

ESTUDO EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DE ADERÊNCIA EM AMOSTRAS COMPOSTAS DE TUBO METÁLICO REVESTIDO POR PASTA DE CIMENTO USANDO TESTES DE VIBRAÇÃO

Marcilene Vieira da Nóbrega¹, marcilenenobrega@yahoo.com.br
Roberto Leal Pimentel¹, r.pimentel@uol.com.br
Sandro Marden Torres¹, sandromardentorres@yahoo.co.uk
Cícero da Rocha Souto², cicerosouto@hotmail.com

¹ Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Cidade Universitária, CEP: 58059-900, João Pessoa, PB.

² Universidade Federal da Campina Grande – UFCG, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica – UAEM, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, CEP: 58429-140 Campina Grande – PB.

Resumo: Os poços para exploração de petróleo e gás são compostos por tubos metálicos revestidos por uma camada de pasta de cimento de forma a proteger e sustentar esse revestimento. O bom desempenho do poço, do ponto de vista produtivo, está diretamente relacionado com a aderência na interface revestimento metálico/camada de pasta de cimento. A ação de substâncias inerentes ao poço, como cloreto de sódio (NaCl) e óleo poderão modificar a região de contato interferindo na aderência. Esse trabalho tem como finalidade obter, através de testes modais, as frequências naturais de amostras confeccionadas com tubos metálicos revestidos por pasta de cimento em diferentes condições de interface (sem e com contaminantes NaCl e óleo) e diferentes idades (3, 7, 14 e 28 dias). Foi desenvolvido um aparato experimental no qual as amostras ensaiadas foram suspensas proporcionando a condição livre-livre. Excitou-se em uma extremidade com atuador (shaker), usando uma varredura na faixa de frequência de estudo, e a resposta foi medida na outra extremidade por um acelerômetro. Resultados foram obtidos evidenciando a influência dos materiais contaminantes na interface revestimento metálico/luva de pasta de cimento em termos da variação das frequências naturais. Os resultados foram relacionados com a variação da aderência entre os materiais.

Palavras-chave: Aderência Cimento Metal, Revestimento de Cimento, Frequência Natural; Análise Modal; Vibração.

1. INTRODUÇÃO

O poço de petróleo é um dos elementos fundamentais na exploração petrolífera. São constituídos por diversos tipos de revestimentos metálicos condutores, revestimentos de superfície, revestimentos intermediários e produtor. A função principal destes revestimentos é dar sustentação aos equipamentos utilizados no processo de perfuração e produção no poço e permitir que o óleo ou gás cheguem até a superfície (Nelson, 1990).

À medida que vai sendo lançado o revestimento metálico é necessário preencher o espaço anular que é gerado entre o revestimento e a rocha com objetivo de protegê-lo das condições adversas no interior do subsolo como também aumentar a resistência aos esforços externos a que o sistema está submetido. O preenchimento desses espaços anulares é realizado através do processo de cimentação, que consiste no bombeamento de uma pasta composta essencialmente de água, cimento e aditivos e tem como funções a vedação dos espaços, proteger contra processos corrosivos e outros problemas que podem comprometer a qualidade do poço.

Um dos principais fatores que conferem sucesso no processo de operação e produção em um poço de petróleo está diretamente relacionado com a completa vedação do espaço anular. No momento em que ocorre algum tipo de problema com a aderência entre esses dois materiais, o desempenho do poço é diretamente afetado, comprometendo a produtividade do mesmo.

O sistema que compõe o poço de petróleo é bastante complexo e composto por diversas substâncias que podem estar presentes na composição natural do terreno ou então serem inseridas durante o processo de perfuração e produção. No processo de perfuração, juntamente com os revestimentos metálicos, são lançados fluidos de perfuração, que fazem a limpeza e regularização das paredes do furo antes de realizar a cimentação. Esses fluidos têm em sua composição diversas espécies iônicas, como sais e óleos (Nelson, 1990). Caso resíduos desses fluidos não sejam retirados completamente antes de realizada a injeção da pasta de cimento no espaço anular, pode ocorrer contaminação da pasta por essas substâncias e provocar interferência na aderência da pasta com o tubo.

Esse fato, como também outros acontecimentos, como por exemplo, variações de pressões, temperaturas, aplicação de cargas explosivas devido ao processo de canhoneio, podem comprometer o funcionamento do poço, sendo desta

forma necessária a verificação periódica da integridade estrutural dos poços, ou seja, verificar a condição de aderência entre o revestimento metálico e a camada de pasta de cimento.

Essa verificação da qualidade da aderência na interface tubo metálico/pasta de cimento é realizada periodicamente através de testes não-destrutivos. Esta modalidade de ensaio é muito difundida por fornecer respostas sem causar dano à estrutura testada. Grosmanin et al. (1961) e Pardue e Gollwitzer (1963) desenvolveram o princípio que até hoje é a técnica mais utilizada na verificação da qualidade da aderência em poços de petróleo. Neste procedimento de ensaio utilizam-se sondas, cujo princípio de avaliação é baseado na propagação de ondas no poço. Essa técnica acústica baseia-se na emissão de pulsos elétricos que são convertidos em pulsos mecânicos e se propagam por todo poço e por conseqüência em seus materiais constituintes. Os sinais são captados por receptores piezoelétricos que os levam de volta à superfície através de cabos, para processamento.

Carter e Evans (1964) observaram a importância de realização de estudos mais precisos nessa região de interface e realizaram testes de arrancamento para verificação da tensão de aderência entre o revestimento metálico e a camada de pasta de cimento. Para realização dos ensaios, foram moldadas amostras com tubos metálicos revestidos por uma pasta de cimento. Antes da moldagem estes tubos tinham suas superfícies tratadas e os testes eram realizados para identificação da tensão de aderência em função do tratamento superficial. Esta técnica é até hoje utilizada como parâmetro para detecção da tensão de aderência na interface revestimento metálico/envoltória de pasta de cimento.

Entretanto, Minear e Goodwin et al (1997) afirmam que nenhuma técnica acústica atual quantifica diretamente a medida da presença ou ausência de cimento por trás do revestimento. O desenvolvimento de técnicas que forneçam informações mais precisas, tanto qualitativas como quantitativas, das condições da região revestimento metálico e pasta de cimento podem preencher uma lacuna em termos do conhecimento no assunto.

Uma metodologia de ensaio foi desenvolvida por Freitas (2007), consistindo em medir a força necessária para romper a aderência entre o tubo metálico e a pasta de cimento após aplicação de uma carga longitudinal ao eixo, em amostras confeccionadas com dois tubos metálicos concêntricos de comprimento 152,40 mm (um tubo com diâmetro de 26,99 mm e outro com diâmetro de 76,22 mm) e com espaço anular preenchido por pasta de cimento. Foram ensaiadas amostras com superfície do tubo interno com e sem hidrojateamento e submetidas a variação de temperatura (100°C , 150°C e 200°C).

Almeida (2005), através dos resultados obtidos de frequência natural, modos de vibração e razão de amortecimento afirmou ter sido possível identificar e localizar danos existentes em variados tipos de materiais e identificar propriedades como módulo de elasticidade dinâmico. As frequências naturais do sistema representam a taxa de oscilação livre, depois de cessada a força que provocou o seu movimento. Como dependem da massa e da rigidez do elemento estrutural, então modificações nessas propriedades alteram o seu valor. Devido a sua natureza não destrutiva, este tipo de teste de vibração possibilita a investigação de peças estruturais reais ou de amostras extraídas destas estruturas, sob condições ambientais específicas e/ou ao longo do tempo (Torres et al., 2006). A proposta de se analisar a interface revestimento metálico/revestimento de cimento através de ensaios não destrutivos torna-se oportuna quando se pensa na possibilidade de caracterização da aderência sem que haja a destruição da camada existente como ocorrem nos testes de arrancamento.

Assim este trabalho apresenta a investigação do estado de aderência entre revestimento metálico e pasta de cimento através de testes de vibração (testes modais), utilizando como parâmetro de avaliação a frequência natural em condição de ressonância.

2 AVALIAÇÃO DE ADERÊNCIA USANDO TESTES MODAIS

Na obtenção dos dados necessários ao desenvolvimento deste trabalho, foi montado um aparato experimental no qual as amostras foram suspensas e colocadas para vibrar na condição livre-livre, restringindo a vibração do sistema em uma direção, considerando-o um sistema de um grau de liberdade.

As estruturas analisadas neste trabalho foram de geometria cilíndrica e vazada. No que diz respeito a sólidos cilíndricos, de acordo com Blevins (1984), a frequência natural na direção longitudinal é dada pela Eq. (1).

$$f_i = \frac{\lambda_i}{2 \cdot \pi \cdot L} \left(\frac{E_d}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

onde,

$i = 1, 2, 3, \dots$ (ordem correspondente ao modo longitudinal de vibração)

$\lambda_i = i \cdot \pi$

L = comprimento da amostra (m)

E_d = módulo de elasticidade dinâmico (N/m²)

μ = densidade do material (kg/m³).

Obtendo-se o valor da frequência natural em conjunto com a informação da massa da peça torna-se possível avaliar a rigidez do sistema, já que esta tem relação direta com o módulo de elasticidade. Entretanto é pertinente ressaltar que,

em função do tipo de sistema, estudos realizados por diversos autores demonstram que é necessário o dano ao material ser bastante significativo para a rigidez do sistema ser afetada (Resende,2003).

2.1. Investigação do Estado de Aderência no Regime Elástico

A investigação da condição de aderência entre materiais cimentícios e o aço é comumente realizada utilizando técnicas destrutivas através de testes de arrancamento. Neste teste a região de contato é submetida a um carregamento até sua completa ruptura, definindo assim a tensão máxima que a região de contato suporta.

No entanto, alguns trabalhos vêm sendo realizados para investigar aderência utilizando testes não destrutivos, através de medições realizadas com ultrassom.

No que diz respeito à verificação da aderência entre materiais cimentícios e materiais como aço e fibras (naturais ou artificiais), alguns estudos foram feitos utilizando parâmetros dinâmicos como taxa de amortecimento, frequência natural e rigidez.

O amortecimento e a frequência foram estudados por Yan et al. (2000). Em seus estudos, os autores sugeriram dois mecanismos de amortecimento como forma de explicar como a energia de vibração é dissipada através da interface entre a matriz cimentícia e a fibra. Foram utilizadas amostras confeccionadas com fibras rugosas e lisas. Estes mecanismos foram baseados no conhecimento das superfícies dessas fibras e o contato existente dessas com a matriz cimentícia. Os autores observaram que o desfibrilamento que surge durante o processo de mistura do concreto pode ter um impacto significativo no amortecimento.

As condições da superfície de contato entre materiais aderidos são importantes, pois devido a esse fato é que poderá ser bem delimitado os parâmetros que definem uma boa aderência. Santos et al. (2009), desenvolveram um método de avaliação não-destrutiva “*in situ*” para controlar a qualidade da interface concreto/concreto. Concluiu-se que um método baseado em ultrassom pode ser usado para caracterizar a textura da interface de duas camadas de materiais com características homogêneas.

Na investigação de perda de aderência, fissuras e delaminações estudos foram realizados utilizando técnicas acústicas, propagação de ondas e ensaios dinâmicos com vibrações forçadas por martelo de impacto.

Na et al. (2003), investigaram a degradação e separação de barras de aço do concreto em vigas, utilizando propagação de ondas. Amostras foram confeccionadas com a delaminação entre barras de aço e o concreto representada pela inserção, no processo de moldagem, de tubos de PVC com espessura de 3,10 mm. Estes eram retirados depois de certo tempo de cura, ficando o espaço entre o aço e o concreto. Daí as amostras eram submetidas a testes dinâmicos. Verificou-se que essa técnica mostrou-se eficiente na identificação do estado de degradação da interface cimento/aço.

Testes dinâmicos usando martelo de impacto em pavimentos asfálticos para verificação da aderência abaixo dessa superfície foram realizados por Sangiorgi et al. (2003). Nas superfícies em que havia problemas de aderência nas camadas inferiores, a resposta, na forma de aceleração, levava mais tempo para decair, contrário ao ocorrido com as superfícies bem aderidas, onde esse sinal chegava a zero em menos tempo.

Donskoy et al. (2000), desenvolveram uma técnica de Modulação Vibro - Acústica para verificação das condições da aderência entre materiais na presença de falhas tais como, fissuras, delaminações e perda de aderência. Esta técnica é baseada na modulação de um sinal ultrassônico. O resultado do sinal modulado contém nova componente de frequência que se relaciona com a falha e pode ser detectado. De acordo com os autores, este fato é especialmente vantajoso para diferenciar entre defeitos de redução de integridade e outras deformidades estruturais.

Neste trabalho a investigação do teste de aderência entre o cimento e o aço se baseou na análise modal do conjunto verificando a mudança de frequência natural para algumas condições de interface entre cimento e metal. Nos testes a amostra foi excitada através de uma varredura de frequência dentro da faixa de frequências naturais do conjunto.

3. MONTAGEM E REALIZAÇÃO DOS TESTES EXPERIMENTAIS

Foram confeccionadas nove amostras compostas cada uma por um tubo metálico revestido com uma luva de pasta de cimento. Essa pasta foi preparada utilizando duas relações água/cimento (a/c) de 0,33 e 0,44. Utilizou-se a relação (a/c) 0,44 por ser a mais usada na preparação de pastas para cimentação de poços de petróleo e comparando com os das amostras confeccionadas com a relação (a/c) 0,33. Dentre as nove amostras ensaiadas, seis amostras foram submetidas a tratamento superficial nos tubos metálicos antes da colocação das pastas. Dentre essas, três amostras foram moldadas usando uma solução de 3% de NaCl (identificadas como CT) e as outras três foram moldadas pincelando óleo (tipo MG1 – SAE, fabricado pela Petrobras) na superfície do tubo. As três amostras que não receberam tratamento superficial foram identificadas como ST.

Após a moldagem as amostras foram colocadas em processo de cura sendo realizados testes modais aos 3, 7, 14 e 28 dias. Na Figura (1) mostra-se o aparato experimental utilizado na realização dos testes.

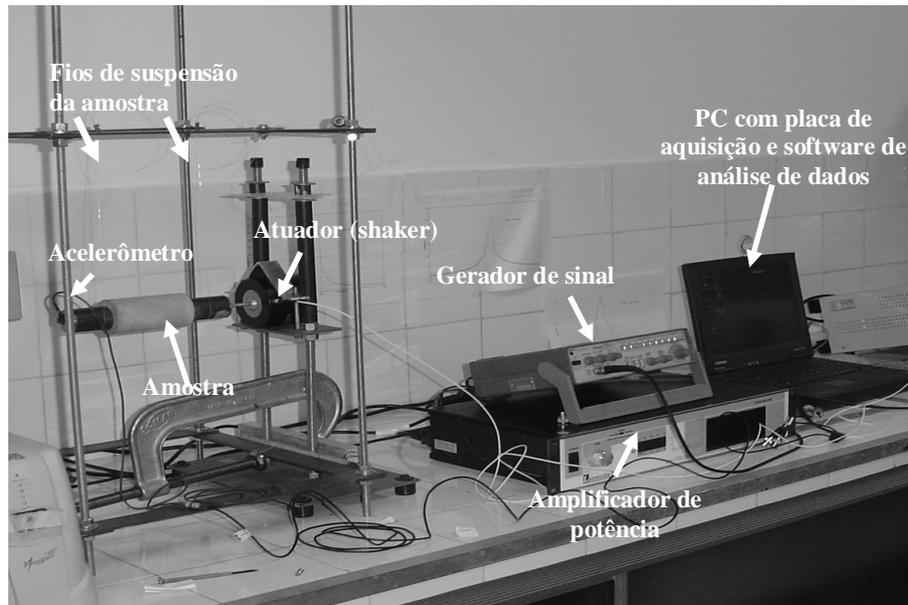


Figura 1. Montagem do aparato experimental.

A instrumentação utilizada foi composta de um acelerômetro (modelo 7253-C 10 triaxial da Endevco), para medir as acelerações na direção longitudinal (axial), produzidas por excitações também axiais de um atuador tipo “*shaker*” (modelo 4810 da Bruel & Kjaer) com amplitude de excitação de 10N e resposta em frequência de até 18 kHz. Como foi requerido forças com pequena intensidade, esse atuador correspondeu as necessidades do experimento. O atuador foi alimentado por amplificador de potência modelo PA-138 da Labworks.

A excitação aplicada foi em varredura senoidal, produzida no gerador de sinal modelo Tektronix – CFG 250, na faixa de frequência de 6 kHz a 15 kHz. Foi escolhida essa faixa de frequência de modo a incluir a frequência de ressonância longitudinal da amostra.

Para a coleta e processamento dos sinais foi utilizado um analisador de sinais de dois canais DATA PHYSICS modelo SignalCalc ACE, conectado a um computador. Um dos canais foi utilizado, captando-se a resposta do sistema quando submetido à excitação. Cada sinal medido teve duração de 0,08s com 4096 pontos. Não foram aplicadas janelas aos sinais adquiridos. Os sinais captados de aceleração da amostra, na direção axial (Fig. (1)), foram processados no analisador sendo obtido o espectro de cada sinal, a partir de aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT), pelo próprio equipamento de aquisição, de onde foi possível identificar a frequência de ressonância do sistema relacionada ao modo de vibração longitudinal. Para obtenção de cada espectro foram adquiridos 100 sinais, realizando-se uma média, de modo a minimizar efeitos de ruídos. Um espectro médio foi obtido a partir da média dos espectros para cada uma das três amostras utilizadas para cada tratamento. Na Figura (2) observa-se o espectro típico de resposta das amostras ensaiadas para as amostras sem tratamento superficial (ST).

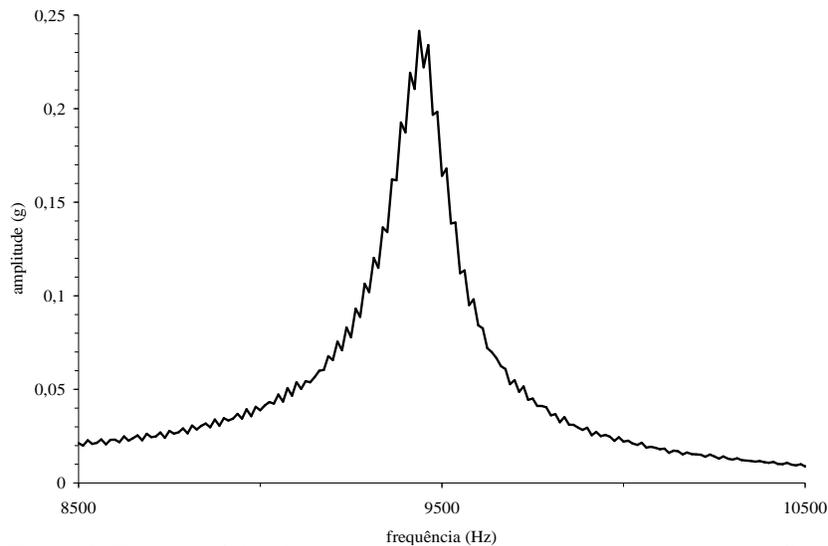


Figura 2. Espectro típico de resposta das amostras sem tratamento superficial (ST).

Uma medição complementar foi realizada posteriormente aos ensaios, com a disponibilização de novos equipamentos, introduzindo uma célula de carga entre o atuador e a amostra, obtendo-se a função de resposta em frequência (FRF), o espectro da excitação aplicada, o espectro da resposta do sistema e a função de coerência para uma amostra escolhida aleatoriamente. Esta medição visou averiguar se havia alguma eventual interferência da estrutura de suporte da amostra na resposta do sistema, a qual não foi observada. Na Figura (3), apresenta-se a FRF medida do sistema, sendo esta compatível com os espectros de resposta determinados pelo procedimento anterior.

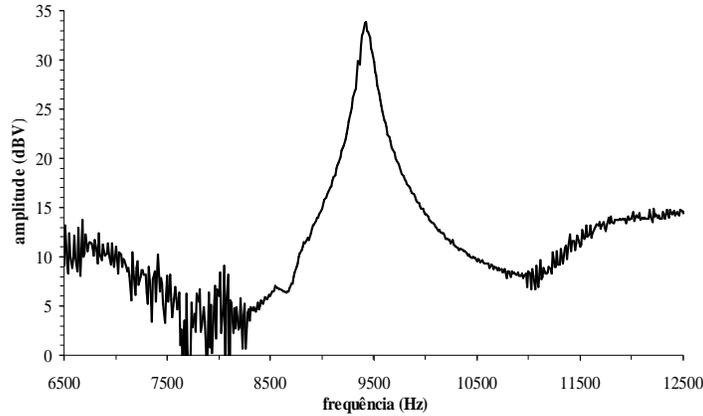


Figura 3. Espectro da função de resposta em frequência (FRF).

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O espectro do sinal enviado ao atuador apresentou amplitudes razoavelmente constantes dentro da faixa selecionada para o sinal de varredura senoidal apresentando pequenas flutuações em alguns trechos (Fig. (4)), podendo ser atribuída a ruídos gerados durante o processo de medição como também a efeitos provocados pelos filtros aplicados no processamento do sinal. O espectro do sinal de excitação enviado ao atuador é mostrado na Fig. (3).

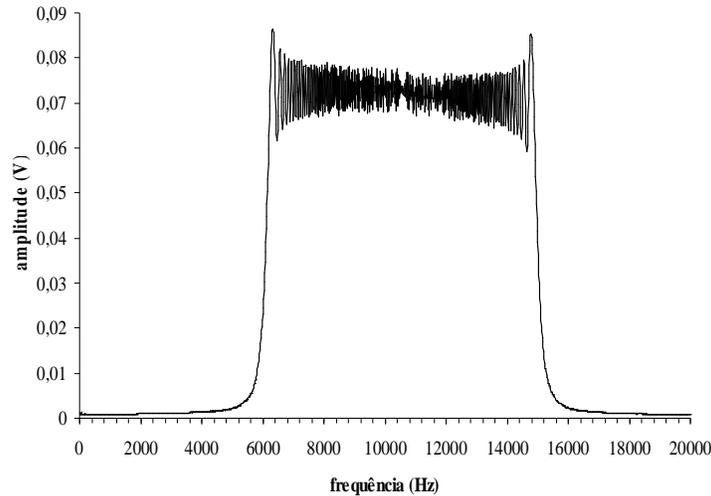


Figura 4. Espectro médio (média de 100 aquisições) do sinal enviado ao atuador (amplitude em Volts).

As amostras foram ensaiadas e suas frequências naturais, obtidas. Na realização dos testes modais nos tubos metálicos sem o revestimento de pasta de cimento, foi observada uma heterogeneidade entre os tubos, em decorrência do seu processo de confecção. Em virtude disto tentou-se minimizar esse efeito, utilizando como padrão comparativo o quociente entre a frequência natural do sistema completo (F_{nes}) e a frequência natural do tubo metálico (F_{net}).

Na Figura (5) mostra-se o gráfico correspondente aos valores relativos de frequência natural em função da idade de cura, para as amostras sem tratamento superficial. Mostra também a variação com relação ao fator (a/c) em 0,33 e 0,44.

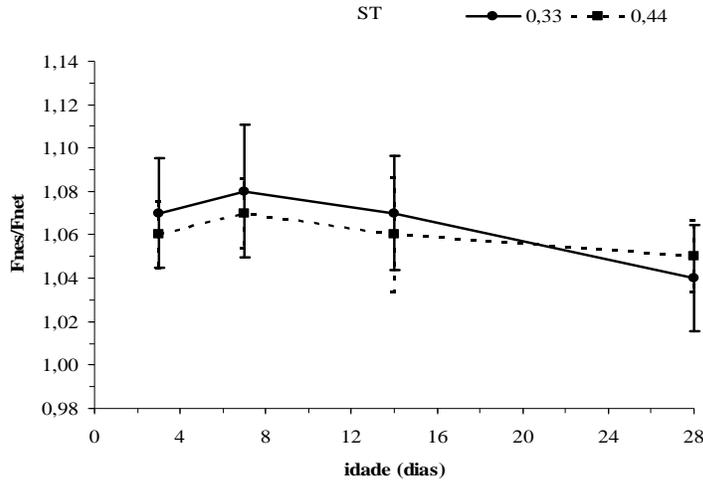


Figura 5. Valores relativos (adimensionais) de frequência natural das amostras sem tratamento superficial (ST).

Verifica-se que os valores relativos de frequência atingiram seu máximo até os 7 dias (primeiras idades). Atribui-se esse fato à utilização de um tipo de cimento que pode atingir sua máxima resistência nas primeiras idades. Notar que os poços de petróleo da Região Nordeste iniciam a produção 8 horas após a realização dos trabalhos de cimentação (Bezerra, 2006).

Observa-se também na Fig. (5) que na maioria dos casos foram obtidos valores superiores para a relação (a/c) 0,33, quando comparados com a relação (a/c) 0,44. Entretanto, a variação observada entre as duas relações (a/c) é pequena, sugerindo assim que a relação (a/c) não é muito relevante para a variação dos valores relativos de frequência natural.

A Figura (6) apresenta os valores relativos de frequência natural experimental, das amostras tratadas superficialmente com NaCl. Mostra também a variação com relação fator (a/c) em 0,33 e 0,44.

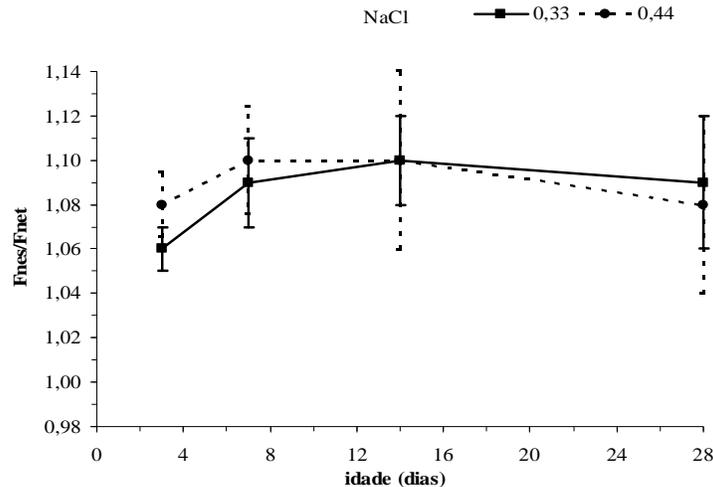


Figura 6. Valores relativos (adimensionais) de frequência natural das amostras tratadas superficialmente com NaCl (CT).

De acordo com Metha e Monteiro, (1994), o NaCl aumenta a velocidade de hidratação nas primeiras idades em compósitos a base de cimento e como consequência tem o aumento da resistência inicial. Sendo a frequência natural diretamente relacionada com a rigidez do material percebe-se então a influência da presença desse cloreto nos valores relativos de frequência natural. Se compararmos esses valores com os obtidos sem tratamento superficial observa-se que ocorreu, de forma geral, um acréscimo de 5% nos valores relativos de frequência (vide Tab. (1)). Assim, como a frequência cresceu, evidencia-se aumento de rigidez da interface e como consequência maior condição de aderência.

Na Figura (6) verifica-se ainda que os valores relativos de frequência natural aumentaram até os 7 dias devido ao cimento utilizado poder atingir sua máxima resistência nas primeiras idades. Se compararmos esses resultados com as amostras ST, cujo aumento foi de 1%, dos 3 até os 7 dias, percebe-se um acréscimo de 3,63%, no mesmo intervalo, para as amostras tratadas com NaCl. Esses resultados podem indicar a influência do NaCl na interface. Silva (2010), em testes cíclicos realizados em amostras confeccionadas sob as mesmas condições, identificou um maior número de ciclos (ainda no regime elástico) antes de ocorrer a perda de aderência da interface revestimento metálico/luva de pasta de cimento em amostras tratadas com NaCl.

Um fato ocorrido com as amostras tratadas com NaCl foi que a relação (a/c) 0,44 apresentou na maiores valores relativos de frequência natural na maioria dos casos se comparados com a relação (a/c) 0,33. No entanto, não foi observada uma variação significativa entre as duas relações (a/c), mostrando que a relação (a/c) não influencia nos valores relativos de frequência natural.

A Figura (7) corresponde aos valores relativos de frequência natural em função da idade, das amostras tratadas superficialmente com óleo. Mostra também a variação com relação ao fator (a/c) em 0,33 e 0,44.

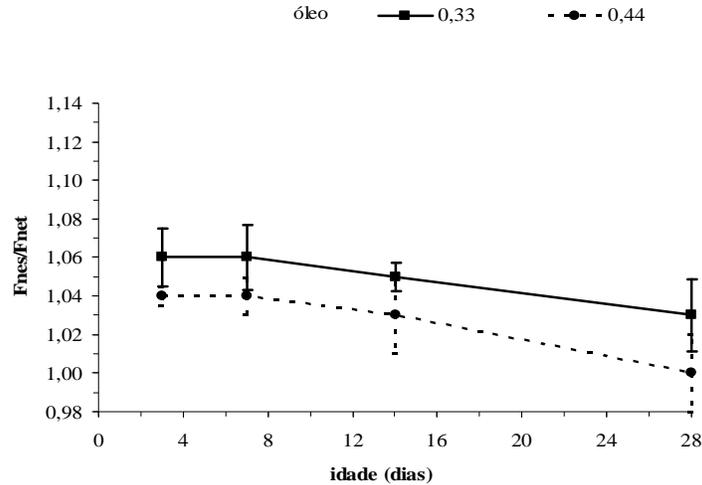


Figura 7. Valores relativos (adimensionais) de frequência natural experimental das amostras tratadas superficialmente com óleo (CT).

A presença de óleo na região de contato entre o tubo metálico e a luva de pasta de cimento resultou na redução nos valores relativos de frequência natural até os 14 dias e depois se manteve praticamente constante. A interação do óleo na interface entre o tubo metálico e a luva de pasta de cimento resultou em perda de contato entre esses dois materiais devido ao óleo não reagir com a água e formar uma película na interface tubo metálico e luva de pasta de cimento, provocando redução da rigidez nessa região e diminuição nos valores relativos de frequência natural do sistema completo. Foi observada uma redução de 6% (aos 28 dias) nos valores relativos de frequência natural obtidos nas amostras tratadas com óleo em relação às respectivas amostras sem tratamento (Tab. (1)).

Na Tabela (1) apresenta-se um comparativo entre os resultados de variação de frequência para as três situações investigadas (amostras sem tratamento superficial e amostras tratadas com NaCl e óleo).

Observa-se nas Figs. (5), (6) e (7) que há, em geral, um desvio padrão significativo em relação às variações observadas entre os tratamentos superficiais apresentadas na Tab. (1). Por outro lado, há uma consistência de variação do valor médio com o tratamento superficial, evidenciando um acréscimo da média, F_{nes}/F_{net} , com o tratamento NaCl e um decréscimo com o tratamento óleo.

Tabela 1. Valores relativos médios de frequência natural das amostras sem tratamento superficial (ST) e das amostras tratadas com NaCl e óleo.

NaCl	0,33			
	3dias	7dias	14dias	28dias
média	1,06	1,10	1,10	1,09
	0,44			
	3dias	7dias	14dias	28dias
média	1,08	1,10	1,10	1,08
ST	0,33			
	3dias	7dias	14dias	28dias
média	1,07	1,08	1,07	1,04
	0,44			
	3dias	7dias	14dias	28dias
média	1,06	1,07	1,06	1,05
óleo	0,33			
	3dias	7dias	14dias	28dias
média	1,06	1,06	1,05	1,04
	0,44			
	3dias	7dias	14dias	28dias
média	1,04	1,04	1,03	0,99

Por outro lado, deve-se considerar o comportamento reológico da relação (a/c) 0,33 durante o processo de moldagem de todas as amostras, independente do tratamento superficial. Verificou-se que devido à relação (a/c) 0,33 ser uma pasta menos fluida que a pasta confeccionada com a relação (a/c) 0,44, houve certa dificuldade no processo de moldagem das amostras confeccionadas com a relação (a/c) 0,33 e esse fato pode ter produzido vazios no interior da região preenchida com pasta de cimento e como resultado reduziu sua rigidez causando uma diminuição nos valores relativos de frequência natural.

5. CONCLUSÕES

Uma investigação do estado de aderência entre tubo metálico e pasta envolvente de cimento foi realizada utilizando testes modais em protótipos construídos e excitados axialmente. O parâmetro utilizado para avaliação do estado de aderência foi a variação da frequência natural das amostras. Verificou-se que este tipo de teste pode ser empregado para esta investigação. Foi observado que o tratamento superficial realizado em algumas amostras influenciou na aderência da interface tubo metálico/ luva de pasta de cimento. Esse fato ficou evidenciado quando se verificou um acréscimo nos valores relativos de frequência natural para as amostras tratadas com NaCl comparadas com as amostras sem tratamento superficial e com óleo entre os materiais, estas últimas apresentando um decréscimo nas frequências naturais em relação à situação sem tratamento. Entretanto, observou-se um desvio padrão significativo entre os resultados obtidos com as amostras utilizadas em algumas idades, sendo o desvio da ordem de grandeza das variações observadas com o tratamento. Isto pode estar relacionado com a extensão utilizada de trecho em contato entre a pasta de cimento e o tubo, pois sendo esta extensão pequena, pode resultar em pequenas variações na frequência natural para diferentes tratamentos. Esta questão requer futura investigação. Outro fator que influenciou na aderência foi a idade de cura das amostras. No que diz respeito às relações água/cimento testadas, os resultados não foram conclusivos no sentido de produzirem dos valores relativos de frequência natural.

6. REFERÊNCIAS

- Blevins, R.D., 1984, Formulas for natural frequency and mode shape, Florida, Krieger Publishing Company.
- Bezerra, U. T., 2006, *Compósitos portland-biopolímero para cimentação de poços de petróleo*. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). UFRN, Natal.
- Carter, L. G., Evans, G.W., 1964, “A study of cement-pipe bonding”, *Journal of Petroleum Technology*, pp. 157-160.
- Donskoy, D., Sutin, A., Ekimov, A., 2001, “Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing”, *NDT & E international*, v.34, pp. 231-238.
- Freitas, J.J.de, 2007, *Validação de uma metodologia de ensaio de resistência ao cisalhamento para avaliação da aderência de interfaces revestimento metálico-bainha de cimento aplicada a poços de petróleo*. Dissertação de mestrado (Engenharia Mecânica). UFRN, Natal.
- Grosmaning, M., Kpkesh, P., Majani, P., 1961, “A sonic method for analyzing the quality of cementation of borehole casings”, *SPE*, paper 1512-G, pp.165-171.
- Metha, P. K., Monteiro, P. J. M., 1994 *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. Ed Pini, São Paulo. 573p.
- Minear, J. W., Goodwin, K.J., 1998, “Cement-Sheath Evaluation”, *Petroleum Well Construction*, John Wiley & sons, England, pp.271-249.
- Na, W., Kundu, T., R.Ehoami, M., 2003, “Lamb waves for detecting delamination between steel bars and concrete”, *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v.18, pp. 58-63.
- Nelson, E.B., 1990, *Well cementing*. Saint-Etienne: Schumberger Educational Services.
- Pardue, G. H., Gollwitzer, L.H., 1963, “Cement bond log – a study of cement and casing variables”, *SPE*, pp. 545-555.
- Santos, P., Júlio, E., Santos, J., 2009, “Towards the development of an in situ non-destructive method to control the quality of concrete-to-concrete interfaces”, *Engineering Structures*, doi: 10.1016/j.engstruct.2009.09.007.
- Resende, F. M., 2003, “Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concreto de resistência normal e de alto desempenho.”, Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Silva, E. P., 2010 (tese em andamento), Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Paraíba, João Pessoa
- Torres, S. M., Pimentel, R. L., Chaves, G. V. de A., 2006, Variação de parâmetros modais em argamassas de cimento hidratadas ao longo do tempo. In: VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo. VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2006. v. 1. p. 2073-2084.
- Yan, L., Jenkins, C. H., Pendleton, R. L., 2000, “Polyolefin fiber-reinforced concrete composites part II. Damping and interface debonding”, *Cement and Concrete Research*, v.30, pp. 403-410.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION FOR EVALUATION OF BOND IN SAMPLES OF STEEL TUBE COVERED BY CEMENT PASTE USING VIBRATION TESTS

Marcilene Vieira da Nóbrega¹, marcilenenobrega@yahoo.com.br

Roberto Leal Pimentel¹, r.pimentel@uol.com.br

Sandro Marden Torres¹, sandromardentorres@yahoo.co.uk

Cícero da Rocha Souto², cicerosouto@hotmail.com

¹ Federal University of Paraíba - UFPB, Program of Pos Graduation in Mechanical Engineering, Center of Technology, Academical City, ZIP CODE: 58059-900, João Pessoa, PB.

² Federal University of Campina Grande - UFCG, Academic Unit of Mechanical Engineering, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, ZIP CODE: 58429-900 Campina Grande - PB.

Abstract

Wells for exploring petroleum and gas consist of a steel casing covered by a protective layer of cement paste. The good condition of the well, in terms of a production point of view, is related to the bond of the interface steel casing/layer of cement paste. The action of inherent substances on the well, like sodium chloride (NaCl) and oil can modify the contact area and interfere in the bond. This paper aims to obtain, through modal tests, the natural frequencies of samples made with metallic tubes covered by cement paste in different interface conditions (with and without the pollutants NaCl and oil) at different ages (3, 7, 14 and 28 days). An experimental apparatus was developed in which the test samples were suspended, providing the free-free condition. The samples were excited in one end with a shaker, using a sweep signal in the frequency range of investigation and the response was measured in the other extremity by an accelerometer. The results obtained evidenced the influence of the polluting materials on the interface between casing and layer of cement paste in terms of the variation of the natural frequencies of the samples. The results were related to the variation of the bond among the materials.

Keywords: Bond Cement-Metal, Natural Frequency, Modal Analysis, Vibration.