

Sistema para determinação da temperatura de transição vítrea de adesivos

Diogo André Santos Azevedo

Dissertação do MIEM – Ramo de automação

Orientador: Professor António Mendes Lopes (FEUP - DEMec – SAIC)

Co-orientador: Professor Lucas F.M. da Silva (FEUP - DEMec – SMPT)



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho de 2014

“No amount of experimentation can ever prove me right; a single experiment can prove me wrong.”

Albert Einstein

Resumo

Contrariamente à grande maioria dos metais, em que as propriedades não variam muito com a temperatura, os materiais poliméricos (onde se inserem os adesivos), apresentam uma grande variação das suas propriedades mecânicas em função da temperatura a que estão expostos. Isto deve-se ao facto da sua temperatura de transição vítrea, abreviada T_g , não estar muito afastada da temperatura ambiente ou das temperaturas de funcionamento. Quando se encontram abaixo da T_g , os adesivos comportam-se de forma vítrea. Acima desta temperatura, o seu comportamento assemelha-se ao da borracha.

Os métodos comumente utilizados na determinação da T_g baseiam-se em análises térmicas ou termomecânicas. Na *Dynamic Mechanical Thermal Analysis* (DMTA), as propriedades mecânicas são medidas em função da temperatura. Para temperaturas afastadas da T_g , o amortecimento é bastante mais baixo. Na T_g , surge um pico no amortecimento correspondente à energia máxima dissipada. Medindo o pico de amortecimento em função da temperatura, a T_g pode ser determinada.

Um método consiste em fazer vibrar uma amostra de adesivo à sua frequência de ressonância e registar a temperatura e amplitude de oscilação. Segundo a teoria da vibração forçada, o amortecimento é proporcional ao inverso da amplitude. O que significa que quando a amplitude é mínima o amortecimento é máximo. O valor exato do amortecimento não é necessário, apenas a temperatura à qual ocorre. O objetivo principal desta dissertação consiste na otimização de um sistema baseado neste princípio.

Neste trabalho de dissertação foram implementadas alterações a um sistema para determinação de T_g existente, que levaram à substituição de vários componentes de *hardware* do método acima descrito como o gerador de sinais, o osciloscópio, do amperímetro e da caixa de *feedback* por uma carta de aquisição de dados. Foi ainda desenvolvida de uma interface gráfica onde estão reunidas todas as funcionalidades da nova versão do protótipo laboratorial.

O sistema foi montado e testado, para obter resultados e compará-los com valores de referência. Para isso foram utilizados os adesivos Nagase Chemtex® XN1244 e Araldite® 2011.

System to determine the glass transition temperature (T_g) of adhesives

Abstract

Contrary to most metals, that properties do not vary much with temperature, polymeric materials present a wide variation of mechanical properties depending on the temperature they are exposed. This is due to the fact that glass transition temperature, abbreviated T_g, is not too far from the environment temperature or the operating temperature. Below T_g, polymers have a glass-like behavior and above T_g they have a rubber-like behavior.

The most common methods used to determine T_g are based on thermal and thermo-mechanical analyses. In the dynamic mechanical thermal analysis (DMTA), the mechanical properties are measured as a function of the temperature. Below and above T_g (in cross-linked materials), the damping is often quite low. At T_g, there is a peak corresponding to the maximum energy dissipated hence the maximum damping. Therefore, if the damping peak can be measured as a function of temperature then T_g can be determined.

One method consists in to vibrate a sample of adhesive to its resonant frequency and record the temperature and oscillation amplitude. From the theory of forced vibration, the damping is proportional to the inverse of the amplitude. This means that when the amplitude is minimal damping is maximum. The exact value of the damping is not needed, but just the temperature at which it peaks. The main objective of this dissertation consists in optimizing a system based on this principle.

This work led to replacement of several hardware components such as the method described above as the signal generator, oscilloscope, and ammeter feedback box by a data acquisition card. And the development of a graphical interface where all the features are combined.

The system has been assembled and tested, in order to obtain results and compare them with reference values. For this were used the adhesives Nagase Chemtex® XN1244 and Araldite® 2011.

Agradecimentos

Gostava de começar por agradecer ao meu orientador, Professor António Mendes Lopes, pela paciência, dedicação e disponibilidade em me ajudar e ensinar ao longo desta dissertação. E também pela oportunidade de trabalhar neste projeto.

De agradecer também ao meu co-orientador, Professor Lucas F.M. da Silva, por todas as críticas construtivas e boa disposição. Também pela exigência e incentivo incutido nas reuniões realizadas durante esta dissertação.

A todos os colegas do Grupo de Adesivos, em especial, ao Eduardo Marques e Ricardo Carbas por todo o apoio prestado e pela amizade.

Ao António José Ramos Silva, pela ajuda e disponibilidade demonstradas no esclarecimento de dúvidas relacionadas com o LabVIEW.

Aos colegas e amigos Sérgio Costa e Rui Barbosa, pela ajuda prestada e pelas gargalhadas e momentos divertidos.

Aos meus pais, Maria Helena dos Santos Reis e Fernando do Couto Azevedo, pela força anímica e pelo apoio financeiro que permitiram a minha formação académica.

À minha irmã, Raquel Patrícia dos Santos Azevedo, pelo apoio nos momentos difíceis. Foi sem dúvida indispensável na motivação para realizar este trabalho de dissertação.

A todos os meus colegas e amigos não mencionados, mas que representaram um enorme apoio.

A todos, os meus mais sinceros agradecimentos.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Definição do problema.....	2
1.3	Objetivos	2
1.4	Metodologia de trabalho	2
1.5	Estrutura da dissertação	3
2	Métodos para determinar a T_g	4
2.1	Adesivos.....	4
2.2	Temperatura de transição vítrea, T_g	5
2.3	Métodos tipicamente utilizados para medição da T_g	7
2.3.1	<i>Thermal Mechanical Analysis</i> (TMA).....	7
2.3.2	<i>Differential Scanning Calorimetry</i> (DSC).....	8
2.3.3	<i>Dynamic Mechanical Thermal Analysis</i> (DTMA).....	10
2.4	Comparação entre TMA, DSC e DMTA	12
3	Estudo do sistema existente	14
3.1	Princípio de funcionamento	14
3.2	Provete e respetivo molde	18
3.3	Estrutura de suporte dos provetes e disposição dos elementos nela contidos	21
3.3.1	Estrutura de suporte	21
3.3.2	Posicionamento do provete, das bobinas de excitação e do termopar ..	21
3.4	Sistema de aquecimento.....	22

3.5	Funcionamento do sistema de excitação	24
3.5.1	Geração de sinal	24
3.5.2	Sistema de excitação contínua em ressonância, ‘Caixa de <i>feedback</i> ’ ...	26
3.6	Aquisição de dados	28
4	Otimização do sistema de determinação da T_g	30
4.1	Alternativa e requisitos	30
4.2	Carta de aquisição de dados NI PCI-6221	33
4.3	Transdutor de corrente Pololu ACS714	34
4.4	Amplificador de corrente Bruel and Kjaer 2706.....	35
4.5	<i>Software</i> de desenvolvimento (LabVIEW vs. Simulink).....	35
4.6	Substituição do <i>hardware</i> do sistema	36
4.7	LabVIEW	39
4.8	Configuração da carta de aquisição de dados	41
4.8.1	Envio de dados	41
4.8.2	Receção de dados	42
4.9	Interface gráfica	45
4.10	Controlo	47
4.11	Lógica programada	48
4.11.1	Geração de sinal	48
4.11.2	Receção de sinais	49
4.11.3	Aquisição e separação de sinais	49
4.11.4	Variável do processo.....	50
4.11.5	Implementação do controlador	51
4.11.6	Tratamento do sinal de temperatura.....	54

4.11.7	Conversão do sinal de saída do transdutor de corrente para Ampere ...	55
5	Ensaio de validação de resultados	56
5.1	Adesivos testados	56
5.2	Preparação dos provetes	57
5.3	Resultados	59
6	Conclusões e possíveis trabalhos futuros.....	62
6.1	Conclusões	62
6.2	Trabalhos futuros	63
	Referências e Bibliografia	64
ANEXO A:	NI PCI-6221	67
ANEXO B:	Pololu ACS714	79
ANEXO C:	Nagase Chemtex® XN1244	82
ANEXO D:	Huntsman® Araldite® 2011	84

Índice de Figuras

Figura 1 – Gráfico da variação do módulo dinâmico, E^* , e do amortecimento, η , em função da temperatura de um polímero amorfo (Zhang, 2008)	6
Figura 2 - Esquema de um equipamento de ensaio TMA (Menczel et al., 2009)	7
Figura 3 - Representação esquemática de uma curva representativa do método TMA (Lobo et al., 2002).....	8
Figura 4 – Exemplos de instrumentação na técnica de DSC: a) compensação de potência, b) fluxo de calor	9
Figura 5 - Gráfico esquemático da entalpia em função da temperatura na determinação T_g (Zhang, 2008)	10
Figura 6 – Esquema de representação das curvas E' , E'' e $\tan \delta$ em função da temperatura (da Silva et al., 2007).....	11
Figura 7 - Amortecimento vs. Temperatura de um material polimérico (Koh, 2000).....	14
Figura 8 – a) Vibração forçada, b) Vibração livre.....	15
Figura 9 - Variação da amplitude em função da frequência de excitação e da frequência de ressonância.....	15
Figura 10 – a) Íman, b) Bobina.....	16
Figura 11 - Princípio de funcionamento do equipamento de determinação da T_g , a) Intensidade máxima de corrente elétrica, b) Corrente elétrica nula, c) Intensidade mínima de corrente elétrica (Telha, 2012).....	17
Figura 12 - Sistema de determinação da T_g existente (PC não mostrado nesta figura)	17
Figura 13 - Esquema de ligação do <i>hardware</i>	17
Figura 14 - a) Configuração do provete solicitado térmica e mecanicamente, b) Provete solicitado apenas termicamente (Tufan, 2013).....	18
Figura 15 - Gráfico 1/Amplitude (Amortecimento) vs. Temperatura de um adesivo de resina epoxy (Koh, 2000).....	19
Figura 16 - Molde utilizado na produção de provetes	19
Figura 17 - Esquema de provete recorrendo a método de produção alternativo (Zhang, 2008)	20

Figura 18 – a) Modelo 3D da estrutura de suporte, b) Estrutura de suporte construída (Telha, 2012).....	21
Figura 19 - Imagem da bobina de excitação.....	22
Figura 20 - Imagem da estufa utilizada	22
Figura 21 - Esquema da estufa (Zhang, 2008).....	23
Figura 22 - Controlador de temperatura Anglicon	23
Figura 23 - Esquema representativo de ligação da geração de sinal	24
Figura 24 – Representação de sinais em fase	25
Figura 25 - a) Bobina de excitação, b) Multímetro Velleman® DVM345DI.....	25
Figura 26 - Tratamento de sinal na caixa de <i>feedback</i> (Zhang, 2012).....	26
Figura 27 - Identificação da caixa de <i>feedback</i> no sistema de determinação T_g existente.....	27
Figura 28 - Interior da caixa de <i>feedback</i> existente	27
Figura 29 - Esquema representativo de ligação do sistema de determinação T_g	28
Figura 30 - Leitura de sinais em ‘Modo de <i>feedback</i> ’, a azul o sinal de excitação e a amarelo o de <i>feedback</i>	28
Figura 31 - Carta de aquisição de dados instruNet iNet-100B	29
Figura 32 - Exemplos de cartas de aquisição de dados, a) NI USB-6008, b) OMB-DAQ-3000 Series, c) NI PXI Express X Series, (NI Corporation, 2014; OMEGA Engineering inc, 2014)	30
Figura 33 – Transdutores de corrente de efeito de Hall, a) Pololu ACS714, b) SparkFun ACS712 (Pololu Corporation, 2014; SparkFun Electronics, 2014).....	32
Figura 34 - Carta de aquisição de dados, NI PCI-6221 (NI Corporation, 2014).....	33
Figura 35 - a) Cabo NI SHC68-68-EPM, b) Bloco de terminais BNC 2110 (NI Coporation, 2014).....	34
Figura 36 - a) Transdutor de corrente sem conectores (Pololu Corporation, 2014), b) Transdutor de corrente com conectores	34
Figura 37 - Amplificador Bruel and Kjaer 2706	35

Figura 38 - Ambiente de programação do LabVIEW 2011	36
Figura 39 - Esquema representativo de ligação do sistema de determinação de T_g utilizando uma carta de aquisição de dados	37
Figura 40 – Caixa de acondicionamento, a) Interior, b) Exterior.....	37
Figura 41 - Caixa de acondicionamento instalada na estrutura de apoio	38
Figura 42 - Configuração do sistema de determinação de T_g , computador não mostrado nesta imagem	38
Figura 43 - Exemplo de diagrama de blocos, LabVIEW	39
Figura 44 - Drivers aconselhados para a placa de aquisição de dados, NI PCI-6221 (NI Corporation, 2012)	40
Figura 45 - Compatibilidade de drivers com versões de LabVIEW (NI Corporation, 2005) ..	40
Figura 46 - Menu de funcionalidades de programação, envio de dados	41
Figura 47 - Janela de configuração de saída analógica, ao0.....	42
Figura 48 - Menu de funcionalidade utilizado, bloco de configuração de recepção de dados ...	42
Figura 49 - Configuração da entrada analógica ai0 para sinal de <i>feedback</i>	43
Figura 50 - Configuração da entrada analógica ai1 para sinal de excitação.....	43
Figura 51 - Configuração da entrada analógica ai2 para termopar.....	44
Figura 52 - Configuração de entrada analógica ai3 para leitura do transdutor de corrente.....	44
Figura 53 - Diagrama de funcionalidades da interface gráfica desenvolvida.....	45
Figura 54 - Separador "Ensaio"	46
Figura 55 - Separador "Opções avançadas"	46
Figura 56 - Esquema de controlador PID onde “R” é a referência, “e” é o erro, “u” é a ação de controlo e “Y” é a variável do processo	47
Figura 57 - Diagrama de fluxo do algoritmo implementado no envio de dados.....	48
Figura 58 - Geração de sinal sinusoidal implementado em LabVIEW	48
Figura 59 – Diagrama de fluxo do algoritmo implementado na aquisição de dados	49

Figura 60 - Receção e separação de sinal em LabVIEW	50
Figura 61 - Bloco "Separador de sinais.vi"	50
Figura 62 – Cálculo da variável de processo (desfasamento)	50
Figura 63 - Gráfico Erro vs SP-PVf, em função do parâmetro de linearidade, L	51
Figura 64 - Implementação de um controlador PID com configurações avançadas	52
Figura 65 - Implementação de PI no controlo de linearidade do controlador PID.....	52
Figura 66 - Tabela de efeito de ajuste dos parâmetros P, I, D.....	53
Figura 67 - Parâmetros do controlador PI	53
Figura 68 - Parâmetros do controlador PID.....	53
Figura 69 - Parâmetros do controlador PID 2.....	54
Figura 70 - Parâmetros do controlador PID 3.....	54
Figura 71 - Parâmetros do controlador PID 4.....	54
Figura 72 - Aplicação de média móvel ao sinal de temperatura	54
Figura 73 - Gráfico da característica real e ideal do transdutor de corrente Pololu ACS714 ..	55
Figura 74 - Conversão do sinal de tensão fornecido pelo transdutor de corrente em Ampère.	55
Figura 75 - Resultado do ensaio DMTA ao adesivo Nagase Chemtex® XN1244 (Banea et al., 2011).....	56
Figura 76 – Efeito da temperatura de cura na T_g do adesivo epoxy Araldite® 2011 (Carbas et al., 2014).....	57
Figura 77 - Composição do provete (Telha, 2012).....	57
Figura 78 – a) Sequência de montagem do provete, b) Colocação das barras de alumínio no molde (Telha, 2012)	58
Figura 79 – a) Molde fechado, com termopares aplicados, b) Prensa utilizada na cura do adesivo XN 1244	58
Figura 80 - Resultado do primeiro ensaio, Amplitude vs. Temperatura para o adesivo Nagase Chemtex® XN1244.....	59

Figura 81 - Resultado do segundo ensaio, Amplitude vs. Temperatura para o adesivo Nagase Chemtex® XN1244..... 59

Figura 82 - Resultado do primeiro ensaio, Amplitude vs. Temperatura para o adesivo Araldite® 2011 60

Figura 83 - Resultado do segundo ensaio, Amplitude vs. Temperatura para o adesivo Araldite® 2011 60

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Efeito do método de medição no valor da T_g (Konarski, 1999) 12

Tabela 2 - Comparação de resultados experimentais de T_g 61

1 Introdução

1.1 Contextualização

Os adesivos têm-se afirmado ao longo da história como uma alternativa de ligação estrutural capaz de solucionar diversos problemas associados às técnicas tradicionais (rebites, parafusos, soldadura, etc.). Esta tecnologia encontra-se em franca expansão devido às vantagens que apresenta e, portanto, à necessidade de introduzir inovações que adequem os adesivos às mais diversas aplicações é constante.

O desenvolvimento contínuo desta área leva à necessidade de caracterizar com regularidade as propriedades dos adesivos. Entre estas encontram-se as propriedades térmicas, que têm uma influência significativa no comportamento destes materiais.

Contrariamente à grande maioria dos metais, em que as suas propriedades não variam muito com a temperatura, os materiais poliméricos (onde se inserem os adesivos), apresentam uma grande variação das suas propriedades mecânicas em função da temperatura a que estão expostos.

Isto deve-se ao facto da sua temperatura de transição vítrea, abreviada T_g , não estar muito afastada da temperatura ambiente ou das temperaturas de funcionamento. Quando se encontram abaixo da T_g , os adesivos comportam-se de forma vítrea e, acima desta temperatura, o seu comportamento assemelha-se ao da borracha. Este conceito é de extrema importância no estudo das propriedades dos materiais, fundamental para todo o projeto de engenharia envolvendo adesivos.

É no contexto do constante desenvolvimento de adesivos e respetivos equipamentos de ensaio que se insere o tema desta dissertação: Sistema para determinação da temperatura de transição vítrea de adesivos. Realizada no âmbito da unidade curricular Dissertação do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, ramo de Automação, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

1.2 Definição do problema

Os equipamentos para a determinação de T_g atualmente existentes no mercado são dispendiosos, relativamente complexos, pouco expeditos e com longos ciclos de ensaio, que podem alterar as propriedades do material. Como alternativa, foi desenvolvida na FEUP um sistema controlado manualmente para a determinação da T_g . Trata-se de uma solução que permite determinar a T_g com precisão, que além de ser relativamente económica, tem também um tempo de ensaio curto, quando comparado com soluções comerciais.

No entanto, o sistema manual revelou-se pouco compacto, pouco prático e relativamente complexo de utilizar. A necessidade de tratamento de dados para conhecer a T_g do adesivo ensaiado é uma realidade deste sistema, motivando o desenvolvimento de uma nova solução.

1.3 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação foi introduzir alterações profundas ao sistema já existente para determinação da T_g , mantendo-se a mesma técnica de ensaio baseada na ressonância de uma camada constrangida de adesivo. As inovações a introduzir tinham como objetivo:

- Simplificar e diminuir a intervenção do utilizador no processo;
- Reduzir a quantidade de *hardware* utilizado, de forma a tornar o sistema mais compacto;
- Conceber e implementar um sistema de controlo automatizado;
- Desenvolver uma interface gráfica capaz de preencher os seguintes requisitos:
 - Gerar um gráfico Amortecimento vs. Temperatura;
 - Possibilitar a exportação dos dados do ensaio;
 - Monitorizar e gerar mensagem de alerta, caso seja ultrapassado o valor de corrente máximo na bobina de excitação (1 A);
- Implementar opções avançadas de configuração.

1.4 Metodologia de trabalho

Nesta dissertação foi otimizado um sistema existente para determinação da T_g , de maneira a formar um conjunto mais compacto e de mais fácil utilização. A medição da T_g é importante e, como tal, devem ser garantidos resultados precisos e fiáveis.

Para isso, numa primeira abordagem, depreendeu-se que seria necessário um estudo relativo a métodos e sistemas usados na determinação da T_g , bem como uma análise ao

equipamento existente, que permitisse entender o seu funcionamento e verificar como se realizam os ensaios.

Depois de compreendido o assunto e o sistema existente, partiu-se então para a identificação de possíveis alterações capazes de cumprir os objetivos propostos. Para o efeito, foi necessário criar uma configuração preliminar, onde se apresentaram soluções de *hardware* e controlo alternativas.

Tendo em conta as soluções alternativas, foram selecionadas as que cumpriam melhor a finalidade pretendida, com vista à sua implementação.

Dispondo dos elementos de *hardware* e *software* necessários, deu-se início à alteração do sistema existente. Tendo em conta a necessidade de validar as alterações efetuadas, foram sendo executados testes intermédios ao longo de todo o processo.

Foi desenvolvida uma interface gráfica capaz de atender às necessidades do utilizador, bem como à especificidade do ensaio, e implementada a lógica programada necessária para o correto funcionamento do sistema.

Concluídas as tarefas anteriores e estando o sistema funcional, realizaram-se então uma série de testes finais, capazes de validar todas as alterações implementadas no sistema.

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos, incluindo a introdução.

No capítulo 2 o leitor é introduzido no âmbito da tese, sendo dadas a conhecer temáticas de adesivos, nomeadamente temperatura de transição vítrea, métodos comumente utilizados na determinação da mesma. É também feita uma comparação das diferentes técnicas.

O capítulo 3 consta o estudo detalhado do sistema existente e objeto de estudo desta dissertação. Aqui encontram-se descritos também modo de funcionamento do equipamento e procedimentos necessários para realizar um ensaio.

No capítulo 4 são apresentadas alternativas capazes de introduzir melhorias ao sistema anteriormente existente. São descritas as soluções implementadas e o resultado das mesmas. São ainda justificadas as escolhas efetuadas.

O capítulo 5 contém os resultados dos ensaios de validação, bem como a descrição da preparação dos provetes e caracterização dos adesivos testados.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões que resultaram do trabalho realizado.

O capítulo 7 apresenta sugestões de que visam a melhoria do sistema aqui otimizado.

Por fim, são incluídos alguns anexos, relativos a componentes comerciais utilizados.

2 Métodos para determinar a T_g

Neste capítulo faz-se uma breve introdução à tecnologia de adesivos. É também apresentada a T_g , a sua importância e os principais métodos que são correntemente utilizados na sua determinação, nomeadamente a *Thermal Mechanical Analysis*, *Differential Scanning Calorimetry* e *Dynamic Mechanical Thermal Analysis*.

Assim sendo, o capítulo está organizado da seguinte forma:

- Adesivos – é realizada uma breve descrição do tema que pretende ilustrar a sua importância no âmbito das ligações estruturais;
- Temperatura de transição vítrea, T_g – é explicado o conceito e as suas particularidades, sendo também salientada a sua importância nos materiais poliméricos;
- Métodos tipicamente utilizados para a medição da T_g – é apresentada uma listagem dos métodos estudados nas secções seguintes;
- *Thermal Mechanical Analysis* (TMA) – faz-se a exposição de uma das técnicas utilizadas na determinação da T_g ;
- *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) – descreve-se este método alternativo de medição da T_g ;
- *Dynamic Mechanical Thermal Analysis* (DMTA) – apresenta-se este outro método de determinação da T_g ;
- Comparação entre TMA, DSC e DMTA – como conclusão do presente capítulo, surge então a comparação das três técnicas TMA, DSC e DMTA.

2.1 Adesivos

Os adesivos apresentam-se como um meio alternativo de promover a ligação entre materiais. Pode ser considerado adesivo qualquer substância que oferece resistência à separação dos materiais em causa.

Atualmente os adesivos são utilizados nas mais diversas aplicações e áreas, como na indústria automóvel, naval, aeronáutica e até mesmo na construção civil, entre outras.

A sua utilização é justificada pelas vantagens que apresentam, nomeadamente:

- Capacidade de ligação de diferentes materiais;
- Amortecimento de vibrações;
- Distribuição de tensões bastante uniforme, relativamente a métodos tradicionais de ligação;
- Criação de um contacto contínuo entre as superfícies ligadas.

Estas são apenas algumas vantagens inerentes à utilização de adesivos, no entanto existem também algumas desvantagens:

- Devem ser usadas geometrias que evitem tensões localizadas;
- Têm uma resistência limitada quando utilizados em condições extremas, tais como calor e humidade;
- Muitos adesivos são curados a temperaturas elevadas;
- Não existe um critério de dimensionamento universal, sendo que vários se adequam apenas a determinadas situações particulares;
- Controlo de qualidade é difícil.

Tal como acontece com qualquer material utilizado na indústria, as propriedades dos adesivos são objeto de estudo. Entre elas estão as propriedades térmicas, de cura, elétricas, mecânicas e térmicas, entre outras.

Os adesivos são tipicamente materiais poliméricos que, ao contrário de outros materiais, apresentam uma grande variação das suas propriedades mecânicas em função da temperatura a que estão expostos. O conhecimento das temperaturas de transição é essencial neste tipo de tecnologia (da Silva et al., 2007).

O crescente interesse nesta área prende-se com o facto da ligação entre diferentes tipos de materiais ser muitas vezes difícil usando métodos tradicionais. Nessas situações os adesivos apresentam-se como uma solução a ter em conta.

2.2 Temperatura de transição vítrea, T_g

As variações de temperatura nos materiais poliméricos permitem observar alterações no seu comportamento associadas às ‘temperaturas de transição’, que podem ser caracterizadas, por exemplo, pela variação do módulo de elasticidade, da entalpia ou do volume específico.

O conceito de temperatura de transição vítrea, T_g , é definido com sendo uma propriedade térmica que distingue claramente o comportamento vítreo de um comportamento borrachoso. Os adesivos, como materiais poliméricos que são, podem ser total ou parcialmente amorfos e são caracterizados pela sua T_g . Abaixo da T_g , tendem a comportar-se como um sólido, vendo a sua rigidez aumentar gradualmente com o decremento da temperatura. Acima da T_g , tornam-se dúcteis e facilmente deformáveis (da Silva et al., 2007).

A T_g pode ser compreendida tendo em conta a natureza das alterações que ocorrem à temperatura em questão. Quando um material é aquecido até este ponto ou acima dele, o movimento dos átomos torna-se bastante mais fácil, tendo como consequência um aumento da flexibilidade e da capacidade de deformação do adesivo. Abaixo da T_g existe uma proximidade maior das ligações atômicas, levando assim a uma maior rigidez do adesivo, que passa então a exhibir uma menor elasticidade.

No caso dos materiais amorfos e devido à sua complexidade estrutural, a T_g não é uma temperatura única mas sim um pequeno conjunto de temperaturas no qual existe uma variação notável das propriedades do material. A norma ASTM E1142-07 define a T_g como sendo a temperatura escolhida para representar o conjunto de temperaturas à qual tal transição ocorre.

A T_g de um material pode ser determinada estudando a variação de um conjunto de parâmetros em função da temperatura, nomeadamente o módulo de elasticidade, o amortecimento, o volume específico e a entalpia, já referenciados anteriormente. Estes parâmetros sofrem variações consideráveis em torno da T_g , **Figura 1** (Zhang, 2008).

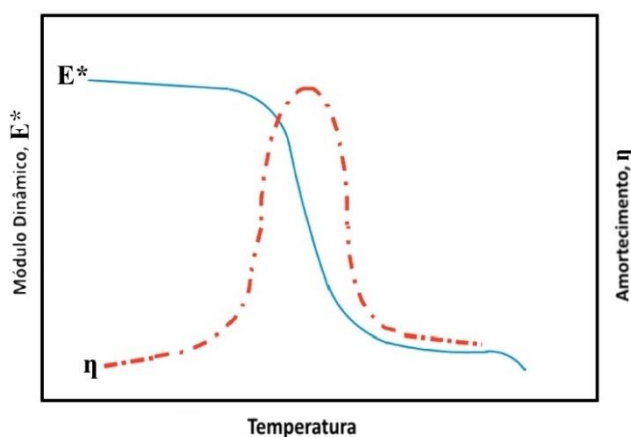


Figura 1 – Gráfico da variação do módulo dinâmico, E^* , e do amortecimento, η , em função da temperatura de um polímero amorfo (Zhang, 2008)

A identificação desta propriedade, no caso dos materiais poliméricos, mais concretamente nos adesivos, é de extrema importância devido às alterações consideráveis que as suas propriedades mecânicas sofrem em função da temperatura a que estão expostos.

Para determinar com exatidão a temperatura de transição vítrea existem vários métodos experimentais que permitem estudar a variação destas propriedades em função de uma gama de

temperaturas. Os métodos correntemente mais utilizados para esta finalidade são apresentados seguidamente.

2.3 Métodos tipicamente utilizados para medição da T_g

As próximas secções pretendem descrever as diferentes técnicas de medição da T_g , nomeadamente:

- *Thermal Mechanical Analysis (TMA)*;
- *Differential Scanning Calorimetry (DSC)*;
- *Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DTMA)*.

2.3.1 *Thermal Mechanical Analysis (TMA)*

A análise termomecânica (TMA) é uma técnica que permite estudar as propriedades dos materiais em função da variação da temperatura. Este processo consiste em medir as variações dimensionais da amostra em função da temperatura, ao mesmo tempo que a amostra é solicitada mecanicamente. Neste processo podem ser aplicados diversos tipos de carregamento, apesar de os mais utilizados serem a tração, flexão e compressão, **Figura 2**.

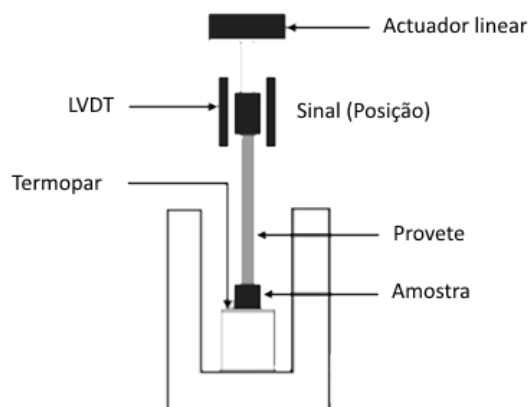


Figura 2 - Esquema de um equipamento de ensaio TMA (Menczel et al., 2009)

A TMA aplica-se a uma diversidade de materiais, como os compósitos, cerâmicos, adesivos e plásticos. Esta técnica, na área dos polímeros, é essencialmente utilizada para

determinar o coeficiente de expansão térmica e medir a T_g . Por vezes a temperatura de fusão (T_m) dos polímeros semi cristalinos é também medida recorrendo a este método.

As propriedades mencionadas podem ser medidas apenas uma vez (devido à degradação da amostra) recorrendo a este método. Como se pode observar na **Figura 3**, com o aumento da temperatura o espaço livre (volume livre) entre as ligações atómicas aumenta, facilitando a movimentação das ligações atómicas (volume ocupado). A T_g é determinada pelo ponto de intersecção entre as curvas referentes à zona vítrea e à zona onde existe um comportamento que se assemelha a borracha.

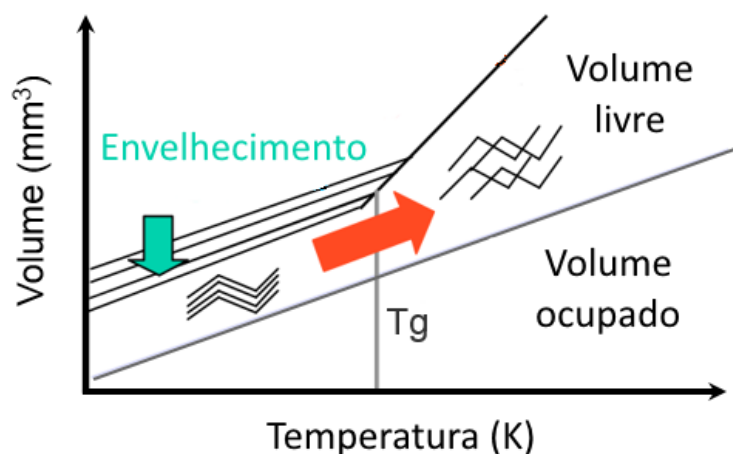


Figura 3 - Representação esquemática de uma curva representativa do método TMA
(Lobo et al., 2002)

Por vezes recorre-se a uma solitação dinâmica para estudar o comportamento elástico dos materiais. Esta variante é chamada de DLTMA (*dynamic load TMA*).

No entanto, estes métodos (TMA e DLTMA) são bastante dependentes da preparação da amostra e têm uma fraca repetibilidade (da Silva et al., 2007).

2.3.2 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

O DSC é um método que consiste em medir a quantidade de energia necessária para estabelecer o equilíbrio térmico entre uma amostra e um material inerte de referência. Necessita de um pequeno número de amostras para se obterem informações qualitativas e quantitativas relativamente às alterações químicas e físicas (da Silva et al., 2007).

Esta técnica faz parte de um grupo denominado por “Análises térmicas”, que se baseiam na deteção de alterações na entalpia ou calor específico da amostra em função da temperatura.

Para executar este processo existem essencialmente dois tipos de instrumentação: compensação de potência, **Figura 4a**, e fluxo de calor, **Figura 4b**. Apesar de serem diferentes, produzem resultados equiparáveis.

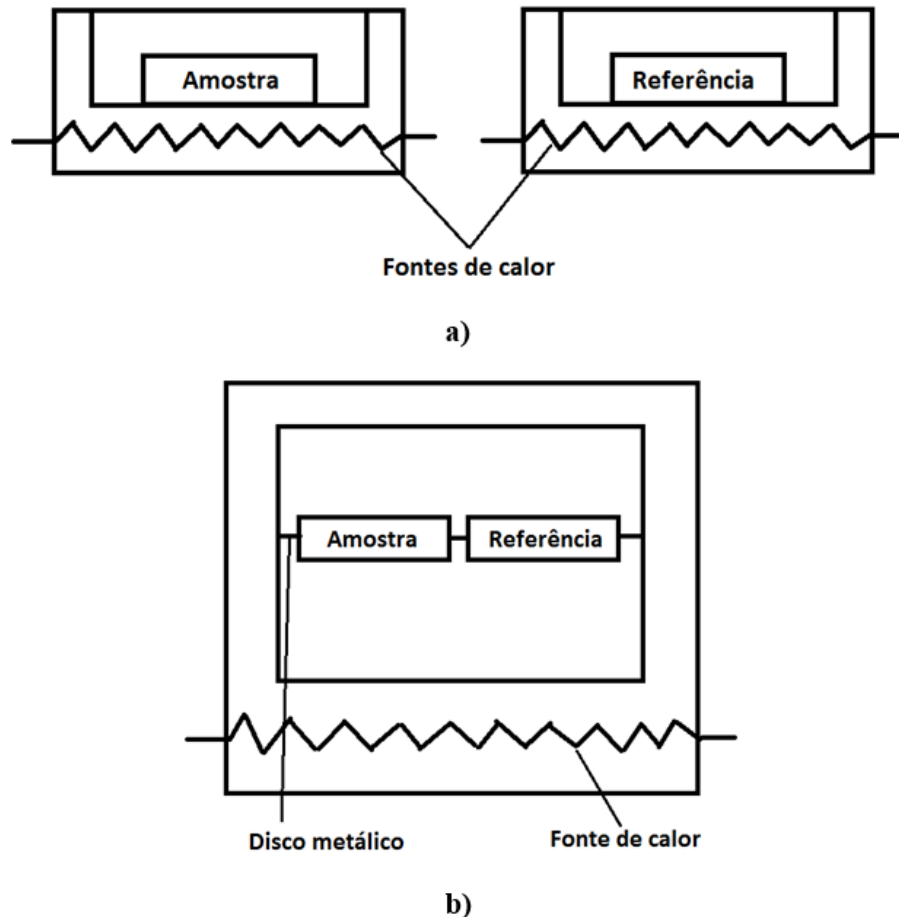


Figura 4 – Exemplos de instrumentação na técnica de DSC: a) compensação de potência, b) fluxo de calor

No caso da compensação de potência, **Figura 4a**, são utilizados dispositivos separados, um para a amostra e outro para a referência, e ambos são controlados independentemente. As temperaturas são mantidas aproximadamente iguais, sendo que a energia necessária para esse efeito é uma medida da variação da entalpia ou da capacidade calorífica da amostra, relativamente à referência. O sistema de fluxo de calor recorre a um disco metálico, com uma resistência térmica reduzida ao fluxo calorífico, como forma de ligação entre a amostra e a referência. O conjunto (amostra, referência e disco) é contido num único dispositivo de aquecimento, **Figura 4b**. Aqui a capacidade calorífica da amostra impõe um diferencial de temperatura relativamente à referência. A diferença de temperatura é registada e relacionada com a variação de entalpia da amostra, recorrendo a um sistema de calibração experimental (da Silva et al., 2007).

A análise do termograma DSC permite determinar dois parâmetros bastante relevantes, a T_g e a entalpia. A **Figura 5** permite observar a relação entre a temperatura e o fluxo de calor, que pode ser usada para identificar a T_g .

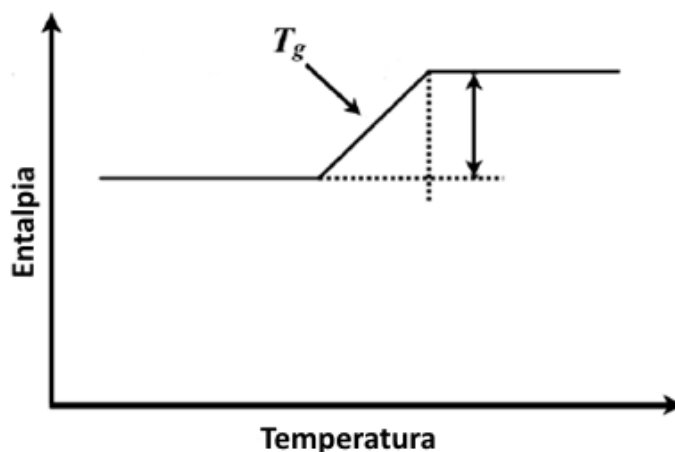


Figura 5 - Gráfico esquemático da entalpia em função da temperatura na determinação T_g (Zhang, 2008)

O sistema DSC é passível de ser utilizado numa extensa gama de temperaturas, pode ser aplicado a sólidos e a líquidos e a facilidade de preparação das amostras é também uma vantagem. O procedimento permite adquirir informação da T_g , do ponto de fusão e ebulição, do grau e taxa de cura, do tempo e temperatura de cristalização, da capacidade calorífica e do calor específico, da percentagem de pureza, da estabilidade térmica, entre outros.

As desvantagens mais significativas devem-se, sobretudo, aos resultados serem suscetíveis a erros, devido a calibrações incorretas, deficiências de acondicionamento e preparação das amostras e utilização de referências inapropriadas (Zhang, 2008).

2.3.3 *Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DTMA)*

A *Dynamic Mechanical (Thermal) Analysis*, abreviada DMA, também conhecida como DMTA, é outro método comumente utilizado na medição da T_g de materiais poliméricos. Este método baseia-se na medição do comportamento mecânico de um material em função da temperatura, frequência, tempo, tensão ou combinação desses parâmetros, para uma gama de temperaturas que pode variar entre $-150\text{ }^\circ\text{C}$ até $+500\text{ }^\circ\text{C}$ com um varrimento que pode variar de $0,1$ a $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{minuto}$, tanto no aquecimento como no arrefecimento. Esta técnica tem uma sensibilidade elevada, especialmente quando utilizada para determinar a T_g , uma vez que origina um amortecimento máximo pronunciado nos ensaios DMA (Rodriguez et al., 2003).

A natureza do material ensaiado deve ser tida em conta, pois os materiais podem ter comportamentos distintos. Enquanto um material dúctil se deforma reversivelmente até à sua transição elasto-plástica, cede e depois encrua até à rotura, os materiais frágeis, deformam-se pouco e de modo reversível até à sua rutura. Dentro do domínio elástico os materiais recuperam integralmente a sua forma, assim que a solitação aplicada é removida.

O dispositivo utilizado na realização de ensaios do tipo DMA é composto por um ambiente de temperatura controlada, onde está inserido um suporte que mantém a amostra em posição. Nesta técnica uma tensão do tipo sinusoidal é aplicada à amostra resultando num deslocamento que é medido, permitindo assim avaliar a propriedade viscoelástica do polímero. Para um material perfeitamente elástico resultará uma tensão e respetiva deformação em fase. No entanto, por exemplo, um material polimérico que apresente um comportamento viscoelástico sofre uma deformação elástica combinada com escoamento viscoso irreversível, o que fará com que as curvas tensão versus deformação fiquem desfasadas (Odlyha, 1997).

A **Figura 6** mostra um gráfico onde estão representadas curvas obtidas através do processo DMA, utilizando um adesivo epoxy. As curvas são $\tan \delta$, fator de amortecimento ou tangente de perda, o módulo da componente em fase, E' , que corresponde à energia armazenada (representa a parte elástica) e o módulo da componente desfasada, E'' , também denominada de módulo de perda, referente à quantidade de energia dissipada sob a forma de calor, todas elas em função da temperatura. O ponto de transição vítrea pode ser observado no ponto de inflexão de E' e picos de E'' e $\tan \delta$ (da Silva et al., 2007; Li et al., 2000).

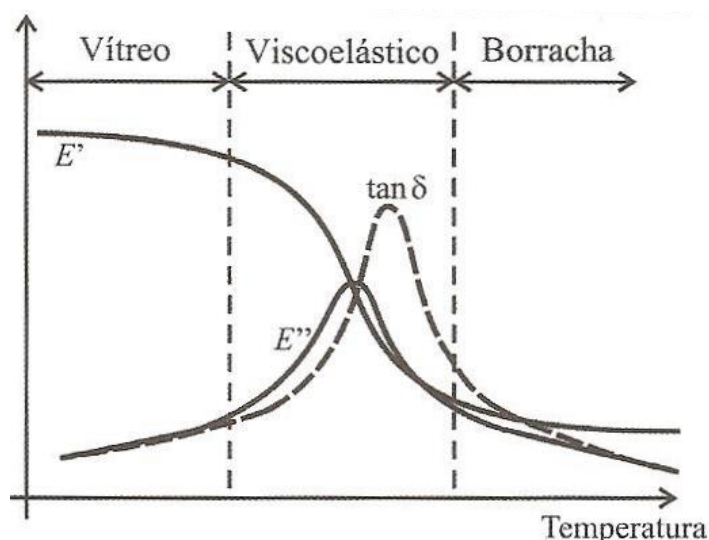


Figura 6 – Esquema de representação das curvas E' , E'' e $\tan \delta$ em função da temperatura (da Silva et al., 2007)

É de ter em conta que, para os polímeros amorfos, a região da T_g é alargada e os ensaios dependem de parâmetros como a frequência de ensaio e do varrimento da temperatura. Desta técnica resulta uma região de T_g que se estende desde o ponto de inflexão da curva E' até ao pico da $\tan \delta$. Segundo Li et al.(2000) é recomendado que a T_g registada seja a correspondente à temperatura medida no pico da curva E'' . Além disso este método pode alterar a cura do material ou secar as amostras, no caso das inicialmente líquidas.

Com esta técnica, é possível determinar com precisão uma série de parâmetros, nomeadamente a T_g , a rigidez, a tensão/deformação, a histerese mecânica, entre outros. Existe

uma vasta quantidade de materiais que podem ser estudados, que incluem os polímeros, elastómeros, adesivos, fibras e metais, entre outros (Li et al., 2000).

2.4 Comparação entre TMA, DSC e DMTA

A T_g pode ser medida de diversas formas, entre as quais os métodos TMA, DSC e DMTA.

O estudo de um epoxy recorrendo à DMA mostrou que a T_g de resinas epoxy baseadas no pico da $\tan \delta$ é significativamente influenciada pela frequência a que o ensaio é realizado (Li et al., 2000). Utilizar o pico do módulo de perda para determinar a T_g , demonstrou ser a forma mais consistente de determinar este parâmetro. Ainda assim para ensaios executados com incrementos de temperatura maiores, a T_g tende a ser maior.

Cada método tem as suas limitações e as suas vantagens. A T_g obtida pode variar de método para método. Konarski (1999), realizou um estudo sobre o efeito que os instrumentos de medição têm na determinação da T_g em amostras curadas a 145 °C durante 2 horas. A **Tabela 1** mostra as T_g obtidas pelos diferentes métodos, DMA, DSC e TMA. Este estudo verifica que a T_g medida varia em função da técnica utilizada. É possível ainda constatar que a T_g pode variar entre métodos mais de 15 °C.

Tabela 1 - Efeito do método de medição no valor da T_g (Konarski, 1999)

Método de medição	T_g (°C)	Duração do ensaio (minutos)
DSC	142	20
TMA	130	40
DMA	137 (módulo de perda) 146 ($\tan \delta$)	120

Comparativamente, a DSC é a técnica mais simples e rápida de medir a T_g . Requer amostras pequenas (tipicamente 5-20 g) e não necessita de uma preparação especial.

Este método, apesar de rápido e simples não é aplicável a todos os materiais e a utilização de uma tensão elevada, a alta densidade dos materiais amorfos, entre outras variáveis, pode influenciar a T_g ou tornar a transição difícil ou impossível de identificar. Esta técnica pode ser dispendiosa devido ao uso de grandes quantidades de nitrogénio líquido necessário no arrefecimento das amostras em cada ensaio.

A análise TMA consiste em aquecer a amostra e medir o diferencial dimensional da mesma. Este método provoca uma diminuição na distribuição de tensões próximo à T_g . Tal pode provocar variações na medição em função da localização onde esta é medida. Por exemplo, a T_g medida na extremidade da amostra pode ser diferente da medida na zona central.

A técnica DMA mede a energia necessária para provocar uma oscilação numa amostra curada. A tensão mecânica na amostra é medida em função da temperatura. Este método é bastante preciso, mas a T_g pode ser determinada de diversas formas o que pode levar a diferentes valores em cada ensaio.

É ainda de salientar o facto de todos os métodos demorarem algum tempo, em especial a DMA. O que pode alterar o grau de cura e secar as amostras. Esta é uma grande limitação quando se pretende medir a T_g em função do grau de cura ou em função da quantidade de água absorvida.

3 Estudo do sistema existente

Este capítulo pretende dar a conhecer o sistema existente e objeto de intervenção no decorrer desta tese. São descritos em detalhe o princípio de funcionamento, provetes utilizados, estrutura de suporte dos elementos do sistema, sistemas de excitação, controlo e aquecimento, aquisição de dados, entre outros.

3.1 Princípio de funcionamento

O sistema utilizado na determinação da T_g mede a variação de amortecimento de um provete em função da temperatura. Para isso é usado um adesivo constrangido entre uma viga de alumínio e uma chapa metálica, que é colocado a vibrar com a maior amplitude possível, enquanto é variada a temperatura. Quando a temperatura de transição vítrea é atingida, o amortecimento é máximo, com é ilustrado pela **Figura 7**.

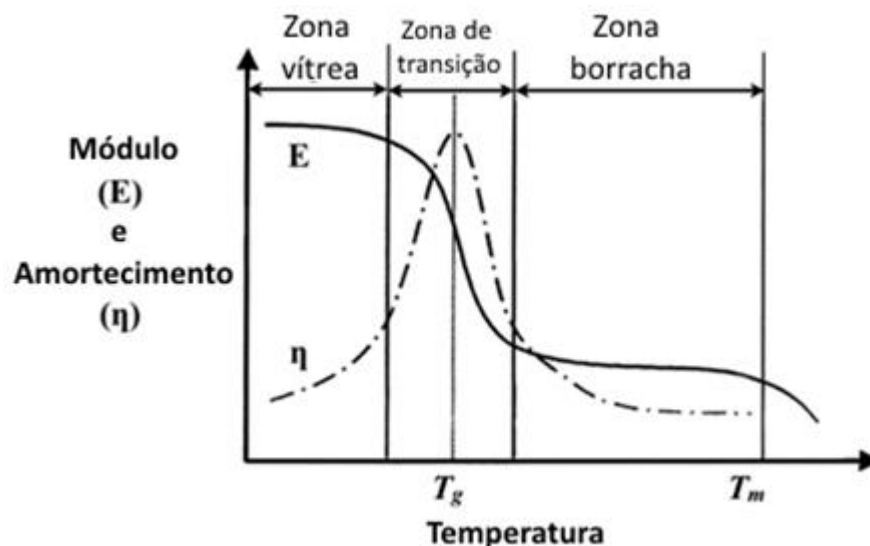


Figura 7 - Amortecimento vs. Temperatura de um material polimérico (Koh, 2000)

Identificando o ponto onde o amortecimento é máximo e a temperatura correspondente, a T_g pode ser determinada com precisão. Quando o amortecimento é máximo a amplitude de vibração é mínima.

O amortecimento pode ser visto como a diferença entre a energia dissipada sob a forma de calor no interior do material e a energia máxima armazenada durante uma oscilação. Existem no entanto uma série de diferenças, que são tipicamente usadas para caracterizar a capacidade de amortecimento. No caso mais simples, a vibração pode ser vista como livre ou forçada, como é possível verificar na **Figura 8**.

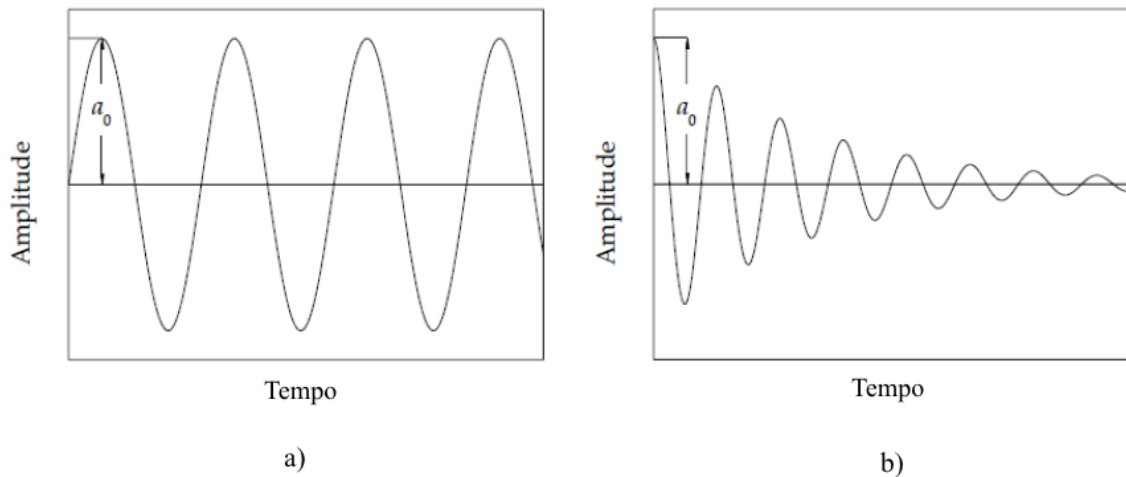


Figura 8 – a) Vibração forçada, b) Vibração livre

Quando a frequência de excitação é coincidente com a frequência de ressonância, a amplitude de vibração é amplificada como é visível na **Figura 9**. Quanto maior o amortecimento, mais rapidamente o transiente decrescerá e, conseqüentemente, a amplitude de ressonância será menor.

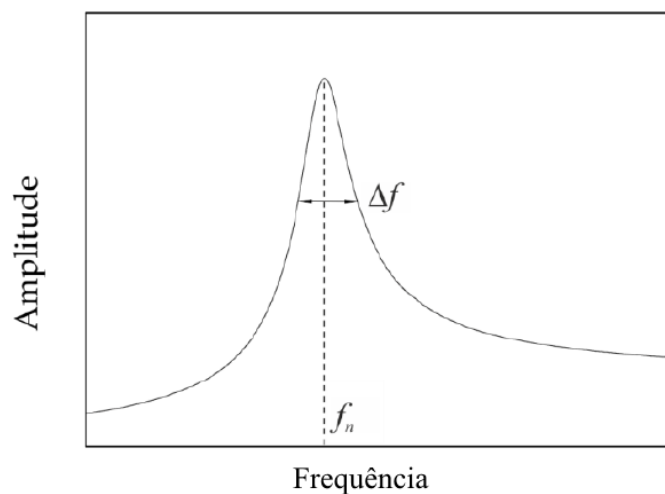


Figura 9 - Variação da amplitude em função da frequência de excitação e da frequência de ressonância

A propriedade de amortecimento nos materiais poliméricos é bastante importante na determinação da T_g . As propriedades alteram-se significativamente assim que é atingida a referida temperatura.

O equipamento descrito neste capítulo, impõe um movimento oscilatório contínuo a uma amostra de adesivo que está montada numa barra de alumínio. O movimento da barra é conseguido através da interação dos campos magnéticos de um íman, **Figura 10a**, montado na extremidade do provete, e de uma bobina alimentada em AC, como é possível verificar na **Figura 10b**. O provete está equipado com duas bobinas, uma de excitação, como já foi referido, e outra para medir a amplitude do movimento.

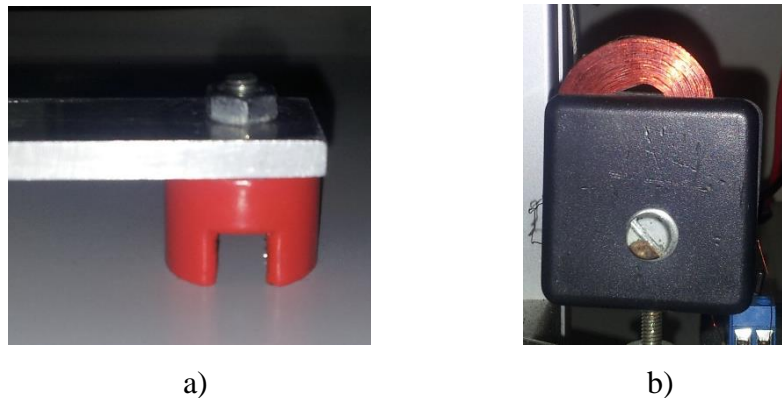
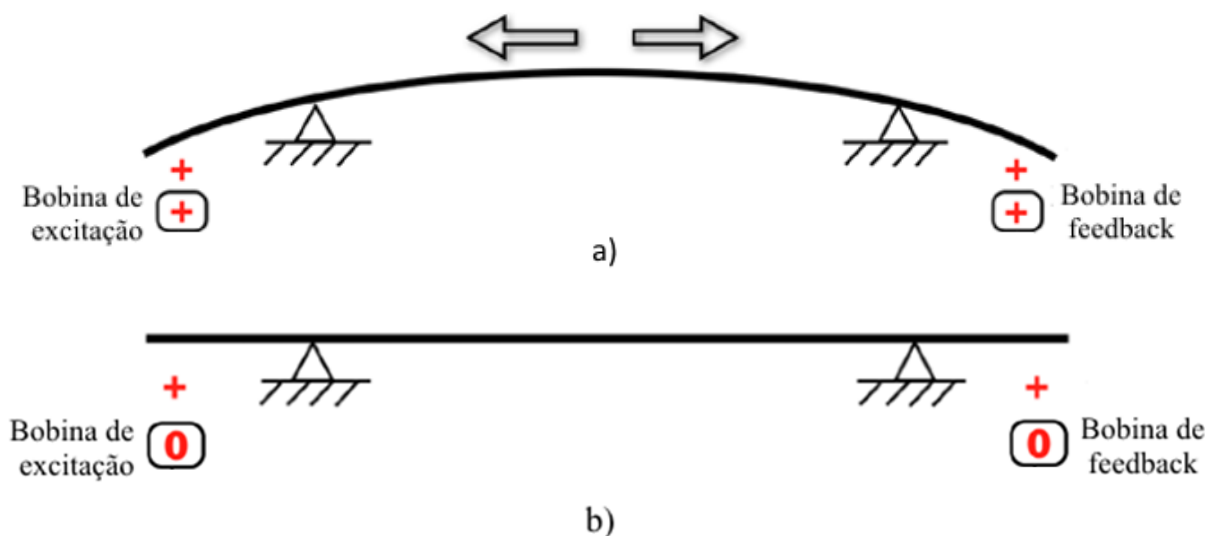


Figura 10 – a) Íman, b) Bobina

Quando a corrente elétrica atinge a intensidade máxima (sinal positivo) a bobina atrai o íman, **Figura 11a**. Com corrente zero (sinal neutro) o íman volta à sua posição inicial **Figura 11b**. Quando a corrente atinge a intensidade mínima (sinal negativo) a bobina repele o íman, **Figura 11c**. Excitando a bobina com uma corrente alternada é possível atrair e repelir o íman, criando assim um movimento alternado da barra que contém o adesivo. Mantendo uma excitação alternada na bobina, o provete e o adesivo nele inserido oscilarão continuamente num movimento alternado, denominado de vibração.



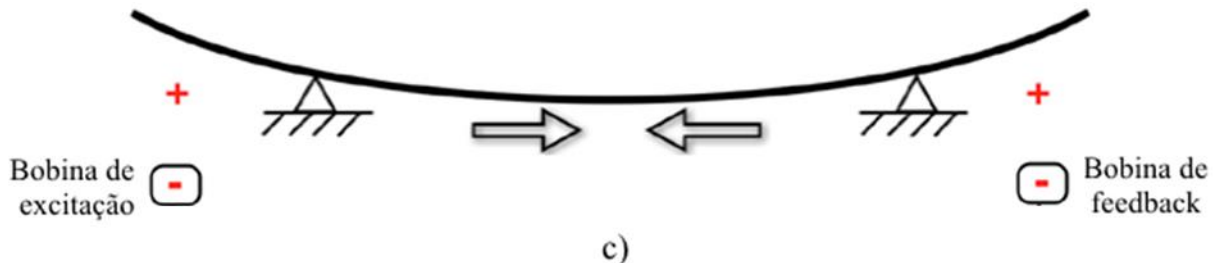


Figura 11 - Princípio de funcionamento do equipamento de determinação da T_g , a) Intensidade máxima de corrente elétrica, b) Corrente elétrica nula, c) Intensidade mínima de corrente elétrica (Telha, 2012)

A **Figura 12** e **Figura 13**, mostram o sistema existente e respetivo esquema de interação do *hardware*. Os seguintes subcapítulos são dedicados à explicação de cada elemento, bem como ao procedimento usado pelo utilizador para realizar um ensaio.



Figura 12 - Sistema de determinação da T_g existente (PC não mostrado nesta figura)

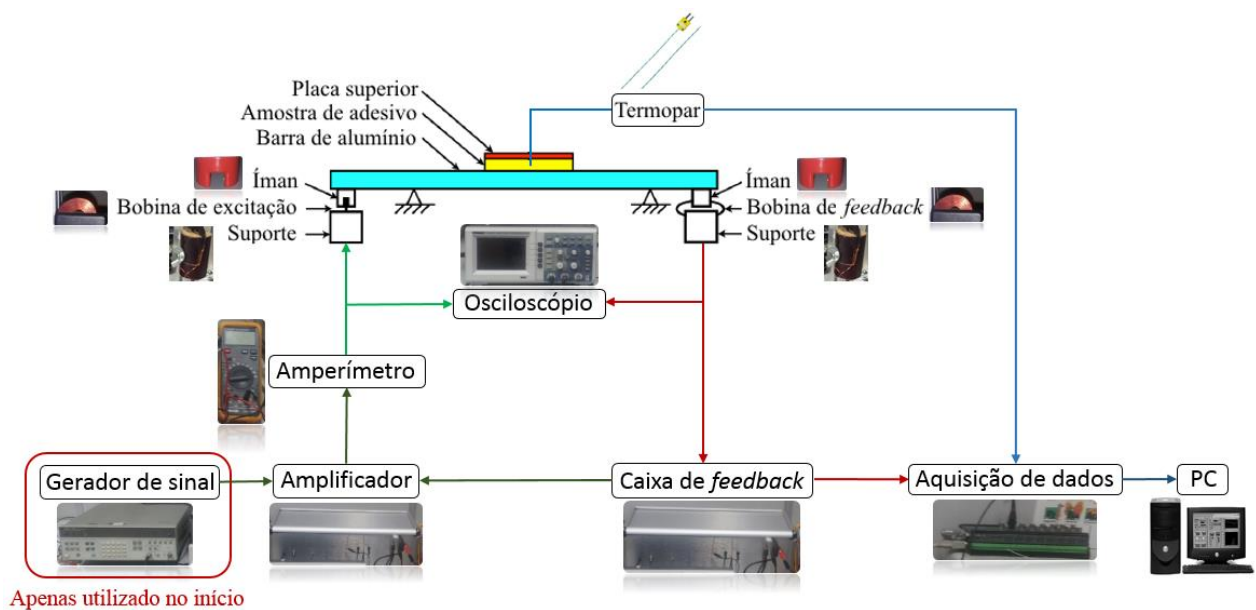


Figura 13 - Esquema de ligação do *hardware*

3.2 Provete e respetivo molde

Os provetes utilizados nos ensaios de determinação da T_g são essencialmente constituídos por duas peças, nomeadamente uma barra onde é embutido o adesivo e uma pequena placa que cobre o mesmo, ambas em liga de alumínio 2024. Estes elementos têm dimensões $250 \times 12.5 \times 3$ mm e $30 \times 12.5 \times 1$ mm (barra e placa superior, respetivamente). A escolha de alumínio deve-se à sua alta resistência, baixo calor específico, baixa rigidez e baixo amortecimento. O adesivo tem dimensões semelhantes à placa superior, mas o dobro de espessura (2 mm). A referida placa permite que o adesivo dissipe alguma energia e amplifica a influência da T_g , facilitando assim a sua leitura. Existe ainda um tipo de provetes utilizado no ensaio de adesivos não curados. Este contém uma cavidade onde é depositado o adesivo.

A **Figura 14** representa a configuração do provete, onde é possível verificar a posição do adesivo relativamente à barra e a placa superior. Em cada ensaio são utilizados dois provetes, colocados no mesmo ambiente de temperatura controlada. Enquanto um é solicitado mecânica e termicamente, **Figura 14a**, o outro, **Figura 14b**, é utilizado apenas na medição de temperatura. Estes provetes diferem entre si apenas na inclusão de um termopar. A necessidade de utilizar dois provetes surge como forma de evitar perturbações introduzidas pelo termopar na vibração do provete solicitado mecanicamente, sem prejudicar a medição da temperatura do adesivo.

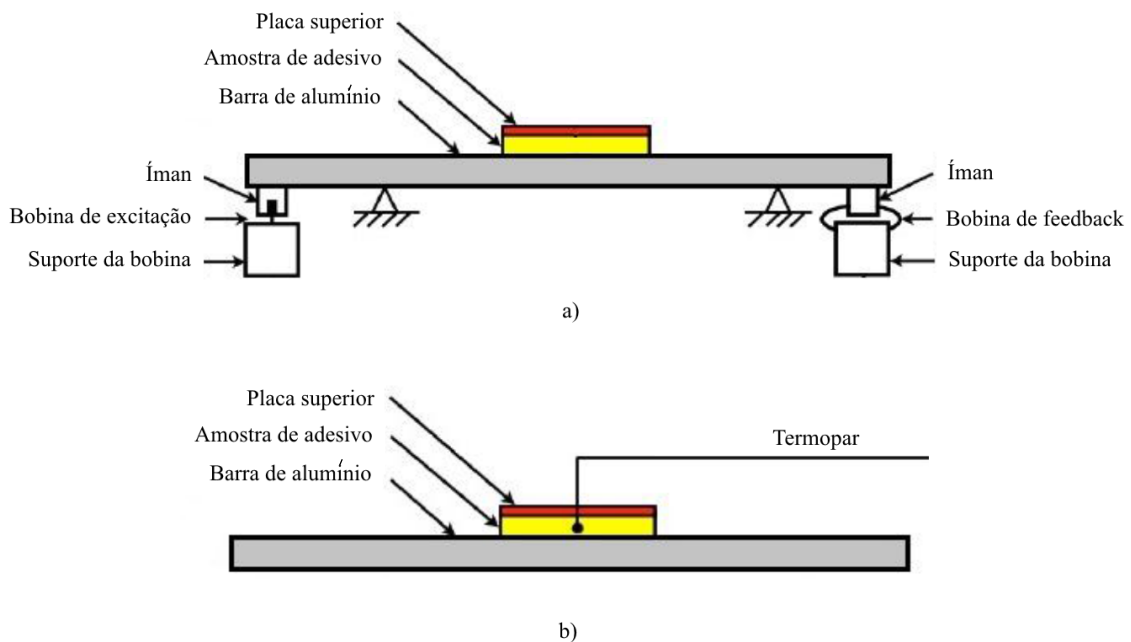


Figura 14 - a) Configuração do provete solicitado térmica e mecanicamente, b) Provete solicitado apenas termicamente (Tufan, 2013)

O comprimento do adesivo é justificado por um estudo (Koh, 2000), **Figura 15**, que identifica como comprimento ideal 30 mm. Como o comportamento do adesivo com 40 mm é

semelhante ao de 30 mm, não existe necessidade de utilizar um comprimento superior. Apenas iria ser usado mais adesivo e seria necessário um molde maior na produção de provetes.

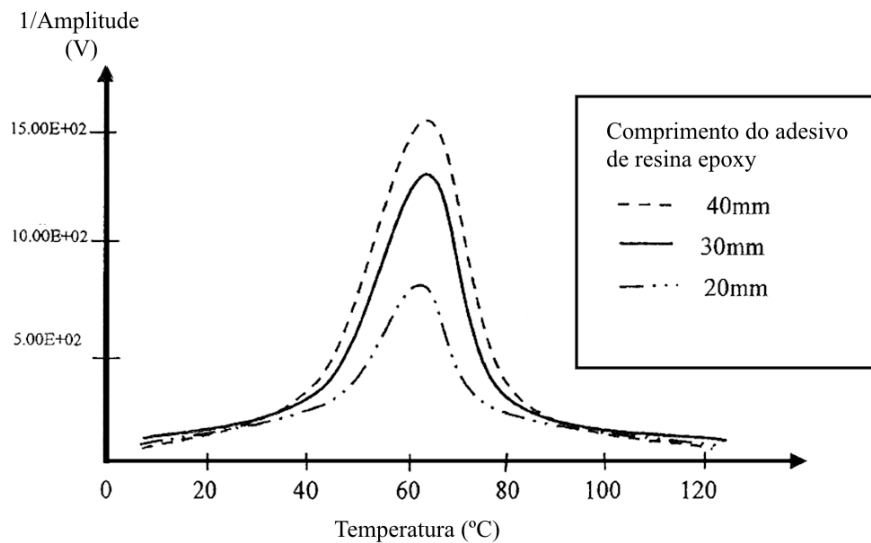


Figura 15 - Gráfico 1/Amplitude (Amortecimento) vs. Temperatura de um adesivo de resina epoxy (Koh, 2000)

Para depositar o adesivo no provete é utilizado um molde, **Figura 16**. O molde já existente permite produzir até 4 provetes, 2 provetes sem termopar e 2 com termopar. Este molde contém espaçadores, o que possibilita variar a espessura do adesivo em 1 a 2 mm, sem ser necessário produzir um novo molde. O tempo de cura depende do adesivo utilizado.



Figura 16 - Molde utilizado na produção de provetes

A produção de provetes conta ainda com um método alternativo, que apenas difere do anterior na forma como o adesivo é fixado à barra de alumínio. Uma amostra de adesivo pré-curado é fixada utilizando um parafuso e uma porca, **Figura 17**. Para a medição de temperatura podem ser colocados termopares entre as camadas do provete existente para o efeito. Esta técnica de produção de provetes diminui o tempo e o custo de produção.

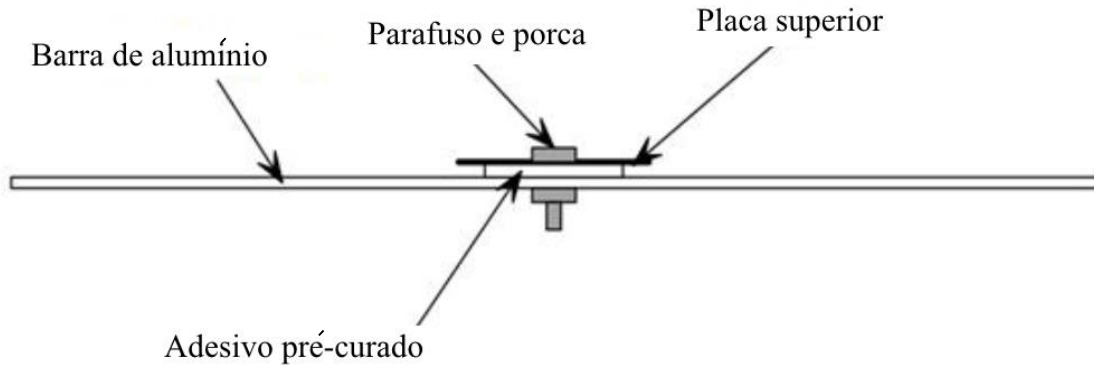


Figura 17 - Esquema de provete recorrendo a método de produção alternativo (Zhang, 2008)

Para esta tese foram produzidos provetes, utilizando para o efeito o molde já existente e desenvolvido numa tese anterior (Telha, 2012).

3.3 Estrutura de suporte dos provetes e disposição dos elementos nela contidos

3.3.1 Estrutura de suporte

A estrutura onde o provete é colocado para ser ensaiado foi desenvolvida com o objetivo de permitir a substituição do mesmo de forma rápida e fácil. A necessidade de ter um ambiente de temperatura controlada, levou a que para o efeito fosse necessária a integração de uma estufa na estrutura. Este equipamento está devidamente caracterizado no **subcapítulo 3.4**. No entanto, importa saber que as características deste equipamento levaram à necessidade de ter uma estrutura rígida, adaptável e de custo reduzido. A solução adotada foi a utilização de perfis de alumínio, ligados com parafusos e porcas, **Figura 18**.

Esta solução acomoda os provetes, bobinas (excitação e *feedback*), conectores e sistema de aquecimento, de forma prática, flexível e compacta.

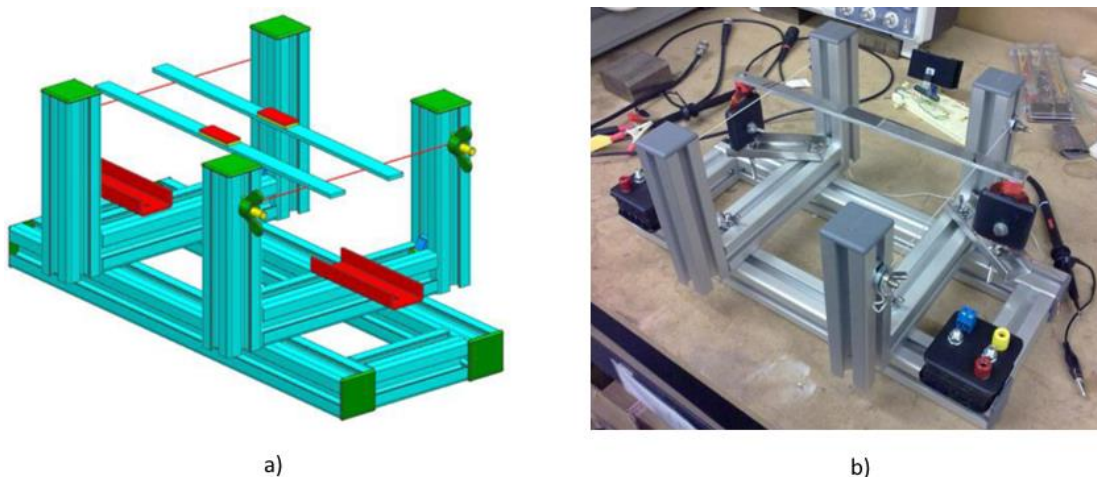


Figura 18 – a) Modelo 3D da estrutura de suporte, b) Estrutura de suporte construída (Telha, 2012)

3.3.2 Posicionamento do provete, das bobinas de excitação e do termopar

Neste sistema o provete é suportado por dois fios, posicionados precisamente nos pontos onde não existe vibração da barra, evitando assim perturbar o seu movimento oscilatório. Estes pontos podem ser encontrados quando o provete oscila com dois nós de vibração. Como já foi referido anteriormente, existe a necessidade de utilizar dois provetes de maneira a conseguir medir a temperatura sem influenciar a oscilação. A **Figura 19** pretende ilustrar o posicionamento dos dois provetes, que são colocados lado a lado, bem como a posição da bobina de excitação e bobina de *feedback* (a bobina de excitação é usada para fazer o sistema oscilar e a bobina de *feedback* permite ler a amplitude de oscilação do provete). Na **Figura 20** é possível ver ainda a estufa utilizada no processo de controlo de temperatura, descrita em detalhe no **subcapítulo 3.4**.

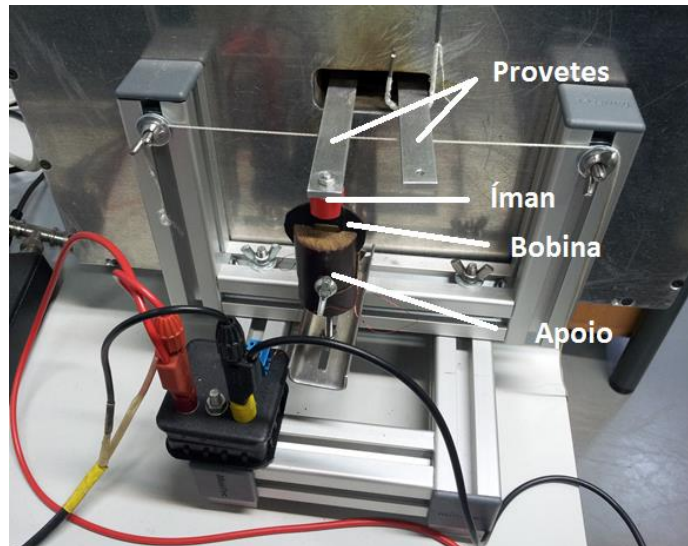


Figura 19 - Imagem da bobina de excitação



Figura 20 - Imagem da estufa utilizada

3.4 Sistema de aquecimento

Para aquecer o provete foi usada uma estufa construída com paredes de alumínio e isolamento interior de lã de vidro. Este material tem uma condutividade térmica bastante reduzida e é capaz de resistir a temperaturas na ordem dos 1000 °C. Como fonte de calor é

usado um aquecedor em forma de anel do tipo Micathermic, com 200 mm de diâmetro e 400 W de potência, **Figura 21**.

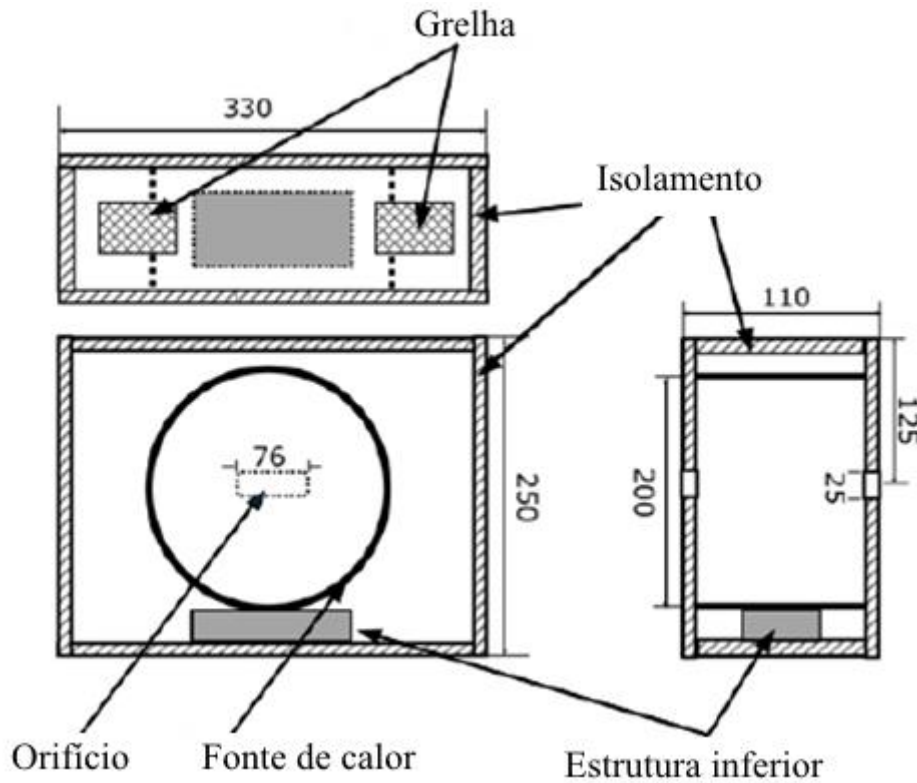


Figura 21 - Esquema da estufa (Zhang, 2008)

Este equipamento de aquecimento tem orifícios nas paredes laterais que permitem posicionar os provetes, de forma a colocar a zona que contém adesivo na parte central da fonte de calor e as extremidades na parte exterior. Este posicionamento é bastante vantajoso, pois além de permitir o posicionamento adequado da amostra, garante também que os ímanes e bobinas ficam na parte exterior do sistema, estando assim resguardados das variações de temperatura provocadas pela fonte de calor.

O sistema de aquecimento é ainda composto por um controlador analógico de temperatura, cuja gama de funcionamento vai até 200 °C, **Figura 22**.



Figura 22 - Controlador de temperatura Anglison

Este sistema é portátil e compacto. Permite facilmente controlar a temperatura do provete e devido às suas dimensões reduzidas, varia rapidamente a temperatura, o que é uma grande vantagem pois assim não altera o grau de cura da amostra.

3.5 Funcionamento do sistema de excitação

3.5.1 Geração de sinal

O sistema base existente é composto por duas bobinas e dois ímanes, um gerador de sinais, um amplificador de corrente, um amperímetro e um osciloscópio, **Figura 23**.

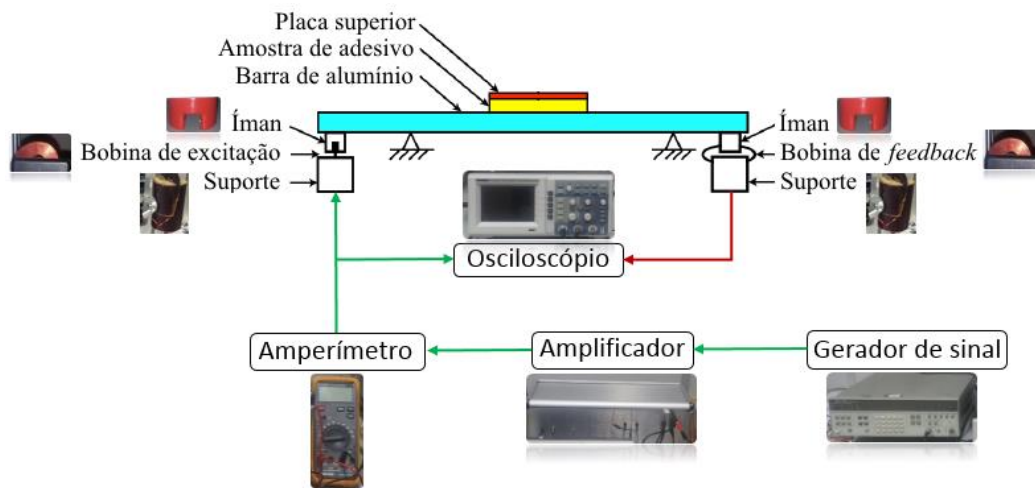


Figura 23 - Esquema representativo de ligação da geração de sinal

No início do ensaio o provete deve ser colocado à sua frequência de ressonância. Para isso o gerador de sinais, Hewlett Packard® 3325B, gera uma onda de tensão sinusoidal que é amplificada e de seguida fornecida à bobina de excitação. A frequência de ressonância do provete pode ser identificada pelo utilizador, comparando os sinais na bobina de excitação e na bobina de *feedback*. O provete está em ressonância quando os sinais estão em fase, **Figura 24**, que corresponde à amplitude de oscilação máxima. A frequência de ressonância é encontrada pelo utilizador que faz um varrimento manual de frequências.

As bobinas utilizadas neste sistema suportam uma corrente máxima de 1 A. Para monitorizar o sinal amplificado é utilizado um multímetro Velleman® DVM345DI, **Figura 25b**, que permite medir com uma resolução de 0,01 A. O utilizador deve observar o valor da corrente e garantir que o limite (1 A) não é ultrapassado, ajustando manualmente o ganho do amplificador.

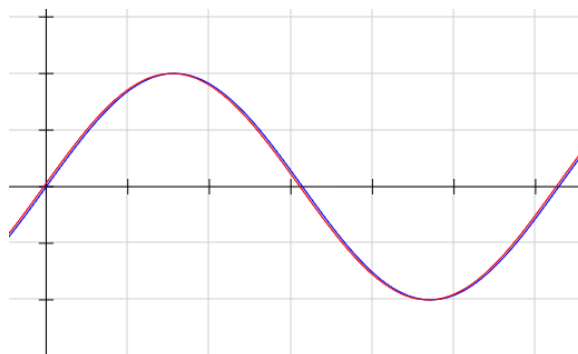
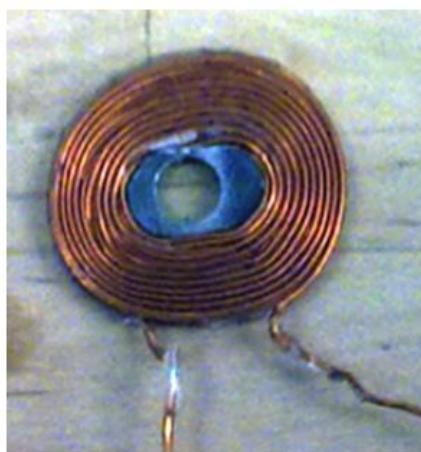


Figura 24 – Representação de sinais em fase

A gama de frequências de ressonância verificada para os adesivos já ensaiados neste sistema situa-se entre 160 e 180 Hz. A amplitude do sinal tensão que chega à bobina de excitação, para 1 A, é de cerca de 10 V, **Figura 25a**.



a)



b)

Figura 25 - a) Bobina de excitação, b) Multímetro Velleman® DVM345DI

Como já foi referido, o sistema é composto por duas bobinas, uma de excitação, que é responsável pelo movimento do provete, e outra denominada de bobina de *feedback*, que de acordo com a lei de Faraday, converte o movimento vertical de um dos ímanes instalados no provete numa pequena tensão elétrica. Esta tensão é diretamente proporcional à amplitude do movimento do provete e é utilizada para identificar a T_g . As bobinas são em tudo idênticas.

Nos ensaios realizados com este sistema, a variação da temperatura provoca uma alteração nas propriedades da amostra, que conseqüentemente impõem alterações na frequência de ressonância do provete. Isso leva à necessidade de ajustar constantemente este parâmetro de forma a garantir que o provete continua em ressonância. Para evitar que este acerto de frequência seja executado manualmente pelo utilizador do equipamento, existe um dispositivo, que funciona em malha fechada, capaz de manter o provete em ressonância independentemente da temperatura. Este dispositivo está descrito no seguinte subcapítulo.

3.5.2 Sistema de excitação contínua em ressonância, ‘Caixa de *feedback*’

O aquecimento e arrefecimento do provete provocam alterações nas suas propriedades, nomeadamente, na capacidade de amortecimento e dimensões, entre outras. Estas mudanças levam a uma variação constante na dinâmica da amostra, que conseqüentemente faz variar a frequência de ressonância do provete. Resultando assim na necessidade de ajustar constantemente a frequência de excitação do provete. O sistema de excitação contínua em ressonância, também denominado de ‘Caixa de *feedback*’, cumpre a função para o qual foi projetado recorrendo ao tratamento do sinal de *feedback*. Para isso, o sinal sinusoidal recebido é consideravelmente amplificado. Depois é transformado numa onda aproximadamente quadrada e, de seguida, sofre um ajuste de fase, imposto por PLL (*Phase Locked Loop*), que gera um sinal em função da fase do sinal que recebe. Por fim, este sinal passa por um filtro usado para bloquear as frequências que estão fora da gama de frequências próximas à frequência de ressonância inicial. Desta forma, a onda quadrada é transformada novamente numa senoide que, posteriormente, é amplificada e enviada à bobina de excitação, mantendo assim o provete em ressonância sem recorrer à intervenção do utilizador. A **Figura 26** ilustra o tratamento de sinal imposto pela ‘caixa de *feedback*’.

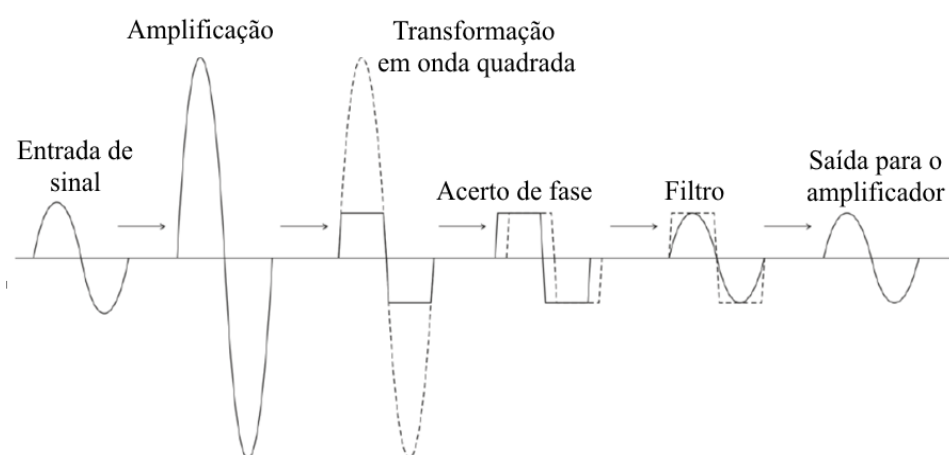


Figura 26 - Tratamento de sinal na caixa de *feedback* (Zhang, 2012)

O dispositivo aqui descrito é capaz de reagir às alterações na frequência de ressonância do provete causadas pelas variações de temperatura, eliminando assim a necessidade qualquer intervenção por parte do utilizador. É essencial esclarecer que no interior da caixa de *feedback*, além da eletrónica necessária para manter o provete em ressonância, existe também um amplificador do sinal de excitação. Este amplificador é capaz de amplificar a corrente do sinal para valores que ultrapassam 1 A. Como é possível verificar pela **Figura 27** e **Figura 28**, este sistema é pouco compacto e bastante complexo.



Figura 27 - Identificação da caixa de *feedback* no sistema de determinação *Tg* existente

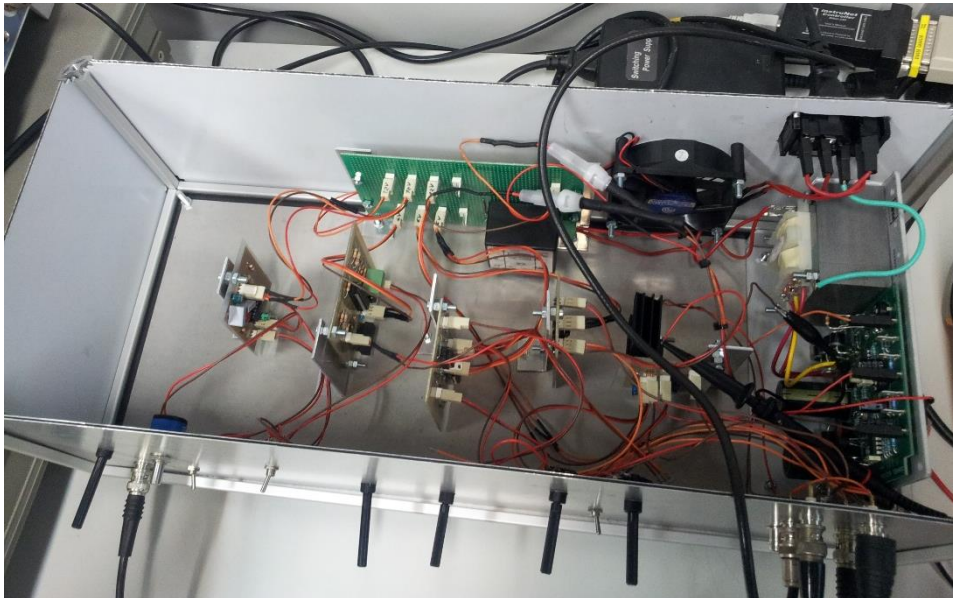


Figura 28 - Interior da caixa de *feedback* existente

É ainda relevante referir que este sistema necessita que o provete seja colocado à frequência de ressonância de forma manual usando o gerador de sinal. Depois disso, a caixa de *feedback* possui um *switch* com o qual o utilizador corta a ligação com o gerador de sinais e o sistema passa a funcionar independentemente, como está representado na **Figura 29**.

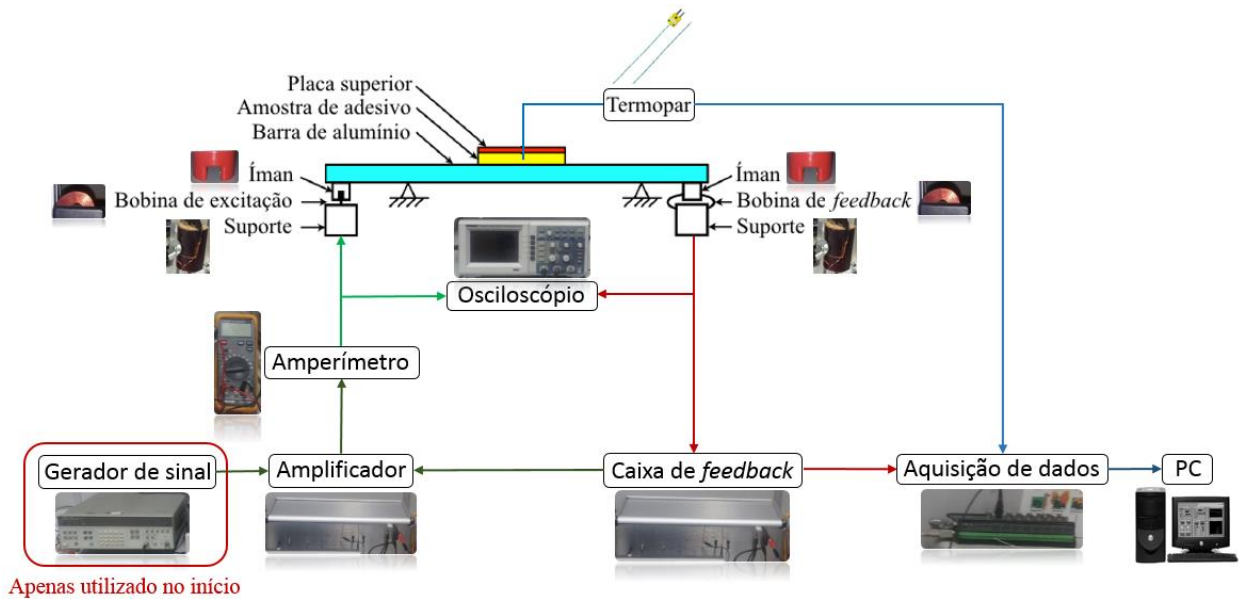


Figura 29 - Esquema representativo de ligação do sistema de determinação T_g

Durante o estudo deste sistema, foi ainda evidente existirem problemas com a qualidade do sinal de excitação, quando o sistema passa a funcionar exclusivamente com a caixa de *feedback*. Recorrendo a um osciloscópio, TENMA® 72-B230, foi possível verificar que os sinais lidos, **Figura 30**, não são os sinais perfeitamente sinusoidais esperados. No entanto, não tem, aparentemente, efeito significativo no correto funcionamento do dispositivo.

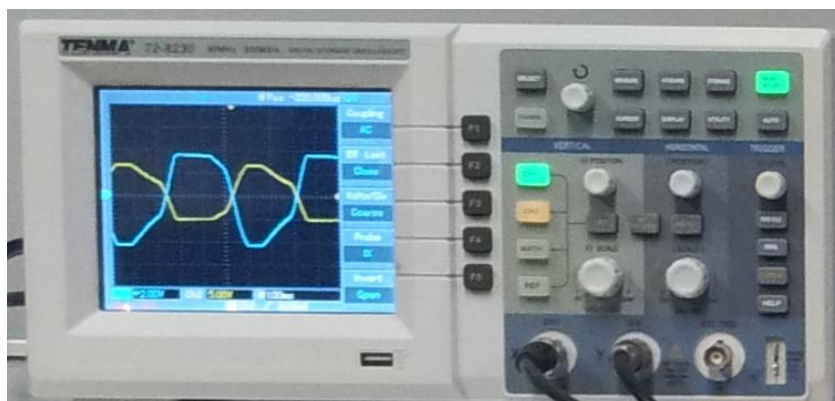


Figura 30 - Leitura de sinais em 'Modo de *feedback*', a azul o sinal de excitação e a amarelo o de *feedback*

3.6 Aquisição de dados

O objetivo final dos ensaios é identificar a T_g , para isso é necessário registar o amortecimento do sistema, que é dado pelo inverso da amplitude de oscilação, e a temperatura

do provete. Para realizar essa tarefa é utilizada uma carta de aquisição de dados, instruNet iNet-100B, que permite ler até 166 Ks/sec, **Figura 31**. A taxa de aquisição de dados de cada entrada analógica é a taxa máxima de aquisição a dividir pelo número de entradas utilizadas.

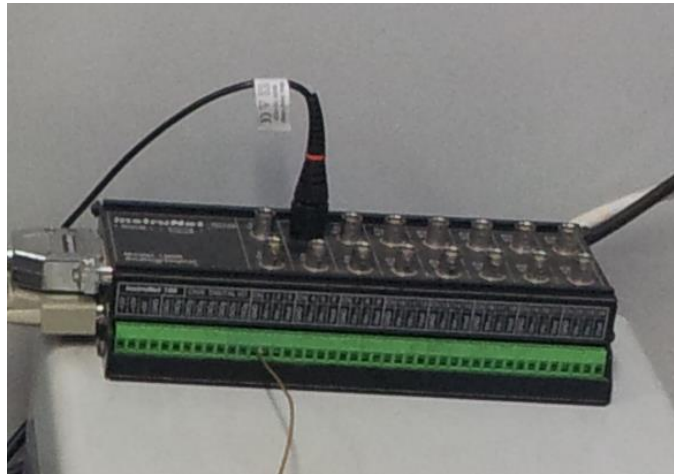


Figura 31 - Carta de aquisição de dados instruNet iNet-100B

A carta de aquisição de dados encontra-se conectada a um PC e utiliza duas entradas analógicas de tensão, uma para ler a temperatura e outra para tensão (amplitude). Os dados são adquiridos a uma frequência de 100 Hz, de forma a permitir o uso do filtro digital incluído na placa. Este filtro permite reduzir o ruído da informação recolhida.

Com este equipamento são obtidos dois gráficos, um de temperatura e outro de amplitude, ambos em função do tempo. Para chegar ao gráfico que permite ler diretamente a T_g é necessário tratar os dados, de modo a obter a relação Amortecimento vs. Temperatura.

4 Otimização do sistema de determinação da T_g

O presente capítulo descreve o trabalho realizado na otimização do sistema de determinação da T_g de adesivos. Aqui constam as opções tomadas e respectiva explicação.

4.1 Alternativa e requisitos

A necessidade de encontrar uma alternativa capaz de reduzir a quantidade de *hardware* necessário para o correto funcionamento do sistema apresentado no capítulo antecedente, levou à ideia de utilizar uma carta de aquisição de dados para o efeito. Esta solução permite tornar o sistema mais compacto e simples.

Uma carta de aquisição de dados, abreviado DAS ou DAQ (*Data Acquisition Systems*), funciona como uma interface entre um computador e os sinais que se pretendem adquirir. No caso dos sinais analógicos, funciona como um dispositivo que digitaliza os sinais de entrada para que o computador possa interpretá-los.

Um sistema de aquisição de dados é composto essencialmente por circuitos eletrônicos de condicionamento de sinal, conversor analógico-digital e interface com o barramento do computador. Muitos dispositivos contêm ainda conversores digital-analógicos, linhas de entrada/saída digitais, para receber e enviar sinais digitais, e ainda contadores/temporizadores que contam e geram impulsos digitais, **Figura 32** (NI Corporation, 2014).

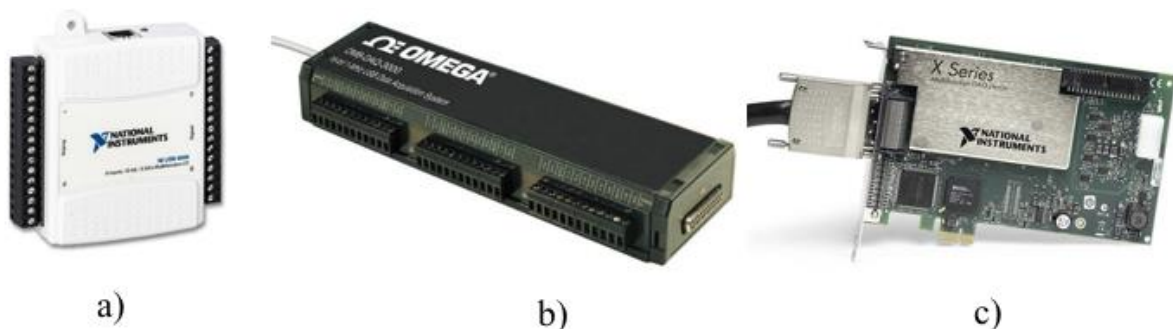


Figura 32 - Exemplos de cartas de aquisição de dados, a) NI USB-6008, b) OMB-DAQ-3000 Series, c) NI PXI Express X Series, (NI Corporation, 2014; OMEGA Engineering inc, 2014)

Com a finalidade de reduzir a quantidade de *hardware* ao mínimo essencial, sem prejuízo para o correto funcionamento do sistema, foi necessário identificar os elementos que poderiam eventualmente ser substituídos. Esta análise permitiu verificar que as funções do gerador de sinais, Hewlett Packard® 3325B, do osciloscópio, TENMA® 72-B230, e do multímetro, Velleman® DVM345DI, poderiam ser executadas por uma carta de aquisição de dados capaz de receber e enviar sinais analógicos, e um *software* de programação adequado. Seria, assim, possível substituir três equipamentos por apenas um. É ainda de salientar que o sistema já possui uma carta de aquisição de dados, o que significa na prática que as funcionalidades, não de 3 equipamentos, mas sim de 4, passariam a estar integradas em apenas um dispositivo, suprimindo assim o espaço ocupado pelos 3 elementos já referidos, tornando dessa forma o sistema bastante mais compacto.

A eletrônica dedicada à manutenção da frequência de ressonância do provete, contida na caixa de *feedback*, que se encontra devidamente caracterizada no **subcapítulo 3.5.2**, é o elemento mais complexo e sensível do conjunto, devido à função que desempenha. Apesar de, potencialmente, ser possível agregar as suas funções a uma carta de aquisição de dados, as incertezas associadas ao tempo de resposta do *software*, computador e carta de aquisição não permitiam afirmar à partida, com um grau de certeza elevado, que tal fosse possível.

Tendo em conta a análise realizada no **capítulo 3**, a escolha de uma carta de aquisição de dados deverá ter em conta os seguintes aspetos.

- Para substituir o gerador de funções é necessária uma saída analógica capaz de gerar uma onda sinusoidal com uma amplitude de -5 V a 5 V, numa gama de frequências de 150 Hz a 200 Hz, com uma resolução de 0,001 a 0,01 Hz;

Segundo o ‘Teorema de amostragem de Nyquist–Shannon’ (Shannon, 1949), o número de amostras usadas para reconstruir um sinal deve ser, pelo menos, duas vezes superior à frequência do sinal. Tendo em conta o pior cenário possível, os 200 Hz, a carta deverá ser capaz de gerar um sinal com 400 Amostras/Segundo. Na prática o número de amostras deve ser cerca de dez vezes superior. O que significa que a carta de aquisição de dados deve ter capacidade para gerar um sinal com 2000 Amostras/Segundo.

- Na substituição do osciloscópio, a carta deve possuir duas entradas analógicas, em tensão, que permitam ler os sinais das bobinas de excitação e *feedback*. A amplitude do sinal de excitação (depois de amplificado) varia entre -10 V e 10 V. A resolução deve ser igual ou superior à do sinal gerado. A amplitude do sinal de *feedback* será sempre inferior. Portanto, para uma correta leitura, as entradas da carta devem conseguir recolher 2000 Amostras/Segundo, cada uma, 4000 no total, com uma amplitude -10 V a 10 V.

- Para proceder à substituição do amperímetro, existem essencialmente duas possibilidades bastante simples e de custo reduzido. Uma é usar uma resistência, de valor conhecido e o mais baixo possível, em série com a bobina de excitação e medir a diferença de potencial nessa resistência. Conhecendo a queda de tensão e o valor de resistência, através da lei de Ohm, é possível calcular a corrente do circuito.

A outra forma de medir a corrente elétrica seria utilizar um transdutor de corrente baseado no efeito de Hall (Hall, 1879), **Figura 33**.

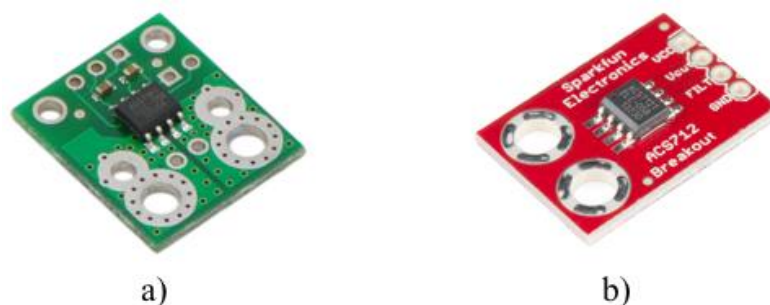


Figura 33 – Transdutores de corrente de efeito de Hall, a) Pololu ACS714, b) SparkFun ACS712 (Pololu Corporation, 2014; SparkFun Electronics, 2014)

Qualquer um dos métodos de medição necessita de uma entrada analógica em tensão na carta de aquisição de dados. No entanto, a introdução de resistência num circuito elétrico para medir corrente nunca é aconselhável, pois a resistência além de adicionar ruído ao sinal, tem também o problema de variar o seu valor com a temperatura, tornando dessa forma a medição de corrente pouco precisa. Por esses motivos, a escolha deve recair sobre o transdutor de corrente não intrusivo. Com uma pesquisa rápida em alguns *sites*, (Pololu Corporation, 2014; SparkFun Electronics, 2014), constatou-se que, tipicamente, estes transdutores geram uma tensão na ordem dos 66 a 185 mV/A. Logo, a resolução da carta deve ser de 0,001 V para ter uma boa resolução na medição de corrente. O número de amostras não é um fator crítico, portanto estima-se que 1000 Amostras/Segundo serão suficientes. De referir ainda que os transdutores de corrente de efeito de Hall necessitam de uma tensão de alimentação, cujo valor é típico, é 5 V.

- Na medição da temperatura será utilizado um termopar do tipo K. Para o efeito, é necessária uma entrada em tensão capaz de uma resolução 0,1 V. O número de amostras aqui também não é crítico. Apenas por uma eventual questão de sincronismo, aquando da construção do gráfico Amortecimento vs. Temperatura, considera-se que serão necessárias 2000 Amostras/Segundo.

Resumidamente, a carta de aquisição de dados deve ter um total de 4 entradas analógicas e uma capacidade de ler cerca de 7000 Amostras/Segundo, numa gama de tensões que varia

entre os milivolt e os ± 10 V. A carta deve incluir ainda uma saída analógica, capaz de gerar 2000 Amostras/Segundo com uma gama de ± 10 V.

4.2 Carta de aquisição de dados NI PCI-6221

A carta de aquisição de dados escolhida foi uma NI PCI-6221 (NI Corporation, 2007), **Figura 34**. Esta carta tem as seguintes características (**Anexo A**):

- 16 entradas analógicas;
 - 250 000 Amostras/Segundo (total);
 - Conversor analógico-digital 16 bit;
 - Gama máxima de tensão de entrada -10 V a 10 V;
- 2 saídas analógicas;
 - 833 000 Amostras/Segundo (total)
 - Conversor digital-analógico 16 bit;
 - Gama máxima de tensão de saída -10 V a 10 V

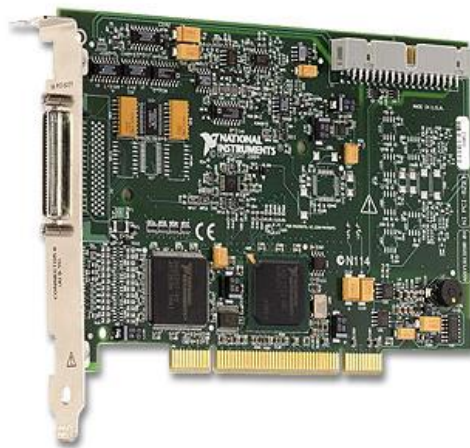


Figura 34 - Carta de aquisição de dados, NI PCI-6221 (NI Corporation, 2014)

Como é possível verificar pelas especificações, a carta em questão cumpre com os requisitos necessários para esta aplicação. Esta carta é conectada diretamente ao barramento PCI de uma *motherboard* de um computador e, portanto, utiliza um cabo NI SHC68-68-EPM,

Figura 35a, juntamente com um bloco de terminais BNC 2110, **Figura 35b**, como interface de ligação física (NI Corporation, 2014).

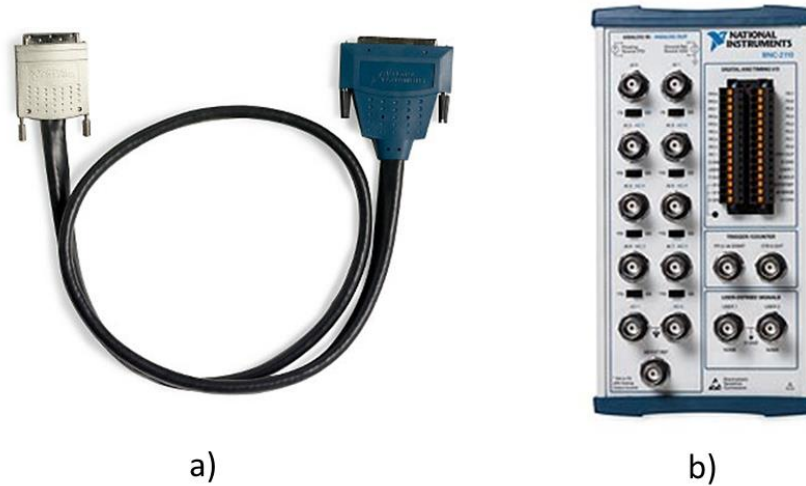


Figura 35 - a) Cabo NI SHC68-68-EPM, b) Bloco de terminais BNC 2110 (NI Coporation, 2014)

4.3 Transdutor de corrente Pololu ACS714

O transdutor de corrente utilizado, na sequência do que foi referido, foi um transdutor de efeito de Hall, Pololu ACS714, capaz de medir numa gama de corrente que varia entre os - 5 A e 5 A, com uma sensibilidade de 185 mV/A e um erro de $\pm 1,5\%$ (Pololu Corporation, 2014) (**Anexo B**). Este transdutor não dispõe de conectores, **Figura 36a**, pelo que para facilitar a sua instalação, foram aplicados os conectores visíveis na **Figura 36b**. Para a alimentação do transdutor é utilizada uma das saídas de tensão (5 V) da carta de aquisição de dados.

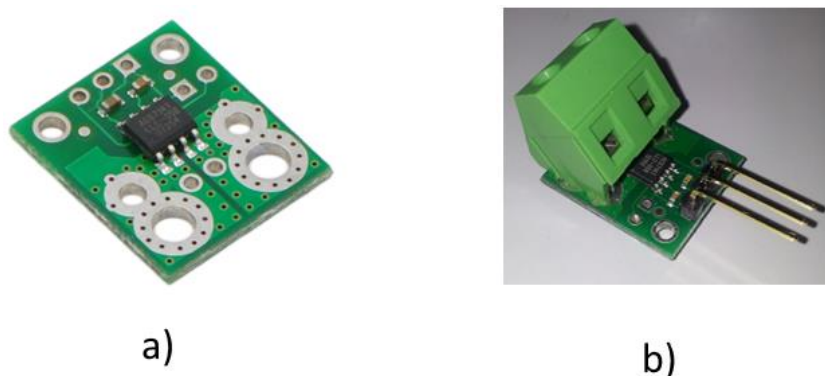


Figura 36 - a) Transdutor de corrente sem conectores (Pololu Corporation, 2014), b) Transdutor de corrente com conectores

4.4 Amplificador de corrente Bruel and Kjaer 2706

A alternativa ao amplificador de corrente para o sinal de excitação, existente no interior da caixa de *feedback*, foi um amplificador de laboratório, Bruel and Kjaer 2706, configurado para um limite máximo de corrente de 1,8 A e um ganho ajustável, **Figura 37**. Com a configuração usada, quando a amplitude do sinal de excitação da DAQ é máxima (10 V), a corrente nunca excede o máximo admissível de 1 A.



Figura 37 - Amplificador Bruel and Kjaer 2706

4.5 Software de desenvolvimento (LabVIEW vs. Simulink)

O LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é um *software* de projeto que utiliza uma linguagem de programação gráfica, desenvolvido pela National Instruments®. Este *software* possui um conjunto de ferramentas que permitem desenvolver aplicações dedicadas a aquisição de dados e processamento de sinais, automatização de sistemas de teste e validação, sistemas embarcados de monitorização e controlo, entre outros.

A programação é baseada num modelo de fluxos de dados, onde os blocos funcionais são ligados pelo programador, criando dessa forma o programa pretendido. A interação com o *hardware* é feita num ambiente gráfico totalmente personalizável e bastante evoluído, **Figura 38**.

O LabVIEW permite comunicação com *hardware* de aquisição de dados, visão, movimento e controlo através de GPIB, PCI, PXI, VXI, RS-232, RS-484, entre outras.

Este *software* permite ainda adquirir módulos e *toolkits* de programação que se adequam às mais diversas funcionalidades e aplicações (NI Corporation, 2014).

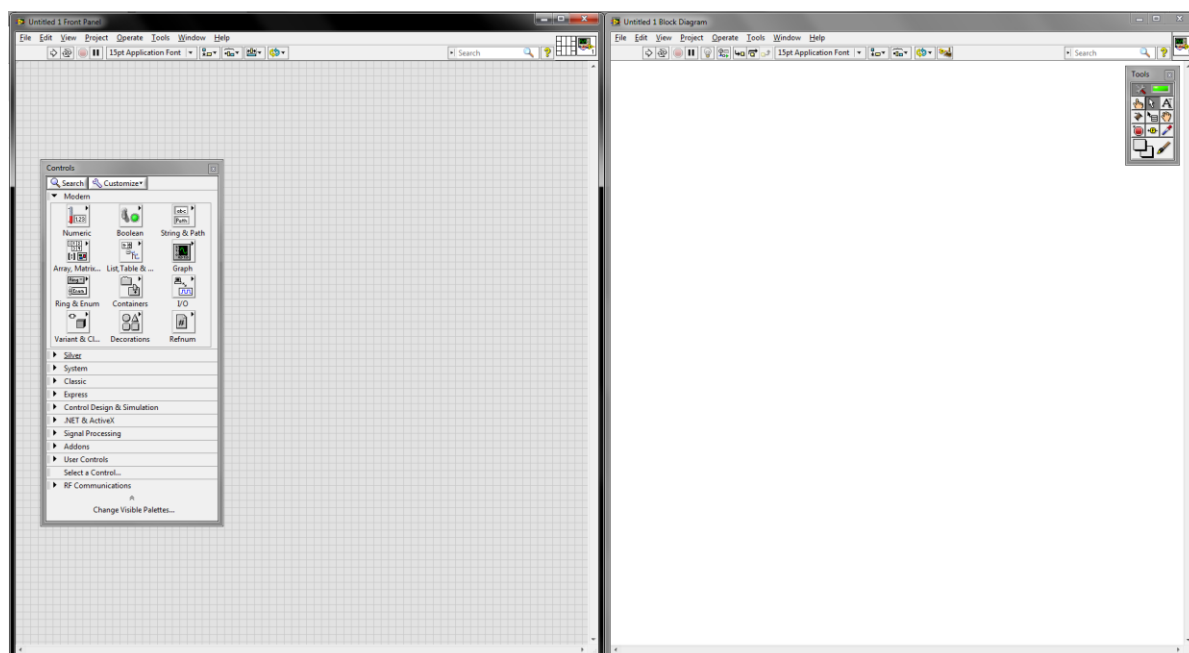


Figura 38 - Ambiente de programação do LabVIEW 2011

O Simulink é um *software* desenvolvido pela MathWorks®, que utiliza também uma linguagem de programação gráfica, baseada num modelo de fluxo de dados. Permite também ligação a *hardware* diverso e aquisição separada de módulos (MathWorks, Inc, 2014).

Este *software* é em tudo semelhante ao LabVIEW. Porém, a criação de ambientes gráficos em LabVIEW é mais fácil e visualmente mais apelativa.

A necessidade de criar uma interface gráfica para o sistema que está a ser otimizado nesta dissertação é uma realidade. Assim devido à vantagem que apresenta neste ponto e sem haver prejuízo noutros, o LabVIEW foi o *software* de programação escolhido.

4.6 Substituição do *hardware* do sistema

Tendo sido identificados os elementos referidos no **subcapítulo 4.1**, foi elaborado um esquema de ligação que pretende ilustrar de forma clara a interação entre os equipamentos (**Figura 39**).

Analisando o esquema da **Figura 39**, é possível perceber que esta configuração do sistema tem o computador e a carta de aquisição de dados como elementos centrais. O amplificador, as bobinas de excitação e *feedback*, o termopar e o transdutor de corrente estão ligados diretamente à carta de aquisição de dados, que por sua vez recebe e envia dados para o computador.

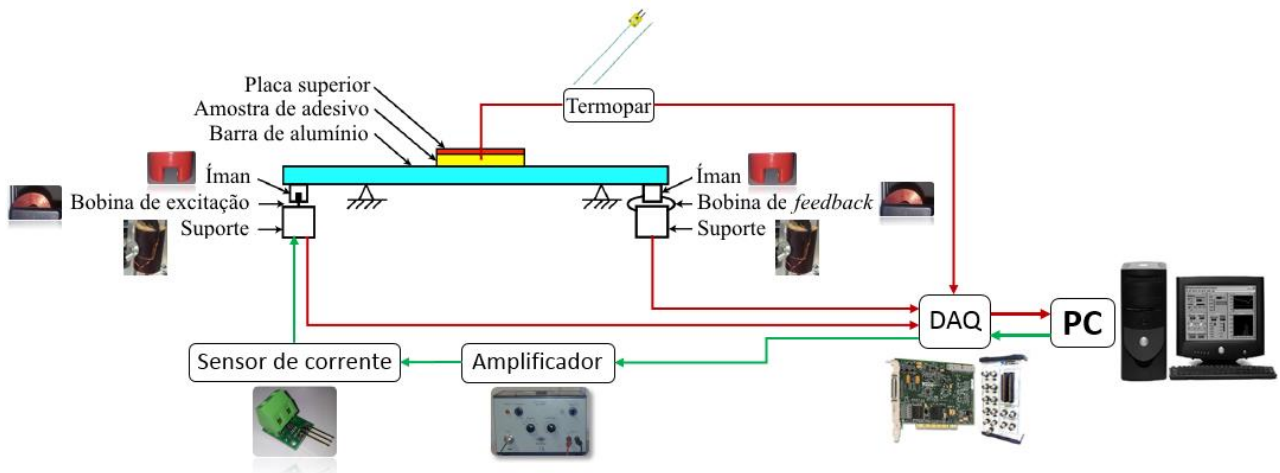


Figura 39 - Esquema representativo de ligação do sistema de determinação de T_g utilizando uma carta de aquisição de dados

Como solução de acondicionamento do transdutor de corrente e respetivas ligações, foi projetada e produzida uma pequena caixa de proteção. O novo elemento de acondicionamento foi projetado recorrendo à ferramenta de modelação 3D, SolidWorks 2013-2014, e posteriormente imprimido, utilizando como ferramenta uma impressora 3D, RepRapBCN BCN3D.

Uma vez obtida a caixa de acondicionamento, foi instalado o transdutor e montados os conectores, como é possível verificar na **Figura 40**.

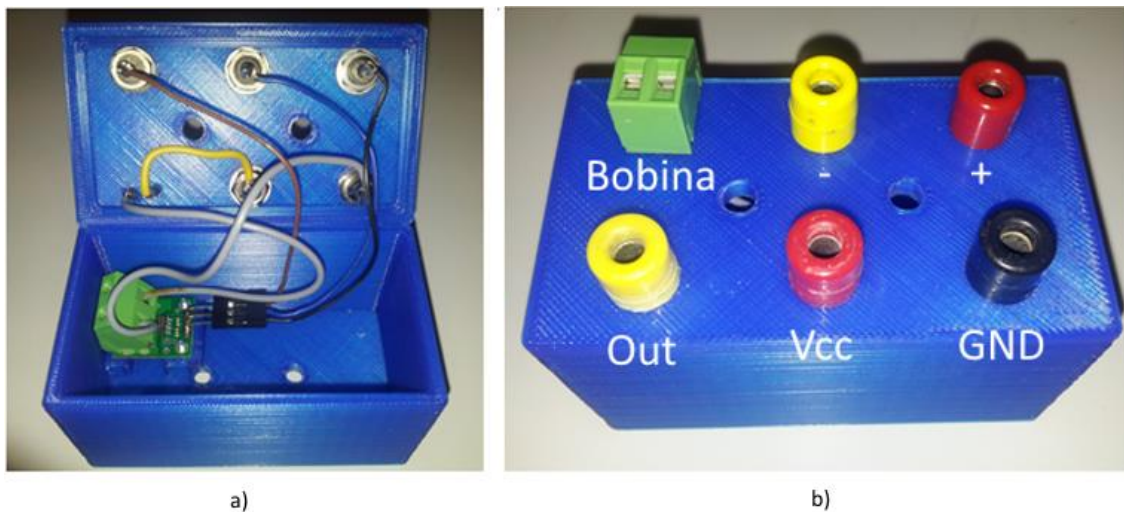


Figura 40 – Caixa de acondicionamento, a) Interior, b) Exterior

Na **Figura 41** é possível ver a caixa de acondicionamento instalada na estrutura de apoio, junto à bobina de excitação.

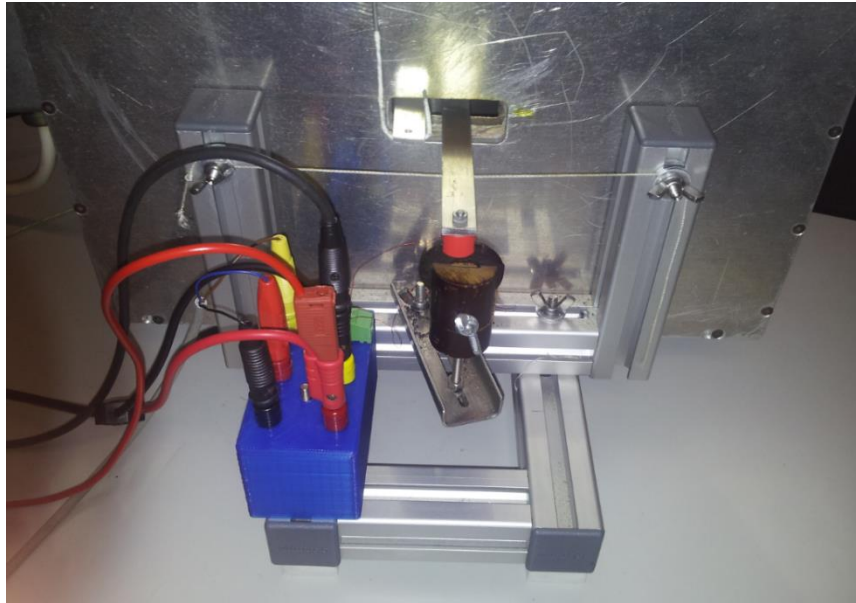


Figura 41 - Caixa de acondicionamento instalada na estrutura de apoio

Obedecendo ao esquema anteriormente apresentado, os equipamentos foram conectados, resultando na configuração que pode ser observada na **Figura 42**.

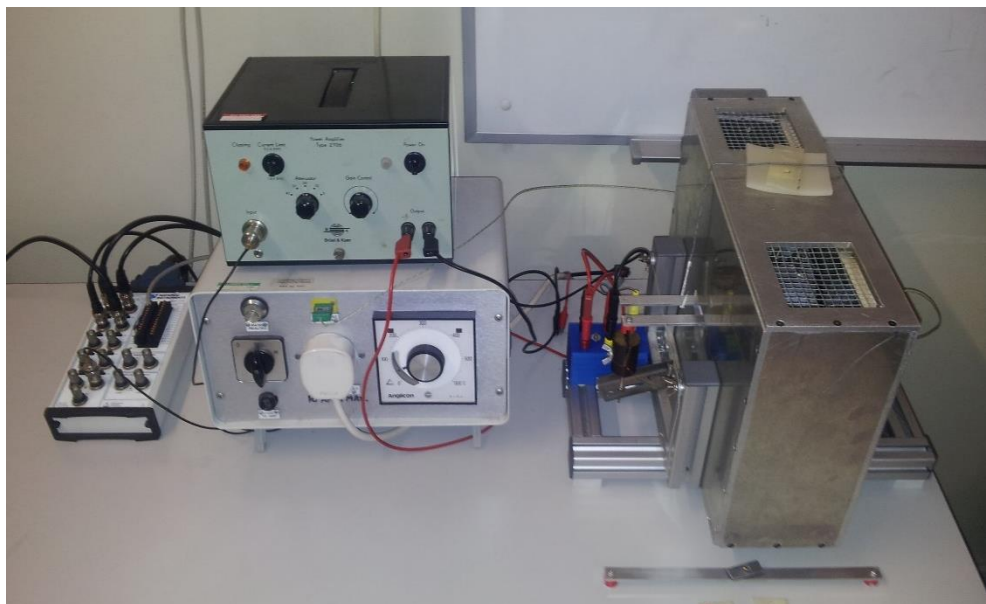


Figura 42 - Configuração do sistema de determinação de T_g , computador não mostrado nesta imagem

A montagem deste sistema pretendeu, além dos objetivos definidos inicialmente, utilizar o máximo dos elementos que compunham o sistema de determinação da T_g existente no início desta dissertação, de modo a evitar dessa forma custos desnecessários.

4.7 LabVIEW

O LabVIEW é um *software* que recorre a uma linguagem de programação baseada num modelo de fluxo de dados. Os programas criados neste *software* são denominados de *Virtual Instruments*, ou VIs, derivado à sua aparência imitar a instrumentação física, como osciloscópios ou multímetros. Cada programa é composto por um painel frontal, que contém a interface, e por um diagrama de blocos, **Figura 43**, que contém o código do programa, em linguagem chamada de código “G”.

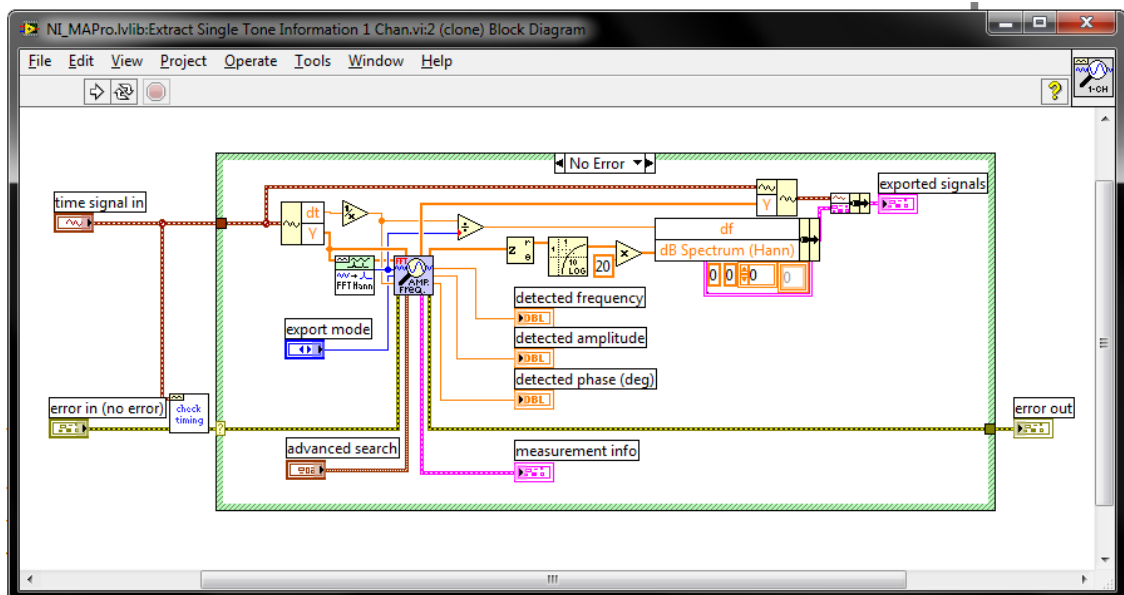


Figura 43 - Exemplo de diagrama de blocos, LabVIEW

Os blocos de funções, VIs, podem ser executados isoladamente ou como subprograma, passando dessa forma a denominar-se de sub-VI. O fluxo de dados é definido pelo utilizador que desenha as ligações entre os sub-VIs. A execução de cada VI/sub-VI está dependente de todas as entradas de dados estarem disponíveis. Desta forma, a ordem de execução é definida em função dos estados de cada bloco. Os sub-VIs que não possuem entradas são executados no início do programa. Caso não estejam disponíveis saídas, os dados resultantes são ignorados ou armazenados. Todos os VIs são baseados numa série de funções básicas, que não podem ser modificadas pelo programador.

O programador começa por criar uma interface de utilizador no painel frontal, onde estão disponíveis ferramentas como botões, mostradores, interruptores, gráficos, indicadores luminosos, entre outros. De seguida o utilizador pode criar as ligações entre blocos funcionais de modo a estabelecer a lógica desejada, onde estão disponíveis uma série de ferramentas que permitem adquirir, analisar, manipular e armazenar dados.

A versão do *software* utilizada nesta dissertação é o LabVIEW 2011, escolhida em função da compatibilidade dos drivers aconselhados, **Figura 44**, para a placa de aquisição de dados, NI PCI-6221, segundo a **Figura 45**.

M Series Multifunction DAQ	Vista/ Win. 7 x64 ⁵	Vista/ Win. 7 x86	XP	2000	NT ²	Pharlap ⁴
NI 6220	9.5.1mx	9.5.1mx	9.5.1mx	9.1.1mx	7.5mx	9.5.1mx
NI 6221	9.5.1mx	9.5.1mx	9.5.1mx	9.1.1mx	7.5mx	9.5.1mx
NI 6224	9.5.1mx	9.5.1mx	9.5.1mx	9.1.1mx	7.5mx	9.5.1mx
NI 6225	9.5.1mx	9.5.1mx	9.5.1mx	9.1.1mx	7.5mx	9.5.1mx
NI 6229	9.5.1mx	9.5.1mx	9.5.1mx	9.1.1mx	7.5mx	9.5.1mx

Figura 44 - Drivers aconselhados para a placa de aquisição de dados, NI PCI-6221 (NI Corporation, 2012)

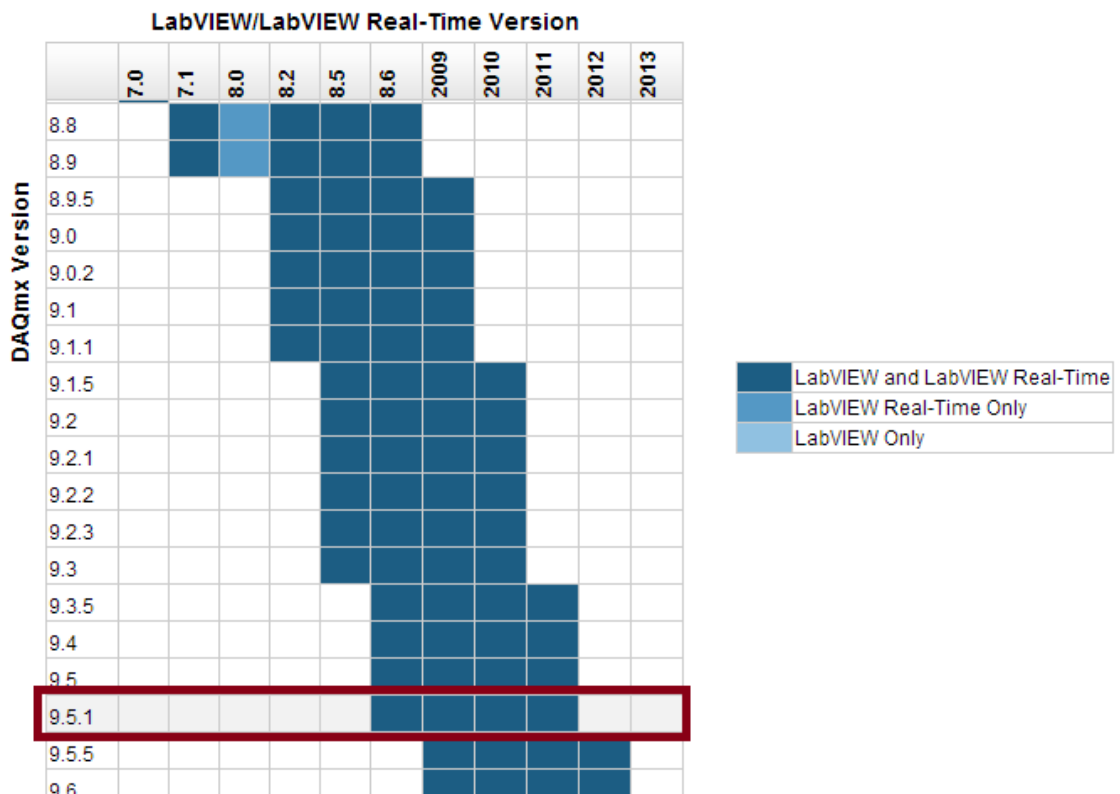


Figura 45 - Compatibilidade de drivers com versões de LabVIEW (NI Corporation, 2005)

4.8 Configuração da carta de aquisição de dados

4.8.1 Envio de dados

A configuração do envio de dados foi feita recorrendo ao bloco de configuração DAQ Assit, do submenu *Output*, do menu de funcionalidades *Express*, **Figura 46**. Este bloco permite configurar o número de amostras, a frequência e a amplitude do sinal gerado.

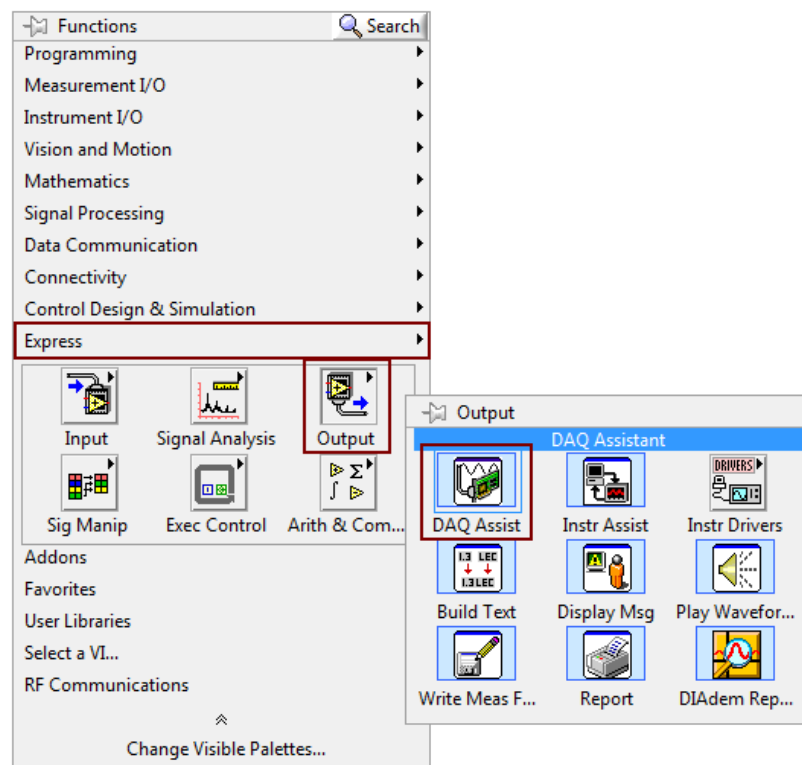


Figura 46 - Menu de funcionalidades de programação, envio de dados

Como havia sido referido, para gerar o sinal sinusoidal pretendido, o número de Amostras/Segundo deve ser de 2 000. A frequência de aquisição foi configurada para 20 000 Hz e a gama de saída ± 10 V, como se pode verificar na **Figura 47**.

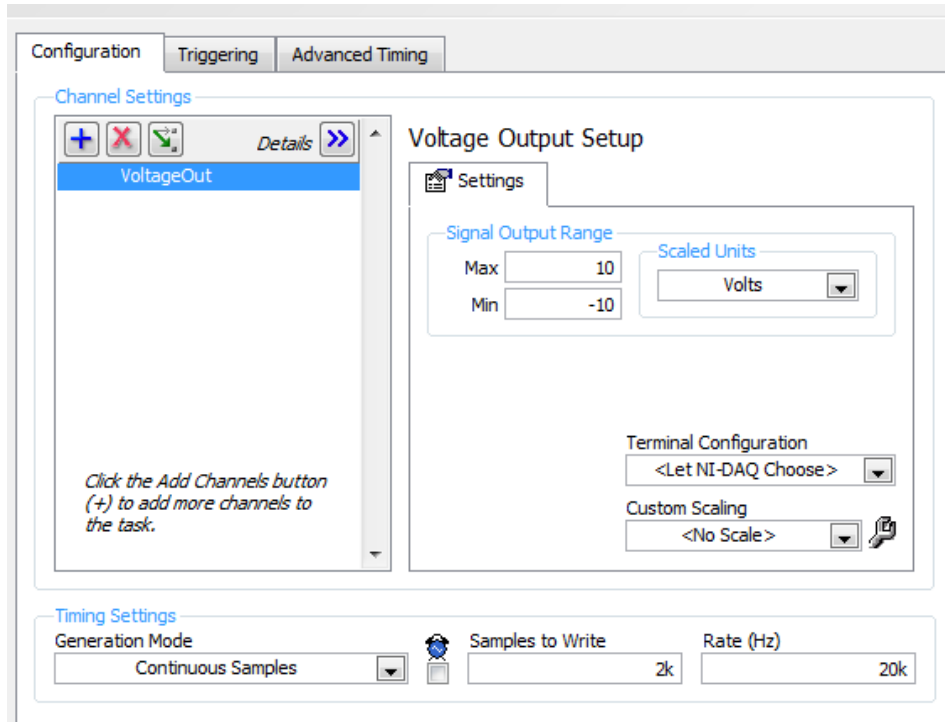


Figura 47 - Janela de configuração de saída analógica, ao0

4.8.2 Receção de dados

A configuração de receção de dados processa-se de forma idêntica à do envio. Deve ser seleccionado o bloco DAQ Assit, do submenu *Input*, no menu de funcionalidades *Express*, **Figura 48**. Neste bloco devem ser configuradas as 4 entradas de forma individual, no que diz respeito à gama de entrada e à definição da entrada analógica a utilizar.

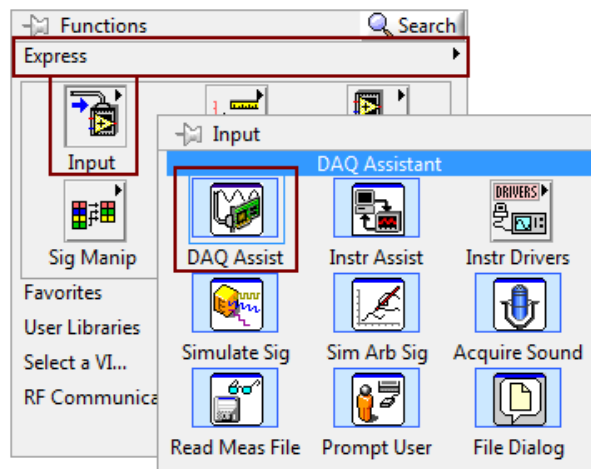


Figura 48 - Menu de funcionalidade utilizado, bloco de configuração de receção de dados

A entrada do sinal de *feedback* foi configurada com sendo a entrada ai0 e foi definida para receber uma amplitude de sinal que varia entre $\pm 0,200$ V, **Figura 49**.

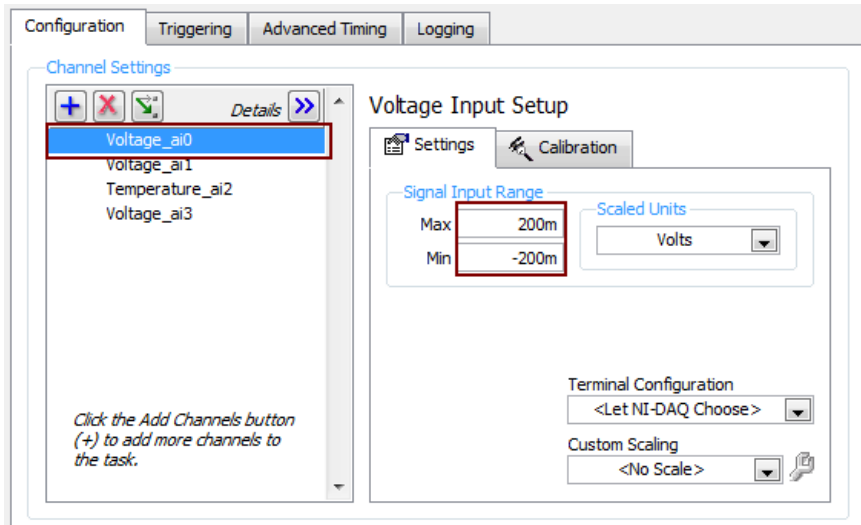


Figura 49 - Configuração da entrada analógica ai0 para sinal de *feedback*

O sinal de excitação é lido através da entrada analógica ai1 e está definida para receber uma amplitude de sinal de ± 10 V, **Figura 50**.

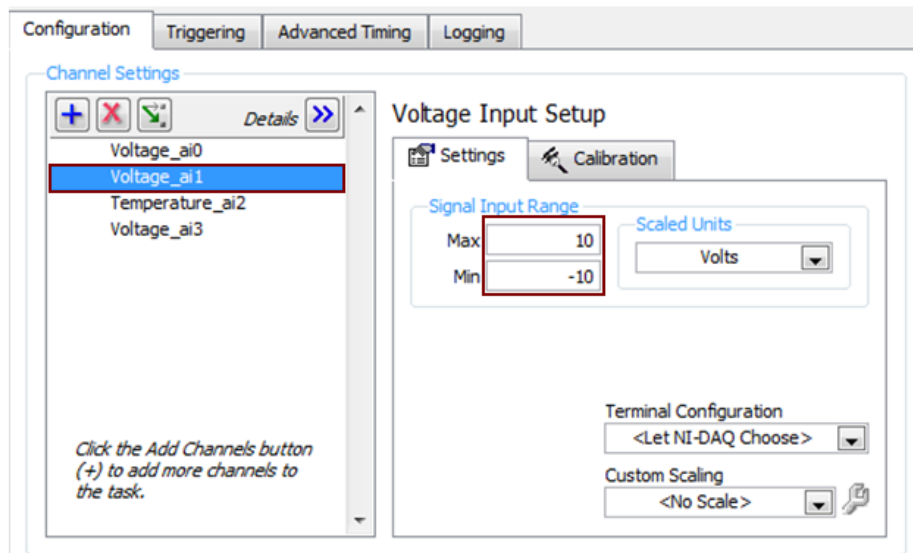


Figura 50 - Configuração da entrada analógica ai1 para sinal de excitação

No caso da medição da temperatura, a carta possui um bloco específico para configuração de termopares, sendo, portanto, a configuração direta. O bloco foi configurado para uma gama de temperatura entre 0 e 250 °C e para um termopar do tipo K. A entrada utilizada foi a ai2, **Figura 51**.

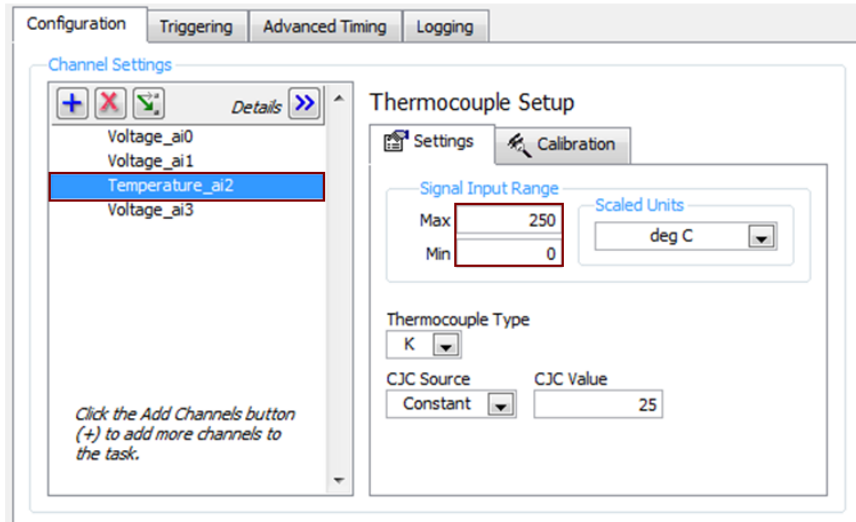


Figura 51 - Configuração da entrada analógica ai2 para termopar

A última entrada configurada, ai3, foi a de aquisição do sinal do transdutor de corrente, que gera um sinal de tensão para a sua gama de funcionamento (± 5 A), de $\pm 0,925$ V ($0,185 \text{ mA/V} \times 5 \text{ V} = 0,925 \text{ V}$). Esta entrada foi configurada para uma gama de funcionamento de ± 1 V, **Figura 52**.

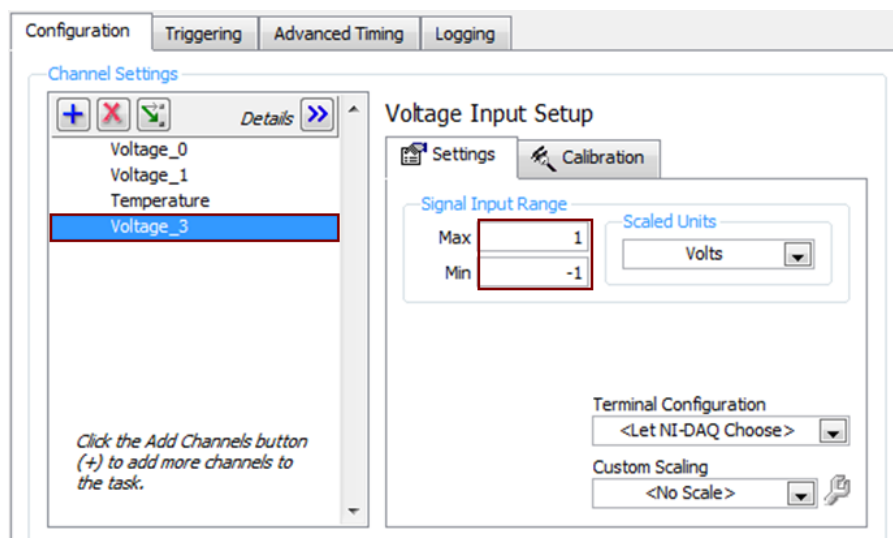


Figura 52 - Configuração de entrada analógica ai3 para leitura do transdutor de corrente

4.9 Interface gráfica

A interface gráfica foi desenvolvida tendo em vista a fácil utilização do sistema de determinação da T_g de adesivos. Pretende ser uma interface simples e capaz de cumprir com as necessidades do utilizador.

Esta interface contém dois separadores, nomeadamente os separadores “Ensaio” e “Opções avançadas”, **Figura 53**. No separador “Ensaio” o utilizador tem a opção de escolher entre um controlo manual de frequência e da amplitude de excitação, ou um modo automático onde estes parâmetros são automaticamente ajustados. Para isso basta ativar o botão “Controlador”. Este separador contém indicadores da temperatura no interior da estufa, de corrente na bobina de excitação e frequência de excitação atual. Contém ainda um gráfico dedicado à leitura dos sinais de excitação e de *feedback*. Relativamente ao ensaio propriamente dito, o utilizador tem à disposição três gráficos, um gráfico 1/Amplitude vs. Temperatura e os dois gráficos que originam o primeiro, isto é, o gráfico 1/Amplitude vs. Tempo e Temperatura vs. Tempo. Estão também disponíveis o botão “START” que permite iniciar o ensaio, o botão “Gravar dados”, que tem como funcionalidade iniciar a aquisição de dados, o botão “Exportar”, que envia os dados recolhidos para folhas de Excel, e o botão “STOP”, que pára o ensaio, **Figura 54**. Existe ainda o botão o “Ganhos”, onde o utilizador pode escolher o conjunto de ganhos do controlador mais adequado ao provete que se pretende ensaiar. Os conjuntos de ganhos predefinidos são PID, PID2, PID3 e PID4. Por defeito, está selecionado o conjunto PID. O ajuste dos parâmetros dos controladores será abordado no **subcapítulo 4.11.5**.

No separador “Opções avançadas” o utilizador tem à disposição o ajuste de parâmetros relativos à configuração do número de amostras geradas e frequência de aquisição e envio de dados. Os parâmetros do controlador PID selecionado e do controlador PI, podem ser individualmente ajustados, **Figura 55**.

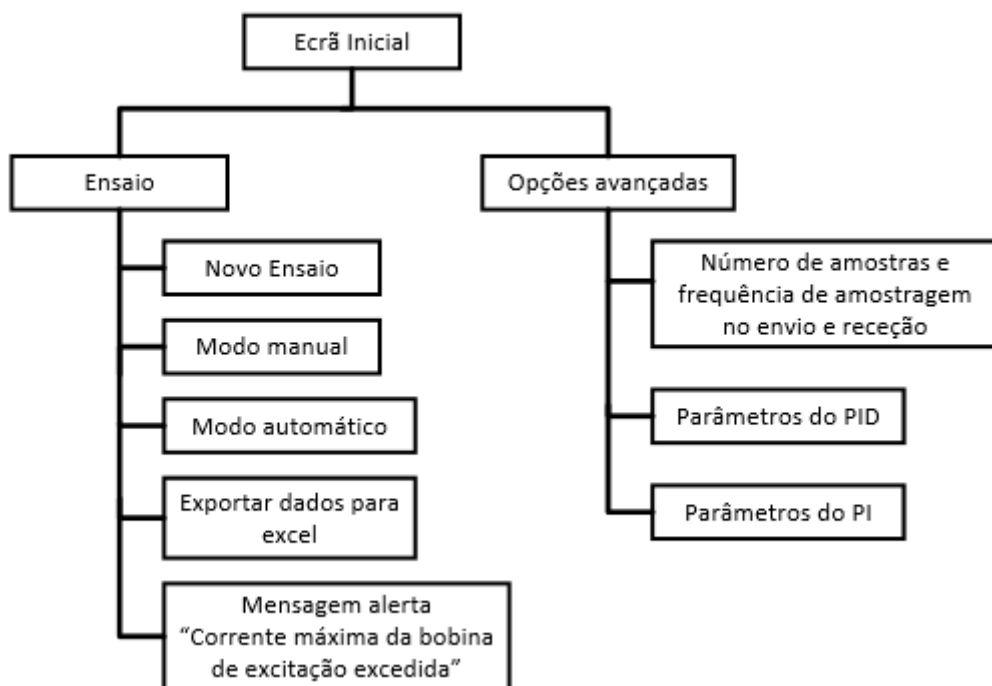


Figura 53 - Diagrama de funcionalidades da interface gráfica desenvolvida

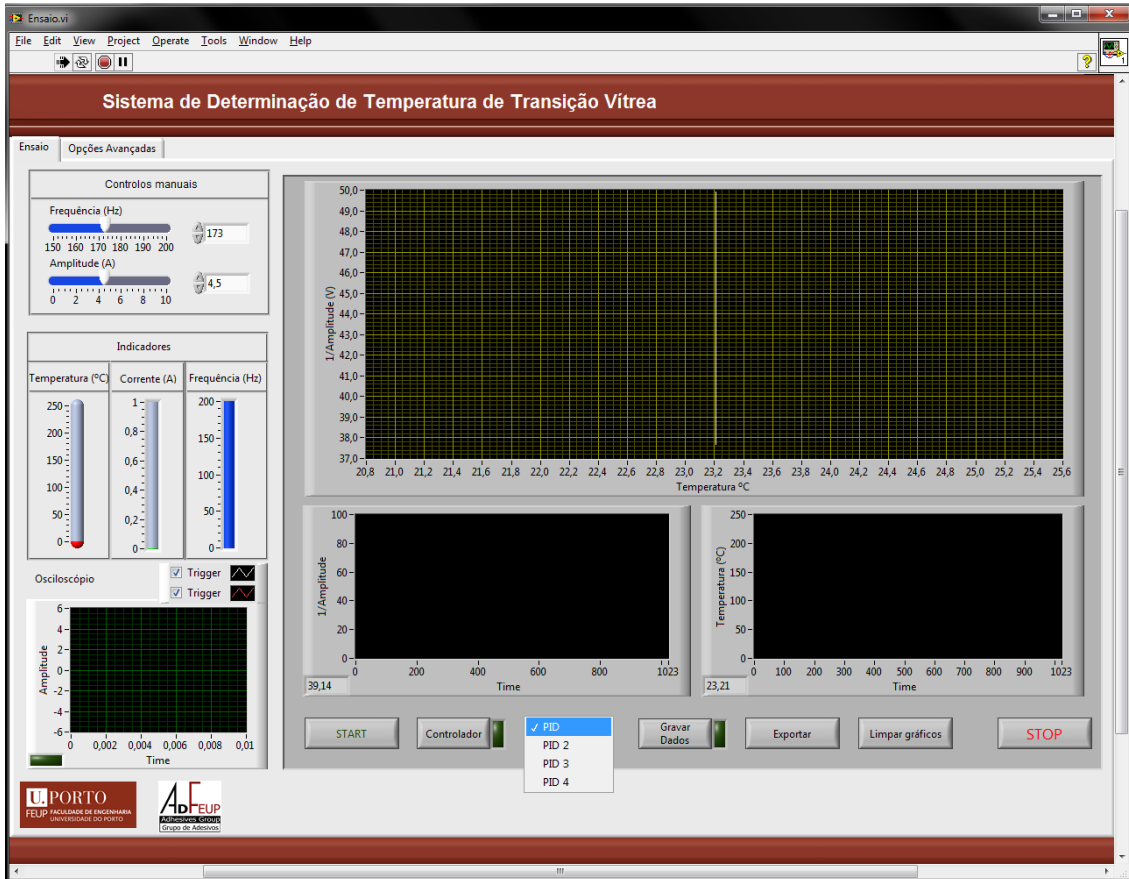


Figura 54 - Separador "Ensaio"

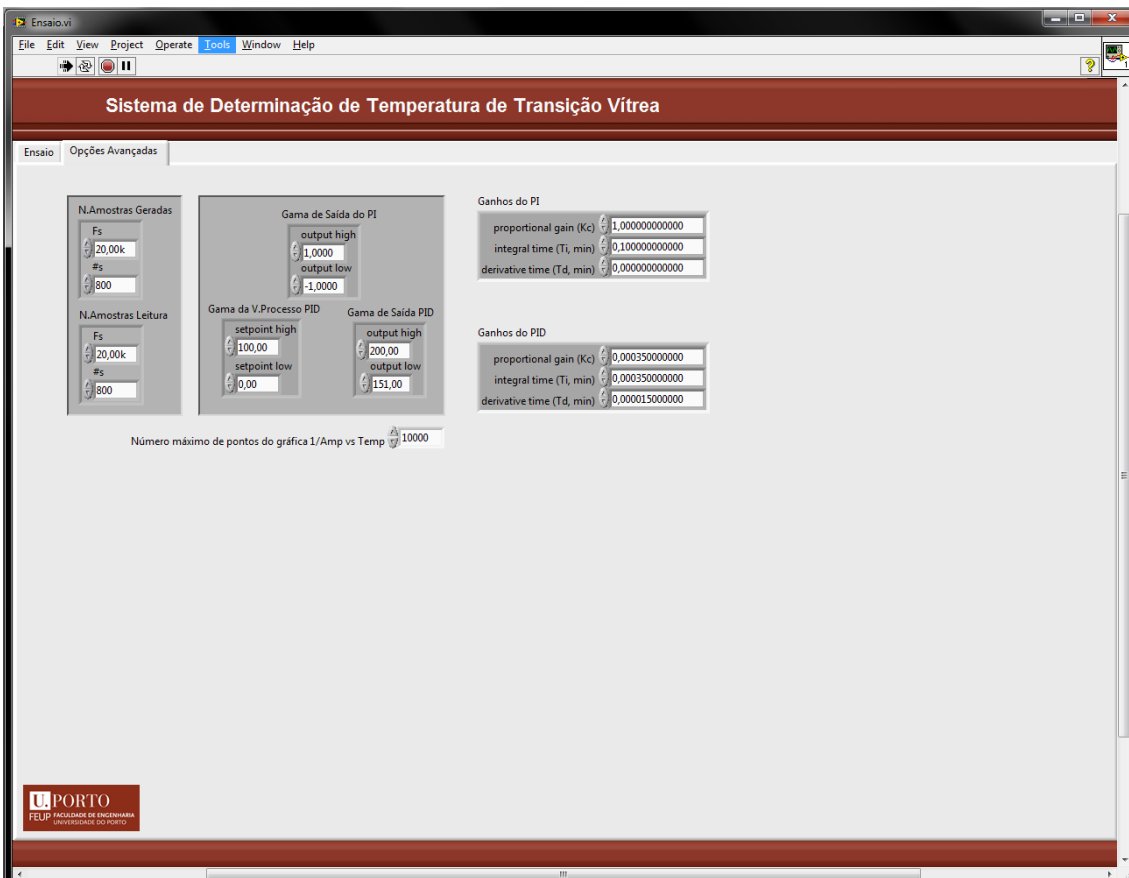


Figura 55 - Separador "Opções avançadas"

4.10 Controle

A necessidade de manter o provete à frequência de ressonância levou à procura de soluções de controlo adequadas à aplicação em questão. Uma pesquisa de soluções de controlo usadas em LabVIEW, permitiu concluir que o módulo *Control Design and Simulation*, dedicado a aplicações de controlo, seria uma boa opção. Este inclui blocos que implementam controladores do tipo proporcional integral derivativo, abreviado PID, **Figura 56**.

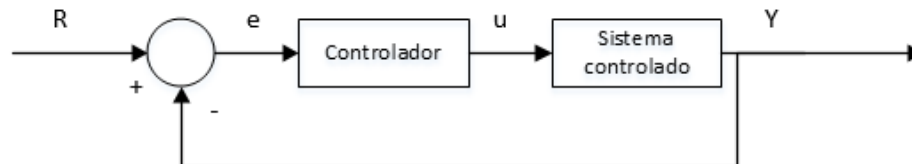


Figura 56 - Esquema de controlador PID onde “R” é a referência, “e” é o erro, “u” é a ação de controlo e “Y” é a variável do processo

Um controlador PID usa o erro entre a variável que representa o estado atual do sistema, denominada de variável do processo, e um valor de referência. O algoritmo determina qual a ação de controlo adequada para minimizar esse erro. Na sua versão clássica, estes controladores são ajustados com três parâmetros constantes, nomeadamente, o ganho proporcional, o integral e o derivativo. Cada um influencia de maneira diferente a ação de controlo. A constante proporcional tem influência sobre o erro calculado no instante atual, o que tipicamente ajuda a diminuir o tempo que o sistema demora a alcançar o erro nulo. No caso da constante integral, a sua ação é com base no erro calculado em instantes passados e está relacionada com a estabilidade do sistema quando o erro é próximo de zero. A constante derivativa atua na estimativa de erros futuros, ajudando dessa forma a diminuir o *overshoot*. Matematicamente a ação de controlo é dada pela seguinte equação:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

Onde u corresponde à ação de controlo, e ao erro, t é o tempo, τ é a variável de integração, K_p é o termo proporcional, K_i é o termo integral e K_d o termo derivativo do controlador.

Os controladores PID são considerados robustos. No entanto, apresentam limitações no controlo de sistemas não lineares e o parâmetro derivativo tem o problema de amplificar o ruído dos sinais, introduzindo dessa forma instabilidade no controlador. Existem soluções que podem amenizar estes problemas, como a utilização de escalonamento de ganhos, ou evitar que o parâmetro integral some continuamente o erro e cause saturação ou destabilização. Outra das técnicas utilizadas é a utilização de controladores PID em cascata, abrindo o tempo de

resposta, suavizando dessa forma a ação de controlo. Existem várias técnicas de controlo que podem melhorar a ação de controlo calculada pelos controladores PID (Ellis, 2000).

4.11 Lógica programada

A implementação das funcionalidades anteriormente descritas leva à necessidade de usar alguns algoritmos que são aqui descritos.

4.11.1 Geração de sinal

Para a geração do sinal de excitação é definida a frequência e a amplitude do sinal a gerar. De seguida, o sinal gerado é enviado para a bobina de excitação, **Figura 57**.

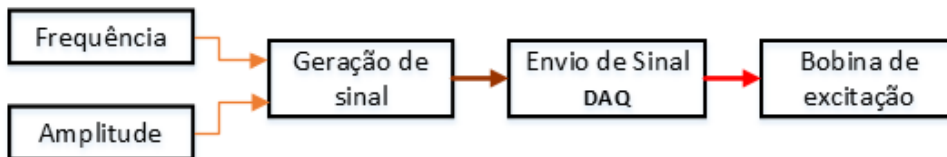


Figura 57 - Diagrama de fluxo do algoritmo implementado no envio de dados

A geração de um sinal de excitação é feita no LabVIEW recorrendo ao bloco *Basic Function Generator.vi* do menu de funcionalidades *Signal Processing – Waveform Generation*. Este bloco é configurado para gerar uma onda sinusoidal, com uma determinada frequência e amplitude, ambas definidas pelo programador. O sinal gerado é enviado para o bloco de envio de sinal, *DAQ Assistant*, configurado de acordo com o **subcapítulo 4.8**, de modo a permitir o envio do sinal gerado para a saída analógica respetiva (ao0), **Figura 58**.

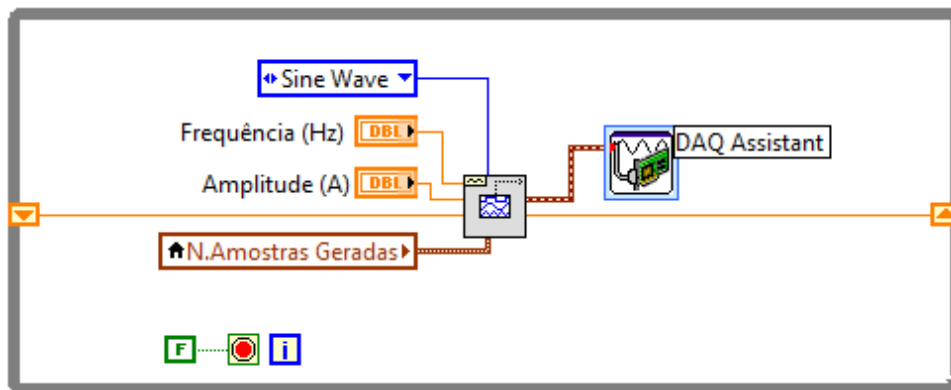


Figura 58 - Geração de sinal sinusoidal implementado em LabVIEW

4.11.2 Receção de sinais

A **Figura 59** esquematiza o tratamento de sinais realizado. A receção de sinais é bastante mais complexa do que o envio, na medida em que os dados recebidos são tratados e utilizados para controlar e gerar informações relativas aos ensaios de determinação da T_g , executados por este sistema.

De uma forma bastante simples, os sinais recebidos pela carta de aquisição de dados, que chegam de forma sequencial, são separados em sinal de *feedback*, sinal de excitação, sinal de temperatura e sinal do transdutor de corrente. Cada sinal é depois tratado individualmente.

Os sinais de *feedback* e de excitação são utilizados para criar uma variável de processo, no caso, o desfasamento entre os referidos sinais. Esta variável é posteriormente utilizada pelo controlador de forma a gerar uma ação de controlo capaz de manter o provete em ressonância. Para isso, é pretendido, como já foi explicado nesta dissertação, que o desfasamento seja nulo. A ação de controlo é então enviada para o amplificador de corrente e depois para a bobina de excitação.

O sinal de temperatura é apenas filtrado, pois o valor numérico disponibilizado é já o valor de temperatura em graus celsius, que por sua vez é apresentado com algum ruído derivado do instrumento de medição ser um termopar.

O transdutor de corrente utilizado envia um sinal em tensão que necessita de ser convertido em corrente, para permitir a leitura direta por parte do utilizador.

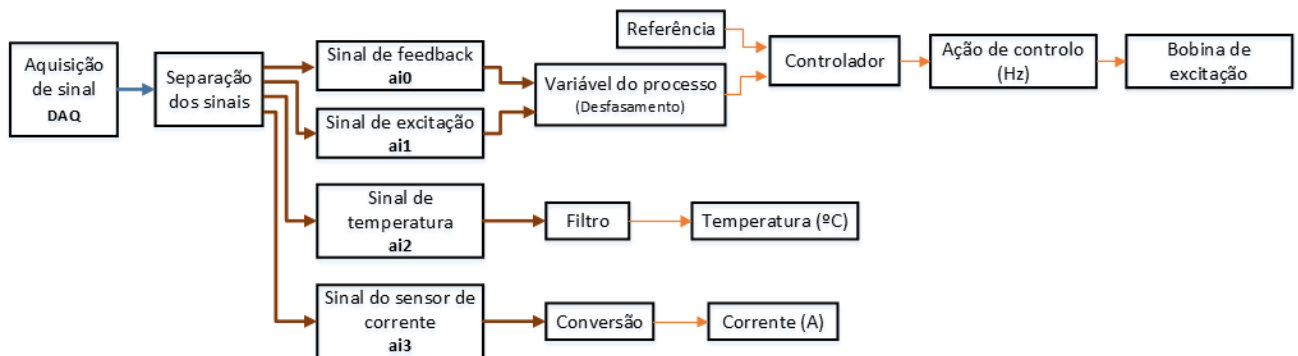


Figura 59 – Diagrama de fluxo do algoritmo implementado na aquisição de dados

4.11.3 Aquisição e separação de sinais

No caso da aquisição de sinais é utilizado o bloco DAQ Leitura para receber os sinais de *feedback* e excitação, sinal de temperatura e sinal do transdutor de corrente. Para a separação de sinais foi construído um bloco denominado de Separador de sinais.vi, **Figura 60**. Este bloco inclui no seu interior quadro blocos *Index Waveform Array.vi* do menu de funcionalidades

Programming – Waveform, que permitem isolar individualmente os sinais recebidos por cada entrada analógica, tendo para isso que se indicar a entrada do sinal pretendido em cada um dos blocos, **Figura 61**.

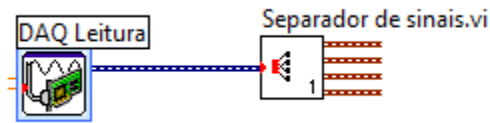


Figura 60 - Recepção e separação de sinal em LabVIEW

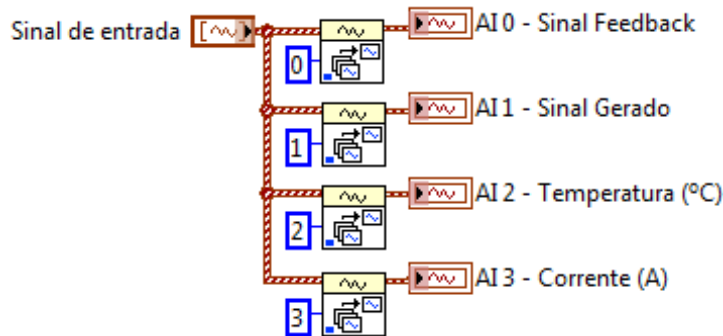


Figura 61 - Bloco "Separador de sinais.vi"

4.11.4 Variável do processo

A variável do processo (desfasamento) resulta da subtração direta de fases dos sinais lidos nos terminais das bobinas de *feedback* e de excitação. O LabVIEW mede a fase numa escala de 0° a 360°. A transformação para uma escala de -180° a 180° é feita subtraindo 180° ao valor lido. Para estas operações foi criado um bloco denominado de “Cálculo de Desfasamento.vi”.

A medição da fase de cada sinal sinusoidal é feita utilizando o bloco *Extract Single Tone Information.vi* do menu de funcionalidades *Signal Processing – Waveform Measurements*, **Figura 62**.

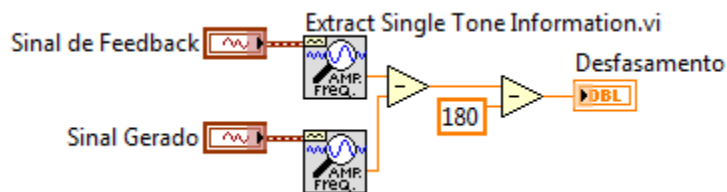


Figura 62 – Cálculo da variável de processo (desfasamento)

4.11.5 Implementação do controlador

Para a implementação do controlador PID foi utilizado o bloco PID *Advanced*.vi do menu *Control Design & Simulation* - PID. Este bloco permite uma série de funcionalidades adicionais relativamente ao controlador PID *standard*, **Figura 64**. O bloco permite alterar a variável de controlo manualmente, definir a gama de valores da referência e variar um parâmetro (linearidade, L) que tem o efeito de modificar o erro que é apresentado ao controlador. Este é dado pela expressão (NI Corporation, 2012):

$$e(t) = (SP - PV_f)(L + (1 - L) * \frac{|SP - PV_f|}{SP_{range}}) \quad (2)$$

Onde e corresponde ao erro, t ao tempo, SP é a referência, PV_f é a variável do processo (desfasamento), SP_{range} é a gama de referência e L refere-se à linearidade do erro apresentado ao controlador.

A **Figura 63** permite verificar a influência do parâmetro de linearidade, L , no erro apresentado ao controlador PID. Tal comportamento é equivalente a ter um controlador PID não linear.

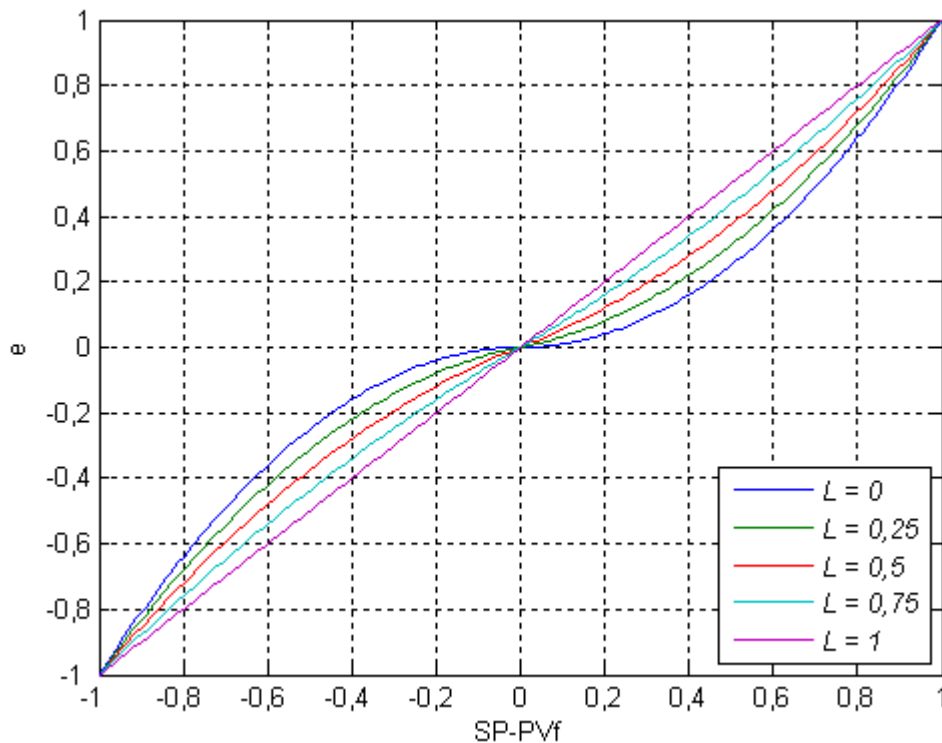


Figura 63 - Gráfico Erro vs SP-PVf, em função do parâmetro de linearidade, L

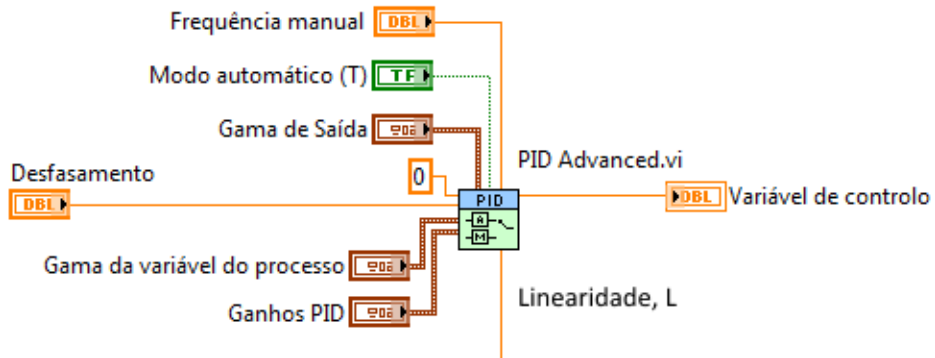


Figura 64 - Implementação de um controlador PID com configurações avançadas

Devido à especificidade da aplicação, visto que o sistema tem uma dinâmica bastante variável com a temperatura, foi necessário pensar numa forma de ter o controlador PID a funcionar corretamente à medida que a dinâmica do sistema varia em função do adesivo testado e da temperatura a que este está sujeito. A solução encontrada foi a implementação de um controlador PI aplicado ao controlo do parâmetro de linearidade, L , do controlador PID. Esta solução permite definir os parâmetros do controlador PID para o caso em que é necessária uma ação de controlo mais expedita e utilizar o controlador PI para variar a resposta do PID ao erro. Tal solução é equivalente a ter um controlador PID com ganhos variáveis. Consegue-se dessa forma, adaptar a ação de controlo à dinâmica do provete, que por sua vez é função da temperatura a que está exposto, **Figura 65**.

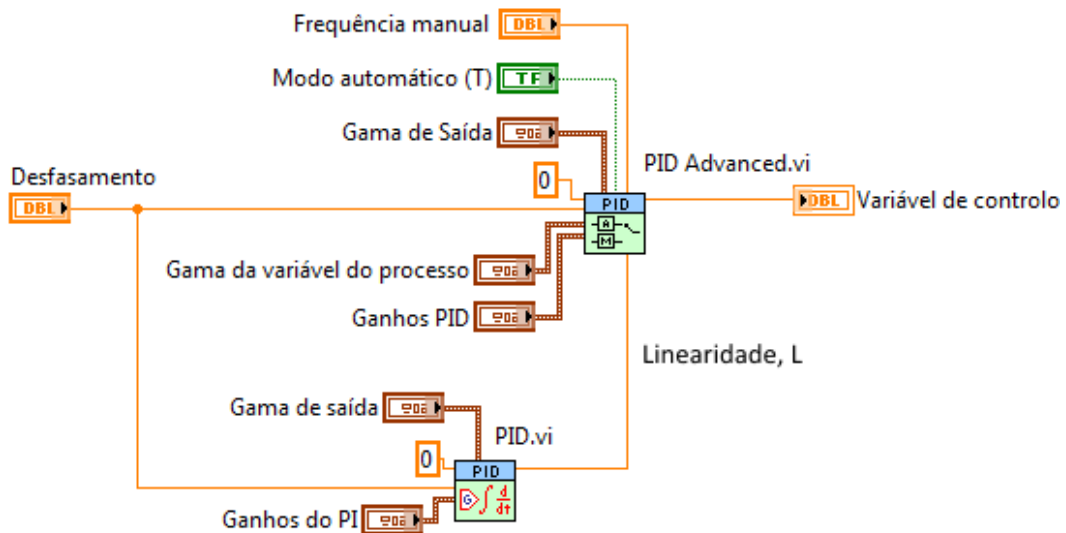


Figura 65 - Implementação de PI no controlo de linearidade do controlador PID

Na implementação do controlador PID é utilizado o bloco *PID Advanced.vi* do menu de funcionalidades *Control Design & Simulation – PID*. Os parâmetros dos controladores foram

ajustados manualmente. Neste método, os termos I e D são definidos para zero e o ganho proporcional é variado até a saída do *loop* começar a oscilar. Uma vez definido P para obter a resposta desejada, o termo integral é variado com a finalidade de parar as oscilações. Ajustadas as componentes, proporcional e integral, o termo derivativo é variado até que o *loop* seja aceitavelmente rápido em relação ao seu ponto de referência. Tendo o controlador PID ajustado, o mesmo procedimento foi realizado para o controlador PI. A **Figura 66** serviu de orientação na sintonia dos parâmetros P, I, D.

CL RESPONSE	RISE TIME	OVERSHOOT	SETTLING TIME	S-S ERROR
Kp	Decrease	Increase	Small Change	Decrease
Ki	Decrease	Increase	Increase	Eliminate
Kd	Small Change	Decrease	Decrease	Small Change

Figura 66 - Tabela de efeito de ajuste dos parâmetros P, I, D

O procedimento descrito foi usado e os parâmetros dos controladores foram ajustados e verificados para um conjunto significativo de provetes. Os ganhos obtidos para o PI foram $K_p=1$ e $K_i=0,1$ e para o PID $K_p=0,00035$, $K_i=0,00035$ e $K_d=0,000015$. Estes são os ganhos que estão definidos por defeito, na interface gráfica, sempre que se configura um novo ensaio (ganhos PI, **Figura 67** e ganhos PID, **Figura 68**).

Porém, existem alguns provetes para os quais os ganhos anteriormente referidos não são os mais adequados. Para estes casos chegou-se a outros conjuntos de ganhos (PID 2, PID 3 e PID 4), **Figura 69** a **Figura 71**, respetivamente. O controlador PI manteve-se inalterado. Se necessário, o utilizador pode na interface gráfica, seleccionar quais os ganhos a usar.

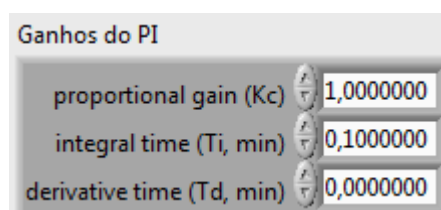


Figura 67 - Parâmetros do controlador PI

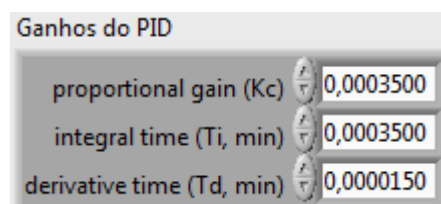


Figura 68 - Parâmetros do controlador PID

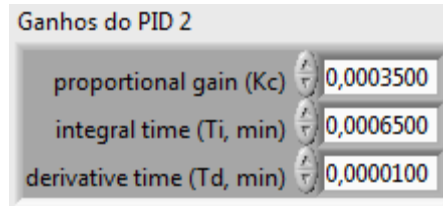


Figura 69 - Parâmetros do controlador PID 2

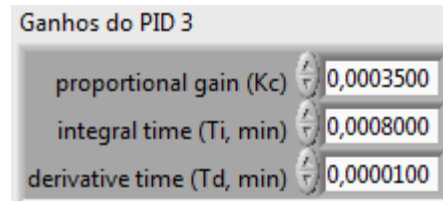


Figura 70 - Parâmetros do controlador PID 3

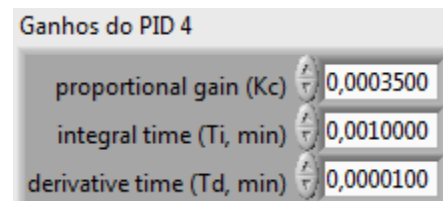


Figura 71 - Parâmetros do controlador PID 4

4.11.6 Tratamento do sinal de temperatura

O valor numérico do sinal de temperatura adquirido é já em graus Celcius. Isto acontece porque na configuração da carta de aquisição de dados existe a opção para a entrada analógica ser configurada para leitura de um termopar (como é possível verificar no **subcapítulo 4.8**). No entanto, o sinal lido no termopar é um pouco ruidoso. Assim, foi implementado um filtro, que aplica uma média móvel. Esta média é implementada pelo bloco *Median PtByPt.vi*, do menu de funcionalidades *Signal Processing – Point by Point- Probability & Statistics*. Neste bloco deve ser definido pelo programador o número de pontos utilizados na média móvel. Neste caso foram utilizados 100 pontos, **Figura 72**.

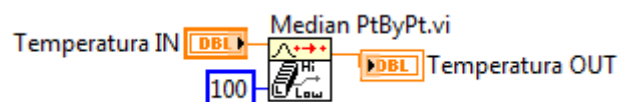


Figura 72 - Aplicação de média móvel ao sinal de temperatura

4.11.7 Conversão do sinal de saída do transdutor de corrente para Ampere

O transdutor de corrente, Pololu ACS714, fornece um sinal em tensão linearmente proporcional à corrente medida. A sensibilidade é indicada pelo fabricante como sendo de 185 mV/A. No entanto, aplicando esta constante, verificou-se que o valor de corrente medido não correspondia ao esperado. Para corrigir esta situação foi traçada a característica do transdutor, **Figura 73**, onde foi utilizado como padrão de referência na medição de corrente um multímetro Velleman® DVM345DI.

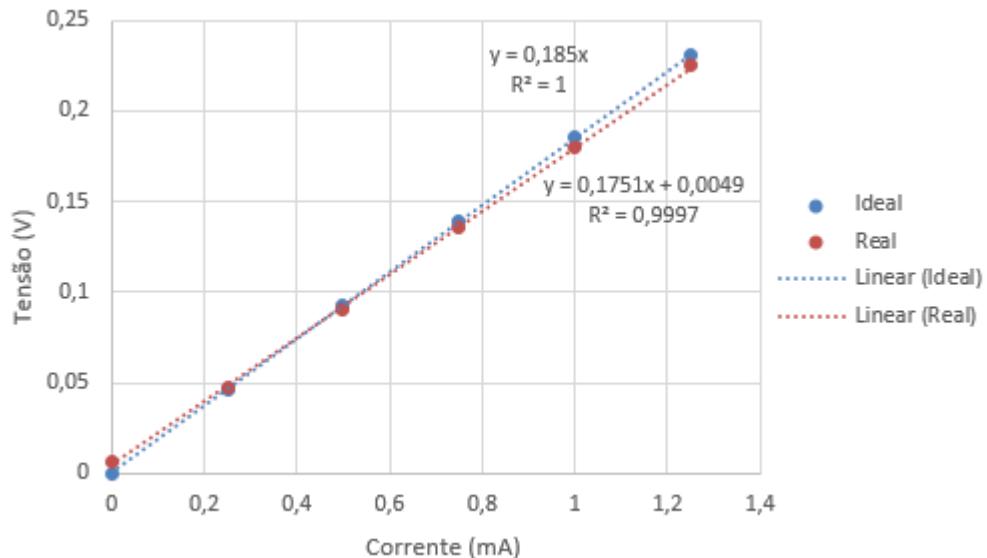


Figura 73 - Gráfico da característica real e ideal do transdutor de corrente Pololu ACS714

Para traçar a característica do transdutor de corrente foram medidos os valores de tensão correspondentes às correntes de 0 A, 0,25 A, 0,5 A, 0,75 A e 1 A. Construído o gráfico da característica do transdutor, foi aplicada uma regressão linear, que permitiu verificar que a sensibilidade real é de 0,1751 mV/A com um *offset* de 0,0049 mV.

Para usar estes novos valores foi criado um bloco denominado de “Amperímetro.vi”, onde é medida a queda de tensão (sinal de corrente alternada), utilizando para esta finalidade o bloco *AC & DC Estimator.vi* do menu de funcionalidades *Signal Processing – Signal Operation*. A este valor medido foi subtraído o *offset* (0,0049) e o valor de tensão resultante foi dividido pela nova constante de proporcionalidade (0,1751 mV/A), **Figura 74**.

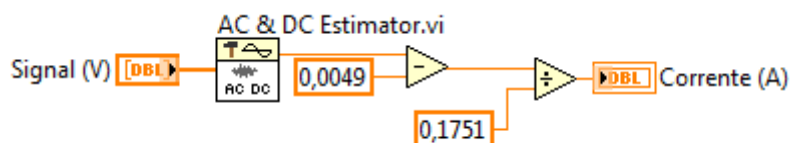


Figura 74 - Conversão do sinal de tensão fornecido pelo transdutor de corrente em Ampère

5 Ensaios de validação de resultados

Este capítulo é dedicado a ensaios de determinação da T_g com o sistema desenvolvido durante nesta dissertação com a finalidade de validar as alterações efetuadas.

5.1 Adesivos testados

Nestes ensaios foram testados dois tipos de adesivo epoxy, um monocomponente, XN 1244 (**Anexo C**), e um bicomponente, Araldite® 2011 (**Anexo D**).

A T_g do adesivo Nagase Chemtex® XN1244 foi determinada noutros estudos (Banea et al., 2011), utilizando a técnica DMTA e uma temperatura de cura de 140 °C durante 60 minutos. Nessas condições a T_g obtida foi 155 °C (**Figura 75**).

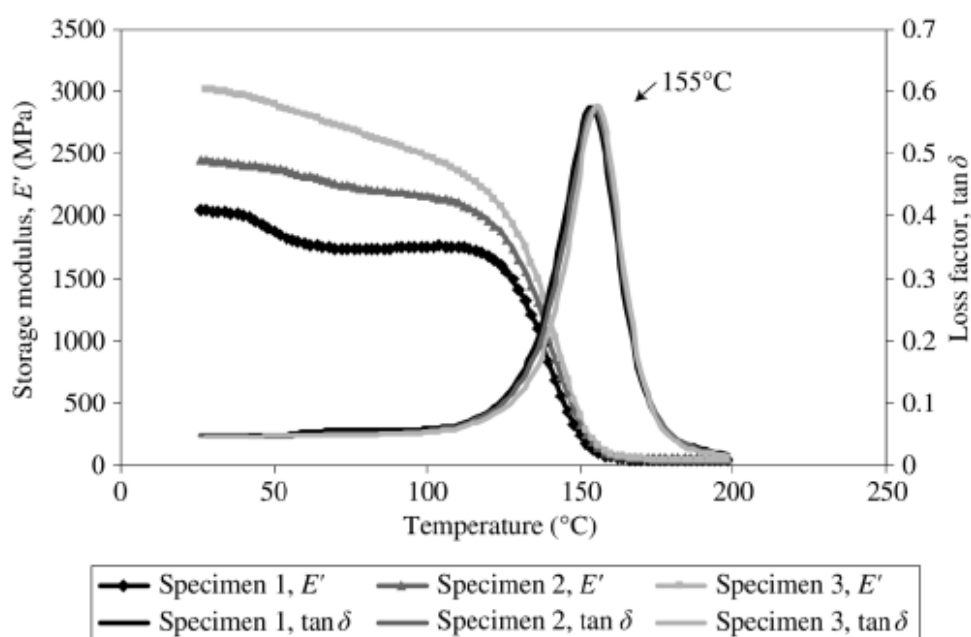


Figura 75 - Resultado do ensaio DMTA ao adesivo Nagase Chemtex® XN1244 (Banea et al., 2011)

O adesivo Huntsman Araldite® 2011 foi curado à temperatura de 25 °C e para esta temperatura segundo, a T_g deste epoxy é de 65 °C, **Figura 76** (Carbas et al., 2014).

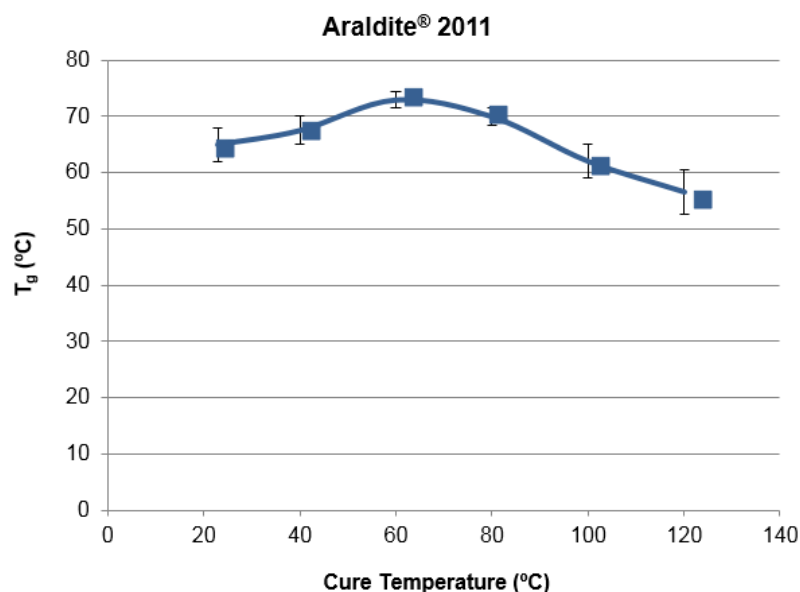


Figura 76 – Efeito da temperatura de cura na T_g do adesivo epoxy Araldite® 2011 (Carbas et al., 2014)

5.2 Preparação dos provetes

A preparação dos provetes é bastante importante e com tal deve ser feita com rigor. Os adesivos (adesivo ou resina e endurecedor) estão armazenados em recipientes próprios para o efeito. No caso do adesivo bicomponente é necessário fazer a mistura devidamente, de forma a garantir a sua homogeneidade.

Como já foi referido no **subcapítulo 3.2**, os provetes são compostos por uma barra de alumínio, onde é depositado o adesivo, e uma placa superior, necessária para restringir a camada de adesivo quando a barra é fletida, **Figura 77**. Isto intensifica a tensão na camada de adesivo, exigindo uma menor oscilação para gerar uma determinada tensão no material.

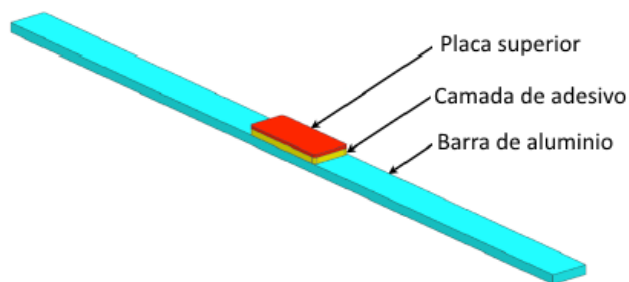


Figura 77 - Composição do provete (Telha, 2012)

Para estes ensaios foram preparados vários provetes. Na sua produção o primeiro passo foi a aplicação de desmoldante aos elementos do molde, para facilitar o processo de desmoldagem. De seguida foram introduzidos espaçadores, as placas superiores e os termopares nas cavidades onde posteriormente foi depositado o adesivo, **Figura 78**.

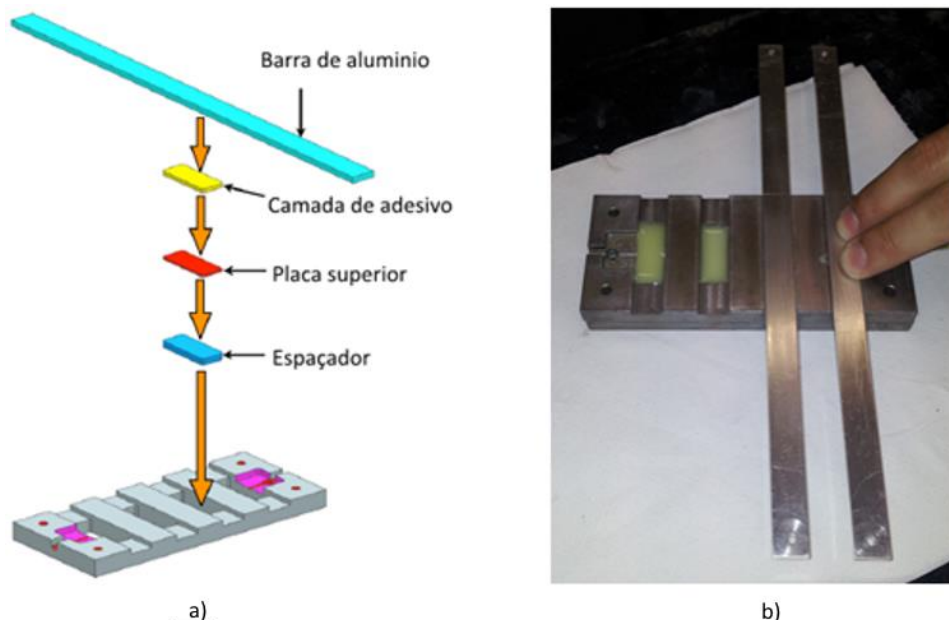


Figura 78 – a) Sequência de montagem do provete, b) Colocação das barras de alumínio no molde (Telha, 2012)

O passo seguinte foi o fecho do molde. No caso do adesivo XN 1244, este foi levado a uma prensa para curar a 140 °C durante 60 minutos, **Figura 79**. O adesivo Araldite® 2011 foi curado a cerca de 25 °C (temperatura ambiente).

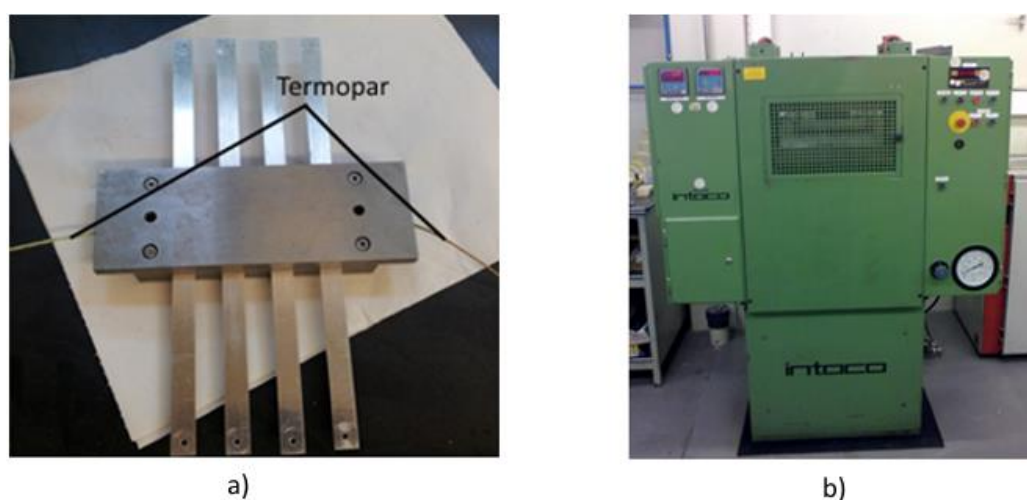


Figura 79 – a) Molde fechado, com termopares aplicados, b) Prensa utilizada na cura do adesivo XN 1244

5.3 Resultados

A T_g foi determinada para dois pares de provetes, para cada um dos adesivos, utilizando o novo sistema descrito no **capítulo 4**. Foi registada a T_g no aquecimento e no arrefecimento, onde o varrimento de temperatura foi de 16 e 8 °C/min, respetivamente.

A **Figura 80** e a **Figura 81** mostra o Amortecimento (1/V) vs. Temperatura (°C) para o aquecimento e arrefecimento do adesivo XN1244.

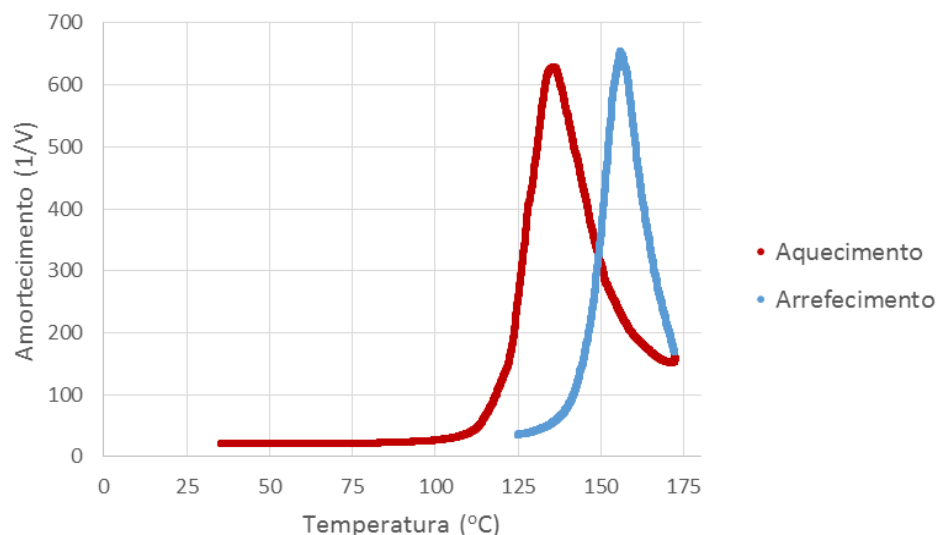


Figura 80 - Resultado do primeiro ensaio, Amplitude vs. Temperatura para o adesivo Nagase Chemtex® XN1244

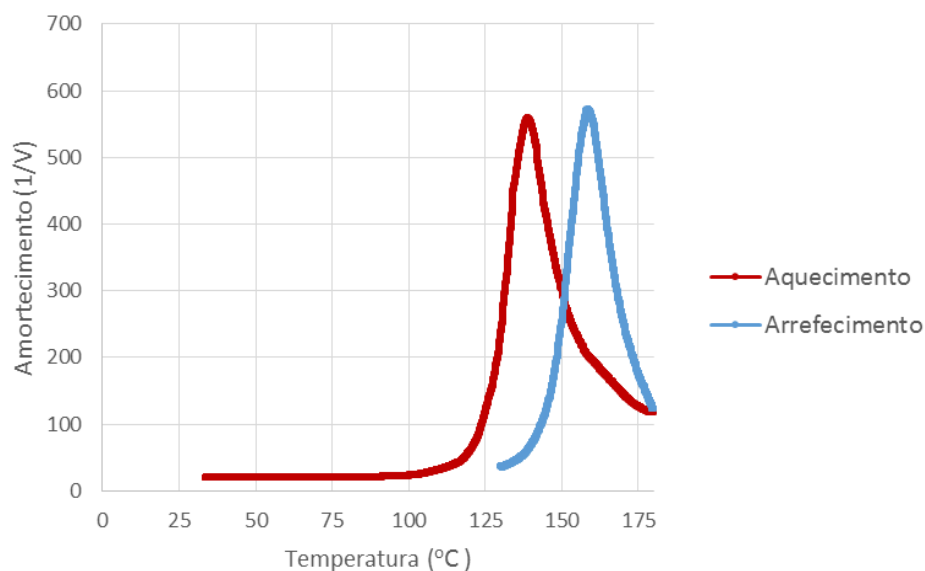


Figura 81 - Resultado do segundo ensaio, Amplitude vs. Temperatura para o adesivo Nagase Chemtex® XN1244

A **Figura 82** e a **Figura 83** mostra o Amortecimento ($1/V$) vs. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para o aquecimento e arrefecimento do adesivo Araldite[®] 2011.

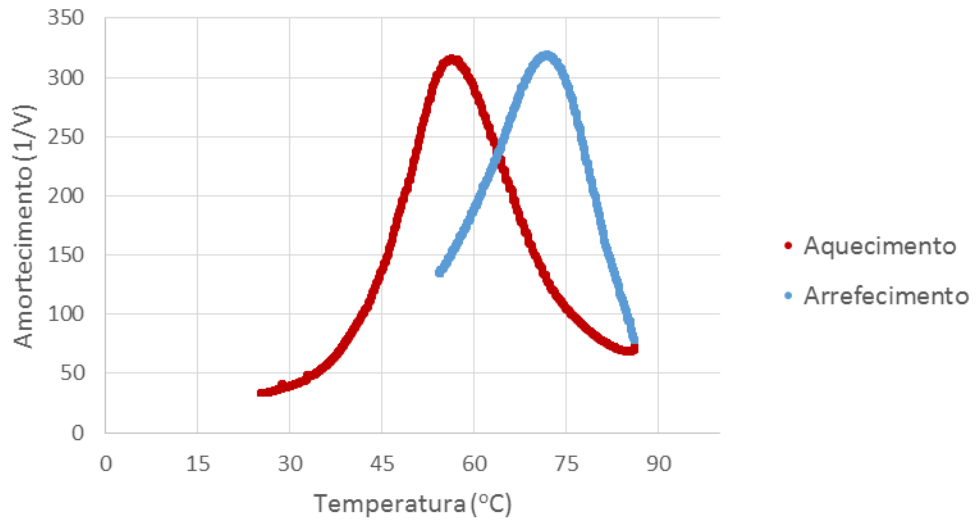


Figura 82 - Resultado do primeiro ensaio, Amplitude vs. Temperatura para o adesivo Araldite[®] 2011

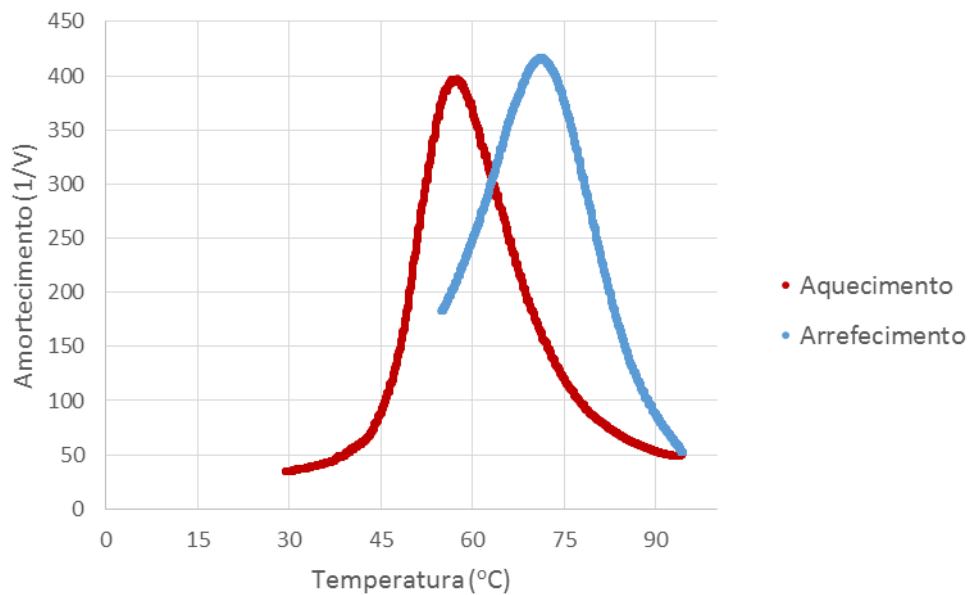


Figura 83 - Resultado do segundo ensaio, Amplitude vs. Temperatura para o adesivo Araldite[®] 2011

Os valores de T_g medidos para o aquecimento e arrefecimento de cada um dos adesivos estão apresentados na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Comparação de resultados experimentais de T_g

Adesivo Epoxy	Resultado Esperado (subcapítulo 5.1)	Resultados experimentais		
		T_g (°C) Aquecimento	T_g (°C) Arrefecimento	T_g (°C) Média
Nagase Chemtex® XN 1244 (1)	155	137	156	147
Nagase Chemtex® XN 1244 (2)		139	159	145
Araldite® 2011 (1)	65	57	70	64
Araldite® 2011 (2)		58	72	65

A diferença de resultados pode estar relacionada com o facto de no método DMTA ser utilizado o pico da $\tan \delta$ para determinar a T_g , o que mostra a influência da frequência a que cada ensaio é realizado (Li et al., 2000).

Outra razão possível para esta diferença na T_g medida, pode ser a diferença existente no varrimento de temperaturas entre o aquecimento e o arrefecimento. E que está relacionada com o facto do controlo de temperatura ser manual, o que consequentemente deixa o controlo dependente da sensibilidade do utilizador.

Como foi referido no **subcapítulo 2.4**, existem diferenças nos valores da T_g medidos dependendo do método utilizado. Estas diferenças podem ser superiores a 15 °C. Os resultados obtidos com o novo sistema estão dentro dos valores esperados, com uma diferença máxima registada de 10 °C para o XN 1244 e de 1 °C para a Araldite 2011.

6 Conclusões e possíveis trabalhos futuros

6.1 Conclusões

Este trabalho foi dividido em quatro grandes partes. A primeira consistiu no estudo teórico da T_g , a sua importância na área dos adesivos estruturais, e ainda, métodos e sistemas correntemente utilizados na determinação desta propriedade, bem como vantagens e desvantagens de cada método estudado.

A fase seguinte consistiu na análise do sistema encontrado de forma a compreender o seu funcionamento e quais os procedimentos necessários para realizar um ensaio. Com esta análise foi possível identificar soluções alternativas capazes de introduzir melhorias significativas ao sistema de determinação da T_g .

Numa terceira fase foram implementadas alterações que levaram eliminação de *hardware*, como o gerador de sinais, o osciloscópio, o amperímetro e da caixa de *feedback*, tendo sido substituídos por uma carta de aquisição de dados. Esta transformação levou à redução da quantidade de equipamentos utilizados, tornando o sistema mais compacto, simples e fácil de utilizar. A utilização de uma carta de aquisição de dados facilitou a criação de uma interface gráfica, o que eliminou a necessidade de tratamento de dados manual e permitiu reunir toda a informação relativa a um ensaio, num local apenas. A substituição da caixa de *feedback* possibilitou ainda resolver o problema existente na qualidade do sinal de excitação e *feedback* do sistema anterior.

A última parte foi dedicada a ensaios de determinação da T_g de alguns adesivos já devidamente caracterizados. Estes ensaios são uma forma de garantir que as inovações introduzidas ao sistema não afetam a precisão dos resultados obtidos com o novo sistema.

Os resultados permitem afirmar que a otimização do sistema de determinação da T_g de adesivos foi alcançada com sucesso, levando a concluir que os objetivos da presente dissertação foram inteiramente cumpridos.

6.2 Trabalhos futuros

O sistema desenvolvido nesta dissertação é capaz de cumprir a finalidade a que se destina. No entanto, como em qualquer sistema, existe espaço para melhorias. Nomeadamente, o estudo e implementação de um controlador de temperatura, o que levaria a uma melhoria significativa nos resultados da T_g obtidos.

Uma outra melhoria que pode ser feita é a introdução de um amplificador de corrente, que permita tornar o sistema ainda mais compacto.

Outros testes podem ser futuramente executados de forma a calibrar melhor o sistema.

O estudo e implementação de um controlador alternativo ao utilizado no controlo da frequência de ressonância, poderia evitar a necessidade do utilizador testar vários parâmetros para a realização de testes a provetes muito distintos dos utilizados.

Existe ainda a possibilidade de introduzir novas funcionalidades na interface gráfica já existente. O armazenamento e consulta de dados relativos a ensaios realizados anteriormente é um exemplo do que pode ser feito.

Referências e Bibliografia

- Banea, M. D., de Sousa, F. S., da Silva, L. F., Campilho, R. D., & de Bastos Pereira, A. M. 2011.** *Effects of temperature and loading rate on the mechanical properties of a high temperature epoxy adhesive.* Journal of Adhesion science and technology, Vol. 25, 18, pp. 2461-2474.
- Carbas, R. J. C, Marques, E. A. S., da Silva, L. F. M., & A. M. Lopes. 2014.** *Effect of Cure Temperature on the Glass Transition Temperature and Mechanical Properties of Epoxy Adhesives,* The Journal of Adhesion, Vol. 90, 1, pp. 104-119.
- Ellis, G. 2000.** *Control System Design Guide.* London: Elsevier Academic Press.
- Hall, E. H. 1879.** *On a New Action of the Magnet on Electric Currents.* American Journal of Mathematics. Vol. 2, 3, pp. 287-292.
- Koh, B. K. 2000.** *A novel method for rapid measurement of the glass transition temperature,* PhD. Bristol: Departement of mechanical Engineering, University of Bristol.
- Konarski, M. M. 1999.** *Effects of Tg and CTE on semiconductor encapsulants.* s.l.: Loctite Industrial, Henkel Corp.
- Li, G., Lee-Sullivan, P. & Thring, R. W. 2000.** *Determination of activation energy for glass transition of an epoxy adhesive using dynamic analysis,* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 60, 2, pp. 377-390.
- Lobo, H. e & Bonilla, J. V. 2002.** *K. Menard in Handbook of Plastic Testing.* Nova York: Marcel Dekker Editors.
- MathWorks, Inc. 2014.** Simulink. *MathWorks.* [Online] 5 de Maio de 2014. <http://www.mathworks.com/products/simulink/>.
- Menczel, J. D. & Prime, R. B. 2009.** *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications.* Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- NI Coporation. 2014.** NI BNC-2110. *National Instruments.* [Online] 16 de Junho de 2014. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/1865>.

- NI Corporation. 2012.** Advanced PID Algorithm (PID and Fuzzy Logic Toolkit). *National Instruments*. [Online] 1 de Junho de 2012. [Citação: 13 de Junho de 2014]. http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370401J-01/lvpidmain/pid_adv_alg/.
- 2014.** Aquisição de dados. *National Instruments*. [Online] 25 de Maio de 2014. <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/>.
- 2014.** Escolhendo o barramento correto para sua medição. *National Instruments*. [Online] 5 de Junho de 2014. <http://www.ni.com/white-paper/9401/pt/>.
- 2007.** NI 622x Specifications. *National Instruments*. [Online] Junho de 2007. [Citação: 12 de Junho de 2014]. <http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/8117DF4C5A29C95C862573020061023B.371290G-01>.
- 2014.** NI LabVIEW. *National Instruments*. [Online] 20 de Abril de 2014. <http://www.ni.com/labview/pt/>.
- 2014.** NI PCI-6221. *National Instruments*. [Online] 11 de Junho de 2014. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/14132>.
- 2014.** NI SHC68-68-EPM. *National Instruments*. [Online] 16 de Junho de 2014. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/modelpopup/p/pcat/6368/lang/pt>.
- 2014.** NI USB-6008. *Nation Instruments*. [Online] 2 de Junho de 2014. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/201986>.
- 2005.** NI-DAQ and LabVIEW Version Compatibility (for Windows). *National Instruments*. [Online] 19 de Setembro de 2005. [Citação: 14 de Junho de 2014.] <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/B0D5630C0A50D5C6862578E800459248>.
- 2012.** NI-DAQmx and NI-DAQ Driver Support: PCI/PXI Devices. *National Instruments*. [Online] 20 de Maio de 2012. [Citação: 14 de Junho de 2014.] <http://www.ni.com/white-paper/6910/en/#top>.
- Odlyha, M. 1997.** *Thermal Methods Laboratory*. London: Birkbeck College.
- OMEGA Engineering inc. 2014.** OMB-DAQ-3000 Series. *Omega*. [Online] 5 de Junho de 2014. <http://www.omega.com/pptst/OMB-DAQ-3000.html>.
- Pololu Corporation. 2014.** ACS714 Current Sensor Carrier -5A to +5A. *Pololu Robotics & Electronics*. [Online] 5 de Junho de 2014. <http://www.pololu.com/product/1185>.
- Reis, A. C. 2012.** *Efeito de cura na temperatura de transição vítrea de um adesivo estrutural*. Porto : MSc. FEUP.
- Rodriguez, F., Cohen, C., Ober, C., Archer, A., & Lynden. 2003.** *Principles of Ploymer Systems*. s.l. : Ithaca: Taylor & Francis Group.
- Shannon, C. E. 1998.** *Communication in the presence of noise*, Institute of Radio Engineers, Vol. 86, 2, pp. 447-457.
- da Silva, L. F. M., de Magalhães, A. G., de Moura, M. F. S. F. 2007.** *Juntas Adesivas Estururais*. Porto : Publindústria, Edições Técnicas.

SparkFun Electronics. 2014. Hall-Effect Current Sensor Breakout - ACS712. *SparkFun* . [Online] 5 de Junho de 2014. <https://www.sparkfun.com/products/8882>.

Telha, R. M. T. 2012. *Development of a dynamic mechanical analysis with a vibrating beam method to determine the glass transition temperature (T_g) of adhesives*. Porto: Dissertação do MIEM.

Tufan, A. D. 2013. *Development of a dynamic mechanical analysis with a vibrating beam method*. Porto: Dissertação do MIEM.

Zhang, Y, Adams, R. D. & da Silva, L. F. M. da Silva. 2013. *A rapid method of measuring the glass transition temperature using a novel dynamic mechanical analysis method*, *Journal of adhesion*, Vol. 89, 10, pp. 785-806.

Zhang, Y. 2008. *A study of the measurement of glass transition temperature*. Bristol: PhD, Departement of Mechanical Engineering, University of Bristol.

ANEXO A: NI PCI-6221

NI 622x Specifications

Specifications listed below are typical at 25 °C unless otherwise noted. Refer to the *M Series User Manual* for more information about NI 622x devices.

このドキュメントの日本語版については、ni.com/manuals を参照してください。
(For a Japanese language version, go to ni.com/manuals.)

Analog Input

Number of channels	Input impedance
NI 6220/6221 8 differential or 16 single ended	Device on
NI 6224/6229 16 differential or 32 single ended	AI+ to AI GND >10 GΩ in parallel with 100 pF
NI 6225 40 differential or 80 single ended	AI- to AI GND >10 GΩ in parallel with 100 pF
ADC resolution 16 bits	Device off
DNL No missing codes guaranteed	AI+ to AI GND 820 Ω
INL Refer to the <i>AI Absolute Accuracy Table</i>	AI- to AI GND 820 Ω
Sampling rate	Input bias current ±100 pA
Maximum 250 kS/s single channel, 250 kS/s multi-channel (aggregate)	Crosstalk (at 100 kHz)
Minimum No minimum	Adjacent channels -75 dB
Timing accuracy 50 ppm of sample rate	Non-adjacent channels -90 dB ¹
Timing resolution 50 ns	Small signal bandwidth (-3 dB) 700 kHz
Input coupling DC	Input FIFO size 4,095 samples
Input range ±10 V, ±5 V, ±1 V, ±0.2 V	Scan list memory 4,095 entries
Maximum working voltage for analog inputs (signal + common mode) ±11 V of AI GND	Data transfers
CMRR (DC to 60 Hz) 92 dB	PCI/PXI devices DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
	USB devices USB Signal Stream, programmed I/O

¹ For USB-6225 devices, channel AI <0..15> crosstalk to channel AI <64..79> is -71 dB; applies to channels with 64-channel separation, for example, AI (x) and AI (x + 64).

Overvoltage protection (AI <0..79>, AI SENSE, AI SENSE 2)

- Device on±25 V for up to two AI pins
- Device off±15 V for up to two AI pins

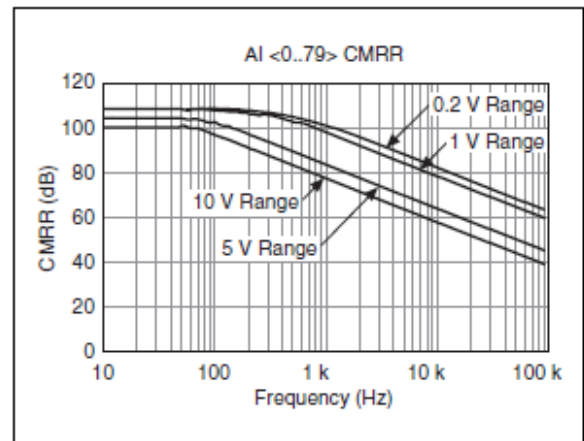
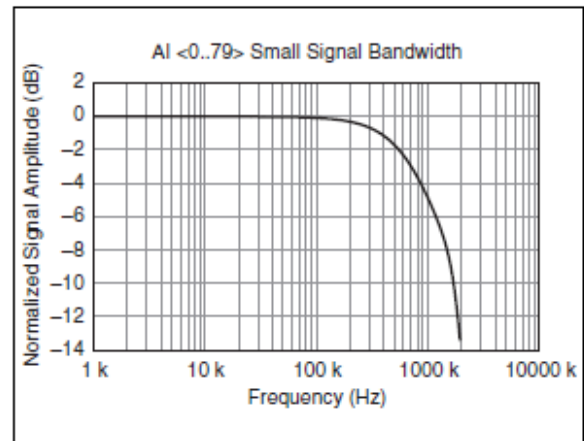
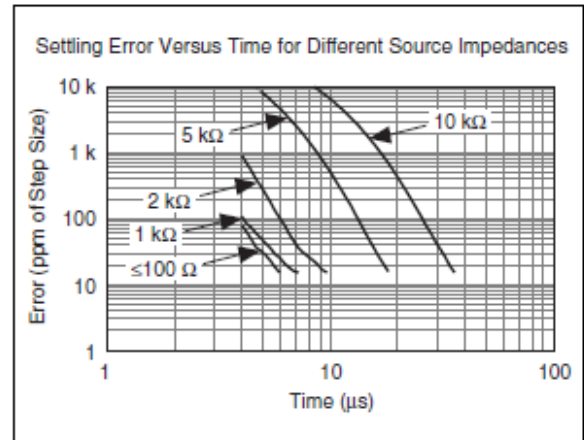
Input current during overvoltage condition±20 mA max/AI pin

Settling Time for Multichannel Measurements

Accuracy, full scale step, all ranges

- ±90 ppm of step (±6 LSB)4 µs convert interval
- ±30 ppm of step (±2 LSB)5 µs convert interval
- ±15 ppm of step (±1 LSB)7 µs convert interval

Typical Performance Graphs



Analog Output

Number of channels	
NI 6220/6224.....	0
NI 6221/6225.....	2
NI 6229.....	4
DAC resolution.....	16 bits
DNL.....	± 1 LSB
Monotonicity.....	16 bit guaranteed
Maximum update rate	
1 channel.....	833 kS/s
2 channels.....	740 kS/s per channel
3 channels.....	666 kS/s per channel
4 channels.....	625 kS/s per channel
Timing accuracy.....	50 ppm of sample rate
Timing resolution.....	50 ns
Output range.....	± 10 V
Output coupling.....	DC
Output impedance.....	0.2 Ω
Output current drive.....	± 5 mA
Overdrive protection.....	± 25 V
Overdrive current.....	10 mA
Power-on state.....	± 20 mV ¹
Power-off glitch.....	400 mV for 200 ms
Output FIFO size.....	8,191 samples shared among channels used
Data transfers	
PCI/PXI devices.....	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
USB devices.....	USB Signal Stream, programmed I/O

AO waveform modes:

- Non-periodic waveform
- Periodic waveform regeneration mode from onboard FIFO
- Periodic waveform regeneration from host buffer including dynamic update

Settling time, full scale step	
15 ppm (1 LSB).....	6 μ s
Slew rate.....	15 V/ μ s
Glitch energy	
Magnitude.....	100 mV
Duration.....	2.6 μ s

Calibration (AI and AO)

Recommended warm-up time.....	15 minutes
Calibration interval.....	1 year

¹ For all USB-6221/6229 Screw Terminal devices, when powered on, the analog output signal is not defined until after USB configuration is complete.

All Absolute Accuracy Table

Nominal Range		Residual Gain Error (ppm of Reading)	Gain Tempco (ppm/°C)	Reference Tempco	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	INL Error (ppm of Range)	Random Noise, σ (μ Vrms)	Absolute Accuracy at Full Scale ¹ (μ V)	Sensitivity ² (μ V)
Positive Full Scale	Negative Full Scale									
10	-10	75	25	5	20	57	76	244	3,100	97.6
5	-5	85	25	5	20	60	76	122	1,620	48.8
1	-1	95	25	5	25	79	76	30	360	12.0
0.2	-0.2	135	25	5	80	175	76	13	112	5.2

Absolute Accuracy = Reading · (GainError) + Range · (OffsetError) + Noise Uncertainty

GainError = ResidualAI/GainError + GainTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + ReferenceTempco · (TempChangeFromLastExternalCal)

OffsetError = ResidualAI/OffsetError + OffsetTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + INL_Error

NoiseUncertainty = $\frac{\text{RandomNoise} \cdot 3}{\sqrt{100}}$ For a coverage factor of 3 σ and averaging 100 points.

¹ Absolute accuracy at full scale on the analog input channels is determined using the following assumptions:

TempChangeFromLastExternalCal = 10 °C

TempChangeFromLastInternalCal = 1 °C

number_of_readings = 100

CoverageFactor = 3 σ

For example, on the 10 V range, the absolute accuracy at full scale is as follows:

GainError = 75 ppm + 25 ppm · 1 + 5 ppm · 10

OffsetError = 20 ppm + 57 ppm · 1 + 76 ppm

NoiseUncertainty = $\frac{244 \mu\text{V} \cdot 3}{\sqrt{100}}$ NoiseUncertainty = 73 μ V

AbsoluteAccuracy = 10 V · (GainError) + 10 V · (OffsetError) + NoiseUncertainty AbsoluteAccuracy = 3,100 μ V

² Sensitivity is the smallest voltage change that can be detected. It is a function of noise.

Accuracies listed are valid for up to one year from the device external calibration.

A0 Absolute Accuracy Table

Nominal Range		Residual Gain Error (ppm of Reading)	Gain Tempco (ppm/°C)	Reference Tempco	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	INL Error (ppm of Range)	Absolute Accuracy at Full Scale ¹ (µV)
Positive Full Scale	Negative Full Scale							
10	-10	90	10	5	40	5	128	3,230

¹ Absolute Accuracy at full scale numbers is valid immediately following internal calibration and assumes the device is operating within 10 °C of the last external calibration. Accuracies listed are valid for up to one year from the device external calibration.

Absolute Accuracy = Output Value · (GainError) + Range · (OffsetError)
 GainError = Residual Gain Error + GainTempco · (TempChangeFromLast InternalCal) + ReferenceTempco · (TempChangeFromLastExternalCal)
 Offset Error = ResidualOffsetError + AOffsetTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + INL_Error

Digital I/O/PFI

Static Characteristics

Number of channels	
NI 6220/6221 (68-pin)/6225	24 total 8 (P0.<0..7>) 16 (PFI <0..7>/P1, PFI <8..15>/P2)
PCI-6221 (37-pin).....	10 total 2 (P0.<0, 1>) 8 (PFI <0..7>/P1)
NI 6224/6229	48 total 32 (P0.<0..31>) 16 (PFI <0..7>/P1, PFI <8..15>/P2)
Ground reference.....	D GND
Direction control.....	Each terminal individually programmable as input or output
Pull-down resistor.....	50 k Ω typical, 20 k Ω minimum
Input voltage protection ¹	± 20 V on up to two pins

Waveform Characteristics (Port 0 Only)

Terminals used	
NI 6220/6221 (68-pin)/6225	Port 0 (P0.<0..7>)
PCI-6221 (37-pin).....	Port 0 (P0.<0, 1>)
NI 6224/6229	Port 0 (P0.<0..31>)
Port/sample size	
NI 6220/6221 (68-pin)/6225	Up to 8 bits
PCI-6221 (37-pin).....	Up to 2 bits
NI 6224/6229	Up to 32 bits
Waveform generation (DO) FIFO	2,047 samples
Waveform acquisition (DI) FIFO	2,047 samples
DO or DI Sample Clock frequency ²	
	0 to 1 MHz

Data transfers	
PCIPXI devices	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
USB devices	USB Signal Stream, programmed I/O
DO or DI Sample Clock source ³	Any PFI, RTSI, AI Sample or Convert Clock, AO Sample Clock, Ctr <i>n</i> Internal Output, and many other signals

PFI/Port 1/Port 2 Functionality⁴

Functionality	Static digital input, static digital output, timing input, timing output
Timing output sources	Many AI, AO, counter, DI, DO timing signals
Debounce filter settings	125 ns, 6.425 μ s, 2.56 ms, disable; high and low transitions; selectable per input

¹ Stresses beyond those listed under *Input voltage protection* may cause permanent damage to the device.

² Performance can be dependent on bus latency and volume of bus activity.

³ The digital subsystem does not have its own dedicated internal timing engine. Therefore, a sample clock must be provided from another subsystem on the device or an external source.

⁴ Port 2 is not available on PCI-6221 (37-pin) devices.

Recommended Operation Conditions

PCI/PXI devices

Level	Min	Max
Input high voltage (V_{IH})	2.2 V	5.25 V
Input low voltage (V_{IL})	0 V	0.8 V
Output high current (I_{OH})		
P0.<0..31>	—	-24 mA
PFI <0..15>/P1/P2	—	-16 mA
Output low current (I_{OL})		
P0.<0..31>	—	24 mA
PFI <0..15>/P1/P2	—	16 mA

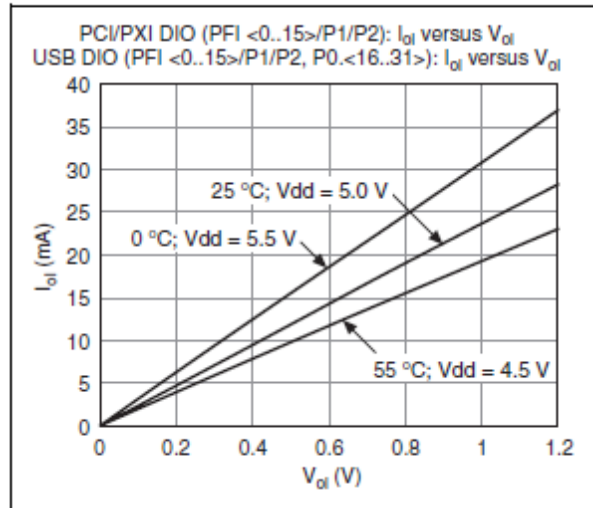
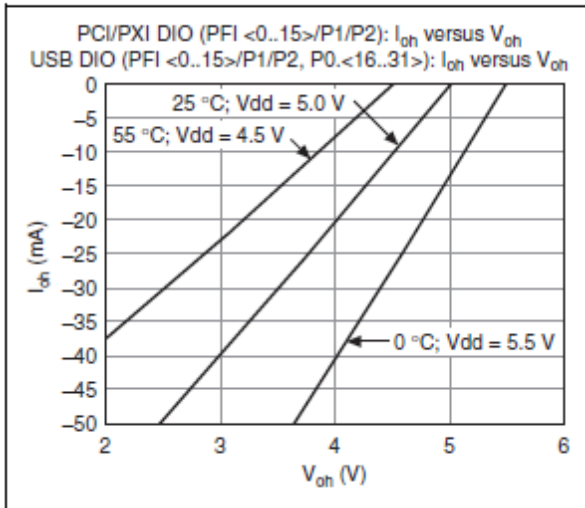
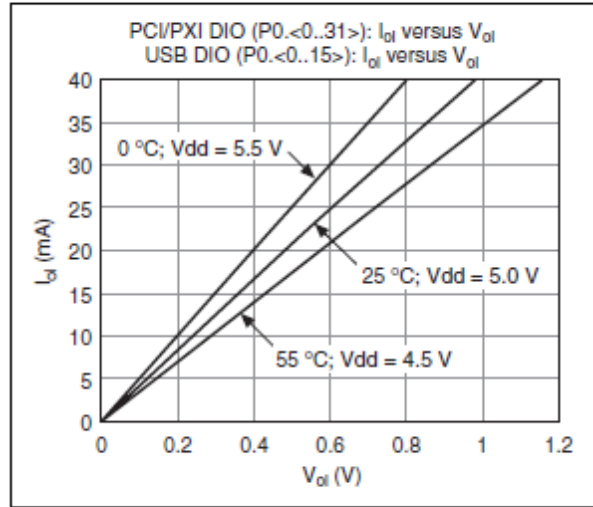
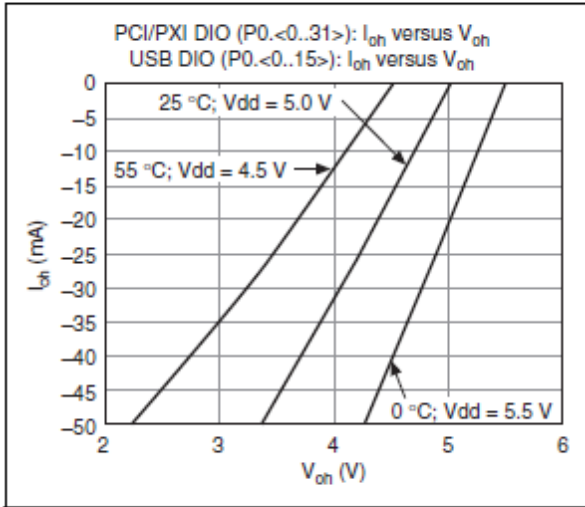
USB devices

Level	Min	Max
Input high voltage (V_{IH})	2.2 V	5.25 V
Input low voltage (V_{IL})	0 V	0.8 V
Output high current (I_{OH})		
P0.<0..15>	—	-24 mA
P0.<16..31>	—	-16 mA
PFI <0..15>/P1/P2	—	-16 mA
Output low current (I_{OL})		
P0.<0..15>	—	24 mA
P0.<16..31>	—	16 mA
PFI <0..15>/P1/P2	—	16 mA

Electrical Characteristics

Level	Min	Max
Positive-going threshold (V_{T+})	—	2.2 V
Negative-going threshold (V_{T-})	0.8 V	—
Delta VT hysteresis ($V_{T+} - V_{T-}$)	0.2 V	—
I_{IL} input low current ($V_{in} = 0$ V)	—	-10 μ A
I_{IH} input high current ($V_{in} = 5$ V)	—	250 μ A

Digital I/O Characteristics



General-Purpose Counter/Timers

Number of counter/timers	2
Resolution	32 bits
Counter measurements	Edge counting, pulse, semi-period, period, two-edge separation
Position measurements	X1, X2, X4 quadrature encoding with Channel Z reloading; two-pulse encoding
Output applications	Pulse, pulse train with dynamic updates, frequency division, equivalent time sampling
Internal base clocks	80 MHz, 20 MHz, 0.1 MHz
External base clock frequency	0 MHz to 20 MHz
Base clock accuracy	50 ppm
Inputs	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down
Routing options for inputs	Any PFI, RTSI, PXI_TRIG, PXI_STAR, analog trigger, many internal signals
FIFO	2 samples
Data transfers	
PCI/PXI devices	Dedicated scatter-gather DMA controller for each counter/timer; interrupts; programmed I/O
USB devices	USB Signal Stream, programmed I/O

Frequency Generator

Number of channels	1
Base clocks	10 MHz, 100 kHz
Divisors	1 to 16
Base clock accuracy	50 ppm
Output can be available on any PFI or RTSI terminal.	

Phase-Locked Loop (PLL)

Number of PLLs	1
Reference signal	PXI_STAR, PXI_CLK10, RTSI <0..7>
Output of PLL	80 MHz Timebase; other signals derived from 80 MHz Timebase including 20 MHz and 100 kHz Timebases

External Digital Triggers

Source	Any PFI, RTSI, PXI_TRIG, PXI_STAR
Polarity	Software-selectable for most signals
Analog input function	Start Trigger, Reference Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Convert Clock, Sample Clock Timebase
Analog output function	Start Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Sample Clock Timebase
Counter/timer functions	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down,
Digital waveform generation (DO) function	Sample Clock
Digital waveform acquisition (DI) function	Sample Clock

Device-To-Device Trigger Bus

PCI devices	RTSI <0..7> ¹
PXI devices	PXI_TRIG <0..7>, PXI_STAR
USB devices	None
Output selections	10 MHz Clock; frequency generator output; many internal signals
Debounce filter settings	125 ns, 6.425 μs, 2.56 ms, disabled; high and low transitions; selectable per input

Bus Interface

PCI/PXI devices	3.3 V or 5 V signal environment
USB devices	USB 2.0 Hi-Speed or full-speed ²
DMA channels (PCI/PXI devices)	6, analog input, analog output, digital input, digital output, counter/timer 0, counter/timer 1
USB Signal Stream (USB devices)	4, can be used for analog input, analog output, digital input, digital output, counter/timer 0, counter/timer 1

All PXI-622x devices support one of the following features:

- May be installed in PXI Express hybrid slots
- Or, may be used to control SCXI in PXI/SCXI combo chassis

Table 1. PXI/SCXI Combo and PXI Express Chassis Compatibility

M Series Device	M Series Part Number	SCXI Control in PXI/SCXI Combo Chassis	PXI Express Hybrid Slot Compatible
PXI-6220	191332B-04	No	Yes
PXI-6221	191332B-03	No	Yes
	191332B-13	Yes	No
PXI-6224	191332B-02	No	Yes
PXI-6225	192227A-01	No	Yes
PXI-6229	191332B-01	No	Yes
	191332B-11	Yes	No
Earlier versions of PXI-6220/6221/6224/6229	191332A-0x	Yes	No

Power Requirements

Current draw from bus during no-load condition³

+5 V	0.02 A ⁴
+3.3 V	0.25 A ⁴
+12 V	0.15 A

Current draw from bus during AI and AO overvoltage condition³

+5 V	0.02 A ⁴
+3.3 V	0.25 A ⁴
+12 V	0.25 A



Caution USB-622x devices must be powered with NI offered AC adapter or a National Electric Code (NEC) Class 2 DC source that meets the power requirements for the device and has appropriate safety certification marks for country of use.

¹ In other sections of this document, *RTSI* refers to *RTSI <0..7>* for PCI devices or *PXI_TRIG <0..7>* for PXI devices.

² If you are using a USB M Series device in full-speed mode, device performance will be lower and you will not be able to achieve maximum sampling/update rates.

³ Does not include P0/PFI/P1/P2 and +5 V terminals.

⁴ PXI-6221 (37-pin) devices do not use +3.3 V from the bus. The 3.3 V current draw, shown in the *Power Requirements* section, comes from the +5 V instead.

USB power supply requirements 11 to 30 VDC, 20 W, locking or non-locking power jack with 0.080" diameter center pin, 5/16–32 thread for locking collars

Power Limits



Caution Exceeding the power limits may cause unpredictable behavior by the device and/or PC/chassis.

PCI devices

+5 V terminal (connector 0) 1 A max¹
 +5 V terminal (connector 1) 1 A max¹

PXI devices

+5 V terminal (connector 0) 1 A max¹
 +5 V terminal (connector 1) 1 A max¹
 P0/PFI/P1/P2 and +5 V terminals combined 2 A max

USB devices

+5 V terminal 1 A max¹
 P0/PFI/P1/P2 and +5 V terminals combined 2 A max
 Power supply fuse 2 A, 250 V

Physical Requirements

Printed circuit board dimensions

PCI-6220/6221/6224/
 6225/6229 9.7 cm × 15.5 cm
 (3.8 in. × 6.1 in.)
 PXI-6220/6221/6224/
 6225/6229 Standard 3U PXI

Enclosure dimensions (includes connectors)

USB-6221/6225/6229
 Screw Terminal 26.67 × 17.09 × 4.45 cm
 (10.5 × 6.73 × 1.75 in.)
 USB-6221/6229 BNC 28.6 × 17 × 6.9 cm
 (11.25 × 6.7 × 2.7 in.)
 USB-6225 Mass Termination 18.8 × 17.09 × 4.45 cm
 (7.4 × 6.73 × 1.75 in.)
 USB-6221/6225/6229 OEM Refer to the
*NI USB-622x/625x OEM
 User Guide*

Weight

PCI-6220 91 g (3.2 oz)
 PCI-6221 (68-pin) 92 g (3.2 oz)
 PCI-6221 (37-pin) 95 g (3.3 oz)
 PCI-6224 99 g (3.5 oz)
 PCI-6225 103 g (3.6 oz)
 PCI-6229 101 g (3.5 oz)
 PXI-6220 158 g (5.5 oz)
 PXI-6221 162 g (5.7 oz)
 PXI-6224 170 g (5.9 oz)
 PXI-6225 174 g (6.1 oz)
 PXI-6229 171 g (6.0 oz)
 USB-6221 Screw Terminal 1.2 kg (2 lb 10 oz)
 USB-6225/6229
 Screw Terminal 1.24 kg (2 lb 11 oz)
 USB-6225 Mass Termination 907 g (2 lb)
 USB-6221 OEM 131 g (4.6 oz)
 USB-6225/6229 OEM 162 g (5.7 oz)

I/O connector

PCI/PXI-6220/6221 (68-pin) 1 68-pin VHDCI
 PCI/PXI-6224/6225/6229 2 68-pin VHDCI
 PCI-6221 (37-pin) 1 37-pin D-SUB
 USB-6221 Screw Terminal 64 screw terminals
 USB-6225/6229
 Screw Terminal 128 screw terminals
 USB-6221 BNC 20 BNCs and
 30 screw terminals
 USB-6229 BNC 30 BNCs and
 60 screw terminals
 USB-6225 Mass Termination 2 68-pin SCSI

USB-6221/6225/6229 Screw Terminal/USB-6221/6229 BNC screw terminal wiring 16–28 AWG

Maximum Working Voltage²

NI 6220/6221/6224/6225/6229
 Channel to earth 11 V,
 Measurement Category I



Caution Do *not* use for measurements within Categories II, III, or IV.

¹ Has a self-resetting fuse that opens when current exceeds this specification.

² *Maximum working voltage* refers to the signal voltage plus the common-mode voltage.

Environmental

Operating temperature	
PCI/PXI devices.....	0 to 55 °C
USB devices.....	0 to 45 °C
Storage temperature.....	-20 to 70 °C
Humidity.....	10 to 90% RH, noncondensing
Maximum altitude	2,000 m
Pollution Degree (indoor use only)	2

Shock and Vibration (PXI Devices Only)

Operational shock.....	.30 g peak, half-sine, 11 ms pulse (Tested in accordance with IEC-60068-2-27. Test profile developed in accordance with MIL-PRF-28800F.)
Random vibration	
Operating5 to 500 Hz, 0.3 g _{rms}
Nonoperating5 to 500 Hz, 2.4 g _{rms} (Tested in accordance with IEC-60068-2-64. Nonoperating test profile exceeds the requirements of MIL-PRF-28800F, Class 3.)

Safety

This product is designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1



Note For UL and other safety certifications, refer to the product label or visit ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Electromagnetic Compatibility

This product is designed to meet the requirements of the following standards of EMC for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326 EMC requirements; Minimum Immunity
- EN 55011 Emissions; Group 1, Class A
- CE, C-Tick, ICES, and FCC Part 15 Emissions; Class A



Note For EMC compliance, operate this device with shielded cables.

CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as amended for CE marking, as follows:

- 73/23/EEC; Low-Voltage Directive (safety)
- 89/336/EEC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)



Note Refer to the Declaration of Conformity (DoC) for this product for any additional regulatory compliance information. To obtain the DoC for this product, visit ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Environmental Management

National Instruments is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial not only to the environment but also to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *NI and the Environment* Web page at ni.com/environment. This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as any other environmental information not included in this document.

Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)



EU Customers At the end of their life cycle, all products *must* be sent to a WEEE recycling center. For more information about WEEE recycling centers and National Instruments WEEE initiatives, visit ni.com/environment/weee.htm.

电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



中国客户 National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息, 请登录 ni.com/environment/rohs_china。(For information about China RoHS compliance, go to ni.com/environment/rohs_china.)

ANEXO B: Pololu ACS714

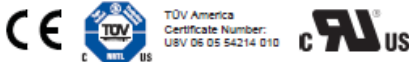


ACS714

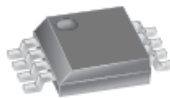
Automotive Grade, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

Features and Benefits

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the FILTER pin
- 5 μ s output rise time in response to step input current
- 80 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% typical, at $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 m Ω internal conductor resistance
- 2.1 kVRMS minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage
- Operating temperature range, -40°C to 150°C



Package: 8 pin SOIC (suffix LC)



Approximate Scale 1:1

Description

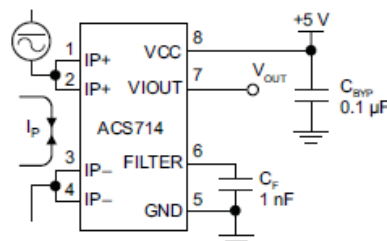
The Allegro® ACS714 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in automotive systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switch-mode power supplies, and overcurrent fault protection.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which the Hall IC converts into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

The output of the device has a positive slope ($\Rightarrow V_{IOUT(Q)}$) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sampling. The internal resistance of this conductive path is 1.2 m Ω typical, providing low power loss. The thickness of the copper conductor allows survival of the device at up to 5 \times overcurrent conditions. The terminals of

Continued on the next page...

Typical Application



Application 1. The ACS714 outputs an analog signal, V_{OUT} , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sampled current, I_p , within the range specified. C_F is recommended for noise management, with values that depend on the application.

ACS714

Automotive Grade, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

Description (continued)

the conductive path are electrically isolated from the signal leads (pins 5 through 8). This allows the ACS714 to be used in applications requiring electrical isolation without the use of opto-isolators or other costly isolation techniques.

The ACS714 is provided in a small, surface mount SOIC8 package.

The leadframe is plated with 100% matte tin, which is compatible with standard lead (Pb) free printed circuit board assembly processes. Internally, the device is Pb-free, except for flip-chip high-temperature Pb-based solder balls, currently exempt from RoHS. The device is fully calibrated prior to shipment from the factory.

Selection Guide

Part Number	Optimized Range, I_p (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)	T_A (°C)	Packing*
ACS714ELCTR-05B-T	±5	185	-40 to 85	Tape and reel, 3000 pieces/reel
ACS714ELCTR-20A-T	±20	100		
ACS714ELCTR-30A-T	±30	66		
ACS714LLCTR-05B-T	±5	185	-40 to 150	
ACS714LLCTR-20A-T	±20	100		
ACS714LLCTR-30A-T	±30	66		

*Contact Allegro for additional packing options.

Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Supply Voltage	V_{CC}		8	V
Reverse Supply Voltage	V_{RCC}		-0.1	V
Output Voltage	V_{IOUT}		8	V
Reverse Output Voltage	V_{RIOUT}		-0.1	V
Reinforced Isolation Voltage	V_{ISO}	Pins 1-4 and 5-8; 60 Hz, 1 minute, $T_A=25^\circ\text{C}$	2100	VAC
		Maximum working voltage according to UL60950-1	184	V_{peak}
Basic Isolation Voltage	$V_{ISO(BSC)}$	Pins 1-4 and 5-8; 60 Hz, 1 minute, $T_A=25^\circ\text{C}$	1500	VAC
		Maximum working voltage according to UL60950-1	354	V_{peak}
Output Current Source	$I_{IOUT(SOURCE)}$		3	mA
Output Current Sink	$I_{IOUT(SINK)}$		10	mA
Overcurrent Transient Tolerance	I_p	1 pulse, 100 ms	100	A
Nominal Operating Ambient Temperature	T_A	Range E	-40 to 85	°C
		Range L	-40 to 150	°C
Maximum Junction Temperature	$T_{J(max)}$		165	°C
Storage Temperature	T_{stg}		-65 to 170	°C



TÜV America
Certificate Number:
U8V 08 05 54214 010

Parameter	Specification
Fire and Electric Shock	CAN/CSA-C22.2 No. 60950-1-03 UL 60950-1:2003 EN 60950-1:2001



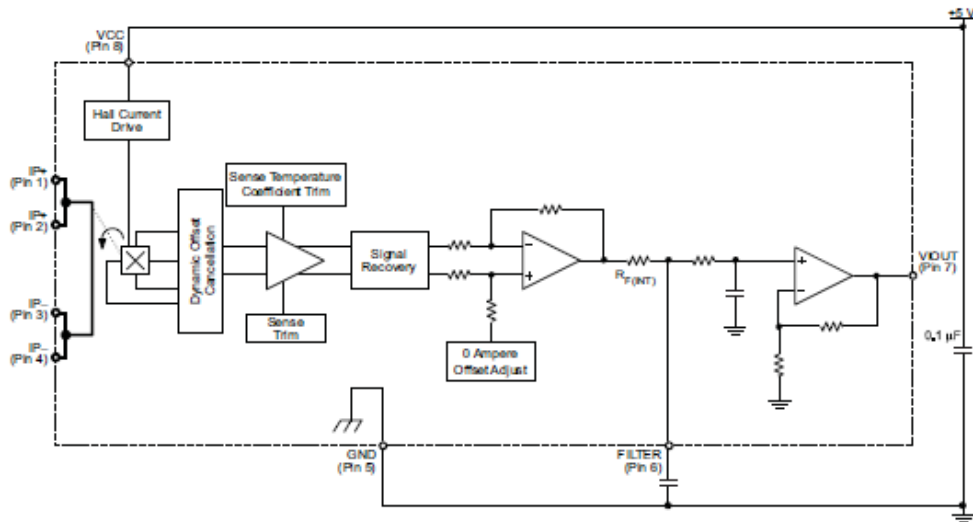
Allegro MicroSystems, Inc.
115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000
www.allegromicro.com

2

ACS714

Automotive Grade, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

Functional Block Diagram



Pin-out Diagram



Terminal List Table

Number	Name	Description
1 and 2	IP+	Terminals for current being sampled; fused internally
3 and 4	IP-	Terminals for current being sampled; fused internally
5	GND	Signal ground terminal
6	FILTER	Terminal for external capacitor that sets bandwidth
7	VIOUT	Analog output signal
8	VCC	Device power supply terminal



Allegro MicroSystems, Inc.
115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000
www.allegromicro.com

ANEXO C: Nagase Chemtex® XN1244



TECHNICAL INFORMATION SHEET

For Industry

One-component Epoxy Adhesive

EPOXY RESIN XN1244

= Description =

- Curable at 85°C.
- Good adhesion to metals, ceramics and plastics .
- Good high temperature and thermal adhesive strength .
- Long shelf life.

010.601

The information given in this publication is based on the present state of our knowledge but any conclusion and recommendations are made without liability on our part.
Buyers and users should make their own assessment of our products under their own conditions and for their own requirements.

Nagase Chemtex Corporation

Harima Plant **ISO 9001 REGISTERED**
236, TATSUNOCHO-NAKAI
TATSUNO, HYOGO, 679-4124, JAPAN
TEL : ++81-791-63-2361
FAX : ++81-791-63-2302
URL <http://www.nagasechemtex.co.jp/>

NAGASE & CO., LTD.

TOKYO OFFICE
5-1, NIHONBASHI-KOBUNACHO
CHUO-KU, TOKYO 103-8355, JAPAN
TEL : ++81-3-3665-3828,3300
OSAKA OFFICE
1-1-17 SHINMACHI NISHI-KU OSAKA-SHI
OSAKA 550-8668 JAPAN
TEL : ++81-6-6535-2435,2407

XN1244

Properties before Curing

Aspect	Black Paste
Viscosity	95,000 mPa · s at 25 °C
Flash point	> 200°C (Cleveland open cup)
Density	1.42
Gellation time	40 sec. at 150 °C

Cure condition

30 min. at 120°C

Cured Properties

Lap shear strength	24 N/mm ² at 25°C	Mild steel(t=1.6mm), overlap:10mm
T-Peel strength	49 N/25mm	Mild steel(t=0.4mm)
Tg	144°C	Cure : 60min at 120°C

Lap shear strength after aging at elevated temperature

		Cure : 30min/120°C
8 days/180°C	25 N/mm ² at 25°C	
30 days/150°C	24 N/mm ² at 25°C	

ANEXO D: Huntsman® Araldite® 2011

HUNTSMAN

Enriching lives through innovation

Advanced Materials**Araldite® 2011-A/B**

MULTI-PURPOSE EPOXY ADHESIVE

DESCRIPTION :	Araldite® 2011-A/B epoxy adhesive is a multi-purpose, viscous material that is suitable for bonding a variety of materials, including metal, ceramic, and wood. The electrically insulating adhesive is easy to apply either manually by spatula and stiff brush or mechanically with meter/mix and coating equipment. Araldite® 2011-A/B epoxy adhesive cures at temperatures from 68°F (20°C) to 356°F (180°C) with no release of volatile constituents. It qualifies to ABR 2-1079 and DAN 1284-01.			
APPLICATIONS :	<ul style="list-style-type: none"> • Metal • Ceramics • Wood • Vulcanized Rubber • Foams • Plastics 			
ADVANTAGES :	<ul style="list-style-type: none"> • Long open time • High shear and peel strength • Easy to apply • Good resistance to static and dynamic loads • Electrically insulating 			
TYPICAL PROPERTIES :	<u>Property</u>	<u>Test Method</u>	<u>Test Values⁽¹⁾</u>	
	Color/appearance	Visual	<u>Resin</u> Creamy, viscous/liquid	<u>Hardener</u> Amber Liquid
	Specific Gravity	ASTM D-792	1.17	0.92
	Viscosity (cP) @ 77°F (25°C)	ASTM D-2393	50,000	35,000
TYPICAL MIXED PROPERTIES :	<u>Property</u>	<u>Test Method</u>	<u>Test Values⁽¹⁾</u>	
	Reaction Ratio (by weight)		100R/80H	
	Reaction Ratio (by volume)		100R/100H	
	Pot Life, hours @ 77°F (25°C) (4.fl. oz. mass)	ASTM D-2471	2	
	Mixed viscosity (cP) @ 77°F (25°C)	ASTM D-2393	45,000	

¹Tested @ 77°F (25°C)



RECOMMENDED CURE SCHEDULES:	<u>Temperature</u>	<u>Handling Strength</u>	<u>Minimum Cure Time</u>
	68°F (20°C)	12 hours	15 hours
	77°F (25°C)	7 hours	12 hours
	104°F (40°C)	2 hours	3 hours
	158°F (70°C)	30 minutes	50 minutes
	212°F (100°C)	6 minutes	10 minutes
	302°F (150°C)	4 minutes	5 minutes

**TYPICAL CURED
PROPERTIES :**

Application of Adhesive

The resin/hardener mix is applied with a spatula to the pretreated and dry joint surfaces.

A layer of adhesive 0.002 to 0.004-inches (0.05 to 0.10-mm) thick will normally impart the greatest lap shear strength to a joint.

The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. Even contact throughout suffices to ensure proper cure.

Standard Test Specimens

Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made up by lap-jointing 4-inch x 1-inch x 0.06-inch (10-cm x 2.5-cm x 1.5-mm) strips of aluminum. The joint area was 0.5 x 1 inch (12.5 mm x 2.5 cm) in each case.

<u>Property</u>	<u>Test Method</u>	<u>Test Values⁽¹⁾</u>
Lap Shear Strength, psi (MPa)	ASTM D-1002	
<i>Effects of cure time and temperature</i>		
<u>Cure Temperature</u>	<u>Time</u>	
77°F (25°C)	8 hours	710 (4.9)
	15 hours	1990 (13.7)
	24 hours	2130 (14.7)
	72 hours	2280 (15.7)
	5 days	2560 (17.6)
158°F (70°C)	1 hour	3130 (21.5)
	2 hours	3410 (23.5)
	3 hours	3200 (22)
212°F (100°C)	10 minutes	3700 (25.5)
	20 minutes	3980 (27.4)
	30 minutes	4120 (28.4)
302°F (150°C)	5 minutes	4270 (29.4)
	10 minutes	4410 (30.4)
	20 minutes	4410 (30.4)



Enriching lives through innovation

Property
Lap Shear Strength, psi (MPa)
Effect of Test Temperature
 (Load applied 10 minutes after specimens reach test temperature.)

Test Method
 ASTM D-1002

<u>Cure Cycle</u>	<u>Test Temp.</u>	
5 days @ 77°F (25°C)	-76°F (-60°C)	2840 (19.5)
	-4°F (-20°C)	2840 (19.5)
	68°F (20°C)	2560 (17.6)
	104°F (40°C)	1420 (9.8)
	140°F (60°C)	570 (3.9)
20 min @ 212°F (100°C)	-76°F (-60°C)	3560 (24.5)
	-46°F (-20°C)	3410 (23.5)
	68°F (20°C)	3980 (27.4)
	104°F (40°C)	1990 (13.7)
	140°F (60°C)	1000 (6.9)

[†]Tested @ 77°F (25°C)

Property
Lap Shear Strength, psi (MPa)
Effect of Immersion
 (Cure cycle 16 hours @ 104°F (40°C). Immersion for 90 days in media listed.)

<u>Media</u>	<u>Test Values⁽¹⁾</u>
Standard - As prepared	2560 (17.6)
Acetone (30 days)	570 (3.9)
Acetylene	430 (2.9)
Gasoline	2410 (16.6)
Ethyl Acetate (30 days)	570 (3.9)
Acetic Acid 10%	Degraded
Methanol	Degraded
Lubricating Oil - HD30	2560 (17.6)
Kerosene	Degraded
Trichloroethylene	Degraded
Water @ 68°F (20°C)	1420 (9.8)
Water @ 194°F (90°C)	430 (2.9)

Lap Shear Strength, psi (MPa)
Effect of Tropical Exposure
 (104° (40°C)/92% R.H.)

<u>Cure Cycle</u>	<u>Exposure Time</u>	<u>Test Values⁽¹⁾</u>
16 hrs @ 104°F (40°C)	0 days	2560 (17.6)
	10 days	2560 (17.6)
	30 days	1710 (11.8)
	60 days	1560 (10.7)
	90 days	570 (3.9)
	90 days	570 (3.9)
20 min @ 212°F (100°C)	0 days	3980 (27.4)
	10 days	2560 (17.6)
	30 days	1710 (11.8)
	60 days	1560 (10.7)
	90 days	1280 (8.8)
	90 days	1280 (8.8)

[†]Tested @ 77°F (25°C)



Lap Shear Strength, psi (MPa)
Effect of Heat Aging
 (Cured 16 hours @ 104°F (40°C)).

Test Method
 ASTM D-1002

<u>Aging Temperature</u>	<u>Exposure Time</u>	<u>Test Values⁽¹⁾</u>
68°F (20°C)	0 days	2560 (17.6)
	1 years	2560 (17.6)
	2 years	2280 (15.7)
	3 years	1710 (11.8)
	4 years	1990 (13.7)
	5 year	1990 (13.7)
140°F (60°C)	3 days	2560 (17.6)
	10 days	2420 (16.6)
	30 days	2130 (14.7)
176°F (80°C)	3 days	2130 (14.7)
	10 days	2130 (14.7)
	30 days	2130 (14.7)
	60 days	2130 (14.7)
	1 year	1280 (8.8)
	2 years	710 (4.9)
	3 years	710 (4.9)
	4 years	430 (2.9)
	5 years	280 (1.9)
248°F (120°C)	3 days	2130 (14.7)
	10 days	2280 (15.7)
	30 days	2280 (15.7)
	60 days	2130 (14.7)

Property
Lap Shear Strength (psi)
Tested on Metal Substrates
 (Cured 20 min @ 212°F (100°C))

<u>Metal</u>	<u>Substrate Thickness</u> <u>(in./mm)</u>	<u>Test Values⁽¹⁾</u>
Carbon Steel	0.039/1.0	3840 (26.4)
Stainless Steel	0.039/1.0	3270 (22.5)
Galvanized Steel ²	0.06/1.5	1990 (13.7)
Copper	0.06/ 1.5	3270 (22.5)
Brass	0.06/ 1.5	2990 (20.6)

¹Tested @ 77°F (25°C)

²Surface degreased only, not roughened.

Property
Fatigue Strength (psi)
 Tested using a load frequency of 90 Hz and a 1 inch (25 mm) joint overlap
 (Cured 20 min @ 212°F (100°C))



Enriching lives through innovation

<u>Fatigue Limit Load % Static Shear Strength</u>	<u>Cycles to Failure⁽¹⁾</u>
50	10 ³ -10 ⁴
40	10 ⁴ -10 ⁵
30	10 ⁵ -10 ⁶
25	10 ⁵ -10 ⁶
20	10 ⁶ -10 ⁷
15	10 ⁷

<u>Property</u>	<u>Test Method</u>	<u>Test Values⁽¹⁾</u>
Ultimate Tensile Strength (psi)	ASTM D-638	4800 (33)
Elongation (%)	ASTM D-638	9
Tg per DMA, °F (°C)	ASTM D-4065	146 (63)
Hardness (Shore D)	ASTM D-2240	80
Coefficient of Thermal Expansion (in/in/°C)	ASTM E-831	8.5 X 10 ⁻⁵
Roller Peel Test, pli (N/mm)	ISO 4578	28 (4.9)

¹Tested @ 77°F (25°C)

**STORAGE/
SHELF LIFE :** Epoxy resins and hardeners should be stored in a dry place in their original, sealed containers at temperatures from 60-100°F (16-38°C). Material temperatures should be above 65°F (18°C) when mixing. After use, tightly reseal containers.

Under these conditions, epoxy resins and hardeners will remain useable for 12 months from date of shipping from Huntsman.

CAUTION :

Huntsman Advanced Materials Americas Inc. maintains up-to-date Material Safety Data Sheets (MSDS) on all of its products. These sheets contain pertinent information that you may need to protect your employees and customers against any known health or safety hazards associated with our products. Users should review the latest MSDS to determine possible health hazards and appropriate precautions to implement prior to using this material. Copies of the latest MSDS may be requested by calling our customer service group at 800-367-8793 or emailing your request to adhesives_group@huntsman.com.

FIRST AID !

Eyes and skin: Flush eyes with water for 15 minutes. Contact a physician if irritation persists. Wash skin thoroughly with soap and water. Remove and wash contaminated clothing before reuse.

Inhalation: Remove subject to fresh air.

Swallowing: Dilute by giving water to drink and contact a physician promptly. Never give anything to drink to an unconscious person.

KEEP OUT OF REACH OF CHILDREN

FOR PROFESSIONAL AND INDUSTRIAL USE ONLY



IMPORTANT LEGAL NOTICE

Sales of the product described herein ("Product") are subject to the general terms and conditions of sale of either Huntsman Advanced Materials LLC, or its appropriate affiliate including without limitation Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., or Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd. ("Huntsman"). The following supercedes Buyer's documents.

Huntsman warrants that at the time and place of delivery all Products sold to Buyer shall conform to the specifications provided to Buyer by Huntsman.

While the information and recommendations included in this publication are, to the best of Huntsman's knowledge, accurate as of the date of publication, NOTHING CONTAINED HEREIN (EXCEPT AS SET FORTH ABOVE REGARDING CONFORMANCE WITH SPECIFICATIONS PROVIDED TO BUYER BY HUNTSMAN) IS TO BE CONSTRUED AS A REPRESENTATION OR WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NONINFRINGEMENT OF ANY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS, OR WARRANTIES AS TO QUALITY OR CORRESPONDENCE WITH PRIOR DESCRIPTION OR SAMPLE, AND THE BUYER ASSUMES ALL RISK AND LIABILITY WHATSOEVER RESULTING FROM THE USE OF SUCH PRODUCT, WHETHER USED SINGLY OR IN COMBINATION WITH OTHER SUBSTANCES.

No statements or recommendations made herein are to be construed as a representation about the suitability of any Product for the particular application of Buyer or user or as an inducement to infringe any patent or other intellectual property right. Buyer is responsible to determine the applicability of such information and recommendations and the suitability of any Product for its own particular purpose, and to ensure that its intended use of the Product does not infringe any intellectual property rights.

The Product may be or become hazardous. The Buyer should obtain Material Safety Data Sheets and Technical Data Sheets from Huntsman containing detailed information on Product hazards and toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures for the Product, and should comply with all applicable governmental laws, regulations and standards relating to the handling, use, storage, distribution and disposal of, and exposure to the Product. Buyer shall also take all steps necessary to adequately inform, warn and familiarize its employees, agents, direct and indirect customers and contractors who may handle or be exposed to the Product of all hazards pertaining to and proper procedures for safe handling, use, storage, transportation and disposal of and exposure to the Product, and the containers or equipment in which the Product may be handled, shipped or stored.

Araldite is a registered trademark of Huntsman LLC or an affiliate thereof in one or more countries, but not all countries.

© 2006 Huntsman Advanced Materials Americas Inc.

Main Offices:
Huntsman Corporation
10003 Woodloch Forest Dr.
The Woodlands
Texas 77380
(281) 719-8000

Huntsman Advanced Technology Center
8800 Gosling Rd.
The Woodlands
Texas 77381
(281) 719-7400