

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA SIMULAÇÃO VISCOELÁSTICA DO FENÔMENO DE PROPAGAÇÃO DE
ONDAS EM TERMOPLÁSTICOS PARA APLICAÇÕES NA DETECÇÃO DE DANO

por

Leonardo Estrázulas Dolzan

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Agosto de 2017

ESTUDO DA SIMULAÇÃO VISCOELÁSTICA DO FENÔMENO DE PROPAGAÇÃO DE
ONDAS EM TERMOPLÁSTICOS PARA APLICAÇÕES NA DETECÇÃO DE DANO

por

Leonardo Estrázulas Dolzan

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Co-orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Co-orientador: Msc. Eng. Eduardo Becker Groth

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Dr. Rogério José Marczak

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 02 de Agosto de 2017.

AGRADECIMENTOS

Seria incapaz de mencionar todas as pessoas que são merecedoras de agradecimento, foram anos de esforço e dedicação para finalmente chegar até este momento.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler que esteve sempre presente e disposto a tirar dúvidas, dar dicas e trocar alguns corpos de prova na máquina de ensaios. Também por me introduzir ao mundo dos polímeros, que pouco é ensinado em nossa grade curricular, mas que é hoje cada vez mais importante.

Ao meu co-orientador, Msc. Eduardo Becker Groth , pelas explicações, ensinamentos e por mostrar algumas luzes neste túnel percorrido. Pelas respostas objetivas enviadas a qualquer hora do dia via whatsapp.

Ao LAMEF por ser um dos meus lares nesses anos de graduação. Local onde muito se trabalhou dia e noite, muitas risadas proporcionadas e uma licença especial para utilização do software ABAQUS/Explicit, utilizado neste trabalho.

Ao pessoal do TS que muito agregou ao meu conhecimento na área da engenharia, expandindo meus conhecimentos para além da grade curricular. Pelo entendimento e flexibilidade nas horas de dificuldade e estudo.

Ao Erik que sempre foi um ótimo amigo, parceiro de mate e que me ajudou com várias dicas para o modelo numérico, poupando meu tempo e estresse.

Aos P., Dudu, Xiko, Ricardo, Edu, Diogo, Stoll, Raul e Pedro, que durante todos estes anos participaram da minha vida dentro e fora da engenharia.

Aos Bohemios, que me fazem levar para a vida toda a frase: “Entenda que amigos vão e vem, mas nunca abra mão dos poucos e bons”. Obrigado por tudo Fili, Rafinha, Gilby, Miojo, Negão, Guiga e Lucas.

À Stefani, pelo carinho, companheirismo e entendimentos nos momentos difíceis dessa caminhada.

Finalmente aos meus Pais, Paulo e Diala, por me darem todo o suporte necessário, durante toda a minha vida. Nunca me faltaram palavras de amor e carinho, incentivos, força e bfunfa para finalmente chegar até onde estou.

DOLZAN, L. E. **Estudo da Simulação Viscoelástica do Fenômeno de Propagação de Ondas em Termoplásticos para Aplicação na Detecção de Dano.** 2017. 07. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

A importância de detecção de defeitos no ramo de dutos para águas profundas cresce a cada dia e tem seu foco de estudos não mais exclusivamente para metais, mas também para polímeros em geral. A utilização de ondas guiadas através de ensaios não-destrutivos (ENDs) em polímeros pode auxiliar na detecção de avarias inesperadas nas camadas externas dos dutos evitando alagamento e corrosão excessiva das camadas internas. Porém, este tipo de material tem dificuldades técnicas relacionadas ao seu comportamento mecânico que normalmente possui alta sensibilidade à velocidade de deformação. O estudo das características dos materiais poliméricos na simulação de sua condição de uso é de suma importância para que simulações numéricas representem constitutivamente respostas realísticas. A rigor, a escolha do modelo de material também é importante uma vez que impacta diretamente na qualidade da capacidade preditiva do fenômeno de propagação de onda, que está, mesmo que indiretamente, correlacionado à detecção de falhas. Assim, este trabalho buscou estudar a melhor estratégia para obter dados experimentais e simular a propagação de uma onda tipicamente usada na detecção de dano em estruturas. Para isto, este trabalho foi dividido em uma parte experimental e uma numérica, buscando uma adequada caracterização experimental do material frente suas características viscoelástica, para então aplicar no fenômeno dinâmico do problema. Amostras foram retiradas de uma capa de duto para que testes de relaxação e análises dinâmico-mecânicas fossem feitas. As propriedades viscoelásticas obtidas a partir desses ensaios foram então utilizadas em modelos constitutivos correlatos, onde foram realizadas simulações numéricas de propagação de uma onda em uma haste termoplástica de geometria definida, utilizando um *software* de elementos finitos comercial. Os resultados numéricos foram comparados com resultados experimentais, permitindo avaliar qual a melhor estratégia de simulação do fenômeno, frente às diferentes metodologias experimentais e numéricas.

PALAVRAS-CHAVE: ensaios não destrutivos; viscoelasticidade; método de elementos finitos; propagação de ondas.

DOLZAN, L. E. **Study of Thermoplastics Guided Wave Viscoelastic Simulation Phenomena for Damage Detection Application.** 2017. 07. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The importance of defects detection on the deep water field grows each day and has its focus not exclusively aimed to metals, but also to polymers in general. The usage of guided waves in non-destructive tests (NDTs) with polymers can assist the detection of unexpected damage on the external layers of the pipes, avoiding corrosion and excessive overflow in the inside layers. However, this kind of material has technical difficulties due to its mechanical behavior that is highly sensitive to deformation speed. The study of the polymeric material characteristics on its usage condition simulations is very important so that numerical simulations could represent realistic constitutive answers. The election of the material model is also

important, once it impacts directly on the quality of wave propagation phenomena prediction, which is indirectly correlated to the damage detection. This work proposes a study on the best strategy to obtain experimental data, and simulate the propagation of common waves used on damage detection. To reach the objective, this work was divided into an experimental and a numerical part, seeking an appropriate experimental material characterization related to its viscoelastic characteristics, so that the dynamical phenomena problem could be explained. Specimens were made from the external layer of a pipe, so that relaxation tests and dynamical mechanical analyses could be performed. The viscoelastic properties obtained from these experiments were used on constitutive models, where thermoplastic rod wave propagation numerical simulations were made from a defined geometry, using a finite element commercial software. The numerical results were then compared experimental data, allowing the evaluation of the best strategy to simulate the phenomena.

KEYWORDS: nondestructive techniques; viscoelasticity; finite element method; wave propagation.

ÍNDICE

	Pág.
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	2
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1 Propagação de Ondas.....	2
2.2 Propagação de Onda Longitudinal em Hastes Finas.....	2
2.3 Atenuação de Ondas Mecânicas.....	3
2.4 Polímeros.....	3
2.4.1 Classificação de Polímeros.....	3
2.4.2 Viscoelasticidade.....	4
2.4.3 Modelos Reológicos Viscoelásticos.....	5
2.5 Séries de Prony.....	6
2.5.1 Domínio Tempo.....	6
2.5.2 Domínio Frequência.....	7
3 INTEGRAÇÃO NUMÉRICO DINÂMICA EXPLÍCITA.....	8
4 METODOLOGIA.....	9
4.1 Procedimento Experimental.....	9
4.2 Teste de Relaxação (Domínio Tempo).....	9
4.3 Teste DMA (Domínio Frequência).....	10
4.4 Descrição Geral do Modelo Numérico.....	10
4.4.1 Modelo 1.....	11
4.4.2 Modelo 2.....	11
4.5 Casos de Estudo.....	11
4.5.1 Caso Estudo I.....	11
4.5.2 Caso Estudo II.....	11
5 RESULTADOS.....	11
5.1 Resultados do Caso de Estudo I.....	11
5.2 Resultados do Caso de Estudo II (com validação).....	13
6 CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
Anexo A1 – Esquema de funcionamento da função Tone Burst [Radke, 2016].....	16
Anexo A2 – Metodologia para o cálculo da atenuação do sinal [Groth,2016].....	18
Apêndice A – Manufatura dos corpos de prova.....	20
Apêndice B – Maquinário utilizado para os ensaios de relaxação e DMA.....	21

1 INTRODUÇÃO

A indústria petrolífera, ainda que tenha passado por recentes crises, é de suma importância econômica em todo o mundo. A utilização dos produtos de origem fóssil e seus derivados ainda representa grande parte da matriz energética utilizada em diversos países. Com a utilização cada vez maior de plataformas *offshore*, e a descoberta do pré-sal, um grande incentivo monetário foi aplicado para o desenvolvimento de tecnologias que suportassem pressões em profundidades variando de 2000 até mais de 7000 metros abaixo do nível do mar em distâncias de centenas de quilômetros da costa. Devido a essas dificuldades o estudo sobre o ramo de dutos para águas profundas tornou-se extremamente importante.

Quando se fala em transporte do produto fóssil propriamente dito, são utilizadas tubulações que podem ser rígidas ou flexíveis, os chamados *risers*. Para a alimentação elétrica e transporte de dados sobre o que se passa no fundo do mar, são utilizados umbilicais. Tanto *risers* flexíveis quanto umbilicais são formados por camadas de polímeros e metais que juntos dão resistência e integridade ao duto. A figura 1.1 mostra um *riser* flexível em camadas e um umbilical com sua seção transversal e camadas.

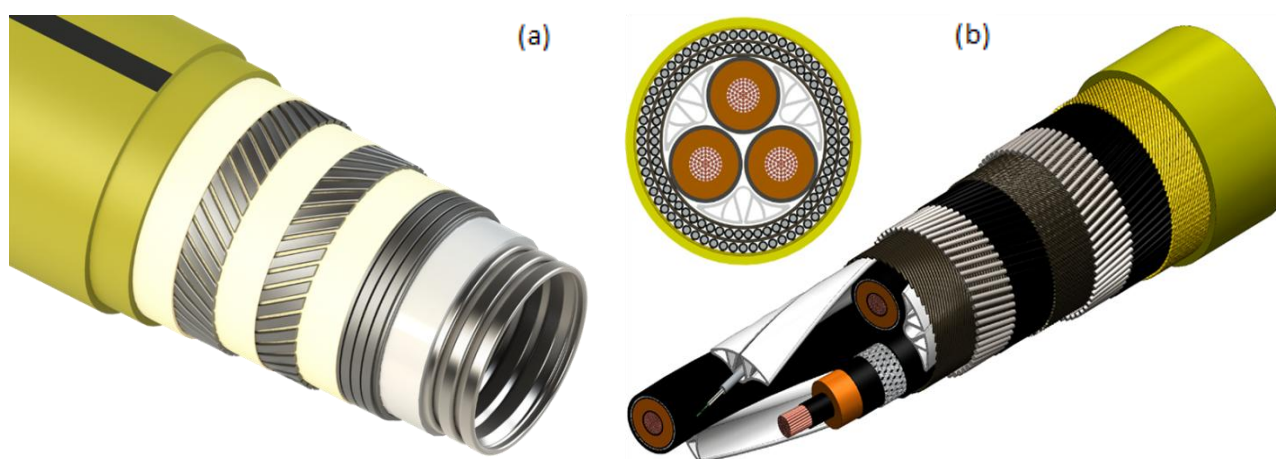


Figura 1.1: (a) Exemplo de riser flexível separado em camadas. (b) Seção transversal e representação das camadas de um umbilical.

Durante a instalação e operação, estes dutos estão sujeitos a eventos anormais que podem causar avarias em sua camada externa. Essas camadas são feitas de material polimérico termoplástico e quando fissuradas de maneira a permitir a entrada do fluido externo, podem causar alagamento na região anular, causando corrosão nos arames e comprometendo a vida da linha. Com o passar do tempo e sabendo dos perigos que um rompimento de linha podem causar ao ambiente, foram desenvolvidas tecnologias não somente embarcadas nos dutos, mas também para monitoramento e detecção de falhas. Com a finalidade de encontrar com precisão qualquer tipo de irregularidade e defeito existente ou que possa vir a se tornar um defeito catastrófico, os ensaios não-destrutivos (ENDs), ganharam força nas últimas décadas e passaram a ser testados não somente em materiais metálicos como também em polímeros diversos. Como o nome já diz esses ensaios não causam danos ao componente e utilizam inúmeras técnicas para localizar as regiões danificadas. O ultrassom com ondas guiadas se destaca em meio à essas técnicas por sua onda mecânica ter grande sensibilidade e atingir grandes distâncias de propagação não necessitando de uma fonte externa de energia. A utilização de ondas guiadas permite encontrar defeitos em locais de difícil acesso como em dutos enterrados e submersos, de maneira rápida necessitando apenas de pequenas áreas de exposição. [Rose, 2014]. Porém, a aplicação desta técnica depende do material da estrutura.

Neste trabalho, o enfoque será sobre o material termoplástico da camada externa, que faz parte da estrutura de interesse. Materiais termoplásticos possuem comportamento diferenciado em relação à propagação de ondas, pois possuem alta viscosidade intrínseca quando comparados aos metais. Isto faz com que a onda possa sofrer dispersão ou dissipação de energia significativa quando percorre longos trechos. Visto que um *riser* pode possuir milhares de metros, o estudo de modelos que simulem a propagação de ondas em termoplásticos possibilita prever o comportamento da propagação tornando a análise viscoelástica de suma importância. A simulação deste fenômeno está diretamente ligada ao modelo constitutivo utilizado para sua representação. Outra dificuldade inerente, não menos importante, está no fenômeno a ser representado, que pode excitar diferentes comprimentos de onda e velocidade de propagação. Estes fenômenos, a princípio, podem ser melhores ou piores representados segundo o tipo de estrutura matemática usada no modelo constitutivo. Dentro das possibilidades, frente os possíveis dados experimentais e o fenômeno de interesse, se destacam a viscoelasticidade descrita no domínio do tempo e a viscoelasticidade descrita no domínio da frequência.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo estudar a simulação numérica da propagação de uma onda tipicamente usada em técnica de detecção de dano em um material termoplástico da camada externa de um *riser*, considerando a viscoelasticidade do material e as formas tradicionais de caracterizá-la experimentalmente. Neste contexto pretende-se explorar técnicas comuns de caracterização experimental de viscoelasticidade e aplicar a modelos viscoelásticos correlatos. Para a validação e análises comparativas serão usados dados experimentais da propagação da onda, feitos sobre uma haste do material. Com este estudo espera-se obter qual é a melhor descrição do comportamento mecânico da propagação de ondas em termoplásticos, permitindo avaliar a sua aplicação em casos como *risers*.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Aqui serão expostos conceitos básicos para o entendimento sobre polímeros, viscoelasticidade e propagação de ondas guiadas em meios sólidos.

2.1 Propagação de Ondas

O estudo da propagação de ondas é baseado na interação de átomos em um corpo. Essas interações nada mais são do que deformações variáveis no tempo, ou podem ser chamadas de vibrações. Quando os átomos que compõem o corpo são excitados, funcionam como um conjunto sequencial de massas e molas, que propagam essa excitação adiante de acordo com a massa e a rigidez desse sistema, representada pelo módulo de elasticidade e densidade [Graff, 1975]. Esse corpo considerado como um meio contínuo, pode ter seus elementos movimentados de maneira longitudinal, quando acontece uma compressão e uma tração dos átomos, ou transversalmente, quando os elementos são cisalhados, distorcendo o corpo, mas mantendo o volume constante [Auld,1973; Moore et al.,2005]

A equação da onda 2.1, que rege o fenômeno apresentado, é basa para equações como a da velocidade de propagação, uma das principais variáveis da aplicação de ondas em ensaios não destrutivos.

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

2.2 Propagação de Onda Longitudinal em Hastes Finas

Os elementos estruturais conhecidos por possuírem um elevado grau de esbeltes (dimensões da seção transversal muito menores que o comprimento) são chamados de hastes finas.

A equação para hastes, que governa a propagação de ondas longitudinais, é representada através do equilíbrio em um elemento infinitesimal da haste.

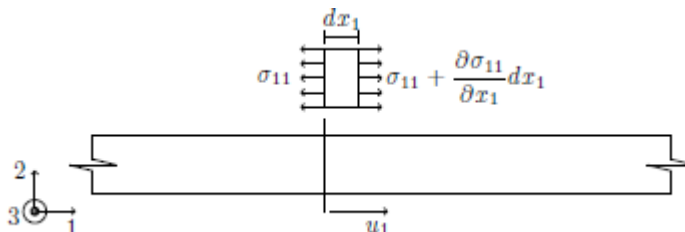


Figura 2.1: Equilíbrio longitudinal em haste [Groth, 2016]

Considerando tensão uniaxial, seção constante, material isotrópico e negligenciando o efeito de inércia lateral

$$-\sigma_{11}\bar{A} + \left(\sigma_{11} + \frac{\partial\sigma_{11}}{\partial x_1}dx_1\right)\bar{A} = \rho\bar{A}\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

onde \bar{A} representa a área da seção transversal da haste. Reescrevendo a equação com as considerações necessárias:

$$E\frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} = \rho\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

Em que E é o módulo de elasticidade. Novamente é mostrada a equação associada ao modelo já estudado. A velocidade de propagação da onda longitudinal, c_L , através da equação 2.1, pode ser escrita como:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.4)$$

2.3 Atenuação de Ondas Mecânicas

Quando a onda se propaga através do meio, sua energia é reduzida devido a diversos fatores. Mecanismos que dissipam energia da onda como: atrito entre as partículas, interações com trincas e descontinuidades, viscosidade interna do material entre outros, são comuns e extremamente importantes no estudo de propagação de ondas, pois causam um decaimento exponencial no sinal [dos Santos, 2008]. O mecanismo de dissipação de energia é explicado no Anexo A2 retirado de Groth, 2016.

2.4 Polímeros

Os polímeros são formados pela polimerização de várias unidades estruturais chamadas de *meros* ou monômeros (moléculas estáveis) que se conectam através de ligações interatômicas covalentes podendo se organizar linearmente, ramificados, com ligações cruzadas e em redes [Callister, 2007].

2.4.1 Classificação de Polímeros

De acordo com seu comportamento perante o aumento de temperatura, os polímeros podem ser divididos em termorrígidos e termoplásticos [Callister, 2007]. Os polímeros termorrígidos, ao sofrerem aquecimento, endurecem formando ligações covalentes entre suas cadeias originando reticulados que inibem a mobilidade das moléculas tornando-as permanentemente rígidas e não mais suscetíveis a aquecimento subsequente. Os termoplásticos ao serem submetidos a um aumento de temperatura aumentam sua fluidez e diminuem a viscosidade, já ao sofrerem um resfriamento, mantêm sua estrutura molecular e sua forma [Callister, 2007; Vassoler, 2007]. De acordo com a organização da matriz atômica e molecular, os polímeros podem ser considerados cristalinos, semicristalinos ou amorfos. Essas características específicas irão determinar a maneira com que o material vai se comportar mecanicamente. Os estudos desses comportamentos costumam apresentar respostas não-lineares, grandes deformações devidas à reorientação das cadeias poliméricas paralelamente à direção do alongamento, sensibilidade à temperatura e tempo de solicitação e também um comportamento viscoso superposto a um comportamento elástico. Essa característica é conhecida como viscoelasticidade e será foco de estudo neste trabalho.

2.4.2 Viscoelasticidade

Muitos autores tem estudado o fenômeno de propagação de ondas com métodos de elementos finitos e modelos de material viscoelástico têm sido amplamente utilizados no estado da técnica atual.

Demma et al, 2014 realizou um estudo sobre reflexão de ondas guiadas em tubos com defeitos, utilizando um modelo de elementos finitos. Dois modos de propagação foram escolhidos para o estudo da interação defeito-onda, variando parâmetros dos defeitos e frequência de excitação. Sorohan et al, 2010 focou seu estudo em descobrir curvas de dispersão ligadas à propagação de ondas em estruturas complexas e anisotrópicas, utilizando códigos comerciais de elementos finitos. Hayashi et al, 2003 obtiveram curvas de dispersão de velocidade de fase e de grupo em modelos com seção transversal complexa utilizando método semi-analítico de elementos finitos.

Luca et al, 2016, apresentaram uma técnica de simulação numérica para propagação de ondas em laminados de fibra de carbono com resina polimérica, utilizando Abaqus. Yang et al, 2016, construíram um modelo 3D para simular o comportamento de propagação de ondas de Lamb para laminados de epoxy e fibra de vidro. Dahmen et al, 2016, realizaram uma extensa abordagem utilizando polinômios de Legendre para solucionar propagação de ondas em placas viscoelásticas multicamadas. Yu et al, 2011, obtiveram uma solução numérica para propagação de ondas em placas de materiais funcionalmente graduados utilizando a teoria viscoelástica com modelos de Kelvin-Voigt. Li e Hu, 2015, aplicaram um método numérico em uma investigação sobre propagação de ondas em transporte de fluido viscoelástico em nano-tubos de carbono.

Alagappan et al, 2014, criaram um modelo de propagação de ondas devido a impacto em materiais com multicamadas poliméricas, e caracterizaram o material utilizando teoria de rede dupla mencionando séries de Prony em comparação com seu método. Liu et al, 2012, desenvolveram um modelo de propagação de ondas em matriz de particulados polimérico. Em seu trabalho, utilizou um método de elementos finitos estendido e um modelo constitutivo através de séries de Prony. Ravikumar et al, 2015, testaram um modelo de balística em elementos finitos para gelatina cirúrgica. O modelo constitutivo utilizado era viscoelástico e utilizava uma série de Prony com um termo exponencial. Cheng e Leong, 2016, desenvolveram um modelo para simular, em elementos finitos, a propagação de ondas em solos utilizando séries de Prony para representar o comportamento viscoelástico.

Ao se observar a presença de fenômenos viscosos em materiais sólidos, notou-se uma forte dependência da velocidade e do tempo de aplicação de solicitações a uma temperatura fixa. Essa reação mostra que a tensão não é somente função dos valores de deformação, mas é também das derivadas deles. Também a deformação é dada como função do histórico de solicitações aplicadas assim como a tensão é do histórico de deformações. O polímero é dado

como viscoelástico linear quando sua deformação e taxa de deformação são infinitesimais, e é possível através de equações diferenciais lineares com coeficientes constantes, expressar a relação tensão-deformação dependente do tempo. Os materiais viscoelásticos lineares mostraram poder ter suas relações hereditárias superpostas e expressas através de módulos de relaxação e fluência [Ferry, 1980].

Os testes de relaxação e fluência são os ensaios mais aplicados para caracterização de materiais viscoelásticos no domínio do tempo, principalmente quando objetivo é alimentar um modelo constitutivo para simulação numérica. No processo de relaxação de tensão, é aplicada uma deformação instantânea (1-5s) que é mantida constante por um período de tempo escolhido, observando-se variação da tensão do material durante esse tempo. No teste de fluência, é aplicada uma tensão instantânea, que é mantida constante, observando-se uma deformação elástica inicial e logo depois uma deformação correspondente à fluência do material. Quando o carregamento cessa, ocorre uma recuperação instantânea seguida por uma recuperação de deformação no tempo que não é total, apresentando uma deformação residual. Os dois processos são ilustrados na figura 2.2.

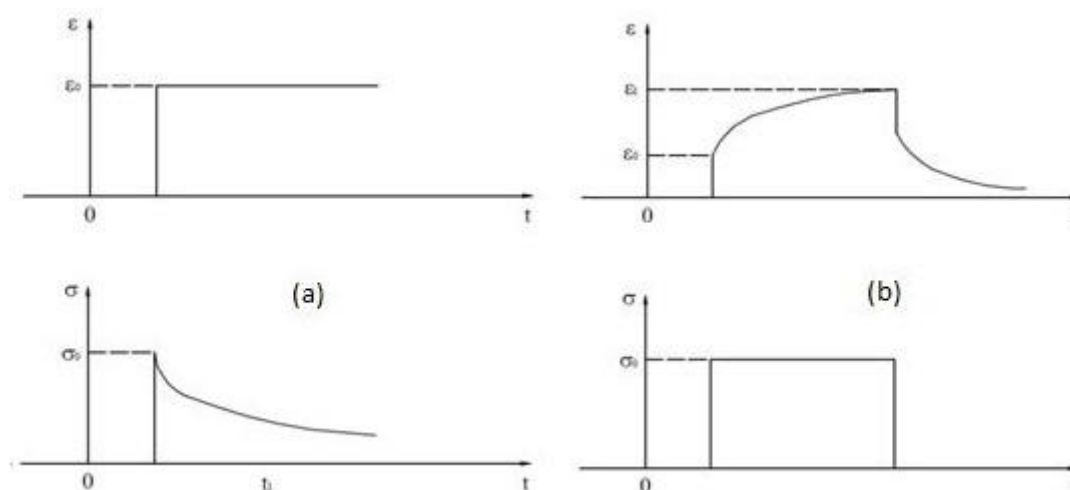


Figura 2.2 (a) Teste de relaxação de tensão. (b) Teste de fluência e recuperação de fluência.

Uma alternativa experimental para avaliar propriedades viscoelásticas é através da análise dinâmico-mecânica, que se dá submetendo o corpo de prova à uma deformação alternada sinusoidalmente e ao mesmo tempo medir sua tensão. É medida a defasagem entre as ondas de tensão e deformação onde para um material puramente elástico a defasagem seria 0° e para um material puramente viscoso seria de 90° , já para um viscoelástico, esta defasagem vai estar entre esses dois valores. A partir desses dados é possível calcular os módulos complexos, de armazenamento, de perda entre outros. Um estudo mais profundo é encontrado em Ward, 2004.

2.4.3 Modelos Reológicos Viscoelásticos

Existem diversos modelos viscoelásticos. Estes podem ser baseados em construções de componentes mecânicos elásticos (dependente de rigidez elástica, como o módulo de elasticidade E) e viscosos (dependentes do amortecimento viscoso, como a viscosidade η). Inúmeras maneiras de agrupar molas e amortecedores deram espaço para os mais variados modelos reológicos. Para fins de aplicação de engenharia, muitas vezes, para representar com a necessária precisão o comportamento mecânico do material, pode ser necessário modelos compostos por uma grande quantidade de elementos, onde essa quantidade está relacionada fortemente com a precisão deles. Essa precisão aparece com grande importância em

características temporais do comportamento viscoelástico que se manifestam principalmente através dos fenômenos de fluência e relaxação de tensões. Uma boa representação pode ser obtida simulando relaxação através de uma cadeia de modelos de Maxwell em paralelo [Sweeney e Ward, 2004]. Essas representações compostas de um número n de unidades, podem ainda ter elementos adicionais como uma mola para dar ao modelo resposta à impacto ($E_0 \neq 0$) [Sweeney e Ward, 2004; Christensen, 1982]. A figura 2.3 ilustra o modelos mencionado.

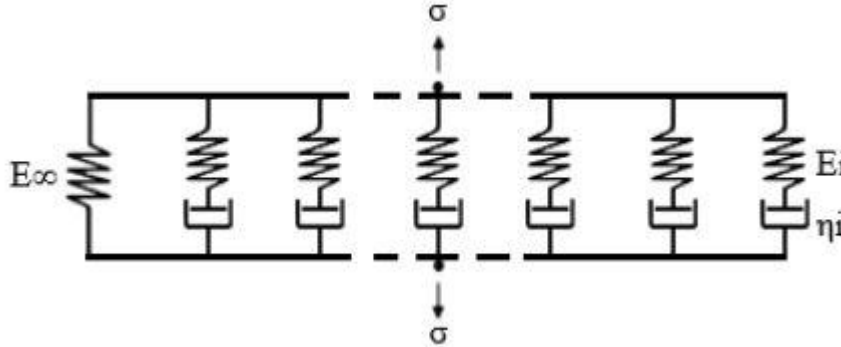


Figura 2.3: Modelo generalizado de Maxwell

2.5 Séries de Prony

2.5.1 Domínio Tempo

No modelo generalizado de Maxwell (Fig 2.2), a deformação total ϵ , é igual para todos os braços enquanto a tensão é a soma das tensões em $n+1$ braços do modelo. A tensão efetiva $\tilde{\sigma}$, em 3 dimensões, pode ser obtida através da deformação total ϵ , e a taxa de deformação deviatória $\dot{\epsilon}$. Através de algumas observações experimentais observou-se que o comportamento viscoso dos materiais é regido por mudanças na forma, enquanto as mudanças em volume são elásticas.

$$\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}^{vol} + \tilde{\sigma}^{dev}(t) = Ktr(\epsilon)I + 2 \int_{-\infty}^t G(t - \tau)\dot{\epsilon}(\tau)d\tau \quad (2.5)$$

Na equação 2.5 é mostrado o modulo de cisalhamento, G , e que o modulo de compressibilidade, K , é independente do tempo, enquanto a tensão desviadora é dada em forma de integral de convolução. G e K são relacionados pelo Modulo de Young, E , e o coeficiente de Poisson, ν , através das seguintes equações:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.6)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (2.7)$$

Uma integração semi-analítica da integral de convolução foi feita [Taylor et al, 1970] para chegar ao valor do módulo material $G(t)$, que representa o módulo de relaxação cisalhante dado na forma de série de Prony.

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^N G_i e^{(-\frac{t}{\lambda_i})} = G_0 \left(\mu_{\infty} + \sum_{i=1}^N \mu_i e^{(-\frac{t}{\lambda_i})} \right) \quad (2.8)$$

Onde μ são os módulo de relaxação normalizado, sendo $\mu_{\infty} = \frac{G_{\infty}}{G_0}$, $\mu_i = \frac{G_i}{G_0}$. λ_i é o tempo de relaxação associado a μ_i e G_0 é o módulo de relaxação instantâneo no tempo zero [Brinson & Brinson, 2008]. Este modelo é encontrado em vários softwares de elementos finitos comerciais, necessitando apenas os parâmetros de material μ_i e λ_i , obtidos de ensaios de relaxação.

2.5.2 Domínio Frequência

A tensão linear viscoelástica é dada pela seguinte equação, baseada no princípio da superposição de Boltzman

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t G_{rel}(t - \tau) \frac{de}{d\tau} d\tau \quad (2.9)$$

Onde σ é o tensor tensão, e é o tensor deformação e $G_{rel}(t)$ é o módulo de relaxação cisalhante. Considerando que $\sigma(t) = e(t) = 0$ para um tempo $t < 0$, e uma carga descontínua é aplicada em $t=0$, reescreve-se a equação (2.9) como:

$$\sigma(t) = G_{rel}(t)e(0) + \int_0^t G_{rel}(t - \tau) \frac{de}{d\tau} d\tau \quad (2.10)$$

sendo $e(0)$ o valor limite de $e(t)$ quando $t \rightarrow 0^+$. Aplicando a transformada de Laplace na equação (2.10) e tomando $e(0) = 0$, obtém-se a seguinte equação no domínio de Laplace $\tilde{\sigma}(s) = s\tilde{G}_{rel}(s)\tilde{e}(s)$, onde $\tilde{\sigma}$ e \tilde{e} são as transformadas de Laplace da tensão e deformação no domínio s . Assumindo s como uma variável puramente imaginária igual a $j\omega$ obtém-se

$$G^*(j\omega) = \frac{\tilde{\sigma}(j\omega)}{\tilde{e}(j\omega)} = j\omega\tilde{G}_{rel}(j\omega) = j\omega \int_0^{\infty} G_{rel}(\tau') e^{(j\omega\tau')} d\tau', \quad s = j\omega \quad (2.11)$$

Onde ω é a frequência circular e $j = \sqrt{-1}$, $G^*(j\omega)$ é o módulo de cisalhamento complexo expresso na forma

$$G^*(j\omega) = G'(\omega) + jG''(\omega), \quad (2.12)$$

Sendo $G'(\omega)$ e $G''(\omega)$ o módulo de armazenamento e o módulo dissipativo, respectivamente. Se as funções de relaxação em (2.9) são expressas no formato de decaimentos exponenciais,

$$G_{rel}(t) = G_{\infty} + \sum_{k=1}^N g_k e^{(-\frac{t}{\tau_k})} \quad (2.13)$$

então, de (2.11), a equação (2.12) será

$$G^*(j\omega) = G_{\infty} + \sum_{k=1}^N \frac{g_k \tau_k j\omega}{1 + \tau_k j\omega} \quad (2.14)$$

Onde N são os modos de relaxação definidos pelos seus coeficientes de Prony g_k e seus tempos de relaxação τ_k , com $k=1,2,\dots,N$, e G_{∞} é o módulo de cisalhamento de longa duração.

Também pela equação (2.14) obtém-se a representação em séries de Prony do módulo de armazenamento e dissipativo, em função da frequência

$$G'(\omega) = \Re\{G^*\} = G_\infty + \sum_{k=1}^N g_k \frac{(\omega\tau_k)^2}{1 + (\omega\tau_k)^2} \quad (2.15)$$

$$G''(\omega) = \Im\{G^*\} = \sum_{k=1}^N g_k \frac{\omega\tau_k}{1 + (\omega\tau_k)^2} \quad (2.16)$$

Este modelo também é encontrado em softwares de elementos finitos comerciais, necessitando apenas os parâmetros de material G' , G'' , K' , K'' e ω , obtidos de análises dinâmico-mecânicas (DMA). Vale ressaltar que para cada frequência testada irá existir um par de módulo de armazenamento e de perda referentes àquela frequência.

3 INTEGRAÇÃO NUMÉRICO DINÂMICA EXPLÍCITA

Pode-se escrever a equação do movimento resultante da aplicação de uma discretização espacial no método de elementos finitos por:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{P} - \mathbf{I} \quad (3.1)$$

Sendo \mathbf{M} a matriz de massa, e $\ddot{\mathbf{u}}$ a aceleração do nó, \mathbf{P} são forças externas e \mathbf{I} internas. Existem dois caminhos que levam até a integração da equação 3.1 no domínio do tempo, um implicitamente, e o outro explícito (utilizado neste trabalho), utilizado quando se necessita uma discretização muito detalhada no domínio do tempo, que se aplica à propagação de ondas guiadas. O intervalo de integração com que este método trabalha está relacionado com aquele que permite captura das frequências naturais do modelo.

O software ABAQUS/*Explicit* utiliza a regra de diferenças finitas centrais para integrar as equações de movimento. Serão apresentadas equações que calculam aceleração, velocidade e deslocamento respectivamente, sendo $\mathbf{u}(t)$ o deslocamento no tempo, $\dot{\mathbf{u}}(t)$ a velocidade, $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ é a aceleração e Δt é o incremento de tempo, utilizando a técnica das diferenças finitas centrais. Visando a precisão do modelo, é necessário que os incrementos de tempo sejam suficientemente pequenos para que a aceleração seja considerada constante no tempo.

$$\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{P} - \mathbf{I}) \quad (3.2)$$

$$\dot{\mathbf{u}}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{\mathbf{u}}|_{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{(\Delta t|_{(t+\Delta t)} + \Delta t|_{(t)})}{2} \ddot{\mathbf{u}}|_{(t)} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{u}|_{(t+\Delta t)} = \mathbf{u}|_{(t)} + \Delta t|_{(t+\Delta t)} \dot{\mathbf{u}}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})} \quad (3.4)$$

A estabilidade e a precisão deste método estão condicionadas ao incremento de tempo definido na análise. Para definir de maneira conservadora o limite de estabilidade, parte-se para uma análise em um único elemento da malha. Define-se então que o incremento de tempo não pode ser maior do que o tempo que a onda se propaga neste elemento [ABAQUS, 2014].

$$\Delta t_{max} = \frac{L^e}{c_d} \quad (3.5)$$

Onde L^e é o tamanho do menor elemento, c_d a velocidade da onda no material, dada pela equação 3.5 e Δt_{max} é o limite de estabilidade [Bathe & Wilson, 2014; ABAQUS, 2014].

4 METODOLOGIA

Nas seguintes seções é apresentada a metodologia experimental e numérica escolhida para este estudo. Neste contexto, serão analisadas as respostas obtidas através de simulações em elementos finitos feitos em uma haste polimérica com o material de interesse. Dois modelos de material foram escolhidos, segundo a disponibilidade no software comercial ABAQUS/*Explicit* e os dados experimentais que poderiam ser obtidos em laboratório. Em ambos é realizada uma discretização espacial do modelo, e uma temporal através de integrações explícitas referenciadas na seção 3. As respostas numéricas obtidas foram comparadas com dados de um experimento de propagação de onda em uma haste do mesmo material, feitos por Msc. Eng. Eduardo Becker Groth em 2016.

4.1 Procedimento Experimental

Uma fatia da capa externa de um duto foi retirada para manufatura dos corpos de prova com dimensão de 7x13x55 mm, feitos de acordo com ASTM D 4065-1, 2001 [Apêndice C]. O corte foi realizado utilizando jato d'água no Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS. Foram utilizados três corpos de prova para o ensaio de relaxação e cinco para DMA. Os ensaios foram realizados em uma máquina disponibilizada pelo laboratório do GMAp.

4.2 Teste de Relaxação (Domínio Tempo)

Os três ensaios de relaxação realizados foram feitos nas mesmas condições. O corpo de prova foi tracionado até uma carga de 5N que foi mantida por dois minutos e em seguida elevada até 150N, o deslocamento atingido foi mantido por duas horas e então a relaxação do material foi observada. A figura 5.1 mostra os resultados obtidos nos três ensaios.



Figura 4.1: Resultado do ensaio de relaxação

Uma curva obtida pela média dos pontos foi então criada para implementação nas propriedades do modelo numérico.

4.3 Teste DMA (Domínio Frequência)

Os cinco corpos de prova utilizados foram testados nas mesmas condições. Cada espécimen passava por ciclagens em doze diferentes frequências. Os parâmetros das análises DMA, como tempo entre análises e tensões média e de amplitude, foram obtidas de Pappalardo, 2016. Os resultados são apresentados na Tabela 5.1.

Frequência [Hz]	E' [Mpa]	E'' [Mpa]
0,01	246,0220	19,4260
0,10	273,5720	15,0398
1,00	304,1260	-35,9840
1,60	305,1600	-73,5320
2,50	293,7520	-130,5380
4,00	244,2880	-220,7040
6,30	95,3756	-314,3200
10,00	-156,6580	-190,0800
16,00	-84,4884	9,9811
25,00	-18,7492	14,2150
40,00	-3,3627	4,8749
63,00	-0,6324	1,4236
100	-0,1212	0,3855

Tabela 4.1: Dados do DMA

4.4 Descrição Geral do Modelo Numérico

O modelo numérico foi desenvolvido a partir da haste polimérica ensaiada, feita a partir do material da capa externa de um duto flexível. As dimensões da haste são 6x5x230mm, os elementos utilizados são hexágonos cúbicos de 8 nós, com 0,5mm de lado, totalizando 120 mil elementos. O módulo de elasticidade E igual a 270Mpa, coeficiente de Poisson ν igual a 0,46 e densidade ρ 1100kg/m³ foram retirados de Pappalardo, 2016, que realizou ensaios no material utilizado afim de obter esses valores. As condições de contorno aplicadas, para efeitos de validação de modelo e comparação de resultados, são aquelas representativas do ensaio: uma extremidade engastada e a outra sofrendo a excitação que segue uma função harmônica modulada variante no tempo, que excita uma banda de frequências estreita conhecida, chamada de *Tone Burst (Apêndice A)*. Duas frequências de excitação foram escolhidas a partir dos dados do experimento realizado por Groth, 2016. Dois pontos definidos (P1 e P2), destacados na Figura 4.2, com uma distância de 101mm entre eles e equidistantes das extremidades, são os pontos de medição onde serão obtidos os dados numéricos. Os dados numéricos são gerados a uma taxa de 2 milhões de valores por segundo com incremento de 1e-7s.

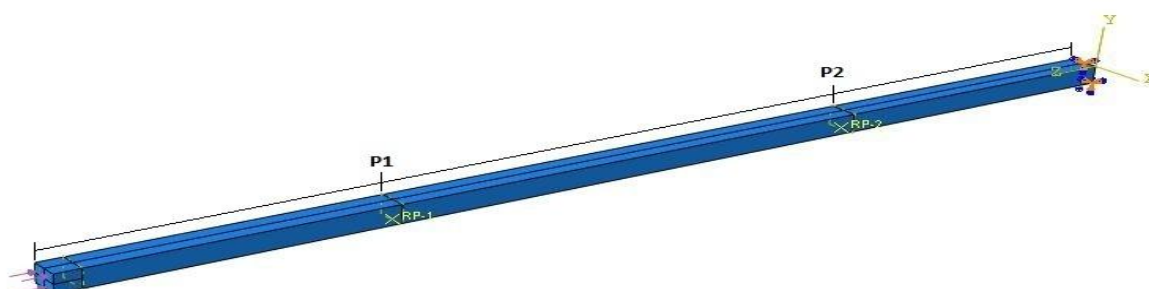


Figura 4.2: Modelo utilizado em elementos finitos.

4.4.1 Modelo 1

O modelo 1 foi implementado com modelo constitutivo de viscoelasticidade no domínio do tempo (Série de Prony clássica), através da entrada dos dados do ensaio de relaxação com módulos de relaxação normalizados e tempos de relaxação.

4.4.2 Modelo 2

O modelo 2 difere do primeiro em relação escolha do modelo constitutivo, onde este foi implementado através da entrada de dados retirados da análise dinâmico mecânica para as frequências da Tabela 4.1.

4.5 Casos de Estudo

4.5.1 Caso Estudo I

Uma vez que o modelo constitutivo já possui viscosidade intrínseca no material, a princípio não seria necessário utilizar do amortecimento numérico comumente empregado em análises explícitas. Assim, os modelos 1 e 2 referentes ao caso de estudo I são primeiramente analisados sem qualquer amortecimento artificial.

4.5.2 Caso Estudo II

Comumente para validar um modelo numérico sem dissipação de energia, faz-se uso de um amortecimento artificial no material para controlar oscilações de alta frequência (*Abaqus, 2014; Groth 2016*). Um modo de fazê-lo é adicionar um valor de *damping*, que influencia como uma atenuação numérica. Esta normalmente pode ser imposta segundo validação com dados experimentais (*Groth 2016*). Assim, neste caso de estudo, uma validação, através da imposição de um valor de *damping juntamente com os valores de relaxação para um modelo deste caso e de DMA para o outro*, foi feita de modo que a atenuação do modelo convergisse para uma atenuação muito próxima do experimento realizado por Groth, 2016.

5 RESULTADOS

Os resultados obtidos foram realizados através da comparação da atenuação calculada a partir dos dados experimentais e da simulação numérica para duas diferentes frequências de excitação 20kHz e 40kHz. O cálculo da atenuação é apresentado no Anexo A2.

5.1 Resultados do Caso de Estudo I

Os gráficos dos resultados das simulações utilizando o teste de relaxação (Modelo 1), para as frequências de 20kHz e 40kHz, são mostrados na Figura 5.1 (esquerda), assim como os respectivos gráficos retirados do experimento (direita). A avaliação é feita através do cálculo e comparação das atenuações, onde α_E é a atenuação para o experimento e α_N é a atenuação do modelo numérico.

Frequência [Hz]	α_E [dB/m]	α_N [dB/m]	Variação [%]
20	80,53	13,21	83,6
40	198,11	35,64	82,0

Tabela 5.1: Atenuação experimental e numérica (Relaxação).

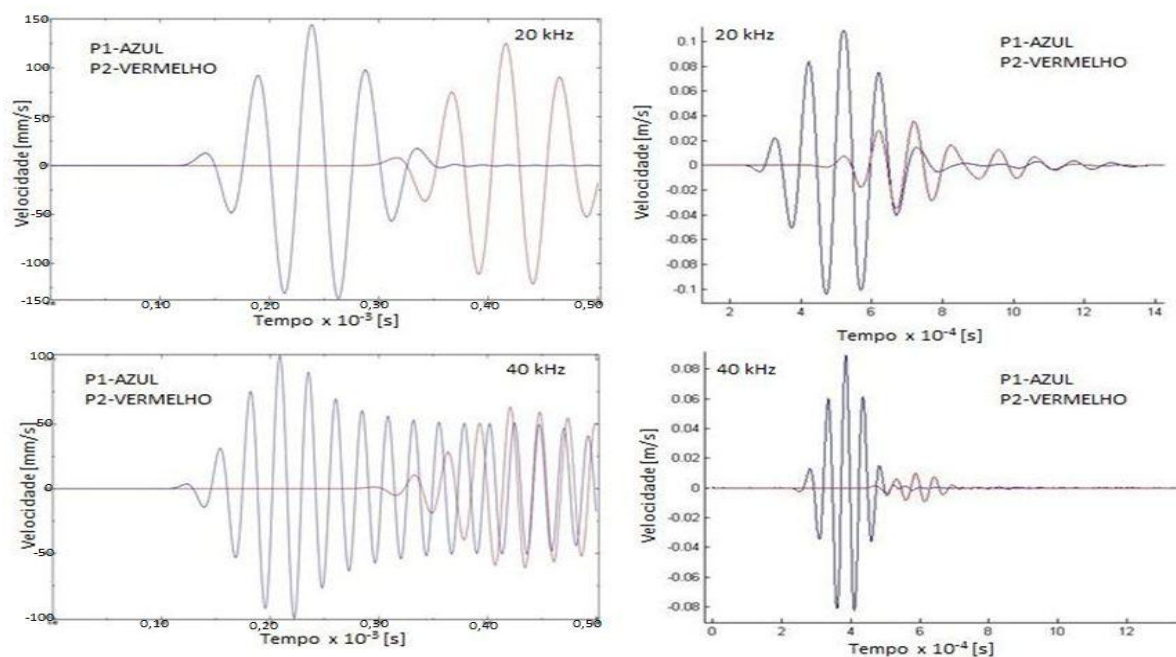


Figura 5.1: Resultado numérico (esquerda) e experimental (direita) para modelo 1.

Os gráficos dos resultados das simulações utilizando o DMA (Modelo 2), para as frequências de 20kHz e 40kHz, são mostrados na figura 5.2 (esquerda) assim como os respectivos gráficos retirados do experimento (direita) e as atenuações na tabela 5.2.

Frequência [Hz]	αE [dB/m]	αN [dB/m]	Varição [%]
20	80,53	4,7008	94,2
40	198,11	11,1367	94,4

Tabela 5.2: Atenuação experimental e numérica (DMA).

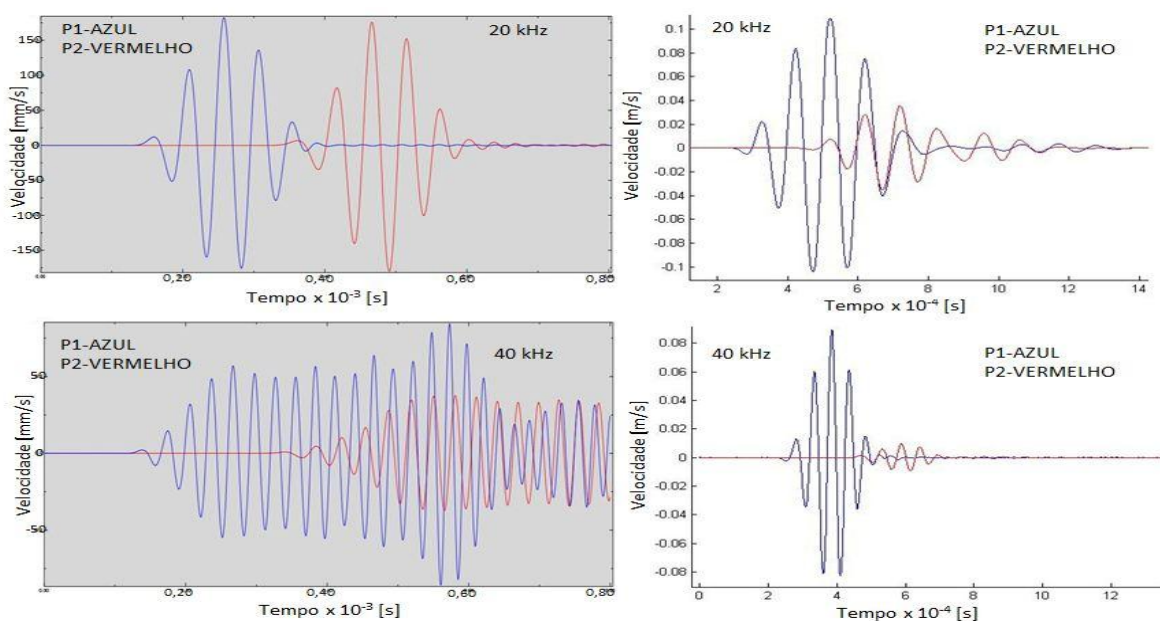


Figura 5.2: Resultado numérico (esquerda) e experimental (direita) para modelo 2.

Em ambos os casos se nota que a atenuação obtida através dos parâmetros experimentais viscoelásticos não foi suficiente para causar a atenuação observada experimentalmente.

5.2 Resultados do Caso de Estudo II (com validação)

Os gráficos dos resultados das simulações utilizando *damping*, para as frequências de 20kHz e 40kHz são mostrados na figura 5.3 e 5.4 (esquerda) assim como os respectivos gráficos retirados do experimento (direita). O valor de β_R igual a $6e-7$ foi obtido segundo validação para a frequência de 20Hz, onde β_R é interpretado pelo software como amortecimento viscoso artificial do material. Mais informações podem ser encontradas em ABAQUS, 2014. Na Figura 5.3 serão mostrados resultados para o modelo de relaxação com *damping* e para o modelo de DMA com *damping*. A avaliação é feita através do cálculo e comparação das atenuações seguindo o método anterior.

	Frequência [Hz]	αE [dB/m]	αN [dB/m]	Variação [%]
Relaxação	20	80,53	77,69	3,53
Relaxação	40	198,11	197,13	0,49
DMA	20	80,53	78,89	2,04
DMA	40	198,11	199,20	-0,55

Tabela 5.3: Atenuação experimental e numérica (Relaxação e DMA com *damping*).

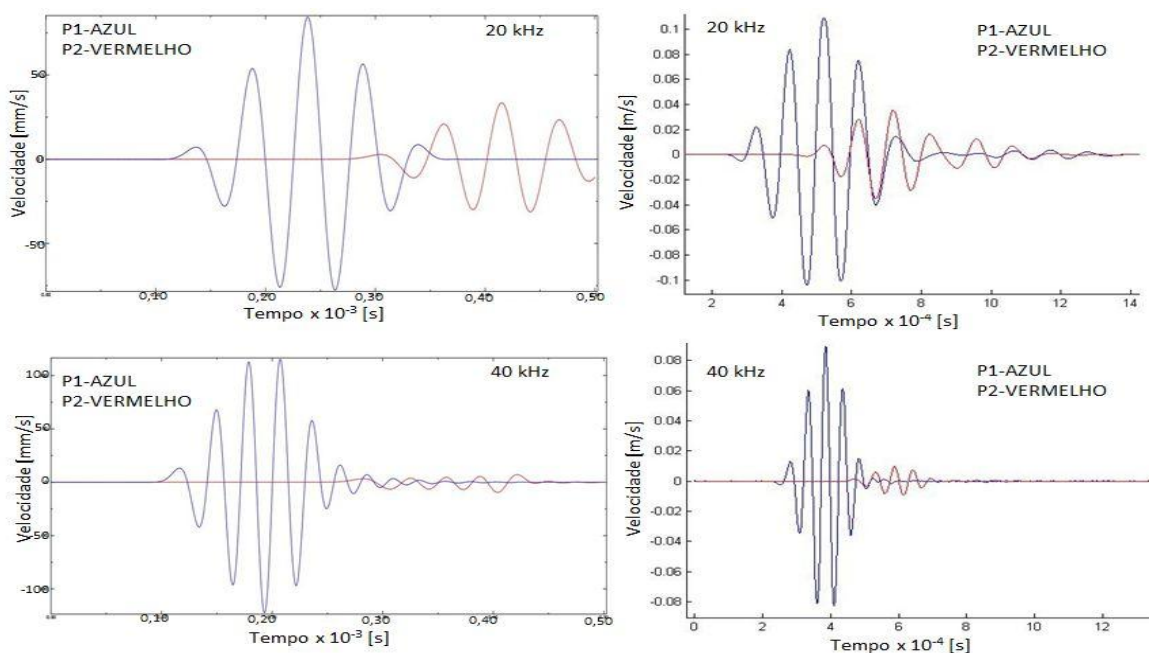


Figura 5.3: Atenuação experimental e numérica (Relaxação com *damping*).

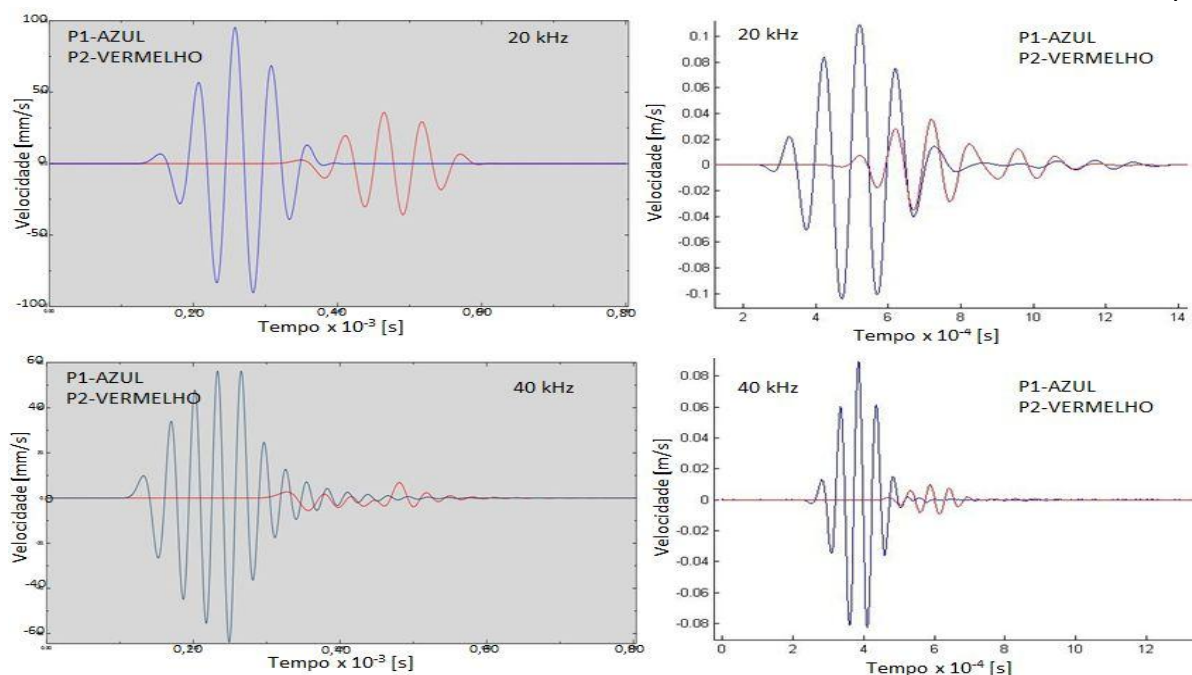


Figura 5.4: Atenuação experimental e numérica (DMA com *damping*).

Para o segundo caso de estudo, nota-se que as respostas para as duas estratégias estudadas são muito próximas, indicando que o parâmetro de *damping*, utilizado para ajustar o modelo é necessário para reproduzir com mais acurácia os resultados de atenuação.

6 CONCLUSÃO

O trabalho apresentado analisou os dados obtidos através de dois testes experimentais distintos em corpos de prova retirados da capa externa de um duto flexível feito de material polimérico. Os testes foram feitos no domínio tempo através do ensaio de relaxação, e outro no domínio da frequência, através de análise dinâmico mecânica, dentro das especificações de normas. Foram elaborados modelos numéricos baseado em uma geometria e condições de contorno análogas aos do teste experimental realizado por Groth, 2016. Os dados dos ensaios nos corpos de prova foram utilizados como entrada nos modelos de relaxação, DMA, relaxação com *damping* e DMA com *damping*.

A utilização do parâmetro de *damping* (amortecimento) artificial mostrou-se muito mais eficiente, e necessário, nas frequências utilizadas em ENDs visto que propagou a atenuação devidamente, como mostrado nas frequências estudadas neste trabalho. Assim, demonstrou-se que apesar do fato que o material possui efeitos dissipativos em seu modelo de material, usando dados experimentais de viscoelasticidade, ainda é necessário e importante usar um amortecimento artificial. Este governou os efeitos dissipativos sobre o material.

Foi observado que alimentando o *software* apenas com informações retiradas dos tradicionais ensaios nos domínios tempo e frequência, não foi possível estabelecer um modelo numérico que obtivesse atenuações próximas às obtidas através de experimento. Acredita-se que isto seja devido a não-linearidade do material (não permitindo extrapolação do modelo) e/ou a utilização de dados advindos dos ensaios tradicionais de relaxação e DMA. O ensaio de relaxação não captura diretamente a dependência da frequência de excitação. Porém, o DMA, apesar de capturar esta dependência, possui limitação do equipamento. Os equipamentos de ensaio DMA normalmente possuem capacidade máxima a 100Hz (máxima necessária indicada em normas). Ou seja, uma frequência muito baixa quando comparada com as ordens de grandeza utilizadas em ENDs.

Como trabalhos futuros, sugere-se que testes experimentais sejam feitos em busca de vinculá-los de maneira mais direta à quantificação do β_R e a faixa de frequência de

trabalho/equipamento. Além disto, pode-se estudar os efeitos de material submerso em fluido e as diferenças de abordagens no domínio tempo e frequência condizentes com o equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abaqus (2014) “**ABAQUS Documentation**”, Dassault Systèmes, Providence, RI, USA.

Graff K. F.; “**Wave Motion in Elastic Solids**”, Dover Publications, 1975.

Groth E. B.; “**Propagação de ondas de tensão em hastes retangulares no intervalo de frequência de (0;100 [kHz])**”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

Auld, A. B. “**Acoustic Fields and Waves in Solids**”, Vol. 1, John Wiley and Sons Inc, 1973.

dos Santos, M. J. F. “**Ondas ultra-sonoras guiadas na caracterização e controlo não destrutivo de materiais**”, Doutorado, Universidade de Coimbra, 2008.

Moore P.O; Miller R.K.; Hill E. V.K; “**Acoustic emission testing – Nondestructive testing handbook**”, 3ª edição, American Society for Nondestructive Testing, 2005.

Rose, J. L.; “**Ultrasonic Guided Waves in Solid Media**”, Cambridge University Press, 2014.

Callister, W. D. J.; “**An Introduction to Materials Science and Engineering**”, John Wiley & Sons Ltd, 7th edition, 2007.

Sweeney, J.; Ward, I. M.; “**An introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers**”, John Wiley & Sons Ltd. 2nd edition, 2004.

Pagliosa, C.; “**Determinação experimental de Propriedades Viscoelásticas de Material Polimérico**”, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

Vassoler, J. M.; “**Modelos Constitutivos Variacionais de Viscoelasticidade e Viscoplasticidade para Materiais Termoplásticos Submetidos a Deformações Finitas**”, Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

Christensen, R. M.; “**Theory of Viscoelasticity – An Introduction**” Academic Press, 2nd edition, 1982.

Ferry, J. D.; “**Viscoelastic Properties of Polymers**”, John Wiley & Sons Ltd, 3rd edition, 1980.

Hughes, T. J. r; Simo J.C.; “**Computational Inelasticity**”, Springer-Verlag New York, Vol.7, 1998.

Taylor, R. L.; “**Thermomechanical Analysis of Viscoelastic Solids**” International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 2, 45-59, 1970.

Bathe, K.J; Wilson E.L.; “**Numerical Methods in Finite Element Analysis**”, 2nd Edition, 2014.

Alleyne D.; Cawley P.; “**A two-dimensional Fourier Transform method for the measurement of propagating multicode signals**”, Journal of Acoustical Society of America, 1990.

Pappalardo, S.; “**Propagazione di Onde Guidate in um Riser Flessibile**” Tesi di Laurea, Università degli Studi di Parma, 2015-2016.

Anexo A1 – Esquema de funcionamento da função Tone Burst [Radke, 2016]

A excitação utilizada no modelo numérico é chamada de função *Tone Burst*. Amplamente utilizada em ENDS, essa função é modulada por uma envoltória função Gauss ou uma harmônica. Com esse método é possível excitar uma banda de frequências conhecidas e bem definidas, facilitando a análise dos modos específicos devido as suas frequências características de ativação. É possível definir duas características desta perturbação: frequência e número de ciclos [Alleyne e Cawley, 1990].

Após obter o sinal no espaço e tempo a FFT (*Fast Fourier Transform*) sob ambas variáveis com o *software* Matlab, resultando em uma análise espectral no espaço e no tempo, que é passível de sobreposição às curvas de dispersão, que possuem as mesmas dimensões do espectro produzido pela FFT. Possibilita-se então a identificação dos modos de propagação da análise. A figura A1.1 apresentada, ilustra em duas dimensões o funcionamento da FFT. O campo (A) representados dados organizados em uma matriz que contém deslocamento no tempo, do ponto de posição x_1 e x_2 , na primeira e segunda coluna respectivamente. O campo (B) representa a matriz após a aplicação da transformada de Fourier na direção do tempo. O campo (C) é a matriz como a FFT aplicada sobre as duas direções. Quando graficada, a matriz de magnitude pode ser sobreposta às curvas de dispersão associadas aos modos.

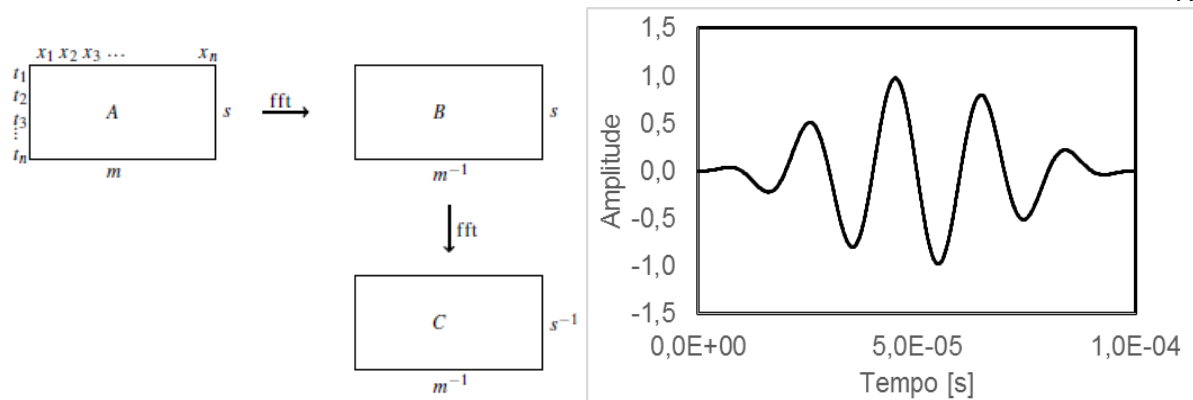


Figura A1.1: (a) Esquema demonstrativo da geração da função FFT2d, s e m indicam as unidades em segundos e metros da variação temporal e espacial respectivamente. (b) Função *Tone Burst*, com 5 ciclos e frequência em 50kHz [Radke,2016].

Anexo A2 – Metodologia para o cálculo da atenuação do sinal [Groth,2016]

Quando um meio é dito não idealizado, ele é chamado de não conservativo, pois sua energia mecânica, não é conservada durante a propagação, gerando uma atenuação. É comum que ao mesmo tempo, vários mecanismos de dissipação de energia estejam agindo em escala atômica e escalas maiores. O fenômeno termoelástico de dissipação está ligado à deformação plástica, interações com trincas e interações com movimentos das deslocações do material [Eagle, 2005]. Também a histerese causa atenuação do sinal de amplitude da onda, assim como perdas por efeitos viscosos, que podem ser mensurados através da equação B.1 [dos Santos, 2008]

$$\alpha_v = \frac{\eta \omega^2}{2c^2 \rho} \quad (\text{A2.1})$$

Onde η é a viscosidade do meio [Ns/m²], e c é a velocidade de propagação, ρ é a densidade e ω é a frequência angular.

Paralelamente, a atenuação mencionada anteriormente, no sinal, pode ser calculada seguindo o procedimento mostrado a seguir, e ilustrado pela figura B.1

$$\text{Amplitude 1} = 0,01317 - (-0,01293) = 0,0261;$$

$$\text{Amplitude 2} = 0,01094 - (-0,01078) = 0,02172;$$

$$\text{Distância} = c \cdot (0,0009779 - 0,0002023) = 3,91[\text{m}];$$

$$\alpha = (1 / \text{Distância}) \cdot (\ln(\text{Amplitude 1} / \text{Amplitude 2})) = 0,04697 [1/\text{m}];$$

$$\alpha_{\text{dB}} = 8,6 \cdot \alpha = 0,4039 [\text{dB}/\text{m}];$$

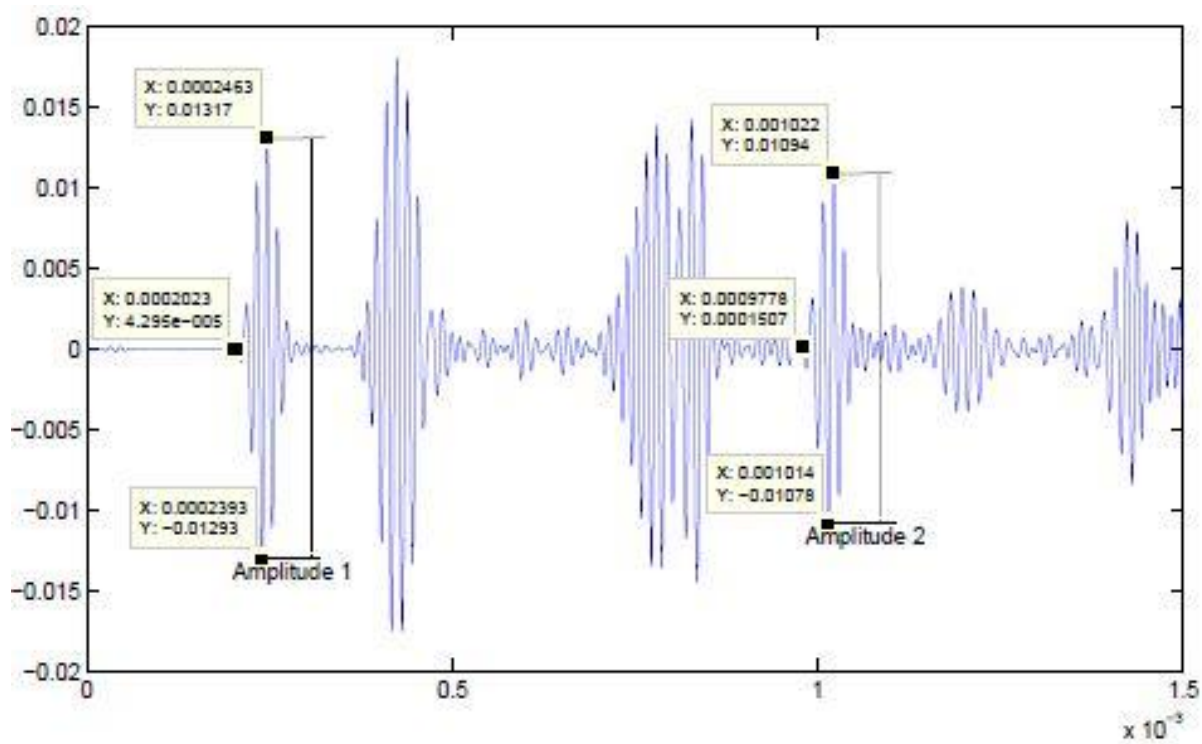


Figura A2.1: Análise do decaimento do sinal a 0 bar [Groth, 2016]

Apêndice A – Manufatura dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizados para este trabalho foram retirados de uma capa externa de uma linha flexível. Após o corte de um pedaço da capa provida pelo GMAp, esse foi levado até o LAMEF UFRGS, onde foi colocado em uma máquina de corte através de jato de água, para que o corte fosse preciso e sem alterar as características do material, como acontece em procedimentos de corte que elevam a temperatura.



Figura A.1: Procedimento de corte através de jato de água

Após a finalização dos cortes, os corpos de prova são destacados e dentre eles foram escolhidos e medidos novamente conforme tabela C.1. Nota-se que existe uma dispersão maior na espessura devido ao processo de vulcanização da capa do *riser*.



Figura A.2: Corpos de prova finalizados

Corpo de prova	Espessura [mm]	Largura [mm]	Comprimento [mm]
Relaxação 1	7,1	13,1	55,1
Relaxação 2	7,8	13,1	55,2
Relaxação 3	7,7	13,1	55,1
DMA 1	7,3	13,2	55
DMA 2	7,1	13,1	55,2
DMA 3	7,2	13,1	55,2
DMA 4	7,5	13	55,1
DMA 5	7,4	13,1	55

Tabela A.1: Medições dos corpos de prova selecionados

Apêndice B – Maquinário utilizado para os ensaios de relaxação e DMA

A máquina de ensaios utilizada é uma ElectroForce® 3200 Serie III, com as características reportadas na tabela A1.1

Força máxima aplicável	450 N
Deslocamento máximo	13 mm ($\pm 6,5$ mm)
Frequência máxima	300 Hz
Máxima frequência em DMA	200 Hz
Variação de temperatura	-150°C a 315° C

Tabela B.1: Características da maquina de ensaios

O conjunto de equipamentos utilizados em conjunto com a máquina é mostrado na figura B.1.

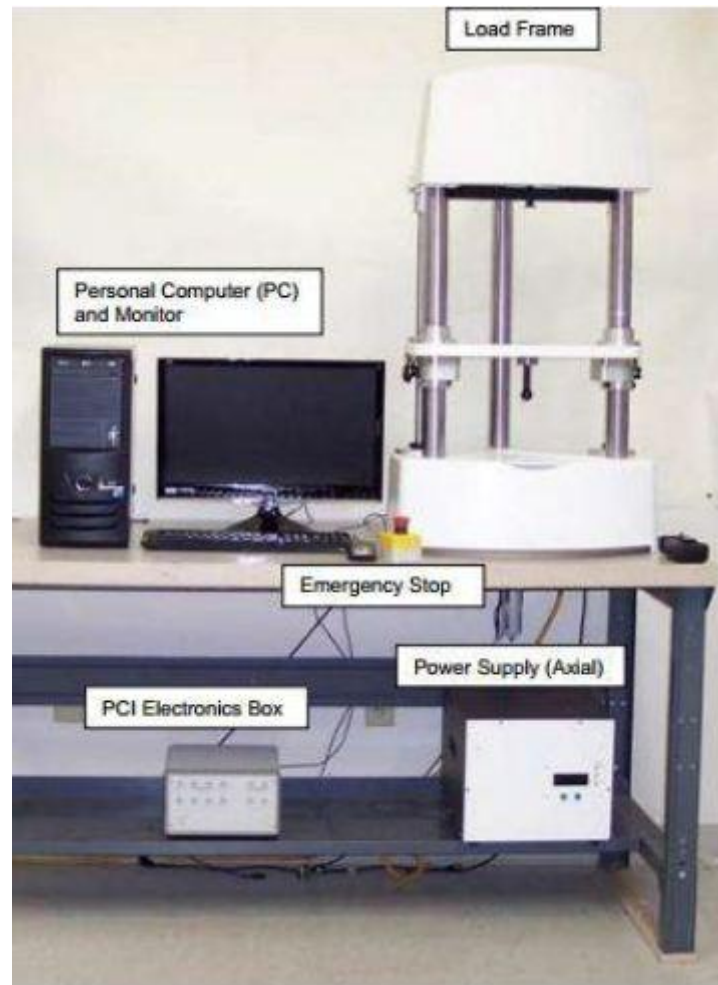


Figura B.1: Conjunto utilizado para funcionamento do ensaio.