

AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE TUBO DE COMPÓSITO SUBMETIDO A ALTA TEMPERATURA*

Lucas Coelho da Silva¹
Hélio Marques Kohler²

Resumo

Neste artigo, foi avaliado o comportamento do tubo frente ao aumento de temperatura. A medida dos valores das propriedades mecânicas do tubo foi determinada através do ensaio de achatamento, para um total de 17 amostras submetidas ao ensaio em condições normais. Através do ensaio foi possível calcular propriedades mecânicas como a tenacidade, limite de resistência à ruptura, limite de escoamento, deformação e módulo de elasticidade. O efeito da temperatura sobre as propriedades mecânicas do material foi estudado. A conclusão foi elaborada no sentido de avaliar de que forma a temperatura pode influenciar no comportamento do material e que características foram comprometidas devido a esse aumento de temperatura e posterior resfriamento.

Palavras-chave: Achatamento; Comportamento do material.

STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT OF COMPOSITE PIPE UNDER HIGH TEMPERATURE

Abstract

In this article, behavior of a tube submitted to temperature increase was evaluated. The measured values of the mechanical properties of the tube was determined by flattening test, for a total of 17 samples subjected to the test under normal conditions. Through the test, it was possible to calculate the mechanical properties such as toughness, tensile strength at break, yield strength, deformation and modulus of elasticity. The effect of temperature on mechanical properties was investigated. The conclusion was drawn to assess how the temperature can influence the behavior of the material and features that have been compromised due to this increase in temperature and subsequent cooling.

Keywords: Flattening; Material behaviour.

¹ Engenheiro Mecânico, Mestrando Pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, PhD em Eletroquímica pela Universidade de Montreal, Professor Adjunto, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

Compósitos são formados pela união de dois ou mais materiais com propriedades diferentes; desta forma obtendo-se propriedades únicas, que não seriam possíveis obter com os materiais que formam o compósito separadamente. Pode-se unir materiais poliméricos com metálicos, metálicos e cerâmicos ou até mesmo polímeros e cerâmicos; bem como pode-se unir materiais da mesma classe (Por exemplo: cerâmico com cerâmico). A aplicação desses materiais vai de artigos usados no dia a dia (raquetes de tênis, pranchas de surf, bicicletas de fibras de carbono) até aplicações nas indústrias de construção civil, aeroespaciais e de óleo e gás. Os materiais que compõe um compósito podem ser classificados como: Matriz e Reforços. As matrizes dão a estrutura ao material, podendo ser poliméricas, metálicas ou cerâmicas. Os reforços normalmente são os elementos que asseguram as propriedades químicas e/ou mecânicas do material [1].

Os compósitos são, na verdade, materiais empregados desde a antiguidade, mas os compósitos modernos têm emprego recente e seu desenvolvimento ocorreu da necessidade de novos materiais com propriedades especiais para diversas das novas tecnologias/aplicações necessárias para a corrida espacial e a guerra fria. Assim, materiais compósitos possuindo, por exemplo, uma combinação de boa resistência mecânica com tenacidade, substituíram os materiais convencionais (metais, polímeros e cerâmicas). Atualmente, a utilização de materiais compósitos tem a seguinte distribuição [2]: Transportes (31%), construção civil (19,7%), naval (12,4%), equipamentos elétrico/eletrônicos (9,9%), produtos de consumo (5,8%), mercado aeroespacial (0,8%). Esse trabalho tem por objetivo avaliar a integridade estrutural de uma tubulação de compósito de fibra de vidro após sua exposição a temperaturas causadas por chama indireta. A integridade do tubo foi avaliada por meio de ensaios de achatamento, comparando-se os resultados de um tubo novo com os resultados dos tubos expostos à temperatura. A simulação foi feita através de uma estufa onde foram colocadas as amostras para simular as condições de aumento de temperatura em um incêndio por exemplo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Ensaio de Achatamento

O ensaio de achatamento é um tipo de ensaio de compressão, normalmente usado em tubos. Esse ensaio é feito da seguinte forma: um segmento de tubo é colocado horizontalmente entre as placas da máquina universal de ensaio e aplica-se uma carga de compressão, achatando o corpo de prova de um determinado valor, Figura 1. A distância final entre as placas é reduzida pela aplicação da carga de compressão e essa medida deve ser registrada. O aparecimento ou não de fissuras, são avaliadas visualmente. Esse tipo de ensaio mecânico visa avaliar a ductilidade do material, pois quanto mais o duto se deforma sem trincas mais dúctil será o material. Os corpos de prova possuem o diâmetro (L_0) da tubulação de interesse e o quanto esse diâmetro deve ser reduzido é acordado entre as partes interessadas. Uma redução de 40% é usual para compósitos de matriz polimérica termorrígidos reforçados por fibras de vidro [3].

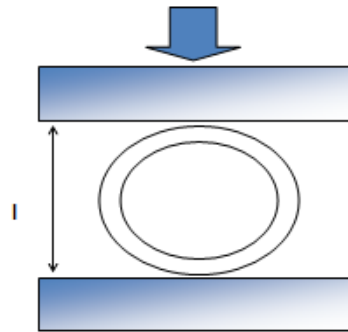


Figura 1. Representação esquemática do ensaio de achatamento

Um tubo de epóxi reforçado por fibra de vidro foi cortado em 17 partes iguais das quais 4 usou-se para realizar os primeiros testes, como mostram as figuras 2 e 3 abaixo:



Figura 2. Tubo cortado em 13 pedaços



Figura 3. Instrumento de medição (paquímetro)

A seguir a figura 4 da máquina de ensaio de achatamento usada para os testes:



Figura 4. Máquina de ensaio de achatamento

Através do ensaio de achatamento, é possível visualizar as primeiras trincas formadas no segmento de tubo e se medir a quantidade de força (figura 5) aplicada por unidade de tempo. A norma para esse ensaio é a ASTM 2412-11 [4]. Quando a carga é aliviada (figura 6) observa-se que há uma recuperação elástica e o tubo volta a um estado similar ao estado anterior do ensaio.



Figura 5. Visor de força (iniciando o achatamento)



Figura 6. Visor de força (força aliviada)

As amostras foram divididas em 3 grupos: 4 amostras como recebidas, 7 amostras para envelhecimento seguido de têmpera à água, e 6 amostras para envelhecimento seguido de resfriamento lento ao ar. O Aumento da temperatura foi simulado em uma estufa, como mostram a figuras 7,8 e 9 abaixo:



Figura 7. Estufa



Figura 8. Têmpera



Figura 9. Resfriamento lento

Para o ensaio, de achatamento, usa-se um software chamado DynaView Standard, como mostra a figura 10, onde é possível realizar relatórios de ensaio, ajustar variáveis como a unidade de força, aplicada que no caso foi Newtons (N), duração máxima do ensaio, velocidade do ensaio, unidade (mm), e também ajustar o formato

da seção transversal do objeto que no caso desse projeto se trata de um tubo de seção circular reta.

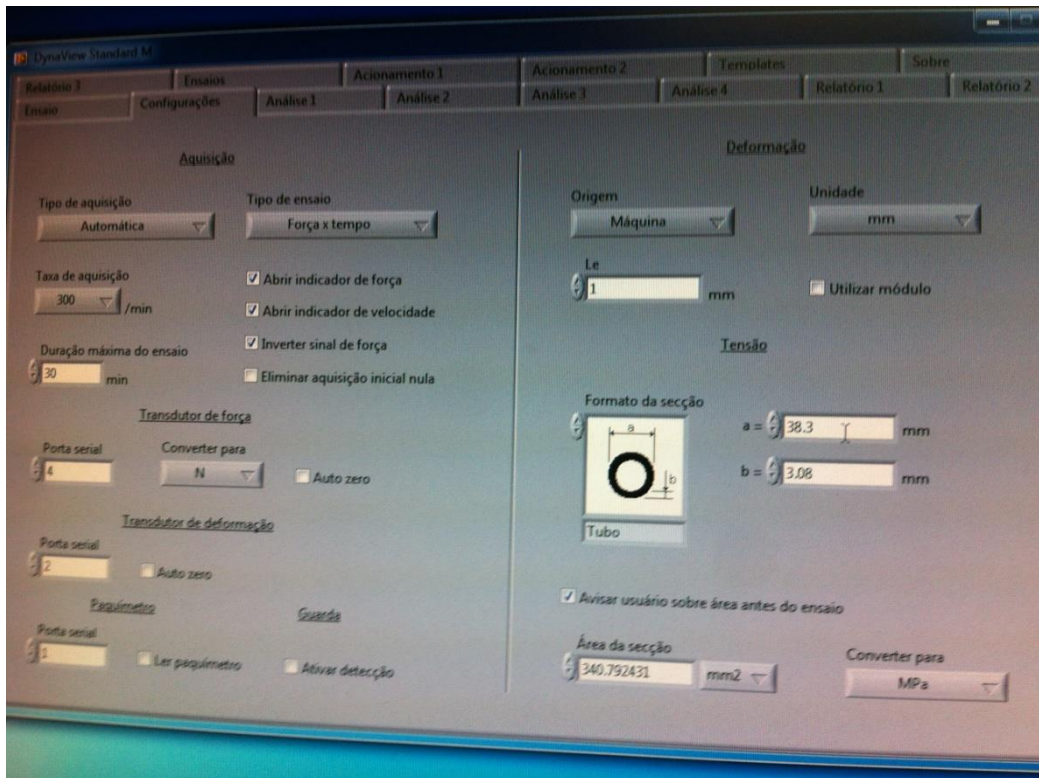


Figura 10. Software DynaView Standard

Paralelamente ao ajuste do formato da seção há a determinação das dimensões iniciais do tubo. A determinação das medidas iniciais e finais se faz necessária para futuros cálculos envolvendo alongamento e recuperação elástica. As dimensões iniciais são medidas por um instrumento muito usado nas aulas de tecnologia mecânica: o paquímetro. Nesse caso usou-se um paquímetro digital como o que foi mostrado na figura 3, para facilidade e rapidez da leitura das dimensões.

O segmento de tubo foi marcado a 0, 90, 180 e 270° à caneta preta para que pudesse ser feito a medida da espessura do tubo em 4 parte diferentes. Dessas 4 medidas tirou-se uma média que foi usada como base para os cálculos. Para a medição do diâmetro externo do tubo o procedimento é similar, porém são realizadas somente duas medições: de 0 a 180° e de 90 a 270°. Através dessas duas medidas, também tirou-se uma média para o diâmetro externo do tubo para efeito dos cálculos.

As leituras registradas no paquímetro digital em milímetros (mm) foram:

De= diâmetro externo, t = espessura da parede do tubo.

Assim que foram tomadas as medidas do tubo e posteriormente calculadas as médias, iniciou-se o software para a preparação do ensaio. Ajustando as variáveis de ensaio especificadas cima, temos que a velocidade de ensaio usada foi 10mm/min e a força registrada em Newtons (N).

Segue a figura 11, o primeiro corpo de prova pouco antes do início do ensaio. Para o segundo corpo de prova observou-se que o tubo trincou lateralmente ou a 90°C inicialmente e depois embaixo ou à 180° C, como pode-se observar na figura 12. A terceira amostra trincou somente à 180° C, como mostra a figura 13, e assim como as outras teve uma recuperação elástica, como mostrado na figura também.

Analogamente para a quarta e última amostra do primeiro grupo usada no ensaio, que trincou à 0 e 180º C como mostra a figura 14.

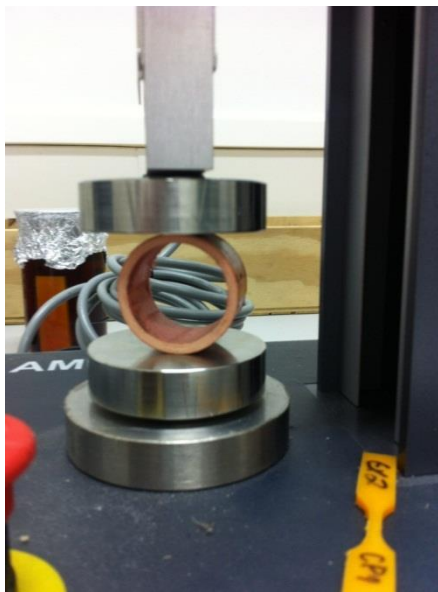


Figura 11. Primeiro corpo de prova

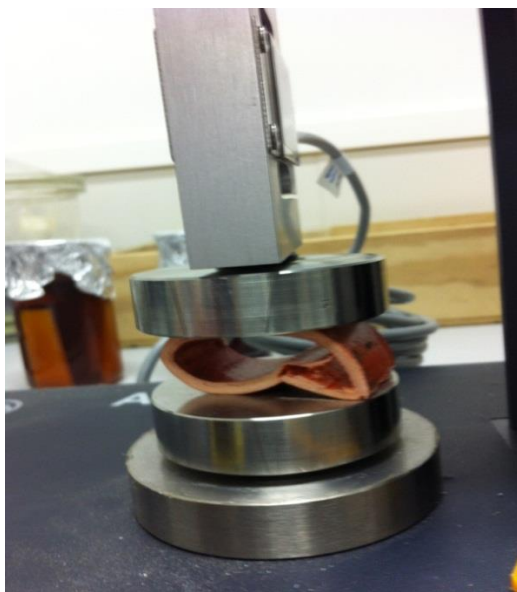


Figura 12. Segunda amostra no ensaio

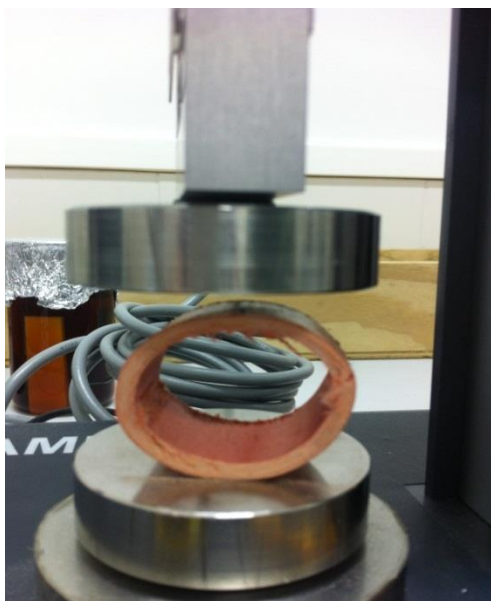


Figura 13. Terceira amostra

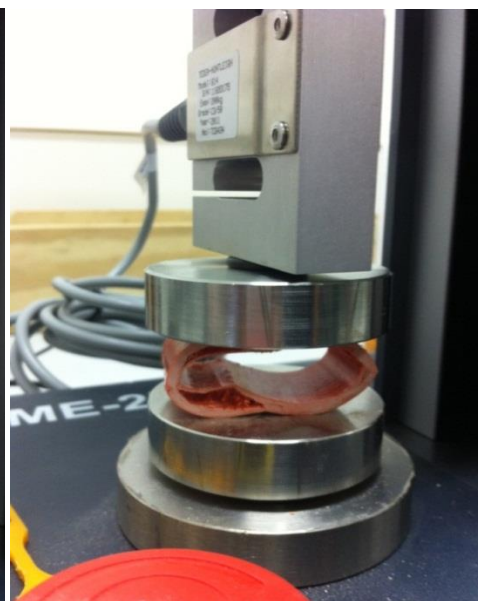


Figura 14. Última amostra do primeiro grupo

Os testes prosseguiram com as amostras restantes dos 2 últimos grupos até um total de 17 amostras. As propriedades mecânicas foram calculadas da seguinte forma:

Limite de escoamento:

Através da equação 1, pode-se calcular o limite de escoamento segundo a norma ASTM 2412-11:

$$\sigma = (\alpha \times P \times r_o) / (t^2 \times L) \text{ onde } \alpha = 1 \quad (1)$$

onde $\alpha = 1$ se $L < 2r_o$ ou $\alpha = 0,866$ se $L > 2r_o$

P é a carga do ensaio, α uma constante do material, enquanto que r_o é o raio externo do tubo e t e L são a espessura e comprimento do tubo respectivamente.

O valor do limite de escoamento também pode ser determinado traçando-se uma reta paralela à reta da região elástica, tendo origem no eixo x em 0,002 mm/mm de deformação que corresponde aos 0,2% de deformação plástica causada na amostra.

Rigidez do tubo e fator de rigidez

De acordo com a norma ASTM D2412-11 a rigidez do tubo ou pipe stiffness (PS) pode ser calculada pela fórmula 2:

$$PS = (F / \Delta y) \times C \quad (2)$$

Onde Δy é a diferença do diâmetro comprimido pela placa em determinado instante e o diâmetro do tubo antes do ensaio. Logo, $\Delta y = \Delta d$. O "C" seria apenas um fator de correção da fórmula definido como (3):

$$C = (1 + \Delta y / 2d_i)^3 \quad (3)$$

onde d_i = diâmetro interno do tubo. Reescrevendo a fórmula, temos a equação 4:

$$PS = (F / \Delta d) \times (1 + \Delta d / 2d_i)^3 \quad (4)$$

A média feita entre 3 pontos distintos da reta na parte elástica do gráfico foi 69,38N/mm para a razão $(F / \Delta d)$.

Resiliência:

Utilizando o método do cálculo da área do gráfico $\sigma \times \epsilon$ sobre a região elástica.

Tensão de ruptura

A tensão de ruptura também pode ser calculada de modo análogo ao limite de escoamento, segundo a norma ASTM 2412-11, pela equação 1. Porém, essa deve ser calculada no ponto de ruptura do material. O limite de ruptura é o ponto de carga máxima após o limite de escoamento nos gráficos.

Deformação de ruptura:

É a deformação total da amostra no ponto onde ela fraturou. O valor pode ser determinado calculando a razão entre a contração do diâmetro do tubo onde a amostra rompe e o diâmetro inicial do corpo de prova, pela equação 5:

$$\epsilon = \Delta d / d_o \quad (5)$$

Tenacidade:

É a área total do gráfico $\sigma \times \epsilon$ até o ponto de fratura que representa a tenacidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se a seguir um gráfico de ensaio para uma amostra de cada grupo como exemplo.

Em primeira mão o gráfico da primeira amostra como recebida apresentou o seguinte formato (15):

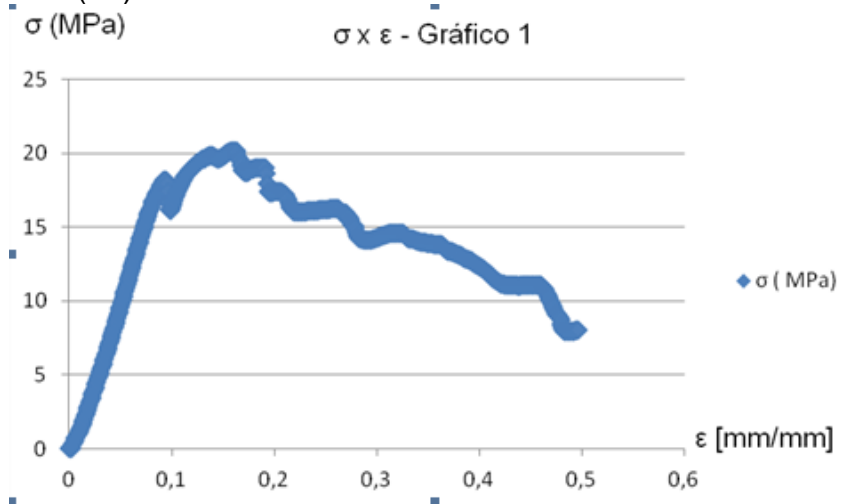


Figura 15. Gráfico da amostra 1

A primeira amostra do grupo 2 que sofreu têmpera, apresentou o seguinte formato de gráfico pela figura 16:

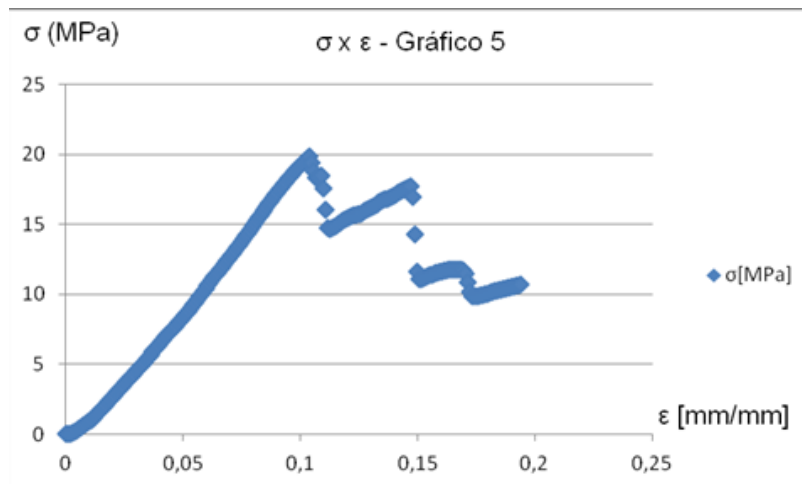


Figura 16. Amostra 5

Enquanto que para a primeira amostra do grupo das resfriadas ao ar, pela figura 17:

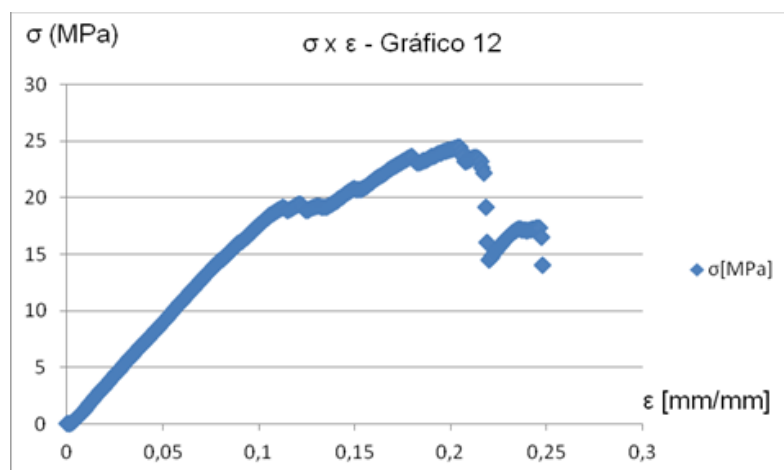


Figura 17. Amostra 12

Fazendo-se a média das principais propriedades calculadas nos 3 grupos do total de 17 amostras, considerando-se o desvio padrão e variância, obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 1. Comparação das Amostras

Situação do tubo	Resiliência (MPa)	Tenacidade (MPa)	Rigidez do tubo (N/mm) e fator de rigidez (N.mm ²)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de ruptura (MPa)
Envelhecimento + têmpera	Aumentou 25%	Aumentou 12%	Aumentaram 22% e 3% respectivamente	Aumentou 3%	Aumentou 13%
Envelhecimento + resfriamento ao ar	Aumentou 35%	Diminuiu 29%	Aumentaram 43% e 20% respectivamente	Aumentou 16%	Aumentou 37%

4. CONCLUSÃO

Percebeu-se um aumento considerável do limite de ruptura das amostras envelhecidas resfriadas ao ar e também um aumento menor para as que sofreram têmpera. Já o tempo para as amostras romperem diminuiu consideravelmente.

As amostras envelhecidas romperam com um grau de deformação menor em relação às amostras não-envelhecidas. Logo elas se tornaram menos dúcteis.

O tempo de escoamento aumentou ligeiramente para as amostras resfriadas bruscamente enquanto que para os tubos resfriados lentamente diminuiu ligeiramente. Pode-se dizer que não houve uma mudança significativa.

O limite de escoamento teve um aumento pequeno e não muito significativo para a têmpera e um aumento maior para o resfriamento ao ar. Houve um aumento maior da rigidez e do fator de rigidez para as amostras envelhecidas ao ar do que para as envelhecidas seguidas de têmpera.

A resiliência teve um pequeno aumento que pode-se dizer que não houve mudança significativa.

A tenacidade aumentou ligeiramente para a têmpera e diminuiu para o resfriamento ao ar. Porém, observou-se que a última amostra temperada ensaiada apresentou uma tenacidade muito superior às outras, o que fez a média aumentar e apresentar valor um pouco maior à média das amostras não-envelhecidas. Se essa última amostra temperada não fosse usada nos ensaios, o resultado seria uma média igual à média das amostras resfriadas lentamente. Em uma situação real, onde temos um aumento de temperatura causado por uma fonte externa, esse estudo é importante pois é possível identificar quais propriedades mecânicas foram comprometidas, avaliando-se assim o comportamento do material. Logo, o profissional é capaz de avaliar se esse decréscimo nos valores das propriedades é capaz de comprometer o bom funcionamento do tubo, de acordo com o nível que cada aplicação exige.

REFERÊNCIAS

- 1 Callister, Jr., W.D. – Ciência e Engenharia de Materiais. Uma Introdução, 7ª Edição, Editora LTC, 2012.
- 2 Ventura, Ana Mafalda F.M.. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. C.Tecn. Mat.[online]. 2009, vol.21, n.3-4, pp. 10-19.
- 3 d’Almeida, J.R.M. – Apostila do curso de Materiais Compósitos (MET 2840), Departamento de Engenharia de Materiais, PUC-Rio, 2013.
- 4 Norma ASTM D2412-11 – Standard Test Method for Determination External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading.