

“MENSUSMONITOR” – Ferramenta de cálculo para tratamento e interpretação de resultados experimentais em Engenharia Civil

Helder Sousa¹, A. Dimande², C. Rodrigues³, A. Henriques⁴, J. Figueiras⁵

RESUMO

Os sistemas de monitorização automáticos e programáveis instalados em estruturas de Engenharia Civil têm sido nos últimos anos um dos tópicos com maior destaque no meio da investigação nacional e internacional.

Actualmente, esses sistemas são programáveis e os registos obtidos pelos sensores podem ser automaticamente armazenados sob a forma de ficheiros de dados. Consequentemente, a quantidade de registos que se pode recolher cresce exponencialmente.

Processar os registos obtidos sem ferramentas específicas e adequadas para este tipo de informação revela-se por vezes uma longa e árdua tarefa. O potencial do conhecimento que se pode extrair desses registos é elevado, o que por vezes não é devidamente rentabilizado devido ao tempo que é necessário despendido.

Com o objectivo de extrair conhecimento desses registos e, simultaneamente, rentabilizar de forma mais eficiente o tempo despendido, é apresentada uma aplicação vocacionada para o tratamento e interpretação de resultados experimentais obtidos por sistemas de monitorização instalados em estruturas de Engenharia Civil.

Tendo em consideração a experiência dos autores na área da monitorização estrutural e material, no seio da unidade de investigação LABEST da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, serão apresentados exemplos práticos, que são partes constituintes da aplicação apresentada – MENSUSMONITOR.

PALAVRAS-CHAVE

LabVIEW, C++, Matlab, mySQL, Programação, Monitorização estrutural e material.

¹ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal. hfmsousa@fe.up.pt.pt

² Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal. adimande@fe.up.pt.pt

³ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal. cfr@fe.up.pt.pt

⁴ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal. aarh@fe.up.pt.pt

⁵ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal. jafig@fe.up.pt.pt

1. MOTIVAÇÃO

Uma das áreas de investigação a que se tem dado mais atenção nos últimos anos, no domínio das Estruturas de Engenharia Civil, tem sido a instrumentação e monitorização de estruturas. Se por um lado permite a verificação da conformidade dos comportamentos previstos, por outro, fornece uma base de dados que permite conhecer de um modo mais aprofundado o comportamento real das estruturas e dos seus materiais constituintes.

Actualmente, os sistemas de monitorização permitem o acompanhamento de um conjunto de grandezas de modo automatizado e programável através de procedimentos de leitura, bem como o armazenamento das leituras efectuadas pelos sensores em ficheiros de dados. O volume de dados recolhido por estes sistemas rapidamente se torna volumoso. A sua consulta com o objectivo de extrair um conhecimento de nível superior é uma tarefa que rapidamente se torna fastidiosa sem o auxílio de ferramentas de cálculo específicas. O potencial de conhecimento que os registos da monitorização possuem é elevado, e se por um lado ter uma vasta base de dados é um bom ponto de partida para se alcançar conhecimento, por outro lado se não se efectua uma abordagem em tempo útil então a base de dados referida não é informação.

Atendendo à especificidade da área da monitorização de estruturas, os autores defendem a necessidade da existência de ferramentas de cálculo específicas visando o tratamento e interpretação de resultados experimentais em materiais e estruturas de Engenharia Civil. Esta conclusão é resultado de uma experiência adquirida pelo LABEST, onde existe um grupo de investigadores que se dedica exclusivamente à monitorização de estruturas. A partilha e discussão dos problemas e suas resoluções deram o estímulo para a elaboração de uma plataforma comum, tornando assim possível a partilha das ferramentas de cálculo desenvolvidas no seio da unidade de investigação. Nesse sentido, é apresentada uma aplicação – MENSUSMONITOR, que tem vindo a evoluir na sua concepção e funcionalidades. A sua estrutura base é implementada em LabVIEW, com a inclusão de módulos que podem ser desenvolvidos na mesma linguagem de programação ou noutra que possua protocolo de integração, designadamente C++ e MATLAB. Destaca-se o facto de ter sido opção, desde o início do seu desenvolvimento, construir uma aplicação de um modo “aberto”. Ou seja, a estrutura base foi desenvolvida visando a possibilidade da integração de novos módulos com relativa facilidade e com alterações mínimas no que já está implementado.

2. MENSUSMONITOR

2.1 Âmbito

A aplicação MENSUSMONITOR pretende disponibilizar uma biblioteca de ferramentas de cálculo para o tratamento e análise de resultados experimentais em materiais e estruturas de Engenharia Civil. Pela experiência dos autores, é premente a existência de uma ferramenta com funções muito específicas e que dêem apoio a determinadas tarefas repetitivas durante a fase do pré-tratamento da informação. A economia de tempo despendido pode ser muito significativa caso essa ferramenta responda a necessidades e exigências que os autores “manualmente” têm de realizar.

Por outro lado, MENSUSMONITOR pretende ser uma aplicação evolutiva, flexível e aberta ao contributo daqueles que estejam na área da monitorização de estruturas. A forma como a aplicação foi desenvolvida permite uma programação em equipa, modular e com protecção do código fonte caso os autores assim o pretendam. Deste modo, é possível a integração de novos módulos desenvolvidos em linguagens de programação para além da que é usada na construção do programa principal. Com esta estratégia facilita-se a participação de novos contributos, tornando a aplicação mais robusta, eficiente, e com reflexos positivos no trabalho desenvolvido por cada utilizador.

2.2 Concepção e funcionamento

Em termos de concepção, MENSUSMONITOR é uma aplicação que possui um programa principal desenvolvido em LabVIEW [2] e que gere a entrada e saída de dados, bem como as ferramentas

numéricas disponibilizadas. Estes três módulos estão dependentes entre si de modo sequencial em termos de variáveis, no entanto independentes no que respeita ao código fonte.

No que respeita à entrada de dados foram tidos em especial consideração os formatos de ficheiros aceites pela aplicação. Trata-se de um aspecto fundamental, pois quanto maior o número de formatos de ficheiros que a aplicação aceite, mais convidativa se torna a sua utilização. Mais especificamente, a aplicação permite aceder a ficheiros de texto com formatos específicos de equipamentos de aquisição utilizados em monitorização estrutural, ficheiros EXCEL e também a conexão a bases de dados MySQL. Já no que respeita à saída de resultados, a aplicação permite igualmente a criação de ficheiros de diversos formatos, designadamente ficheiros de texto, EXCEL, JPEG, HTML e ainda o armazenamento em bases de dados MySQL.

No que concerne às ferramentas numéricas, estas são desenvolvidas na mesma linguagem do programa principal, LabVIEW, ou então em C++ e MATLAB. A possibilidade de poder incluir ferramentas de cálculo desenvolvidas em outra linguagem de programação que não LabVIEW é uma grande vantagem, pois possibilita que diferentes programadores habituados a desenvolver as suas ferramentas nessas linguagens possam inclui-las no programa principal sem necessidade de as reescrever em LabVIEW.

Actualmente, MENSUSMONITOR oferece um conjunto de ferramentas das quais se destacam as seguintes: (i) *mensus_sampling-rate_change*: redução ou incremento da frequência base de um registo experimental; (ii) *mensus_filter*: filtragem de resultados experimentais com recurso a uma biblioteca de filtros disponibilizada; (iii) *mensus_fitting*: ajuste das expressões teóricas da retracção e fluência do EC2 a resultados experimentais obtidos em prismas de betão; (iv) *mensus_correlation*: identificação de correlações entre sinais experimentais e obtenção de parâmetros de correlação.

Refere-se que a aplicação desenvolvida disponibiliza um guia de utilização para cada ferramenta de cálculo, que pretende elucidar e ajudar na correcta utilização dos recursos disponibilizados. Este procedimento convida o próprio autor da ferramenta de cálculo a reflectir nos elementos que está a disponibilizar numa perspectiva de utilizador (e não só de programador).

Na Figura 1 ilustra-se a estrutura do MENSUSMONITOR, bem como se procede à identificação dos módulos anteriormente referidos.

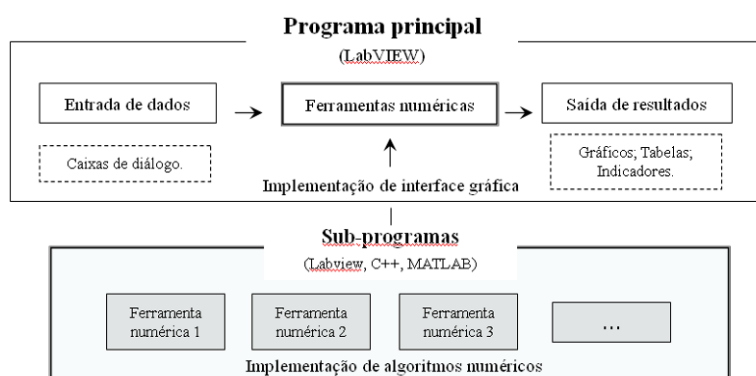


Figura 1. Estrutura do MENSUSMONITOR.

A opção por uma estrutura deste tipo (modular) teve em conta um dos principais objectivos desta aplicação, que é facilitar a inclusão de novas ferramentas com o mínimo de alterações no que já está implementado.

3. MENSUSMONITOR – Exemplos de aplicação

3.1 Decimação e Interpolação de Sinal

Na análise de uma série temporal de dados provenientes da monitorização estrutural, seja ela de carácter dinâmico ou estático, um dos aspectos mais significativos na determinação do conteúdo útil dessa mesma série temporal é a frequência de amostragem. Neste contexto, a selecção da frequência

de amostragem deve ser a mais adequada possível para a caracterização do fenómeno físico em estudo nos seus mais variados contextos.

Procurando assegurar a caracterização do fenômeno em apreço, existe, no contexto atrás exposto, a necessidade de assumir um compromisso entre a resolução temporal da amostragem e o consequente volume de informação a processar. Neste particular, com a possibilidade de conferir, aos equipamentos de aquisição, taxas de amostragem cada vez mais elevadas, conduzindo por vezes a informação pesada e pouco rica, ou na tentativa de compatibilizar a informação de diferentes séries temporais, assume particular importância a possibilidade de numericamente conseguir alterar, *a posteriori* e sem perda relevante da qualidade do sinal, a respectiva taxa de amostragem.

Dos algoritmos numéricos que envolvem a transformação da frequência de amostragem, destaca-se, neste ponto, a designada decimação de sinal associada à redução da taxa de amostragem e a interpolação de sinal associada, por sua vez, ao incremento da frequência de amostragem. Ambas as operações enunciadas envolvem geralmente a aplicação prévia de filtros passa-baixo para tratamento específico do respectivo sinal [3].

Procurou-se, neste trabalho, desenvolvido sobretudo com o intuito de demonstrar a possibilidade de interação da programação de base em LabVIEW com a capacidade numérica reconhecida ao MATLAB, desenvolver um conjunto de ferramentas que permitam, no contexto exposto, a transformação da frequência de amostragem base de determinado registo de dados. Realça-se, neste sentido, a potencial vantagem tirada da utilização da programação em MATLAB (*m-files*) resultante da utilização da biblioteca de rotinas de raiz constituintes deste último programa. Resulta, desta forma, integrado numa interface gráfica comum à dinâmica definida para o MENSUSMONITOR, uma ferramenta de cálculo em que é imperceptível ao utilizador final a linguagem base que sustenta o algoritmo de cálculo.

Construiu-se, no âmbito exposto, uma ferramenta de cálculo que comporta a possibilidade de proceder à decimação ou interpolação, isto é à redução ou incremento da frequência base de uma amostra de dados previamente carregada, que tira sobretudo partido das rotinas “*downsample*”, “*decimate*” e “*interp*” da biblioteca *Signal Processing Toolbox* do MATLAB [4].

Para a utilização de qualquer ferramenta de cálculo, o utilizador tem que aceder previamente aos registos que podem estar sob a forma de ficheiros de dados ou provenientes de uma base de dados. Na Figura 2 ilustra-se o procedimento de abertura de um fiheiro EXCEL que possui dois registos experimentais e aos quais se pretende aplicar a ferramenta de cálculo aqui apresentada.

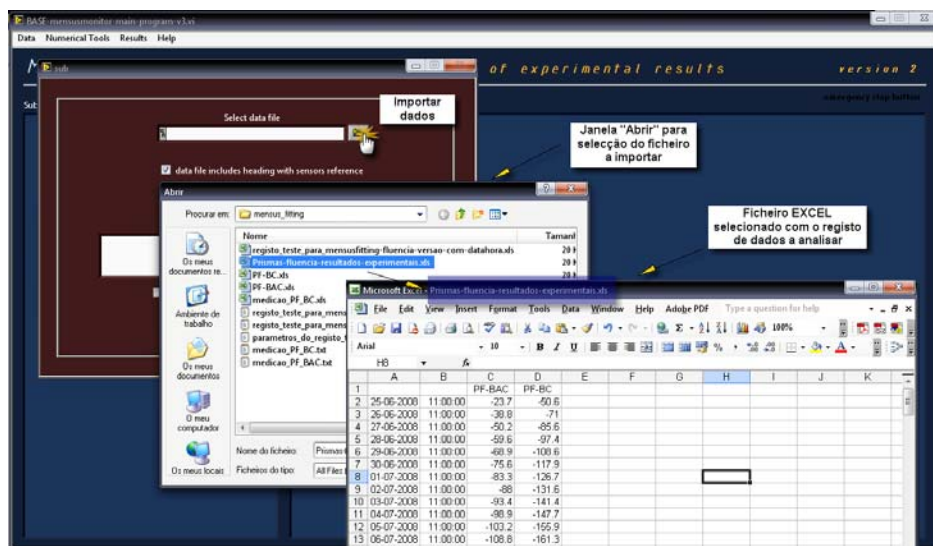


Figura 2. Introdução de dados através de ficheiros EXCEL.

Na Figura 3 ilustra-se o interface criado para esta ferramenta numérica assim como se representa, a título exemplificativo, a aplicação de uma decimação de sinal sobre uma amostra de dados representativa.

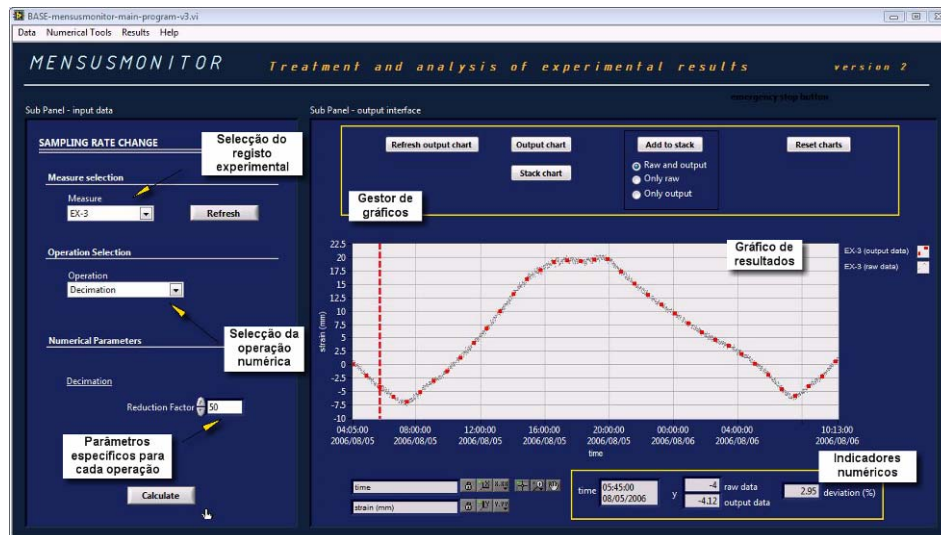


Figura 3. Ferramenta *Sampling Rate Change* com decimação de sinal.

3.2 Filtragem de registos obtidos por sensores

Acontece diversas vezes em ensaios experimentais a necessidade de efectuar um pré-tratamento da informação recolhida. Muitas vezes, o tempo despendido nesta fase de estudo é elevado. No sentido de minimizar esse tempo (e que por vezes não corresponde ao principal objectivo da análise dos dados) foi implementada uma ferramenta de cálculo que de modo automático efectua as seguintes tarefas: (i) eliminação das perturbações no sinal adquirido; (ii) eliminação de amostras atípicas; (iii) avaliação de valores máximos e mínimos assim como os instantes da sua ocorrência.

Como exemplo ilustrativo, considere-se um registo obtido durante um ensaio de carga numa ponte o qual possui uma série de colunas referentes aos diversos sensores utilizados e uma série de linhas que correspondem às leituras efectuadas em todos os sensores desde o início até ao fim do ensaio. Geralmente esse registo possui um grande número de sensores e uma série temporal composta por uma sequência de procedimentos de ensaio. De modo a facilitar a consulta de um registo com grande quantidade de informação é disponibilizado um pré-visualizador de dados. Esta janela permite, em qualquer altura, seleccionar um conjunto específico de sensores do registo importado, bem como, definir uma janela temporal a considerar para a análise (Figura 4).

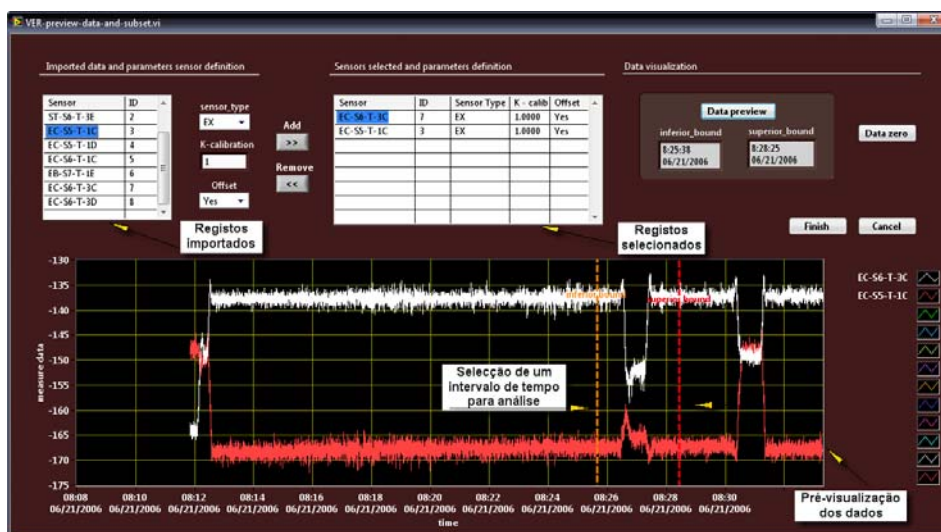


Figura 4. Pré-visualização de dados e escolha selectiva.

“MENSUSMONITOR” – Ferramenta de cálculo para tratamento e interpretação de resultados experimentais em Engenharia Civil

Com os registos pretendidos seleccionados, a ferramenta de cálculo disponibiliza um conjunto de filtros para os quais é possível quantificar, de modo interactivo, os parâmetros do filtro seleccionado. A visualização dos resultados permite a sobreposição do registo original com o registo após filtragem. Adicionalmente e de modo automático, é construída uma tabela com a indicação dos valores iniciais e finais do registo, bem como os valores mínimo e máximo ocorridos. Para todos os valores anteriormente referidos é também indicado o seu instante de ocorrência. É possível ainda, e em tempo real, visualizar os valores de ambos os registos para um dado instante, com a indicação dos valores e desvios constatados entre eles (Figura 5).

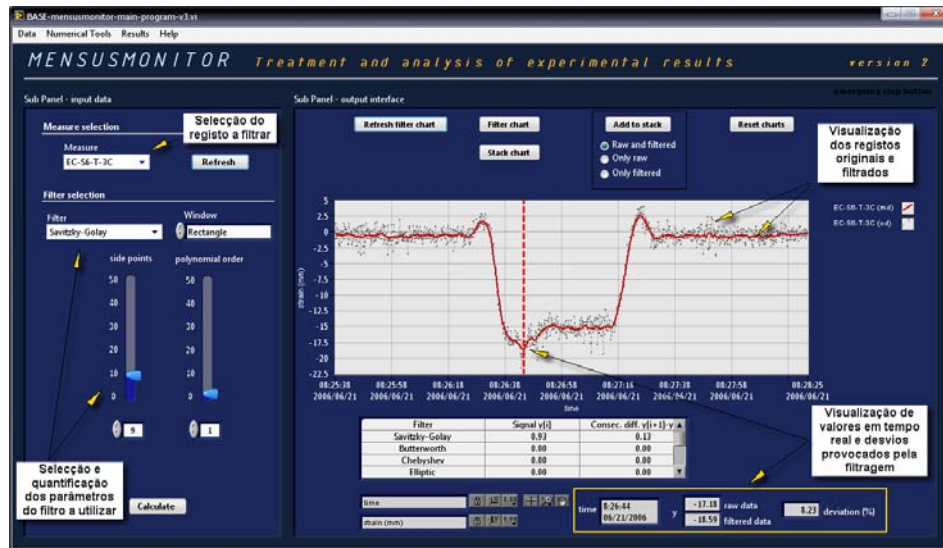


Figura 5. Funcionalidades da ferramenta de cálculo *mensur filter*.

3.3 Ajuste das curvas de retracção e fluência a registos experimentais obtidos em prismas de betão

Um dos aspectos mais importantes na monitorização, a longo prazo, de estruturas de betão é a correcta avaliação da retracção e fluência. Os modelos teóricos apresentam por vezes desvios consideráveis em relação a registos experimentais em prismas de betão. Com esta constatação, para uma avaliação correcta através dos modelos regulamentares é necessário proceder a um ajuste dessas mesmas expressões aos registos experimentais obtidos. No entanto, tendo em conta as expressões regulamentares do EC2, o processo de ajuste não é uma tarefa simples e directa. Nesse sentido foi desenvolvido uma ferramenta de cálculo, que de um modo relativamente rápido e simples permite efectuar esse ajuste, de um modo versátil e interactivo. A metodologia de ajuste é baseada na formulação de um problema de minimização entre o registo experimental e os modelos teóricos do EC2, considerando como incógnitas alguns parâmetros que definem os referidos modelos teóricos [5]. Após o acesso ao ficheiro de dados com os registos experimentais, o utilizador pode realizar de um modo interactivo: (i) selecção do registo experimental que pretende utilizar; (ii) selecção do modelo teórico que traduz o fenómeno em estudo, que neste caso será a retracção ou a fluência do betão; (iii) quantificação dos parâmetros do modelo teórico seleccionado, que serão considerados como a solução inicial do problema de ajuste; (iv) e finalmente a discriminação dos parâmetros que serão ajustados e os que serão considerados fixos. Em qualquer altura dos cálculos, é possível visualizar os resultados obtidos, em formato gráfico, tabela resumo (com os valores dos parâmetros antes e após ajuste e respectivos desvios), bem como indicadores numéricos.

À semelhança das outras ferramentas de cálculo disponibilizadas, em qualquer altura o utilizador pode facilmente seleccionar outro registo experimental para análise, seleccionar outro modelo teórico disponibilizado na biblioteca da ferramenta de cálculo (de referir que é possível acrescentar modelos teóricos à biblioteca interna do programa), bem como alterar os valores iniciais dos parâmetros e o seu comportamento (fixo ou ajustável) e visualizar de imediato os novos resultados. Esta versatilidade permite efectuar uma análise de sensibilidade num curto espaço de tempo.

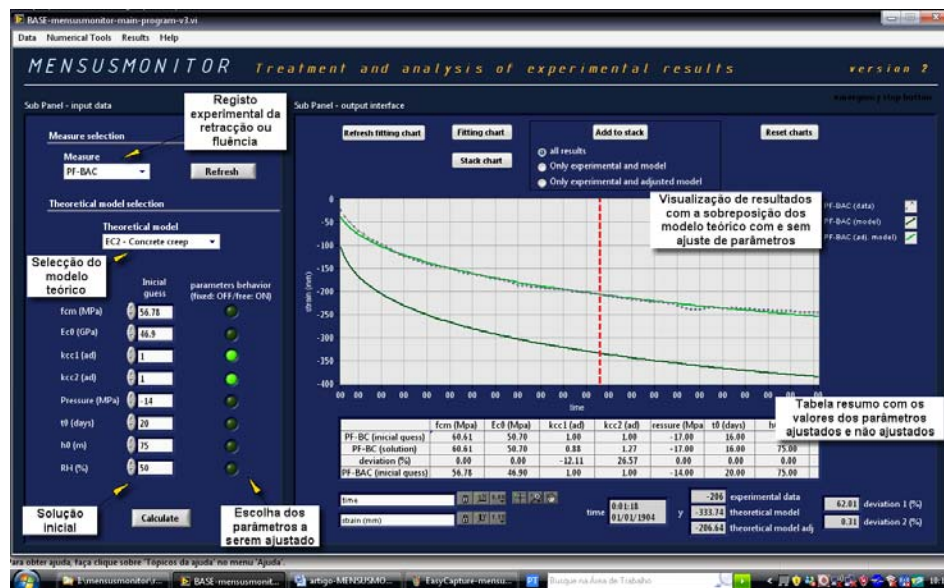


Figura 6. Funcionalidades da ferramenta de cálculo *menssus fitting*.

A aplicação desenvolvida possibilita também a realização de composições a partir de resultados obtidos durante uma sequência de análises efectuadas. Por exemplo, no caso do ajuste de modelos teóricos da retracção ou fluência por vezes há interesse de representar, num mesmo gráfico e/ou tabela, os resultados obtidos por diferentes modelos teóricos (EC2, MC90, outros). Sendo assim, o utilizador pode efectuar uma série de ajustes de modo sequencial, e sempre que obter um resultado satisfatório este pode ser adicionado a uma memória (na forma de gráfico e/ou tabela) que vai armazenando esses resultados.

Sendo uma área de composição, é possível definir as referências dos eixos X e Y do gráfico, bem como definir as cores e tipo de linhas dos registos apresentados no gráfico de composição. Numa fase final da composição, o utilizador tem a possibilidade de exportar os resultados sob a forma de um conjunto de formatos disponibilizados. A Figura 7 ilustra o espaço de composição.

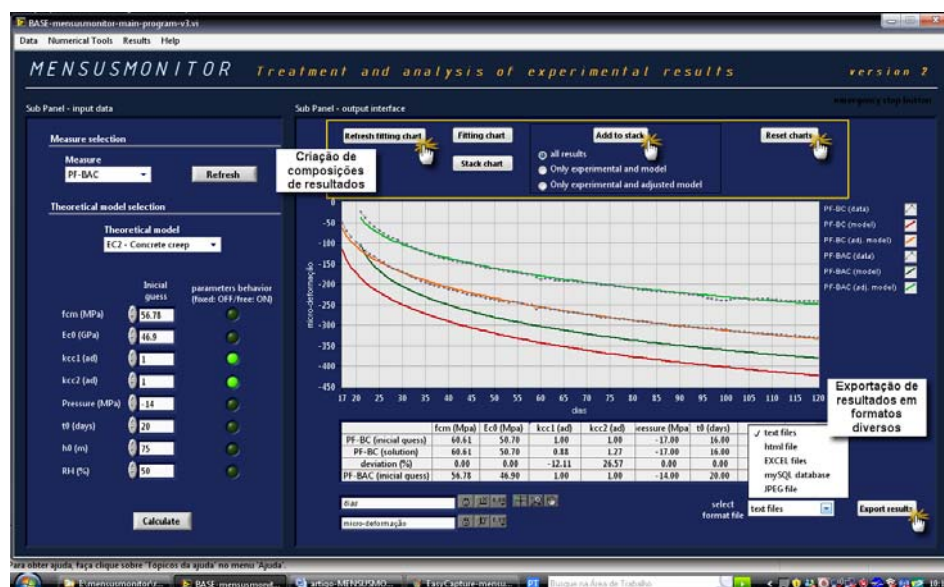


Figura 7. Espaço de composição de resultados.

3.4 Estudo de correlação de registos experimentais com a temperatura ou outras grandezas

Quando se observam e estudam os registos obtidos na monitorização de estruturas acontece muitas das vezes constatar correlações entre registos. Em algumas situações, grandezas aleatórias, tais como, a humidade, a temperatura, e a pressão afectam os dados da medição, podendo haver uma dependência entre estes últimos e os primeiros. Se for possível avaliar a correlação entre esses registos, então torna-se também possível construir modelos estatísticos que permitam posteriormente minimizar os efeitos dessas variáveis.

Nesse sentido a aplicação disponibiliza uma ferramenta de cálculo que avalia o grau de correlação entre registos de grandezas da mesma natureza ou de natureza distinta. Para quantificar o grau de correlação é utilizado um modelo de regressão, sendo um dos métodos estatísticos mais usados para investigar a relação entre variáveis. Este método tenta relacionar um conjunto de observações de uma dada variável, x_i , com as leituras de uma outra grandeza, y_i . O conceito da correlação é baseado na minimização dos desvios entre os dados experimentais $y(x_i)$ e a estimativa $f(x_i, a)$. A equação que permite avaliar o grau de correlação entre as duas grandezas é definida pela minimização do quadrado dos desvios de acordo com a ‘Eq. (1)’.

$$E(a) = \sum_{i=1}^n [f(x_i, a) - y(x_i)]^2 \quad (1)$$

Onde $E(a)$ representa o quadrado dos desvios, $y(x_i)$ corresponde ao conjunto de dados observados, $f(x, a)$ é a função que define o comportamento do conjunto de dados, e a é o conjunto de coeficientes da curva que melhor se ajusta ao conjunto de dados experimentais.

A determinação do conjunto de coeficientes (a) da curva é feita resolvendo o sistema de equações definido pela ‘Eq. (2)’

$$\frac{\partial}{\partial a} E(a) = 0 \quad (2)$$

Por exemplo, a consideração da correlação entre registos experimentais e as variáveis aleatórias incluem as seguintes vantagens: (i) remoção do ruído resultante das medições; (ii) possibilidade de preenchimento de dados experimentais em falta em situações em que há falha na leitura de uma ou mais variáveis ou quando estas são impropriamente gravadas; (iii) interpolação de dados, isto é, permite estimar dados entre leituras, em situações em que o intervalo entre leituras seja demasiado grande; (iv) extrapolação de dados, permite estimar pontos para além dos pontos adquiridos, isto é, obter pontos antes ou depois de um conjunto de medições efectuadas;

A Figura 8 ilustra a ferramenta de cálculo desenvolvida, na qual o utilizador dispõe de um conjunto de opções para poder avaliar a existência, ou não, de correlações entre variáveis seleccionadas. Na tela à esquerda são disponibilizados campos de selecção em que o utilizador poderá escolher as variáveis a considerar no eixo das abcissas e das ordenadas e consoante a tendência dos dados observados, poderá escolher o tipo de modelo, linear, exponencial, polinomial, logarítmico, etc. e a precisão pretendida. A estimativa do modelo é apresentada juntamente com os dados observados, é dada a equação que traduz o modelo definido e é apresentado o erro quadrático médio que traduz o afastamento entre os valores da previsão e os valores observados.

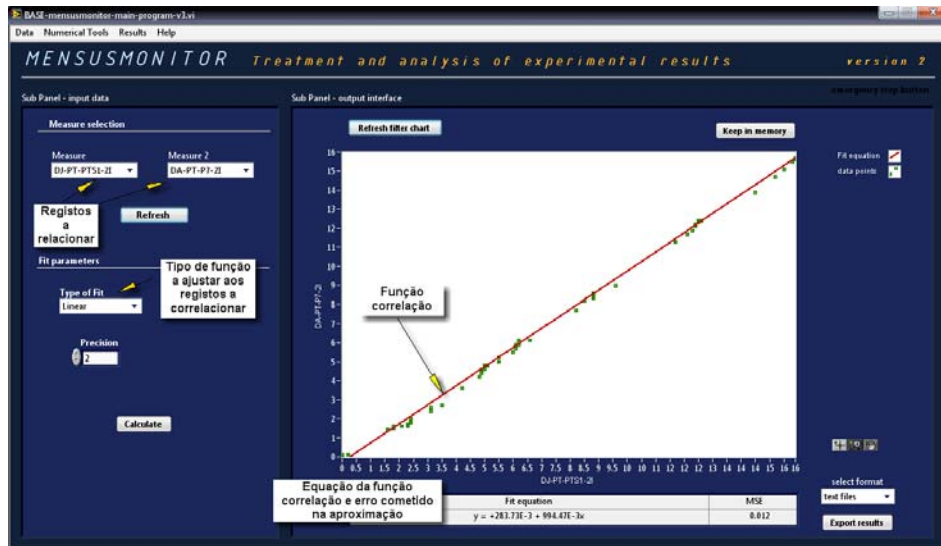


Figura 8. Funcionalidades da ferramenta de cálculo *mensur correlation*.

Para além das ferramentas numéricas propriamente ditas, a aplicação fornece um guia de utilização que descreve de forma sucinta as principais características das ferramentas disponibilizadas, designadamente: (i) nome da ferramenta de cálculo disponibilizada; (ii) autor; (iii) objectivo; (iv) sequência de passos a realizar para uma correcta utilização da ferramenta de cálculo disponibilizada. Como exemplo ilustrativo apresenta-se na Figura 9 o guia de utilização para a ferramenta de cálculo *mensur correlation*. Na página principal existe um resumo das ferramentas de cálculo disponibilizadas. Por sua vez, cada uma das ferramentas referidas comporta-se como um link que redirecciona para a página que contém toda a informação relevante para a correcta utilização da ferramenta de cálculo.

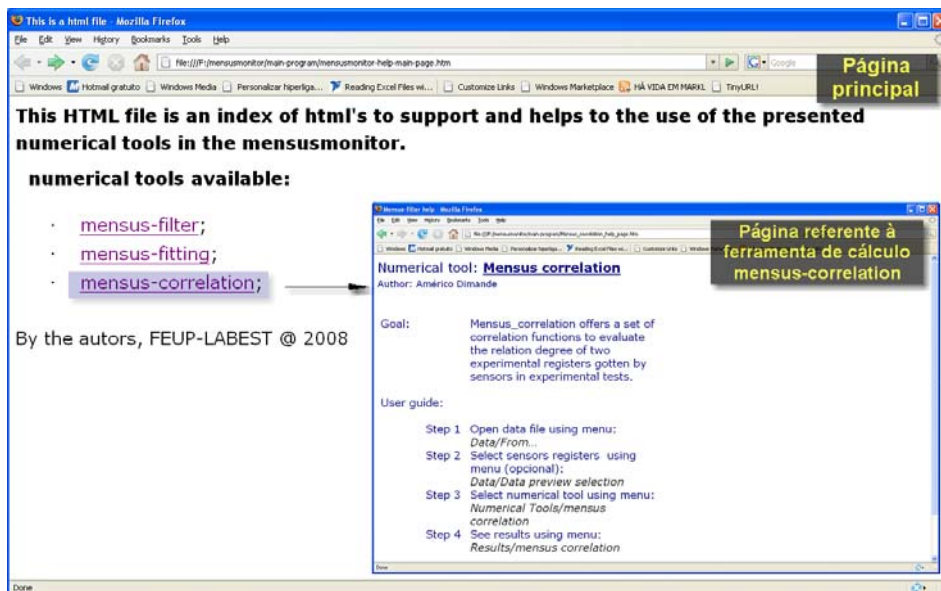


Figura 9. Guia de utilização das ferramentas numéricas.

4. CONCLUSÕES

Em primeiro lugar destaca-se a facilidade e versatilidade em desenvolver aplicações com funções muito específicas e ao mesmo tempo conferir-lhes uma interface gráfica de fácil utilização. Por outro lado destaca-se a sinergia resultante da possibilidade de, numa mesma aplicação, poder coexistir

ferramentas numéricas desenvolvidas em diferentes linguagens de programação, aproveitando assim as principais vantagens de cada uma delas. Os dois factores anteriores, aliados à capacidade e vontade de criar aplicações destinadas à monitorização estrutural, conduzem a um benefício para todos aqueles que têm de realizar tarefas inerentes ao tratamento, análise e interpretação de resultados experimentais.

5. AGRADECIMENTOS

Os três primeiros autores agradecem à FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento dos seus trabalhos de doutoramento.

REFERÊNCIAS

- [1] Sousa, Helder et al. - *MENSUSMONITOR – Tool for the treatment and interpretation of experimental results in Civil Engineering*. CCC 2008 – Challenges for Civil Construction, FEUP, Porto, 2008.
- [2] Beyon, J. Y.. *LabVIEW programming data acquisition and analysis*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, cop. 2001.
- [3] IEEE. *Programs for Digital Signal Processing*, IEEE Press, John Wiley & Sons, New York, 1979.
- [4] MATLAB Help. *MATLAB – The Language of Technical Computing – R2007a*, 2007.
- [5] Sousa, Helder et al. - *Estudo numérico e experimental da retracção e fluência – Metodologia de ajuste das expressões do Eurocódigo 2*. 4ª Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, LNEC, 2006.