



TERMOPARES DE FIO FINO PARA ESTUDOS DO CAMPO DE TEMPERATURA EM CHAMAS DIFUSIVAS TURBULENTAS

Cristiane Aparecida Martins

Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Aeronáutica
Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos, SP, Brasil, CEP: 12228-900
manfredi@cptec.inpe.br

Pedro Teixeira Lacava

Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Aeronáutica
Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos, SP, Brasil, CEP: 12228-900
lacava@aer.ita.br

Armando de Azevedo Caldeira Pires

Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável
SAS Quadra 05 Bloco H 2º andar
armando@cds.unb.br

Carlos Guedes Neto

Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Aeronáutica
Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos, SP, Brasil, CEP: 12228-900

Marco Aurélio Ferreira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão
Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista, SP, Brasil, CEP: 12700-000

João Andrade de Carvalho Jr.

Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Depto. de Energia
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá –SP, Brasil, CEP: 12500-000
joao@feg.unesp.br

Resumo. *O conhecimento do perfil de temperatura em chamas é necessário para que se possa entender os diversos aspectos relacionados com os fenômenos físicos e químicos, que se desenvolvem durante o processo de combustão. Um exemplo disso, é a dependência dos mecanismos reacionais de formação de poluentes, como o NO_x e a fuligem, em função da temperatura. Para os experimentos onde o objetivo é analisar a temperatura na região de chama, os termopares de fio fino são bastante adequados, pois apresentam como vantagem: a) baixa troca térmica por radiação entre a chama e o termopar; b) menor perturbação do escoamento; c) coeficiente de inércia térmica adequado para as flutuações de temperatura. Desta forma, desenvolveu-se uma bancada e uma metodologia própria para confecção desse tipo de termopar. O presente trabalho aborda os aspectos envolvidos com o projeto do termopar, seu processo de soldagem e a aplicação em uma chama difusiva turbulenta de dimensão laboratorial.*

Palavras-chave: *termopares, combustão, medição de temperatura.*

1. INTRODUÇÃO

Para compreensão dos fenômenos de combustão, ou para o desenvolvimento de modelos teóricos capazes de descrevê-los, faz-se necessário um conjunto de dados experimentais refinados, que muitas vezes são limitados pelas técnicas experimentais disponíveis (Bilger, 1991). Desde o

início do século passado, com o contínuo desenvolvimento dos motores de combustão interna, turbinas a gás e dispositivos industriais, que fazem uso da energia térmica liberada pelas reações de combustão, as técnicas experimentais de diagnóstico de combustão foram sendo aprimoradas. Contudo, grande parte delas está baseada em sondas intrusivas ao escoamento reativo, podendo causar perturbações de natureza aerodinâmica, térmica e química. Com o avanço das técnicas a laser, dispositivos óticos puderam ser utilizados sem influenciar os fenômenos envolvidos. Entre eles pode-se citar a velocimetria a laser, as diversas formas de espectroscopia a laser (medidas de concentração de espécies e temperatura) e as análises envolvendo tomografia de chama. No entanto, estas técnicas também possuem suas limitações, que normalmente estão relacionadas com as necessidades de acesso ótico e dificuldades de obtenção de dados com qualidade em ambientes de combustão com alta luminosidade e/ou concentração de particulados (Eckbreth, 1988). Desta forma, as sondas intrusivas ainda encontram um amplo campo de atuação, cabendo um contínuo refino nas técnicas envolvidas, para aumentar a precisão dos dados e expandir sua aplicabilidade (Heitor e Moreira, 1992).

Em diversas pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos relacionados com combustão, a medição do campo de temperatura na região de chama é de fundamental importância, pois grande parte dos fenômenos que ali se desenvolvem, de alguma forma, se relacionam com a temperatura. Como exemplo, podemos destacar o próprio desenvolvimento do mecanismo reacional de oxidação do combustível, a cinética química de formação ou destruição de poluentes, como NO_x e fuligem, entre outros, e os processos de transferência de calor para o ambiente onde a chama se encontra.

Um dispositivo clássico e intrusivo para medição de temperatura em escoamentos é o termopar, que é basicamente constituído por dois fios de materiais diferentes, com suas extremidades soldadas. Uma destas extremidades (junta quente) deve permanecer no ambiente que se deseja caracterizar a temperatura, a outra (junta fria) deve permanecer a uma temperatura constante de referência. Assim, um potencial elétrico é criado em razão da diferença de temperatura entre as junções e da diferença entre os materiais dos fios.

Para aplicações diretas em chamas, o termopar utilizado, além de ter que minimizar os efeitos intrusivos, deve ser capaz de responder aos gradientes espaciais e temporais de temperatura. Os termopares comerciais não são capazes de atender estes requisitos; desta forma, é preciso desenvolver uma estrutura laboratorial para confeccionar os termopares de fio fino. Assim, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver tal estrutura, avaliar a qualidade do processo de soldagem e aplicar o termopar de fio fino para medição do campo de temperatura em uma chama difusiva livre de um jato de gás natural.

2. TERMOPAR DE FIO FINO E CHAMAS DIFUSIVAS

Os termopares são extensivamente utilizados em pesquisas e experimentos relacionados à combustão, para obtenção da temperatura média, instantânea ou flutuações (Ballantyne e Moss, 1977, Heitor et al., 1985 e Caldeira-Pires e Heitor, 1998). Entre as vantagens da utilização dos termopares, destaca-se a sua facilidade de uso, ser uma técnica econômica, além de possuir boa resolução temporal e espacial. No entanto, para que os erros nas medidas decorrentes dos efeitos intrusivos sejam minimizados, faz-se necessário utilizar termopares cujo o diâmetro dos fios seja da ordem de dezenas de micrômetros, denominados por termopares de fio fino.

Os erros presentes na medição do campo de temperatura em chamas utilizando termopares, estão extremamente relacionados na literatura, como, por exemplo, na revisão realizada por Heitor e Moreira (1992). Basicamente, os efeitos mais preponderantes são: os distúrbios do escoamento, a condução de calor através dos fios, efeitos convectivos, perdas por radiação e efeitos catalíticos.

Adicionalmente, quando se deseja obter a temperatura instantânea, surgem erros relacionados com o procedimento de compensação, pois, normalmente, há incertezas quanto a determinação da constante de tempo e uma incapacidade de compensar flutuações de alta frequência (Fernandes, 1998).

Os problemas relacionados com os distúrbios no fluxo, em razão da presença do próprio termopar, são mais críticos em escoamentos com recirculação (Heitor e Moreira, 1992). Nesta situação, ou em outro escoamento elíptico qualquer, a presença de uma sonda pode causar uma severa perturbação nas características locais da mistura combustível/oxidante ou agir como um ancorador de chama. Tais efeitos podem ser minimizados utilizando termopares com fios de menor diâmetro possível, por todo seu comprimento; além de inseri-lo na direção principal do escoamento (LaRue et al., 1984). Durão et al. (1988), através da velocimetria a laser, mostraram que os efeitos da presença de um termopar com diâmetro máximo de 80µm sobre o campo de velocidade média, podem ser desprezados mesmo em um escoamento com recirculação.

As perturbações aerodinâmicas locais, muitas vezes são resultantes da energia cinética convertida em energia térmica na camada limite em torno do termopar (efeitos convectivos). Contudo, o erro resultante pode ser desconsiderado em escoamentos reativos com número de Mach inferior a 0,1 (Fristrom, 1976).

Bradley e Matthews (1968) mostraram que o calor conduzido pelos fios do termopar não é fortemente afetado pelo diâmetro do glóbulo formado na região de junta quente (solda), até que este diâmetro não ultrapasse quatro vezes o diâmetro dos fios. A principal fonte de erro neste processo está relacionada com o comprimento dos fios utilizados. Estes autores mostraram que o erro devido à condução pode ser minimizado escolhendo termopares com comprimento acima de 200 vezes o diâmetro. Isto reduz o gradiente de temperatura ao longo do fio, diminuindo o erro de condução a 1K, para termopares de fio fino com 40µm de diâmetro (Moneib, 1980).

O processo de troca térmica por radiação pode ser dividido em três termos: 1) radiação emitida pelo termopar para a vizinhança, 2) radiação proveniente da região de chama e absorvida pelo termopar e 3) radiação proveniente da vizinhança e absorvida pelo termopar. O segundo termo pode ser negligenciado devido à baixa emissividade do gás e o terceiro só é necessário levar em conta quando houver parede aquecida na vizinhança do termopar (Stroomeer, 1995).

O erro induzido pelo processo de transferência de calor por radiação é uma função do diâmetro do fio e de sua emissividade, sendo que esta última nem sempre é determinada com facilidade. Ballantyne et al. (1976) observaram que, utilizando um termopar Pt/Pt-13%Rh com proteção de sílica e 120µm de diâmetro em uma chama difusiva não confinada, a diferença entre a temperatura média medida e a temperatura do gás foi de 4%, quando esta última era de 1375K. Attya e Whitelaw (1982) estimaram o erro em razão das perdas por radiação em chamas de querosene não confinadas, utilizando termopares Pt/Pt-13Rh calibrados em uma câmara de vácuo. Para termopares com 40µm de diâmetro (glóbulo com 45µm de diâmetro), o erro foi de 40°C para o gás a 1000°C, com 80µm (glóbulo com 90µm) foi de 80°C para 1400°C e com 300µm (glóbulo com 450µm) foi de 250°C para 1400°C. Bicen et al. (1986), utilizando termopares de Pt/Pt-13Rh com proteção cerâmica para avaliar o campo de temperatura em um combustor de turbina a gás, indicaram que a perda por radiação não depende acentuadamente do diâmetro do termopar no range entre 40µm e 80µm.

As perturbações químicas estão relacionadas com os efeitos catalíticos na superfície do termopar. Estes efeitos podem influenciar suas propriedades. Para minimizar este problema, utiliza-se um revestimento superficial. Entretanto, além da possibilidade de mudanças nas propriedades do termopar, devido à difusão das moléculas utilizadas no revestimento, o comportamento de tais compostos é pouco conhecido em elevada temperatura. Para chamas turbulentas tipo jato, os efeitos catalíticos podem ser negligenciados.

Bradley e Matthews (1968) desenvolveram um método para corrigir os efeitos das trocas de calor por radiação e convecção, de tal forma que a temperatura do gás pode ser estimada por:

$$T_g = T_t + \frac{\sigma \epsilon_t T_t^4}{h_t} \quad (1)$$

onde T_g temperatura do gás, T_t a temperatura medida pelo termopar, ε_t a emissividade do termopar, σ é igual $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ e h_t o coeficiente de troca térmica por convecção. O termo que corrige a temperatura medida, o segundo do lado direito da Eq. (1), não depende somente da temperatura a quarta potência, mas também de parâmetros relacionados ao escoamento e ao próprio fio do termopar. O coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser encontrado através do número de Nusselt (Nu), que por sua vez relaciona-se com os números de Reynolds (Re) e Prandtl (Pr). Desta forma, para se determinar tal coeficiente, é preciso um conhecimento prévio do campo de velocidade na região de inserção do termopar.

Norton et al. (1993) mostraram que uso de termopares de fio fino pode dispensar as correções nos valores medidos de temperatura média. Para isto, compararam medidas diretas obtidas por um termopar Pt/Pt-10%Rh com $125\mu\text{m}$ de diâmetro, realizadas em uma chama difusiva laminar de CH_4/ar na pressão ambiente, com os valores corrigidos pela Eq. (1). A Fig (1) apresenta como exemplo do trabalho de Norton et al., os perfis radiais de temperatura média medida e corrigida a 9 mm de distância do queimador.

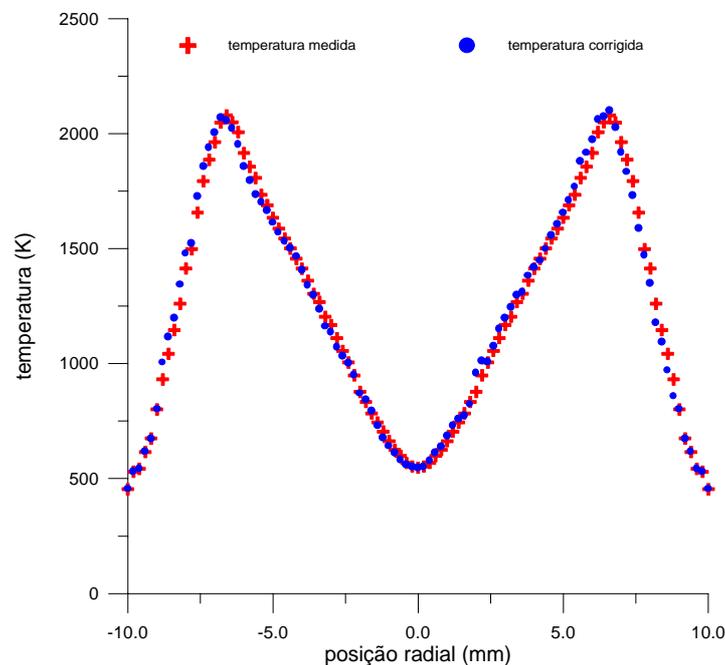


Figura (1). Comparação e entre os perfis radiais de temperatura média medida e corrigida, obtidos por Norton et al. (1993), para uma chama difusiva laminar de CH_4/ar .

Para o presente trabalho, o interesse de aplicação do termopar de fio fino foi no levantamento do perfil radial da temperatura média ao longo do eixo axial de uma chama difusiva turbulenta não confinada, proveniente de um jato circular de gás natural. A Fig. (2) representa esta situação. Neste tipo de chama, o combustível escoar ao longo do eixo axial e difunde radialmente do centro do jato para a frente de chama. Esta região é denominada de região interna à chama. Por outro lado, o oxidante difunde radialmente no sentido contrário, ou seja, do ambiente em direção à frente de chama. A superfície da chama é definida onde o combustível e o oxidante se encontram em proporção estequiométrica. O lado do oxidante é denominado de região externa à chama. Os produtos formados se difundem em ambas as direções, ou seja, para as regiões interna e externa. As reações químicas se desenvolvem em uma região muito estreita e a zona de alta temperatura ocorre em uma região anular até que o topo da chama seja atingido ($x = L$, definido como comprimento de chama).

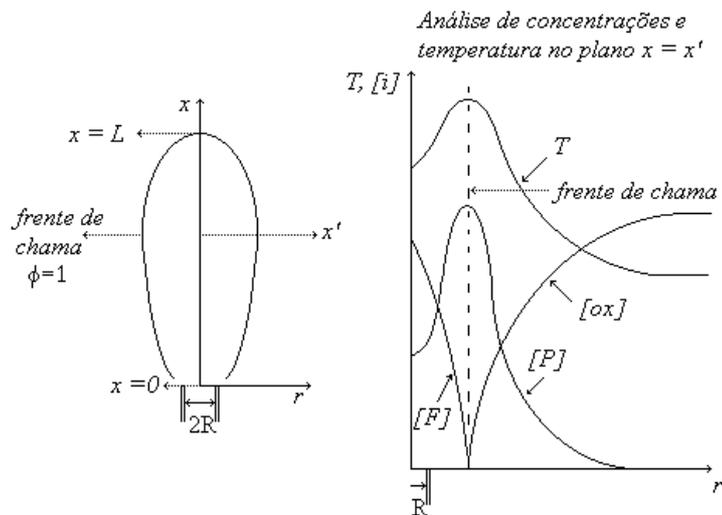


Figura 2. Esquema de uma chama difusiva, onde [F], [ox] e [P] são as concentrações do combustível, do oxidante e dos produtos, respectivamente, e T a temperatura.

3. CONFECÇÃO DO TERMOPAR

Apesar dos termopares de fio fino serem utilizados desde a década de setenta, no Brasil seu uso em pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos de combustão é praticamente nulo. Isto deve-se ao fato de tais termopares não serem comerciais, cabendo então um procedimento laboratorial para sua confecção. Além disso, no comércio brasileiro é possível encontrar fios de Pt/Pt-13%Rh com diâmetro mínimo de 500 μ m, necessitando a importação dos Estados Unidos ou de Países da Europa.

Desta forma, uma bancada para soldagem dos fios do termopar foi desenvolvida no Laboratório Professor FENG do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Esta bancada foi criada a partir de um sistema utilizado para confecção de anemômetros de fio quente, sendo basicamente constituída por um dispositivo de posicionamento x/y/z para os fios, um microscópio e um sistema de aplicação de carga para soldagem. A Fig. (3) apresenta a bancada e um termopar Pt/Pt-13%Rh de 38 μ m nela confeccionado.

O par de fios escolhidos foi Platina e a liga Platina-Ródio (13%), ou seja, termopar tipo R. Tal configuração permite a sua aplicação em ambientes com até 1900K, o que é bastante conveniente para a análise em chamas.

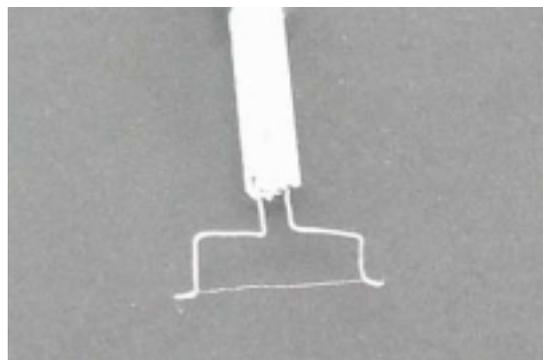


Figura 3. Esquema da bancada e de um termopar de 38 μ m nela confeccionado.

Nesta bancada, o processo de soldagem ocorre por resistência, ou seja, através do dispositivo de posicionamento, as extremidades dos fios são pressionadas uma contra a outra e uma corrente atravessa os mesmos. O sistema de aplicação de carga permite ajustar o valor da carga e de seu

tempo de aplicação. Para soldar o par Pt/Pt-13%Rh com 38 μ m de diâmetro, é necessário uma carga entre 90 mJ e 120 mJ, durante 400 ms, sendo que, quanto menor for a umidade do ambiente, maior será a carga necessária. A bancada foi instalada em uma sala onde procurou-se minimizar os efeitos das condições ambientais sobre o processo utilizando um sistema de ar condicionado.

Conforme discutido nas seções anteriores, fica claro que o desempenho do termopar está relacionado com a eficiência do processo de soldagem, principalmente com o diâmetro final do glóbulo formado na junta quente. Para inspeção visual das sondas se utilizou um microscópio marca Leica, modelo DM IRM, com uma câmera SAMSUNG SCC-131 (analógica) com resolução de 670 x 478 pixels, além do software de análise de imagens Leica Qwin 2.3 standart, disponíveis no Departamento de Materiais Refratários da Faculdade de Engenharia Química de Lorena. A Fig. (4a) apresenta a imagem uma solda considerada adequada para este tipo de termopar, enquanto que Fig. (4b) mostra uma imagem onde a solda foi aparentemente comprometida, ambas para termopares Pt/Pt-13%Rh com fios de 38 μ m de diâmetro.

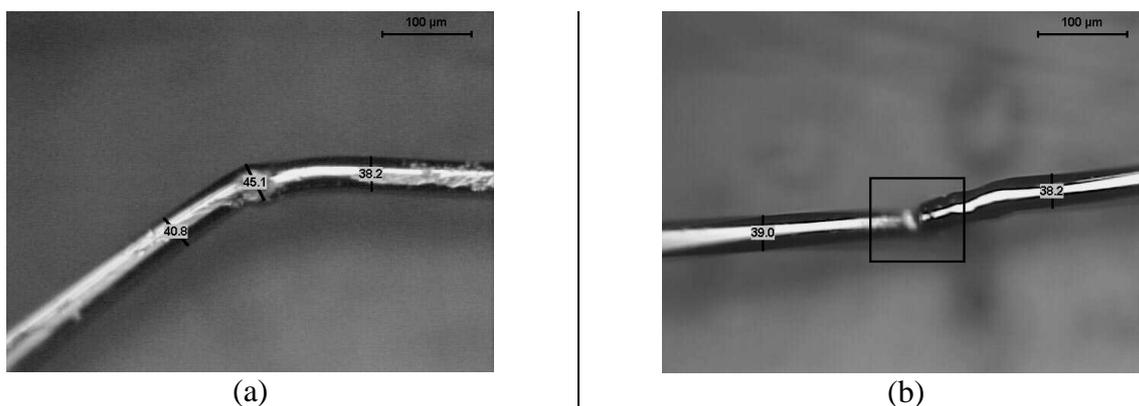


Figura 4. Imagens das soldas de termopares Pt/Pt-13%Rh com fios de 38 μ m de diâmetro; a imagem (a) apresenta uma solda adequada e a imagem (b) uma solda comprometida. As dimensões que aparecem nas imagens estão micrômetros (μ m).

A solda da imagem (a) de Fig. (4) é considerada adequada, pois o maior diâmetro do glóbulo apresentou um aumento de 18% em relação ao diâmetro do fio, atingindo 45 μ m, o que bastante satisfatório para minimizar os erros de medida do termopar. A solda da imagem (b) mostra a formação de um “pescoço”, que resulta em um diâmetro do glóbulo inferior ao dos fios. Baseado na qualidade da medida, a solda apresentada na imagem (b) não comprometeria os resultados, pois um menor diâmetro é sempre favorável para minimizar o erro envolvido. Contudo, este tipo de solda diminui a resistência mecânica do termopar, apresentando este um tempo de vida mais curto; no entanto, não é necessário descartá-lo.

Aparentemente, esta diferença entre as soldas pode estar relacionada com variações nas condições ambientais ou deficiências no posicionamento dos fios. É importante observar que mesmo os termopares cuja as soldas são consideradas adequadas, apresentam um tempo de operação médio de três ensaios de algumas horas, confirmando experiências anteriores disponíveis na literatura. As imagens apresentadas na Fig. (4) foram escolhidas por representarem bem as duas situações extremas observadas nos termopares confeccionados.

Uma vez que o termopar utilizado possui diâmetro de 38 μ m, é necessário utilizar outros fios do mesmo material, mas com diâmetro diferente, para desempenhar o papel de haste e fio condutor. Isto porque o fio mais espesso é de fácil manuseio e possui maior resistência mecânica, permitindo um tempo de vida muito superior em comparação com o fio do termopar. Para a presente sonda, os fios condutores apresentam 500 μ m de diâmetro, sendo conduzidos no interior de tubos capilares cerâmicos, feitos de alumina (Al₂O₃) com alto teor de pureza (99,7%). Para proteção mecânica destes tubos, eles foram alojados no interior de um duto metálico (aço inox) em forma de “L”. A Fig. (5) apresenta um esquema da sonda do termopar.

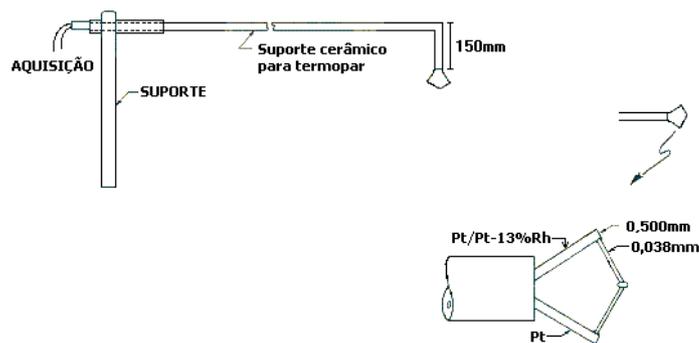


Figura 5. Esquema da sonda do termopar.

4. MONTAGEM PARA APLICAÇÃO DO TERMOPAR

Nesta seção, é feita uma breve descrição da instalação experimental onde estão sendo testados os termopares de fio fino, confeccionados de acordo com o que foi descrito na seção 3. O objetivo da montagem é estudar chamas difusivas turbulentas de gás natural, para caracterizar as regiões de formação de NO_x “prompt” e térmico. Para tal, montou-se no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de Cachoeira Paulista, uma instalação idêntica a utilizada e caracterizada na Universidade Técnica de Delft – TUDelft e nos laboratórios SANDIA (De Vries, 1994, Stroomeer, 1995, Van Den Bercken, 1998). Desta forma, pretende-se adicionar dados a uma base disponível, que poderão eventualmente ser utilizados em comparações com modelagens matemáticas; além de contribuir para o melhor entendimento dos fenômenos físicos e químicos envolvidos neste tipo de chama.

O queimador de Delft, baseado nos princípios de Starner e Bilger (1985), consiste de dois tubos concêntricos, o central para o combustível e o anular para o ar primário. Chamas pilotos de hidrogênio ancoram a chama principal nas proximidades da saída do queimador, sendo esta protegida de grandes estruturas de circulação do ar atmosférico, por uma corrente de ar secundário de baixa velocidade. A corrente de ar primário também apresenta características de jato e desta forma a mistura turbulenta entre o combustível e o ar é intensificada. A Fig. (6) apresenta um esquema do queimador de Delft, uma imagem instantânea de toda chama nas condições que foram realizados os ensaios (aproximadamente 1m de comprimento) e um esquema da montagem.

5. MEDIDAS DE TEMPERATURA

A sonda, esquematizada na Fig. (5) foi acoplada a um sistema de deslocamento que permitiu a variação da posição dos termopares nas direções radial (x) e axial (y). Tal sistema possui precisão de 0,5mm em ambas direções. O termopar foi montado na direção axial do jato de combustível que emerge do queimador. Convencionou-se o ponto zero da direção radial o eixo de centro do queimador e na direção axial na sua saída.

Considerando o baixo nível de tensão gerado pelo termopar (máximo de $21101\mu\text{V}$), sendo que o menor valor de variação de tensão com a variação da temperatura é de $5\mu\text{V}$, tornou-se necessário um apropriado condicionamento do sinal; caso contrário, poderia se incurrir um erro sistemático nas medidas, devido à incapacidade do sistema eletrônico em captar variações desta ordem de grandeza. Desta forma, o sinal proveniente do termopar foi amplificado antes de ser digitalizado. O módulo de condicionamento de sinal da National Instruments, SCXI-1102 apresentou características apropriadas para execução das medidas (User Manual SCXI-1102/B/C, 1997). Tal módulo possui filtro passa-baixo com frequência de corte de 2 Hz para rejeitar ruídos de 60 Hz, ajuste de ganho de 1 a 100 e termistor utilizado como sensor para compensação de junta fria.

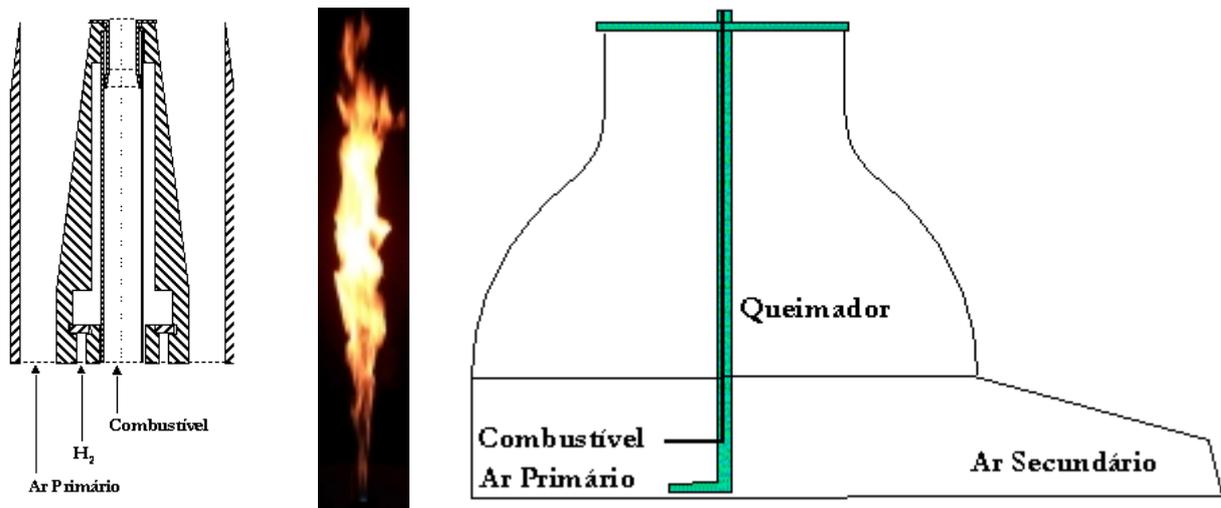


Figura 6. Esquema do queimador de Delft, imagem instantânea de toda chama e um esquema da montagem utilizada.

Como exemplo de aplicação do termopar de fio fino desenvolvido, escolheu-se uma condição típica de ensaio do queimador de Delft, conforme Tab. (1). A Fig. (7) apresenta a variação radial da temperatura média em três posições axiais 50mm, 100mm e 200mm a jusante do queimador. Para cada posição, o valor de temperatura representa uma média de 1000 medidas instantâneas.

Observando os resultados, nota-se um comportamento típico da distribuição radial de temperatura média em chamas difusivas turbulentas, ou seja, uma distribuição bimodal aproximadamente simétrica, onde a diferença entre os valores de pico e o medido no eixo de centro, vai diminuindo com o aumento da distância axial em relação à saída do queimador. A redução desta diferença surge em razão da difusão radial do combustível em direção à frente de chama e do aumento da concentração dos produtos de combustão na zona interna da chama, a medida que escoamento reativo se desenvolve na direção axial.

Recentemente, Teixeira (2001) realizou uma análise da distribuição radial de temperatura, utilizando um processo ótico baseado em tomografia de chama, na mesma montagem e condições experimentais do presente trabalho. Os resultados apontaram uma excelente concordância entre os resultados do sistema ótico e os das medidas realizadas com o termopar de fio fino.

Tabela 1. Condições dos escoamentos dos testes realizados.

Combustível (gás natural)		Ar Primário		Ar Secundário	
U (m/s)	Re	U (m/s)	Re	U (m/s)	Re
11.1	$3.9 \cdot 10^3$	3.0	$4.5 \cdot 10^3$	0.3	$12 \cdot 10^3$

* Onde U é Re são a velocidade média e número de Reynolds dos escoamentos, respectivamente.

6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

O presente trabalho abordou a utilização de termopares de fio fino para a medição do campo de temperatura em chamas turbulentas difusivas. Muitos fenômenos físicos e químicos que se desenvolvem na região de chama estão relacionados com este parâmetro, sendo muitas vezes imprescindível conhecer o campo de temperatura em estudos de combustão.

A seção 2 apresentou uma breve revisão sobre a utilização de termopares em estudos de chamas e como os termopares de fio fino podem minimizar os erros envolvidos no emprego deste dispositivo intrusivo. A seção 3 abordou o desenvolvimento de uma bancada para confecção dos termopares e o resultado da qualidade da solda resultante. Nas seções 4 e 5 discutiu-se o emprego dos termopares confeccionados em uma chama difusiva turbulenta de gás natural/ar, promovida pelo queimador Delft. Na seqüência algumas conclusões foram extraídas.

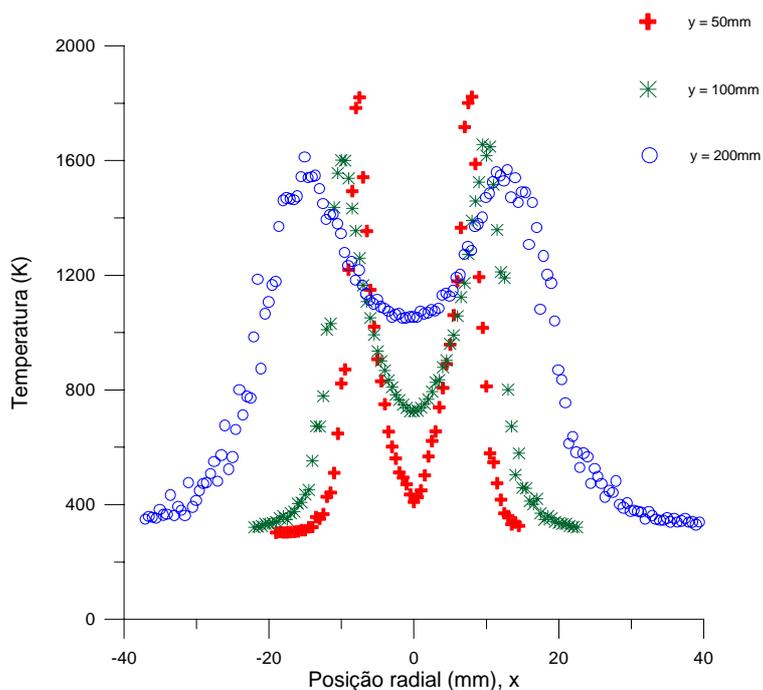


Figura 6. Perfil radial temperatura média para as condições da Tab. (1), para as posições axiais 50mm, 100mm e 200mm.

- 1) A capacidade de se confeccionar e dominar a utilização de termopares de fio no Brasil é de grande importância para os estudos experimentais de combustão aqui desenvolvidos, sejam eles de caráter fundamental ou para o desenvolvimento de queimadores específicos.
- 2) O sistema desenvolvido é capaz de realizar soldas consideradas adequadas para este tipo de termopar.
- 3) O resultado do campo de temperatura médio apresentado mostra que este tipo de termopar é capaz de descrever os gradientes radiais envolvidos em uma chama difusiva turbulenta
- 4) Finalmente, pode-se dizer que este tipo de instrumento também será importante na pesquisa em andamento para alimentar um banco internacional de dados sobre as chamas produzidas em queimadores de Delft.

7. REFERÊNCIAS

- Attya, A.M., Whitelaw, J.H., 1981, “Velocity Temperature and Species Concentration in Unconfined Kerosene Spray Flames”, ASME paper 81-WA1Ht-6.
- Ballantyne, A., Boon, D.J., Moss J.B, 1976, “Measurements of Fluctuating Temperature in Open Diffusion Flames Employing Fine Wire Thermocouples”, *A.A.S.U. Memorandum*, N° 76/3.
- Ballantyne, A., Moss J.B, , 1977, “Fine Wire Thermocouple Measurements of Fluctuating Temperature”, *Combustion Science and Tecnology*, 17:63-72.
- Bradley, D. e Matthews, K.J., , 1968, “Measurement of High Gas Temperature with Fine Wires Thermocouples”, *Journal Mechanical Engineering Science*, 10(4).
- Bicen, A.F., Heitor, M.V., Whitelaw, J.H., 1986, “Velocity and Temperature Measurements in a Can – Type Gas Turbine”, *Advanced Instrumentation for Aero Gas Turbine*, Agardograph, n°399, paper 14.
- Bilger, R. W., , 1991, “Experimental Methods in Combustion Flows – Basic Condideratios”, In: *Experimental Methods for Flow with Combustion*, ed. A. M. K. P. Taylor, Academic Press.
- Caldeira-Pires, A., Heitor M.V., , 1998, “Temperature and Related Statistics in Turbulent Jet Flames”, *Experiments in Fluids*, 24:118–129.

- De Vries, J. E., , 1994, “Study on Turbulent Fluctuations in Diffusion Flames Using Laser induced Fluorescence”, Tese de Doutorado, Universidade Técnica de Delft.
- Durão, DFG, Heitor, M.V., Moreira, A.L.N., , 1988, “On the Effect of Combustion on Multi-Jet Swirl Swirl Stabilized Flames”, 4th International Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluids Mechanics, Lisboa.
- Eckbreth, A.C., 1988, “Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species”, Energy and Engineering Sciences Series, ed. A.K. Gupta and D.G. Liley, Abacus Press, UK.
- Fermades, E.C., 1998, “The Onset of Combustion-Driven Acoustic Oscillations”, Ph.D Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Fristom, R.M., 1976, “Probe Measurements in Laminar Combustion Systems”, In: Combustion Measurements, ed. by R. Goulard, Academic Press.
- Heitor, M.V., Taylor, A.M.K.P., Whitelaw, J.H. , 1985, “Simultaneous Velocity and Temperature in a Premixed Flame”, Experiments in Fluids, 3:323-339, 1985.
- Heitor, M.V., Moreira, A.L.N. , 1992, “Probe Measurements of Escalar Properties in Reacting Flows”, In: Combusting Flow Diagnostics, D.F.G. Durão et al. (eds.), Kluwer Academic Publishers, 79-136.
- LaRue, J.C., Samuelson, G.S., Seiler, E.T. , 1984, “Momentum and Heat Flux in a Swirl-Stabilized Combustor”, 20th Symp. (International) on Combustion, The Comb. Institute, pp. 227-285.
- Moneib, H.A., 1980, “Experimental Study of the Fluctuating Temperature in Inert and Reacting Turbulent Jets”, Ph.D. Thesis, Imperial College of Science and Thecnology, Mech. Eng. Dept., University of London.
- Norton, T.S., Smyth, K.C., Miller, J.H., Smooke, M.D., 1993, “Combustion Science and Technology, 90:1-34.
- Starnes S.H. e Bilger R.W., 1985, "Characteristics of a Piloted Diffusion Flame Designed for Study of Combustion Turbulence Interactions”, Combustion and Flame, 61:19-38.
- Stroomeer, P. P. J., 1995, “Turbulence and OH Structures in Flames”, Tese de Doutorado, Universidade Técnica de Delft.
- Teixeira, R.C., 2001, “Levantamento do Perfil de Temperatura de Uma Chama Usando Processos Óticos”, Dissertação de Mestrado, UNESP-Guaratinguetá.
- User Manual SCXI-1102/B/C, 1997, National Instruments Edition.
- Van Den Bercken, R. E. J., 1998, “IR Emission / Absorption Tomography in Flames”, Tese de Doutorado, Universidade Técnica de Delft.

8. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo financiamento parcial através dos projetos 96/10310-0 e 98/15539-0 e ao Sr. Jefferson F.C. Lins pelas fotos da solda do termopar.

FINE WIRE THERMOCOUPLES FOR TEMPERATURE FIELD STUDIES IN TURBULENT DIFFUSION FLAMES

Abstract. *The information about flame temperature profile are important to understand several aspects involved in physical and chemical process that happen during the combustion situations. For example, the pollutants formation temperature dependence (for instance NO_x and soot). The fine wire thermocouples are useful to analyze the temperature field in flame region, because they have a) lower heat exchange by radiation between the thermocouple and surroundings, b) lower aerodynamic disturbance and c) appropriated time constant for temperature fluctuations measurements. Then, devises and methodologies were developed to make this kind of thermocouple, and the present work broaches aspects about the construction, solder process and the use of fine wire thermocouples in a laboratorial scale turbulent diffusion flame.*

Keywords. *thermocouple, combustion, temperature measurement.*