

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de P&D em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Desenvolvimento de uma célula de carga triaxial para avaliação de carregamentos mecânicos na indústria do petróleo

AUTORES:

Maria Augusta de Menezes Lourenço, Jonas Medeiros de Azevedo Barbosa, Adilson José de Oliveira

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.

DESENVOLVIMENTO DE UMA CÉLULA DE CARGA TRIAXIAL PARA AVALIAÇÃO DE CARREGAMENTOS MECÂNICOS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

Abstract

The oil and gas supply chain includes several processes, such as exploration, extraction, refining, transportation and marketing and it has received heavy investments, mainly due to the exploration of the Brazilian pre-salt layer hydrocarbon resources. However, for this growth, it has been necessary to optimize the processes based on knowledge of the variables involved. The load analysis (statics and dynamics) in structures, equipment and installations is one of the critical issues. The knowledge about the reliable loads provides suitable mechanical dimensioning, prevent accidents, which can involve hundreds of people. Experimentally, these loads can be measured with the assistance of load cells (force measurement devices) and one possible manner to obtain this result is to measure the deformations in an element that undergoes loading. The measurement is carried out by strain gages (transducers able to measure small deformations), and relating the deformation and the applied force. The objective of this work is the development a triaxial load cell with four sensing elements, based in strain gages, between rectangular bases, to measure orthogonal force components (until 1 kN on each axis). The transducers configured in complete Wheatstone Bridge (one for each direction) allow, together with the acquisition modules and software, the determination of the resultant force vector. The project was divided into seven stages: (a) conceptual design and engineering analyzes, (b) manufacturing of components, (c) dimensional analyses, (d) bonding and welding of transducers, (e) development of acquisition programs, (f) calibration programs and, finally, (g) functional tests. This paper deals with the (a) to (e) stages. The developed load cell allows to obtain parameters such as the rate of force variation, magnitude and frequency in different processes of the oil and gas production chain. In addition, this technology can be expanded to other areas such as pressure vessels, oil chambers and drill strings.

Introdução

A importância das células de carga é primária em trabalhos experimentais nas diversas áreas do conhecimento em que a informação dos componentes de uma força seja crítica, pois para medir a força resultante com a precisão desejada faz-se necessário um dispositivo projetado e fabricado com suficiente acurácia (SAGLAM e ÜNÜVAR, 2001). Existem diferentes tipos de células de carga os quais permitem medir forças em até três direções e/ou determinar a força resultante (DEVRIES, 2011), como os modelos projetados por Saglam e Ünüvar (2001), Shaw (2005), Rossi (2007), Totis et al. (2014), Rizal et al. (2014) e Ribeiro (2016). A análise de força está presente nos diferentes processos industriais inseridos em uma cadeia produtiva de petróleo e gás natural, como exploração, extração, refino, transporte e comercialização. Esse ramo industrial é motivo de grandes investimentos e, portanto, a sua otimização é o alvo deste trabalho. Isso se torna possível através da análise de forças as quais os equipamentos e os instrumentos utilizados são submetidos.

A célula de carga é um dispositivo para medir força, sejam elas estáticas ou dinâmicas. Uma das formas de se obter este resultado é através da medição de deformações (no regime elástico do material) apresentadas em um elemento sujeito ao carregamento. A medição de força é expressa através da deformação do material, que pode ser captada por meio de transdutores, como extensômetros (ROSSI, 2007). Assim, relaciona-se a deformação e a força, permitindo sua obtenção de maneira indireta. Os extensômetros permitem medir deformações de ordem micrométrica, o que é fundamental para se evitar modificações de posição e de comportamento do carregamento em função da rigidez.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma célula de carga com bases retangulares, baseada em extensômetros, para medição de componentes tridimensionais de força (até 1 kN em cada eixo).

Múltiplos elementos elásticos presentes no interior do dispositivo e os transdutores configurados em Ponte de Wheatstone completa (uma para cada direção) permitem, juntamente com os módulos de aquisição e programas de computador, a aquisição e processamento dos dados. Além disso, o projeto permite fácil configuração para uma ampla faixa de modelos e tamanhos de peças ensaiadas, de forma poder se adaptar às necessidades de cada processo. A técnica de medição de força também pode ser facilmente extrapolada para outros processos da cadeia de petróleo de gás natural, como vasos de pressão, reservatórios, colunas de perfuração, etc.

Metodologia

O projeto de desenvolvimento de uma célula de carga está dividido em sete fases: (a) o projeto conceitual e análises de engenharia da célula de carga, (b) a manufatura dos componentes, (c) análise dimensional, (d) colagem e soldagem dos transdutores, (e) elaboração de programas de aquisição e processamento de dados, (f) programas de calibração e (g) testes funcionais. Neste artigo são abordadas as fases (a) a (e).

A concepção do projeto - primeira fase (a) - considerou os requisitos iniciais baseados em uma fundamentação teórica, em sua aplicação, e em restrições apresentadas por instrumentos, materiais, máquinas e ferramentas disponíveis. Os requisitos foram: capacidade de medir componentes ortogonais de força triaxial de 50 N a 1 kN; elementos rígidos e elementos elásticos com diferença de, pelo menos, três vezes entre os módulos de elasticidade; elementos elásticos carregados no regime elástico; sensibilidade e rigidez do dispositivo adequadas ao carregamento; transdutores compatíveis com sistemas de aquisição e processamento do sinal; geometria compacta e simétrica, que permita montagem, desmontagem e expansão; geometria dos elementos elásticos que facilite a colagem e soldagem dos transdutores; sistema de fixação do dinamômetro compatível com mesas de máquinas-ferramenta; sistema de fixação do corpo de prova de acordo com a Série de Renard. Para o desenvolvimento do projeto, da modelagem, das análises de engenharia e das estratégias de usinagem foi utilizado o software CREO Parametric 3.0 da empresa PTC (versão acadêmica). Com relação aos extensômetros, eles devem atender aos seguintes requisitos para adaptação ao sistema de aquisição: máxima tensão de alimentação de 10 V; resistência adequada e máxima possível para a aplicação (350 Ω); sensibilidade menor ou igual a 1%. Algumas das condições listadas tiveram como base o projeto desenvolvido por Ribeiro (2016).

A análise de tensões e de deformações com o Método dos Elementos Finitos teve como foco os elementos elásticos. Esses elementos, conforme apresentado por Saglam e Ünüvar (2001), Shaw (2005), Rossi (2007), Totis et al. (2014), Rizal et al. (2014) e Ribeiro (2016), devem ser situados entre duas bases. Na face de contato superior (recebe carregamento) deve ser colocado um vetor de força, com módulo e direção conforme os requisitos de projeto, e na superfície de contato inferior, as restrições ao movimento (graus de liberdade), uma vez que essa face representa a fixação em um apoio ou base. Para o critério de convergência da simulação utilizou-se o método de múltiplas iterações, com convergência de 10% e polinômios de ordem mínima 1 e máxima 6.

A segunda fase (b) foi a manufatura dos componentes, realizada em um Centro de Usinagem CNC ROMI D600. As operações de usinagem necessitaram de fresas de topo reto ($\varnothing 5$, 12 e 20 mm), brocas helicoidais ($\varnothing 4$, 5 e 5,8 mm), alargador ($\varnothing 6$ mm) e macho rígido (M6 x 1 mm). Com relação às operações, definiu-se desbaste com sobrematerial de 0,25 mm em cada superfície e acabamento de regiões críticas de forma atingir as especificações de tolerância dimensional e textura superficial. A definição dos parâmetros de usinagem seguiu as recomendações do fabricante de ferramentas (SANDVIK, 2017). Utilizou-se fluido de corte em abundância (emulsão baseada em óleo mineral) em todas as operações.

A análise dimensional - terceira fase (c) - teve como foco a análise das tolerâncias críticas estabelecidas em projeto. Os instrumentos utilizados para as medições foram: micrômetro externo Mitutoyo 0-25 mm (resolução de 0,01 mm); micrômetro de profundidade Mitutoyo 0-25 mm (resolução de 0,01 mm); paquímetro Mitutoyo 0-150 mm (resolução de 0,01 mm); relógio apalpador Mitutoyo (resolução de 0,01 mm); rugosímetro portátil Taylor Hobson Surtronic 3; traçador de altura digital Mitutoyo (resolução de 0,01 mm); multímetro Digital ET-2053 Minipa.

A quarta fase (d) foi a colagem e soldagem dos extensômetros. Realizou-se a preparação das superfícies do elemento elástico com lixas d'água Gr 150 e 240 (abrasivo SiC). Com o auxílio do traçador de altura digital (Mitutoyo - resolução de 0,01 mm) foram feitas marcações ortogonais de orientação para a colagem. Para a limpeza usou-se papel celulose umedecidos com acetona (PA), passando-os em uma única direção e uma única vez até que este não apresentasse resíduos aparentes. Com auxílio da fita poliamida, posicionaram-se os extensômetros nas marcações de acordo com o especificado em projeto. Aplicou-se a cola Z70 na região de fixação de acordo com as instruções do fabricante (HBM, 2017b). Para a soldagem dos cabos aos terminais dos extensômetros, novamente, realizou-se a limpeza com acetona PA e papel celulose; e posteriormente, com uma estação de soldagem (Toyo TS-960D), ajustada para temperatura de 240°C, foram soldados os itens com fio de liga de estanho de 0,8 mm. A última atividade da quarta fase foi a aplicação do revestimento superficial PU140 da HBM, de acordo com as recomendações do fabricante (HBM, 2017a).

Uma vez com os transdutores colados e os cabos soldados nos elementos elásticos, a quinta fase (e) foi o desenvolvimento de programas para a aquisição e o processamento de dados. Foram utilizados um computador, um chassi NI CompactDAQ, um módulo NI 9237 com quatro entradas analógicas simultâneas e com capacidade de amostragem de 50 k amostras/segundo e um conector e cabo RJ50 para cada canal. Para a elaboração dos programas de aquisição e de processamento de dados foi utilizado o software NI LabVIEW (versão 2011).

Resultados e Discussão

Os resultados estão apresentados de acordo com a sequência descrita na metodologia. Portanto, os primeiros resultados referem-se ao projeto conceitual do dinamômetro (conforme a Figura 1). Esse apresenta os requisitos geométricos propostos, como: geometria dos elementos elásticos que facilite a colagem e soldagem dos transdutores; eliminação de graus de liberdade ao sistema mecânico; sistema de fixação do corpo de prova de acordo com a Série de Renard; sistema de fixação do dinamômetro compatível com mesas de máquinas-ferramenta; geometria compacta e simétrica, que permite montagem, desmontagem e expansão das bases sem alteração dos elementos elásticos. Os extensômetros escolhidos foram do modelo HBM 1-LY43-3/350. A lateral e parte central do dinamômetro são protegidas por chapa metálica (ausente na ilustração), evitando entrada de resíduos em seu interior. Na Figura 1 pode-se observar o projeto conceitual da célula de carga.

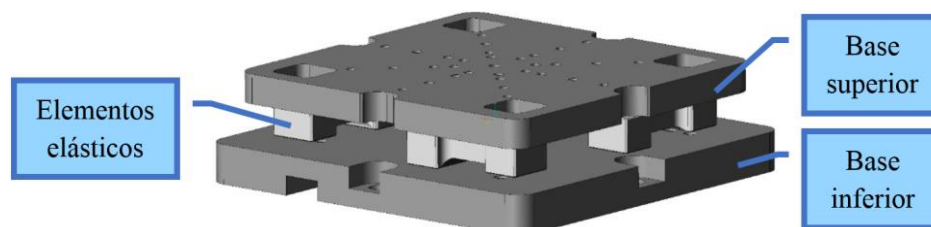


Figura 1 – Projeto conceitual da célula de carga.

Como aplicação dos requisitos tem-se na região central do elemento elástico uma extricção onde são fixados os transdutores (ilustrada na Figura 2), de modo a concentrar deformação e permitir fácil acesso para os processos de colagem e soldagem. Para a montagem, parafusos e pinos retificados fixam

os elementos elásticos nas bases, eliminando os graus de liberdade do sistema mecânico. Na base superior notam-se os rebaixos para acomodar as cabeças dos parafusos, de modo a evitar que ficassem salientes e se tornassem obstáculos para a utilização do dinamômetro. A base superior apresenta ainda furos roscados espaçados de acordo com a Série de Renard. Já na base inferior há rebaixos para acomodação da cabeça dos parafusos com espaçamentos compatível com máquinas ferramentas.

A utilização de múltiplos elementos elásticos proporciona maior estabilidade dinâmica e permite que esses sejam tratados de forma individual durante os processos de preparação da superfície de fixação dos transdutores, de colagem dos extensômetros e de soldagem dos cabos. Este aspecto facilita futuras manutenções e substituições de transdutores e/ou elementos elásticos. Essa configuração também possibilita a expansão do dinamômetro para modelos de maior porte, uma vez que os elementos elásticos podem ser montados em bases de maiores dimensões. Por outro lado, existem desafios, tais como a exatidão da montagem e o alcance de tolerâncias estreitas nas seções de fixação dos transdutores. Em relação aos materiais utilizados, foram escolhidos a liga de alumínio 7075-T6 para o elemento elástico e o aço 4340 para as bases, com módulos de elasticidade de, respectivamente, 71,7 e 205 GPa (MATWEB, 2017).

Em seguida foram realizadas as análises de engenharia, nas quais um par de elementos elásticos é responsável pela medição do carregamento na componente “X” e “Z”, enquanto outro par realiza a medição na componente “Y”. Para os eixos “X” e “Y”, o carregamento medido é aplicado de maneira ortogonal ao elemento que realiza sua medição, causando a flexão lateral dos componentes. Para essa condição foi aplicado carregamento na superfície superior do elemento elástico (Figura 2a) (face que “recebe” a carga transmitida pela base superior) e na superfície inferior foram colocadas restrições aos movimentos de translação. Carregamentos, dentro da faixa de medição, foram testados nas três direções. A malha gerada (Figura 2b) possui como entidades: 1405 tetraedros, 2415 arestas e 3297 faces. Para o carregamento de 250 N em “Y” (simétrico), conforme a Figura 2c, as deformações no ponto central de medição foram de 1,2 a 24,8 μm para tração e compressão, respectivamente.

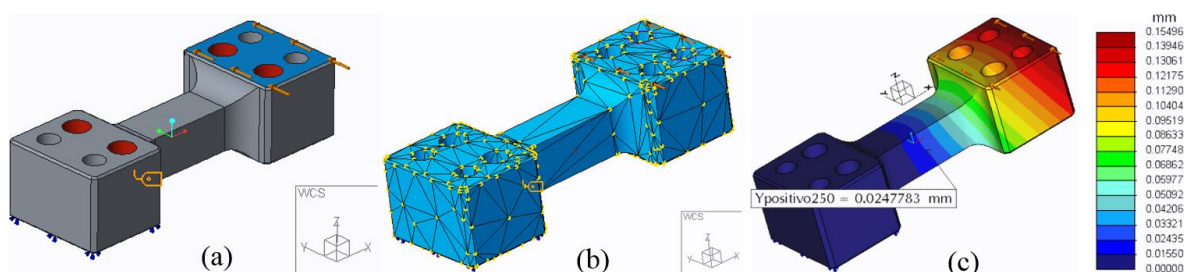


Figura 2 – Análises de engenharia no elemento elásticos em “Y”, condições de contorno e deformações para 250 N.

Com relação ao carregamento na componente “Z” e compreendendo que a base superior é igualmente apoiada por quatro elementos elásticos, a faixa de carregamento de 50 N a 1 kN foi dividida em 4 partes, obtendo-se uma faixa, por elemento elástico, de 12,5 a 250 N. Essa faixa de carregamento ocasionou deformações de 0,4 a 8,7 μm na tração e de 0,4 a 8,6 μm na compressão. A tensão máxima encontrada pelo critério de Von Mises, foi de 82 MPa, o que representa 16,31% do limite de elasticidade do material de 503 MPa (MATWEB, 2017a).

A segunda fase (b) compreende a manufatura. Os componentes críticos para o desenvolvimento do projeto são os elementos elásticos e, por este motivo, foram priorizados, uma vez que mais tempo para sua finalização devido à instrumentação necessária. Para sua manufatura partiu-se de uma barra com diâmetro de 102 mm, da qual dois discos de 30 mm de espessuras foram cortados. De cada disco foi feito um par de elementos (responsável por um eixo de medição). O fato de dois elementos elásticos serem manufaturados a partir da mesma seção de barra contribui para a homogeneidade e para

minimização de fontes de variabilidade dos resultados de deformação. Do ponto de vista de operações, realizou-se um faceamento, regularizando a superfície superior. Em seguida foram feitas as 16 furações, o desbaste externo, acabamento da superfície superior, desbaste e acabamento da lateral, desbaste e acabamento da face superior da seção central, arredondamentos e chanframentos. A Figura 3 ilustra: (a) definição do material bruto, (b) simulação da usinagem no módulo de CAM do software CREO Parametric, e (c) componentes usinados na máquina-ferramenta.

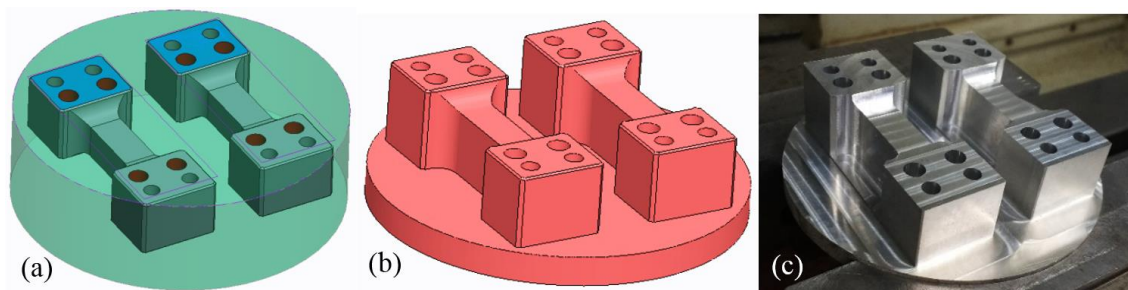


Figura 3 – Processo de manufatura para os elementos elásticos.

O desenvolvimento dos processos de manufatura foi realizado para todos os componentes mecânicos da célula de carga. Os detalhes de manufatura para o lado 2 do elemento elástico e para os demais componentes do sistema mecânico podem ser encontrados em Lourenço (2017).

A terceira fase (c) de resultados envolve as análises dimensionais. Uma série de dimensões foi analisada em todos os componentes com o objetivo de verificar a adequação aos requisitos de projeto. Contudo, as dimensões mais críticas para o desenvolvimento da célula de carga são as que envolvem a seção transversal do elemento elástico (quadrado de $10 \pm 0,02$ mm). Esta região é o local para a colagem dos transdutores (extensômetros). Os resultados da análise dimensional mostraram que a variação se encontra entre os limites de 9,99 a 10,02 mm. Portanto, as dimensões e tolerâncias críticas, definidas em projeto, foram atendidas pelo processo de manufatura dos elementos elásticos.

Em seguida foram feitas as colagens e as soldagens dos extensômetros - fase (d). Desses procedimentos, vale frisar a aderência adequada entre a cola Z70, os extensômetros e o componente elástico. As lixas utilizadas imprimiram na superfície de colagem uma rugosidade de $0,64 \mu\text{m Ra}$, mostrando-se adequadas, visto que, de acordo com Micro-Measurement (2011), a superfície para colagem deve apresentar rugosidade entre $0,4$ e $1,6 \mu\text{m Ra}$. A soldagem foi verificada pela medição da resistência dos extensômetros nos cabos soldados com um multímetro. Os valores obtidos variaram de $351,0$ a $352,9 \Omega$. Este resultado é a evidência da consistência dos processos de colagem e de soldagem. A Figura 4 mostra os componentes após a fase de colagem e soldagem.

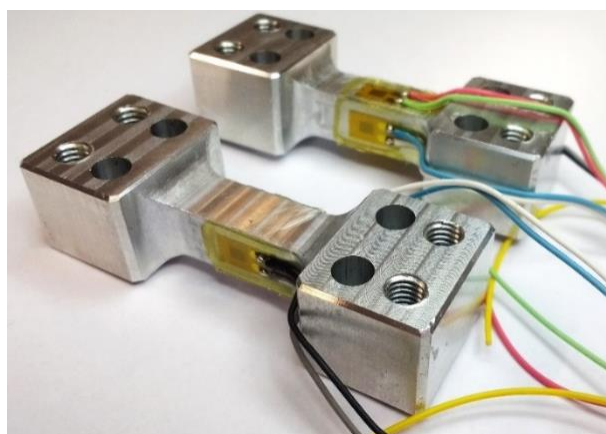


Figura 4 – Extensômetros colados, soldados e protegidos sobre elementos elásticos.

Após os testes de resistência elétrica nos elementos elásticos, desenvolveram-se os programas para a etapa de aquisição e processamento de dados – fase (e). Os programas têm duas funções distintas: (a) aquisição e (b) processamento e análise. O primeiro programa permite a aquisição e armazenamento dos dados na extensão TDMS, em formato de tabela. Para a aquisição são utilizados três canais com taxa de aquisição simultânea de 30 Hz. O tempo de aquisição é controlado pelo operador, definindo o início e término por meio de botões na interface gráfica.

O segundo programa possibilita abrir os arquivos salvos e realizar o processamento do sinal. A interface deste programa, conforme a Figura 5, é composta por 5 gráficos com os valores de força (N) em função do tempo (ms) para os eixos X, Y e Z de forma conjunta (Figura 5 a) e individual (eixos X, Y e Z), respectivamente figuras 5 (c), (d) e (e), além de força resultante (Figura 5 b). As linhas verticais no gráfico principal, Figura 5 (a) permitem selecionar o intervalo de análise, apresentando os dados referentes a cada eixo nos gráficos secundários, figuras 5 (c), (d) e (e). Nessas figuras, linhas horizontais possibilitam delimitar os intervalos (filtro passa banda) para a delimitação dos valores de picos e vales.

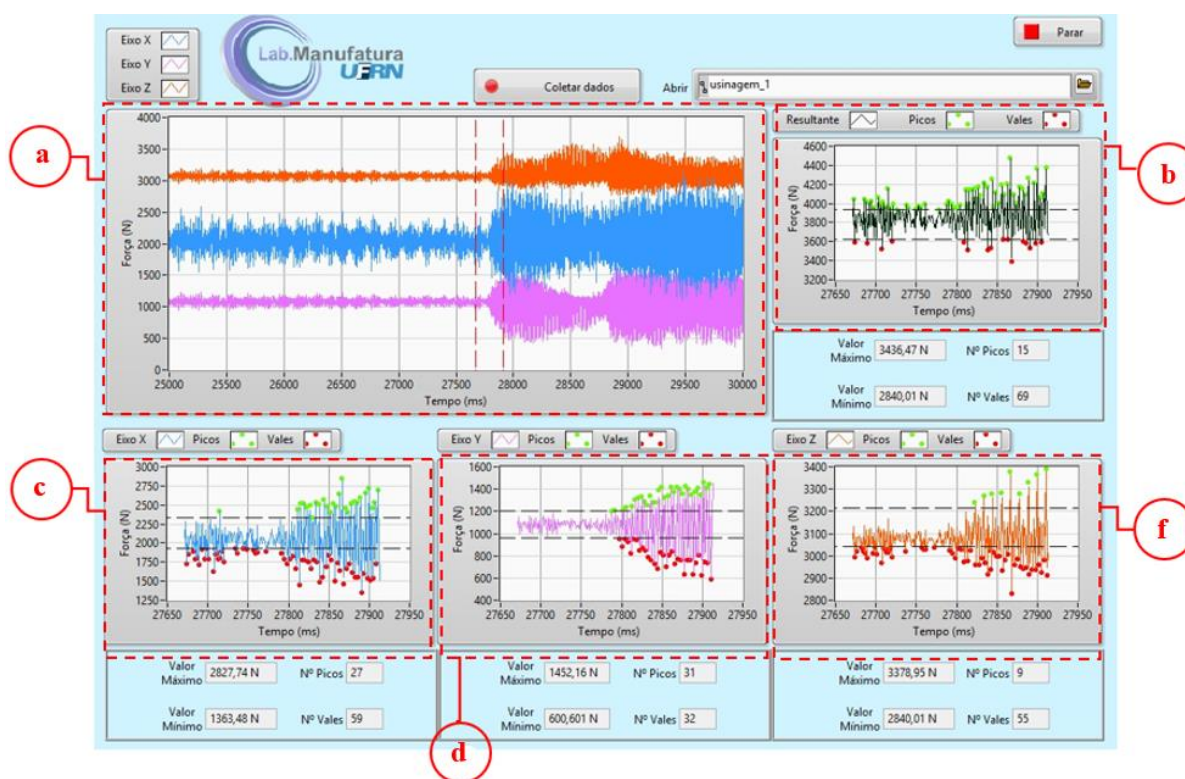


Figura 5 – Interface gráfica do programa de processamento de dados.

Os detalhes do diagrama de blocos para o eixo “X” são apresentados na Figura 6. Do ponto de vista de processamento de sinal, o programa abre o arquivo TDMS e separa os dados da matriz em vetores, Figura 6 (a), os quais representam o tempo e os componentes da força (F_x , F_y e F_z) em três eixos. Com esses vetores realiza-se o cálculo da resultante ponto a ponto, de acordo com a Equação (1):

$$R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

Em seguida, esses vetores passam a ser entrada na função de “picos e vales” e “máximo e mínimo”, respectivamente Figura 6 (b) e (c). As funções de análise retornam os valores de máximo, de mínimo, da quantidade e da posição dos pontos críticos na função tempo. Enquanto o programa é executado, o usuário pode alterar a posição de dois cursores (filtros ou limites de dados) representados por linhas tracejadas em cada gráfico (Figura 5). Os blocos responsáveis por essa função no eixo X são

indicados na Figura 6 (d). Esta abordagem permite que o usuário determine qual o intervalo de dados de interesse e os limites mínimos para a determinação dos componentes da resultante com atualização automática dos dados. Por fim, os dados são apresentados nos gráficos, Figura 6 (e). Vale ressaltar que o processamento para os demais eixos é idêntico e foi omitido na imagem com o obtivo de facilitar a compreensão.

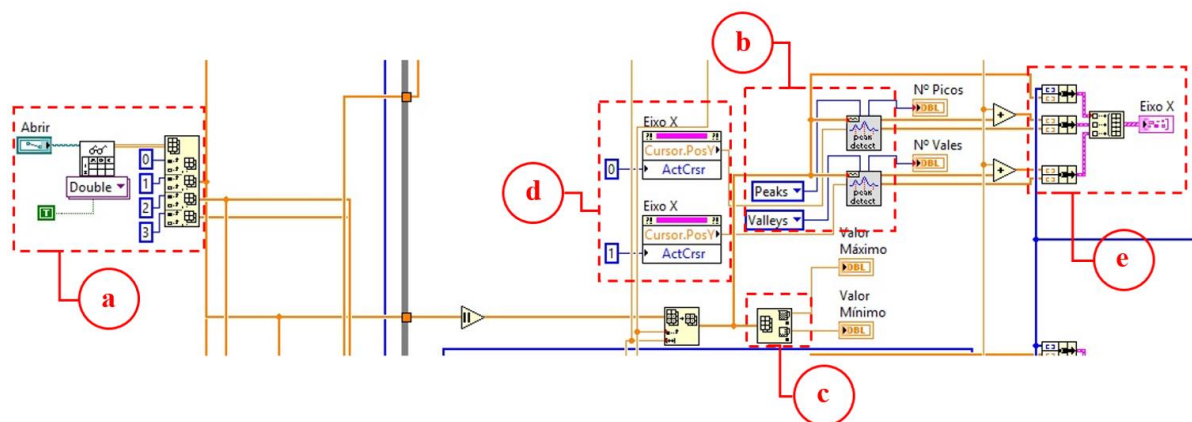


Figura 6 – Diagrama de blocos: processamento dos dados do eixo “X”.

Este trabalho descreveu as cinco primeiras fases de desenvolvimento de uma célula de carga triaxial. As próximas fases envolvem a calibração estática do sistema e os testes funcionais. Esta última fase utilizará como referência o processo de usinagem por fresamento, pois esse processo permite uma fácil mudança da direção, do sentido e da magnitude dos componentes da força analisada, além de alteração na frequência de excitação do sistema. Neste sentido, análises do comportamento dinâmico da célula de carga serão o escopo de futuros trabalhos.

Conclusões

Baseado nos resultados apresentados neste trabalho, pode afirmar que um projeto conceitual e análises de engenharia foram realizados para o desenvolvimento de célula de carga para medição de componentes tridimensionais de força (até 1 kN em cada eixo). Ainda, desenvolvimentos de processos de manufatura, inspeção e instrumentos foram abordados para a preparação dos elementos elásticos (componentes chave do sistema) baseado na utilização de extensômetros. Finalmente, programas de aquisição e de processamento de dados, baseados na plataforma Nacional Instruments (NI), foram criados e aplicados para determinação da resultante de componentes ortogonais de forças, identificando picos e vales. Este projeto possibilita a análise de força em equipamentos e em instrumentos utilizados na indústria do petróleo, colaborando para o correto dimensionamento de sistemas mecânicos, vasos de pressão, reservatórios e colunas de perfuração.

Agradecimentos

Este trabalho teve a colaboração do Laboratório de Manufatura, Laboratório de Metrologia e do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Petróleo e Gás (NUPEG PRH-ANP14) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Referências Bibliográficas

DEVRIES, W.R. **Analysis of Material Removal Processes**, 2 ed. New York: Springer Publisher, 2011.

HBM. **Instructions for Use - Covering agent PU140.** Disponível em: <<https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/a2558.pdf>>. Acesso em: 18 de abril de 2017a.

HBM. **Instructions for Use - Rapid Adhesive Z70.** Disponível em: <<http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/a1653.pdf>>. Acesso em: 18 de abril de 2017b.

LOURENÇO, M. A. M. **Projeto e construção de dinamômetro triaxial com múltiplos elementos elásticos.** 2017. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Natal: PRH-ANP 14, 2017.

MATWEB. **Aerospace Specification Metals.** Disponível em: <<http://www.aerospacemetals.com/contact-aerospace-metals.html>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

MICRO-MEASUREMENT. **Surface Preparation for Strain Gage Bonding.** 2011. Disponível em: <http://www.vishaypg.com/docs/11129/11129_b1.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2017.

RIBEIRO, K. S. B. **Projeto e construção de um dinamômetro triaxial para avaliação de carregamentos na usinagem.** 2016. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

RIZAL, M. & GHANI, J. & NUAWI, M. & HARON, C. (2015). **Development and testing of an integrated rotating dynamometer on tool holder for milling process.** Mechanical Systems and Signal Processing. 52-53. 559–576. 10.1016/j.ymssp.2014.07.017.

ROSSI, G. C. **Estudo das forças de corte no processo de fresamento de bordas de chapas utilizadas para a fabricação de tubos de aço com costura.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. doi:10.11606/D.3.2007.tde-01042008-111246. Acesso em: 2017-08-17.

SANDVIK. **Ferramentas para usinagem.** Disponível em: <<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/>>. Acesso em: 21 ago. 2017.

SAGLAM, H.; ÜNÜVAR, A. (2001). **Three-Component, Strain Gage Based Milling Dynamometer Design and Manufacturing.** Journal of Integrated Design & Process Science. 5. 95-109.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles.** 2 ed. Nova York: Oxford University Press, 2005. 672 p.

TOTIS, G.; ADAMS, O.; SORTINO, M.; VESELOVAC, D. KLOCKE, F. (2014). **Development of an innovative plate dynamometer for advanced milling and drilling applications.** Measurement. 49. 164–181. 10.1016/j.measurement.2013.11.049.