



## 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

### REPARO INTERNO “IN SITU” DE DUTOS POR REVESTIMENTOS EPOXÍDICOS.

Ricardo Vinícius B. Gomes<sup>1</sup>, Sérgio S. Camargo Jr.<sup>2</sup>

Universidade Federal do Rio de Janeiro, C. P. 68505, CEP 21975-970 Rio de Janeiro, RJ,

<sup>1</sup> rvbg@metalmat.ufrj.br, <sup>2</sup> camargo@metalmat.ufrj.br

**Resumo** – As propriedades mecânicas dos revestimentos epóxi bi-componente sem solvente são estudadas objetivando a aplicação interna “in situ” em dutos de escoamento submarino. Os revestimentos são aplicados sobre substratos de aço carbono que são submetidos a dois processos diferentes de tratamento superficiais SA 2 e ST 3, em que o grau inicial de corrosão da superfície do aço era B segundo a norma SIS 055900. São estudados o efeito da preparação superficial nas propriedades de desgaste, adesão e impacto do revestimento. O módulo de Young (E) e o módulo de elasticidade transversal (G) foram determinados por ensaio de ultrassom. O mecanismo de desgaste caracterizou-se por ser adesivo e abrasivo. No entanto, o desgaste abrasivo ocorreu preferencialmente em relação ao adesivo. Concluiu-se que a taxa de desgaste da tinta epóxi sem solvente sofre pouca influência do tipo de tratamento superficial empregado. A falha de adesão ocorre por diferentes mecanismos e que são fortemente dependentes da preparação da superfície. A falha de impacto revelou que a preparação da superfície, a espessura do revestimento e a natureza da tinta são os parâmetros mais importantes na avaliação do desempenho dessas tintas sob cargas de impacto.

Palavras chave: Epóxi; recobrimento; dutos de escoamento submarino.

**Abstract** – Mechanical properties of epoxy solvent-free bi-component coatings suitable for “in situ” application in deep-sea pipelines were studied. Coatings are applied on carbon steel substrates submitted to two different surface preparation procedures SA2 and ST3 with initial corrosion grade B according to SIS 055900 standard. The effect surface treatment on coating wear, adhesion and impact were evaluated. The wear mechanisms were both abrasive and adhesive. However abrasive wear prevailed over the adhesive mechanism. These tests lead to the conclusion that wear rate does not depend on surface preparation. The adhesive failures by different mechanisms were observed and mostly influenced by surface preparation. The impact tests showed that surface preparation, coating thickness and type of paint are crucial parameters on the performance of coatings under impact loads. The Young’s modulus (E) and shear modulus (G) of the coating material were also measured by ultrasonic tests.

Keywords: Epoxy, coatings, deep-sea pipelines.

## 1. Introdução

Dutos de escoamento de petróleo apresentam sérios problemas de corrosão interna e acumulação de depósitos orgânicos e inorgânicos. O processo corrosivo leva a grandes perdas de espessura da tubulação, o que compromete a integridade estrutural da linha. O comprometimento estrutural dos dutos defeituosos é ainda maior quando estamos lidando com tubulações submarinas, pois estas estão submetidas a carregamentos de pressão interna e externa.

A pressão de colapso hidrostático ( $P_c$ ) é a pressão externa máxima que um elemento tubular sem defeito pode suportar sem colapsar. No entanto, com a redução da resistência do tubo devido aos defeitos a pressão deixa de ser a pressão de colapso hidrostático e passa a ser a pressão de iniciação ( $P_i$ ), que é a pressão que uma tubulação defeituosa pode suportar sem colapsar. Uma vez iniciado o colapso, a pressão atuante ( $P_i$ ) é reduzida e denomina-se pressão de colapso propagante ( $P_p$ ). Esta última é fortemente influenciada pelos defeitos e à medida que a linha se encontra mais defeituosa maior será a velocidade de propagação do colapso.

A perda de carga ao longo da linha é também um problema crítico para dutos de escoamento de óleo e gás. A deposição de compostos orgânicos, principalmente devido ao fenômeno de parafinação, inorgânicos e o alto atrito entre o material transportado e as paredes dos dutos levam a utilizações de altas pressões de bombeamento e a paradas periódicas da linha para limpeza. A utilização de revestimentos internos em tubos reduz consideravelmente a rugosidade da superfície interna, o que gera benefícios de redução de atrito e formação de depósitos.

Singh e Samdal (1998) indicaram que para um tubo comercial uma redução de 90% na rugosidade da superfície pode ser obtida reduzindo-se a fricção em 33%. O fator máximo de transmissão é de 22%. Uma redução de 33% do fator de fricção resultará numa redução de 8% no diâmetro em sistemas de gás e líquido. Na prática o aumento de vazão fica em torno de 5 a 10% tendo se observado um aumento de 25% em tubos de pequenos diâmetros. A redução do coeficiente de atrito é maior para os tubos de menor diâmetro e maiores números de Reynolds. Para sistemas líquidos a vantagem econômica da redução de atrito é maior para os tubos de menor diâmetro, enquanto que para gases os benefícios são maiores para os dutos de maiores diâmetros. Para as condições apresentadas os benefícios são maiores no caso de gases do que de líquidos. A análise econômica mostrou que em ambos os casos, gases e líquidos, os custos com o recobrimento interno dos dutos se justifica pela redução nos custos de operação.

A utilização de revestimentos internos em dutos ainda é incipiente no Brasil embora em outros países como Canadá e Estados Unidos seja rotineiramente utilizado. A primeira experiência brasileira foi a utilização de pintura interna em alguns trechos do gasoduto Brasil-Bolívia, sendo que a pintura ocorreu em dutos novos, ou seja, na fábrica.

A tecnologia de recuperação de dutos em operação nunca foi utilizada no Brasil devido ao alto custo envolvido, embora este seja muito inferior ao envolvido na construção de uma nova linha. Sendo assim, é importante que antes da aplicação da tecnologia de recuperação de dutos existentes é essencial que seja realizada uma avaliação da eficiência do processo em si, bem como os materiais a serem empregados e as condições de operações utilizadas. O sucesso de tal empreitada depende do nível de limpeza e recuperação da superfície, do material a ser empregado e do esquema de pintura.

O desempenho de um recobrimento depende das propriedades mecânicas do revestimento, bem como da integridade do conjunto recobrimento-substrato. A característica preponderante que o processo de revestimento deve atender é a cobertura de qualquer irregularidade da superfície conferindo assim a completa proteção do substrato. A aderência entre o recobrimento e o substrato é a principal propriedade que um filme protetor deve ter. Sendo assim, garantido uma boa adesão a função de proteção está praticamente assegurada.

## 2. Caracterização do revestimento

### 2.1. Técnicas experimentais

A tinta utilizada trata-se de uma resina epóxi bi-componente livre solvente. Este recobrimento foi aplicado por meio de rolo sobre placas de aço carbono cujas superfícies foram previamente preparadas segundo os padrões de lixamento mecânico ST3 e jateamento abrasivo a seco SA2 com grau inicial de corrosão B, da norma SIS 055900 com superfície seca. As espessuras dos recobrimentos foram determinadas por um equipamento Fischerscope, módulo de indução magnética. A adesão dos revestimentos ao substrato foi medida pelo teste de aderência a tração *pull-of test*, segundo a norma ASTM D-4541 apêndice 2, utilizando um equipamento tipo Patti da Elcometer. Os testes de impacto foram feitos em um equipamento montado segundo a norma API RP 5L7 apêndice 14. Os testes de desgaste foram realizados segundo a norma API RP 5L7 apêndice 8, utilizando-se abrasivos CS 10 de gradação *mild* e carga de 1Kg. A cada 300 ciclos realizou-se inspeção por microscopia ótica com o objetivo de observar o mecanismo de desgaste.

### 2.2. Espessura

A tabela 1 mostra os valores obtidos para as espessuras dos revestimentos. Esta grande dispersão de valores está associada ao método de pintura e a condição inicial da superfície. No entanto esta falta de uniformidade aproxima a nossa metodologia do processo de aplicação *in situ*, pois o controle da espessura em processos de recuperação onde o substrato está sujeito a alterações de superfície como depressões e *pits* não garantem uniformidade.

Amostra	Espessura
ST31	150
ST32	250
SA22	350
SA21	450

Tabela 1: Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova utilizados neste trabalho.

### 2.3. Adesão

O objetivo principal de qualquer recobrimento é a proteção total do substrato. Sendo assim é necessário que o conjunto revestimento-substrato seja solidário e se mantenha íntegro durante toda a vida útil do sistema. Desta forma a aderência da tinta ao aço é de fundamental importância e precede qualquer outra caracterização. A preparação da superfície é o principal parâmetro de adesão e, portanto, a obtenção de condições próximas ao padrão SA2 é altamente desejável para maximizar a aderência. No entanto, sabemos que este nível de limpeza, SA2, nem sempre é possível de ser obtido, em particular em aplicações *in situ* onde os dutos já se encontram em operação há muitos anos. Logo os resultados de adesão sobre substratos preparados em condições inferiores, como no caso o padrão ST3, são fundamentais para avaliar o desempenho da tinta em uma situação menos favorável e mais realista.

Os valores médios de adesão para as tintas aplicadas sobre superfície de padrão SA2 foi de 7,365 MPa e para aplicadas sobre superfície ST3 foi de 7,212 MPa. Após a realização dos testes, a região de falha foi analisada por meio de uma lupa estereoscópica da Nikon e as regiões inspecionadas estão na figura 1. Observou-se que no caso das tintas aplicadas sobre substratos SA2 a falha ocorria no adesivo. Sendo assim os valores de adesividade obtidos para estas amostras indicam o limite de resolução do equipamento, ou seja, o valor determina a energia de adesão entre o pino e o adesivo e não entre o revestimento e o substrato. Sendo assim, a energia de adesão entre o recobrimento e o substrato é superior ao valor obtido de 7,365 MPa.

No caso das amostras ST3, os valores de adesão são aproximadamente os mesmos das amostras SA2. No entanto, estas apresentaram um mecanismo de falha totalmente adesiva em 100% da área ensaiada como mostra a figura 1. É importante ressaltar que o acabamento superficial ST3 representa uma condição bastante desfavorável para a aplicação de tintas epóxis *in situ*, pois o nível de limpeza superficial obtido com o tratamento ST3 é bem inferior ao obtido no processo *in situ*.

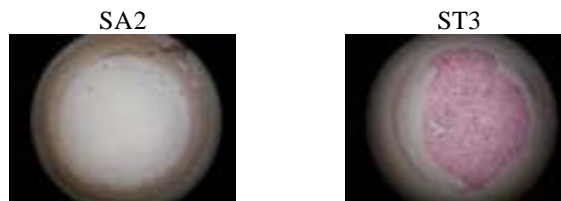


Figura 1: Imagens das regiões ensaiadas no ensaio de aderência

### 2.4. Desgaste

Os resultados obtidos para perda de massa nos ensaios de desgaste estão mostrados na figura 2. Na tabela 2 estão apresentados os valores obtidos para a taxa de desgaste. Estes dados estão discriminados de acordo com o tipo de tratamento de superfície empregado no substrato.

Tabela 2: Valores obtidos para o desgaste obtidos neste trabalho.

Tratamento superficial	Taxa de desgaste (mg/100ciclos)
ST3	10,03
SA2	8,6

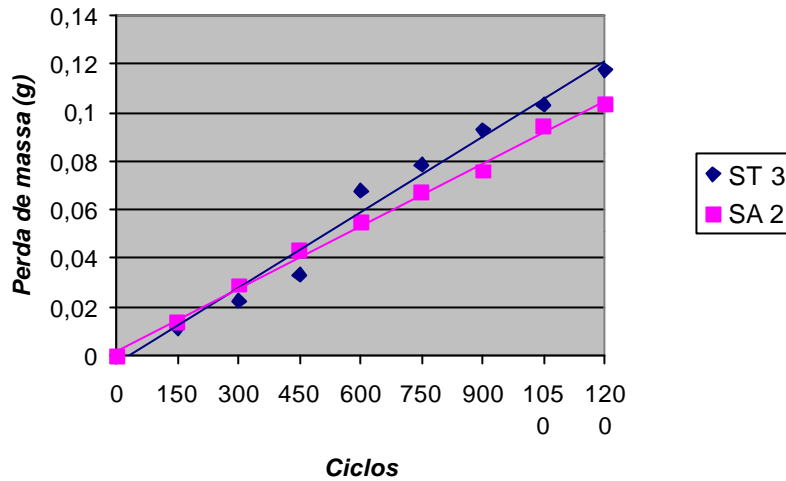


Figura 2: Resultados obtidos para taxa de desgaste.

Podemos observar da tabela 2 que a taxa de desgaste da amostra SA2 é um pouco menor do que a amostra ST3. Esta observação parece ser coerente com os resultados de aderência acima, pois aderência do recobrimento ao substrato no caso das amostras SA2 é maior que no caso das amostras ST3. As micrografias das superfícies desgastadas estão apresentadas nas figura 3.

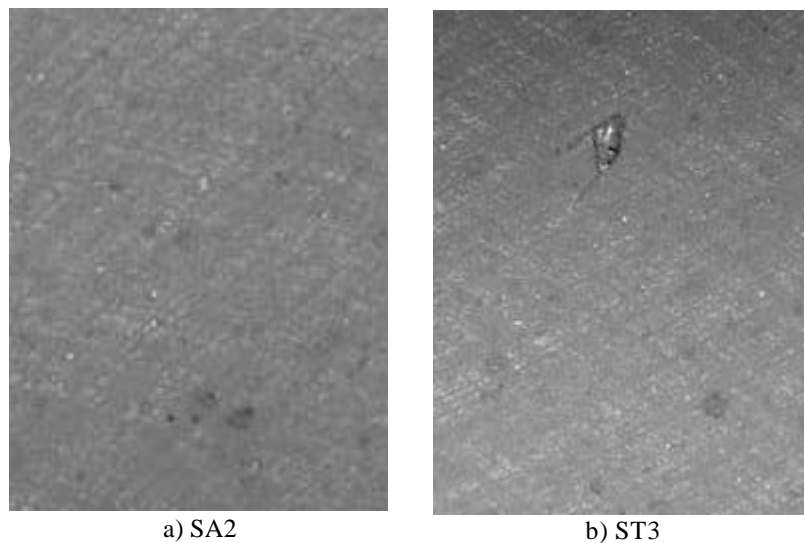


Figura 3: Micrografias da superfície de desgaste com aumentos de 50X.

As micrografias nos permitem afirmar que a tinta sobre ambos os substratos apresentam desgaste abrasivo, caracterizado pelos riscos diagonais. Todavia as amostras ST3 apresentaram também um desgaste tipicamente adesivo, caracterizado pelo arrancamento da tinta e exposição do substrato, e indicado pelo círculo vermelho na figura 3b.

## 2.5 Impacto

Cada amostra foi submetida a 10 testes de impacto com energia crescente, iniciando-se com 1 J até 10 J, em intervalos de 1J. As marcas resultantes foram inspecionadas por meio de uma lupa estereoscópica marca Nikon com o objetivo de avaliar o processo de deformação e/ou fratura dos recobrimentos, bem como a possível exposição do aço. Sendo assim, poderemos obter informações a respeito da resistência mecânica ao impacto do material utilizado com revestimento. De acordo com a norma API RP 5L7 a exposição do substrato não deve ocorrer para cargas inferiores a 1,7 J. A figura 4 mostra algumas marcas de impacto assim como os seus respectivos valores.

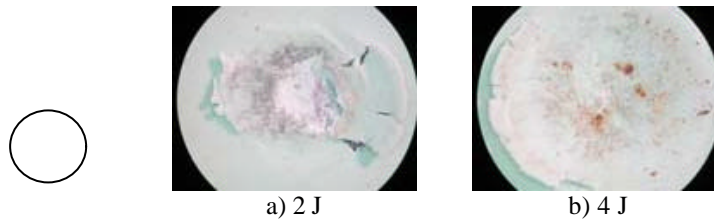


Figura 4: Marcas de impacto obtidas por uma lupa estereoscópica.

A inspeção estereoscópica das marcas de impacto revelou que estas tintas apresentam fraturas tipicamente frágeis, como se pode observar no canto esquerdo da figura 3a indicado pelo círculo. Este tipo de comportamento pode estar relacionado a um conjunto de fatores desfavoráveis tais como: espessura do recobrimento, tratamento superficial ST3, maior grau de fragilidade e maior energia de impacto. No entanto este tipo de recobrimento apresentou uma resistência ao impacto, dentro da faixa permitida, pois a carga de exposição do substrato foi de 2 J.

## 2.6. Ensaio de ultrassom

O ensaio de ultrassom tem por objetivo determinar o módulo de elasticidade longitudinal,  $E$ , o módulo de elasticidade transversal,  $G$ , e o coeficiente de *Poisson*,  $\nu$ , da resina epóxi. Os corpos de prova utilizadas são em forma de disco conforme está ilustrado na figura 5. A tabela 3 mostra os valores de espessura e diâmetro das diferentes amostras. A massa de cada corpo de prova foi medido em uma balança digital afim de determinar a densidade média da resina. Os respectivos valores da densidade encontram-se na tabela 3. Este ensaio consiste na emissão de ondas com frequências em torno de 2MHz por meio de transdutores. A onda quando se propaga causa perturbações nas direções longitudinais e transversais em relação ao eixo que passa pelo transdutor e é captada pelos transdutores longitudinais e transversais respectivamente, como pode ser visto na figura 5. Neste trabalho usamos os transdutores longitudinais do tipo G5KB 2 MHz com diâmetro de 10 mm e transversais do tipo MB4Y 2 MHz com diâmetro de 10 mm. Um osciloscópio acoplado aos transdutores foi utilizado medindo o tempo no qual a onda percorria duas vezes a espessura da amostra e assim pela divisão de duas vezes a espessura da amostra pelo tempo medido foi determinada as velocidades longitudinais e transversais. As equações 1,2 e 3 foram utilizadas para o cálculo das grandezas  $E$ ,  $G$  e  $\nu$ .

$$\nu = \frac{1 - 2\left(\frac{v_t}{v_l}\right)^2}{2 - 2\left(\frac{v_t}{v_l}\right)^2} \quad (1)$$

Onde  $v_t$  e  $v_l$  são as velocidades transversais e longitudinais respectivamente.

$$v_l = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho_M}\right) \left(\frac{1-\nu}{[(1+\nu)(1-\nu)]}\right)} \quad (2)$$

Onde  $\rho_M$  é a densidade do material, ou seja, da resina epóxi.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

Tabela 3: Valores obtidos para as dimensões dos corpos de prova, para a massa e para as respectivas densidades.

Amostra	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Massa (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
31102	0,57	2,68	3,5	1,2
31103	0,55	2,68	3,5	1,3
31104	0,55	2,69	3,6	1,2

A tabela 4 mostra os dados obtidos para o ensaio de ultrassom, onde usou-se uma densidade de 1,25 g/cm<sup>3</sup>. Deve-se notar que há uma pequena dispersão dos dados de  $v_l$  e  $v_t$ . Este fato ocorre devido a estrutura interna dos corpos de prova, pois trata-se de um material com certa porosidade.

Tabela 4: Valores obtidos para o ensaio de ultrassom realizados neste trabalho.

Amostra	$v_l$ (m/s)	$v_t$ (m/s)	$\nu$	E (GPa)	G (GPa)
31102	2591	1048	0,4	3,9	1,4
31103	2311	1018	0,4	3,6	1,3
31104	2183	982	0,4	3,3	1,2
Média	2361	1016	0,4	3,6	1,3

### 3. Conclusões

A tinta apresentou valores altos de aderência para ambos os tratamentos superficiais. A falha no adesivo para os recobrimentos sobre substratos SA2 mostraram que o estado da superfície é uma característica importante para o sucesso do revestimento. O mecanismo de falha nas amostras ST3, falha adesiva com exposição total do substrato, é totalmente indesejado, mesmo que o valor de aderência seja alto. No entanto este tipo de falha adesiva em 100% da área ensaiada nas amostras ST3 não era esperado no caso de tintas sem solvente e uma análise mais detalhada será realizada.

Os testes de desgaste mostraram que o tratamento superficial influencia também na taxa de desgaste do material. Foram identificados mecanismos de desgaste abrasivo e adesivo para ambas as amostras, SA2 e ST3, sendo o desgaste abrasivo o mecanismo predominante. No entanto, as micrografias das amostras ST3 revelaram pontos de arrancamento entre o recobrimento e o substrato cuja qual acreditamos que seja um dos fatores responsáveis pela diferença entre as taxas de desgaste. O ensaio de ultrassom mostrou que uma grande dispersão dos dados para o módulo de *Young*, E, e para o módulo de cisalhamento, G. Este fato deve-se a grande dispersão dos valores obtidos para as velocidades transversais e longitudinais. Teste adicionais de ultrassom serão realizados objetivando chegar a valores mais consistentes para os módulos de elasticidade transversal e longitudinal.

Como próximas etapas deste trabalho, serão realizados, a modelagem matemática para tubos de paredes compostas, aço + revestimento, considerando um estado plano de deformação e a aderência perfeita entre as camadas do duto, ensaio de tração segundo a norma ASTM D-638 e ensaio de compressão segundo a norma ASTM D-695.

### 4. Agradecimentos

Os autores agradecem à ANP e ao CNPq pelo apoio financeiro e ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais de UFRJ.

### 5. Referências

- SINGH, G. & SAMDAL, O.R. – *Internal coating justified by operation costs*, *Oil and Gas Journal*, pp. 50-55, abril, 1988.
- FERREIRA, M.; CAMARGO Jr., S.S.; BARBOSA, B.R.M.; GOMES, R.V.B.; LACHETERMACHER, M. G.; QUINTELA, J. – Propriedades mecânicas de epóxis utilizadas no recobrimento interno de oleodutos e gasodutos, *Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 12, n. 3, Jul/Set 2002, p. 180-187.
- MOORE, P.O.; MCINTIRE, P. – *Nondestructive testing handbook*, v. 9, Segunda edição, 1995, American Society for Nondestructive Testing., R. S. H. *Chemical processes structures and information flows*, Butterworth Publishers, 1990.
- FERREIRA, M.; CAMARGO Jr., S.S.; BARBOSA, B.R.M.; GOMES, R.V.B.; LACHETERMACHER, M. G.; QUINTELA, J. – Propriedades mecânicas de epoxís utilizadas no recobrimento interno de oleodutos e gasodutos, *Anais do 3º Seminário Brasileiro de Dutos*, Rio de Janeiro, 2001.
- DOWSON, D.; HOLMBERG, K.; MATTHEWS, A. – *Coatings tribology – Properties, techniques and applications in Surface Engineering*, Elsevier, 1997.