



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Avaliação das propriedades elásticas de materiais a elevada temperatura pela técnica de excitação por impulso**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

**Autor**

**Ricardo José Carvalho Geraldo**

**Orientador**

**Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho**

**Júri**

**Presidente**

**Professor Doutor Ana Paula Bettencourt Martins Amaro**  
**Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**

**Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho**  
**Professor Associado da Universidade de Coimbra**

**Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes**

**Vogais**

**Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**

**Coimbra, Julho, 2013**

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

Aos meus pais.  
À minha família.  
Ao avô Já.

## **Agradecimentos**

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento e um simples obrigado nunca vai ser suficiente.

Em primeiro lugar, agradeço ao Senhor Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho, orientador desta dissertação, pela disponibilidade que sempre demonstrou para me auxiliar ao longo deste trabalho e pelos conhecimentos transmitidos.

Aos meus colegas e amigos, pelo companheirismo, espírito e amizade com que me brindaram ao longo destes anos, estando sempre presentes tanto nas horas boas e de diversão como nas de maior dificuldade.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica que estiveram sempre disponíveis para ajudar e esclarecer dúvidas que fossem surgindo.

Aos meus pais, pelo apoio em tudo e pela educação e valores transmitidos com que me presenteiam todos os dias.

À minha família que sempre me ajudou em tudo e esteve presente neste percurso.

A todos, um sincero e profundo OBRIGADO.

## Resumo

O objectivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia que, utilizando a técnica de medida de excitação por impulso, permita avaliar a influência de altas temperaturas nas propriedades elásticas dos materiais. Esta técnica é já utilizada no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra para o mesmo fim, mas à temperatura ambiente ou próximas desta.

São feitas modificações no método existente, de forma a contornar as adversidades causadas pela temperatura elevada a que os materiais são submetidos, sendo estas devidamente validadas.

Por fim, é avaliada a influência de elevadas temperaturas nas propriedades elásticas de dois materiais distintos e verificada a coerência e precisão dos resultados obtidos pelo sistema desenvolvido.

A montagem experimental que foi desenvolvida mostrou-se adequada para a realização de ensaios entre a temperatura ambiente e 200 °C. A actual limitação quanto ao valor de temperatura máxima admissível está relacionada com o tipo de sensores que foi usado para medir o movimento vibratório.

A comparação de valores medidos pela técnica implementada com outros obtidos por técnicas alternativas e também com resultados que estão disponíveis na literatura permitiu atestar a fiabilidade dos resultados obtidos.

**Palavras-chave:** Excitação por impulso, Altas temperaturas, propriedades elásticas, Implementações, Sistema desenvolvido, Temperatura máxima, Fiabilidade dos resultados.

## Abstract

The main objective of this work is to develop a method that, using a measure technique of exiting by impulsion, allows us to evaluate the influence of high temperatures on the elastic properties of the materials. This technique is already used in the Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra for the same purpose, but at ambient temperature or temperatures close to those.

There are made implementations on the existing method, with the porpoise to overcome the adversities caused by the high temperatures that the materials are subjected to, validating the same.

At the end, the influence of the high temperatures on the elastic properties of two different materials is evaluated, and studied the occurrence of precision on the results obtained by the developed system.

The experimental assembly developed showed to be adequate for the realization of the tests with temperatures between the ambient temperature and 200°C. The current limitation witch the maximum temperature was matter, is related with the type of sensors that were used to measure the vibration movement.

Comparing the values obtained by the new technic, by alternative technics and also with results that are available in the literature, permitted us to test the liability of the results.

**Keywords** Exiting by impulsion, High temperatures, elastic properties, Implementations, Developed system, Maximum temperature, Liability of the results.

---

## Índice

Índice de Figuras.....	v
Índice de Tabelas .....	vii
Simbologia e Siglas.....	ix
Simbologia.....	ix
Siglas .....	x
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica.....	3
2.1. Módulos de Elasticidade .....	3
2.2. Métodos de caracterização .....	4
2.2.1. Análise Estática .....	4
2.2.2. Análise Dinâmica .....	10
2.3. Motivação da Presente Dissertação .....	17
3. Descrição da metodologia experimental .....	19
3.1. Suporte Teórico da Técnica.....	19
3.2. Adaptações do Equipamento .....	22
3.2.1. Forma de Excitação .....	24
3.2.1. Sistema de Apoio dos Provetes .....	26
3.2.2. Transdutores .....	29
3.2.3. Colagem .....	31
3.2.4. Ligação eléctrica.....	32
3.3. Resumo do Procedimento de Ensaio com Variação da Temperatura.....	33
3.3.1. Materiais e Provetes Testados .....	35
3.3.2. Módulo de Elasticidade Longitudinal.....	39
3.3.3. Módulo de Elasticidade Transversal.....	40
3.3.4. Coeficiente de Poisson.....	41
4. Apresentação e Discussão dos Resultados .....	42
4.1. Frequências Naturais e Modos Normais de Barra Uniforme .....	42
4.2. Liga de Alumínio 5083 .....	43
4.2.1. Módulo de elasticidade longitudinal.....	43
4.2.2. Módulo de Elasticidade Transversal.....	47
4.2.3. Coeficiente de Poisson.....	50
4.3. Poliamida Akulon Ultraflow K – FG0, PA6 – GF50 .....	52
4.3.1. Módulo de Elasticidade Longitudinal.....	52
5. Conclusões.....	59
Referências Bibliográficas .....	61
Anexo A .....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Máquina de ensaio de tracção universal.....	4
Figura 2.2. Diagrama Tensão-Deformação (adaptado [2]).....	5
Figura 2.3. Diagrama Tensão-Deformação regime não-linear (adaptado [2]).....	6
Figura 2.4. Curva carga-descarga e rigidez de contacto (adaptada [8]).....	8
Figura 2.5. Esquema básico para a medição da frequência de ressonância flexional. (adaptado [10]).....	14
Figura 3.1. Tubo de direccionamento das esferas (vista exterior).....	24
Figura 3.2. (a) Tubo de direccionamento das esferas, nos ensaios de frequência de ressonância principal longitudinal; (b) Tubo de direccionamento das esferas, nos ensaos de frequência de ressonância principal transversal.....	25
Figura 3.3. Furos e fio de suspensão do provete.....	26
Figura 3.4. [Linhas nodais para ensaios de vibração torsional].....	28
Figura 3.5. Base de suporte nas linhas nodais.....	29
Figura 3.6. Esquema representativo da montagem para ensaios de frequência de ressonância à flexão.....	34
Figura 3.7. Esquema representativo da montagem para ensaios de frequência de ressonância à torção.....	34
Figura 3.8. Dimensões do provete A.....	37
Figura 3.9. Dimensões do provete B.....	37
Figura 3.10. Dimensões do provete C.....	38
Figura 3.11. Posicionamento do sensor e ponto de impacto.....	40
Figura 4.1. [Variação do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura].....	45
Figura 4.2. [Ensaos de tracção realizados no DEM à temperatura ambiente na liga de alumínio 5083].....	46
Figura 4.3. Propriedades mecânicas da liga de alumínio 5083 (adaptado [14]).....	46
Figura 4.4. Variação do módulo de elasticidade transversal com o aumento da temperatura. .....	50
Figura 4.5. Variação do coeficiente de Poisson com o aumento da temperatura.....	51
Figura 4.6. Variação do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura.....	54
Figura 4.7. Ensaio de tracção realizado no DEM à temperatura ambiente no material Akulon Ultraflow K-FG0.....	55

---

Figura 4.8. Ensaio de tracção realizado no DEM a 210°C no material Akulon Ultraflow K-FG0.....	55
Figura 4.9. Propriedades mecânicas do material Akulon Ultraflow K-FG0 (adaptado [15]). .....	56
Figura 4.10. [Evolução do módulo de elasticidade da poliamida com a temperatura (adaptado [19])].....	57



---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Comparativo de características de técnicas de medição de propriedades elásticas.....	17
Tabela 3.1. Frequências naturais e modos normais de barras uniformes.....	20
Tabela 3.2. Ensaio realizados com extensómetro eléctrico, com provete suspenso pelos fios ligados ao extensómetro.....	27
Tabela 3.3. Ensaio realizados com extensómetro eléctrico, com o provete apoiado nos pontos nodais. ....	27
Tabela 3.4. Ensaio realizados com extensómetro eléctrico, com o provete suspenso no sistema de posicionamento vertical.....	28
Tabela 3.5. Ensaio realizados com extensómetro eléctrico. ....	30
Tabela 3.6. Ensaio realizados com sensor piezoeléctrico do tipo bimorfo.....	30
Tabela 3.7. Ensaio realizados com sensor piezoeléctrico do tipo bimorfo, colado com silicone de alta temperatura. ....	31
Tabela 3.8. Ensaio realizados com sensor piezoeléctrico do tipo bimorfo, colado com silicone de alta temperatura e cabos de alta temperatura.....	32
Tabela 3.9. Propriedades da liga de alumínio 5083.....	35
Tabela 3.10. Propriedades da poliamida <i>Akulon Ultraflow K – FG0, PA6 – GF50</i> .....	36
Tabela 3.11. Resumo dos ensaios efectuados em cada provete .....	38
Tabela 4.1. Valores das frequências naturais teóricos e experimentais.....	42
Tabela 4.2. Ensaio realizados à temperatura ambiente.....	43
Tabela 4.3. Ensaio realizados a 50°C.....	43
Tabela 4.4. Ensaio realizados a 100°C.....	44
Tabela 4.5. Ensaio realizados a 150°C.....	44
Tabela 4.6. Ensaio realizados a 200°C.....	44
Tabela 4.7. Ensaio realizados à temperatura ambiente.....	48
Tabela 4.8. Ensaio realizados a 50°C.....	48
Tabela 4.9. Ensaio realizados a 100°C.....	48
Tabela 4.10. Ensaio realizados a 150°C.....	49
Tabela 4.11. Ensaio realizados a 200°C.....	49
Tabela 4.12. Evolução do coeficiente de Poisson com o aumento da temperatura.....	51
Tabela 4.13. Ensaio realizados à temperatura ambiente.....	52

---

Tabela 4.14. Ensaio realizados a 50°C .....	53
Tabela 4.15. Ensaio realizados a 100°C .....	53
Tabela 4.16. Ensaio realizados a 150°C .....	53
Tabela 4.17. Ensaio realizados a 200°C .....	54

---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$A_s$  – Área de secção do provete

$A_i$  – Área real de contacto

$A$  – Factor de correcção empírico

$B$  – Constante dependente da geometria do indentador

$B$  – Termo dependente de forma

$\beta$  – Coeficiente dependente da geometria do indentador

$b$  – Largura

$\Delta E$  – Variância do módulo de elasticidade

$\Delta G$  – Variância do módulo de elasticidade transversal

$\Delta l$  – Variação do comprimento

$E$  – Módulo de elasticidade

$E_R$  – Módulo de elasticidade reduzido

$\varepsilon$  – Deformação longitudinal

$F$  – Força

$f_f$  – Frequência de ressonância principal à flexão

$f_t$  – Frequência de ressonância principal à torção

$G$  – Módulo de elasticidade transversal

$h$  – Profundidade de penetração

$h_f$  – Profundidade de penetração final

$h_{m\acute{a}x}$  – Profundidade de penetração máxima

$I(x)$  – Momento de inércia da secção transversal

$k$  – Constante de separação

$L$  – Comprimento

$L_u$  – Distância entre os dois transdutores

$l_0$  – Comprimento inicial do provete

$m$  – Massa

$m_i$  – Constante dependente da geometria do indentador

$m(x)$  – Massa por unidade de comprimento

$\omega$  – Frequência natural de vibração

$\rho$  – Densidade

$\sigma$  – Tensão aplicada

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

$P$  – Carga

$S$  – Rigidez

$T$  – Temperatura

$T_1$  – Factor de correcção dimensões finitas

$T_u$  – Tempo de transição

$t$  – Tempo

$t$  – Espessura

$V$  – Velocidade longitudinal do som

$x$  – Coordenada na direcção longitudinal da viga

$y$  – Deslocamento transversal da viga

## **Siglas**

ASTM – American Society for Testing and Materials

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FFT – Fast Fourier Transform

## 1. INTRODUÇÃO

As propriedades elásticas dos materiais são de elevada importância não só a nível de projecto mecânico, mas também a nível de controlo de qualidade dos mesmos, dado que existe uma relação única com a sua estrutura e o seu processamento. Para além disso existem correlações com outras propriedades mecânicas.

Existem diversos métodos para medir estas propriedades. Estes podem ser divididos em dois grupos, métodos estáticos, como o ensaio de tracção, e métodos dinâmicos, como a técnica de excitação por impulso.

Esta técnica de excitação por impulso já é utilizada no DEM, mas apenas para fazer ensaios à temperatura ambiente, e foi pontualmente utilizada com uma variação de temperatura entre 0°C e 50°C. O objectivo da presente dissertação é pois tirar partido da experiência já existente no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra para estender a utilização da técnica de excitação por impulso de forma a estudar a variação das propriedades mecânicas dos materiais com a temperatura.

Consequentemente, o que é proposto envolve alterações nos equipamentos e nos procedimentos utilizados nos ensaios. Para validar estas alterações são feitos ensaios comparativos pela técnica de excitação por impulso entre os equipamentos e procedimento utilizado até agora, e os que serão usados.

O procedimento experimental é montado com as adaptações e calibrado, sendo posteriormente efectuados ensaios experimentais com a técnica adaptada, variando a temperatura, até aos 200°C.

A validação da técnica de excitação por impulso adaptada a altas temperaturas, é feita aplicando a mesma em materiais cujas propriedades elásticas são conhecidas. Sendo assim é possível a comparação dos resultados obtidos, com os resultados dos ensaios de tracção e com os valores encontrados na literatura.

De forma a tornar a leitura desta tese de dissertação de mestrado mais apelativa e simples, a mesma foi dividida em seis capítulos.

O primeiro, a introdução, é onde se apresenta o tema abordado. No capítulo dois é feita uma revisão bibliográfica onde são apresentados os diversos tipos de métodos para a medição das propriedades elásticas. No capítulo três, é explicada a metodologia experimental. A adaptação dos equipamentos, a validação dos mesmos e o procedimento. No capítulo quatro, são apresentados os resultados obtidos pela técnica de excitação por impulso a elevadas temperaturas e a discussão dos mesmos. No capítulo cinco, apresenta-se uma conclusão geral e sugestões para estudos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Módulos de Elasticidade

Os módulos de elasticidade são propriedades mecânicas de enorme importância, tanto a nível de projecto como no controlo de qualidade de materiais. Estes são afectados pela composição, pelo processamento e dano do material e relacionam-se com outras propriedades.

Existem diferentes técnicas para determinar estas propriedades e podem ser divididas em dois tipos, estáticas e dinâmicas.

A técnica estática clássica, ensaio de tracção, tem como base a relação do alongamento da amostra em função da carga que lhe é aplicada, designando-se por estática porque utiliza velocidades de deformação quase nulas.

As técnicas dinâmicas, por sua vez, são fundamentadas na relação entre as propriedades elásticas de um material e o comportamento vibratório que este apresenta, isto é, a frequência de ressonância depende directamente das propriedades elásticas dos materiais. Esta técnica, ao ser uma técnica não destrutiva, tem vantagens relativamente aos ensaios estáticos. Nomeadamente, o facto de uma amostra ser suficiente para determinar várias constantes de elasticidade, visto que no caso da técnica estática, habitualmente, são necessários vários provetes com diferentes geometrias para diferentes módulos de elasticidade. É precisa no caso de amostras de tamanho reduzido e de materiais frágeis e é possível empregá-la na determinação destes módulos no caso de materiais isotrópicos, anisotrópicos, ortotrópicos, etc. [1]

## 2.2. Métodos de caracterização

### 2.2.1. Análise Estática

#### 2.2.1.1. Ensaio de Tração

Este tipo de ensaio consiste na aplicação de uma força na direção axial do provete de material que se pretende testar, este é alongado até a ruptura.

O provete é fixado nas suas extremidades nas garras de fixação da máquina de tração, esta vai aplicar uma carga no provete que aumenta gradualmente e registar a força correspondente a cada diferente alongamento do material. O alongamento normalmente é medido por um extensómetro [2]. Na Figura 2.1 está um exemplo ilustrativo deste tipo de máquinas.

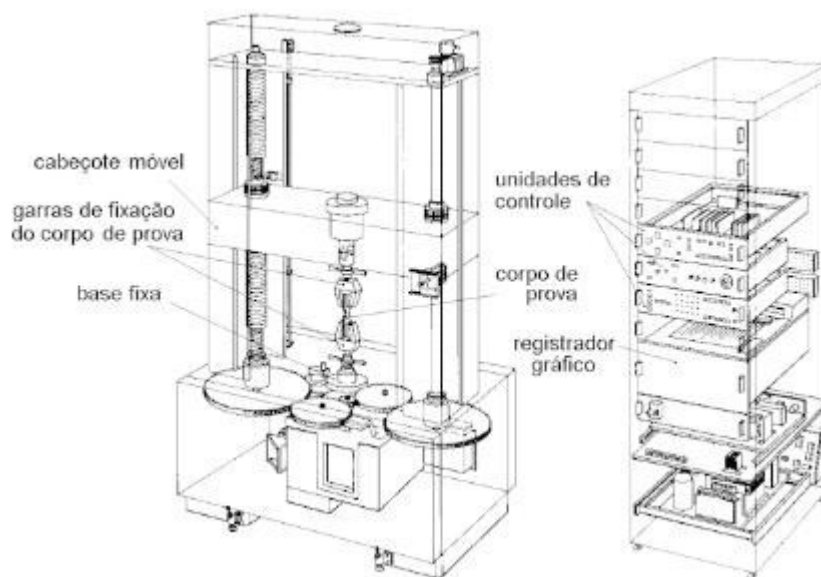


Figura 2.1. Máquina de ensaio de tração universal.

A tensão nominal que é aplicada é dada pela equação (2.1).

$$\sigma = \frac{F}{A_s} \quad (2.1)$$



Onde:

$\sigma$  = Tensão aplicada ( $Pa$ )

$F$  = Força ( $N$ )

$A_s$  = Área de secção do provete não deformado ( $m^2$ )

A deformação longitudinal é dada pela equação (2.2).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

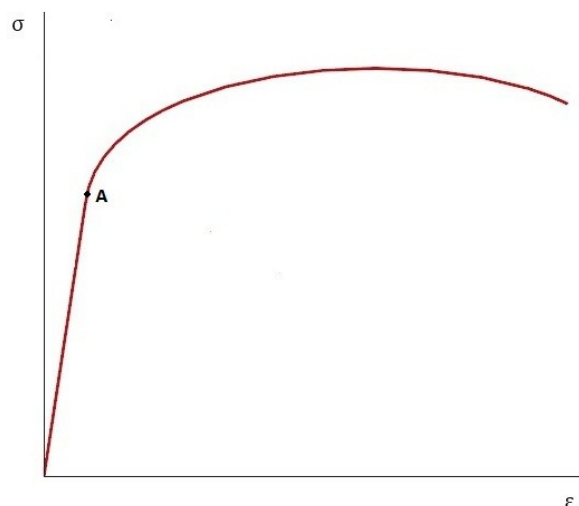
Onde:

$\varepsilon$  = Deformação longitudinal

$\Delta l$  = Variação do comprimento ( $m$ )

$l_0$  = Comprimento inicial do provete ( $m$ )

Este tipo de equipamento ao registar os valores da tensão aplicada com a deformação permite traçar um digrama, chamado diagrama tensão-deformação, como demonstrado na Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Diagrama Tensão-Deformação (adaptado [2]).

Na Figura 2.2 é possível distinguir o domínio elástico, até ao ponto A, do domínio plástico. Até este ponto, quando a carga é aplicada, a deformação elástica mantém-se constante e é totalmente recuperada após lhe ser retirada a carga.[2]

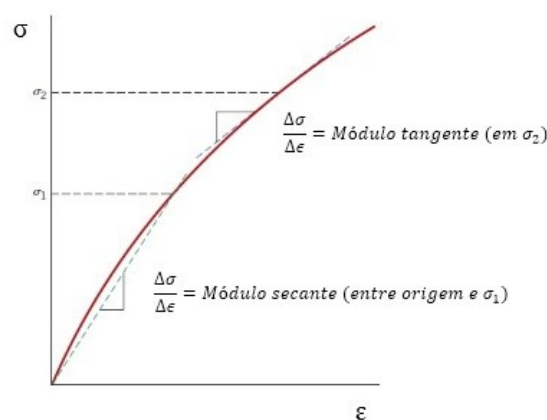
No domínio elástico os materiais têm um comportamento elástico linear, ou seja, o módulo de elasticidade pode ser calculado através da lei de Hooke, representada na equação (2.3).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.3)$$

Esta lei descreve o comportamento experimental dos materiais entre a deformação ( $\varepsilon$ ) e a tensão ( $\sigma$ ), quando estes são proporcionais, sendo o módulo de elasticidade “ $E$ ” é a constante dessa proporcionalidade.

Assim sendo, o módulo de elasticidade corresponde ao declive da recta no domínio elástico do diagrama que se obtém nos ensaios de tracção. [2]

Para materiais que não apresentam este comportamento linear na parte elástica inicial da curva tensão-deformação, não é possível determinar o módulo de elasticidade pelo método referido acima. Para comportamentos não-lineares nesta parte da curva são usados o módulo tangente e o módulo secante. O módulo secante é o declive de uma recta secante que é traçada a partir da origem até um ponto especificado da curva tensão-deformação. O módulo tangente é o declive da curva tensão-deformação num nível de tensão específico. Na Figura 2.3 está ilustrado como se determinam estes módulos.[2]



**Figura 2.3.** Diagrama Tensão-Deformação regime não-linear (adaptado [2]).

A precisão deste tipo de ensaios depende de máquina para máquina, o erro pode atingir os 15%, isto porque dependem do módulo de elasticidade dos acessórios de medida, da rigidez do banco de ensaios da máquina, dos arredondamentos e como já referido, da própria máquina [3]. O erro relativamente elevado destes ensaios está relacionado com a dificuldade associada à medição dos valores de deformação que são extremamente baixos, excepto se se usarem provetes de elevada dimensão; todavia neste caso existem limitações de várias ordens, nomeadamente: limitação da máquina de ensaios, limitação do curso do extensómetro e limitações associadas à obtenção de provetes de dimensão elevada.

### **2.2.1.2. Técnica de Indentação Instrumentada**

A indentação instrumentada é uma técnica que permite estimar características mecânicas dos materiais.

Esta técnica é baseada nos ensaios de dureza com instrumentos adequados que possibilitam medir a variação da força que é aplicada ao indentador e ao mesmo tempo o deslocamento relativo do mesmo em relação à superfície da amostra.

O ensaio clássico desta técnica consiste em obter a dureza ao dividir a força máxima aplicada pela extensão da cratera provocada na superfície do provete.

Este tipo de técnica apresenta um procedimento simples, permite a utilização de amostras de tamanho reduzido e apresenta características para ser considerado um ensaio não destrutivo [4].

Esta técnica é também utilizada para obter propriedades elásticas e plásticas dos materiais, sendo possível encontrar diversas referências na literatura. No DEM existem já diversos trabalhos que abordam este tema [5,6,7].

A técnica de indentação instrumentada produz uma curva da carga ( $P$ ) em função da profundidade de penetração ( $h$ ), normalmente denominada curva de carga – descarga.

Na fase de carregamento ocorrem deformações plásticas e pode-se esperar que a fase de descarga seja perfeitamente elástica. Stillwell e Tabor (1961) testaram esta hipótese, centrando as suas observações na recuperação elástica produzida por indentadores após a descarga em materiais com comportamento elasto-plástico. Este estudo permitiu visualizar que as indentações residuais mantinham a forma geral do indentador, apesar de distorcidos

devido à recuperação elástica podendo assim separar a deformação plástica da deformação elástica. Foi também observado que o raio de contacto entre o material em estudo e o indentador não se altera após vários ciclos de carga-descarga [8].

Desta forma, conhecido o módulo de elasticidade do indentador também era possível determinar o módulo de elasticidade do material da amostra.

O declive da curva de descarga pode ser obtido por  $\partial P/\partial h$  no ponto de carga máxima, como ilustrado na Figura 2.4, e representa a rigidez do material. O método Oliver-Pharr [9] considera que a curva de descarga pode ser ajustada pela expressão (2.4).

$$P = B \cdot A_i \cdot (h - h_f)^{m_i} \quad (2.4)$$

onde,  $h$  é a profundidade de penetração,  $h_f$  é a profundidade final,  $B$  e  $m_i$  são constantes que dependem da geometria do indentador e do tipo de material a ser analisado e  $A_i$  é a área real de contacto. Logo, a rigidez do material ( $S$ ) é dada pela equação (2.5) e como é possível ver na Figura 2.4.

$$S = \left( \frac{\partial P}{\partial h} \right) = B \cdot A \cdot (h_{m\acute{a}x} - h_f)^{1-m_i} \quad (2.5)$$

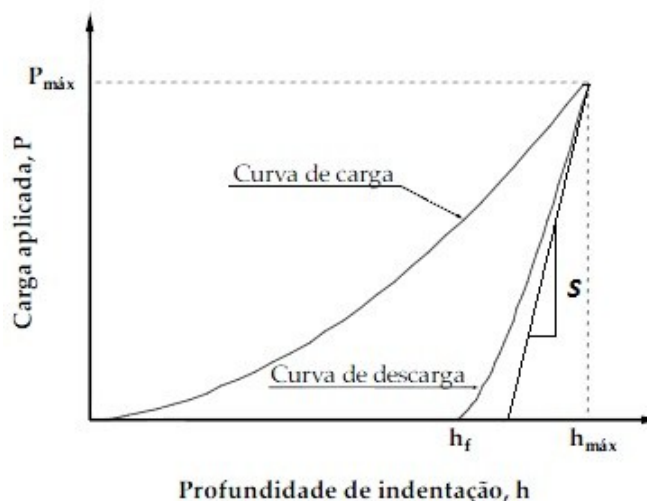


Figura 2.4. Curva carga-descarga e rigidez de contacto (adaptada [8]).

Onde  $h_{máx}$  é a profundidade de penetração quando a carga é máxima e  $h_f$  é a profundidade de penetração final.

O módulo de elasticidade reduzido do material é definido pela equação (2.6) [7].

$$E_R = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \quad (2.6)$$

Onde  $E_R$  é o módulo de elasticidade reduzido,  $E$  é o módulo de elasticidade do material e  $\nu$  o coeficiente de Poisson do mesmo.

Finalmente o módulo de elasticidade reduzido relaciona-se com a rigidez através da equação (2.7) [4].

$$E_R = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot \beta} \cdot \frac{S}{\sqrt{A_i}} \quad (2.7)$$

onde  $\beta$  depende da geometria do indentador.

Uma vez que tem de ser tido em conta não só a rigidez do material, mas também a rigidez do indentador [8], deve ser considerada a equação (2.8).

$$E_R = \frac{E}{(1 - \nu^2)} + \frac{E_i}{(1 - \nu_i^2)} \quad (2.8)$$

onde  $E_i$  e  $\nu_i$  são os módulos já referidos, mas agora relativos ao material do indentador.

O inverso da rigidez designa-se por complacência, ou seja,  $C = 1/S$ , e representa a capacidade de deformação elástica do sistema em função da carga aplicada. Logo, invertendo a equação (2.8), é obtida a equação (2.9) [7].

$$\frac{1}{E_R} = \frac{(1 - \nu^2)}{E} + \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i} \quad (2.9)$$

O módulo de elasticidade do material da amostra pode então assim ser encontrado em função do módulo de elasticidade do indentador e do módulo de elasticidade reduzido.

A técnica de indentação instrumentada permite ultrapassar várias das limitações antes apontadas aos ensaios de tracção. Contudo esta técnica também tem os seus problemas específicos, nomeadamente pelo facto de que na análise dos resultados é habitual supor-se o comportamento dos materiais como sendo isotrópico, a técnica só permite avaliar o módulo reduzido, não permitindo separar o valor do coeficiente de Poisson, a técnica baseia-se numa medição muito local e como tal tem limitações em materiais com microestrutura muito grosseira e em materiais compósitos.

### **2.2.2. Análise Dinâmica**

A análise dinâmica reúne um conjunto de várias técnicas que permitem medir várias propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade, módulo de elasticidade transversal e coeficiente de Poisson através da frequência natural de vibração de uma amostra de um dado material e com uma geometria adequada.

A relação entre estas frequências, as dimensões e a massa de uma amostra estão directamente ligadas às propriedades elásticas acima referidas.

Os métodos de análise dinâmica permitem ensaios realizados em amostras de pequenas dimensões, são rápidos, de fácil repetibilidade e não destrutivos, o que possibilita fazer várias medições com a mesma amostra [1].

Consoante as propriedades a medir, estes métodos utilizam três modos de vibração: longitudinal, transversal ou flexional e torsional. Onde os dois primeiros são utilizados para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal e o segundo para o módulo de elasticidade transversal e correspondentemente o coeficiente de Poisson.

Neste tipo de análise o processo experimental é feito em duas partes, uma onde é provocada a excitação do provete e obtidas as frequências de ressonância e posteriormente

a utilização destas mesmas frequências em expressões que relacionam as frequências com as propriedades elásticas e que permitem calcular os módulos pretendidos. [10]

### 2.2.2.1. Técnica de excitação por impulso

Esta técnica consiste em provocar um impacto no provete do material em estudo e o mesmo responde através de vibração livre nas suas frequências naturais de vibração de acordo com a geometria da amostra, a forma de apoio e a localização do ponto de impacto [10].

A norma ASTM E 1876 – 01 explica pormenorizadamente como deve ser realizado este tipo de técnica, abordando todos os parâmetros.

Para o cálculo dos módulos elásticos são utilizadas relações teóricas bem definidas e propostas pela norma [10]. Estas relações dependem das propriedades que se pretendem determinar e da geometria da amostra.

### Barras rectangulares excitadas à flexão

O módulo de elasticidade dinâmico é definido pela equação (2.10).

$$E = 0,9465 \left( \frac{mf_f^2}{b} \right) \left( \frac{L^3}{t^3} \right) T_1 \quad (2.10)$$

Onde:

- $E$  = Módulo de elasticidade ( $Pa$ ),
- $f_f$  = Frequência de ressonância do primeiro modo de flexão ( $Hz$ ),
- $m$  = Massa da barra ( $g$ ),
- $b$  = Largura da barra ( $mm$ ),
- $L$  = Comprimento a barra ( $mm$ ),
- $t$  = Espessura da barra ( $mm$ ),

- $T_1$  = Factor de correcção para o modo de flexão fundamental que depende da espessura finita da barra e do coeficiente de Poisson.

onde o factor de correcção  $T_1$  depende da relação entre a espessura da barra e o comprimento e do coeficiente de Poisson, garante um erro de precisão inferior 1% [3].

É dado pela equação (2.11).

$$T_1 = 1 + 6,585(1 + 0,0752\nu + 0,8109\nu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{L}\right)^4 - \left[ \frac{8,340(1 + 0,2023\nu + 2,173\nu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^4}{1,000 + 6,338(1 + 0,1408\nu + 1,536\nu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2} \right] \quad (2.11)$$

onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson.

O factor de correcção  $T_1$  pode ser simplificado se  $\frac{L}{t} \geq 20$ , caso isso aconteça pode ser utilizada a equação (2.12):

$$T_1 = \left[ 1,000 + 6,585 \left(\frac{t}{L}\right)^2 \right]. \quad (2.12)$$

### **Barras rectangulares excitadas à torção**

O módulo de elasticidade dinâmico é definido pela equação (2.13).

$$G = \frac{4Lmf_t^2}{bt} \left[ \frac{B}{(1 + A)} \right] \quad (2.13)$$

Onde:

$G$  = Módulo de elasticidade transversal (Pa),

$f_t$  = Frequência de ressonância do primeiro modo de torção (Hz),



$B$  é um termo que depende da geometria e é definido pela equação (2.14).

$$B = \left[ \frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4 \left( \frac{t}{b} - 2,52 \left( \frac{t}{b} \right)^2 \right) + 0,21 \left( \frac{t}{b} \right)^6} \right] \quad (2.14)$$

$A$  é um factor de correcção empírico que depende da razão da largura pela espessura do provete. Este factor pode ser omitido caso se admitam erros superiores a 2%. Este factor é definido pela equação (2.15).

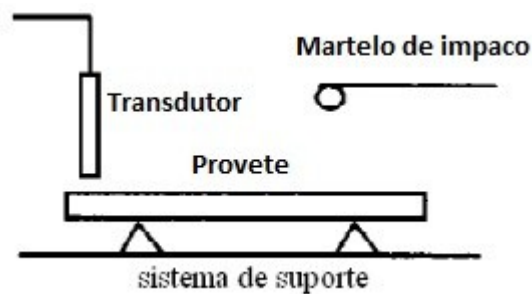
$$A = \frac{\left[ 0,5062 - 0,8776 \left( \frac{b}{t} \right) + 0,3504 \left( \frac{b}{t} \right)^2 - 0,0078 \left( \frac{b}{t} \right)^3 \right]}{\left[ 12,03 \left( \frac{b}{t} \right) + 9,892 \left( \frac{b}{t} \right)^2 \right]} \quad (2.15)$$

O coeficiente de Poisson é calculado relacionando  $E$  e  $G$  através da equação (2.16):

$$v = \left( \frac{E}{2G} \right) - 1 \quad (2.16)$$

### **Procedimento descrito na norma de suporte**

De forma sucinta, o impacto é provocado por um martelo de impacto sem danificar o provete, que se encontra num sistema de suporte, e induz um movimento vibratório. O transdutor regista estas vibrações e transforma-as em sinal eléctrico, podendo depois de um tratamento de dados adequado determinar-se a frequência de ressonância. A Figura 2.5 ilustra o processo descrito para um provete solicitado a vibrar em flexão.



**Figura 2.5.** Esquema básico para a medição da frequência de ressonância flexional. (adaptado [10]).

O provete deve estar apoiado nos pontos nodais, que se encontram a  $0,224L$  de cada extremidade e o local onde o provete deve sofrer o impacto deve ser o ponto de maior amplitude para excitar as frequências flexionais ou transversais.[10]

No caso das frequências torsionais, o provete deve estar apoiado nas linhas nodais, que se encontram, uma em  $0,5L$ , ou seja, a linha que marca metade do comprimento do provete a outra é a linha longitudinal que marca o meio da largura do provete.[10]

Com estas frequências e com as expressões que são disponibilizadas, é possível calcular o módulo de elasticidade, módulo de elasticidade transversal e coeficiente de Poisson.

Para a utilização desta técnica, e obter as frequências naturais pretendidas é necessária uma montagem experimental constituída por:

- Base de suporte
- Martelo de impacto (ou outro equipamento que provoque impacto no provete)
- Transdutor
  - Contacto (normalmente extensómetros eléctricos ou sensores piezoeléctricos)
  - Sem contacto (normalmente microfones acústicos)
- Sistema de condicionamento de sinal (amplificador, software de aquisição de dados e de análise de frequência)

Esta técnica apresenta várias características que tornam atractiva a sua utilização [1][3]:

- Ser não destrutiva;
- Permitir o cálculo dos diferentes módulos de elasticidade na mesma amostra;
- Simplicidade de execução;
- Elevada repetibilidade;
- Bem adaptada a materiais não isotrópicos.
- Reduzido erro;
- Facilmente adaptável à realização de ensaios com variação de temperatura.

#### **2.2.2.2. Técnica de varrimento de frequência**

Esta técnica é baseada nos mesmos princípios que a técnica de excitação por impulso, diferindo apenas na forma de excitação da amostra.

Neste caso o provete é excitado em vibração forçada impondo-lhe uma excitação de frequência variável, a curva de resposta é usada para identificar as frequências de vibração do mesmo. É utilizado um gerador de sinal que é ligado a um actuador de excitação, em contacto com o provete, que vai transformar este sinal eléctrico em vibração e um transdutor que regista a resposta vibratória do provete.

Neste método o provete pode ficar suspenso por fios ou nos pontos nodais. Caso se opte por o provete ficar suspenso por fios, este não deve ficar apoiado nos pontos nodais, mas sim entre os pontos nodais e a extremidade [3].

De forma a satisfazer melhor as soluções matemáticas estabelecidas o mesmo deve apresentar uma geometria de barra de secção transversal quadrada ou circular.

O parâmetro mais sensível nesta técnica é o acoplamento dos transdutores de excitação e recepção ao provete. Isto porque ao acoplar os transdutores pode ser alterada a massa do sistema e causar interferência nas frequências naturais de vibração. Logo deve ser garantido que o aumento da massa do sistema não cause uma alteração significativa, ou ainda que esta possa ter uma influência variável.

Quanto à análise de sinal esta técnica é semelhante à anterior. Uma variante desta técnica é utilizada em múltiplos equipamentos comerciais e é genericamente designada por Dynamic Mechanical Analysis (DMA).

### 2.2.2.3. Técnica de Ultra-som

Esta técnica também é não destrutiva, e consiste em emitir ondas de ultra-som e captar o seu eco. Existem algumas normas de suporte que contêm especificações sobre a técnica, como é o caso da norma ASTM C 597 – 02.

Esta técnica que se baseia na teoria de propagação da onda para medir a profundidade dos materiais, permite encontrar o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, uma vez que a velocidade de propagação da onda depende destas propriedades do material.

Existem duas vertentes neste método, uma onde a propagação da onda é feita através da espessura do provete, colocando um transdutor de pulso num das superfícies e no ponto oposto da superfície contrária um transdutor receptor, que é a mais comum. Na outra, a propagação e a recepção da onda são feitos na mesma superfície. [11]

A partir da velocidade longitudinal de propagação do som é possível calcular o módulo de elasticidade do meio de propagação através das equações referidas na norma de suporte. [12]

A velocidade longitudinal do som é obtida pela equação (2.17).

$$V = \frac{L_u}{T_u} \quad (2.17)$$

Onde:

$V$  = Velocidade longitudinal do som ( $m/s$ ),

$L_u$  = Distância entre os dois transdutores ( $m$ ),

$T_u$  = Tempo de transição ( $s$ ).

O módulo de elasticidade relaciona-se com a velocidade longitudinal do som pela equação (2.18):

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.18)$$

Onde:

$E$  = Módulo de elasticidade ( $Pa$ ),

$\rho$  = Densidade do material ( $Kg/m^3$ ),

$\nu$  = Coeficiente de Poisson.

Esta técnica é bastante simples, mas tem algumas desvantagens. O facto de só conseguir medir a velocidade longitudinal da onda e não a transversal impossibilita o cálculo do coeficiente de Poisson, tendo de ser estimado e não podendo ser obtido através deste método experimental. Pode apresentar diferenças entre resultados na ordem dos 20% [12]

### 2.3. Motivação da Presente Dissertação

A Tabela 2.1 resume as características das técnicas que foram anteriormente descritas de forma breve [1, 3, 5, 10, 13], evidenciando as vantagens da técnica de excitação por impulso.

**Tabela 2.1.** Comparativo de características de técnicas de medição de propriedades elásticas.

<i>Técnica</i>	<i>Ensaio de tracção</i>	<i>Indentação</i>	<i>Excitação por impulso</i>	<i>Ultra-som</i>
<i>Erro</i>	15%	2%-12%	< 2%	< 20%
<i>Tipo</i>	Destrutivo	Não-Destrutivo	Não-Destrutivo	Não-Destrutivo
<i>Materiais</i>	Principalmente isotrópicos	(*)	Todos	Todos
<i>Propriedades medidas</i>	Principalmente $E$	$E_R$	$E, G, \nu$	$E$
<i>Velocidade de reprodutibilidade</i>	Depende do equipamento	Depende do equipamento	Rápido	Rápido

\*No modelo de análise o comportamento do material é sempre considerado isotrópico. Atendendo a dimensão da indentação, esta técnica não é adequada ao estudo de materiais com microestrutura grosseira e compósitos.

No DEM, a técnica de excitação por impulso já é utilizada para medir propriedades mecânicas, como os módulos de elasticidade longitudinal e transversal.

Até ao momento esta técnica é normalmente utilizada para fazer ensaios à temperatura ambiente. Esta técnica foi pontualmente utilizada para avaliar propriedades com a variação da temperatura entre 0°C e 50°C.

Contudo, esta gama de temperaturas é muito reduzida e de utilização pouco importante especialmente para materiais metálicos.

O objectivo da presente dissertação é pois tirar partido da experiência já existente no DEM para estender a utilização da técnica de excitação por impulso de forma a permitir estudar a variação das propriedades mecânicas dos materiais com a temperatura.

---

## 3. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 3.1. Suporte Teórico da Técnica

A frequência natural é parâmetro modal pelo qual este tipo de ensaios se rege. As relações matemáticas teóricas apresentadas na norma são baseadas no modelo teórico para o cálculo da frequência natural transversal de Euler-Bernoulli.

O movimento correspondente à vibração transversal de vigas de secção uniforme é dado pela equação diferencial (3.1).

$$m(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (3.1)$$

Onde:

$m(x)$  = Massa por unidade de comprimento,

$y$  = Deslocamento transversal da viga,

$E$  = Módulo de elasticidade,

$I(x)$  = Momento de inércia da secção transversal,

$x$  = Coordenada na direcção longitudinal da viga,

$t$  = Tempo

A separação de variáveis da equação (3.1) implica que se assumam como soluções o produto de duas funções, uma delas  $Y(x)$  que é só função do espaço, e a outra,  $F(t)$ , é apenas função do tempo. Assim, a equação (3.1) admite soluções do tipo da representada pela equação (3.2).

$$y(x, t) = Y(x)F(t) \quad (3.2)$$

A substituição das várias variáveis de  $y$  na equação (3.1) permite obter a equação (3.3).

$$-\frac{d^2}{dx^2} \left( EI(x) \frac{d^2 Y}{dx^2} \right) F(t) = m(x) Y(x) \frac{d^2 Y}{dt^2} \quad (3.3)$$

Após separação das variáveis, cada uma das partes da equação (3.3) poderá ser integrada separadamente. Integrando a parte dependente do espaço, obtêm-se as várias frequências de vibração, cuja forma geral é dada pela equação (3.4).

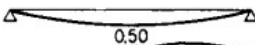
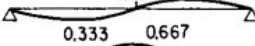
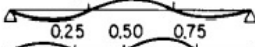

$$k^4 = \frac{\omega^2 m(x)}{EI} \quad (3.4)$$

Onde:

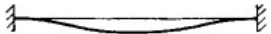
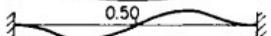

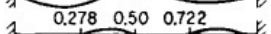

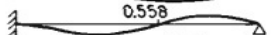
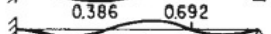
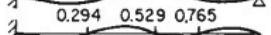

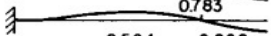
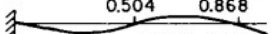
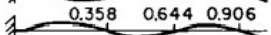


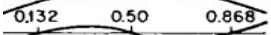
- $\omega$  = Frequência natural de vibração,
- $k$  = Constante de separação,
- $I(x)$  = Momento de inércia da secção transversal,
- $E$  = Módulo de elasticidade,
- $m(x)$  = Massa por unidade de comprimento.

Os vários valores de  $k$  estão associados a cada modo próprio de vibração e são dependentes das condições de fronteira da barra vibrante, Tabela 3.1.

**Tabela 3.1.** Frequências naturais e modos normais de barras uniformes.

<i>Suporte</i>	<i>Modo</i>	<i>Forma e pontos nodais</i>	<i>Condição de fronteira</i>	<i>Equação da frequência</i>	<i>kL</i>
<i>Apoiado-apoiado</i>	1		$A(0) = 0$	$\sin kL = 0$	3,142
	2		$A''(0) = 0$		6,283
	3		$A(L) = 0$		9,425
	4		$A''(L) = 0$		12,566



<b>Encastrado-encastrado</b>	1		$A(0) = 0$	$(\cos kL).$ $(\cosh kL) = 1$	4,730
	2		$A'(0) = 0$		7,853
	3		$A(L) = 0$		10,966
	4		$A'(L) = 0$		14,137
<b>Encastrado-apoiado</b>	1		$A(0) = 0$	$\tan kL =$ $\tanh kL$	3,927
	2		$A'(0) = 0$		7,069
	3		$A(L) = 0$		10,210
	4		$A''(L) = 0$		13,352
<b>Encastrado-livre</b>	1		$A(0) = 0$	$\cos kL).$ $(\cosh kL) = -1$	1,875
	2		$A'(0) = 0$		4,694
	3		$A''(L) = 0$		7,855
	4		$A'''(L) = 0$		10,966
<b>Livre-Livre</b>	1	<b>Movimento de corpo rígido</b>	$A''(0) = 0$	$(\cos kL).$ $(\cosh kL) = 1$	0,000
	2		$A'''(0) = 0$		4,730
	3		$A''(L) = 0$		7,853
	4		$A'''(L) = 0$		10,966

No caso da técnica que é utilizada no presente trabalho, os provetes não têm restrição de qualquer deformação nas suas extremidades, Assim, considere-se um suporte com apoios livre-livre. Assumindo estas condições fronteira, os valores de  $kL$  correspondentes às primeiras quatro soluções de  $\omega$  são:  $kL_1 = 4,730$ ,  $kL_2 = 7,853$ ,  $kL_3 = 10,996$ ,  $kL_4 = 14,137$ .

As frequências de vibração são assim calculadas substituindo estas soluções na equação (3.4), obtendo-se os valores dados pelas equações (3.5) e (3.6).

$$\omega = k_n^2 \sqrt{\frac{EI}{m(x)L^3}} \quad (3.5)$$

$$\Rightarrow f = \frac{k_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{m(x)L^3}} \quad (3.6)$$

Considerando uma secção transversal rectangular, de largura  $b$  e altura  $t$ , resulta a equação (3.7).

$$E = \frac{48\pi^2}{k_n^4} \cdot \frac{f^2 m(x) L^3}{bt^3} \quad (3.7)$$

Nesta equação,  $k_n$ , representa a constante específica associada a cada modo de vibração. Considerando o primeiro modo,  $k_{L_1} = 4,730$ , obtém-se a equação (3.8).

$$E = 0,9465 \cdot \left( \frac{m(x)f^2}{b} \right) \cdot \left( \frac{L^3}{t^3} \right) \quad (3.8)$$

A equação (3.8) é semelhante à equação que é disponibilizada na norma ASTM E 1876 – 01, sendo a única diferença o factor de correcção  $T_1$ . A razão da introdução deste factor de correcção deve-se às pequenas alterações introduzidas pelo facto dos provetes terem dimensões finitas.

### 3.2. Adaptações do Equipamento

A técnica de medição dinâmica do módulo de elasticidade, tem sido usada com sucesso no DEM para avaliar o módulo de elasticidade longitudinal e transversal e o coeficiente de Poisson, especialmente à temperatura ambiente. Contudo realizaram-se estudos para avaliar a influência da temperatura mas apenas na faixa 5 a 50°C [13]. Pelo exposto, fica claramente definido o objectivo inicial da presente dissertação que se centrou na adaptação da técnica à avaliação das propriedades elásticas a elevada temperatura, com a consequente adaptação dos equipamentos de ensaios e dos respectivos procedimentos.

Apesar de existir um número significativo de normas para a caracterização de propriedades elásticas de materiais através de técnicas de excitação por impulso, nesta

dissertação será seguida a norma ASTM E 1876 – 01 “Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration”.

Nesta norma encontram-se especificações e orientações para a elaboração dos ensaios que se pretendem realizar, descrição dos equipamentos a utilizar, geometria dos provetes, forma de apoio dos provetes e expressões matemáticas para o cálculo dinâmico do módulo de elasticidade longitudinal e transversal e respectivo coeficiente de Poisson.

A extensão da técnica à avaliação das propriedades elásticas a alta temperatura exige várias adaptações, nomeadamente nos equipamentos, sensores e forma de excitação. A própria utilização de um forno para garantir a temperatura de ensaio cria obstáculos geométricos que necessitam ser ultrapassados.

As principais adaptações implementadas versaram os seguintes parâmetros:

- Forma de excitação - no DEM, à temperatura ambiente, utiliza-se um pequeno martelo para excitar a superfície dos provetes induzindo-lhe o movimento vibratório que está na base desta técnica de medida. O facto dos ensaios decorrerem em forno não permite esta forma de excitação e requereu o estudo de diferentes formas de introduzir movimento aos provetes.
- Apoio dos provetes - as condições de fronteira, bem como o local de excitação são determinantes para os modos de vibração que se manifestam. Também foi necessário adaptar a montagem quanto a este aspecto.
- Transdutores - no DEM, à temperatura ambiente, utilizam-se extensómetros eléctricos colados na superfície dos provetes para medir o movimento vibratório dos mesmos em resultado da excitação por impulso. Todavia, este tipo de sensor não está adaptado para aplicações a alta temperatura.
- Colagem - a colagem do sensor à superfície dos provetes tem de ser fiável, e devido à alta temperatura, a cola utilizada até agora não garante isso.
- Ligações- as ligações eléctricas e a forma como se transporta o sinal eléctrico do interior do forno para o exterior também requereram especial atenção.

Com o intuito de variar a temperatura a que são submetidos os provetes durante os ensaios foi utilizado um forno *JP Selecta Digitheat* que permite temperaturas até 300 °C.

Para adquirir os sinais correspondentes ao movimento vibratório utilizou-se um osciloscópio digital, *PicoScope ADC – 216*, com o programa de aquisição de dados

*PicoScope*. O sinal foi pós-processado utilizando o programa *Origin 5.0* para processar os valores, fazendo uma transformada rápida de Fourier (*FFT*) para passar do domínio do tempo para o domínio da frequência.

### 3.2.1. Forma de Excitação

Visto que os ensaios são feitos dentro do forno, a forma de excitação do provete não pode ser feita manualmente com um martelo de impacto como é indicado na norma ASTM E 1876 – 01.

Foi escolhido um sistema de excitação por queda gravítica com esferas de aço. Para o efeito utilizaram-se esferas de aço com diâmetro de 3 mm e massa de 0,11 g. Por tentativa-erro ajustaram-se as condições de impacto adequadas à realização dos ensaios, tendo-se optado por uma altura de queda de 20 cm a que corresponde uma energia potencial gravítica de 0,22 mJ.

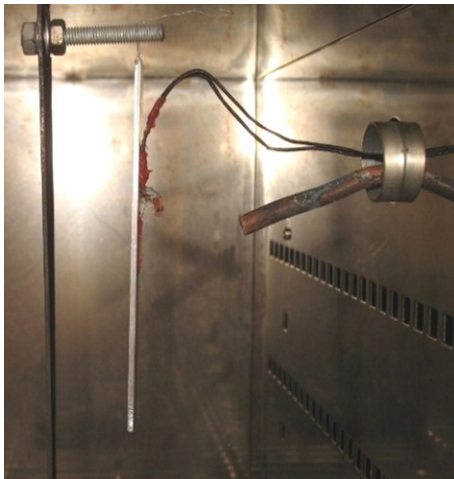
O sistema de excitação por queda gravítica implica o uso de um sistema para direccionar as esferas desde o exterior até ao ponto de impacto na superfície dos provetes.

Para este fim foi acoplado a uma escotilha lateral, que o forno possui, um tubo de cobre conforme é ilustrado na Figura 3.1, que não só permite que os ensaios sejam feitos todos a partir do exterior do forno, sem a abertura do mesmo, como também possibilita o direccionamento das esferas.



**Figura 3.1.** Tubo de direccionamento das esferas (vista exterior).

Visto que a forma de apoio e o local de impacto é diferente conforme se realizem ensaios de determinação do módulo de elasticidade nas direcções longitudinal ou transversal é diferente, as esferas tiveram que ser direccionadas de forma diversa, Figura 3.2.



a)



b)

**Figura 3.2.** (a) Tubo de direccionamento das esferas, nos ensaios de frequência de ressonância principal longitudinal; (b) Tubo de direccionamento das esferas, nos ensaios de frequência de ressonância principal transversal.

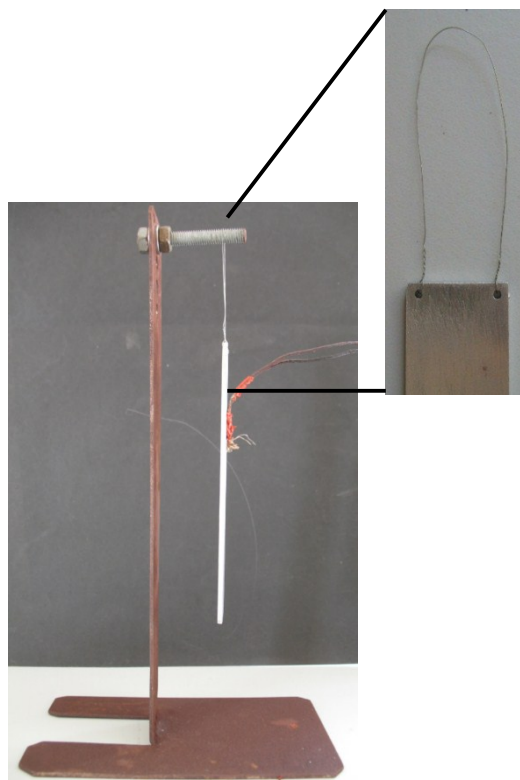
A opção seleccionada apresenta as seguintes vantagens:

- Não é necessário abrir o forno
- Simplicidade da sua produção
- Simplicidade na sua utilização
- Precisão
- Reprodutibilidade dos ensaios
- A excitação é feita por um só impacto

### 3.2.1. Sistema de Apoio dos Provetes

Como já foi anteriormente apresentado, este método baseia-se na relação entre os modos de vibração em flexão e em torção e as frequências dos correspondentes modos de vibração, utilizando as equações correspondentes à forma de apoio livre-livre. Para garantir que os provetes vibram nos modos pretendidos é necessário utilizar um tipo de apoios adequado e seleccionar convenientemente o local do impacto. A norma ASTM E 1876 – 01 recomenda que no caso da avaliação do módulo de elasticidade longitudinal, o provete seja apoiado horizontalmente nos pontos nodais, a  $0,244*L$  de cada extremidade. Contudo no DEM os testes à temperatura ambiente são realizados com os provetes suspensos em fios com uma rigidez infinitamente pequena em comparação com os provetes.

Nos testes de alta temperatura foi adoptada uma forma de apoio com os provetes suspensos, fazendo um furo de diâmetro 1,5 mm em cada canto de uma das extremidades e passando um fio de cobre muito fino. Ficando assim o provete suspenso na vertical, apoiado num suporte de metal que foi produzido para o efeito, Figura 3.3



**Figura 3.3.** Furos e fio de suspensão do provete.

O facto do provete ficar posicionado na vertical, faz com que a esfera de aço depois do impacto caia para um tabuleiro causando um só impacto.

Para validar esta forma de apoio foram feitos ensaios, comparando o mesmo provete apoiado de três maneiras distintas; todos eles usaram como sensor um extensómetro eléctrico.

Primeiro foram feitos ensaios onde o provete fica suspenso apenas pelos fios ligados ao extensómetro eléctrico, apresentados na Tabela 3.2, de seguida ensaios em que é utilizado o sistema de posicionamento nos pontos nodais recomendado pela norma ASTM E 1876 – 01, representados na Tabela 3.3 e por fim ensaios no sistema de posicionamento vertical agora proposto, que se encontram reproduzidos na Tabela 3.4.

**Tabela 3.2.** Ensaios realizados com extensómetro eléctrico, com provete suspenso pelos fios ligados ao extensómetro.

<i>Ensaio</i>	<i>Ff [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média Ff [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	857,04	71314,4	856,19	71,174
<i>2</i>	854,50	70892,3		
<i>3</i>	857,04	71314,4		

**Tabela 3.3.** Ensaios realizados com extensómetro eléctrico, com o provete apoiado nos pontos nodais.

<i>Ensaio</i>	<i>Ff [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média Ff [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	857,04	71314,4	857,04	71,314
<i>2</i>	857,04	71314,4		
<i>3</i>	857,04	71314,4		

**Tabela 3.4.** Ensaios realizados com extensómetro eléctrico, com o provete suspenso no sistema de posicionamento vertical.

<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	857,04	71314,4	857,04	71,314
<i>2</i>	857,04	71314,4		
<i>3</i>	857,04	71314,4		

O tratamento dos resultados obtidos, permitiu verificar que a alteração da forma de apoio não causou alteração mensurável no valor da frequência de ressonância do primeiro modo de flexão, apresentando todas as situações o mesmo valor de  $E = 71,3$  GPa.

Para a realização dos ensaios para medir o módulo de elasticidade transversal, foi utilizado um sistema de apoio semelhante ao recomendado pela norma ASTM E 1876 – 01.

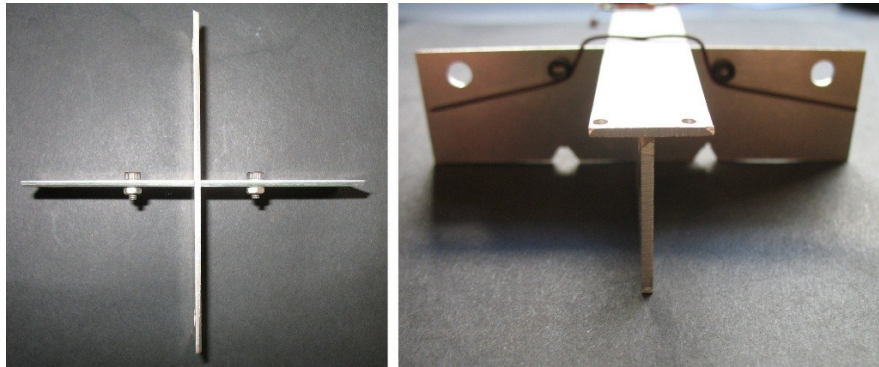
Isto consiste em que o provete esteja simplesmente apoiado ao longo da sua linha média longitudinal e na sua linha média transversal, (como demonstrado na Figura 3.4).



**Figura 3.4.** [Linhas nodais para ensaios de vibração torsional].

Para o efeito foi construído uma base de suporte que garanta as condições em cima referidas. Para tal foi utilizado duas chapas de alumínio, que formam um ângulo de 90° entre elas. A espessura das chapas, na zona de contacto com a amostra foi lixada com um ângulo superior a 45°, de forma a criar apenas uma linha de contacto, como ilustrado na Figura 3.5.





**Figura 3.5.** Base de suporte nas linhas nodais.

Foi adicionado a esta base de suporte um sistema de fixação do provete para garantir que a sua posição permaneça inalterada.

### **3.2.2. Transdutores**

De forma a registar as vibrações e as transformar em sinal eléctrico foram usados dois tipos de transdutores: extensómetros eléctricos e sensores piezoeléctricos do tipo bimorfo.

Uma vez que estes dois sensores permitem ambos medir o deslocamento do provete após excitado, a opção mais coerente seria o extensómetro eléctrico, pois tem uma massa desprezável. Todavia, esta solução não é compatível com as temperaturas de teste que se pretendem usar.

Assim sendo, seleccionou-se um sensor piezoeléctrico do tipo bimorfo. Para isso foi necessário verificar se a alteração de massa provocada pelo sensor depois de colado ao provete iria ou não afectar os valores da frequência própria de vibração e em consequência o módulo de elasticidade.

Foram assim realizados ensaios fora do forno, à temperatura ambiente, instrumentando o mesmo provete com um extensómetro eléctrico e posteriormente com um sensor piezoeléctrico do tipo bimorfo.

**Tabela 3.5.** Ensaios realizados com extensómetro eléctrico.

<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	857,04	71314,4	857,04	71,314
<i>2</i>	857,04	71314,4		
<i>3</i>	857,04	71314,4		

**Tabela 3.6.** Ensaios realizados com sensor piezoeléctrico do tipo bimorfo.

<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	851,95	70469,8	851,95	70,470
<i>2</i>	851,95	70469,8		
<i>3</i>	851,95	70469,8		

Após os ensaios, e analisando os resultados obtidos nos mesmos, que são reproduzidos na Tabela 3.5 e na Tabela 3.6, foi constatado que, relativamente ao extensómetro eléctrico, o sensor piezoeléctrico do tipo bimorfo provoca alguma alteração no valor da frequência e consequentemente no módulo de elasticidade. Sendo obtido um valor médio de  $E = 71,31$  GPa nos ensaios realizados com extensómetro eléctrico e  $E = 70,47$  GPa com o sensor piezoeléctrico do tipo bimorfo.

Visto que a diferença de valores obtida entre os ensaios com os dois sensores é cerca de 0,84 GPa, um valor pequeno comparado com a gama de valores que corresponde a uma diferença de 1,18%, foi considerado que a utilização do sensor piezoeléctrico do tipo bimorfo constitui uma opção viável.

### 3.2.3. Colagem

De forma a conseguir tornar o sensor solidário com o provete foi necessário efectuar uma colagem.

Para esta colagem o grande obstáculo são as elevadas temperaturas a que a cola irá ser submetida dentro do forno, ou seja, teria de ser utilizada uma cola que aguentasse as altas temperaturas sem comprometer a colagem.

Após a análise de algumas opções oferecidas por diversas marcas, optou-se por um silicone de alta temperatura (*VersaChem High Temp Red RTV Silicone*).

Para a colagem ser eficiente com este silicone, deve haver uma quantidade considerável de material entre o sensor e o provete. Foi então testado se este facto iria influenciar a sensibilidade do sensor.

Para tal, foi feita uma preparação de junta no provete com lixa de grão 80 de forma a aumentar a rugosidade, para tornar a colagem mais eficiente. Depois disto foram feitos ensaios à temperatura ambiente, com o provete suspenso no suporte metálico, que estão representados na Tabela 3.7.

**Tabela 3.7.** Ensaios realizados com sensor piezoeléctrico do tipo bimorfo, colado com silicone de alta temperatura.

<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	851,95	70469,8	851,95	70,470
<i>2</i>	851,95	70469,8		
<i>3</i>	851,950	70469,8		

Comparando os resultados do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios com sensor piezoeléctrico, em que foi utilizada a colagem de silicone de alta temperatura ( $E = 70,47$  GPa), com os efectuados anteriormente no mesmo provete, quando foi verificado se a utilização deste sensor era viável, sem esta colagem ( $E = 70,47$  GPa), conclui-se que a mesma não causa qualquer tipo de alteração nos valores obtidos.

### 3.2.4. Ligação eléctrica

Uma vez que se pretendiam fazer ensaios a elevadas temperaturas, tiveram que se usar condutores com isolamento resistente a elevadas temperaturas e adequar a ligação entre os condutores e os fios do sensor de forma a garantir que a ligação suportaria as temperaturas no interior do forno. Utilizaram-se grampos de cobre para fazer a ligação que se mostraram adequados ao objectivo do estudo.

Para verificar a influência dos cabos de alta temperatura nos dados obtidos, realizaram-se ensaios já dentro do forno, mas à temperatura ambiente, com os mesmos a passar na escotilha lateral. O resto das condições (colagem de alta temperatura, provete posicionado na vertical no suporte metálico) foram mantidas.

**Tabela 3.8.** Ensaios realizados com sensor piezoeléctrico do tipo bimorfo, colado com silicone de alta temperatura e cabos de alta temperatura.

<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	849,41	70050,2	849,41	70,050
<i>2</i>	849,41	70050,2		
<i>3</i>	849,41	70050,2		

Analisando os valores obtidos nos ensaios realizados, reproduzidos na Tabela 3.8, ( $E = 70,05$  GPa) e comparando os mesmos com os resultados obtidos anteriormente nos ensaios realizados nas mesmas condições, mas com os fios de cobre ( $E = 70,47$  GPa), foi constatado que a utilização dos cabos de alta temperatura com revestimento cerâmico causa uma pequena alteração no valor do módulo de elasticidade, que no entanto não inviabiliza a sua utilização.

### 3.3. Resumo do Procedimento de Ensaio com Variação da Temperatura

Após a realização dos ensaios que foram efectuados para validar as alterações que foram feitas relativamente a norma de suporte, foram realizados ensaios em diferentes materiais com as implementações feitas e variando a temperatura.

O procedimento foi o mesmo que o especificado na norma, encontrar a frequência de ressonância principal e posteriormente utilizar as relações matemáticas sugeridas.

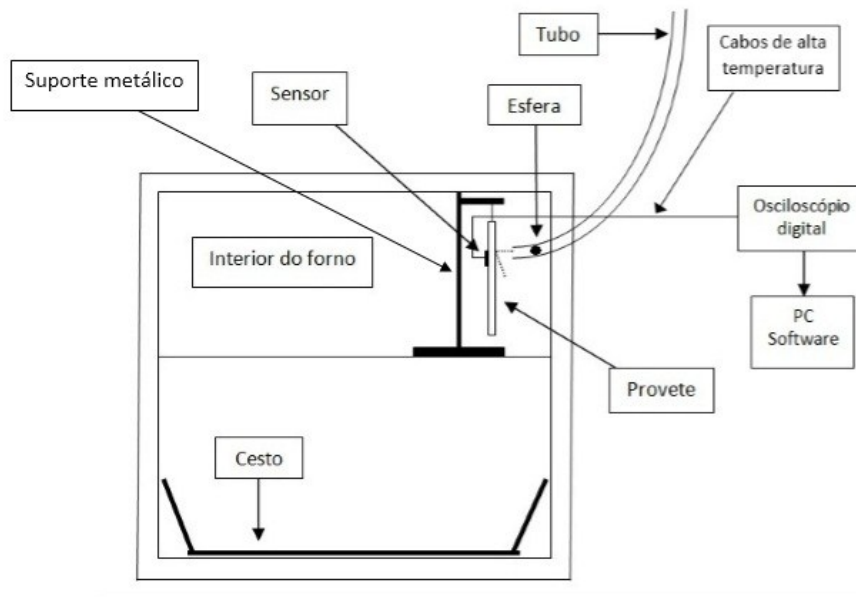
De uma forma sucinta, a esfera é largada na ponta do tubo que se encontra no exterior, que através da força gravítica vai descer e ser direccionada pelo mesmo, originando o choque no provete no local pretendido, ressaltando depois para o cesto onde são recolhidas as esferas.

A esfera ao chocar com o provete vai fazer com que este vibre. O sensor piezoeléctrico do tipo bimorfo vai adquirir este sinal que é transmitido pelos cabos de alta temperatura para o osciloscópio digital e sendo registado no *software PsicoScope*.

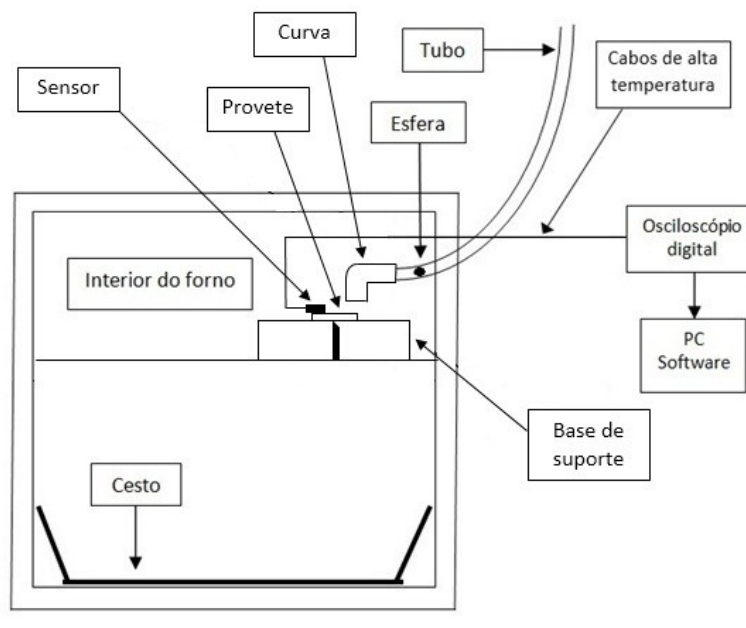
Posteriormente os valores são tratados no Excel, é feita uma Transformada Rápida de Fourier no *software Origin 5.0*, encontrando assim a frequência de ressonância do primeiro modo.

O processo é o mesmo para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal e transversal, variando apenas o posicionamento do provete e do sensor.

Na Figura 3.6 e na Figura 3.7 estão ilustrados os esquemas representativos da montagem dos equipamentos, após implementadas as alterações devido à temperatura, para proceder aos ensaios de frequência de ressonância transversal ou de flexão e de frequência de ressonância à torção.



**Figura 3.6.** Esquema representativo da montagem para ensaios de frequência de ressonância à flexão.



**Figura 3.7.** Esquema representativo da montagem para ensaios de frequência de ressonância à torção.

### 3.3.1. Materiais e Provetes Testados

#### 3.3.1.1. Materiais

Foram usados dois materiais para a realização deste estudo, uma liga de alumínio 5083 e uma poliamida reforçada com 50% de fibra de vidro, cuja designação comercial é *Akulon Ultraflow K – FG0, PA6 – GF50, DSM Engineering Plastics*.

A liga de alumínio 5083 é uma liga utilizada para construção mecânica que tem o magnésio como principal elemento de liga, com conteúdo de 4,0 a 4,9%. A presença deste elemento melhora as propriedades de endurecimento a frio desta liga e simultaneamente garante adequada resistência à corrosão. Na Tabela 3.9 são apresentadas as principais características, [14] que se encontram da liga utilizada, que no presente caso foi utilizada no estado de tratamento T6.

**Tabela 3.9.** Propriedades da liga de alumínio 5083.

<i>Propriedades</i>	<i>Valor</i>
Densidade	<i>2,66 g/cm<sup>3</sup></i>
Módulo de elasticidade	<i>70,3 GPa</i>
Módulo de elasticidade transversal	<i>26,4 GPa</i>
Coefficiente de Poisson	<i>0,33</i>
Dureza Brinell	<i>81</i>
Dureza Vickers	<i>91</i>
Tensão máxima	<i>270 - 300 MPa</i>
Tensão de Cedência	<i>115 – 190 MPa</i>
Alongamento de rotura	<i>12 – 16 %</i>

A poliamida encontra múltiplas aplicações industriais e quando reforçada com 50% de fibra de vidro permite aplicações a temperaturas significativas. A adição de fibras de vidro curtas em percentagens significativas permite um aumento significativo do módulo de elasticidade e simultaneamente melhora as propriedades a temperaturas relativamente altas

para um termoplástico. Uma das aplicações deste material é na substituição de ligas metálicas em permutadores de calor usados na indústria automóvel, radiadores e intercoolers.

Na Tabela 3.10 são apresentadas algumas características da poliamida reforçada com 50% de fibra de vidro, que se encontram na ficha técnica da material fornecida pela *DSM Engineering Plastics* [15].

**Tabela 3.10.** Propriedades da poliamida *Akulon Ultraflow K – FG0, PA6 – GF50*.

<i>Propriedades</i>	<i>Valor</i>
Densidade	<i>1,56 g/cm<sup>3</sup></i>
Módulo de elasticidade	<i>16,5 GPa</i>
Tensão de rotura	<i>220 MPa</i>
Alongamento de rotura	<i>2,5 %</i>

### 3.3.1.2. Provetes Testados

A norma de suporte [10] mostra algumas especificações relativas as dimensões das amostras de forma a facilitar o processo experimental. Para barras finas rectangulares, a relação entre o comprimento ( $L$ ) e a largura ( $b$ ) deve ser no mínimo 5 e para medições do módulo de elasticidade transversal, a relação entre a largura ( $b$ ) e a espessura ( $t$ ) deve ser no mínimo 5.

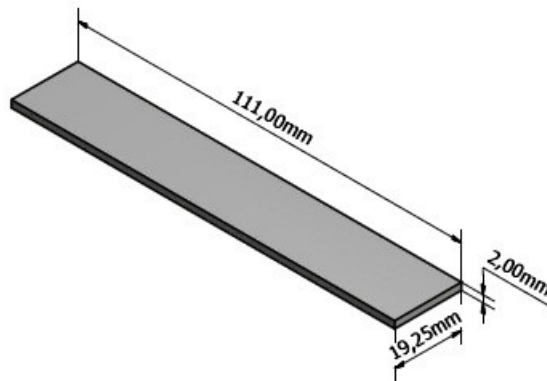
Foram efectuadas medições da geometria e da massa dos provetes. Cada um destes parâmetros foi medido sete vezes de forma a diminuir o erro associado a cada um deles.

#### Provete A

O provete A, ilustrado na Figura 3.8, é constituído pela liga de alumínio 5083. Apresenta um comprimento de  $L = 111,00mm$ , largura de  $b = 19,25mm$ , espessura de  $t = 2,00mm$  e uma massa  $m = 11,526g$ .



Estas medidas respeitam as relações acima especificadas, sendo a relação  $L/b = 5,766$  e  $b/t = 9,625$ .

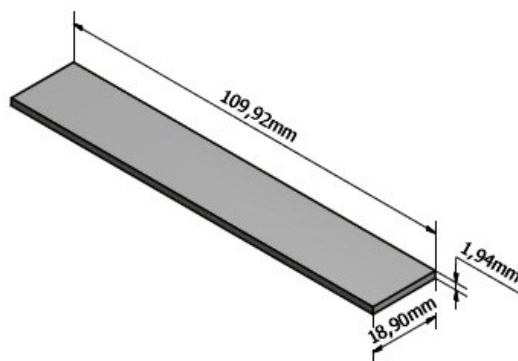


**Figura 3.8.** Dimensões do provete A.

### Provete B

O provete B, ilustrado na Figura 3.9, é constituído também pela liga de alumínio 5083. Apresenta um comprimento de  $L = 109,92mm$ , largura de  $b = 18,90mm$ , espessura de  $t = 1,94mm$  e uma massa  $m = 10,708g$ .

Estas medidas respeitam as relações acima especificadas, sendo a relação  $L/b = 5,816$  e  $b/t = 9,742$ .



**Figura 3.9.** Dimensões do provete B.

### Provete C

O provete C, ilustrado na Figura 3.10, é constituído pela poliamida *Akulon Ultraflow K-FG0, PA6-GF50*. Apresenta um comprimento de  $L = 81,79\text{mm}$ , largura de  $b = 9,12\text{mm}$ , espessura de  $t = 3,65\text{mm}$  e uma massa  $m = 4,366\text{g}$ .

Estas medidas respeitam uma das relações acima especificadas, sendo a relação  $L/b = 8,968$  e  $b/t = 2,499$ .

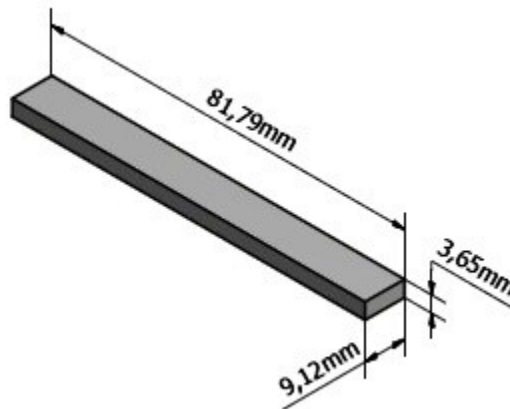


Figura 3.10. Dimensões do provete C.

Tabela 3.11. Resumo dos ensaios efectuados em cada provete

<i>Material</i>	<i>Designação</i>	<i>Propriedades medidas</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Número de ensaios</i>
Alumínio 5083	Provete A	Módulo de elasticidade longitudinal	24 °C	3
			50 °C	3
			100 °C	3
			150 °C	3
			200 °C	3
	Provete B	Módulo de elasticidade transversal	24 °C	3
			50 °C	3
			100 °C	3
			150 °C	3
			200 °C	3

Poliamida <i>Akulon</i> <i>Ultraflow</i> <i>K – FG0,</i> <i>PA6 – GF50</i>	Provete C	Módulo de elasticidade longitudinal	24 °C	3
			50 °C	3
			100 °C	3
			150 °C	3
			200 °C	3

Na Tabela 3.11 é apresentado um resumo de todos os ensaios que foram realizados em cada provete. De referir que não foram realizados ensaios de modo a obter o valor do módulo de elasticidade transversal da poliamida *Akulon Ultraflow K – FG0, PA6 – GF50*, pelo facto de não haver material disponível no DEM com largura suficiente para este fim.

Foram usados dois provetes no caso da liga de alumínio 5083 uma vez que os transdutores são colados em direcções diferentes para caracterizar os módulos elásticos na direcção longitudinal e transversal.

### 3.3.2. Módulo de Elasticidade Longitudinal

Para os ensaios de módulo de elasticidade foram utilizados dois materiais, alumínio 5083 e poliamida reforçada com 50% de fibra de vidro, provete A e provete C respectivamente.

Foram respeitadas as implementações de alta temperatura que foram testadas e validadas. Os sensores piezoeléctricos foram colados no centro dos provetes longitudinalmente com o silicone de alta temperatura, já referido anteriormente. Ligados aos cabos de alta temperatura através de grampos. O provete foi colocado no suporte metálico suspenso verticalmente dentro do forno.

Realizaram-se ensaios a cinco temperaturas diferentes (25°C, 50°C, 100°C, 150°C e 200°C). Por cada temperatura foram feitos três ensaios, ou seja, três lançamentos de esferas.

Os valores obtidos foram registados e tratados pelo software utilizado de forma a encontrar a frequência de ressonância principal. Foi feita a média da frequência de ressonância principal dos três ensaios que são feitos em cada temperatura, de forma a diminuir o erro.

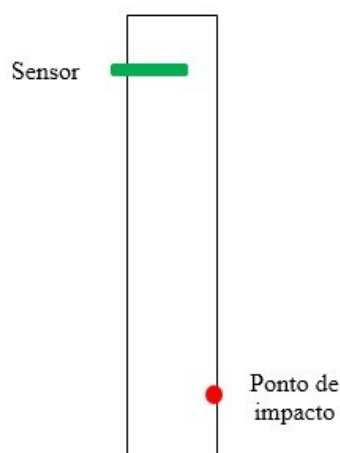
A frequência média é assim introduzida na equação (2.10) para o cálculo do módulo de elasticidade.

### 3.3.3. Módulo de Elasticidade Transversal

Nos ensaios do módulo de elasticidade transversal foi utilizado apenas um material, alumínio 5083, provete B.

Todo o procedimento foi igual ao dos ensaios para o módulo de elasticidade, excepto a posição do sensor, o posicionamento do provete e na equação utilizada.

Para adquirir a frequência de ressonância principal à torção o sensor piezoeléctrico foi colado no provete transversalmente descentrado e o ponto de impacto é feito na extremidade lateral contrária, aumentando assim a amplitude, como representado na Figura 3.11.



**Figura 3.11.** Posicionamento do sensor e ponto de impacto.

O provete foi posicionado horizontalmente na base de suporte como é indicado no ponto 4.4.1.1.2, de forma a restringir os movimentos vibratórios do provete à torção.

A equação (2.13), que é especificada na norma de suporte, utilizando a frequência de ressonância principal à torção, permite calcular o módulo de elasticidade transversal.

### **3.3.4. Coeficiente de Poisson**

Para o cálculo do coeficiente de Poisson não é necessário realizar ensaios. Isto porque a relação matemática existente na norma depende apenas do módulo de elasticidade e do módulo de elasticidade transversal.

Logo, como os ensaios destes módulos já são realizados com variação da temperatura, para calcular o coeficiente de Poisson do provete à temperatura pretendida, basta utilizar o módulo de elasticidade longitudinal e o módulo de elasticidade transversal que foi calculado a essa mesma temperatura e introduzi-los na equação (2.16).

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. Frequências Naturais e Modos Normais de Barra Uniforme

Utilizando a equação (3.6), os quatro primeiros modos para um suporte com apoios livre-livre que se encontram na Tabela 3.1, utilizado no presente trabalho, as dimensões do provete A, e assumindo  $E = 71,04 \text{ GPa}$ , foram calculados os valores das frequências naturais de vibração pelo método teórico. No mesmo provete, através da técnica de excitação por impulso, foram também encontrados os valores das quatro primeiras frequências naturais de vibração.

Na Tabela 4.1 apresentam-se os respectivos valores obtidos pelos dois métodos.

**Tabela 4.1.** Valores das frequências naturais teóricos e experimentais.

	<i>Ensaio</i>	<i>Frequência [Hz]</i>		
		<i>Valores experimentais</i>	<i>Média Valores experimentais</i>	<i>Valores teóricos</i>
$K_1$	1	864,66	<b>864,66</b>	<b>871,92</b>
	2	864,66		
	3	864,660		
$K_2$	1	2375,28	<b>2371,89</b>	<b>2403,41</b>
	2	2370,20		
	3	2370,20		
$K_3$	1	4648,84	<b>4648,84</b>	<b>4712,22</b>
	2	4648,84		
	3	4648,84		

$K_4$	1	7680,26	<b>7680,26</b>	<b>7788,81</b>
	2	7680,26		
	3	7680,26		

## 4.2. Liga de Alumínio 5083

Os resultados aqui apresentados, são provenientes de ensaios realizados com o equipamento desenvolvido já com todas as implementações aplicadas.

### 4.2.1. Módulo de elasticidade longitudinal

São aqui apresentados, da Tabela 4.2 a Tabela 4.6, os resultados do módulo de elasticidade longitudinal obtidos experimentalmente, em função do aumento da temperatura. Observando os valores do módulo de elasticidade obtidos é possível ver que existe uma diminuição do mesmo com o aumento da temperatura.

**Tabela 4.2.** Ensaios realizados à temperatura ambiente

<i>Temperatura Ambiente</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	849,41	70050,2	<b>849,41</b>	<b>70,050</b>
<i>2</i>	849,41	70050,2		
<i>3</i>	849,41	70050,2		

**Tabela 4.3.** Ensaios realizados a 50°C

<i>50°C</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	844,32	69213,2	<b>844,32</b>	<b>69,213</b>
<i>2</i>	844,32	69213,2		

3	844,32	69213,2		
---	--------	---------	--	--

Tabela 4.4. Ensaios realizados a 100°C

<i>100°C</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	829,06	66733,9	<b>829,06</b>	<b>66,734</b>
<i>2</i>	829,06	66733,9		
<i>3</i>	829,06	66733,9		

Tabela 4.5. Ensaios realizados a 150°C

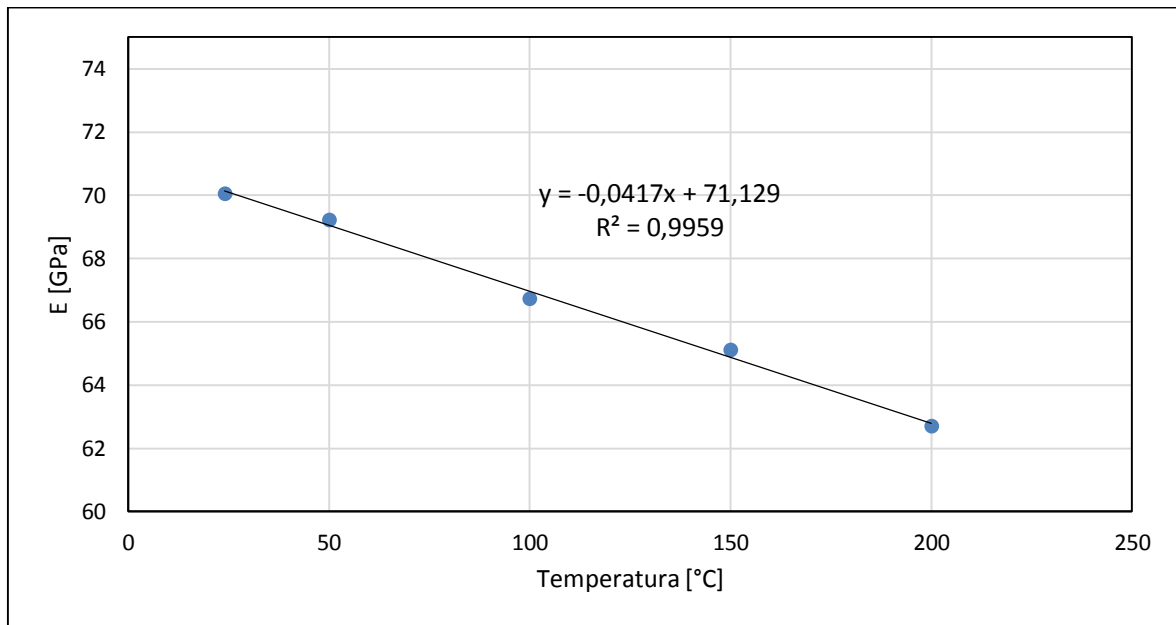
<i>150°C</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	818,89	65106,8	<b>818,89</b>	<b>65,107</b>
<i>2</i>	818,89	65106,8		
<i>3</i>	818,89	65106,8		

Tabela 4.6. Ensaios realizados a 200°C

<i>200°C</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	803,63	62702,8	<b>803,63</b>	<b>62,703</b>
<i>2</i>	803,63	62702,8		
<i>3</i>	803,63	62702,8		

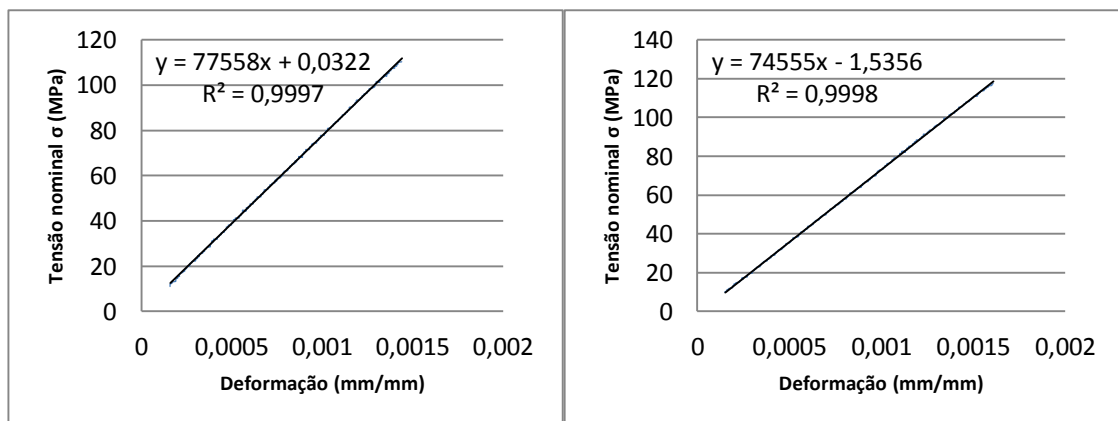


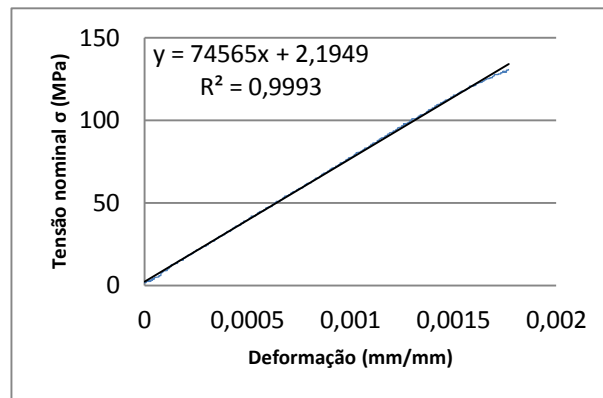
Na Figura 4.1 está representada a variação do valor médio do módulo de elasticidade dos ensaios, acima referenciados, em função do aumento da temperatura e a linha de tendência.



**Figura 4.1.** [Variação do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura].

Para validar os resultados, o valor do módulo de elasticidade obtido utilizando técnica de excitação por impulso com as implementações que foram feitas, foi comparado com o valores estipulados pela literatura e com valores obtido por três ensaios de tracção realizados no DEM para este material no âmbito de um projecto actualmente em curso. Os três ensaios de tracção foram todos realizados à temperatura ambiente, e os resultados, restringidos às deformações elásticas, são apresentados na Figura 4.2.





**Figura 4.2.** [Ensaio de tracção realizados no DEM à temperatura ambiente na liga de alumínio 5083].

O valor médio do módulo de elasticidade obtido nos três ensaios de tracção realizados no DEM, representados na Figura 4.2.

Na literatura encontram-se as propriedades mecânicas da liga de alumínio que foi utilizada. Na Figura 4.3 estão representadas algumas dessas propriedades que se encontram na ficha técnica do material [14].

O valor tabelado do módulo de elasticidade é  $E = 70,3 \text{ GPa}$ .

#### Physical Properties

Property	at	value	unit	Property	At	value	unit
Density	20°C	2,660	kg/m <sup>3</sup>	Melting Range		574 – 638	°C
Weight	20°C	2.66 x thickness in mm		Mean Coefficient of Expansion	20°C	24.2	x 10 <sup>-6</sup> / °C
Modulus of Elasticity				Thermal Conductivity	25°C	120	W / m . °C
Tension	20°C	70.3	GPa	Electrical Resistivity	20°C	59.5	Nano-ohm . m
Torsion		26.4		Electrical conductivity			
Compression	20°C	71.7	GPa	(all tempers)	20°C	29	% IACS

**Figura 4.3.** Propriedades mecânicas da liga de alumínio 5083 (adaptado [14]).

Pela técnica de excitação por impulso depois das implementações feitas obteve-se o valor de  $E = 70,05 \text{ GPa}$  valor mais reduzido do que o encontrado pelos ensaios de tracção realizados. Contudo como os provetes testados em ambas as técnicas foram obtidos a partir de amostras com espessuras distintas, poderão resultar algumas alterações desse facto, contudo é de referir que a técnica de excitação por impulso conduziu a valores muito mais próximos dos habitualmente referenciados para esta liga.

Esta comparação de resultados permite aceitar como adequados os resultados obtidos com variação de temperatura.

Constatou-se que o módulo de elasticidade, diminui de forma linear com o aumento da temperatura até  $200^{\circ}\text{C}$ . Assim sendo, o módulo de elasticidade, até  $200^{\circ}\text{C}$ , diminui de forma linear com o aumento da temperatura, obedecendo à seguinte equação (4.1):

$$E(T) = -0,0417T + 71,129 \quad (4.1)$$

Sendo  $E$  o módulo de elasticidade em  $\text{GPa}$  e  $T$  a temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ .

É de salientar que o módulo de elasticidade apresenta um decréscimo de  $10,49\%$  com o aumento da temperatura de  $24^{\circ}\text{C}$  para  $200^{\circ}\text{C}$ , ou seja,  $41,76 \text{ MPa}/^{\circ}\text{C}$ .

De forma a analisar este decréscimo, o mesmo foi comparado com estudos efectuados por outros autores em alumínio puro a elevada temperatura [16]. Onde se verificou também uma diminuição linear do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura de  $42,9 \text{ MPa}/^{\circ}\text{C}$ . Comprovando assim a tendência do módulo de elasticidade que foi obtido experimentalmente e uma enorme proximidade nos valores do decaimento por  $^{\circ}\text{C}$  obtido nos dois casos.

#### **4.2.2. Módulo de Elasticidade Transversal**

Nas Tabelas 4.7 a 4.11 são apresentados os resultados do módulo de elasticidade transversal obtidos experimentalmente, em função do aumento da temperatura. É possível verificar que o módulo de elasticidade transversal diminui com o aumento da temperatura.

**Tabela 4.7.** Ensaio realizado à temperatura ambiente

<i>Temperatura Ambiente</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>G [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média G [GPa]</i>
<i>1</i>	2787,27	25144,6	<b>2787,49</b>	<b>25,149</b>
<i>2</i>	2787,27	25144,6		
<i>3</i>	2787,93	25156,4		

**Tabela 4.8.** Ensaio realizado a 50°C

<i>50°C</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>G [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média G [GPa]</i>
<i>1</i>	2766,93	24778,9	<b>2766,93</b>	<b>24,779</b>
<i>2</i>	2766,93	24778,9		
<i>3</i>	2766,93	24778,9		

**Tabela 4.9.** Ensaio realizado a 100°C

<i>100°C</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>G [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média G [GPa]</i>
<i>1</i>	2746,58	24415,8	<b>2746,58</b>	<b>24,416</b>
<i>2</i>	2746,58	24415,8		
<i>3</i>	2746,58	24415,8		

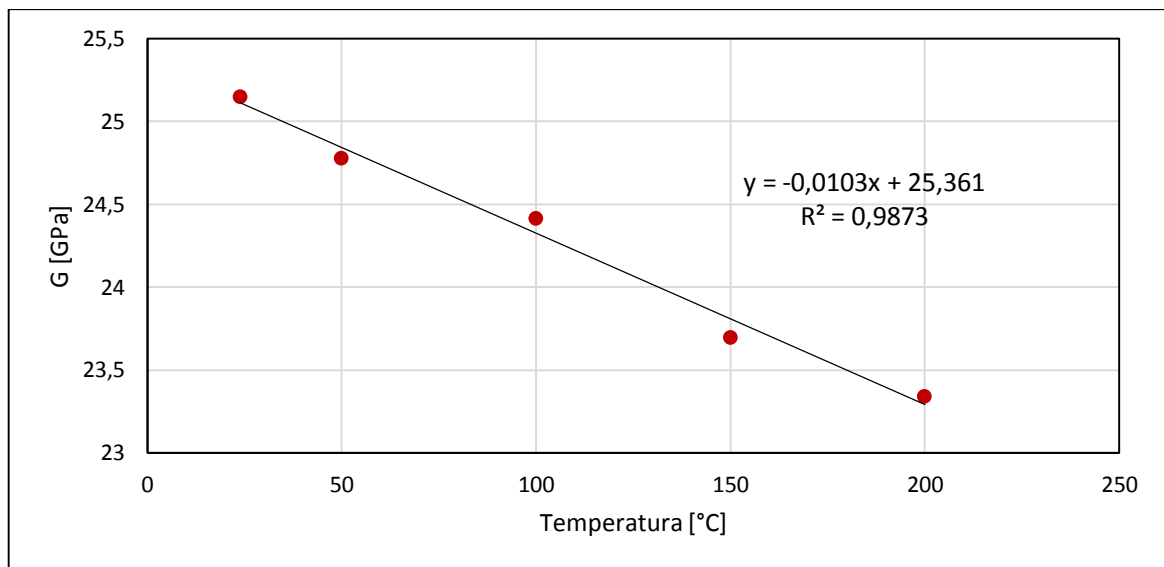
Tabela 4.10. Ensaio realizados a 150 °C

<i>150°C</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>G [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média G [GPa]</i>
<i>1</i>	2705,89	23697,8	<b>2705,89</b>	<b>23,698</b>
<i>2</i>	2705,89	23697,8		
<i>3</i>	2705,89	23697,8		

Tabela 4.11. Ensaio realizados a 200 °C

<i>200°C</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>G [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média G [GPa]</i>
<i>1</i>	2685,55	23342,7	<b>2685,55</b>	<b>23,343</b>
<i>2</i>	2685,55	23342,7		
<i>3</i>	2685,55	23342,7		

Pelos valores do módulo de elasticidade transversal obtidos é possível observar que este diminui com o aumento da temperatura. Na Figura 4.4 estão resumidos os valores médios das tabelas Tabela 4.7 a Tabela 4.11 na forma de gráfico com a variação do valor médio do módulo de elasticidade transversal dos ensaios, em função do aumento da temperatura. A redução do valor de  $G$  com temperatura é razoavelmente linear, a equação da linha de tendência permite verificar que  $G$  decresce com o aumento da temperatura à razão de  $10 \text{ MPa}$  por cada grau centígrado.



**Figura 4.4.** Variação do módulo de elasticidade transversal com o aumento da temperatura.

Relativamente ao módulo de elasticidade transversal, ao comparar o valor tabelado que se encontra na Figura 4.3,  $E = 26,4 \text{ GPa}$ , com o valor obtido pelo equipamento desenvolvido que se encontra na Tabela 4.7,  $E = 25,15 \text{ GPa}$ , é plausível considerar o valor experimental razoável, visto ser próximo do valor tabelado.

Logo, o módulo de elasticidade transversal, até  $200^\circ\text{C}$ , decresce linearmente com o aumento da temperatura, obedecendo à equação (4.2).

$$G(T) = -0,0103T + 25,361 \quad (4.2)$$

onde  $G$  é o módulo de elasticidade transversal em  $\text{GPa}$  e  $T$  é a temperatura em  $^\circ\text{C}$ .

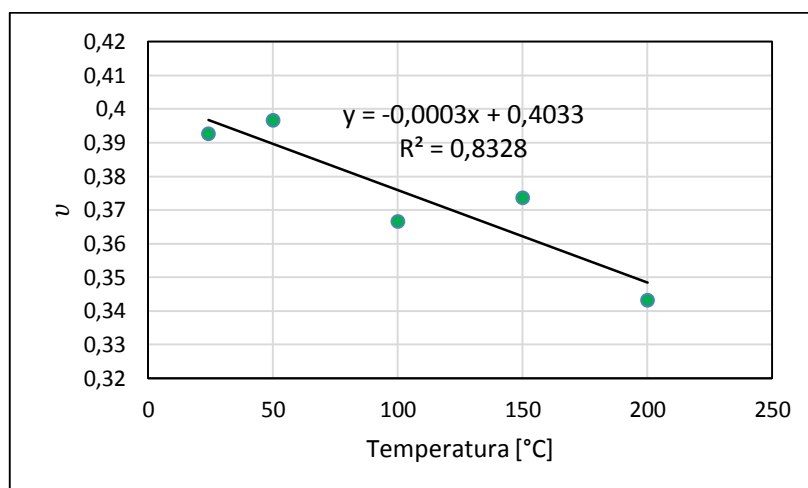
### 4.2.3. Coeficiente de Poisson

Na Figura 4.5 e na Tabela 4.12 estão representados os valores do coeficiente de Poisson em função da temperatura, onde se pode observar uma diminuição do mesmo em função do aumento da temperatura.

Estes valores foram obtidos a partir dos valores adquiridos médios dos ensaios do módulo de elasticidade longitudinal e do módulo de elasticidade transversal às diferentes temperaturas.

**Tabela 4.12.** Evolução do coeficiente de Poisson com o aumento da temperatura

Temperatura [°C]	$\nu$
24	0,393
50	0,397
100	0,367
150	0,374
200	0,343



**Figura 4.5.** Variação do coeficiente de Poisson com o aumento da temperatura.

O valor do coeficiente de Poisson deste material que é referido na literatura para a temperatura ambiente é  $\nu = 0,33$  [17]. O valor obtido através da técnica de excitação por impulso é mais elevado que este, como é possível ver na Tabela 4.12,  $\nu = 0,393$ .

Na Figura 4.5 é possível ver que para temperatura variável entre 24 e 200°C o valor do coeficiente de Poisson apresenta um comportamento linearmente decrescente que obedece à equação (4.3).

$$\nu(T) = -0,0003T + 0,4033 \quad (4.3)$$

onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson e  $T$  é a temperatura em °C.

Mais importante do que os valores absolutos do coeficiente de Poisson é verificar que o aumento da temperatura entre 24 e 200 °C originou uma redução de 15% em relação ao valor registado à temperatura ambiente.

### 4.3. Poliamida Akulon Ultraflow K – FG0, PA6 – GF50

#### 4.3.1. Módulo de Elasticidade Longitudinal

São aqui apresentados da Tabela 4.13 à Tabela 4.17 os resultados do módulo de elasticidade longitudinal obtidos experimentalmente, em função do aumento da temperatura. Observando os valores é possível verificar que o módulo de elasticidade diminui com o aumento da temperatura.

**Tabela 4.13.** Ensaios realizados à temperatura ambiente

<i>Temperatura Ambiente</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	1688,64	14734,4	<b>1681,86</b>	<b>14,617</b>
<i>2</i>	1688,64	14734,4		
<i>3</i>	1668,29	14381,5		



Tabela 4.14. Ensaio realizados a 50°C

<i>50°C</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>Ff [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média Ff [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	1485,19	11397,8	<b>1478,41</b>	<b>11,294</b>
<i>2</i>	1464,84	11087,7		
<i>3</i>	1485,19	11397,8		

Tabela 4.15. Ensaio realizados a 100°C

<i>100°C</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>Ff [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média Ff [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	1241,05	7958,6	<b>1234,27</b>	<b>7,872</b>
<i>2</i>	1220,70	7699,8		
<i>3</i>	1241,05	7958,6		

Tabela 4.16. Ensaio realizados a 150°C

<i>150°C</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>Ff [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média Ff [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	1118,98	6469,9	<b>1118,98</b>	<b>6,470</b>
<i>2</i>	1118,98	6469,9		
<i>3</i>	1118,98	6469,9		

Tabela 4.17. Ensaio realizados a 200 °C

<i>200°C</i>				
<i>Ensaio</i>	<i>F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Média F<sub>f</sub> [Hz]</i>	<i>Média E [GPa]</i>
<i>1</i>	1037,59	5563,1	<b>1037,59</b>	<b>5,563</b>
<i>2</i>	1037,59	5563,1		
<i>3</i>	1037,59	5563,1		

É possível observar que o módulo de elasticidade apresenta uma diminuição do seu valor com o aumento da temperatura. Na Figura 4.6 está representada a variação do valor médio do módulo de elasticidade dos ensaios, acima mencionados, em função do aumento da temperatura e a linha de tendência.

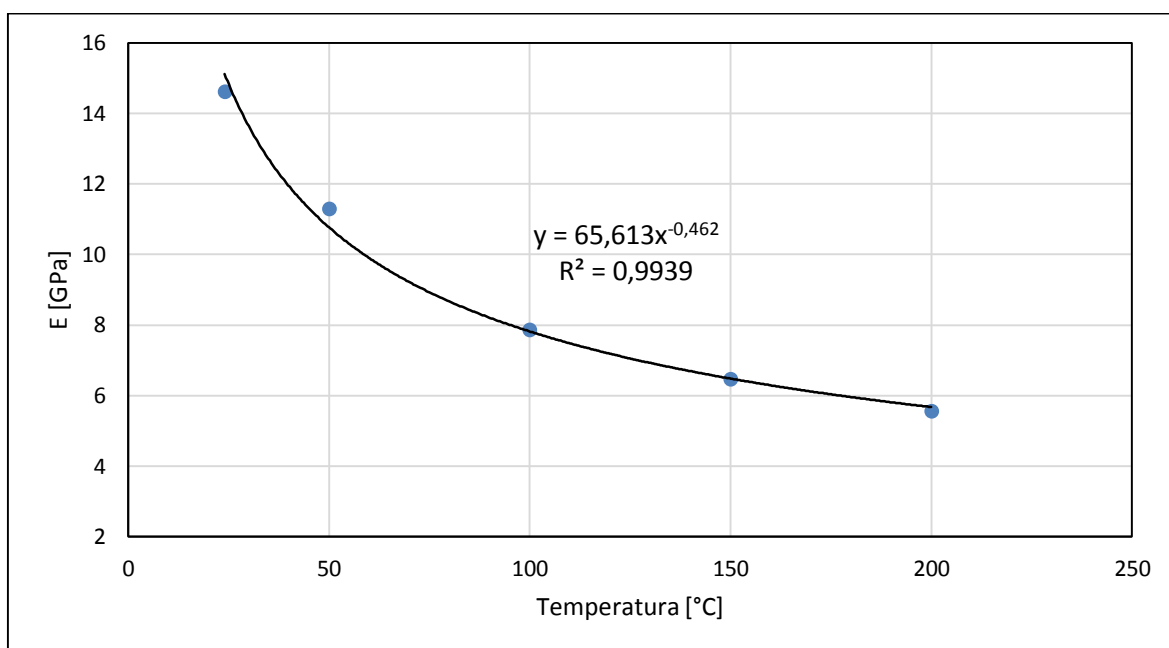
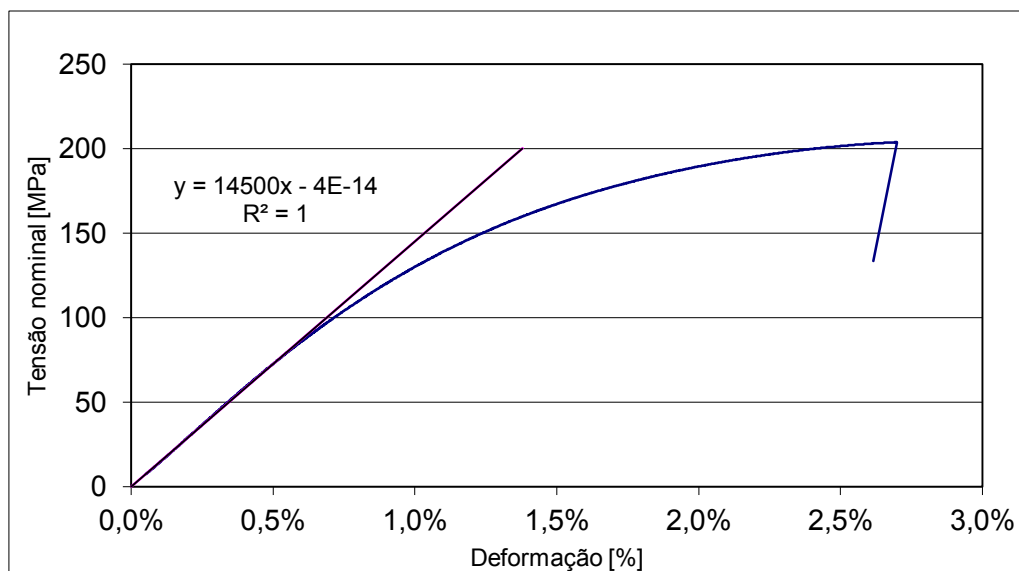


Figura 4.6. Variação do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura.

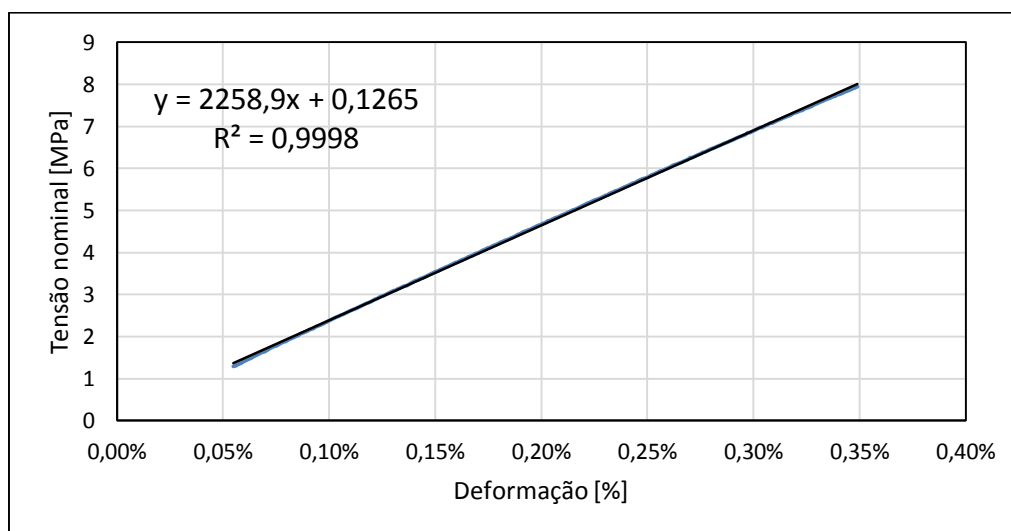
De forma a analisar o módulo de elasticidade obtido utilizando o equipamento desenvolvido, utilizam-se novamente ensaios de tracção realizados neste material no DEM.

Onde um é realizado à temperatura ambiente e outro a  $210^{\circ}\text{C}$ . Foi também utilizado como termo de comparação o valor que a ficha técnica deste material fornece.



**Figura 4.7.** Ensaio de tracção realizado no DEM à temperatura ambiente no material Akulon Ultraflow K-FGO.

O valor do módulo de elasticidade obtido através do ensaio de tracção realizado no DEM, à temperatura ambiente, foi de  $E = 14,5 \text{ GPa}$ , como é possível ver na Figura 4.7.



**Figura 4.8.** Ensaio de tracção realizado no DEM a  $210^{\circ}\text{C}$  no material Akulon Ultraflow K-FGO.

No caso do ensaio de tracção também realizado no DEM, mas a  $210^{\circ}\text{C}$ , o módulo de elasticidade obtido foi de  $E = 2,3 \text{ GPa}$ , como ilustrado na Figura 4.8.

Na ficha técnica do fornecedor [15] é possível ver algumas propriedades mecânicas do mesmo, entre as quais o módulo de elasticidade.

Na Figura 4.9 estão ilustrados alguns dos valores que se encontram tabelados, sendo o  $E = 16,5 \text{ GPa}$ .

Mechanical properties	dry / cond		
Tensile modulus	16500/11000	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at break	220/155	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break	2.5/5	%	ISO 527-1/-2
Flexural modulus	15500/-	MPa	ISO 178
Flexural strength	335/-	MPa	ISO 178
Charpy impact strength (+23°C)	90/100	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eU
Charpy impact strength (-30°C)	85/85	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength (+23°C)	15/25	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
Charpy notched impact strength (-30°C)	12/12	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA

**Figura 4.9.** Propriedades mecânicas do material Akulon Ultraflow K-FG0 (adaptado [15]).

Os valores do módulo de elasticidade que foram obtidos nos ensaios de tracção realizados no DEM e os valores obtidos pelo equipamento no presente trabalho, ambos a temperatura ambiente, são muito semelhantes,  $E = 14,5 \text{ GPa}$  e  $E = 14,617 \text{ GPa}$ , respectivamente.

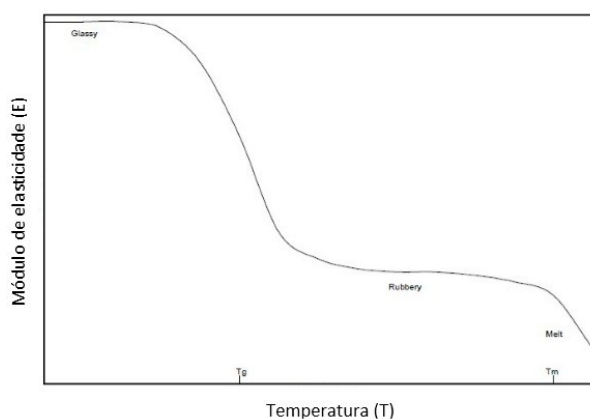
Comparando estes ao valor tabelado apresentado pelo fabricante,  $E = 16,5 \text{ GPa}$ , é possível dizer que o valor do módulo de elasticidade que se obtém através do equipamento é um valor aceitável.

Os ensaios realizados com o equipamento desenvolvido não foram para além dos  $200^{\circ}\text{C}$ , assim sendo não existe valor do módulo de elasticidade a  $210^{\circ}\text{C}$  obtido pelo mesmo, de forma a comparar com o valor encontrado pelo ensaio de tracção a esta mesma temperatura. Mas é possível comparar o valor do módulo de elasticidade a  $200^{\circ}\text{C}$  dado pelo equipamento com o valor de  $210^{\circ}\text{C}$  adquirido pelo ensaio de tracção, de forma a ter uma noção da coerência dos valores.

Na Tabela 4.17 podemos ver esse valor obtido pelo equipamento,  $E = 5,56 \text{ GPa}$ , sendo este mais do dobro do valor obtido pelo ensaio de tracção a uma temperatura próxima.

Mas o mais importante a reter aqui é o facto de com o aumento da temperatura entre  $24^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$  o módulo de elasticidade diminuir  $61,96\%$  relativamente ao valor registado à temperatura ambiente.

Neste material, contrariamente ao que acontece na liga de alumínio 5083, a variação do módulo de elasticidade não é linear. Isto deve-se ao facto destes materiais terem uma variação do comportamento mecânico com a temperatura. Abaixo da temperatura de transição vítrea o material apresenta um comportamento rígido-elástico enquanto que acima dessa temperatura o comportamento é visco-elástico. Assim sendo, este tipo de materiais, expostos a temperaturas que excedam a temperatura de transição vítrea sofrem um acentuado decréscimo dos valores das propriedades elásticas de forma não linear[18]. Este comportamento é representado na Figura 4.10. [19]



**Figura 4.10.** [Evolução do módulo de elasticidade da poliamida com a temperatura (adaptado [19])].

A temperatura de transição vítrea da matriz da poliamida é cerca de  $50^{\circ}\text{C}$  e a temperatura de fusão no  $255^{\circ}\text{C}$  [20].

Comparando o comportamento do módulo de elasticidade de uma poliamida reforçada com 35% de fibra de vidro com o aumento da temperatura, realizado noutro estudo [18] com o comportamento da poliamida reforçada com 50% de fibra de vidro obtido no presente trabalho, Figura 4.6, é possível ver que apresentam o mesmo comportamento. Em ambos ocorre um decaimento acentuado do módulo de elasticidade após a temperatura de transição vítrea, tendendo a estabilizar para valores próximo da temperatura de fusão.

Conclui-se então que a variação do módulo de elasticidade obtido com o equipamento em função da temperatura até  $200^{\circ}\text{C}$ , é dado pela equação (4.4).

$$E(T) = 65,613T^{-0,462} \quad (4.4)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade em  $\text{GPa}$  e  $T$  é a temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ .

## 5. CONCLUSÕES

É possível afirmar que o objectivo da presente tese de dissertação de mestrado foi alcançado com sucesso. Foi conseguida a optimização do método dinâmico utilizado para a medição de propriedades elásticas, utilizado no DEM até à data, dotando-o da capacidade de analisar estas mesmas propriedades até 200°C.

Foram feitas adaptações à técnica de excitação por impulso já utilizada. E realizados ensaios comparativos, onde foi verificado se as mesmas, implementadas na técnica de excitação por impulso já utilizada no DEM eram válidas, ou causavam alterações mensuráveis no valor da frequência de ressonância do primeiro modo de flexão, e consequentemente no valor do módulo de elasticidade.

No que diz respeito à forma de excitação dos provetes, o sistema de excitação por queda gravítica com esferas de aço revelou ser adequado e cumpriu com todos os requisitos que lhe eram exigidos, verificando-se assim que a alteração da forma de excitação relativamente à utilizada anteriormente (martelo de impacto) é viável.

No caso do sistema de apoio dos provetes, os ensaios comparativos realizados permitiram verificar que a alteração do mesmo, relativamente ao sistema especificado pela norma ASTM E 1876 – 01 e ao sistema onde o provete fica apoiado pelos fios ligados ao extensómetro não causa alterações de valores significativas, sendo viável a sua utilização.

A substituição do extensómetro eléctrico pelo sensor piezoeléctrico do tipo bimorfo constituiu-se também como uma opção viável, visto verificar-se nos valores obtidos através de um e de outro de apenas uma diferença de 1,18%. O sensor piezoeléctrico foi testado a temperaturas acima dos 200°C, apresentando aí uma limitação e não sendo capaz de registar valores que pudessem ser tratados. Isto acontece pelo facto da solda que une os fios do sensor ao mesmo, ter um ponto de fusão perto deste valor, fazendo com que os fios se soltem nesta zona.

A colagem com o silicone de alta temperatura, apesar de necessitar de alguma quantidade de material entre o provete e o sensor para ser eficiente, demonstrou pelos resultados do módulo de elasticidade obtidos com a sua utilização, e comparados com os

obtidos sem a mesma, não causar qualquer alteração no valor desta propriedade, comprovou ser uma opção viável.

Relativamente às alterações na ligação eléctrica, verificou-se que a utilização dos cabos de alta temperatura com revestimento cerâmico causa uma pequena alteração nos valores do módulo de elasticidade relativamente aos valores do mesmo utilizando fios de cobre. No entanto, não inviabiliza a sua utilização visto ser uma diferença de 0,6 %.

No caso da liga de alumínio 5083, comparando os resultados do módulo de elasticidade obtidos pela técnica, pós adaptada a altas temperaturas, com os valores encontrados na literatura e com os resultados alcançados por ensaio de tracção realizados no DEM, conclui-se que o método dinâmico empregado é mais preciso que o ensaio de tracção, Este apresenta um erro de apenas 0,36% em relação ao valor apresentado na literatura contra um erro de 7,48% do ensaio de tracção. Conclui-se também, comprando com estudos realizados por outros autores que o decaimento linear do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura é bastante preciso.

Relativamente aos resultados do módulo de elasticidade transversal encontrados, estes foram também comparados aos valores especificados pela literatura e apresentam um erro de 4,73%. Foi também observada uma redução desta propriedade elástica com a temperatura razoavelmente linear, verificando-se assim um decréscimo de 10 MPa/°C.

Olhando para o coeficiente de Poisson, é possível concluir que apesar do valor obtido pela técnica dinâmica utilizada à temperatura ambiente ser superior ao valor referenciado na literatura, este apresenta um comportamento linear decrescente, decaindo 15% dos 24 a 200°C.

No caso dos valores do módulo de elasticidade longitudinal obtidos pelo sistema desenvolvido para o material Akulon Ultraflow K-FG0, PA6 – GF50 à temperatura ambiente, estes apresentam um valor muito próximo dos valores obtidos por ensaio de tracção, mas 11,51% inferior ao valor encontrado na literatura. Apesar disso, no que toca ao comportamento do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura obtido pela técnica utilizada no presente trabalho, e comparado a estudos efectuados por outros autores, pode-se concluir que este é correcto, apresentando um comportamento não linear provocado pela variação do comportamento mecânico com a temperatura (transição vítrea) que caracteriza estes materiais.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Antunes, P., Ramalho, A., Ferreira, J., Capela, C. “Determination of Elastic Properties by Resonant Techique: A Sensitivity Analisis,” *Journal of Testing and Evaluation*.
- [2] Callister, W., Wiley, J. (2007), "*Materials ScienceMaterials Science and Engineering*", 7º ed. New York.
- [3] Morrel, R. (2006), “NPL measurement good practice guide No. 98-Elastic module measurement,” *UK National Physical Laboratory Report*, vol. 29, no. 98.
- [4] Silva, J. (2010), “Caracterização Elasto-plástica de Materiais Metélicos por Indentadores Esféricos,” Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica na especialidade de Sistemas de Produção, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [5] Fernandes, J., Antunes, J., Cavaleiro, A., Menezes, L. and Simoes, M. (2002), “Ultra-microhardness testing procedure with Vickers indenter,” *Surface and Coating Technology*, vol. 149, pp. 27–35.
- [6] Antunes, J., Fernandes, J., Menezes, L. and Chaparro, B. (2007), “A new approach for reverse analyses in depth-sensing indentation using numerical simulation,” *Acta Materialia*, vol. 55, no. 1, pp. 69–81.
- [7] Fernandes, J., Sakharova, N., Antunes, J. and Oliveira , M. (2007), “Mechanical Properties Evaluation of Bulk and Coated Material by Depth Sensing Indentation,”.
- [8] Antunes, J. (2006) “A Indentação de Materiais Maciços e Filmes Finos: Modelação e Análise Inversa,” Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.

- 
- [9] Oliver, W. and Pharr, G. (1992), “An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments,” *Journal of Materials Research*, vol. 7.
- [10] ASTM E 1876 - 1 (2001), “Standard Test Method for Dynamic Young ’ s Modulus , Shear Modulus , and Poisson ’ s Ratio by Impulse Excitation of Vibration.”.
- [11] Petro, J. and Kim, J. (2011), “Detection of delamination in concrete using ultrasonic pulse velocity test,” *Construction and Building Materials*, vol. 26, no. 1, pp. 574–582.
- [12] ASTM C 597 - 02 (2002), “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.” ASTM International, pp. 4–7.
- [13] Ramalho, A., Braga de Carvalho, M., and Antunes, P. (2013) “Effects of temperature on mechanical and tribological properties of dental restorative composite materials,” *Tribology International*, vol. 63, pp. 186–195.
- [14] Austral Wright Metals, (2005) “Product Data Aluminium 5083.” pp. 8–9.
- [15] DSM Engineering Plastics, (2013) “Product Data Akulon ® Ultraflow K-FG0, PA6 - GF50,”.
- [16] Hill, W. and Shimmin, K. (1961) “Elevated Temperature Dynamic Elastic Moduli of Various Metallic Materials,” *Materials Central*.
- [17] MatWeb. Acedido Junho de 2013, em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bd6317b19dd94faf8bff851e4f339e88&ckck=1>.
- [18] Glasscock, D., Kozielski, G. and Martens, M. (2008) “High Performance Polyamides Fulfill Demanding Requirements for Automotive Thermal Management Components,” *DuPont Engineering Polymers*, pp. 1–9.
- [19] Muzzy, J. “Thermoplastics – Properties,” Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA.
-

- [20] PolymerProcessing. Acedido Junho de 2013, em:  
<http://www.polymerprocessing.com/polymers/PA66.html>.

## ANEXO A

Foi efectuada uma análise de propagação de erro tendo em conta todos os factores de erro das várias variáveis que são necessárias para os cálculos dos módulos de elasticidade.

Como as variáveis são todas independentes, pode ser utilizada a equação da propagação de erro simplificada. A mesma é definida, no caso presente pela equação **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** para a variância do módulo de elasticidade longitudinal e pela equação **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** para a variância do módulo de elasticidade transversal:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial m}\right)^2 \cdot \Delta m^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial f_f}\right)^2 \cdot \Delta f_f^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial L}\right)^2 \cdot \Delta L^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial b}\right)^2 \cdot \Delta b^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial t}\right)^2 \cdot \Delta t^2} \quad (1)$$

$$\Delta G = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial m}\right)^2 \cdot \Delta m^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial f_f}\right)^2 \cdot \Delta f_f^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial L}\right)^2 \cdot \Delta L^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial b}\right)^2 \cdot \Delta b^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial t}\right)^2 \cdot \Delta t^2} \quad (2)$$

Após efectuar os cálculos, foram obtidos os valores da variância associada a cada grandeza medida em cada provete e o erro máximo associados aos módulos de elasticidade, que se apresentam na Tabela 1.

**Tabela 1.** Erros associados às grandezas medidas

	Provete A		Provete B		Provete C	
$\Delta L$	0,0643	0,0579 %	0,0514	0,0468 %	0,0329	0,0402 %
$\Delta t$	0,0314	1,5726 %	0,0100	0,5155 %	0,0429	1,1732 %
$\Delta b$	0,1400	0,7273 %	0,1100	0,5820 %	0,0200	0,2193 %
$\Delta m$	0,0002	0,0014 %	0,0002	0,0015 %	0,0002	0,0046 %
$\Delta f$	2,5432	0,2994 %	20,3451	0,7299 %	20,3451	1,2048 %
$\Delta E$	3,37	4,8%	-	-	0,62	4,24%
$\Delta G$	-	-	2,07	8,23%	-	-

Observando os valores obtidos é possível concluir que a variável que mais influencia tem no erro máximo do módulo de elasticidade longitudinal é a espessura. Uma vez que tem um erro máximo da mesma magnitude que pelo facto de incidir numa dimensão nominal mais pequena se traduz num maior erro relativo, dificultando assim a precisão na sua medida.

No caso do módulo de elasticidade transversal isto acontece na frequência porque a casa de tempo de aquisição de sinal escolhida não foi a mais correcta.

