

Impl. 7.10.92

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO ANALÍTICO EXPERIMENTAL
DE UM CONJUNTO GASEIFICADOR

SINFRÔNIO BRITO MORAES

Orientador: Esmal A.R. Ismail, Ph.D.

Tese de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia de Cam-
pinas da Universidade Estadual
de Campinas, para a obtenção
do Título de Mestre em Engen-
haria Mecânica na área de Têr-
mica e Fluidos

CAMPINAS-1983

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Aos meus pais,

João Pereira de Moraes e

Reimunda F. da Conceição Moraes

Esposa e Filhos.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Pará - Centro Tecnológico,
Departamento de Mecânica e Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-
Graduação.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica - Unicamp.

Ao Engenheiro Químico Mancel Sobrinho - Elettronorte
Tapanã - Belém - Pará.

Aos amigos: Celso Augusto Coelho e Fernando Antonio
de Sá.

A minha esposa Vânia.

Aos professores:

Dr. Kamal Abdel Raël Ismail (Orientador)
Dr. Marcos Ximenes Ponte.

A todos aqueles que embora não citados contribuíram
e tornaram possível a realização deste trabalho, nessa gra-
tidão.

Í N D I C E

Pag.

ÍNDICE DE TABELAS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
SIMBOLOGIA	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
INTRODUÇÃO	vi
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
1.1. Produção de gás	5
1.2. Tipos de Gaseificadores	6
1.2.1. Gaseificador Ascendente ou Vertical	6
1.2.2. Gaseificador de Tiragem Central ou Direta ...	8
1.2.3. Gaseificador Descendente	8
1.2.4. Gaseificador Transversal	10
1.3. Reações Químicas	100
1.4. Matéria Prima	14
1.4.1. Características	15
1.4.1.1 Inflamabilidade	15
1.4.1.2 Combustibilidade	16
1.4.1.3 Reatividade	16
1.4.1.4 Densidade	16
1.4.2. Tipos de Combustíveis	17
2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	20
2.1. Materiais	20
2.1.1. Carvão Vegetal	20
2.1.2. Medidores de Vazão	20
2.1.3. Gaseificador	20

2.1.4.	Termopares	21
2.1.5.	Aparelho de Orsat	21
2.1.6.	Cromatógrafo	24
2.1.7.	Outros Equipamentos	24
2.2.	Métodos	25
2.2.1.	Tratamento do Carvão Vegetal	25
2.2.2.	Controle do fluxo de ar	25
2.2.3.	Fluxo de gás	25
2.2.4.	Metodologia usada no processo de gaseificação	25
2.3.	Tratamento de Dados	26
2.3.1.	Diâmetro Hidráulico	26
2.3.2.	Número de Reynolds	27
2.3.3.	Temperaturas	27
2.3.4.	Densidade do Gás	27
2.3.5.	Valores Geométricos	28
2.3.6.	Relações de Fluxos	28
2.3.6.1.	Relação de Fluxos de gás/carvão	28
2.3.6.2.	Relação de Fluxos de ar/gás	28
2.3.6.3.	Relação de Fluxos vapor/gás	28
2.3.7.	Poder Calorífico	29
2.3.8.	Coefficiente de Potência ou Rendimento	29
2.3.9.	Potência Calorífica	30
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
3.1.	Testes do Gaseificador	30
3.2.	Composição do Gás	30
3.3.	Influência da Vazão de Ar nas Zonas de Reação	35
3.4.	Parâmetros Adimensionais	36
3.5.	Influência das Parcelas de Energia	38
3.6.	Potência Calorífica	40
4.	CONCLUSÕES	42
5.	SUGESTÕES	43

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
APÊNDICE A	49
APÊNDICE B	50
APÊNDICE C	52

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA Nº	TÍTULO	Pág.
1.4.2.1	Composição do gás para diferentes Combustíveis. ¹⁴	19
3.1.1	Dados Experimentais dos testes da Geometria Superior - $\delta = 3,09$	31
3.1.2	Dados Experimentais dos testes da Geometria inferior - $\delta = 2,14$	32
3.2.1	Composição em % Volumétrica e Poder Calorífico dos Gases dos testes da Geometria Inferior	33
3.2.2	Composição em % Volumétrica e Poder Calorífico inferior dos gases dos testes da Geometria Superior	34
C - 1	Balanco de Massa e Calor das Reações de Gaseificação da Geometria Superior.	58
C - 2	Balanco de Massa e Calor das Reações de Gaseificação da Geometria Inferior.	53
C - 3	Dados utilizados na Fig. 3.4.2. Parcelas e Porcentuais de energia do monóxido de carbono, metano e hidrogênio para a Geometria Superior	54
C - 4	Dados utilizados na Fig. 3.4.2. Parcelas e Porcentuais de energia do Monóxido de Carbono, metano e hidrogênio para a Geometria Inferior	55

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA Nº	TÍTULO	Pág.
1.2.1.1	Gaseificador Ascendente	7
1.2.2.1	Gaseificador de Tiragem Central	9
1.2.3.1	Gaseificador Descendente	11
1.2.4.1	Gaseificador Transversal	12
2.1.3.1	Sistema Gaseificador	22
2.1.3.2	Gaseificador	23
3.4.1	Parâmetros Adimensionais	37
3.4.2	Parcelas Porcentuais de Energia dos Gases CO, CH ₄ , H ₂	39
3.5.1	Potência Calorífica x Fluxo de ar	41
A	Curva de Calibração da Placa de orifício	49
B - 1	Ciclone	51

Símbolo	Definição
A	Amperes
L	Diâmetro do Gaseificador
D _H	Diâmetro Hidráulico
d _k	Diâmetro de esfera de um corpo compacto
%E	Porcentual de Energia
F	Fator de forma
G.S	Geometria Superior
G.I	Geometria Inferior
ΔH	Perda de carga
L	Altura da saída de gás
ṁ _a	Fluxo de massa de ar
ṁ _c	Fluxo de massa de carvão
ṁ _g	Fluxo de massa de gás
ṁ _v	Fluxo de massa de vapor
P _c	Poder Calorífico do carvão
P _g	Poder Calorífico do gás
Pot	Potência do Gaseificador
Q	Vazão
Re	Número de Reynolds
T	Temperatura
X _n	Fração Volumétrica
W	Umidade Absoluta
λ	Coefficiente de Potência ou Rendimento
ρ _c	Densidade ou Peso específico do carvão
ρ _g	Densidade do gás
ψ	Porosidade ou Fração de vazio
ε	Relação Geométrica
ε _g	Relação dos fluxos de gás - carvão
ε _a	Relação dos fluxos ar-gás
ε _v	Relação dos fluxos vapor-gás
ν	Viscosidade cinemática

R E S U M O

O estudo proposto neste trabalho está baseado num estudo de parâmetros influentes no processo de gaseificação ascendente ou Contra-Corrente.

O gaseificador utilizado foi um prototipo modular. O módulo inferior com diâmetro externo de 50 cm e diâmetro interno 42 cm devido ao refratário e às paredes duplas para o pré-aquecimento do ar de entrada. O módulo superior de diâmetro externo 55 cm e interno 50,6 cm é constituído também de paredes duplas por causa das extrações de gás estarem localizadas a duas alturas diferentes. Os dois módulos são acoplados entre si de tal maneira que podemos variar a altura de carga do gaseificador, assim como, a altura da saída de gás.

O processo utilizado na gaseificação foi o "gás de ar" ou "gás pobre". O estudo foi dividido em duas geometrias, variando entre elas a relação da altura da saída de gás pelo diâmetro do gaseificador. Quando a extração de gás se processou pelos furos superiores com uma relação $\delta = 3,09$ denominamos de geometria superior e para $\delta = 2,14$ de geometria inferior. Para cada uma das geometrias foram realizadas cinco experiências com vazões de ar diferentes.

Foram medidas as temperaturas em três pontos distintos do gaseificador a fim de verificarmos o comportamento das zonas de reação de acordo com as temperaturas, assim como, os fluxos de ar, gás, carvão gaseificado e vapor d'água contido no ar foram medidos a fim de que as análises fossem feitas em termos de parâmetros adimensionais.

A composição do gás foi analisada cromatograficamente para todos os experimentos a fim de determinarmos o poder calorífico do gás, as parcelas de energia de cada componente na mistura do gás resultante, a potência calorífica do gaseificador.

Com relação a combustão do gás de ar, sendo as condições ambientais a gasificação comportou-se como se fosse uma composição de gás e água apresentando em sua análise parcelas de hidrogênio e metano proporcionando assim um aumento no poder calorífico do gás e conseqüentemente ao aumento da potência calorífica da gasificação.

A B S T R A C T

The research subject proposed in this study is based on an examination of the parameters significant for the process of ascendent and counter-current gasification.

The gasifier which was utilized was a module prototype. The lower module has an exterior diameter of 50 cm and an internal diameter of 42 cm, owing to the refractory and to the double walls designed for the heating of the incoming air. The upper module with an external diameter of 55 cm and an internal diameter of 50,6 cm, is similarly made of double walls in view of the extraction of gas being localized at different altitudes. The two modules are joined to each other in such a way as to enable a variation in the height of the charging of the gasifier, as well as in the height of the outgoing gas.

The process of gasification used in the study was that of air gas or low-BTU gas. The study was divided into two geometries by varying between them, the relation of the height of the outgoing gas and the diameter of the gasifier. When gas was extracted by the upper perforation with a relation $h = 3,09$ it is denominated upper geometry and when $h = 2,14$, lower geometry.

Five experiments involving different escapes of air were made for each of the geometries.

Temperatures were measured at three different points of the gasifier in order to ascertain the behavior of the reaction zones according to the temperatures.

The flows of air, gas, gasified coal and steam contained in the air were measured so that the analyses were made in terms of adimensional parameters.

The composition of the gas was analysed chromatographi-

cally in all the experiments undertaken, so as to determine the calorific potential of the gas, the volume of energy in each component of the resultant mixed gas, and the calorific potential of the gasifier.

In relation to the composition of air gas, the gasification behaved as if it were a mixture of water gas, owing to local ambiantal condition. The composition presented, on analysis, parts of hydrogen and methane, thus contributing to an increase in the heating power of the gas and consequently, an increase in the heating potential of the gasifier.

I N T R O D U Ç Ã O

Atualmente não há mais dúvida de que o futuro do País como nação independente está vinculado ao estabelecimento, nas próximas décadas, de um perfil energético auto-sustentável, de grande estabilidade e sobretudo, livre de fontes de suprimento externas.

A energia importada do petróleo, além de percentualmente elevada, hoje é vital para a economia brasileira, uma vez que mais de 80% das atividades de transporte e a maioria das atividades industriais, dependem de seus derivados. Além disso, a totalidade do suprimento de energia de pequenas comunidades isoladas, não servidas pelas grandes redes de distribuição, dependem de geradores de usinas termelétricas à base de óleo diesel e óleo combustível, principalmente na região Amazônica.

Em vista disso o governo tem procurado incentivar as buscas por fontes alternativas de energia, dentre as quais podemos citar: energia nuclear, energia solar, energia hidráulica, energia de bionassa.²⁴ Nessa última, temos: Plano Nacional do Alcool, Prô-óleo Vegetal, biodigestores e Gaseificadores.^{23, 25}

A gaseificação de combustível sólidos é um processo bastante antigo e é realizado com o objetivo de produzir um combustível gasoso, com melhores características de transporte, maior eficiência de combustão e também, que possa ser utilizado como matéria-prima para outros processos.

Os produtos da gaseificação são os seguintes: 2.
total ou parcialmente transformado em gases cujos principais
componentes são: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hi-
drogênio e, dependendo das condições, metano, hidrocarbonetos
leves, nitrogênio e vapor de água em diferentes proporções.

A tecnologia da utilização dos gasogênios para moto-
res data do fim do século XIX, quando foram empregados para
motores fixos.

Fizeram-se as primeiras experiências práticas de sua
utilização em motores na primeira década do século XX, sendo
que estes ensaios não foram bem sucedidos e ficaram desativa-
dos até o início da segunda década. Posteriormente, os indus-
triais franceses de veículos Berliet, Panhard e Renault pro-
curaram tecnicamente fazer as adaptações e durante 7 anos de
trabalhos, conseguiram excelentes resultados.

Berliet e Panhard, com automóveis de turismo alimen-
tados a gás pobre, conseguiram média de 90km/h, no autódromo
de Montllery, no percurso de 500 km.

Na Itália o prof. Ferragutti conseguiu simplificar
e reduzir seus gasogênios tendo inclusive empregado o turbo-
compressor nos carros "Fiat-Balilla" e Alfa-Romeo" Sport de
17500 cc, com sucesso.

No Brasil, o estudo da gaseificação data dos anos
trinta. Em Agosto de 1940 foi assinado pelo Governo o decrete-
to-lei nº 2.526 criando a obrigatoriedade do gasogênio em 10%
da frota de caminhões de alguns estados. Durante a Segunda
Guerra Mundial foi estimado o uso de gaseificadores em apro-
ximadamente vinte mil veículos.¹

Na primeira metade da década de 40, o gasogênio foi
muito empregado, suas instalações desenvolvidas e muitos tra-
balhos técnicos foram executados e escritos sobre os siste-
mas de gaseificação para fins automotivos. Entretanto após

a II Guerra mundial esse assunto foi esquecido devido aos baixos preços e a grande abundância dos derivados do petróleo.

Na década de 70, a tecnologia da gaseificação, passou a ser estudada novamente com maior intensidade, devido a uma nova crise derivados do petróleo. No Brasil a busca de fontes alternativas foi dirigida mais para substituições industriais, isto é, os estudos sobre gaseificadores de grande potência tomaram frente em face das necessidades industriais.

O estudo proposto neste trabalho se prende ao fato de que são escassas as informações sobre parâmetros característicos influentes no fenômeno da gaseificação em função de sua potência. Vários pesquisadores^{2,3} estimam as alturas das zonas de reação segundo um determinado tipo de gaseificador. Para o nosso modelo verificamos o comportamento das alturas dessas zonas mediante tomadas de temperaturas em pontos fixos em função do aumento da vazão de ar introduzida no gaseificador.

Estudaremos dois tipos de geometria, isto é, de uma geometria para a outra modificaremos a relação entre a altura da saída dos gases pelo diâmetro. Para o maior valor dessa relação denominaremos de geometria superior, enquanto que para o menor valor, de geometria inferior.

Para cada uma delas executaremos uma série de experimentos com a variação do fluxo de ar, a fim de verificar o comportamento de relações adimensionais influentes na gaseificação como função de um coeficiente de potência ou rendimento. De acordo com os resultados encontrados faremos um estudo comparativo entre as geometrias em termos dos parâmetros adimensionais, influência das energias liberadas por cada componente energético da mistura de gases no poder calorífico e a evolução da potência calorífica do gaseificador com o aumento da vazão de ar. Todos esses dados demonstrados através de tabelas e gráficos.

Foi escolhido um gasificador do tipo ascendente de contra-corrente pelo fato de usarmos como matéria prima o carvão vegetal originário de madeiras abundantes em nossa região. Para usarmos esse carvão como matéria gasificável, teremos o levantamento de algumas características, tais como: poder calorífico, densidade, etc. que servirá como primeiro passo para um estudo mais amplo visando a classificação de matéria prima regional que poderá ser utilizada como combustível para a gasificação.

Outro fator que deverá ser considerado e apreciado será a grande umidade relativa do ar, a qual gira em torno de 75 a 95%. Como o nosso estudo usará como oxidante o ar atmosférico, observaremos a influência dessa excessiva umidade nas reações de gasificação de modo que a grande quantidade de vapor d'água presente no ar afetará a formação de metano e hidrogênio do gás resultante.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Produção de gás

Gaseificadores, com a tecnologia atualmente disponível, podem operar com oxigênio puro ou ar como agente oxidante. Operando-se o gaseificador com ar, obtém-se o chamado "gás pobre" com poder calorífico inferior da ordem de 1200 a 1500 Kcal/Nm³. Operando-se com oxigênio, obtém-se um gás mais rico, com um poder calorífico inferior da ordem de 2200 a 2500 Kcal/Nm³. Gaseificadores a oxigênio produzem normalmente um gás mais caro e sua aplicação principal é para gás de síntese para a produção de metanol, amônia, Fischer-Tropsch, os quais exigem que o gás seja comprimido; como o Nitrogênio do ar é um inerte, é necessário eliminá-lo do gás de síntese o que leva então à utilização praticamente obrigatória do gaseificador operando com oxigênio.

Se o objetivo for a produção de gás combustível, usualmente se utiliza ar com oxidante.

Estudos mais recentes³, reavaliam os custos de produção do "gás pobre" e do gás intermediário, obtidos via gaseificação de carvões minerais, e chegam à conclusão surpreendente, que em certas condições os seus custos de produção podem ser praticamente equivalentes. Tais estudos, porém, baseiam-se em plantas de capacidade muito grande, com produção de gás equivalente a 28.000 até 59.800 barris de petróleo/dia.

Cumpra aqui salientar que tecnicamente poder-se-ia gaseificar madeira sem a utilização do ar ou oxigênio. Observando-se que a reação de produção de metano: $C + H_2 \rightarrow CH_4 - 45.300 \text{ Kcal/Kmol}$ é exotérmica, ela poderia ser maximizada, para fornecer o calor necessário à gaseificação. O gaseificador operando então a 8379 K a 24 atm de pressão, torna-se-ia autotérmico, produzindo um gás rico em metano com poder calorífico inferior da ordem de 2100 Kcal/m³ sem consumir oxigênio ou ar.¹²

Quando um elemento é colocado sobre o agente oxidante e introduzido no gaseificador vapor d'água, obtém-se o chamado "gás misto", que apresenta em sua composição hidrogênio e metano os quais teoricamente não fazem parte da composição do "gás pobre". O poder calorífico inferior do gás misto é da ordem de 1730 a 1865 kcal/Nm³.⁴

O monóxido de carbono é o componente principal do gás gerado em gaseificadores. O hidrogênio sempre está presente embora em pequenas quantidades, devido o carvão vegetal, por exemplo, apresentar determinada higroscopicidade, além disso, há a presença de alguma quantidade de umidade no ar participante das reações.

A proporção de hidrogênio no gás é importante, pois, ele é o elemento de propagação de chama dentro do monóxido de carbono de queima lenta, entretanto há um limite, o qual é influenciado pela quantidade de nitrogênio presente da mistura, que funciona como meio diluente do gás.

1.2 Tipos de Gaseificadores

1.2.1 Gaseificador Ascendente ou Vertical

A maior parte dos sistemas industriais estacionários utilizam este tipo de gaseificador, sua operação esquemática se encontra mostrado na figura 1.2.1.1.

Gaseificação ascendente é caracterizada pela extensão da zona de combustão, ela é particularmente conveniente para gaseificar combustíveis de baixa resposta de reação e pouco conteúdo de voláteis condensáveis, como: alcatrão, ácidos pirolenhosos, os quais são destilados pelo combustível e arrastados pelo gás de saída. Uma solução técnica para a eliminação dos voláteis é utilizar o gaseificador de tiragem central ou direta.

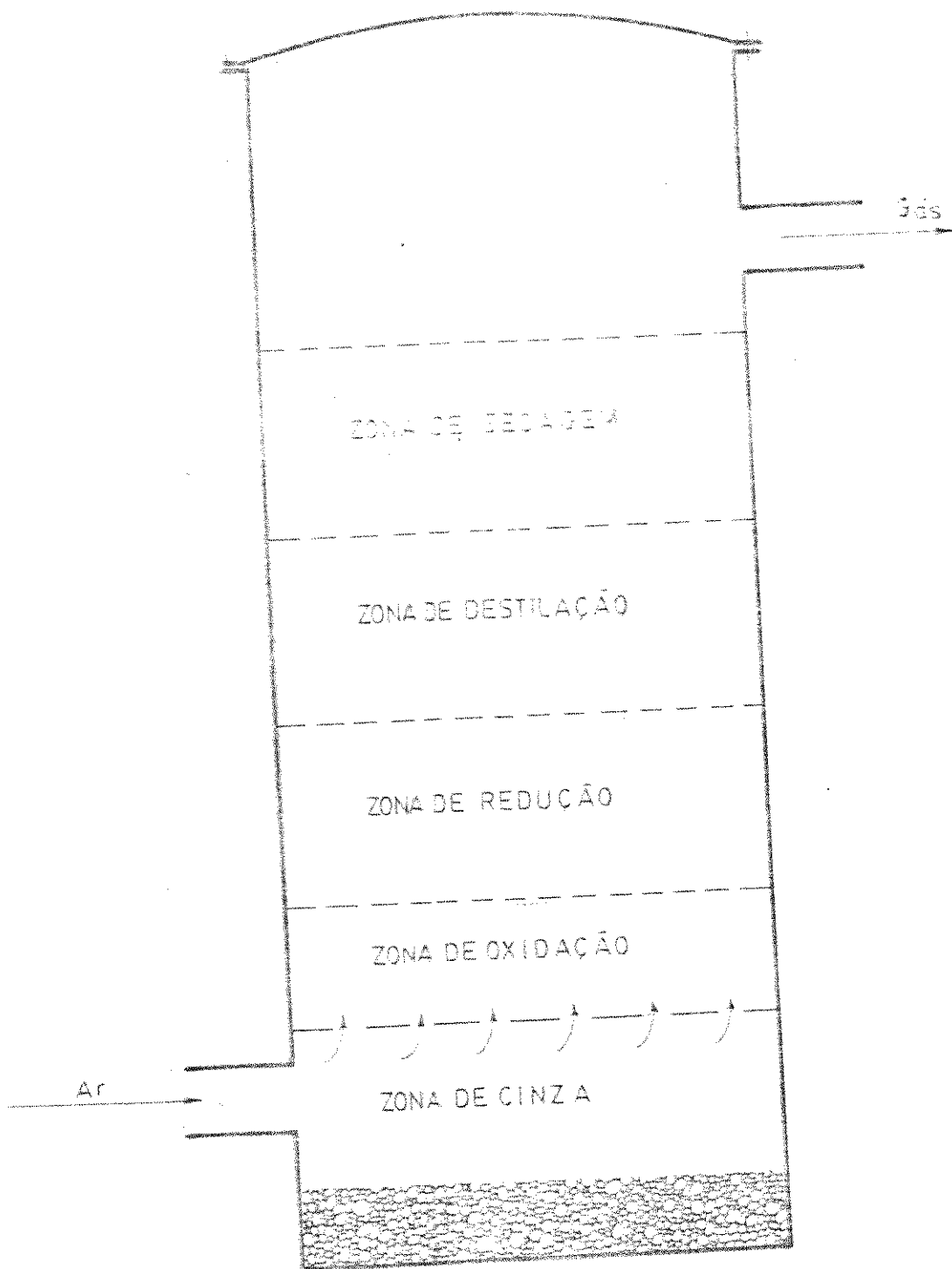


Fig. 12.11 GASEIFICADOR ASCENDENTE

1.2.2 Gaseificador de Tiragem Central ou Direta.

Este tipo é uma variante do gaseificador de tiragem ascendente, pois o ar entra também pela parte inferior da grelha. O gás produzido é extraído para o exterior antes de chegar a zona de secagem ou destilação, isto é, a uma altura localizada ao redor da zona de redução, evitando assim que os gases atravessem a massa de reserva incorporando os produtos voláteis. Por outro lado tais produtos são aspirados no sentido descendente atravessando as zonas ativas, onde são transformados em substâncias enriquecedoras do gás, mediante o processo de Cracking.

Este tipo de gaseificador, mostrado esquematicamente na figura 1.2.2.1., oferece a vantagem de sua grande flexibilidade de combustão, facilitando assim variações bruscas na demanda de gás.

Entretanto é prudente não utilizar combustíveis que destilam muito voláteis. O combustível indicado para os gaseificadores de tiragem ascendente é o carvão vegetal, adequadamente carbonizado.

1.2.3 Gaseificador Descendente

Este tipo de gaseificador produz um gás com baixo teor de alcatrão, mesmo quando combustíveis com alto conteúdo de alcatrão são usados.

O gaseificador de tiragem descendente é impróprio para o uso de combustíveis com alto conteúdo de cinzas, porque a alta temperatura cria um estreitamento da passagem formando uma escória a qual dificulta a sua remoção criando problemas funcionais. É quase invariavelmente utilizado para gaseificar madeira com baixa porcentagem de umidade, no máximo 30%.⁵

Ele também é pouco adequado para combustíveis com

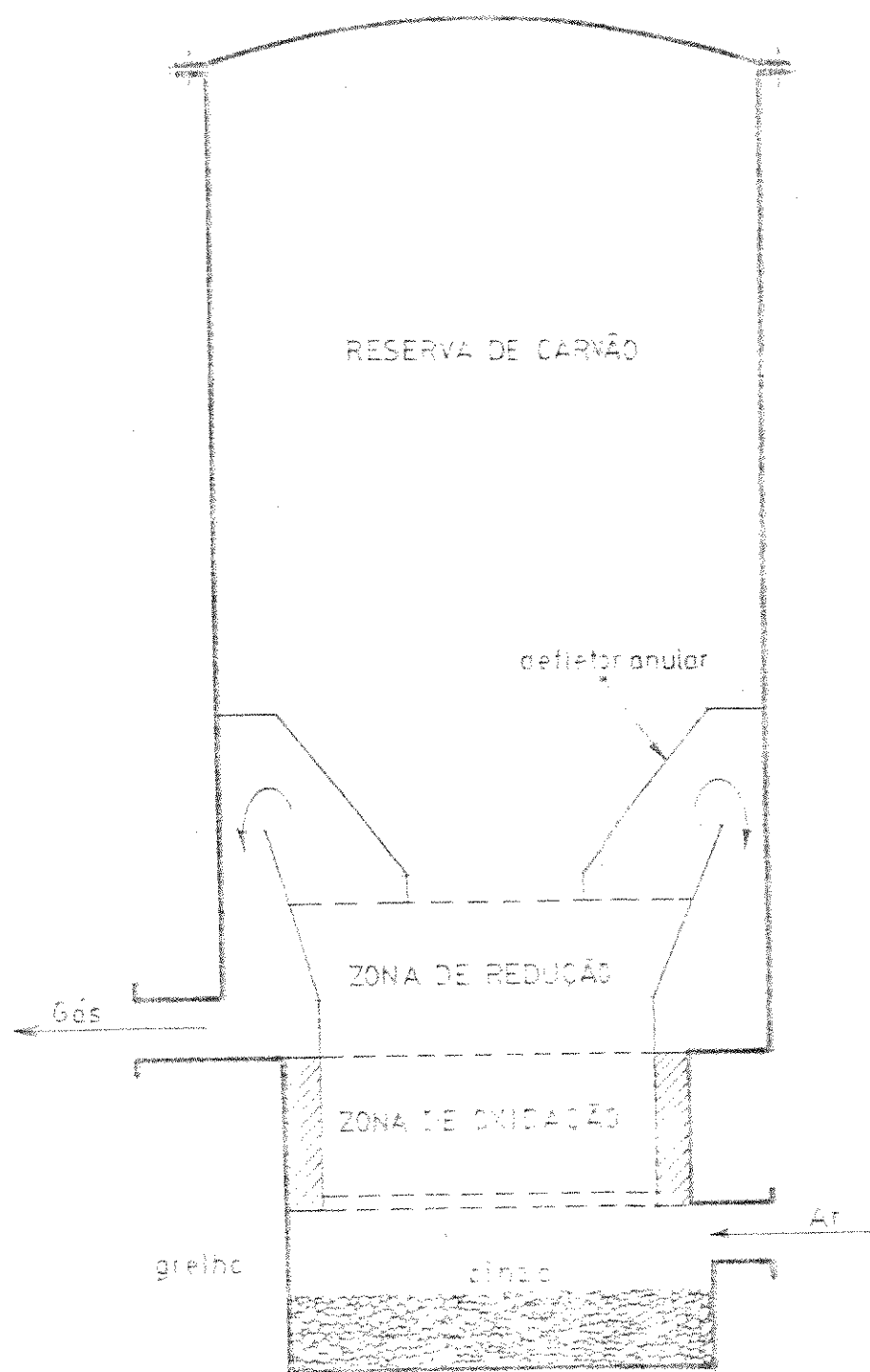


fig. 112 - GASEIFICADOR DE TIRAGEM CENTRAL

baixa reatividade, pois, o gaseificador de tiragem descendente usa substancialmente um pequeno espaço para as reações e consequentemente se torna muito rápido na resposta às flutuações da demanda de gás, esse pequeno espaço de reação requer também uma alimentação de combustíveis uniforme.

Devido os produtos voláteis, atravessarem integralmente as zonas ativas, o gás resultante possui uma temperatura elevada. Seu princípio de operação encontra-se esquematicamente mostrado na figura 1.2.3.1.

1.2.4 Gaseificador Transversal

Neste tipo de gaseificador o ar é aspirado pelo lado e através de um conduto é insuflado no meio da zona de oxidação, na forma sensivelmente esférica, a qual se acha rodeada pela zona de redução. Os gases resultantes continuam em um fluxo transversal, cruzando o gaseificador e saindo pela grelha que fica disposta verticalmente, figura 1.2.4.1.

A temperatura na zona de oxidação fica em torno de 2000°C^4 , devido a isso o conduto de insuflamento do ar deverá ter um arrefecimento perfeito.

Além de ser o mais simples dos gaseificadores empregados, é particularmente eficaz pela flexibilidade na combustão e facilidade de partida. É indicado para o uso de qualquer tipo de combustível, desde que possua baixo teor de alcatrão e baixo conteúdo de cinza. Devido as pequenas zonas de reação requer uma alimentação de combustível regular e uniforme, embora permita a recarga em funcionamento sem que isso implique em maiores inconvenientes.

1.3 Reações Químicas

Combustíveis Sólidos são Substâncias complexas e a sua conversão em gás é um processo de intrincadas reações. É, no entanto, relativamente fácil descrever as mudanças termo-

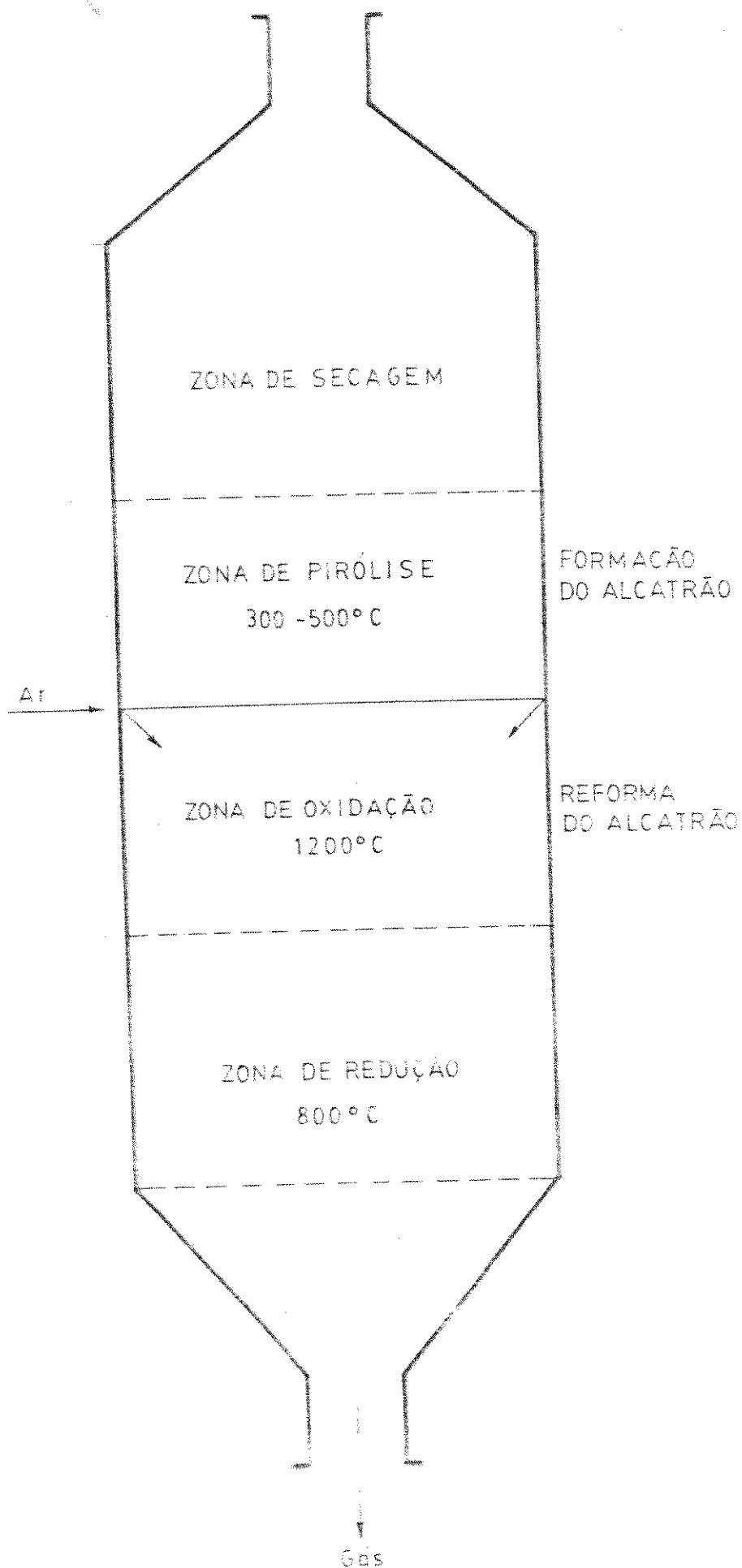


Fig. 1231. GASEIFICADOR DESCENDENTE

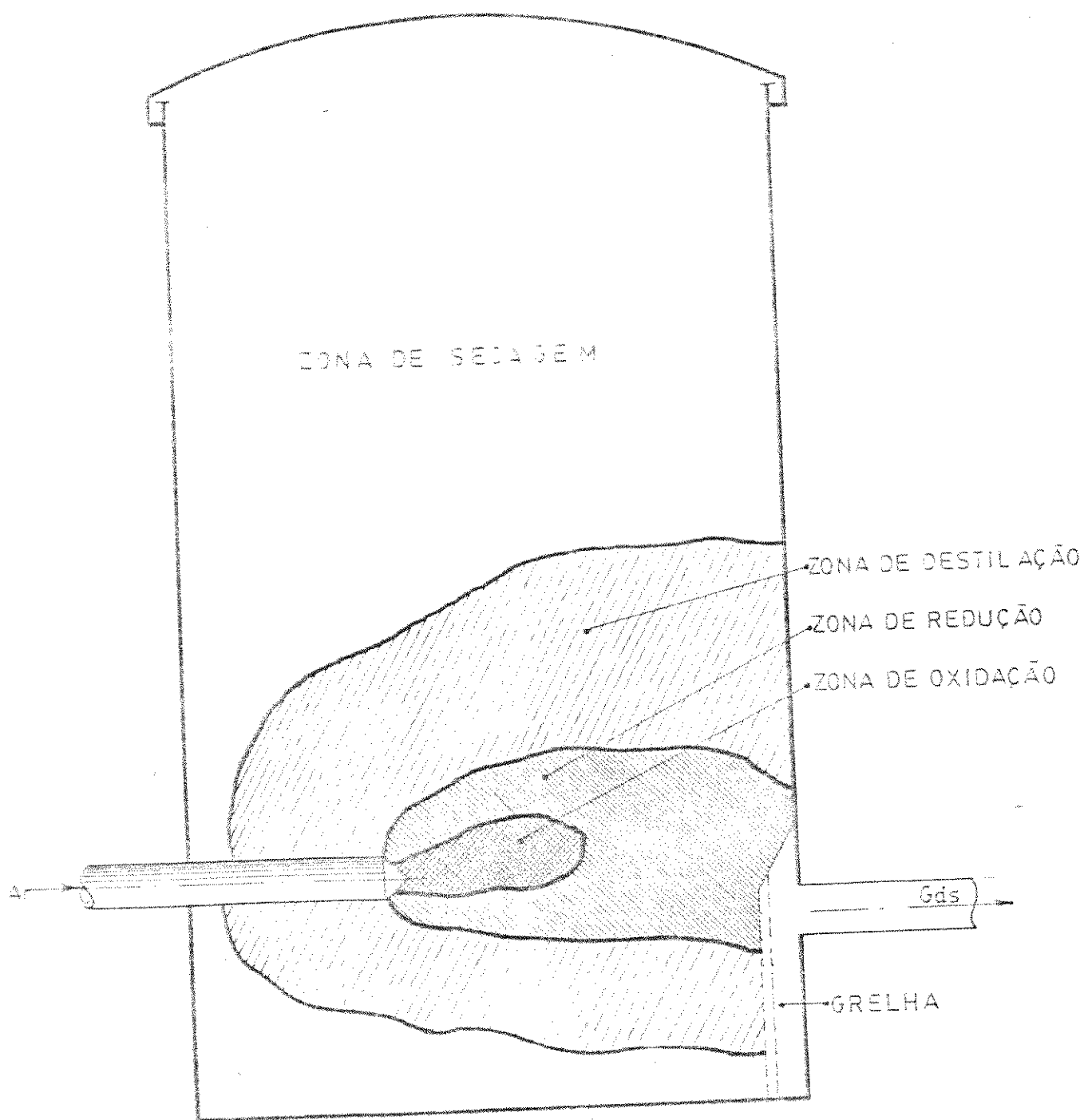
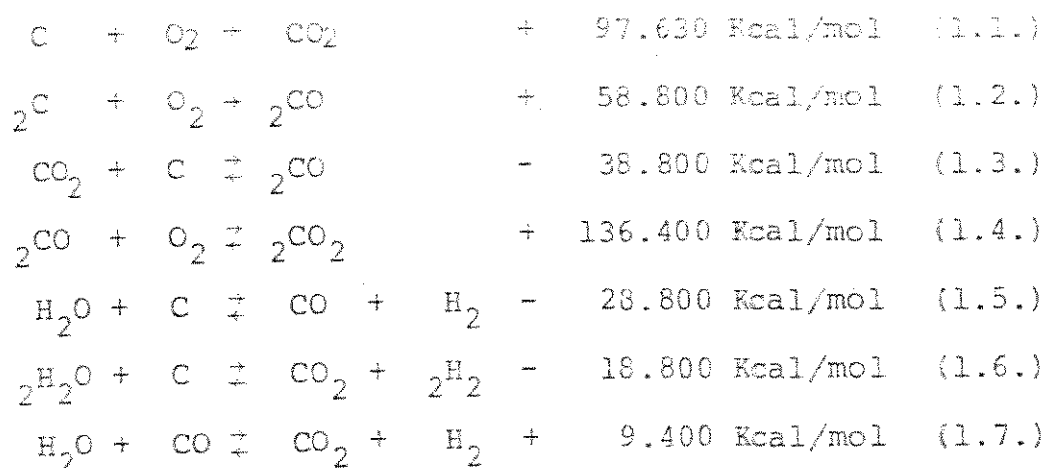


fig.1241. GASEIFICADOR TRANSVERSAL

químicas que ocorrem no gerador.



Em linhas gerais, o objetivo principal do projetista de gaseificadores, deveria ser o de promover as reações que resultam na produção de gases combustíveis, tais como: monóxido de carbono e Hidrogênio e evitar possível as reações que originam os não combustíveis: dióxido de carbono e vapor d'água. Na equação 1.1. o ar é admitido reage exotermicamente com o carbono para formar CO_2 a uma temperatura na faixa de 1000°C a 1300°C , correspondente a zona de oxidação. Na equação 1.3. o dióxido de carbono, produzido é reduzido pelo carbono presente em excesso, na zona de redução que opera numa faixa de 700°C a 1000°C . O gás quente cede seu calor para o combustível que chega a zona de redução esquentando-a, secando e destilando suas materias voláteis.

Na equação 1.4. o CO_2 se dissocia reversivelmente em O_2 e CO . A direção da reação é determinada pela posição de equilíbrio que depende da temperatura e do tempo de contato do gás com a massa combustível. Acima de 1000°C , isto é, a temperatura precisa varia com o combustível: 1200°C a 1300°C para carvão mineral e 900°C a 1000°C para carvão vegetal, a conversão de CO_2 em CO é quase completa, mas abaixo de 1000°C o CO tende a permanecer não conversível.

É interessante notar que a reação representada pela equação 1.5. predomina acima de 1000°C , enquanto que abaixo

dessa temperatura predomina a reação representada pela equação 1.5. Outro fator que deve ser notado é que as reações representadas pelas equações 1.5, 1.6 e 1.7 ocorrem quando se introduz vapor d'água no gaseificador ou quando uma quantidade considerável de umidade do combustível é levada para a zona de oxidação.

Assim, como o objetivo é obtermos o máximo de $\text{CO} + \text{H}_2$ e o mínimo de CO_2 , a temperatura em torno de 1000°C é desejável para um carvão combustível razoavelmente puro. Neste sentido Brame e King² mostraram que é impossível se obter mais de 16% de H_2 com menos de 2% de CO_2 .

Verifica-se que o mais importante da reversibilidade das reações, ocorre quando é empregado vapor d'água. Neste caso há uma variação entre as proporções de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio e vapor, e uma interação entre eles para várias temperaturas. Por exemplo a composição dos gases da mistura mostrada na reação $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ dependia da taxa de reatividade, a qual mudava progressivamente de sentido na reação em função da constante de equilíbrio dada por $K = \frac{\text{CO} \times \text{H}_2\text{O}}{\text{CO}_2 \times \text{H}_2}$, que varia com a temperatura de operação.

Temperatura $^\circ\text{C}$:	800	1100	1200	1400	1500
K :	0,25	1,06	1,44	2,27	2,70

1.4 Matéria Prima

No atual aperfeiçoamento dos gaseificadores o que tem chamado a atenção dos pesquisadores é em torno do problema dos combustíveis que podem ser usados na gaseificação. O combustível deve ser encontrado em grandes quantidades, apresentar características homogêneas, além da sua obtenção ser econômica, de tal forma a permitir um funcionamento sem inconvenientes dos equipamentos de "gás pobre".

A madeira, carvão vegetal, carvão mineral, turfa, resíduos agrícolas, etc... formam uma gama muito vasta de combustíveis aptos para a alimentação em gaseificadores.

O problema se apresenta de maneira diferente para os gaseificadores de utilização automotiva e para os gaseificadores de utilização industrial ou fixa. No último a possibilidade de se usar componentes pesados e volumosos, simplificam consideravelmente a escolha do combustível, enquanto que, os de utilização automotiva, o peso e o volume devem ser reduzidos ao mínimo, além de que a gaseificação se efetue muito rapidamente, fatores limitantes na escolha do combustível.

De acordo com Glugniac, J.C.⁶, podemos estimar em três décimos de segundo o tempo da passagem do gás através das zonas de reação nos gaseificadores industriais ou fixos e em três centésimos de segundo para os gaseificadores automotivos. Desta maneira os combustíveis destinados a gaseificação, devem apresentar determinadas características.

1.4.1 Características

1.4.1.1 Inflamabilidade

É a capacidade do combustível inflamar-se facilmente. Quanto mais baixa é a temperatura em que ocorre o fenômeno tanto mais inflamável é o combustível.

A importância dessa característica é fundamental para os gaseificadores automotivos, pois, além da rapidez em ser dada a partida ela facilita acelerações bruscas.

Independente da natureza química do combustível, certos fatores externos como a umidade e a temperatura de carbonização para carvão vegetal influem na inflamabilidade. Particularmente a presença de certos voláteis como: hidrogênio e metano, presentes no carvão, em quantidades maiores tanto quanto mais baixa é a temperatura de carbonização; favorecem a

partida e as acelerações, ainda que em princípio dificultem a redução do CO_2 para CO .

1.4.1.2 Combustibilidade

Denomina-se de combustibilidade a afinidade que possui o combustível com oxigênio, queimar-se para produzir gás carbônico.

1.4.1.3 Reatividade

Denomina-se de reatividade a propriedade que possui o combustível, que a temperaturas baixas, possibilite reduzir o dióxido de carbono em monóxido de carbono.

A reatividade é a condição que constitui um aspecto dominante de um bom combustível para gaseificadores automotivos, pois, ela possibilita a diminuição da zona de redução e consequentemente o volume do gaseificador.

A porosidade do combustível também tem influência muito grande para a ativação do poder redutor, pois quanto maior for a superfície de contato entre o carvão e o gás maior será a redução de CO_2 para CO .

A reatividade é tomada como sendo o número de ml de CO produzido a partir de 100 ml de CO_2 a uma temperatura de 950°C ⁷. Rammner⁸ afirmou que a reatividade geralmente diminui com a idade do combustível.⁹

1.4.1.4 Densidade

Os parâmetros que permitem atuar na densidade do carvão são a temperatura de carbonização e a densidade da madeira que lhe deu origem.

Quanto maior a densidade da madeira, maior será a

densidade do carvão produzido.⁹

A temperatura de carbonização tem um efeito peculiar na densidade do carvão vegetal. Blankenhorn¹⁰, estudando a carbonização de uma espécie de madeira, em várias temperaturas, constatou uma tendência da densidade aparente decrescer até cerca de 600°C e então aumentar até 900°C.

1.4.2 Tipos de Combustíveis

O carvão de madeira é o combustível típico para os gaseificadores de utilização automotiva. Facilmente inflamável, dotado de boa combustibilidade, boa porosidade o que lhe confere características excelentes de reatividade. Em geral, apresenta pouca porcentagem de cinza, não superior a 5%.¹¹

O sistema empregado para realizar a carbonização da madeira tem grande influência sobre a qualidade do carvão. Uma carbonização realizada em torno de 300°C dá ao carvão muita inflamabilidade, entretanto realizada a 1000°C, ao contrário, se obtém um carvão de difícil inflamabilidade e que possui dureza de coque metalúrgico. O melhor carvão se obtém levando a destilação até 400°C, de maneira que o carvão obtido contenha 7 a 8% de produtos voláteis, que melhoram a qualidade do gás.

O grau de cosimento também influencia sobre a qualidade do carvão, se este apresenta, porções insuficientemente destiladas, há presença de produtos condensáveis como o alcatrão e ácidos pirolenhosos, que em grande quantidade serão prejudiciais ao bom funcionamento do equipamento gerador de gás.

O teor de umidade ideal deverá estar localizado em torno de 5%, a densidade de carga fica na faixa de 180 a 220 Kg/m³. O poder calorífico do carvão varia de 7000 a 7370 kcal/kg, o poder calorífico do gás é de 1100 a 1200 Kcal/m³ e o poder calorífico da mistura ar-gás é de 520 a 570 Kcal/m³.

A madeira apresenta boa potencia calorífica e aceitã

vel rendimento, porque com alto teor de voláteis, em torno de 80%, o baixo teor de cinza, além da vantagem adicional de não conter enxofre, faz com que a madeira seja muito utilizada em gaseificadores, principalmente nos do tipo de tiragem descendente.⁵ A densidade de carga fica em torno de 350 Kg/m³ e um poder calorífico de 4700 Kcal/Kg. Um fator importante a ser controlado na madeira é o teor de umidade, que pode ser no máximo 30%, pois, uma quantidade excessiva pode baixar demasiadamente a temperatura e com isso prejudicar a redução do gás carbônico.

Alguns pesquisadores^{7,12} defendem a tese de que o uso da madeira como combustíveis para gaseificadores é muito proveitosa. Em termos de balanço térmico, na queima de 100 Kg de madeira obtém-se 437000 Kcal; ao carbonizar essa madeira em contra-se 27 Kg de carvão, que ao ser queimado libera 227000, ou seja, mais da metade da energia é perdida devido a operação intermediária de carbonização.^{6,13}

Os combustíveis minerais apesar de seu elevado poder calorífico não são muito convenientes para serem utilizados em gaseificadores, devido, a sua baixa reatividade, alguns possuem enxofre, produzem cinzas fusíveis a menos de 1300°C. As desvantagens apresentadas para o carvão mineral são compensadas pela sua densidade de carga, que é três vezes maior que o carvão vegetal e também pela sua riqueza em hidrogênio.

Na tabela 1.4.2.1 apresentamos alguns tipos de matéria prima e o seu respectivo modo de gaseificação.

Combustível	Métodos de Gaseificação	Porcentagem em Volume					Poder Calorífico Kcal/Nm³
		CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	N ₂	
Madeira com 15% de umidade	Descendente	22,2	17,5	0,8	12,2	47,3	1190
Madeira com 25% de umidade	Descendente	23,0	14,1	0,9	16,0	45,9	1130
Carvão vegetal	Ascendente	30,4	19,7	0,3	3,6	46,0	1430
Turfa	Descendente	19,0	11,2	1,0	14,0	54,8	950
Briquetes de lignita	Descendente	22,8	14,0	1,0	12,3	49,9	1140
Coque de lignita	Ascendente	30,4	11,2	0,4	3,2	54,8	1280
Carvão de coque duro	Ascendente	25,6	20,8	-	5,1	48,5	1350
Antracite	Ascendente	27,0	12,7	0,7	3,9	55,7	1200
	Cruzado	24,8	8,9	0,6	2,8	62,9	1020

TABELA: 1.4.2.1. Composição do gás para diferentes combustíveis. 14

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

2.1.1 Carvão Vegetal

A matéria prima utilizada foi o carvão vegetal originário de vários tipos de madeiras regionais, tais como: maçaranduba, acapû, mata-mata; madeiras densas com peso específico real da ordem de $423,5 \text{ kg/m}^3$. E carvão vegetal de madeiras menos densas, tais como: embauba, lacre, madeira branca, com peso específico aparente da ordem de 314 kg/m^3 .

2.1.2 Medidores de Vazão

Foram instalados no circuito dois medidores de vazão: um medidor tipo turbina com diâmetro $6,35 \text{ cm}$ por $35,56 \text{ cm}$ de comprimento da "Flow Technology Inc.", acoplado a um indicador digital de mesma fabricação. Uma placa de orifício de $10,16 \text{ cm}$ de diâmetro externo, cuja leitura é feita em um manômetro de tubo inclinado "Air Flow Developments". A placa de orifício foi calibrada com o auxílio de um tubo de Pitot e conferido com um micromanômetro-diferencial eletrônico. Os cálculos se encontram no Apêndice A.

2.1.3 Gaseificador

O conjunto gaseificador é modular, possibilitando assim a variação dos parâmetros geométricos do sistema.

O módulo inferior possui um diâmetro interno de 50 cm e uma altura de 93 cm . É constituído de parede dupla até uma altura de 45 cm , sendo a distância entre elas de 2 cm . Na parede externa encontramos a entrada de ar à 30 cm com diâmetro de $7,6 \text{ cm}$ e na base uma parte cônica para a retirada de cinzas. A parede interna encontra-se localizada 10 cm acima da parte cônica externa, onde se encontra a grelha em ferro fundido com 10 cm de diâmetro.

O módulo superior possui um diâmetro interno de 56,6 cm e uma altura de 99cm. A 18cm da base até o topo é composto de parede dupla com espaçamento entre elas de 2,5cm. Pela parte interna encontramos duas linhas de 07 furos de 2,54cm dispostos radialmente a 40 e 80cm de altura respectivamente. Pela parede externa a uma altura de 80cm temos a saída de gás com diâmetro de 7,62cm.

Os dois módulos são acoplados por seis parafusos tirantes de 30cm presos nos flanges. A vedação é feita por uma junta de amianto grafitado, figura 2.1.3.1.

O sistema gaseificador é constituído de um ventilador centrífugo com motor assíncrono-trifásico de 3,2 amperes, 3300 RPM, 220 Volts, 1 HP., denominado de ventilador principal; válvula borboleta controladora de fluxo e um medidor tipo turbina.

Na linha de gás temos, uma placa de orifício, um ciclone, o ventilador secundário de 1/4 CV, 25 Amperes, 3450 RPM, 110 Volts e o queimador de gás. Os cálculos do ciclone encontram-se no Apêndice B.

A Figura 2.1.3.2., mostra o desenho esquemático do conjunto com todo os seus elementos.

2.1.4 Termopares

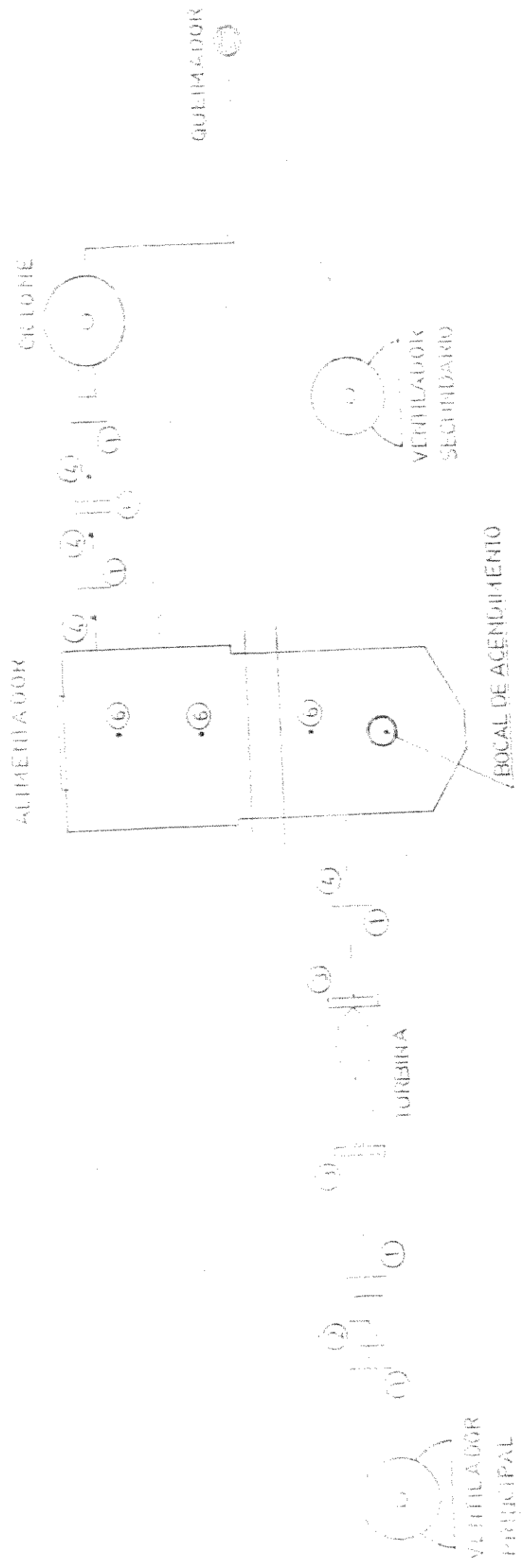
Os termopares utilizados foram do tipo Platinum Vs Platinum - 13% Rhodium.¹⁵ E a sua leitura feita num "Digital Thermometer-FLUKE", com 10 canais.

2.1.5 Aparelho de Orsat

O aparelho consiste em estojos individuais da "Anglo Nordic Thermal Holding Ltd" para medir O_2 , CO_2 e CO.

Para a medida de O_2 e CO_2 são utilizadas âmpolas gra

DIAGRAMA ESQUEMATICO



- 1- Junta de Fuelle
- 2- Válvula controladora de Fuelle
- 3- Junta de escape
- 4- Junta de presión
- 5- Poca de orificio
- 6- Fuelle

fig.2131 SISTEMA GASEIFICADOR

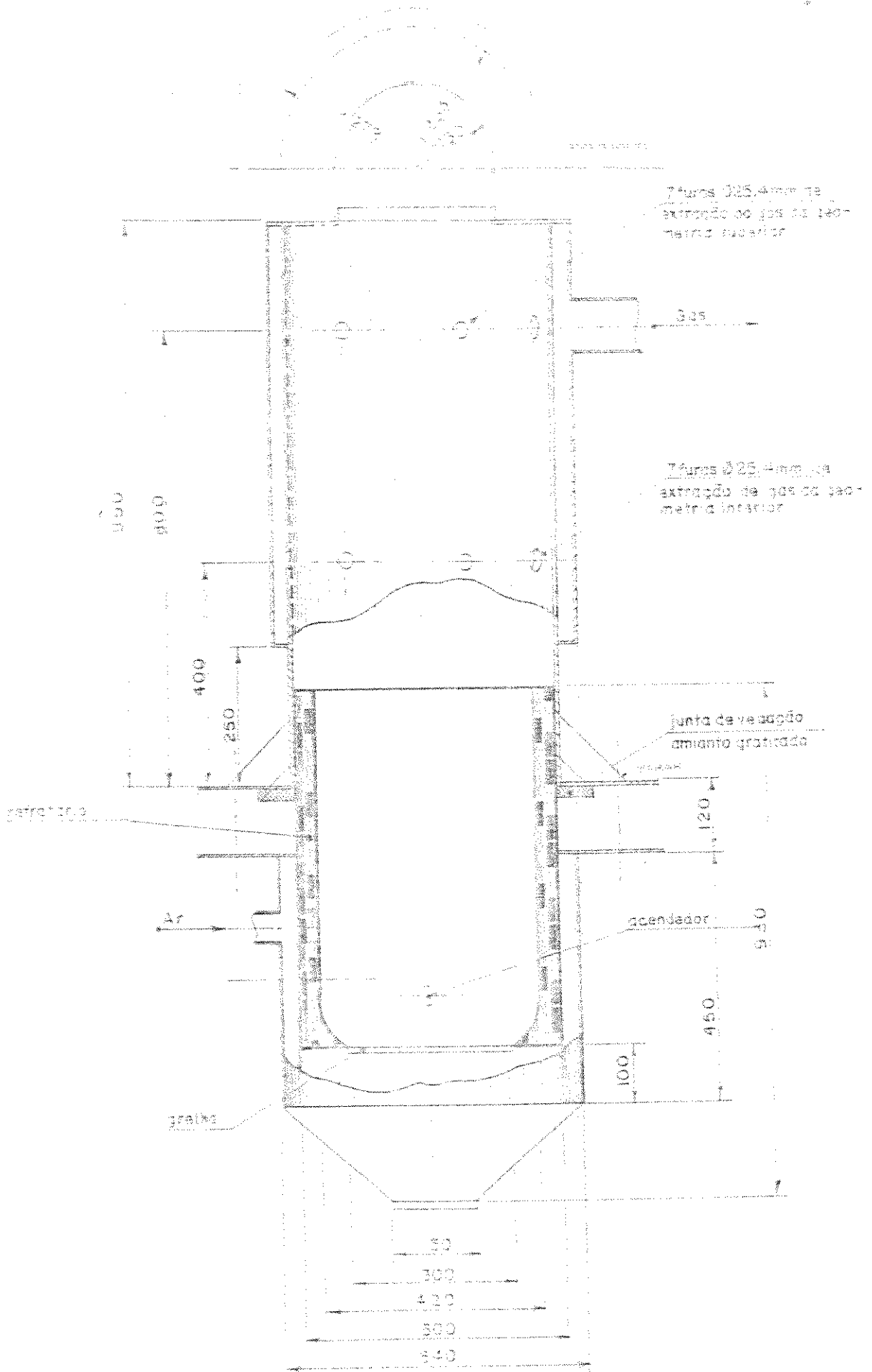


Fig. 2.32. GABINETE DE QUEIMA

duadas de 0 a 20% com os respectivos líquidos absorvedores, nos quais o gás é introduzido com o auxílio de uma bomba de vácuo manual.

Para a medida de CO é utilizada uma bomba de vácuo específica, na qual, numa haste interna é colocado um tubo de vidro graduado contendo uma coluna de sais absorvedores por onde é aspirado o gás.

Como o teor de monóxido de carbono foi grande demais para a medida máxima permissível no vidro graduado; o aparelho de orsat foi utilizado apenas para ajustes preliminares do gás gerado no gaseificador, ficando a análise completa para o cromatógrafo com detector de condutividade térmica.

2.1.6 Cromatógrafo

O cromatógrafo de condutividade térmica da Instrumentos Científicos C.G - Modelo 3535, composto de dupla coluna, peneira molecular, coluna Porapak N, temperatura das colunas 50°C e operando com uma corrente no detector de condutividade térmica de 1109A. Acoplado a um registrador-integrador-linear de mesma fabricação. Compõe ainda o conjunto duas garrafas de Nitrogênio e Hélio que servem como gás de arraste.

2.1.7 Outros Equipamentos

Higrômetro, Balança para determinação de umidade de equilíbrio de produtos - OHAUS, Balança Fillizola com capacidade até 500 kg, balança analítica de precisão 0,10 mg com capacidade de 200g, seringa coletora de gás com 50ml, micromanômetro de precisão da "Furness Controls Ltd", cronômetro, forno câmara elétrico com temperatura até 1300°C, e bomba calorimétrica tipo "PARR".

2.2 Métodos

2.2.1 Tratamento do Carvão Vegetal.

O carvão antes de ser utilizado foi quebrado em pedaços na faixa de 2 a 6cm e colocado ao sol para diminuir o teor de umidade e facilitar a sua queima. Em seguida foram retiradas cinco amostras de cada carregamento para teste para a determinação do teor de umidade, do peso específico aparente e do poder calorífico, sendo que o teor de umidade foi medido numa balança de determinação de umidade de equilíbrio de produtos, para o peso específico foi usado o método de determinação a granel e para o poder calorífico uma bomba calorimétrica.

2.2.2 Controle do fluxo de ar.

O controle do fluxo de ar foi feito através de uma válvula borboleta instalada na saída do ventilador principal. As variações de fluxo foram medidas com o auxílio de um medidor tipo turbina eletrônico-digital.

2.2.3 Fluxo de Gás

O fluxo de gás foi medido com o auxílio de uma placa de orifício localizada entre a saída de gás do gaseificador e o ciclone. As variações nos fluxos foram registradas em um manômetro de tubo inclinado, cuja leitura foi interpretada com o auxílio da equação A.1 do Apêndice A.

2.2.4 Metodologia usada no processo de gaseificação.

No processo de gaseificação do carvão vegetal, utilizando-se o ar atmosférico com agente oxidante no gaseificador mostrado na figura 2.1.3.1 obtivemos o então denominado de "gás de ar" ou "gás pobre". O gaseificador era abastecido com uma carga de 40 kg de carvão de dimensões uniformizadas e devidamente seco, em seguida era colocado uma chama no bocal de acendimento e ligado o ventilador principal, quando então ini-

ciava-se a combustão.

Foram consideradas duas geometrias do gasificador, denominadas de geometria inferior e geometria superior nas quais a extração do gás era feita a 117cm e 157cm respectivamente acima da grelha, conforme mostra a figura 2.1.2.1.

Para cada geometria foram realizadas as (cinco) experiências variando entre elas o vazão de ar. Cada experiência era realizada num tempo de duas horas e meia e em intervalos de 10 em 10 minutos eram feitas as leituras nos instrumentos de medida de vazão, temperatura, pressão, umidade a fim de que os pontos tomados como referência realmente pudessem estar em regime normal de funcionamento. Quando o gasificador se encontrava em regime eram retiradas amostras do gás para as análises cromatográfica¹⁷ com a finalidade de determinar a sua composição química e consequentemente o seu poder calorífico.

2.3 Tratamento de Dados

2.3.1 Diâmetro Hidráulico.

O diâmetro hidráulico foi determinado com o auxílio da equação 2.1.

$$D_h = \frac{\psi d_k}{3f(1-\psi)} \quad (2.1)$$

onde:

D_h - diâmetro hidráulico¹⁸

ψ - fração de vazio ou porosidade do leito

f - fator de forma (relação entre a superfície de um corpo compacto de uma forma qualquer sobre a superfície de uma esfera de mesmo volume, para o carvão $f = 1,5$)

d_k - diâmetro de uma esfera com volume de um corpo compacto.

2.3.2 Número de Reynolds

Este foi determinado com o auxílio da equação 2.2

$$Re = \frac{v \cdot Dh}{\nu} \quad (2.2)$$

onde:

Re - Número de Reynolds

Dh - Diâmetro hidráulico, definido no item 2.2.4

v - velocidade de ar, definido pela equação 2.3

ν - viscosidade cinemática.

$$v = \frac{Q_a}{A} = \frac{4 \cdot Q_a}{\pi \cdot D^2} \quad (2.3)$$

onde:

Q_a - Vazão de ar

D - Diâmetro interno do gaseificador

2.3.3 Temperaturas

Foram medidas três temperaturas no gaseificador. A temperatura T_1 medida pelo termopar-1 a uma altura de 30 cm, T_2 medida pelo termopar-2 à 133 cm e T_3 medida pelo termopar-3 à 88 cm acima da grelha, com todos os pontos localizados sobre um mesmo plano longitudinal. Sendo que, os termopares 02 e 03 localizam-se no módulo superior de tal maneira que o termopar-3 está a uma altura igual a saída dos gases da geometria inferior e o termopar-2 está a uma altura igual à saída dos gases do gaseificador. Os valores medidos nos experimentos encontram-se nas tabelas 3.1.1 e 3.1.2.

2.3.4 Densidade do Gás

A densidade do gás foi determinada para cada experiência em função da fração volumétrica de cada componente na mistura e também como função da temperatura do gás, de acordo com a equação 2.4.

$$\rho_m = x_1 \rho_1 + x_2 \rho_2 + x_3 \rho_3 + \dots + x_n \rho_n \quad (2.4)$$

onde:

ρ_m - densidade da mistura

x_n - fração volumétrica de cada componente na mistura

ρ_n - densidade de cada componente na mistura em determinada temperatura obtida em tabelas.^{18,19}

2.3.5 Valores Geométricos

Definimos como relação geométrica a razão entre a altura de saída dos gases pelo diâmetro do gasificador, expressa pela equação 2.5.

$$\delta = \frac{L}{D} \quad (2.5)$$

- Para a Geometria Superior $\delta = 3,09$

- Para a Geometria Inferior $\delta = 2,14$

2.3.6 Relações de Fluxos

2.3.6.1 Definimos a relação entre o fluxo de massa de gás e o fluxo de massa de carvão, dada pela equação 2.6.

$$u_g = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_c} \quad (2.6)$$

2.3.6.2 Definimos a relação entre o fluxo de massa de ar e o fluxo de massa de gás, dada pela equação 2.7.

$$u_a = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_g} \quad (2.7)$$

2.3.6.3 Definimos a relação entre o fluxo de massa de vapor d'água contido no ar na forma de umidade pelo fluxo de massa de gás, dado pela equação 2.8.

$$h_v = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_a} \quad (2.8)$$

O valor de $\dot{m}_v$ foi encontrado medindo-se as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco do ar a fim de determinar a umidade absoluta do ar, então pela equação 2.9.

$$\dot{m}_v = \left(\frac{w}{1+w} \right) \dot{m}_a \quad (2.9)$$

onde:

$\dot{m}_a$ - fluxo massico de ar úmido

w - umidade absoluta

Como os valores de $\dot{m}_v$ tiveram uma pequena variação, podemos considerá-lo como constante e igual a 0,02.

2.3.7 Poder Calorífico

O poder calorífico inferior em Kcal/m³ do gás foi determinado com o auxílio da equação 2.10.

$$P_g = \{ 3080 (\%CO) + 8561 (\%CH_4) + 2580 (\%H_2) \} \quad (2.10)$$

O Poder calorífico do carvão foi determinado experimentalmente com o auxílio de uma bomba calorimétrica.

2.3.8 Coeficiente de Potência ou Rendimento

Definimos como coeficiente de potência ou rendimento a relação entre a potência do gás pela potência do combustível ou carvão, dada pela equação 2.11.

$$\lambda = \frac{P_g}{P_c} = \frac{\dot{m}_g P_g}{\dot{m}_c P_c} \quad (2.11)$$

2.3.9 Potência Calorífica

Pela equação 2.12 determinamos a potência calorífica do gaseificador para cada experiência realizada.

Os resultados encontram-se na tabela 3.1.1 e 3.1.2.

$$\text{Pot} = \dot{m}_g P_g \quad (2.12)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Testes do Gaseificador

Conforme descrito na metodologia, foram efetuados 05 experimentos para cada geometria variando o fluxo de ar entre eles. Os resultados experimentais encontram-se nas tabelas 3.1.1 e 3.1.2.

3.2 Composição do Gás

Para cada experimento das geometrias foram extraídas uma amostra do gás e efetuada a análise cromatográfica, cujos resultados encontram-se nas tabelas 3.2.1 e 3.2.2.

Observando os resultados apresentados, destacamos:

- O monóxido de carbono aumentou a sua porcentagem na composição do gás em função do acréscimo da temperatura do gaseificador, esta por sua vez fator dependente do aumento da vazão de ar.
- O monóxido de carbono diminuiu a sua porcentagem na composição do gás em função da diminuição da altura de saída dos gases, isto é, para uma determinada vazão de ar a geometria superior apresentou um gás mais rico em CO do que a geometria inferior, concordando com os resultados apresen

T A B E L A - 3.1.1.1

Dados	Unidades	Experiências				
		$11,20 \times 10^{-3}$	$14,30 \times 10^{-3}$	$17,20 \times 10^{-3}$	23×10^{-3}	$25,60 \times 10^{-3}$
$\dot{m}_a$	kg/s	$11,20 \times 10^{-3}$	$14,30 \times 10^{-3}$	$17,20 \times 10^{-3}$	23×10^{-3}	$25,60 \times 10^{-3}$
$\dot{m}_g$	kg/s	$12,90 \times 10^{-3}$	$17,30 \times 10^{-3}$	$21,98 \times 10^{-3}$	$23,80 \times 10^{-3}$	$26,30 \times 10^{-3}$
$\dot{m}_v$	kg/s	$0,28 \times 10^{-3}$	$0,36 \times 10^{-3}$	$0,33 \times 10^{-3}$	$0,47 \times 10^{-3}$	$0,64 \times 10^{-3}$
$\dot{m}_c$	kg/s	$4,20 \times 10^{-3}$	$5,60 \times 10^{-3}$	$6,80 \times 10^{-3}$	$8,20 \times 10^{-3}$	$9,60 \times 10^{-3}$
Dh	cm	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Γ_c	kcal/kg	6528,70	6528,70	6528,70	6528,70	6528,70
Γ_g	kcal/kg	664,70	1110,00	1283,80	1606,50	1728,80
T_1	°C	913,00	1020,00	1095,00	1120,00	1150,00
T_2	°C	209,00	341,00	356,00	396,00	462,00
T_3	°C	421,00	470,00	479,00	484,00	529,00
ρ_g	kg/m ³	0,774	0,685	0,681	0,676	0,672
Pot	kcal/h	30,852	69,120	101,592	137,628	163,692
λ	-	0,313	0,525	0,636	0,714	0,725
μ_g	-	3,07	3,09	3,23	2,90	2,74
μ_a	-	0,87	0,83	0,78	0,96	0,97
R_0	-	4321,00	5487,00	6609,00	8792,00	9789,00

Dados Experimentais dos Testes da Geometria Superior - $\delta = 3,09$.

TABELA - 3.1.2

Dados	Unidades	Experiências				
		$11,70 \times 10^{-3}$	$14,70 \times 10^{-3}$	$18,60 \times 10^{-3}$	$20,80 \times 10^{-3}$	$25,20 \times 10^{-3}$
$\dot{m}_a$	kg/s	$11,70 \times 10^{-3}$	$14,70 \times 10^{-3}$	$18,60 \times 10^{-3}$	$20,80 \times 10^{-3}$	$25,20 \times 10^{-3}$
$\dot{m}_g$	kg/s	$15,20 \times 10^{-3}$	$21,50 \times 10^{-3}$	$23,80 \times 10^{-3}$	$24,70 \times 10^{-3}$	$26,10 \times 10^{-3}$
$\dot{m}_v$	kg/s	$0,26 \times 10^{-3}$	$0,33 \times 10^{-3}$	$0,41 \times 10^{-3}$	$0,52 \times 10^{-3}$	$0,55 \times 10^{-3}$
$\dot{m}_c$	kg/s	$4,00 \times 10^{-3}$	$5,30 \times 10^{-3}$	$6,40 \times 10^{-3}$	$7,00 \times 10^{-3}$	$9,20 \times 10^{-3}$
D_h	cm	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
P_c	kcal/kg	6528,70	6528,70	6528,70	6528,70	6528,70
P_g	kcal/kg	603,40	760,60	894,40	942,80	1334,10
T_1	°C	893,00	948,00	1067,00	1094,00	1175,00
T_2	°C	151,00	172,00	248,00	256,00	289,00
T_3	°C	341,00	406,00	416,00	503,00	522,00
ρ_g	kg/m ³	0,824	0,822	0,720	0,715	0,680
Q_{ot}	kcal/h	33012,00	58860,00	76644,00	83844,00	125352,00
λ	-	0,351	0,473	0,51	0,52	0,58
μ_g	-	3,80	4,06	3,72	3,53	2,84
μ_a	-	0,77	0,68	0,78	0,84	0,96
Re	-	4489,00	5674,00	7108,00	8043,00	9664,00

Dados Experimentais dos Testes da Geometria Inferior - $\delta = 2,14$.

T A B E L A - 3.2.1

Componentes	$\dot{m}_a=11,7 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$	$\dot{m}_a=14,7 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$	$\dot{m}_a=18,6 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$	$\dot{m}_a=20,8 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$	$\dot{m}_a=25,2 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$
O ₂	13,77	18,23	19,42	20,19	27,32
CO ₂	0,64	0,60	0,52	0,57	0,56
O ₂	12,10	9,16	10,80	8,34	5,06
N ₂	72,49	71,12	68,63	70,16	66,15
CH ₄	0,79	0,68	0,50	0,55	0,70
H ₂	0,21	0,21	0,13	0,19	0,21
P _G (kcal/m ³)	497,20	625,00	644,30	673,80	906,80

Composição em % volumétrico e Poder Calorífico dos Gases dos testes da Geometria Inferior.

T A B E L A - 3.2.2

Componentes	$\dot{m}_a=11,2 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$	$\dot{m}_a=14,3 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$	$\dot{m}_a=17,2 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$	$\dot{m}_a=23 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$	$\dot{m}_a=25,6 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$
CO	15,10	22,50	24,52	28,02	29,75
CO ₂	0,61	0,38	0,58	0,32	0,30
O ₂	14,88	9,00	6,59	5,36	3,81
N ₂	68,70	67,15	66,70	63,20	62,78
CH ₄	0,52	0,70	1,32	2,40	2,64
H ₂	0,19	0,27	0,21	0,70	0,72
P _C (kcal/m ³)	514,50	760,00	873,60	1086,50	1160,90

Composição em % volumétrica e poder calorífico inferior dos gases dos testes da Geometria Superior.

taços pela Codetec.⁵

- A geometria superior apresentou maior porcentagem de metano do que a geometria inferior, pois, na primeira o gás entra em contato com o carbono do carvão em zonas de baixa temperatura, favorecendo assim a reação para a formação do metano.²⁰
- O aumento da temperatura no gaseificador em função do aumento da vazão de ar, favoreceu a conversão do di-óxido de carbono para monóxido de carbono, concordando com a teoria defendida por Brame & King,² que a temperatura igual ou superior a 1000°C favorece a conversão de CO₂ para CO de 96,09 para 98,32%, assim como facilita a dissociação da água em hidrogênio e oxigênio.
- Com o aumento do fluxo de ar e consequentemente aumento da temperatura do gaseificador ocorreu uma maior oxidação, diminuindo assim o teor de oxigênio na composição do gás. Desta forma, também, houve uma diminuição do teor de Nitrogênio o qual se diluiu mais na mistura de gases.
- Mesmo sendo "gás pobre" ou "gás de ar" a sua composição apresentou considerável teor de metano e hidrogênio, o que nos leva a concluir que a quantidade excessiva de umidade no ar e também a grande higroscopicidade do carvão influem para a obtenção desses resultados.

No Apêndice C, tabelas C.1 e C.2, apresentamos um balanço de massa e balanço de energia das reações²¹ para cada experimento e cada geometria.

3.3 Influência da Vazão de Ar nas Zonas de Reação

Conforme podemos notar nas tabelas 3.1.1 e 3.1.2 em relação as temperaturas medidas pelo termopar-1, o qual se encontra a 30 cm acima da grelha por onde entra o ar necessário para oxidar o carvão, concluímos:

- a baixas vazões a zona de redução está perfeitamente enquadrada nessa faixa de altura do termopar-1.
- a medida que aumentamos a vazão de ar, a temperatura do termopar-1 vai aumentando, o que nos mostre claramente a aproximação da zona de oxidação do ponto considerado.
- O termopar-3 mede a temperatura da zona de secagem e o termopar-2 mede a temperatura do gás na saída do gaseificador. Esta se apresenta com valores mais baixos com relação a dados de outros pesquisadores.^{5,12}
- A temperatura-2 se apresenta em menor valor para a geometria inferior em virtude de haver uma perda maior de calor do gás para o meio ambiente, fato que na geometria superior essa quantidade de calor é aproveitada para promover a secagem do carvão que posteriormente irá participar das reações nas respectivas zonas ativas.

3.4 Parâmetros Adimensionais

Plotando os parâmetros adimensionais μ_a , u_g e λ em função do número de Reynolds, obtemos o gráfico da Figura 3.4.1, o qual analisando concluímos:

- Quanto maior o número de Reynolds, menor é a produção de gás por unidade de carvão queimado; maior é o coeficiente de potência ou rendimento e maior é a quantidade de ar por unidade de gás.
- A quantidade de ar por unidade de gás a princípio diminui de valor até determinado ponto a partir do qual o aumento de Reynolds provoca um aumento dessa relação.
- O consumo de ar por unidade de gás é maior para a geometria superior do que para a geometria inferior.

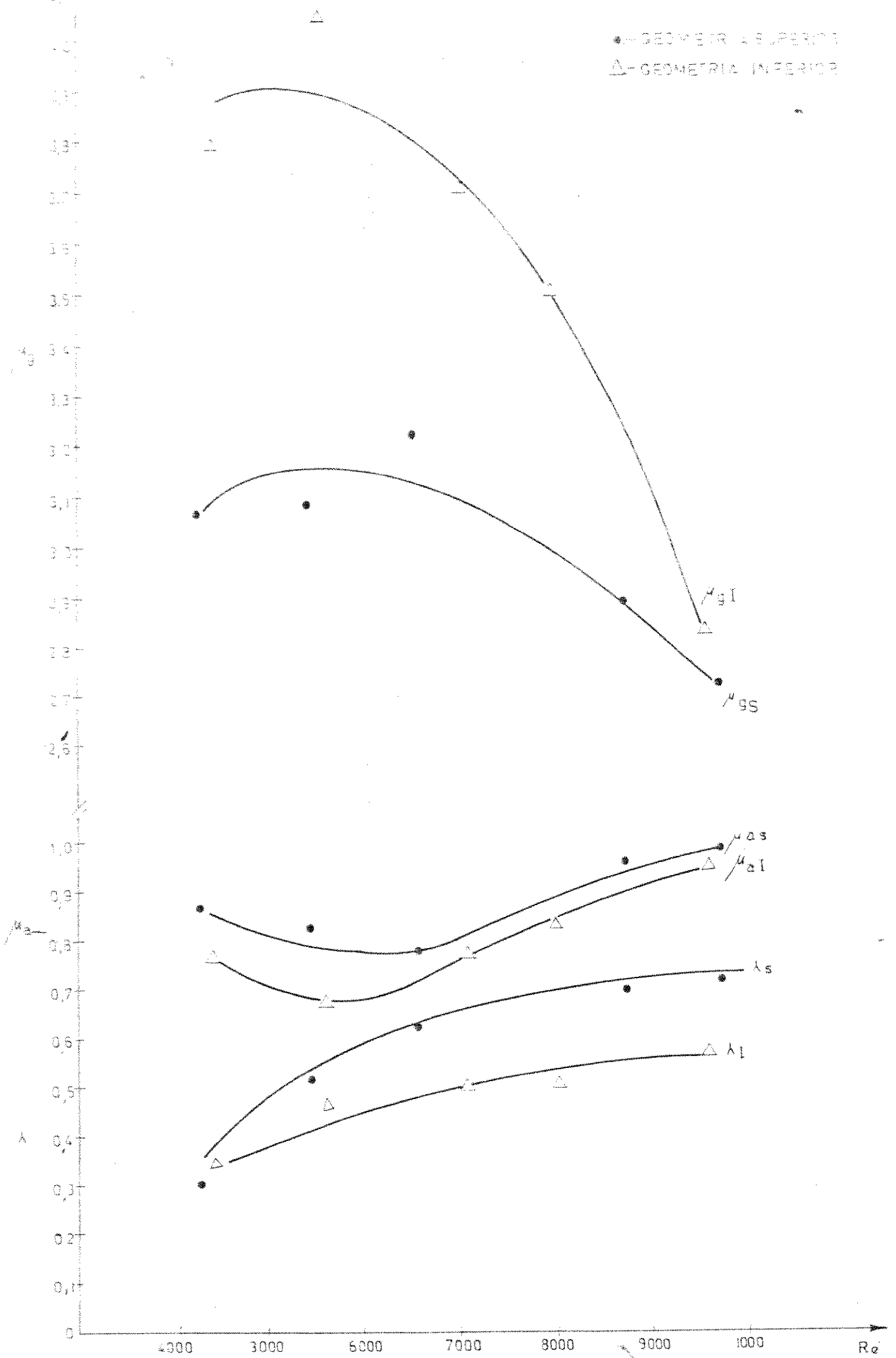


fig. 3.4.1. PARÂMETROS ADIMENSIONAIS

- O coeficiente de potência ou rendimento é maior para a geometria superior do que para a geometria inferior embora a produção de gás por unidade de carvão queimado seja maior para a geometria inferior. Este fato é compensado pelo poder calorífico do gás da geometria superior é maior que o poder calorífico da geometria inferior.

3.5 Influência das Parcelas de Energia

No gráfico de Figura-3.4.2, temos as relações em termos percentuais das parcelas de energia do monóxido de carbono, metano e hidrogênio em relação a quantidade de energia total disponível no gás em seu poder calorífico. Todos os três gases são os responsáveis diretos pelo aumento do poder calorífico do gás, sendo que, cada um deles entra com uma maior ou menor parcela de energia, contribuindo assim para um maior ou menor aumento do poder calorífico.

No gráfico fazemos um balanço da influência das parcelas de energia de cada componente na quantidade total de energia em função do aumento do número de Reynolds em ambas geometrias. Em análise ao gráfico podemos tirar as seguintes conclusões:

- A parcela percentual de energia do monóxido de carbono decresce para a geometria superior, enquanto as parcelas percentuais de energia do metano e do hidrogênio crescem.
- Na geometria inferior enquanto a parcela percentual de energia do monóxido de carbono cresce as parcelas de energia do metano e hidrogênio decrescem.
- A parcela percentual de energia do hidrogênio é maior para a geometria superior do que para a geometria inferior.
- A parcela percentual de energia do metano é maior para a geometria superior do que para a geometria inferior, pelo fato

ENERGIA CALORÍFICA DO CO (C.V.)
ENERGIA CALORÍFICA DO CH₄ (C.V.)

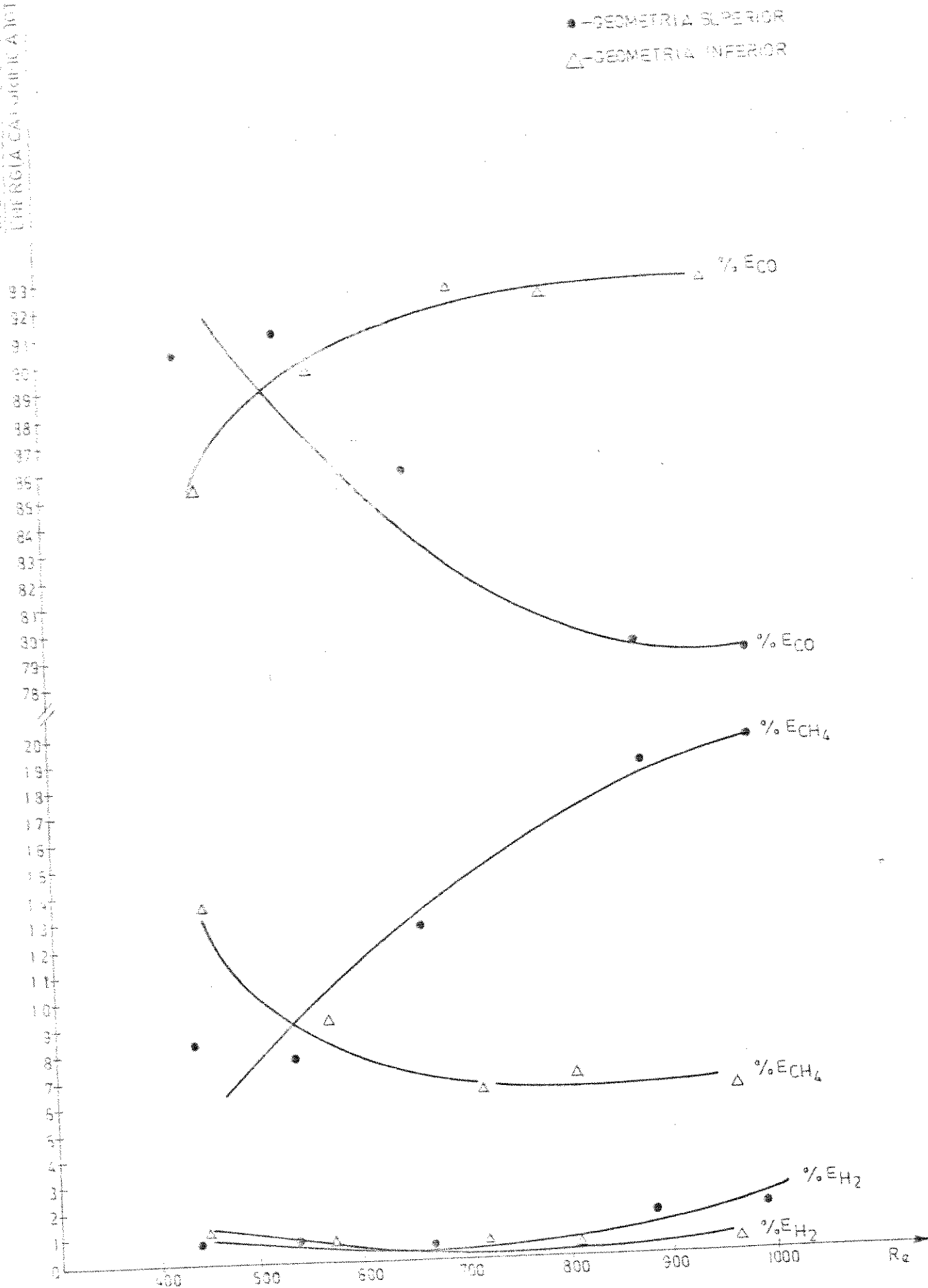


FIG. 12 - PARCELAS PORCENTUAIS DE ENERGIA DOS GASES CO, CH₄, H₂

de que na primeira o gás com a sua quantidade de hidrogênio livre entra em contato com o carbono do carvão em zonas de baixa temperatura, possibilitando assim a formação de uma maior quantidade de metano; o que não acontece na geometria inferior onde o gás é extraído para fora das zonas de reação e se resfria sem no entanto estar em contato com o carbono ativo.

- Na geometria superior houve um aumento da influência da parcela de energia do metano em relação a parcela do monóxido de carbono para a quantidade total de energia, pois, o aumento do teor de metano no gás foi considerável e a quantidade de energia liberada pelo metano é três vezes maior que a do monóxido de carbono.

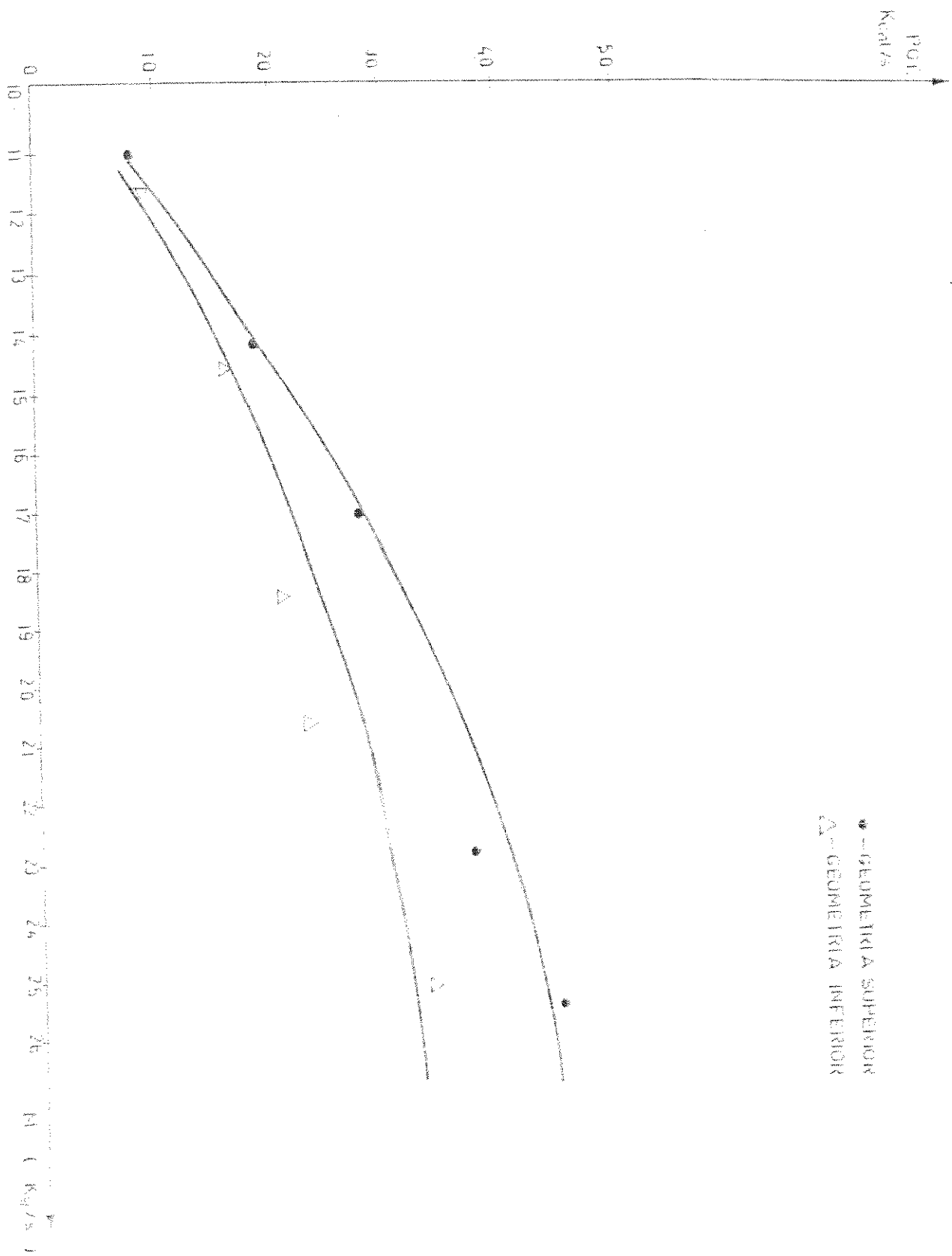
Os cálculos das parcelas e das porcentagens de energia dos componentes mostrado no Apêndice C, C-3 e C-4.

3.6 Potência Calorífica

No gráfico da Figura 3.5.1, mostramos a evolução da potência calorífica do gaseificador considerando as duas geometrias em estudo.

A geometria superior apresenta uma maior potência calorífica devido o gás apresentar um maior poder calorífico, em função das quantidades de monóxido de carbono, metano e hidrogênio.

Outro fato a ser notado é que para as dimensões do gaseificador, ele apresentou considerável potência calorífica superior mesmo a dados de outros pesquisadores.^{12, 5}



• -- GEOMETRIA SUPERIOR
Δ -- GEOMETRIA INFERIOR

Fig. 351. POTENCIA CALORIFICA X FLUJO DE AR

4. CONCLUSÕES

Dos resultados encontrados, tiramos as seguintes conclusões:

4.1 Embora a maioria dos estudos sobre gaseificação ascendente se prenda a carvão do tipo originário da madeira eucalipto em suas várias espécies, concluimos que: o carvão derivado de madeiras regionais mais densas do tipo: maçaranduba, acapul, possuem uma semelhança muito grande com o carvão de eucalipto em termos de aparência, fibrosidade, possuindo até peso específico aproximado, além de se comportarem como excelente combustível para gaseificação.

4.2 O carvão originário de madeiras menos densas do tipo embauba, lacre e madeira branca possuem baixo coeficiente ao choque consequentemente é de difícil manuseio devido a excessiva formação de finos.

4.3 Em relação a temperatura medida a 30 cm da grelha, concluimos que com o aumento do fluxo de ar a zona de oxidação se aproxima desse ponto. Entretanto esse aumento da vazão de ar não prejudicou a qualidade do gás, o qual se apresentou sempre com um aumento crescente de seu poder calorífico.

4.4 As paredes duplas tanto no módulo inferior que possibilitou o pré-aquecimento do ar, como no módulo superior que proporcionou que o calor do gás fosse cedido em sua maior parte para a secagem do carvão, influenciaram na baixa temperatura do gás efluente, elevando assim, o rendimento térmico.

4.5 De acordo com o gráfico mostrado na Figura 3.4.1, observamos que para um determinado valor geométrico de δ e outro valor fixo de λ_y , temos a geometria superior com um melhor rendimento do que a geometria inferior, quanto maior for o número de Reynolds. Embora a produção de gás por unidade de carvão seja maior para a geometria inferior.

4.6 Observando o gráfico da Figura 3.4.2 vemos a influência da energia liberada pelo metano que é três vezes maior que a energia liberada pelo monóxido de carbono no poder calorífico do gás e consequentemente na potência calorífica.

4.7 De acordo com o gráfico da Figura 3.5.1, observamos que a potência calorífica é cada vez maior para a geometria superior em relação a geometria inferior em função do aumento da vazão de ar.

4.8 Em estudo realizados em outras regiões com "gás de ar" ou "gás pobre" não encontramos a presença do hidrogênio e um elevado teor de metano na composição do gás. Entretanto como a umidade relativa do ar em nossa região é altíssima, além de que, por mais que o carvão fosse secado para diminuir a sua umidade, a sua higroscopicidade é grande. Devido a esses fatores a gaseificação se comportou como se estivéssemos usando uma injeção de vapor de água ou também denominado de "gás d'água" em consequência dos elevados teores de metano e hidrogênio presentes na composição do gás.

4.9 Devido a esses fatores expostos no item anterior, tivemos um aumento considerável do poder calorífico do gás e consequentemente uma maior potência calorífica do gaseificador em comparação a outra de mesma espécie.

5. SUGESTÕES

De acordo com a proposta do trabalho e baseado nos resultados obtidos, assim como, com a experiência adquirida apresentamos as seguintes sugestões:

- Seja feito uma pesquisa sobre a carbonização de madeiras regionais e sua utilização como matéria prima para a gaseificação. Fazendo um levantamento completo tal como: combustibilidade, reatividade, porosidade, etc...

- Usando o mesmo sistema experimental, ao trabalhar fazer um estudo visando determinar as variáveis termodinâmicas influentes nos resultados apresentados.
- Montar um sistema com as mesmas características do apresentado, usando entretanto a gaseificação descendente e fazer o levantamento dos parâmetros a fim de termos dados comparativos entre os dois modos de gaseificação.
- Fazer um estudo semelhante ao efetuado, entretanto, em vez de se fazer a variação da altura de saída de gás variar o diâmetro do gaseificador.

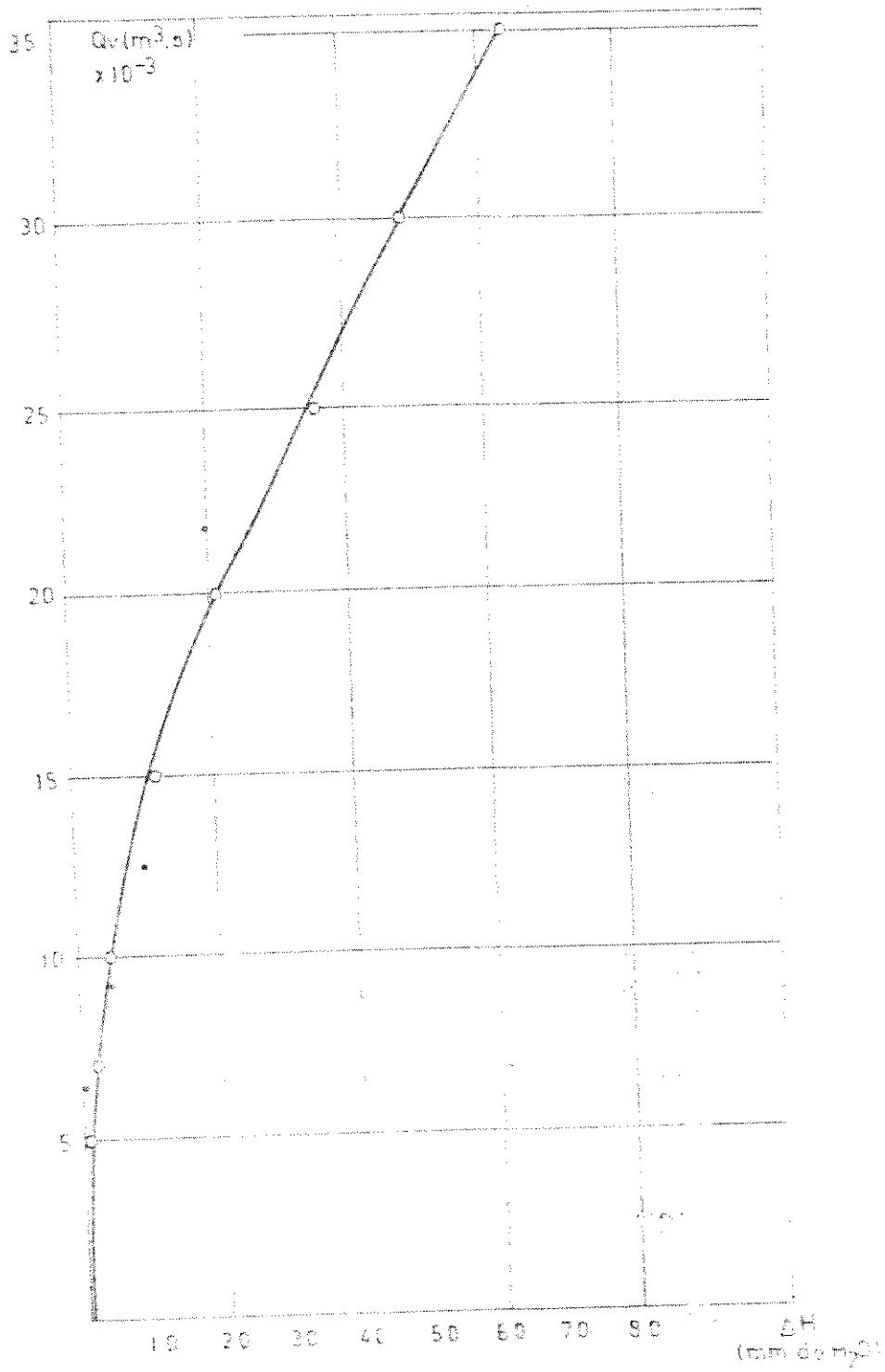
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - SICILIANO, L.B. Gaseificação para Automóveis e outros fins. Divisão de Combustíveis do Instituto de Engenharia de São Paulo. 1945.
- 2 - BRAME, J.S.S & KING, J.C.. Fuel Solid, liquid and gaseous. 5 th ed. Butter & Tanner Ltd., London, 1956.
- 3 - EPRI. The real costs of synthetic fuels. 1981.
- 4 - PAPWORTH, M.L. & SKOV, N.A. The Pegasus Unit (Petroleum, gasoline Substitute systems). Olimpia. 1974.
- 5 - RELATÓRIO DE PESQUISA. Gaseificação de Madeira. Companhia de Desenvolvimento Tecnológico. CEDETEC. Campinas, S.P.
- 6 - GLUGNIAC, J.C. Gasógeno para Automotores. Editorial Argentina Aristides Quillet S.A, 1944.
- 7 - CETEC - Uso da madeira para fins energéticos. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Série de Publicações Técnicas, B.H. 1980.
- 8 - RAMMUER, E. Motor. Berlin, Junho 1937.
- 9 - CETEC - Experiências em escala de laboratório para determinar a influência da idade, umidade e temperatura de carbonização sobre propriedades do carvão. Relatório de Pesquisa, B.H., 1979. 143p.
- 10 - BLANKENHORN, P. R. et alii. Porosity and pore size distribution of black-cherry carbonized in an inert atmosphere. Wood Science, 11(1): 23-9, jul 1978.
- 11 - GASIFICATION AND LIQUEFACTION OF COAL. Symposium at annual meeting of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers. New York, 1952.

- 12 - CETEC - Gaseificação de madeira e carvão vegetal. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Série de Publicações Técnicas. P.H. 1981.
- 13 - TOSELLO, A. Curso Prático sobre combustão e combustíveis. Fundação Tropical de Pesquisa e Tecnologia. Campinas, SP. Programa Energia para Agricultura. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Engenharia Agrícola - CENEA. 1980.
- 14 - ISMAIL, K.A. R. & MORAES, S.B. Alternativas para eletrificação Rural: Gaseificadores de bio-massa. Relatório de Pesquisa. Publicação FEC nº 026/81. Unicamp, SP. 1981.
- 15 - BORCHARDI, I. G. & GOMES, A.F. Termometria Termoelétrica - TERMOPARES. Sagra S.A. Porto Alegre, 1979.
- 16 - KNEULE, F. El Secado. Ediciones Urno S.A. Bilbao-Spain, 1966.
- 17 - CIOLA, R. Introdução a Cromatografia em fase gasosa. Editora da Universidade de São Paulo. 1973.
- 18 - PERRY, J.J. et alii. Chemical Engineers Handbook. 5 ed. Guanabara Dois, RJ. 1980.
- 19 - KREITH, F. Princípios da Transmissão de Calor. 3 ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1977.
- 20 - SCHWARZ, R. Instalação de gasogênios industriais a carvão vegetal. Metalurgia-ABM, vol. 37, nº 283, Jun-1981.
- 21 - CASH, J.D. & CASH, M.G. Producer gas for motor vehicles. Angus and Robertson Ltd, London, 1942.
- 22 - RELATÓRIO DE PESQUISA. Fundação Tropical de Pesquisa e Tecnologia. Campinas, SP, 1981.

- 23 - GROENEVELD, M.J. & VAN SWAAILJ, W.P.M. Gasification of solid waste. Potential and application of co-current bed gasifiers. Dept. of chemical Engineering, Twente University of technology. P. O Box, 217, 7500 AE Enschede, the Netherlands, 1979.
- 24 - GROENEVELD, M.J & WESTERTERP, K.R. Social and economical aspects of the introduction of gasification technology in the rural areas in developing Countries e g. Tanzania. Twente University of Technology. P.O. Box 217, 7500 AE Enschede. the Netherlands. 1980.
- 25 - GROENEVELD, M.J & VAN SWAAILJ, W.P.M. The design of co-current moving bed gasifiers fueled by biomass. Dept. of chemical Engineering. Twente University of Technology. P.O Box 217, 7500 AE Enschede. the Netherlands, 1980.
- 26 - KLASS, D.L. Energy from biomass and wastes. Engineering and Science Research Institute of gas technology. Chicago, Illinois. 1978.
- 27 - POSSELIUS, J. et alii. An updraft producer gas generator. Agricultural Engineering Dept. Michigan State University and Jun Sakan, Agricultural Machinery Dept. Mie University, Tsu City, Japan. March. 1979.
- 28 - RENSFELT, E. et alii. Basic gasification studies for development of biomass medium-BTU gasification processes. The Royal Institute of Technology. Sweden.
- 29 - WILLIAMS, R.O & HORSFIELD, B. Generation of low-BTU fuel gas from agricultural residues. Department of Agricultural Engineering University of California.
- 30 - WILLIAMS, R.O & GOSSE, J.R. An assesment of the gasification characteristics of some agricultural and energy residues using a laboratory gasifiers. Dept. of Agricultural Engineering. University of California. 1977.

31 - HODAN, A.S. & WILLIAMS, R.V. Small scale gasification of biomass to produce a low BTU gas. California Energy Commission and Electric Fuel Conversion Associates. 1976.



CURVA DE CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO

$$Q_v = A_1 \Delta H^2 + A_2 \Delta H + A_3$$

ONDE: A_1 , A_2 , A_3 - COEFICIENTES DETERMINADOS POR MÍNIMOS QUADRADOS

$$Q_v = 0,4339 \times 10^{-3} \Delta H^2 + 0,7245 \times 10^{-3} \Delta H + 0,5700 \times 10^{-3} \text{ (L/s)}$$

APENDICE A

A B I I D I I I - 2

1 - Dados para o dimensionamento do ciclone.

$$Q = 3,0 \text{ m}^3/\text{min de ar}$$

$$V = 15 \text{ m/s.}$$

$$Q = \frac{3 \times 10^3}{60} = 50 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = S \cdot V$$

$$S = \frac{Q}{V} = \frac{3}{60 \times 15} = 0,0033 \text{ m}^2$$

$$S = 3300 \text{ mm}^2$$

2 - Dimensionamento

$$S = \frac{D_c^2}{8} \quad D_c = 162,5 \text{ mm}$$

$$B_c = \frac{D_c}{4} \quad B_c = 40,6 \text{ mm}$$

$$D_e = \frac{D_c}{2} \quad D_e = 81 \text{ mm}$$

$$H_c = \frac{D_c}{2} \quad H_c = 81 \text{ mm}$$

$$L_c = 2D_c \quad L_c = 325 \text{ mm}$$

$$S_c = \frac{D_c}{8} \quad S_c = 20 \text{ mm}$$

$$Z_c = 2D_c \quad Z_c = 325 \text{ mm}$$

$$J_c = \frac{D_c}{4} \quad J_c = 40,6 \text{ mm}$$

BC/4859

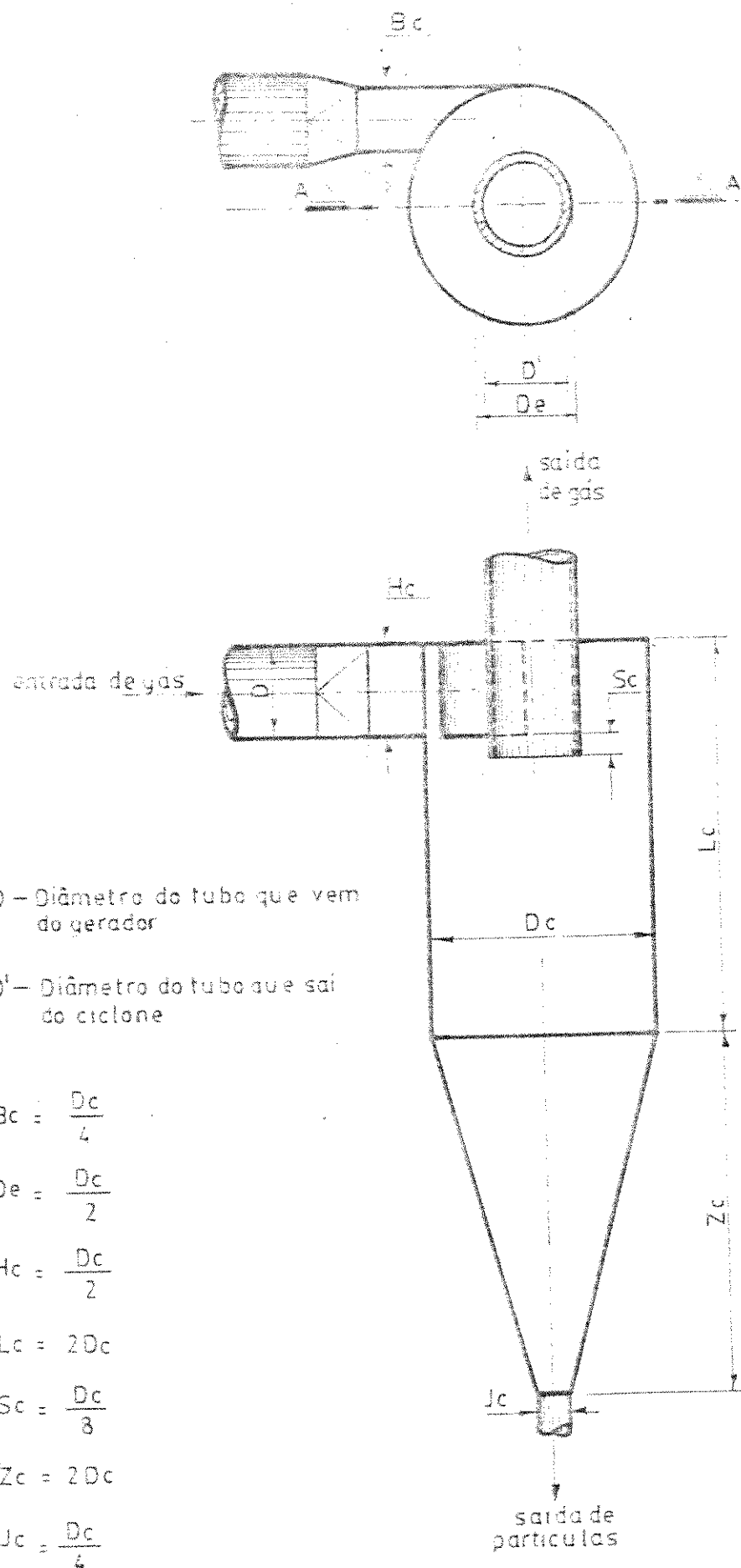


fig. B-1 CICLONE

TABELA - C-1

Fluxo de ar (kg/s)	Balanco de Massa (kg)						Balanco de Calor (kcal)			
11,20x10 ⁻³	0,036	C	+	0,09	O2	+	0,126	CO2	+	289,63
	0,12	CO2	+	0,03	C	+	0,15	CO	-	106,79
	0,0059	C	+	0,0038	H2O	+	0,014	CO	+	0,00015H2
	0,0025	C	+	0,0008	H2	+	0,0033	CH4	+	3,73
	0,051	C	+	0,136	O2	+	0,137	CO2	+	414,33
14,30x10 ⁻³	0,13	CO	+	0,05	C	+	0,21	CO	-	153,43
	0,0028	C	+	0,0113	H2O	+	0,012	CO	+	0,00021H2
	0,0033	C	+	0,0011	H2	+	0,0044	CH4	+	4,93
	0,055	C	+	0,144	O2	+	0,199	CO2	+	447,47
	0,138	CO2	+	0,051	C	+	0,239	CO	-	164,90
17,20x10 ⁻³	0,014	C	+	0,02	H2O	+	0,032	CO	+	0,00017H2
	0,0063	C	+	0,0021	H2	+	0,0084	CH4	+	9,33
	0,055	C	+	0,144	O2	+	0,199	CO2	+	447,47
	0,19	CO2	+	0,053	C	+	0,243	CO	-	171,37
	0,03	C	+	0,039	H2O	+	0,065	CO	+	0,00055H2
23x10 ⁻³	0,0114	C	+	0,0038	H2	+	0,0152	CH4	+	17,00
	0,053	C	+	0,154	O2	+	0,212	CO2	+	462,44
	0,21	CO2	+	0,056	C	+	0,266	CO	-	131,07
	0,0213	C	+	0,043	H2O	+	0,067	CO	+	0,0006 H2
	0,013	C	+	0,0042	H2	+	0,0167	CH4	+	19,38

Balanco de Massa e Calor das Reações de Gaseificação da Geometria Superior.

TABELA - C-2

Fluxo de ar (kg/s)	Balanço de massa (kg)						Balanço de Calor (kcal)
11,70x10 ⁻³	0,03	C	+ 0,08	O ₂	+ 0,11	CO ₂	+ 254,65
	0,10	CO ₂	+ 0,03	C	+ 0,13	CO	- 90,53
	0,009	C	+ 0,013	H ₂ O	+ 0,021	CO + 0,0002 H ₂	- 21,60
	0,0037	C	+ 0,0013	H ₂	+ 0,005	CH ₄	+ 5,59
	0,042	C	+ 0,11	O ₂	+ 0,152	CO ₂	+ 341,70
14,70x10 ⁻³	0,14	CO ₂	+ 0,04	C	+ 0,18	CO	- 126,10
	0,0077	C	+ 0,012	H ₂ O	+ 0,018	CO + 0,0002 H ₂	- 18,48
	0,0032	C	+ 0,0011	H ₂	+ 0,0043	CH ₄	+ 4,77
	0,046	C	+ 0,122	O ₂	+ 0,168	CO ₂	+ 374,25
	0,16	CO ₂	+ 0,043	C	+ 0,20	CO	- 139,03
18,60x10 ⁻³	0,0054	C	+ 0,008	H ₂ O	+ 0,0013	CO + 0,0002 H ₂	- 12,96
	0,0024	C	+ 0,0008	H ₂	+ 0,0032	CH ₄	+ 3,59
	0,047	C	+ 0,126	O ₂	+ 0,173	CO ₂	+ 382,38
	0,163	CO ₂	+ 0,045	C	+ 0,21	CO	- 145,50
	0,0065	C	+ 0,0097	H ₂ O	+ 0,015	CO + 0,0002 H ₂	- 15,60
20,80x10 ⁻³	0,0026	C	+ 0,0009	H ₂	+ 0,0035	CH ₄	+ 3,87
	0,064	C	+ 0,17	O ₂	+ 0,234	CO ₂	+ 520,70
	0,223	CO ₂	+ 0,061	C	+ 0,284	CO	- 197,23
	0,0078	C	+ 0,012	H ₂ O	+ 0,018	CO + 0,0002 H ₂	- 18,72
	0,0033	C	+ 0,0011	H ₂	+ 0,0044	CH ₄	+ 4,92

Balanço de Massa e Calor das Reações de Gaseificação da Geometria Inferior.

TABELA - C-3

Componentes	Re = 4321	Re = 5487	Re = 6609	Re = 8792	Re = 9789
Energia do CO (kcal/m ³)	465,08	693,00	755,22	863,02	916,30
Energia do CH ₄ (kcal/m ³)	44,52	59,93	113,01	205,46	226,01
Energia do H ₂ (kcal/m ³)	4,90	6,97	5,42	18,06	18,58
Energia Total ou Poder Calorífico (kcal/m ³)	514,50	760,00	873,60	1086,50	1160,90
Porcentagem de Energia do CO	90,4	91,20	86,40	79,40	78,90
Porcentagem de Energia do CH ₄	3,65	7,90	12,90	18,90	19,50
Porcentagem de Energia do H ₂	0,95	0,90	0,70	1,70	1,60

Dados utilizados na figura 3.4.2. Parcelas e Porcentuais de energia do monóxido de carbono, metano e hidrogênio para a Geometria Superior.

T A B E L A - C-4

Componentes	Re = 4489	Re = 5674	Re = 7108	Re = 8043	Re = 9664
Energia do CO (kcal/m ³)	424,12	561,48	598,14	621,46	841,46
Energia do CH ₄ (kcal/m ³)	67,63	58,21	42,81	47,08	59,93
Energia do H ₂ (kcal/m ³)	5,42	5,42	3,35	4,90	6,42
Energia total ou Poder Calorífico (kcal/m ³)	497,20	625,00	644,30	673,80	905,80
Porcentagem de Energia do CO	85,30	89,80	92,80	92,30	92,80
Porcentagem de Energia do CH ₄	13,60	9,30	6,60	7,00	6,60
Porcentagem de Energia do H ₂	1,10	0,90	0,60	0,70	0,60

Dados utilizados na figura 3.4.2. parcelas e Percentuais de energia do Monóxido de carbono, metano e hidrogênio para a Geometria Inferior.