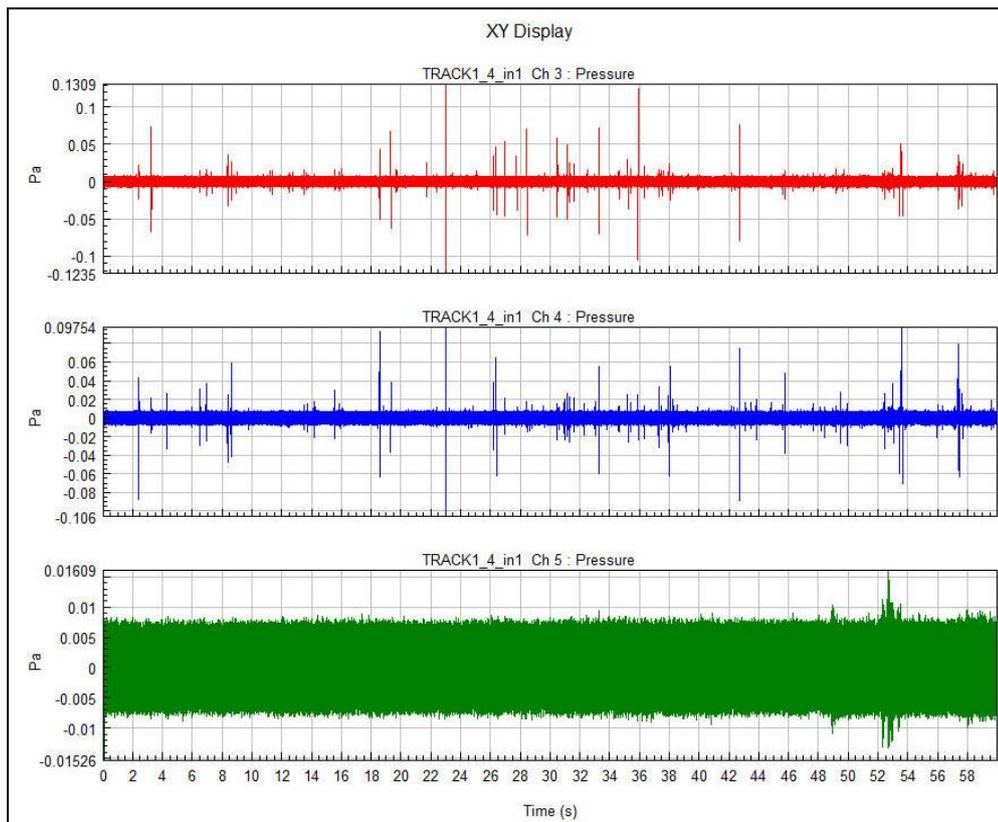


Gráfico AP-B. 3 - Gráfico amplitude *versus* tempo durante o terceiro minuto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova C

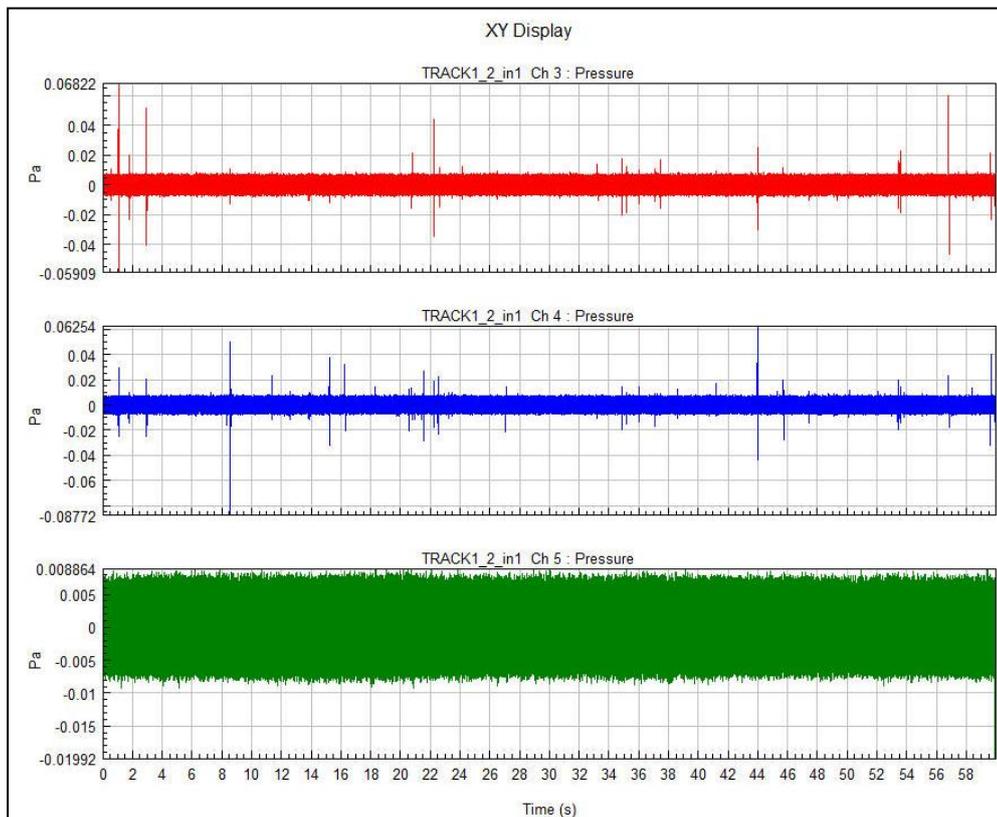


Gráfico AP-B. 4 - Gráfico amplitude *versus* tempo durante o segundo quarto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova C

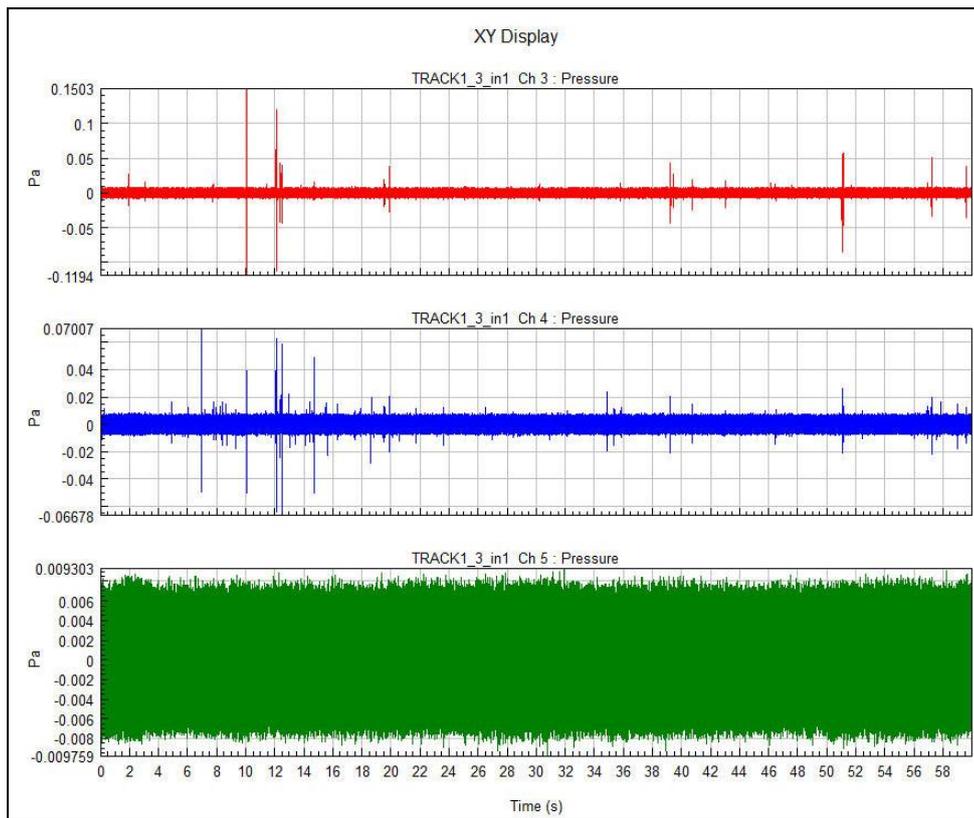


Gráfico AP-B. 5 - Gráfico amplitude *versus* tempo durante o segundo quinto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova C

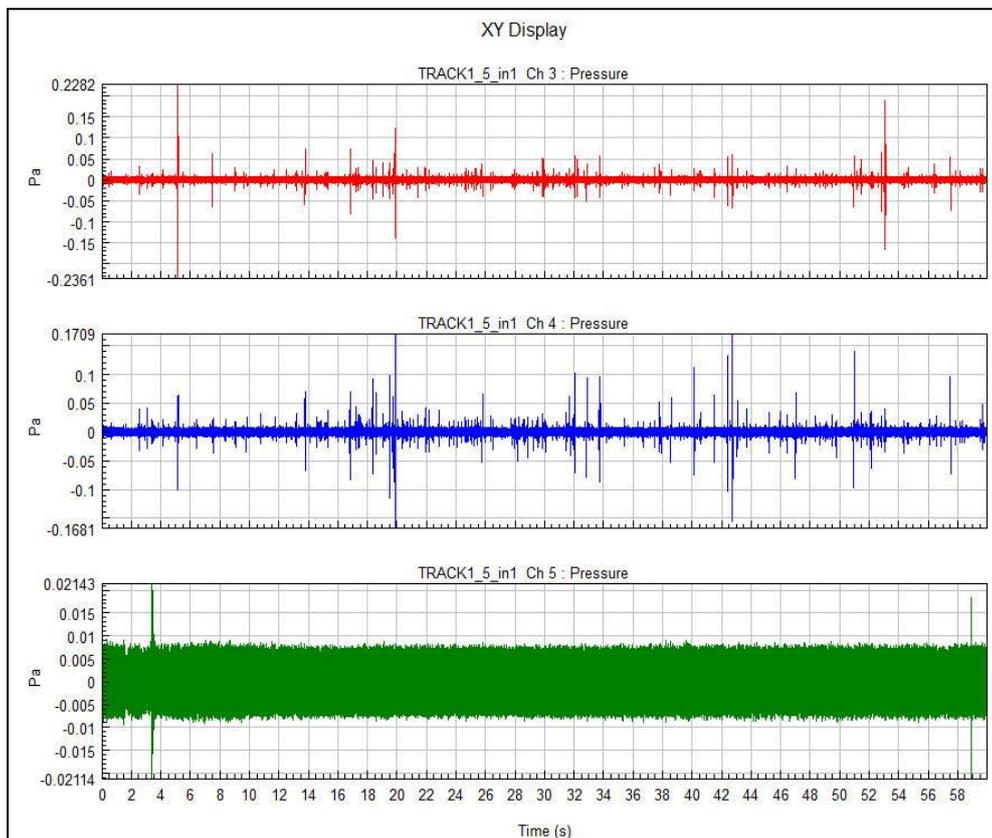
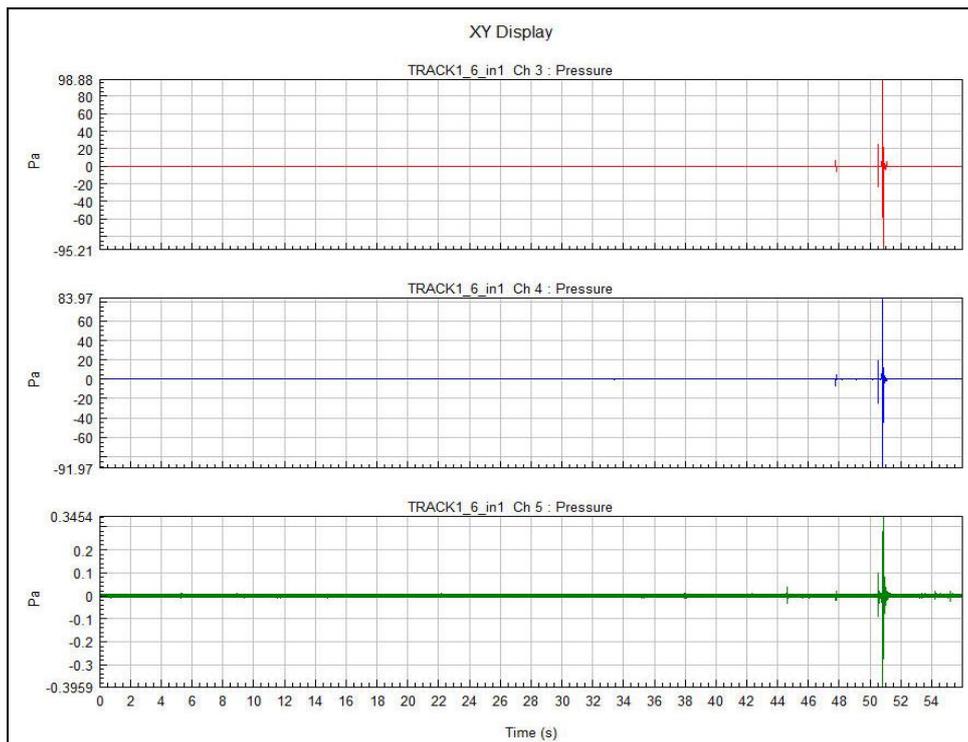


Gráfico AP-B. 6 - Gráfico amplitude *versus* tempo durante o sexto minuto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova C



➤ Corpo de prova G

Gráfico AP-B. 7 - Gráfico amplitude *versus* tempo durante o primeiro minuto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova G

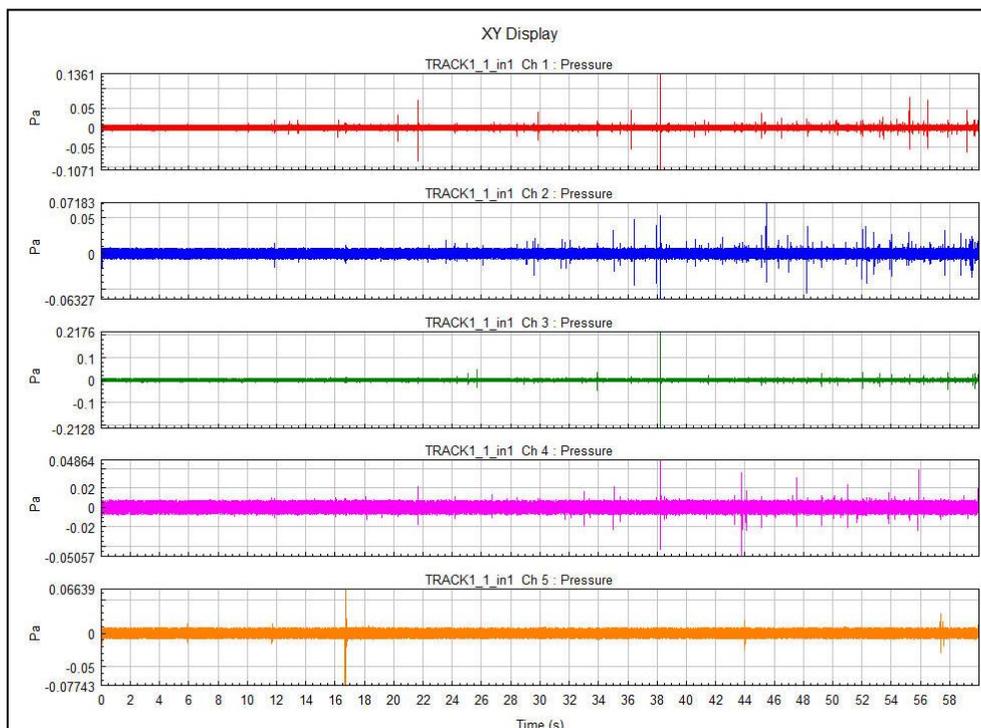


Gráfico AP-B. 8 - Gráfico amplitude *versus* tempo durante o segundo minuto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova G

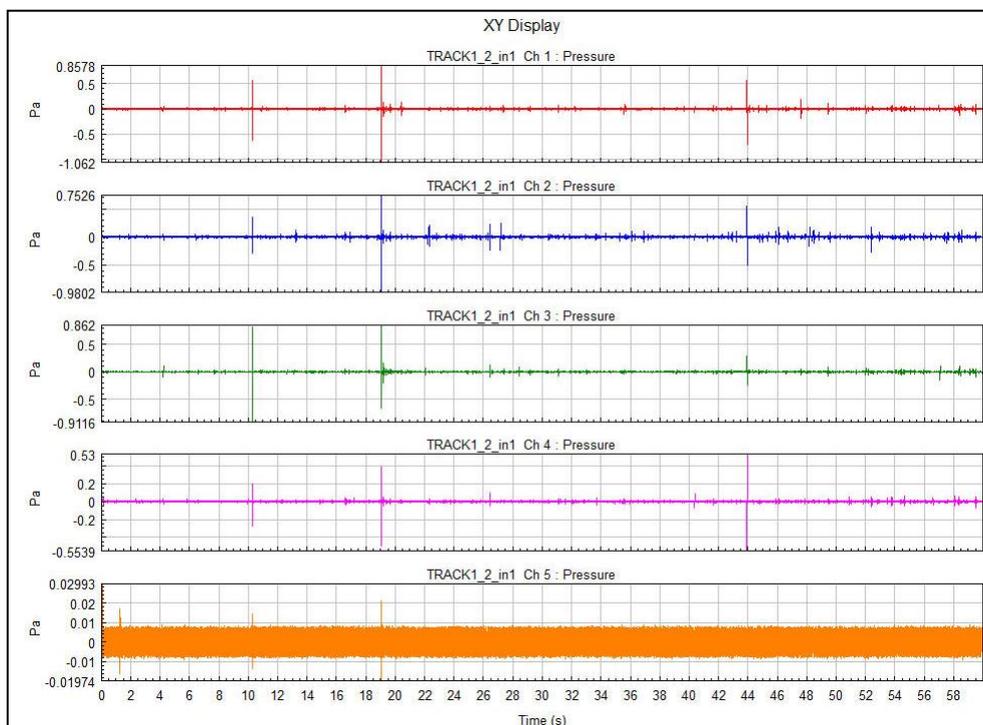


Gráfico AP-B. 9 - Gráfico amplitude *versus* tempo durante o terceiro minuto do ensaio de emissão acústica do corpo de prova G

