



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

SISTEMA DE AQUISIÇÃO PARA PRENSAS DE COMPRESSÃO E FLEXÃO

Estudo desenvolvido para o Núcleo de Betões, Pedra
e Cerâmicos do Departamento de Materiais

Lisboa • dezembro de 2013

I&D INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO 436/2013 – CIC/NSEM

Título

SISTEMA DE AQUISIÇÃO PARA PRENSAS DE COMPRESSÃO E FLEXÃO

Autoria

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

Gustavo Esteves Coelho

Bolseiro de Doutoramento, Núcleo de Sistemas Eletrotécnicos e Mecânicos

João C. P. Palma

Investigador Principal, Chefe do Núcleo de Sistemas Eletrotécnicos e Mecânicos

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 436/2013

Proc. 0903/1301/0030001

Resumo

É apresentado um sistema de interface e de aquisição de dados para uma prensa de compressão e flexão do Núcleo de Betões, Pedra e Cerâmicos (NBPC) do Departamento de Materiais (DM). O sistema desenvolvido teve como objetivo suprimir algum equipamento afeto aos transdutores de deslocamento dos provetes (defómetros), que entretanto ficou obsoleto, e centralizar num único computador a aquisição de dados e a interface com todos os transdutores afetos aos ensaios experimentais para determinação de cargas de rotura e de módulos de elasticidade em provetes de betão e argamassa.

Como resultado final, o novo sistema de interface e aquisição instalado permitiu melhorar e agilizar os ensaios realizados com a prensa de compressão e flexão.

Palavras-chave: Sistema de aquisição, Interface humano-máquina.

INTERFACE AND SIGNAL ACQUISITION SYSTEM FOR THE COMPRESSION AND BENDING TEST MACHINE

Abstract

A new interface and signal acquisition system for the compression and bending test press machine of the Concrete, Stone and Ceramics Division of the Materials Department is presented. The main goal for the development of a new system is to suppress some obsolete equipment and centralize in a unique computer the interface with all transducers involved in the experimental evaluation of breaking strength and modulus of elasticity of concrete specimens.

Final results show that the implemented solution has allowed improving the overall experimental tests with the compression and bending test equipment.

Keywords: Acquisition System, Human-machine interface.

Índice

1	Introdução	1
2	Descrição do sistema de ensaio existente.....	2
3	Conceção do novo sistema de aquisição.....	5
	3.1 Hardware.....	5
	3.2 Software	10
4	Resultados	12
5	Conclusão	18
	Referências Bibliográficas	21

Índice de figuras

Fig. 1 Prensa hidráulica para ensaios de compressão e flexão dos laboratórios do NBPC: a) Unidade de comando e controlo; b) Atuador de compressão (200 kN); c) Atuador de flexão (10 kN); d) Unidade óleo-hidráulica.....	2
Fig. 2 Equipamentos para a alimentação e aquisição dos defómetros: a) Fonte de alimentação; b) Unidade programável HP 75000.....	3
Fig. 3 Defómetros instalados no provete para ensaio: a) Provete cilíndrico de betão com dois defómetros instalados à sua superfície em zonas diametralmente opostas; b) Caixa concentradora dos defómetros; c) Defómetros de reserva não instalados.....	4
Fig. 4 Esquema sinótico dos equipamentos: P1 – prensa para ensaios de compressão; P2 – prensa para ensaios de flexão; C – unidade de controlo das prensas; C1, C2 – células de carga; D1, D2 – defómetros; E1, E2 – pontos de captura de sinal das células de carga; X – caixa concentradora dos defómetros; A – módulo de aquisição de dados; PC – computador de aquisição de dados e visualização de grandezas de ensaio.....	5
Fig. 5 Módulo NI9219 da <i>National Instruments</i> com interface <i>USB</i> que implementa quatro interfaces analógicas com isolamento galvânico e com capacidade de excitar e ler desvios de transdutores em ponte em cada uma.....	7
Fig. 6 Esquema mostrando a inserção de resistores para mitigação de perturbações externas na derivação a partir cadeia de controlo de força dos atuadores óleo-hidráulicos.....	7
Fig. 7 Pormenor das duas caixas de derivação de sinal a interpor entre a unidade de controlo e a célula de carga de cada uma das prensas: a) ficha para ligação ao controlador das prensas hidráulicas; b) ficha para ligação a uma célula de carga; c) terminal de acesso para o novo sistema de aquisição.....	8
Fig. 8 Defómetros ligados no novo sistema de aquisição: a) os quatro defómetros disponíveis para os ensaios; b) caixa concentradora dos defómetros; c) módulo de aquisição NI9219.	9
Fig. 9 Tensão elétrica da célula de carga em função da carga aplicada.....	12
Fig. 10 Medição da força aplicada nas células de carga com o novo sistema de aquisição.....	14
Fig. 11 Erro de medição da força aplicada nas células de carga.	14
Fig. 12 Defómetro instalado no calibrador de LVDT.....	15
Fig. 13 Variação da tensão dos defómetros com variação de deslocamento.....	16
Fig. 14 Erros de medição dos defómetros.....	17

Índice de tabelas

Tabela 1 Análise das medições da célula de carga com o novo sistema de aquisição.	13
Tabela 2 Descriminação dos erros relativos para cada medição.	15
Tabela 3 Sensibilidades e erros de medição dos defómetros.	16

1 | Introdução

O Núcleo de Betões, Pedra e Cerâmicos (NBPC) tem uma longa e consolidada atuação na área da caracterização, estudo e desenvolvimento de materiais de construção como betões e seus constituintes, argamassas, materiais cerâmicos e pétreos, traduzida em contributos importantes não só para a investigação e desenvolvimento destes materiais como para o apoio à indústria da construção. Neste âmbito, a qualidade dos ensaios experimentais assume um papel determinante para a realização dos referidos estudos e desenvolvimentos, os quais requerem soluções de equipamento cada vez mais sofisticado e com mais resolução quer na medição quer na atuação.

Este estudo tem como principal objetivo melhorar o equipamento de medição e aquisição de dados, especificamente no que respeita aos sistemas de interface destinados aos ensaios experimentais para determinação do módulo de elasticidade e da resistência à rotura de provetes de betão e de argamassa.

Nestes ensaios são necessários meios de atuação, que permitam aplicar uma carga de forma controlada sobre os provetes, e meios de medição da extensão dos provetes, muitas vezes até à rotura. Neste caso, para a atuação é utilizada uma prensa hidráulica; esta prensa está instrumentada com células de carga para medição da força aplicada aos provetes mas essas grandezas, que servem internamente para controlo do actuador, não estão disponíveis no exterior. Para a medição de extensões no provete são usados defómetros que são colocados no próprio provete em estudo.

Tipicamente, nos ensaios de rotura os provetes são submetidos a forças de compressão progressivamente crescentes, registando-se a força de rotura por meio de deteção da variação abrupta da força aplicada. Nos ensaios de flexão de provetes (para determinação dos respetivos modos de elasticidade) é necessário instrumentar o provete com transdutores de deslocamento (defómetros) colocados usualmente em duas das suas faces. Neste tipo de ensaios são registadas as forças e as correspondentes variações de deslocamento, em função do tempo.

2 | Descrição do sistema de ensaio existente

O atual sistema para ensaios de compressão e flexão é composto por dois subsistemas autónomos. O primeiro subsistema, ilustrado na Fig. 1, permite aplicar forças de compressão ou flexão ao provete de forma controlada. É composto por duas prensas hidráulicas com capacidades de 200 kN e de 10 kN, respetivamente, comandadas e controladas por uma unidade dedicada da marca *Form+Test Seidner*, modelo 506/200/10 DM1-S [1]. O atuador de maior capacidade é geralmente usado para ensaios de rotura e o outro para ensaios de flexão. Este equipamento permite executar as operações de carga sobre os provetes, de forma controlada, com várias opções consoante o ensaio pretendido. As operações de comando e configuração deste equipamento são realizadas por meio de uma interface humano-máquina do próprio equipamento, constituída por um painel de botões (*keypad*) e um mostrador digital. O equipamento possui ainda uma interface de comunicação série (RS232) apenas para envio de dados em formato ASCII (normalmente para impressoras), não podendo esta interface ser usada para comando ou configuração da mesma.



Fig. 1 Prensa hidráulica para ensaios de compressão e flexão dos laboratórios do NBPC: a) Unidade de comando e controlo; b) Atuador de compressão (200 kN); c) Atuador de flexão (10 kN); d) Unidade óleo-hidráulica.

As forças exercidas pelas prensas sobre os provetes são medidas através de células de carga do tipo extensométrico, em que as resistências por extensómetro têm o valor aproximado de 350Ω , estão ligadas em ponte, apresentando uma sensibilidade de 2 mV V^{-1} no fim de escala. Como são excitadas com tensão contínua de 10 V , a leitura será de 20 mV no fim de escala (isto é, à carga máxima) em qualquer das células.

O segundo subsistema, ilustrado na Fig. 2, implementa a interface de sinal dos defómetros, sendo composto por uma fonte de alimentação dedicada *GW GPR-6030D* e uma unidade programável *HP 75000* [2] que se encontra avariada.

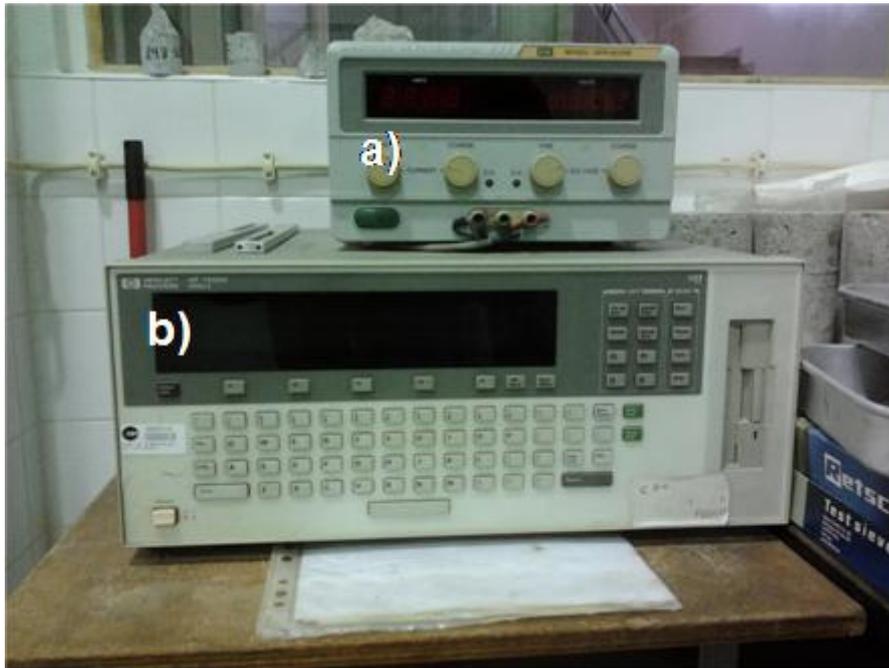


Fig. 2 Equipamentos para a alimentação e aquisição dos defómetros: a) Fonte de alimentação; b) Unidade programável HP 75000.



Fig. 3 Defómetros instalados no provete para ensaio: a) Provete cilíndrico de betão com dois defómetros instalados à sua superfície em zonas diametralmente opostas; b) Caixa concentradora dos defómetros; c) Defómetros de reserva não instalados.

No total existem quatro defómetros disponíveis que podem ser ligados numa caixa concentradora (ver Fig. 3 b)), que disponibiliza quatro fichas do tipo DB9 para a ligação (com alimentação e medição) aos equipamentos anteriormente referidos. Para se identificarem os defómetros estes são numerados de acordo com uma nomenclatura específica “PxLx”, que permite definir o “Provete” e o “Lado” onde estes são montados. Os defómetros são agrupados aos pares da seguinte forma: P0L1-P0L2 e P1L1-P1L2, perfazendo um total de dois pares de defómetros disponíveis.

Os defómetros são transdutores de tipo extensométrico para medição de pequenos deslocamentos. Os que equipam este sistema são da marca HBM (Baldwin Messtechnik GmbH), modelo DD1 [3], com uma amplitude nominal de $\pm 2,5\text{mm}$, apresentam a sensibilidade de $1\text{mV V}^{-1} \text{mm}^{-1}$ e são baseados em ponte de extensómetros elétricos de resistência com o valor nominal de 350Ω .

3 | Conceção do novo sistema de aquisição

3.1 Hardware

Pretende-se melhorar e agilizar o processo de aquisição de dados dos ensaios para determinação de módulos de elasticidade e de rotura de provetes, concebendo um novo sistema de aquisição que possibilite a interface para recolha sincronizada de medições dos vários transdutores usados nos ensaios executados com as prensas hidráulicas. O novo sistema de aquisição permitirá centralizar num único computador a recolha e registo digital dos valores de força aplicados nos provetes e os correspondentes valores de deformação medidos com os defómetros, bem como a visualização gráfica da evolução das grandezas resultantes do ensaio.

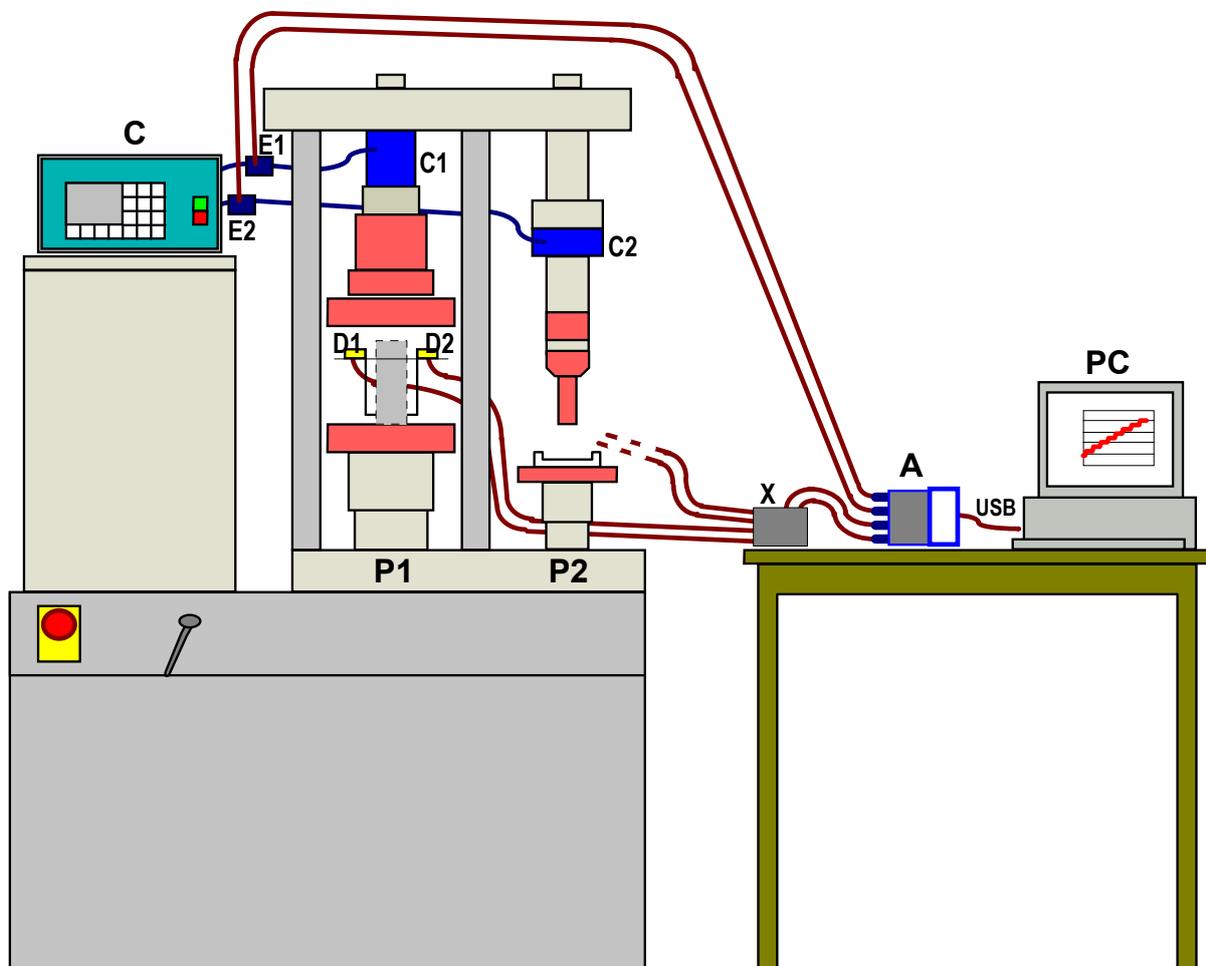


Fig. 4 Esquema sinótico dos equipamentos: P1 – prensa para ensaios de compressão; P2 – prensa para ensaios de flexão; C – unidade de controlo das prensas; C1, C2 – células de carga; D1, D2 – defómetros; E1, E2 – pontos de captura de sinal das células de carga; X – caixa concentradora dos defómetros; A – módulo de aquisição de dados; PC – computador de aquisição de dados e visualização de grandezas de ensaio.

Com a nova solução pretende-se que o operador parametrize o ensaio no controlador da máquina, o qual continuará a ser autónomo na sua função de controlo dos actuadores óleo-hidráulicos, mas passe a dispor da aquisição e da visualização gráfica das grandezas do ensaio num computador comum, conforme se resume na Fig. 4 de forma sinóptica.

Para o novo sistema de aquisição, que serve de interface física aos transdutores, foi adquirido um módulo da *National Instruments*, modelo NI9219 [4] (cf. Fig. 5). Este módulo disponibiliza quatro entradas analógicas, com isolamento galvânico individual e com resolução de 24 bits, e uma ligação USB para ligação a um computador pela qual também recebe a alimentação de que necessita. Trata-se da configuração de *hardware* mais económica que se encontrou capaz de fazer a aquisição de sinais convencionais e em pontes de extensometria.

No computador foi instalado o *software*, desenvolvido para o efeito, para aquisição e registo de dados bem como para a interface com o operador. Das quatro entradas analógicas do módulo NI9219 disponíveis, duas foram usadas para interface com as células de carga da prensa e as restantes duas para interface com os transdutores de deslocamento (defómetros). Com esta solução, foi possível centralizar num único computador a aquisição de dois sistemas de medição independentes, que anteriormente se fazia com interfaces heterogéneas distribuídas. O equipamento da Fig. 2 foi, deste modo, substituído pelo dispositivo da Fig. 5 ligado a um computador, o qual realiza ainda funções adicionais de aquisição e visualização simultânea de todas as grandezas do ensaio.

As células de carga e os defómetros são transdutores constituídos por extensómetros elétricos de resistência, montados em ponte completa de *Wheatstone* que necessitam de uma alimentação (ou excitação) elétrica externa e fornecem um sinal de tensão (de desvio ou desequilíbrio) que é função aproximadamente linear da grandeza medida. O módulo NI9219, para além de implementar em cada interface analógica um canal de aquisição em modo diferencial, para aquisição dos sinais de desequilíbrio dos transdutores em ponte, permite aplicar uma tensão de excitação elétrica independente para cada canal de aquisição, dispensando assim a necessidade de instalar fontes de alimentação externas dedicadas aos transdutores.

As interfaces deste módulo são configuráveis para diversas funções de medição, permitindo efetuar a aquisição de sinais de tensão (nas escalas de ± 60 V, ± 15 V, ± 4 V, ± 1 V ou ± 125 mV), corrente (± 25 mA), resistência (10 k Ω , 1 k Ω), temperatura (termopares, PT1000, PT100) e extensometria (quarto de ponte a 350 Ω ou 120 Ω , meia ponte a ± 500 mV/V, ponte completa a ± 62.5 mV/V ou ± 7.8 mV/V). A amostragem é simultânea nos quatro canais e o tempo de conversão total para atingir a melhor resolução é de 500 ms. A impedância de entrada dos canais é de 1 M Ω na leitura de tensões de ± 60 V, ± 15 V e ± 4 V, é inferior a 40 Ω na leitura de correntes, sendo superior a 1 G Ω nas restantes situações onde se inclui a medição de tensões de ± 1 V e ± 125 mV, bem como a extensometria.

Os requisitos de isolamento galvânico e de impedância de entrada muito elevada devem-se à necessidade de efetuar aquisição de sinais em pontos críticos da máquina existente, nomeadamente nas células de carga excitadas pela própria máquina e utilizadas por ela para controlo de atuadores

óleo-hidráulicos potentes, onde a interferência do acesso externo tem de ser muito cautelosa por razões de segurança.



Fig. 5 Módulo NI9219 da *National Instruments* com interface *USB* que implementa quatro interfaces analógicas com isolamento galvânico e com capacidade de excitar e ler desvios de transdutores em ponte em cada uma.

Para mitigar o efeito de possíveis perturbações exteriores sobre a cadeia de controlo dos atuadores foram inseridos resistores elétricos como indicado na Fig. 6, com valor de resistência suficientemente elevado para atenuar quaisquer perturbações externas plausíveis (nomeadamente curto-circuitos entre os condutores de sinal e entre qualquer destes condutores e a massa ou os potenciais de excitação) reduzindo-as a desvios praticamente insignificantes no sinal de medição da força. Por outro lado, no que respeita à aquisição de dados, esses valores de resistência introduzidos em série no circuito de medição devem ter um efeito desprezável no erro de método.

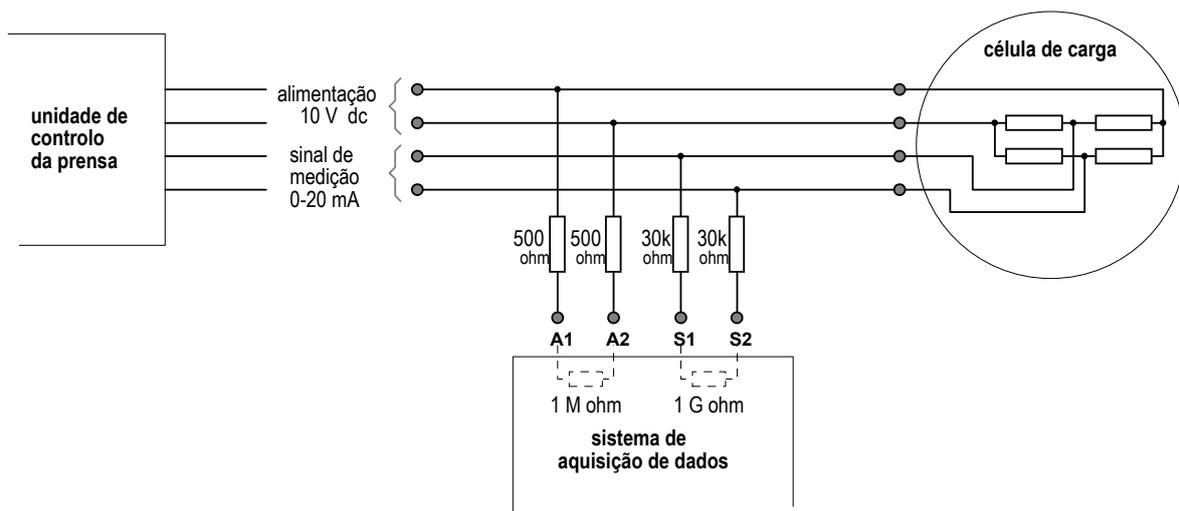


Fig. 6 Esquema mostrando a inserção de resistores para mitigação de perturbações externas na derivação a partir da cadeia de controlo de força dos atuadores óleo-hidráulicos.

Com os valores de resistência adotados na derivação para o sistema de aquisição da Fig. 6:

- Um curto-circuito externo fortuito entre os terminais A1 e A2, ou entre um deles e a massa, será atenuado pelos resistores de $500\ \Omega$, originando correntes de poucos mA, as quais não são perturbadoras para a fonte de alimentação do controlador;
- A presença de $1\ \text{k}\Omega$ em série com a impedância interna de $1\ \text{M}\Omega$ (1000 vezes maior) do sistema de aquisição, por outro lado, tem um contributo baixo para o erro de método na medição da tensão de excitação da célula de carga;
- Um curto-circuito externo fortuito entre os terminais S1 e S2, ou entre um deles e a massa, ou entre um deles e um dos terminais A1 ou A2, cria trajetos com impedância várias centenas de vezes maior do que as impedâncias correspondentes da ponte de extensómetros da célula de carga (cada um deles tem cerca de $350\ \Omega$), pelo que a alteração no sinal medido pelo controlador não será significativa;
- Do ponto de vista da aquisição de dados, a presença de $60\ \text{k}\Omega$ em série com a impedância interna de $1\ \text{G}\Omega$ ($>10^4$ vezes maior) do sistema de aquisição, tem um contributo insignificante para o erro de método na medição da tensão de desvio da célula de carga.

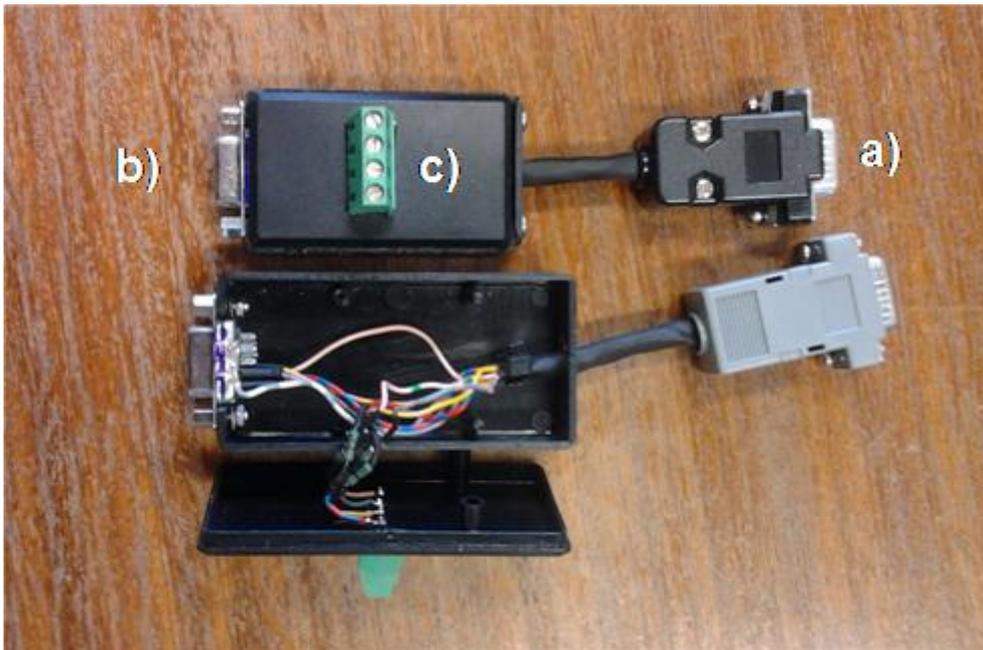


Fig. 7 Pormenor das duas caixas de derivação de sinal a interpor entre a unidade de controlo e a célula de carga de cada uma das prensas: a) ficha para ligação ao controlador das prensas hidráulicas; b) ficha para ligação a uma célula de carga; c) terminal de acesso para o novo sistema de aquisição.

Para interface com os defómetros o módulo NI9219 permite substituir integralmente a fonte de alimentação dedicada *GW GPR-6030D* e a unidade programável *HP 75000*, disponibilizando uma interface centralizada de muito menor dimensão e mais simples de utilizar. O módulo NI9219

disponibiliza interface direta para pontes de extensometria com excitação (a 2,7 V) incluída, conforme esquema elétrico da Fig. 8.

A ligação dos defómetros ao módulo de aquisição NI9219 é feita por chicote com interface DB9 entre este e a caixa concentradora. Como existem quatro defómetros para apenas duas entradas disponíveis no novo sistema de aquisição, a troca entre defómetros é efetuada diretamente na caixa concentradora pelo reposicionamento das fichas DB9 que estão devidamente identificadas. Este método permite maximizar a utilização dos canais disponíveis no módulo de aquisição NI9219, uma vez que nos ensaios experimentais apenas é necessário um par de defómetros em simultâneo.

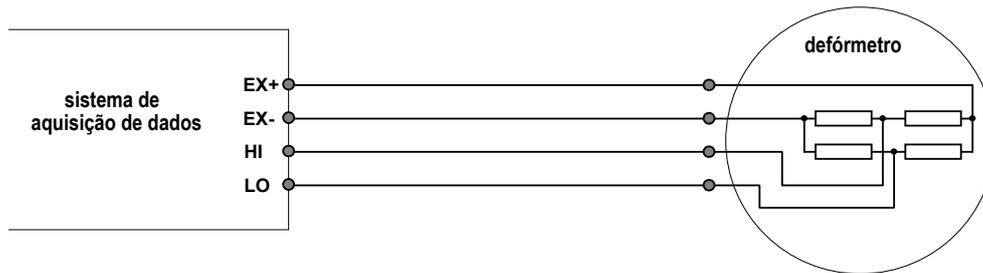


Fig. 8 Esquema de interface entre o sistema de aquisição de dados e um defómetro.

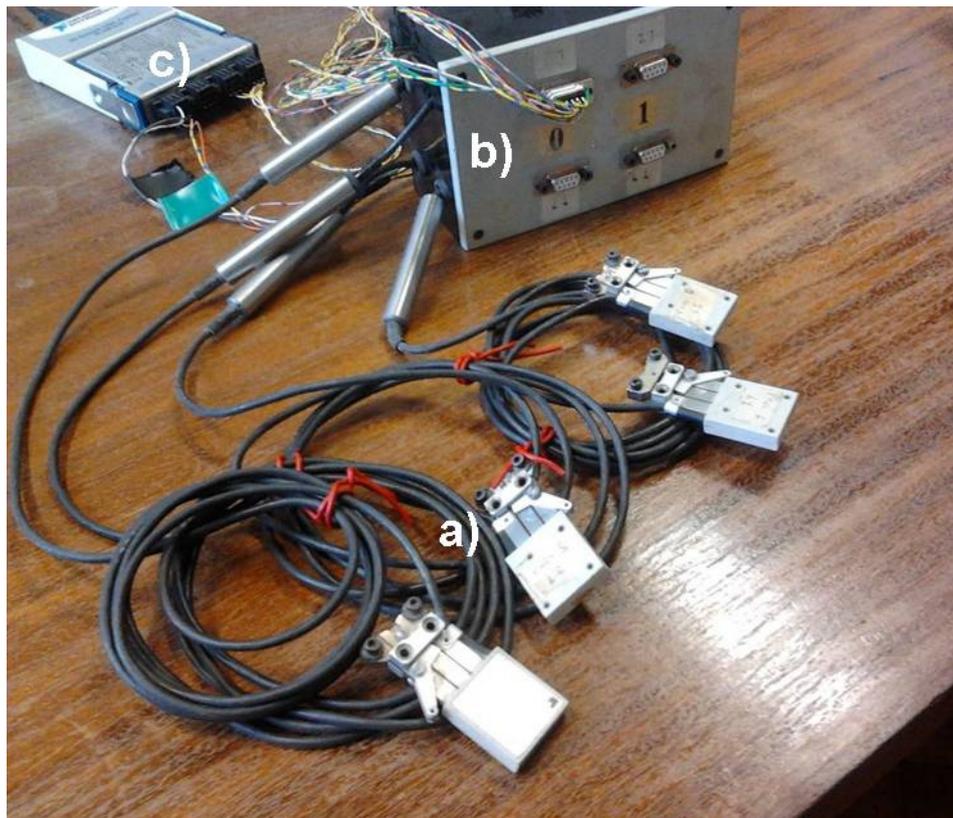


Fig. 9 Defómetros ligados ao novo sistema de aquisição: a) os quatro defómetros disponíveis para os ensaios; b) caixa concentradora dos defómetros; c) módulo de aquisição NI9219.

3.2 Software de interface

Para utilização do sistema de aquisição foi elaborado um programa em *Labview Signal Express* que permite a configuração do módulo de aquisição NI9219, visualização dos sinais dos transdutores e registo em ficheiro dos dados de ensaio para posterior processamento. O programa faz a aquisição dos sinais elétricos e converte automaticamente em valores da mensuranda final, de acordo com as retas de conversão e sensibilidades apuradas nos ensaios de caracterização dos transdutores, que se apresentam nos resultados deste relatório.

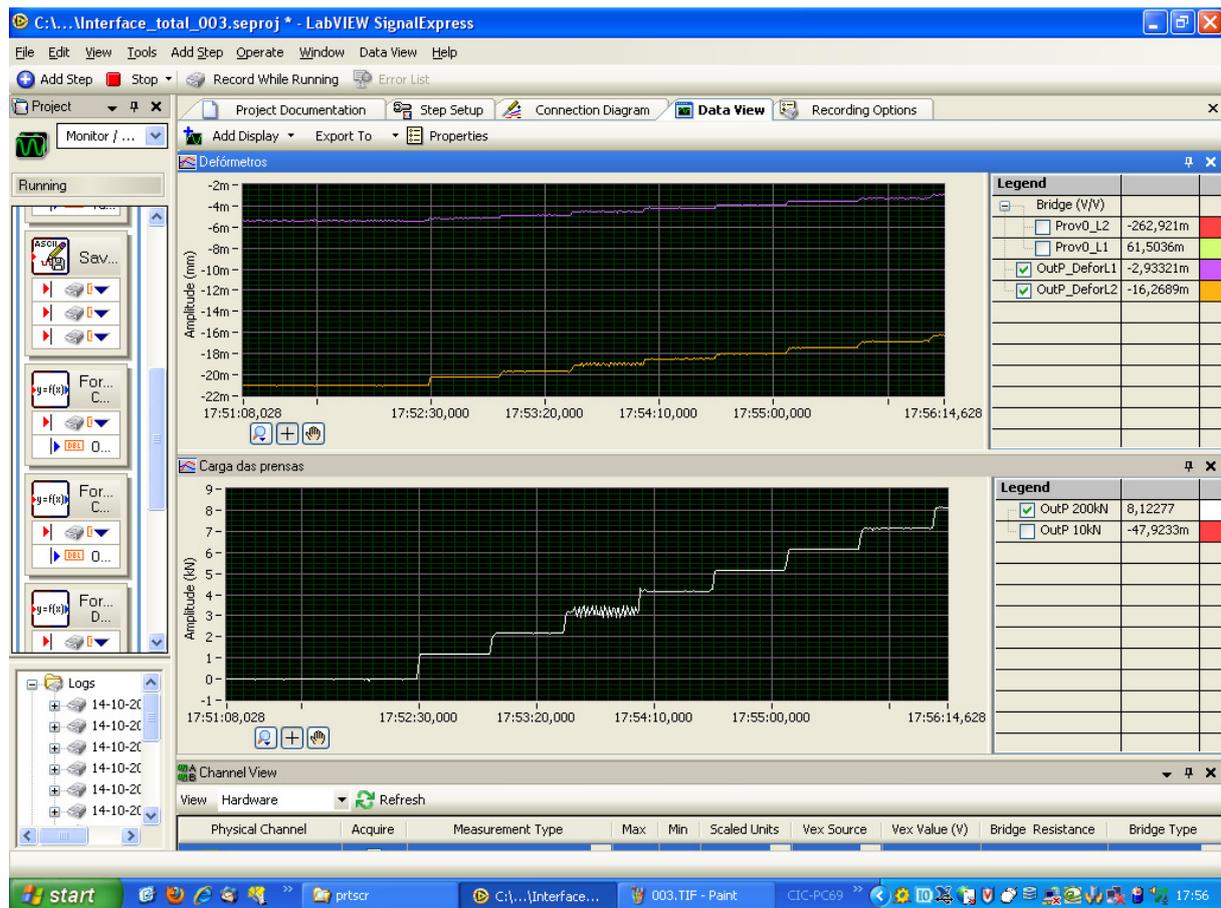


Fig. 10 Software de interface em utilização.

A título de exemplo, na Fig. 10 ilustra-se a utilização da interface desenvolvida. No painel central é apresentada a evolução temporal da amplitude em mm dos defómetros (gráfico superior) e em kN das células de carga (gráfico inferior)¹. O painel lateral esquerdo da interface permite aceder à configuração e gestão da conversão dos dados de aquisição, acertos de zero e registo em ficheiro. O painel lateral direito implementa a gestão da visualização dos dados nos gráficos acima descritos. O painel inferior permite a gestão do módulo da aquisição, como por exemplo a configuração da

¹ De notar ainda na Fig. 10 a existência de oscilações de carga no patamar de 3kN que foram apontadas pelos operadores como uma ocorrência habitual que, segundo os mesmos, poderá dever-se à falta de manutenção do sistema óleo-hidráulico da prensa.

frequência de aquisição e modos de rejeição de ruído. Todos os painéis são dinâmicos e ajustáveis de acordo com a preferência do utilizador, podendo por exemplo mostrar-se apenas um ou os dois gráficos de evolução das grandezas, colocando os restantes painéis em segundo plano.

A modularidade e a flexibilidade que o *Labview Signal Express* oferece, permitem alterações funcionais ou ergonómicas do programa final de forma expedita e rápida, normalmente à custa de limitações de implementações mais específicas, como por exemplo na gestão de registo dos ficheiros de dados de ensaio. Não obstante, as melhorias ou correções que se justifiquem necessários de implementar, são facilmente incorporadas e permitem que o *feedback* dos operadores seja incorporado no programa final, melhorando assim os aspetos técnicos e/ou ergonómicos do interface da prensa de compressão e flexão.

4 | Resultados

Foram realizados ensaios experimentais com o objetivo de caracterizar o processo de medição com o novo sistema de aquisição instalado.

Conforme referido anteriormente, existem duas células de carga da marca HBM modelo C2 [5] de carga nominal 200 kN e 10 kN, respetivamente, com sensibilidades anunciadas de 2 mV V^{-1} em ambos os casos.

Inicialmente foram realizados ensaios de carga *in loco* com a prensa hidráulica, colocando um provete metálico não deformável e aplicando carga sobre o mesmo, de forma a ser medida a tensão elétrica da célula de carga já ligada ao novo sistema de aquisição. Este ensaio foi efetuado com a célula de carga de 10 kN, aplicando carga em patamares de 0 kN a 9,5 kN com uma duração de cerca de 60 segundos em cada patamar.

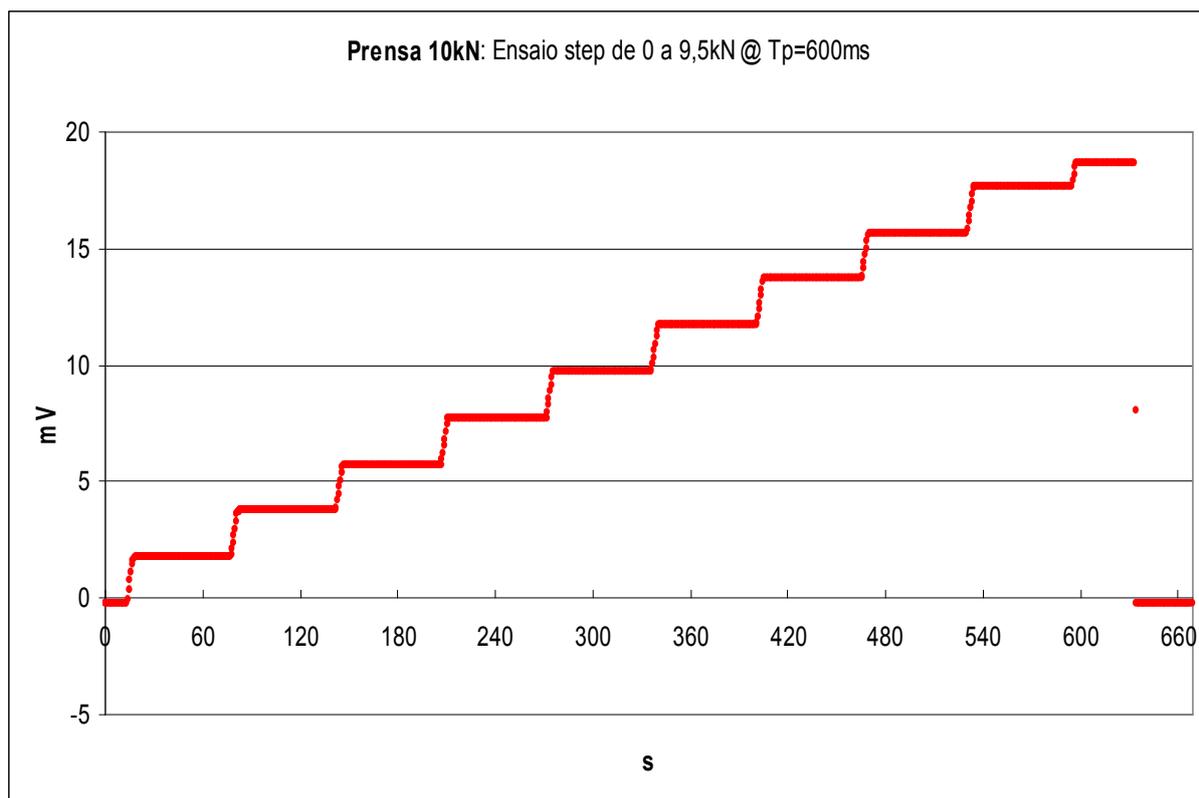


Fig. 11 Tensão elétrica da célula de carga em função da carga aplicada.

Na Fig. 11 é ilustrada a variação da tensão elétrica da célula de carga durante o ensaio, obtida pelo novo sistema de aquisição. Na Tabela 1 é apresentado um resumo da análise dos resultados obtidos. Os resultados mostram as leituras em tensão das células de carga, com um desvio máximo

de 0,004% em relação do valor de fim de escala que é inferior ao erro máximo anunciado pelo fabricante do sistema de aquisição.

Tabela 1 Análise das medições da célula de carga com o novo sistema de aquisição.

Carga aplicada	Desvio padrão (mV)	Desvio % FE (20mV)
0kN	5,6E-04	0,0028%
1kN	8,7E-04	0,0044%
2kN	5,8E-04	0,0029%
3kN	5,8E-04	0,0029%
4kN	5,9E-04	0,0029%
5kN	5,4E-04	0,0027%
6kN	6,7E-04	0,0034%
7kN	6,3E-04	0,0031%
8kN	6,9E-04	0,0034%
9kN	7,3E-04	0,0037%
9,5kN	6,5E-04	0,0032%
Tensão de alimentação	Desvio padrão (mV)	Desvio % FE (10V)
10VDC	2,6E-05	0,0003%

No caso da tensão de alimentação da célula de carga, verifica-se que a fonte de alimentação (instalada na própria prensa) se mantém estável durante todo o ensaio, com uma variação de 0,0003% em relação ao valor nominal de 10V. Este facto permite assumir o pressuposto de que a tensão de alimentação das células de carga é constante em toda a gama de utilização da célula. Desta forma, não será necessário a aquisição desta grandeza pelo sistema de aquisição para cálculo e conversão da tensão elétrica na grandeza da mensuranda pretendida (kN). No entanto, regista-se a necessidade de verificar a estabilidade da tensão de alimentação com a periodicidade necessária, a fim de minimizar a contribuição de deriva (temporal) da tensão de alimentação dos transdutores no erro de conversão para a grandeza da mensuranda pretendida.

Para a conversão da grandeza de tensão elétrica medida para as unidades de força pretendida, foi calculada a sensibilidade por regressão linear dos dados experimentais. Neste ensaio, foi assumido como valor de referência da força exercida sobre a célula de carga o valor observado no painel digital do equipamento da prensa. Não obstante, a rastreabilidade do sistema de medição do valor de força tomado para referência não assume aqui importância relevante para a análise dos resultados que se seguem, uma vez que o interesse reside em averiguar a sensibilidade e linearidade nas medições de força com a atual cadeia de medição (célula de carga + novo sistema de aquisição). A operação de calibração das cadeias de medição, de forças e de deslocamentos, deverá ser solicitada posteriormente, pois sai fora do âmbito deste trabalho, podendo incorporar-se então os seus resultados no programa de aquisição.

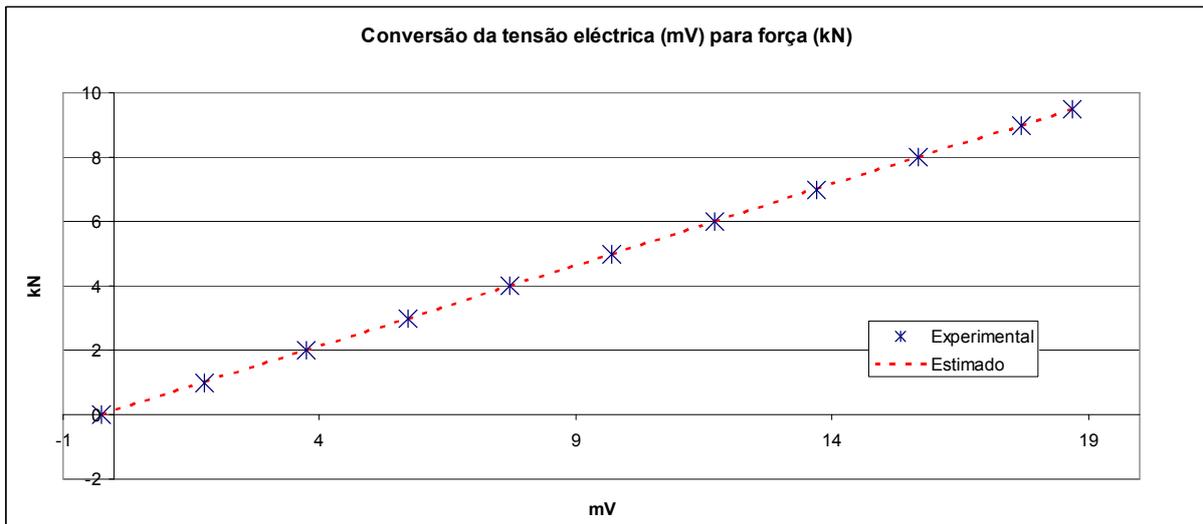


Fig. 12 Medição da força aplicada nas células de carga com o novo sistema de aquisição.

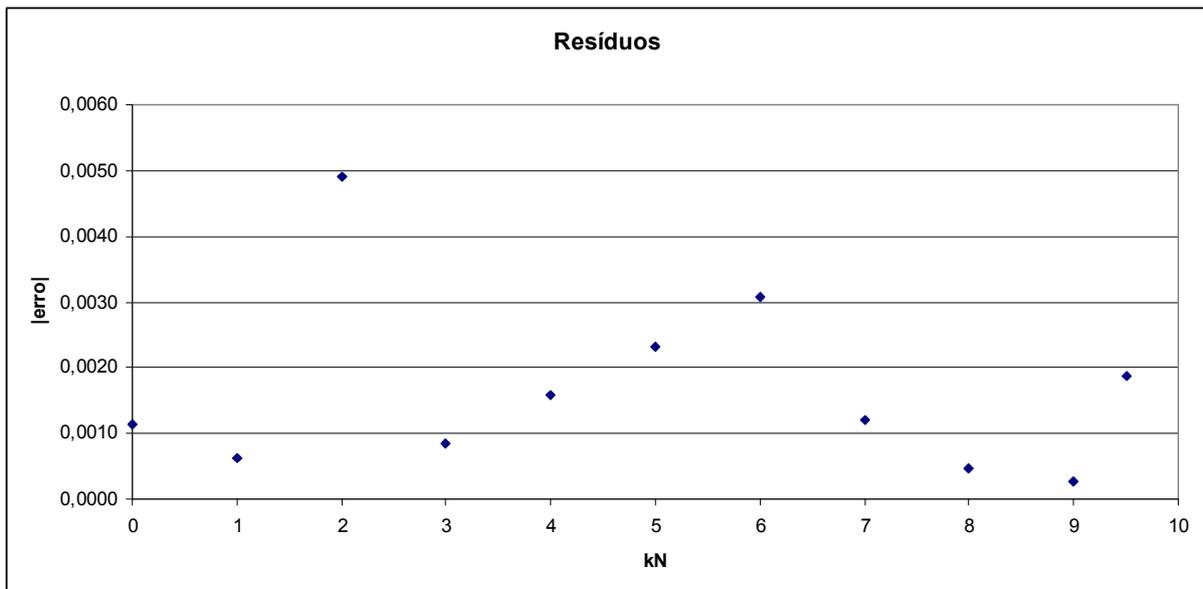


Fig. 13 Resíduos de medição da força aplicada nas células de carga.

Os resultados mostram que a cadeia de medição (célula de carga + novo sistema de aquisição) tem um comportamento linear, apresentando um desvio máximo na medição das forças de 0,05% em relação ao fim de escala, o qual é inferior ao valor de referência do fabricante da célula de carga que anuncia um erro máximo de 0,1%. O valor da sensibilidade apurado foi de $1,993 \text{ mV V}^{-1}$, o qual se aproxima do valor anunciado pelo fabricante (de 2 mV V^{-1}), no entanto, como seria espetável a variação da sensibilidade, mesmo na ordem das milésimas, tem impacto no erro de medição, especialmente quando se aproxima de valores de força de fim de escala. A título de exemplo, utilizando a sensibilidade de referência do fabricante (de 2 mV V^{-1}), o desvio máximo de medição

sobe para 0,4% em relação ao fim de escala. Uma operação de calibração desta cadeia é, pois, recomendável.

Tabela 2 Descriminação dos desvios relativos para cada medição.

Carga aplicada	Desvio % FE (10kN)
0kN	0,011%
1kN	0,006%
2kN	0,049%
3kN	0,008%
4kN	0,016%
5kN	0,023%
6kN	0,031%
7kN	0,012%
8kN	0,005%
9kN	0,003%
9,5kN	0,019%

Os quatro defórmegos afetos a este sistema são da marca HBM modelo DD1 [3], com uma amplitude nominal de $\pm 2,5\text{mm}$ e com sensibilidade anunciada de $1\text{mV V}^{-1} \text{mm}^{-1}$. Para verificação do seu funcionamento foram executados ensaios em bancada para uma primeira avaliação das respetivas sensibilidades na cadeia de medição correspondente. Estes transdutores implementam a medição de deformações dos provetes quando estes são submetidos a cargas. Para submeter os defórmegos a deslocamentos controlados foi utilizado um dispositivo para teste de LVDT², onde a palheta do defórmego é empurrada pelo parafuso micrométrico de referência. Esta operação não pretende calibrar os defórmegos, mas sim efetuar um teste preliminar à sensibilidade e à linearidade da cadeia de medição (defórmegos + novo sistema de aquisição).

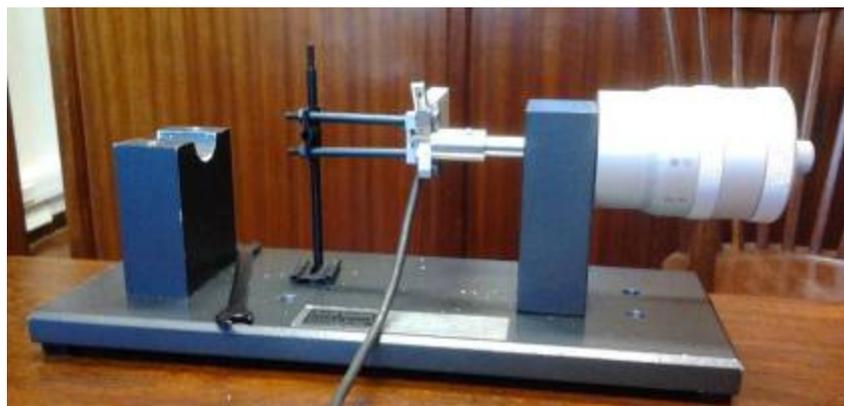


Fig. 14 Defórmego instalado no dispositivo de teste de LVDT.

² *Linear Variable Differential Transformer*

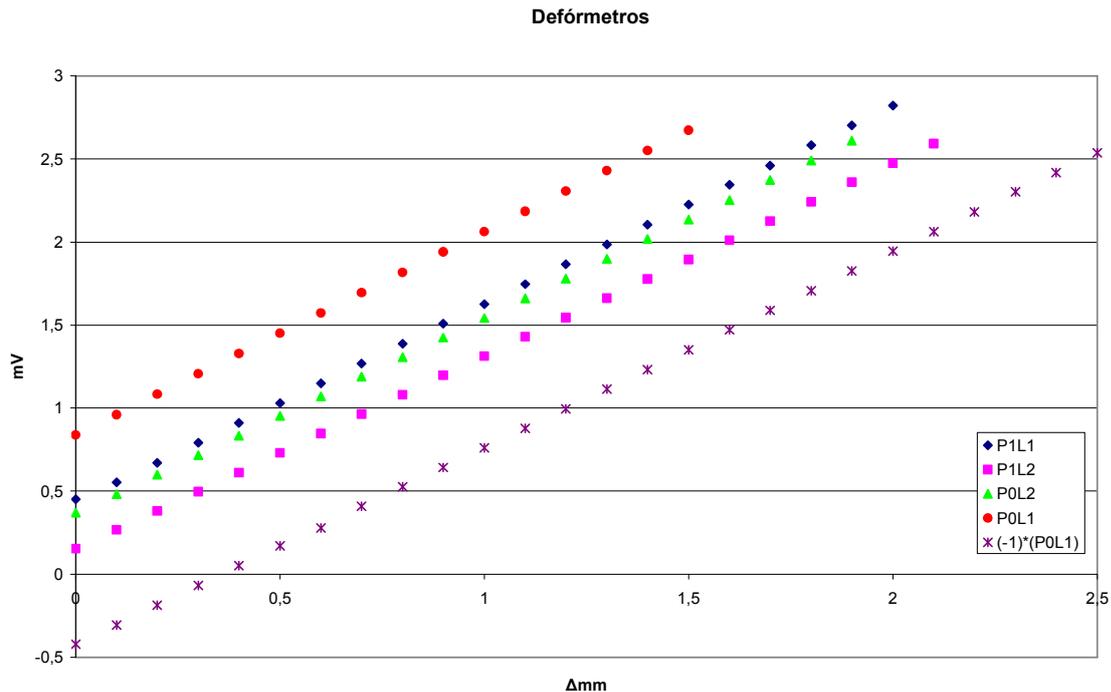


Fig. 15 Variação da tensão dos defórmetros com variação de deslocamento.

Na Fig. 15 evidencia-se que os defórmetros têm uma variação da tensão elétrica linear com o deslocamento e de sensibilidades muito semelhantes entre os transdutores. Numa análise mais detalhada, verifica-se que a sensibilidade entre defórmetros varia, sendo no entanto próxima da sensibilidade anunciada em catálogo pelo fabricante (de $1 \text{ mV V}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), conforme é evidenciado na tabela seguinte com as sensibilidades apuradas. Observa-se que existe uma variação da sensibilidade do defórmetro P0L1 para deformações em sentidos opostos, o que não é desejável. Desse modo é desejável efetuar uma calibração dos defórmetros de forma a obter a sensibilidade do sensor em condições padrão e ambiente controlado.

Tabela 3 Sensibilidades e resíduos de medição dos defórmetros.

Defórmetro	Sensibilidade ($\text{mV V}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)	Desvio % FS (5mm)
P1L1	1,192	0,036%
P1L2	1,163	0,031%
P0L1 @ [0 +2,5]	1,223	0,012%
P0L1 @ [0 -2,5]	1,184	0,049%
P0L2	1,181	0,025%

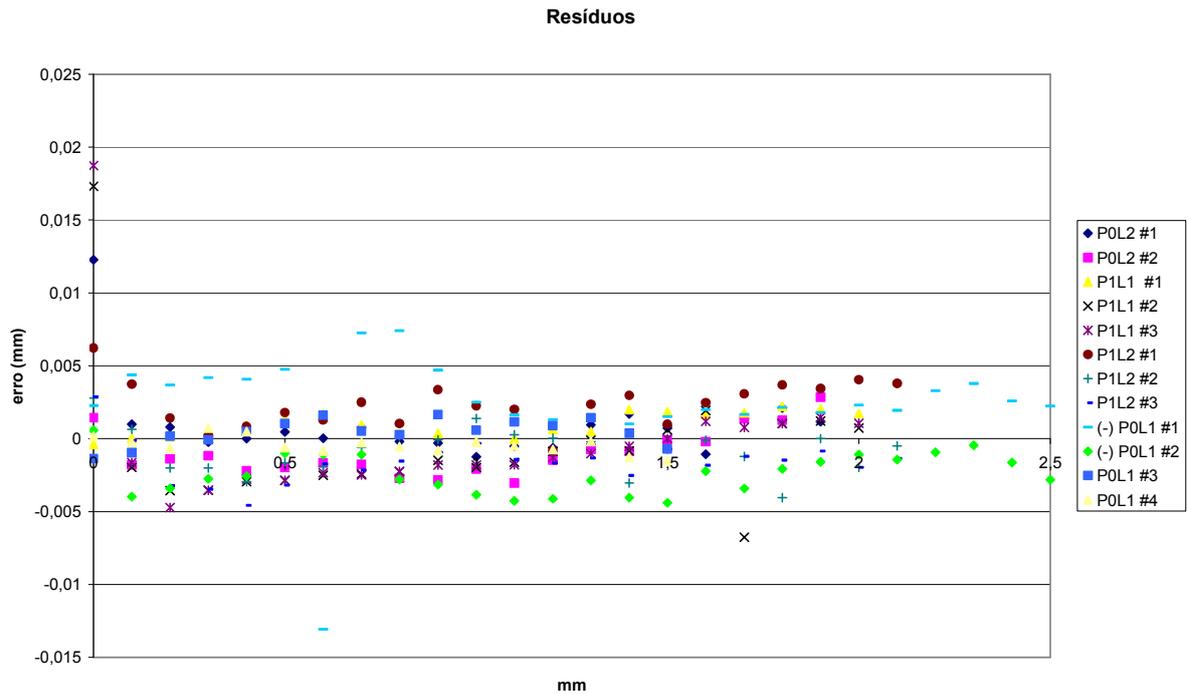


Fig. 16 Resíduos de medição dos defómetros.

Embora na Fig. 16 se observem alguns *outliers* dos resíduos com especial ênfase na origem das ordenadas (devido à dificuldade do acerto do zero mecânico), o gráfico mostra que, com as sensibilidades apuradas, é espectável medir deformações nos provetes com uma resolução até 10 microns. No entanto, como referido anteriormente esta análise de resultados não pretende substituir uma calibração do equipamento.

5 | Conclusão

Os resultados obtidos mostram que o novo sistema de aquisição implementa as funcionalidades especificadas. Foi possível melhorar o sistema de medição afeto aos ensaios com a prensa de compressão e flexão, centralizando num único computador todas as medições necessárias à condução dos ensaios. Foi também possível suprimir a dependência dos equipamentos obsoletos e avariados afetos à medição dos defómetros, eliminando-se desta forma os elementos heterogêneos e de difícil operação existentes no anterior sistema de medição.

Da análise dos resultados obtidos verifica-se que a cadeia de medição tem um comportamento linear como seria desejado. No entanto, verifica-se que as sensibilidades apuradas, embora muito semelhantes aos valores anunciados pelos fabricantes dos equipamentos, apresentam variação significativa que podem representar contribuições para um desvio de medição total superior à classe do equipamento. Nesse sentido, recomenda-se uma calibração completa das cadeias de medição, incluindo o sistema de aquisição agora instalado.

Com a introdução do novo sistema de aquisição, as células de carga passam a estar eletricamente ligadas ao novo sistema de aquisição e em simultâneo à prensa óleo-hidráulica. No entanto, a cadeia de controlo da prensa depende diretamente dos sinais elétricos das células de carga. Com a escolha criteriosa do equipamento de aquisição em conjugação com a inserção de resistores adequados na derivação de sinal para aquisição, foi possível implementar uma solução que não só melhorou os aspetos relativos à interface humano-máquina como salvaguardou a operacionalidade segura, independente e sem distúrbios na medição, da prensa óleo-hidráulica.

Finalmente, o *software* desenvolvido para esta aplicação permite agora o registo digital no próprio computador de todas as medições, melhorando e acelerando assim o processo de ensaios experimentais com a prensa de compressão e flexão. Dada a flexibilidade e modularidade que o *software* de interface oferece, é encorajado o retorno de informação por parte do utilizador de forma a melhorar e/ou corrigir a aplicação final com o objetivo de contribuir para uma melhoria da qualidade e da facilidade de realização dos ensaios com a prensa de compressão e flexão.

Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, dezembro de 2013

VISTO

O Chefe do NSEM



João C. P. Palma

O Diretor do CIC

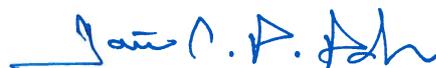


Carlos Oliveira Costa

AUTORIA



Gustavo Esteves Coelho
Eng.º Eletrotécnico, Mestre
Bolsheiro de Doutoramento



João C. P. Palma
Engº Eletrotécnico, Doutor
Investigador Principal

6 | Referências Bibliográficas

- [1] FTS Prufsysteme, “Compression and Bending Test Machine 506/200/10 DM1-S.” 1998.
- [2] Hewlett Packard (HP), “Main Frames HP E1300A.” 1991.
- [3] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM), “DD1 Strain Transducer.”
- [4] National Instruments, “NI 9219 Operating Instructions & Specifications.” 2009.
- [5] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM), “C2 Force Transducer Datasheet.” .

