

Ensaios de tração uniaxial com variação de temperatura em adesivo utilizado em juntas coladas de tubulações de PRFV aplicado em plataformas marítimas

PESSANHA, M.C.R.^I; DIAS, D.P.^I; FILGUEIRA, M.^{II}; PARANHOS, R.P.R.^{II}; DE FARIAS, O.L.^{III}

^I Laboratório de Engenharia Civil – LECIV – CCT/UENF, Av. Alberto Lamego 2000, Campos dos Goytacazes, RJ. CEP: 28013-602, e-mail: maikon@uenf.br, dylmar@uenf.br

^{II} Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV – CCT/UENF, Av. Alberto Lamego 2000, Campos dos Goytacazes, RJ. CEP: 28013-602, e-mail: marcello@uenf.br, paranhos@uenf.br

^{III} Gerência Setorial Engenharia de Instalações de Superfície, E&P/UN-BC/ST/EIS, Petróleo Brasileiro S.A., e-mail: lamas@petrobras.com.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento termo-mecânico de adesivos usados em juntas coladas de tubos de plástico reforçado com fibras de vidro (PRFV). Inicialmente usados em instalações de dessalinização e tratamento de efluentes, hoje são aplicados na indústria do petróleo, tanto em plataformas de perfuração quanto de produção, devido à necessidade do uso de materiais mais leves e com alta resistência à corrosão. Destaca-se que no Brasil estas tubulações estão submetidas a temperaturas de serviço da ordem 85°C, com transientes térmicos de até 115°C, enquanto as demais aplicações destes tubos são projetadas para operar à temperatura ambiente. O adesivo foi avaliado por meio de ensaios uniaxiais de tração realizados às temperaturas de 25, 55, 85 e 115°C, tendo sido determinado a tensão de escoamento, a tensão de ruptura, a deformação associada a estas tensões e o módulo de elasticidade. Os resultados obtidos mostram que, com o aumento da temperatura, há uma elevada queda na tensão de escoamento, na tensão de ruptura e no módulo de elasticidade do adesivo, ao mesmo tempo em que aumenta a deformação associada a estas tensões. Pode-se também concluir que o adesivo opera com segurança até a temperatura de 55°C. Acima desta temperatura as juntas produzidas com este adesivo estariam sujeitas a falhas como o aparecimento de trincas e deformação excessiva, o que pode vir a trazer como consequência o colapso da estrutura.

Palavras-chave: Adesivos, efeito de temperatura, indústria *offshore*, PRFV.

Uniaxial tensile tests with temperature variation in adhesive used in bonded joints of GFRP pipes applied in offshore platforms

ABSTRACT

This work has as objective to evaluate the thermo-mechanical behavior of adhesives used in bonded joints of pipes made of glass fiber reinforced plastics (GFRP). These bonded pipes, initially used in desalination and effluent treatments installations, today are applied in the oil industry, both in oil drilling and production platforms, due to the necessity of lighter and higher corrosion resistance materials. It must be pointed out that in Brazil these pipes are submitted at service temperature of approximately 85°C, with thermal transient until 115°C, while other applications of these pipes are designed to work at room temperature. So, the adhesive was evaluated by means of uniaxial tensile tests carried out at temperatures of 25, 55, 85 e 115°C, and there were determined the yield tension, the rupture tension, the elasticity modulus in the deformation associated to theses tensions. The obtained results show that, with the increase of the temperature, there is a high drop in the yield tension, the rupture tension and the elasticity modulus of the adhesive, while deformation associated to theses tensions significantly increase. It was possible to conclude that the adhesive operates with security until the temperature of 55°C. Above this temperature the bonded joints produced with this adhesive would be subjected to fails

Keywords: Adhesives, GFRP, offshore industry, effect of temperature.

1 INTRODUÇÃO

O uso de tubulações de plásticos reforçados com fibras de vidro (PRFV) em plataformas marítimas teve início com a proeminente necessidade de materiais mais leves e resistentes à corrosão, para a redução do peso das plataformas, bem como nas aplicações em ambientes salinos [1, 2]. Estas tubulações são utilizadas tanto em plataformas de perfuração quanto de produção de petróleo, desde sistemas de tratamento de efluentes até oleodutos com vários quilômetros [1-3]. Destaca-se que estes materiais possuem excelentes propriedades mecânicas quando comparados aos convencionais utilizados na indústria do petróleo [4-6]. Estas características implicam menor incidência de manutenção, pintura e substituição, auxiliando na diminuição dos tempos de parada das unidades produtivas [1].

Estima-se que em uma plataforma com capacidade de produção de 100 mil barris de óleo por dia, cerca de 40% das tubulações é confeccionada com PRFV [3]. Devido à característica intrínseca do óleo produzido no Brasil, que é extremamente viscoso e, portanto, necessita de tratamento com fluidos a temperaturas elevadas, na indústria do petróleo estas tubulações operam a pressões de aproximadamente 15 bar e temperaturas da ordem de 85°C, podendo atingir transientes térmicos de até 115°C [7].

Os tipos de juntas em tubulações de PRFV podem ser do tipo coladas, laminadas ou mecânicas. Do ponto de vista custo/benefício, as juntas coladas requerem menor tempo de preparação e execução, sendo preferidas para uso em plataformas marítimas [2, 8]. Contudo, tem sido observada a presença de falhas em juntas coladas na indústria *offshore*, tendo sido estas relacionadas à execução errônea do processo de colagem, com a presença de vazios [7, 9]. Por outro lado, por serem compósitos de matriz polimérica, estas juntas (particularmente os adesivos) estão sujeitas aos efeitos deletérios da combinação de umidade e temperatura. Via de regra, tubos colados de PRFV são usados para operação à temperatura ambiente [1], assim como os estudos disponíveis sobre os adesivos [3]. Desta forma o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da temperatura no comportamento mecânico de um adesivo usado na colagem de tubos PRFV, por meio de ensaios de tração uniaxial em temperaturas variando da ambiente (25°C) a até 115°C.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para os ensaios de tração uniaxial com variação de temperatura, foram confeccionados corpos-de-prova com adesivo proveniente da Edra do Brasil. Este é do tipo bi-componente (resina+catalisador), sendo recomendada a proporção de mistura em 50% de resina e 50% de catalisador, em volume. Para a confecção dos corpos-de-prova foram preparados moldes de borracha siliconada, por meio de polimerização a frio, com 6 cavidades cada um, como mostra a Figura 1a. A Figura 1b mostra que os corpos-de-prova tinham entalhes em forma de meia circunferência na região de aquecimento, localizando desta forma a região de ruptura. Os entalhes tinham o objetivo de evitar efeitos de pré-carga, principalmente nas extremidades, devido à fixação das garras da máquina de ensaio. Os corpos-de-prova tinham 140 mm de comprimento, 15 mm de largura da seção maior, 11 mm de largura da seção menor (entalhe) e 4 mm de espessura. Contudo, após a desmoldagem os corpos-de-prova sofreram lixamento para remoção de defeitos de superfície, reduzindo assim a espessura para cerca de 2,5 a 3,0 mm.

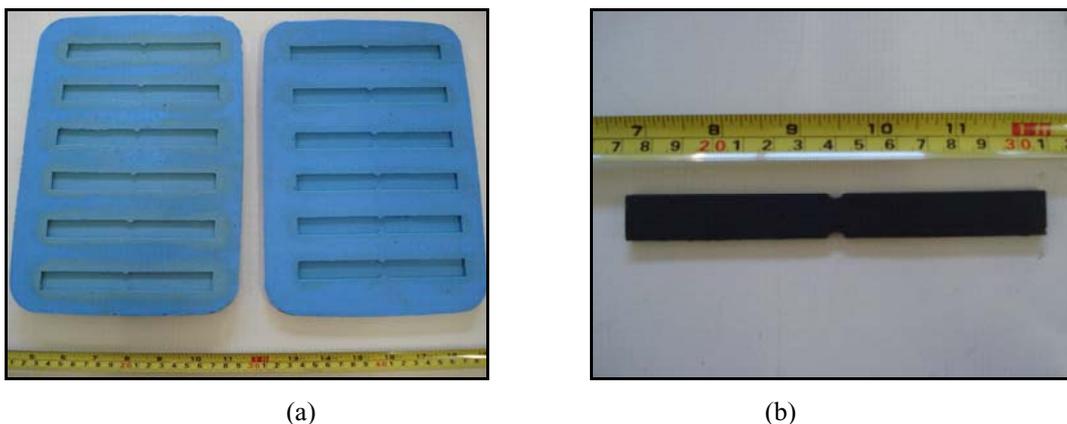


Figura 1: (a) Moldes para a confecção dos corpos-de-prova e (b) detalhe do corpo-de-prova de adesivo.

Para a execução dos ensaios de tração, foi usada a norma ASTM D 638 [10], tendo sido utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos da marca INSTRON modelo 5582 com capacidade de 100 kN. A velocidade do ensaio utilizada foi de 2 mm/min. Para o aquecimento dos corpos-de-prova foi acoplado à

máquina de ensaios um forno resistivo com as extremidades isoladas. A temperatura foi medida por meio de um termopar inserido no forno, localizado próximo ao entalhe do corpo de prova de tração, como parcialmente visualizado na Figura 2a. Para evitar a perda de calor e facilitar a estabilização da temperatura do corpo-de-prova, foi utilizada uma manta de fibra de vidro envolvendo o forno resistivo, como mostrado na Figura 2b. Quatro corpos de prova foram ensaiados em cada uma das temperaturas escolhidas (25, 55, 85 e 115°C). A Tabela 1 apresenta a nomenclatura adotada para os corpos-de-prova analisados.

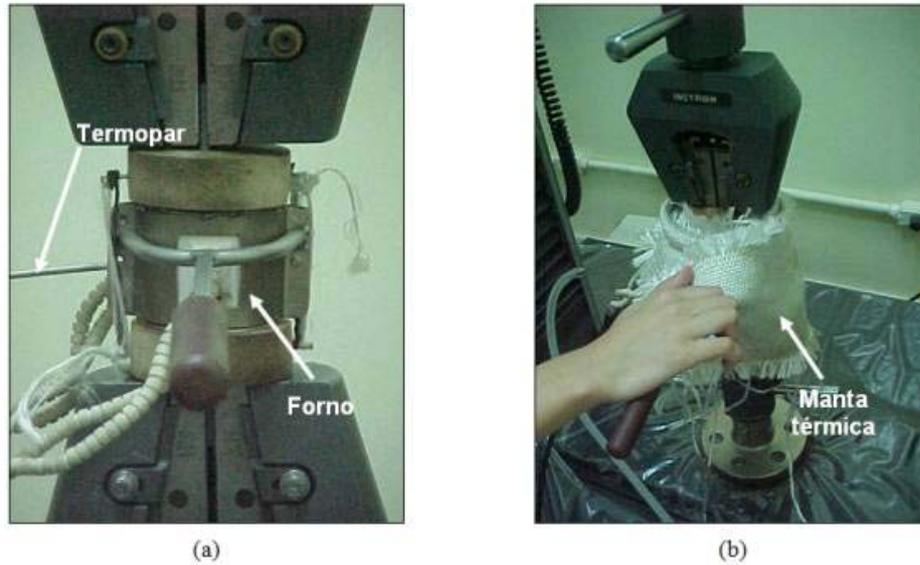


Figura 2: Ensaio de tração uniaxial com variação de temperatura: (a) detalhe do forno resistivo com extremidades isoladas e (b) detalhe da manta térmica utilizada.

Tabela 1: Nomenclatura dos corpos-de-prova analisados.

Temperatura (°C)	Nomenclatura ¹
25	CPaE25
55	CPaE55
85	CPaE85
115	CPaE115

¹ A letra a significa o número do corpo-de-prova, ou seja, 1, 2, 3 e 4 para cada temperatura.

Nos ensaios de tração de adesivos, a máquina de ensaios INSTRON forneceu curvas P-Δ, isto é, carga-deslocamento. A deformação dos corpos-de-prova durante o ensaio foi determinada pela razão entre o deslocamento obtido (Δ) a cada 0,1 s pelo comprimento inicial deformável do corpo-de-prova (l_0), isto é, comprimento inicial do corpo-de-prova (L) excluído as extremidades onde foram fixadas as garras, sendo tais medidas obtidas por meio de um paquímetro. Devido à dificuldade em se determinar a tensão do corpo-de-prova durante o ensaio, optou-se por utilizar a tensão na superfície de ruptura da amostra. Para ruptura no entalhe, a tensão nominal (σ_{nom}) e a tensão na superfície de ruptura da amostra (σ_{rup}) foram determinadas da seguinte forma:

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{h \cdot (H - 2 \cdot r)} \quad (1)$$

$$\sigma_{rup} = K_t \cdot \sigma_{nom} \quad (2)$$

Onde, h , H , L são, respectivamente, espessura, largura e comprimento dos corpos-de-prova. P é a carga de ruptura e r refere-se ao raio da meia circunferência no ponto médio de cada lado dos corpos-de-prova (Figura 1b). O parâmetro K_t é o fator de concentração de tensão, onde para os casos em que o entalhe tem forma de semi-circunferência, PILKEY *et al.* [11] sugerem a seguinte equação:

$$K_t = 3,065 - 3,472 \cdot \left(2 \cdot \frac{r}{H}\right) + 1,009 \cdot \left(2 \cdot \frac{r}{H}\right)^2 - 0,405 \cdot \left(2 \cdot \frac{r}{H}\right)^3 \quad (3)$$

Para ruptura fora do entalhe, a tensão nominal (σ_{nom}) e a tensão na superfície de ruptura do corpo-de-prova ($\sigma_{máx}$) foram determinadas da seguinte forma:

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{h \cdot H} \quad (4)$$

$$\sigma_{rup} = K_t \cdot \sigma_{nom} = 1 \cdot \sigma_{nom} \quad (5)$$

O módulo de elasticidade (E) foi determinado selecionando-se pontos experimentais das curvas tensão-deformação (σ - ε) que estavam, por sua vez, dentro da região elástica, ou seja, obedecendo a Lei de Hooke. Tais pontos foram interpolados por uma reta do tipo $\sigma = a\varepsilon + b$ que representava o melhor ajuste (Figura 3), onde a corresponde ao módulo elástico (E , em GPa). Esta propriedade é de fundamental importância, pois permite determinar a rigidez do sistema ao longo do eixo tracionado.

Para a determinação da tensão de escoamento foi traçada a reta passante pela deformação $\varepsilon = 0,10\%$, paralela àquela citada anteriormente, conforme explanado por HIGGINS [12], até atingir a curva σ - ε . O respectivo ponto de interseção entre a reta e a curva é lido no eixo vertical, sendo a tensão de escoamento (σ_{esc} , em MPa). Esta propriedade é de grande importância, pois a partir dela o material passa ao regime plástico, onde ocorrem os danos permanentes, que causam parte das falhas nas juntas coladas. A Figura 3 ilustra como foram obtidos tais parâmetros, onde os valores de deformação estão divididos por 1000 e o coeficiente angular do trecho linear ou módulo de elasticidade, em GPa.

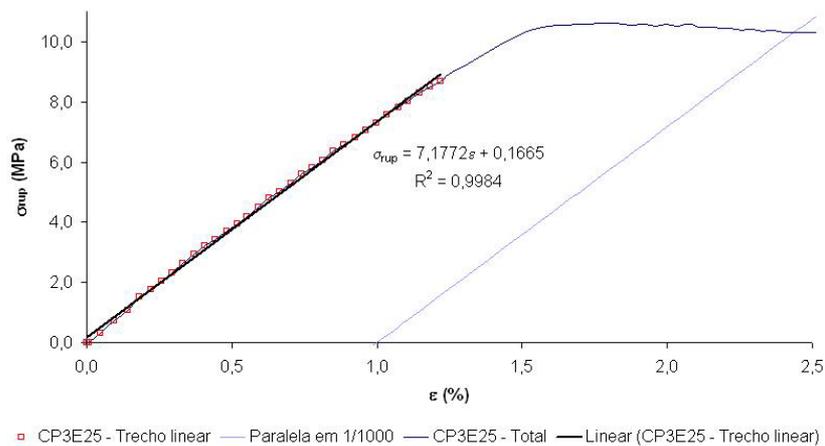


Figura 3: Obtenção do módulo elástico (E) e da tensão de escoamento (σ_{esc}).

Desta forma, de cada corpo-de-prova ensaiado foi obtida uma curva σ - ε . De cada curva foi possível a obtenção, nas temperaturas diversas, das tensões de escoamento (σ_{esc}), da tensão de ruptura (σ_{rup}), das deformações associadas a estas tensões (ε_{esc} e ε_{rup}), bem como do módulo de elasticidade (E). Dos parâmetros obtidos, na investigação dos efeitos da temperatura na resistência à tração e módulo de elasticidade, fez-se possível confirmar através deste ensaio o desempenho termomecânico dos adesivos utilizados em juntas coladas de tubulações PRFV.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 4 a 8 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial nos corpos-de-prova do adesivo para as diversas temperaturas avaliadas. São apresentados os valores médios da tensão de escoamento (σ_{esc}), da tensão de ruptura (σ_{rup}), da deformação de escoamento (ε_{esc}), da deformação de ruptura (ε_{rup}) e do módulo de elasticidade (E), além das respectivas dispersões em cada temperatura.

Na temperatura de 25°C, (veja Figuras 4 a 8), observa-se uma tensão média de ruptura (σ_{rup}) de 62,91 MPa, para um módulo de elasticidade médio (E) de 8,24 GPa e uma tensão média de escoamento (σ_{esc}) de 9,29 MPa. Em um primeiro momento, os valores de interesse são E , relacionado à rigidez, e σ_{esc} que fornece o limite a partir do qual tensões geram deformações irreversíveis no material. A deformação de escoamento (ε_{esc}) é aquela verificada quando se atinge a tensão de escoamento e, a deformação de ruptura (ε_{rup}) é aquela verificada quando se atinge a ruptura do corpo-de-prova. O elevado valor de E obtido à temperatura ambiente está de acordo com o resultado de análise de *DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analysis)* realizado neste adesivo por PESSANHA *et al.* [13], que obteve valor do módulo de cisalhamento de 1,89 GPa a 25°C. A deformação de escoamento obtida foi de 0,22% e a de ruptura foi de 1,47%, demonstrando que à temperatura ambiente o adesivo admitiu baixo nível de deformação a partir de seu escoamento.

Ainda para os resultados obtidos à temperatura ambiente (25°C), vale a pena ressaltar que σ_{esc} igual a 9,29 MPa significa adequada margem de segurança em relação ao carregamento admissível quando do uso deste adesivo em juntas coladas em tubulações de PRFV usadas em plataformas marítimas, que trabalha sob pressão de serviço de até 2,00 MPa para o diâmetro de 100 mm [14]. Entretanto, o valor obtido reporta-se à temperatura ambiente (25°C) e considera somente carregamento trativo. BRUM [3] via ensaios de cisalhamento de adesivos de resina estér-vinílicas curadas com poliamida efetuados a 25°C verificou tensão de ruptura entre 7,2 MPa e 8,6 MPa, também superiores a tensão de serviço apresentada.

Para a temperatura de 55°C, como pode ser visto nas Figuras 4 a 8, observa-se que o σ_{esc} reduz-se de 9,29 MPa (a 25°C) para 8,60 MPa (a 55°C). Contudo, devido à dispersão de resultados observada, pode-se dizer que não houve grande variação neste parâmetro. Já σ_{rup} reduziu-se drasticamente, passando de 62,91 MPa (a 25°C) para 15,91 MPa (a 55°C), indicando ainda uma situação de segurança para a temperatura de 55°C, como discutido no parágrafo anterior. Entretanto, E reduziu-se de 8,24 GPa (a 25°C) para 1,10 GPa (55°C), com uma queda de cerca de 8 vezes no módulo de elasticidade para este aumento da temperatura de ensaio. Esta queda também foi verificada nos resultados de *DMTA* obtidos por PESSANHA *et al.* [13] com relação ao módulo de cisalhamento, isto é, queda de 1,89 GPa a 25°C para 0,30 GPa a 50°C. Cabe lembrar que neste mesmo trabalho [13], a temperatura de transição vítrea deste adesivo foi de cerca de 55°C, indicando que este adesivo encontra limitação no seu uso acima de 55°C. No que tange aos valores obtidos para as deformações (ε_{esc} e ε_{rup}), verifica-se que ambas obtiveram valores superiores aos obtidos à temperatura ambiente.

Para as temperaturas de 85 e 115°C, como pode ser visto nas Figuras 4 a 8, observa-se uma queda drástica no σ_{esc} (2,37 MPa a 85 °C e 2,77 MPa a 115°C), como também na σ_{rup} e E , associado a um aumento em ε_{esc} e ε_{rup} .

Os resultados aqui apresentados indicam que, para o caso da aplicação deste adesivo em juntas coladas em tubulações de PRFV usadas em plataformas marítimas, o sistema pode colapsar pelo efeito conjugado de esforços de tração, de compressão ou de torção, caso a temperatura de trabalho exceda 55°C. Conforme explanado por FARIAS e BALBI [7] e SADA e CORTE [9], foi observado que estas tubulações em plataformas marítimas no Brasil estão submetidas à passagem de líquidos em seu interior com temperaturas de até 85°C e transientes térmicos de até 115°C. É importante observar que o fornecedor do adesivo não faz menção à aplicação deste em temperaturas acima da temperatura ambiente [14], o que é comum quando de sua aplicação em estações de tratamento de efluentes. Desta forma, este trabalho estabeleceu uma forma de avaliação do adesivo para aplicação em juntas coladas de tubulações PRFV quando a temperatura de trabalho encontra-se acima da temperatura ambiente.

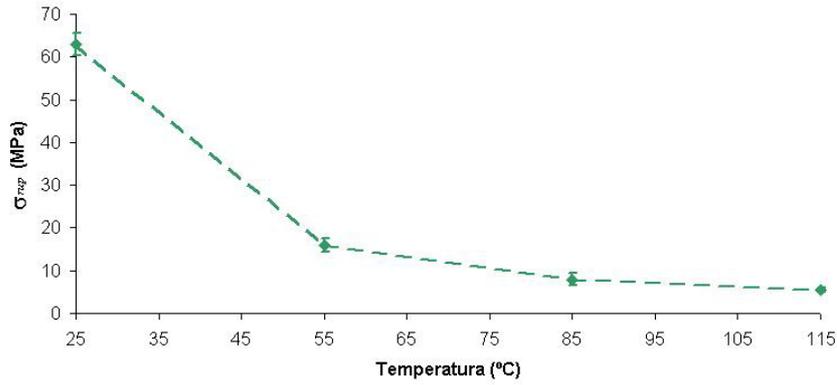


Figura 4: Variação da tensão de ruptura (σ_{rup}) do adesivo em função da temperatura e suas respectivas dispersões.

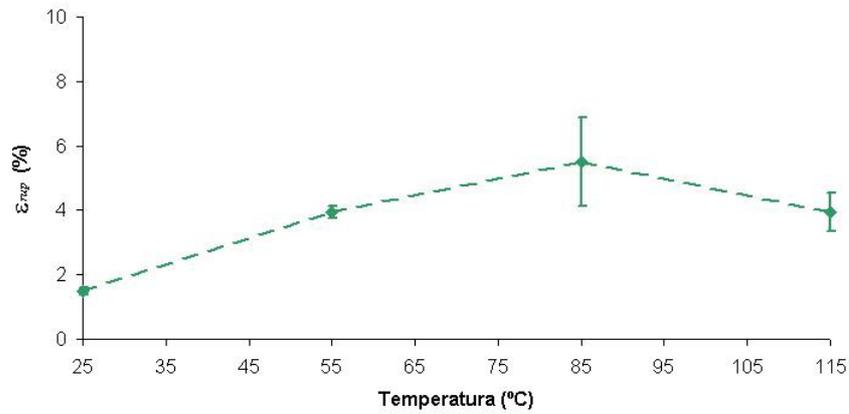


Figura 5: Variação da deformação de ruptura (ϵ_{rup}) do adesivo em função da temperatura e suas respectivas dispersões.

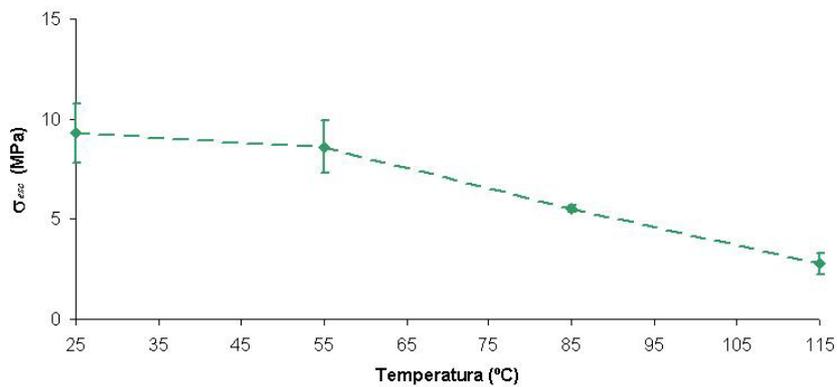


Figura 6: Variação da tensão de escoamento (σ_{esc}) do adesivo em função da temperatura e suas respectivas dispersões.

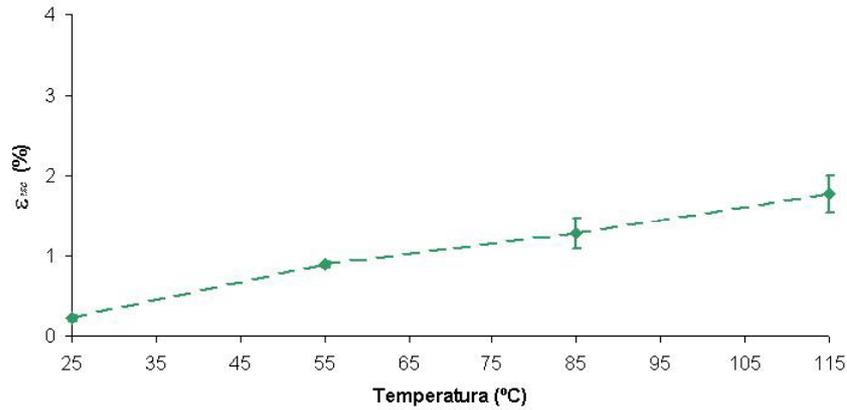


Figura 7: Variação da deformação de escoamento (ϵ_{esc}) do adesivo em função da temperatura e suas respectivas dispersões.

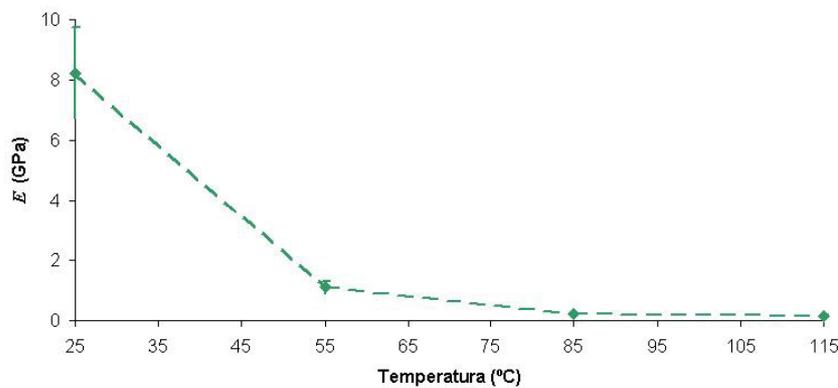


Figura 8: Variação do módulo de elasticidade (E) do adesivo em função da temperatura e suas respectivas dispersões.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos ensaios de tração uniaxial em corpos-de-prova de adesivo usado na colagem de tubos PRFV, foi verificada uma forte influência da temperatura nas propriedades mecânicas do adesivo. À temperatura ambiente, o adesivo possui excelentes propriedades mecânicas, que caem significativamente com o aumento da temperatura. Pode-se concluir que este pode operar com relativa segurança até 55°C, estando a partir desta temperatura sujeito a falhas, trincas, deformações excessivas e queda do módulo de elasticidade, que pode trazer como consequência o colapso da estrutura. Isto pode ser mais drástico ainda se estes adesivos unem tubulações de plástico reforçadas com fibras de vidro (PRFV) com pressurização interna (situação de serviço), pois o estado de tensões torna-se mais complexo, não apenas unidirecional, como no caso dos ensaios de tração realizados.

5 AGRADECIMENTOS

À Capes, Petrobras e Edra do Brasil, pelo apoio financeiro e pelo fornecimento dos materiais.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] SALIBI, Z., “Performance of reinforced thermosetting resin pipe systems in desalination applications: a long-term solution to corrosion - The Arabian Gulf example”, *Desalination*, v. 138, pp. 379-384, 2001.
- [2] GIBSON, A.G., *The cost effective use of fibre reinforced composites offshore*, University of Newcastle Upon Tyne, Health and Safety Executive (HSE), Newcastle, United Kingdom, 2003.
- [3] BRUM, M.C., *Metodologia de colagem com avaliação do comportamento de adesivos por meio de testes de tração*, dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- [4] EVANS, K.E., ALDERSON, K.L., “Low velocity transverse impact of filament-wound pipes: Part 2. Residual properties and correlations with impact damage”, *Composite Structures*, v. 20, pp. 47-52, 1992.
- [5] MARTENS, M., ELLYIN, F., “Biaxial monotonic behavior of a multidirectional glass fiber epoxy pipe”, *Composites: Part A*, v. 31, pp. 1001-1014, 2000.
- [6] JOSEPH, E., PERREUX, D., “Fatigue behavior of glass-fibre/epoxy-matrix filament wound pipes: tension loading tests and results”, *Composites Science and Technology*, v. 52, pp. 469-480, 1995.
- [7] FARIAS, O.L. e BALBI, D., “Eventos ocorridos com materiais de PRFV em plataformas da UN-BC”, *1.º Workshop da UN-RIO sobre PRFV*, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- [8] KNOX, E.M., LAFFERTY, S., COWLING, M.J, HASHIM, S.A., “Design guidance and structural integrity of bonded connections in GRE pipes”, *Composites Part A: applied science and manufacturing*, v. 32, pp. 231-241, 2001.
- [9] SADA, A.E., CORTE, J.S., “Experiência da UN-RIO com tubulações em FRP”, *1.º Workshop da UN-RIO sobre PRFV*, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- [10] ANÔNIMO, ASTM D 638, *Standard test method for tensile properties of plastics*, ASTM - American Society for Testing and Materials, 2003.
- [11] PILKEY, W.D., PETERSEN, J.E., CLARK, K.M., *Peterson’s stress concentration factors*, 2nd Edition, John Willey & Sons, 1997.
- [12] HIGGINS, R. A., *Propriedades e Estruturas dos Materiais em Engenharia*, Ed. Difel, 1982.
- [13] PESSANHA, M.C.R., DIAS, D.P., FILGUEIRA, M., PARANHOS, R.P.R, FARIAS, O.L., “Caracterização de tubo e adesivo nacional utilizado em juntas coladas de tubulações de PRFV aplicados em plataformas marítimas”, In: *62º Congresso Anual da ABM*, pp. 655-664, Vitória, Espírito Santo, 2007.
- [14] EDRA DO BRASIL, <http://edra.com.br>, acessado em maio de 2006.