

# ESTUDO, CONCEÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA PNEUMÁTICO DE APLICAÇÃO DE CARGA CÍCLICA PARA PROCESSO DE SOLDADURA “PRESSURING DIFFUSION WELDING”

*E. Seabra, A. Guedes, J. Barbosa, L.F. Silva*

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Mecânica*

*Campus de Azurém*

*4800-058 Guimarães*

**Portugal**

## **Abstract**

The joining process carried out in the solid state, named Pressuring Diffusion Welding (PDW), is a modified version of Diffusion Welding (DW). In PDW, the load applied to the samples to be joined varies in a sine wave pattern during the whole process instead of being kept constant as in DW. The PDW process produces high strength joints, due to the fact that the load wave pattern enhances rupture of the oxide scales during the initial stages of the joining process.

The main objective is to upgrade an existing vacuum furnace, used to produce joints by DW, in order to enable PDW joining; this apparatus should be capable of developing cycling loads between 70 N to 15 kN, with an operative frequency comprised between 0.5 and 5 Hz.

This paper will present and discuss the results obtained so far in the design, development and construction of a pneumatic actuation system needed for applying cycling loads to process transient joints by PDW. The whole setup will be presented, which includes the actuator, the force sensor and acquisition system used to evaluate the performance of the pneumatic actuation. The obtained results will also be presented and discussed.

**Keywords:** *Mechanical design; Pneumatic actuation; Diffusion welding; Pressuring diffusion welding; Transition joints.*

## **Resumo**

O processo de união conduzido no estado sólido, designado por Pressuring Diffusion Welding (PDW), é uma variante da Soldadura por Difusão (SD). Nas juntas obtidas por PDW, a força aplicada aos materiais a ligar varia sinusoidalmente no decorrer do processo, em vez de ser mantida constante como na SD. O PDW produz juntas de elevada resistência mecânica, em virtude de promover a rotura da película superficial de óxidos durante os instantes iniciais do processo.

Pretende-se assim efetuar um “upgrade” a um forno de vazio já existente, que é usado para SD, para efetuar PDW, devendo ser capaz de aplicar cargas cíclicas de 70 N a 15 kN a uma frequência de operação de 0.5 a 5 Hz.

Este artigo apresenta e discute os resultados obtidos até esta altura relativamente à conceção, desenvolvimento e construção de um sistema de atuação pneumático dedicado à aplicação de cargas cíclicas para o processamento de juntas por PDW. O equipamento de ensaio será apresentado, o qual inclui o atuador propriamente dito, um sensor de força e o sistema de aquisição de dados usado para avaliar o desempenho da atuação pneumática. Os resultados obtidos nesta fase serão igualmente apresentados e discutidos.

**Palavras chave:** *Projeto mecânico; Atuação pneumática; Soldadura por difusão; Soldadura “pressuring diffusion welding”; Juntas de transição.*

## 1. Introdução

Pressuring Diffusion Welding (PDW) consiste num processo de união que ocorre no estado sólido. Este processo descende da soldadura por difusão (SD) e difere desta pois, durante o processo existe a aplicação de uma carga cíclica que altera sinusoidalmente, ao contrário do que acontece com a SD pois nesta a carga aplicada é constante.

Com o processo PDW é possível obter juntas de maior resistência mecânica e também reduzir o tempo de processamento, pois a aplicação de carga sinusoidal provoca a destruição da película superficial de óxidos, o que facilita a união de ligas com elevada cinética de oxidação superficial (Yuan et al, 2008), sendo a ligas de alumínio e as ligas de titânio exemplos disso.

O PDW torna-se extremamente importante na indústria de transportes, pois ao facilitar a união entre ligas leves e de alta cinética de oxidação superficial, constitui uma técnica de ligação eficaz para a produção de componentes mais leves que por seu turno permitem reduzir o peso dos veículos e consequentemente, o consumo de combustível (Seabra et al, 2009).

Neste projeto pretende-se estudar e realizar os parâmetros necessários para possibilitar a obtenção do equipamento obedecendo às especificações pretendidas.

O equipamento em causa é constituído por vários sistemas, sendo eles, o sistema de aplicação de carga, o sistema de fornecimento de calor, o sistema de refrigeração, o sistema de vácuo e o sistema de comando e controlo. Dos sistemas referidos o primeiro a ser estudado e desenvolvido foi o sistema de aplicação de carga.

## 2. Processamento das juntas de transição pelos processos de soldadura por difusão (SD) e pressuring diffusion welding (PDW)

Os processos SD e PDW são processos de união totalmente efetuados no estado sólido, sendo assim excluída a intervenção de qualquer fase líquida na formação das juntas. De forma geral, pode dizer-se que estes processos são conduzidos nas seguintes condições (Orhan, Aksoy, Eroglu, 1999), (Yuan et al, 2008):

- A temperatura de ligação é inferior à temperatura de fusão dos materiais de base;
- O tempo de estágio, quando à temperatura de ligação, tem uma variação entre alguns minutos e várias horas;
- Para que haja ligação é necessária a aplicação de pressão que deverá ser relativamente inferior as que provocariam deformações plásticas macroscópicas nos materiais de base;

- Eventualmente, poderá ser colocada uma camada intermédia entre os materiais de base, para que facilite a ligação ou impeça a formação de fases frágeis na interface.

As principais vantagens que se retiram da realização destes processos no estado sólido passam pela possibilidade de obter junções em que a interface apresenta composição química e estrutura idêntica à dos materiais base, e conseqüentemente, resistência mecânica semelhante.

Uma vez que se tratam de processos realizados no estado sólido, os riscos de fissuração associados à solidificação são eliminados e a degradação da superfície dos componentes a ligar é mínima, quando comparada aos processos que envolvem a formação e a reação de um líquido na zona de ligação (Peteves et al, 1996).

A formação da junta é provocada pela deformação microscópica dos materiais de base na interface, em conjunção com mecanismos de difusão. Normalmente, o processo de ligação processa-se através de três fases (Yuan et al, 2008):

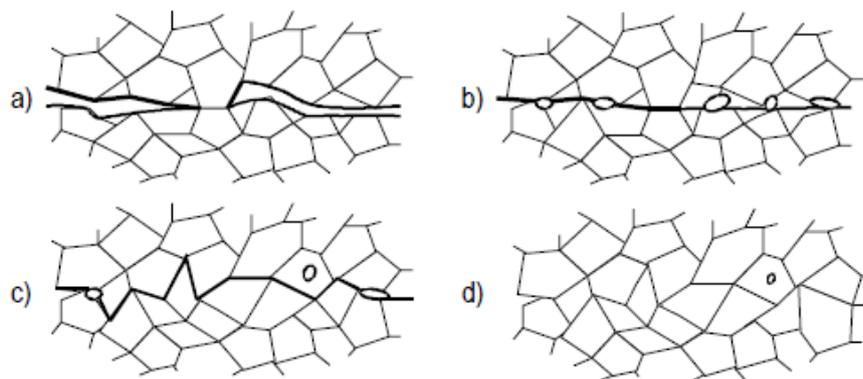
FASE I – Deformação das microsaliências;

FASE II – Transporte de massa controlado por difusão;

FASE III – Migração da interface.

Na figura 1 é possível observar a representação esquemática do processo de formação de uma junta obtida por SD. Este processamento das juntas de transição, utilizando os processos SD e PDW, foi já convenientemente descrito pelos autores em (Seabra et al, 2009).

**Figura 1: a) Contacto inicial limitado a algumas microsaliências; b) Aumento da área de contacto por deformação plástica e fluência das microsaliências; c) Eliminação da maioria dos poros e migração da fronteira de grão da interface; d) No fim do processo, a fronteira de grão da interface é indistinguível das restantes fronteiras de grão (Seabra et al, 2009)**



### 3. Sistema de aplicação de carga

O sistema de aplicação de carga terá de ir em conta com as especificações, por isso, tem de ser um sistema que aplique cargas periódicas sinusoidais entre os valores 0,07 a 15 kN e com uma frequência de aplicação de carga entre 0,5 a 5 Hz. Existem vários sistemas no mercado capazes de aplicar cargas cíclicas. Após análise das várias soluções existentes a seleção recaiu sobre um cilindro pneumático de membrana de simples efeito. Este atuador encontra-se ilustrado na figura 2.

Estes tipos de cilindros são dotados de várias características, tais como (FESTO, 2011):

- Utilizado como elemento de mola ou para redução de oscilação;

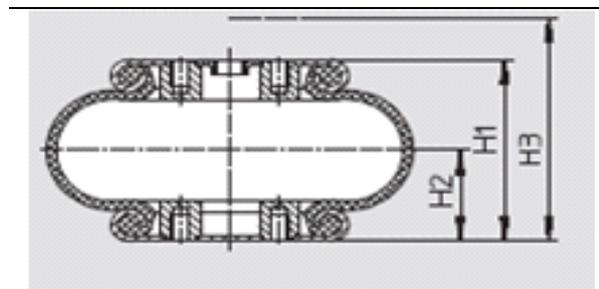
- Grandes forças com cursos reduzidos;
- Movimentos uniformes e sem atrito;
- Pode ser utilizado em ambientes com algum pó ou na água, e
- Não necessita de manutenção.

**Figura 2: O cilindro de membrana de simples efeito da marca FESTO selecionado para esta aplicação (FESTO, 2011)**



Na figura 3 encontra-se representada a perspectiva de corte de um cilindro de membrana de simples efeito, bem como as alturas de trabalho permitidas para um atuador deste tipo.

**Figura 3: Alturas de trabalho de um cilindro de membrana (FESTO, 2011)**



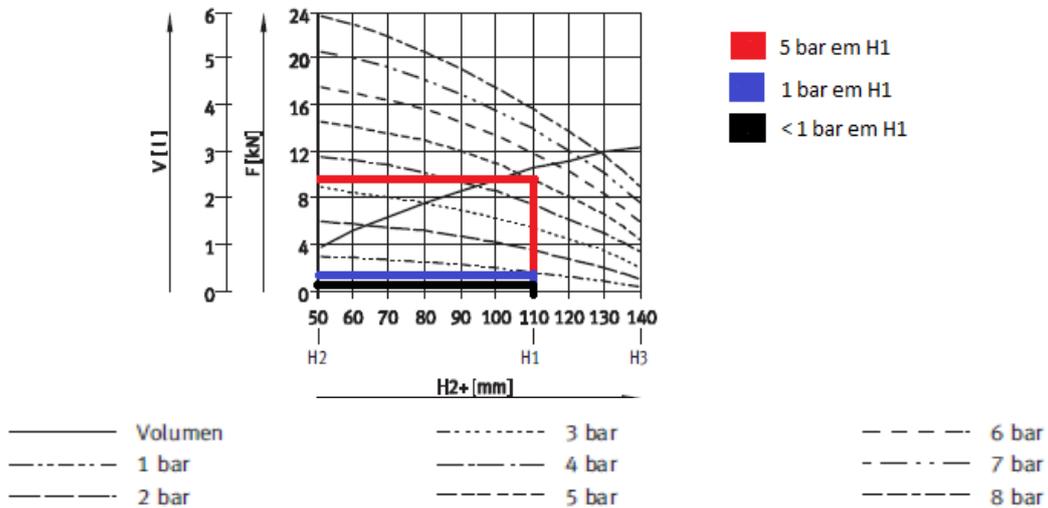
- H1- Altura de trabalho recomendada com amortecimento a 6 bar.
- H2- Altura mínima para a montagem
- H3- Altura máxima da membrana

Através do catálogo da empresa FESTO (FESTO, 2011) efetuou-se a seleção do cilindro pneumático, tendo este, um diâmetro de 250 mm, uma altura de  $H1=110$  mm (sendo  $H1$  a altura recomendada de trabalho), podendo trabalhar no intervalo de temperaturas de  $-40$  °C a  $+70$  °C e possuindo uma massa de 2,3 kg. O cilindro da marca FESTO selecionado tem a referência EB-250-85 #36489.

Através do gráfico da figura 4 é possível verificar que:

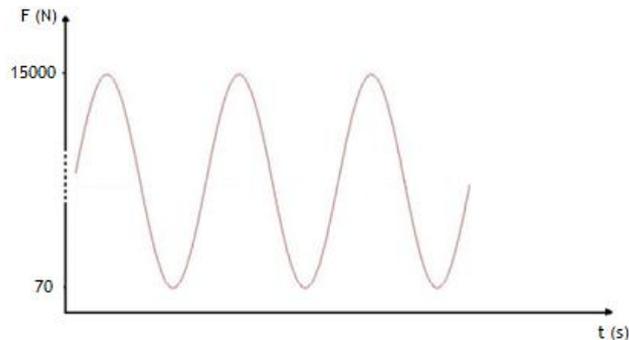
- Com 8 bar em  $H1$ , tem-se uma força de 15 kN;
- Com 7 bar em  $H1$ , tem-se uma força de 14 kN;
- Com 5 bar em  $H1$ , tem-se uma força de 10 kN;
- Com 1 bar em  $H1$ , tem-se uma força de 2 kN;
- Com  $<1$  bar em  $H1$ , tem-se uma força  $<1$  kN.

**Figura 4: Gráfico força/pressão (FESTO, 2011)**



A figura 5 apresenta um gráfico com a variação de carga exigida nas especificações do projeto do equipamento; esta carga cíclica varia entre 0,07 e 15 kN. Isto torna-se possível com a alteração da pressão fornecida ao atuador pneumático (cilindro de membrana).

**Figura 5: Gráfico de carga cíclica a aplicar no processo de soldadura**



Para o sistema de aplicação de carga foi também necessário proceder à seleção de um regulador/controlador de pressão, o que equivale, portanto, a um sistema de comando e controlo baseado numa válvula proporcional para a regulação de pressão a fornecer ao atuador. Este regulador foi selecionado tendo em conta a gama de forças que se pretende aplicar. Para tal, optou-se por um regulador/controlador da marca SMC (ver figura 6) que permite regular a pressão entre 0,005 bar e 9 bar (SMC, 2011). A pressão máxima que pode ser regulada é de 8 bar porque é a pressão limite de utilização do atuador de membrana.

**Figura 6: Regulador/controlador proporcional selecionado da marca SMC (SMC, 2011)**



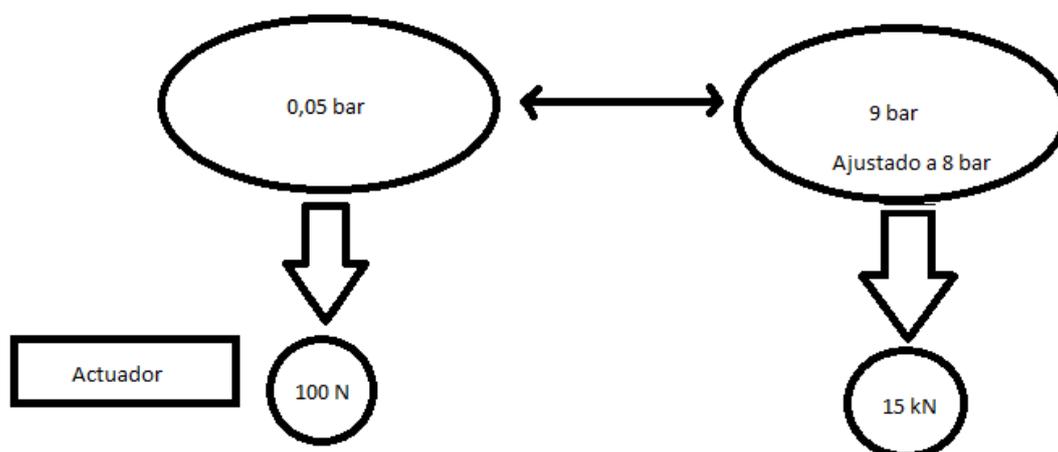
Na tabela 1 estão listadas as principais características do regulador/controlador de pressão selecionado (SMC, 2011).

**Tabela 1: Tabela de características do regulador/controlador da marca SMC (SMC, 2011)**

Modelo	ITV2050-313CS3-Q
Pressão mínima de fornecimento	+ 0,1MPa
Pressão máxima de fornecimento	1,0MPa
Alcance de pressão	0,005 a 0,9 MPa
Voltagem	24 VDC $\pm$ 10%
Consumo de corrente	0,12 A
Sinal de entrada	0 a 10 VDC
Impedância de entrada	250 $\Omega$ ou inferior
Saída analógica	1 a 5 VDC
Linearidade	$\pm$ 1%
Histerese	0,5%
Repetibilidade	$\pm$ 0,5%
Sensibilidade	0,2%
Características da temperatura	$\pm$ 0,12%
Exatidão do mostrador da pressão de saída	$\pm$ 3%
Temperatura ambiente e do fluido	0 a 50°C
Invólucro	Equivalente ao IP65
Massa	350 g

O esquema da figura 7 permite explicar de forma muito resumida as características de maior importância do regulador/controlador, como por exemplo, a pressão e a força que se pode estimar obter com essa pressão.

**Figura 7: Regulação do regulador de pressão (ajustado a um máximo de 8 bar)**



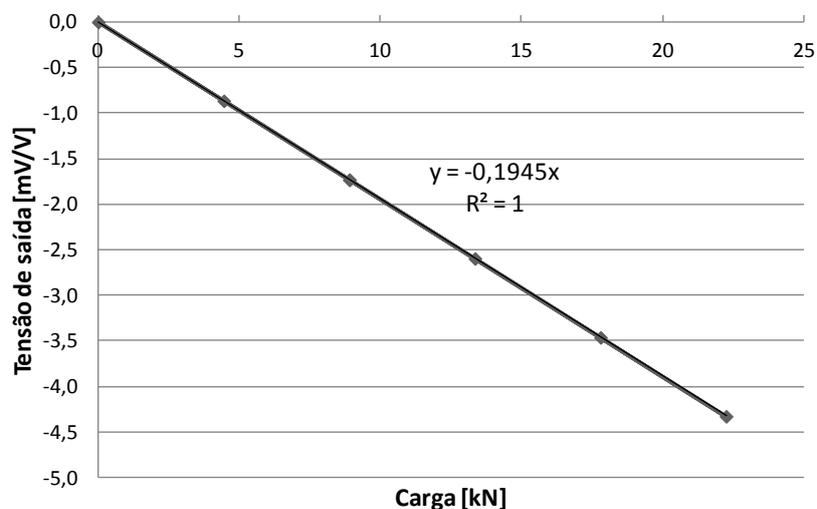
#### 4. Arquitetura do sistema de aquisição e controlo

No sentido de avaliar o desempenho do sistema pneumático de aplicação de carga constituído pelo atuador de membrana e o regulador/controlador, selecionados e apresentados anteriormente, foi necessário conceber uma arquitetura de comando e controlo. Para tal, em primeiro lugar, foi selecionada uma célula de carga adequada ao tipo de carga (compressão) e força máxima (15 kN) do sistema de atuação pretendido. As figuras 8 e 9 apresentam, respetivamente, a célula de carga escolhida da marca Interface, modelo 3200 com carga máxima de compressão de 5 kN (22,24 kN) e a sua curva de calibração.

Figura 8: Célula de carga de compressão selecionada

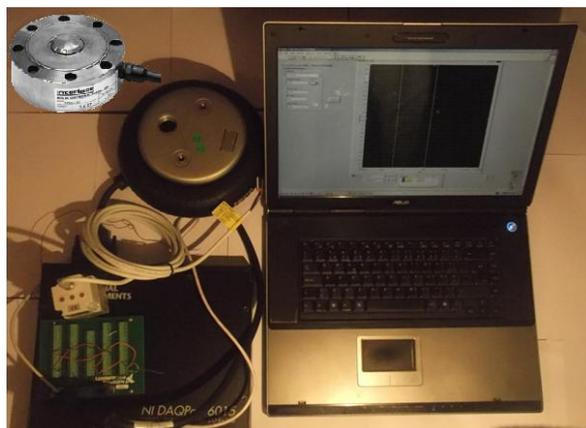


Figura 9: Curva de calibração da célula de carga



Para efetuar o controlo e aquisição do sistema de aplicação de carga cíclica será utilizada uma placa de aquisição de dados NI DAQPad-6015 da marca National Instruments® ligada por USB a um Laptop PC e um programa dedicado desenvolvido no editor LabVIEW® (Johnson, Jennings, 2001) da mesma marca. Este editor permite uma elevada flexibilidade de configuração, como seja: realizar aquisição, tratamento, apresentação e armazenamento/gravação de dados, bem como realizar comando analógico e digital. A figura 10 apresenta os principais constituintes do sistema de aquisição e controlo da carga cíclica utilizados, nomeadamente, a célula de carga, a placa de aquisição de dados com terminal de ligações, o Laptop PC com editor LabVIEW®, o atuador de membrana e respetivo regulador/controlador de pressão pneumático.

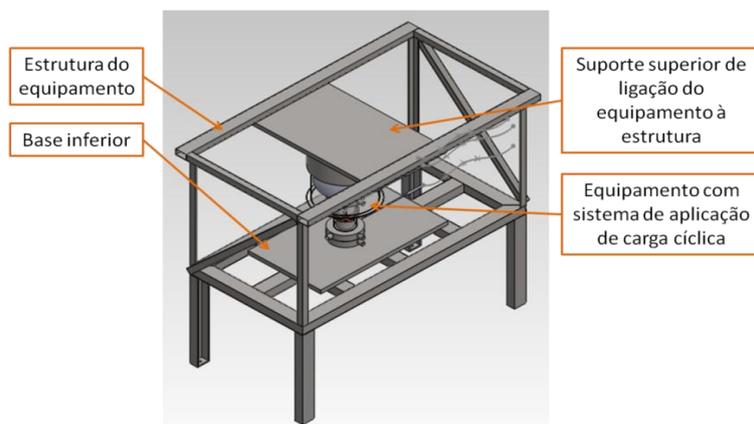
**Figura 10: Componentes do sistema de aquisição e controlo**



## 5. Desenhos conceptuais do equipamento

A figura 11 representa o primeiro desenho conceptual de conjunto do equipamento concebido para a aplicação de carga cíclica para promover a soldadura por PDW, o qual inclui o sistema de aplicação de carga, o de aquecimento por indução, o de arrefecimento a água e o de vácuo. Todo o equipamento foi concebido de modo a incorporar todos os sensores necessários ao funcionamento do forno (termopares, sensor de vácuo e sensor de carga), bem como os órgãos atuadores (como a bomba de vácuo, a bomba de circulação de água, a bobine de indução e o actuador pneumático, o qual deverá funcionar juntamente com o respetivo regulador/controlador).

**Figura 11: Desenho conceptual 3D de conjunto do equipamento concebido para a aplicação de carga cíclica para promover a soldadura por PDW**

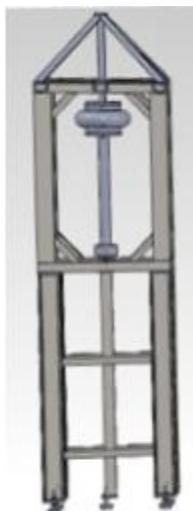


Após alguma análise conclui-se que a primeira ideia não seria a mais adequada. Foram aspetos como a ergonomia e resistência da estrutura que fizeram com que se pensasse em outra solução que fosse de encontro aos objetivos pretendidos.

Em termos ergonómicos pensou-se numa mesa relativamente mais alta, pois a anteriormente idealizada teria uma zona de trabalho muito baixa o que a tornaria pouco ergonómica.

Quanto à resistência da estrutura foi necessário optar por uma estrutura mais forte do que a anteriormente idealizada, pois esta terá de suportar cargas de 15 kN (carga máxima cíclica a aplicar). Deste modo, optou-se pela estrutura apresentada na figura 12.

**Figura 12: Desenho conceptual 3D de conjunto do equipamento concebido como solução final para a aplicação da carga cíclica para promover a soldadura por PDW**



## **6. Construção**

Para obter a estrutura foi necessário passar à sua construção, para isso foi necessário escolher o material a utilizar e as tecnologias de fabrico a utilizar. O material escolhido para a construção da estrutura foi ferro de diferentes tipos de perfis U, I e L e algumas chapas de várias espessuras. As tecnologias de fabrico utilizadas foram a maquinagem e a soldadura.

A construção da estrutura foi efetuada por inúmeros passos os quais podem ser reduzidos aos 4 passos seguintes:

- 1- Corte do diferente tipo de material;
- 2- Efetuar algumas operações de maquinagem, como, furar, tornear e rebarbar;
- 3- Soldar os materiais de forma a construir a estrutura que se pretende;
- 4- Efetuar todos os procedimentos necessários para pintar a estrutura.

Na figura 13 é possível observar a estrutura final que se pretendia obter.

**Figura 13: Estrutura final do suporte de aplicação da carga cíclica**



## 7. Programa informático de aquisição e controlo

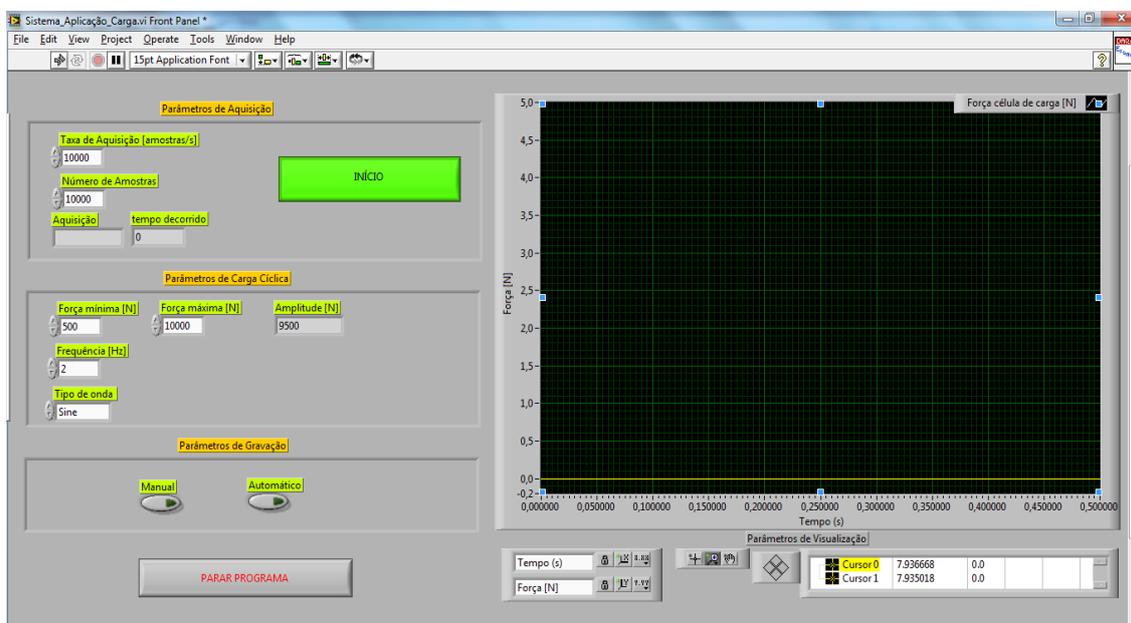
Nesta seção serão apresentadas e explicadas de uma forma genérica as principais funções do programa informático que foi desenvolvido no editor LabVIEW® (Mihura, 2001), utilizando uma placa de aquisição (NI DAQPad-6015) com interface USB para PC, para poder efetuar a aquisição e o controlo do sistema de atuação de carga cíclica.

Deste modo, as principais funções a serem realizadas pelo programa informático, podem-se resumir a:

- Possuir uma interface homem-máquina (painel frontal do programa) para que possam ser selecionados diferentes condições da carga cíclica (amplitude, carga máxima, carga mínima e frequência) e diversos parâmetros de aquisição, visualização e gravação de dados.
- Determinar a pressão regulada pelo controlador de pressão e deste modo controlar a força cíclica aplicada pelo atuador de membrana pneumático. Para tal, terá de ser programada uma saída de tensão analógica de amplitude e frequência variável da placa de aquisição, correspondendo 0 e 10 V, respetivamente, a 0,005 e a 9 MPa de pressão pneumática;
- Efetuar a aquisição em contínuo da força efetiva aplicada pelo atuador de membrana pneumático. Para isso, terá de ser programada uma entrada de tensão analógica diferencial da placa de aquisição para efetuar a aquisição do sinal de tensão da célula de carga.
- Realizar a visualização, tratamento e gravação dos sinais analógicos fornecidos e adquiridos pela placa de aquisição. Para tal, foram programadas várias sub-rotinas adequadas à realização destas tarefas.

A figura 14 apresenta o painel frontal do programa informático desenvolvido especialmente para esta aplicação, em que se podem realçar os principais parâmetros de configuração em termos de aquisição, controlo da carga cíclica, visualização e gravação.

**Figura 14: Painel frontal do programa de aquisição e controlo**



## 8. Conclusões

Foi concebido e desenvolvido um sistema de aplicação de carga cíclica com a utilização de um actuador pneumático. Esta escolha foi realizada de tal forma que o sistema de aplicação

de carga cumprisse as especificações exigidas para o projecto de um forno de soldadura por PDW. Foram então escolhidos dois elementos importantes com base nas suas características, sendo estes, um cilindro de membrana de simples efeito, da marca FESTO, e um regulador/controlador de pressão, da marca SMC.

Após algum estudo, conclui-se que a estrutura inicialmente idealizada não era a mais adequada, pois não era ergonómica. Foi desenvolvida e construída a estrutura final que irá suportar o forno e todos os sistemas a ele inerente.

Efetuuou-se a calibração da célula de carga para que esta esteja preparada para ser utilizada nos testes a efetuar posteriormente.

Este trabalho seguirá na direcção da implementação prática deste sistema de aplicação de carga, com a realização de testes do mesmo e com a sua integração no conjunto dos outros sistemas indispensáveis ao correcto funcionamento do equipamento de soldadura por PDW.

## 9. Referências

FESTO, (2011). Consultado em 11 de Março de 2011 de [http://xdki.festo.com/xdki/data/doc\\_ENUS/PDF/US/EB-EBS\\_ENUS.PDF](http://xdki.festo.com/xdki/data/doc_ENUS/PDF/US/EB-EBS_ENUS.PDF)

Johnson, G., Jennings R. (2001). LabVIEW Graphical Programming. McGraw-Hill Professional Publishing, USA

Mihura, B. (2001). LabVIEW for Data Acquisition, Prentice Hall PTR, USA

Orhan, N., Aksoy, M., Eroglu, M. (1999). A new model for diffusion bonding and its application to duplex alloys, Materials, in Materials Science and Engineering. A271 (1999) 458-468

Peteves, S., Ceccone, G., Paulasto, M., Stamos, V., Yvon, P. (1996). Joining Silicon Nitride to itself and to Metals, in ,JOM 48 (1996) 48-52

Seabra, E., Silva, L.F., Guedes, A., Barbosa, J. (2009). Projecto Mecatrónico de um Forno de vazio para Soldadura por Pressuring Diffusion Welding,” in *FIMEC'2009*

SMC, (2011). Consultado em 11 de Março de 2011 de [http://www.smc.eu/portal/NEW\\_EBP/14%29Air\\_Line\\_Equipment/14.6%29Pressure\\_C\\_Equip/b%29ITV1-2-3000/ITV1\\_2\\_3000\\_PO.pdf](http://www.smc.eu/portal/NEW_EBP/14%29Air_Line_Equipment/14.6%29Pressure_C_Equip/b%29ITV1-2-3000/ITV1_2_3000_PO.pdf)

Yuan, X.J., Sheng, G.M., Qin, B., Huang, W.Z., Zhou, B. (2008). Impulse pressuring diffusion bonding of titanium alloy to stainless steel, in Materials Characterization 59 (2008) 930-936

### **Correspondencia** (Para más información contacte con):

Secretaría XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos.

Phone: + 34 96 387 70 00 Ext. 75685 / 79172

Fax: + + 34 96 387 91 73

E-mail: [congresoalencia2012@aeipro.com](mailto:congresoalencia2012@aeipro.com)

URL: <http://www.congresoaeipro2012.es>