

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE RADIAÇÃO EMITIDA POR CHAMAS TURBULENTAS DE GÁS NATURAL

por

Orion do Nascimento Costa

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2016





Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DE RADIAÇÃO EMITIDA POR CHAMAS TURBULENTAS DE GÁS NATURAL

por

Orion do Nascimento Costa

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Eng. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Eng. Fernando Marcelo Pereira

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Eng. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof. Dr. Eng. Felipe Roman Centeno

Prof.<sup>a</sup> Dra. Eng.<sup>a</sup> Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 18, Novembro de 2016.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Lauvaro e Suely, por todo incentivo ao estudo e ao aperfeiçoamento pessoal, e à Talita, por toda sua motivação e apoio.

Agradeço ao meu orientador, Prof<sup>o</sup> Dr. Fernando Marcelo Pereira, pela oportunidade de estudo e de desenvolvimento profissional no Laboratório de Combustão. Agradeço pela elaboração do tema para o presente trabalho e pela orientação.

Agradeço ao meu co-orientador, Eng. Luis Quezada, pelo apoio ao longo do trabalho.

Agradeço aos meus colegas e amigos do Laboratório de Combustão pelo companheirismo.

COSTA, O. N. **Análise De Radiação Emitida Por Chamas Turbulentas De Gás Natural**. 2016. 28. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## **RESUMO**

O presente trabalho estuda modelos para estimativa do fluxo de calor radiativo proveniente de chamas turbulentas difusivas. Para isso, utiliza-se uma bancada experimental onde são captados os valores do fluxo de chamas de gás natural, em um queimador tipo jato simples de 7,55 mm de diâmetro. As vazões de trabalho são controladas para chamas estabilizadas operando entre 5 e 150 L/min. Tendo em vista dois modelos consagrados na literatura (Múltiplas Fontes Pontuais Ponderadas e Modelo de única Fonte Pontual) para o cálculo do fluxo de calor radiativo, um terceiro modelo (Modak, 1977) é adaptado às chamas turbulentas. Este modelo simula analiticamente a aquisição de radiação térmica de uma chama. Uma vez que a superfície que representa a chama exerce grande influência na transferência de calor radiativo, são investigadas três diferentes geometrias. Os dados experimentais serviram como critério na avaliação dos resultados fornecidos pelos três modelos, indicando melhor concordância com o modelo de Modak, 1977, tanto para baixas, quanto para altas vazões de gás natural. Entretanto, os outros dois modelos apresentaram resultados satisfatórios em altas vazões.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fluxo de calor radiativo, chamas turbulentas difusivas, modelagem de chamas.

COSTA, O. N. **Turbulent Natural Gas Flames Emitted Radiation Analysis**. 2016. 28. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## **ABSTRACT**

The present study promotes a searching of models to predict radiant heat flux arising from non-premixed turbulent flames. Aiming this, radiative heat flux distributions are measured along the height of natural gas non premixed flames. The flames are set in a range from 5 to 150 L/min. Three models to estimate the radiant heat flux are studied: Two main radiation models are wide known, which are Weighted Multiple Points Source, and Single Point Source. A third one, performed by Modak, 1977, is adjusted to work on the turbulent jet fire, and is able to simulate radiant heat flux from a static surface that represents the flames. Once the surface has an expressive influence on the results, this essay looks into three different geometries and typifies the fittest one regarding the experimental data, showing that the model presented by Modak best describes the behavior of all diffusion flames with a polynomial axisymmetric contour. The results provided by the further models show that they are best fitted to larger flames.

**KEY-WORDS:** Radiant Heat Flux, Turbulent non-premixed Flames, Flame modeling.

## ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Motivação .....	1
1.2. Revisão bibliográfica .....	1
1.3. Objetivos .....	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
2.1. Tipos de chama .....	2
2.2. Comprimento visível de chama .....	3
2.3. Altura de levantamento e extinção de chama .....	3
2.4. Fração radiante .....	3
2.5. Modelo de Fonte Pontual, SPS .....	4
2.6. Modelo de Múltiplas Fontes Pontuais .....	4
2.7. Estimativa do fluxo de calor radiante pelo modelo analítico de Modak, 1977 .....	5
2.7.1. Hipóteses .....	5
2.7.2. Modelo matemático .....	5
2.7.3. Coeficiente de absorção .....	6
2.7.4. Espessura ótica, volume e área de chama .....	6
2.7.5. Temperatura efetiva de chama .....	7
3. BANCADA EXPERIMENTAL .....	7
4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS .....	8
4.1 Medição de fluxo radiante .....	8
4.1 Modelagem numérica .....	10
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	10
5.1. Superfície descrita por polinômio de terceiro grau .....	11
5.2. Superfície descrita por Tronco de Cone .....	12
5.3. Superfície descrita por cilindro circular reto .....	13
5.4. Comparações entre os modelos para estimar o fluxo radiante .....	13
5.5. Correlações do parâmetro de ajuste de espessura ótica .....	13
6. CONCLUSÕES .....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
ANEXO I .....	16

APÊNDICE I .....	16
APÊNDICE II .....	18
APÊNDICE III .....	18
APÊNDICE IV .....	18
APÊNDICE V .....	20
APÊNDICE VI.....	20



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivação

A utilização de processos de combustão é crescente em escala mundial. Tendo em vista fatores ambientais, econômicos e de segurança, o entendimento e a possibilidade de predição desses processos possui grande relevância para o desenvolvimento do setor industrial. Entre a extensa gama de aplicações destacam-se as chamas difusivas, utilizadas em fornos e caldeiras, em motores do ciclo Diesel, em turbinas e em *flares* para o descarte de rejeitos. Em todos esses casos a radiação procedente da chama tem um papel relevante na transferência do calor gerado pela combustão. Mais especificamente, os *flares*, instalados em plataformas, situam-se nas proximidades de outros equipamentos e colaboradores, os quais são suscetíveis ao fluxo de calor proveniente da chama.

No caso do pré-sal brasileiro, o gás associado contém altos teores de CO<sub>2</sub>, que é um gás participante e altera a emissão de radiação pela chama. Em laboratório, por meio de condições controladas, gás natural e CO<sub>2</sub> podem ser utilizados para simular a operação dos *flares* com o objetivo de determinar limites de estabilidade e a radiação emitida durante a combustão. O modelo de fonte pontual é muito utilizado para prever o fluxo de calor radiante emitido por chamas, apesar de não considerar fatores geométricos da chama. Outro modelo, proposto por Hankinson e Lowesmith, 2012, considera múltiplas fontes pontuais ao longo da chama e possui maior sensibilidade quanto à geometria, mas depende de pesos que devem ser ajustados. Uma terceira opção é considerar que a chama é um volume homogêneo com uma única temperatura e coeficiente de absorção, segundo Modak, 1977.

No presente trabalho, será realizada a comparação do modelo analítico de Modak, 1977, com resultados experimentais de radiação, obtidos em escala de laboratório, e modelos mais simplificados.

### 1.2 Revisão bibliográfica

Investigar modelos de radiação é fundamental para previsão da energia liberada durante a combustão de chamas turbulentas. Além de servir como uma ferramenta estratégica para o posicionamento de *flares*, os modelos auxiliam a pesquisa e a validação de novas configurações de equipamentos relacionados à área.

Tendo em vista a importância do estudo da radiação em chamas, Lowersmith *et al.*, 2007 estabeleceram relação entre a fração radiante e a razão entre átomos de carbono e hidrogênio presentes no combustível. A fração radiante se eleva à medida que a razão entre a quantidade de Carbono e a de Hidrogênio (C/H) do combustível aumenta. Isso ocorre devido à maior concentração de CO<sub>2</sub> nos produtos da combustão e a maior tendência à formação de fuligem. Enquanto as chamas não estão descoladas do bico injetor, a fração radiante é maior, devido à maior formação de fuligem [Hu *et al.*, 2014].

A aquisição de dados experimentais de radiação é realizada por meio de radiômetro posicionado em certa distância relativa à chama, geralmente expressa de forma adimensional (dividida pelo comprimento de chama) [Quezada *et al.*, 2016]. Outro parâmetro experimental importante é a geometria da chama. Gautam, 1984, realizou um estudo experimental dos fatores que influenciam no comprimento de chama e na altura de levantamento para diferentes hidrocarbonetos a partir de técnicas fotográficas. Mungal, 1989, investigou o comportamento da estrutura e das flutuações de chamas turbulentas com uma câmera de vídeo, adaptando parâmetros particulares para cada tipo de chama. Feese e Turns, 1998, estudaram o efeito da adição de inertes no ar e no combustível sobre o comprimento de chamas difusivas laminares de metano.

O fluxo de calor calculado pelo modelo de fonte pontual resulta em valores com boa confiabilidade, desde que o radiômetro esteja distante o suficiente da fonte emissora de radiação [Turns e Myhr, 1991]. Os estudos experimentais de Lowersmith *et al.*, 2007, apontaram o decaimento exponencial da radiação incidente na superfície receptora à medida que a distância radial relativa à chama aumenta. Por outro lado, Machado, 2015, encontrou boa concordância nos resultados, ao medir radiação em chamas difusivas de gás natural diluídas e não diluídas com CO<sub>2</sub> pelo método de múltiplas fontes pontuais, proposto por Hankinson *et al.*, 2012. Modak, 1977, propõe um modelo analítico para calcular o fluxo de calor em chamas do tipo *pool fire* (incêndio em piscina) em larga escala. Assume-se que essas chamas são misturas isotérmicas e homogêneas de particulado de fuligem e outros produtos de combustão em equilíbrio termodinâmico e também que se comportam como um gás cinza. Posteriormente, Souil *et al.*, 1984, agregaram parâmetros experimentais ao modelo de Modak, 1977, a fim de validá-lo em função do combustível utilizado. Porém, nenhum trabalho apresenta uma comparação sistemática de modelos preditivos para o fluxo de calor radiante.

### 1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o modelo de Modak, 1977, para estimativa do fluxo de calor radiante emitido por chamas difusivas turbulentas. Para isso, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- 1.3.1 Realizar medições experimentais de radiação térmica ao paralelas ao eixo vertical das chamas turbulentas não pré-misturadas de gás natural para diversas vazões em um queimador tipo jato simples;
- 1.3.2 Estimar o fluxo de calor radiante emitido pela chama, considerando dois diferentes modelos propostos na literatura: múltiplas fontes pontuais ponderadas e de uma única fonte pontual;
- 1.3.3 Implementar rotinas de processamento das formas geométricas pré-determinadas ao modelo de Modak, 1977, utilizando um código implementado no *software* Matlab;
- 1.3.4 Comparar os resultados analíticos fornecidos pelo modelo com os resultados experimentais e demais modelos preditivos.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Tipos de chama

As chamas podem ser classificadas pela disposição dos reagentes em dois grupos: chamas pré-misturadas e chamas difusivas. No caso da pré-mistura, combustível e comburente se encontram antes que ocorra reação química na atmosfera. As chamas difusivas são distinguidas pela presença do oxidante necessário na reação exclusivamente na atmosfera, sem prévia mistura. Dentro do grupo das chamas difusivas há duas subcategorias que descrevem a configuração e o estado físico do combustível: tipo jato, para combustível gasoso sendo injetado em pressão superior à atmosférica, e tipo piscina, quando se utiliza combustível líquido à pressão atmosférica [Turns, 2000].

No presente trabalho adota-se chama difusiva, sendo a condição de pré-mistura verificada apenas em vazões elevadas, para as quais não ocorre ancoragem da chama no bico injetor. Consequentemente a altura de levantamento estabelece uma zona de pré-mistura de reagentes na base da chama [Wohl *et al.*, 1949].

## 2.2 Comprimento visível de chama

Na literatura, encontram-se diversas técnicas para medição de comprimento de chama. Entretanto, Coelho e Costa, 2007, definem a partir de técnica fotográfica que  $L_f$  é determinado pela média dos comprimentos na linha central de uma amostra de fotografias. Turns, 2000 formaliza o conceito, indicando  $L_f$  como a distância entre a base e o ponto de maior temperatura na linha central da chama. Neste ponto, a fração de mistura média, definida pela razão entre a massa do material proveniente do bico injetor e a massa total, é considerada como estequiométrica.

Quezada *et al.*, 2016, propõem que o comprimento médio de chama,  $L_f$ , seja determinado a partir da média de 300 imagens instantâneas. Cada medição é definida como a distância entre o ponto mais alto de chama no espectro visível e o plano paralelo à saída de combustível no queimador.

## 2.3 Altura de levantamento e extinção de chama

A altura de levantamento,  $H_f$ , é verificada a partir de elevadas velocidades dos reagentes na saída do queimador. À medida que a velocidade do combustível aumenta, a chama tem menor estabilidade em sua base e  $H_f$  aumenta, embora o comprimento de chama permaneça constante. Isso ocorre até que a velocidade crítica seja atingida. A partir deste estado, a velocidade de queima é inferior à dos reagentes e ocorre o apagamento da chama.

Wohl *et al.*, 1949, e Vanquickenborne e A. Van Tiggelen, 1966, relatam pré-mistura de ar-combustível na região descolada, enquanto que Peters e William, 1983, sugerem que, para chamas turbulentas descoladas e em qualquer ponto próximo à saída do queimador, a velocidade média do escoamento é maior que a velocidade de propagação da chama. Enquanto não ocorre apagamento, há equilíbrio entre as velocidades dos reagentes e de queima.

Para determinar a altura de levantamento, o procedimento proposto por Quezada *et al.*, 2016, utiliza técnicas fotográficas similares as utilizadas para definição do comprimento de chama. Seu método tem a vantagem de não precisar de outro recurso visual, como *Schierlen* ou *Shadow photography*, utilizados por outros autores.

## 2.4 Fração radiante

A fração radiante,  $X_R$ , é a parcela da taxa de geração de energia da chama que é liberada na forma de radiação. Pode ser definida, segundo Coelho e Costa, 2007, pela razão entre a quantidade de calor liberada por radiação por unidade de tempo,  $Q_R$  [W], e a potência total da chama,  $Q_F$  [W]. A Equação 2.1 representa a fração radiante.

$$X_R = \frac{Q_R}{Q_F} \quad (2.1)$$

Assumindo o modelo de fonte pontual, a fração radiante pode ser estimada considerando a chama como fonte pontual de calor radiante, conforme a Equação 2.2, na qual  $\tau_s$  é a transmitância da atmosfera e  $q''_R$  é o fluxo de energia liberada por radiação [W/m<sup>2</sup>].

$$X_R = \frac{4\pi S^2 q''_R}{Q_F \tau_s} \quad (2.2)$$

O calor liberado por radiação é definido por  $Q_R = q''_R A_f$ , uma vez que a superfície esférica receptora de energia é expressada por  $A_f = 4\pi S^2$ , onde  $S$  é a distância radial entre o eixo axial da chama e o receptor [m]. Para chamas turbulentas,  $S$  é definida em duas vezes o valor do comprimento de chama [Quezada *et al.*, 2016].

## 2.5 Modelo de Fonte Pontual, SPS

Sabendo-se o valor de  $X_R$  para determinada chama, o fluxo de calor radiante,  $q''_R$ , pode ser estimado rearranjando a Equação 2.2, como mostrado a seguir na Equação 2.3.

$$q''_R = \frac{X_R Q_F \tau_s}{4\pi S^2} \cos \varphi \quad (2.3)$$

As variáveis são ilustradas na Figura I do ANEXO I, na qual o termo  $\varphi$  representa o ângulo formado pela trajetória de  $S$  entre o eixo normal à face plana do receptor e a fonte de radiação, sendo que esta se encontra a meio comprimento de chama acima do queimador [Machado, 2015].

## 2.6 Modelo de Múltiplas Fontes Ponderadas, WMPS

Outra forma de estimar  $q''_R$  é através do *Weighted Multiple Points Source*, WMPS, segundo Hankinson e Lowersmith, 2012. Este modelo é empregado para estimar o fluxo radiante em vários pontos colineares ao longo da chama. Tendo em vista a Figura I do Anexo I, calcula-se o fluxo de calor, em cada ponto de interesse, pelo somatório do fluxo proveniente de  $N$  fontes pontuais distribuídas ao longo da chama, cada um com um fator de ponderação  $w_j$ . Utiliza-se a Equação 2.4 para estimar  $q''_R$ .

$$q''_R = \sum_{j=1}^N \frac{w_j X_R Q_F \tau_s}{4\pi S_j^2} \cos \varphi \quad (2.4)$$

Os fatores  $w_j$  são distribuídos linearmente em duas funções ao longo do comprimento de chama, onde o ponto máximo encontra-se à altura de  $0,75L_f$ . Estes fatores influenciam a capacidade de prever o fluxo radiativo,  $q''_R$ , e são calculados a partir de duas equações que consideram a posição relativa  $n$ . A primeira, Equação 2.5, é utilizada no intervalo  $0 < n \leq 0,75N$ . Para valores  $n > 0,75N$ , emprega-se a Equação 2.6. Considerando, inclusive, a Equação 2.7, é possível montar um sistema de equações linearmente independentes a fim de calcular os valores  $w_j$ . Para isso, atribui-se um número inteiro positivo ao valor de  $w_1$ .

$$w_j = \frac{jw_1}{\sum_{j=1}^n w_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.5)$$

$$w_j = \frac{\left[ n - \frac{n-1}{N-(n+1)}(j-(n+1)) \right] w_1}{\sum_{j=1}^n w_j}, \quad j = n+1, n+2, \dots, N \quad (2.6)$$

$$\sum_{j=1}^N w_j = 1 \quad (2.7)$$

## 2.7 Estimativa do fluxo de calor radiante pelo modelo analítico de Modak, 1977.

### 2.7.1 Hipóteses

Assume-se que a chama é composta por uma mistura de gases cinzas e que o produto de combustão é constituído de forma homogênea pela mistura de fuligem e gases (água,  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2$ ) e em equilíbrio termodinâmico. O modelo analítico considera geometria axissimétrica da chama no cálculo de radiação emitida.

### 2.7.2 Modelo matemático

No presente modelo, a hipótese de meio homogêneo permite a integração da equação da transferência radiativa de calor (ETR) para um dado caminho que atravessa a chama. Com base nisso, é possível calcular o fluxo de calor radiativo em determinado ponto receptor próximo à chama, considerando a componente normal ao receptor das intensidades radiantes que se propagam em todas as direções.

Para viabilizar o cálculo da trajetória na qual será integrada a intensidade de energia radiativa, é adotado um sistema de coordenadas cilíndricas. Outra simplificação aplicada ao presente trabalho é estabelecida para que a face do receptor esteja orientada sempre perpendicular ao chão paralela ao eixo de simetria da chama. A Figura 2.1 vincula a trajetória e o posicionamento do receptor aos termos das Equações 2.8, 2.9 e 2.10, cujas descrições encontram-se na Tabela I do APÊNDICE I.

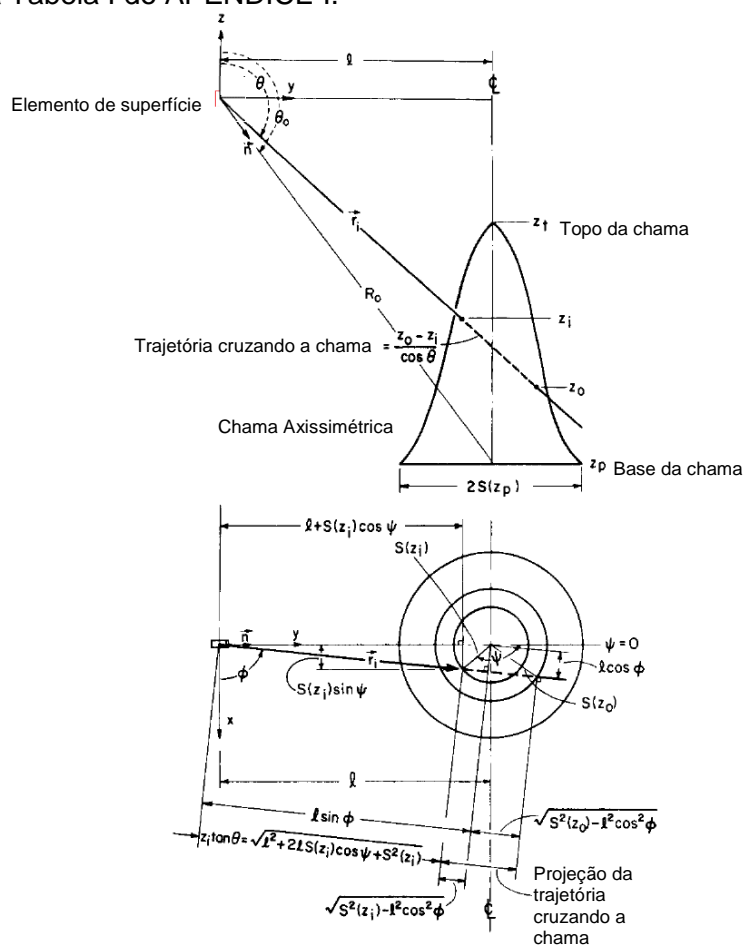


Figura 2.1: Referências geométricas das Equações 2.8, 2.9 e 2.10 no modelo de cálculo de radiação [adaptado de Modak, 1977].

$$q''_{R,S} = \frac{2 \sigma T_{ad}^4}{\pi} \int_{z_i=z_i}^{z_p} dz_i \int_{\Psi=\Psi_i}^{\pi} \frac{1}{r_i} A B d\Psi \quad (2.8)$$

$$A = \left( 1 - \exp[-k r_i (z_o/z_i - 1)] (u S(z_i) \sin\Psi + v(l + S(z_i) \cos\Psi) + w z_i) \right) \quad (2.9)$$

$$B = S(z_i) \left( S(z_i) + l \cos\Psi - z_i \frac{dS(z_i)}{dz} \right) \quad (2.10)$$

O termo  $q''_{R,S}$  na Equação 2.8 representa o fluxo de calor radiante referente à integração dos raios emitidos por um volume infinitesimal da chama. Para determinada geometria da chama ( $S(z_i)$ ), pode-se calcular o fluxo de calor radiativo,  $q''_R$ , somando, por integração numérica, as contribuições de todos os raios que cruzam a chama,  $q''_{R,S}$ . Em referência à literatura, será assumido que a superfície possui em sua largura um valor máximo de 17% do comprimento de chama [Turns, 2000].

### 2.7.3 Coeficiente de absorção

Estudos na década posterior ao modelo de Modak, 1977, indicam que o coeficiente de absorção,  $k$ , varia em função da espessura ótica emissora,  $S_m$ , do comprimento de chama, do fluxo de calor radiante e da temperatura adiabática de chama,  $T_{ef}$ , entre outros fatores, conforme a Equação 2.11 [Hottel e Sarofim, 1967]. Neste caso,  $q''_R$  é adquirido experimentalmente em uma medição de único ponto.

$$k = -\frac{1}{S_m} \ln \left( 1 - \frac{4\pi(2L_f)^2}{A_f} \frac{q''_R}{\sigma T_{ef}^4} \right) \quad (2.11)$$

### 2.7.4 Espessura ótica, volume e área de chama

A espessura ótica de chama,  $S_m$ , é a distância linear que representa a superfície emissora de radiação. Dada a Equação 2.12,  $S_m$  é caracterizada pela razão entre o volume de chama visível,  $V_f$ , e a superfície visível de chama,  $A_f$ . A inclusão de uma constante experimental,  $C_0$ , torna-se necessária para validação quantitativa do modelo de Modak, 1977. Esta depende do tipo de combustível e de parâmetros geométricos [Souil *et al.*, 1984].

$$S_m = C_0 \frac{V_f}{A_f} \quad (2.12)$$

Respectivamente, calcula-se a área,  $A_f$ , e o volume de chama,  $V_f$ , a partir das Equações 2.13 e 2.14, que são oriundas de teoremas para o cálculo integral de geometrias axissimétricas de revolução [Anton *et al.*, 2007]. O eixo auxiliar de revolução,  $z'$ , coincide com o eixo do queimador e os limites de integração indicam que o volume e a área de chama não contabilizam a altura de levantamento. Dessa forma, considera-se apenas a região onde há chama visível.

$$A_f = \int_{H_f}^{L_f} 2\pi S(z_i) \sqrt{1 + \left(\frac{S(z_i)}{dz}\right)^2} dz' \quad (2.13)$$

$$V_f = \int_{H_f}^{L_f} 2\pi z' S(z_i) dz' \quad (2.14)$$

### 2.7.5 Temperatura efetiva de chama

Assumindo pressão constante, combustão completa e mistura estequiométrica, a temperatura adiabática de chama é calculada a partir do balanço de entalpias de reagentes,  $H_{REAG}$ , e produtos,  $H_{PROD}$ , pela Primeira Lei da Termodinâmica [Turns, 2000]. Como uma parcela da energia é liberada na forma de radiação essa perda é contabilizada no balanço, conforme mostrado na Equação 2.15,

$$H_{REAG} - X_R \cdot PCI \cdot M = H_{PROD} \quad (2.15)$$

onde  $PCI$  é o poder calorífico inferior e  $M$  é a massa molecular de mistura combustível. Para  $X_R$  é utilizado o valor obtido experimentalmente. Assim, assume-se que a temperatura efetiva de chama,  $T_{ef}$ , provém da Equação 2.15.

## 3. BANCADA EXPERIMENTAL

A Figura 3.1 apresenta as conexões dos equipamentos da bancada experimental.

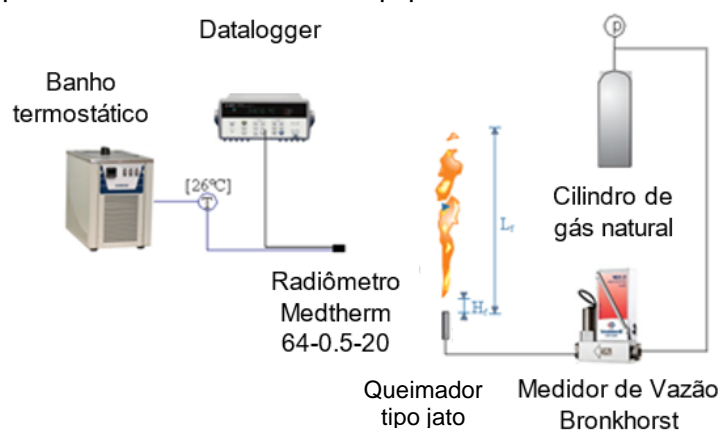


Figura 3.1: Bancada experimental.

As chamas difusivas são produzidas verticalmente em um queimador tipo jato de aço inox com diâmetro interno de 7,55 mm, cujo comprimento é de 30 vezes o diâmetro, garantindo o escoamento completamente desenvolvido. As condições ambientes assumidas são de 302,15 K à 1 atm.

O sistema é alimentado com cilindros de gás natural, cuja composição assumida é de 90,8% de Metano, 6,1% de etano, 1,4% de nitrogênio, 1,2% de propano e 0,5% de  $CO_2$  [GasNet, 2016].

Em série com o queimador, um medidor de vazão eletrônico Bronkhorst F112AC é utilizado para controlar a vazão de gás natural. A incerteza informada pelo fabricante é de  $\pm 0,5\%$  do valor lido somado a  $\pm 0,1\%$  do fundo de escada, 150 L/min.

Um sensor de termopilha do tipo Schmidt-Boelter da marca Medtherm, modelo 64-0,5-20 com janela de Ze-SeW-1C-150, é utilizado para aquisição de tensão proveniente da transdução do fluxo radiante. O ângulo de abertura do sensor é de  $150^\circ$ , a sensibilidade é de  $0,8503 \text{ kW/cm}^2$  para a faixa de operação de 0 a  $0,5 \text{ kW/cm}^2$  e incerteza de  $\pm 3\%$ . O espectro captado é de 0,5 a  $22 \mu\text{m}$ . Este radiômetro é arrefecido e estabilizado à temperatura ambiente por um banho termostático. Por meio de um *datalogger* modelo bla bla da marca Agilent, o computador registra a tensão medida.

## 4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

### 4.1 Medição de Fluxo Radiante

Inicialmente, o sensor é arrefecido até que haja equilíbrio com a temperatura ambiente. Em seguida, posiciona-se o radiômetro à dois comprimentos de chama de distância radial do queimador. As vazões de GN consideradas são de 5, 10, 25, 30, 50, 70, 100, 120 e 150 L/min.

No caso de medição de única fonte pontual, o sensor é posicionado suficientemente longe e a meio comprimento de chama de altura acima da saída do queimador. Uma vez que o valor indicado no medidor de vazão é estabilizado com a ignição da chama, o *datalogger* é acionado para adquirir a tensão do radiômetro Schmidt-Boelter, que está com a face orientada radialmente para a chama, perpendicular ao chão. A taxa de aquisição é ajustada para 300 ms para cada amostra de 20 s captada, totalizando 67 valores [Quezada *et al.*, 2016]. Após captada a tensão com chama estabilizada, a vazão de combustível é interrompida para que a radiação de fundo seja adquirida. Esta é captada para que a radiação emitida ou refletida por outras superfícies presentes no ambiente experimental também seja contabilizada. A tensão efetiva proveniente da transdução do sinal medido é resultado da diferença de tensões de chama acesa e apagada. Com o auxílio de planilhas, as médias e os desvios padrão são calculados e armazenados. O valor do fluxo medido será utilizado no cálculo do coeficiente de absorção da chama.

A medição em vários pontos ao longo da chama é utilizada para captar a distribuição do fluxo radiante ao longo da chama e servirá para comparação de comportamento entre valores experimentais e os modelos WMPS, SPS e o modelo adaptado de Modak, 1977. São ajustadas a mesma distância radial e a mesma orientação de face do sensor que a medição de fonte pontual. Em contrapartida, necessita que o receptor seja posicionado em múltiplos pontos ao longo da chama. Adota-se uma medida modular para o intervalo entre dois pontos de medição:  $1/8$  do comprimento de chama para vazão de 5 L/min,  $1/12$  de  $L_f$  de 10 a 70 L/min e  $1/16$  de  $L_f$  para as demais vazões. Além disso, a trajetória de 24 pontos do radiômetro se estende desde três pontos abaixo do nível do queimador até 21 pontos a partir do nível do queimador. Esta técnica foi adotada para realizar medições em todo o comprimento disponível da bancada experimental (distância segura entre o chão e o exaustor de gases), tentando manter o mesmo comprimento adimensional para chamas de tamanho similares.

### 4.2 Modelagem numérica

Após aquisição dos dados experimentais, um código no *software* Matlab foi desenvolvido para adaptar o modelo de Modak, 1977, a uma superfície definida para chamas. Este código simula numericamente vários pontos de medição ao longo da chama para estimar o fluxo de energia radiante. Em cada posição são aplicadas as Equações 2.8, 2.9 e 2.10, além das outras equações subsidiárias já descritas. Assim, a rotina é dividida nas etapas concatenadas da Figura 4.1.

A entrada de dados experimentais considera:  $L_f$ ,  $H_f$ ,  $X_R$  (Fração Radiante calculada a partir de medição em único ponto), posições mínima e máxima verticais paralelas ao eixo da



chama, intervalo entre as posições verticais e diâmetro do queimador. A constante empírica  $C_0$  da Equação 2.12 influencia a espessura ótica  $e$ , conseqüentemente o coeficiente de absorção, e é declarada na primeira etapa. Esta constante é encontrada na literatura para reação com metano puro [Lowesmith *et al.*, 2007], porém, no presente trabalho, ela é ajustada para o valor que leve à maior concordância com os dados experimentais de fluxo de calor radiante. Logo, utiliza-se a análise linear de erros R-quadrado como critério de aproximação que define  $C_0$ .

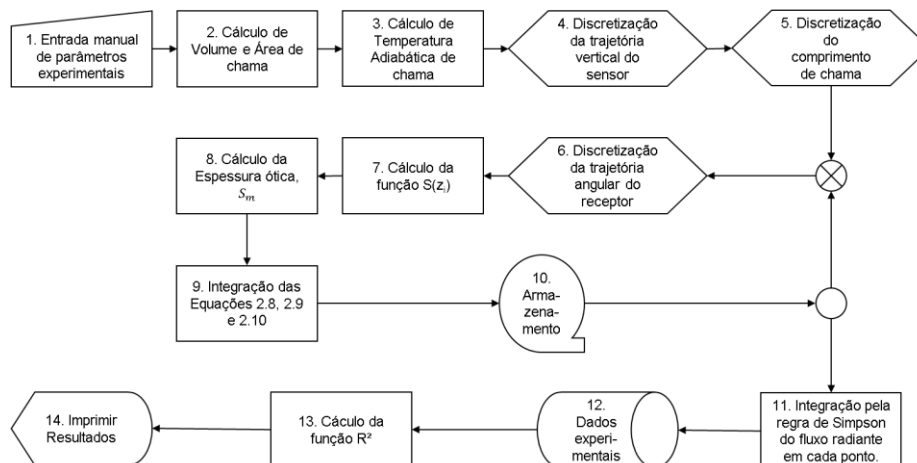


Figura 4.1: Rotina de processamento do código para o cálculo do fluxo radiante ao longo da chama.

As discretizações do comprimento de chama e da trajetória angular são requisitos para as integrações apresentadas nas Equações 2.8, 2.9, 2.10, 2.13 e 2.14. O estudo de independência de malha presente na Tabela I do APÊNDICE II indicou que são necessários apenas dez intervalos de integração, tanto ao longo de  $L_f$ , quanto para  $\Psi$ , no somatório proveniente das Equações 2.8, 2.9 e 2.10. Entretanto, para as integrais de volume e área das Equações 2.13 e 2.14, são necessários 1000 intervalos ao longo de  $L_f$ . Das três superfícies desenvolvidas para o presente trabalho, a de maior complexidade é a representada por uma função de terceiro grau e nesta é analisada a independência.

A descrição geométrica da chama ( $S(z_i)$ ) é um parâmetro essencial no modelo de Modak, 1977. Os resultados sofrem grande influência da superfície escolhida para representar a chama. Assim são avaliadas três opções de superfície para desenvolver o código: 1) tronco de cone, 2) função polinomial de terceiro grau e 3) cilindro. A Figura 4.2 ilustra as superfícies em comparação com as chamas de GN. Conforme observado na literatura, a máxima largura de chama utilizada na modelagem das superfícies equivale a 17% do comprimento de chama. No caso da superfície 2), o código desenvolve o polinômio a partir da interpolação de quatro pontos, os quais são destacados na Figura 4.2 b.

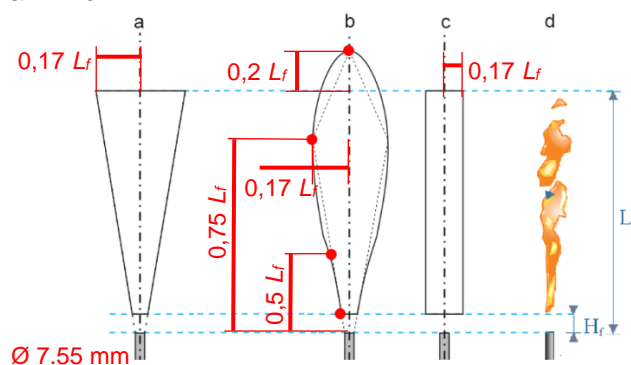


Figura 4.2: Modelos representativos para chamas turbulentas de gás natural, sendo a) tronco de cone, b) revolução de função de terceiro grau e c) cilindro e d) chama de gás natural.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores obtidos experimentalmente e numericamente são registrados nas Tabelas I, II e III presentes no APÊNDICE III. Para cada vazão estudada,  $z/L_f$  é a posição relativa ao comprimento de chama,  $qr_{experim}$  é o fluxo medido,  $qr_{modelo}$  é o fluxo calculado pelo modelo numérico e  $2\sigma_{z/L_f}$  e  $2\sigma_{qr}$  representam dois desvios padrão da posição relativa e do fluxo medido, respectivamente. As Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 a seguir contêm os valores de vazão volumétrica e de comprimento de chama disponíveis na literatura e os demais parâmetros utilizados no presente trabalho. As incertezas de comprimento de chama e das medições de radiação estão demonstradas no APÊNDICE IV.

Tabela 5.1: Resultados do modelo de superfície de terceiro grau.

$V$ [L/min]	$Re$	$L_f$ [mm]	$H_f$ [mm]	$X_R$	$C_0$	$R^2_{qr}$	$A_f$ $10^{-3}$ [m <sup>2</sup> ]	$V_f$ $10^{-3}$ [m <sup>3</sup> ]	$S_m$ $10^{-3}$ [m]	$k$ $10^{-3}$ [m <sup>-1</sup> ]	$T_{ad}$ [K]
5,0	912,9	540,3	0,0	0,149	18,0	0,852	88,4	1,6	16,1	335,6	2020,8
10,0	1825,7	755,4	0,0	0,178	10,5	0,810	174,2	4,5	24,2	273,5	1961,2
25,0	4564,3	947,0	0,0	0,147	8,2	0,822	275,0	9,0	31,3	267,7	2024,8
30,0	5477,1	968,4	43,3	0,140	9,2	0,855	262,3	8,4	31,4	293,0	2038,6
50,0	9128,6	1116,3	76,2	0,133	10,5	0,632	332,2	11,9	29,8	376,5	2052,3
70,0	12780,0	1226,4	102,13	0,129	11,3	0,960	388,6	15,1	29,7	437,9	2060,9
100,0	18257,2	1391,7	139,6	0,121	11,8	0,967	482,6	20,8	27,3	509,3	2077,2
120,0	21908,6	1428,5	169,3	0,133	12,8	0,936	488,1	21,2	33,6	555,6	2053,2
150,0	27385,7	1410,5	207,7	0,133	14,8	0,834	445,2	18,5	41,2	611,6	2051,9

Tabela 5.2: Resultados do modelo de superfície de tronco de cone.

$V$ [L/min]	$Re$	$L_f$ [mm]	$H_f$ [mm]	$X_R$	$C_0$	$R^2_{qr}$	$A_f$ $10^{-3}$ [m <sup>2</sup> ]	$V_f$ $10^{-3}$ [m <sup>3</sup> ]	$S_m$ $10^{-3}$ [m]	$k$ $10^{-3}$ [m <sup>-1</sup> ]	$T_{ad}$ [K]
5,0	912,9	540,3	0,0	0,149	6,9	0,938	91,2	1,3	53,6	98,3	2020,8
10,0	1825,7	755,4	0,0	0,178	6,9	0,868	174,8	3,5	48,3	136,8	1961,2
25,0	4564,3	947,0	0,0	0,147	6,5	0,749	271,9	6,7	52,7	161,2	2024,8
30,0	5477,1	968,4	43,3	0,140	6,8	0,690	282,6	7,2	49,4	173,2	2038,6
50,0	9128,6	1116,3	76,2	0,133	7,7	0,789	372,1	10,9	44,2	226,5	2052,3
70,0	12780,0	1226,4	102,13	0,129	8,6	0,704	446,6	14,5	40,7	278,4	2060,9
100,0	18257,2	1391,7	139,6	0,121	8,9	0,807	571,1	21,0	35,9	327,6	2077,2
120,0	21908,6	1428,5	169,3	0,133	9,8	-	598,6	22,7	40,1	226,9	2053,2
150,0	27385,7	1410,5	207,7	0,133	11,0	-	578,9	21,8	46,7	414,4	2051,9

Tabela 5.3: Resultados do modelo de superfície cilíndrica.

$V$ [L/min]	$Re$	$L_f$ [mm]	$H_f$ [mm]	$X_R$	$C_0$	$R^2_{qr}$	$A_f$ $10^{-3}$ [m <sup>2</sup> ]	$V_f$ $10^{-3}$ [m <sup>3</sup> ]	$S_m$ $10^{-3}$ [m]	$k$ $10^{-3}$ [m <sup>-1</sup> ]	$T_{ad}$ [K]
5,0	912,9	540,3	0,0	0,149	8,8	0,898	162,5	3,6	15,1	193,8	2020,8
10,0	1825,7	755,4	0,0	0,178	8,6	0,894	317,7	9,8	13,7	264,9	1961,2
25,0	4564,3	947,0	0,0	0,147	8,2	0,866	499,3	19,3	14,6	316,7	2024,8
30,0	5477,1	968,4	43,3	0,140	7,0	0,884	499,8	19,7	17,5	275,8	2038,6
50,0	9128,6	1116,3	76,2	0,133	7,0	0,913	648,4	29,4	18,1	317,6	2052,3
70,0	12780,0	1226,4	102,13	0,129	7,2	0,933	770,5	38,4	28,3	358,7	2060,9
100,0	18257,2	1391,7	139,6	0,121	6,9	0,926	974,6	55,0	17,6	389,7	2077,2
120,0	21908,6	1428,5	169,3	0,133	6,6	0,826	1007,0	58,3	23,6	382,3	2053,2
150,0	27385,7	1410,5	207,7	0,133	5,5	0,816	951,3	54,3	37,3	314,1	2051,9

A função  $R^2$  das diferenças (representada pelo símbolo  $R^2_{qr}$ ) indica maior precisão em vazões superiores, e os valores do coeficiente de absorção,  $k$ , estão na mesma ordem de grandeza do que é encontrado na literatura [Souil *et al.*, 1984] e [Lowesmith *et al.*, 2007].

## 5.1 Superfície descrita por polinômio de terceiro grau

A Figura 5.1 apresenta a comparação entre os dados experimentais, E, e o modelo, M, com função de terceiro grau na superfície para o cálculo do fluxo de radiação,  $q''_R$ . Cada série de pontos retrata uma vazão medida em múltiplos pontos ao longo da chama. À medida que a vazão aumenta, há maior concordância entre  $q''_R$  medido e o valor calculado.

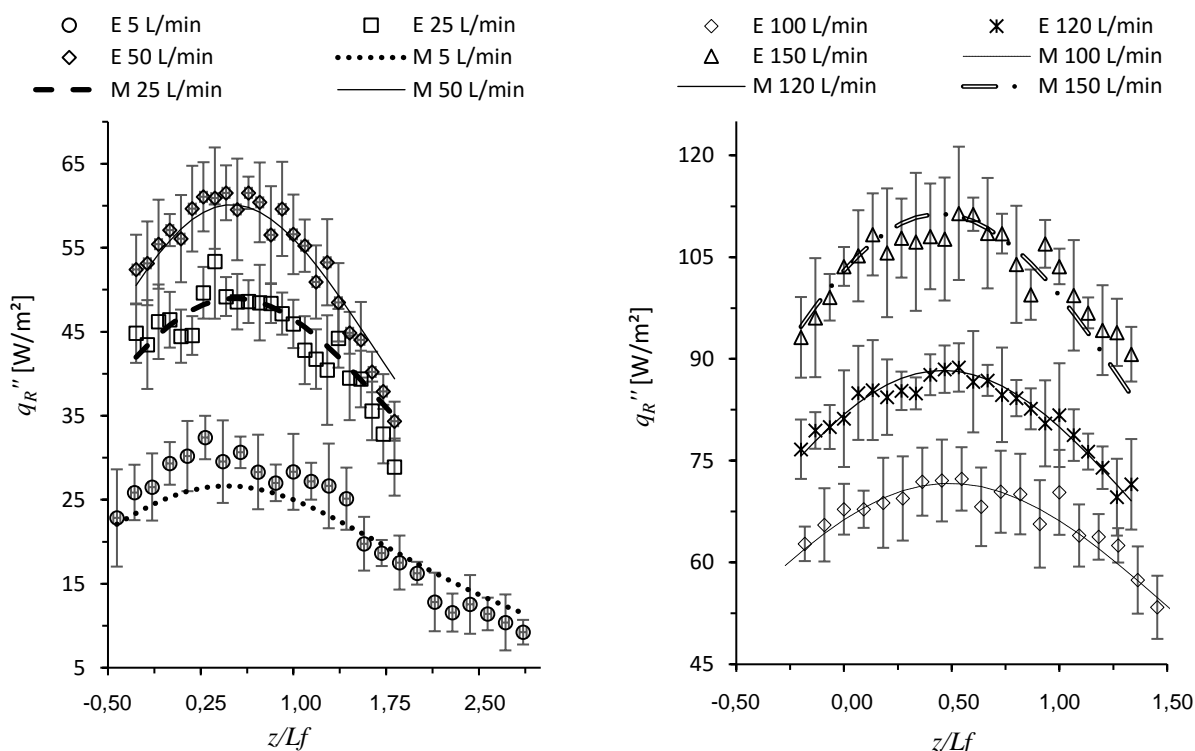


Figura 5.1: Comparação entre dados experimentais de fluxo de calor radiante e modelo descrito por superfície polinomial de terceiro grau segundo o modelo de Modak, 1977.

Esquerda: vazões de 5 a 50 L/min. Direita: vazões de 100 a 150 L/min.

Esta superfície superestima o comprimento de chama visível em 20% e melhor se adequa ao comportamento do fluxo de calor radiante. Esse percentual é determinado empiricamente, uma vez que  $L_f$  não considera os produtos da reação que são arrastados por empuxo logo após a queima. Estes gases emitem radiação no espectro infravermelho e não são captados pelo sensor da câmera utilizada para medir comprimento de chama. Experimentalmente observa-se que o comprimento da chama oscila em torno de  $L_f$  e que essa intermitência é da ordem de  $\pm 20\%$  de  $L_f$ , havendo concordância com a literatura [Quezada *et al.*, 2016]. Esta variação é relacionada com um 95% de confiabilidade da amostra, equivalendo a dois desvios padrão.

## 5.2 Superfície descrita por tronco de cone

Os resultados da superfície representada por tronco de cone são verificados na Figura 5.2. Embora os resultados concordem satisfatoriamente para vazões inferiores a 50 L/min, o modelo não é capaz de prever com precisão o fluxo radiante para as demais vazões.

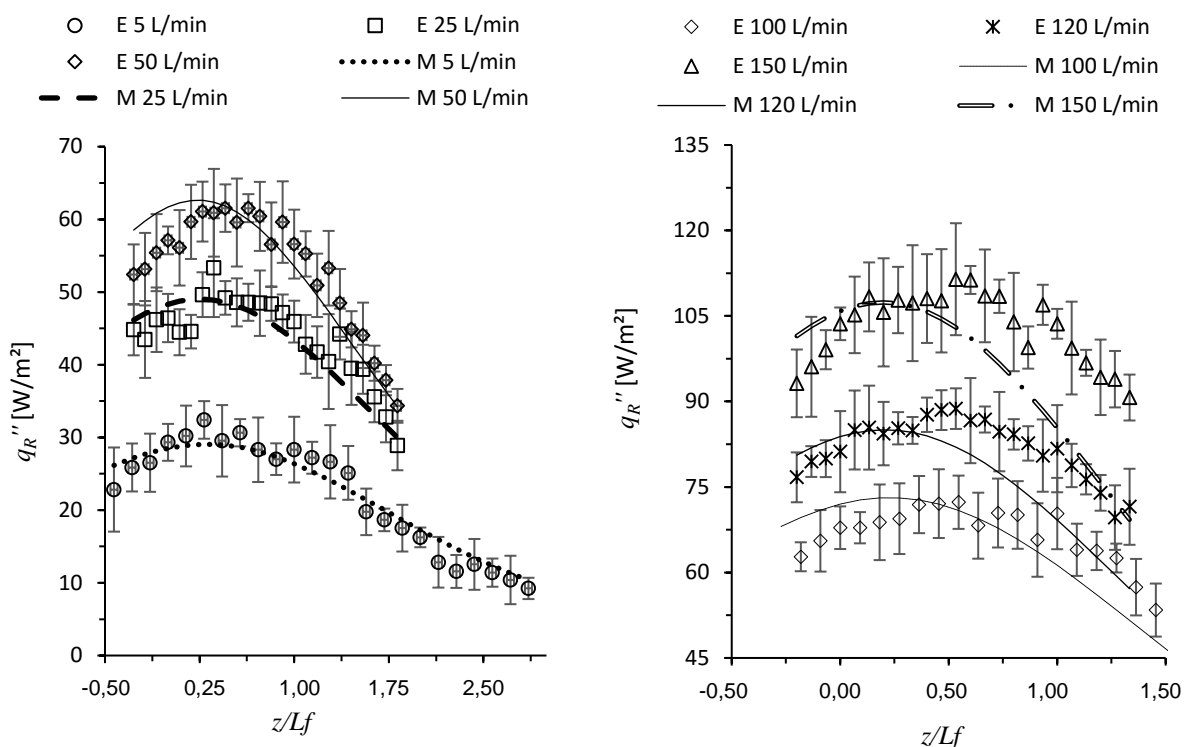


Figura 5.2: Comparação entre dados experimentais de fluxo de calor radiante e modelo de Modak, 1977, descrito por tronco de cone. Esquerda: vazões de 5 a 50 L/min. Direita: vazões de 100 a 150 L/min.

Em relação ao modelo polinomial, os valores de  $A_f$  indicam que a superfície da chama é superestimada com o tronco de cone. Além disso, o comprimento de chama medido experimentalmente é um valor que representa a média da intermitência de vários comprimentos no tempo. A flutuação deste comprimento de chama não é considerada na geometria e a defasagem em relação aos dados experimentais indica a possibilidade de diferenças entre a taxas de aquisição de  $L_f$  e de fluxo radiante.

### 5.3 Superfície descrita por cilindro circular reto

A Figura 5.3 exibe os resultados da modelagem de um cilindro. Este modelo, novamente pelo efeito da área no fluxo, em geral superestima o valor do fluxo radiante medido na base da chama.

Em vazões superiores a 25 L/min, ocorre descolamento de chama, e o ar arrastado na base empobrece a mistura. Conseqüentemente, a formação de fuligem é reduzida, bem como a fração radiante. Este efeito é perceptível a partir de 50 L/min na Figura 5.3, onde é indicado que o modelo superestima o valor do fluxo radiante de calor.

Ainda que a área deste modelo seja muito maior que as demais, os índices  $R^2$  indicam melhor representação da chama real do que a geometria de tronco de cone. Não é verificada defasagem entre o modelo e os dados experimentais, como ocorre com a superfície tronco de cone.

A razão entre volume e área de chama, conforme a Equação 2.11, é crescente com o aumento do comprimento de chama. Entretanto, a constante  $C_0$  diminui com o aumento de  $L_f$ , em discordância com as geometrias anteriores.

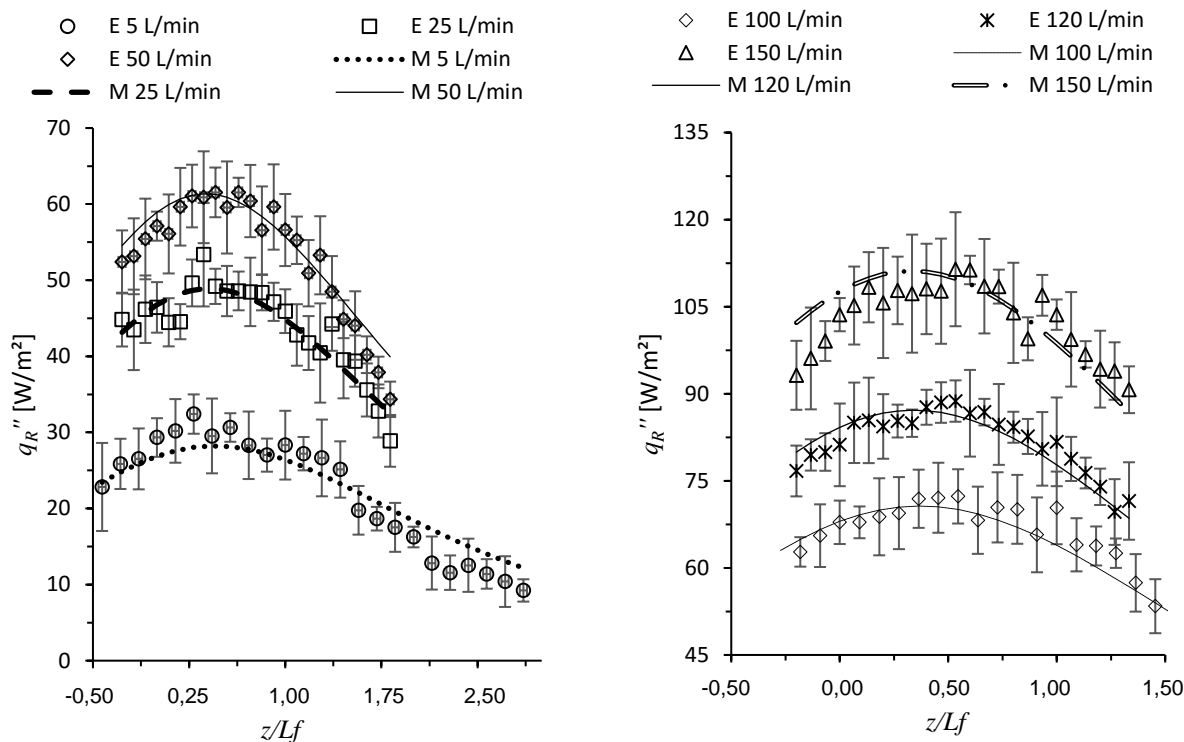


Figura 5.3: Comparação entre dados experimentais de fluxo de calor radiante e modelo de Modak, 1977, descrito por superfície cilíndrica. Esquerda: vazões de 5 a 50 L/min. Direita: vazões de 100 a 150 L/min.

#### 5.4 Comparações entre os modelos para estimar o fluxo radiante de chamas turbulentas

É verificada a maior concordância da geometria polinomial com os dados experimentais. Por meio desta superfície, o modelo de Modak, 1977, é comparado aos outros modelos (SPS e WMPS), conforme a Figura I do APÊNDICE V. São analisadas as vazões de 10, 70 e 150 L/min, para as quais a Tabela 5.4 ratifica os valores da regressão linear  $R^2$ , tomando como base as séries de valores experimentais. O modelo de Modak, 1977, traz melhor concordância do fluxo em relação aos dados experimentais. Entretanto, o modelo WMPS também encontra-se na faixa de incerteza dos valores experimentais em vazões a partir de 70 L/min. Para altas vazões, os três modelos possuem boa representatividade.

Tabela 5.4: Valores de  $R^2$  para as curvas da Figura I do APÊNDICE V.

Modelo↓	10 L/min	70 L/min	150 L/min
SPS	0,852	-	0,849
WMPS	0,514	0,719	0,859
Modak, 1977	0,911	0,958	0,861

#### 5.5 Correlações do parâmetro de ajuste de espessura ótica

Até então, os valores da constante empírica  $C_0$ , para a Equação 2.12, foram definidos empiricamente pela comparação entre os resultados do modelo e os valores experimentais medidos. Porém, foi possível estabelecer correlações desse parâmetro com a vazão de combustível injetada. O modelo utilizado é o de Modak, 1977, para uma superfície polinomial de terceiro grau.

Inicialmente foi proposta, para vazões superiores a 25 L/min, a correlação linear entre  $C_0$  e o número de Reynolds,  $Re$ . Utilizando os novos coeficientes  $C_0$ , foi possível comparar os novos valores de fluxo de calor radiante previstos pelo código e os valores experimentais. De maneira análoga, foi possível investigar uma correlação de terceira ordem. Esta era a segunda menor ordem de análise viável. A Figura 5.4 apresenta as correlações citadas.

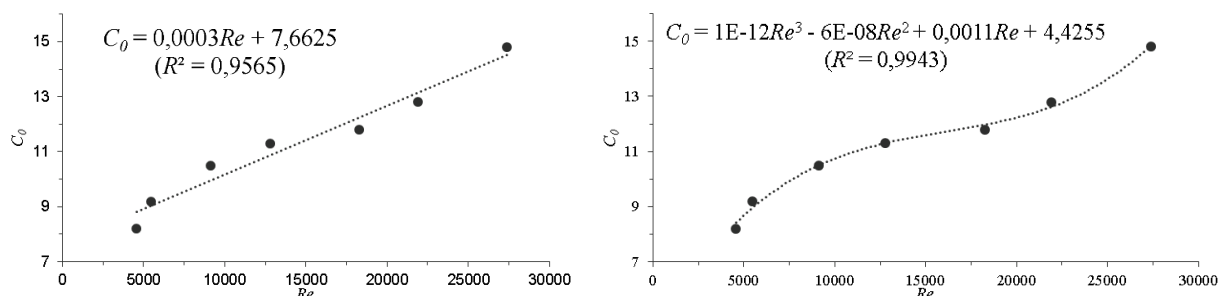


Figura 5.4: Correlações entre coeficiente empírico da espessura ótica,  $C_0$ , e  $Re$ . Esquerda: correlação linear. Direita: correlação de terceira ordem.

À medida que a vazão aumenta, o código torna-se menos representativo à chama, conforme é mostrado na Tabela I do APÊNDICE VI, para a correlação linear. Por outro lado, a correlação de terceira ordem indica excelente concordância dos valores de fluxo radiante em todas as vazões estudadas, conforme a Tabela II do APÊNDICE VI.

## 6. CONCLUSÕES

A validação do modelo de Modak, 1977, é verificada por seus resultados satisfatórios em chamas turbulentas não premisturadas de gás natural. A comparação entre modelos experimental e numérico foi baseada na medição de nove chamas em diferentes vazões entre 5 e 150 L/min. A análise numérica investigou a eficiência de três superfícies ao modelar o fluxo de calor radiante das chamas.

Das três superfícies estudadas, a geometria que melhor descreve a chama de altas vazões, em relação ao fluxo de calor radiante, é a superfície composta pela revolução de uma função polinomial de terceiro grau. Em baixas e médias vazões, inferiores a 100 L/min, a representação da superfície como um cilindro possui melhor representatividade.

Na região acima do comprimento de chama há a presença de produtos de combustão em altas temperaturas emitindo energia por radiação. Isso justifica a baixa concordância dos valores de fluxo radiante em superfícies que são delimitadas pelo comprimento de chama.

O presente trabalho propicia estudos de novas correlações para os parâmetros utilizados. O modelo validado a partir de condições iniciais e de contorno bem definidas sugere o aprofundamento no estudo de radiação de chamas turbulentas. Dado contexto já descrito na motivação, sugere-se que o modelo seja empregado em chamas turbulentas diluídas com gás carbônico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anton, H., Bivens I., Davis, S.; “**Cálculo – Volume I**”, Ed. Bookman, 8ª ed, 2007.

Coelho, P., Costa, M. “**Combustão**”, Edições Orion, 1ª Ed., 2007.

Feese, J. J., Turns, S. R.; “**Nitric oxide emissions from laminar diffusion flames: effects of air-side versus fuel-side diluent addition**”. Combustion and Flame, vol. 113, pp 66-78, 1998.

Gautam, T.; **“Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air”**. Combustion Science and Technology, vol. 41, 1984.

GasNet – O site do gás natural; **“Composição do Gás Natural Comercial”**, [http://www.gasnet.com.br/gasnatural/gas\\_completo.asp](http://www.gasnet.com.br/gasnatural/gas_completo.asp). Acessado em 05/10/2016.

Hankinson, G., Lowesmith, B. J. **“A Consideration of Methods of Determining the Radiative Characteristics of Jet Fires”**, Combustion and Flame, 159, pp 1165-1177, 2012.

Hottel, H. C., Sarofim, A. F. **“Radiative Transfer”**. Editora McGraw-Hill, pp 278, 1967.

Hu, L. Wang, Q., Delichatsios, M., Lu, S., Tang, F.; **“Flame radiation fraction behaviors of sooty buoyant turbulent jet diffusion flames in reduced and normal atmospheric pressures and a global correlation with Reynolds number”**, Fuel, vol. 116, pp 781-786, 2014.

Lowesmith, B. J., Hankinson, G., Acton, M. R., Chamberlain, G. **“An overview of the nature of hydrocarbon jet fire hazards in the oil and gas industry and a simplified approach to assessing the hazards”**, Process Safety and Environmental Protection, vol. 85 -B3, pp 207-220, 2007.

Machado, I. M. **“Caracterização experimental da radiação térmica emitida por chamas não pré-misturadas de metano diluído com CO<sub>2</sub>”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

Modak, A. T. **“Thermal Radiation from Pool Fires”**, Combustion and Flame, vol. 29, pp 177-192. 1977.

Moffat, R. J.; **“Describing the uncertainties in experimental results”**, Experimental and Fluid Science, vol ‘, pp 3-17, 1988.

Mungal, M., O’Neil, J.; **“Visual observations of a turbulent diffusion flame.”** Combustion and flame, vol. 78, pp 377-389, 1989.

Quezada, L. A., Costa, O. N., Machado, I. M., Pereira, F. M., **“Study Of Experimental Techniques For Visible Flame Length Measurement On Turbulent Diffusion Flames”**, Artigo Encit, 2016.

Souil, J. M., Joulain, P., Gengembre, E. **“Experimental and Theoretical Study of Thermal Radiation from Turbulent Diffusion Flames to Vertical Target Surfaces”**, Combustion Science and Technology, vol. 41:1-2, pp 69-81, 1984.

Turns, S. R., Myhr, F. H.; **“Oxides of nitrogen emissions from turbulent jet flames: part I – fuel effects and flame radiation”**, Combustion and Flame, vol. 87, pp 319-335, 1991.

Turns, S. R. **“An Introduction to Combustion”**, McGraw-Hill Higher Education, 2<sup>nd</sup> Ed., 2000.

Vanquickenborne, L., Van Tiggelen, A.; **“The stabilization mechanism of lifted diffusion flames”**, Combustion and Flame, vol. 10, no. 1, pp. 59–69, 1966.

Wohl, K., Gazley, C., Kapp, N. **“Diffusion Flames”**, Third Symposium on Combustion and flame and Explosion Phenomena, pp. 288, 1949.

## ANEXO I

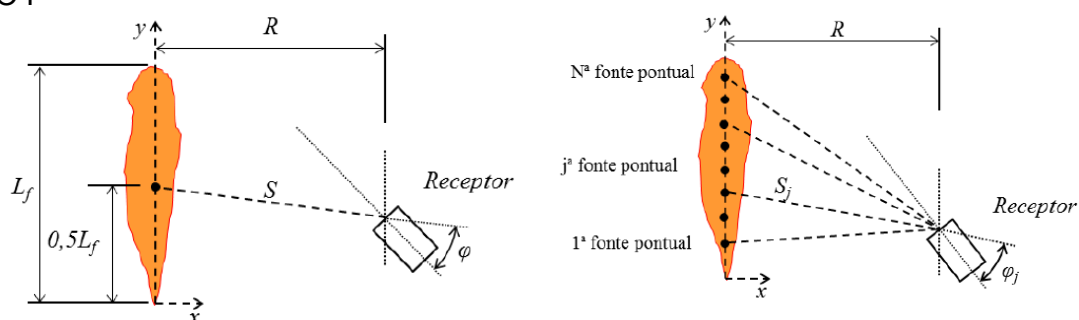


Figura I: Da esquerda para direita, modelos de estimativa de radiação de chamas SPS e WMPS para uma superfície receptora à distância  $R$  [m] da chama. [Machado, 2015].

## APÊNDICE I

Tabela I: Termos utilizados nas Equações 2.8, 2.9 e 2.10.

Termo	Significado	Valor Predefinido	Unidade
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	5.67E-08	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$T_{ef}$	Temperatura Efetiva de Chama	-	K
$z_i$	Cota no eixo z entre o sensor e o ponto em que o feixe incidente entra na chama	-	m
$z_o$	Cota no eixo z entre o sensor e o ponto em que o feixe incidente sai da chama	-	m
$z_p$	Cota no eixo z entre o sensor e a saída do queimador	-	m
$z_t$	Cota no eixo z entre o sensor e $L_f$	-	-
$k$	Coefficiente de Absorção	-	$m^{-1}$
$\Psi$	Ângulo radial do setor circular paralelo ao plano x-y	$0 \leq \Psi \leq \pi$	-
$u, v, w$	Vetores unitários normalizados que indicam a orientação da superfície do receptor	$-1 \leq u \leq 1$ $-1 \leq v \leq 1$ $-1 \leq w \leq 1$	-
$S(z_i), S(z_o)$	Função do raio compreendido no interior da superfície de chama nos pontos $z_i$ e $z_o$ , respectivamente	-	m
$l$	Distância em y entre o eixo axissimétrico da chama e a superfície do receptor	-	m
$\theta$	Ângulo compreendido entre o eixo z e o feixe incidente à chama	$0 \leq \theta \leq \pi$	-
$r_i$	Distância entre o receptor e a superfície da chama em $z=z_i$	-	m









$$B_{\bar{X}_i} = [(A\bar{X}_i)^2 + (B\bar{X}_i)^2 + (C\bar{X}_i + D)^2]^{1/2} \quad (IV.2)$$

A incerteza total do fluxo radiante,  $U_{\bar{X}_i}$ , é definida na Equação IV.3. A Equação IV.4 expressa o valor do fluxo de calor radiante,  $q''_R$ , para a constante de calibração do sensor,  $\alpha$ , [(W/m<sup>2</sup>)/mV] e número de pontos de medição  $N_p$ .

$$U_{\bar{X}_i} = [(B_{\bar{X}_i})^2 + (S_{\bar{X}_i})^2]^{1/2} \quad (IV.3)$$

$$q''_R = \alpha(\bar{X}_i \pm U_{\bar{X}_i}), \quad i = 1, 2, \dots, N_p \quad (IV.4)$$

## APÊNDICE V

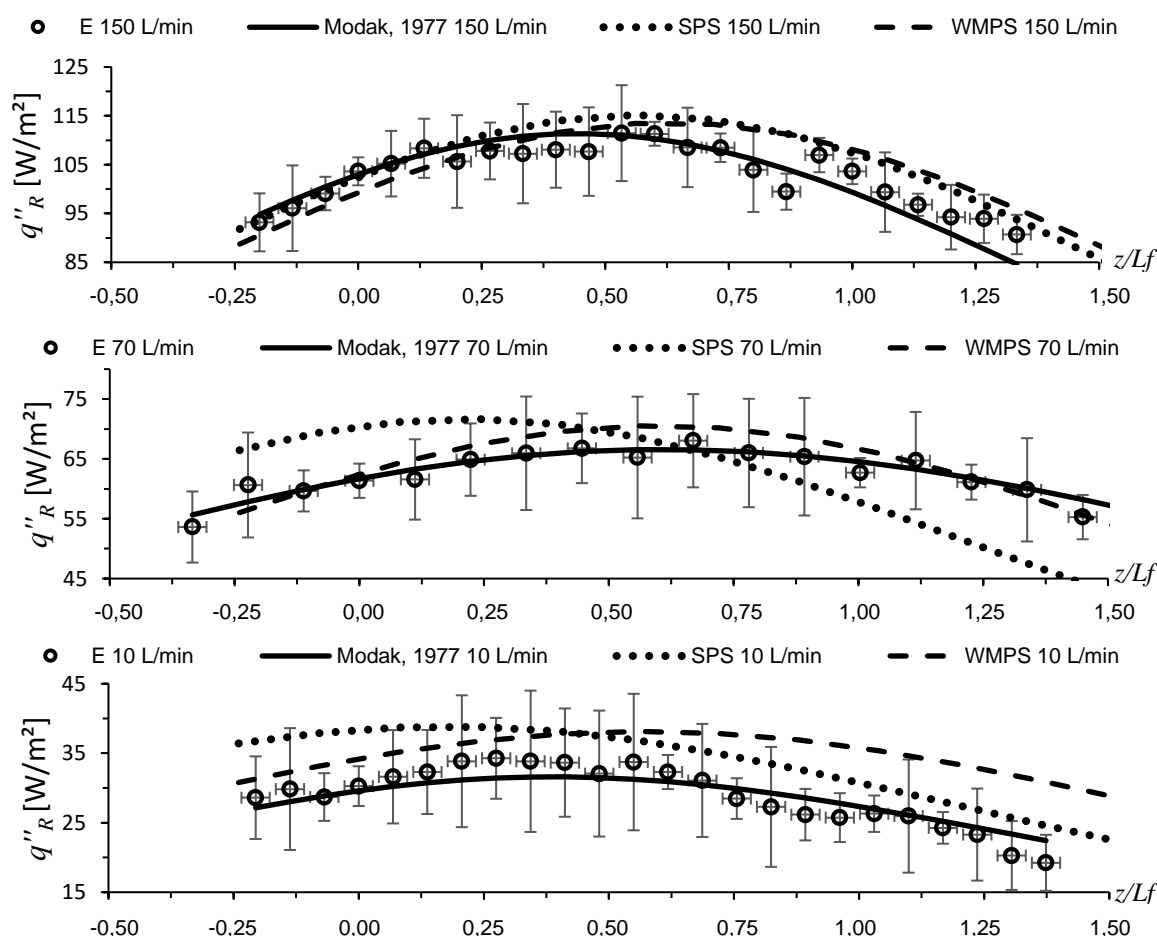


Figura I: Estimativa de Fluxo de Calor radiante para os modelos SPS, WMPS e Modak, 1977, em relação ao comportamento experimental de chamas difusivas de Gás Natural.

## APÊNDICE VI

Tabela I: Correlação linear entre $C_\theta$ e $Re$						Tabela II: Correlação de terceira ordem entre $C_\theta$ e $Re$					
$V$ [L/min]	$Re$	$C_\theta$ empírico	$R^2_{qR''}$ empírico	$C_\theta$ correlacionado	$R^2_{qR''}$ correlacionado	$V$ [L/min]	$Re$	$C_\theta$ empírico	$R^2_{qR''}$ empírico	$C_\theta$ correlacionado	$R^2_{qR''}$ correlacionado
25	4564,3	8,2	0,822	8,4	0,818	25	4564,3	8,2	0,822	8,4	0,818
30	5477,1	9,2	0,855	9,0	0,786	30	5477,1	9,2	0,855	9,0	0,786
50	9128,6	10,5	0,632	10,5	0,632	50	9128,6	10,5	0,632	10,5	0,632
70	12780	11,3	0,960	11,3	0,960	70	12780,0	11,3	0,960	11,3	0,960
100	18257,2	11,8	0,967	12,0	0,949	100	18257,2	11,8	0,967	12,0	0,949
120	21908,6	12,8	0,936	12,6	0,922	120	21908,6	12,8	0,936	12,6	0,922
150	27385,7	14,8	0,834	14,8	0,834	150	27385,7	14,8	0,834	14,8	0,834