

---

Copyright 2018, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2018, em São Paulo, no mês de maio de 2018.

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

## **Revestimentos Elastoméricos para Reabilitação de Dutos**

Erik B. Nunes<sup>a</sup>, Jeferson L. Oliveira<sup>b</sup>

### **Abstract**

---

As the pipelines reach their service life, there is a growing concern about its integrity and maintenance as corrosion problems can arise. The fact is that there is a growing demand for pipeline rehabilitation. To this end, several anti-corrosion technologies that assist in the maintenance of the pipeline system have been used in the oil & gas industry. Buried pipelines that have coating damage or disbondment and that there is a need for rehabilitation, the degraded coating is removed and then a new coating system is applied to provide pipeline protection, leading to operate safely and extending its service life. Different types of coatings usually have been adopted, such as: polymeric tapes, tapes based on petrolatum or microcrystalline wax, heat shrinkable sleeves and epoxy. Among these systems, there is a difference in the requirements of surface preparation, application, productivity, performance and cost. Some other coatings, such as polyurethane elastomers and polyurea have been applied to pipelines. This paper aims to evaluate the properties of elastomeric coatings (polyurethane and polyurea) and present the technical advantages of this technology for the application in buried pipelines.

**Keywords:** corrosion, coating, polyurethane, polyurea, pipeline, rehabilitation.

### **Resumo**

---

A medida que os dutos cheguem ao seu tempo de vida útil, há uma preocupação cada vez maior quanto a sua integridade e manutenção, pois podem surgir problemas de corrosão. O fato é que existe uma crescente demanda para reabilitação dos dutos. Para este fim, diversas tecnologias de prevenção à corrosão que auxiliam na manutenção do sistema dutoviário têm sido utilizadas na indústria de óleo e gás. Dutos enterrados que apresentam danos ou descolamento do revestimento e onde há a necessidade de reabilitação, o revestimento degradado é removido e um novo sistema de revestimento é aplicado, provendo proteção ao duto, levando a operar com segurança e estendendo a sua vida útil. Diferentes tipos de revestimentos têm sido usualmente adotados, tais como: fitas poliméricas, fitas a base de petrolato ou cera microcristalina, mantas termocontráteis e epóxi. Dentre estes sistemas há uma diferença quanto aos requisitos de preparo de superfície, aplicação, produtividade, desempenho e custo. Outros revestimentos, tais como os elastoméricos de poliuretano e poliureia têm sido aplicados em tubulação e dutos. Este trabalho tem por objetivo avaliar as

---

<sup>a</sup> Engenheiro de Equipamentos - PETROBRAS

<sup>b</sup> Químico de Petróleo – PETROBRAS

propriedades de revestimentos elastoméricos (poliuretano e poliureia) e apresentar as vantagens técnicas desta tecnologia para a aplicação em dutos enterrados.

**Palavras-chave:** corrosão, revestimento, poliuretano, poliureia, dutos, reabilitação.

---

## 1. Introdução

Poliureias e poliuretanos são polímeros que podem ser usados como revestimentos tanto sobre concreto como sobre superfície metálica. Trata-se de uma tecnologia que produz um material polimérico a partir da reação de dois componentes, com cura rápida, que pode ser aplicado como revestimento e, em alguns casos, com a função impermeabilizante. Revestimentos 100% base poliureia são obtidos quimicamente pela reação de poliadição de um poliisocianato e uma poliamina, enquanto os revestimentos 100% poliuretanos elastoméricos são produzidos a partir de um poliisocianato e um polioli. No Brasil, na indústria de óleo e gás, pouco se sabe sobre o uso dessa tecnologia para revestimento externo de dutos ou mesmo para o revestimento de juntas de campo. As propriedades desses revestimentos envolvem cura rápida, baixa permeabilidade e propriedades mecânicas, além da possibilidade de ser usado em campo, que são de interesse da indústria e poderiam ser usados como alternativa para reabilitação de dutos e proteção de juntas de campo.

Atualmente os revestimentos externos utilizados para dutos enterrados na PETROBRAS são de polietileno ou polipropileno tripla camada (3LPE ou 3LPP) que conferem propriedades tais como aderência, resistência ao descolamento catódico, dureza, resistência à tração, resistência à abrasão, resistência ao impacto e flexibilidade. Essas propriedades atendem à demanda de construção e montagem de dutos, bem como sua operação. No entanto, o revestimento polietileno tripla camada só pode ser aplicado em fábrica e, por essa razão, há no cenário de campo, espaço para novas tecnologias que se enquadrem para reabilitação de dutos.

Atualmente, a PETROBRAS especifica mantas termocontráteis para juntas soldadas de tubos revestidos em 3LPE e 3LPP. É importante que o revestimento a ser aplicado tenha compatibilidade com o revestimento aplicado em fábrica. Atualmente, há no mercado poucos fornecedores de mantas termocontráteis de maneira que há demanda para novos materiais que podem ser utilizados como alternativa para essa aplicação.

Assim, esse trabalho tem como objetivo avaliar alguns poliuretanos e poliureias quanto ao seu desempenho de forma que essa tecnologia possa ser aplicada como solução alternativa no cenário de dutos enterrados.

## 2. Metodologia

As normas de referência para os ensaios de desempenho nas formulações de poliureia e poliuretano deste trabalho foram a EN 10290 e ABNT NBR 16545 que tratam de poliuretano e poliureia, respectivamente (Tabela 1).

**Tabela 1. Comparação entre diferentes critérios e normas**

<b>Propriedades Ensaçadas</b>	<b>EN 10290</b>	<b>ABNT NBR 16545</b>
<b>Aderência <i>Pull-off</i></b>	≥ 7 MPa	≥ 10 MPa (ASTM D4541)
<b>Descolamento catódico (raio)</b>	≤ 8 mm	N/E
<b>Abrasão</b>	N/E	< 50 mg (ASTM D4060)
<b>Dureza</b>	C/F	≥ 75A ou 40D (ASTM D2240)
<b>Resistência ao impacto</b>	≥ 10 J	N/E
<b>Absorção de água</b>	N/E	≤ 10 % (ASTM D471)
<b>Resistência à tração</b>	N/E	≥ 10 MPa (ASTM D638)
<b>Alongamento</b>	≥ 10 %	≥ 100 % (ASTM D638)
<b>Resistência ao rasgamento</b>	N/E	≥ 35 kN/m (ASTM D624)

Os ensaios executados em laboratório tiveram por principal objetivo avaliar o desempenho dos revestimentos em cenários similares às condições de campo. Os resultados do presente trabalho servem para comparar as propriedades de cada produto que atenda aos requisitos de desempenho exigidos pela PETROBRAS.

Para o presente trabalho foram testados 9 produtos (4 poliureias e 5 poliuretanos) de 5 fornecedores distintos. A Tabela 2 relaciona os produtos e suas características.

**Tabela 2. Relação de produtos testados**

<b>Produto</b>	<b>Polímero</b>	<b>Fabricante</b>
<b>PUA-1</b>	Poliureia	A
<b>PUR-1</b>	Poliuretano	A
<b>PUA-2</b>	Poliureia	B
<b>PUA-3</b>	Poliureia	B
<b>PUA-4</b>	Poliureia	C
<b>PUR-2</b>	Poliuretano	D
<b>PUR-3</b>	Poliuretano	D
<b>PUR-4</b>	Poliuretano	E
<b>PUR-5</b>	Poliuretano	E

Os corpos de prova para os testes de laboratório foram preparados pela aplicação dos polímeros sobre painéis de aço, com o intuito de avaliar o desempenho do sistema metal/polímero e pela preparação de filme livre, para ensaios com o polímero livre.

Todos os corpos de prova foram preparados pelos fornecedores em suas instalações, com equipamentos adequados e mão-de-obra especializada. A aplicação foi feita com os painéis de aço na posição horizontal em condições de temperatura e umidade relativa controladas. As dimensões dos painéis de aço foram variadas para atender os requisitos das normas utilizadas para os ensaios.

Foram usados dois tratamentos de superfície sobre painéis de aço AISI 1020: Sa3, que é o jateamento abrasivo ao metal branco e St3 que é com tratamento mecânico. Antes da execução do jateamento abrasivo, os painéis estavam com sua carepa de laminação original, ilustrado na Figura 1. Antes da execução do tratamento St3, os painéis apresentaram grau de enferrujamento C, onde a carepa de laminação foi eliminada por meio da corrosão.



**Figura 1. Painéis de aço de 200 x 300 x 4 mm jateadas ao metal branco e painéis com grau de enferrujamento C**

A norma europeia, EN 10290 é um compêndio de normas para ensaios de desempenho para revestimento externo de poliuretano e poliuretano modificado aplicados como proteção anticorrosiva. A norma brasileira ABNT NBR 16545 é atualmente aplicada para revestimentos poliureia. A partir daí foram selecionados os seguintes ensaios: aderência *pull-off*; descolamento catódico; abrasão; dureza; resistência ao impacto; absorção de água; dobramento; resistência à tração e alongamento na ruptura; resistência ao rasgamento.

O teste de aderência *pull-off* referente às normas EN 24624 e ASTM D4541 foi executado em quatro condições:

- a. após cura total do revestimento;
- b. após envelhecimento térmico em estufa a 80 °C por 100 dias;
- c. após imersão em água industrial a 40 °C por 2000 horas; e
- d. após imersão em água industrial a 60 °C por 100 horas.

Os testes foram feitos em painéis de aço carbono, de acordo com a recomendação das normas. Para cada condição foram preparados corpos de prova a partir de painéis com tratamento de superfície Sa3 e St3. O equipamento usado para os testes foi o *Type IV adhesion test* com pistão F-8.

O teste de descolamento ou delaminação catódica, de acordo com as normas ASTM G8 e G42, é um procedimento acelerado para comparar as características de sistemas de revestimentos aplicados a tubos de aço que podem ou não receber proteção catódica. Ele tem por fim verificar a tendência do revestimento ao descolamento durante a polarização catódica do aço. A condição de teste foi de imersão na solução salina na temperatura ambiente,  $(23 \pm 2)$  °C, durante 28 dias. O descolamento catódico foi determinado pelo diâmetro a partir do defeito artificial até extremidade da área do revestimento removido facilmente. Os testes

foram feitos em três corpos de prova com dimensões 100 mm x 150 mm x 4 mm. Foram preparados corpos de prova a partir de painéis com tratamento de superfície Sa3 e St3. O eletrodo utilizado como referência foi o de prata/cloreto de prata (Ag/AgCl), como auxiliar foi o de platina (Pt) e como de trabalho foi o aço exposto pelo dano do corpo de prova revestido.

O teste de resistência à abrasão pelo equipamento “Taber Abraser”, de acordo com a norma ASTM D4060, se aplica a revestimentos orgânicos aplicados a uma superfície plana e rígida, como um painel metálico, por exemplo. Três corpos de prova de cada produto foram preparados sobre painéis de aço carbono nas dimensões de 100 mm x 100 mm x 2 mm. A perda de massa por abrasão após 1000 ciclos com o uso de rebolos N° CS-17 foi determinada com precisão de 0,1 mg por meio de balança analítica.

O teste de dureza, de acordo com a norma ISO 868 determina a resistência por penetração por meio de durômetros de dois tipos: tipo A é usado para materiais mais macios (elastoméricos) e tipo D para materiais rígidos. O método permite a medição tanto da dureza inicial quanto da dureza após um período de tempo específico. Os durômetros e os métodos especificados na norma são denominados tipo “Shore A” e tipo “Shore D”. Os corpos de prova foram feitos pela sobreposição de revestimento livre com espessura mínima de 4 mm. A temperatura foi de  $(23 \pm 2)$  °C e a umidade relativa do ar de 75%.

O teste de resistência ao impacto, de acordo com a norma ASTM D2794, consiste na avaliação da deformação instantânea de um filme polimérico aplicado sobre um substrato causada pela queda livre de um indentador de massa predeterminada. A energia de impacto mínima, em *Joules*, deve corresponder a  $5 J \times k$  por milímetro de espessura do revestimento a  $(23 \pm 2)$  °C. O valor de  $k$  é 1,00 porque o corpo de prova é plano. O equipamento usado foi o testador de impacto que possui um punção de aço com extremidade hemisférica para o contato com o revestimento. O método de teste executado foi aquele em que um peso cai sobre o punção hemisférico que está apoiado sobre o painel metálico revestido. O corpo de prova é posicionado, o peso é erguido até a altura predeterminada e é liberado para causar o impacto, onde a deformação no corpo de prova pode ser observada. Ao fim, o corpo de prova é inspecionado por meio do “Holiday Detector”. O diâmetro do punção hemisférico é de 15,9 mm. Os corpos de prova foram preparados pela aplicação de 2000 µm de revestimento sobre painéis de 200 mm x 300 mm x 6 mm com tratamento de superfície Sa3.

O ensaio de absorção de água, realizado em acordo com a norma ASTM D570, visa determinar a taxa de absorção relativa de água nos materiais poliméricos. O procedimento escolhido inicialmente foi de 24 horas de imersão a  $(23 \pm 2)$  °C. Com o objetivo de tornar o ensaio mais representativo, foi usada água industrial ao invés de água destilada e para fins de comparação. O teste foi também realizado a  $(40 \pm 2)$  °C e a  $(60 \pm 2)$  °C. Os corpos de prova foram preparados a partir de revestimento livre, na forma circular com diâmetro de 50,8 mm e espessura de 3,2 mm. Foi feito previamente o lixamento das duas faces dos corpos de prova com lixa 400.

O teste de dobramento consiste em medir a flexibilidade do revestimento em painéis de testes preparados em laboratório, de acordo com a norma EN 10290. O equipamento consiste em máquina de dobramento com os mandris apropriados. O revestimento foi aplicado sobre painéis de aço de 50 mm x 300 mm x 6 mm e curado adequadamente. Após o dobramento,

espera-se que o revestimento não quebre, descole ou apresente poros após teste com “Holiday Detector”.

O ensaio resistência à tração, de acordo com as normas ASTM D638, ISO 527 e ASTM D412 que se equivalem, determina a tração e o alongamento do corpo de prova na ruptura. Os corpos de prova, a partir de revestimento livre de aproximadamente 2000 µm de espessura, foram preparados por estampagem no formato Type IV (ASTM D638) ou Die C (ASTM D 412). Além do estado inicial dos corpos de prova, as duas outras condições em que as amostras foram submetidas antes do teste foram: 1) envelhecimento térmico a seco por 100 dias a 80°C em estufa e 2) imersão em água industrial a 60°C por 100 horas.

### **3. Resultados e discussão**

Os resultados obtidos mostraram que os revestimentos testados são bem distintos entre si. Foi constatado que alguns deles não apresentam qualquer comportamento elastomérico, ex: PUR-2, PUR-3, PUR-4 e PUR-5. De toda forma, os testes cabíveis foram executados, considerando que duas classes de materiais são prontamente identificadas: poliureias e poliuretanos.

#### **3.1. Aderência**

##### **3.1.1. Aderência inicial**

A aderência *pull-off* dos revestimentos após a cura do polímero sobre tratamento de superfície Sa3 é apresentada na Figura 1. A norma EN 10290 aponta como valor de referência 7 MPa para os poliuretanos. Já a norma ANBT NBR 16545 define como valor mínimo 10 MPa para poliureia.

De forma geral, os valores de revestimentos elastoméricos são menores que os dos não elastoméricos. Os revestimentos elastoméricos apresentam cura mais rápida e por essa razão nem sempre tem tempo suficiente para molhar a superfície do aço e penetrar nos vales da rugosidade, comprometendo a ancoragem do revestimento. Por conta disso, alguns fabricantes desenvolveram um *primer*, identificado com um “P”, para suas formulações, que tem como objetivo promover maior aderência, mesmo em superfície com tratamento abrasivo Sa3.

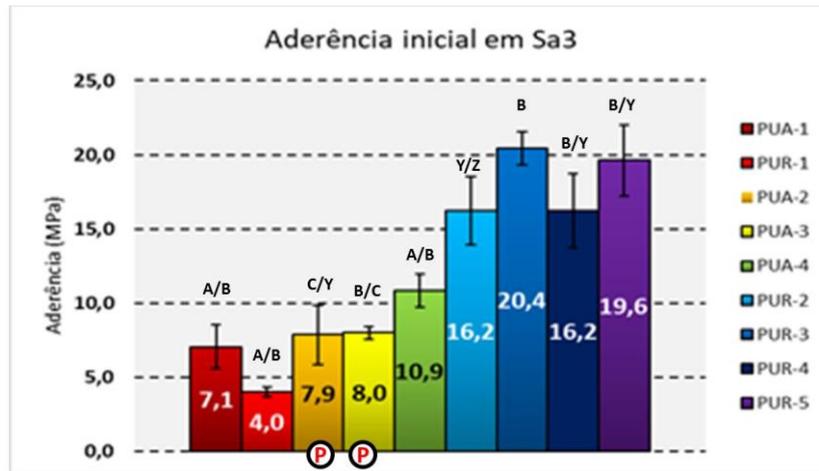


Figura 1. Gráfico de colunas com resultados de aderência *pull-off* sobre aço com tratamento de superfície Sa3 para revestimentos em estado inicial

Assim, todos os revestimentos poliuretano (não elastoméricos) superaram o requisito mínimo de 7 MPa referente à norma EN 10290. No entanto, dentre os elastoméricos somente o PUA-2, onde houve falha no adesivo (C/Y) e o PUA-4 que superou o requisito mínimo de 10 MPa para poliureias, apresentaram bom desempenho em aderência sobre superfície com tratamento abrasivo.

A aderência *pull-off* dos revestimentos sobre tratamento de superfície St3 é apresentada na Figura 2. De acordo com o esperado, os valores são menores que aqueles observados sobre o tratamento de superfície Sa3, por causa da ausência de perfil de rugosidade e resíduo de produto de corrosão. A poliureia PUA-4 e os poliuretanos PUR-2 e PUR-3 apresentaram sensível queda de aderência no tratamento de superfície St3.

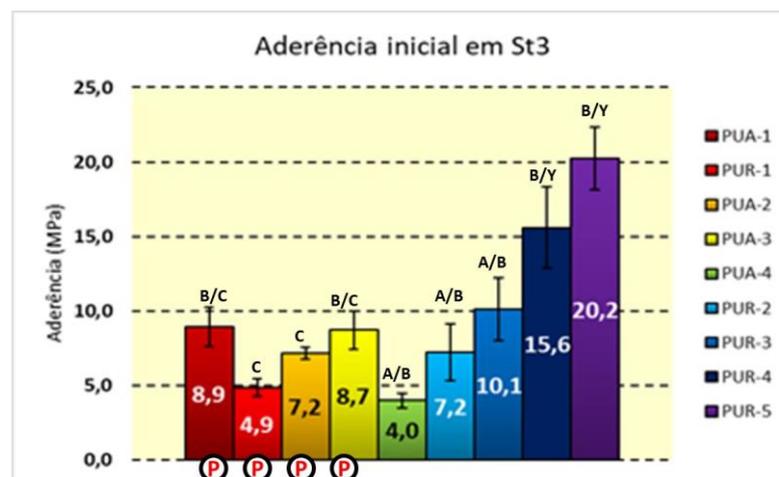


Figura 2. Gráfico de colunas com resultados de aderência *pull-off* sobre aço com tratamento de superfície St3 para revestimentos em estado inicial.

Dentre os revestimentos não elastoméricos houve queda de aderência dos PUR-2 e PUR-3, enquanto os PUR-4 e PUR-5 mantiveram seu desempenho. Os poliuretanos PUR-2 e PUR-3 além de apresentar queda nos valores de aderência, também tiveram falha adesiva no substrato (tipo A/B).

Vale, no entanto, ressaltar que o uso de *primer* para as poliureias PUA-1, PUA-2 e PUA-3 aparentam promover aderência em seus produtos. No caso dos PUA-1 e PUR-1, o *primer* só foi aplicado em superfície com tratamento St3 e o desempenho de aderência superou aquele visto no tratamento Sa3. Já no caso das poliureias PUA-2 e PUA-3, que possuem *primer* em todos os casos, os valores são muito próximos para os dois tratamentos de superfície. Há o detalhe de que a poliureia PUA-3 apresentou, em alguns casos, falha adesiva do tipo B/C, que é a exposição do *primer* (na cor vermelha), tanto em Sa3 quanto em St3, como pode ser visto na Figura 3.



**Figura 3.** Corpo de prova sobre Sa3 com falha adesiva do tipo B/C, onde o *primer* fica exposto.

Entre os revestimentos elastoméricos, a poliureia PUA-4 foi a única que não usou *primer* sobre superfície St3 e foi observada uma redução de 10,9 MPa (em Sa3) para 4 MPa (em St3).

### **3.1.2. Aderência após o envelhecimento térmico**

Os resultados de aderência *pull-off* após o envelhecimento térmico dos revestimentos a seco, a 80°C por 100 dias sobre tratamento de superfície Sa3 são apresentados na Figura 4. É observado que esse tipo de envelhecimento só fez melhorar a propriedade de aderência dos materiais. No caso dos revestimentos PUA-1 e PUR-1, embora tenham apresentado falha adesiva (tipo A/B), os valores de aderência aumentaram.

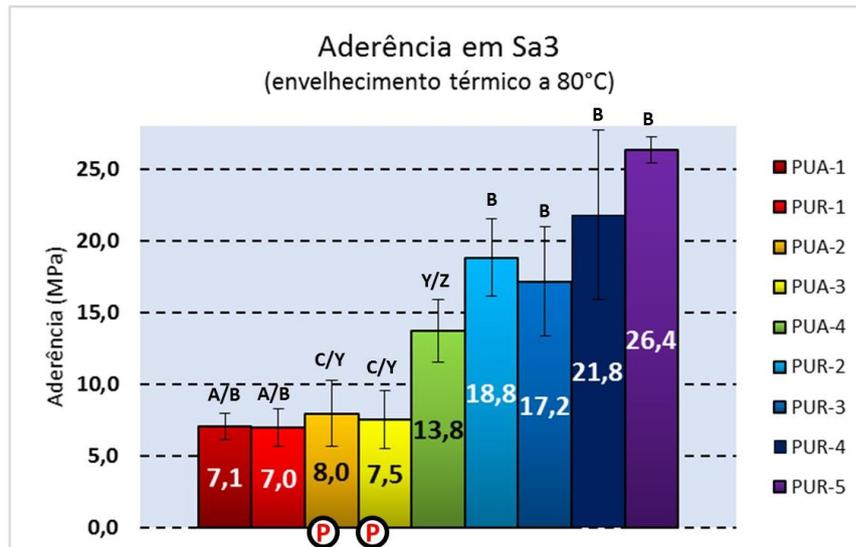


Figura 4. Gráfico de colunas com resultados de aderência *pull-off* sobre aço com tratamento de superfície Sa3 para revestimentos após envelhecimento térmico a 80°C por 100 dias.

Os resultados de aderência *pull-off* após o envelhecimento térmico dos revestimentos a seco, a 80°C por 100 dias sobre tratamento de superfície St3 são apresentados na Figura 5. Uma vez mais pode ser visto que o envelhecimento a seco em geral melhorou a propriedade de aderência para todos os revestimentos.

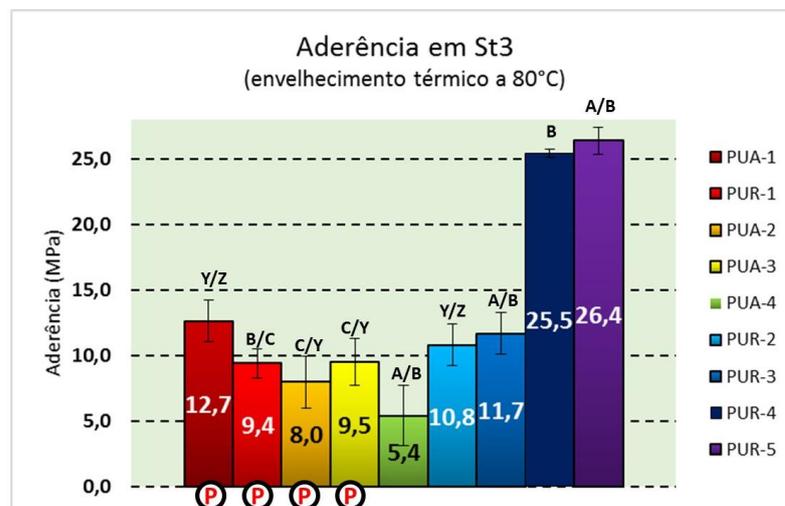
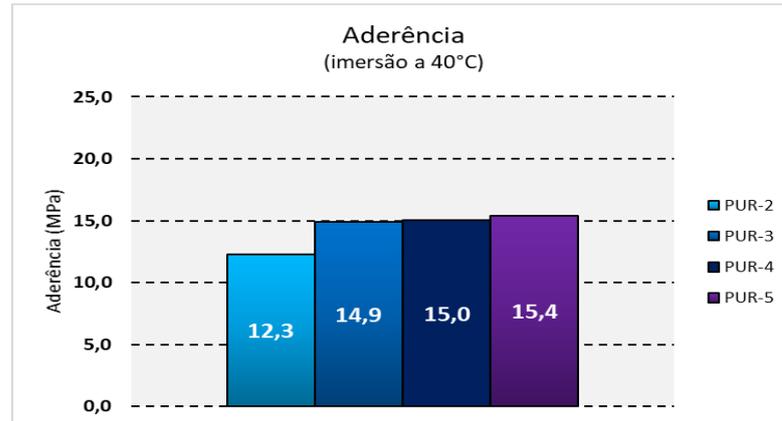


Figura 5. Gráfico de colunas com resultados de aderência *pull-off* sobre aço com tratamento de superfície St3 para revestimentos após envelhecimento térmico a 80°C por 100 dias.

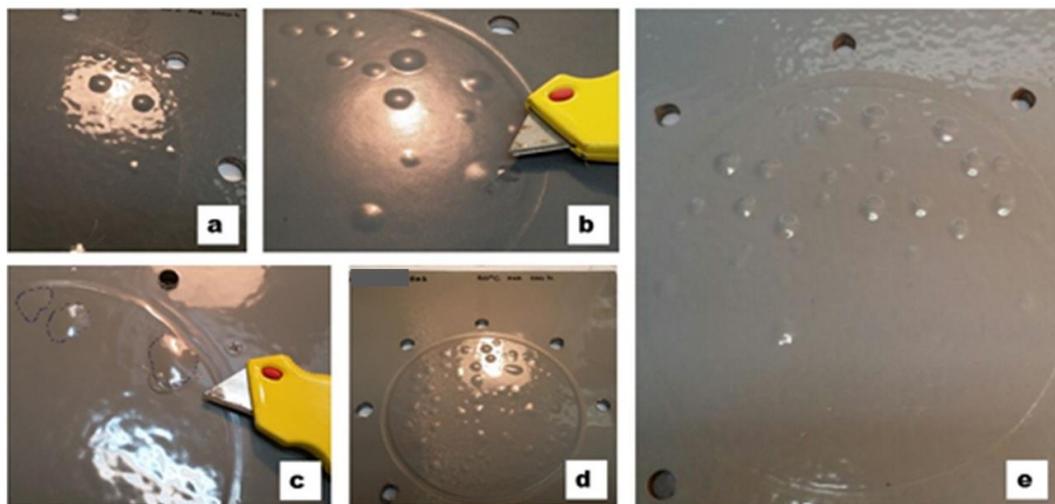
### 3.1.3. Aderência após imersão em água a 40°C

Esse ensaio tem por fim simular o efeito da água sobre os revestimentos na temperatura máxima de serviço. Os resultados de aderência *pull-off* após imersão dos revestimentos a 40°C por 2000 horas, aplicados sobre tratamento de superfície Sa3, são apresentados na Figura 6.



**Figura 6.** Gráfico de colunas com resultados de aderência *pull-off* sobre aço com tratamento de superfície Sa3 para revestimentos após imersão em água industrial a 40°C por 2000 horas.

Todos os revestimentos elastoméricos (poliureias e o poliuretano PUR-1) apresentaram permeação de água que geraram bolhas nos corpos de prova, ilustrado na Figura 7. Por essa razão não foi possível realizar os testes de aderência.



**Figura 7.** Imagem de corpos de prova com bolhas após imersão em água industrial a 40°C por menos de 400 horas (a) PUA-1, (b) PUR-1, (c) PUA-2, (d) PUA-3 e (e) PUA-4

Os poliuretanos rígidos PUR-2, PUR-3, PUR-4 e PUR-5 completaram o período de 2000 horas sem que ocorresse esse fenômeno. Os revestimentos PUR-2 e PUR-3 apresentaram falha adesiva no substrato (tipo A/B) e os PUR-4 e PUR-5 apresentaram falha coesiva (tipo B).

Os ensaios de imersão foram executados em corpos de prova de aço nas dimensões de 300 mm x 300 mm x 6 mm em célula Atlas (Figura 8) completamente cheia de água para, dessa maneira, evitar o efeito de infiltração pela borda.



Figura 8. Célula Atlas usada para os testes de imersão

### 3.1.4. Aderência após imersão em água a 60 °C

Esse ensaio tem por fim acelerar o efeito da água sobre os revestimentos, pelo aumento da temperatura. Os resultados de aderência para os revestimentos não elastoméricos são apresentados na Figura 9.

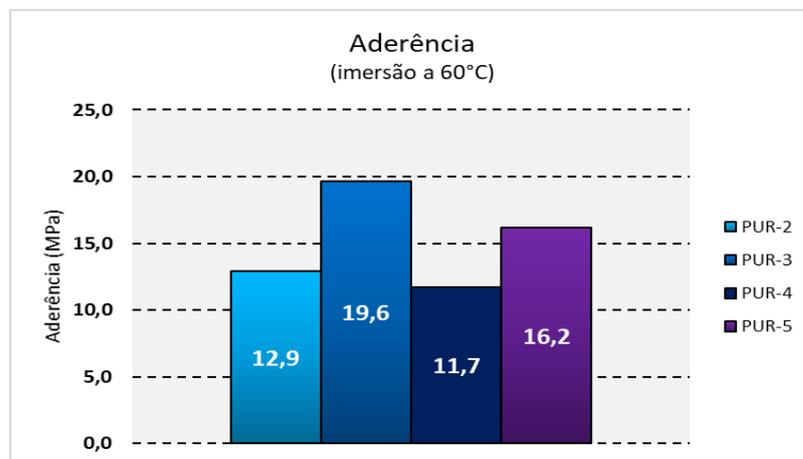


Figura 9. Gráfico de colunas com resultados de aderência *pull-off* sobre aço com tratamento de superfície Sa3 para revestimentos após imersão em água industrial a 60°C por 100 horas.

Assim como no teste de imersão à 40 °C, todos os revestimentos elastoméricos (PUA-1, PUR-1, PUA-2, PUA-3 e PUA-4) apresentaram bolhas nos corpos de prova no ensaio de imersão à 60 °C por 100 h.

De maneira similar ao teste a 40 °C, de maior duração, os revestimentos PUR-2, PUR-3, PUR-4 e PUR-5 testados a 60 °C por 100 horas não apresentaram bolhas.

Os revestimentos elastoméricos são compostos por segmentos rígidos (*Hard block A*) e de segmentos macios (*Soft block B*), de acordo com a literatura (1) e ilustrado na Figura 10. As

forças de ligação que envolvem essas moléculas são do tipo ligação de hidrogênio. Essas interações intermoleculares são as mesmas que existem entre as moléculas de H<sub>2</sub>O, o que facilita a penetração de água entre as cadeias desses revestimentos elastoméricos. Isso justifica a permeação de água e consequentemente a formação de bolhas nos corpos de prova PUA-1, PUR-1, PUA-2, PUA-3 e PUA-4.

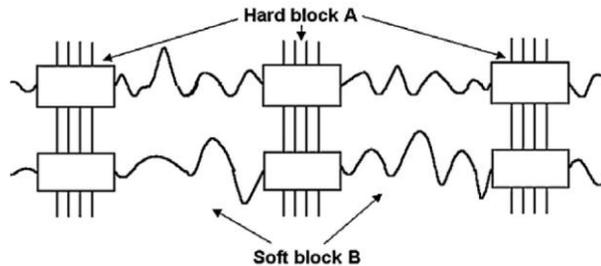


Figura 10. Esquema de ligações e interações químicas nos revestimentos elastoméricos

Os revestimentos de poliuretano testados (PUR-2, PUR-3, PUR-4 e PUR-5) são mais rígidos, ou seja, não elastoméricos. As ligações entre as moléculas são do tipo *crosslink* (Figura 11), ou seja, ligações covalentes que dão mais rigidez às cadeias e que permitem a passagem de moléculas H<sub>2</sub>O com mais dificuldade. Por isso não foram observadas bolhas nos revestimentos PUR-2, PUR-3, PUR-4 e PUR-5. Isso não significa que não houve ação da água, pois os revestimentos PUR-2 e PUR-3 apresentaram falhas adesivas (tipo A/B) após os testes de imersão.

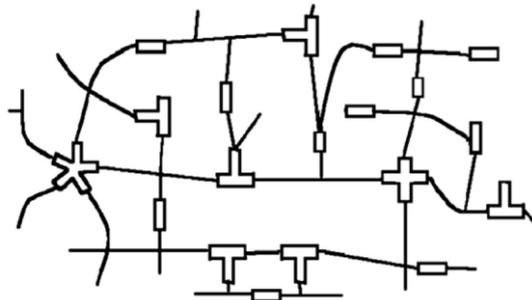


Figura 11. Esquema de ligações e interações químicas nos revestimentos não elastoméricos

### 3.2. Descolamento catódico

Os resultados obtidos para os testes de descolamento catódico para tratamento de superfície Sa3 encontram-se na Figura 12. A norma EN 10290 estabelece para poliuretanos um raio equivalente mínimo de 8 mm (diâmetro equivalente de 16 mm). Não há especificação para poliureias na norma ABNT NBR 16545 e, dessa forma, nesse tratamento de superfície, esse critério é atendido por 7 dos 9 revestimentos. De uma forma geral, os revestimentos não elastoméricos apresentaram melhor resultado que os elastoméricos.

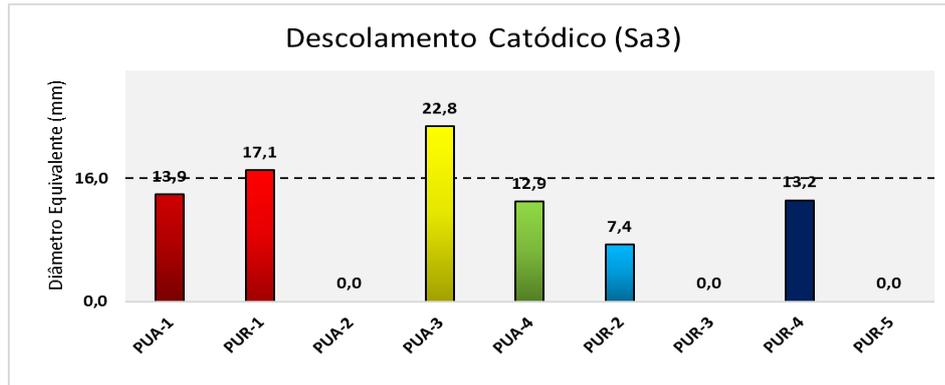


Figura 12. Comparação de diâmetro equivalente delaminado dos revestimentos após 28 dias de polarização catódica a  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  aplicados sobre tratamento de superfície Sa3

Foi observado que o *primer* usado sob a poliureia PUA-2 foi decisivo para que não houvesse descolamento catódico na superfície do substrato. No entanto, o *primer* não produziu o mesmo efeito na poliureia PUA-3.

Os resultados obtidos para os testes de descolamento catódico para tratamento de superfície St3 encontram-se na Figura 13. Os valores de diâmetro equivalente variam de 15 a 35 mm com exceção dos revestimentos PUR-4 e PUR-5, nos quais não houve descolamento.

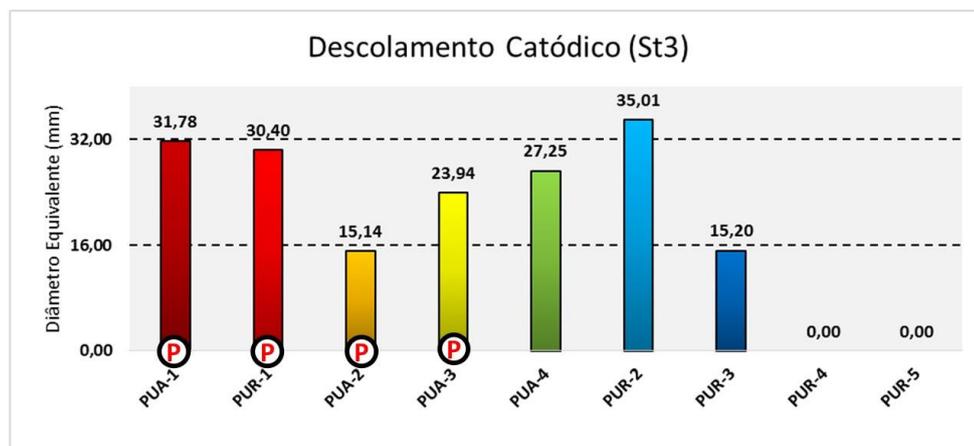


Figura 13. Comparação de diâmetro equivalente descolado dos revestimentos após 28 dias de polarização catódica a  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  aplicados sobre tratamento de superfície St3

Pode ser observado que, de maneira geral, o descolamento catódico é mais pronunciado em revestimentos aplicados sobre superfície com tratamento mecânico do que para jateamento abrasivo. Os resultados dos revestimentos PUA-2, PUR-3, PUR-4 e PUR-5 foram satisfatórios por apresentar descolamento abaixo de 16 mm de diâmetro equivalente frente à polarização catódica sobre superfície com tratamento mecânico.

Observa-se que nos revestimentos PUA-1 e PUR-1, em que o *primer* foi utilizado exclusivamente para tratamento de superfície St3, houve aumento de descolamento se

comparado ao Sa3. O *primer* apresentou eficiência em melhorar as propriedades de aderência, mas isso não foi observado no ensaio de descolamento catódico.

### 3.3. Abrasão

Resultados obtidos para os testes de resistência à abrasão encontram-se na Figura 14. Com exceção do revestimento PUR-3, os demais apresentaram boa resistência à abrasão, com valores abaixo de 50 mg/1000 ciclos, valor máximo requisitado pela norma ABNT 16545.

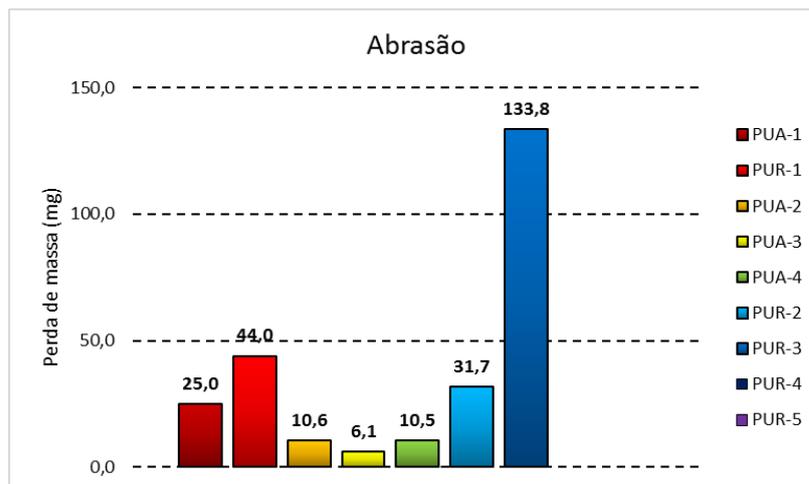


Figura 14. Perda de massa por abrasão dos revestimentos em “Taber Abraser” com rebolo CS17 por 1000 ciclos a  $(23 \pm 2)$  °C

Os testes nos materiais dos fabricantes A e E ainda não foram realizados. Os valores de PUA-1 e PUR-1 são referentes a seus respectivos boletins técnicos. A ficha técnica de PUR-4 e PUR-5 não contém valores de abrasão.

### 3.4. Dureza

Os resultados obtidos para os testes de dureza encontram-se na Figura 15. É observado que os valores de dureza dos revestimentos elastoméricos são menores do que os dos não elastoméricos. A norma EN 10290 não apresenta requisito para a dureza de poliuretanos, apontando que os valores ficam a critério do fabricante. No entanto, a norma ABNT NBR 16545, para poliureias, tem como requisito o valor de 40D ou 75A de dureza de forma que os revestimentos PUR-1, PUA-2 e PUA-3 apresentaram valores abaixo do especificado (40D).

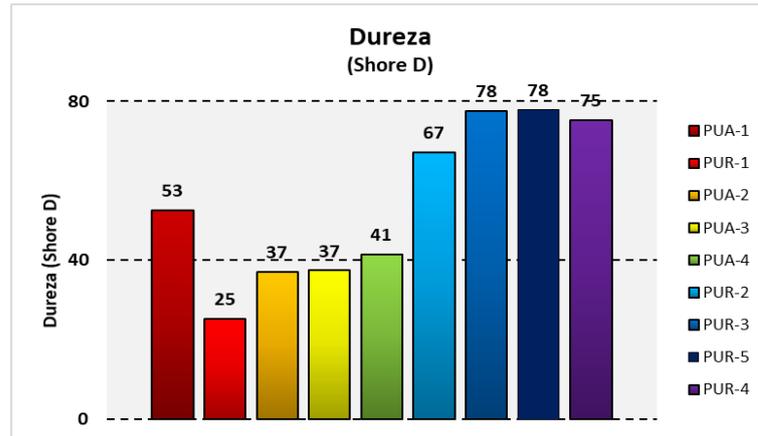


Figura 15. Comparação das medidas de dureza “Shore D” dos revestimentos

Como os valores de dureza das poliureias PUA-2, PUA-3 e PUA-4 foram semelhantes e muito próximos do requisito da norma, foram feitas medições de dureza “Shore A”, geralmente usada para elastômeros. Além disso, foram incluídos o poliuretano PUR-1 e a poliureia PUA-1, todos apresentados na Figura 16. Como a norma ABNT NBR 16545 tem como requisito o valor de 75A de dureza, os revestimentos PUA-1, PUA-2, PUA-3 e PUR-1 estão dentro do critério.

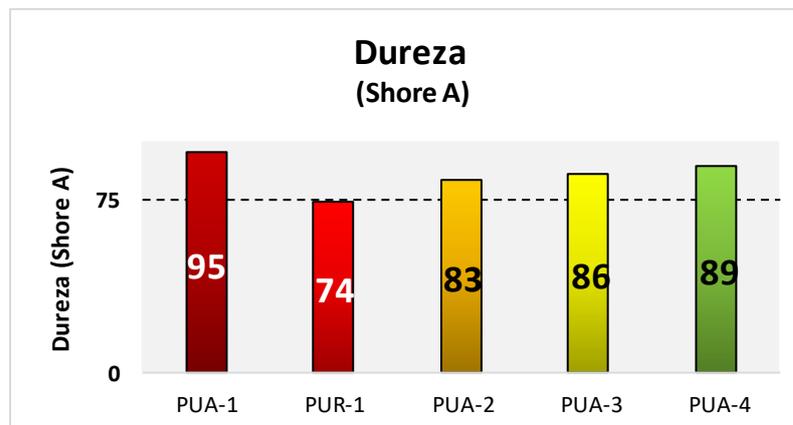


Figura 16. Comparação das medidas de dureza “Shore A” dos revestimentos de menor dureza “Shore D”

### 3.5. Resistência ao impacto

A resistência do revestimento ao impacto é uma propriedade fundamental para dutos reabilitados devido ao manuseio, transporte e assentamento dos tubos. Os resultados obtidos para os testes de impacto encontram-se na Tabela 3. Em todos os testes o diâmetro do punção foi de 15,9 mm, os painéis foram de aço 1020 de 6 mm de espessura, a temperatura ambiente foi de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  e a umidade relativa de  $50 \pm 5 \%$ .

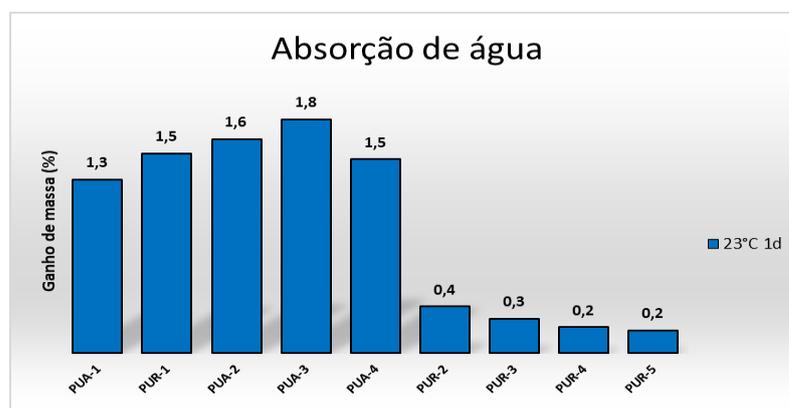
**Tabela 3. Resultado de testes de impacto**

Revestimento	Espessura ( $\mu\text{m}$ )	Energia de 5 J/mm
PUA-1	2450	Aprovado
PUR-1	2200	Aprovado
PUA-2	2300	Aprovado
PUA-3	2120	Aprovado
PUA-4	1500	Aprovado
PUR-2	2460	Aprovado
PUR-3	2170	Aprovado
PUR-4	3500	Aprovado
PUR-5	4500	Aprovado

Todos os revestimentos atenderam o especificado na EN 10290 de 5 J/mm.

### 3.6. Absorção de água

A água que entra em contato com o revestimento externo do tubo por permeação no solo é um agente potencial de degradação do material polimérico e pode ter sua ação acelerada conforme a elevação da temperatura. O ganho percentual de massa de água após 24 horas foi, na média, 8 vezes maior para os revestimentos elastoméricos do que para os poliuretanos rígidos, como pode ser visto na Figura 17. A exceção é o poliuretano PUR-1 (elastomérico), que tem absorção de água elevada, como as 4 poliureias elastoméricas testadas.



**Figura 17. Gráfico de absorção de água a  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$**

Além disso, com o aumento de 23 para  $40^\circ\text{C}$ , o ganho de massa aumentou em torno de 50% no mesmo intervalo de tempo, mostrado na Figura 18. O comportamento anormal foi observado nos poliuretanos PUR-4 e PUR-5, que absorveram 101 e 140% a mais de água com a elevação da temperatura. A poliureia PUA-4 entre todos apresentou o menor aumento de massa com a elevação de temperatura.

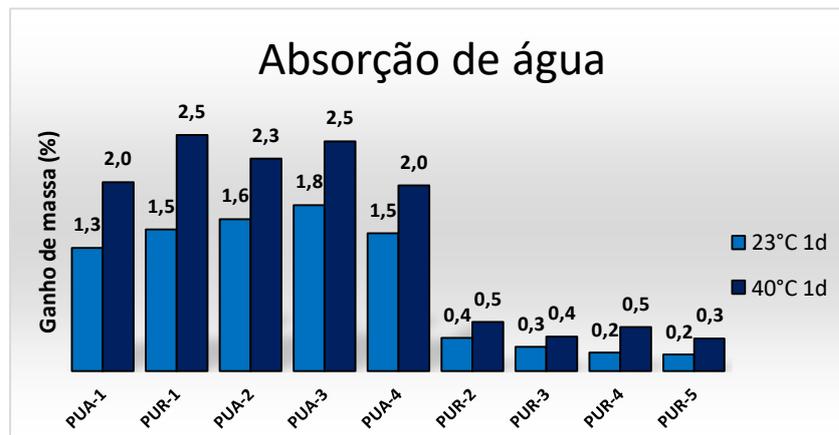


Figura 18. Gráfico de absorção de água a 23 e 40 °C

Foi observado que a 60 °C houve maior aumento de absorção de água para revestimentos não elastoméricos (Figura 19) do que para revestimentos elastoméricos (Figura 20) em termos percentuais, quando comparado à temperatura de 23 °C pelo mesmo período.

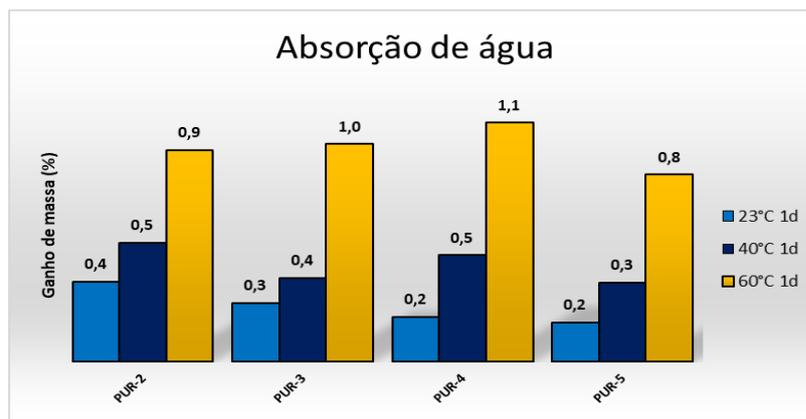


Figura 19. Aumento acentuado de absorção de água a 60°C para revestimentos não elastoméricos

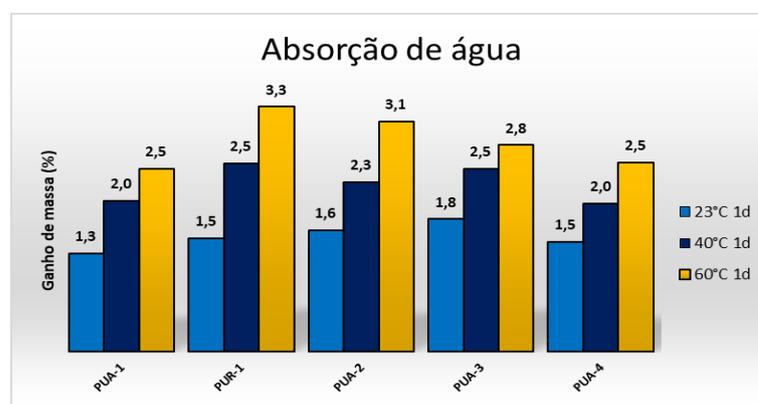


Figura 20. Aumento regular de absorção de água a 23, 40 e 60°C para revestimentos elastoméricos

### 3.7. Dobramento

Em geral, a maioria dos revestimentos apresentaram bom desempenho no teste de dobramento, ou seja, sofreram deformação por ação de um mandril sem que o revestimento perdesse aderência com o aço ou apresentasse fissuras. Dentre os poliuretanos rígidos, um dos três corpos de prova do PUR-3 sofreu fratura no teste de dobramento.

### 3.8. Resistência à tração

#### 3.8.1. Resistência inicial à tração

A resistência à tração inicial foi medida após a cura do polímero. Os resultados do ensaio de resistência à tração para os revestimentos são ilustrados na Figura 21. Assim como nos resultados de aderência, mostrados na Figura 1, a resistência à tração é maior para os revestimentos não elastoméricos do que para os não elastoméricos. Todos os sistemas estão enquadrados no critério da ABNT NBR 16545, por superarem 10 MPa de resistência a tração.

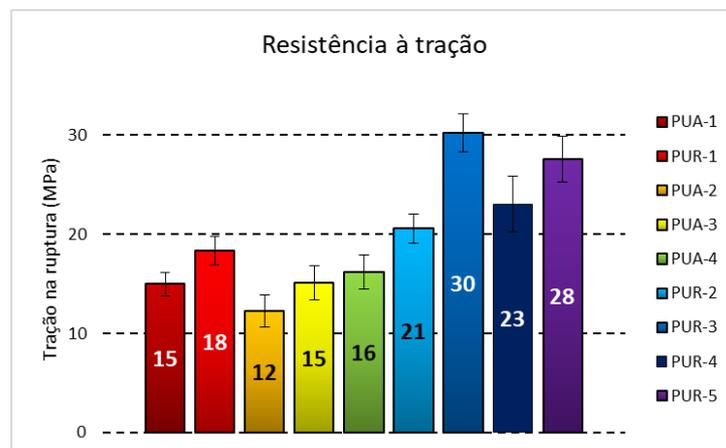
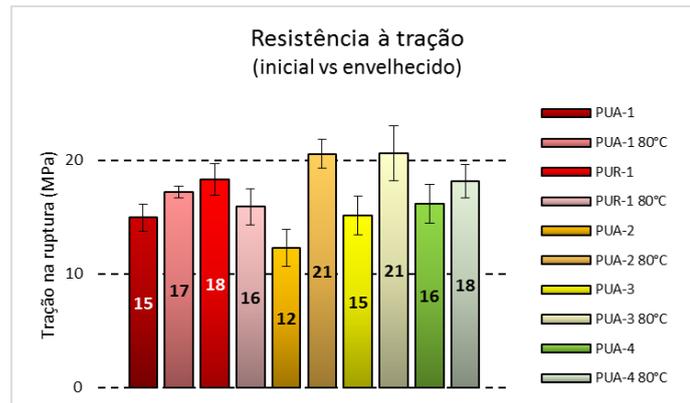


Figura 21. Comparação de resistência à tração inicial de todos os revestimentos

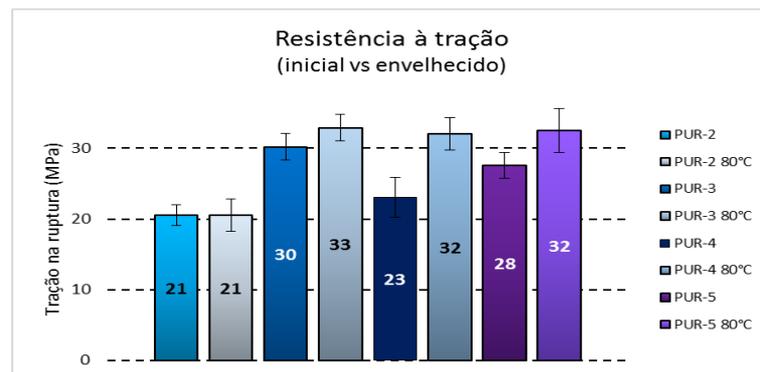
#### 3.8.2. Resistência à tração após envelhecimento térmico

Os resultados do ensaio de resistência à tração para os revestimentos elastoméricos, comparando amostras iniciais e amostras após envelhecimento térmico a seco a 80 °C por 100 dias, são mostrados na Figura 22. Pode ser observado que os valores de tração após envelhecimento térmico, em geral, são maiores.



**Figura 22. Comparação de resistência à tração dos revestimentos elastoméricos em condição inicial e envelhecidos a seco por 100 dias a 80°C**

No caso dos poliuretanos rígidos, não foi observada variação significativa após o envelhecimento térmico, para os materiais do fabricante D (PUR-2 e PUR-3), mas foi constatado aumento dessa propriedade para os produtos do fabricante E (PUR-4 e PUR-5), como mostrado na Figura 23. Estes últimos foram envelhecidos por 60 dias.



**Figura 23. Comparação de resistência à tração dos poliuretanos em condição inicial e envelhecidos a seco por 100 dias a 80 °C. PUR-4 e PUR-5 foram envelhecidos por apenas 60 dias**

### 3.8.3. Resistência à tração após imersão em água a 60 °C

Os corpos de prova de poliuretano rígido foram mais afetados do que os elastoméricos após imersão em água industrial a 60 °C por 100 horas. Com exceção do poliuretano PUR-2, as outras 3 formulações apresentaram queda média de 40% nos valores de tração, como mostra a Figura 24.

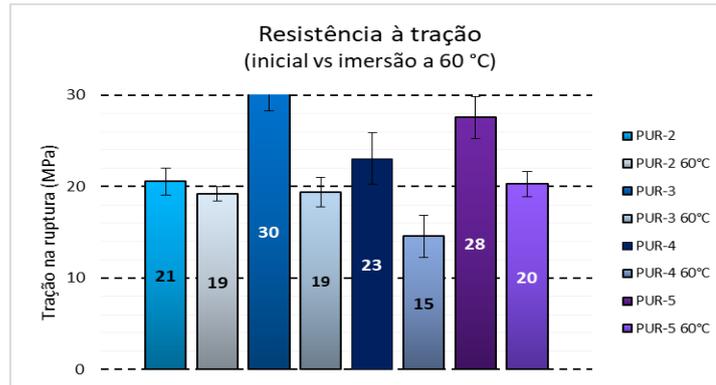


Figura 24. Comparação de valores de resistência à tração inicial dos poliuretanos e após imersão em água a 60 °C

Com exceção do PUR-1, o comportamento de queda de tração após imersão em água a 60 °C não foi observado para os revestimentos elastoméricos, como mostra a Figura 25.

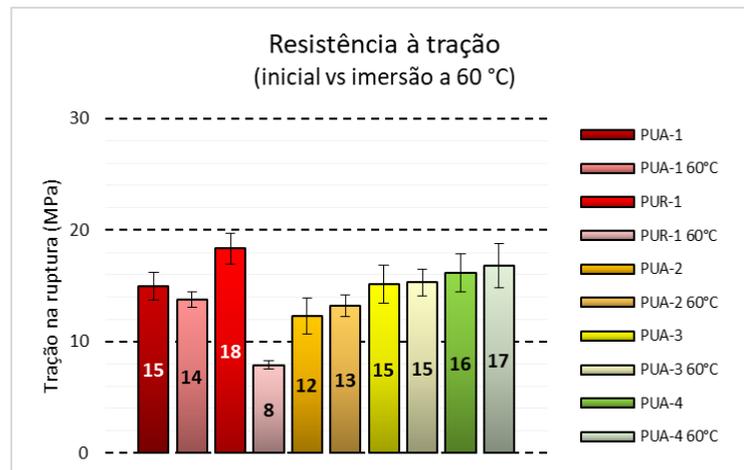


Figura 25. Comparação de valores de resistência à tração inicial dos revestimentos elastoméricos e após imersão em água a 60 °C

### 3.9. Alongamento

#### 3.9.1. Alongamento inicial

Os revestimentos poliméricos após sua cura têm os resultados de alongamento ilustrados na Figura 26.

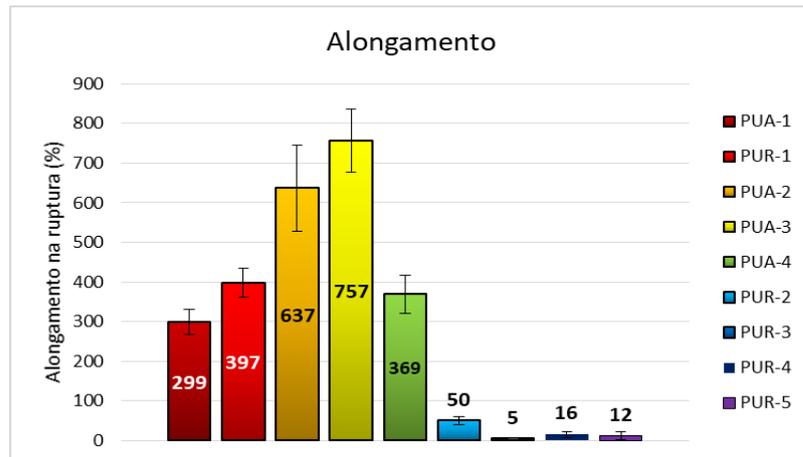


Figura 26. Comparação de alongamento inicial dos revestimentos

Por essa propriedade, pode ser observado que há duas classes distintas de materiais, onde os elastoméricos apresentam elevado alongamento devido as ligações químicas mais fracas e os não elastoméricos, um alongamento muito baixo, justamente por causa das ligações cruzadas que restringem o estiramento das cadeias. Isso está de acordo com as normas EN 10290 e ABNT NBR 16545 para poliuretanos e poliureias, respectivamente. A norma para poliuretanos especifica um valor mínimo de 10% de alongamento, enquanto a norma para poliureias define o de 100%. Por esse critério o revestimento PUR-3 se apresenta como uma exceção.

### 3.9.2. Alongamento após envelhecimento térmico

Os resultados do ensaio de alongamento para revestimentos elastoméricos, comparando amostras iniciais e amostras após envelhecimento térmico a seco a 80 °C por 100 dias, são mostrados na Figura 27. Pode ser observado que os valores de alongamento após envelhecimento térmico se mantiveram, com exceção do PUA-4, onde o valor diminuiu.

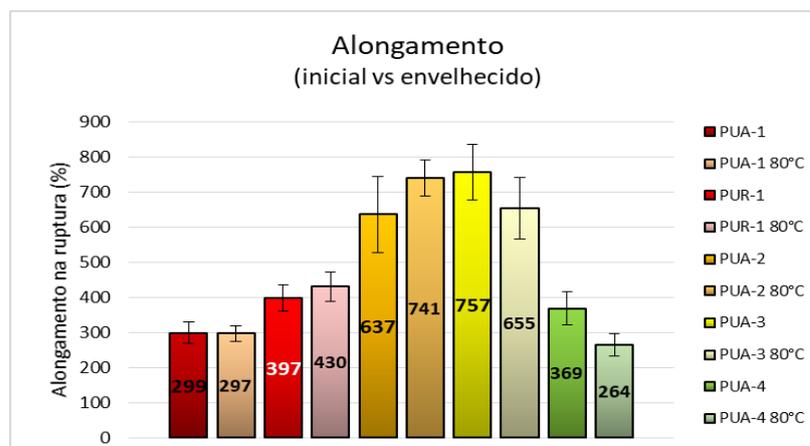


Figura 27. Comparação de alongamento das poliureias em condição inicial e envelhecidos a seco por 100 dias a 80 °C

Os resultados do ensaio de alongamento para poliuretanos, comparando amostras iniciais e amostras após envelhecimento térmico a seco a 80 °C por 100 dias, são mostrados na Figura 28. É observado que todos os poliuretanos rígidos apresentaram redução de alongamento após o envelhecimento.

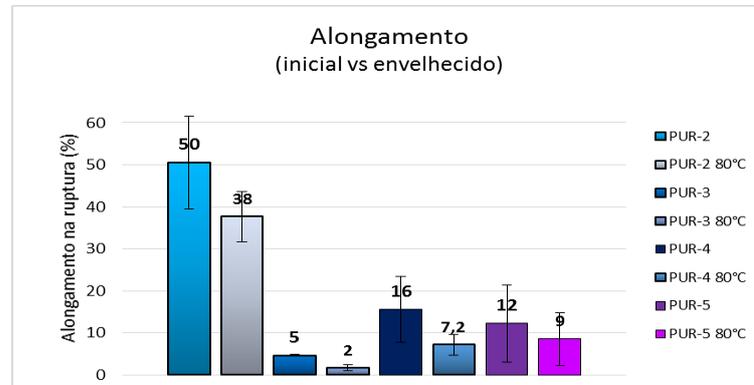


Figura 28. Comparação de alongamento dos poliuretanos em condição inicial e envelhecidos a seco por 100 dias a 80 °C

### 3.9.3. Alongamento após imersão em água a 60 °C

Os resultados do ensaio de alongamento para revestimentos elastoméricos, comparando amostras iniciais e amostras após imersão em água industrial a 60 °C por 100 horas, são mostrados na Figura 29. Só foi observada influência de imersão para a poliureia PUA-4, onde houve redução no alongamento.

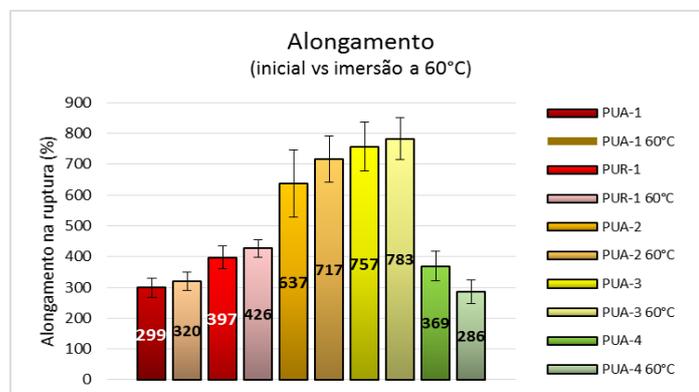


Figura 29. Comparação de alongamento das poliureias em condição inicial e imersos em água industrial por 100 horas a 60 °C

Os resultados do ensaio de alongamento para poliuretanos rígidos, comparando amostras iniciais e amostras após imersão em água industrial a 60 °C por 100 horas, são mostrados na Figura 30. É observado que os poliuretanos do fabricante D (PUR-2 e PUR-3) apresentam queda de alongamento enquanto os poliuretanos do fabricante E (PUR-3 e PUR-4) apresentam aumento dessa propriedade.

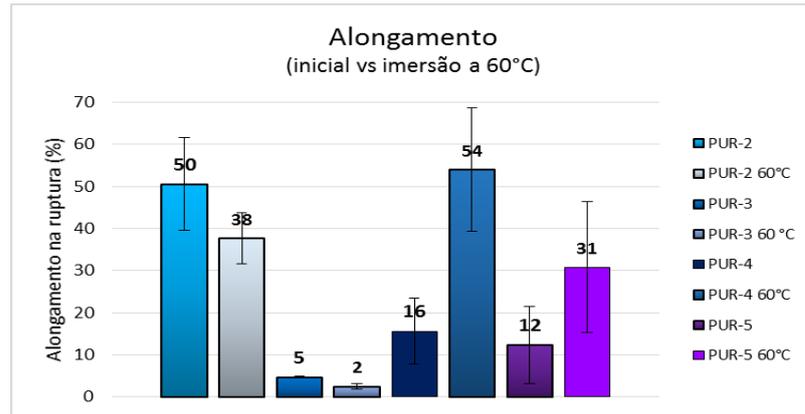


Figura 30. Comparação de alongamento dos poliuretanos em condição inicial e imersos em água industrial por 100 horas a 60°C

### 3.10. Resistência ao rasgamento

#### 3.10.1. Resistência inicial ao rasgamento

Os revestimentos onde foi possível realizar os testes de resistência ao rasgamento foram PUA-1, PUR-1, PUA-2, PUA-3 e PUA-4. Os poliuretanos PUR-2, PUR-3, PUR-4 e PUR-5 são demasiadamente rígidos para esse teste, que é característico para elastômeros. Os resultados de resistência inicial ao rasgamento são mostrados na Figura 31. A norma ABNT NBR 16545 determina o critério de resistência mínima de 35 KN/m (ou N/mm). De acordo com os valores obtidos, os revestimentos elastoméricos estão enquadrados nos requisitos do documento, porém o poliuretano PUR-1 não alcançou o valor.

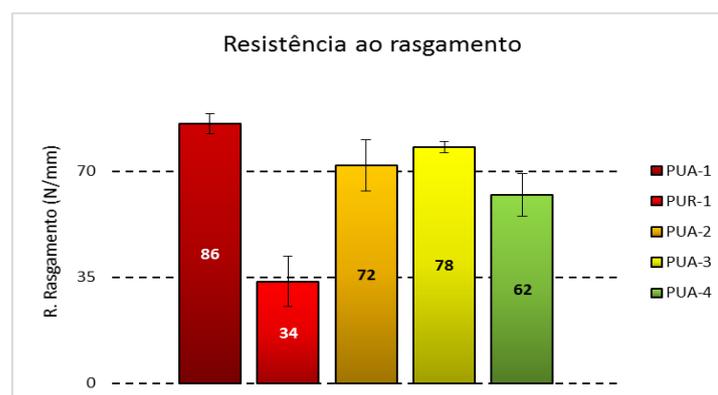


Figura 31. Comparação de resistência inicial ao rasgamento entre os revestimentos

#### 3.10.2. Resistência ao rasgamento após envelhecimento térmico

Os resultados do ensaio de rasgamento para revestimentos elastoméricos, comparando amostras iniciais e amostras após envelhecimento térmico a seco a 80 °C por 100 dias, são

mostrados na Figura 32. O envelhecimento térmico a seco tende a aumentar a resistência ao rasgamento.

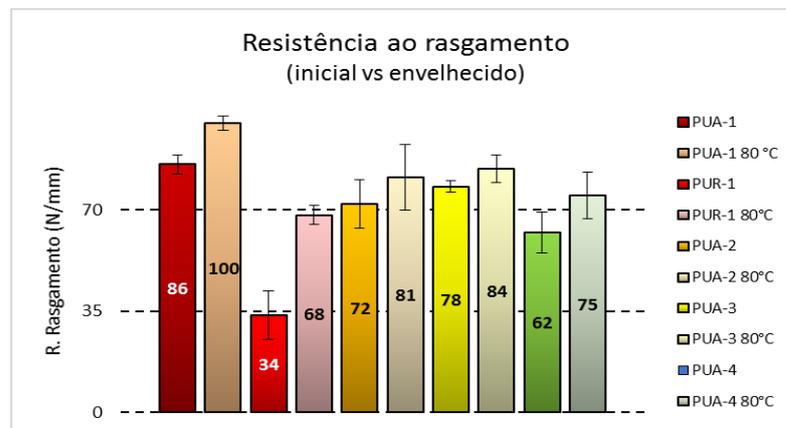


Figura 32. Comparação de alongamento dos revestimentos em condição inicial e envelhecidos a seco por 100 dias a 80 °C

### 3.10.3. Resistência ao rasgamento após imersão a 60 °C

Os resultados do ensaio de rasgamento para revestimentos elastoméricos, comparando amostras iniciais e amostras após imersão a 60 °C por 100 h estão ilustrados na Figura 33. A imersão em água em alguns casos reduziu a resistência ao rasgamento e em outro não alterou essa propriedade.

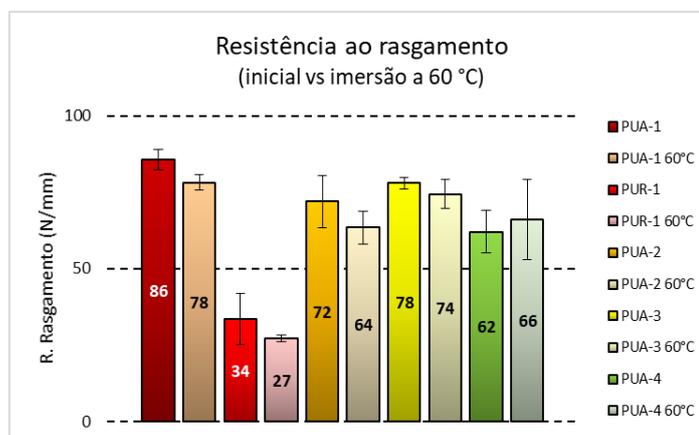


Figura 33. Comparação de rasgamento dos revestimentos em condição inicial e imersos em água industrial por 100 horas a 60 °C

## 4. Conclusões

O desempenho mecânico dos revestimentos rígidos foi mais afetado pela presença de água nas condições estudadas, apesar da absorção de água dos revestimentos não elastoméricos ser menor que a dos elastoméricos, onde não foi observada variação nas propriedades mecânicas.

---

Este fato sugere que os poliuretanos avaliados nesse trabalho sofrem degradação em presença de água em torno de 60°C, possivelmente pelo mecanismo de hidrólise.

Visto que o desempenho entre poliureias e poliuretanos foi bastante distinto, foram feitas associações para comparação entre os resultados. As cinco formulações (PUA-1, PUR-1, PUA-2, PUA-3 e PUA-4) foram avaliadas no grupo elastomérico, enquanto as quatro formulações de poliuretano (PUR-2, PUR-3, PUR-4 e PUR-5) foram avaliadas no grupo não elastomérico. Embora o PUR-1 seja um poliuretano, por ser elastomérico, seu comportamento mecânico é similar ao das poliureias.

Em relação ao tratamento de superfície, os resultados de desempenho foram inferiores com tratamento St3 quando comparado ao padrão Sa3. Os revestimentos poliuretanos não elastoméricos PUR-3, PUR-4 e PUR-5 apresentaram resultado satisfatório em relação aos ensaios executados neste trabalho. Vale, no entanto, ressaltar que o uso de *primer* para as poliureias PUA-1, PUA-2 e PUA-3 aparentam promover aderência em seus produtos. No caso das PUA-1, o *primer* só foi aplicado em superfície com tratamento St3 e o desempenho de aderência superou aquele visto no tratamento Sa3. Com isso, pode-se destacar que o uso de *primer* poderia ser um fator importante para o desempenho do sistema, mesmo que superfícies com tratamento mecânico.

Em relação ao ensaio de imersão em água industrial a 40 °C e 60 °C, todos os revestimentos elastoméricos: PUA-1, PUR-1, PUA-2, PUA-3 e PUA-4 apresentaram permeação de água gerando bolhas nos corpos de prova. Não se observou este fenômeno nos poliuretanos não elastoméricos. Contudo, os revestimentos PUR-2 e PUR-3 apresentaram falha adesiva A/B e os PUR-4 e PUR-5 apresentaram falha coesiva B.

Em relação ao ensaio de abrasão, todos os revestimentos, com exceção do PUR-3, apresentaram boa resistência a abrasão. Em relação ao ensaio de dureza, os revestimentos não elastoméricos apresentaram maior dureza. Em relação ao ensaio de impacto, todos os revestimentos apresentaram boa resistência. Em relação ao ensaio de dobramento, com exceção do PUR-3, os revestimentos não apresentaram fissuras ou descolamento após o ensaio.

A resistência à tração é maior para os revestimentos não elastoméricos do que para os não elastoméricos e pode ser observado que os valores de tração após envelhecimento térmico, em geral, são maiores. Os corpos de prova de poliuretano foram mais afetados do que os elastoméricos após imersão em água industrial a 60 °C por 100 horas.

Os revestimentos elastoméricos apresentam elevado alongamento e os não elastoméricos, um alongamento muito baixo. Pode ser observado que os valores de alongamento após envelhecimento térmico se mantiveram, com exceção do PUA-4. Os poliuretanos, com exceção do elastomérico PUR-1 sofreram influência da imersão em água.

Em relação ao ensaio de rasgamento o PUR-1 foi o que apresentou menor resistência e não alcançou o critério estabelecido na ABNT NBR 16545. Após envelhecimento térmico, a resistência ao rasgamento tende a aumentar. Contudo, após imersão a 60 °C, a tendência foi se manter, com exceção do PUA-1 onde a resistência diminuiu.

De uma forma geral e com base nos resultados obtidos, constatou-se que os revestimentos não elastoméricos (poliuretanos rígidos) testados neste trabalho possuem maior potencial para serem aplicados em dutos com temperatura de operação até 40°C. De modo geral, apresentaram bom desempenho anticorrosivo, boas propriedades mecânicas e compatibilidade com proteção catódica. Embora, os revestimentos elastoméricos tenham apresentado boas propriedades mecânicas, os produtos avaliados neste trabalho não tiveram bom desempenho nos ensaios de corrosão. Vale ressaltar que a tecnologia de revestimentos elastoméricos possuem grande variedade quanto a formulação. A partir destes dados, alguns ajustes podem ser efetuados, inclusive considerando aplicação de um primer específico com o intuito de prover proteção anticorrosiva em dutos enterrados.

## **5. Referências bibliográficas**

- (1) GUAN, S. 100% Solids Polyurethane and polyurea coatings technology. **Coatings World**, p. 49-58, Mar. 2003.