

Copyright 2012, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2012, em Salvador/BA no mês de maio de 2012.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Poliuretano Sintático – Qualificação da Tecnologia para Utilização em Dutos Rígidos Submarinos

Fabio B. Azevedo^a, Bruno M. Cunha^b, Guilherme E. Haverroth^c, Marcelo B. Teixeira^d

Abstract

The thermal insulation system defined as Syntactic Polyurethane is obtained when glass microspheres are added to solid polyurethane aiming to reduce the thermal conductivity of the material. This thermal insulation is applied on pipes over the FBE anticorrosion coating. Polyurethane is the result of the chemical reaction between polyol and isocyanate. This coating system can be applied on subsea pipelines to fulfill the anticorrosion and insulation requirements in accordance with the pipeline design. This paper presents the qualification process developed by Petrobras in order to consider this technology for subsea pipelines up to 3000 meters water depth. Also the paper addresses the advantages in using this technology, qualification tests developed and results/conclusions.

Keywords: insulation, coating, syntactic polyurethane.

Resumo

O sistema de Isolamento Térmico denominado Poliuretano Sintático (Syntactic Polyuretane), é constituído do material Poliuretano sólido no qual são adicionadas microesferas de vidro com o objetivo de diminuir a condutividade térmica do material. Este material é aplicado sobre o revestimento anticorrosivo de fusion bonded epóxi. O Poliuretano por sua vez é obtido por meio da reação química que ocorre quando se adiciona o Polioliol ao Isocianato em proporções definidas. Este sistema de revestimento anticorrosivo e de isolamento térmico pode ser utilizado para aplicação em dutos rígidos submarinos objetivando garantir proteção contra a corrosão e proporcionar adequado isolamento térmico ao duto, conforme requisitos do projeto. Este trabalho tem como objetivo apresentar o processo de qualificação desenvolvido para que a referida tecnologia de isolamento térmico seja disponibilizada para a utilização em dutos submarinos na Petrobras e em empresas parceiras, em lâminas d'água de até 3000 metros de profundidade. Ainda, serão apresentados as possíveis vantagens do uso dessa tecnologia, os testes de qualificação desenvolvidos e os resultados obtidos.

Palavras-chave: isolamento térmico, revestimento, poliuretano sintático.

^a Mestre, Engenheiro de Dutos - PETROBRAS

^b Engenheiro de Dutos - PETROBRAS

^c Engenheiro de Dutos - PETROBRAS

^d Gerente de Projetos de Dutos - PETROBRAS

Introdução

Estudos de escoamento para dutos submarinos de coleta ou de exportação indicam, muitas vezes, a necessidade da aplicação de isolamento térmico aos dutos como forma de otimizar o fluxo de óleo ou gás ou mesmo para a viabilização técnica e econômica da produção de um poço ou campo. O isolamento térmico de um duto submarino deve atender, no mínimo, os seguintes requisitos:

- a) Para oleodutos o isolamento térmico deverá manter a temperatura de chegada do óleo na plataforma acima da temperatura de início de formação de depósitos. Sob regime normal de operação, nestas condições, evita-se a formação de parafina.
- b) Para gasodutos o isolamento térmico deverá manter a temperatura do gás, em um shutdown, acima da temperatura crítica de formação de hidrato por um período mínimo de forma a permitir a intervenção no duto.

Além disso, o isolamento térmico proposto deverá possuir características físicas suficientes para suportar e manter sua integridade quando submetido às diversas solicitações durante a construção, transporte, instalação e operação do duto durante a vida útil do sistema. Importante ressaltar que o isolamento térmico deve sempre ser projetado de forma também a atender as necessidades econômicas do projeto.

A partir das características dos fluidos a serem deslocados, do diâmetro interno do duto e do perfil da rota do duto, o estudo de escoamento vem a determinar o valor ideal do coeficiente global de troca térmica OHTC (*overall heat transfer coefficient*) para toda a extensão do duto. Este coeficiente define o valor máximo admissível de troca de calor através do sistema tubo/isolamento térmico/água do mar. A unidade usual para este coeficiente é W/m^2K . Simulações de escoamento usualmente são executadas utilizando-se softwares tais como, por exemplo, PIPESIM e OLGA.

Histórico

A PETROBRAS vem utilizando largamente isolantes térmicos em dutos submarinos. Dutos submarinos com isolamento térmico do tipo molhado são aqueles cujo material isolante encontra-se em contato com a água do mar. Em contrapartida, quando o isolamento térmico não está em contato com a água do mar este é definido como do tipo seco, ou seja está protegido. Este último é o caso típico de um sistema do tipo Pipe-in-Pipe (PIP) [2], quando um tubo de menor diâmetro está posicionado dentro de outro tubo. Neste sistema o espaço anular entre os dois tubos é utilizado para a aplicação de isolante térmico de alta eficiência.

Quando as análises de escoamento definem valores de OHTC aproximadamente entre os valores de 0,6 e 2 W/m^2K , a solução PIP se torna necessária para a viabilidade técnica do escoamento do fluido a ser produzido. Valores de OHTC superiores aos definidos possibilitam a solução de escoamento pela utilização de isolamento térmico molhado nos

duto submarino. Neste caso, o isolamento térmico está em contato permanente com a água do mar e sujeito as condições ambientais locais.

Neste último cenário aparecem soluções pela utilização de diversos materiais isolantes térmicos tais como: polipropileno sólido, polipropileno sintático, poliuretano sólido e poliuretano sintático. As Tabelas 1, 2, 3 e 4 apresentam as principais características dos materiais citados.

Tabela 1 – Características do material Polipropileno Sólido para Dutos Submarinos

Densidade do Material	930kgf/m ³
Condutividade térmica	0,22W/mK
Resistência à ruptura	20MPa
Textura	O material não possui espaços vazios

Tabela 2 – Características do material Poliuretano Sólido para Dutos Submarinos

Densidade do Material	1100kgf/m ³
Condutividade térmica	0,19W/mK
Resistência à ruptura	15MPa
Textura	O material não possui espaços vazios

Tabela 3 – Características do material Polipropileno Sintático para Dutos Submarinos

Densidade do Material	700kgf/m ³
Condutividade térmica	0,17W/mK
Resistência à ruptura	8MPa
Textura	Ao material são adicionadas microesferas

Tabela 4 – Características do material Poliuretano Sintático para Dutos Submarinos

Densidade do Material	850kgf/m ³
Condutividade térmica	0,17W/mK
Resistência à ruptura	6MPa
Textura	Ao material são adicionadas microesferas

Motivação

A principal motivação para o presente trabalho foi à necessidade de se disponibilizar uma nova tecnologia de isolamento térmico para dutos submarinos. A disponibilidade de maior número de opções técnicas de isolamento térmico para dutos submarinos amplia a concorrência e conseqüentemente proporciona melhores retornos econômicos para as empresas operadoras.

Os materiais polipropileno sólido e sintático já se encontram qualificados na Petrobras para utilização nos projetos de dutos submarinos. O material poliuretano, já utilizado em dutos submarinos por outras empresas, carecia de qualificação para uso na Petrobras.

O poliuretano sintático (GSPU, *glass syntactic polyurethane*), por apresentar melhores propriedades térmicas, foi selecionado para o processo de pré-qualificação, devendo atender aos requisitos de dutos a serem instalados em até 3000m de lâmina de água.

Descrição do Sistema Anticorrosivo e Térmico

O sistema FBE dual layer foi especificado como revestimento anticorrosivo para os tubos. Este sistema é composto por duas camadas de FBE que são aplicadas sobre os tubos. A primeira camada de FBE tem a espessura de 450 μ m, e a segunda camada, sobreposta à primeira camada, tem a espessura também de 450 μ m. A segunda camada tem a função de proteção do FBE anticorrosivo.

Para o sistema de revestimento térmico dos tubos foi especificado o GSPU. Este sistema aplicado sobre o anticorrosivo é composto por uma camada de poliuretano na qual são inseridas microesferas de vidro com o objetivo de melhorar o desempenho térmico do material isolante. O poliuretano por sua vez é um produto resultante da reação química entre o polioliol e o isocianato. A proporção entre o polioliol e o isocianato utilizada foi de 2,2/1,0 em peso. A espessura da camada de GSPU, para esta pré-qualificação, foi especificada em 80mm.

As microesferas são adicionadas ao polioliol, a priori, de forma a se obter uma mistura homogênea com densidade aproximadamente de 0,72. A mistura final polioliol + microesferas e isocianato é preparada na proporção de 2,2/1 em peso, imediatamente antes de sua aplicação ao tubo. O isolamento térmico de GSPU aplicado tem as características conforme listadas na Tabela 5. Nesta pré-qualificação foram empregadas microesferas de alta resistência (5500psi) objetivando minimizar quebras e melhorar o desempenho térmico do revestimento.

A Figura 1 ilustra o sistema de revestimento anticorrosivo e térmico aplicado no tubo. A Tabela 5 apresenta as principais propriedades do revestimento térmico aplicado nos tubos.



Figura 1 – Tubo com revestimento anticorrosivo e GSPU aplicado.

Tabela 5 – Características do material Poliuretano Sintético Aplicado no Tubo

Densidade do Material	850kgf/m ³
Condutividade térmica	0,165 a 0,170W/mK
Resistência à rutura	9MPa
Alongamento	20%
Dureza	45 shore D
Cisalhamento	12MPa
Temperatura máxima de operação	92°C
Espessura do GSPU	80mm
OHTC máximo para o tubo de 8,625pol (referido a DI)	3,4 W/m ² K

Aplicação do Sistema Anticorrosivo e GSPU no Tubo

A aplicação do revestimento no tubo está dividida em duas fases: aplicação do revestimento anticorrosivo e aplicação do isolante térmico de GSPU.

Para esta pré-qualificação foram selecionados tubos com diâmetro de 8,625 pol e espessura de 0,625 pol. Antes da aplicação do revestimento anticorrosivo os tubos são inspecionados e limpos, quando são eliminados os detritos, óleos e impurezas. A contaminação salina da superfície do tubo é controlada e deve ser mantida abaixo de $2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Os tubos são pré-aquecidos e jateados ao padrão Sa 2 ½ conforme norma ISO 8501-1. A superfície do tubo jateado é inspecionada de forma a garantir rugosidade entre $60 \mu\text{m}$ e $100 \mu\text{m}$ (Rz) e verificada a contaminação por pó conforme norma ISO 8502-3, admitindo-se como critério máximo o padrão da figura 2 dessa norma. Para a aplicação do anticorrosivo, o tubo é aquecido por indução a temperatura média de $220 \text{ }^\circ\text{C}$ ou conforme orientação específica do fabricante do FBE. O anticorrosivo FBE é aplicado em duas camadas na espessura total de aproximadamente $900 \mu\text{m}$ e inspecionado com o *holiday detector* na voltagem $5 \text{ V}/\mu\text{m}$ de espessura de revestimento. A Figura 2 mostra um tubo com o revestimento anticorrosivo de FBE aplicado.

Antes da efetiva aplicação do GSPU no tubo, o poliuretano sintético é preparado pela adição das microesferas ao polioliol na dosagem adequada de forma a se obter as propriedades térmicas e mecânicas especificadas. Para este projeto foram adicionadas microesferas ao polioliol de forma a se obter a densidade de 0,72 para a mistura polioliol/microesferas.

A aplicação do GSPU ao tubo foi executada pelo método de forma. A forma e o tubo com FBE são aquecidos a temperatura de $70 \text{ }^\circ\text{C}$ e o tubo é posicionado dentro da forma sendo centralizado por meio de centralizadores previamente confeccionados com o mesmo GSPU a ser aplicado. A forma é composta de sistema bi-partido para o posicionamento do tubo. Desmoldante a base de silicone é aplicado na forma antes do posicionamento do tubo. A Figura 3 mostra o tubo com FBE e centralizadores sendo posicionado dentro da forma para receber o GSPU.



Figura 2 – Tubo com o revestimento de FBE aplicado.



Figura 3 – Tubo posicionado na forma.



Figura 4 – Tubo na forma pronto para receber GSPU.



Figura 5 – Tubo com GSPU sendo retirado da forma.

Os dois componentes do poliuretano polioliol + microesferas e isocianato são dosados, na proporção de 2,2:1 em peso e bombeados para o interior da forma. A forma permanece em ângulo de 30 °C com a horizontal durante todo o bombeio do GSPU. A Figura 4 mostra a forma em sua posição angular para receber o GSPU. Todo o espaço anular tubo/forma é preenchido com GSPU e a cura do material acontece em aproximadamente 15 minutos. A forma é então aberta e o tubo revestido é retirado e inspecionado. A Figura 5 mostra o tubo revestido com GSPU sendo retirado da forma após cura.

Qualificação do Sistema GSPU

Objetivando garantir a qualidade do sistema de revestimento aplicado nos tubos, quando submetido às condições operacionais do projeto durante a vida útil e para as condições específicas da instalação, todo o sistema de revestimento deve ser submetido a testes de pré-qualificação antes da sua efetiva especificação em projetos de dutos submarinos. Esta é uma prática usual da Petrobras que objetiva obter produtos de qualidade comprovada em seus dutos submarinos. Desta forma a pré-qualificação do GSPU foi desenvolvida em três fases.

Primeira Fase da Pré-Qualificação.

Nesta etapa da pré-qualificação são desenvolvidos os documentos técnicos. Foram elaborados e aprovados os seguintes documentos: especificação técnica (I-ET-0000.00-6500-431-PPR-004 [5]) para o revestimento anticorrosivo e térmico em GSPU; procedimentos de aplicação para os revestimentos anticorrosivos e térmicos nos tubos; e planos de inspeção e testes (ITPs) para os revestimentos anticorrosivos e térmicos aplicados nos tubos. Todos os documentos foram analisados e discutidos extensivamente e uma vez acordados entre as partes, foi iniciada a fase de aplicação e execução dos testes de pré-qualificação.

Segunda Fase da Pré-Qualificação.

Nesta etapa da pré-qualificação o revestimento foi aplicado nos tubos e foram realizados os testes de pré-qualificação, conforme especificações técnicas e procedimentos. Esta fase visa verificar a qualidade e propriedades dos materiais e do sistema aplicado nos tubos. O revestimento de GSPU foi aplicado em 6 tubos conforme procedimentos aprovados e os testes

foram executados pelas empresas Wasco, Dow Hyperlast e Dnv. Alguns testes executados durante esta etapa de pré-qualificação estão listados abaixo:

Verificação da qualidade das matérias primas compradas.

Análise dos certificados e da validade de cada produto fornecido e execução dos testes de conformidade de acordo com o Plano de Inspeção e Testes (ITP). Foram controladas as condições de armazenagem e estoque para cada matéria prima que foi utilizado no revestimento.

Verificação da qualidade das microesferas utilizadas como matéria-prima.

Análise dos certificados e validade do produto e execução de testes de controle de qualidade tais como: densidade real, *nitrogen isostatic crush strength at 5500psi*, tamanho máximo da partícula, alcalinidade, conteúdos voláteis, estabilidade térmica. Critério de aceitação conforme *data sheet* do fabricante.

Verificação da presença de contaminantes nos tubos e abrasivos.

Controle dos limites aceitáveis de contaminantes nos tubos (cloretos $< 2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) e nos abrasivos a serem utilizados (óleo e impurezas).

Verificação das condições ambientais.

Monitoração contínua das condições de umidade e da temperatura do ambiente antes e durante o processo de aplicação dos revestimentos.

Verificação de condições do tubo após o jato abrasivo.

Execução de testes visando garantir a rugosidade especificada para o aço. Foi utilizado o sistema *Press-o-Film*. Também poderá ser utilizado o medidor de rugosidade eletrônico. A rugosidade (Rz) deve permanecer entre 60 μm e 100 μm . Foi controlado o padrão para o jato abrasivo do tubo (Sa 2 1/2) e a limpeza do aço após jato abrasivo em no máximo *rating 2*.

Verificação da limpeza do tubo com FBE aplicado.

Controle do grau de limpeza da superfície do FBE, se conforme especificado, e presença de contaminantes nos tubos. O revestimento já aplicado não poderá estar degradado, sujo, ou apresentar material já exposto a UV.

Verificação da espessura do FBE.

Execução de testes visando controlar a espessura do FBE aplicado no tubo conforme especificado.

Verificação da aderência do FBE aplicado.

Execução de testes visando verificar a aderência do FBE ao aço Foi utilizado o teste de *pull-off*. O critério de aceitação para a força resistente por unidade de área foi de 17,2 MPa.

Verificação do grau de cura do FBE aplicado.

Controle do grau de cura e da qualidade do FBE após aplicação ao tubo através da execução do teste *differential scanning calorimetry (DSC)* em película de FBE retirada do tubo. Critério de aceitação conforme *data sheet* do fabricante.

Verificação da espessura do revestimento de GSPU.

Controle e registro da espessura total do revestimento anticorrosivo e térmico (80mm) aplicado no tubo. A espessura total aplicada ao tubo não poderá ser inferior a 80mm em qualquer ponto de uma seção do tubo medido nas posições 0:00, 3:00, 6:00 e 9:00 horas.

Verificação da aderência do revestimento de GSPU aplicado sobre o FBE do tubo.

Controle da aderência do revestimento de GSPU aplicado sobre o FBE do tubo. Foram executados testes de arrancamento do revestimento a 23°C. Critério de aceitação 5N/mm². A Figura 6 ilustra a execução desses testes de aderência.

Verificação da dureza do GSPU após aplicação e cura no tubo.

Controle da qualidade do GSPU aplicado pela medição da dureza. O valor da dureza deve estar, conforme especificação, entre 40 e 51 Shore D a 23°C. A Figura 7 ilustra a medição da dureza do GSPU no tubo após aplicação e cura.



Figura 6 – GSPU aplicado no tubo sendo submetido a teste de aderência.



Figura 7 – Medição da dureza do GSPU aplicado ao tubo.

Verificação da resistência à ruptura, alongamento e *nicked crescent tear strength* do revestimento aplicado.

Controle da qualidade do revestimento pela execução de testes de resistência à ruptura, alongamento e *nicked crescent tear strength* do GSPU aplicado ao tubo a 23 °C. A resistência à ruptura do GSPU deve ser superior a 9 MPa. O alongamento mínimo do GSPU deve ser superior a 20 %. O valor para o *nicked crescent tear strength* deve ser superior a 80 N/mm. A Figura 8 apresenta os corpos de prova para a execução dos três ensaios.

Verificação da condutividade térmica de amostra do GSPU aplicado.

Controle da qualidade do revestimento pela execução de teste de condutividade térmica do material GSPU. Amostras de GSPU são retiradas do tubo e o teste de condutividade térmica objetiva confirmar a propriedade térmica do material. O valor obtido se situou conforme critério de aceitação estabelecido nas especificações (entre 0,165 e 0,170 W/mK). Os testes foram executados em laboratório e nas condições ambientais.

Verificação do descolamento catódico do revestimento aplicado.

Controle da qualidade do revestimento aplicado ao tubo, pela execução de testes de descolamento catódico para verificação da capacidade do revestimento resistir à corrosão. Testes foram realizados durante 48 horas a 65 °C e durante 28 dias a 23 °C e 70 °C. O valor obtido de descolamento deve ser inferior a 5 mm para o teste a 23 °C, 5mm para o teste a 65 °C e 10 mm para o teste a 70 °C.

Verificação da capacidade de compressão do GSPU.

Controle de qualidade do revestimento aplicado pela execução de testes de compressão do revestimento. Amostras retiradas do tubo são submetidas à compressão de forma a se obter 5 % e 10 % de deformação quando são avaliadas as cargas correspondentes. Foram obtidos valores de 4,9 N/m obtido para o GSPU foi de 91 MPa. A Figura 9 ilustra o resultado do teste de compressão.



Figura 8 – Corpos de prova para execução dos testes de ruptura, alongamento e *nicked crescent tear strength*.

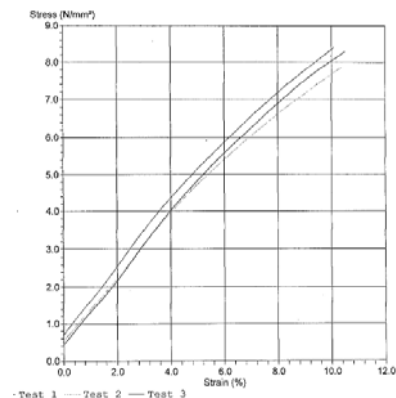


Figura 9 – Curva tensão x deformação correspondente a 3 corpos de prova submetidos a teste de compressão.

Terceira Fase da Pré-Qualificação.

Nesta etapa são realizados os testes funcionais aplicáveis aos sistemas de revestimento conforme definidos nas especificações técnicas. Estes testes objetivam garantir a adequabilidade dos revestimentos anticorrosivo e térmico dos tubos para serem instalados, inclusive pelo método Reel, e a suportarem as condições operacionais de 90°C na profundidade de 300 0m. A seguir breve descrição dos testes realizados.

Verificação da capacidade de dobramento do FBE+GSPU aplicado no tubo.

Este teste visa simular as condições reais a que o tubo revestido será submetido durante a fase de instalação quando o duto é instalado pelo método *Reel*. O tubo revestido será submetido à deformação plástica quando enrolado no tambor do barco instalador e durante o lançamento do duto este será submetido à nova deformação plástica no processo de alinhamento e retificação. Para este teste são utilizados tubos revestidos, em escala real, e são considerados quatro ciclos completos de dobramento e retificação de um tubo revestido com GSPU. Neste teste o revestimento não pode apresentar descolamentos, enrugamentos e/ou trincas/fissuras.

Ainda, seções do tubo são cortadas para inspeção visual do revestimento. Nesta mesma amostra são executados testes de aderência, *hot soak water* e descolamento catódico considerando-se os mesmos critérios de aceitação do tubo não dobrado. A Figura 10 ilustra o apparatus utilizado para o teste de dobramento e o teste sendo executado.

Verificação do *overall heat transfer coefficient* (OHTC) e *cooldown time* do duto.

Este teste visa simular às condições reais a que o duto está submetido durante a fase de operação. Nestas condições é avaliado o coeficiente global de troca térmica do duto (OHTC) e o tempo de resfriamento *cooldown time*. Para o teste é utilizado um tubo em escala real revestido com GSPU. A verificação do valor do OHTC do duto tem importância fundamental, pois vem a confirmar a real capacidade do isolamento de garantir as condições de escoamento do fluido a ser transportado. O teste foi realizado em câmara hiperbárica sendo a amostra submetida a pressão de 220 bar e temperatura de 90 °C durante 28 dias. O critério de aceitação para este teste é a confirmação do valor da condutividade térmica de no máximo 0,170 W/mK para o poliuretano sintático nas condições operacionais. O teste de *cooldown time* visa obter o tempo necessário para, nas condições operacionais do duto, o fluido atingir a temperatura de 4 °C quando o escoamento é interrompido. Até o momento da conclusão desse paper os resultados dos testes não estavam disponíveis. A Figura 11 apresenta o esquema do apparatus utilizado para o teste.

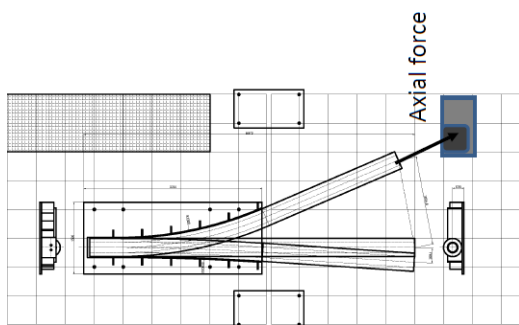


Figura 10 – Apparatus para o teste de dobramento.

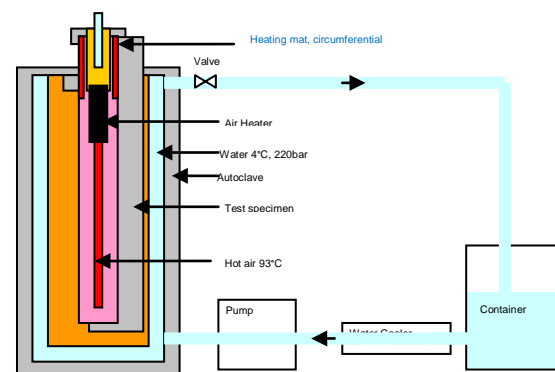


Figura 11 – Apparatus utilizado para o teste de OHTC.

Verificação da capacidade do revestimento suportar grandes cargas de impacto.

Este teste visa simular em condições reais o efeito de cargas de impacto a que o duto eventualmente, poderá estar submetido durante a operação. O teste é aplicado a um tubo em escala real revestido com GSPU. O teste segue a normalização da DNV [4] tendo sido selecionado para o teste a cabeça de impacto com 50mm. A energia potencial da cabeça de impacto é liberada e transmitida ao tubo via energia cinética. O tubo revestido com 80mm de GSPU deverá suportar, sem apresentar danos ao revestimento, impactos com energia crescente a partir de 1000 Joules. Foram executados 11 impactos, não coincidentes, até a energia máxima de 3000 Joules. Os impactos provocaram marcas no revestimento, sem contudo causarem trincas, mesmo na energia máxima de 3000 Joules. As dimensões das marcas impostas ao GSPU variaram de 100 mm/37 mm/0,35 mm a 169 mm/43 mm/0,75 mm,

sendo esta última a medida da profundidade. Após corte das regiões afetadas pelos impactos não foi observado nenhum descolamento ou rutura do GSPU. A Figura 12 ilustra o apparatus utilizado para a realização do teste.

Verificação da degradação térmica do GSPU pelo efeito do calor e pressão.

Este teste visa simular, nas condições reais da operação do duto, a absorção de água do GSPU. Para o teste foram utilizadas amostras de GSPU removidas dos tubos revestidos. O duto em condições operacionais poderá, eventualmente, vir a sofrer danos e nesta situação o poliuretano sintático estará sujeito a absorver água. As amostras de GSPU foram imersas em água e expostas, em câmara hiperbárica, a pressão de 220 bar e a temperatura de 90 °C durante 28 dias. Ao final do teste as amostras são pesadas e submetidas aos testes de resistência à rutura, alongamento e dureza. As variações nos resultados de rutura não poderão ser superiores a +/-20%, no alongamento nenhuma variação é admitida e na dureza as variações devem se situar em +/-10%.

Verificação da resistência ao cisalhamento (*shear test*) do GSPU ao tubo.

Este teste visa verificar, utilizando uma amostra em escala real, a força máxima necessária para cisalhar o revestimento do tubo. Para tal foi utilizado apparatus conforme ilustrado na Figura 13 onde uma seção do tubo revestido é posicionada de forma apoiada sobre o revestimento de GSPU. O apparatus de teste aplica uma força crescente no tubo de aço até que ocorra o rompimento do GSPU do tubo. Neste momento a força é registrada. O critério de aceitação para este teste é de, no mínimo, 12 MPa.

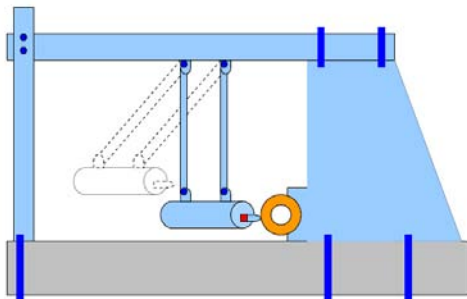


Figura 12 – Apparatus para o teste de impacto em escala real.



Figura 13 – Apparatus utilizado para o teste de resistência ao cisalhamento.

Resultados e discussão

Os resultados dos testes de pré-qualificação dos revestimentos aplicados aos tubos mostraram adequabilidade, até a presente data, do sistema proposto para utilização em dutos submarinos em lâminas de água de até 3000 m.

Os testes de pré-qualificação aplicados ao poliuretano sintático, até a presente data, confirmaram os requisitos técnicos necessários à especificação desse tipo de revestimentos em projetos da Petrobras.

Conclusão

A tecnologia para a formulação do poliuretano sintático, com condutividade térmica de 0,170 W/mK, para uso em projetos submarinos atingiu, até a presente data, os objetivos das especificações técnicas e recomendamos seu uso em novos projetos de dutos em águas profundas e ultraprofundas.

Nomenclatura

Definição de termos utilizados.

Lâmina de Água (LDA). Distância entre a superfície do mar e o solo marinho.

Fusion Bonded Epoxy (FBE). Material epóxi utilizado como anticorrosivo para dutos submarinos.

Overall Heat Transfer Coefficient (OHTC). Medida da transferência global de calor por unidade de área, de um sistema térmico composto por diversas camadas.

Thermal Exchange Coefficient (TEC). Medida da transferência global de calor por unidade de comprimento, de um sistema térmico composto por diversas camadas.

Condutividade térmica (k). Propriedade térmica dos materiais de isolamento térmico.

Resistência à compressão. Característica compressiva dos materiais anticorrosivos e isolantes térmicos utilizados nos dutos que operam em águas profundas e ultraprofundas devido à pressão hidrostática.

Densidade. Propriedade que influencia diretamente a resistência mecânica e condutividade térmica.

Estabilidade térmica. Os materiais de revestimento devem manter suas características dentro dos limites de temperatura especificados.

Resistência à água e à temperatura elevada. Característica que confere ao sistema de isolamento térmico, resistência à degradação provocada pela absorção de água.

Aderência. Propriedade dos materiais que avalia a aderência das diversas camadas de materiais ao seu substrato.

Resistência mecânica. Propriedade dos materiais de resistir às diversas solicitações mecânicas durante a construção, transporte, instalação e operação durante a vida útil do duto.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Petrobras pela publicação desse trabalho.

A Petrobras agradece o empenho da empresa Dow pelo desenvolvimento e pré-qualificação dessa nova tecnologia para revestimento de tubos para dutos submarinos.

Agradecemos ainda as empresas Wasco e Dnv pela participação.

Referências Bibliográficas

- (1) AZEVEDO, F.B., CUNHA, B., ALEXANDRE, P. Nova Tecnologia Utilizada para Revestimento Anticorrosivo e Isolamento Térmico de Juntas de Campo em Dutos Submarinos. In: Segundo Seminário de Engenharia Submarina na Petrobras, Novembro 2006.
- (2) AZEVEDO, F.B., SOLANO, R. Pipe-in-Pipe for Gas Production in Deep Water Offshore Brazil. In: OMAE 2009.
- (3) AZEVEDO, F.B., HAVERROTH, G.E., CUNHA, B., OLIVEIRA, R. Sistema Sintático para Revestimento Anticorrosivo e Isolamento Térmico de Duto Submarino em Marlim Sul. In INTERCORR 2010.
- (4) DNV RP-F111 – *Interference Between Trawl Gear and Pipelines*. October 2006.
- (5) I-ET-0000.00-6500-431-PPR-004 – *Glass Syntactic Polyurethane Thermal Insulation (GSPU)*. Dezembro 2010.