

Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

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

Revestimento Interno de Dutos Submarinos – Aplicação e Utilização em Gasodutos da Bacia de Santos.

Fabio B. Azevedo^a, Bruno R. M. Cunha^b, Guilherme E. Haverroth^c

Abstract

The flow coating for subsea pipelines aims to reduce the pipe internal rugosity and therefore reduce the internal friction on the interface pipeline/fluid. When applying internal coating into a pipeline the fluid flow will be optimized, considering the same flow conditions. The use of this type of coating is been specified by PETROBRAS, for the first time in gas offshore pipelines to be laid in Santos Basin.

This paper addresses the internal coating specification, qualification and application on the gas pipelines Rota 2 and Rota 3, both export pipelines to be installed in the pre-salt area of Santos Basin. Qualification tests were specified and performed in order to assure the final quality of the internal coating when submitted to installation and operational condition and also simulating the cleaning pigs run.

Keywords: internal coating, corrosion, flow.

Resumo

O revestimento interno de dutos submarinos do tipo redutor de atrito, *flow coating*, tem como principal objetivo a diminuição da rugosidade interna dos tubos e conseqüentemente a redução do atrito na interface parede interna do duto com o fluido a ser escoado. O uso do revestimento interno permite a redução da perda de carga do fluido com possível aumento de vazão para as mesmas condições de escoamento. Este tipo de revestimento interno está sendo especificado, pela primeira vez, para uso em dutos rígidos submarinos na PETROBRAS com aplicação específica em gasodutos do pré-sal.

O objetivo desse trabalho é apresentar o processo de especificação, qualificação e aplicação do revestimento interno dos gasodutos Rota 2 e Rota 3 a serem instalados na área do pré-sal da Bacia de Santos. Diversos testes foram especificados e desenvolvidos de forma a comprovar a qualidade do revestimento aplicado quando este é submetido às condições de instalação e operação dos dutos, inclusive com a passagem de *pigs* de limpeza.

Palavras-chave: revestimento interno, corrosão, vazão.

^a MSc, Engenheiro de Dutos - PETROBRAS

^b MSc, Engenheiro de Dutos - PETROBRAS

^c Engenheiro de Dutos - PETROBRAS

Introdução

Estudos de escoamento para os longos gasodutos submarinos de exportação são bastante impactados por variáveis tais como, diâmetro do duto, pressão de projeto, tipo e composição química do gás, extensão do duto, diferenças batimétricas ao longo da rota do duto e também pela rugosidade interna da parede do tubo. Esta última representa um fator de perda de carga devido ao atrito do fluido com a superfície interna do duto e impacta diretamente na definição e especificação da potência necessária para os compressores de gás a serem instalados nas UEPs.

Como forma de otimizar o escoamento do gás e conseqüentemente a potência necessária do compressor instalado na plataforma de produção foi estudada a viabilidade de redução do coeficiente de atrito fluido/aço. Com tal objetivo foi considerada a aplicação de uma camada de revestimento na superfície interna do gasoduto. Novas simulações de escoamento indicaram consideráveis ganhos na vazão do gás considerando-se as demais variáveis constantes. Como exemplo, tem-se o duto Rota 2, com revestimento interno e capacidade de transportar 13 MMm³/dia de gás, e também o gasoduto Rota 3, com revestimento interno e capacidade de transportar 18 MMm³/dia de gás. O gasoduto Lula/PMXL, 18 pol, sem revestimento interno, tem capacidade de transportar 10 MMm³/dia de gás.

O revestimento interno, quando especificado para um duto deve atender principalmente ao seguinte objetivo: proporcionar expressiva redução da rugosidade da superfície interna do tubo de aço de forma a proporcionar maior eficiência de fluxo do fluido. Além disso, o revestimento interno proposto deverá possuir características físicas suficientes para suportar e manter a integridade quando submetido às diversas solicitações durante a construção, transporte, instalação e operação do duto durante a sua vida útil. Importante ressaltar que o revestimento interno deve sempre ser projetado de forma também a viabilizar e atender às necessidades econômicas do projeto.

É importante destacar que o revestimento interno aqui proposto não tem a função de evitar a corrosão interna no duto. A corrosão interna de um duto deverá ser mitigada, em cada projeto específico, adotando-se técnicas de controle dos contaminantes do fluido transportado, ou pela utilização de inibidores de corrosão, ou pela adoção de sobre espessura de corrosão adequada, ou pelo uso de aços especiais, ou ainda com o uso de revestimentos internos projetados especificamente para este fim.

Histórico

A PETROBRAS vem utilizando revestimento interno com a função de reduzir atrito em dutos terrestres. Como exemplo, podemos citar o gasoduto Brasil/Bolívia onde a sua aplicação permitiu a redução do número de estações de compressão ao longo do trajeto do gasoduto.

No caso de gasodutos submarinos Rota 2 e Rota 3, este tipo de revestimento foi selecionado e será utilizado pela primeira vez. Este revestimento deverá apresentar propriedades de forma a atender às cargas as quais os dutos são submetidos durante a instalação e as condições operacionais durante a vida útil do projeto.

Desta forma, os dutos Rota 2 e Rota 3 serão os primeiros dutos submarinos da PETROBRAS que utilizarão revestimento interno como redutor de atrito, objetivando o aumento da eficiência de escoamento.

Características dos Dutos e Revestimentos

As Tabelas 1 e 2 apresentam as principais características dos gasodutos Rota 2 e Rota 3.

Tabela 1 – Características do gasoduto Rota 2		Tabela 2 – Características do gasoduto Rota 3	
Diâmetro	24 pol	Diâmetro	24 e 20 pol
Tipo de aço	DNV LSAW 450 SFDU	Tipo de aço	DNV LSAW 450 SFDU
Pressão de projeto	25 MPa	Pressão de projeto	25 MPa
Critério dimensionamento	Colapso e pressão Interna conforme LDA	Critério dimensionamento	Colapso e pressão interna conforme LDA
Espessura do aço tubo de 24 pol	De 28,57 a 36,53 mm conforme a LDA	Espessura do aço tubo de 24 pol de 20 pol	De 28,2 a 22,4 mm conforme a LDA De 29,2 mm a 27,1 mm conforme a LDA
Vida útil	30 anos	Vida útil	30 anos

As principais características do revestimento anticorrosivo externo e do revestimento interno utilizados nos gasodutos Rota 2 e Rota 3 são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características dos revestimentos externo e interno dos gasodutos Rota 2 e Rota 3	
Revestimento anticorrosivo externo	3LPP
Espessura do 3LPP	3,6 mm
Revestimento de lastro*	Concreto com 3040 kgf/cm ³ e espessuras conforme projeto
Revestimento interno	Epóxi líquido tipo Novolac
Espessura do revestimento interno	De 150 a 300 µm
Revestimento interno nas juntas de campo	Não utilizado

*: Definido conforme necessidade de estabilidade em baixas profundidades.

O revestimento externo anticorrosivo dos dutos Rota 2 e Rota 3 estão especificados de forma a atender a vida útil dos projetos. O revestimento está baseado no sistema 3LPP composto por uma camada de FBE, uma segunda camada de adesivo copolimérico e uma terceira camada de polipropileno com resistência a UV. Para as juntas de campo diversos sistemas foram especificados de forma a atender às diversas seções do duto tais como: i) HDD, ii) seção com

3LPP + concreto e iii) seção com 3LPP. Para a seção HDD o revestimento da junta de campo está especificado em FBE + manta termocontráctil + manta reforço. Para a seção com 3LPP + concreto está especificado o FBE dual layer + PU. Para a seção com 3LPP está especificado o FBE + manta termocontráctil. Tanto o revestimento do tubo como o revestimento das juntas de campo serão submetidos à qualificação de forma a verificar/confirmar as suas propriedades finais após aplicação.

Para o revestimento interno foi selecionado o epóxi líquido tipo Novolac devido à facilidade de aplicação, histórico de uso em outras aplicações, atendimento às necessidades de redução de rugosidade e custo acessível. Para o uso em dutos submersos, este revestimento interno pré-selecionado foi submetido à completa qualificação de forma a se verificar/confirmar as características e propriedades adequadas ao seu uso nesta aplicação específica.

Os produtos de diversos fornecedores atenderam às propriedades necessárias para o fornecimento do material para o revestimento interno dos dutos Rota 2 e Rota 3. Na Tabela 4 e na Tabela 5, são informadas as principais características obtidas de testes do material epóxi Novolac líquido, antes e após a sua aplicação, respectivamente.

Tabela 4 – Principais características do material epóxi Novolac líquido (antes da aplicação)

Sólidos por massa	84% (N-1367)
Sólidos por volume	76% (N-1358)
Massa específica	1,451 g/cm ³ (ASTM D-1475)
Tempo de secagem livre de pegajosidade	2 horas (ASTM D-1640)
Tempo de secagem à pressão	10 horas (ASTM D-1640)

Tabela 5 – Principais características do material epóxi Novolac líquido (após aplicação)

Célula Atlas 40°C, 2000h	Grau 10 de corrosão Grau 10 empolamento (ASTM C-868)
Abrasão CS-17, 1kg, 1000 ciclos	17,40 mg (ASTM D-4060)
Descolamento catódico	7,2 mm (ASTM G-8)
Aderência à tração	21,13 MPa (ASTM D-4541)
Resistência à H ₂ SO ₄ 40% 2000 h	Grau 10 de corrosão Grau 10 empolamento (ISO 2812-1)

Aplicação do Revestimento Interno

De forma a preservar as propriedades da tinta líquida tipo Novolac, foi definido que o revestimento interno seria aplicado após a aplicação do revestimento anticorrosivo externo de 3LPP, uma vez que para a aplicação do revestimento de 3LPP o tubo é aquecido a aproximadamente 220°C.

A tinta líquida é aplicada na superfície interna dos tubos por meio de lança com pistola *airless*. Este é um sistema onde se obtém melhor qualidade da tinta aplicada e consequentemente maior desempenho do esquema de pintura. A pistola *airless* não utiliza ar para atomização da tinta, mas sim uma bomba que pressuriza o líquido contra o bico e esta energia provoca a pulverização da tinta. As pressões devem ser reguladas, mas podem atingir cerca de 30 MPa. A pistola *airless* tem capacidade de aplicar tintas com elevado teor de sólidos sem a necessidade de diluição obtendo-se altas espessuras, alto rendimento e baixas perdas. No caso da aplicação nos tubos do gasoduto Rota 2 e Rota 3, optou-se por pequena diluição da tinta de forma a obter uma camada superficial contínua, uniforme e sem defeitos superficiais.

A seguinte sequência de atividades foi especificada e qualificada para o projeto Rota 2:

- Recebimento do tubo, limpeza e inspeção interna de forma a garantir a ausência de sujeira, contaminantes, óleos, graxas, etc...;
- Verificação da temperatura interna do tubo;
- Aplicação do jato abrasivo na superfície interna do tubo de forma a obter o grau de limpeza mínimo padrão SA2½;
- Limpeza da superfície interna do tubo com ar seco e limpo;
- Preparação e verificação dos parâmetros da tinta e aplicação por lança rígida em toda a superfície interna do tubo que apresenta movimento rotacional enquanto a lança se desloca axialmente dentro do tubo. Apenas uma demão foi aplicada para a obtenção da espessura definida;
- Inspeção visual de toda a superfície interna do tubo e registrada a medida da espessura de película úmida.
- Uma vez o tubo aprovado, este tem suas extremidades tamponadas com invólucro de polietileno com orifício para a secagem da tinta.
- O tubo permanece no pátio para cura completa do revestimento interno tipo Novolac, durante sete (7) dias, quando então serão aplicados os testes finais de controle de qualidade da aplicação.

A Figura 2 apresenta o processo de aplicação da tinta no interior do tubo. A Figura 3 apresenta a superfície interna do tubo após aplicação da tinta, sem apresentar superfície escamada ou qualquer tipo de defeito.



Figura 2 – Tinta sendo aplicada no interior do tubo.

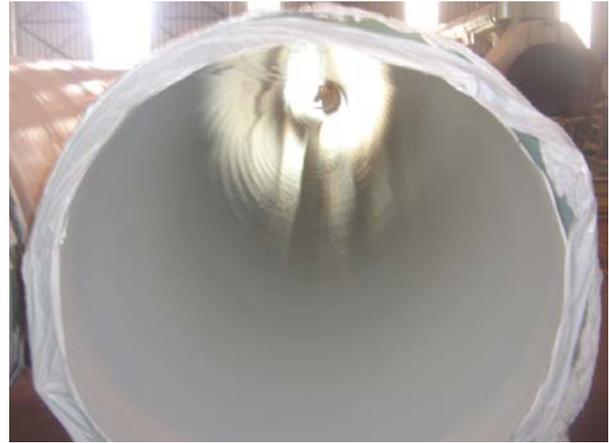


Figura 3 – Tubo com revestimento interno logo após aplicação.

Qualificação do Revestimento Interno

Objetivando garantir a qualidade dos revestimentos aplicado nos tubos, para as condições operacionais ao longo da vida útil do projeto e para as condições de instalação, todo o sistema de revestimento foi submetido a testes de pré-qualificação antes da sua efetiva especificação para aplicação 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 revestimento interno para os tubos do projeto Rota 2 foi desenvolvida em 3 fases.

Primeira fase da pré-qualificação. Nesta etapa da pré-qualificação foram desenvolvidos os documentos técnicos. Foram elaborados e aprovados os seguintes documentos: especificação técnica I-ET-0000.00-6500-217-PPR-019 [3] para o revestimento interno do tipo *flow coating*; procedimentos de aplicação para o revestimento nos tubos e plano de inspeção e testes (ITP). Todos os documentos foram analisados e discutidos extensivamente e uma vez acordados iniciou-se a segunda fase de aplicação com a execução dos testes de pré-qualificação. Nesta fase, usualmente são qualificadas as matérias primas, que para os projetos Rota 2 e Rota 3, a prévia qualificação já executada na PETROBRAS foi considerada.

Segunda fase da pré-qualificação. Nesta etapa da pré-qualificação o revestimento é aplicado nos tubos e são 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 interno foi aplicado em 10 tubos, conforme procedimentos aprovados, e os testes foram executados pelas empresas aplicadoras do revestimento. Alguns testes executados durante esta etapa de pré-qualificação são listados abaixo:

- Verificação da qualidade da matéria prima. São verificados os certificados e a validade de cada produto fornecido e são executados dos testes de conformidade de acordo com o Plano de Inspeção e Testes (ITP) aplicável. Foram verificadas e controladas as condições de armazenagem e estocagem para cada produto que foi utilizado no revestimento.

- Verificação dos limites aceitáveis de contaminantes. São verificados nos tubos os limites aceitáveis de cloretos ($< 2\mu\text{g}/\text{cm}^2$) e limites de contaminantes nos abrasivos a serem utilizados, tais como óleo e impurezas.
- Verificação das condições ambientais. Monitoração contínua das condições de umidade do ambiente e da temperatura do tubo antes e durante o processo de aplicação dos revestimentos. A temperatura do tubo deverá ser $3\text{ }^\circ\text{C}$ superior ao ponto de orvalho local;
- Verificação de condições do tubo após o jato abrasivo. São executados testes visando garantir a rugosidade especificada para o aço após jato abrasivo. Foi utilizado o método *Press-o-Film*. Também pode ser utilizado o medidor de rugosidade eletrônico. A rugosidade (Rz) deve estar situada entre $60\text{ }\mu\text{m}$ e $100\text{ }\mu\text{m}$ conforme ISO 8501-1 [1]. Foi controlado o padrão para o jato abrasivo do tubo (Sa 2½) e a limpeza do aço após jato abrasivo em no máximo *rating 2*, conforme ISO 8502-3 [2].
- Verificação da espessura do revestimento interno. Controle e registro da espessura úmida do revestimento interno logo após a sua aplicação e após a cura. A espessura final após a cura deverá estar na faixa de 150 a $300\text{ }\mu\text{m}$ 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 interno aplicado. Para o controle da aderência do revestimento interno foram utilizados painéis de teste na dimensão de $100 \times 100 \times 0,81\text{ mm}$ posicionadas no interior dos tubos durante a aplicação. O teste é executado após a cura completa da tinta. Foram executados testes de *pull-off*, a $23\text{ }^\circ\text{C}$, conforme ASTM D-4541 [4], sendo adotado o critério de aceitação de 15 MPa . Objetivando acelerar o processo de cura, o painel após 2 horas de cura na temperatura ambiente foi inserido em forno durante 10 minutos a $70\text{ }^\circ\text{C}$ e em seguida foi inserido novamente em forno durante 30 minutos a $145\text{ }^\circ\text{C}$. Os resultados obtidos se situaram sempre acima de 18 MPa , tendo-se obtido resultados na faixa de 30 MPa .
- Verificação do grau de cura, resistência à imersão em água e decapagem (*stripping test*). Testes foram realizados conforme API RP 5L2 [5]. Para o teste de cura o painel foi inserido em solvente por 4 horas. Para o teste em água o painel foi inserido neste meio por 4 horas. Em ambos os testes o revestimento aplicado no painel não pode apresentar empolamento, amolecimento ou enrugamento. Para o teste de decapagem a tinta aplicada foi submetida a corte com lâmina posicionada a 60° e esta não podia ser removida do painel e ainda pequenas partículas possivelmente removidas deviam ser identificadas como pó. Todos os testes realizados foram aprovados. A Figura 4 apresenta os painéis após aplicação da tinta, aguardando o prazo para inserção no forno.
- Verificação da rugosidade interna dos tubos após aplicação e cura da tinta. Os testes foram realizados durante a fase de pré-qualificação e durante a fase de produção dos tubos. A rugosidade máxima admissível é de $7\text{ }\mu\text{m}$ (Rq). Foram obtidos valores de rugosidade entre $2,0$ e $3,5\text{ }\mu\text{m}$ (Rq).

- Verificação do descolamento catódico do revestimento interno aplicado. Foram realizados testes de descolamento catódico para verificação da capacidade do revestimento resistir à corrosão. Testes foram realizados durante 28 dias, -1,5V e 23°C. O valor obtido de descolamento devia ser inferior a 15 mm para o teste a 23°C. Os resultados obtidos para este teste se situaram no intervalo de 6,6 a 8,3 mm. Também foram realizados testes de descolamento catódico na temperatura de 65°C, porém este revestimento se mostrou inadequado para operação nesta temperatura.
- Verificação da capacidade de dobramento do revestimento interno. Foram executados testes de dobramento às temperaturas de 0°C e 23°C. O teste foi realizado conforme a norma canadense CAN/CSA Z-245-20 [6]. O teste a 23°C foi realizado com sucesso, porém este revestimento se mostrou inadequado para dobramento a 0°C.
- Verificação da resistência à abrasão do revestimento interno. Foram realizados testes de abrasão do revestimento aplicado em painéis que foram submetidos a 1000 ciclos/1000g/CS-17, conforme norma ASTM D-4060 [7]. A abrasão máxima foi especificada em 70 mg. Os resultados de abrasão obtidos estão situados entre os valores de 49 e 67 mg.



Figura 4 – Painéis aplicados aguardando cura para a realização de testes de controle de qualidade.



Figura 5 – Apparatus para o teste *stinger roller*.

Terceira fase da qualificação. Nesta etapa são realizados os testes funcionais aplicáveis ao sistema de revestimento interno, conforme definidos nas especificações técnicas. Estes testes objetivam garantir a adequabilidade do revestimento *flow coating* dos tubos, para suportar as condições de instalação e as condições operacionais. A seguir breve descrição dos testes realizados:

- Verificação da capacidade do revestimento interno resistir a cargas localizadas. Um tubo revestido internamente foi submetido às deformações causadas pela passagem do tubo sobre os roletes da rampa e do *stinger* da embarcação instaladora. Este teste é conhecido como *stinger roller test*. Ao tubo foi imposta uma carga de forma a simular a deformação imposta (até 0,4%) durante a passagem do duto sobre os roletes do *stinger* da balsa. Após o teste o revestimento interno não sofreu qualquer dano, defeito

ou trinca. A Figura 5 apresenta o *apparatus* desenvolvido para a execução do teste. O tubo testado estava revestido internamente com epóxi líquido e externamente com 3LPP conforme Figura 5.

- Verificação da capacidade do revestimento interno resistir à abrasão. Um tubo revestido internamente foi submetido a passagem dos *pigs* de limpeza utilizados durante as fases de instalação e operação do duto. Para este teste foram utilizados dois tubos com revestimento interno que foram submetidos a 100 corridas de dois tipos de *pigs*. Um *pig* de limpeza com escovas de aço e um *pig* de limpeza com escovas de nylon. A Figura 6 mostra o *pig* com escovas de aço e a Figura 7 o *pig* com escovas de nylon. Após as 100 corridas de cada *pig* foi constatado que o *pig* com escovas de nylon não impôs qualquer tipo de abrasão ou dano ao revestimento interno. Em contrapartida o *pig* com escovas de aço causou abrasão e impôs marcas e riscos ao revestimento interno que foram detectadas pela inspeção com *holiday detector*. Deve-se observar que o *pig* com escovas de aço impõe marcas ou sulcos ao revestimento interno já após a primeira corrida. Nota-se que os riscos no revestimento interno apresentam perdas localizadas de material não sendo observado qualquer tipo de arrancamento ou descolamento do revestimento. A Figura 8 apresenta estas marcas.



Figura 6 – *Pig* com escovas de aço.



Figura 7 – *Pig* com escovas de nylon.



Figura 8 – Marcas ou sulcos devido à passagem de *pig* raspador com escovas de aço.



Figura 9 – Tubo com colarinho interno.

- Verificação do comprimento do colarinho interno. O comprimento do colarinho interno dos tubos foram testados de forma a garantir que os mesmos não seriam danificados ou queimados durante as operações de soldagem dos tubos e aplicação do revestimento anticorrosivo na junta de campo. Para este teste foram utilizados tubos

com revestimento interno e externo. As extremidades dos tubos foram aquecidas à 240°C em 90 segundos e após aguardou-se o retorno à temperatura ambiente. Testes de aderência foram realizados no revestimento interno como forma de avaliar a sua integridade. Diversos comprimentos de colarinho interno foram testados. O comprimento de colarinho adotado foi de 240 mm de forma a se preservar o revestimento interno com certa segurança. A Figura 9 apresenta tubo com colarinho interno de 240 mm após o teste.

Conclusões

Os resultados dos testes de pré-qualificação a que foram submetidos os tubos com revestimento interno mostraram a adequabilidade do sistema de revestimento proposto para utilização como *flow coating* em dutos submarinos.

Testes em escala real se mostraram eficazes, como forma de determinar a adequabilidade do revestimento proposto, para as condições de instalação e operação dos dutos. No caso do projeto Rota 2 e Rota 3 o teste de abrasão permitiu se definir a inadequabilidade do uso de *pigs* com escovas de aço.

O revestimento interno conforme especificado em [3] apresentou resultados de pré-qualificação satisfatórios para aplicação e uso como *flow coating* em dutos submarinos.

Nomenclatura

FBE – *Fusion Bonded Epoxy*. Material epóxi em pó utilizado como anticorrosivo para dutos submarinos;

HDD – *Horizontal Directional Drilling*;

ITP – Plano de Inspeção e Testes;

J-Lay - Método J-lay de instalação de dutos;

LDA – Lâmina d'água. Distância entre a superfície do mar e o solo marinho;

PMXL-1 – Plataforma fixa de Mexilhão;

PU – Poliuretano;

S-Lay – Método S-lay de instalação de dutos;

TECAB – Terminal de Cabiúnas;

UEP – Unidade Estacionária de Produção;

UTGCA – Unidade de Tratamento de Gás de Caraguatatuba;

UV – Radiação ultra-violeta;

3LPP – Revestimento anticorrosivo externo com 3 camadas;

Agradecimentos

Os autores agradecem a PETROBRAS pela publicação desse trabalho.

Agradecemos ainda a participação das empresas SOCOTHERM BRASIL, BSR PIPELINE SERVICES, WEG, RENNER e SHERWIN WILLIAMS pelo desenvolvimento e pré-qualificação dessa nova tecnologia para revestimento interno de tubos.

Referências bibliográficas

- [1] ISO 8501-1 - **Preparation of steel substrates before application of paints and related products - Visual assessment of surface cleanliness.**
- [2] ISO 8502-3 - **Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Tests for the assessment of surface cleanliness.**
- [3] I-ET-0000.00-6500-217-PPR-019 – **Internal liquid epoxy flow coating.** Junho 2012
- [4] ASTM D-4541 - **Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers**
- [5] API RP 5L2 - **Recommended practice for internal coating of line pipe for non-corrosive gas transmission service**
- [6] CAN/CSA Z-245-20 – **External fusion bond epoxy coating for steel pipe**
- [7] ASTM D-4060 - **Standard test method for abrasion resistance of organic coatings by the taber abraser**