

ANÁLISE DE FALHA ESTRUTURAL EM UM SUPORTE DE *STUFFING BOX* UTILIZADO EM OPERAÇÕES PETROLÍFERAS DE *SLICKLINE* E UMA SOLUÇÃO PARA A PROBLEMÁTICA

Giovanna Maria de Oliveira Fin¹, giovanna_fin@yahoo.com.br

Ruthenio Severo de Medeiros¹, ruthenio1@yahoo.com.br

Prince Azsemergh Nogueira de Carvalho², prince.cfv@gmail.com

Wesley da Silva Soares³, wesleysoares@msn.com

Anderson Wagner Alves de Menezes², wagneranderson_@hotmail.com

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido Campus Caraúbas, RN 233 KM 01 Sítio Nova Esperança II Caraúbas/RN, 59700-000, Brasil

²Universidade Federal Rural do Semi-Árido Campus Mossoró, R. Francisco Mota, 572 - Pres. Costa e Silva, Mossoró - RN, 59625-900, Brasil

³Universidade Cândido Mendes, Programa de Pós-Graduação Instituto Prominas, Av. Acesita, 655 – Timóteo - MG, 35180-207, Brasil

Resumo: A engenharia é imprescindível para o desenvolvimento da indústria do petróleo. Devido às condições de pressão, temperatura, salinidade, intemperismo, etc. são necessárias confecções de ferramentas de alta qualidade para que a perfuração, completação e produção de poços sejam feitas, caso contrário, podem ocorrer acidentes que causarão prejuízos diversos (ambientais, financeiros, danos físicos e emocionais, morte, entre outros). O objetivo deste trabalho é detalhar uma análise de uma falha ocorrida no Brasil em uma dessas ferramentas, a caixa de vedação ou stuffing box, utilizada em Slickline (uma operação de manutenção e recuperação de poços). Outros pontos abordados são as possíveis causas para tal fato, uma solução proposta e os novos resultados após a implementação desta. Serão utilizadas ferramentas de qualidade como FMEA e Diagrama de Ishikawa, além de um brainstorming e fluxogramas para explicar as metodologias utilizadas. Para executar este trabalho, foram necessárias informações do fabricante da ferramenta, o auxílio de um software de projetos e modelagens (SOLIDWORKS®) e calculados o fator de segurança do projeto e os critérios de falha (optou-se pelo de Von Mises). Os resultados culminaram para falhas de integridade do equipamento, oriundas do processo de fabricação da ferramenta (fundição), e se a troca de material por um menos resistente influenciou significativamente no incidente. Foram sugeridas algumas ações, como por exemplo, processos mais sofisticados que garantissem a qualidade do material e depois destas ações terem sido tomadas, verificou-se se a integridade do equipamento foi garantida.

Palavras-Chave: Sheave staff, Petróleo, Análise de falha, Ferramentas de qualidade, Fundição.

1. INTRODUÇÃO

A garantia da segurança e integridade de pessoas e processos são fatores imprescindíveis na área industrial. Entretanto, conforme a NR-04 do Ministério do Trabalho do Brasil, as atividades de apoio à extração de petróleo e gás natural são consideradas áreas de risco 4 (grau máximo). Conforme dados divulgados em 2016 pela empresa DuPont, presente em mais de 90 países, o Brasil representa o quarto lugar no mundo em acidentes de trabalho, ficando atrás somente da China, Índia e Indonésia. Ainda no mesmo ano, no setor de extração de Petróleo e Gás Natural, de acordo com o Ministério da Previdência Social, foram registrados 95 acidentes típicos. Visando reduzir e/ou extinguir estes acidentes, verifica-se que é de suma importância que as ferramentas utilizadas neste setor possuam alto nível de confiabilidade. Durante uma operação em condições normais de Slickline¹ em um poço localizado no Rio Grande do Norte, Brasil, ocorreu uma fratura repentina de uma ferramenta crucial na execução desta.

¹ De acordo com Mayzel [20--?], Slickline é a operação que envolve a manutenção, recuperação, e/ou melhoramento de poços de óleo e gás em geral na qual são utilizados arames que descem no poço transportando ferramentas para execução de diversos serviços. Para que este arame seja conduzido até o poço, é necessário o uso de polias e uma caixa de vedação (stuffing box), que conduz e promove a vedação do arame na parte superior do lubrificador (tubo abaixo do stuffing box), tanto em condições estáticas como dinâmicas.

Para se ter uma noção do ocorrido, as figuras abaixo retratam esquemas de montagem da operação.



Figura 1: Esquema de montagem de Slickline.

A parte fraturada foi o suporte do Stuffing Box, conhecido como *sheave staff*, como mostra a figura 2.



Figura 2: Objeto da análise. (a) Sheave staff desmontado; (b) Sheave staff montado no stuffing box.

O escopo do presente trabalho constitui-se de uma parte introdutória, detalhando alguns aspectos à respeito do item fraturado, os métodos utilizados para analisar o fato, os resultados obtidos com o estudo de caso, as soluções e conclusões dos fatos. Foram utilizadas referências tanto nacionais como internacionais (a maioria da literatura concentra-se em catálogos e manuais de empresas estrangeiras).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL

Primeiramente, surgiu a necessidade de investigar o problema, começando por uma tempestade de idéias (*brainstorming*), para que pessoas com diferentes funções na companhia contribuísse com suas idéias para esta investigação.

Com algumas suspeições, foram realizados os seguintes ensaios não-destrutivos na peça: visual, líquido penetrante (LP) e um teste de carga, os quais eram os únicos disponíveis no momento. Para auxiliar na interpretação dos resultados, foi utilizado um modelo matemático conforme o critério de falhas de Von Mises, para verificar se teoricamente o projeto suportaria os esforços usualmente submetidos a ele. Finalmente, utilizou-se modelos de falha com os resultados obtidos com as etapas já descritas: iniciando-se pelo diagrama de Ishikawa, seguido da Análise dos Modos de falha e seus efeitos (FMEA), para facilitar a obtenção da pontuação deste último. Para chegar às possíveis soluções, foram feitas as análises dos modelos de falha e propostas novas soluções.

Com relação aos materiais, utilizou-se a peça fraturada e materiais relativos aos ensaios feitos, como solventes, pó revelador, entre outros e foram utilizados também os softwares SolidWorks® para verificar se a ferramenta suportava

os esforços ou não e o Microsoft Excel para a elaboração das tabelas e diagramas dos modelos de falhas. A metodologia pode ser simplificada através do fluxograma da figura 3.

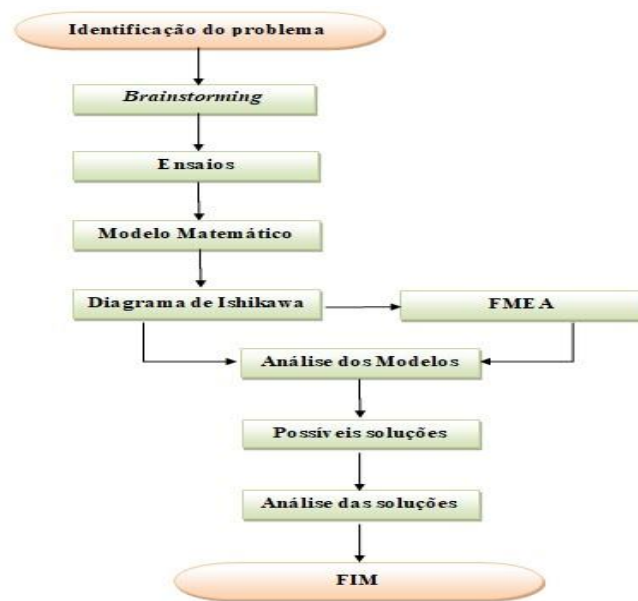


Figura 3: Fluxograma da metodologia utilizada

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com o brainstorming realizado, detectou-se alguns pontos principais, como cerca de 80% dos entrevistados sugerirem que o suporte da polia do *stuffing box* seria o item que sofre mais falhas, juntamente com o protetor da polia (em menor proporção); o local mais suscetível à falha do suporte é na curva entre a parte que aloja o cilindro e o corpo; cerca de 60% dos entrevistados afirmaram que houve uma mudança no material; todos concordaram que a qualidade da peça fornecida era baixa, falta de informação por parte do fornecedor quanto aos ciclos de fadiga e vida útil da peça, entre outros. Com esta análise, o direcionamento dado para a investigação do problema estava mais relacionado com falhas de integridade estrutural da peça, sendo necessários outros métodos (ENDs Visual, por LP e teste de carga).

Após o *brainstorming*, foi feito um ensaio visual que, de acordo com a ABENDI (2016), serve para verificar alterações dimensionais, padrão de acabamento superficial e descontinuidades superficiais visuais, como trincas, corrosão, deformação, alinhamento, cavidades, porosidade, montagem de sistemas mecânicos, etc. Finalizado o ensaio visual, iniciou-se o ensaio por líquido penetrante que visa a detecção de descontinuidades essencialmente superficiais. Os ensaios detectaram algumas descontinuidades, tais como poros, imperfeições na análise dimensional e a inclusão de corpo solidificado na fusão do metal. Para a observação de detalhes internos, a peça foi cortada e verificou-se a presença de rechupes (visíveis na figura 5). Os resultados encontrados podem ser visualizados nas figuras 4, 5 e 6.



Figura 4: Inclusão de corpo solidificado na fusão do metal.



Figura 5: Rechupes encontrados indicando problemas de fundição do material.



Figura 6: Poros encontrados no ensaio por líquido penetrante

Fez-se também um teste de carga com um stuffing box de mesmo lote, conforme montagem esquematizada em figura 7, para identificar se mesmo com estas discontinuidades o material suportaria as cargas usuais de trabalho.

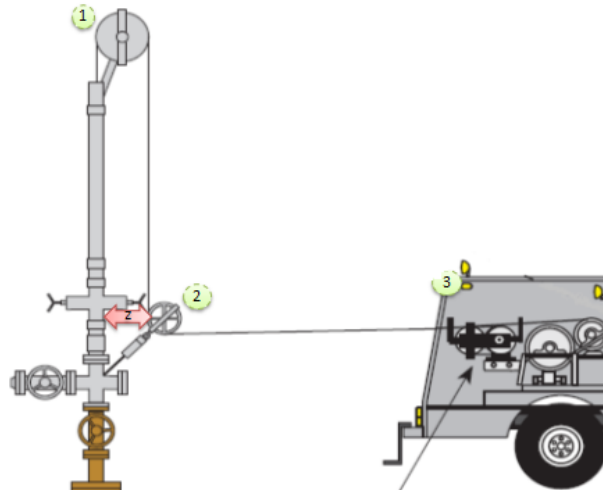


Figura 7: Esquema de montagem do teste de carga com distâncias

O número 1 da figura acima representa o *sheave staff*, quando montado no stuffing box e submetido a esforços provocados pela tração no arame que a unidade (número 3) promove. A carga de trabalho usual é de 1513 lb. Foi aplicada uma carga de 200lb a cada minuto com o objetivo de verificar como o *sheave staff* se comporta. Foi medido o valor de “z”, que é a distância do eixo da composição ao arame, a qual influencia no ângulo que este forma com a polia (número 2). Foram anotados outros valores, descritos na tabela 1. Constatou-se que, na tomada 6, o stuffing box suportou uma carga de até aproximadamente 1,5 vezes a carga de trabalho (157%) sem se romper, mesmo com as discontinuidades detectadas pelos ensaios anteriores.

Tabela 1 – Resultados obtidos no teste de carga de acordo com padrão adotado pela empresa

Sequência de teste	Δl (distancia de "z")	Carga de trabalho	Rampa partir 1000lb)	%(sobre-carga de trabalho)	Carga (Patam ar - 5min)	Resultado
1ª Tomada:	80 cm	1513 lb	200lb/min	107%	1625 lb	OK
2ª Tomada:	120 cm	1513 lb	200lb/min	108%	1629 lb	OK
3ª Tomada:	220 cm	1513 lb	200lb/min	112%	1694 lb	OK
4ª Tomada:	220 cm	1513 lb	200lb/min	117%	1775 lb	OK
5ª Tomada:	220 cm	1513 lb	200lb/min	137%	2072 lb	OK
6ª Tomada:	220 cm	1513 lb	200lb/min	157%	2381 lb	OK

Com o fim de averiguar condições de projeto, já que a ferramenta não rompeu-se no teste de carga, utilizou-se também um modelo matemático e computacional, baseado no critério de falha de Von Mises, devido à facilidade de correlação com os dados experimentais, além de considerar a tensão intermediária que influencia no comportamento dos metais na zona plástica. De acordo com Dassault Systemes (2016) e Hibbeler (2010), a tensão e o critério de Von Mises é dado por:

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (1)$$

e o critério de falha é definido como:

$$\sigma_{\text{vonMises}} \leq \sigma_{\text{Esc}} \quad (2)$$

onde:

σ_1 é a tensão radial (compressão), σ_2 é a tensão tangencial (tração), σ_3 é a tensão longitudinal e σ_{Esc} é a tensão de escoamento.

Ou seja, o material teoricamente falharia quando ultrapassasse essa tensão de escoamento. Como se tinha essas tensões radial, tangencial e longitudinal, foi utilizado um software (SolidWorks®), como visto na figura 8, que já calcula a tensão de von Mises à partir das dimensões e modelagem da peça, assim como ele compara com a tensão de escoamento e determina os pontos da peça com a maior probabilidade de ocorrência de falha. O software também forneceu o fator de segurança, que também poderia ter sido obtido pela relação (para materiais dúcteis, que é o caso deste trabalho):

$$FS = \frac{\sigma_{\text{Esc}}}{\sigma_{\text{vonMises}}} \quad (3)$$

onde:

FS é o fator de segurança do projeto.

A tensão de von Mises gerou o resultado de aproximadamente 42,70MPa. Como a tensão de escoamento para o material da ferramenta (liga de alumínio SAE 323) é de aproximadamente 137Mpa, de acordo com a Alraise Metais (2016), aplicando esses dados na equação descrita acima, o fator de segurança gerou o resultado de 3,2 (aproximado do gerado pelo software de 3,1), fator satisfatório para este tipo de equipamento, de acordo com o *American Petroleum Institute*. Teoricamente, portanto, em condições normais o material não falharia de acordo com a simulação (a figura 8 retrata o final da simulação, que é o cálculo do fator de segurança).

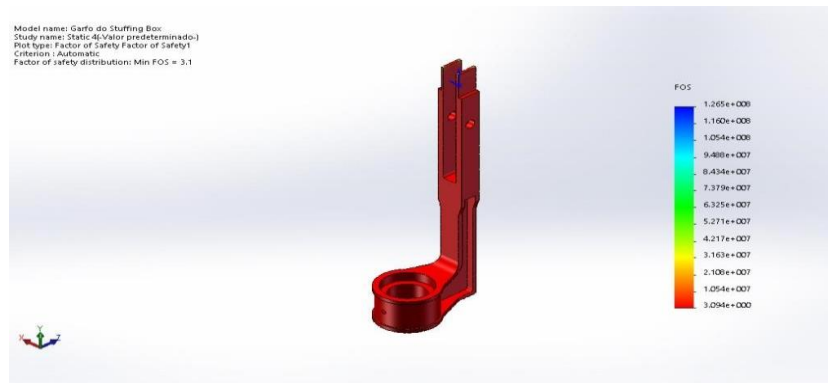


Figura 8: Fator de segurança obtido em software *SolidWorks*

Por fim, após todos esses processos foram empregadas as ferramentas de qualidade denominadas diagrama de Ishikawa e FMEA, que geraram os resultados conforme se veem nas figuras 9 e 10, cuja maioria das informações foram obtidas pelo brainstorming.



Figura 9: Diagrama de Ishikawa do estudo

As causas em fonte de cor vermelha demonstram os principais motivos que culminaram na falha; estes, serviram de coluna dos modos de falha na elaboração do FMEA (com exceção da extremidade, que é o efeito). São elas: uma contra-pressão do poço (que pode ser derivada de uma falha nos sistemas de segurança), o projeto da ferramenta estar inadequado para o seu fim, heterogeneidades oriundas do processo de fabricação da peça, fadiga e má execução na operação. Já o FMEA apresentou o seguinte resultado:

FMEA							
NOME DO COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO POTENCIAL DA FALHA	O	S	D	RPN (OxSxD)
Suporte da polia do <i>stuffing box</i> ou <i>sheave staff</i>	Servir de guia para o arame de slickline e vedá-lo na superfície acima do lubrificador	Má execução na operação, incluindo erros na montagem e excesso de tração	Rompimento do <i>sheave staff</i> e interrupção na operação	5	8	6	240
		Mudança no projeto (utilização de um novo material de SAE 4140 para SAE 323)		10	5	3	150
		Defeitos e descontinuidades oriundos do processo de fabricação (fundição) da ferramenta		10	7	4	280
		Fadiga devido à sucessivos usos da ferramenta		2	8	8	128
		Contra-pressão do poço	Rompimento do <i>sheave staff</i> , interrupção na operação e risco de vida à todos os colaboradores	2	9	3	54

Figura 10: FMEA obtido no estudo

De acordo com os dados acima, pode-se inferir que os fatores de maior probabilidade de causa foram a má execução na operação e problemas relacionados à integridade do material como defeitos de fabricação na ferramenta. Outro fato de alto potencial foi a mudança do material de um aço para uma liga de alumínio, ou seja, uma liga de menor resistência. Detectou-se também que a probabilidade de fadiga do material foi baixa devido ao índice de ocorrência do FMEA ser baixo.

Com as análises dos resultados, ficou clara a que a falha decorreu da fabricação da peça. Para isto, foi sugerido ao fornecedor um método mais sofisticado do que fundição por gravidade em areia verde (o caso deste estudo) e se ter um controle maior para esse processo (o custo é um pouco maior, mas em contrapartida a qualidade também é melhorada) e no caso da porosidade, deveria-se retirar calor da peça, utilizando resfriadores na parede do molde, ou de preferência, utilizar moldes metálicos. É muito importante eliminar estes defeitos em tais peças, pois eles servem como concentrador de tensões, ou seja, se uma carga é uniformemente distribuída numa peça, onde tiver espaços vazios, haverá uma área menor, ou seja, as tensões serão maiores podendo gerar a ruptura do material.

Entretanto, o fornecedor apenas adotou as seguintes medidas: recolhimento imediato dos moldes e modelos de fundição; desenvolvimento e acompanhamento técnico no processo de fabricação dos fundidos (a figura 12 mostra a utilização de ar para limpeza e exclusão de particulados sólidos na superfície do modelo), modificação nos moldes de fundição e a implementação de mais canais de enchimento para garantir um maior preenchimento do material, conforme pode ser demonstrado nas seguintes figuras.

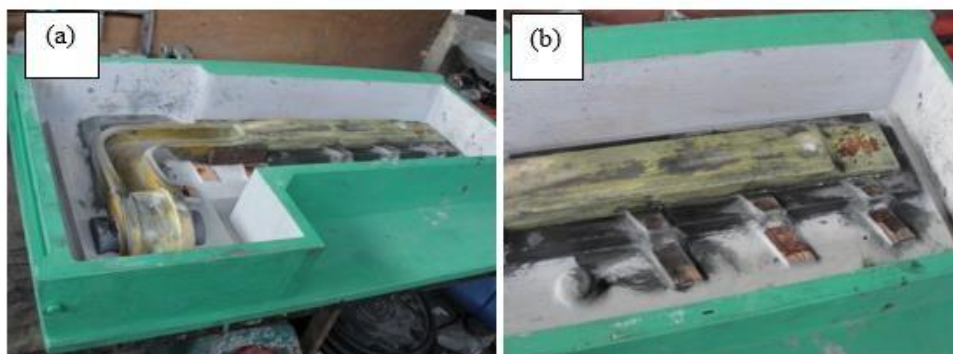


Figura 11: Mudanças adotadas pelo fabricante. (a) Melhoria nos moldes ; (b) Inclusão de resfriadores e mudança nos pontos de injeção do alumínio.



Figura 12: Acompanhamento do processo de pré-fundição

Uma vez pronta a peça, foram realizados novos ensaios: visual, por líquido penetrante e raios X, obtendo resultados satisfatórios, como o não aparecimento de rechupes, trincas ou porosidades acima do critério de aceitação.

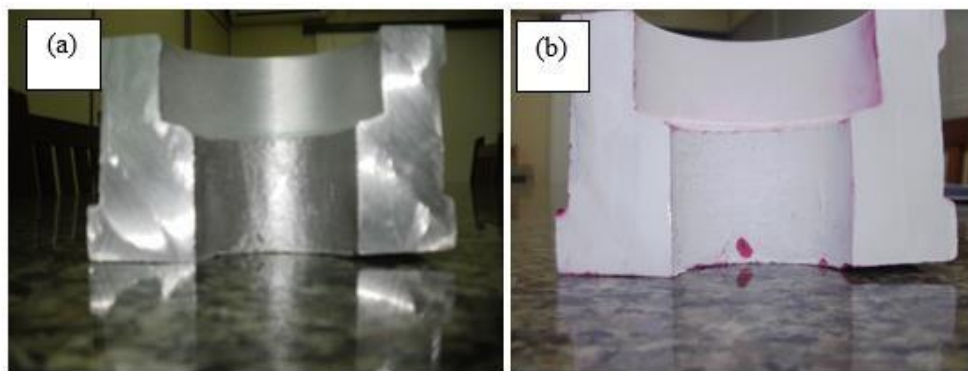


Figura 13: Ensaios visual e por LP aplicados após as mudanças adotadas. (a) Ensaio visual. (b) Ensaio por LP, visivelmente com pouca porosidade



Figura 14: Ensaio de RX para detecção de possíveis discontinuidades praticamente inexistentes

4. CONCLUSÃO

De acordo com este estudo de caso, algumas causas contribuíram para o rompimento da ferramenta. Inicialmente, conforme o diagrama de Ishikawa, as quatro principais suspeitas foram: projeto da ferramenta, contrapressão do poço, processo de fabricação e falha por fadiga. Descartou-se a possibilidade de uma contrapressão pois a operação se deu em condições normais e eliminou-se também a possibilidade de fadiga devido a ferramenta não trabalhar com condições cíclicas. Visando um detalhamento maior, utilizou-se um FMEA que culminou para o motivo principal da falha ter sido devido a defeitos e discontinuidades oriundos do processo de fabricação. Outro ponto interessante obtido através do FMEA foi que a mudança do material não contribuiu significativamente para esta falha (pontuação baixa) e que os fatores de segurança e valores de teste de carga obtidos atendiam perfeitamente às condições de trabalho.

Diante de tal constatação, foram sugeridas mudanças no processo de confecção da ferramenta, que após serem implantadas geraram resultados satisfatórios, como nenhuma ou pouca porosidade e ausência de rechupes no interior da peça e atendimento aos critérios de aceitação propostos pelos ensaios, garantindo assim a integridade da ferramenta.

5. AGRADECIMENTOS

À Deus e a todos que colaboraram de alguma forma para a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- ABENDI. Associação brasileira de ensaios não destrutivos e inspeção. Ensaio visual (ev). Disponível em: <<http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=739&c=&s=30&friendly;=>>>. Acesso em: 03 nov. 2016.
- Almeida, C.; Sousa, E. Análise dos acidentes de trabalho na indústria petrolífera no rio grande do norte. In: encontro nacional de engenharia de produção, 36., 2016, João Pessoa. Abepro, 2016. P. 1 - 19. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_229_339_30045.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2018.
- Alraise Metais. Ficha Técnica: Alumínio 323. Disponível em: <<http://alrasmetais.com.br/fichaaluminio323.asp>>. Acesso em: 20 mar. 2018.
- Andrade, L.F.C.; Hamacher, S. Análise de investimentos na cadeia de suprimentos downstream da indústria petrolífera: proposta de um modelo de programação linear inteira mista. Rio de Janeiro, 2012. 83p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Carlos, Antônio. Segurança do Trabalho: Diagrama de causa e efeito: Vantagens e Desvantagens. 2009. Disponível em: <<http://segurancaesaudodotrabalho.blogspot.com.br/2009/07/diagrama-de-causa-e-efeitovantagens-e.html>>. Acesso em: 05 nov. 2016.
- Chiaverini, V. Tecnologia Mecânica Vol. III – Materiais de Construção Mecânica. 2ed.. Makron Books. São Paulo: 1986.
- Dupont Brasil. Brasil é o 4º país no ranking mundial de acidentes no trabalho. Disponível em: <<http://falandodeprotecao.com.br/brasil-e-o-4o-pais-no-ranking-mundial-de-acidentes-no-trabalho/>>. Acesso em: 20 mar. 2018.
- Halliburton. Slickline. Disponível em: <<http://www.halliburton.com/en-US/ps/wireline-perforating/wireline-and-perforating/slickline-services/default.page#>>>. Acesso em: 20 ago. 2016.
- Hibbeler, R. C. Resistência dos Materiais. 7. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 66
- Mayzel, J. Schlumberger (Ed.). Slickline Training Manual. [s. L.]: Sophia Publishing, [20--?]. 827 p.
- Ministério do trabalho. Nr 4 - Serviços especializados em engenharia de segurança e em medicina do trabalho. Disponível em: <[http://acesso.mte.gov.br/data/files/8A7C816A4AC03DE1014AEED6AD8230DC/NR-04\(atualizada 2014\) II.pdf](http://acesso.mte.gov.br/data/files/8A7C816A4AC03DE1014AEED6AD8230DC/NR-04(atualizada%202014)%20II.pdf)>. Acesso em: 07 ago. 2016.
- SENAI. Análise de Modo e Efeito de Falha Potencial – FMEA: Apostila e Tabelas Recomendadas para Severidade Ocorrência e Detecção Qualidade em serviços: um estudo de caso. São Leopoldo: Centro Tecnológico de Mecânica de Precisão SENAI “Plínio Gilberto Kröeff”, 2010. 13 p. Apostila.
- Systemes, Dassault. Ajuda do SOLIDWORKS. 2016. Disponível em: <http://help.solidworks.com/2016/Portuguesebrazilian/SolidWorks/cworks/r_Maximum_von_Mises_Stress_Criterion.htm>. Acesso em: 05 nov. 2016.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STRUCTURAL FAILURE ANALYSIS IN A STUFFING BOX SUPPORT USED IN SLICKLINE PETROLEUM OPERATIONS AND A SOLUTION FOR A PROBLEM

Giovanna Maria de Oliveira Fin¹, giovanna_fin@yahoo.com.br

Ruthenio Severo de Medeiros¹, ruthenio1@yahoo.com.br

Prince Azsemergh Nogueira de Carvalho², prince.cfv@gmail.com

Wesley da Silva Soares³, wesleysoares@msn.com

Anderson Wagner Alves de Menezes², wagneranderson_@hotmail.com

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido Campus Caraúbas, RN 233 KM 01 Sítio Nova Esperança II Caraúbas/RN, 59700-000, Brasil

²Universidade Federal Rural do Semi-Árido Campus Mossoró, R. Francisco Mota, 572 - Pres. Costa e Silva, Mossoró - RN, 59625-900, Brasil

³Universidade Cândido Mendes, Programa de Pós-Graduação Instituto Prominas, Av. Acesita, 655 – Timóteo - MG, 35180-207, Brasil

Abstract: Engineering is imperative for the development of the oil industry. Due to conditions of pressure, temperature, salinity, weathering, etc. it is necessary to make high quality tools for the drilling, completion and production of wells. Otherwise, accidents that cause various damages (environmental, financial, physical and emotional damage to third parties, death, among others) may occur. The objective of this work is to detail an analysis of a failure occurred in Brazil in one of these tools, the stuffing box, used in Slickline (a well maintenance and recovery). Other points are the possible causes for this fact, a proposed solution and the new results after the implementation of this. Quality tools such as FMEA and Ishikawa Diagram will be used, as well as brainstorming and flowcharts to explain the methodologies used. In order to carry out this work, it was necessary to obtain information from the tool's manufacturer, the aid of a design and modeling software (SOLIDWORKS®) and the safety factor of the project and the failure criteria (Von Mises's choice). The results culminated in equipment integrity failures, resulting from the tool manufacturing process (casting), and whether the exchange of material by a less resistant material significantly influenced the incident. Some actions were suggested, such as more sophisticated processes that ensure the quality of the material and after these actions were taken, it was verified that the integrity of the equipment was guaranteed.

Keywords: Sheave staff, Oil, Failure analysis, Quality tools, Casting.