

ANÁLISE TÉRMICA DE TUBO SUBMETIDO A AUMENTO DE TEMPERATURA POR CHAMA INDIRETA*

Lucas Coelho da Silva¹
Hélio Marques Kohler²

Resumo

Também chamado de PRFV, esse tipo de material é usado em diversos segmentos da indústria e a escolha por esse material é devido ao aprimoramento de suas características ou propriedades se comparados com os metais, cerâmicos ou polímeros isoladamente. O tempo médio de um incêndio foi estimado fazendo-se um levantamento de incêndios de média a grandes proporções e esse tempo usado para calcular a temperatura média do incêndio para materiais hidrocarbonetos. O tubo tem sua temperatura limitada em 200°C, temperatura de degradação do polímero. As amostras foram envelhecidas no forno a uma temperatura próxima da deterioração e depois resfriadas à água e ao ar. Foi comprovado através da análise da transferência de calor que quanto mais perto o material estiver da fonte de calor, maior vai ser a energia incidente sobre o material. O estudo foi feito considerando uma fonte pontual de calor. Além disso, é feita uma análise do tempo que uma estrutura feita do mesmo material levaria para atingir a temperatura de degradação, descartando seu uso posterior.

Palavras-chave: PRFV; Fonte de calor pontual.

THERMAL ANALYSIS OF TUBE SUBJECTED TO TEMPERATURE RAISE CAUSED BY INDIRECT FLAME

Abstract

Also named PRFV, the choice of this material is due to the enhancement of its characteristics or properties when compared with metals, ceramics, or polymers individually. A fire average time was estimated regarding fire occurrences in small and big areas so that its time could be used to calculate the fire average temperature for hydrocarbon materials. Pipe maximum temperature is 200°C, polymer degradation temperature. Samples were thermally treated at oven into a temperature nearby degradation and afterward cooled in water and air. Through heat transfer analysis, it was possible to prove that the more a material is close from heat source, bigger will be the incident energy upon material. Its study was done considering a point heat source. Besides that, an analysis is done about the time that a structure made from the same kind of material would take to hit degradation temperature, discarding usage later.

Keywords: PRFV; Point heat source.

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

Devido ao aumento do emprego de compósitos em diversas áreas industriais aumentou o interesse de se caracterizar como uma estrutura fabricada em compósito de matriz polimérica se comporta quando for submetida a alta temperatura, causada por um incêndio em sua vizinhança. Em situações como essa é importante avaliar a integridade dessa estrutura após sua exposição a alta temperatura, visando determinar se há segurança em mantê-la em operação. Como nas indústrias de óleo e gás há uma maior probabilidade de que ocorram acidentes envolvendo incêndios, é importante saber até que faixa de temperatura e qual o tempo médio que uma estrutura em compósito pode resistir. Dessa forma será possível compreender os riscos que essa estrutura pode vir a oferecer. Este artigo visa simular o aumento de temperatura no compósito através de tratamento térmico de envelhecimento, analisar suas consequências e calcular o tempo que a tubulação aguentaria sem degradar.

De um modo geral os compósitos apresentam algumas propriedades vantajosas em comum, a saber [1]: elevada rigidez, elevada resistência a corrosão e condutividade térmica, estabilidade estrutural e fácil moldagem, baixa densidade, maior durabilidade em relação a outros materiais. Entretanto, os compósitos mais comuns, que são fabricados com matrizes poliméricas, apresentam algumas desvantagens, como sua baixa tolerância a altas temperaturas [2]. Dentre os compósitos de matriz polimérica, os reforçados por fibras de vidro são os mais empregados. Esses compósitos podem ser aplicados nas carrocerias de automóveis, em tubulações na indústria de óleo e gás e até mesmo em pisos industriais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Fez-se um tratamento térmico de envelhecimento no qual 6 amostras foram resfriadas a temperatura ambiente ou 25°C, e 7 amostras foram resfriadas bruscamente com água.

Para isso utilizou-se 7 corpos de prova para o envelhecimento seguido de têmpera e 6 corpos de prova para o envelhecimento seguido de resfriamento natural. Por têmpera entende-se que houve um resfriamento brusco do material ou objeto por um agente ou fluido externo. No caso do projeto, a água a temperatura ambiente (25°C). Por resfriamento lento entende-se que as amostras são submetidas a exposição ao ar ambiente e são resfriadas pela convecção do ar, que é a troca térmica em que há a presença de um fluido.

Inicialmente a temperatura no interior do forno é controlada com um termopar até chegar a temperatura que se quer no caso próximo a 200°C, uma temperatura em que não haja a deterioração do material em questão.

Foi simulado e controlado com o termopar a temperatura de aproximadamente 185°C variando entre 184,8 e 185,7°C.

Após a temperatura estabilizar em 185°C, as 13 amostras restantes são postas cuidadosamente dentro do forno e assim mantidas durante 5 horas, que é o tempo médio de um incêndio de médias proporções, para se realizar o envelhecimento a fim de se simular as condições em um incêndio. O resfriamento seguido de têmpera foi simulado em um balde d'água com 17 cm de altura por 23 cm de diâmetro. Assim as amostras foram resfriadas por um volume de água aproximadamente igual a: 7063 cm³.

Por outro lado, no resfriamento ao ar as amostras são tiradas do forno e imediatamente postas para resfriar ao ar livre. Segue as ilustrações 1,2,3 e 4 abaixo:



Figura 1. Estufa na qual foi realizado o tratamento térmico



Figura 2. Termopar



Figura 3. Amostras sendo resfriadas bruscamente lentamente ao ar



Figura 4. Amostras sendo resfriadas lentamente ao ar

Através da lei da radiação, será possível calcular uma distancia mínima, onde a temperatura do incêndio não danificará a matriz polimérica. De acordo com a lei da radiação [3], a transferência de calor varia inversamente com o quadrado da distância à fonte. Sendo assim pela equação 1:

$$E_1/E_2 = D_2^2/D_1^2 \quad (1)$$

onde E_1 e E_2 = energia calorífica recebida nos pontos 1 e 2; e D_1 e D_2 = distância dos pontos 1 e 2.

Nesse caso será determinada a energia liberada pela gasolina. No entanto temos que a distancia mínima ($\delta_{\text{admissível}}$) para estruturas é de 20m² e a taxa de calor liberada é 43700 KJ/kg, de acordo com a tabela 1 abaixo [4,5]:

Tabela 1. Taxa de queima para líquidos perigosos [4,5]

Liquid	Mass Burning Rate, \dot{m}'' kg/m ² /s	Heat of Combustion kJ/kg	HRR Per Unit Area, \dot{q}''_f kW/m ²	Screen ASD		Reference
				Struct. m	People m	
Acetic Acid	0.033	13,100	400	10	90	Ref. [10]
Acetone	0.041	25,800	1,100	10	250	Ref. [9]
Acrylonitrile	0.052	31,900	1,700	15	390	Ref. [10]
Amyl Acetate	0.102	32,400	3,300	30	750	Ref. [10]
Amyl Alcohol	0.069	34,500	2,400	20	550	Ref. [10]
Benzene	0.048	44,700	2,100	20	480	Ref. [9]
Butyl Acetate	0.100	37,700	3,800	35	860	Ref. [10]
Butyl Alcohol	0.054	35,900	1,900	15	430	Ref. [10]
m-Cresol	0.082	32,600	2,700	25	620	Ref. [10]
Crude Oil	0.045	42,600	1,900	15	430	Ref. [9]
Cumene	0.132	41,200	5,400	50	1220	Ref. [10]
Cyclohexane	0.122	43,500	5,300	45	1200	Ref. [10]
No. 2 Diesel Fuel	0.035	39,700	1,400	12	320	Ref. [9]
Ethyl Acetate	0.064	23,400	1,500	15	340	Ref. [10]
Ethyl Acrylate	0.089	25,700	2,300	20	530	Ref. [10]
Ethyl Alcohol	0.015	26,800	400	10	90	Ref. [9]
Ethyl Benzene	0.121	40,900	4,900	40	1100	Ref. [10]
Ethyl Ether	0.094	33,800	3,200	30	730	Ref. [10]
Gasoline	0.055	43,700	2,400	20	550	Ref. [9]
Hexane	0.074	44,700	3,300	30	750	Ref. [9]
Heptane	0.101	44,600	4,500	40	1000	Ref. [9]
Isobutyl Alcohol	0.054	35,900	1,900	15	430	Ref. [10]
Isopropyl Acetate	0.073	27,200	2,000	20	460	Ref. [10]
Isopropyl Alcohol	0.046	30,500	1,400	15	320	Ref. [10]
JP-4	0.051	43,500	2,200	20	500	Ref. [9]
JP-5	0.054	43,000	2,300	20	530	Ref. [9]
Kerosene	0.039	43,200	1,700	15	400	Ref. [9]
Methyl Alcohol	0.017	20,000	340	10	80	Ref. [9]
Methyl Ethyl Ketone	0.072	31,500	2,300	20	530	Ref. [10]
Pentane	0.126	45,000	5,700	50	1300	Ref. [10]
Toluene	0.112	40,500	4,500	40	1000	Ref. [10]
Vinyl Acetate	0.136	22,700	3,100	25	700	Ref. [10]
Xylene	0.090	40,800	3,700	30	850	Ref. [9]

Sendo assim poderemos definir E_1 sendo ($\Phi_{\delta_{\text{ad}^*}}^{\text{gasol}}$), E_2 sendo a taxa de energia liberada pela gasolina, D_2 seria um distancia simulada (δ^*) e D_1 e a distancia admissível ($\delta_{\text{admissível}}$) $E_1/E_2 = D_2^2/D_1^2$, chegando dessa forma na seguinte equação 2:

$$\Phi_{\delta_{\text{ad}^*}}^{\text{gasol}} = \Phi_{\delta_{\text{admissível}}}^{\text{gasol}} \times (\delta^* / \delta_{\text{admissível}})^2 \quad (2)$$

A seguir um esquema básico mostrando a relação entre o incêndio e a tubulação, figura 5:

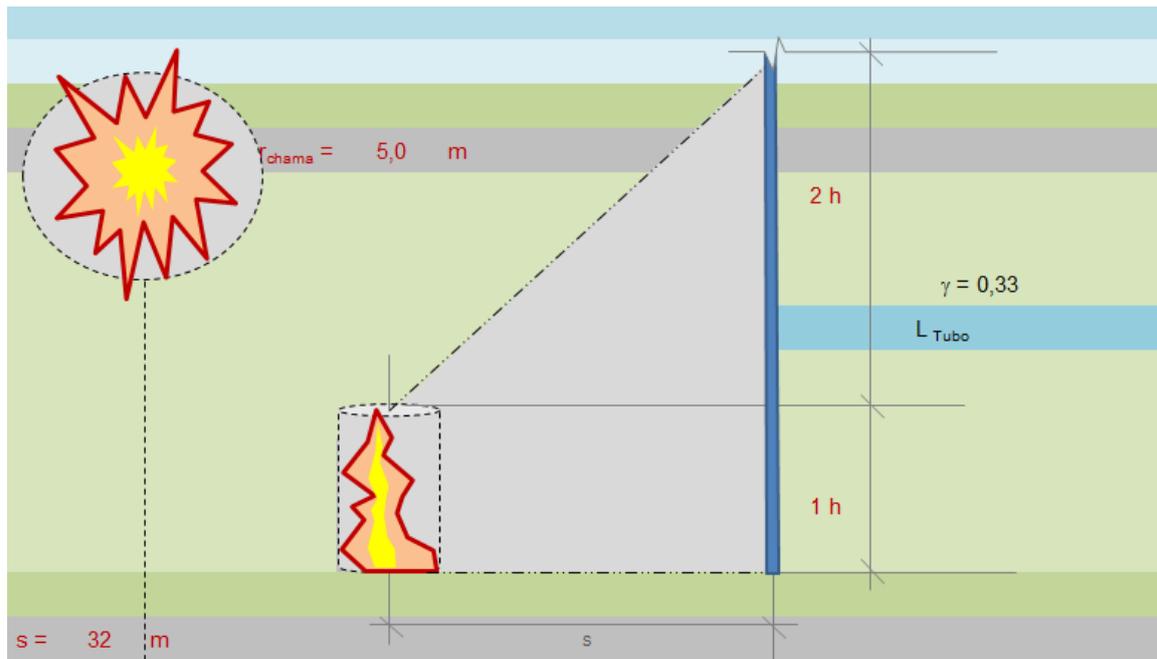


Figura 5. Relação do incêndio e a tubulação

Desta forma o fator de aspecto para cilindros paralelos de raios diferentes e dado pela equação 3:

$$F_{\text{aspecto Tubo}} = (1/2\pi) \{ \pi + [C^2 - (R+1)^2]^{1/2} - [C^2 - (R-1)^2]^{1/2} + (R-1) \cos^{-1}[(R/C) - (1/C)] - (R+1) \cos^{-1}[(R/C) + (1/C)] \} \quad (3)$$

Onde podemos escrever algumas relações pelas equações 4,5,e 6:

$$R = r_{\text{chama}} / r_{\text{Tubo}} \quad (4)$$

$$S = s / r_{\text{Tubo}} \quad (5)$$

$$C = 1 + R + S \quad (6)$$

É importante determinarmos o fluxo de calor radiante de um gás a uma superfície adjacente. Desta forma determinaríamos a radiação emitida por uma massa de gás de temperatura T a um elemento de superfície dA que esta localizada no centro do hemisfério. Tal fluxo pode ser determinado pela equação 7:

$$E_g = \epsilon_g \sigma T_g^4 \quad (7)$$

Em particular ϵ_g foi correlacionado em termos da temperatura do gás e a pressão do mesmo. Para avaliar a emissividade numa região onde a pressão total não seja de 1 atm devemos multiplicar por um fator de correção C_w como veremos a seguir. Sendo assim uma emissividade total do gás pode ser expressa pela equação 8:

$$\alpha_{\text{Gás}} = \alpha_{\text{água}} + \alpha_{\text{dióxido carbono}} - \Delta\alpha \quad (8)$$

Onde $\Delta\alpha$ é um fator de correção
Para absorvância da água temos a equação 9:

$$\alpha_{\text{água}} = C_{\text{água}} (T_{\text{Gas}}/T^*_{\text{Tubo}})^{0,45} \epsilon_{\text{água}} \quad (9)$$

Para absorvância do dióxido de carbono temos pela equação 10:

$$\alpha_{\text{dióxido de carbono}} = C_{\text{dióxido de carbono}} (T_{\text{Gas}}/T^*_{\text{Tubo}})^{0,65} \varepsilon_{\text{dióxido de carbono}} \quad (10)$$

Os valores das constantes ($C_{\text{água}}$ e $C_{\text{Dióxido de carbono}}$) são tirados dos gráficos abaixo onde se vê por C_w nas figuras 6 e 7 abaixo:

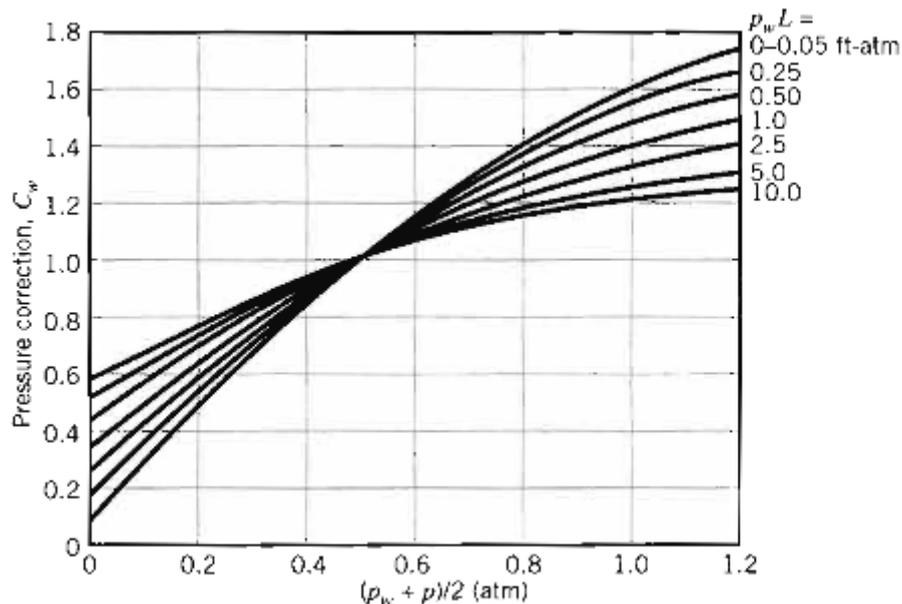


Figura 6. Fator de correção para a emissividade da água

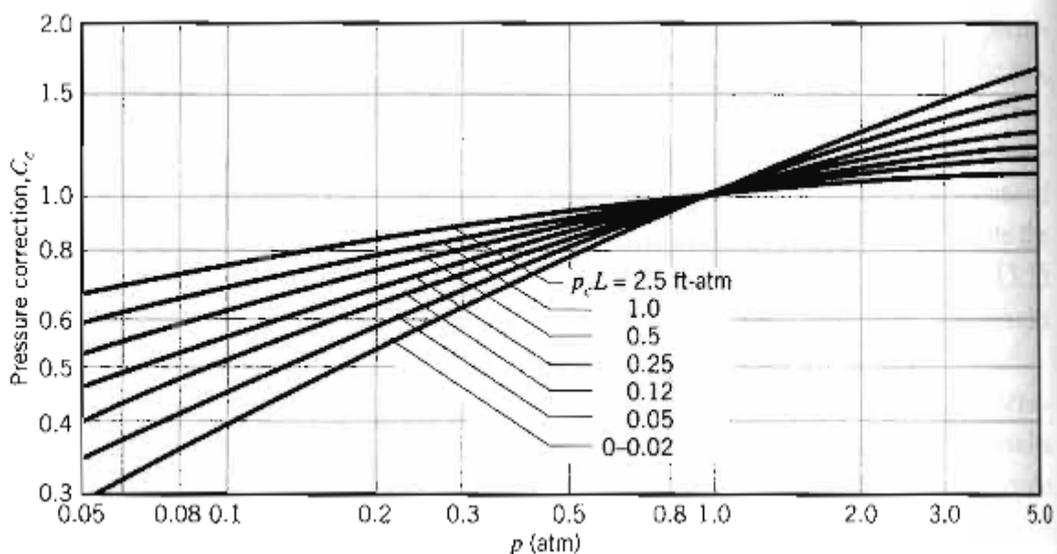


Figura 7. Fator de correção para a emissividade do carbono

Calculando o fluxo de calor ao atingir um segmento de parede, se a camada de gás for transparente o fluxo da superfície j até a superfície k será dada pela fórmula 11:

$$[q]_{j \rightarrow k} = (q_{\text{fire total}} W_{j \rightarrow k}) / (4\pi A_{j \rightarrow k}) \quad (11)$$

Onde q_{fire} é a energia liberada pelo fogo e $W_{j \rightarrow k} / (4\pi A_{j \rightarrow k})$ é a fração da energia que deixa a superfície j e vai até k configurando um fator. Dessa forma podemos reescrevê-la como (12) e (13):

$$q_{\text{incêndio} \rightarrow \text{Tubo}} = F_{\text{efetivo}} \times \alpha_{\text{Tubo}} \times (\text{Energia do incêndio}) \quad (12)$$

$$\text{onde } F_{\text{efetivo}} = \gamma_{\text{distribuição vertical}} \times F_{\text{aspecto Tubo}} \quad (13)$$

Agora analisando o fluxo de calor ao atingir um segmento de parede devido à emissão de uma camada de gás, tem-se que a energia emitida pelo gás ao longo do segmento é (12):

$$q_{\text{gás}} = \alpha_{j-k} \sigma T^4 \quad (14)$$

Podemos reescrevê-la da seguinte maneira(13) e (14):

$$q_{\text{Tubo} \rightarrow \text{gás}} = q_{\text{Tubo} \rightarrow \text{gás}}^* \times T_{\text{Tubo}}^4 \quad (15)$$

$$\text{onde, } q_{\text{Tubo} \rightarrow \text{gás}}^* = \alpha_{\text{Gás}} \times \epsilon_{\text{Tubo}} \times \sigma_{\text{SB}} \quad (16)$$

Agora, precisa-se saber o tempo que o tubo leva para atingir 185°C através das equações 15 a 22:

$$V_{\text{Tubo}} / L = \pi/4 \times (\varnothing_{\text{ext Tubo}}^2 - \varnothing_{\text{int Tubo}}^2) \quad (17)$$

$$\rho_{\text{Tubo}} = m/v \quad (18)$$

$$M_{\text{Linear Tubo}} = (V_{\text{Tubo}} / L) \times \rho_{\text{Tubo}} = \quad (19)$$

$$C_{p \text{ Tubo}} = 2,578 \text{ kJ/kg/K}$$

$$\Delta T = (T_{\text{máximo}} - T_{\text{ambiente}}) \quad (20)$$

$$Q'_{\text{absorvido Tubo}} = M_{\text{Linear Tubo}} \times C_{p \text{ Tubo}} \times \Delta T \quad (21)$$

$$A_{\text{Tubo}} / L = \pi \times \varnothing_{\text{ext Tubo}} = \quad (22)$$

$$Q_{\text{absorvido Tubo}} = Q'_{\text{absorvido Tubo}} \times (A_{\text{Tubo}} / L) \quad (23)$$

$$\text{Tempo } \Delta t = Q_{\text{absorvido Tubo}} / q_{\text{incêndio} \rightarrow \text{Tubo}} \quad (24)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Obtemos os principais resultados: foi obtido um gráfico representado pela figura 8, no qual se relaciona a distância em função da energia de incêndio liberada, e pode-se observar que conforme a distancia aumenta, a energia de incidência diminui.

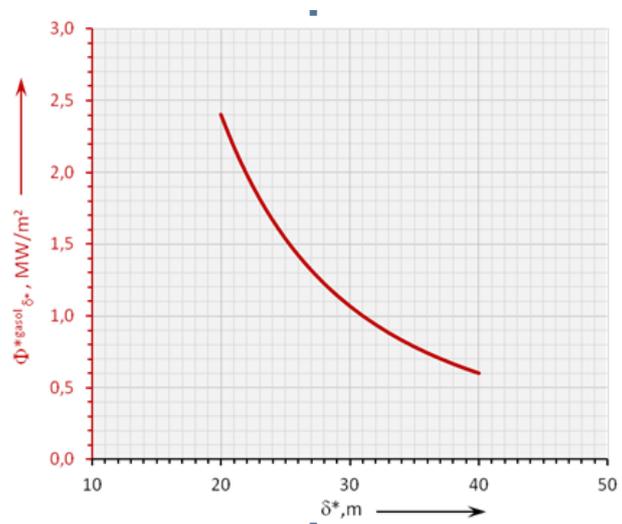


Figura 8. Energia incidente vs distância

Através das equações 2, 12, 15 será possível determinar a temperatura na qual o tubo está sendo submetido ao adotarmos diferentes distâncias. Primeiramente, foi adotado a distância de 32m na qual a energia incidente mostrada na tabela 2 e igual a 939 kW/m². (Energia do incêndio, 32m) = 939 kW/m². Desta forma chegamos a uma temperatura de 185,2°C no tubo em 10,47 minutos. Sendo assim é possível variarmos a distância podendo desta forma encontrar diferentes temperaturas no tubo a diferentes distâncias.

Tabela 2. Relação de distancias x temperatura do tubo x energia liberada

δ^* m	$\Phi_{\text{gasol},\delta^*}$ MW/m ²	$Q_{\text{incêndio} \rightarrow \text{Tubo}}$ kW/m ² _{Tubo}	T _{Tubo} °C
20	2404	5,1826	307
21	2180	4,7008	293
22	1986	4,2831	280
23	1817	3,9188	267
24	1669	3,5990	256
25	1538	3,3169	245
26	1422	3,0666	235
27	1319	2,8437	226
28	1226	2,6442	217
29	1143	2,4650	208
30	1068	2,3034	200
31	1000	2,1572	192
32	939	2,0244	185
33	883	1,9036	178
34	832	1,7933	171
35	785	1,6923	165
36	742	1,5996	159
37	702	1,5143	153
38	666	1,4356	147
39	632	1,3629	142
40	601	1,2956	137

Sabendo que a temperatura de degradação da matriz polimérica e de entorno de 200°C temos 30 metros como a distancia critica, já que numa distancia menor teríamos uma temperatura superior a 200°C, desta forma a matriz polimérica degradaria impossibilitando o uso dessa tubulação.

A figura 9 nos mostra o ponto onde encontramos a distância crítica na qual qualquer distância abaixo dela não poderá ser considerada vide que a matriz polimérica estaria degradada.

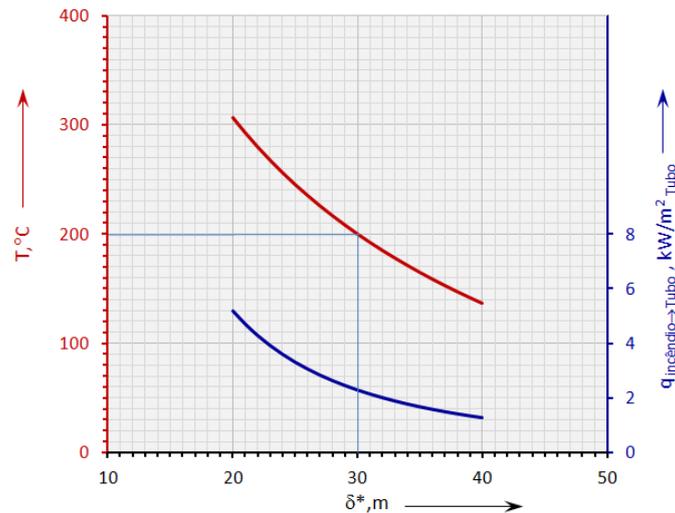


Figura 9. Distancia vs Temperatura vs Energia

A figura abaixo(10) mostra a diferença na coloração do tubo entre uma amostra que sofreu têmpera à esquerda e outra que sofreu resfriamento ao ar à direita. Para as amostras que sofreram resfriamento ao ar, também observou-se visualmente porosidade. Além de muitos poros, muitos defeitos como trincas. Foi mais visível nas amostras tratadas os defeitos sendo que a cor do tubo que era vermelho alaranjado tornou-se mais escura.



Figura 10. Comparação entre amostras

4. CONCLUSÃO

A energia incidente no tubo diminui conforme a distância para a fonte de calor aumenta.

A temperatura do tubo diminui conforme a distância para a fonte de calor aumenta.

A mudança nas propriedades mecânicas é válido para um envelhecimento à aproximadamente 185°C. O tubo leva 10,47 minutos para atingir essa temperatura. Como se sabe a degradação da matriz polimérica é de entorno de 200°C, e à uma distância menor que 30 metros da fonte de calor o tubo degradaria após um tempo.

A coloração das amostras tornou-se mais escura, sendo mais escuras para as amostras resfriadas ao ar do que para aquelas temperadas à água.

REFERÊNCIAS

- 1 Anabela Mendes Moreira – Departamento de Engenharia Civil (ESTT- Escola Superior de Tecnologia de Tomar) - www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2932__Compositos_MC1.pdf
- 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 INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6ª.Ed. Rio de janeiro, Ed. LTC, 2008.
- 4 V. Babrauskas. SFPE Handbook, chapter Burning Rates. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2nd edition, 1995
- 5 Fire Protection Handbook. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 18th edition, 1997.