

Caraterização de uma máquina de ensaios de resistência à torção de juntas adesivas

Rui Alberto Sousa Ponte

Dissertação de Mestrado

Orientador:

Prof. António Mendes Lopes

Coorientadores:

Inv. Carlos Moreira da Silva

Prof. Lucas F M da Silva



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Opção de Automação

Junho 2017

*Aos meus pais,
aos meus irmãos
e à minha sobrinha.*

Resumo

As juntas adesivas são cada vez mais utilizadas na indústria, pois oferecem várias vantagens que outros métodos de fixação tradicionais não têm. Há então a necessidade de caracterizar de uma forma completa o comportamento das juntas adesivas.

Um dos ensaios que permite determinar com exatidão as propriedades ao corte dos adesivos é o ensaio de torção de juntas topo a topo. Quando bem feito, este ensaio é livre de concentração de tensões, levando a resultados rigorosos.

Foi do interesse do Grupo de Adesivos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (ADFEUP) dispor de um equipamento que permitisse a realização de ensaios de torção, uma vez que os resultados e conhecimentos nesta área são muito escassos. Daí que o ADFEUP impulsionou o projeto e criação de uma máquina de ensaios de torção.

Atualmente a máquina de torção encontra-se no Laboratório de Adesivos da FEUP, e com intuito de realizar ensaios fiáveis é necessário caracterizar e implementar correções e melhorias na máquina. Dois dispositivos importantes nesta máquina são o transdutor de binário e *encoder*. Neste trabalho, foram feitas melhorias ao sinal do transdutor, pois o sinal medido era muito afetado por ruído.

Como o objetivo desta máquina passa por realizar 4 testes diferentes, foi necessário projetar e implementar controladores adequados.

Por fim, de modo a tornar um ambiente mais amigável ao utilizador, foi criada uma interface gráfica onde é possível especificar os parâmetros para cada ensaio e monitorizar em tempo-real os ensaios realizados. Os mesmos resultados podem ser guardados no final de cada ensaio, para um possível pós-processamento dos mesmos.

Characterization of a torsion test machine for adhesive joints

Abstract

Nowadays adhesive joints are widely used in industrial applications. They offer several advantages that other traditional fastening techniques do not have. Thus, it is necessary to do many different tests in order to characterize adhesive joints.

One of the tests that allow the precise determination of the adhesives shears properties is the torsion test. When it's done correctly, this test is free of stress concentrations, leading to precise results.

It was of the Adhesive Group of FEUP (ADFEUP) interest to have equipment that would allow torsion tests to be performed since the results and knowledge in this area are very scarce. Therefore, ADFEUP suggested the design of a torsion testing machine.

Currently, the torsion machine is in the Adhesive Laboratory, and in order to provide tests with good results, it is necessary to characterize and implement corrections and some improvements in the machine. Two important devices in this machine are the torque cell and the encoder. In this work, improvements were made in the torque cell, since the signal was affected by noise.

As the purpose of this machine is to perform 4 different tests, it was necessary to design and implement controllers.

Finally, in order to make the machine more user-friendly, a graphical user interface has been created where it is possible to specify the parameters for each test and to monitor the tests performed in real time. The same results can be saved at the end of each test for possible post-processing data.

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, Professor António Mendes Lopes, Engenheiro Carlos Moreira da Silva e Professor Lucas F. M. da Silva, por todo o apoio, tempo e dedicação que disponibilizaram no decorrer desta tese. Um muito obrigado pela partilha de conhecimentos e pela oportunidade de ter trabalhado convosco.

Quero agradecer a todos os membros do ADFEUP, pelo apoio e contribuição no decorrer deste trabalho. Um grupo fantástico com quem tive oportunidade de trabalhar e que tornaram esta caminhada muito mais fácil.

Um muito obrigado a todos os meus amigos que me acompanharam nestes últimos anos. Sem dúvida que tiveram um papel importantíssimo nestes anos da minha formação académica, mas especialmente na minha vida.

Finalmente quero agradecer à minha família, aos meus pais e aos meus irmãos, pelo sacrífico e apoio que me deram nestes anos da minha vida, pois apesar da distância, sempre me apoiaram incondicionalmente. Sem o vosso apoio, esta etapa teria sido impossível.

Índice de Conteúdos

Resumo	v
Abstract.....	vii
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação e contextualização	1
1.2 Objetivos do projeto.....	2
1.3 Metodologia	2
1.4 Estrutura da dissertação.....	2
2 Revisão bibliográfica	3
2.1 Ensaios para avaliar as propriedades ao corte dos adesivos	3
2.1.1 Junta de sobreposição simples.....	3
2.1.2 Thick Adherend Shear Test, TAST	4
2.1.3 Junta topo a topo em torção.....	5
2.2 Máquinas comerciais de ensaios de torção.....	8
2.3 Descrição da máquina de ensaios de torção desenvolvida na FEUP	13
3 Caracterização da máquina de ensaios de torção.....	17
3.1 Determinação da rigidez da máquina	17
3.2 Ruído no sinal do transdutor de binário	21
4 Testes e síntese dos controladores	25
4.1 Teste em controlo de deslocamento angular	26
4.2 Teste de relaxação	28
4.3 Teste em controlo de binário e de fluência.....	29
4.3.1 Determinação do tipo de controlador	29
4.3.2 Determinação dos ganhos dos controladores.....	36
5 Dispositivos para medir a deformação angular.....	45
5.1 Câmara de vídeo microscópica	45
5.2 Extensómetro axial/torsional	47
5.3 LVDT's	48

6	Comando e interface gráfica com o utilizador	49
7	Conclusões	53
7.1	Trabalhos futuros.....	54
8	Referências	55
	Anexos	57

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Junta de sobreposição simples. Na figura b) está representada a distribuição da tensão de corte no adesivo, quando solicitado num ensaio de tração. Adaptado (da Silva et al., 2007).....	4
Figura 2.2 - Provete TAST. Adaptado (da Silva et al., 2012).	4
Figura 2.3 - Na figura a), juntas de topo com cilindros tubulares e na figura b) substratos cilíndricos maciços. Adaptado (da Silva et al., 2012).	5
Figura 2.4 -Substratos cilíndricos tubulares. Adaptado (da Silva et al., 2012).	5
Figura 2.5 - Provete com substratos cilíndricos maciços. Adaptado (da Silva et al., 2012).	6
Figura 2.6 - Correção de Nadai aplicado ao gráfico “Binário vs. Rotação”. Adaptado (da Silva et al., 2012).	7
Figura 2.7 - Resultado do gráfico “Tensão de corte vs. Deformação de corte” com e sem correção de Nadai. Adaptado (da Silva et al., 2012).	7
Figura 2.8 - Máquina de ensaios de torção TorsionLine TL020 (Zwick/Roell, 2012).....	8
Figura 2.9 - Máquina de ensaios de torção eXpert 9612 (ADMET, 2013).	10
Figura 2.10 - Máquina de ensaios de torção eXpert 9618 (ADMET, 2013).	10
Figura 2.11 - Exemplo de uma máquina de ensaios de torção construída à medida do utilizador (ADMET, 2013).	11
Figura 2.12 - Máquina de ensaios de torção MT MicroTorsion (Instron, 2016).....	12
Figura 2.13 - Máquina de ensaios de torção. Estão numerados alguns dos componentes principais da máquina.	13
Figura 2.14 - Na imagem à esquerda, rolamento de esferas autocentrante FAG 2208. Na imagem à direita, acoplamento ARPEX RS-6 da Siemens®. Adaptado (Gonçalves, 2013).....	14
Figura 2.15 - Na imagem à esquerda, servomotor Parvex® NX 310EAPR7310. Na imagem à direita o redutor planetário Parvex® GE3N26R0401. Adaptado de (Costa, 2015).	15
Figura 2.16 - Na imagem à esquerda o transdutor de binário Lorenz® DF-30. Na imagem à direita o amplificador de sinal Lorenz® GM 40 (Lorenz, 2015, 2016).	16
Figura 3.1 - Pormenor do provete metálico usado inicialmente.....	18
Figura 3.2 - Acoplamento direto das buchas.	18

Figura 3.3 - Gráfico do binário em função da deformação da estrutura mecânica da máquina, para os primeiros ensaios.	19
Figura 3.4 - Gráfico do binário em função da deformação da estrutura mecânica da máquina, para os 3 últimos ensaios. É possível identificar uma “zona morta” entre -1° e 1°	20
Figura 3.5 - Uma amostra do sinal do transdutor, onde a azul está representado o sinal de entrada e a vermelho o sinal à saída do filtro.	21
Figura 3.6 - Digital Filter Design.....	22
Figura 3.7 - Variação do sinal do transdutor e análise do sinal filtrado	23
Figura 3.8 - Resposta em frequência do filtro “Butterworth” de 1ª ordem gerado, e as suas especificações. A resposta em magnitude está representada a azul, enquanto que a resposta em fase está representada a verde.	24
Figura 4.1 - Janela do software do driver do servomotor. Está representado o sistema em controlo de velocidade em malha fechada.	26
Figura 4.2 - Diagrama de blocos do Simulink® relativo ao comando do teste em controlo de deslocamento.....	27
Figura 4.3 - Diagrama de blocos relativo ao comando do teste em controlo de deslocamento.	28
Figura 4.4 - Diagrama de blocos relativo ao teste de relaxação. No caso representado, a velocidade do ensaio é de 0.3 rad/min e a posição pretendida é de 2°	28
Figura 4.5 - Na imagem da esquerda está representado o provete de PVC e na imagem da direita o provete com o adesivo 3M™ AF 163-2K.....	29
Figura 4.6 - Esquema de um sistema controlado em malha fechada.	30
Figura 4.7 - Diagrama de blocos em Simulnk® relativamente ao controlador de binário. Foi introduzido um “Manual Switch” para facilitar a troca do tipo de referência.	30
Figura 4.8 - Resposta a uma solicitação em degrau com ganho proporcional $K_p=1$ V/Nm com a utilização do provete em PVC.	31
Figura 4.9 - Erro da resposta ao degrau com ganho proporcional $K_p=1$ V/Nm para o provete em PVC.....	31
Figura 4.10 - Resposta de um sistema com um controlador proporcional com e sem ação integral. Adaptado (OMRON, 2016)	32

Figura 4.11 - Resposta a uma solicitação em degrau com ganho proporcional $K_p=1$ V/Nm com a utilização do provete em PVC.	32
Figura 4.12 - Resposta a uma solicitação em rampa de um sistema com ganho proporcional e de tipo 1. Adaptado (Ogata, 2010).	33
Figura 4.13 - Resposta a uma solicitação em rampa com ganho proporcional $K_p=1$ V/Nm com a utilização do provete em PVC.	33
Figura 4.14 - Erro da resposta à rampa com ganho proporcional $K_p=1$ V/Nm para o provete em PVC	34
Figura 4.15 - Comparação da resposta ao degrau com ganho proporcional unitário entre PVC e o adesivo 3M™ AF 163-2K.	34
Figura 4.16 - Comparação do erro da resposta ao degrau com ganho proporcional unitário entre PVC e o adesivo 3M™ AF 163-2K.	35
Figura 4.17 - Resposta a uma solicitação em rampa com ganho proporcional $K_p=0.5$ V/Nm com a utilização do adesivo 3M™ AF 163-2K.	35
Figura 4.18 - Erro da resposta à rampa com ganho proporcional $K_p=0.5$ V/Nm para o provete em 3M™ AF 163-2K.	36
Figura 4.19 - Controlador apenas com ganho proporcional. Adaptado (Ogata, 2010)	37
Figura 4.20 - Oscilação sustentada de período P_{cr} (Ogata, 2010).	37
Figura 4.21 - Obtenção de uma resposta do sinal de saída sustentada.	38
Figura 4.22 - Pormenor da oscilação sustentada.	39
Figura 4.23 - Resposta do sistema à rampa com o controlador PI, com os respetivos ganhos ajustados, para amostra de PVC.	40
Figura 4.24 - Erro entre a resposta do sistema e a referência em rampa com o controlador PI, com os respetivos ganhos ajustados, para amostra de PVC.	40
Figura 4.25 - Resposta do sistema à rampa com o controlador PI, com os respetivos ganhos ajustados, para o adesivo 3M™ AF 163-2K.	41
Figura 4.26 - Erro entre a resposta do sistema e a referência em rampa com o controlador PI, com os respetivos ganhos ajustados, para o adesivo 3M™ AF 163-2K.	41
Figura 4.27 - Resposta do sistema com a amostra de PVC à rampa com o controlador PI projetado para o adesivo 3M™ AF 163-2K,	42

Figura 4.28 - Erro da resposta da Figura 4.27.....	42
Figura 5.1 - Na imagem à esquerda está representada uma câmara de vídeo microscópica num ensaio TAST (da Silva et al., 2012). Na imagem à direita, novamente um ensaio TAST, mas com uma câmara de vídeo convencional.	46
Figura 5.2 - Na imagem da esquerda o provete com as duas fitas traçadas. Na imagem da direita, um esquema da utilização de uma câmara de vídeo na medição do deslocamento angular. ...	46
Figura 5.3 - Extensómetro axial/torsional, modelo 3550 (Tech, 2017).	47
Figura 5.4 - Pormenor da utilização do LVDT num provete de juntas topo a topo em torção (Thomas e Adams, 1996).	48
Figura 6.1 - Software Bluehill® da empresa Instron®	49
Figura 6.2 - Janela inicial da interface	50
Figura 6.3 - Painel onde o utilizador indica algumas constantes importantes para o teste	50
Figura 6.4 - Painel “Botão de radio” onde o utilizador escolhe o tipo de gráfico que quer visualizar.	51
Figura 6.5 - Painel de comando	51
Figura 6.6 - Janela de controlo do servomotor.....	52
Figura 6.7 - Janela da interface do teste em controlo de binário e fluência (“Torque Rate Control”)	52

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Caraterísticas do modelo TL 020 (Zwick/Roell, 2012).....	9
Tabela 2.2 - Caraterísticas dos modelos 9612 e 9618 (ADMET, 2013).	11
Tabela 2.3 - Caraterísticas dos modelos MT1 e MT2 (Instron, 2016).	13
Tabela 2.4 - Caraterísticas do transdutor de binário Lorenz® DF-30.....	16
Tabela 3.1 - Valor das constates que relacionam o binário com a rotação na zona linear, representada na Figura 3.3.....	20
Tabela 3.2 - Comparação entre o valor esperado da velocidade dos ensaios, e do valor a que efetivamente ocorre a velocidade.	21
Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do PVC e 3M™ AF 163-2K (EduPack, 2016 e Palmares, 2016).....	30
Tabela 4.2 - Expressões para cálculo dos parâmetros em função do tipo de controlador. Adaptado (Ogata, 2010).	38
Tabela 4.3 - Resultados obtidos para o ganho proporcional e para a constante de tempo integral.	39
Tabela 5.1 - Caraterísticas do extensómetro axial/torsional modelo 3550 da Epsilon Tech® (Tech, 2017).....	47

1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo introduzir o tema desta dissertação, expondo o enquadramento do projeto, a sua motivação, os objetivos e por fim a estrutura seguida neste relatório.

1.1 Motivação e contextualização

A utilização de adesivos estruturais é uma realidade muito presente nos dias de hoje, seja na indústria automóvel, aeroespacial ou mesmo na construção civil. Estes têm vindo a substituir as ligações tradicionais, tais como as ligações por rebites ou soldadas. Isto porque apresentam vantagens, como grande resistência à fadiga, e garantem uma distribuição de tensões uniforme ao longo das juntas. Além disso, têm um baixo peso, boas propriedades anticorrosivas e boas capacidades em absorver choques que, por exemplo, se refletem num aumento da segurança automóvel (da Silva *et al.*, 2007, da Silva *et al.*, 2011).

De modo a caraterizar mecanicamente os adesivos estruturais, é necessário levar a cabo vários testes e ensaios. Entre os vários tipos de ensaios, os realizados sobre juntas adesivas são os mais comuns na caraterização dos adesivos quanto à sua resistência ao corte. Um dos ensaios que permite obter bons resultados é o ensaio de torção, pois aplica uma distribuição uniforme de tensão em toda a junta permitindo assim, determinar a resistência ao corte do adesivo, exclusivamente devido a forças de corte (da Silva *et al.*, 2012).

Para a realização destes ensaios são necessárias máquinas, algumas delas designadas de máquinas de ensaios universais. Estas máquinas têm um custo elevado, além de que as mais comuns são as de ensaios de tração. Em 2013 o ADFEUP propôs como dissertação de mestrado, o projeto de uma máquina de ensaios de torção com especificações particulares para a realização de ensaios de juntas adesivas. Esta máquina encontra-se atualmente no Laboratório de Adesivos no edifício M da FEUP, na qual é possível realizar alguns testes (Costa, 2015, Gonçalves, 2013, Guimarães, 2013). De modo a obter os melhores resultados, é necessário realizar uma avaliação da máquina e, caso necessário, fazer alguns ajustes com o objetivo de melhorar o seu desempenho.

1.2 Objetivos do projeto

O principal objetivo deste projeto é o de caracterizar a máquina de ensaios de resistência à torção de juntas adesivas. Para isso têm de ser realizados alguns ensaios e testes experimentais que permitam caracterizar e perceber o funcionamento do sistema, para que possam ser implementadas as necessárias medidas de correção. Para além de caracterizar a máquina, é necessário implementar uma interface gráfica funcional, assim como o comando e os controladores para os testes em controlo de deslocamento angular, teste em controlo de binário, teste de relaxamento e teste de fluência.

1.3 Metodologia

O primeiro passo nesta dissertação foi o de perceber o funcionamento das máquinas de torção comerciais, analisando as suas especificações e características. De seguida, foi analisada e estudada a máquina de ensaios de torção presente no Laboratório de Adesivos. O passo seguinte foi o da criação do comando e da interface gráfica, que permitisse a monitorização dos sinais em tempo-real. Por fim, foram projetados e implementados os controladores necessários para o bom desempenho da máquina.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta tese está organizada em 6 capítulos principais. No primeiro capítulo é introduzido o tema, onde são expostos a motivação e os objetivos.

No segundo capítulo é realizada uma pesquisa bibliográfica onde são expostos os diferentes tipos de ensaios disponíveis para avaliar as propriedades de corte dos adesivos, seguido de uma exposição de máquinas de torção mais comuns no mercado e, por fim, é feita uma descrição da máquina de ensaios de torção em estudo.

O trabalho experimental realizado quanto à caracterização da máquina de torção é apresentado no capítulo 3.

No capítulo 4 é realizada a síntese dos controladores, assim como a determinação experimental dos ganhos dos controladores.

No capítulo 5 são apresentados dispositivos para medir a deformação angular relativa.

No capítulo 6, são descritos os passos na criação do comando e interface da máquina.

Finalmente, no capítulo 7, são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica

Neste capítulo serão abordados alguns tipos de ensaios mais comuns para avaliar as propriedades ao corte dos adesivos, entre os quais o ensaio de torção e as vantagens da sua utilização. De seguida serão apresentadas algumas máquinas de ensaios de torção comerciais. Por fim será realizada uma descrição da máquina de ensaios de torção em estudo, assim como de alguns elementos importantes da máquina.

2.1 Ensaios para avaliar as propriedades ao corte dos adesivos

Existem vários métodos para avaliar o comportamento ao corte dos adesivos, dos quais se destacam os ensaios *Iosipescu (V-Notched Beam) Test*, *Arcan (V-Notched Plate) Test*, junta de sobreposição simples, *Thick Adherend Shear Test (TAST)* ou o ensaio de torção em juntas topo a topo. De seguida será apresentada uma breve descrição dos últimos 3 testes com base nos trabalhos de da Silva *et al.*, 2007 e da Silva *et al.*, 2011.

2.1.1 Junta de sobreposição simples

Um dos ensaios mais comuns para determinar a resistência ao corte de adesivos é o ensaio de tração de juntas sobrepostas (ISO 4587). Tem a vantagem de ser barato, simples, de utilizarem uma máquina de ensaios de tração, comum em laboratórios de investigação, e de existirem muitos dados e resultados que podem servir de base de comparação. No entanto, a sua configuração leva ao aparecimento de momentos fletores nos substratos. Consequentemente, os resultados obtidos da resistência ao corte dos adesivos não são os mais exatos (Figura 2.1). Uma das soluções para reduzir tal efeito é a utilização de uma dupla junta sobreposta. Apesar da redução dos momentos fletores, continuam a aparecer picos de tensão nas extremidades, corrompendo os resultados relativos ao valor da resistência ao corte do adesivo em questão. Daí que este tipo de ensaios, apesar de ser muito comum, é mais utilizado para fins de qualidade e controlo de juntas adesivas e não para avaliar as reais propriedades mecânicas dos adesivos (da Silva *et al.*, 2007).

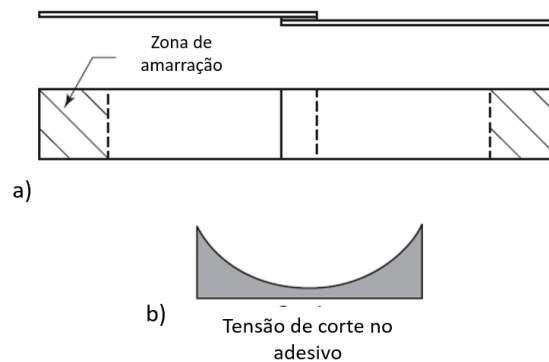


Figura 2.1 - Junta de sobreposição simples. Na figura b) está representada a distribuição da tensão de corte no adesivo, quando solicitado num ensaio de tração. Adaptado (da Silva *et al.*, 2007).

2.1.2 Thick Adherend Shear Test, TAST

Outro dos testes que permite determinar as propriedades de corte é o ensaio TAST. Assim como no ensaio de tração de juntas de sobreposição simples, são ensaios relativamente fáceis e que requerem dispositivos igualmente simples, como é o caso das máquinas de ensaios de tração. Este tipo de ensaio surge com o objetivo de uniformizar o campo de tensões gerado na junta aquando do ensaio de tração, quando comparado com o ensaio anteriormente referido. Para isso, são utilizados substratos metálicos e espessos, com elevada rigidez (ISO 11002-2), como pode ser visto na Figura 2.2. No entanto, na prática, é impossível obter uma distribuição de tensões perfeitamente uniforme. Isto porque há sempre uma pequena deformação dos substratos que não é contabilizada, para além dos momentos fletores, que podem ser originados pelo desalinhamento dos furos de carregamento dos substratos com as amarras da máquina de ensaios (da Silva *et al.*, 2007, da Silva *et al.*, 2012, da Silva *et al.*, 2011).

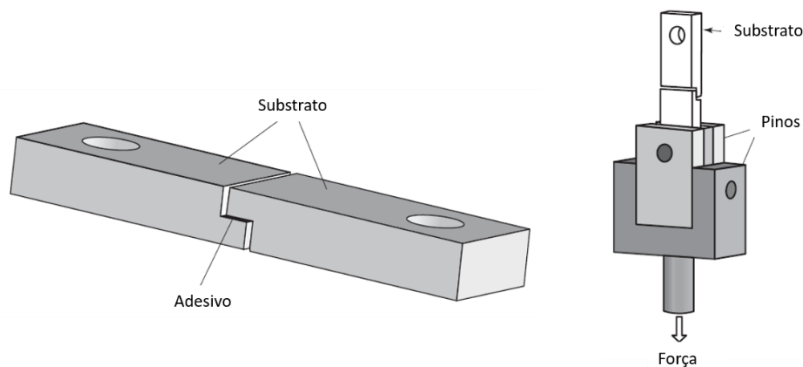


Figura 2.2 - Provete TAST. Adaptado (da Silva *et al.*, 2012).

2.1.3 Junta topo a topo em torção

Uma das alternativas para determinar a resistência ao corte dos adesivos, para além dos ensaios de tração de juntas sobrepostas, é o ensaio de torção de juntas topo a topo. Este teste pode ser realizado com dois tipos diferentes de substratos: juntas de topo com cilindros tubulares de paredes finas (*Napkin-ring test*) ou substratos cilíndricos maciços (Figura 2.3). O primeiro tem a vantagem de reduzir a variação das tensões de corte ao longo do raio no adesivo (da Silva *et al.*, 2012).

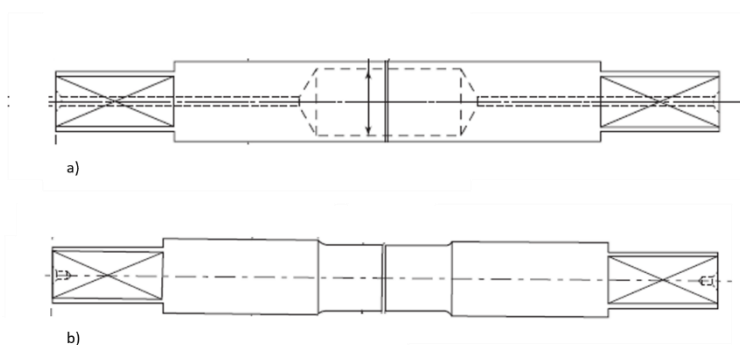


Figura 2.3 - Na figura a), juntas de topo com cilindros tubulares e na figura b) substratos cilíndricos maciços.

Adaptado (da Silva *et al.*, 2012).

A execução dos substratos cilíndricos tubulares é cara e difícil. No caso dos adesivos com baixa viscosidade, a realização dos provetes torna-se igualmente difícil pois o adesivo dificilmente ocupa a posição exata entre os substratos. Além de que é necessário remover o excesso de adesivo na parede interna do cilindro tubular (Figura 2.4), pois a sua presença gera valores de resistência e módulo de corte menos exatos. Por estas razões, a utilização de substratos cilíndricos maciços é por vezes preferível (da Silva *et al.*, 2007, da Silva *et al.*, 2012).

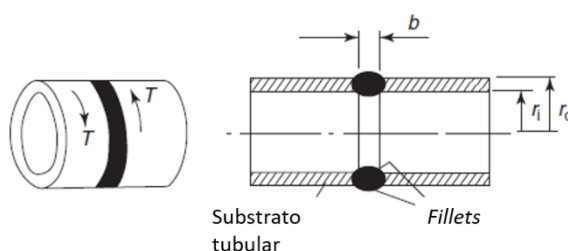


Figura 2.4 -Substratos cilíndricos tubulares. Adaptado (da Silva *et al.*, 2012).

Ao aplicar um momento igual e oposto nas secções tubulares, o adesivo fica sujeito a esforços puramente de corte (idealmente) onde a tensão de corte máxima será na zona do raio exterior do tubo ($r_o \approx r_i$) e que é dada pela seguinte equação:

$$\tau = \frac{Tr_o}{J} \quad (1)$$

onde T representa o binário aplicado e J o momento polar. No caso dos provetes de estrutura tubular, o momento polar é dado por:

$$J = \frac{\pi}{2}(r_o^4 - r_i^4) \quad (2)$$

O módulo de rigidez ao corte G é dado por:

$$G = \frac{b}{J} \left(\frac{T}{\phi} \right) \quad (3)$$

onde b é a espessura do adesivo e T/ϕ a relação entre o binário e o deslocamento angular medido. Quando bem executado, este tipo de teste é livre de concentração de tensões, promovendo-se um estado de tensão de corte puro. Para isso é necessário garantir o correto alinhamento dos substratos. É igualmente importante realizar uma medição fiável da variação do ângulo de rotação. Caso contrário, é necessário ter em conta a rotação devido à deformação dos substratos e da própria máquina de ensaios, e de seguida, efetuar as devidas correções.

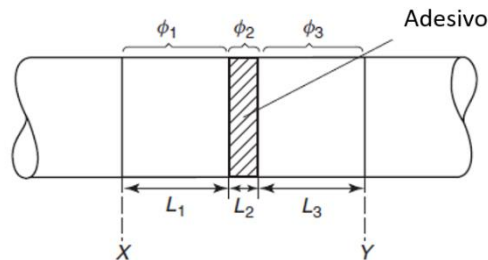


Figura 2.5 - Provete com substratos cilíndricos maciços. Adaptado (da Silva *et al.*, 2012).

Aquando da utilização dos substratos cilíndricos maciços, o cálculo da tensão de corte difere no cálculo do momento polar, que é dado por:

$$J = \frac{\pi}{2} r^4 \quad (4)$$

Temos então que:

$$\tau = \frac{2T}{\pi r^3} = G\gamma = \frac{Gr\phi}{l} \quad (5)$$

Apesar da fabricação dos provetes com substratos cilíndricos maciços ser mais fácil que a dos tubulares, como a tensão de corte em secções circulares varia linearmente com o raio, numa determinada altura do ensaio, parte do adesivo entra no domínio plástico, aumentando a tensão de corte nesta zona. O ensaio de torção dá, assim, a curva “Binário vs. Rotação”. Para determinar com maior exatidão a curva “Tensão de corte vs. Deformação de corte” é necessário aplicar um método de correção: Correção de Nadai (Nadai, 1931). No caso do comportamento não linear na curva “Tensão de corte vs. Deformação de corte”, é demonstrado que a tensão de corte na zona do raio exterior pode ser dada pela seguinte expressão:

$$\tau = \frac{1}{2\pi r^3} \left(3T + \phi \frac{dT}{d\phi} \right) \quad (6)$$

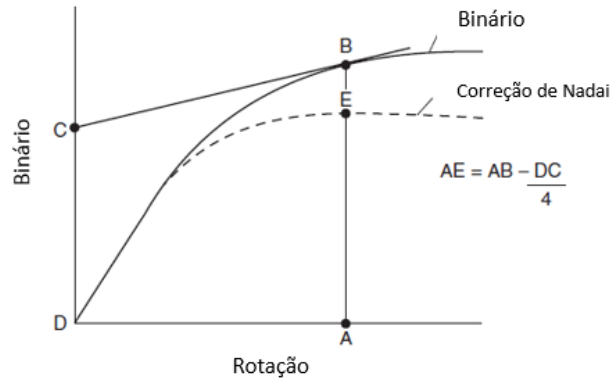


Figura 2.6 - Correção de Nadai aplicado ao gráfico “Binário vs. Rotação”. Adaptado (da Silva *et al.*, 2012).

O método gráfico da aplicação da Correção de Nadai é mostrado na Figura 2.6. Um ponto B da zona não linear da curva “binário vs. rotação” é selecionado e de seguida é determinada a tangente nesse respetivo ponto. É determinada a interseção da tangente com o eixo vertical e determinado o ponto C. A correção AB é obtida subtraindo $\frac{1}{4}$ da distância DC, obtendo-se assim a distância AE. Assim é possível construir a verdadeira curva “Tensão de corte vs. Deformação de corte”, que pode ser vista na Figura 2.7 (da Silva *et al.*, 2007, da Silva *et al.*, 2012).

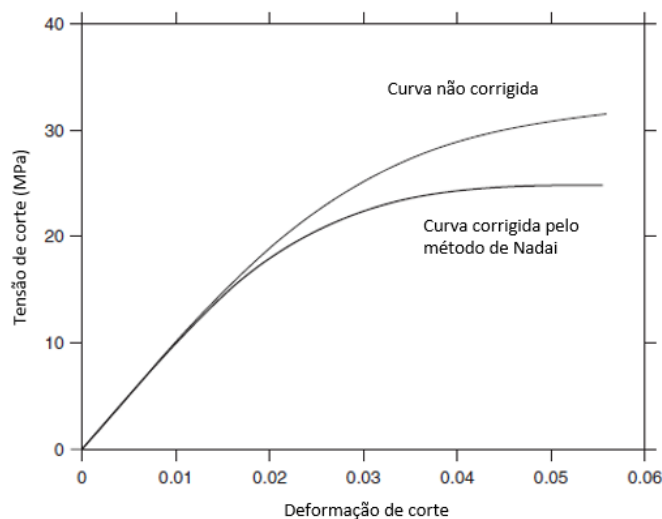


Figura 2.7 - Resultado do gráfico “Tensão de corte vs. Deformação de corte” com e sem correção de Nadai.

Adaptado (da Silva *et al.*, 2012).

2.2 Máquinas comerciais de ensaios de torção

Existe uma grande variedade de fabricantes de máquinas de torção comerciais, dos quais são destacados a *Zwick Roell*®, *Instrom*®, *MTS*®, *ADMET*®, *Hegewald and Peschke*®, *Tinius Olsen*® e *TestResources, Inc*®. Na verdade, a grande maioria destes fabricantes não são especializados em máquinas de ensaios de torção, mas sim em equipamento de testes e nas chamadas máquinas de ensaios universais. Algumas destas máquinas têm a opção de realizar ensaios axiais e transversais em simultâneo, além de que não são especializadas para testes de juntas adesivas, mas sim nos mais variados ensaios, tais como de materiais compósitos, fios metálicos, materiais biomecânicos, entre outros.

Estes fabricantes disponibilizam uma vasta gama de máquinas de ensaios de torção, com capacidades de binário máximo que pode variar entre os 5 Nm e os 2000 Nm. De seguida serão apresentados modelos de alguns fabricantes, maioritariamente com baixa capacidade de carga, visto que são mais semelhantes à máquina de ensaios de torção em estudo (60 Nm).

- **TorsionLine TL020, Zwick Roell®**



Figura 2.8 - Máquina de ensaios de torção TorsionLine TL020 (Zwick/Roell, 2012).

Esta máquina de ensaios de torção tem uma configuração horizontal. O fabricante possui 3 modelos com esta configuração: TL 020 (Figura 2.8), TL200 e TL 500, com binários máximos de 20 Nm, 200 Nm e 500 Nm respetivamente. Como principais aplicações destacam-se os testes de polímeros, testes de fios metálicos, de produtos da área médica, entre outros. Apresenta as seguintes principais vantagens e características, representadas na Tabela 2.1 (Zwick/Roell, 2012):

- Garante a máxima rigidez em toda a sua gama de binário disponível;

- Alta resolução na medição do deslocamento angular;
- Proteção da célula de carga contra uma excessiva atuação mecânica;
- Uso de servomotor AC que garante uma manutenção mínima;
- Utilização de um PC convencional na leitura dos dados;
- Opção de utilizar uma força axial em simultâneo (Fmax: 500 N);
- Proteção elétrica;
- Configuração modular, ou seja, podem ser utilizados outros equipamentos (ex: diferentes células de carga) disponíveis no fabricante.

Tabela 2.1 - Caraterísticas do modelo TL 020 (Zwick/Roell, 2012).

Modelo	Unidades	TL 020
Binário Máximo	Nm	20
Velocidade de Rotação	rpm	0.0005-180
Dimensões (h*w*d)	mm	1775x1475x650
Comprimento Máx. Provetes	mm	510
Diâmetro Máx. Provetes	mm	200
Rigidez torsional	Nm/°	>1000
Tensão de alimentação	V	230 V AC (50/60 Hz)
Resolução da Célula de carga (Mmax= 20 Nm)¹	Nm	≥0.2

¹ Para o modelo TL 020 estão disponíveis 3 tipos de células de carga diferentes com capacidade de binário máximo de 2 Nm, 5 Nm e 20 Nm, cada uma com resoluções diferentes.

- eXpert 9612 *static/vertical* & eXpert 9618 *static/horizontal*, ADMET®



Figura 2.9 - Máquina de ensaios de torção eXpert 9612 (ADMET, 2013).

Estas máquinas de ensaios de torção estão inseridas na série eXpert 9000 da ADMET®, que possui modelos com orientação na vertical (Figura 2.9) ou na horizontal (Figura 2.10) com capacidade para realizar ensaios estáticos (modelos 9600) ou de fadiga (modelos 9900). Os modelos com orientação horizontal possuem um *spindle* fixo e um carro móvel, enquanto os de orientação vertical possuem um *spindle* móvel. É garantida uma rigidez torsional máxima, assim como forças axiais mínimas causadas por atrito, graças ao uso de calhas laterais que permitem o deslizamento dos carros móveis. Ambos os modelos possuem a capacidade de aplicar forças axiais (tração ou compressão) durante os ensaios (ADMET, 2013). As características dos modelos 9612 e 9618 estão apresentadas na Tabela 2.2.



Figura 2.10 - Máquina de ensaios de torção eXpert 9618 (ADMET, 2013).

É possível adicionar diferentes tipos de células de carga que este fabricante disponibiliza, assim como equipamento de sensorização extra, que o utilizador ache conveniente. Caso as máquinas de torção comerciais disponíveis por este fabricante não cumpram os requisitos do utilizador, é possível encomendar à empresa uma máquina à medida do utilizador que cumpra os objetivos pretendidos (Figura 2.11). Naturalmente que os custos devem ser elevados, razão pela qual foi pretendido pelo ADFEUP realizar a máquina de torção em estudo neste trabalho (ADMET, 2013).

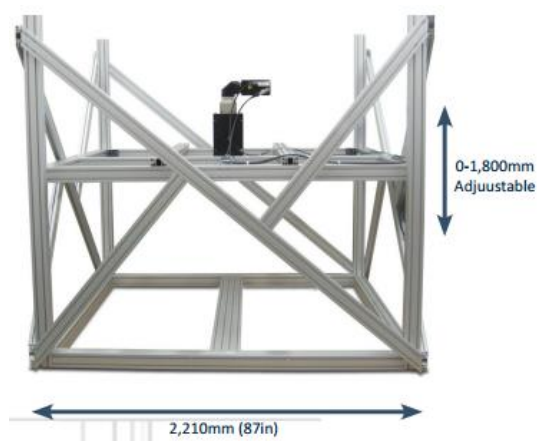


Figura 2.11 - Exemplo de uma máquina de ensaios de torção construída à medida do utilizador (ADMET, 2013).

Tabela 2.2 - Caraterísticas dos modelos 9612 e 9618 (ADMET, 2013).

Modelo	Unidades	9612	9618
Binário Máximo	Nm	20	300
Velocidade de Rotação	rpm	0.0045-90	0.002-40
Comprimento Máx. Provetes	mm	0-760	0-760
Diâmetro Máx. Provetes	mm	200	200
Rotação Máx.	°	infinito	infinito
Resolução Angular	°	0.0008	0.0008
Tensão de alimentação	V	110-220 (50, 60 Hz)	110-220 (50, 60 Hz)

- **MT MicroTorsion Series, Instron®**

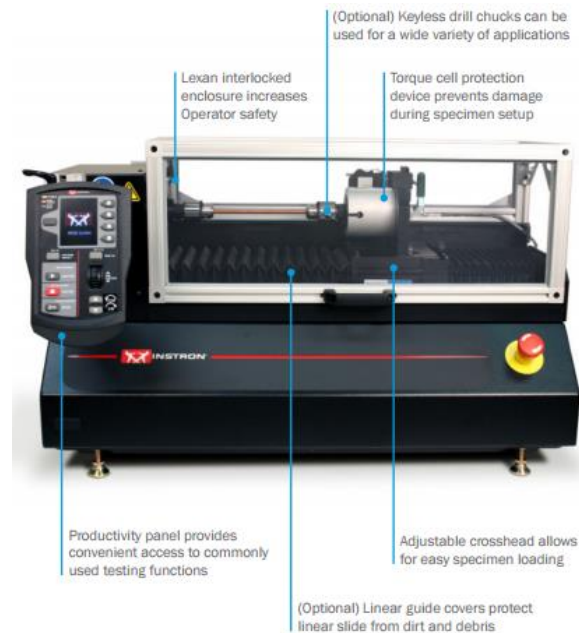


Figura 2.12 - Máquina de ensaios de torção MT MicroTorsion (Instron, 2016).

Esta máquina de ensaios de torção está disponível em dois modelos: o MT1 e MT2 com capacidade de binário máximo de 22.5 Nm e 225 Nm respetivamente (Figura 2.12 e Tabela 2.3). Garantem na sua estrutura a máxima rigidez possível, assim como um bom alinhamento de toda a estrutura. Possui um sistema de controlo e proteção e, à semelhança das outras máquinas analisadas, possui as seguintes características (Instron, 2016):

- Alta rigidez torsional e baixo atrito axial;
- Células de carga com capacidade de 0.225-225 Nm;
- *Software* que monitoriza e disponibiliza os gráficos dos ensaios de torção;
- Proteção das células de carga;
- Proteção física; em modo manual a velocidade é ajustada para um máximo de 5 rpm;
- Opção de pré-ajuste de uma força axial, de tração ou compressão.

Tabela 2.3 - Caraterísticas dos modelos MT1 e MT2 (Instron, 2016).

Modelo	Unidades	MT1	MT2
Binário Máximo	Nm	22.5	225
Velocidade Máx. Rotação	Rpm	120	60
Rotação Máx.	Rotações	15000	15000
Resolução	Arcmin	0.171	0.168
Pré-esforço Axial	N	44.5	44.5
Backlash Máx.	Arcmin	6	10

2.3 Descrição da máquina de ensaios de torção desenvolvida na FEUP

A máquina de ensaios de torção existente no Laboratório de Adesivos no edifício M da FEUP foi desenvolvida ao longo de 3 dissertações no Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, sofrendo algumas alterações até chegar à solução atual, que pode ser vista na Figura 2.13 (Costa, 2015, Gonçalves, 2013, Guimarães, 2013). O projeto da máquina teve como base as máquinas comerciais de ensaios anteriormente apresentadas. No entanto, algumas caraterísticas particulares foram introduzidas de modo a minimizar esforços indesejados nas juntas adesivas. Isto porque esforços que não os de corte têm influência na determinação das propriedades ao corte do adesivo (Gonçalves, 2013).

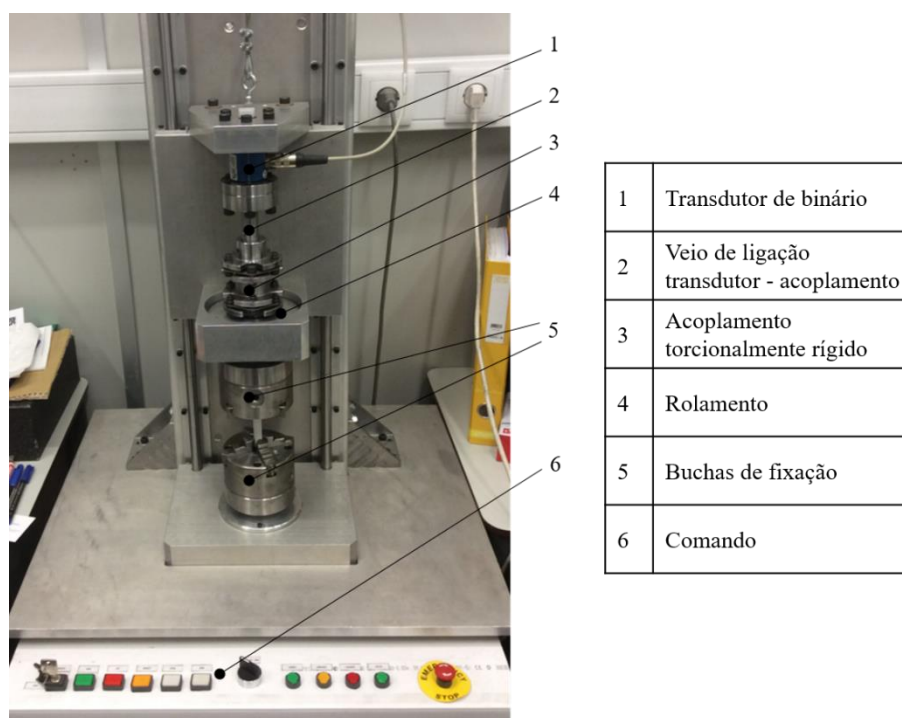


Figura 2.13 - Máquina de ensaios de torção. Estão numerados alguns dos componentes principais da máquina.

Foi em função das características dos provetes, em particular as dos adesivos a testar, que foram decididas as especificações de projeto da máquina. Assim, as principais características são (Gonçalves, 2013, Guimarães, 2013):

- Binário Máximo: 60 Nm;
- Ângulo de rotação Máximo: 70°;
- Velocidade dos testes: 0.05 rpm a 1 rpm;
- Resolução da leitura do ângulo: 0.0005°;
- Diâmetro do provete: 10 mm a 30 mm;
- Comprimento útil do provete: 100 mm a 150 mm.

Foi adotada uma configuração vertical, uma vez que minimiza possíveis desalinhamentos da cadeia cinemática, bem como os efeitos do peso próprio do provete que, caso a máquina tivesse uma configuração horizontal, poderiam originar momentos fletores e, assim, provocar tensões que não as de corte na zona do adesivo. No entanto, mesmo adotando uma configuração vertical, os provetes e a própria cadeia cinemática não estão perfeitamente alinhados. Daí que foram pensados componentes para minimizar tais erros. A máquina é assim constituída por dois acoplamentos torcionalmente rígidos e dois rolamentos de esferas autocentrantes (Figura 2.14) (Gonçalves, 2013).



Figura 2.14 - Na imagem à esquerda, rolamento de esferas autocentrante FAG 2208. Na imagem à direita, acoplamento ARPEX RS-6 da Siemens®. Adaptado (Gonçalves, 2013)

A atuação mecânica foi projetada de modo a cumprir os requisitos de velocidade e de binário pretendidos. A máquina possui um servomotor elétrico *low cogging* acoplado com um redutor planetário (Figura 2.15). O facto de ser do tipo *low cogging* tem como objetivo obter um binário o mais linear possível, quando comandado a baixas velocidades, como no presente caso (Guimarães, 2013).

Associado ao servomotor, o *driver* efetua controlo de velocidade e pode ser programado pelo computador. Para controlo de binário e de posição foi necessário desenvolver controladores em *Matlab*® e *Simulink*®. Para além de controlo, neste ambiente é efetuado o comando, leitura e interface com o utilizador.



Figura 2.15 - Na imagem à esquerda, servomotor *Parvex*® NX 310EAPR7310. Na imagem à direita o redutor planetário *Parvex*® GE3N26R0401. Adaptado de (Costa, 2015).

Outro componente essencial da máquina é o transdutor de binário (Figura 2.16). É o responsável pela leitura do binário aplicado na junta adesiva. Em conjunto com a leitura da deformação angular, permite obter as propriedades de corte da junta. Inicialmente foi pensado um projeto para a construção do transdutor de binário, de modo a minimizar os custos da máquina (Guimarães, 2013). No entanto, sendo um equipamento algo complexo, que exige rigor na sua construção e instrumentação, bem como uma calibração periódica, o transdutor de binário acabou por ser adquirido à marca alemã *Lorenz*® (Tabela 2.4). É um transdutor estático, modelo DF-30, com uma gama de leitura +/- 100Nm (Lorenz, 2015). Associado ao transdutor de binário está o amplificador de sinal, *DIN Mounting Rail Strain Gauge Amplifier GM 40* (Figura 2.16), que permite precisamente amplificar o sinal, assim como ajustar o valor de referência de binário (no caso da máquina de torção é de 0 Nm) e ajustar um filtro de modo a minimizar o ruído (Lorenz, 2016).

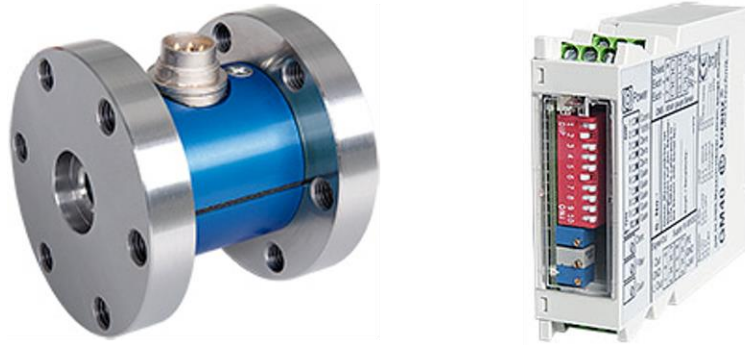


Figura 2.16 - Na imagem à esquerda o transdutor de binário *Lorenz®* DF-30. Na imagem à direita o amplificador de sinal *Lorenz®* GM 40 (Lorenz, 2015, 2016).

Tabela 2.4 - Características do transdutor de binário *Lorenz®* DF-30

Transdutor de binário	Unidades	DF-30
Exatidão	%	0.2
Sensibilidade	mV/V	1.0
Binário máximo	Nm	100
Tensão de alimentação	V	2 a 12

3 Caraterização da máquina de ensaios de torção

Neste capítulo é descrito o trabalho de caraterização da máquina de ensaios de torção quanto à sua rigidez, assim como a análise do comportamento de alguns dos seus componentes, como é o caso do transdutor de binário e do *encoder*. A ideia é perceber o comportamento da máquina, nomeadamente a sua deformação, quando solicitada a um teste em velocidade constante. De seguida, aquando de um teste de uma junta adesiva, o ensaio é corrigido com base no valor da deformação da máquina, e deste modo ser possível a utilização do *encoder* na medição da deformação do adesivo.

3.1 Determinação da rigidez da máquina

Todo o projeto inicial da estrutura mecânica da máquina teve em conta que o binário máximo para os testes seria de 60 Nm. Foram tomadas as devidas precauções de segurança de modo a que toda a estrutura mecânica possa não só resistir aos 60 Nm, como também evitar deformações excessivas. O objetivo inicial do projeto seria obter uma estrutura “infinitamente” rígida, de modo a ser possível utilizar o *encoder* do servomotor para medição do deslocamento angular, até porque a resolução deste cumpria com os objetivos iniciais do projeto (Gonçalves, 2013).

Na verdade, é impossível obter uma estrutura infinitamente rígida. Aquando do projeto mecânico foram feitas simulações no *SolidWorks*® de modo a perceber como se deformava e em que zonas críticas a deformação da máquina poderia ocorrer. Após análise das simulações e dos catálogos de alguns componentes, chegou-se à conclusão que os componentes críticos seriam os acopladores torcionalmente rígidos e o redutor planetário (Gonçalves, 2013). Além disso as duas buchas têm uma capacidade máxima de 60 Nm, ou seja, no limite da capacidade da máquina. Para além da rigidez dos componentes mecânicos, toda a construção e ligação das peças que constituem a máquina, ou seja, parafusos e chavetas, podem sofrer alguma deformação que na prática, difere dos resultados obtidos nas simulações.

- **Procedimento na obtenção dos resultados**

Inicialmente foi pensado usar-se um provete metálico, com uma rigidez muito elevada, que seria acoplado às buchas de 4 grampos, no entanto, de modo a reduzir o escorregamento, foi usado um cubo que ficava centrado na bucha (Figura 3.1). Contudo, após realizados alguns ensaios, verificou-se que ocorria algum esmagamento no próprio provete, assim como pequenos escorregamentos nos grampos das buchas. Além disso, mesmo que o espaçamento entre as buchas fosse pequeno, haveria sempre deformação do provete que influenciava a leitura do *encoder*.

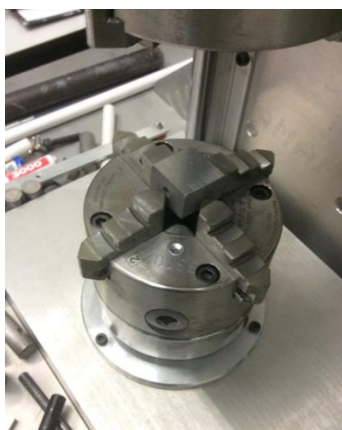


Figura 3.1 - Pormenor do provete metálico usado inicialmente.

A solução encontrada foi acoplar diretamente as duas buchas, como mostra a Figura 3.2. Assim, há uma maior possibilidade de as deformações terem origem exclusivamente na própria estrutura mecânica da máquina.

Visto que o transdutor de binário e o *encoder* estão em lados opostos da cadeia cinemática, estes foram usados para determinar as deformações para um binário máximo de 60 Nm.

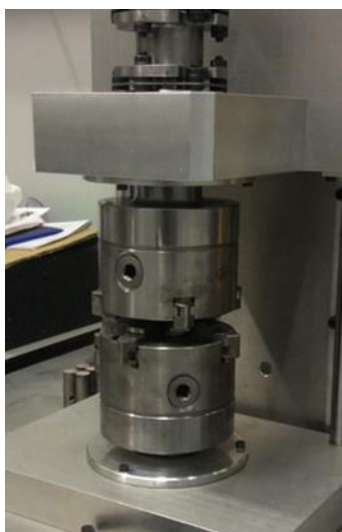


Figura 3.2 - Acoplamento direto das buchas.

- **Resultados obtidos**

De seguida são apresentados 6 ensaios realizados. Os primeiros 3 com movimento no sentido direto (positivo) de rotação, começando com o transdutor de binário próximo de zero, ou seja, sem pré-carga (Figura 3.3). Os restantes 3 foram realizados de modo a beneficiarem do binário com que terminaram os primeiros. Assim, foi possível percorrer toda a gama da máquina (Figura 3.4) com o único objetivo de perceber o seu comportamento, uma vez que os ensaios de juntas adesivas, previstos de serem realizados na máquina, ocorrem no 1º quadrante. Neste caso o sentido de rotação foi o inverso dos primeiros. De referir, por fim, que os ensaios 1, 2, 4 e 5 foram realizados a uma velocidade de 0.3 rad/min enquanto que os ensaios 3 e 6 foram realizados a 0.1 rad/min.

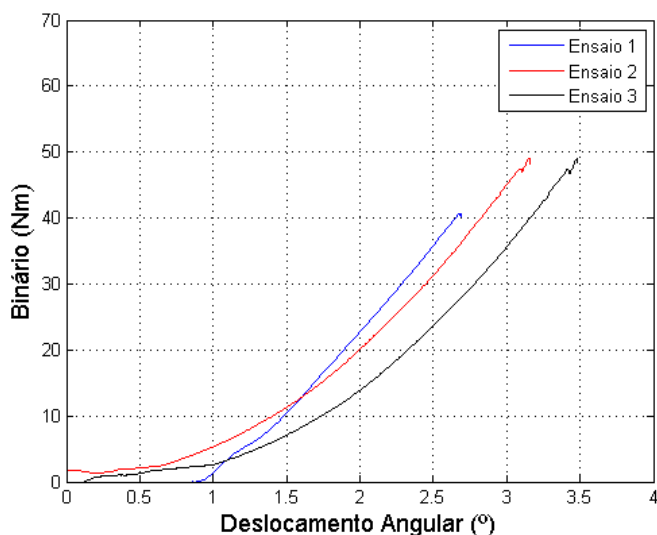


Figura 3.3 - Gráfico do binário em função da deformação da estrutura mecânica da máquina, para os primeiros ensaios.

Os gráficos obtidos foram ligeiramente modificados, pois por questões de sincronização, nem todos os testes começavam ao mesmo tempo. No entanto, é possível observar que nos 3 primeiros ensaios, existem acomodações da máquina nos instantes iniciais. Depois, a partir dos 2° de deslocamento, o comportamento é aproximadamente linear, e com uma relação “Binário vs. Deslocamento angular” idêntica em todos, como pode ser visto na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valor das constantes que relacionam o binário com a rotação na zona linear, representada na Figura

3.3

Ensaio	K (Nm/°)	K (Nm/rad)
1	26.02	1490.8
2	24.6	1383.7
3	24.15	1409.5
Média	24.9	1428

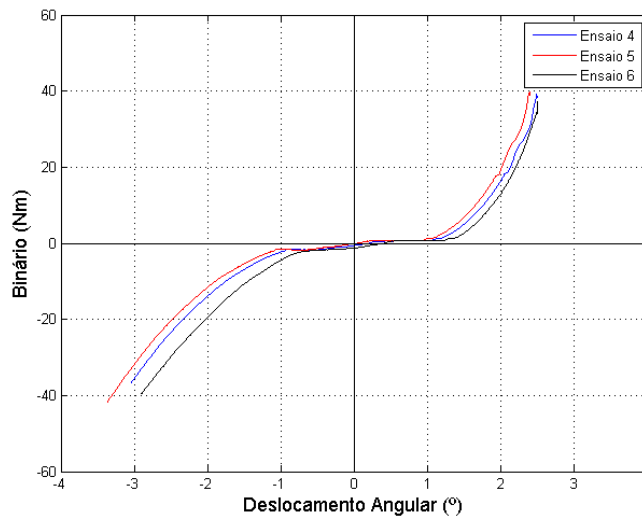


Figura 3.4 - Gráfico do binário em função da deformação da estrutura mecânica da máquina, para os 3 últimos ensaios. É possível identificar uma “zona morta” entre -1° e 1°.

Após análise dos ensaios 4, 5 e 6 foi possível verificar que existe uma folga na ordem dos 2° no redutor, que se traduz numa “zona morta” nos gráficos “binário vs. rotação”. De facto, esta característica do redutor era conhecida desde início. Há também a ocorrência de alguns ajustes, ou deformações na máquina nos momentos iniciais aquando da realização de um ensaio. Esta característica revelou-se muito importante na implementação do controlador para os testes de controlo de binário e fluência, que vão ser abordados no próximo capítulo.

- **Testes na medição da velocidade dos ensaios**

Outra característica analisada foi se a velocidade do servomotor, de facto, correspondia ao valor introduzido pelo utilizador na interface. Foram realizados vários testes e constatou-se que para baixas velocidades, apresentava um erro de cerca de 3%, como pode ser visto na Tabela 3.2. Foram realizados três testes para cada valor esperado de velocidade. De seguida, o sinal do *encoder* foi analisado, do qual foram obtidos o valor efetivo da velocidade, a partir da derivada desse sinal, e calculado o erro relativo (Anexo C).

Tabela 3.2 - Comparação entre o valor esperado da velocidade dos ensaios, e do valor a que efetivamente ocorre a velocidade.

Velocidade esperada (rad/min)	Velocidade obtida (rad/min)	Erro relativo (%)
0.3	0.3093	3.099
0.5	0.5111	2.23
1	1.0096	0.957
2	2.0088	0.438

3.2 Ruído no sinal do transdutor de binário

Um dos problemas que surgiram no início deste trabalho foi o ruído que o sinal do transdutor de binário apresentava (Figura 3.5). O ruído é um dos grandes problemas que afeta as células de carga.

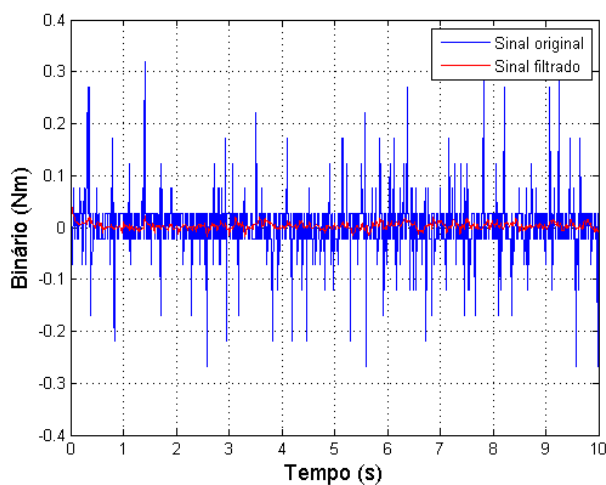


Figura 3.5 - Uma amostra do sinal do transdutor, onde a azul está representado o sinal de entrada e a vermelho o sinal à saída do filtro.

Uma medida tomada no passado foi a utilização de uma fonte de alimentação dedicada à célula de carga. No entanto, não resultaram melhorias significativas. Uma possível fonte de ruído poderá ser o servomotor e todos os componentes do quadro elétrico, que se encontram muito próximos do amplificador de sinal do transdutor.

Como foi referido no início da dissertação, associado à célula de carga está um amplificador de sinal que, para além da função base de amplificar o sinal, tem opção de ajustar um filtro de modo a minimizar o ruído. Efetivamente este filtro foi ajustado, no entanto, não resultou numa melhoria significativa no sinal. Isto porque provavelmente a fonte de ruído esteja após o próprio amplificador, antes da leitura do sinal pela carta de aquisição de dados.

A solução encontrada foi a utilização de um filtro digital para o sinal do transdutor de binário. Para isso foi utilizado um bloco do diagrama de comando em *Simulink*®, que permite projetar um filtro, o *Digital Filter Design* (Figura 3.6).

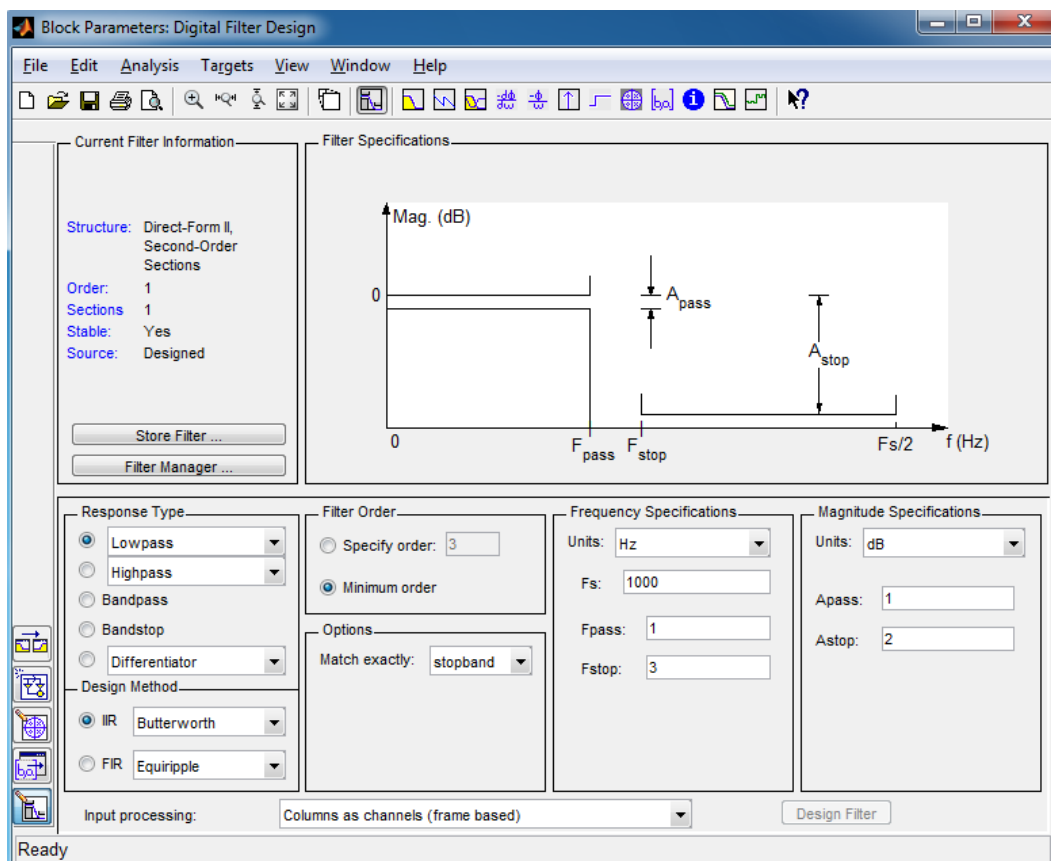


Figura 3.6 - *Digital Filter Design*

- **Filtro passa- baixo**

Um filtro pode ser visto como um elemento que consegue modificar ou rejeitar certas frequências de um sinal e que só aceita ou permite passar as frequências desejadas. No caso particular de um filtro passa-baixo, este permite passar os sinais com baixa frequência, até à frequência de corte, e atenua as frequências mais elevadas.

Uma vez que à partida não é possível perceber a que frequência o sinal pode ser filtrado, é necessário fazer o ajuste por tentativa e erro. Porém, tendo em conta o objetivo da máquina e do próprio transdutor de binário, os ensaios de torção em controlo de deslocamento angular serão realizados a baixas velocidades, pelo que não serão introduzidas variações muito bruscas no sinal (em princípio só quando o provete partir). Assim, o sinal deverá poder ser filtrado com uma frequência de corte baixa.

Um fator muito importante aquando do projeto do filtro é o de assegurar que as frequências do sinal propriamente dito, ou seja, que contêm informação útil, não são eliminadas (Figura 3.7).

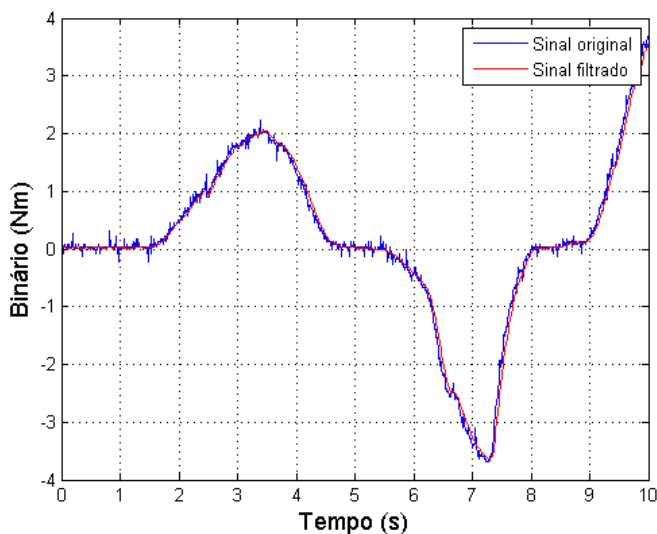


Figura 3.7 - Variação do sinal do transdutor e análise do sinal filtrado

No diagrama de blocos do *Simulink*®, foi selecionado o bloco “*Digital Filter Design*” que permitiu selecionar o tipo de filtro e os seus parâmetros. Começou-se por particularizar o tipo de resposta, o método e as especificações de frequência e de magnitude.

O ponto de partida foi especificar que o filtro é do tipo passa-baixo, mais especificamente “*Butterworth*”, e a frequência de amostragem de 1000 Hz. Os restantes parâmetros, foram obtidos de modo experimental, tendo em atenção que a informação relevante do sinal não é eliminada nem atenuada (Figura 3.7). Para isso, foram realizadas variações aleatórias ao sinal do transdutor, com frequências à partida mais elevadas que um ensaio em controlo de

3 Caracterização da máquina de ensaios de torção

deslocamento. A resposta em frequência do filtro gerado e as suas especificações estão representados na Figura 3.8

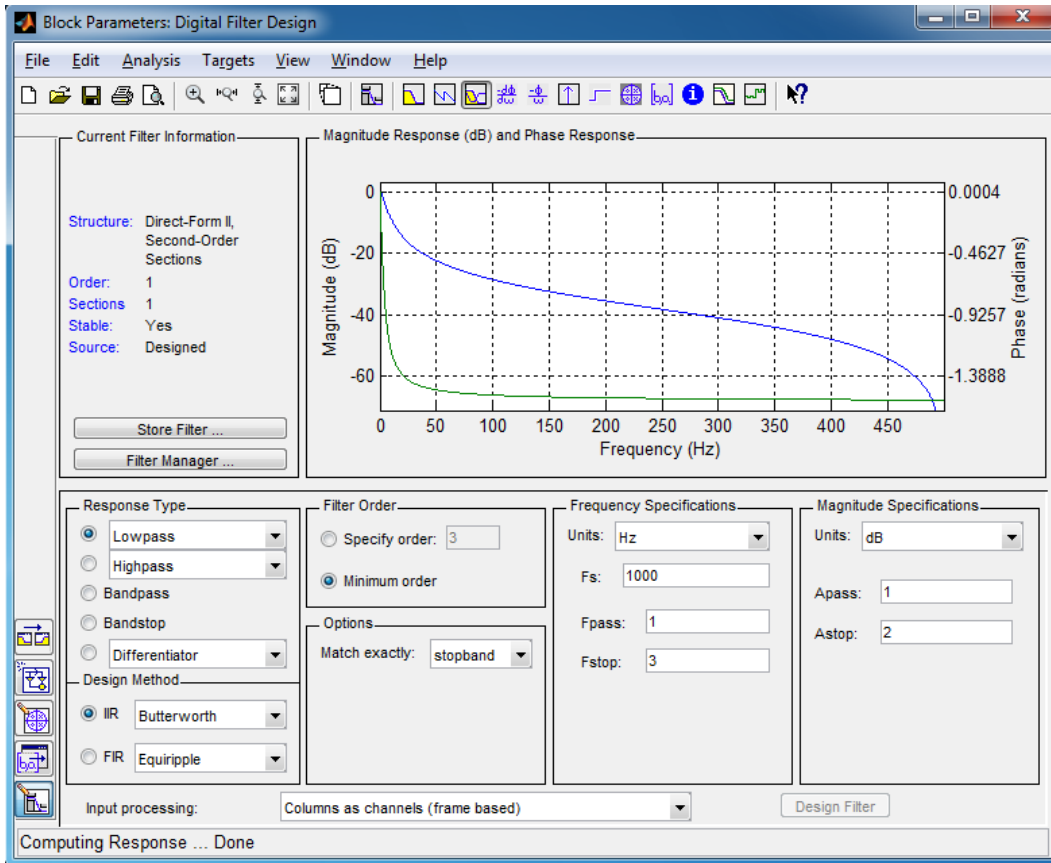


Figura 3.8 - Resposta em frequência do filtro “Butterworth” de 1ª ordem gerado, e as suas especificações. A resposta em magnitude está representada a azul, enquanto que a resposta em fase está representada a verde.

4 Testes e síntese dos controladores

Neste capítulo serão abordados os diferentes testes possíveis de realizar com a máquina de torção, com destaque para o projeto dos controladores associados. Será abordado o método utilizado na determinação dos ganhos dos controladores de binário.

Tal como foi considerado aquando do projeto da máquina, o comando e controlo são realizados através do *software Matlab*®, mais precisamente a partir do *Simulink*®, isto é, um ambiente de programação gráfica para modelação, simulação e análise de sistemas dinâmicos, desenvolvido pela empresa *MathWorks*®. É uma ferramenta muito utilizada em simulação de sistemas de controlo. No entanto, é possível aceder a diferentes aplicações e ferramentas, as denominadas *Toolbox*, que contêm funções para processamento de sinal. Uma delas é o *Real-Time Workshop*, uma aplicação que permitem a utilização de cartas de aquisição de dados (I/O, A/D e D/A) que por sua vez permitem comunicar em tempo real com dispositivos, como é o caso do transdutor de binário, *encoder*, servomotor, ou outro *hardware*.

A modelação e o estudo do sistema mecânico foram realizados em dissertações anteriores, bem como a simulação e determinação dos parâmetros dos controladores. No entanto, baseados num anel de controlo em corrente (Guimarães, 2013). Uma vez que o *driver* efetua um controlo em velocidade, é necessário projetar novamente o controlador de binário e determinar os seus parâmetros, desta vez de um modo experimental.

Tendo em conta o tipo de teste a realizar, foi projetado um controlador diferente. De seguida serão apresentados os diferentes testes e os respetivos controladores.

4.1 Teste em controlo de deslocamento angular

Este é talvez o teste mais importante, dos quatro possíveis, na determinação das propriedades ao corte das juntas adesivas. O princípio deste teste passa por impor um deslocamento angular crescente no tempo, isto é, velocidade angular constante, com o objetivo de obter a relação entre o binário e a deformação angular resultante na junta adesiva. A partir desta relação e dos dados geométricos do provete, é possível obter as propriedades ao corte do adesivo.

Ao *driver* do servomotor está associado um *software* que está instalado no computador que controla a máquina de torção. Neste *software* é possível ajustar alguns parâmetros, tais como a velocidade máxima do servomotor, bem como alguns ganhos importantes que relacionam a tensão ou a corrente com a velocidade. É possível, igualmente, limitar a corrente debitada ao servomotor pelo *driver*, de modo a precisamente limitar o binário máximo disponibilizado pelo sistema “servomotor+reductor”. Este é um parâmetro muito importante visto que, e apesar do binário em contínuo a baixa velocidade ser de 2 Nm, o reductor tem uma razão de 216:1, o que resulta num binário em contínuo de 337 Nm, isto é, superior ao máximo admissível, que é 60 Nm.

Além dos parâmetros, neste *software* é definido o controlo do servomotor, controlo em velocidade, como pode ser visto na Figura 4.1. Como o deslocamento angular é feito a velocidade constante, o utilizador apenas tem de fornecer uma referência ao controlador.

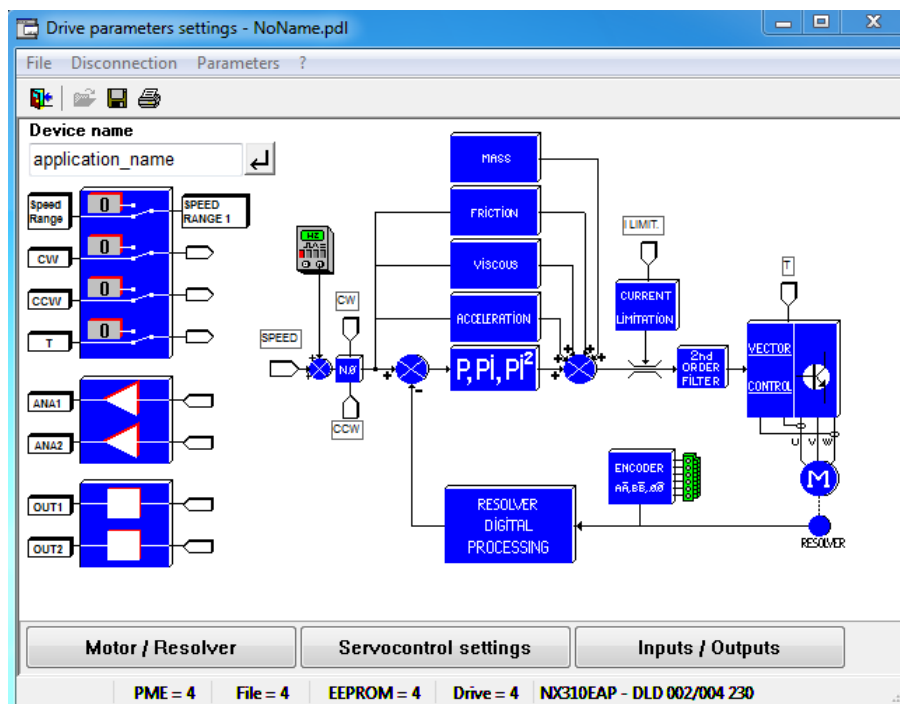


Figura 4.1 - Janela do *software* do *driver* do servomotor. Está representado o sistema em controlo de velocidade em malha fechada.

O comando propriamente dito é realizado no *Simulink*®, onde são adquiridos os sinais do *encoder* e do transdutor de binário, assim como os sinais de monitorização (Guimarães, 2013). A velocidade de referência é indicada pelo utilizador, em rad/min, sendo multiplicada por um ganho para conversão em tensão de referência para o *driver*. A relação entre a tensão e a velocidade do servomotor é um parâmetro que é ajustado no *software* do *driver*. Assim, tendo em conta a velocidade máxima prevista para os ensaios de 5,5 rad/min e sabendo que a tensão de referência máxima é de 5 V, foi possível determinar esse ganho (está representado como “*Gain3*” na Figura 4.2).

A velocidade máxima da máquina é de 1 rpm, ou seja, à saída do servomotor é de 216 rpm. Para além disso, a relação entre a velocidade e a tensão de referência é de 43.2 rpm/V. Uma vez que a gama da carta D/A (bloco analógico “*Analog Output*”) é de +/-5V, de modo a tirar o máximo proveito de toda a gama, o ganho é dado por:

$$K(Vmin/rad) = \frac{5}{2\pi} \quad (7)$$

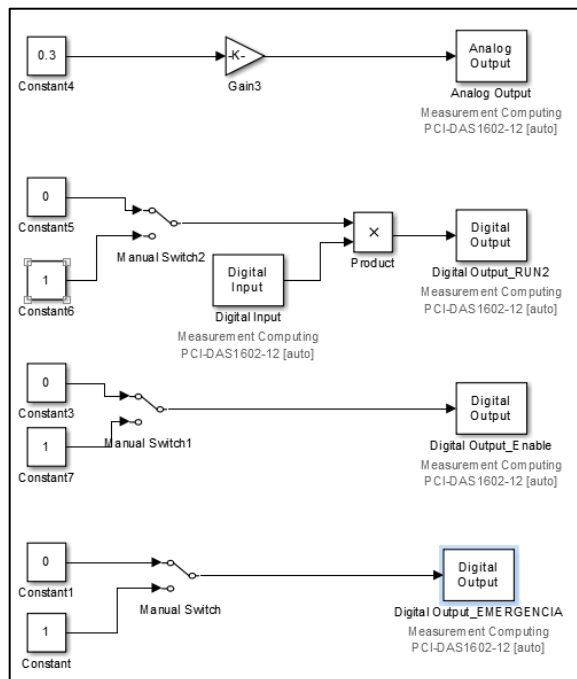


Figura 4.2 - Diagrama de blocos do *Simulink*® relativo ao comando do teste em controlo de deslocamento

Apesar do valor de corrente limitar o binário do servomotor, por questões de segurança, foi introduzido no *Simulink*® uma relação lógica que suspende a “simulação” (ver Figura 4.3) caso os sinais do transdutor sejam superiores a 60 Nm (menor que -60 Nm caso a rotação do servomotor seja no sentido inverso).

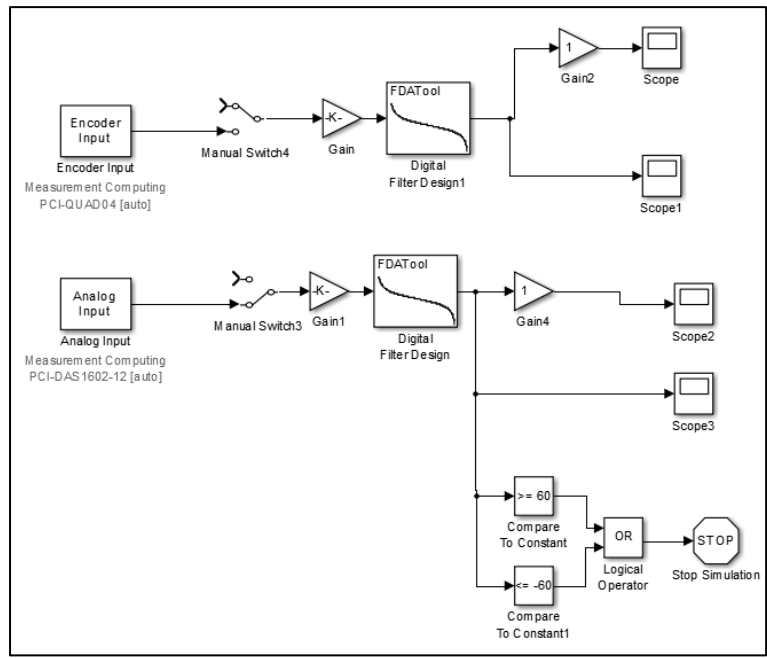


Figura 4.3 - Diagrama de blocos relativo ao comando do teste em controlo de deslocamento.

4.2 Teste de relaxação

No teste de relaxação é pretendido que o servomotor tenha uma velocidade constante até uma determinada posição angular, definida pelo utilizador. De seguida, a posição do servomotor é mantida e a evolução do binário, ao longo do tempo, é monitorizada.

Uma vez que o *driver* efetua o controlo em velocidade, o utilizador apenas tem de indicar a que velocidade o ensaio é realizado, e o valor da posição angular. Durante o ensaio, este valor de posição angular é comparado com o valor lido pelo *encoder*. Enquanto a posição angular lida pelo *encoder* for inferior à posição pretendida, é mantida a velocidade constante. Quando for atingida a posição pretendida, a velocidade passa a valor nulo, mantendo-se a posição do servomotor (Figura 4.4).

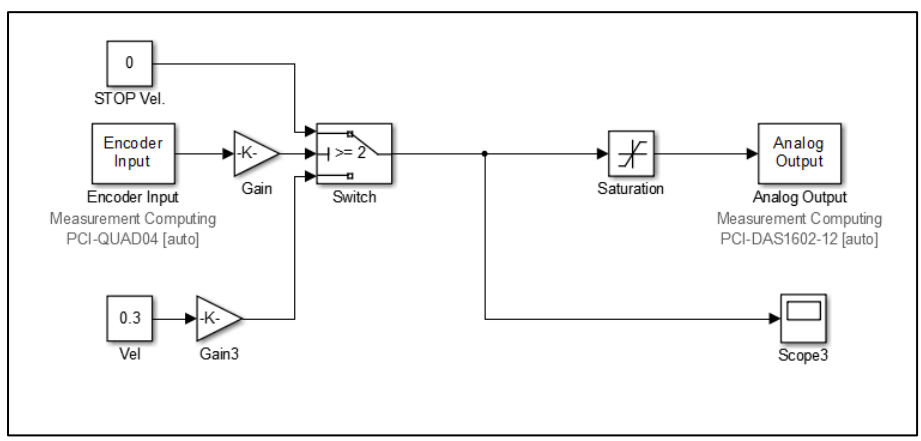


Figura 4.4 - Diagrama de blocos relativo ao teste de relaxação. No caso representado, a velocidade do ensaio é de 0.3 rad/min e a posição pretendida é de 2°.

4.3 Teste em controlo de binário e de fluência

O objetivo destes dois testes consiste em aplicar uma taxa de binário constante, até a um valor limite. Esta variação constante é obtida através de uma referência em rampa. No caso do teste de fluência, é definido pelo utilizador um valor máximo de binário, valor esse que é assegurado pela saturação do sinal em rampa. O teste de controlo de binário não tem um limite teórico de binário. Neste caso, o teste é realizado a um aumento constante do binário ao longo do tempo, e o teste só termina quando o provete fraturar. No entanto, tendo em conta que o limite da máquina são os 60 Nm, é necessário ter um saturador de 60 Nm (ou menor) após a referência em rampa. Desta forma, o comando, o controlador e a interface são os mesmos para ambos os testes.

4.3.1 Determinação do tipo de controlador

Um elemento fundamental na cadeia cinemática é o provete e consequentemente o adesivo a ser testado. O módulo de rigidez do adesivo tem um papel importante na determinação dos parâmetros do controlador, como serão analisados de seguida.

Tendo em conta as disponibilidades, foram utilizados dois materiais com propriedades distintas (Tabela 4.1): um provete em PVC e um adesivo estrutural, 3M™ AF 163-2K (Figura 4.5). Este último foi utilizado igualmente em testes de validação da máquina, concretamente nos testes em controlo de deslocamento angular, devido ao facto de ter sido estudado numa tese de mestrado no ADFEUP (Palmares, 2016).



Figura 4.5 - Na imagem da esquerda está representado o provete de PVC e na imagem da direita o provete com o adesivo 3M™ AF 163-2K.

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do PVC e 3M™ AF 163-2K (EduPack, 2016, Palmares, 2016).

Propriedades	Unidades	PVC	3M™ AF 163-2K
Módulo rigidez ao corte	GPa	1	0.563
Módulo Young	GPa	3	1.5
Resistência à tração	MPa	50	46.93
Elongação após rotura	%	50-80	11

Visto que o teste é realizado em controlo de binário e que existe naturalmente acesso aos sinais do transdutor de binário, será utilizado um controlo em malha fechada (Figura 4.6). Tal controlador utiliza como anel interno o controlador de velocidade implementado pelo *driver*, sendo do tipo PID. Trata-se assim de um controlador de binário baseado em controlo de velocidade.

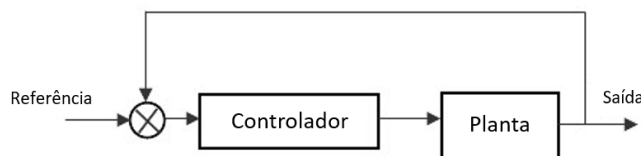


Figura 4.6 - Esquema de um sistema controlado em malha fechada.

Sendo o objetivo o de determinar o tipo de controlador, como ponto de partida mais simples, inicia-se com um controlador com ganho proporcional unitário (Figura 4.7). Foi imposta uma solicitação em degrau de 6 Nm (10 vezes menor que a capacidade máxima da máquina). Naturalmente que esta solicitação é demasiada exigente para o teste pretendido, visto que o objetivo é controlar com uma referência em rampa, isto é, com um crescimento controlado e constante de binário.

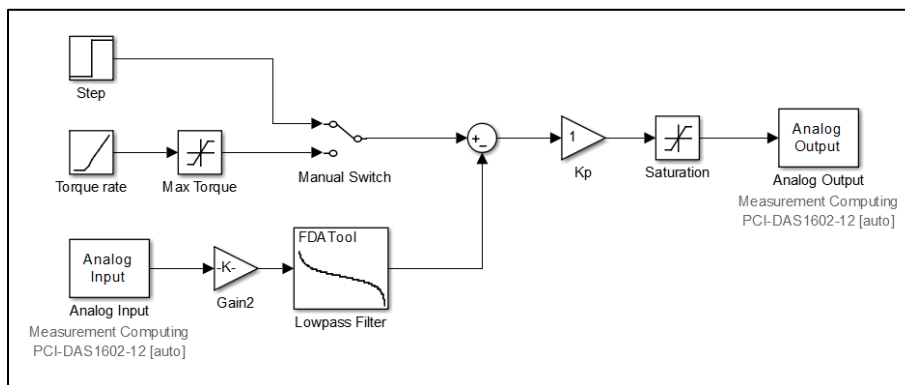


Figura 4.7 - Diagrama de blocos em *Simulink*® relativamente ao controlador de binário. Foi introduzido um “*Manual Switch*” para facilitar a troca do tipo de referência.

Primeiramente foi utilizado o provete em PVC, aparentemente mais rígido que o adesivo 3M™ AF 163-2K. O resultado obtido está representado no gráfico da Figura 4.8.

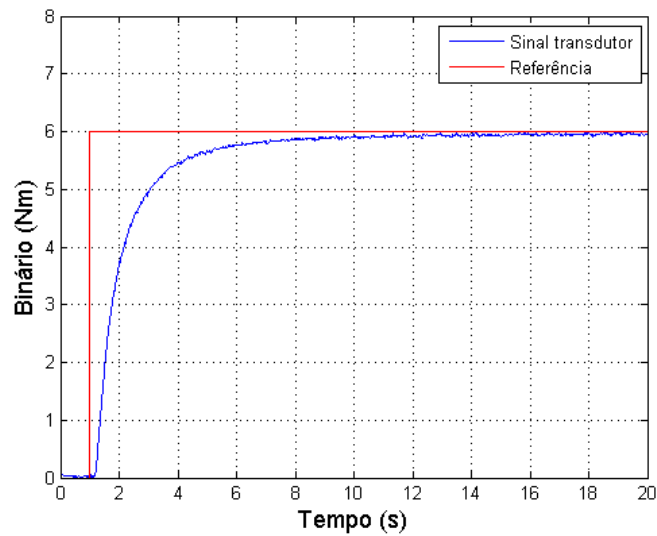


Figura 4.8 - Resposta a uma solitação em degrau com ganho proporcinal $Kp=1$ V/Nm com a utilização do provete em PVC.

Após uma análise global, esta resposta pareceu satisfatória, aparentemente com o erro a tender para zero. No entanto, após uma análise mais detalhada do sinal do erro, verifica-se que na verdade não é obtido erro nulo, ou seja, surge um *offset* entre o sinal de referência e o sinal de saída (Figura 4.9).

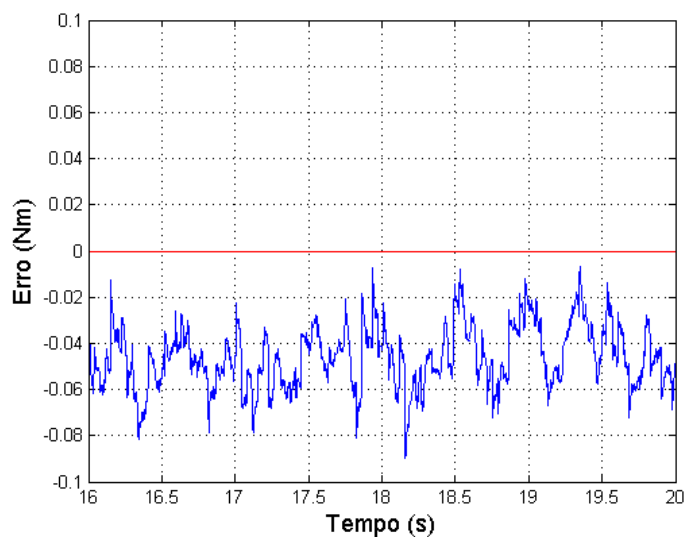


Figura 4.9 - Erro da resposta ao degrau com ganho proporcinal $Kp=1$ V/Nm para o provete em PVC

O primeiro passo seria aumentar o ganho proporcional, no entanto, dado que o sistema parece ser do tipo 0, isso pode levar à instabilidade do sistema e não anularia o erro, como pode ser observado no esquema da Figura 4.10 (Ogata, 2010).

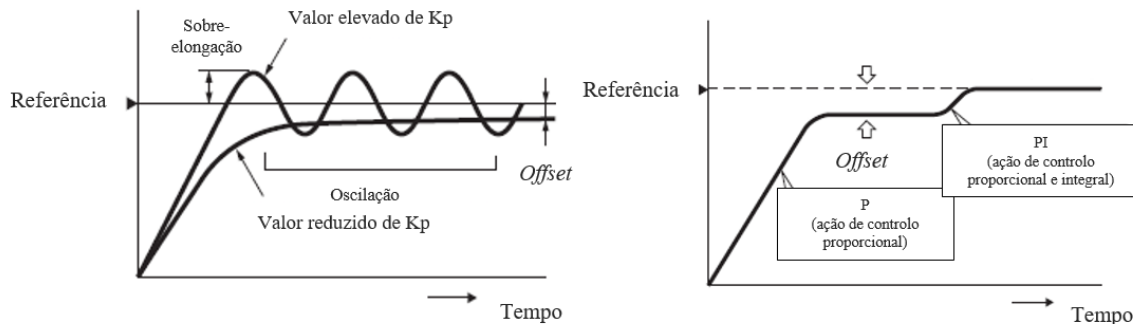


Figura 4.10 - Resposta de um sistema com um controlador proporcional com e sem ação integral. Adaptado (OMRON, 2016)

Na tentativa de perceber se há efetivamente um erro constante em regime permanente, o valor de referência foi aumentado para 10 Nm. Neste caso, é possível observar a ocorrência de um erro constante entre a resposta e a referência (Figura 4.11). Além disso, foi imposta uma solicitação em rampa com declive de 0,5 Nm/s (Figura 4.13). Caso se trate de um sistema do tipo 0, o sinal de saída tende a divergir do sinal da referência, ou seja, há um aumento do erro ao longo do tempo.

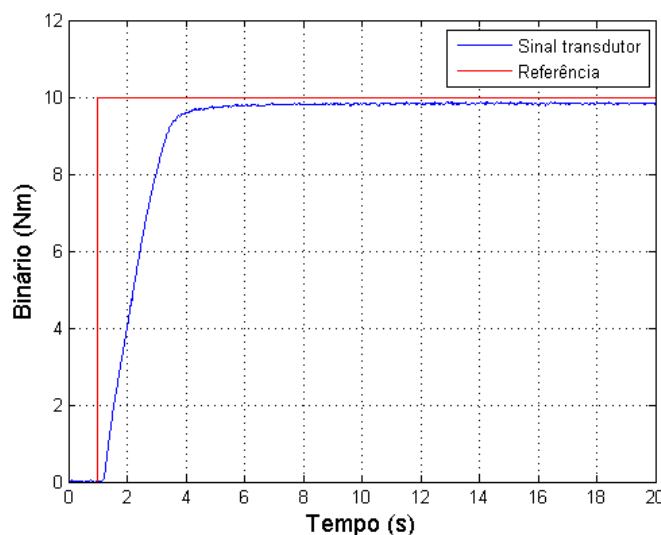


Figura 4.11 - Resposta a uma solicitação em degrau com ganho proporcional $K_p=1$ V/Nm com a utilização do provete em PVC.

É possível observar que efetivamente o sinal de saída tende a divergir do sinal de referência (Figura 4.13 e Figura 4.14), assim como a existência de um pico no sinal do erro no início da

resposta em rampa, por volta dos 3 segundos (Figura 4.14). Este comportamento algo irregular é esperado em sistemas em que o sinal de entrada é dado numa resposta em rampa, seja ele do tipo 0 ou tipo 1 (Figura 4.12). Contudo, pode-se relacionar com a “zona morta” que o sistema apresenta, como foi visto no capítulo 3. Este fenómeno está associado às folgas que o redutor de velocidade possui.

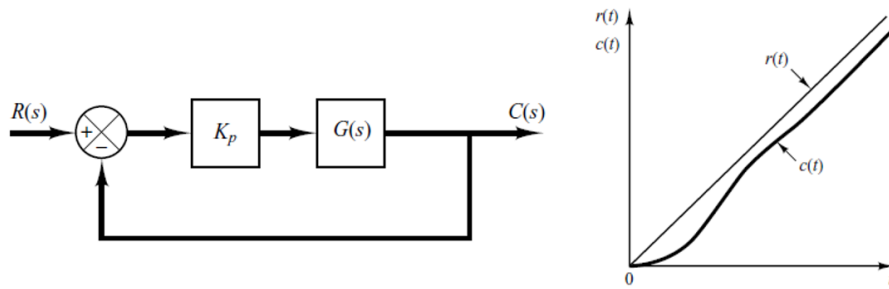


Figura 4.12 - Resposta a uma solicitação em rampa de um sistema com ganho proporcional e de tipo 1. Adaptado (Ogata, 2010).

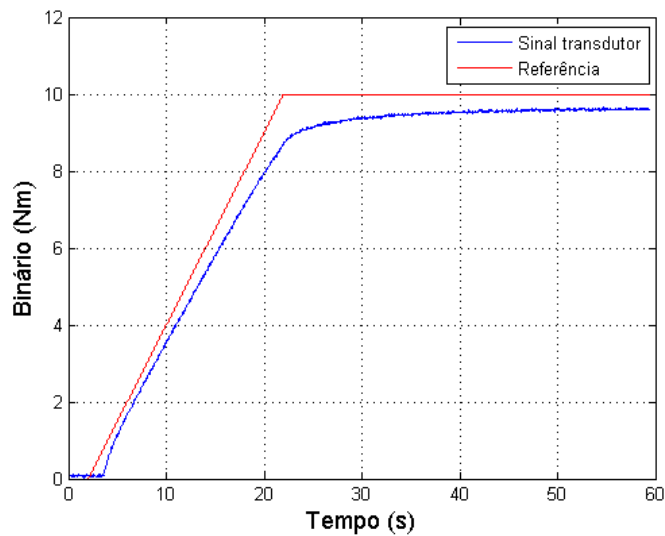


Figura 4.13 - Resposta a uma solicitação em rampa com ganho proporcional $Kp=1$ V/Nm com a utilização do provete em PVC.

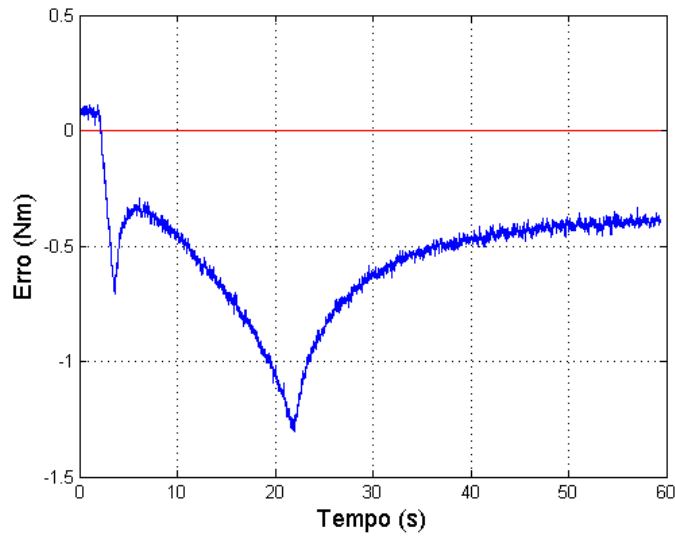


Figura 4.14 - Erro da resposta à rampa com ganho proporcional $K_p=1$ V/Nm para o provete em PVC

Após esta análise, concluiu-se que é necessário haver uma ação integral de modo a anular o erro entre o sinal de referência e o sinal de saída. Tem-se assim que o controlador deverá ser do tipo PI.

De seguida, o mesmo procedimento anteriormente descrito é aplicado ao segundo provete, ao adesivo estrutural 3M™ AF 163-2K, desta vez iniciando com uma resposta em degrau com declive 0.5 Nm/s e binário máximo de 10 Nm, igualmente com um ganho proporcional unitário (Figura 4.15).

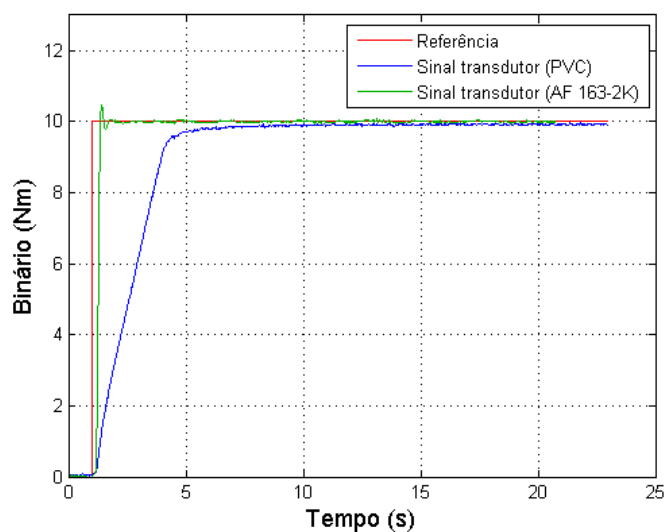


Figura 4.15 - Comparação da resposta ao degrau com ganho proporcional unitário entre PVC e o adesivo 3M™ AF 163-2K.

É possível verificar que com um ganho proporcional unitário, na resposta ao degrau, resulta num tempo de subida menor e numa sobre-elongação do sinal de saída (Figura 4.15). É de relembrar que o módulo de rigidez ao corte do 3M™ AF 163-2K é cerca de metade do módulo do PVC, este comportamento é considerado normal. Aparentemente está-se perante um sistema do tipo 1, com o erro entre a referência e o sinal de saída a tender para zero.

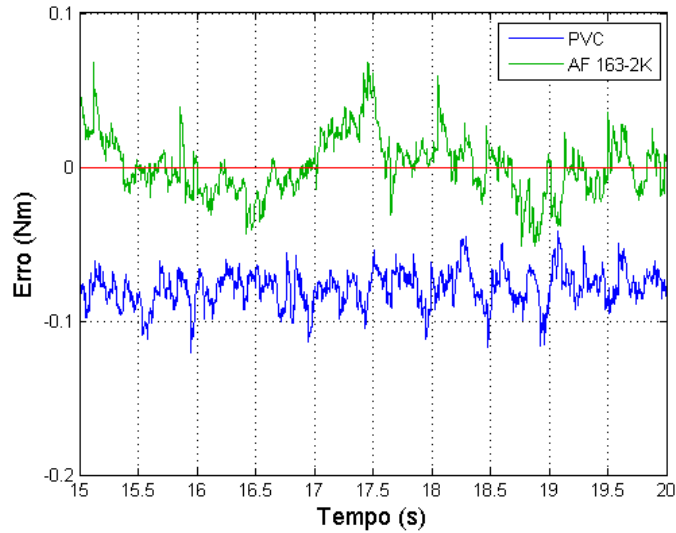


Figura 4.16 - Comparação do erro da resposta ao degrau com ganho proporcional unitário entre PVC e o adesivo 3M™ AF 163-2K.

De seguida foi imposto um sinal de referência em rampa, nas mesmas condições utilizadas no provete em PVC (rampa com declive 0.5 Nm/s) com uma saturação de 6 Nm, mas desta vez com um ganho proporcional de 0.5 V/Nm (Figura 4.17).

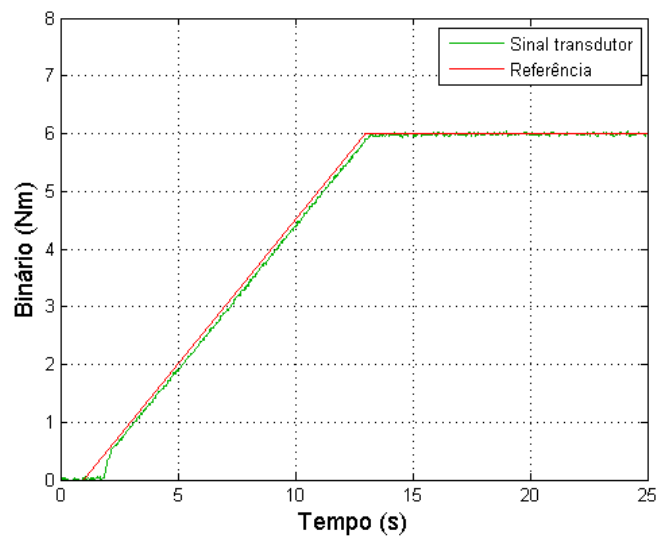


Figura 4.17 - Resposta a uma solicitação em rampa com ganho proporcional $K_p=0.5$ V/Nm com a utilização do adesivo 3M™ AF 163-2K.

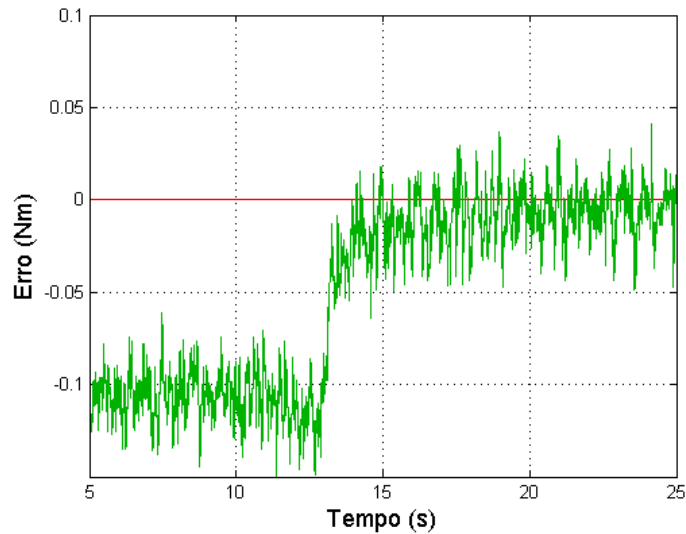


Figura 4.18 - Erro da resposta à rampa com ganho proporcional $K_p=0.5$ V/Nm para o provete em 3M™ AF 163-2K.

Pode-se aferir que se trata de um sistema do tipo 1, com o erro entre a referência e o sinal de saída a resultar num valor aproximadamente constante, numa resposta em rampa, e num erro pequeno, na resposta com valor de referência constante (6 Nm). Pode-se observar novamente um ligeiro atraso do sinal nos instantes iniciais, comum em sistemas do tipo 1, mas possivelmente relacionado com as folgas do redutor de velocidade anteriormente identificado (Figura 4.17).

Visto que o teste em controlo de binário é realizado com o sinal de referência em rampa com declive igual ao valor desse mesmo binário, e uma vez que é obtido erro constante, o declive do sinal de saída é igual ao da referência. Este controlador cumpre assim os requisitos dos testes de controlo de binário e fluência de modo satisfatório. Não obstante, é de relembrar que este teste é particular para este adesivo. Naturalmente que o objetivo é poder testar os mais variados adesivos com esta máquina de torção. Desta forma, foi decidido adicionar uma ação integral ao último controlador, tornando-o num controlador PI, com o objetivo de testar, com esse mesmo controlador, a amostra de PVC.

4.3.2 Determinação dos ganhos dos controladores

O próximo passo, novamente experimental, passa por determinar os ganhos proporcional e integral dos controladores. Existem vários métodos heurísticos para o ajuste de controladores PID, um dos métodos mais conhecidos é o chamado Método Ziegler-Nichols (ZN) (Ogata, 2010).

São métodos que foram desenvolvidos experimentalmente a partir de um elevado número de casos e que foram condensados numa tabela de coeficientes. Este método não garante ótimos resultados, no entanto, é um bom ponto de partida para posterior afinação, como será apresentado de seguida (Ogata, 2010).

Ziegler e Nichols propõem dois métodos para ajuste dos controladores PID. O primeiro método tem como base um sistema de controlo em malha aberta, enquanto que o segundo baseia-se num sistema de controlo em malha fechada. Foi com base neste segundo método que foram estimados os ganhos do controlador (Ogata, 2010).

- **2º Método de Ziegler-Nichols**

Num sistema de controlo em malha fechada e partindo de um controlador PID, os ganhos K_i e K_d são igualados a zero (Figura 4.19). Posteriormente, o ganho proporcional K_p é aumentado desde 0 até a um valor crítico, K_{cr} , no qual o sinal de saída apresenta uma oscilação sustentada (Figura 4.20).

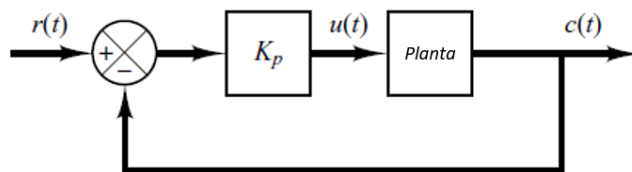


Figura 4.19 - Controlador apenas com ganho proporcional. Adaptado (Ogata, 2010)

Os parâmetros K_p , K_i e K_d (ou T_i e T_d) são então obtidos a partir do ganho crítico, K_{cr} , e do respetivo período crítico de oscilação, P_{cr} (Figura 4.20), de acordo com as expressões presentes na Tabela 4.2.

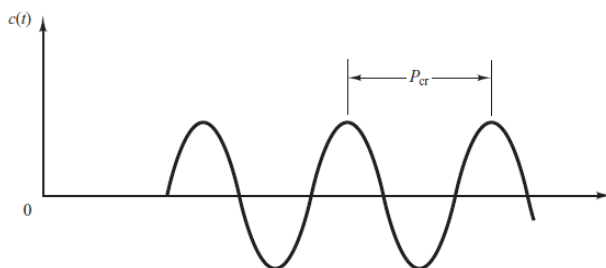


Figura 4.20 - Oscilação sustentada de período P_{cr} (Ogata, 2010).

Tabela 4.2 - Expressões para cálculo dos parâmetros em função do tipo de controlador. Adaptado (Ogata, 2010).

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$P_{cr}/1.2$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Foi este método que serviu como ponto de partida para o cálculo dos ganhos proporcional e integral do controlador PI, para ambos os testes descritos anteriormente, ou seja, para a amostra de PVC e de 3M™ AF 163-2K. Na Figura 4.21 está representado o método utilizado na determinação do controlador PI para o caso do provete com o adesivo 3M™ AF 163-2K.

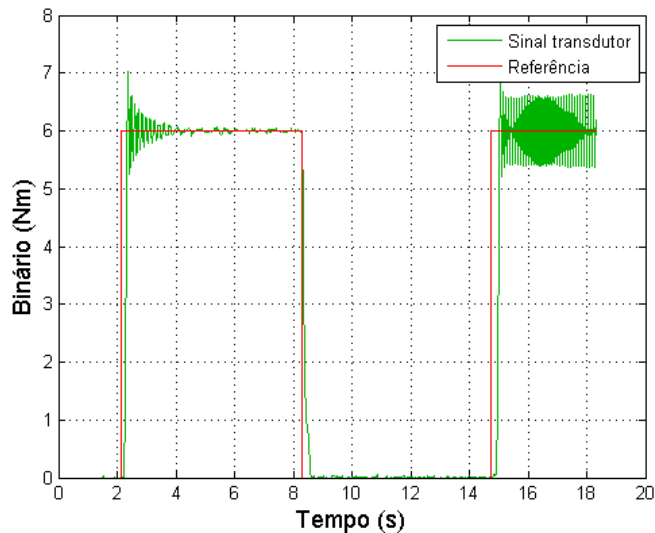


Figura 4.21 - Obtenção de uma resposta do sinal de saída sustentada.

Inicialmente, por volta dos 2 segundos, foi utilizado um ganho $K_p=4$ V/Nm, visto que para um ganho unitário apenas havia uma ligeira sobre-elongação (Figura 4.21). Uma vez que o sinal de saída não apresentou uma oscilação sustentada, o ganho foi novamente aumentado, desta vez para 5 V/Nm, por volta dos 15 segundos. Como pode ser observado, desta vez o sinal de saída apresentou uma oscilação sustentada, que posteriormente foi analisada ao pormenor, de modo a obter-se o período da resposta (Figura 4.22). Os resultados obtidos estão representados na Tabela 4.3.

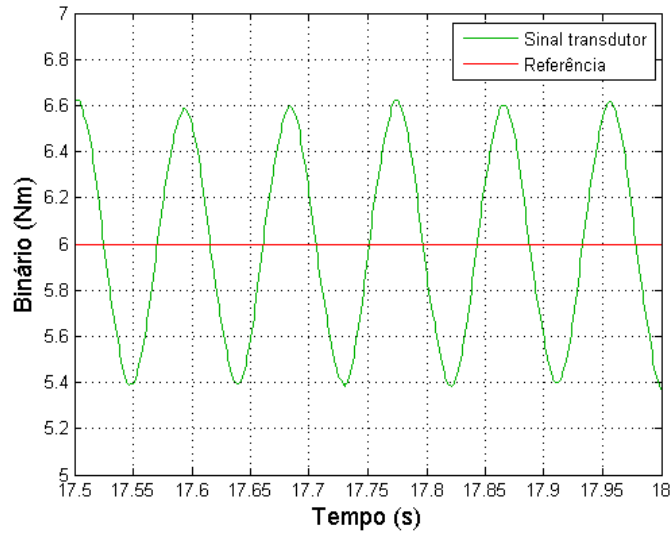


Figura 4.22 - Pormenor da oscilação sustentada.

Tabela 4.3 - Resultados obtidos para o ganho proporcional e para a constante de tempo integral.

Provetes	Parâm. críticos		Parâm. ZN		Parâm. ajustados	
	K_{cr} (V/Nm)	P_{cr} (s)	K_p (V/Nm)	T_i (s)	K_p (V/Nm)	T_i (s)
PVC	12	0.3	5.4	0.25	4.5	1.125
3M™ AF 163-2K	5	0.092	2.25	0.077	1.8	2

Os parâmetros ajustados experimentalmente diferiram um pouco dos resultados obtidos pelo método ZN, em particular a constante de tempo integral. A resposta à rampa obtida em cada um dos controladores está representada na Figura 4.23 e Figura 4.25.

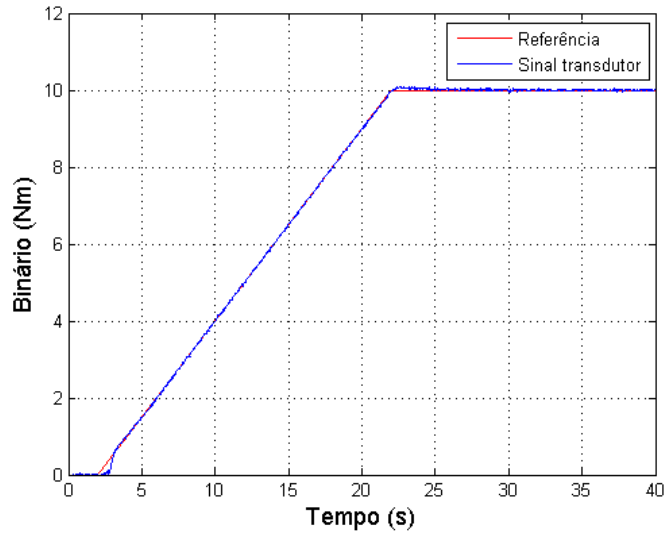


Figura 4.23 - Resposta do sistema à rampa com o controlador PI, com os respectivos ganhos ajustados, para amostra de PVC.

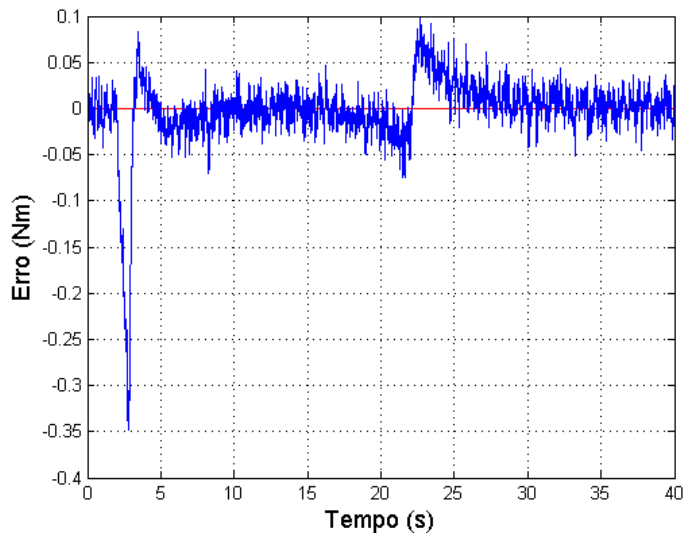


Figura 4.24 - Erro entre a resposta do sistema e a referência em rampa com o controlador PI, com os respectivos ganhos ajustados, para amostra de PVC.

Nos instantes iniciais e na zona inicial do sinal de referência constante continuaram a aparecer os picos máximos do erro, em ambos os controladores. Estes picos podem ser minimizados com a geração de uma rampa mais suave nos instantes iniciais e finais. No entanto, os resultados obtidos para o controlador PI do adesivo 3M™ AF 163-2K foram menos satisfatórios que os resultados obtidos para um simples controlador proporcional. Após análise da Figura 4.26 observa-se que, apesar de se obter um erro permanente próximo de zero entre o sinal de referência em rampa e o sinal de saída, na zona do sinal de referência constante o sistema adquiriu um comportamento mais oscilatório, quando comparado com o controlador proporcional.

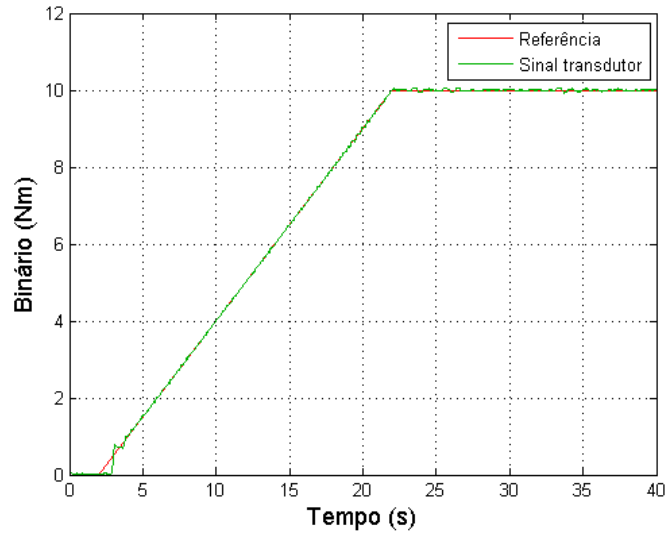


Figura 4.25 - Resposta do sistema à rampa com o controlador PI, com os respectivos ganhos ajustados, para o adesivo 3M™ AF 163-2K.

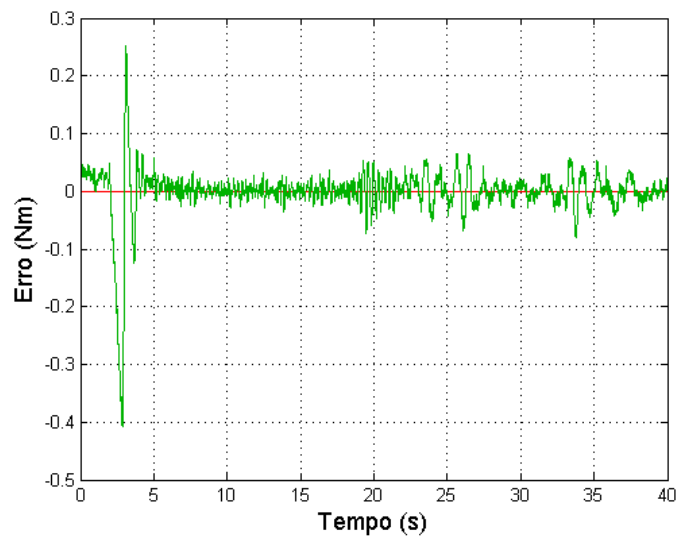


Figura 4.26 - Erro entre a resposta do sistema e a referência em rampa com o controlador PI, com os respectivos ganhos ajustados, para o adesivo 3M™ AF 163-2K.

Por fim, a amostra de PVC foi testada no controlador PI obtido para o adesivo 3M™ AF 163-2K, de modo a se perceber a versatilidade deste controlador (Figura 4.27).

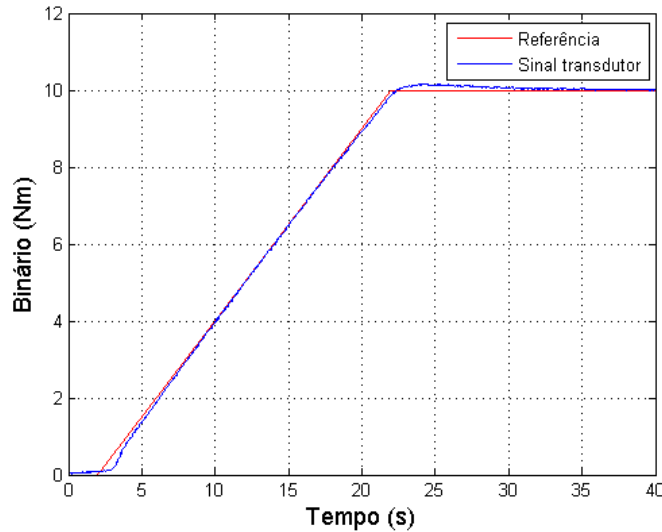


Figura 4.27 - Resposta do sistema com a amostra de PVC à rampa com o controlador PI projetado para o adesivo 3M™ AF 163-2K,

Após análise da Figura 4.27 e Figura 4.28 é observado que existem erros significativos no início e no fim da rampa, ainda que da mesma ordem de grandeza dos obtidos no controlador apresentado anteriormente. Além disso, o comportamento do sistema ao longo da rampa não é linear, isto é, a variação de binário não é constante até atingir o valor de referência constante. Quando atinge a saturação verifica-se também que há uma sobre-elongação do sinal, com um tempo de acomodação aproximadamente de 15 segundos.

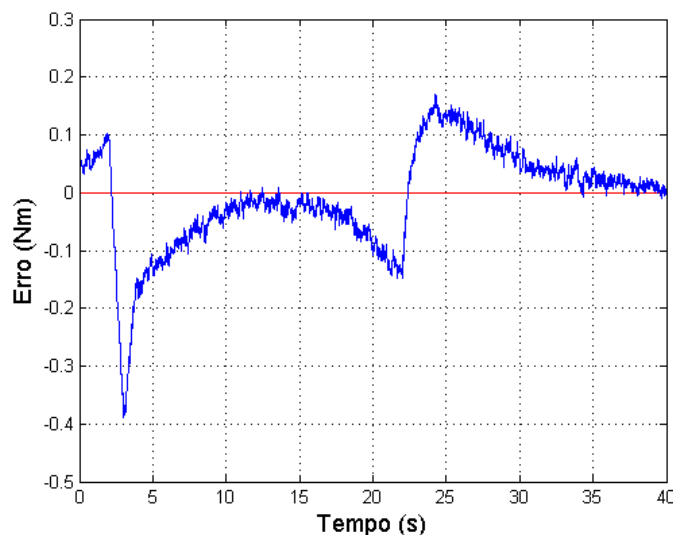


Figura 4.28 - Erro da resposta da Figura 4.27

Em forma de conclusão deste ponto, foi observado que o comportamento do sistema e consequentemente do controlador, é dependente do adesivo a ser testado. Antes do início do projeto deste controlador, foi decidido optar por um simples controlador PID pois, na maioria dos casos, consegue resolver de forma eficiente muitos dos problemas.

Após análise dos resultados obtidos, surgiram duas soluções possíveis quanto a trabalhos futuros em relação ao controlador de binário: tendo em conta que o módulo de rigidez da maioria dos adesivos varia entre 1 MPa e 2000 MPa, o próximo objetivo passa por definir diferentes parâmetros do controlador para diferentes gamas de módulo de rigidez, em que o utilizador apenas tem de indicar em que gama se insere o adesivo a testar, e o controlador é escolhido em função dessa informação; a outra solução passa pelo estudo e desenvolvimento de um controlador robusto à variação da rigidez do adesivo, sem que o utilizador tenha de se preocupar em indicar a rigidez desse adesivo.

5 Dispositivos para medir a deformação angular

Um dos objetivos desta dissertação passou por perceber se ao determinar a rigidez da máquina, isto é, a contribuição da deformação da máquina num ensaio de resistência ao corte de uma junta adesiva, fosse justificável utilizar apenas o *encoder* do servomotor da medição da deformação angular do adesivo. Após alguns testes com amostras de adesivos concluiu-se que, implementar um algoritmo que corrigisse em tempo real o gráfico com a resposta “Binário vs. Deslocamento Angular” não seria a melhor opção, uma vez que a ocorrência de deslizamentos entre o provete e a amostra era algo frequente. Mesmo com a utilização de provetes com faces quadradas, verificou-se que por vezes ocorria esmagamento do provete por parte das amarras. Consequentemente, a melhor solução seria a utilização de um dispositivo que meça a deformação relativa entre os dois substratos de um provete. De seguida serão apresentados alguns dispositivos e soluções de modo a medir essa deformação.

5.1 Câmara de vídeo microscópica

Uma solução para determinar o deslocamento angular passa pela utilização de uma câmara de vídeo. Esta é uma solução já adotada pelo ADFEUP no caso dos ensaios de tração. Uma câmara de vídeo grava o ensaio, que com a ajuda de linhas de referência junto à zona de adesivo, permite obter o deslocamento relativo dos substratos (Figura 5.1). O vídeo pode ser processado logo de seguida, por exemplo com a ajuda do *software Matlab*®. Naturalmente que a qualidade da medição depende da resolução da imagem, pelo que a utilização de uma câmara de vídeo microscópica é aconselhável. Além disso, esta solução só se aplica em pequenos deslocamentos, em função do diâmetro do provete. A relação pode ser vista na Figura 5.2, que é dada pela seguinte equação:

$$S = r\theta = r \tan^{-1} \left(\frac{\delta}{r} \right) \quad (8)$$

onde S representa o deslocamento angular, r o raio e δ o deslocamento linear medido.

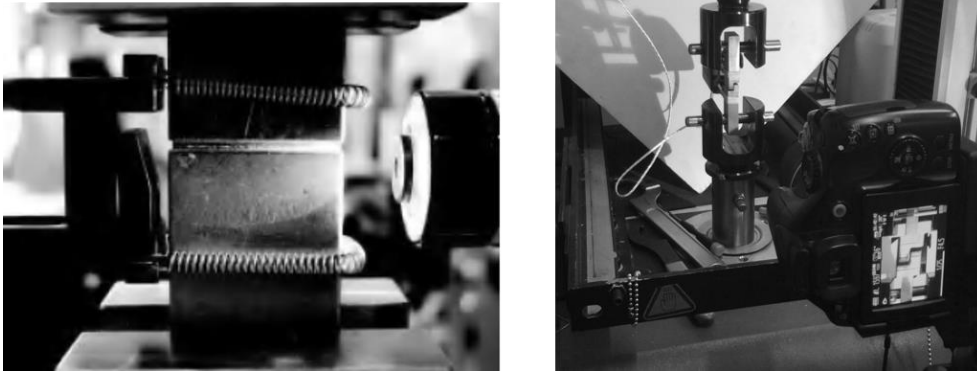


Figura 5.1 - Na imagem à esquerda está representada uma câmara de vídeo microscópica num ensaio TAST (da Silva *et al.*, 2012). Na imagem à direita, novamente um ensaio TAST, mas com uma câmara de vídeo convencional.

- **Método experimental desenvolvido**

A técnica anteriormente descrita foi aplicada na determinação do deslocamento angular do provete com o adesivo 3M™ AF 163-2K, num teste em controlo de deslocamento. Passou pela utilização de duas fitas, uma em cada substrato, com traços alinhados e igualmente espaçados (Figura 5.2). Com a utilização de uma câmara de vídeo, o deslocamento relativo entre as duas fitas traçadas foi monitorizado e gravado, e de seguida foi processado com o *software Matlab®* (código desenvolvido pelo ADFEUP). No entanto, os resultados obtidos não foram satisfatórios, uma vez que foi utilizada uma câmara convencional de baixa resolução. Para além disso, a densidade das linhas traçadas era elevada, o que dificultou no processamento do vídeo.

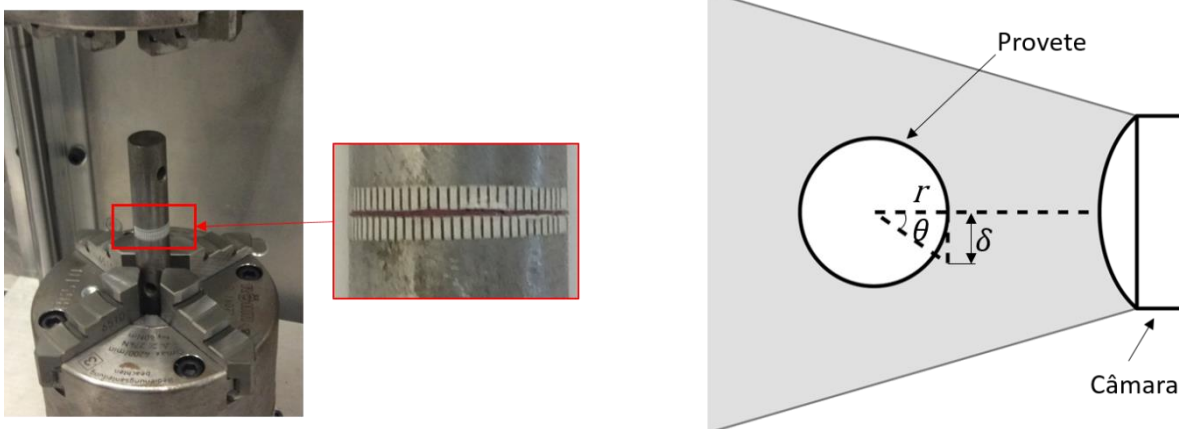


Figura 5.2 - Na imagem da esquerda o provete com as duas fitas traçadas. Na imagem da direita, um esquema da utilização de uma câmara de vídeo na medição do deslocamento angular.

5.2 Extensómetro axial/torsional

A *Epsilon Tech*® é uma empresa com uma vasta gama de extensómetros. Em particular possui o modelo 3550 que tem como função medir os deslocamentos axiais e torsionais em simultâneo (Figura 5.3). É utilizado preferencialmente em provetes cilíndricos com diâmetro entre 9.5 e 25.4 mm. No entanto, a série com maior amplitude da medição da deformação angular é o modelo 3550-025M-005-003-ST, com capacidade para medir até +/- 3°, ainda longe dos 70° especificado para a máquina de torção (Tech, 2017).

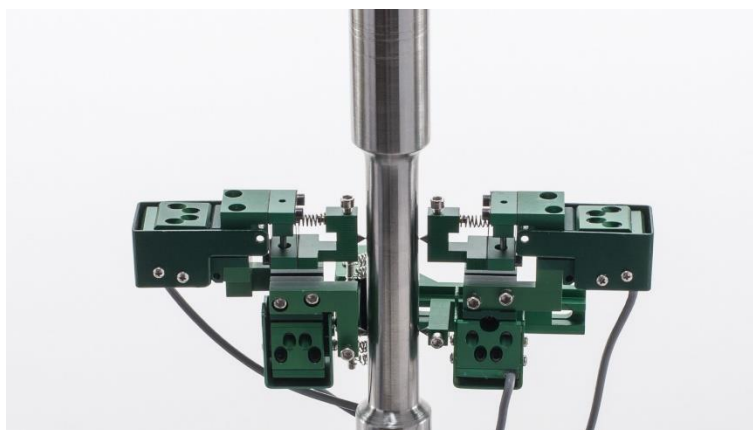


Figura 5.3 - Extensómetro axial/torsional, modelo 3550 (Tech, 2017).

Tem a vantagem de poder ser ligado diretamente à maioria das máquinas de ensaios, ou caso contrário, ligações eletrónicas apropriadas são fornecidas caso seja necessário ligar diretamente a uma placa de aquisição de dados. Há assim a possibilidade da leitura do deslocamento angular se realizar em tempo-real. Além disso, estes extensómetros são desenhados para medir diretamente a deformação de corte, sem a necessidade de saber o raio do provete a ser testado. As restantes características estão presentes na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Características do extensómetro axial/torsional modelo 3550 da *Epsilon Tech*® (Tech, 2017).

Extensómetro Axial/Torsional	Unidades	Modelo 3550
Tensão alimentação	VDC	5 a 10
Tensão de saída	mV/V	2 a 4
Linearidade	%	≤0.15
Temperatura de funcionamento	°C	-40 a 100

5.3 LVDT's

A utilização de LVDT's (*Linear Variable Differential Transducers*) é mais uma das alternativas na medição de pequenas deformações de juntas adesivas. Este método, representado na Figura 5.4, já foi utilizado em trabalhos passados onde foram realizados ensaios de torção em juntas adesivas (Thomas e Adams, 1996). O método consiste na utilização de um par de LVDT's fixos em cada um dos substratos, num suporte com dimensões bem definidas. De seguida, o valor da deformação angular é obtido pela razão entre o valor lido pelo LVDT e o comprimento do suporte.

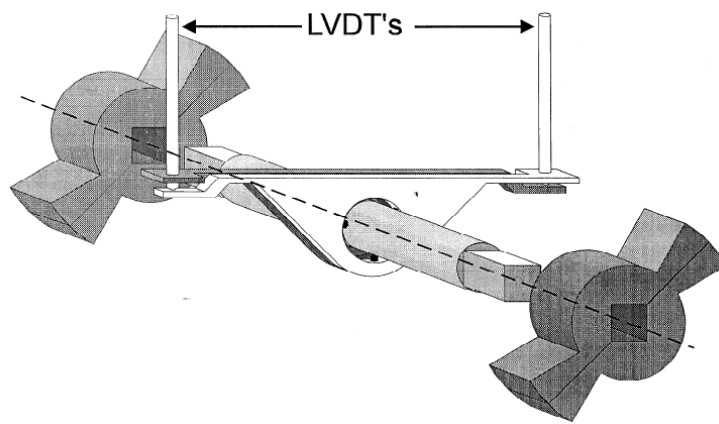


Figura 5.4 - Pormenor da utilização do LVDT num provete de juntas topo a topo em torção (Thomas e Adams, 1996).

6 Comando e interface gráfica com o utilizador

A interface entre o utilizador e a máquina, é assegurada pelo painel de comando e pela interface gráfica. O painel de comando contém as botoneiras de arranque, paragem, *reset*, de emergência e de corte geral. Cabe à interface gráfica assegurar que os ensaios são devidamente monitorizados, assim como permitir que certos dados e valores de referência são introduzidos no sistema.

Uma vez que o *software* utilizado no controlo do sistema é o *Matlab*®, este já disponibiliza uma ferramenta, o *GUIDE*, para criar as interfaces gráficas. No entanto, o seu *design* e os seus comandos são um pouco limitados.

Nas últimas duas dissertações foram criadas interfaces, porém, não passaram de maquetes (Costa, 2015, Guimarães, 2013). Ambas as interfaces não conseguiam monitorizar em tempo-real qualquer ensaio que estivesse a ser realizado. Para além disso, tinham em falta alguns dados importantes do ensaio, como o valor numérico do binário, deslocamento angular e o tempo de ensaio. Foi desta forma decidido criar de raiz uma interface, baseada em alguns *software* das mesmas empresas que vendem máquinas de ensaios universais (Figura 6.1).

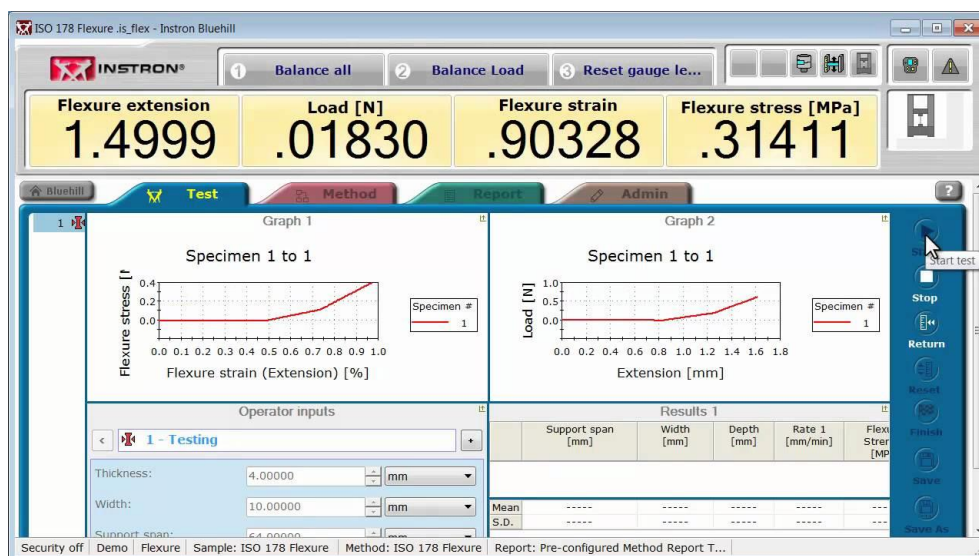


Figura 6.1 - *Software* Bluehill® da empresa Instron®

Uma das mudanças tomadas foi a redução de “4 testes” para “3 testes”, isto é, uma vez que tanto o controlador como o comando são os mesmos para os testes em controlo de binário e de fluência, foi decidido que a interface fosse também a mesma para ambos os testes (Figura 6.2).

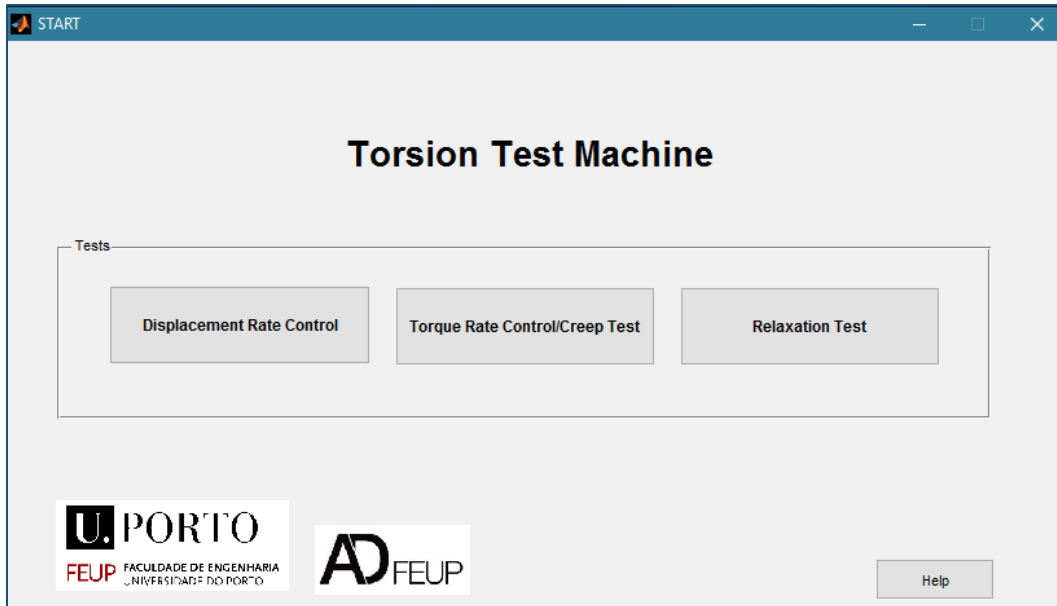
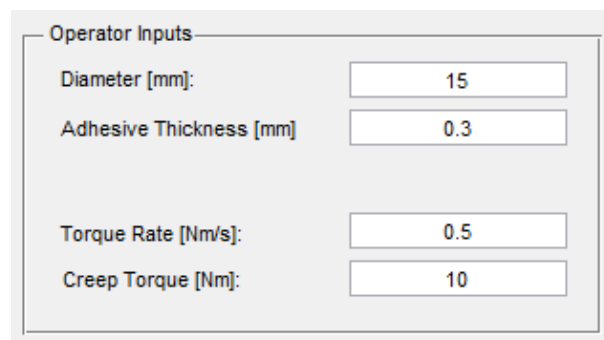


Figura 6.2 - Janela inicial da interface

Após aberta a janela inicial da interface, o utilizador escolhe o teste que pretende realizar, como por exemplo o “Torque Rate Control/Creep Test”. Aqui o utilizador tem de definir os parâmetros geométricos do provete, tais como o “Diameter” e “Adhesive Thickness” (Figura 6.3). De seguida indica o “Torque Rate”, ou seja, o valor constante de crescimento para o binário e o limite máximo desse binário, caso seja um teste de relaxação (“Creep Troque”). Caso contrário, o utilizador pode definir um valor elevado para o limite máximo de binário (por exemplo 59 Nm) e consegue assim obter um teste exclusivamente em controlo de binário.



Operator Inputs	
Diameter [mm]:	15
Adhesive Thickness [mm]	0.3
Torque Rate [Nm/s]:	0.5
Creep Torque [Nm]:	10

Figura 6.3 - Painel onde o utilizador indica algumas constantes importantes para o teste

De seguida o utilizador pode indicar o tipo de gráfico que pretende visualizar, seja ele “Torque vs. Angular Displacement”, “Shear Stress vs. Shear Strain” ou ambos (Figura 6.4).

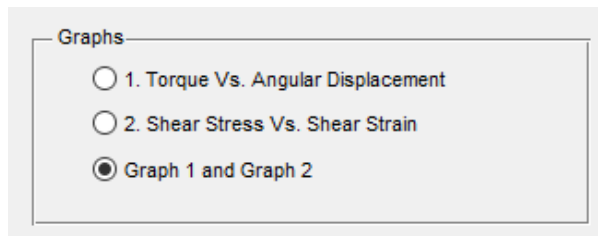


Figura 6.4 - Painel “Botão de radio” onde o utilizador escolhe o tipo de gráfico que quer visualizar.

Estando em condições de começar o ensaio, é necessário verificar e assegurar que no painel de controlo, o servomotor esteja destravado, o interruptor geral esteja em “ON” e a botoneira luminosa “START” (verde) esteja ligada. De seguida, o utilizador pode pressionar o botão da interface gráfica que diz “START” (Figura 6.5).



Figura 6.5 - Painel de comando

Quando o ensaio estiver a decorrer, o botão que diz “STOP” passa a ativo, e o utilizador pode pressioná-lo quando quiser. Caso seja atuado a botoneira de emergência do painel de controlo, o utilizador necessita de parar o ensaio logo de seguida, destravar o botoneira de emergência, pressionar a botoneira “RESET” e verificar as condições anteriormente descritas, caso queira começar um novo ensaio.

Caso o utilizador use provetes com faces quadradas, há por vezes a necessidade de alinhar as faces do provete com os grampos das buchas. Quando assim é, ao carregar no botão “Left/Right”, abre-se uma janela, como na Figura 6.6, na qual o utilizador tem controlo no sentido de rotação do servomotor (Está definida uma velocidade de 0.2 rad/min).

6 Comando e interface gráfica com o utilizador

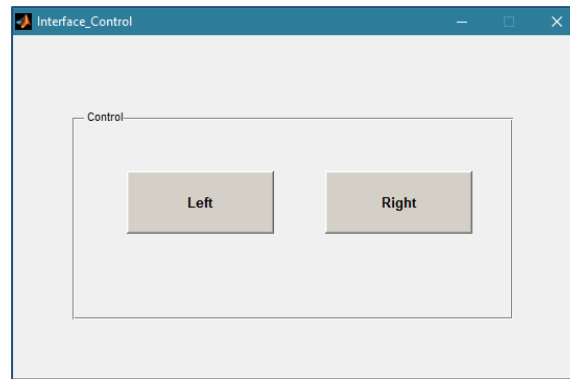


Figura 6.6 - Janela de controlo do servomotor.

O aspeto final da interface no teste em controlo de binário e de fluência (“Torque Rate Control”) está representado na Figura 6.7. As restantes interfaces podem ser consultadas em anexo.

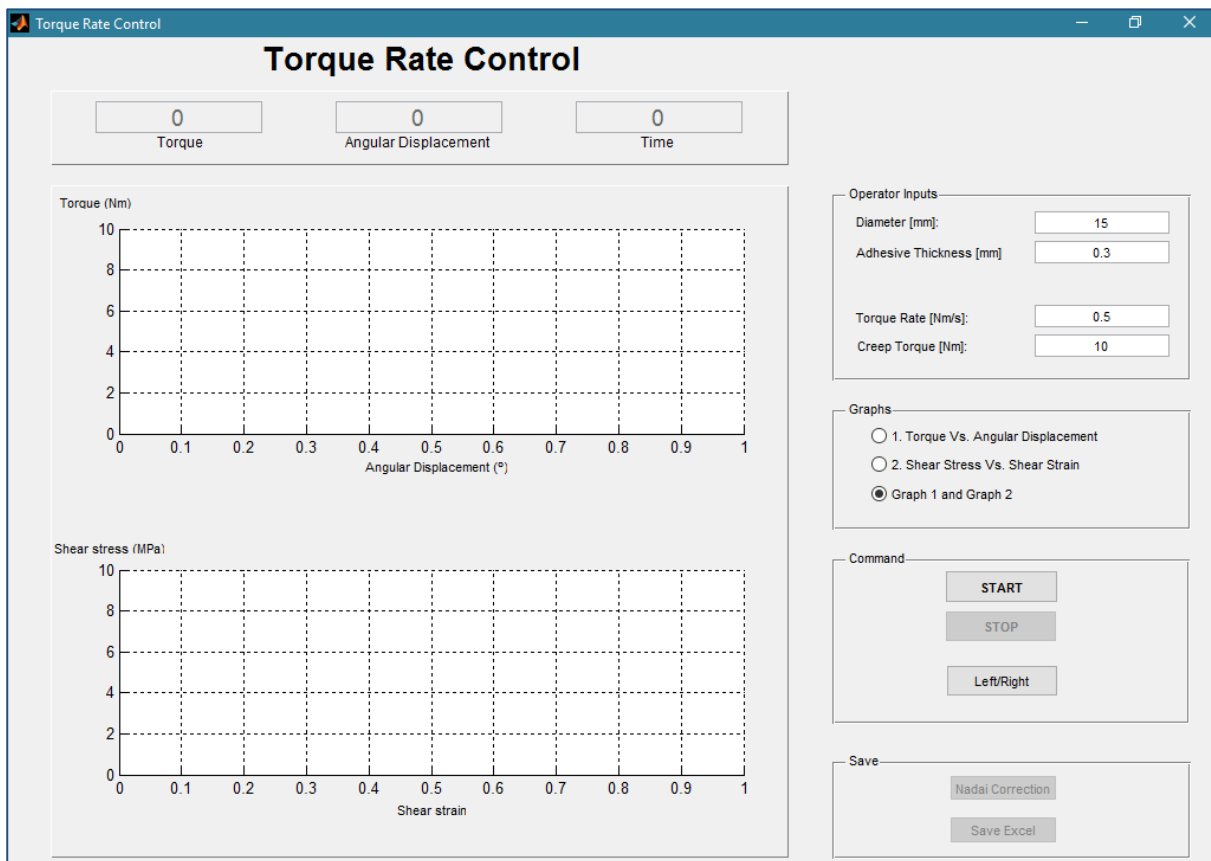


Figura 6.7 - Janela da interface do teste em controlo de binário e fluência (“Torque Rate Control”)

7 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo a caraterização de uma máquina de ensaios de resistência à torção de juntas adesivas.

Um dos objetivos iniciais desta tese passou por determinar a deformação da máquina num ensaio de resistência ao corte de uma junta adesiva, com o intuito de compensar essa deformação por *software* de modo a corrigir futuros ensaios. Esta estratégia tinha como base a utilização do *encoder* na medição da deformação angular das juntas adesivas, pois apresenta uma resolução de medição que cumpre os requisitos da máquina. Concluiu-se que este método era pouco rigoroso uma vez que, além da deformação da máquina não apresentar um comportamento linear, o resultado do ensaio dependia do valor de pré-carga a que começava. Além disso, caso ocorressem deslizamentos entre o provete e as buchas, estes erros não seriam compensados, deturpando os resultados obtidos nos ensaios. Por estas razões conclui-se que a melhor solução é a utilização de extensómetros locais ou dispositivos que meçam a deformação angular relativa dos substratos do provete.

Foram desenvolvidos controladores PID para os testes em controlo de binário e de fluência com base em dois materiais com propriedades mecânicas diferentes. Concluiu-se que os parâmetros dos controladores são dependentes do comportamento mecânico do adesivo a testar, pelo que foram desenvolvidos dois controladores de binário diferentes.

Por fim, foi desenvolvida uma interface gráfica amigável para o utilizador, com base na aplicação GUIDE do *Matlab*®, que por sua vez comunica com o *Simulink*®. Assim o utilizador pode monitorizar os ensaios em tempo-real, assim como introduzir parâmetros específicos para cada teste.

7.1 Trabalhos futuros

Como foi observado no sub-capítulo 4.2, teste em controlo de binário e de fluência, tanto o controlador como os respetivos parâmetros são dependentes do tipo de material a testar. Tendo em conta a variação do módulo de rigidez da maioria dos adesivos, o próximo objetivo passa por definir diferentes parâmetros do controlador para diferentes gamas de módulo de rigidez, em que o utilizador apenas tem de indicar em que gama se insere o adesivo a testar, e os parâmetros do controlador são atualizados.

Em alternativa, é proposto o projeto e desenvolvimento de um controlador robusto para os testes em controlo de binário e de fluência.

Para a medição do deslocamento angular, é proposto a utilização de uma câmara microscópica ou de alta resolução, aplicando a técnica descrita no sub-capítulo 5.1.

8 Referências

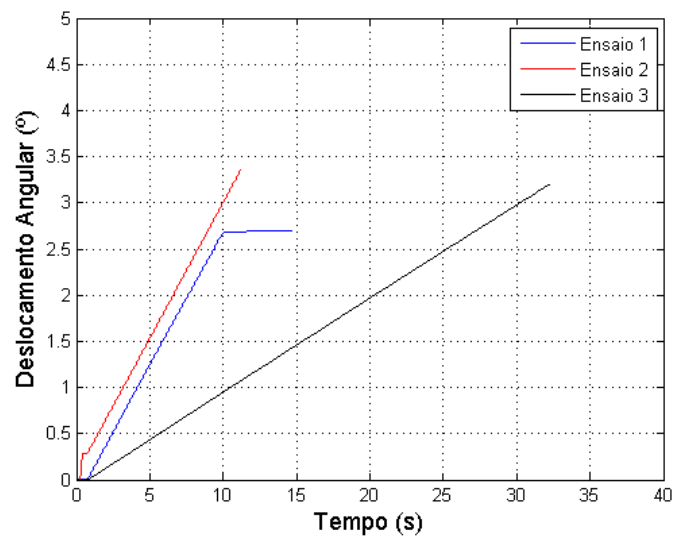
- ADMET. 2013. eXpert 9000 Series Torsion Testing Systems. edited by ADMET.
- Costa, Sérgio Miguel Oliveira. 2015. "Comando de uma Máquina de Ensaios de Resistência à Torção de Juntas Adesivas." MSc Master, DEMec, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- da Silva, L.F.M., D.A. Dillard, B. Blackman, and R.D. Adams. 2012. *Testing Adhesive Joints: Best Practices*: Wiley.
- da Silva, L.F.M., A. Öchsner, and R.D. Adams. 2011. *Handbook of Adhesion Technology*: Springer Berlin Heidelberg.
- da Silva, Lucas F. M., António G. de Magalhães, and Marcelo F. S. F. de Moura. 2007. *Juntas Adesivas Estruturais*: Publindustria.
- CES EduPack. GRANTA.
- Gonçalves, Joel Almeida. 2013. "Desenvolvimento Mecânico de uma Máquina para Ensaios de Torção de Adesivos Estruturais." MSc, DEMec, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Guimarães, André Filipe da Costa. 2013. "Conceção e automatização de um sistema para ensaios de resistência à torção de juntas adesivas." MSc, DEMec, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Instron. 2016. MT MicroTorsion Series | Low-Capacity Torsion Testing Systems. edited by Instron.
- Lorenz. 2015. Torque Measuring Flange, reactive, DF-30. edited by LORENZ MESSTECHNIK GmbH.
- Lorenz. 2016. DIN Mounting Rail Strain Gauge Amplifier, GM 40. edited by LORENZ MESSTECHNIK GmbH.
- Nadai, A. 1931. *Plasticity: A Mechanics of the Plastic State of Materials*. New York: McGraw-Hill.
- Ogata, K. 2010. *Modern Control Engineering*: Prentice Hall.
- OMRON. 2016. Technical Explanation for Temperature Controllers. edited by OMRON.
- Palmares, Miguel Pereira. 2016. "Strength of Hybrid Laminates Aluminium Carbon-Fibre Joints With Different Lay-up Configurations." MSc Master, DEMec, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Tech, Epsilon. 2017. Model 3550 Axial/Torsional Extencometers. edited by Epsilon Tech.
- Thomas, R, and R D Adams. 1996. Test Methods For Determining Shear Property Data For Adhesives Suitable For Design. Bristol: University of Bristol.

8 Referências

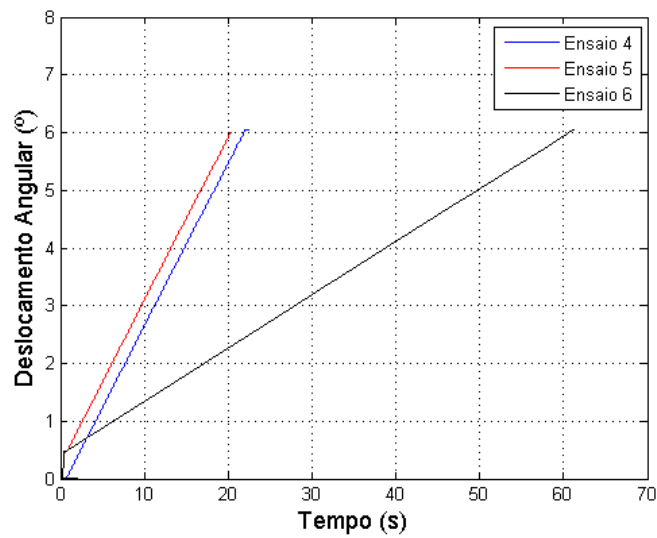
Zwick/Roell. 2012. Torsion testing machines TorsionLine TL 020/TL200/T1500. edited by Zwick Roell.

Anexos

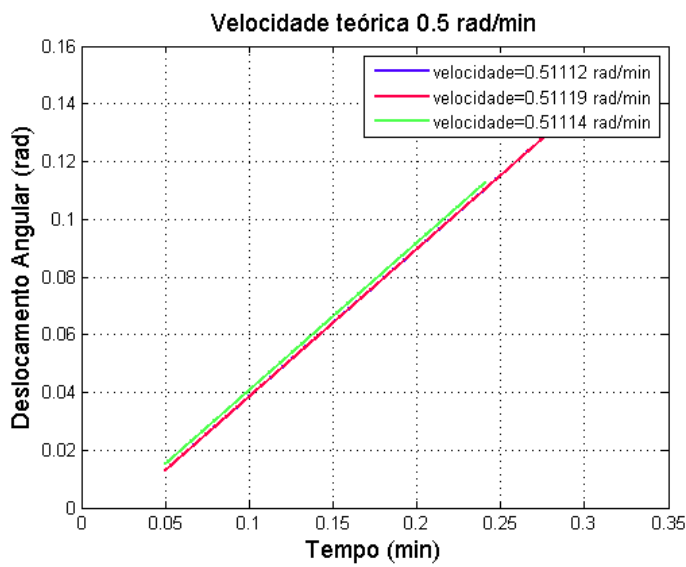
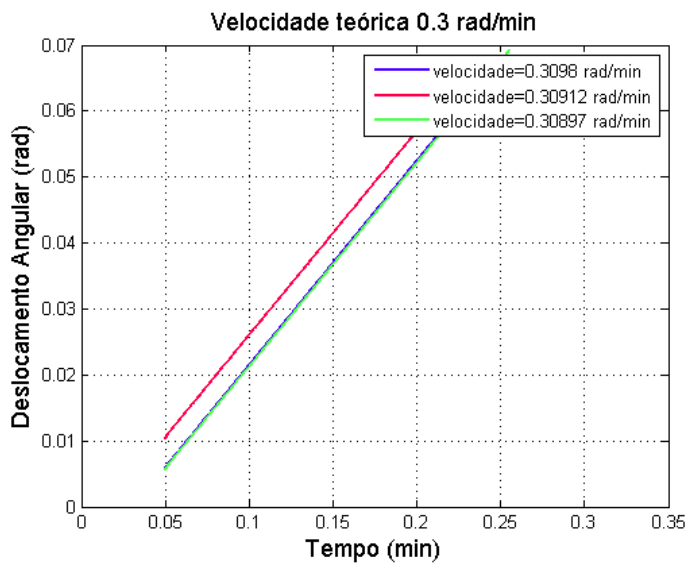
A. Gráfico “Deslocamento Angular vs. Tempo” dos 3 primeiros ensaios

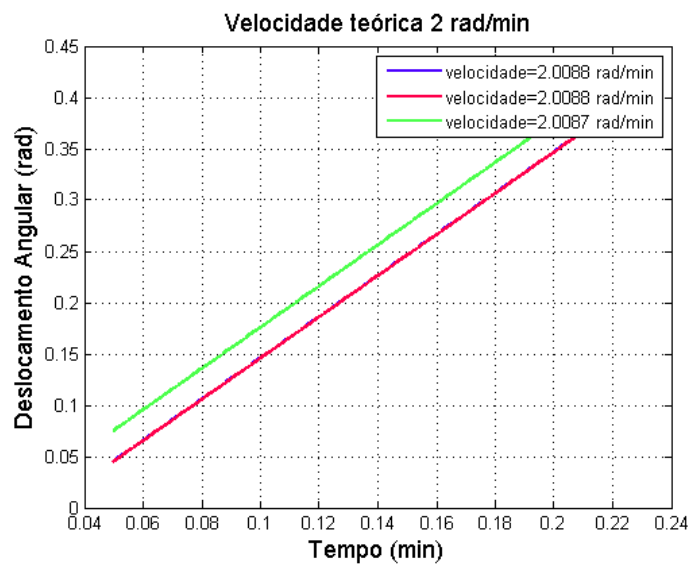
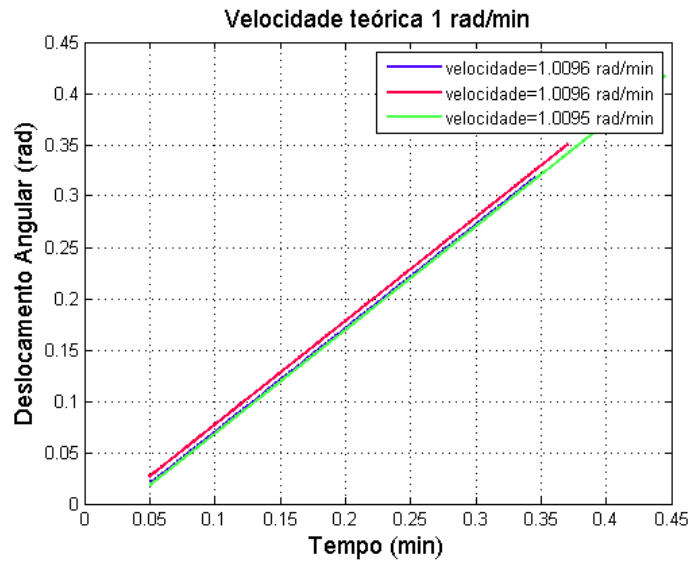


B. Gráfico “Deslocamento Angular vs. Tempo” dos 3 últimos ensaios

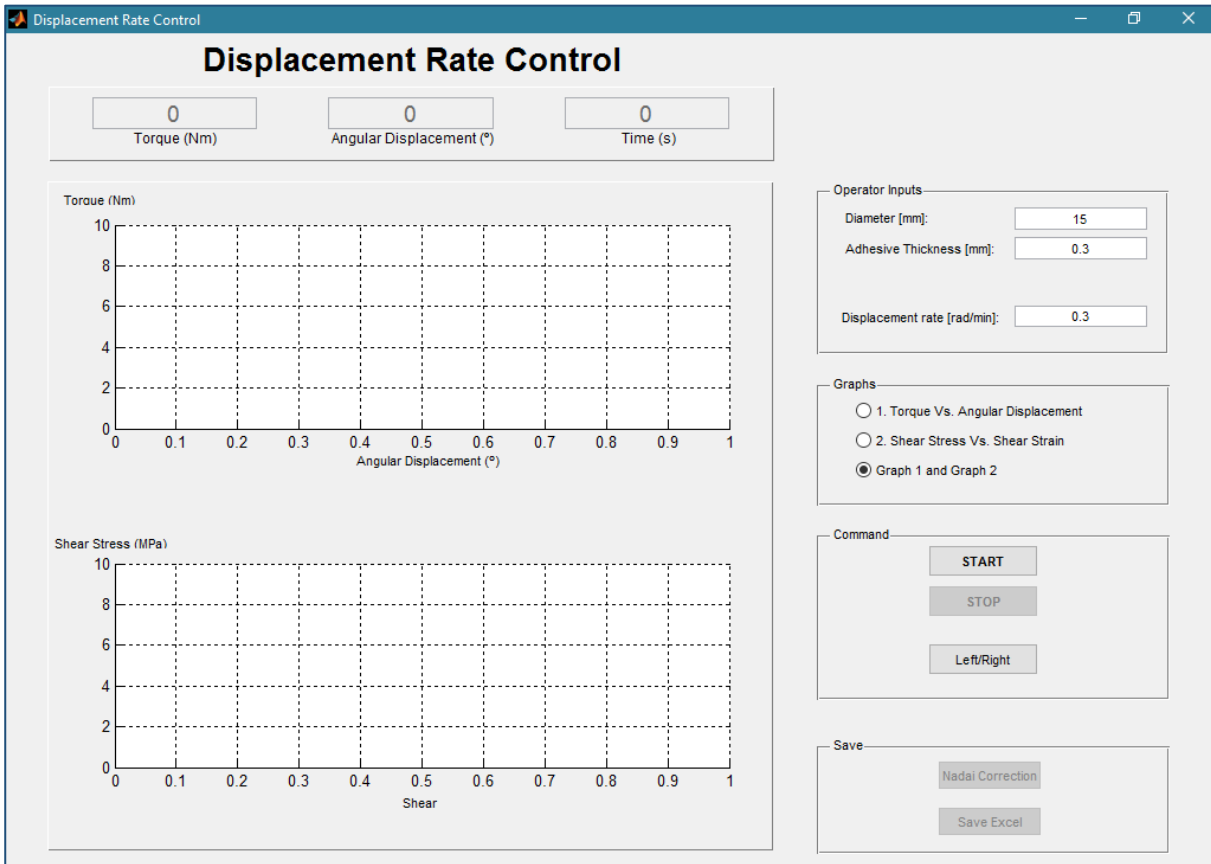


C. Gráficos relativos aos testes de velocidade





D. Interface gráfica do “teste em controlo de deslocamento angular”



E. Interface gráfica do “teste de relaxação”

