

## **A TEMPERATURA E FLUXO DE CALOR EM UMA SITUAÇÃO DE INCÊNDIO E SEU IMPACTO NOS BOMBEIROS.**

**George Cajaty Barbosa Braga**, Ph.D., Major QOBM/Compl. Físico. Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal, Brasília, DF, Brasil. e *Building and Fire Research Laboratory - National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg, MD, EUA.

### **Resumo**

A compreensão da dinâmica de um incêndio é essencial para a atividade de prevenção, combate e investigação de incêndios. No combate ao incêndio, aliada a esta compreensão, é extremamente importante que o bombeiro tenha o conhecimento das condições que podem existir no ambiente em que ele estará trabalhando, de forma que ele possa ter uma noção mais clara dos riscos a que ele estará submetido. Com o sistema de treinamento de combate a incêndio atualmente utilizado no Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal é possível simularmos situações próximas a um incêndio real, mas em condições de controle e medição. Desta forma, foi possível monitorar, por meios de sensores, a temperatura e fluxo de calor a que os bombeiros estão submetidos quando em treinamento. Nas condições de treinamento, foi verificado que os bombeiros podem estar submetidos a temperaturas de até 200°C no lado externo da roupa de proteção e de 80° C dentro da roupa de proteção, podendo estar submetidos a picos de fluxo de calor próximos a 8 kW/m<sup>2</sup>. Estes dados são importantes na avaliação e criação de normas sobre as roupas de proteção, bem como das máscaras de proteção respiratória.

### **Introdução**

Apesar da conscientização dos riscos inerentes à área de combate a incêndio ter melhorado consideravelmente nas últimas décadas, muitas questões sobre como aumentar a segurança do bombeiro por meio de melhores equipamentos de proteção individual ainda não foram respondidas. Isso faz com que este assunto ainda seja largamente pesquisado em grandes centros pelo mundo, inclusive com o objetivo de melhorar as normas existentes, ou mesmo criar novas normas. E só com um maior conhecimento de como um incêndio se desenvolve e, conseqüentemente, do ambiente a que o bombeiro está exposto é que será possível buscar uma maior proteção para o bombeiro, melhorando os níveis de segurança dos seus equipamentos de proteção individual, principalmente por meio do desenvolvimento de normas e padrões para estes equipamentos.

Nos últimos anos, com a implantação do projeto de modernização dos procedimentos de combate a incêndio no Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (CBMDF), com o apoio da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) do Ministério da Ciência e Tecnologia/CNPq e da Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF), o treinamento de combate a incêndio passou a ser realizado em um sistema de treinamento composto de contêineres, similar ao existente em diversos países da Europa e América do Norte. Este sistema foi apresentado pela primeira vez em palestra realizada no X SENABOM realizado em Belém/PA, em 2008.

Com o objetivo de melhor compreender o desenvolvimento dos incêndios e a sua influência nos bombeiros, diversos treinamentos foram monitoradas por meio de sensores termopares, tanto no ambiente, quanto no equipamento de proteção individual dos bombeiros, como por exemplo, na face interna e externa da roupa de proteção e nas máscaras de proteção respiratória. Além de sensores termopares, foram também utilizados medidores de fluxo de calor. Por meio dessas medições, foi possível verificar a temperatura e o fluxo de calor a que os bombeiros estão submetidos em uma situação de pré-generalização do incêndio (*pré-flashover*).

## Temperatura e Fluxo de calor

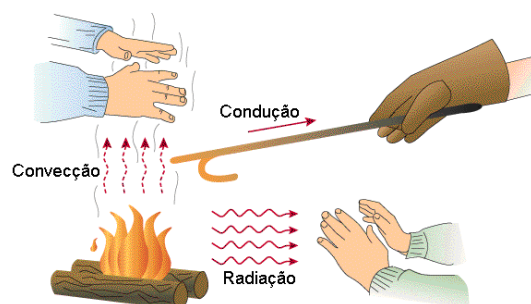
O serviço dos bombeiros é considerado, em geral, uma ocupação perigosa, principalmente por estarem expostos a diversas condições térmicas geradas pelos incêndios. Existem duas componentes principais da exposição térmica que impactam os bombeiros [Lawson, 2009]:

1. Fluxo de calor – Taxa de energia térmica transferida de uma região mais fria para uma mais quente; [CBMDF, 2006]
2. Temperatura – medida direta da atividade molecular, ou seja, é a medida da energia térmica. [CBMDF, 2006]

Essas componentes são acopladas e em conjunto criam as condições que oferecem risco para os bombeiros em um incêndio. Geralmente as pessoas associam o risco de se queimar à temperatura, mas ela é apenas parte da história. A temperatura em um incêndio é resultado da energia gerada pelo incêndio e transferida como fluxo de calor para o ambiente e objetos, tais como o mobiliário, a roupa de proteção e a camada de fumaça. Sendo assim, o fluxo de calor é o que causa a mudança de temperatura em um incêndio. De uma forma simples, o calor pode ser transferido de três formas [CBMDF, 2006]:

- Condução – transferência de calor por meio do contato direto entre as moléculas do material em corpos sólidos;
- Convecção – transferência de calor de um fluido em movimento até uma superfície sólida ou para outro fluido;
- Radiação Térmica – É a transferência de calor por meio de ondas eletromagnéticas.

Estas podem ser representadas pela figura abaixo:



Fonte: <http://www.physics.brocku.ca/courses/1p93/Heat/>  
Figura 1 – Formas de transferência de calor

Cada uma dessas formas de fluxo de calor tem um impacto nos riscos de uma pessoa sofrer uma queimadura e elas causam uma mudança na temperatura sentida pelo bombeiro. Dessa forma, é importante lembrar que é a combinação do fluxo de calor e da mudança de temperatura resultante que causa queimaduras.

Um conjunto de níveis de fluxo de calor que podem ser experimentados por um bombeiro e as conseqüências destes níveis para o ser humano está apresentado na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Nível de fluxo de calor e sua conseqüência para o ser humano.

Nível de fluxo de calor (kW/m <sup>2</sup> )	Conseqüência
0.67	Dia ensolarado de verão no Reino Unido.
≈1	Fluxo em um dia claro de sol na superfície da terra com radiação direta. Valor limite de dor para uma pele não protegida. Uma queimadura de sol pode ocorrer entre 20 e 30 minutos.
2,5	Exposição típica de um bombeiro quando trabalhando.
4,5	Uma pele sem proteção irá sofrer queimaduras de 2º grau em cerca de 30 segundos.
6,4	Uma pele sem proteção irá sentir dor em menos de 8 segundos e queimadura de 2º grau em 18 segundos
7	Valor limite para os bombeiros vestindo a roupa de proteção após 3 a 7 minutos de exposição
10	Uma pele sem proteção irá sofrer queimaduras de 2º grau em cerca de 10 segundos.
12	Pirólise da madeira
13	Os gases voláteis da madeira irão sofrer ignição quando expostos a uma chama.
16	Uma pele sem proteção irá sentir dor imediatamente e queimadura de 2º grau em 5 segundos.
20	Uma pele sem proteção irá sofrer queimaduras de segundo grau em menos de 4 segundos. Este nível de fluxo de calor representa o fluxo de calor no nível do chão em um quarto no início da generalização do incêndio ( <i>flashover</i> ).
29	Ignição espontânea da madeira
80	Uma pele sem proteção irá sofrer queimadura de 2º grau instantaneamente. A generalização do incêndio está estabelecida no ambiente.
84	Fluxo de calor especificado no teste das roupas de proteção de bombeiros previsto na norma NFPA 1971.
170	Máximo fluxo de calor medido pelo NIST numa situação de pós-generalização do incêndio dentro de um ambiente.

Fonte: [LAWSON, 2009] e [SVENSSON, 2008]

Na Tabela 2, temos informações sobre as temperaturas normalmente encontradas durante uma operação de combate a incêndio, bem como suas conseqüências para o ser humano.

Tabela 2 – Temperatura e sua conseqüência para o ser humano.

Temperatura (°C)	Conseqüência
37	Temperatura normal do ser humano.
38	Temperatura interna corporal típica de um bombeiro quando trabalhando.
43	Temperatura interna corporal humana que pode causar morte.
44	Temperatura da pele humana quando começa a sentir dor.
48	Temperatura da pele humana causando queimadura de 1º grau.
54	Temperatura da água quente que pode causar uma queimadura em 30 segundos.
55	Temperatura da pele humana com bolhas e queimadura de 2º grau.
62	Temperatura quando o tecido humano torna-se entorpecido.
72	Temperatura quando o tecido humano é imediatamente destruído.
100	Temperatura quando a água ferve e torna-se vapor.
250	Temperatura quando o algodão natural começa a carbonizar.
>300	Temperatura quando os tecidos sintéticos das roupas de proteção começam a carbonizar.
≥400	Temperatura dos gases em um ambiente quando o incêndio começa a se generalizar
≈1000	Temperatura dentro de um ambiente quando da ocorrência da generalização do incêndio

Fonte: [LAWSON, 2009]

J. A. Foster e G. V. Roberts [FOSTER e ROBERTS, 1994] propuseram um modo de classificar as condições a que os bombeiros estão submetidos. São elas:

1. De rotina – Condição de operação mais comum para o Bombeiro. Limite de 25 minutos a 100°C na roupa com radiação térmica limite de 1 kW/m<sup>2</sup>;
2. De perigo – Espera-se quando o bombeiro irá trabalhar por um período curto de tempo em alta temperatura em combinação com alta radiação térmica. Limite de 1 minuto a 160°C na roupa com radiação térmica de 4 kW/m<sup>2</sup>. Um limite intermediário foi criado para representar as condições que podem ser toleradas por até 10 minutos
3. Extremas – Ocorre tipicamente em situação de resgate, ou, no pior caso, da fuga em uma situação de generalização do incêndio. Acontece na região acima de 1 minuto a 160°C na roupa com radiação térmica de 4 kW/m<sup>2</sup> e abaixo de 235°C e 10 kW/m<sup>2</sup>.
4. Críticas – São condições acima de 235°C na roupa e radiação térmica acima de 10 kW/m<sup>2</sup>. Existe o risco de morte.

Essas condições estão resumidas na figura 2 a seguir.

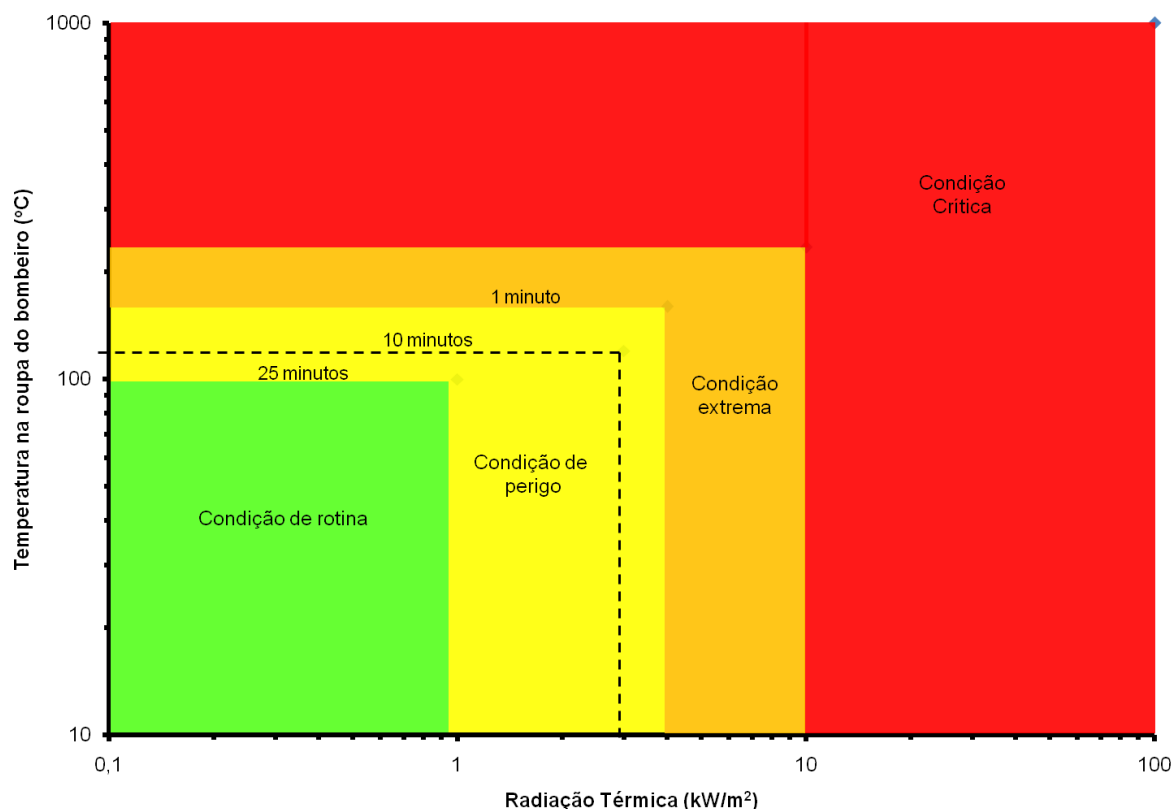


Figura 2 – Limites de exposição térmica em um ambiente de combate a incêndio. Adaptado de [FOSTER e ROBERTS, 1994].

### **Avaliação das condições do ambiente de treinamento de combate a incêndio.**

Desde a criação do sistema de controle de combate a incêndio no CBMDF, sempre existiu a preocupação em monitorar o ambiente a que o bombeiro estava submetido, bem como a sua influência direta nos bombeiros e equipamentos de proteção individual. Para realizar o controle do ambiente de treinamento, em geral são realizadas medições de temperatura próximas ao local do fogo e entre o fogo e os bombeiros por meio de termopares tipo K com isolamento de fibra de vidro. Os dados são coletados em um registrador de temperatura da marca Yokogawa, modelo MV220 de 30 canais. Também é utilizada uma câmera térmica da marca MSA, modelo 5200HD, para registro das imagens térmicas do local.

Para verificar a influência da temperatura do ambiente sobre os bombeiros e seus equipamentos de proteção individual, mede-se a temperatura na parte externa das roupas dos bombeiros ou no capacete, utilizando termopares tipo k com isolamento de fibra de vidro, e dentro da roupa ou capacete, com o uso de termopares com isolamento de PVC. Para medir o fluxo de calor a que o bombeiro é submetido foi utilizado um medidor de fluxo de calor do tipo Schmidt Boelter de fundo de escala de 20 kW/m<sup>2</sup> e tamanho de 1 polegada.

Na figura 3 é apresentado o perfil vertical de temperatura dentro do sistema de treinamento de combate a incêndio. A posição dos sensores termopares (TC), bem como da localização dos bombeiros (BM) no início do treinamento estão representadas no desenho à direita da figura. Verifica-se pelo gráfico que a diferença de temperatura na altura do ombro de um bombeiro agachado (0,9 m) e em pé (1,5 m) pode chegar até 550°C neste local.

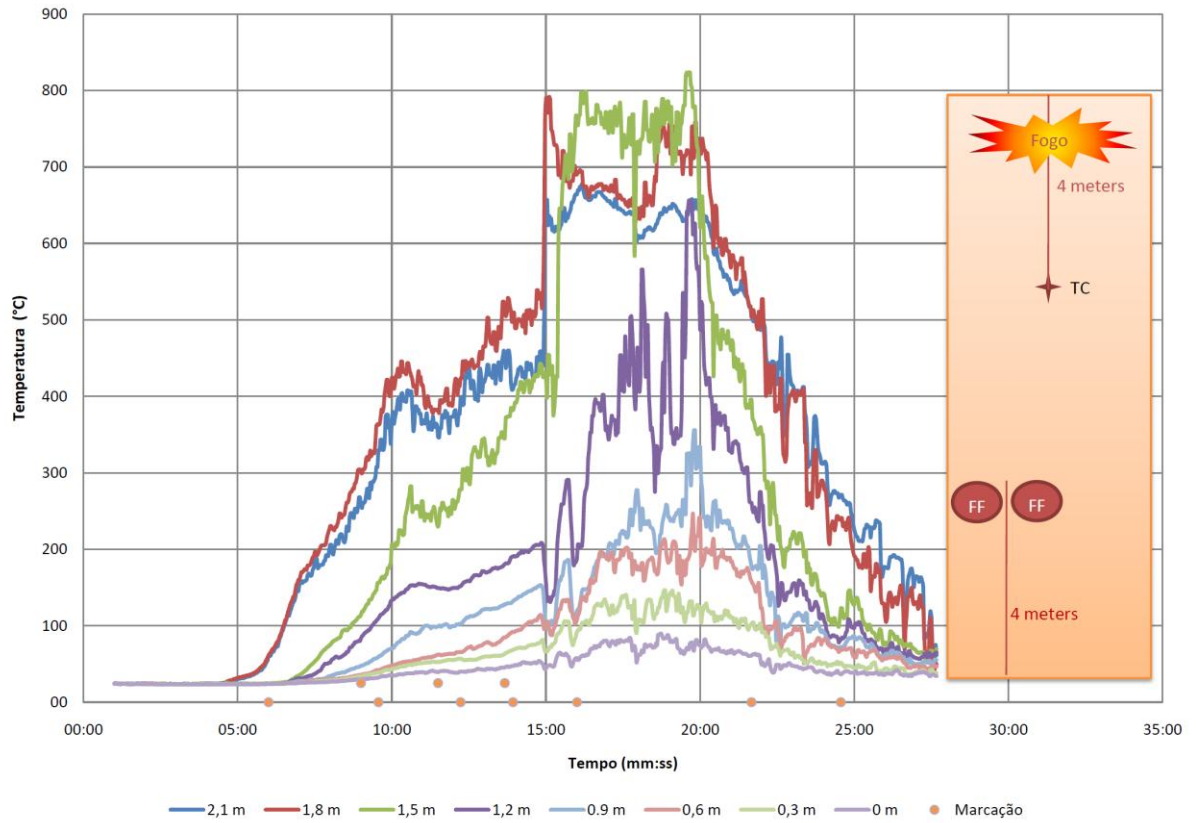


Figura 3 – Gráfico do perfil vertical de temperatura dentro do container.

Na figura 4 é tem-se o perfil horizontal de temperatura perto do teto, a 2,3 metros de altura, mostrando temperaturas máximas próximas a 800º C.

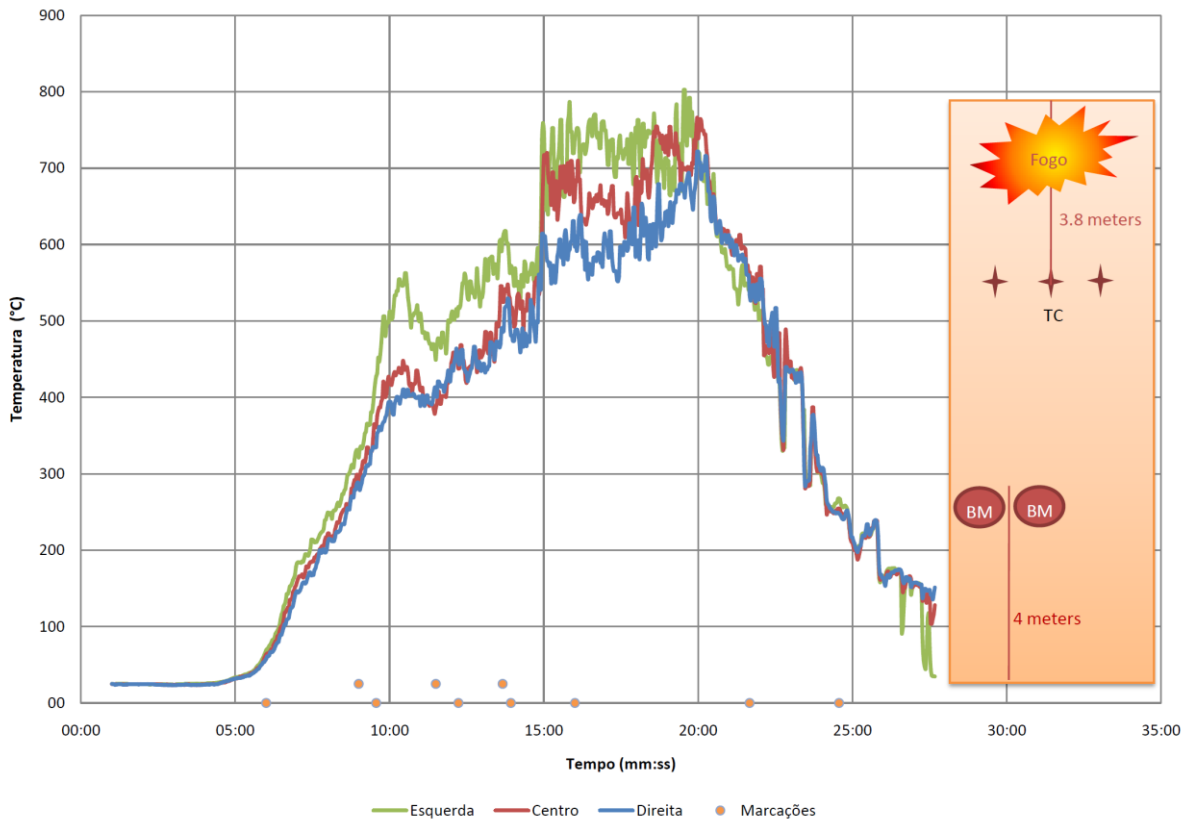


Figura 4 – Gráfico do perfil horizontal de temperatura dentro do container.



Na figura 5 é mostrada a temperatura na roupa de aproximação em 6 pontos diferentes: No ombro, no peito e na coxa, sempre do lado externo e interno da roupa de proteção. Podemos verificar que a temperatura máxima chegou a 200°C na parte externa da perna e do peito. O ombro apresentou uma temperatura um pouco mais baixa, perto de 160°C, provavelmente porque a medida estava sendo realizada do lado do corpo e não de frente para o fogo. As temperaturas internas ficaram entre 80°C e 95°C. Essa não é a temperatura na pele do bombeiro, pois os sensores foram colocados próximo ao forro interno da roupa de aproximação. Além disso, o bombeiro estava vestindo uma calça e uma camisa de malha por baixo da roupa. Mesmo assim, é importante verificar quão alta é a temperatura a que o bombeiro fica submetido, correndo inclusive risco de queimaduras de 2º grau (temperatura acima de 55°C). Deve ser notado também que o corpo humano é afetado negativamente quando está submetido a temperaturas acima de 37°C podendo ocorrer desidratação, exaustão, cãibra e até mesmo um acidente vascular cerebral [SVENSSON, 2008]. Quanto mais alta for a temperatura e longa for a exposição, mais rapidamente o corpo poderá ser afetado ou de uma forma mais agravada. É importante notar que a roupa de proteção por ela mesma já pode aumentar a temperatura corporal a níveis perigosos. Por isso é ainda mais importante que o bombeiro esteja sempre se hidratando quando estiver vestindo a roupa de proteção.

Para que o bombeiro diminua o risco de se queimar é importante que ele tente manter algum espaço com ar entre as diversas camadas da roupa de aproximação e entre a roupa de baixo, pois o ar atua como um isolante térmico. Estudos realizados no pelo NIOSH e outros institutos [NIOSH, 2008] comprovaram que caso haja um uma compressão, como um toque em um objeto ou em outros bombeiros, o calor armazenado nas camadas da roupa de aproximação será liberado mais facilmente, levando a queimadura no ponto onde houve a compressão.

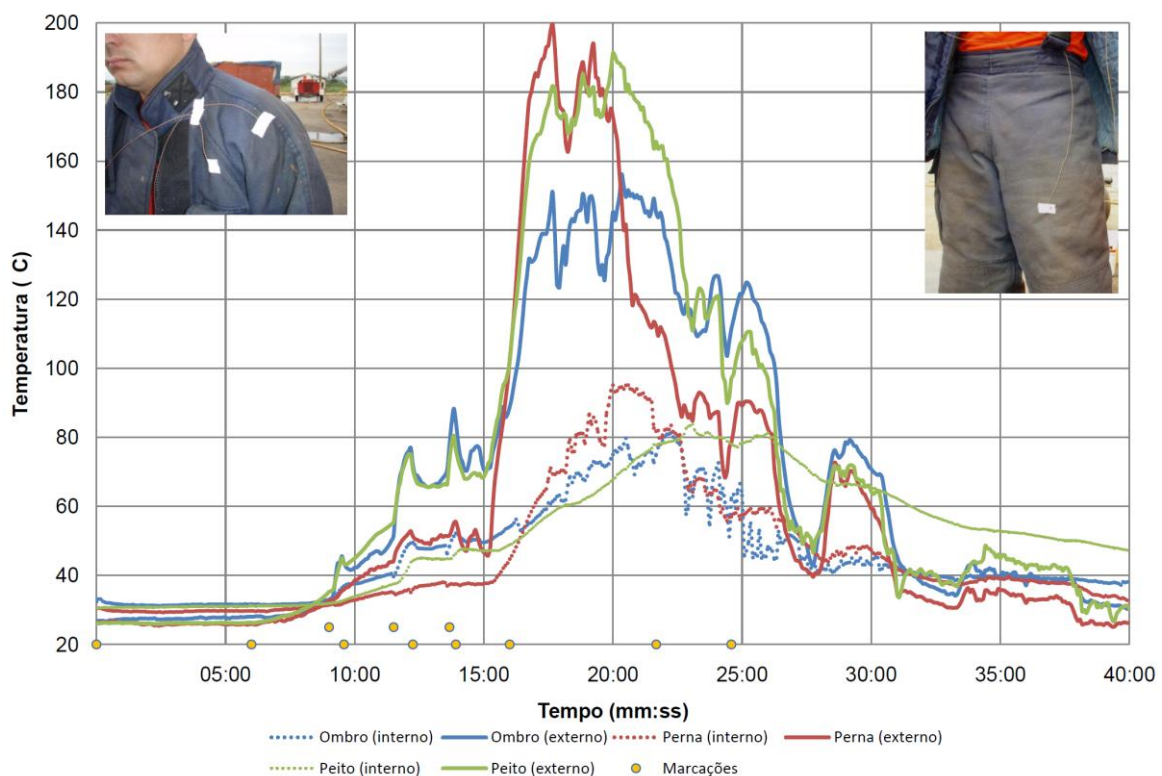


Figura 5 – Gráfico do perfil horizontal de temperatura dentro do container.

Na figura 6 é apresentada a temperatura dentro e fora da máscara de proteção respiratória. Podemos perceber que a temperatura dentro da máscara é bem alta, 120°C, e, diferentemente da roupa de proteção, bem próxima à temperatura externa na lente da máscara, 160°C. Isso demonstra uma menor proteção térmica da lente. É importante salientar que a lente dessas máscaras é feita de policarbonato. Este material começa a amolecer com temperaturas próximas de 267°C, podendo até mesmo vir a derreter em temperaturas maiores.

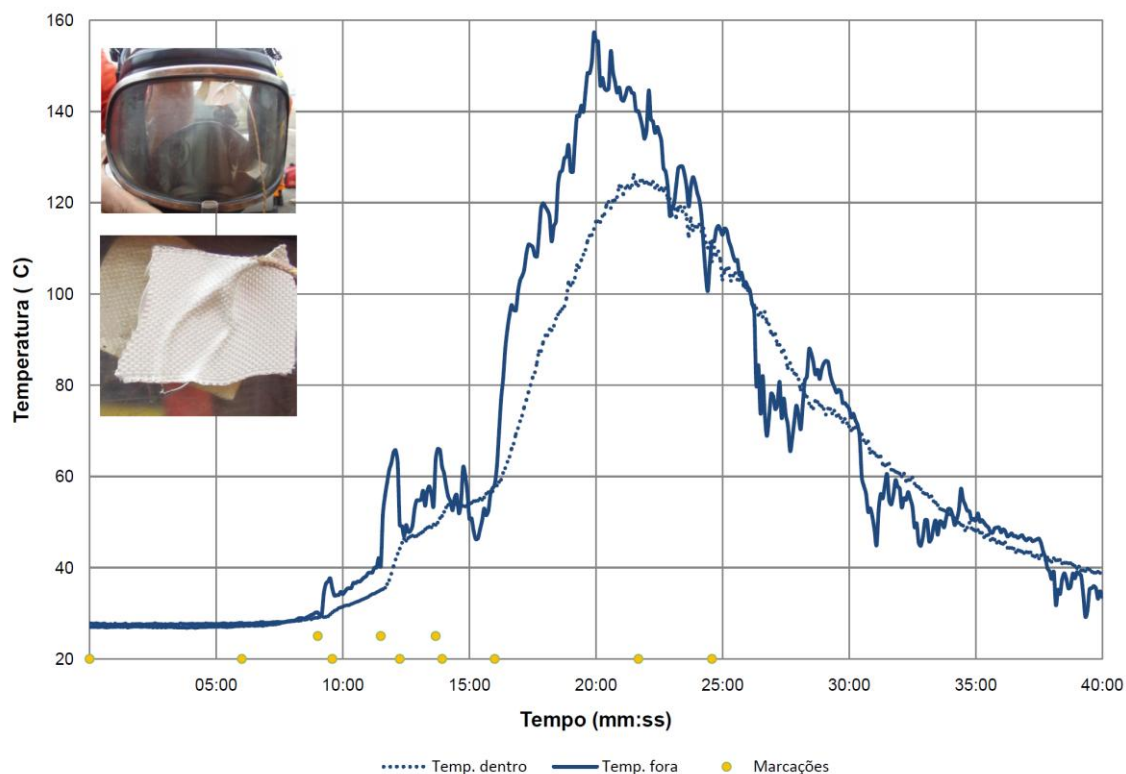


Figura 6 – Gráfico da temperatura dentro e fora da máscara de proteção respiratória.

Atualmente a máscara de proteção respiratória está sendo objeto de muito estudo, inclusive com relação à melhoria da norma. Isso está ocorrendo agora, pois em vários centros de treinamento do mundo estão ocorrendo problemas, como o aparecimento de riscos (figura 7a) e bolhas nas lentes (figura 7b), após os treinamentos realizados. Estudos preliminares utilizando um painel radiante realizados no NIST levam a crer que a radiação térmica é um importante fator a ser estudado. Esse estudo torna-se mais importante ainda quando se sabe que a norma Americana atual sobre o padrão dos equipamentos de proteção respiratório de circuito aberto para serviços de emergência (NFPA 1981) prevê apenas teste com calor convectivo utilizando um forno (100°C por 10 minutos) e teste de resistência a chama (30 segundos), não existindo nenhum teste de resistência à radiação térmica mais severa, como o feito nas roupas de aproximação.



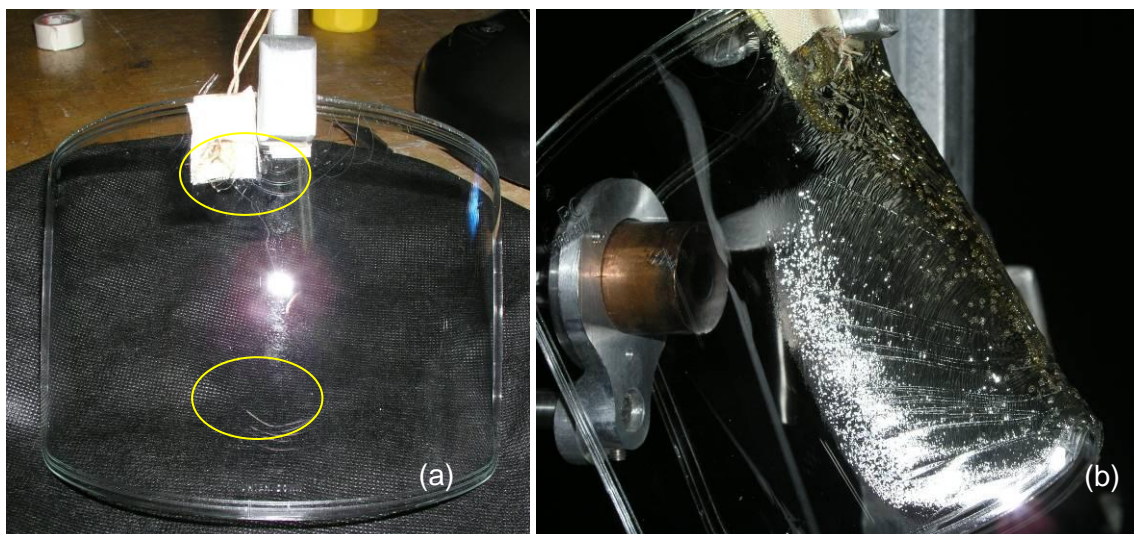


Figura 7: a) Aparecimento de riscos após 10 minutos de exposição a  $4,7 \text{ kW/m}^2$ .  
b) Aparecimento de bolhas após menos de 2 minutos de exposição a  $9,8 \text{ kW/m}^2$ .

Na figura 8 a seguir pode-se verificar que o fluxo de calor chegou a  $6 \text{ kW/m}^2$ . Esse valor está abaixo do nível limite de segurança apresentado na Tabela 1, de  $7 \text{ kW/m}^2$ . Em outros testes realizados, chegou-se a se medir fluxo de calor mais altos, próximos a 8 a  $9 \text{ kW/m}^2$ , mostrando que é necessário um cuidado muito grande durante os treinamentos. Os primeiros três picos apresentados no gráfico correspondem aos momentos em que o bombeiro se levantou como parte do treinamento (visualização da camada de fumaça). Perceba a diferença entre o bombeiro estar agachado e estar em pé. Rapidamente o fluxo de calor passou de menos de  $1 \text{ kW/m}^2$ , que seria uma situação de rotina [FOSTER e ROBERTS, 1994], para uma condição próxima a extrema, com fluxo de calor chegando perto de  $6 \text{ kW/m}^2$ . Isso por si só já demonstra a necessidade do bombeiro se manter agachado durante o combate a incêndio.

É importante salientar que os testes de potencial de proteção térmica da roupa de aproximação na NFPA 1971 (ver Tabela 1) são realizados com fluxos de calor de  $84 \text{ kW/m}^2$ , situação de generalização de incêndio, mostrando que a roupa, dependendo do tempo de exposição, ainda mantém a sua integridade. Mas Krasny e outros [KRASNY, 1998] sugerem que os bombeiros provavelmente teriam queimaduras sérias se fossem expostos a esse nível de fluxo de calor em menos de 10 segundos. Na realidade, a maioria das queimaduras em bombeiros parece acontecer com fluxo de calor muito abaixo dessas condições, mostrando que elas ocorrem quando os bombeiros estão expostos por um período longo de tempo a fluxos de calor de valores baixos para moderados [LAWSON e TWILLEY, 1999].

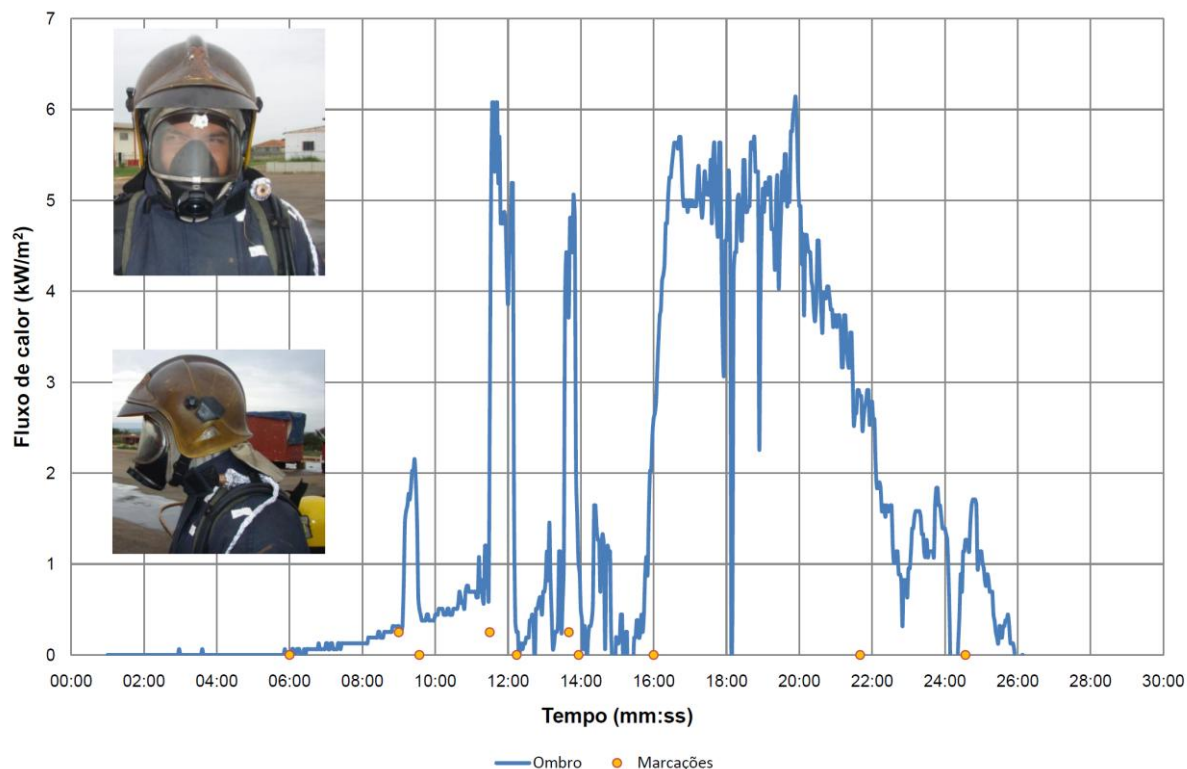


Figura 8 – Gráfico do fluxo de calor. Pendente correção do valor.

Um estudo realizado por Michael Karter [KARTER, 1993] mostrou que a ocorrência de queimaduras em bombeiros acontece com bastante frequência, e alguns fatores que contribuem para essa ocorrência são comuns, tais como:

- O bombeiro estava pré-aquecido antes de atacar o fogo;
- O bombeiro estava suando;
- A roupa do bombeiros, dentro da barreira de umidade da roupa de proteção, absorveu suor e água, mudando o desempenho da proteção térmica;
- O bombeiro estava a vários metros de qualquer chama e a temperatura do ambiente não parecia ser problema;
- A roupa de aproximação fornece uma demora grande na transferência do calor do lado de fora para dentro, permitindo que o bombeiro entre em locais termicamente perigosos.

## Conclusões

Os resultados apresentados mostram as condições a que os bombeiros estão submetidos quando em treinamento de combate a incêndio no sistema atualmente utilizado pelo Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal. As temperaturas medidas estão próximas às encontradas em outros estudos, como os de Foster e Roberts [FOSTER e ROBERTS, 1994] e os de Johan Mangs e Hakan Kruse [GRIMWOOD E DESMET, 2003]. Contudo, deve-se tomar cuidado para que o ambiente esteja sempre abaixo das condições críticas (Figura 2), ou seja, temperatura abaixo de 235°C e radiação térmica abaixo de 10kW/m<sup>2</sup>.

Os dados de temperatura e fluxo de calor obtidos nesta pesquisa mostram que os padrões utilizados pela NFPA 9182 para avaliação dos equipamentos de proteção respiratória estão bem aquém das condições a que os bombeiros estão submetidos. Pelos testes realizados em laboratório com a utilização de um painel radiante foi possível verificar as situações que podem levar a degradação da lente das máscaras de proteção respiratória. Comparando esses resultados com os valores medidos na situação de pré-generalização de incêndio encontrada nos treinamentos em contêineres, percebe-se que durante o treinamento as máscaras podem ser submetidas a condições próximas às que levam ao aparecimento de riscos e bolhas.

Mais pesquisas ainda terão que ser realizadas no futuro buscando a melhoria dos equipamentos de proteção individual dos bombeiros, tais como botas, luvas, roupas e equipamentos de proteção respiratória. É apenas com uma compreensão exata das condições a que os bombeiros estão submetidos no combate a incêndio que se chegará a uma melhoria das normas que regem a fabricação desses equipamentos.

## Agradecimentos

Agradeço o apoio do Comando do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (CBMDF), da 7ª Seção do EMG, do Centro de Treinamento Operacional (CTO) do CBMDF e em especial aos seus instrutores de combate a incêndio. Esta pesquisa não teria sido possível sem o excelente trabalho desenvolvido pelos instrutores do CTO.

Agradeço o *National Institute of Standards and Technology* (NIST) pelo empréstimo do medidor de fluxo de calor utilizado em alguns dos experimentos.

Este projeto foi parcialmente financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) do Ministério da Ciência e Tecnologia e pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF).

## Referências

- CBMDF. **Manual básico de combate a incêndio do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal**: Módulo 1: Comportamento do fogo. Brasília, 2006. 164p.
- FOSTER J. A. and ROBERTS, G.V., **Measurements of the Firefighting Environment – Summary Report**, Central Fire Brigades Advisory Council Research Report número 61, 1994, Home Office Fire Research and Development Group, Fire Engineers Journal, Reino Unido, setembro 1995
- GRIMWOOD , P. e DESMET ,K., **Tactical Firefighting: a comprehensive guide to compartment firefighting & live fire training (CFBT)**, Firetactics, Cemac, 2003
- KARTER, Michael J., Jr., **Patterns of Fire Fighters Injuries, 1989-1991**, National Fire Protection Association, Quincy, MA, dezembro 1993.
- KRASNEY, J.F., ROCKETT, J.A., and HUANG, D., **Protecting Fire Fighters Exposed in Room Fires: Comparison of Results of Bench Scale Test for Thermal Protection and Conditions During Room Flashover**, Fire Technology, 24 No. 1, pp. 5-19, 1988
- LAWSON, James R., **Fire Facts**, NIST Special Publication 1102, NISTIR 6400, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, agosto 2009
- LAWSON, James R., MELL, William E., PRASAD, Kuldeep, **A Heat Transfer Model for Firefighters' Protective Clothing, Continued Developments in Protective Clothing Modeling**, Fire Technology, Publicado on-line em 7 de fevereiro de 2010.
- LAWSON, James R. e TWILLEY, W.H., **Development of an Apparatus for Measuring the Thermal Performance of Fire Fighters' Protective Clothing**, NISTIR 6400, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, outubro 1999.
- NIOSH - National Institute for Occupational Safety and Health, The National Personnel Protective Technology Laboratory and National Institute of Standards and Technology and North Carolina State University, **Thermal Capacity of Fire Fighter Protective Clothing: Final Report**, outubro de 2008.
- SVENSSON, Stefan, **Reducing fire fighter fatalities – the knowledge based approach**, Reducing Firefighter Deaths and Injuries: Changes in Concept, Policy, and Practice Virtual Symposium, setembro 2008.