TESE
207

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Engenheiro Químico ROBERTO DE ANDRADE ROUX

créditos no curso de pós graduação obtidos nos anos:

1975

1976

1977

Orientador de Tese - Prof JAW LIN TANG

Tese - Fabricação de propelentes moldados de base dupla para foguetes.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

CLASS. 662.311.4:67(043.2)
CUTT. R 871f
COMBO 207

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - Cálculo dos Diferentes parâmetros que definem um motor de foguete.

1 - Funções dinâmicas gasosas 9

1.1 - Primeiro Princípio da Termodinâmica 10

1.2 - Segundo Princípio da Termodinâmica 13

1.3 - Equações de base 13

1.3.1 - Equação de Estado 13

1.3.2 - Equação da continuidade 14

1.3.3 - Equação da Energia 19

1.3.4 - Equação da conservação da Quantidade de Movimento 19

2 - Tubeira 28

2.1 - Definição 28

2.2 - Escoamento adiabático reversível, unidimensional 29

2.3 - Bocal e difusor 30

2.4 - Velocidade na seção crítica 31

3 - Função de temperatura e número "de LAVAL" . . . 36

4 - Função de Pressão 37

5 - Função de densidade 38

6 - Função de continuidade 38

7 - Empuxo 40

8 - Coeficiente de Empuxo - C_F 46

9 - Coeficiente de Débito - C_D 48

10 - Impulsão específica 49

11 - Velocidade de combustão 50

12 - Klemmung ou Serrage 51

13 - Relação de Alargamento de Tubeira 52

14 - Tubeiras Reais 55

15 - Fração em peso do propelente 57

16 - Coeficiente de enchimento 57

17 - Consumo específico de propelente 57

18 - Rendimento do MOTOR 58

19 - Aplicação 59

CAPÍTULO 2 - Determinação teórica das características termodinâmicas das pólvoras e propelentes sólidos.

1 - Determinação da fórmula bruta por grama de propelente 65

1.1 - Nitrocelulose 65

1.2 - Nitroglicerina 67

1.3 - Sulfato de Potássio 68

1.4 - Nitrato de Bário 68

1.5 - Nitrato de Sódio 69

1.6 - Óxido de Cobre 70

1.7 - Criolita 71

1.8 - Óxido de Magnésio 71

1.9 - Estanho 72

1.10 - Perclorato de Amônio 72

1.11 - Nitro 2 difenilamina 73
1.12 - Carbon Black 73
1.13 - Alumínio Metálico 74
1.14 - Centralite 76
1.15 - Triacetina 76
1.16 - Difenilamina 77
1.17 - Álcool 77
1.18 - Éter 77
1.19 - Água 78
1.20 - Vaselina 78
1.21 - Estearina 78
1.22 - Palatinol 78
1.23 - Acetona 79
1.24 - Nitrato de Potássio 79
1.25 - Dinitrotolueno 79
1.26 - Trinitrotolueno 80
1.27 - Estearato Neutro de Chumbo 80
1.28 - Salicilato de Chumbo 80
1.29 - 2 Etil Hexoato de Chumbo 81
1.30 - Congo Rouge 81
1.31 - Dietilftalato 81
1.32 - Perclorato de Potássio 82
1.33 - Dimetilftalato 82

2 - Determinação da Equação de decomposição de propelente 83

3 - Calor de formação do propelente 87

4 - Calor de combustão 97

5 - Lei de Hess 97

6 - Potencial Real 100

7 - Potencial aparente (Definição) 100

8 - Características termodinâmicas dos propelentes sólidos 100

8.1 - Tabela VI 104

8.2 - Tabela IV 106

8.3 - Tabela II 107

9 - Potencial aparente para um propelente CHON . . . 113

10 - Potencial aparente para um propelente CHON Cl F. 115

11 - Potencial aparente para um propelente CHON Al. . 116

12 - Potencial aparente para um propelente CHON Be . 118

13 - Potencial aparente para um propelente CHON Cl F Al Be 119

14 - Equações do L.C.A. (E.N.S.A. - France - Loeuille) 120

14.1 - Coeficientes das funções termodinâmicas (LCA). . 122

14.2 - Programa para pólvoras de base simples (computador Telefunken EFEI) 123

14.3 - Programa para pólvora de base dupla sem solvente (computador Telefunken EFEI) 125

14.4 - Programa para pólvoras BS e BD (computador CTA). 128

15 -Equações de Paul Tavernier 132

16 - Equações de Hirschfelder - Sherman 133

16.1 - Aplicação 137

16.2 - Tabelas de constantes Hirschfelder-Sherman . . . 140

17 - Avaliação do Impulso Específico 142

18 - Avaliação da massa molecular média dos produtos de combustão 145

19 - Aplicação 148

CAPÍTULO 3 - Velocidade de combustão nas pólvoras de base dupla SD.

1 - Estabelecimento da Lei 155

2 - Processo de combustão 156

3 - Leis da velocidade de combustão 157

4 - Relação entre a velocidade linear de combustão, o potencial aparente e a pressão das pólvoras compostas essencialmente de NC, NGL e Centralite 158

CAPÍTULO 4 - Cálculo da forma dos blocos propulsores.

1 - Método geral de determinação de formas de blocos 171

1.1 - Determinação do diâmetro máximo do grão. 171

1.2 - Escolha da forma 171

1.3 - Escolha do propelente 172

2 - Estudo de formas particulares 172

2.1 - Estudo de blocos de forma estrelada 172

2.1.1 - Definição 172

2.1.2 - Evolução do perímetro em função da espessura de pólvora queimada num bloco estrelado de 10 pontas 174

2.1.3 - Superfície de combustão de blocos de propelentes com canal estrelado e de combustão central . . . 174

2.1.4 - Influência da inibição das faces 188

2.1.5 - Influência da inibiçãc parcial das faces 188

2.1.6 - Alargamento do canal num bloco estrelado 188

2.1.7 - Determinação de uma usinagem exterior 192

2.1.8 - Exemplo de estudo de um bloco de forma estrelada 193

2.2 - Bloco em forma de "trompette" 197

2.2.1 - Definição 197

2.2.2 - Exemplo de estudo de um bloco de forma "trompette" 197

2.2.3 - Determinação aproximada da "trompette" 198

2.3 - Estudo de um bloco da forma "mamelles" 199

2.3.1 - Definição 199

2.3.2 - Exemplo de formas de blocos do tipo "mamelle" . 199

2.3.3 - Exemplo de cálculo 201

3 - Cálculos Balísticos 204

3.1 - Estabelecimento da lei Sc (e) 204

3.2 - Cálculo geométrico do volume 204

3.3 - Estabelecimento da lei P (t) 205

3.3.1 - Determinação da área da tubeira 205

3.3.2 - Cálculo de P (t) 205

3.4 - Estabelecimento da lei F (t) 212

4 - Processos de verificações 214

4.1 - Curva Sc (e) 214

4.2 - Curva P (t) 215

4.3 - Curva F (t) 215

5 - Noções úteis para os cálculos de superfície e de volume 216

5.1 - Para as superfícies 216

5.2 - Para os volumes 216

5.3 - Determinação do centro de gravidade dos elementos mais empregados 217

6 - Determinação da pressão máxima esperada para uma temperatura máxima 218

6.1 - Em funçãó da velocidade por um valor de superfície máxima 218

6.2 - Em função da dispersão sobre as tolerências. . 219

6.3 - Em função da erosão 220

CAPÍTULO 5 - A fabricação de propelente moldado de base dupla.

1 - Definição 223

1.1 - Fórmula e potencial aparente dos ingredientes ativos mais utilisados no processo 223

1.2 - Etapas do processo 225

2 - Composição do propelente 226

2.1 - Pólvora de Base 226

3 - Histórico 229

4 - Fabricação de Pólvora de Base, comparação entre a Técnologia Americana e a Técnologia Francesa 232

5 - Fabricação do propelente 250

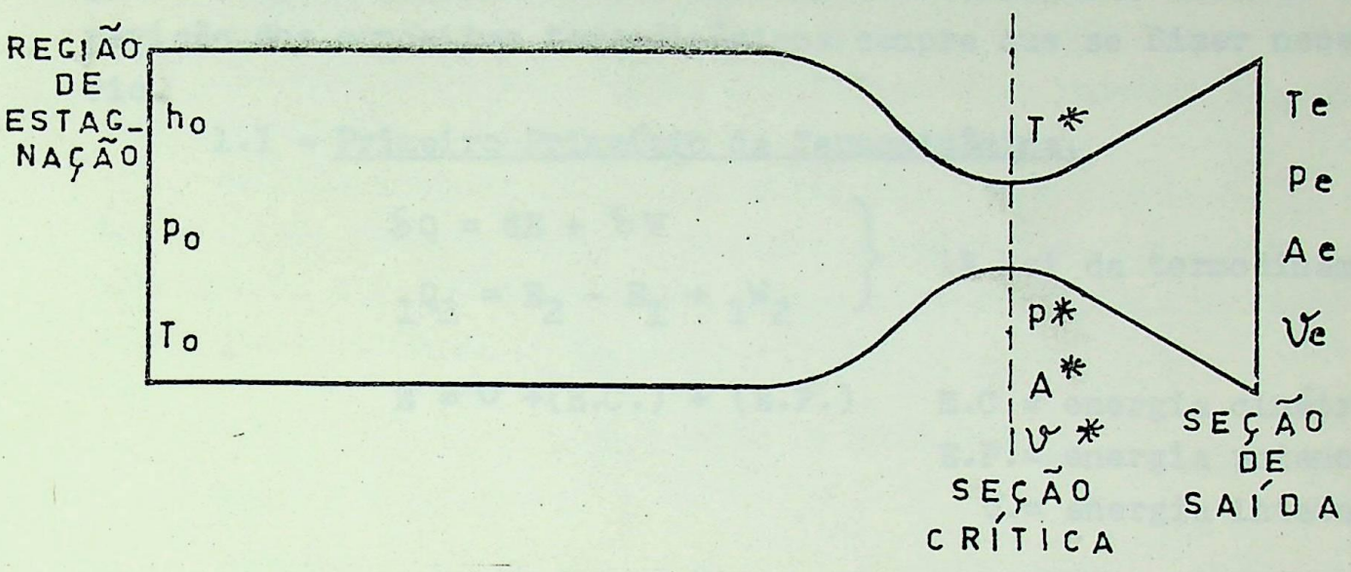
6 - Teoria da moldagem e cura 256

7 - Propriedades dos materiais 262

CAPÍTULO 1

CÁLCULO DOS DIFERENTES PARÂMETROS QUE DEFINEM UM MOTOR DE FOGUETE.

1 - O desenvolvimento baseia-se na teoria exposta no livro "Gas dynamische Funktionen und deren Anwendung mit Formelsammlung und Tabellenteil - DEUTSCHE LUFT - UND RAUMFAHRT - FORSCHUNG.



Simbologia:

h = entalpia
p = pressão
T = temperatura
A = seção reta
v = velocidade dos gases de combustão

A teoria exposta no livro supra citado, estabelece as chamadas funções dinâmicas gasosas para estudar os fenômenos que se produzem nas correntes unidimensionais e estacionárias em meios compressíveis.

Vamos considerar um recipiente suficientemente grande, terminado em uma tubeira, na qual supomos ter-se estabelecido um fluxo compressível permanente, unidimensional e isentrópico de um gás perfeito e vamos adotar que unicamente ao longo do fluxo se produzam variações de seção reta.

Para estabelecer as equações que regem o fenômeno a que nos referimos, convém definir as condições de estagnação como aquelas em que o fluxo tenha velocidade zero (parado), ao que

corresponderia uma entalpia de estagnação dada h_o, valor que tornaria a se repetir sempre que a velocidade se anulasse, caso em que o sistema fosse isentrópico.

O índice zero (0) designará qualquer propriedade na estagnação; assim To será a temperatura de estagnação, Po a pressão de estagnação, ρ_o a massa específica na estagnação etc.

Feito êste preâmbulo, estabeleceremos as equações que regem o fenômeno, procurando facilitar o entendimento através uma revisão dos conceitos termodinâmicos sempre que se fizer necessário.

1.1 - Primeiro Princípio da Termodinâmica.

$$\left.\begin{aligned} \delta Q &= dE + \delta W \\ {}_1Q_2 &= E_2 - E_1 + {}_1W_2 \end{aligned}\right\} \text{ 1ª lei da termodinâmica}$$

$$E = U + (E.C.) + (E.P.)$$

E.C.= energia cinétrica
E.P.= energia potencial
U.= energia interna

diferenciando $\underset{=}{E}$ teremos:

$$dE = dU + d(E.C.) + d(E.P.) \text{ ---------- 1}$$

e poderemos expressar a primeira lei da termodinâmica para uma mudança de estado de um sistema, da seguinte forma

$$\delta Q = dU + d(E.C.) + d(E.P.) + \delta W$$

Consideremos um sistema inicialmente em repouso em relação à terra, a qual está ligado um referencial, e deixemos atuar sôbre o sistema uma fôrça externa $\underset{=}{F}$ horizontal, que o movimenta por uma distância dx na direção da fôrça. Assim, não há variação de energia potencial.

$$d(E.P.) = 0$$

Admitamos que não haja transferência de calor nem variação da energia interna.

$$\delta Q = 0 \quad e \quad dU = 0$$

$$\delta W = -F\,dx = -\,d(E.C.)$$

$$\text{mas} \quad F = m.\,a = m.\,\frac{d(v)}{dt} \qquad v = \frac{dx}{dt}$$

$$x = \varphi_2(t)$$

$$F = m.\frac{d}{dt}(v) = m.\frac{d}{dx}(v).\frac{dx}{dt} = m.v\frac{dv}{dx}$$

então $d(E.C.) = F\,dx = (mv\frac{dv}{dx})\,dx = mv\,dv$

integrando teremos

$$\int_{v=o}^{v=v} mv\,dv = \int_{E.C.=0}^{E.C.=E.C.} d(E.C.) \qquad e \qquad E.C. = \frac{1}{2}mv^2$$

Consideremos um sistema inicialmente em repouso e a uma certa altura em relação a um plano de referência.

Deixemos atuar sôbre o sistema uma fôrça vertical $\underline{F}$, de intensidade tal que eleve o sistema à velocidade constante, de uma altura dZ. Consideramos que a aceleração da gravidade nesse ponto seja g. $\delta Q = 0$, $dU = 0$ e $d(E.C.) = 0$

$$\delta W = -F dZ = -d(E.P.)$$

mas $F = m.a = m.g$

$$d(E.P.) = F\,dZ = mg\,dZ$$

$$\int_{(EP)_1}^{(EP)_2} d(E.P.) = m\int_{Z_1}^{Z_2} g\,dZ$$

Admitindo g não variando com Z (o que é bastante razoável para variação moderada de cota).

$$(EP)_2 - (EP)_1 = mg\,(Z_2 - Z_1)$$

e substituindo na equação 1 teremos

$$dE = dU + mvdv + mg\,dZ \qquad \text{----------} \qquad 2$$

Integrando para uma mudança do estado $\underline{1}$ para o estado $\underline{2}$, com g constante temos:

$$E_2 - E_1 = U_2 - U_1 + \frac{m}{2}v_2^2 - \frac{m}{2}v_1^2 + mgZ_2 - mgZ_1$$

Substituindo então dE por seu valor dado pela equação 2 na equação da primeira lei da termodinâmica teremos:

$$\delta Q = dU + d(\frac{mv^2}{2}) + d(mgZ) + \delta W$$

Dividindo ésta expressão pela massa para trabalharmos com propriedades específicas teremos:

$$\delta q = du + d\left(\frac{v^2}{2}\right) + d(gz) + \delta\omega \quad \text{---------- 3}$$

A entalpia é definida por:

$h = u + p\bar{v}$ onde $\bar{v}$ = volume específico

Diferenciando vem:

$dh = du + p\,d\bar{v} + \bar{v}\,dp = du + \delta\omega + \bar{v}\,dp$

pois $pd\bar{v} = \delta\omega$ (Trabalho elementar)

Num sistema a pressão constante, teremos $dp = 0$ logo:

$$(dh)_p = du + \delta\omega \quad \text{---------- 4}$$

Mas pela equação da 1ª lei da termodinâmica, num processo adiabático $\delta Q = 0$ e teremos:

$$0 = du + d\left(\frac{v^2}{2}\right) + d(gz) + \delta\omega \quad \text{ou} \quad du + \delta\omega = -d\left(\frac{v^2}{2}\right) - d(gz) \ldots\ldots$$

e num processo adiabático ($\delta Q = 0$) à pressão constante ($dp = 0$) teremos:

$$dh = -d\left(\frac{v^2}{2}\right) - d(gz)$$

Tendo a energia potencial contribuição insignificante no processo podemos finalmente escrever:

$$dh \tilde{=} -d\left(\frac{v^2}{2}\right) \quad \text{---------- 6}$$

e como $c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$ $\qquad dh = c_p\,dT$

$$-d\left(\frac{v^2}{2}\right) = dh = c_p\,dT$$

integrando teremos:

$$\int_{T_c}^{T} c_p\,dT = -\int_{0}^{v} d\left(\frac{v^2}{2}\right)$$

para c_p aproximadamente constante no intervalo de temperatura considerado, teremos:

$$c_p(T - T_o) = -\frac{v^2}{2} \quad \text{ou}$$

$$c_p(T_o - T) = \frac{v^2}{2} \quad \text{---------- 7}$$

onde T_o = temperatura de estagnação

T = temperatura num ponto do fluxo onde a velocidade é $\underset{=}{v}$.

Esta equação (7) é uma das equações de base, chamada equação da energia.

1.2 - Segundo Princípio da Termodinâmica.

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{Reversível} \quad \text{ou} \quad ds = \left(\frac{\delta q}{T}\right)_{Reversível}$$

para um processo adiabático $\delta Q=0$ e portanto $ds=0$

1.3 - Equações de base

1.3.1 - Equação de Estado

$$pV = n\bar{R}T$$

$$n = \frac{m}{Mol}$$

$$pV = \frac{m}{Mol}\bar{R}T = mRT$$

$$\frac{pV}{m} = RT$$

$$p\bar{v} = RT$$

$$p = \frac{m}{V}RT$$

$$p = \rho RT$$

Simbologia

V = volume
n = número de moles
$\bar{R}$ = constante universal molar dos gases
m = massa do gás
Mol= massa molecular do gás
R = constante universal dos gases perfeitos
ρ = massa específica dos gases
p = pressão estática
T = temperatura absoluta

$T^{o}K = t^{o}C + 273$

$T^{o}R = t^{o}F + 460$

$\bar{R}$ = 1545 ftlb / lbmol ^{o}R

$\bar{R}$ = 1,986 Btu/ lbmol ^{o}R

$\bar{R}$ = 1,986 cal/ gmol ^{o}K

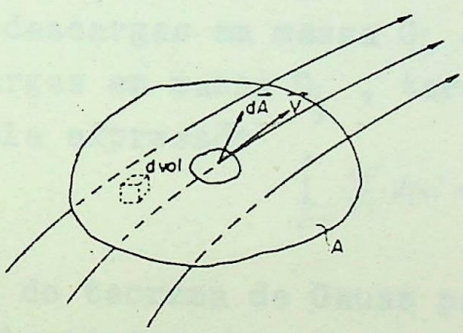
$\bar{R}$ = 0,08206 atmosfera - litro / gmol ^{o}K

$\bar{R}$ = 847,7 metro - Kilograma força/Kgmol ^{o}K

1.3.2 - Equação da Continuidade

O Princípio da Conservação da Massa permite estabelecer a chamada "Equação da Continuidade", de grande importância para a análise do inter-câmbio de massa nos escoamentos.

Suponha-se uma massa de fluído em escoamento pelo espaço e considere-se uma superfície de contrôle fechada A, fixa no espaço, através da qual escoa o fluido.



Num instante t a massa de um elemento de volume contido no interior da superfície de contrôle é $dm_1 = \rho$ d vol. No instante t + dt a massa contida no mesmo elemento de volume será igual a

$$dm_2 = \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} dt\right) dvol.$$

Houve portanto no intervalo de tempo dt o acréscimo de massa.

$$dm_2 - dm_1 = \frac{\partial \rho}{\partial t} dt\, dvol$$

Para o volume todo envolvido pela superfície de contrôle tem-se então o acréscimo total de massa.

$$dm = \int_{vol} \frac{\partial \rho}{\partial t} dt\, dvol$$

Por outro lado, através da superfície de contrôle tem-se a descarga total em massa num instante t

$$G = \int_A \rho \vec{V} \cdot \overrightarrow{dA}$$

que, sendo positiva indica que está saindo mais massa do que entrando na superfície de contrôle, e vice-versa sendo negativa.

Portanto, no intervalo de tempo dt tem-se o acréscimo total de massa internamente a superfície de contrôle

$$dm = -G\,dt = -\int_A \rho \vec{V} \cdot \overrightarrow{dA}\,dt$$

Igualando-se as duas expressões obtidas para o acréscimo total de massa dm resulta

$$\int_{vol} \frac{\partial \rho}{\partial t} dvol = -\int_A \rho \vec{V} \cdot \overrightarrow{dA}$$

que é a expressão da conservação da massa, ou equação da continuidade sob forma integral, com a hipótese de não haver fontes ou sumidouros internamente à superfície de contrôle.

Havendo internamente à superfície de contrôle fontes que contribuam com descargas em massa G_i e sumidouros que contribuam com as descargas em massa G_j, ter-se-á a equação da continuidade dada pela expressão

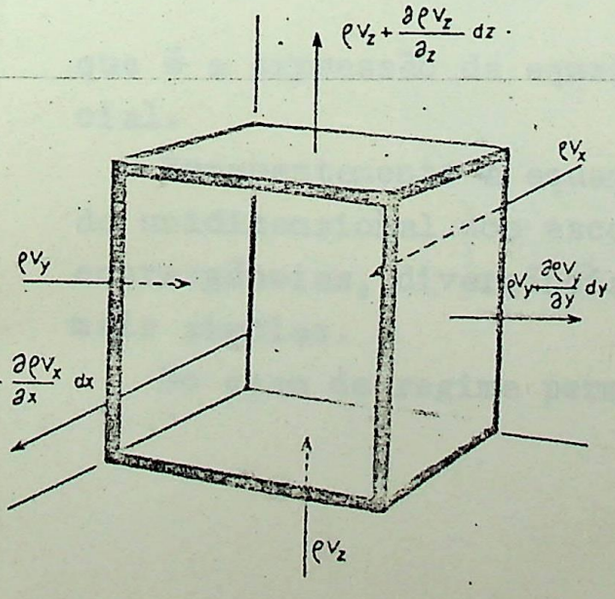
$$\int_{vol} \frac{\partial \rho}{\partial t} dvol = -\int_A \rho \vec{V} \cdot \overrightarrow{dA} + \sum G_i - \sum G_j$$

A aplicação do teorema de Gauss permite obter a expressão da equação da continuidade sob a forma diferencial. De fato, sendo

$$\int_A \rho \vec{V} \cdot \overrightarrow{dA} = \int_{vol} \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{V}\, dvol$$

resulta para o caso em que não há fontes ou sumidouros

$$\int_{vol} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{V} \right) dvol = 0$$



Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

A massa total de fluido que entra no volume considerado no intervalo de tempo elementar dt será dada por

$$dm_1 = (\rho V_x\, dy\, dz + \rho V_y\, dx\, dz + \rho V_z\, dx\, dy)\, dt$$

A massa total de fluido que sai, correspondentemente será

$$dm_2 = \left[\left(\rho V_x + \frac{\partial \rho V_x}{\partial x} dx\right) dy\, dz + \left(\rho V_y + \frac{\partial \rho V_y}{\partial y} dy\right) dx\, dz + \left(\rho V_z + \frac{\partial \rho V_z}{\partial z} dz\right) dx\, dy\right] dt$$

Logo o acréscimo de massa no elemento de volume no intervalo de tempo elementar dt será dado pela diferença da massa que entrou para a que saiu

$$dm_1 - dm_2 = \left[-\frac{\partial \rho V_x}{\partial x} dvol - \frac{\partial \rho V_y}{\partial y} dvol - \frac{\partial \rho V_z}{\partial z} dvol\right] dt$$

Por outro lado, no instante t a massa contida no volume elementar sendo ρ dvol e instante t + dt sendo

$$\left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} dt\right) dvol$$

segue-se que o acréscimo $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ dt dvol deverá ser igual ao acréscimo anterior.

Resulta então $$-\frac{\partial \rho V_x}{\partial x} - \frac{\partial \rho V_y}{\partial y} - \frac{\partial \rho V_z}{\partial z} = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

ou $$-\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{V} = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

ou ainda $$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{V} = 0$$

que é a forma diferencial da equação da continuidade.

e portanto $$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{V} = 0$$

que é a expressão da equação da continuidade sob a forma diferencial.

Frequentemente a equação da continuidade é aplicada no estudo unidimensional dos escoamentos através de dutos cilíndricos, convergências, divergências, curvas, etc, assumindo então formas mais simples.

No caso de regime permanente tem-se para um escoamento con-

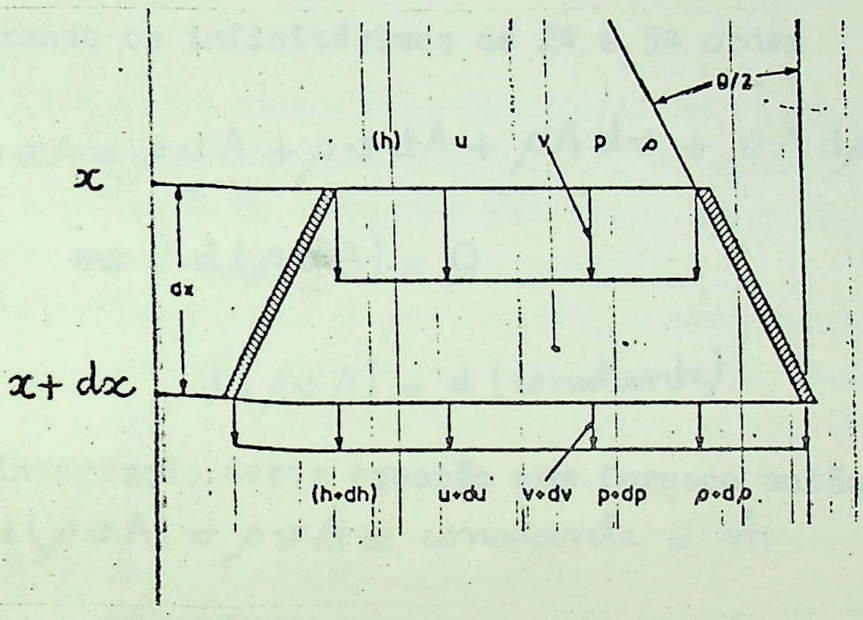
siderado como unidimensional $\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2$

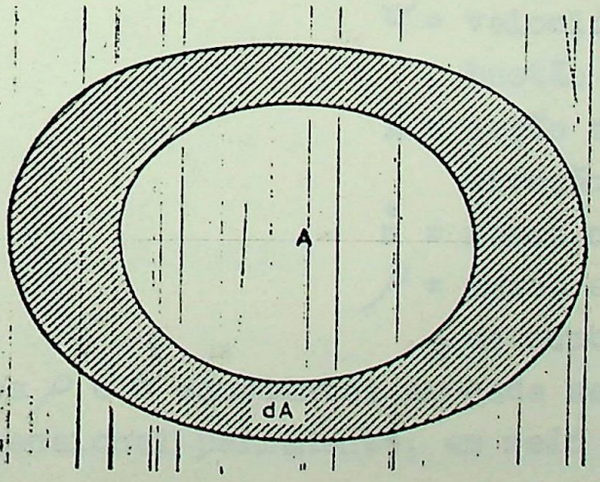
sendo V_1 e V_2 as velocidades médias nas secções transversais A_1 e A_2. Se o fluido em escoamento puder ser considerado como incompressível ter-se-á $\rho_1 = \rho_2$ e portanto

$$V_1 A_1 = V_2 A_2$$

para fluidos compressíveis em regime permanente, em escoamento unidimensional teremos:

PRIMEIRO DESENVOLVIMENTO





A massa que entra no elemento de contrôle mostrado na fig. anterior, na unidade de tempo através a superfície localizada na posição x é $\rho v A$. A massa que sai do mesmo, na unidade de tempo, através a superfície localizada na posição $(x + dx)$ é $(\rho+d\rho).(v+dv).(A+dA)$

Em regime permanente, essas duas quantidades devem ser iguais, pois não há acúmulo de massa no elemento de contrôle. Expandindo para primeira ordem em quantidades diferenciais, encontraremos que:

$$\rho v A = (\rho+d\rho)(v+dv)(A+dA)$$

$$\rho v A = \rho v A + \rho v dA + \rho dv A + \rho dv dA + d\rho v A + d\rho v dA + d\rho dv A + d\rho dv dA.$$

desprezando os infinitésimos de 2ª e 3ª ordem

$$\rho v A = \rho v A + \rho v dA + \rho A dv + v A d\rho$$

ou $$d(\rho v A) = 0$$

$$d(\rho v A) = d(\text{constante})$$

A integração desta equação nos fornece então

$$\int d(\rho v A) = \rho v A = \text{constante} = \dot{m}$$

SIMBOLOGIA

v = velocidade dos gases de combustão

A = seção reta perpendicular à direção do fluxo

$\dot{m}$ = massa na unidade de tempo

ρ = massa específica dos gases de combustão.

Como teremos ρ e v constantes em cada seção, devido ser escoamento unidimensional permanente, em meio compressível teremos

$$\rho v A = \text{constante}$$

$$\ln(\rho v A) = \ln(\text{constante})$$

$$\ln\rho + \ln v + \ln A = \ln(\text{constante})$$

derivando vem

$$\frac{dA}{A} + \frac{dv}{v} + \frac{d\rho}{\rho} = 0 \qquad \text{ou}$$

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 = \dot{m} \qquad \text{---------- 8}$$

SEGUNDO DESENVOLVIMENTO

$$d(\rho v A) = \rho_p \cdot V_{(p)} \cdot d\Sigma$$

ρ = massa específica dos gases de combustão
v = velocidade de escoamento dos gases de combustão
A = seção de passagem dos gases de combustão
ρ_p = massa específica do propelente
$V_{(p)}$ = velocidade de combustão, essencialmente, função da pressão e da temperatura inicial do bloco de propelente. Há casos entretanto em que "v" é igualmente função do débito gasoso (caso de combustão erosiva)
$d\Sigma$ = superfície de combustão
escreve-se frequentemente $d\Sigma \sim P dx$ onde P é o perímetro da seção considerada, dx a largura da fatia.

$$\int d(\rho v A) = \int \rho_p \cdot V_{(p)} \cdot d\Sigma$$

$$\rho v A = \rho_p \cdot V_c \cdot S_c = \dot{m}$$

1.3.3 - Equação da Energia

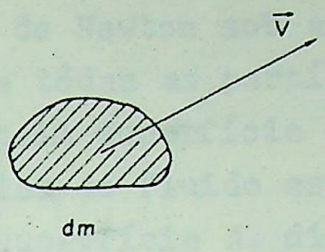
$$C_p(T_o - T) = \frac{v^2}{2} \qquad \text{----- ver equação 7}$$

1.3.4 - Equação da conservação da Quantidade de Movimento.

Define-se como impulso ou quantidade de movimento de uma partícula de fluido de massa dm animada de uma velocida-

de $\vec{V}$ o produto

$$d\vec{\mathcal{I}} = dm\,\vec{V}$$



A segunda lei de Newton estabelece a relação existente entre a resultante $d\vec{F}$ das fôrças externas que agem sôbre a partícula considerada e a variação do seu impulso em função do tempo

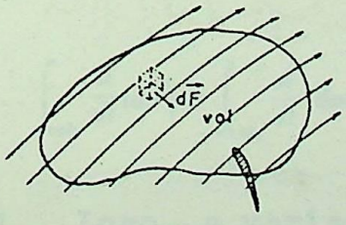
$$\vec{dF} = \frac{d}{dt}(d\vec{\mathcal{I}})$$

Na aplicação da segunda lei de Newton sob a forma apresentada, deve ser lembrado que a derivação relativamente ao tempo deve ser feita num sistema de referência inercial, e que o impulso elementar deve corresponder à mesma massa, isto é, à mesma partícula prèviamente individualizada.

É de interêsse a obtenção da integração da segunda lei de Newton estendida às partículas de fluido contidas internamente a uma dada superfície de contrôle. Tal integração permitirá obter a resultante das fôrças externas que atuam sôbre o fluido contido internamente à superfície de contrôle considerada.

Suponha-se assim a superfície de contrôle esquematizada na figura abaixo.

Ter-se-á então a resultante $\vec{F}$ das fôrças externas que atuam sôbre o fluido



contido no seu interior dada pela integração

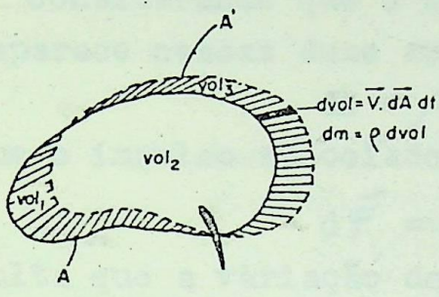
$$\vec{F} = \int_{vol} d\vec{F} = \int_{vol} \frac{d}{dt}(d\vec{\mathcal{I}})$$

ou

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}\int_{vol}(d\vec{\mathcal{I}})$$

A variação da integral do impulso elementar estendida ao volume vol, relativamente ao tempo, deverá ser computada levando em conta as mesmas partículas de fluido nos tempos t e t + dt, conforme exigido pela segunda lei de Newton sob a forma em que foi escrita. No instante t têm-se tôdas as partículas consideradas ocupando o volume limitado pela superfície de contrôle A.

No instante t + dt as partículas de fluido estarão ocupando a região do espaço limitada pela superfície A, distinguindo-se então os volumes indicados na figura abaixo como vol_1, vol_2 e vol_3.



A variação do impulso total correspondente às partículas contidas internamente à superfície de contrôle A deverá portanto corresponder à variação das densidades e velocidades no interior do volume vol_2 somada ao efeito do deslocamento da superfície de contrôle de A para A', que por sua vez equivale a variações de impulso nos volumes vol_1 e vol_3.

A variação de impulso correspondente ao volume vol_2 será dada pela integral de volume

$$\int_{vol_2} \frac{d}{dt}(d\vec{\mathcal{I}}) = \int_{vol_2} \frac{d}{dt}(dm\vec{V}) = \frac{d}{dt}\int_{vol_2}(dm\vec{V})$$

com $dm = \rho\, dvol$. Logo, a variação de ρ e de $\vec{V}$ correspondendo sòmente a uma variação local, tem-se

$$\frac{d}{dt}\int_{vol_2}(dm\,\vec{V}) = \frac{\partial}{\partial t}\int_{vol_2} dm\,\vec{V} = \frac{\partial}{\partial t}\int_{vol_2}\rho\vec{V}\,dvol$$

ou ainda, considerando que no limte $vol_2 \longrightarrow vol$

$$\frac{d}{dt}\int_{vol_2}(dm\,\vec{V}) = \frac{\partial}{\partial t}\int_{vol}\rho\,\vec{V}\,dvol$$

$$\frac{d}{dt}\int_{vol_2}(d\vec{m}\vec{V}) = \frac{\partial}{\partial t}\int_{vol}\rho\ \vec{V}\ dvol$$

Por outro lado, a variação de impulso correspondente aos volumes vol_1 e vol_3 será dada pela integral de volume

$$\int_{vol_1 + vol_3}\frac{d}{dt}(d\vec{F})$$

correspondendo fisicamente ao aparecimento do impulso relativo ao volume vol_3 e ao desaparecimento do impulso relativo ao volume vol_1.

Considerando que o elemento de massa dm que surge ou desaparece nessas duas regiões pode ser expresso como

$$dm = \rho\ \vec{V}\ \vec{dA}\ dt$$

e que o impulso associado a tal elemento de massa será

$$d\vec{F} = (\rho\ \vec{V}\ \vec{dA})\ \vec{V}\ dt$$

resulta que a variação de impulso elementar no intervalo de tempo dt será igual a

$$\frac{d}{dt}(d\vec{F}) = (\rho\ \vec{V}\ \vec{dA})\ \vec{V}$$

e portanto para o volume $vol_1 + vol_3$ ter-se-á a variação global

$$\int_{vol_1+vol_3}\frac{d}{dt}(d\vec{F}) = \int_A(\rho\vec{V}\cdot\vec{dA})\,\vec{V}$$

Resulta então que a resultante $\vec{F}$ das fôrças externas que atuam sôbre o fluido contido no interior da superfície de contrôle A será dada por

$$\vec{F} = \frac{\partial}{\partial t}\int_{vol}\rho\vec{V}\,dvol + \int_A(\rho\vec{V}\cdot\vec{dA})\,\vec{V}$$

A expressão assim encontrada exprime o chamado Teorema do Impulso, de grande importância para o estudo dos fenômenos dinâmicos da Mecânica dos Fluidos.

Nas aplicações do Teorema do Impulso é de grande importância a escolha de superfícies de contrôle adequadas que resultem no mínimo de transformações algébricas durante o desenvolvimento dos cálculos, e na maior facilidade de integração.

Podem ser destacados alguns pontos de importância que devem ser observados na escolha das superfícies de contrôle, de maneira geral. Inicialmente, é de interêsse a escolha da superfície fixa a um sistema de referência com relação ao qual o escoamento seja permanente, pois isso evitará a necessidade de calcular a parcela relativa às variações locais da densidade e da velocidade. Em seguida, òbviamente, nos pontos da superfície de contrôle devem ser bem determinadas as densidades, velocidades e pressões do escoamento considerado. De preferência as superfícies de contrôle devem ou constituir paredes de tubos de corrente ou ser ortogonais às velocidades do escoamento, para facilitar as integrações envolvidas na segunda parcela da expressão do Teorema do Impulso. O trecho da superfície de contrôle que é ortogonal às velocidades deve estar situado numa região do escoamento em que a distribuição de velocidades ou é uniforme ou então é a mais simples possível. Nos casos em que há simetria do escoamento, é conveniente adotar-se também uma superfície de contrôle simétrica, sendo útil em algumas aplicações a consideração do que se passa em um só dos semi-espaços definidos pelo plano de simetria do escoamento.

Ressalta-se de antemão que sòmente a prática na aplicação do Teorema do Impulso a casos diversos é que permitirá a escolha correta da superfície de contrôle mais adequada.

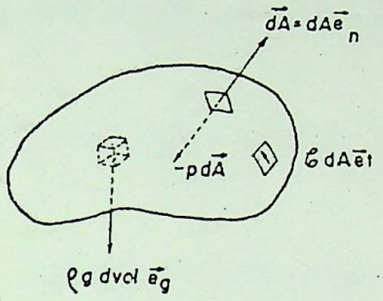
Deve ser observado que a resultante $\vec{F}$ das fôrças externas, calculada pela expressão do Teorema do Impulso, pode ser igualada à soma das fôrças que atuam sôbre o fluido contido internamente à superfície de contrôle, calculadas a partir de outras eventuais considerações.

Assim, lembra -se qua as fôrças que podem atuar sôbre o fluido contido internamente à superfície de contrôle são de duas naturezas - fôrças de contato e fôrças de ação a distância.

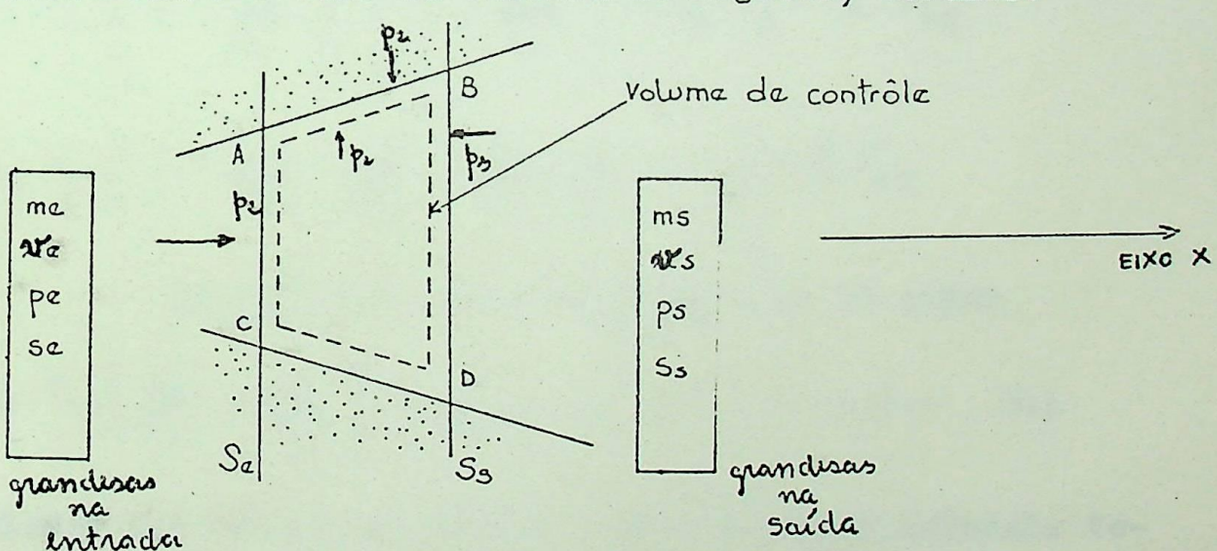
As fôrças de contato correspondem às ações mútuas exercidas diretamente entre ambos os lados (interno e externo) da superfície de contrôle ou entre o fluido em escoamento e os eventuais obstáculos contidos internamente à superfície de contrôle, podendo se dividir em fôrças normais (de pressão) e tangenciais (de - atrito). As fôrças de ação a distância correspondem às ações de campos como o da gravidade, elétricos ou magnéticos.

Não se levando em conta a ação de campos elétricos ou magnéticos, restringindo-se à consideração sòmente das forças de pressão, de atrito e de gravidade, segue-se que a resultante $\vec{F}$ das forças externas que atuam sôbre o fluido contido internamente à superfície de contrôle poderá ser escrita como.

$$\vec{F} = -\int_A p\,dA\,\vec{e}_n + \int_A \tau\,dA\,\vec{e}_t + \int_{vol} \rho g\,dvol\,\vec{e}_g$$



Considerando o caso da tubeira do foguete, teremos:



Consideremos o volume de contrôle ABCD, compreendendo entre duas seções S_e e S_s.

A equação básica é $\frac{d}{dt}(mv) = \sum F_{ex}$, onde "mv" é quantidade de movimento (produto da massa pela velocidade) e F_{ex} a soma das fôrças exteriores que agem sôbre o volume de contrôle.

A massa "m" que entra numa seção durante um tempo "dt" é

$m = \mathring{m}\,dt$, $\mathring{m}$ é o débito mássico, podemos então es-

crever, substituindo m por seu valor,

$$\frac{d}{dt}\left(\dot{m} v\, dt\right) = \sum F_{ex}$$

Tomando o índice e (entrada) e s (saída) teremos

$$\frac{\dot{m}_s v_s\, dt - \dot{m}_e v_e\, dt}{dt} = \sum F_{ex}$$

$$\dot{m}_s v_s - \dot{m}_e v_e = \sum F_{ex}$$

$$\dot{m}_s = \dot{m}_e \left[1 + \frac{d\dot{m}}{\dot{m}_e}\right] = \dot{m}_e + \frac{\partial \dot{m}}{\partial x}\, dx$$

$$v_s = v_e \left[1 + \frac{dv}{v_e}\right] = v_e + \frac{\partial v}{\partial x}\, dx$$

Substituindo vem

$$\dot{m}_e \left[1 + \frac{d\dot{m}}{\dot{m}_e}\right] v_e \left[1 + \frac{dv}{v_e}\right] - \dot{m}_e v_e = \sum F_{ex}$$

$$\dot{m}_e v_e \left[1 + \frac{d\dot{m}}{\dot{m}_e}\right] \left[1 + \frac{dv}{v_e}\right] - \dot{m}_e v_e = \sum F_{ex}$$

$$\dot{m}_e v_e \left[1 + \frac{dv}{v_e} + \frac{d\dot{m}}{\dot{m}_e} + \frac{d\dot{m}}{\dot{m}_e}\frac{dv}{v_e} - 1\right] = \sum F_{ex}$$

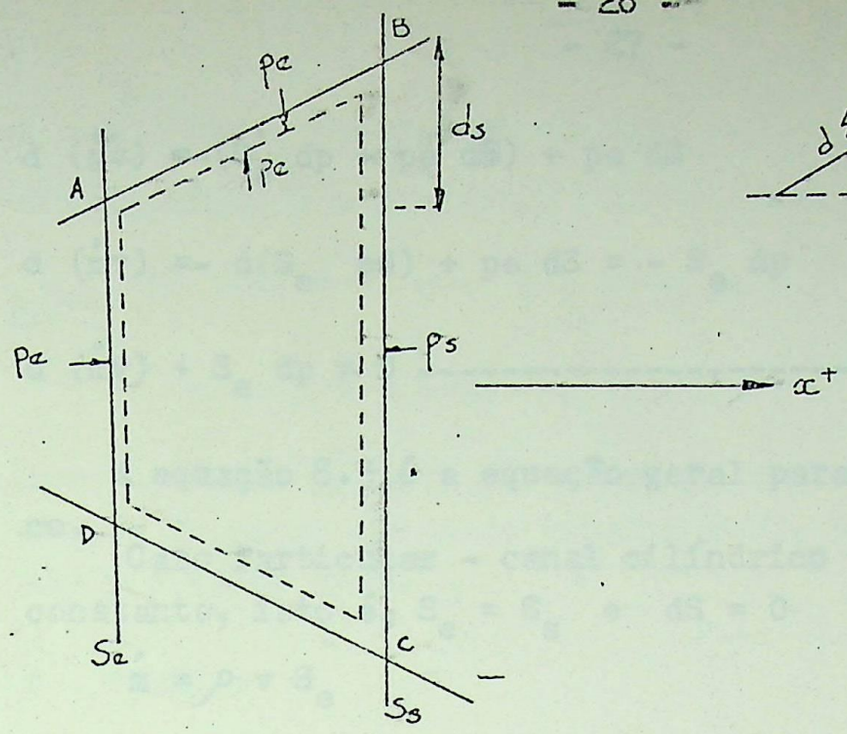
Trabalhando com diferenciais de 1ª ordem

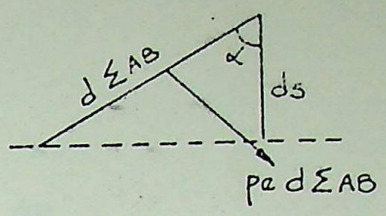
$$\dot{m}_e v_e \left(\frac{d\dot{m}}{\dot{m}_e} + \frac{dv}{v_e}\right) = \sum F_{ex} \qquad \text{8.1}$$

Balanço das fôrças exteriores sôbre as faces laterais temos: $p_2 S_2 - p_1 S_1$

Sôbre as faces oblíquas AB e CD, como a fatia é fina, considera-se que a pressão no interior do volume de contrôle e praticamente igual à "p_e"; para que as faces AB e CD estejam em equilíbrio, é preciso que haja p_e no exterior do volume de contrôle, e a fôrça exterior que resulta é

$$p_2\, d\Sigma_{AB}$$





mas como nos interessa a projeção sôbre o eixo dos "x", teremos

$$p_e \, d\Sigma_{AB} \cos\alpha$$

mas $d\Sigma_{AB} \cos\alpha = dS = S_s - S_e$

E assim teremos um balanço total das fôrças exteriores projetadas sôbre o eixo dos "x"

$$p_e S_e - p_s S_s + p_e \, dS \quad \text{.....} \quad 8.2$$

A combinação das equações 8.1 e 8.2 nos dá

$$\dot{m}_e \, v_e \left(\frac{d\dot{m}}{\dot{m}_e} + \frac{dv}{v_e} \right) = p_e \, S_e - p_s \, S_s + p_e \, dS$$

$$ps = pe \left| 1 + \frac{dp}{pe} \right| = pe + \frac{\partial p}{\partial x} \, dx$$

$$S_s = S_e \left| 1 + \frac{ds}{S_e} \right| = S_e + \frac{\partial S}{\partial x} \, dx$$

substituindo vem

$$\dot{m}_e \, v_e \left(\frac{d\dot{m}}{\dot{m}_e} + \frac{dv}{v_e} \right) = pe \, S_e - pe \left[1 + \frac{dp}{pe} \right] S_e \left[1 + \frac{dS}{S_e} \right] + pe \, dS$$

$$\dot{m}_e \, v_e \left(\frac{d\dot{m}}{\dot{m}_e} + \frac{dv}{v_e} \right) = -pe \, S_e \left(\frac{dp}{pe} + \frac{dS}{S_e} \right) + pe \, dS$$

$$v_e \, d\dot{m} + \dot{m}_e \, dv = -pe \, S_e \left(\frac{dp}{pe} + \frac{dS}{S_e} \right) + pe \, dS$$

$d(\dot{m}v) = -(S_e\, dp + pe\, dS) + pe\, dS$

$d(\dot{m}v) = -\, d(S_e\ pe) + pe\, dS = -\, S_e\, dp$

$d(\dot{m}v) + S_e\, dp = 0$ ---------- 8.3

A equação 8.3 é a equação geral para um canal não cilíndrico.

Caso Particular - canal cilíndrico onde a superfície é constante, isto é, $S_e = S_s$ e $dS = 0$

$\dot{m} = \rho\, v\, S_e$

$d(\rho\, v\, S_e\ v) + S_e\, dp = 0$

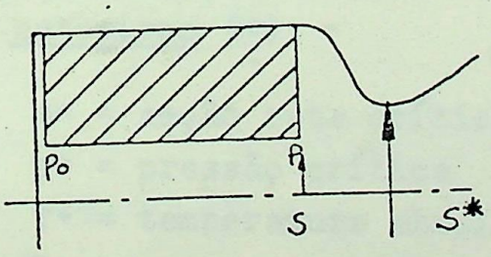
$d(\rho v^2 S_e) + S_e\, dp = 0$

e eliminando S_e, que é uma constante, $dp + d(\rho v^2) = 0 = d$ (constante). $p + \rho v^2 =$ constante (canal cilíndrico)

A equação acima não é aplicável senão para um canal cilíndrico. Ela permite estimar grosseiramente os esforços sôbre um bloco, calculando a diferença de pressão entre a parte anterior e a posterior do propelente. Com efeito:

do lado do iniciador (ALLUMEUR) $v = 0$ logo po = pressão devida à iniciação

do lado da tubeira $v \neq 0$ $p + \rho v^2 = po$



de onde tira-se $\rho v^2 = p_o - p = \Delta p$

mas pela equação de estado $\rho = \frac{p}{RT}$, substituindo temos

$\frac{p}{RT} \cdot v^2 = \Delta p$

cálculos posteriores mostram a importância e o interesse do número de Mach $M = v/c$ com

$C = \sqrt{\gamma RT}$ = velocidade do som

Substituindo $v = M.c = M\sqrt{\gamma RT}$ vem

$$\frac{p}{RT} \cdot M^2 \gamma RT = \Delta p = \gamma p M^2 = po - p$$

$$po = p + \gamma p M^2 = p (1 + \gamma M^2)$$

como o número de Mach não é função senão da relação entre as seções do canal (S) e da tubeira (S*), pode-se calcular a pressão p e então Δ p.

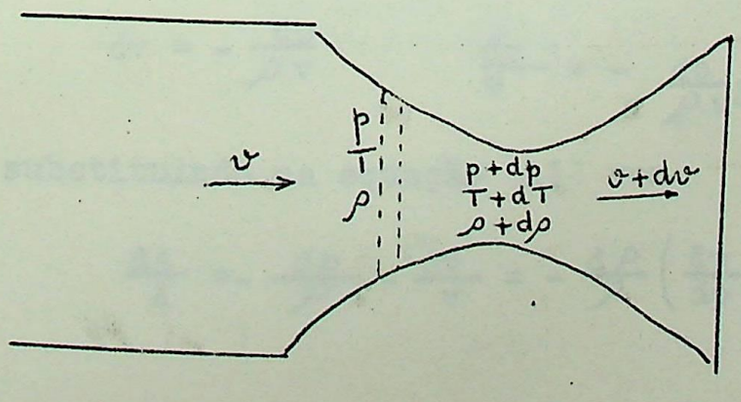
2 - TUBEIRA

2.1 - Uma tubeira é um dispositivo que permite a um fluido expandir-se desde alta até baixa pressão.

O gás a uma velocidade subsônica entra na parte convergente da tubeira, cuja seção reta vai estreitando-se progressivamente aumentando sua velocidade até chegar na zona mais estreita onde se alcança a velocidade sônica nas condições da experiencia; a seguir a tubeira sofre um alargamento em sua parte divergente e nele o fluido experimenta um progressivo aumento de velocidade com queda correspondente de pressão até que, se o comprimento da massa for adequado, se alcança a pressão atmosférica ao fim dela. Uma tubeira assim organizada se chama totalmente expandida.

As condições que reinam na seção mais estreita da tubeira (garganta), se chamam condições críticas e se designa com um asterisco (*).

A* = seção reta crítica
p* = pressão crítica
T* = temperatura absoluta crítica
ρ* = massa específica crítica do gás



2.2 - Para escoamento adiabático reversível, unidimensional, em regime permanente, através de uma tubeira, temos:

Fazendo uso da equação 6

$$dh + d\left(\frac{v^2}{2}\right) = 0$$

$$dh + v\,dv = 0 \qquad \text{---------- 9}$$

$$ds = \left(\frac{\delta q_{rev}}{T}\right) = 0$$

seja $H = f(S,p)$ teremos

$$dh = \frac{\partial h}{\partial s}\,ds + \frac{\partial h}{\partial p}\,dp$$

$$dh = T\,ds + \bar{v}\,dp$$

pois $\frac{\partial h}{\partial s} = T \qquad (\partial h = T\,ds = \delta q_{rev})$

e $\frac{\partial h}{\partial p} = \bar{v}, \qquad (\partial h = \bar{v}\,dp \text{ para } \delta q = 0)$

$$dh = T\,ds + \frac{dp}{\rho}$$

$$T\,ds = dh - \frac{dp}{\rho} = 0 \qquad \text{---------- 10}$$

Equação da continuidade

$$\rho A v = \dot{m} = \text{constante}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dv}{v} = 0 \qquad \text{---------- 11}$$

combinando as esquações 9 e 10 temos:

$$dh + v\,dv = dh - \frac{dp}{\rho}$$

$$\frac{dp}{\rho} = -v\,dv$$

$$dv = -\frac{dp}{\rho v} \qquad \frac{dv}{v} = -\frac{dp}{\rho v^2}$$

substituindo na equação 11 vem

$$\frac{dA}{A} = -\frac{d\rho}{\rho} - \frac{dv}{v} = -\frac{d\rho}{\rho}\left(\frac{dp}{dp}\right) + \frac{dp}{\rho v^2}$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{-dp}{\rho}\left(\frac{d\rho}{dp} - \frac{1}{v2}\right) = \frac{dp}{\rho}\left(\frac{1}{v2} - \frac{d\rho}{dp}\right)$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{dp}{\rho}\left(\frac{1}{v^2} - \frac{1}{\frac{dp}{d\rho}}\right)$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{dp}{\rho}\left(\frac{1}{v2} - \frac{1}{\frac{v2}{M2}}\right) = \frac{dp}{\rho}\left(\frac{1}{v2} - \frac{M^2}{v2}\right) =$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{dp}{\rho}\left[\frac{1}{v2}(1 - M2)\right]$$

Para escoamento isentrópico

$$\frac{dp}{d\rho} = c^2 = \frac{v^2}{M2}$$

c = velocidade do som

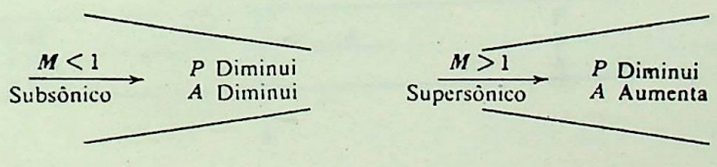
$M = \frac{v}{c}$ número de Mach ou relação entre velocidade do gás e a do som.

2.3 - BOCAL e DIFUSOR

para um bocal $dp < 0$

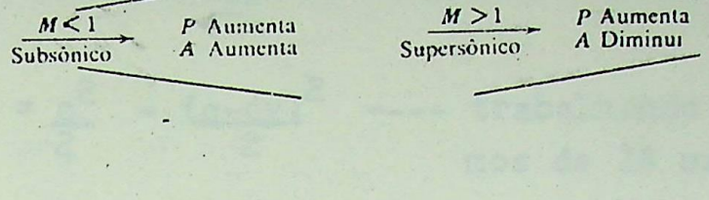
para um difusor $dp > 0$

$$\frac{dA}{A} = \frac{dp}{\rho}\left(\frac{1}{v2} - \frac{1}{\frac{v2}{M2}}\right) = (1 - M^2)\cdot\frac{dp}{\rho v^2}$$



Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

Para um bocal $dP < 0$. Portanto,
para um bocal subsônico $M < 1$, $dA < 0$ e o bocal é convergente.
para um bocal supersônico $M > 1$, $dA > 0$ e o bocal é divergente.



Para um difusor $dP > 0$. Portanto,
para um difusor subsônico $M < 1$, $dA > 0$ e o difusor é divergente.
para um difusor supersônico $M > 1$, $dA < 0$ e o difusor é convergente.

Quando M = 1, d A = 0, siginifica que a velocidade sônica sòmente pode ser encontrada na garganta da tubeira, e neste caso especial, temos as propriedades críticas.

2.4 - A velocidade na seção crítica é função da temperatura que ali existe T* e pode-se chegar a :

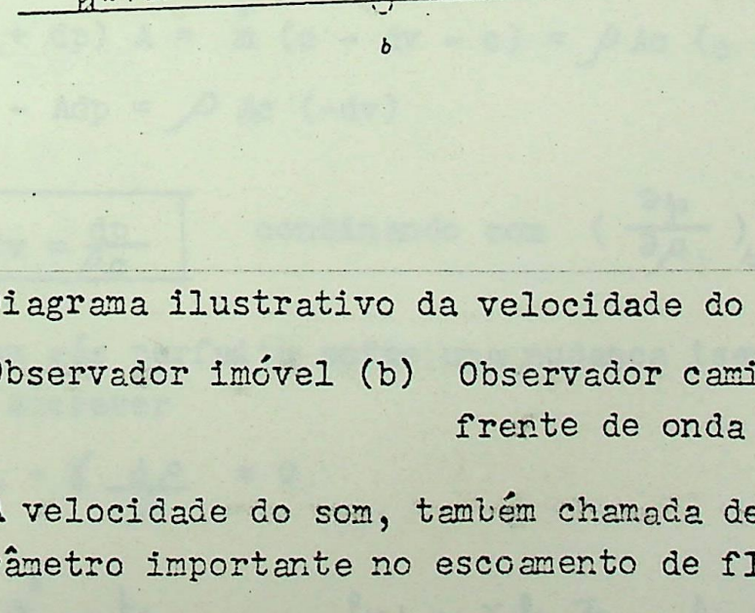


Diagrama ilustrativo da velocidade do som (a)

Observador imóvel (b) Observador caminhando com a frente de onda

A velocidade do som, também chamada de velocidade sônica é um parâmetro importante no escoamento de fluidos compressíveis.

$h + \frac{c^2}{2} = (h + dh) + \frac{(c-dv)^2}{2}$ ------ da equação 6

$h + dh - h = \frac{c^2}{2} - \frac{(c-dv)^2}{2}$ ---- trabalhando com infinitíssimos de 1ª ordem.

$dh - cdv = 0$

Da equação da continuidade, podemos escrever

$\rho cA = (\rho + d\rho)\, A\, (c-dv)$ ------ trabalhando com infinitíssimos de 1ª ordem

$\rho cA = \rho Ac - \rho Adv + cAd\rho - Ad\rho\, dv$

$cA\, d\rho = \rho A\, dv$ ou $\boxed{c\, d\rho = \rho\, dv}$

e consideremos também a relação

$$Tds = dh - \frac{dp}{\rho} \quad \text{(pag 201 do Van Wylen)}$$

se o processo é isentrópico $ds = 0$, $dh - \frac{dp}{\rho} = 0$

$$\left.\begin{array}{l} dh - c\, dv = 0 \\ dh - \frac{dp}{\rho} = 0 \end{array}\right\} \quad \frac{dp}{\rho} = c\, dv$$

mas $c\, d\rho = \rho\, dv$ $\quad \frac{dp}{\rho}\ \frac{\rho}{d\rho} = c\, dv\ \frac{\rho}{d\rho} = \frac{c \cdot \rho\, dv}{d\rho}$

$\frac{dp}{d\rho} = c^2$ ou melhor escrevendo $\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s = c^2$

introduzindo a equação da quantidade de movimento

$pA - (p + dp)\, A = \dot{m}\, (c - dv - c) = \rho Ac\, (c - dv - c)$

$pA - pA - Adp = \rho\, Ac\, (-dv)$

$\boxed{dv = \frac{dp}{\rho c}}$ combinando com $\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s = c^2$

quando um gás perfeito sofre uma mudança isentrópica de estado, podemos escrever

$$\frac{dp}{p} - \gamma \frac{d\rho}{\rho} = 0$$

$p \bar{v}^{\gamma} = cte$ $\qquad \ln p + \gamma \ln \bar{v} = \ln cte$

$$\frac{dp}{p} + \gamma \frac{dv}{v} = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{dp}{p} - \gamma \frac{d\rho}{\rho} = 0$$

ou $\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_n = \frac{\gamma p}{\rho}$

como temos $\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_n = \frac{\gamma p}{\rho}$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_n = c^2$$

chegamos a $c^2 = \frac{\gamma p}{\rho}$

como a equação de estado prescreve $p = \rho RT$

$$c^2 = \frac{\gamma}{\rho} \cdot \rho RT = \gamma RT$$

$$\boxed{c = \sqrt{\gamma RT}}$$

$v^* = \sqrt{\gamma RT}$ * , sendo γ a relação de calores específicos a pressão e volume constantes e R a constante específica do gás, obtida dividindo-se a constante universal molar dos gases R, pelo peso molecular do fluido gasoso.

$$R = \frac{\overline{R}}{\text{MOL do Fluido gasoso}}$$

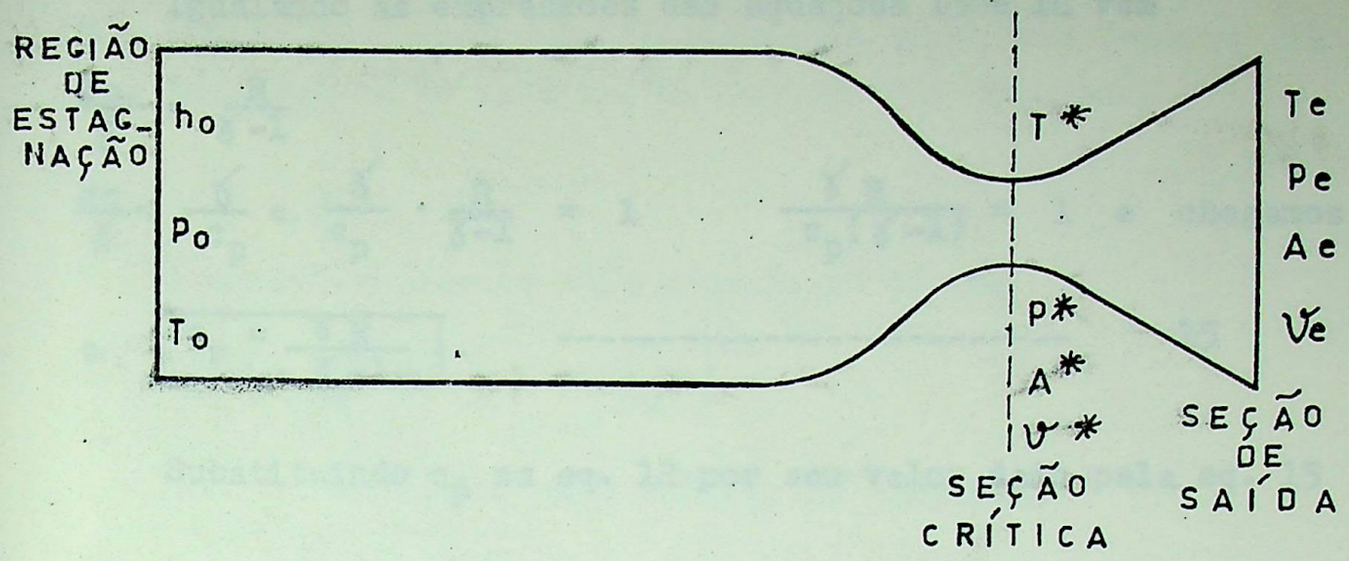
$$\gamma = \frac{cp}{cv}$$

Isto posto, vamos estudar a figura a seguir:

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$$

$$\partial h = c_p (\partial T)_p$$

$dh = -d\left(\frac{v^2}{2}\right)$ ---------- da equação 6



integrando entre T = To, v = 0 e

T = T v = v , admitindo o calor específico constante na faixa de temperatura considerada temos

$$dh = c_p\, dT = -d\left(\frac{v^2}{2}\right)$$

$$c_p \int_{To}^{T} dT = -\int_{o}^{v} d\left(\frac{v^2}{2}\right)$$

$$c_p\,(T - To) = -\left[\frac{v^2}{2}\right]_o^v = -\frac{v^2}{2}$$

$$c_p\,(T_o - T) = \frac{v^2}{2}$$

$$c_p\, T_o \left[1 - \frac{T}{T_o}\right] = \frac{v^2}{2} \quad ; \quad v^2 = 2\, c_p\, T_o \left[1 - \frac{T}{T_o}\right] \text{----- 12}$$

mas $c_p - c_v = R$

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \quad ; \quad \frac{cp}{c_v} = \gamma$$

$$c_v = \frac{cp}{\gamma} \text{ ---------- 13}$$

substituindo vem

$$\gamma c_v - c_v = R = c_v\,(\gamma - 1) \qquad \boxed{c_v = \frac{R}{\gamma - 1}} \text{ ----- 14}$$

Igualando as expressões das equações 13 e 14 vem

$$\frac{cp}{\gamma} = \frac{R}{\gamma - 1}$$

$$\frac{cp}{\gamma} \cdot \frac{\gamma}{c_p} = \frac{\gamma}{c_p} \cdot \frac{R}{\gamma - 1} = 1 \qquad \frac{\gamma R}{c_p(\gamma - 1)} = 1 \text{ e chegamos}$$

a $\boxed{c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}}$. ---------- 15

Substituindo c_p na eq. 12 por seu valor dado pela eq. 15

$$v^2 = 2 \times \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \times T_o \left[1 - \frac{T}{T_o} \right] = \frac{2 \gamma R T_o}{\gamma - 1} \left[1 - \frac{T}{T_o} \right] \text{ --- } 16$$

Temos a expressão da velocidade na garganta (seção crítica), dada por $v^* = \sqrt{\gamma RT^*}$ e temos a expressão geral da velocidade dada pela equação 16, portanto

$$(v^*)^2 = \frac{2 \gamma RT_o}{\gamma - 1} \left[1 - \frac{T^*}{T_o} \right] = \gamma RT^* \text{ ------ } 17$$

$$\frac{2 \gamma RT_o}{\gamma - 1} - \frac{2 \gamma RT^*}{\gamma - 1} = \gamma RT^*$$

$$\frac{2 \gamma RT_o}{\gamma - 1} = \gamma RT^* \left[1 + \frac{2}{\gamma - 1} \right] = \gamma RT^* \left[\frac{\gamma - 1 + 2}{\gamma - 1} \right]$$

$$\frac{2 \gamma RT_o}{\gamma - 1} = \gamma RT^* \left[\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right]$$

$$T_o = \frac{T^*}{2} (\gamma + 1)$$

$$\boxed{T^* = \frac{2 T_o}{\gamma + 1}} \text{ ---------- } 18$$

Mediante estas equações podemos encontrar a relação ou função de temperatura, em qualquer seção da tubeira, entre a temperatura do fluxo em movimento e a temperatura de estagnação.

3 - Função de Temperatura é a relação entre uma temperatura e a temperatura de estagnação, normalmente designada por f_T

$$f_T = \frac{T}{To}$$

vimos anteriormente pela equação nº 17 que

$$(v^*)^2 = \frac{2\gamma RTo}{\gamma - 1}\left[1 - \frac{T^*}{To}\right]$$

$(v^*)^2 = \gamma RT^*$ e pela equação 18 chegamos a:

$$\boxed{f_{T^*} = \frac{T^*}{T_o} = \frac{2}{\gamma + 1}} \quad \text{---------- 19}$$

substituindo o valor de $\frac{T^*}{To}$ dado pela equação nº 19 na equação nº 17 temos:

$$(v^*)^2 = \frac{2\gamma RTo}{\gamma - 1}\left[1 - \frac{2}{\gamma + 1}\right] = \frac{2\gamma RTo}{\gamma - 1}\left[\frac{\gamma + 1 - 2}{\gamma + 1}\right]$$

$$(v^*)^2 = \frac{2\gamma RTo}{\gamma - 1}\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right) = \frac{2\gamma RTo}{\gamma + 1}$$

$$v^* = \sqrt{\frac{2\gamma RTo}{\gamma + 1}} \quad \text{---------- 20}$$

A equação nº 20 estabelece a velocidade crítica (na garganta) em função da relação entre os calores específicos γ, e da temperatura de estagnação To.

Efetuando o quociente da equação nº 16 e 20 teremos:

$$\frac{v^2}{(v^*)^2} = \frac{\frac{2\gamma RTo}{\gamma - 1}\left[1 - \frac{T}{To}\right]}{\frac{2\gamma RTo}{\gamma + 1}}$$

e denominando esta relação por L^2, sendo $L = v/v^*$

O número "de LAVAL", relação entre a velocidade em uma seção dada e o valor da velocidade na seção crítica teremos:

$$L^2 = \frac{v^2}{(v^*)^2} = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}\left(1 - \frac{T}{To}\right)$$

$$1 - \frac{T}{To} = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right) L^2$$

mas $f_T = \frac{T}{To}$ logo

$$1 - f_T = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right) L^2$$

$$\boxed{f_T = 1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right) L^2} \quad \text{---------- 21}$$

A equação nº 21 nos dá a relação de qualquer temperatura com a temperatura de estagnação, em junção do número "de LAVAL".

Na seção crítica, teremos $L^* = 1$ e $f_T^* = 1 - (\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}).1$

$f_{T^*} = \frac{T}{To} = \frac{2}{\gamma + 1}$ conforme consta na equação nº 19

4 - <u>Função de pressão</u> é a relação entre uma pressão e a pressão de estagnação, normalmente designada por f_p

$$\boxed{f_p = \frac{p}{p_o}}$$

Das relações isoentrópicas de um gás perfeito, temos:

$$\frac{T}{T_o} = \left(\frac{p}{p_o}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$$

$$\frac{p}{p_o} = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

mas $\frac{T}{T_o} = 1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right) L^2$ (equação nº 21)

então $f_p = \frac{p}{po} = \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right) L^2\right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$ --------- 22

Esta expressão relaciona a pressão estática numa seção qualquer com a pressão de estagnação, em função do número "de LAVAL".

Na seção crítica, $L^* = 1$ e

$$f_{p^*} = \frac{p^*}{p_o} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \text{---------- 23}$$

5 - Função de densidade é a relação entre a massa específica de um gás numa seção qualquer e a massa específica do gás na estagnação, normalmente designada por f_ρ

$$\boxed{f_\rho = \frac{\rho}{\rho_o}}$$

Da equação adiabática de um gás perfeito tiramos

$$\frac{\rho}{\rho_o} = \left(\frac{T}{T_o} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

$$f_\rho = \frac{\rho}{\rho_o} = \left(\frac{T}{T_o} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = \left[1 - \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right) L^2 \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad \text{--- 24}$$

e para a seção crítica $L^* = 1$

$$\boxed{f_{\rho^*} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}} \quad \text{---------- 25}$$

EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

Vimos anteriormente que a equação do fluxo mássico é :

$$\dot{m} = \rho A v$$

$$\dot{m} = \frac{\rho_o}{\rho_o} \times \frac{v^*}{v^*} \times \rho A v = A \rho_o v^* \times \frac{\rho}{\rho_o} \times \frac{v}{v^*}$$

$$\boxed{\dot{m} = A \rho_o v^* \cdot f_\rho \cdot L} \quad \text{---------- 26}$$

6 - Função de continuidade

Ao produto da função de densidade f_ρ pelo número "de LAVAL" chamaremos função de continuidade f_c

$$\boxed{f_c = f_\rho \cdot L} \quad \text{---------- } \boxed{26.1}$$

A equação dos gases perfeitos nos fornece:

$$pV = n\bar{R}T = \frac{m}{Mol} \cdot \bar{R}T = mRT$$

$\bar{R}$ = constante molar

R = constante específica

$$p = \frac{m}{V} \cdot RT = \rho RT$$

nas condições de estagnação teremos:

$$\rho_o = \frac{po}{RTo}$$

porem $(v^*)^2 = \gamma RT^*$

$$\rho_o = \frac{po}{RTo} \times \frac{\gamma T^*}{\gamma T^*} = \frac{\gamma po}{(v^*)^2} \cdot \frac{T^*}{To} = \frac{\gamma po}{(v^*)^2} \cdot \frac{2}{(\gamma+1)}$$

Combinando a equação acima com a equação nº 26 e 26.1 obteremos:

$$\dot{m} = A \left[\frac{\gamma po}{(v^*)^2} \cdot \frac{2}{(\gamma+1)} \right] \cdot v^* \cdot f_c$$

$$\dot{m} = \frac{2\gamma}{(\gamma+1)} \quad \frac{A\, po\, f_c}{v^*} \qquad \text{----------} \qquad 27$$

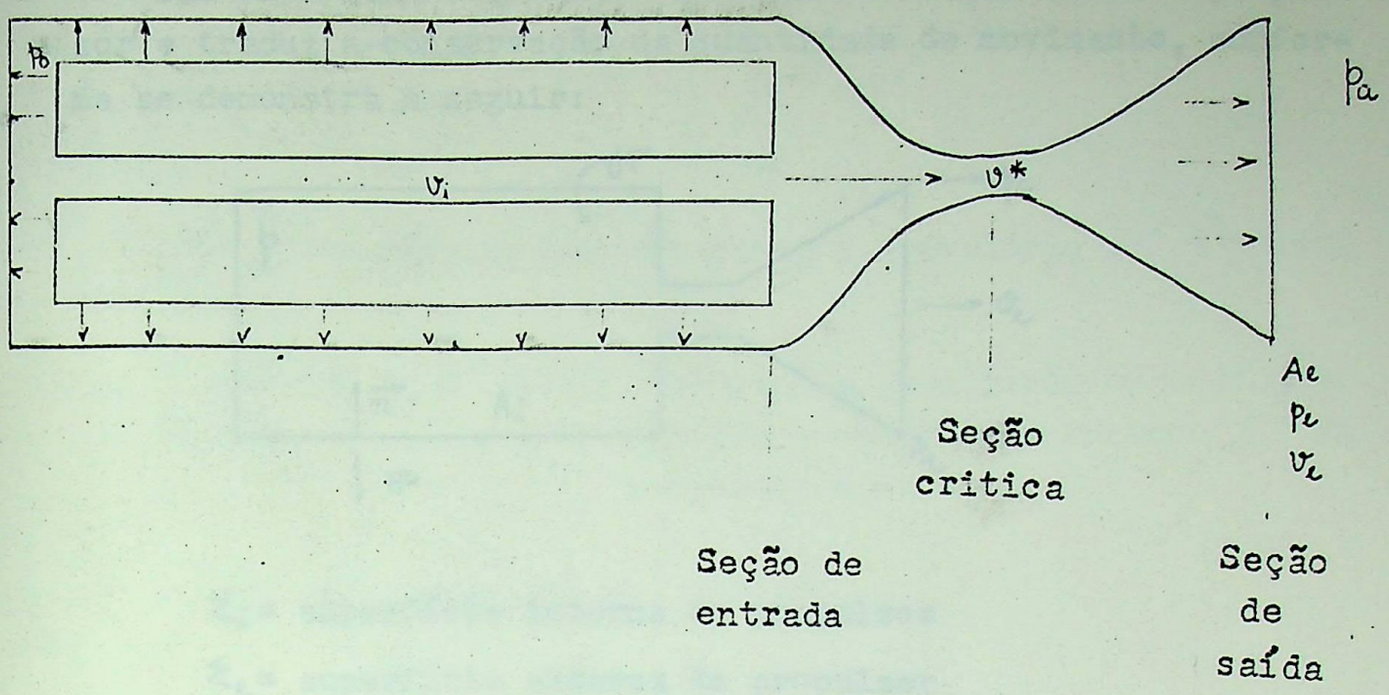
como $f_p = \frac{p}{po}$ $\qquad$ $po = \frac{p}{f_p}$

substituindo em 27 vem

$$\dot{m} = \frac{2\gamma}{(\gamma+1)} \cdot \frac{A\, p\, f_c}{v^*\, f_p} \qquad \text{----------} \qquad 28$$

Para um sistema dado; γ, p_o, $\dot{m}$ e v^* são constantes e portanto, para 2 seções quaisquer podemos escrever

$$f_{ce} \cdot Ae = f_{ci} \cdot Ai \qquad \text{----------} \qquad 29$$



7 - Empuxo de um motor de foguete

Considerando que o motor do foguete estivesse hermeticamente fechado, as fôrças que se originariam em seu interior, produzidas pela pressão, dariam uma resultante e o engenho entraria em movimento.

Não obstante a câmara de combustão se abrir ao exterior através da tubeira, e como consequência da combustão, estaria submetido à resultante das fôrças interiores $p_e\ A_e$, designando por p_e a pressão estática que reina no plano de saída; por efeito da pressão exterior nesta seção, que neste caso será a própria pressão atmosférica p_a, originar-se-á uma fôrça resultante $p_a\ A_e$, no sentido contrário à anterior.

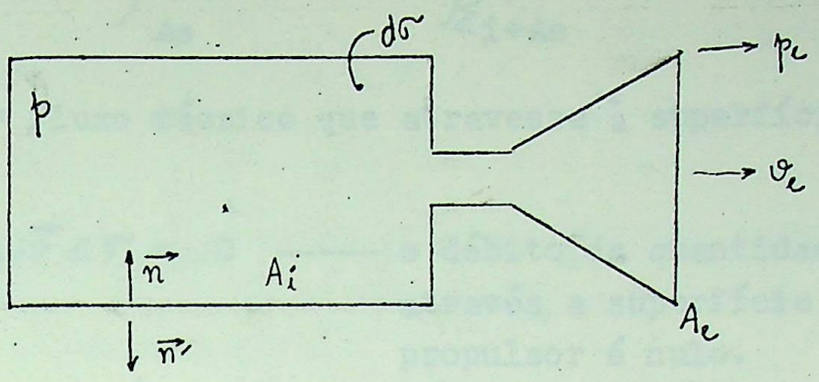
Sendo $\dot{m}$ o débito mássico ejetado pela tubeira e v_e a velocidade de ejeção dos produtos de combustão, teremos, baseado no teorema da quantidade de movimento da fluidodinâmica:

$$F = \dot{m}\ v_e + A_e\ (p_e - p_a) \qquad \text{---------- 30}$$

F = fôrça comunicada ao engenho

$$F = (\dot{m}\ v_e + p_e\ A_e) - p_a\ A_e$$

Tal expressão resulta do balanço de fôrças sôbre o propulsor e traduz a conservação da quantidade de movimento, conforme se demonstra a seguir:



Σ_i = superfície interna do propulsor

Σ_e = superfície externa do propulsor

p = pressão interior (local)

$\vec{n}$ = vetor unitário normal à superfície orientada para o interior do corpo

$d\sigma$ = superfície elementar

$\vec{n'} = -\vec{n}$

$$\vec{R} = \int_{\Sigma} p \cdot \vec{n}\, d\sigma = \int_{\Sigma_i} p\,\vec{n}\, d\sigma + \int_{\Sigma_e} p\,\vec{n}\, d\sigma$$

$\vec{R} = \vec{F} + \vec{T}$ $\qquad$ $\vec{T}$ = fôrças de atrito (contrárias)

$$\vec{T} = \int_{\Sigma_e} (p - p_a)\,\vec{n}\, d\sigma \qquad \vec{F} = \vec{R} - \vec{T}$$

$$\vec{F} = \int_{\Sigma_i} p\,\vec{n}\, d\sigma + \int_{\Sigma_e} p\,\vec{n}\, d\sigma - \int_{\Sigma_e} p\,\vec{n}\, d\sigma + \int_{\Sigma_e} p_a\,\vec{n}\, d\sigma$$

$$\vec{F} = \int_{\Sigma_i} p\,\vec{n}\, d\sigma + \int_{\Sigma_e} p_a\,\vec{n}\, d\sigma$$

A aplicação do teorema de Euler (A resultante das fôrças exercidas sôbre um fluido é igual ao débito da quantidade de

movimento).

$$\int_{\Sigma_i} - p\,\vec{n}\,d\sigma + \int_{Ae} - p\,\vec{n}\,d\sigma = \int_{\Sigma_{i+Ae}} \mu\,\vec{v}\,d\sigma$$

μ = fluxo mássico que atravessa à superfície $d\sigma$ à velocidade $\vec{v}$

mas $\int_{\Sigma_i} \mu\,\vec{v}\,d\sigma = \dot{0}$ ----- o débito da quantidade de movimento através a superfície interna Σi do propulsor é nulo.

$$\int_{\Sigma_i} - p\,\vec{n}\,d\sigma + \int_{Ae} - p\,\vec{n}\,d\sigma = \int_{Ae} \mu\,\vec{v}\,d\sigma$$

$$\vec{F} = - \int_{Ae} \mu\,\vec{v}\,d\sigma + \int_{Ae} - p\,\vec{n}\,d\sigma + \int_{\Sigma_e} p_a\,\vec{n}\,d\sigma$$

O volume de contrôle ($\Sigma_e + A_e$) na pressão p_a conduz

à $\int_{\Sigma_e + A_e} p_a\,\vec{n}\,d\sigma = 0$, logo $\int_{\Sigma_e} p_a\,\vec{n}\,d\sigma = \int_{A_e} p_a\,\vec{n}\,d\sigma = - \int_{A_e} p_a(-\vec{n})d\sigma$

$$\vec{F} = - \int_{A_e} \mu\,\vec{v}\,d\sigma - \int_{A_e} p\,\vec{n}\,d\sigma - \int_{A_e} p_a\,(-\vec{n})\,d\sigma$$

$$\vec{F} = - \int_{A_e} \mu\,\vec{v}\,d\sigma + \int_{A_e} (p_a - p)\,\vec{n}\,d\sigma$$

a normal $\vec{n}$ na seção A_e é na direção do escoamento.

$$\dot{m} = \int_{A_e} \mu\,d\sigma$$

Se se escolhe para A_e uma seção de iso-pressão (p_e é igual à p_a em tôda a seção) então teremos uma tubeira adaptada.

$$\vec{F} = -\int_{A_e} \mu \vec{v}\, d\sigma$$

para $\vec{v}_e$ de direção constante

$$\vec{F} = -\dot{m}\,\vec{v}_e$$

A condição de tubeira adaptada ($p_e = p_a$) é bastante restritiva e não é facil de se conseguir.

De uma maneira geral

$$\vec{F} = -\int \mu \vec{v}_e\, d\sigma + \underbrace{\int_{A_e} (p_a - p_e)\,\vec{n}\, d\sigma}_{A_e\,(p_a - p_e).\,\vec{n}}$$

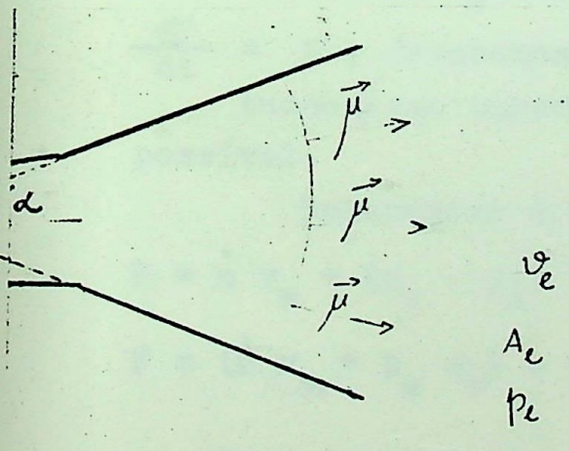
e no caso que todas as $\vec{v}_e$ são colineares

$$\vec{F} = -\left[\dot{m}\, v_e + A_e\,(p_e - p_a)\right]\vec{n}$$

Mas no caso geral

$$\vec{v}_e = v_e\,.\vec{\mu}$$

$$\vec{F} = -v_e \underbrace{\int_{A_e} \mu \vec{u}\, d\sigma}_{\lambda \dot{m}} + A_e\,(p_a - p_e)\,\vec{n}$$



sendo λ um parâmetro ligado à divergência da tubeira e igual a $\lambda = \frac{1 + \cos\alpha}{2}$ ---------- 31

No caso da repartição totalmente simétrica (ejeção radial dos gases de combustão)

$$F = \lambda \dot{m} v_e + A_e (p_e - p_a) \quad \text{---------- 32}$$

Demonstra-se que, em igualdade de condições, a fôrça máxima comunicada ao engenho ocorre quando a expansão se faz até a pressão ambiente, isto é $P_e = P_a$.

Diz-se então que a tubeira está adaptada e esta é a condição normal de projeto. Portanto, a expressão final (eq 32) reduz-se a

$$F = \lambda \dot{m} v_e$$

Procura-se, tanto para mísseis como para engenhos balísticos uma fôrça de propulsão constante, ao longo da ação propulsiva. Como a vazão mássica ($\dot{m}$) pode ser expressão por

$\dot{m}$ = massa específica X volume queimado na unidade de tempo $\dot{m} = \rho_p \cdot S_c \cdot V_c$ ---------- 32.1

onde
- ρp = massa específica do propelente
- S_c = superfície de combustão do propelente (emissão)
- V_c = velocidade de combustão do propelente

e considerando v_e constante verificamos que para se obter uma $\frac{dF}{dt} = 0$, deveremos projetar um grão, procurando manter as sucessivas superfícies de queima tão constantes quanto possível.

Retornando à equação nº 30 temos:

$$F = \dot{m} v_e + (p_e - p_a) A_e$$

$$F = (\dot{m} v_e + p_e A_e) - p_a A_e$$

Vamos substituir a parcela entre parênteses do segundo membro da igualdade:

$$L_e = \frac{v_e}{v^*} \qquad \text{(número "de LAVAL")}$$

$$\dot{m} = \frac{2\gamma}{(\gamma+1)} \frac{A_e p_e f c_e}{v^* \cdot f p_e} \qquad \text{(da equação nº 28)}$$

$$A_e\, p_e = \dot{m}\,\left(\frac{\gamma+1}{2\gamma}\right)\frac{v^*\, fp_e}{fc_e}$$

$$\dot{m}\, v_e + p_e\, A_e = \dot{m}\, L_e\, v^* + \frac{\dot{m} v^*}{fc_e}\cdot fp_e\,\left(\frac{\gamma+1}{2\gamma}\right)$$

$$\dot{m}\, v_e + p_e\, A_e = \dot{m}\, v^*\left[L_e + \frac{fp_e}{fc_e}\left(\frac{\gamma+1}{2\gamma}\right)\right] \qquad \text{-------- 32.2}$$

mas $fp_e = \left[1 - \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right) L_e^2\right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ -------(da equação 22)

$$fc_e = fp_e \cdot L_e = \left[1 - \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right) L_e^2\right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \cdot L_e \quad \text{(da equação 24)}$$

Divindo então f_{p_e} por f_{c_e} obteremos

$$\frac{fp_e}{fc_e} = \frac{\left[1 - \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right) L_e^2\right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}{\left[1 - \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right) L_e^2\right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \cdot L_e} = \frac{1}{L_e}\cdot\left|1 - \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right) L_e^2\right|$$

Definindo $\boxed{f_{L_e} = \left[\frac{1}{L_e} + L_e\right]}$ --------- 32.3

e substituindo a relação por seu valor, na equação nº 32. obteremos

$$\dot{m}\, v_e + p_e A_e = \dot{m}\, v^*\left\{L_e + \frac{1}{L_e}\left[1 - \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right) L_e^2\right]\left(\frac{\gamma+1}{2\gamma}\right)\right\}$$

$$\dot{m}\, v_e + p_e\, A_e = \dot{m}\, v^*\left\{L_e + \frac{\gamma+1}{2\gamma}\cdot\frac{1}{L_e} - \frac{(\gamma-1)}{2\gamma}\cdot L_e\right\}$$

$$= \dot{m}\, v\left\{\left(\frac{\gamma+1}{2\gamma}\right)\cdot\frac{1}{L_e} + L_e\left(1 - \frac{\gamma-1}{2\gamma}\right)\right\}$$

$$= \dot{m}\, v^*\left\{\left(\frac{\gamma+1}{2\gamma}\right)\cdot\frac{1}{L_e} + \left(\frac{\gamma+1}{2\gamma}\right)\cdot L_e\right\}$$

$$= \dot{m}\, v^*\left\{\left(\frac{\gamma+1}{2\gamma}\right)\left(\frac{1}{L_e} + L_e\right)\right\}$$

$$\dot{m}\, v_e + p_e\, A_e = \left(\frac{\gamma+1}{2\gamma}\right) \cdot \dot{m} \cdot v^* \cdot f_{L_e}$$

mas, usando o valor de $\dot{m}$ dado pela equação nº 27

$$\dot{m} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} \quad \frac{A_e p_o f_{ce}}{v^*}$$

Assim, substituindo chegamos a:

$$\dot{m}\, v_e + p_e\, A_e = \left(\frac{\gamma+1}{2\gamma}\right) \frac{2\gamma}{(\gamma+1)} \quad \frac{A_e\, p_o\, f_{ce}}{v^*} \cdot v^* \quad L_e$$

$$\dot{m}\, v_e + p_e\, A_e = A_e\, p_o\, f_{c_e} \cdot f_{L_e}$$

Assim, chegamos a:

$$F = A_e \cdot p_o \cdot f_{c_e} \cdot f_{L_e} - p_a\, A_e$$

mas $\boxed{\Omega_e = f_{c_e} \cdot f_{L_e}}$ e

$$F = A_e\, p_o \Omega_e - p_a\, A_e \qquad \text{---------- 33}$$

8 - COEFICIENTE DE EMPUXO - C_F

O coeficiente de empuxo é um parâmetro que depende da expansão da tubeira e da composição do propelente, através da relação de calores específicos γ, ou seja, depende principalmente do desenho do motor.

É definido como $\boxed{C_F = \dfrac{F}{p_o\, A^*}}$ (Admensional)

Retornando à equação nº 33, podemos escrever

$$C_F = \frac{Ae\, p_o\, \Omega\, e - p_a\, A_e}{p_o\, A^*} = \frac{Ae}{A^*}\left(\Omega_e - \frac{p_a}{p_o}\right)$$

Admitindo-se uma tubeira adaptada, onde $p_a = p_e$ e sendo

$$\frac{p_a}{po} = \frac{p_e}{po} = f_{pe}$$

resulta $C_F = \frac{Ae}{A^*} \left(\Omega_e - f_{pe} \right)$ ---------- 34

mas por definição $\Omega_e = f_{ce} \cdot f_{Le}$ logo

$$\Omega_e - f_{pe} = f_{ce} \cdot f_{Le} - f_{pe} \quad ; \quad \text{mas}$$

$$f_{L_e} = \left[\frac{1}{Le} + Le \right] \cdot \quad \text{---------- (equação 32.3)}$$

$$f_{p_e} = \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) Le^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad \text{----- (equação 22)}$$

$$f_{c_e} = \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) Le^2 \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}} \cdot Le \quad \text{---- (equação 24 e 26.1)}$$

Substituindo na expressão de Ω_e resulta:

$$\Omega_e - f_{pe} = \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) Le^2 \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}} Le \cdot \left[\frac{1}{Le} + Le \right] - \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) Le^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

$$= \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) Le^2 \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}} + \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) Le^2 \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}} Le^2 - \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) Le^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

$$= \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) Le^2 \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}} \times \left[1 + Le^2 - \left(1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \cdot Le^2 \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma - 1}} \right]$$

$$= \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) Le^2 \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}} \left[1 + Le^2 - 1 + \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) Le^2 \right]$$

$$= \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) Le^2 \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}} \left[\frac{2\gamma}{\gamma + 1} Le^2 \right]$$

$$= \left\{ \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) Le^2 \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}} \cdot Le \right\} \; Le \cdot \gamma \cdot \frac{2}{\gamma + 1}$$

Comparando êste resultado com as equações de número 26.1 e 19 temos:

$$\Omega_e - f_{pe} = f_{ce} \cdot Le \cdot \gamma \cdot f_{T^*} \quad \text{----------} \quad 35$$

Mas da equação nº 29 podemos escrever

$$f_{c^*} \cdot A^* = f_{ce} \quad A_e \qquad \text{e tirar a relação}$$

$$f_{ce} = f_{c^*} \cdot \frac{A^*}{A_e}$$

e sabendo-se que f_{c^*} é o valor da função de continuidade para $L^* = 1$

levando-se este valor na equação nº 35 e substituindo na equação nº 34 resulta

$$\Omega_e - f_{pe} = f_{c^*} \cdot \frac{A^*}{A_e} \cdot L_e \cdot f_{T^*} \cdot \gamma$$

$$C_F = \frac{A_e}{A^*} \left(f_{c^*} \cdot \frac{A^*}{A_e} \cdot Le \cdot \gamma f_{T^*} \right) = \gamma \cdot Le \cdot f_{c^*} \cdot f_{T^*}$$

e como temos

$$f_{c^*} = \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) L^{*2} \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}} \cdot L^* = \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}$$

$$f_{T^*} = \frac{2}{\gamma + 1}$$

$$f_{c^*} \cdot f_{T^*} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \cdot \frac{2}{\gamma + 1} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = f_{p^*} \quad \ldots\ldots 35.1$$

E resulta finalmente

$$\boxed{C_F = f_{p^*} \cdot Le \cdot \gamma} \qquad \text{------- (adimensional)} \ldots\ldots 36$$

9 - COEFICIENTE DE DÉBITO OU DE DESCARGA

C_D

Este parâmetro caracteriza a combustão no interior da câmara de combustão. Quanto menor o valor de C_D mais satisfatório é o comportamento do motor.

Este parâmetro é definido pela relação:

$$C_D = \frac{\dot{m}}{P_o\ A^*} \quad \left| \frac{seg}{m} \right| \quad \text{--------} \quad 37$$

Mas o fluxo mássico pela garganta (seção crítica) é dado pela equação nº 27

$$\dot{m} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} \frac{A^* \cdot p_o \int c^*}{v^*}$$

Resultando então para o coeficiente de descarga

$$C_D = \frac{2\gamma}{\gamma+1} \frac{A^*\ p_o \int c^*}{v^*} \cdot \frac{1}{p_o\ A^*} = \gamma \cdot \int c^* \cdot \frac{1}{v^*} \cdot \frac{2}{\gamma+1}$$

$$C_D = \gamma \cdot \int c^* \cdot \frac{1}{v^*} \cdot \int T^* = \frac{\gamma}{v^*} \cdot \int p^* \quad \text{--------} \quad 38$$

pois como vimos na equação 35.1 $\left(f_c^* \cdot f_T^*\right) = f_p^*$

O coeficiente de débito varia de 8,6 à 7 x 10^{-4} seg/m

Impulsão total

A impulsão total é obitida por integração da fôrça ao longo do tempo de combustão.

$$I_{ft} = \int_o^{t_r} F \cdot dt$$

onde t_r = tempo de combustão em regime

ou $I_{ft} = \overline{F} \cdot t_r$ unidade | Newton x seg |

$\overline{F}$ = fôrça média

10 - IMPULSÃO ESPECÍFICA

A impulsão específica é definida como quociente da fôrça pelo fluxo mássico. Quanto maior a impulsão, melhor o propelente.

$$I_{esp} = \frac{F}{\dot{m}} = \frac{F}{p_o\ A^*} \cdot \frac{p_o\ A^*}{\dot{m}} = \frac{C_F}{C_D} \quad \text{-------} \quad \left| \frac{m}{seg} \right| \quad \cdots \quad 39$$

Os franceses definem I_{esp} como o quociente da fôrça pelo

peso de combustível queimado na unidade de tempo.

$$I_{esp} = \frac{F}{\dot{m}g} = \frac{F}{p_o A^* . g} \cdot \frac{p_o A^*}{\dot{m}} = \frac{C_F}{C_D . g} \quad \text{--------} \quad | \text{ seg } | \quad 39.1$$

Uma impulsão específica média é obtida dividindo-se a impulsão total I_t pela massa propulsora (unidade em m/seg) ou pelo peso do propelente (unidade em seg).

$$I_{esp} \text{ (m/seg)} = \frac{I_{ft}}{\dot{m}}$$

$$I_{esp} \text{ (seg)} = \frac{I_{ft}}{\dot{m} . g}$$

Quando a impulsão específica é medida em Newton X segundo Kilograma, ou seja metros/segundo, é desegnada por C, velocidade efetiva de saída dos gases.

A eficiência global do foguete, depende das eficências combinadas da câmara de combustão (onde os propelentes são queimados) e da tubeira (onde a energia térmica é convertida em energia cinética).

Como aproximação grosseira, considera-se frequentemente que o impulso específico é proporcional à:

$$I_{esp} \propto \sqrt{\frac{\Delta H}{\bar{M}}}$$

onde ΔH = calor de combustão em atmosfera inerte

$\bar{M}$ = massa molecular média dos produtos de combustão

Assim, estabelece-se simplesmente, que uma liberação de alto calor a partir de propelente de baixo peso molecular é o mais desejado.

11 - Velocidade de combustão

A equação da velocidade de combustão de um propelente foi estabelecido por SUMMERFIELD

$$V_c = KA\, e^{-E/RT_s}$$

onde:

E = energia de ativação

R = constante universal dos gases perfeitos

T_s = temperatura dos gases na superfície de combustão

A = fator de frequência

Após vários estudos e pesquisas, chegou-se à equação

$$V_c = \alpha \cdot p^n$$

onde α é função da temperatura inicial do bloco de propelente, antes do tiro.

Chegou-se então à equação final

$$V_c = \alpha \left[1 + \theta_{at} - \theta_{ref} \right] p^n$$

onde θ_{at} = temperatura antes do tiro

θ_{ref} = temperatura de referência

A velocidade de combustão é assunto muito complexo e será tratado com mais detalhes no capítulo 3, para pólvoras de base dupla sem solventes, chamadas SD.

12 - KLEMMUNG OU SERRAGE

Em um motor que contenha um propelente, denomina-se Klemmung exterior, ou serrage ao quociente da superfície de combustão (queima) do propelente e a seção reta crítica da tubeira.

$$K = \frac{S_c}{A^*} \qquad \text{----------} \qquad 40$$

S_c = superfície de combustão do propelente.

Denomina-se Klemmung interior ou serrage interna ao quociente que se estabelece entre a superfície de combustão S_c e a área livre de passagem dos gases, igual a subtração à seção normal ao eixo do motor, da área transversal ocupada nesta seção pelo propelente; chamado de A_p a superfície de passagem dos gases, teremos:

$$K_i = \frac{Sc}{A_p}$$

A serrage pode ser expressa em função do coeficiente de descarga, senão vejamos:

$$C_D = \frac{\dot{m}}{p_o \, A^*}$$

$$K = \frac{Sc}{A^*}$$

Mas $\dot{m} = S_c \cdot V_c \cdot \rho_p =$ ---------- equação 32.1

S_c = superfície de combustão do propelente

V_c = velocidade de combustão do propelente

ρ_p = massa específica do propelente

A velocidade de combustão é igual à espessura de pólvora deflagada na unidade de tempo. É função da pressão reinante na câmara de combustão, da composição do propelente e da temperatura inicial do mesmo.

Substituindo em C_D , $\dot{m}$ por seu valor vem:

$$C_D = \frac{Sc \cdot V_c \cdot \rho_p}{po \; A^*} = \frac{Sc}{A^*} \cdot \left(\frac{Vc \cdot \rho_p}{po} \right) = K \left(\frac{V_c \cdot \rho_p}{po} \right)$$

$$e \quad K = \frac{C_D \cdot po}{V_c \cdot \rho_p} \qquad \text{----------} \qquad 41$$

A relação entre K_i e K deve situar-se entre 0,45 e 0,65 para que a combustão transcorra normalmente em se tratando de pólvoras de base dupla ou composites

$$\boxed{0.45 \leqslant \frac{Ki}{K} \leqslant 0.65} \qquad \text{----------} \qquad 42$$

13 - RELAÇÃO DE ALARGAMENTO DE TUBEIRA

Relação de alargamento da tubeira é a relação entre a área da seção mais externa da mesma e a área da seção crítica

$$E = \varepsilon = \frac{Ae}{A^*}$$

Escola Federal de ... Biblioteca ...

Da equação nº 29 tiramos

$$f_{c^*} \cdot A^* = f_{c_e} \cdot A_e \qquad e \qquad \frac{A_e}{A^*} = \frac{f_{c^*}}{f_{c_e}}$$

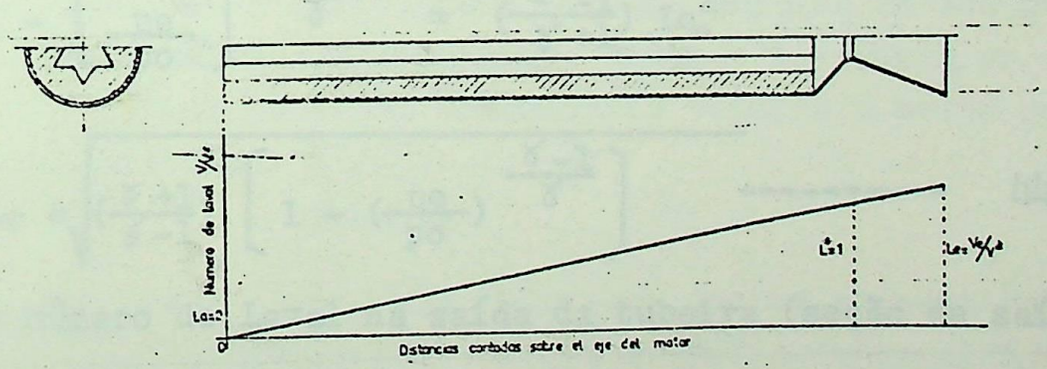
portanto $$E = \varepsilon = \frac{f_{c^*}}{f_{c_e}}$$

Posto que, a área da seção mais externa da tubeira, condiciona o comprimento do elemento de expansão, para um semiângulo de abertura dado, α , da parte divergente; da relação de alargamento dependerá o empuxo e, portanto, o coeficiente de empuxo C_F

$$C_F = \text{função} \left(\frac{A_e}{A^*} \right) \quad \text{ou função} \ (\varepsilon)$$

Variação do número "de LAVAL" ao longo de um motor de foguete. Como número de LAVAL é a relação entre a velocidade em qualquer seção transversal de um motor de foguete e o valor da velocidade crítica,

$L = \frac{v}{v^*}$, e como v pode variar desde zero, na parte da câmara de combustão mais distante da tubeira até v* na seção crítica, a figura abaixo estabelece um diagrama de como poderá variar o número de LAVAL ao longo do eixo do motor.



Cálculo da velocidade da seção final da tubeira.

Consideremos em primeiro lugar, uma tubeira totalmente expandida (adaptada), na qual a pressão de saída é igual à pressão do fluido que a rodeia

$$pe = pa$$

$$F = \dot{m}\, v_e + (pe - pa)\, Ae$$

$$F = \dot{m}\, v_e$$

$I_{esp} = \frac{F}{\dot{m}}$ (para os Americanos) e $I_s = \frac{F}{\dot{m}g}$ (para os franceses)

$$I_{esp} = \frac{\dot{m}\, Ve}{\dot{m}} = v_e = C$$

Quando a impulsão específica é medida em metros/segundos, êste valor C é denominado velocidade efetiva de saída dos gases, é um valor ideal, exceto no caso em que se obtenha uma expansão ótima.

Para os casos em que não se obtenha esta condição, a velocidade de saída pode ser encontratada da seguinte maneira:

Suponhamos que se conheça a relação $(\frac{pe}{po})$, da pressão na saída da tubeira com a máxima no interior do motor.

Com esta relação e aplicando a relação nº 22, podemos encontrar o valor Le.

$$\frac{pe}{po} = \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right) Le^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

$$\left[\frac{pe}{po}\right]^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} = 1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right) Le^2$$

$$1 - \left[\frac{pe}{po}\right]^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right) Le^2$$

$$Le = \sqrt{\left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}\right) \left[1 - \left(\frac{pe}{po}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]} \qquad \text{---------} \quad 44$$

Le = número de Laval na saída da tubeira (seção de saída)

$$Le = \frac{ve}{v^*}$$

$$ve = Le\, v^* \qquad \text{mas} \qquad v^* = \sqrt{\gamma RT^*}$$

$$ve = Le.\sqrt{\gamma RT^*} \qquad \text{----------} \quad 45$$

mas $F = \dot{m}\, v_e + (pe - pa)\, A_e$ $\qquad v_e = \frac{F - (pe - pa)\, A_e}{\dot{m}}$

14 - TUBEIRAS REAIS

Todo estudo até aqui, considerou o fluxo mássico através da tubeira como isentrópico e unidimensional.

Estas condições teóricas podem ser aceitas idealmente.

O fluxo mássico em uma tubeira real difere do ideal por causas dos efeitos da não isoentropicidade devido ao atrito, transferência de calor, não idealidade dos gases e distribuição não uniforme do fluxo.

Isto faz com que a pressão de estagnação p_o (pressão total devido a falta de movimento do fluxo gasoso), na parte do motor mais afastada da tubeira seja diferente da pressão total (soma da pressão estática e dinâmica) que reinará na seção anterior ao início da zona convergente da tubeira p_{oi}, e esta por sua vez diferente da pressão total, p_{oe} , que se produz na região mais externa da zona divergente em contato com a atmosfera. A determinação dos efeitos de atrito são resultantes da medida das pressões estáticas e velocidades existentes em seções diferentes do motor do foguete.

De outra forma, para se conseguir uma tubeira totalmente expandida requer-se, às vezes, que a parte divergente da mesma seja, excessivamente comprida, com o que o aumento de empuxo que se consegue vê-se prejudicado pelo aumento de peso das partes metálicas para tal: motivo pelo qual, se empregam tubeiras ligeramente sub expandidas que tendo um rendimento adequado, resultam relativamente leve no tocante ao seu peso.

Por tubeira sub expandida, entende-se aquela em que a pressão estática na seção de saída da tubeira é menor que a pressão atmosférica.

$$poe < pa$$

Por outra parte, nas tubeiras, devido ao semi ângulo do cone da região divergente α , que OSCILA entre 12º e 18º, deve introduzir-se uma correção devido à componente não axial da velocidade de saída dos gases v_e ; conforme consta das equação nº 31 e 32.

Correções devem ser introduzidas também devido ao fluxo ser não axial, à transmissão de calor e não idealidade dos gases de combustão bem como devido aos efeitos de fricção.

Um fator de rendimento energético que estabelece a razão entre as energias cinéticas por unidade de massa do fluxo que sai da tubeira é dado por

$$\mathcal{F}_\eta = \frac{(V_e)_r^2}{(V_e)_i^2}$$

Os sub índices i e r fazem referência ao caso ideal e real. Do fator de rendimentos energético se pode deduzir o fator de correção da velocidade de saída:

$\varphi_v = \sqrt{\mathcal{F}_\eta}$, para o qual se obtem um valor médio de 0.92

$$\varphi_v = \sqrt{\mathcal{F}_\eta} = 0.92 \qquad \text{----------} \qquad 46$$

Define-se também um fator de correção φ_D que corrige o coeficiente de descarga ideal

$$(C_D)_i = \frac{(\dot{m})_i}{p_o A^*}$$

O fluxo mássico real $(\dot{m})_r$ é maior que o ideal $(\dot{m})_i$, devido a combustões incompletas, e cresce assim a densidade dos gases de saída na tubeira e seu peso molecular, reforçado este efeito pela transmissão de calor às paredes da tubeira, com consequentes variações de valor específico.

$$\frac{1}{\varphi_D} = \frac{(\dot{m})_r}{(\dot{m})_i} = \frac{(C_D)_r}{(C_D)_i}$$

$$(C_D)_r = \frac{(C_D)_i}{\varphi_D}$$

φ_D varia no intervalo 0.92 a 0.96

$$\boxed{0.92 \leqslant \varphi_D \leqslant 0.96} \qquad \text{----------} \qquad 47$$

O coeficiente de empuxo real C_F vem influencido por φ_v, devido ao empuxo influir na velocidade de saída, por φ_D e por λ devido a falta de axialidade da velocidade.

$$\varphi_F = \text{função } (\varphi_v, \varphi_D, \lambda)$$

φ_F varia no intervalo 0.94 a 0,96 e é definido por

$$\varphi_F = \frac{(C_F)_r}{(C_F)_i}$$

$$\boxed{0.94 \leqslant \varphi_F \leqslant 0.96} \qquad \text{---------- 48}$$

Os valores médios destes coeficientes são os que são aconselhados introduzir para adaptar à realidade, em um anteprojeto, os valores deduzidos por cálculos aos experimentais.

Correções posteriores obtidas a partir de resultados experimentais devem ser introduzidas para ajustar o projeto definitivo.

Rendimento da tubeira

$$\eta_{tub} = \frac{(C_F)_r}{(C_F)_t} \; ; \; 0.96 \leqslant \eta_{tub} \leqslant 0.99$$

15 - Fração em peso do propelente

É o quociente entre o peso do propelente e o peso total do foguete.

$$F_p = \frac{P_p}{P_p + P_v}$$

P_p = peso do propelente

$P_p + P_v$ = peso total do foguete

16 - Coeficiente de enchimento

$$C_r = \frac{\text{volume ocupado pelo propelente}}{\text{Volume do motor (câmara de propulsão)}}$$

e para um propelente de seção constante:

$$C_r = \frac{\text{área da seção transversal ocupada pelo propelente}}{\text{Área da seção transversal do motor}}$$

17 - Consumo específico do propelente

$$G_{esp} = \frac{1}{I_{esp}}$$

é o inverso da impulsão específica.

18 - Rendimento do Motor

a - Rendimento de combustão é o quociente entre o calor de combustão real por unidade de peso do propelente e o calor de combustão ideal.

$$\eta_{combustão} = \frac{Q_r}{Q_i}$$

Situa-se no intervalo 0.95 a 0.99

$$0.95 \leqslant \eta \text{ combustão} \leqslant 0.99$$

b - Rendimento interno do motor

η_{int} = Energia cinétrica dos gases de saída
Energia térmica liberada pela combustão

$$\eta_{int} = \frac{\frac{1}{2} \dot{m} v_e^2}{\dot{m} Q_r . E}$$

onde

Q_r = calor de combustão por unidade de massa do propelente
E = equivalente mecânico do calor

rendimento de propulsão

$$\eta_{propulsão} = \frac{\text{Energia do foguete}}{\text{Energia do foguete + energia residual dos gases de saída}}$$

$$\eta_{propulsão} = \frac{F . V}{F . V + \frac{1}{2} \dot{m} (C - V)^2}$$

onde

F = empuxo
V = velocidade do foguete
C = velocidade efetiva de saída dos gases

19 - Aplicação

Com o objetivo de dar mais intimidade com os parâmetros estudados, vamos considerar que um foguete necessite de um empuxo de aproximadamente 300 da N, e sua câmara de combustão seja de 300 mm.

Para o referido foguete, dispõe-se de um propelente cuja impulsão específica é de 214 segundos, densidade 1,65g/cc, γ = 1.25 e massa molecular dos gases de combustão de 28 Kg/Kgmol. Do diagrama velocidade - pressão do propelente, conclui-se que para pressão de trabalho de 80 bars corresponde uma velocidade de combustão de 12,94 mm/seg.

Dos estudos de forma geométrica conclui-se que a forma do bloco é plena, combustão em cigarette.

O tempo de combustão requerido é de 105 segundos.

CÁLCULOS:

$\overline{F}$ = 300 da N

$\emptyset$ = 300 mm

Espessura do inibidor = 4mm

Diâmetro do bloco = 300 - 2x4 = 292 mm

t_{cr} = 105 seg

$I_{ft} = \overline{F} \times t_{cr} = 3000\ N \times 105\ seg = 315000\ N.seg$

$$\text{Massa de pólvora} = \frac{I_{ft}}{I_{esp.g}} = \frac{315000\ N.seg}{214 seg \times \frac{9,8\ m}{seg^2}} = 150,20\ Kg$$

$$\text{Volume da pólvora} = \frac{M_p}{\rho} = \frac{150,20\ Kg}{1,65\ Kg/dm^3} = 91,03\ dm^3$$

$$\text{Volume} = \frac{\pi}{4} \cdot \emptyset^2 \cdot H = \frac{\pi}{4} \cdot 2,92^2\ dm^2 \cdot H\ dm = 91,03\ dm^3$$

Comprimento do bloco = 1359 mm

bloco de propelente
- D = 292 mm
- l = 1359 mm
- m = 150,20 Kg

confirmação do comprimento do bloco

comprimento = $V_c \times t_{cr} = 12,94 \frac{mm}{seg} \times 105 \text{ seg} = 1358,70 \text{ mm}$

a) Número "de LAVAL"

Supondo a tubeira totalmente expandida, pe = pa

$$f_{pe} = \frac{pe}{po} = \frac{pa}{po} \cong \frac{1 \text{ bar}}{80 \text{ bars}} = 0.013$$

$$f_{pe} = \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right) Le^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = 0.013$$

$$\left[1 - \left(\frac{1.25-1}{1.25+1}\right) Le^2 \right]^{\frac{1.25}{1.25-1}} = 0.013$$

$$1 - \frac{0.25}{2.25} Le^2 = \sqrt[5]{0.013} = 0.416$$

$$(1 - 0.416) \times \frac{2.25}{0.25} = Le^2$$

$$Le \cong 2,292$$

$$f_{p^*} = \left[1 - \frac{0.25}{2.25} \times 1^2 \right]^5 = 0.5549$$

$$f_{p^*} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = \left(\frac{2}{2,25}\right)^5 = 0.5549$$

b) Coeficiente de empuxo

$$C_F = f_{p^*} \cdot Le \cdot \gamma = 0.5549 \times 2,292 \times 1.25 = 1.5898$$

vamos adotar para o coeficiente experimental, segundo a expressão 48

$$(C_F) \text{ experimental} = 1.5898 \times 0.96 = 1.5262$$

c) Coeficiente de descarga

pela equação 39.1 $\quad I_s = \dfrac{C_F}{C_D \cdot g}$

$$C_D = \frac{C_F}{I_s \cdot g}$$

$$C_D = \frac{1.5262}{214\,\text{seg} \times 9{,}8\ \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}} = 7.2773 \times 10^{-4}\ \frac{\text{seg}}{\text{m}}$$

d) Seção crítica

$$C_D = \frac{\dot{m}}{p_o\ A^*}$$

$$A^* = \frac{\dot{m}}{p_o\ C_D} = \frac{\frac{M_p}{t_r}}{p_o\ C_D} = \frac{\frac{150.20\ \text{Kg}}{105\ \text{seg}}}{80 \times 1{,}0196\ \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \times 7{,}2773 \times 10^{-4}\ \frac{\text{seg}}{\text{m}}}$$

$$A^* = \frac{150{,}20}{105} \times \frac{1}{80 \times 1{,}0196 \times 7{,}2773 \times 10^{-4} \times 9{,}8}\ \text{cm}^2$$

$$A^* = 2{,}459\ \text{cm}^2$$

diâmetro crítico = 1.76945 cm

e) Klemmung ou serrage

pela equação nº 41

$$K = \frac{C_D \cdot p_o}{V_c \cdot \rho_p} = \frac{7.2773 \times 10^{-4}\ \frac{\text{seg}}{\text{m}}}{12{,}94\ \frac{\text{mm}}{\text{seg}}} \times \frac{80 \times 1.0196\ \text{Kg} \times 9{,}8\ \text{m}}{1{,}65\ \frac{\text{Kg}}{\text{dm}^3} \times \text{cm}^2 \times \text{seg}^2}$$

$$K = \frac{7\ 2773 \times 10^{-4} \times 80 \times 1.0196 \times 980}{129.4 \times 1{,}650 \times 10^{-3}} = 272{,}45$$

pela equação nº 40

$$K = \frac{S_c}{A^*} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot D^2}{A^*} = \frac{\pi}{4} \times \frac{(29{,}2\ \text{cm})^2}{2{,}459\ \text{cm}^2} = 272.33$$

f) Superfície de combustão

$$K = \frac{S_c}{A^*}$$

$$S_c = K.A^* = 272.33 \times 2,459\ cm^2 = 669,66\ cm^2$$

$$S_c = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} \times (29,2\ cm)^2 = 669,66\ cm^2$$

g) Relação de alargamento da tubeira

$$\varepsilon = \frac{Ae}{A^*} = \frac{f_{c^*}}{f_{c_e}}$$

$$f_c = f_{p.} L$$

$$f_{c^*} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = \left(\frac{2}{1,25+1}\right)^{\frac{1}{1.25-1}} = \left(\frac{2}{2,25}\right)^{4} = 0,6243$$

$$f_{c_e} = \left[1 - \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right) Le^2\right]^{\frac{1}{\gamma-1}} . Le$$

$$f_{c_e} = \left[1 - \frac{0.25}{2.25} \times 2,292^2\right]^4 \times 2,292 = 0.0688$$

$$\varepsilon = \frac{0.6243}{0.0688} = 9.0685$$

$$A_e = \varepsilon . A^* = 9.0685 \times 2,459\ cm^2 = 22.2995\ cm^2$$

circulo de 5.3285 cm de diâmetro

h) Klemmung interno

$$0.45 \leqslant \frac{Ki}{K} \leqslant 0.65$$

adotando um valor médio $\frac{Ki}{K} = 0.55$

$$K_i = 0.55 \times 272.33 = 149.78$$

i) Velocidade crítica

$$v^* = \frac{f_{p^*}.\gamma}{C_D} = \frac{0.5549 \times 1.25}{7.2773 \times 10^{-4}\ \frac{seg}{m}} = 953,14\ m/seg$$

j) Velocidade dos gases na saída da tubeira

como a tubeira é totalmente expandida

$$v_e = C = 214 \text{ seg} \times 9{,}8 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2} = 2097{,}2 \text{ m/seg}$$

k) Temperatura de estagnação

$$(v^*)^2 = \gamma R T^*$$

$$T^* = \frac{953.14^2 \text{ m}^2/\text{seg}^2}{1.25 \times 8.314 \frac{\text{joules}}{\text{ºK mol}}} \times \frac{1}{\frac{28 \text{ g}}{\text{gmol}}}$$

$$T^* = \frac{(953.14)^2 \times 28}{1.25 \times 8.314 \times 10^3} \text{ºK} = 2447.66 \text{ºK}$$

$$f_{T^*} = \frac{T^*}{T_o} = \frac{2}{\gamma + 1} = \frac{2}{2{,}25} = 0.8889$$

$$T_o = \frac{T^*}{f_{T^*}} = \frac{2447.66 \text{ºK}}{0{,}8889} = 2753.62 \text{ºK}$$

$$t_o = (2753.62 - 273)\text{ºC} = 2480.62 \text{ºC}$$

$$f_{T_e} = \frac{T_e}{T_o} = \left[1 - \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\right) Le^2\right] = \left[1 - \frac{0.25}{2.25} \times 2{,}292^2\right]$$

$$f_{T_e} = 0.4163$$

$$T_e = T_o f_{T_e} = 2753.62 \text{ºK} \times 0.4163$$

$$T_e = 1146.34 \text{ ºK}$$

1) Check - up do empuxo.

$$F = (C_F)_{experimental} \cdot p_o \cdot A^*$$

$$F = 1.5262 \times 80 \times 1.0196 \times 9,8 \times 2,459 \text{ N}$$

$$F = 2999.96 \text{ N.}$$

CAPITULO 2

Determinação teórica das características termodinâmicas das pólvoras e propelentes sólidos

1 - Determinação da fórmula bruta por grama de propelente

Para determinar a fórmula bruta do propelente, temos que partir da composição centesimal do mesmo. Tomando para base um propelente de base dupla modificado com a composição fictícia abaixo:

- Nitrocelulose de a % de nitrogênio ..... NC %
- Nitroglicerina de b % de nitrogênio ..... NG %
- Sulfato de Potássio ..... SK %
- Nitrato de Bário ..... NB %
- Nitrato de Sódio ..... NS %
- Óxido de Cobre ..... OC %
- Criolita ..... CT %
- Óxido de Magnésio ..... OM %
- Estanho (pó metálico) ..... ES %
- Perclorato de Amônio ..... PA %
- 2 NDPA ..... DP %
- Carbon Black ..... CB %
- Alumínio Metálico (pó finíssimo) ..... AL %

100 %

1.1 - Nitrocelulose (ingrediente ativo)

$$\left[C_{24}\ H_{40-n}\ (NO_3)_n\ O_{20-n}\right]_m$$

Peso molecular

$$24 \times 12.011 + (40-n)(1.008) + n(14.007 + 48) +$$

$$+ (20-n)\,16 = 288.264 + 40.32 - 1.008n + 62.007\,n +$$

$$+ 320 - 16\,n = 648.584 + 44.999\,n$$

Se em 100 g de Nitrocelulose temos a gramas de Nitrogênio, então podemos fazer a proporcionalidade:

.../

NC $\qquad\qquad$ N_2

100 g $\qquad\qquad$ a g

$648.584 + 44.999\ n \qquad\qquad 14.007\ n$

$(648.584 + 44.999\ n) \times a = 1400.7\ n$

$648.548 \times a + 44.999\ n\ a = 1400.7\ n$

$$n = \frac{648.584 \times (a)}{1400.7 - 44.999 \times (a)} \qquad \text{---------- (1)}$$

Pela equação (1) tira-se o valor de n e daí a fórmula da NC. Mas em 100 gramas do propelente temos "NC" gramas de Nitrocelulose e portanto podemos calcular quantos átomos grama de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio teremos em 1 grama do propelente

$$\left[C_{24} \quad H_{40-n} \quad O_{20+2n} \quad N_n\right]_m$$

Nitrocelulose	C	H	O	N
648,584 + 44,999 n	288.264	40.32-1.008n	320 + 32 n	14.007n
NC	C_1	H_1	O_1	N_1

$$C_1 = \frac{NC \times 288.264}{(648.584+44.999n)} \times \frac{10^{-2}}{12.011} = \frac{0,240\ (NC)}{648.584 + 44.999n}$$

$$H_1 = \frac{NCx(40.32-1.008n)}{(648.584+44.999n)} \times \frac{10^{-2}}{1.008} = \frac{0,010\ (NC)(40-n)}{648.584 + 44.999n}$$

$$O_1 = \frac{NC \times (320+32\ n)}{(648.584+44.999n)} \times \frac{10^{-2}}{16} = \frac{0,020\ (NC)(10+n)}{648.584 + 44.999n}$$

$$N_1 = \frac{NC \times 14.007\ n}{(648.584+44.999n)} \times \frac{10^{-2}}{14.007} = \frac{0,010\ (NC)\ n}{648.584 + 44.999n}$$

.../

1.2 - Nitroglicerina (ingrediente ativo)

$$C_3 H_5 (ONO_2)_x \quad (OH)_{3-x}$$

Peso molecular

$3 \times 12.011 + 5 \times 1.008 + x(48 + 14.007) + (3 - x) \cdot (17.008) = 92.097 + 44.999x$

Se em 100 g de Nitroglicerina temos b gramas de nitrogênio, então podemos fazer a proporcionalidade:

Nitroglicerina		Nitrogênio
100		b
$92.097 + 44.999x$		$14.007x$

$$(92.097 + 44.999x)\, b = 1400.7x$$

$$92.097\, b + 44.999\, bx = 1400.7x$$

$$x = \frac{92.097 \times b}{1400.7 - 44.999 \times b} \qquad \text{---------- (2)}$$

Pela equação (2) tira-se o valor de X e daí a fórmula da NG.

De maneira semelhante à anterior, em 100 g de propelente temos "NG" gramas de nitroglicerina e chegamos ao número de átomos de C, H, O, N por grama de propelente pelas expressões abaixo:

$$C_3 \quad H_{8-x} \quad O_3 + 2x \quad N_x$$

Nitroglicerina	C	H	O	N
$92.097 + 44.999x$	36.033	$8.064 - 1.008x$	$48 + 32x$	$14.007x$
NG	C_2	H_2	O_2	N_2

.../

$$C_2 = \frac{(NG) \times 36.033}{92.097 + 44.999} \times \frac{10^{-2}}{12.011} = \frac{0,030\ (NG)}{92.097 + 44.999\,x}$$

$$H_2 = \frac{(NG)x(8.064-1.008x)}{92.097 + 44.999} \times \frac{10^{-2}}{1.008} = \frac{0,010\ (NG)(8-x)}{92.097 + 44.999\,x}$$

$$O_2 = \frac{(NG) \times (48+32\,x)}{92.007 + 44.999} \times \frac{10^{-2}}{16} = \frac{0,010(NG)(3+2\,x)}{92.097 + 44.999\,x}$$

$$N_2 = \frac{(NG) \times 14.007\,x}{92.097 + 44.999} \times \frac{10^{-2}}{14.007} = \frac{0,010\ (NG)\ x}{92.097 + 44.999\,x}$$

1.3 - Sulfato de Potássio

$K_2\ SO_4$ p.at K = 39.102
p.at S = 32.064

Peso molecular: 2 x 39.102 + 32.064 + 4 x 16= 174.268

$$O_3 = \frac{(SK) \times 64}{174.268} \times \frac{10^{-2}}{16} = 0,000230\ (SK)$$

$$S_3 = \frac{(SK) \times 32.064}{174.268} \times \frac{10^{-2}}{32.064} = 0,000057\ (SK)$$

$$K_3 = \frac{(SK) \times 78.204}{174.268} \times \frac{10^{-2}}{39.102} = 0,000115\ (SK)$$

1.4 - Nitrato de Bário

$Ba\ (NO_3)_2$ p.at. Ba = 137.34

Peso molecular

137.34 + 2 x 14.007 + 6 x 16 = 261.354

.../

Nitrato de Bário	O	N	Ba
261.354	96	28.014	137.34
NB	O_4	N_4	B_4

$$O_4 = \frac{(NB) \times 96}{261.354} \times \frac{10^{-2}}{16} = 0,000230 \quad (NB)$$

$$N_4 = \frac{(NB) \times 28.014}{261.354} \times \frac{10^{-2}}{14.007} = 0,000077 \quad (NB)$$

$$Ba_4 = \frac{(NB) \times 137.34}{261.354} \times \frac{10^{-2}}{137.34} = 0,000038 \quad (NB)$$

1.5 - Nitrato de Sódio

$Na\ NO_3$ p.at N_a = 22.9898

Peso molecular

22.9898 + 14.007 + 3 x 16 = 84.9968

Nitrato de Sódio	O	N	Na
84.9968	48	14.007	27.9898
NS	O_5	N_5	$N_{a\ 5}$

.../

$$C_5 = \frac{(NS) \times 48}{84.9968} \times \frac{10^{-2}}{16} = 0,000353 \quad (NS)$$

$$N_5 = \frac{(NS) \times 14.007}{84.9968} \times \frac{10^{-2}}{14.007} = 0,000118 \quad (NS)$$

$$Na_5 = \frac{(NS) \times 22.9898}{84.9968} \times \frac{10^{-2}}{22.9898} = 0,000118 \quad (NS)$$

1.6 - Óxido de Cobre II

Cu O p.at. Cu = 63,54

Peso molecular

63,54 + 16 = 79,54

Óxido de cobre II	O	Cu
79,54	16	63,54
OC	O_6	Cu_6

$$O_6 = \frac{(OC) \times 16}{79,54} \times \frac{10^{-2}}{16} = 0,000126 \quad (OC)$$

$$Cu_6 = \frac{(OC) \times 63,54}{79,54} \times \frac{10^{-2}}{63,54} = 0,000126 \quad (OC)$$

.../

1.7 - Criolita

$ALF_3 \cdot 3\,NaF$

p.at F = 18.9984
p.at Al = 26.9815
p.at Na = 22.9898

$Na_3\,Al\,F_6$

Peso molecular

$3 \times 22.9898 + 26.9815 + 6 \times 18.9984 = 209.9413$

Criolita	F	Na	AL
209.9413	113.9904	68.9684	26.9815
C T	F_7	Na_7	AL

$$F_7 = \frac{(CT) \times 113.9904}{209.9413} \times \frac{10^{-2}}{18.9984} = 0,000286 \quad (CT)$$

$$Na_7 = \frac{(CT) \times 68.9694}{209.9413} \times \frac{10^{-2}}{22.9898} = 0,000143 \quad (CT)$$

$$AL_7 = \frac{(CT) \times 26.9894}{209.9413} \times \frac{10^{-2}}{26.9815} = 0,000048 \quad (CT)$$

1.8 - Óxido de Magnésio

Mg O

p.at Mg = 24.312

Peso molecular

$24.312 + 16 = 40.312$

Óxido de Magnésio	O	Mg
40.312	16	24.312
OM	O_8	Mg_8

$$O_8 = \frac{(OM) \times 16}{40.312} \times \frac{10^{-2}}{16} = 0,000248 \quad (OM)$$

$$Mg_8 = \frac{(OM) \times 24.312}{40.312} \times \frac{10^{-2}}{24.312} = 0,000248 \quad (OM)$$

1.9 - Estanho

Sn p.at = 118.69

$$Sn_9 = \frac{(ES) \times 118.69}{118.69} \times \frac{10^{-2}}{118.69} = 0,000084 \quad (ES)$$

1.10 - Perclorato de Amônio

NH_4 CLO_4 p.at CL = 35.453

Peso molecular

14.007 + 4 x 1.008 + 35.453 + 4 x 16 = 117.492

Perclorato de Amônio	H	O	N	CL
117.492	4.032	64	14.007	35.453
PA	H_{10}	O_{10}	N_{10}	CL_{10}

$$H_{10} = \frac{(PA) \times 4.032}{117.492} \times \frac{10^{-2}}{1.008} = 0,000340 \quad (PA)$$

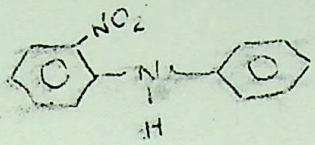
$$O_{10} = \frac{(PA) \times 64}{117.492} \times \frac{10^{-2}}{16} = 0,000340 \quad (PA)$$

$$N_{10} = \frac{(PA) \times 14.007}{117.492} \times \frac{10^{-2}}{14.007} = 0,000085 \quad (PA)$$

.../

$$CL_{10} = \frac{(PA) \times 35.453}{117.492} \times \frac{10^{-2}}{35.453} = 0,000085 \quad (PA)$$

1.11 - Nitro 2 difenilamina



C_{12} H_{10} O_2 N_2

12 x 12.011 + 10 x 1.008 + 2 x 16 + 2 x 14.007 = 214.226

2 NDPA	C	H	O	N
214.226	144.132	10.08	32	28.014
DP	C_{11}	H_{11}	O_{11}	N_{11}

$$C_{11} = \frac{(DP) \times 144.132}{214.226} \times \frac{10^{-2}}{12.011} = 0,000560 \quad (DP)$$

$$H_{11} = \frac{(DP) \times 10.08}{214.226} \times \frac{10^{-2}}{1.008} = 0,000467 \quad (DP)$$

$$O_{11} = \frac{(DP) \times 32}{214.226} \times \frac{10^{-2}}{16} = 0,000093 \quad (DP)$$

$$N_{11} = \frac{(DP) \times 28.014}{214.226} \times \frac{10^{-2}}{14.007} = 0,000093 \quad (DP)$$

1.12 - Carbon Black (C)

$$C_{12} = \frac{(CB) \times 12.011}{12.011} \times \frac{10^{-2}}{12.011} = 0,000833 \quad (CB)$$

.../

1.13 - Alumínio Metálico

AL p.at Al = 26.9815

$$ALM_{13} = \frac{(AL) \times 26.9815}{26.9815} \times \frac{10^{-2}}{26.9815} = 0,000371 \ (AL)$$

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
- Itajubá -

COMPONENTES	ATOMOS POR GRAMA DE PROPELENTES															
	C	H	O	N	S	CL	F	Na	K	Cu	Mg	Ba	Sn	AL	ALM	Pb
Nitrocelulose	C1	H1	O1	N1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nitroglicerina	C2	H2	O2	N2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sulfato de Potássio	-	-	O3	-	S3	-	-	-	K3	-	-	-	-	-	-	-
Nitrato de Bário	-	-	O4	N4	-	-	-	-	-	-	-	Ba4	-	-	-	-
Nitrato de Sódio	-	-	O5	N5	-	-	-	Na5	-	-	-	-	-	-	-	-
Óxido de Cobre II	-	-	O6	-	-	-	-	-	-	Cu6	-	-	-	-	-	-
Criolita	-	-	-	-	-	-	F7	Na7	-	-	-	-	-	AL7	-	-
Óxido de Magnésio	-	-	O8	-	-	-	-	-	-	-	Mg8	-	-	-	-	-
Estanho Metálico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Sn9	-	-	-
Perclorato de Amônio	-	H10	O10	N10	-	CL10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 NDPA	C11	H11	O11	N11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Carbon Black	C12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alumínio Metálico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ALM13	-
Outros	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOMA	XC	XH	XO	XN	XS	XCL	XF	YNa	YK	YCu	YMG	YBA	YSN	YAL	YALM	YPB

onde $XC = C_1 + C_2 + C_{11} + C_{12}$

$XH = H_1 + H_2 + H_{10} + H_{11}$

$XO = O_1 + O_2 + O_3 + O_4 + O_5 + O_6 + O_8 + O_{10} + O_{11}$

YMG = Mg 8

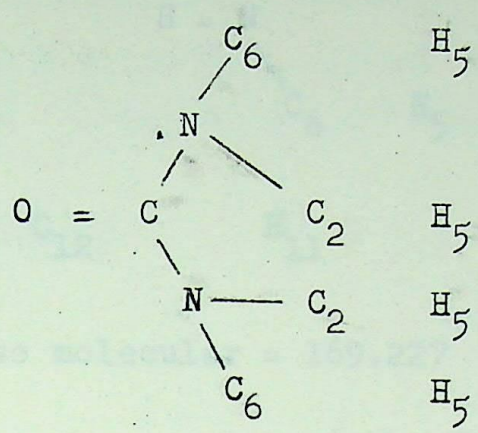
YAL = AL 7

YALM = ALM 13

COMPLEMENTO PARA O CALCULO DA FORMULA BRUTA DO PROPELENTE

(1 grama)

1.14 - Centralite

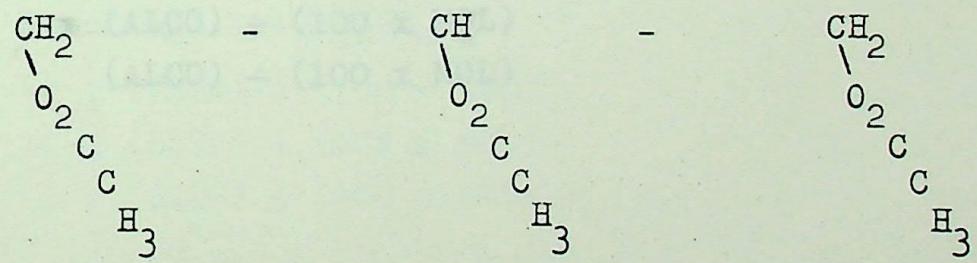


C_{17} H_{20} O N_2

Peso molecular = 268.361

C = 17 x (CENT) ÷ (100 x MOL)
H = 20 x (CENT) ÷ (100 x MOL)
O = (CENT) ÷ (100 x MOL)
N = 2 x (CENT) ÷ (100 x MOL)

1.15 - Triacetina



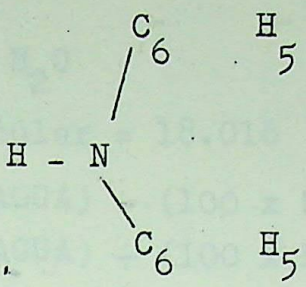
C_9 H_{14} O_6

Peso molecular = 218.211

C = 9 x (TRAC) ÷ (100 x MOL)
H = 14 x (TRAC) ÷ (100 x MOL)
O = 6 x (TRAC) ÷ (100 x MOL)

.../

1.16 - Difenilamina

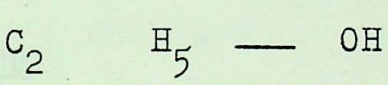


C_{12} H_{11} N

Peso molecular = 169.227

C = 12 x (DPA) ÷ (100 x MOL)
H = 11 x (DPA) ÷ (100 x MOL)
N = (DPA) ÷ (100 x MOL)

1.17 - Álcool

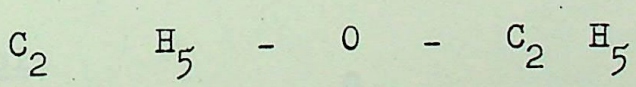


C_2 H_6 O

Peso molecular = 46.070

C = 2 x (ALCO) ÷ (100 x MOL)
H = 6 x (ALCO) ÷ (100 x MOL)
O = (ALCO) ÷ (100 x MOL)

1.18 - Éter



C_4 H_{10} O

Peso molecular = 74.124

C = 4 x (ETER) ÷ (100 x MOL)
H = 10 x (ETER) ÷ (100 x MOL)
O = (ETER) ÷ (100 x MOL)

.../

1.19 - Água (Umidade)

H_2O

Peso molecular = 18.016

H = 2 x (AGUA) ÷ (100 x MOL)
O = (AGUA) ÷ (100 x MOL)

1.20 - Vaselina

$C_n - H_{(2n+2)}$

$16 \leqslant n \leqslant 34$

Peso molecular = 18 x 12.011 + 38 x 1.008 = 254.502

C = 18 x (VASL) ÷ (100 x MOL)
H = 38 x (VASL) ÷ (100 x MOL)

1.21 - Estearina

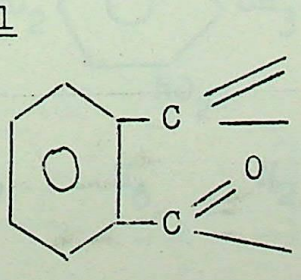
$$\left[C\ H_3\ (CH_2)_{16}\ COO\right]_3\ C_3\ H_5$$

$$C_{57}\ H_{110}\ O_6$$

Peso molecular = 891.507

C = 57 x (ESTR) ÷ (100 x MOL)
H = 110 x (ESTR) ÷ (100 x MOL)
O = 6 x (ESTR) ÷ (100 x MOL)

1.22 - Palatinol



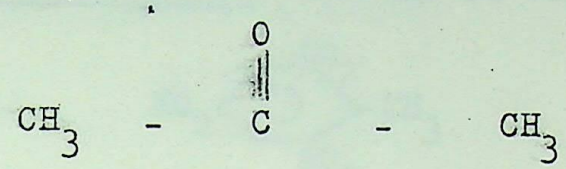
$C_{16}\ H_{22}\ O_4$

.../

Peso molecular = 278.352

C = 16 x (PALT) ÷ (100 x MOL)
H = 22 x (PALT) ÷ (100 x MOL)
O = 4 x (PALT) ÷ (100 x MOL)

1.23 - Acetona

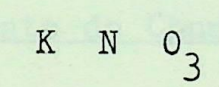


C_3 H_6 O

Peso molecular = 58.081

C = 3 x (ACET) ÷ (100 x MOL)
H = 6 x (ACET) ÷ (100 x MOL)
O = (ACET) ÷ (100 x MOL)

1.24 - Nitrato de potássio

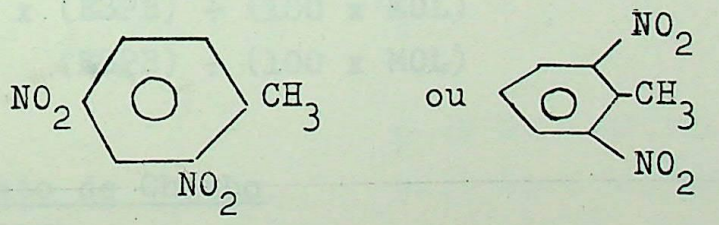


p.at K = 39,102

Peso molecular = 101.109

O = 3 x (KNO_3) ÷ (100 x MOL)
N = (KNO_3) ÷ (100 x MOL)
K = (KNO_3) ÷ (100 x MOL)

1.25 - Dinitrotolueno



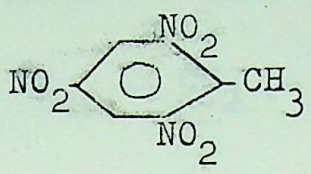
C_7 H_6 N_2 O_4

.../

Peso molecular = 182.139

C = 7 x (DNT) ÷ (100 x MOL)
H = 6 x (DNT) ÷ (100 x MOL)
O = 4 x (DNT) ÷ (100 x MOL)
N = 2 x (DNT) ÷ (100 x MOL)

1.26 - Trinitrotolueno (Trotil ou Tolite)



C_7 H_5 N_3 O_6

Peso molecular = 227.138

C = 7 x (TNT) ÷ (100 x MOL)
H = 5 x (TNT) ÷ (100 x MOL)
O = 6 x (TNT) ÷ (100 x MOL)
N = 3 x (TNT) ÷ (100 x MOL)

1.27 - Estearato de Chumbo (neutro)

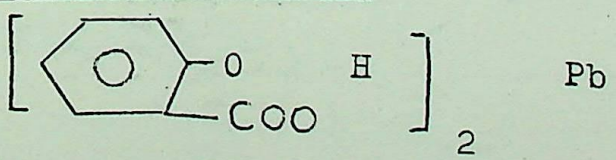
$(C_{18}\ H_{35}\ O_2)_2\ Pb$ p.at do Pb = 207.19

$C_{36}\ H_{70}\ O_4\ Pb$

Peso molecular = 774.146

C = 36 x (ESPB) ÷ (100 x MOL)
H = 70 x (ESPB) ÷ (100 x MOL)
O = 4 x (ESPB) ÷ (100 x MOL)
Pb = (ESPB) ÷ (100 x MOL)

1.28 - Salicilato de Chumbo



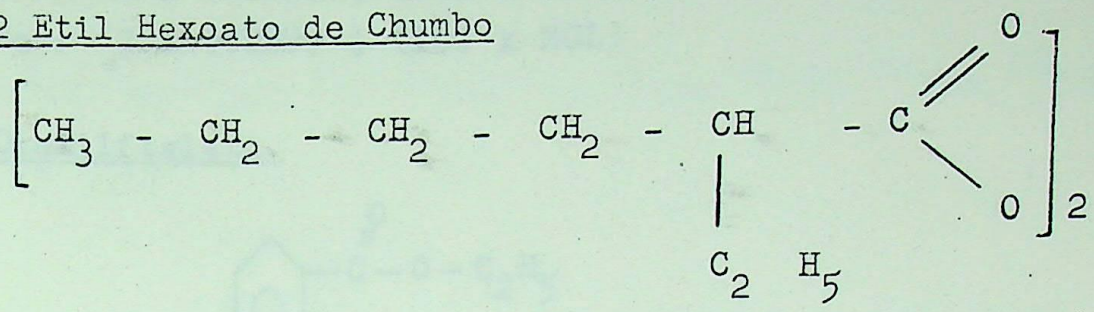
$C_{14}\ H_{10}\ O_6\ Pb$

..../

Peso molecular = 481.424

C = 14 x (SAPB) ÷ (100 x MOL)
H = 10 x (SAPB) ÷ (100 x MOL)
O = 6 x (SAPB) ÷ (100 x MOL)
Pb = (SAPB) ÷ (100 x MOL)

1.29 - 2 Etil Hexoato de Chumbo

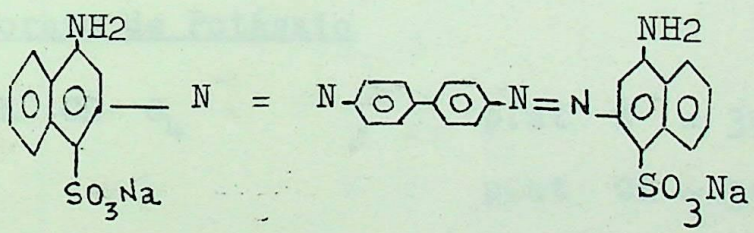


C_{16} H_{30} O_4 Pb

Peso molecular = 493.606

C = 16 x (2EHP) ÷ (100 x MOL)
H = 30 x (2EHP) ÷ (100 x MOL)
O = 4 x (2EHP) ÷ (100 x MOL)
Pb = (2EHP) ÷ (100 x MOL)

1.30 - Congo Rouge



C_{32} H_{22} O_6 N_6 S_2 Na_2

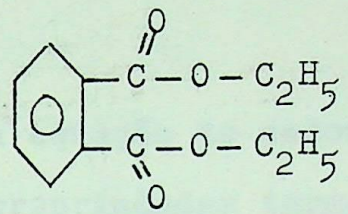
p.at S = 32,064
p.at Na = 22,9898

.../

Peso molecular = 696.6776

C = 32 x (CORU) ÷ (100 x MOL)
H = 22 x (CORU) ÷ (100 x MOL)
O = 6 x (CORU) ÷ (100 x MOL)
N = 6 x (CORU) ÷ (100 x MOL)
S = 2 x (CORU) ÷ (100 x MOL)
Na = 2 x (CORU) ÷ (100 x MOL)

1.31 - Dietilftalato



C_{12} H_{14} O_4

Peso molecular = 222,244

C = 12 x (DEP) ÷ (100 x MOL)
H = 14 x (DEP) ÷ (100 x MOL)
O = 4 x (DEP) ÷ (100 x MOL)

1.32 - Perclorato de Potássio

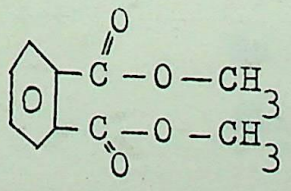
K CL O_4

p.at K = 39.102
p.at CL = 35.453

Peso molecular = 138.555

O = 4 x (PEK) ÷ (100 x MOL)
CL = (PEK) ÷ (100 x MOL)
K = (PEK) ÷ (100 x MOL)

1.33 - Dimetilftalato



C_{10} H_{10} O_4

.../

Peso molecular = 194.190

C = 10 x (DMP) ÷ (100 x MOL)
H = 10 x (DMP) ÷ (100 x MOL)
O = 4 x (DMP) ÷ (100 x MOL)

Teremos assim, a seguinte fórmula bruta, por grama de propelente:

$C_{XC}\ H_{XH}\ O_{XO}\ N_{XN}\ S_{XS}\ CL_{XCL}\ F_{XF}\ Na_{YNA}\ K_{YK}\ Cu_{YCu}\ Mg_{YMG}\ Ba_{YBA}\ SN_{YSN}$

$Pb_{YPB}\ AL_{YAL}\ AL^{*}_{YALM}$

2 - Determinação da equação de decomposição do propelente

O cálculo das propriedades termodinâmicas de um propelente à partir de sua fórmula bruta, pode ser feito a partir da equação de decomposição do mesmo, sabendo-se que:

Substância	Produto inorgânico de decomposição à baixas temperaturas
$NH_4\ CLO_4$	H CL
K NO_3	$K_2\ CO_3$
$K_2\ SO_4$	K_2 S
Al $F_6\ K_3$	Al $F_6\ K_3$
K CLO_4	K CL
Al $F_6\ Na_3$	Al $F_6\ Na_3$
Ba $(NO_3)_2$	Ba CO_3
Ca CO_3	Ca CO_3
Ca O	Ca CO_3
Mg O	Mg O
Sn	Sn O_2
Al	$Al_2\ O_3$

.../

propelente $\Longrightarrow$ (AA) CO_2 + (BB) CO + (CC) H_2O + (DD) H_2 +
+ (EE) N_2 + (FF) K_2S + (GG) Ba CO_3 +
+ (HH) Na_2CO_3 + (OO) CU O + (PP) Al F_6 Na
+ (QQ) MgO + (RR) Sn O_2 + (SS) PbO +
+ (TT) Al_2O_3 + (WW) H Cℓ

Teremos assim as seguintes igualdades:

XC = (AA) + (BB) + GG) + (HH)

XH = 2 (CC) + 2 (DD) + (WW)

XO = 2 (AA) + (BB) + (CC) + 3 (GG) + 3 (HH) + (OO) + (QQ) +
2 (RR) + (SS) + 3 (TT)

XN = 2 (EE)
XS = (FF)
XCL = (WW)
XF =6 (PP)
YNa = 2 (HH) + 3 (PP)
YK = 2 (FF)
YCu = (OO)
YM_g = (QQ)
YB_a = (GG)
YS_n = (RR)
YP_b = (SS)
YAL = (PP) (alumínio em forma de cation)
YALM = 2 (TT) (alumínio metálico)

Dessas igualdades, chegamos aos seguintes valores para número de moles de produtos da combustão de 1 grama do propelente:

(EE) = (XN) ÷ 2
(FF) = XS = (YK) ÷ 2
(WW) = X CL
(PP) = (XF) ÷ 6 = YAL

.../

(OO) = YCu

(QQ) = YMg

(GG) = YBa

(RR) = YSn

(SS) = YPb

(TT) = (YALmet) ÷ 2

(HH) = [YNa - 3 (PP)] ÷ 2

(AA) + (BB) = XC - (GG) - (HH) ---------- (a)

(CC) + (DD) = [XH - (WW)] ÷ 2 ---------- (b)

2(AA)+(BB)+(CC)= XO - 3 (GG) - 3 (HH) - (OO)-(QQ)-2(RR)-(SS)+

- 3 (TT) ---------- (c)

A equação do gás d'água nos fornece:

$$CO + H_2O \underset{k_2}{\overset{k_1}{\rightleftharpoons}} CO_2 + H_2$$

Cujo equilíbrio pode ser expresso em forma de concentração ou pressão parcial dos constituintes

$$K_o = \frac{[CO]\ [H_2O]}{[CO_2]\ [H_2]} = \frac{k_2}{k_1}$$ função da temperatura de combustão

$$K_o = \frac{[CO]\ [H_2O]}{[CO_2]\ [H_2]} = \frac{(BB)\ (CC)}{(AA)\ (DD)}$$ ---------- (d)

Teremos assim um sistema de 4 equações (a, b, c, d) a 4 incógnitas (AA, BB, CC, DD) de fácil solução.

Fazendo:

XC - (GG) - (HH) = SOMA 1

[XH - (WW)] ÷ 2 = SOMA 2

XO - 3 (GG) - 3 (HH) - (OO) - (QQ) - 2 (RR) - (SS) +

- 3 (TT) = SOMA 3

K_o = RATIO, teremos:

.../

$$(AA) + (BB) = SOMA\ 1 \quad \text{---------- (1)}$$
$$(CC) + (DD) = SOMA\ 2 \quad \text{---------- (2)}$$
$$2\,(AA) + (BB) + (CC) = SOMA\ 3 \quad \text{---------- (3)}$$

$$\frac{(BB)(CC)}{(AA)(DD)} = RATIO \quad \text{---------- (4)}$$

(Equação III) - (Equação I)

$$2\,(AA) + (BB) + (CC) - (AA) - (BB) = (SOMA\ 3) - (SOMA\ 1)$$
$$(AA) + (CC) = (SOMA3) - (SOMA\ 1) = (SOMA\ 4)$$

(Equação II) - (Equação III) + (Equação I)

$$(CC) + (DD) - 2(AA) - (BB) - (CC) + (AA) + (BB) = (SOMA\ 2$$
$$- (SOMA\ 3) + (SOMA\ 1)$$
$$(DD) - (AA) = (SOMA\ 2) - (SOMA\ 3) + (SOMA\ 1) = (SOMA\ 5)$$

Teremos finalmente o sistema simplificado

$$(AA) + (BB) = (SOMA\ 1)$$
$$(AA) + (CC) = (SOMA\ 4)$$
$$-(AA) + (DD) = (SOMA\ 5)$$

$$\frac{(BB)\ (CC)}{(AA)\ (DD)} = (RATIO)$$

Tirando o valor de (BB), (CC) e (DD) e substituindo na última equação teremos:

$$(BB) = (SOMA\ 1) - (AA)$$
$$(CC) = (SOMA\ 4) - (AA)$$
$$(DD) = (SOMA\ 5) + (AA)$$

$$\frac{\left[SOMA\ 1 - (AA)\right] \cdot \left[SOMA\ 4 - (AA)\right]}{(AA) \cdot \left[SOMA\ 5 + (AA)\right]} = RATIO$$

$$(SOMA\ 1)\ (SOMA\ 4) - (AA)\ (SOMA\ 1 + SOMA\ 4) +$$
$$+ (AA)^2 = (AA)\ (RATIO)\ (SOMA\ 5) + (RATIO)\ (AA)^2$$

.../

$$(AA)^2 \left[RATIO - 1 \right] + (AA) \left[(RATIO)\ (SOMA\ 5) + SOMA\ 1 + SOMA\ 4 \right] - (SOMA\ 1)\ (SOMA\ 4) = 0$$

ALFA = RATIO - 1
BETA = (RATIO) (SOMA 5) + (SOMA 1) + (SOMA 4)
GAMA = -(SOMA 1) (SOMA 4)

Resolução da equação do segundo grau

$$(ALFA)\ (AA)^2 + (BETA)(AA) + (GAMA) = 0$$

Cálculo do discriminante

DELTA = (BETA)(BETA) - 4 x (ALFA)(GAMA)

$$(AA) = \frac{-(BETA) + \sqrt{DELTA}}{2\ (ALFA)}$$

A raiz deve satisfazer as seguintes condições:

$$(AA) < XC$$

$$(AA) > 0$$

Assim teremos:

(BB) = (SOMA 1) - (AA)
(CC) = (SOMA 4) - (AA)
(DD) = (SOMA 5) + (AA)

A temperatura de combustão (T_p, sob pressão p) para se conhecer K_o = RATIO será avaliada por balanço de massa e balanço térmico e será vista no cálculo do potencial aparente.

3 - Calor de formação do propelente

É o incremento no conteúdo calorífico ΔH originado quando se forma 1 grama do propelente, a partir de seus elementos constituintes a uma pressão e temperatura dadas, em geral 1 at e 300ºK.

.../

$$\text{calor de formação do propelente} = \sum_{i=1}^{NCOMP} n_i h_{fi}^{300°K}$$

NCOMP = número de componentes da massa.

Quando um propergol é constituído por um certo número de produtos de base, dos quais se conhece os calores de formação, admite se que seu calor de formação é a soma ponderada dos daqueles de seus constituintes, desprezando-se as quantidades de calor liberadas no transcurso das operações de fabricação (calor de gelatinização, de polimerização, etc). Na ausência de qualquer indicação, será sempre possível obter um valor próximo do calor de formação de um composto, a partir de sua fórmula química, utilizando a teoria da aditividade das energias de ligação entre átomos, estabelecida por PAULING;

CALOR DE FORMAÇÃO À VOLUME CONSTANTE

I - De compostos orgânicos da forma $C_x\ H_y\ O_z\ N_u$

Compostos orgânicos contendo carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio podem ser analisados no calorímetro, em combustão em excesso de oxigênio, num vaso fechado de colume constante.

$$C_x H_y O_z N_u + O_2 \text{ excesso} \longrightarrow x\,CO_2 + \frac{y}{2} H_2O + \frac{u}{2} N_2 + O_2 \text{ rest}$$

$$q \text{ combustão, v} = 94052\,x + 67409\,\frac{Y}{2} - q \text{ formação, v}$$

$$\boxed{q \text{ formação, v} = 94052\,x + 33704{,}5\,y - q \text{ combustão, v}}$$

II - De compostos minerais em estado cristalino

Os calores de formação dos compostos mineria em estado cristalino podem ser calculados através a teoria de KapoustinsKy, segundo a qual o Δ H formação da combinação de um elemento qualquer com outro elemento da mesma série ou do mesmo subgrupo da tabela periódica, referenciado à 1 Equivalente grama, é uma função linear do logarítimo do número atômico deste elemento. A equação

.../

$$\frac{\Delta H \text{ formação, v}}{\text{Valencia}} = a \log Z + b$$

obedece a esta teoria, onde a e b são constantes empíricas e Z o número atômico do cation.

III - Aplicações

III.1 - O calor de combustão num vaso fechado de volume constante da nitrocelulose com 12,40% de nitrogênio é de 2434,2 cal/g. Calcular o calor de formação a volume constante e a pressão constante.

$$n = \frac{648.584 \times 12.40}{1400.7 - 44.999 \times 12.40} = 9.543519$$

$$C = \frac{0.240 \times 100}{648.584 + 44.999 \times n} = 0.022263$$

$$H = \frac{0.010 \times 100 \times (40-n)}{648.584 + 44.999 \times n} = 0.028252$$

$$q_{\text{formação, v}} = 94052 \times 0,022263 + 33704,5 \times 0,028252 - 2434,2 \text{ cal/g}$$

$$= 611.81 \text{ cal/g}$$

$$q_{\text{formação, p}} = q_{\text{formação, v}} + 298 (y + z + u)$$

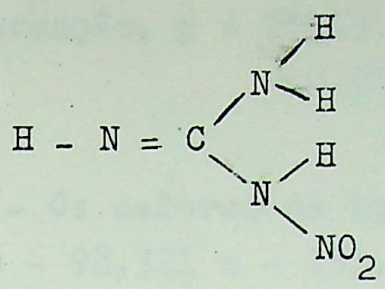
$$O = \frac{0.020 \times 100 \times (10 + n)}{648.584 + 44.999 \times n} = 0.036258$$

$$N = \frac{0.010 \times 100 \times n}{648.584 + 44.999 \times n} = 0.008853$$

$$q_{\text{formação, p}} = 611.81 + 298 (0.028252 + 0.036258 + 0.008853) = 611.81 + 21.86 = 633.67 \text{ Cal/g}$$

III.2 - O calor de combustão num vaso fechado de volume constante da nitroguanidina é de 2010 cal/g. Calcular o calor de formação a volume constante e a pressão constante.

.../



$C\ H_4\ O_2\ N_4$

mol = 12.011 + 4 x 1.008 + 2 x 16 + 4 x 14.007 =

= 104.071

C = 1 ÷ 104.071 = 0.009609
H = 4 ÷ 104.071 = 0.038435
O = 2 ÷ 104.071 = 0.019218
N = 4 ÷ 104.071 = 0.038435

$q_{formação}$, v = 94052 x 0.009609 + 33704,5 x 0.038435 +

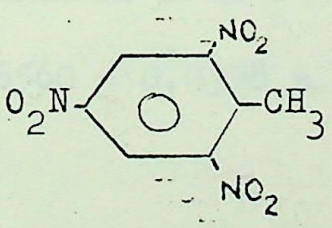
- 2010

$q_{formação}$, $\breve{v}$ = 189.18 cal/g

$q_{formação}$, p = 189.18 + 298 (0.038435 + 0.019218 +

+ 0.038435) = 217.81 cal/g

III.3 - O calor de combustão num vaso fechado de volume constante do TNT é de 3614 cal/g



$C_7\ H_5\ O_6\ N_3$ mol = 227.138

C = 7 ÷ 227.138 = 0.030818
H = 5 ÷ 227.138 = 0.022013
O = 6 ÷ 227.138 = 0.026416
N = 3 ÷ 227.138 = 0.013208

$q_{formação}$, v = 94052 x 0.030818 + 33704,5 x 0.022013 +

- 3614 = 26.46 cal/g

..:/

Q formação, p = 26.46 + 298 (0.022013 + 0.026416 +
+ 0.013208) = 44.83 cal/g

III.4 - Os calores de formação do Na CL e do Mg CL_2 são respectivamente - 98,321 e - 153,22 Kcal/mole.

Determinar o calor de formação do cloreto de alumínio e do cloreto de silício, em estado cristalino.

Na CL $\quad -\frac{98,321}{1} = a \log 11 + b$ ----------

Mg CL_2 $\quad -\frac{153,22}{2} = a \log 12 + b$ ----------

AL CL_3 $\quad \frac{\Delta H_f}{3} = a \log 13 + b$ ----------

Si CL_4 $\quad \frac{\Delta H_f}{4} = a \log 14 + b$ ----------

$- 98,321 = 1.0414a + b$ ---------- 1

$- 76,665 = 1.0792\ a + b$ ---------- 2

subtraindo 1 de 2 vem

$21.6560 = 0.0378\ a \qquad a = 572.9101$

$b = 694.9496$

ΔH_f Al $CL_3 = 3 \left[572,91 \log 13 - 694,95 \right] = - 170.28$ Kcal/mole

ΔH_f Si $CL_4 = 4 \left[572,91 \log 14 - 694,95 \right] = - 153.29$ Kcal/mole

III.5 - Os calores de formação do K_2 Cr O_4 e do Ca Cr O_4 são respectivamente - 333.5 e - 329.6 Kcal/mole.

Determinar o calor de formação do cromato de cobre

.../

$K_2 Cr O_4$ $\quad - \frac{333.4}{2} = a \log 19 + b$ ----------

$Ca Cr O_4$ $\quad - \frac{329.6}{2} = a \log 20 + b$ ----------

$Cu Cr O_4$ $\quad \frac{\Delta H_f}{2} = a \log 29 + b$ ----------

$- 160.7 = 1.2788\ a + b$ ---------- 1

$- 164,8 = 1.3010\ a + b$ ---------- 2

subtraindo 1 de 2 vem.

$1.9 = 0.022276\ a$: $a = 85.29$

$b = - 275,76$

$Cu Cr O_4$ ------ $\frac{\Delta H_f}{2} = 85,29 \times \log 29 - 275,76$

$\Delta H_f = - 302.06$ Kcal/mol

mol = 63,55 + 51,996 + 4 x 16 = 179,546 g/mole

ΔH formação = - 302060 cal/ 179,546 g = - 1682,35 cal/g

$$\delta Q = dU + \delta W$$

$$\delta Q = dU + p\ d\ V$$

para uma transformação a volume constante

$$d\ V = 0$$

.../

$\delta Q_v = d U$

Por definição $H = U + p V$

diferenciando vem:

$d H = d U + p\, d V + V\, dp = \delta Q + V\, dp.$

para uma transformação a pressão constante

$$dp = 0$$

$\delta Q_p = d H$

Relação entre δQ_p e δQ_v

$d H = d U + p\, dV + V\, dp$

para p constante

$d H = d U + p dV$

$$\delta Q_p = \delta Q_v + p\, d V$$

$$\int \delta Q_p = \int \delta Q_v + \int p\, d V$$

sendo o processo realizado a pressão constante

$$Q_p = Q_v + p \int_{v_i}^{v_f} d V = Q_v + p\, (V_{final} - V_{inicial})$$

seja n_i = número de moléculas gasosas antes da combustão em 1 mol do explosivo e n_f o número de moléculas gasosas depois da combustão.

$V_{final} = 22{,}412 \times n_f\, (1 + \alpha t)$

$V_{inicial} = 22{,}412 \times n_i\, (1 + \alpha T)$ volume a t graus

subtraindo na expressão teremos

$$Q_p = Q_v + p \left[22{,}412\, (1 + \alpha t)\, (n_f - n_i) \right]$$

.../

Normalmente o tabelamento é feito para 300ºK ou seja 27ºC e 1 atmosfera de pressão ou seja 1,0332 Kgf/cm^2, considerando-se no cálculo as moléculas de água como gases.

$$Q_p = Q_v + p \left[22{,}412 \left(1 + \frac{1}{273} \cdot 27\right) (n_f - n_i) \right]$$

O equivalente mecânico do calor é 427.1 Kgm/Kcal, e quando se trata de explosivos, o volume V_i é geralmente desprezível em relação a V_f, logo n_i é desprezado em presença de n_f.

$$Q_p = Q_v + p \left[22{,}412 \left(1 + \frac{1}{273} \times 27\right) (n_f) \right]$$

$$p = 1 \text{ at} = 1{,}0332 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm2}} = 10332 \frac{\text{Kgf}}{\text{m2}}$$

$$22{,}412 \text{ l} = \frac{22{,}412}{1000} \text{ m3}$$

$$10332 \frac{\text{Kgf}}{\text{m2}} \times \frac{22{,}412}{1000} \text{ m}^3 = 10{,}332 \times 22{,}412 \text{ Kgm}$$

$$\frac{10{,}332 \times 22{,}412 \text{ Kgm}}{427.1 \text{ Kgm/Kcal}} = \frac{10.332 \times 22.412 \text{ Kcal}}{427.1}$$

$$Q_p = Q_v + \frac{10{,}332 \times 22{,}412}{427.1} \times \frac{300}{273} \; n_f \text{ Kcal}$$

$$Q_p = Q_v + 0.596 \; n_f \text{ Kcal}$$

$$Q_p = Q_v + 596 \; n_f \text{ calorias / mol de explosivo}$$

Para um explosivo de fórmula geral $C_x H_y O_z N_u$ teremos a seguinte decomposição:

.../

1 grama

$$C_x H_y O_z N_u \Longrightarrow a\ CO_2 + (x - a)\ CO + \ldots\ldots\ldots$$

decomposição em elementos a 300ºK

aquecimento dos produtos de combustão até T_p ºK

formação a partir de elementos

$$C + \frac{y}{2} H_2 + \frac{z}{2} O_2 + \frac{u}{2} N_2 \longrightarrow a\ CO_2 + (x - a)\ CO + \ldots$$

formação dos produtos de combustão a 300ºK

$$n_f = \frac{y}{2} + \frac{z}{2} + \frac{u}{2} \quad \text{(referenciado a 1 grama de explosivo)}$$

$$Q_p = Q_v + 596 \cdot \left(\frac{y}{2} + \frac{z}{2} + \frac{u}{2} \right)$$

$$Q_p = Q_v + 298\ (y + z + u)\ \text{cal/g do explosivo}$$

n_f é também definido como o número de átomos gramas de produtos gasosos à 300ºK na fórmula bruta de 1 grama do propelente ou explosivo em questão.

Exemplo: a pólvora negra de guerra, cuja equação de decomposição é

$$10\ K NO_3 + 4\ S + 12\ C \dashrightarrow K_2 CO_3 + 2\ K_2 SO_4 + 2\ K_2 S +$$
$$8\ CO_2 + 3\ CO + 5\ N_2$$

$Q_v = 684$ cal/g

$C_{12}\ H_0\ O_{30}\ N_{10}\ S_4\ K_{10}$

.../

Mol = 1283.422
z = 0.023375
u = 0.007792

$q_p = q_v + 298\ (y + z + u)$

$q_p = 684 + 298\ (0.023375 + 0.007792)$

$q_p = 684 + 9.287 \simeq 693.29$ cal/g

Exemplo II - A nitroguanidina se decompõe segundo a equação

$$C\ H_4\ O_2\ N_4 \longrightarrow CO + H_2O + H_2 + 2\ N_2$$

$q_v = 721$ cal/g

Mol = 104.071
y = 0.038435
z = 0.019218
u = 0.038435

$q_p = 721 + 298\ (0.038435 + 0.019218 + 0.038435)$

$q_p = 749.6$ cal/g

Exemplo III - Um propelente de fórmula bruta

$C_{15}\ H_{20}\ O_{23}\ N_6$ se decompõe segundo a equação

$$C_{15}\ H_{20}\ O_{23}\ N_6 \longrightarrow 2.8\ CO_2 + 12.2\ CO + 5.2\ H_2O + 4.8\ H_2 + 3\ N_2$$

Mol = 652.367
y = 0.030658
z = 0.035256
u = 0.009197

$q_p = q_v + 298\ (0,030658 + 0.035256 + 0.009197)$

$q_p = q_v + 22,383$ cal/g

.../

4 - CALOR DE COMBUSTÃO

O calor de combustão é definido como o calor de oxidação do composto pelo oxigênio, nos óxidos superiores dos elementos constituintes do mesmo. Para compostos orgânicos em particular, o calor de combustão é definido como calor da completa oxidação da substância à dióxido de carbono, vapor d'água (ou água líquida) e outros produtos correspondentes.

5 - LEI DE HESS

O calor de uma reação química é independente do trajeto e depende somente dos estados inicial e final do sistema.

Para um processo à temperatura constante (300ºK) e volume constante, o calor de reação é igual a variação da energia interna.

$$\Delta Q_v = \Delta U = U_2 - U_1$$

Para um processo a temperatura constante (300ºK) e pressão constante, o calor de reação é igual a variação de entalpia

$$\Delta Q_p = \Delta H = H_2 - H_1$$

Dependência do calor de reação da Temperatura

Para um volume constante

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

diferenciando em relação à temperatura

$$\left(\frac{d(\Delta U)}{dT}\right)_v = \left(\frac{d\,U_2}{dT}\right)_v - \left(\frac{d\,U_1}{dT}\right)_v = C_{v,2} - C_{v,1} = \Delta C_v$$

$C_{v,1}$ = calor específico a volume constante do sistema no estado inicial

$C_v,2$ = calor específico a volume constante do sistema no estado final

ΔC_v = variação no calor específico a volume constante do sistema na transição do estado 1 para o estado 2.

.../

Exemplo:

$$b\,B + d\,D \longrightarrow r\,R + s\,S$$

$$C_{v,1} = b\,C_{v,B} + d\,C_{v,D}$$

$$C_{v,2} = r\,C_{v,R} + s\,C_{v,S}$$

$$\Delta C_v = (r\,C_{v,R} + s\,C_{v,S}) - (b\,C_{v,B} + d\,C_{v,D})$$

no caso geral teremos

$$\Delta C_v = \sum_{\text{produtos}} n.C_v - \sum_{\text{reagentes}} n.C_v$$

para pressão constante

$$\left(\frac{d\,(\Delta H)}{dT}\right)_p = \left(\frac{d\,H_2}{dT}\right)_p - \left(\frac{d\,H_1}{dT}\right)_p$$

$$\left(\frac{d\,(\Delta H)}{dT}\right)_p = C_{p,2} - C_{p,1}$$

$C_{p,1}$ = calor específico à pressão constante do sistema no estado inicial

$C_{p,2}$ = calor específico à pressão constante do sistema no estado final

ΔC_p = variação no calor específico à pressão constante do sistema na transição do estado 1 para o estado 2.

em geral teremos:

$$\Delta C_p = \sum_{\text{produtos}} n.C_p - \sum_{\text{reagentes}} n.C_p$$

.../

assim teremos:

Para volume constante

$$\left(\frac{d(\Delta U)}{dT}\right)_v = \Delta C_v \qquad d(\Delta U) = \Delta C_v . dT$$

$$\Delta U = \int_{T_1}^{T_2} \Delta C_v . dT$$

Para pressão constante

$$\left(\frac{d(\Delta H)}{dT}\right)_p = \Delta C_p \qquad d(\Delta H) = \Delta C_p . dT$$

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} \Delta C_p . dT$$

Como geralmente usa-se a bomba calorimétrica, de volume constante, para calcular o calor das reações de combustão, teremos:

$$\Delta Q = Q_v$$

$$\delta Q = dU + \delta W = dU + pdV$$

para $V = cte \quad dV = 0$

$$\delta Q_v = dU$$

Se quisermos determinar o calor das reações de combustão à pressão constante teremos $H = U + pV$

$$dH = dU + pdV + Vdp \qquad dH = \delta Q + Vdp, \text{ para } p = cte \quad dp = 0$$

$$dH = \delta Q_p$$

$$\Delta Q_p = \Delta U + p \Delta V$$

$$\Delta Q_p = \Delta U + p \Delta V = \Delta Q_v + p \Delta V$$

$$pV_1 = n_1 RT$$

$$pV_2 = n_2 RT$$

$$p(V_2 - V_2) = p \Delta V = RT \Delta n = RT (n_2 - n_1)$$

$$\Delta Q_p = \Delta Q_v + RT \Delta n$$

.../

onde $\Delta n = n_2 - n_1$ é diferença entre o número de moles gasosos dos produtos e dos reagentes.

6 - POTENCIAL REAL

Quantidade de calor liberado na combustão em ausência de oxigênio, numa bomba calorimétrica, água em estado de vapor e referenciado a 300ºK os produtos de combustão.

$$HPROD = \sum_{i=1}^{m} n_i \left(h_{fv} \quad 300ºK \right)_i \quad \text{água em estado vapor}$$

HREAG = calor de formação do propelente a volume constante

Pot real = HPROD - HREAG

7 - POTENCIAL APARENTE

Q_a de uma substância é definido como a quantidade de calor liberada por esta substância na combustão em ausência de oxigênio numa bomba calorimétrica, a água formada encontrando-se no estado líquido.

8 - CARACTERISTICAS TERMODINÂMICAS DOS PROPELENTES SOLIDOS

O desenvolvimento do trabalho é o indicado pelo engenheiro de pólvoras Daniel Quentin, em trabalhos publicados na França. Assim, partindo de um propelente sólido de fórmula bruta $C_x H_y O_z N_u$, determinamos diretamente a massa molecular média dos produtos de combustão e o potencial aparente do propergol, para uma pressão de câmara de 70 bars ($\approx$ 70 Kgf/cm^2).

Daí pode-se estimar a impulsão específica, a relação entre os calores específicos e a temperatura de combustão na câmara (pressão constante), com razoável aproximação, por intermédio de equações lineares do tipo:

$$y = a + b \cdot Q_a$$

.../

A partir da fórmula bruta do propelente, escreve-se a equação de decomposição:

$$C_x H_y O_z N_u \longrightarrow a\,CO_2 + (x - a)\,CO + \frac{u}{2} N_2 +$$
$$+ (z - x - a)\,H_2O + (x + \frac{y}{2} - z + a)\,H_2 \quad \text{---------- 1}$$

átomos de carbono ..... $x = a + x - a = x$
átomos de Hidrogênio ... $y = 2z - 2x - 2a + 2x + y - 2z + 2a = y$
átomos de Oxigênio ..... $z = 2a + x - a + z - x - a = z$
átomos de Nitrogênio $u = 2 \times \frac{u}{2} = u$

O desenvolvimento da teoria considera inicialmente a decomposição do propelente em elementos a 300ºK, a seguir a formação, à partir dos elementos, dos produtos de combustão à 300ºK e a seguir o aquecimento dos produtos de combustão de 300ºK até a temperatura de combustão na câmara T_p ºK.

Propelente inicial T_p^oK

$C_x H_y O_z N_u$ .....⟹ $a\,CO_2 + (x - a)\,CO +$

decomposição em elementos

aquecimento dos produtos de combustão até $T_p\,^oK$

$xC + \frac{y}{2} H_2 + \frac{z}{2} O_2 + \frac{u}{2} N_2 + \ldots \longrightarrow a\,CO_2 + (x - a)\,CO + \ldots$

a 300ºK

formação dos produtos de combustão

a 300ºK

Na temperatura de referência T_o (300ºK) e sob a pressão de câmara p, o propelente se decompõe em seus elementos simples (seja C grafite, H_2 gás, O_2 gás, N_2 gás, F_2 gás, Cl_2 gás, Al sólido etc) liberando um calor $-q_p$ sendo q_p o calor de formação do propelente à pressão constante e na temperatura de referência T_o = 300ºK

. ./

Os elementos se recombinam na temperatura de referência T_o e sob a pressão de câmara p, para dar os produtos resultantes da combustão, liberando o calor q_1

$$q_1 = a\ q_{CO_2} + (x - a)\ q_{CO} + (z - x - a)\ q_{H_2O} + \ldots$$

onde q_{CO_2} é o calor de formação do CO_2

q_{CO} é o calor de formação do CO

q_{H_2O} é o calor de formação da H_2O

Nota: Todos os calores de formação são no estado físico de referência, em geral a forma estável à 300ºK e sob a pressão de câmara p.

Os produtos de combustão são então levados da temperatura de referência T_o (300ºK) à temperatura final T_p ºK absorvendo o calor q_2.

$$q_2 = \sum n_i\ (\Delta H_i)_{To}^{Tp}$$

onde $(\Delta H_i)_{To}^{Tp}$ representa a variação de entalpia molar do produto de combustão entre temperatura de referência T_o e a temperatura de combustão T_p

Assim, a (número de moles de gás carbônico CO_2 formados na decomposição de $C_x H_y O_z N_a \ldots$) e T_p (temperatura de combustão, sob pressão p, em ºK) podem ser calculados por meio de balanço de massa, balanço térmico e equilíbrio do gás d'água, num processo por tentativas.

O balanço de massa nos é dado pela equação de decomposição do propelente (equação nº 1):

$$C_x H_y O_z N_u \longrightarrow a\ CO_2 + (x - a)\ CO + \frac{u}{2} N_2 + (z - x + a)\ H_2O + (x + \frac{y}{2} - z + a)\ H_2$$

O balanço térmico nos fornece:

$$q_2 = q_1 - q_p \qquad \text{(2)}$$

.../

A equação de equilíbrio do gás d'água:

$$C\,O + H_2\,O \rightleftharpoons C\,O_2 + H_2$$

$$K_o = \frac{(CO)\,(H_2O)}{(CO_2)(H_2)}$$

$$K_o = \text{função}\ (T_p)$$

$$K_o = \frac{(x - a)\,(z - x - a)}{a\,(x + \frac{y}{2} + a - z)} \qquad \text{---------- (3)}$$

a - Escolhendo-se uma temperatura de combustão $[T_p]_1$, entra-se na tabela de constantes de equilíbrio em função da temperatura (TABLEAU VI) e encontra-se $[K_o]_1$

b - com $[K_o]_1$, entra-se na equação de equilíbrio do gás d'água (equação 3) e calcula-se $[a]_1$

c - com $[a]_1$ entra-se na equação de decomposição do propelente (equação 1) e calculam-se os moles de cada produto de decomposição.

d - com os moles de cada produto de decomposição

(a) moles de CO_2

(x - a) moles de CO

$\frac{u}{2}$ moles de N_2

(z - x - a) moles de H_2O

$(x + \frac{y}{2} - z + a)$ moles de H_2, entra-se nas equações de balanço térmico, calculando-se Q_p, Q_1 e Q_2.

e - Se $Q_2 = Q_1 - Q_p$, a temperatura de combustão escolhida é a verdadeira, mas se $Q_2 \neq Q_1 - Q_p$, deve-se escolher uma segunda temperatura $[T_p]_2$ e recomeçar o processo até que a equação do balanço térmico (equação 2), seja satisfeita.

.../

8.1 Tabela VI

Produtos	K_0	K_1	K_2	K_3	K_4
300°k	$1,118.10^{-5}$				
400	$6,78 .10^{-4}$				
500	$7,63 .10^{-3}$				
600	0,03704				
700	0,1113				
800	0,2486				
900	0,4566				
1000	0,7316				
1100	1,065				
1200	1,443				
1300	1,852				
1400	2,281				
1500	2,718				
1600	3,154				
1700	3,584	0,0001			
1800	4,004	0,0004			
1900	4,411	0,0008			
2000	4,803	0,0016	0,0002		
2100	5,177	0,0031	0,0004		
2200	5,533	0,0056	0,0008		
2300	5,870	0,0096	0,0015		
2400	6,188	0,0159	0,0029	0,0002	
2500	6,488	0,0251	0,0052	0,0004	
2600	6,769	0,0383	0,0089	0,0007	0,0001
2700	7,033	0,0567	0,0146	0,0012	0,0003
2800	7,279	0,0816	0,0232	0,0020	0,0005
2900	7,509	0,1147	0,0355	0,0034	0,0008
3000	7,723	0,1576	0,0539	0,0055	0,0013
3100	7,928	0,2121	0,0770	0,0085	0,0022
3200	8,112	0,2805	0,1092	0,0129	0,0027
3300	8,290	0,3647	0,1516	0,0191	0,0052
3400	8,455	0,4670	0,2064	0,0276	0,0078
3500	8,606	0,5807	0,2761	0,0390	0,0113
3600	8,744	0,7384	0,3636	0,0541	0,0161
3700	8,872	0,9268	0,4718	0,0738	0,0224
3800	8,994	1,1041	0,6041	0,0989	0,0308
3900	9,107	1,332	0,7635	0,1306	0,0416
4000	9,208	1,592	0,9534	0,1700	0,0551

Escola Federal de Biblioteca MAUA - Itajubá -

Tabela VI

Produtos	K_0	K_1	K_2	K_3	K_4
4000	9,208	1,592	0,9534	0,1700	0,0554
4100	9,308	1,862	1,155	0,2163	0,0734
4200	9,403	2,178	1,405	0,2754	0,0951
4300	9,483	2,565	1,702	0,3428	0,1219
4400	9,560	2,978	2,065	0,4315	0,1531
4500	9,632	3,459	2,434	0,5320	0,1914
4600	9,702	3,917	2,901	0,6494	0,2377
4700	9,770	4,446	3,408	0,7807	0,2938
4800	9,825	5,035	3,981	0,9441	0,3589
4900	9,865	5,701	4,613	1,122	0,4290
5000	9,902	6,448	5,381	1,326	0,5188
5100	9,937	7,278	6,237	1,552	0,6152
5200	9,970	8,147	7,261	1,828	0,7328
5300	10,000	9,057	8,472	2,113	0,8730
5400	10,028	10,07	9,795	2,460	1,020
5500	10,052	11,15	11,29	2,895	1,181
5600	10,073	12,08	13,00	3,342	1,363
5700	10,090	13,18	15,07	3,811	1,577
5800	10,105	14,20	17,20	4,365	1,[illegible]
5900	10,117	15,43	19,43	5,012	2,075
6000	10,125	16,70	22,28	5,887	2,[illegible]

§ 2 Tabela IV

Produtos	CO_2	CO	H_2	H_2O	N_2	O_2
300°K	0	0	0	0	0	0
400	939,9	698,3	694,5	810,2	697,2	709,6
500	1 868,0	1 404,4	1 393,0	1 639,8	1 400,0	1 441,4
600	3 067,5	2 124,0	2 092,2	2 494,5	2 112,8	2 196,2
700	4 225,2	2 860,4	2 794,8	3 375,6	2 840,0	2 974,0
800	5 431,5	3 614,0	3 501,0	4 286,5	3 583,4	3 771,4
900	6 679,2	4 384,8	4 212,0	5 227,2	4 342,8	4 585,8
1000	7 960,4	5 170,9	4 929,4	6 198,5	5 117,0	5 413,8
1100	9 270,4	5 971,2	5 655,2	7 200,0	5 905,6	6 252,8
1200	10 604,7	6 782,4	6 390,9	8 231,4	6 706,8	7 101,0
1300	11 959,0	7 604,0	7 137,0	9 291,0	7 519,0	7 958,0
1400	13 330,9	8 434,8	7 892,5	10 378,5	8 340,2	8 822,0
1500	14 718,0	9 273,6	8 658,0	11 491,2	9 169,2	9 693,6
1600	16 117,4	10 119,2	9 434,1	12 626,9	10 006,0	10 570,2
1700	17 528,0	10 970,4	10 220,0	13 785,8	10 850,0	11 453,4
1800	18 948,0	11 826,0	11 016,0	14 964,0	11 700,0	12 342,0
1900	20 376,0	12 686,4	11 820,8	16 163,2	12 555,2	13 236,8
2000	21 812,7	13 540,5	12 634,4	17 379,1	13 413,0	14 135,4
2100	23 256,0	14 419,8	13 456,8	18 610,2	14 274,0	15 040,8
2200	24 703,8	15 291,2	14 286,1	19 856,9	15 139,2	15 952,4
2300	26 158,0	16 166,0	15 122,0	21 118,0	16 008,0	16 868,0
2400	27 617,1	17 041,5	15 964,2	22 388,1	16 879,8	17 789,0
2500	29 079,6	17 921,2	16 814,6	23 672,0	17 754,0	18 715,4
2600	30 548,6	18 804,8	17 670,9	24 966,5	18 632,2	19 646,6
2700	31 996,8	19 689,6	18 532,8	26 270,4	19 532,0	20 582,4
2800	33 495,0	20 575,0	19 400,0	27 582,5	20 395,0	21 922,4
2900	34 972,6	21 460,4	20 272,2	28 904,2	21 278,4	22 466,6
3000	36 452,7	22 347,9	21 149,1	30 231,9	22 161,6	23 414,4
3100	37 937,2	23 237,2	22 030,4	31 570,0	23 049,6	24 368,4
3200	39 425,5	24 130,9	22 915,8	32 912,1	23 939,4	25 325,6
3300	40 912,0	25 026,0	23 805,0	34 263,0	24 831,0	26 289,0
3400	42 408,0	25 919,1	24 700,8	35 619,0	25 720,6	27 255,2
3500	43 904,0	26 812,8	25 600,0	36 979,2	26 611,2	28 224,4
3600	45 401,4	27 710,1	26 499,0	38 346,0	27 505,4	29 198,4
3700	46 899,6	28 687,6	27 400,6	39 715,4	28 400,2	30 178,4
3800	48 401,5	29 508,5	28 308,0	41 090,0	29 395,0	31 160,8
3900	49 906,8	30 409,2	29 217,6	42 469,2	30 193,2	32 144,4
4000	51 411,5	31 309,4	30 129,1	43 848,7	31 091,0	33 133,4
4000	58 968,0	35 821,8	34 742,4	50 807,4	35 663,4	38 098,2
5000	66 570,8	40 368,3	39 409,5	57 795,9	40 114,4	43 136,6

8.3 Tabela II

Calor de formação dos produtos residuais 300ºK - 1 at

Produto	MOL	Estado de referência	q_f Kcal/mol
CO_2	44,01	gaz	94,052
CO	28,01	gaz	26,413
H_2	2,02	gaz	0,0
H_2O	18,02	gaz	57,802
			68,303 (liquide)
N_2	28,02	gaz	0,0
O_2	32,0	gaz	0,0
OH	17,01	gaz	9,903
H	1,01	gaz	- 52,002
NO	30,01	gaz	- 21,600
O	16,00	gaz	- 59,039
N	14,01	gaz	- 85,568
C	12,01	graphite	0,0
Pb	207,21	solide	0,0
Cu	63,57	solide	0,0
S	32,066	solide	0,0
T_iO_2	79,90	solide	218,0
Mg	24,32	solide	0,0
MgO	40,32	solide	143,84
$MgCl_2$	95,23	solide	153,4
$Mg\ F_2$	62,32	solide	263,5

Produto	MOL	Estado de référence	q_f Kcal/mo
Al	26,97	solide	0,0
			- 77,4(s
Al_2O_3	101,94	solide	399,09
			373,0 (liquide
Al_2O	69,94	gaz	31,66
AlO	48,97	gaz	- 45,3
Cl	35,455	gaz	- 29,012
Cl_2	70,91	gaz	0,0
ClH	36,465	gaz	22,083
F	19,00	gaz	- 18,30
F_2	38,00	gaz	0,0
FH	20,01	gaz	64,200
Li	6,94	solide	0
Li_2O	29,88	solide	142,4
Cl Li	42,10	solide	97,7
Li F	25,94	solide	146,3

Suponhamos que se tenha um propelente cuja fórmula bruta por Kg do mesmo seja:

$C_{22.840}\ H_{30,980}\ O_{35,130}\ N_{9,080}$ ..... $x = 22.840$; $y = 30.980$; $z = 35.130$; $u = 9.080$

a - Escolhendo-se uma temperatura $[T_p]_1 = 2700^oK$

na tabela de constantes de equilíbrio (tableau VI) para $[T_p]_1 =$ 2700^oK, $[K_o]_1 = 7,033$

b - $K_o = \dfrac{(x-a)(z-x-a)}{a\,(x+\frac{y}{2}+a-z)} = \dfrac{(22.84-a)(35.13-22.84-a)}{a\,(22.84+\frac{30.98}{2}+a-35.13)}$

$$7.033 = \frac{(22.84-a)(12.29-a)}{a\,(3.20+a)}$$

$$7.033\ a.(3.20+a) = 22.84 \times 12.29 - (22.84+12.29)\ a + a^2$$

$$22.5056\ a + 7.033\ a^2 = 280.7036 - 35.130\ a + a^2$$

$$6.033\ a^2 + 57.6356a - 280.7036 = 0$$

c - $$a = \frac{-57.6356 + \sqrt{57.63356^2 + 4 \times 6.033 \times 280.7036}}{2 \times 6.033} = 3.551$$

$a = 3.551$ moles de CO_2

$x - a = 19.289$ moles de CO

$\frac{u}{2} = \frac{9.08}{2} = 4.54$ moles de N_2

$z - x - a = 8.739$ moles de H_2O

$x + \frac{y}{2} - z + a = 6.751$ moles de H_2

d - Cálculo de $q_{/p}$ (calor de formação à pressão constante)

q_p = 637 g x 622 $\frac{cal}{g}$ (NC) + 234 g x 405 $\frac{cal}{g}$ (NGL) + 63 g x

x 1452,3 $\frac{cal}{g}$ (Plastif) + 17 g x (- 59,3 $\frac{cal}{g}$) (Estab) +

+ 28 g x 831,9 $\frac{cal}{g}$ (cat comb) + 21 g x (583,99 $\frac{cal}{g}$) (cat c

= q_p = 617.03 $\frac{cal}{g}$ de propelente

Cálculo de q_1 (uso do tableau II)

q_1 = 3,551 moles x 94,052 $\frac{Kcal}{mol.}$ + 19,289 moles x 26,413 + 4,54 moles x 0.0 + 8.739 moles x 68,303 + 6.751 moles x x 0.0 = 1440,36 cal/g de propelente

Cálculo de q_2 (uso do tableau IV)

q_2 = 3,551 x 31.9968 + 19,289 x 19.6896 + 4.54 x 19.532 +

+ 8.739 x 26.2704 + 6.751 x 18.5328 =

= q_2 = 936.78 cal/g de propelente

q_2 = 936.78 cal/g de propelente

e - $q_1 - q_p$ = 1440,36 - 617,03 = 823.33 cal/g de propelente

$q_2 \neq q_1 - q_p$, $q_2 > q_1 - q_p$ logo T_p deve baixar

2ª tentativa $T_p = 2300^0K$

.../

a - tableau VI $[T_p]_2 = 2300^o$ K , $[Ko]_2 = 5,870$

b - $5,870 = \dfrac{(22.84 - a)(12.29 - a)}{a\,(3,20 + a)}$

$5,870\ a\ (3,20 + a) = 280.7036 - 35.13\ a + a^2$

$(5,87 - 1)\ a^2 + (35.13 + 18.784)\ a - 280.7036 = 0$

$4.87\ a^2 + 53.914\ a - 280.7036 = 0$

$$a = \frac{-53.914 + \sqrt{2906.7194 + 4 \times 4.87 \times 280.704}}{2 \times 4.87} = 3.860$$

c - $a = 3.860$ moles de CO_2

$x - a = 18.980$ moles de C O

$\dfrac{u}{2} = 4.54$ moles de N_2

$z - x - a = 8.430$ moles de H_2O

$x + \dfrac{y}{2} - z + a = 7.060$ moles de H_2

d - $q_p = 617.03$ cal/g de propelente

cálculo de q_1 (tableau II)

$q_1 = 3,86 \times 94.052 + 18,98 \times 26,413 + 8,43 \times 68,303$

$q_1 = 1440,15$ cal/g de propelente

e - $q_1 - q_p = 1440,15 - 617.03 = 823.12$ cal/g de propelente

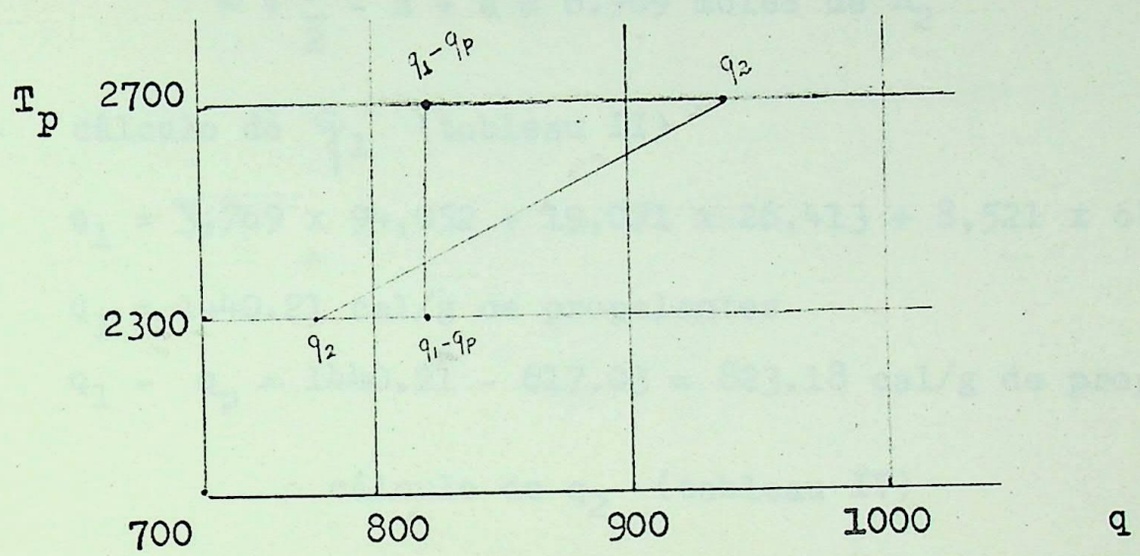
.../

calculo de $q_{/2}$ (tabelau IV)

$q_{/2} = 3,86 \times 26,158 + 18,98 \times 16,166 + 4,54 \times 16,008 +$

$+ 8,43 \times 21,118 + 7,06 \times 15,122 = 765.26$ cal/g propelente

ora $q_{/2} < q_{/1}$ - q_p logo T_p deve subir



3ª tentativa $T_p = 2400^oK$

$q_{/p} = 617.03$ cal/g de propelente

a - tableau VI $\left[T_p\right]_3 = 2400^oK$ $\left[Ko\right]_3 = 6,188$

b - $6.188 = \dfrac{(22.84 - a)(12.29 - a)}{a\,(3.20 + a)}$

$6,188\ a\ (3,20 + a) = 280.7036 - 35,13\ a + a^2$

$5,188\ a^2 + 54.9316\ a - 280.7036 = 0$

$a = \dfrac{-54.9316 + \sqrt{3017.4807 + 5825.1611}}{2 \times 5.188} = 3,769$

.../

c - a = 3,769 moles de CO_2

$x - a = 19,071$ moles de CO

$\frac{u}{2} = 4,54$ moles de N_2

$z - x - a = 8.521$ moles de H_2O

$x + \frac{y}{2} - z + a = 6.969$ moles de H_2

d - cálculo de q_1 (tableau II)

$q_1 = 3,769 \times 94,052 + 19,071 \times 26,413 + 8,521 \times 68,303$

$q_1 = 1440.21$ cal/g de propelentes

$q_1 - q_p = 1440.21 - 617.03 = 823.18$ cal/g de propelente

cálculo de q_2 (tableau IV)

$q_2 = 3,769$ (CO_2) $\times 27,6171 + 19,071$ (CO) $\times 17,0415 + 4,54 \times$

$\times 16,8798 + 8,521 \times 22,3881 + 6,969 \times 15,9642$

(N_2) (H_2O) (H_2)

$q_2 = 807.75$ cal/g de propelente

e - $q_2 = 807.75$ e $q_1 - q_p = 823.18$

logo T_p é um pouco maior que 2400°K

.../

9 - POTENCIAL APARENTE (Qa)

Seja um propelente de fórmula bruta $C_x H_y O_z N_u$ por grama teremos:

condições de sub oxigenação:

$$2x + \frac{y}{2} - z > 0$$

condições de sub carbonação:

$$z - x > 0$$

Essas duas condições são necessárias para que se estabeleça o equilíbrio do gás d'água

$$CO_2 + H_2 \rightleftharpoons CO + H_2O$$

$$K_o = \frac{(CO)\ (H_2O)}{(CO_2)\ (H_2)}$$

Calor de formação à 300ºK e a volume constante em cal/mole (Memorial des Poudres)	
$q\ CO_2$	94052,00
$q\ CO$	26711,00
q_{H_2O} liq	67409,00
$q_{CO_2} - q_{CO} - q_{H_2O}$ liq	- 68,00
$q_{CO} - q_{H_2O}$ liq	- 40698,00

.../

teremos que

$$12{,}011\,x + 1{,}008\,y + 16{,}0\,z + 14{,}007\,u = 1 \text{ grama}$$

$$C_x\ H_y\ O_z\ N_u \longrightarrow a\ CO_2 + (x - a)\ CO + \frac{u}{2}\ N_2 +$$

$$+ (z - x - a)\ H_2O + (x + \frac{y}{2} - z + a)\ H_2$$

Teremos que o Potencial aparente será

$$Q_a = a\ q_{CO_2} + (x - a)\ q_{co} + (z - x - a)\ q_{H_2O_{liq}} +$$

$$- Q_{FV} \text{ propelente}$$

$$Q_a = a\ (q_{co_2} - q_{co} - q_{H_2O\ liq}) + x(q_{co} - q_{H_2O\ liq}) +$$

$$+ z\ q_{H_2O\ liq} - Q_{FV} \text{ propelente}$$

$$Q_a = - 68\ a - 40698\,x + 67409\ z - Q_{FV} \text{ propelente}$$

$$Q_a = 67409\ z - 40698\,x - 68\ a - Q_{FV} \text{ propelente cal/g}$$

Mas o termo (- 68 a) é insignificante em presença dos demais pois representa aproximadamente 0,27% do outro termo subtrativo na faixa de temperaturas de combustão dos propelentes.

$$\frac{a\ (q_{co_2} - q_{co} - q_{H_2O\ liq})}{x(q_{co} - q_{H_2o\ liq})} \approx 0{,}0027$$

Assim despreza-se o termo (- 68 a) e teremos para o potencial aparente a seguinte expressão:

$$Q_a = 67409\ z - 40698\,x - Q_{FV} \text{ propelente calorias/g}$$

.../

10 - Para um propelente que contenha percloratos ou compostos do Fluor, ou ambos, podemos supor que o halogênio se combina preferencialmente com o hidrogênio, formando H CL ou/ e HF.

$$C_x \quad H_y \quad O_z \quad N_u \quad Cl_c \quad F_f$$

$$12{,}011\,x + 1{,}008\,y + 16\,z + 14{,}007\,u + 35{,}453\,c + 18{,}9984\,f = 1 \text{ grama}$$

condição de sub-oxigenação:

$$2x + \frac{(y - c - f)}{2} - z > 0$$

condição de sub-carbonação:

$$z - x > 0$$

$$C_x \quad H_y \quad O_z \quad N_u \quad Cl_c \quad F_f \longrightarrow a\,CO_2 + (x - a)\,CO + \frac{u}{2}\,N_2 + c\,HCL + f\,HF + (z - a - x)\,H_2O + \left(x + a - z + \frac{y}{2} - \frac{c}{2} - \frac{f}{2}\right) H_2$$

Teremos que o potencial aparente será:

$$Q_a = a\,q_{co_2} + (x - a)\,q_{co} + c\,q_{HCL} + f\,q_{HF} + (z - a - x)\,q_{H_2O\ liq} - (Q_{FV\ propelente}$$

Calor de formação à 300ºK e à volume em cal/gmole (Stanley F. Sarner)	
q_{HF}	64800.0
q_{HCL}	22063.0

.../

$$Q_a = a\,(q_{CO_2} - q_{CO} - q_{H_2O\ liq}) + x\,(q_{CO} - q_{H_2O\ liq}) +$$

$$+ z\,q_{H_2O\ liq} + c\,q_{HCL} + f\,q_{HF} - Q_{FV\ propelente}$$

$$Q_a = -68\,a - 40698\,x + 67409\,z + 22063\,c +$$

$$+ 64800\,f - Q_{FV\ propelente}$$

Conforme já visto anteriormente, podemos desprezar o termo - 68.a e teremos a expressão final para o potencial aparente:

$$Q_a = 67409\,z - 40698\,x + 22063\,c + 64800\,f - Q_{FV\ propelente}$$

cal/g

11 - Para um propelente que contenha pós metálicos (pó redutor como alumínio, magnésio, boro, berílio, lítio ou zirconio), podemos supor que o material vá se combinar preferencialmente com o oxigênio para formar um óxido superior. No caso de adição de alumínio

$$C_x\ H_y\ O_z\ N_u\ Al_{al}$$

$$12{,}011\,x + 1{,}008\,y + 16\,z + 14{,}007\,u + 26{,}9815\,(al) =$$

$$= 1 \text{ grama}$$

condição de sub-oxigenação:

$$2x + \frac{y}{2} - z + \frac{3}{2}\,(al) > 0$$

condição de sub-carbonação:

$$z - \frac{3}{2}\,(al) - x > 0$$

.../

$$C_x\ H_y\ O_z\ N_u\ AL_{al} \text{ ----- } a\ CO_2 + (x - a)\ CO + \frac{u}{2}\ N_2 +$$

$$+ \frac{al}{2}\ AL_2\ O_3 + (z - a - x - \frac{3}{2}\ al)\ H_2O + (\frac{y}{2} - z + a + x +$$

$$+ \frac{3}{2}\ al)\ H_2$$

Teremos que o potencial aparente será:

$$Q_a = a\ q_{CO_2} + (x - a)\ q_{CO} + \frac{al}{2}\ q_{AL_2\ O_3} + (z - a - x - \frac{3}{2}\ al)\ x$$

$$x\ q_{H_2O\ liq} - Q_{FV\ propelente}$$

Escola Federal - Biblioteca - Itaiubá - MATO GROSSO

Calor de Formação à 300°K e à volume constante em cal/g mole (STANLEY F. SARNER)	
$q_{AL_2O_3}$	400 400.0
q_{BeO}	143 100.0

$$Q_a = a\ (q_{CO_2} - q_{CO} - q_{H_2O\ liq}) + x\ (q_{CO} - q_{H_2O\ liq}) +$$

$$+ z\ q_{H_2O\ liq} + \frac{al}{2}\ (q_{AL_2O_3} - 3\ q_{H_2O\ liq}) - Q_{FV\ propelente}$$

$$Q_a = -\ 68.a - 40698\ x + 67409\ z + 99087\ al - Q_{FV\ propelente}$$

Finalmente, desprezando o termo - 68a teremos:

$$Q_a = 67409\ z - 40698\ x + 99087\ al - Q_{FV\ propelente}\ \ cal/g$$

.../

12 - No caso de Adição de Berílio

$$C_x \; H_y \; O_z \; N_u \; Be_{be}$$

$12.011\,x + 1.008\,y + 16\,z + 14.007\,u + 9{,}0122\,be = 1$ grama

Condição de sub-oxigenação:

$$2x + \frac{y}{2} - z + be \geq 0$$

Condição de sub-carbonação:

$$z - be - x \geq 0$$

$$C_x \; H_y \; O_z \; N_u \; Be_{be} \longrightarrow a\,CO_2 + (x - a)\,CO + \frac{u}{2}\,N_2 +$$

$$be\,Be\,O + (z - a - x - be)\,H_2O + \left(\frac{y}{2} - z + a + x + be\right) H_2$$

O potencial aparente será:

$$Q_a = a\,q_{f\,CO_2} + (x - a)\,q_{f\,CO} + be\,q_{f\,BeO} + (z - a - x - be)\,x$$

$$q_{f\,H_2O\ liq} - Q_{FV\ propelente}$$

$$Q_a = a\,(q_{f\,CO_2} - q_{f\,CO} - q_{f\,H_2O\ liq}) + x\,(q_{f\,CO} - q_{f\,H_2O\ liq}) +$$

$$+ z\,q_{f\,H_2O\ liq} + be\,(q_{f\,BeO} - q_{f\,H_2O\ liq}) - Q_{FV\ propelente}$$

$$Q_a = -68a - 40698\,x + 67409\,z + 75691\,be - Q_{FV\ propelente}$$

Finalmente, desprezando o termo - 68 a teremos:

$$Q_a = 67409\,z - 40698\,x + 75691\,be - Q_{FV\ propelente} \quad cal/g$$

.../

13 - Para um propelente de base dupla modificada, contendo Fluor, Cloro, Alumínio e Berílio, teremos:

$$C_x \; H_y \; O_z \; N_u \; CL_c \; F_f \; AL_{al} \; Be_{be}$$

$$12.011\,x + 1.008\,y + 16\,z + 14.007\,u + 35{,}453c + 18{,}9984\,f +$$

$$+ 26{,}9815\,al + 9{,}0122\,be = 1 \text{ grama}$$

Condição de sub-oxigenação:

$$2x + \frac{(y - c - f)}{2} + \frac{3}{2}(al) + (be) - z > 0$$

Condição de sub-carbonação:

$$z - \frac{3}{2}(al) - (be) - x > 0$$

$$C_x \; H_y \; O_z \; N_u \; CL_c \; F_f \; AL_{al} \; Be_{be} \longrightarrow a\,CO_2 + (x - a)\,CO +$$

$$+ \frac{u}{2} N_2 + cH\,CL + f\,HF + be\,BeO + \frac{al}{2} Al_2O_3 + (z - a - x +$$

$$- be - \frac{3}{2} al).\, H_2O + (\frac{y}{2} - z + a + x + be + \frac{3}{2} al - \frac{c}{2} - \frac{f}{2})\; H_2$$

O potencial aparente será:

$$Q_a = a\,q_{f\,CO_2} + (x - a)\,q_{f\,CO} + c\;q_{f\,HCl} + f\;q_{f\,HF} + be\;q_{f\,BeO} +$$

$$+ \frac{al}{2}\; q_{f\,Al_2O_3} + (z - a - x - be - \frac{3}{2} al)\; q_{f\,H_2O\ liq} +$$

$$- Q_{FV \text{ propelente}}$$

.../

$$Q_a = a\,(\,{}^{c}\!f_{CO_2} - {}^{c}\!f_{CO} - {}^{c}\!f_{H_2O\ liq}) + x\,(\,{}^{c}\!f_{CO} - {}^{c}\!f_{H_2O\ liq}) +$$

$$+ z\ {}^{c}\!f_{H_2O\ liq} + c\ {}^{c}\!f_{HCl} + f\ {}^{c}\!f_{HF} + be\,(\,{}^{c}\!f_{BeO} - {}^{c}\!f_{H_2O\ liq}) +$$

$$+ al\,\left(\frac{1}{2}\ {}^{c}\!f_{Al_2O_3} - \frac{3}{2}\ {}^{c}\!f_{H_2O\ liq}\right) - Q_{FV\ propelente}$$

$$Q_a = -\,68a - 40698\,x + 67409\,z + 22063\,c + 64800\,f +$$

$$+ 75691\,be + 99087\,al - Q_{FV\ propelente}$$

Desprezando o termo (- 68 a) teremos:

$$Q_a = 67409\,z - 40698\,x + 22063\,c + 64800\,f + 99087\,(al) +$$

$$+ 75691\,(be) - Q_{FV\ propelente} \quad cal/g$$

14 - O livro "Méthodes et appareils de mesure utilisés en balistique intérieure (E.N.S.A - France), de LOEUILLE, estabeleceu o método de cálculo das seguintes funções termodinâmicas: calor de formação, potencial aparente, potencial real, número de moléculas gasosas, número de moléculas de água, temperatura de combustão, força e relação entre os calores específicos médios em função das percentagens dos compostos químicos constitutivos da pólvora e de quantidades particulares à cada um desses elementos.

As determinações experimentais que serviram de base ao estabelecimento das equações, permitiram concluir que as funções citadas acima seguiam em suas variações, uma lei praticamente linear em relação à taxa de nitrogênio ativo da pólvora (grupo-NO_2).

Inicialmente as fórmulas foram apresentadas sob a forma

$X = a.\,(N) + \sum (K.C) + b$ onde (N) = taxa de nitrogênio ativo

.../

da pólvora (grupos NO_2), a e b são constantes que conservam os seu valores para quaisquer tipos de pólvoras consideradas e $\sum$ (KC) é o somatório dos produtos dos coeficientes K (tabelado) pelos teores percentuais dos constituintes da pólvora.

As equações L.C.A. são as seguintes:

CALOR DE FORMAÇÃO

$$Q_f = - 61,77.(N) + \sum (K_o.C) + 1391,4 \text{ Kcal/Kg}$$

POTENCIAL APARENTE

$$Q_a = 139,2.(N) + \sum (K_1.C) - 798 \text{ Kcal/Kg}$$

POTENCIAL REAL

$$Q_r = 132,85.(N) + \sum (K_2.C) - 813 \text{ Kcal/Kg}$$

NÚMERO DE MOLÉCULAS GASOSAS

$$N_T = - 2,184.(N) + \sum (K_3.C) + 67,92 \text{ moles}$$

NÚMERO DE MOLÉCULAS D'AGUA

$$n = 0,633.(N) + \sum (K_4.C) + 1,500 \text{ moles}$$

TEMPERATURA DE COMBUSTÃO

$$T_o = 436.(N) + \sum (K_5.C) - 2359 \ ^oK$$

FORÇA DA PÓLVORA

$$F = 101000.(N) + \sum (K_6.C) - 196000 \text{ decímetros}$$

RELAÇÃO ENTRE OS CALORES ESPECÍFICOS ENTRE 291 ^oK e T_o ^oK

$$\gamma = - 0,0147.(N) + \sum (K_7.C) + 1,453$$

Obs: Tabela e programa para computador a seguir:

NOME DO COMPOSTO	FÓRMULA	TEOR DE N_2 (%)
Nitroglicerina	$C_3H_5O_9N_3$	18,504
Nitroguanidina	$C\ H_4O_2N_4$	13,46
Dinitrato-dietileno glicol	$C_4H_8O_7N_2$	14,28
Dinitrato-trietileno glicol	$C_6H_{14}O_7N_2$	12,39
Dinitrobenzeno	$C_6H_4O_4N_2$	16,67
Dinitrotolueno	$C_7H_6O_4N_2$	15,38
Dinitrato de glicol	$C_2H_4O_6N_2$	18,42
Trinitrotolueno	$C_7H_5O_6N_3$	18,502
Nitrato de Potássio	KNO_3	13,86

COMPOSTOS	K_0	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7
Nitroglicerina	+ 1,28	- 0,034	- 0,31	+ 0,033	+ 0,029	+ 2,6	- 180	+ 0,000034
Dinitrato-Dietileno Glicol	- 0,007	- 1,14	- 1,23	+ 0,09	+ 0,010	- 6,6	- 282	+ 0,00033
Nitroguandina	- 3,71	- 3,47	- 3,32	+ 0,095	- 0,015	- 11,5	- 2070	+ 0,00053
Centralite	- 12,72	- 16,09	- 12,71	+ 0,365	+ 0,335	- 38,1	- 5910	+ 0,0030
Cânfora	- 9,15	- 18,65	- 15,43	+ 0,505	- 0,323	- 51,0	- 8110	+ 0,0032
Difenilamina	- 15,63	- 18,55	- 14,60	+ 0,384	- 0,40	- 41,0	- 6060	+ 0,0034
Álcool	+ 0,510	- 9,00	- 8,80	+ 0,404	- 0,015	- 36,1	- 3800	+ 0,0018
Éter	- 5,14	- 13,15	- 11,7	+ 0,534	- 0,14	- 45,0	- 4180	+ 0,0028
Vasolina	- 8,59	- 25,47	- 22,02	+ 0,79	- 0,34	- 76,8	- 10810	+ 0,0046
Sulfato de Potássio	+ 5,73	+ 9,50	+ 9,45	- 0,71	+ 0,005	+ 42,6	- 5600	- 0,0038
Água	+ 23,59	+ 8,25	+ 4,0	- 0,125	+ 0,42	+ 3,0	- 2400	- 0,0020
(Estearina) Matérias inertes	- 13,91	+ 8,09	+ 8,52	- 0,681	- 0,04	+ 35,5	- 6040	- 0,00399
Palatinol	- 6,70	- 12,47	- 10,85	+ 0,29	- 0,22	- 31,7	- 5040	+ 0,0022
Difenil-uretana	- 1,11	- 14,11	- 10,66	+ 0,27	- 0,31	- 29,7	- 4650	+ 0,0024
Etil-fenil-uretana	- 9,50	- 13,20	- 9,8	+ 0,30	- 0,24	- 27,8	- 3282	+ 0,0022
Dinitrotolueno	- 3,54	- 14,8	- 12,6	+ 0,26	- 0,22	- 38	- 8114	+ 0,0022
Grafite	- 13,91	- 25,5	- 19,95	+ 0.150	- 0,55	- 48,5	- 14160	+ 0,0036
Nitrato de Potássio	+ 6,36	+ 2,71	+ 2,60	- 0,38	+ 0,014	+ 25,0	- 1180	- 0,00095
Oxalato de NH_4	+ 7,53	+ 1,92	+ 0,57	- 0,10	+ 0,137	- 0,02	- 2560	- 0,00090
Hidrocelulose	+ 0,55	- 0,44	- 0,43	- 0,001	+ 0,0015	- 1,7	- 680	+ 0,000027

2 - PROGRAMA PARA FORMAR DE [illegible]

[illegible]

[illegible]

[

```
      WRITE(IPRNC,11)ASTER
11    FORMAT(/4(2X,5A1)
      WRITE(IPRNC,12)ASTER
12    FORMAT(/4(2X,1H*,14X,2(5A1,4X,1H*)
      TEOR=PERCT*TEON/100.
      DO 66 J=1,NCOMP
      READ(LCARD,6)IDENT(J),PERCT(J),TEON(J)
66    FORMAT(I2,3X,2F10.2)
      DO 44 J=1,NCOMP
      TEOR=TEOR+TEON(J)*PERCT(J)/100.
44    CONTINUE
      SOMA0=-51.77*TEOR +1391.4
      SOMA1=133.2*TEOR -798.0
      SOMA2=132.95*TEOR -813.6
      SOMA3=-2.184*TEOR +67.92
      SOMA4=0.003*TEOR +1.50
      SOMA5=43.4*TEOR -2559.
      SOMA6=1010.07.*TEOR -196000.
      SOMA7=-0.147*TEOR+1.453
      DO 45 I=1,NCOMP
      SOMA0=SOMA0+A0(IDENT(I))*PERCT(I)
      SOMA1=SOMA1+A1(IDENT(I))*PERCT(I)
      SOMA2=SOMA2+A2(IDENT(I))*PERCT(I)
      SOMA3=SOMA3+A3(IDENT(I))*PERCT(I)
      SOMA4=SOMA4+A4(IDENT(I))*PERCT(I)
      SOMA5=SOMA5+A5(IDENT(I))*PERCT(I)
      SOMA6=SOMA6+A6(IDENT(I))*PERCT(I)
      SOMA7=SOMA7+A7(IDENT(I))*PERCT(I)
45    CONTINUE
      WRITE(IPRNC,10)
10    FORMAT(////)
      WRITE(IPRNC,2001)
2001  FORMAT(///,20X,'COMPOSICAO DA POLVORA',10X,'PERCENTAGEM',10X,'TEOR DE N
     &ITROGENIO'///)
      WRITE(IPRNC,13)F1X,PERLC,TNAMC
13    FORMAT(27X,A4,22X,F6.3,16X,F6.3)
      DO 88 N=1,NCOMP
      IDEN=IDENT(N)
      WRITE(IPRNC,14)ASSOC(IDEN),PERCT(N),TEON(N)
14    FORMAT(27X,A4,22X,F6.3,16X,F6.3)
88    CONTINUE
      WRITE(IPRNC,15)
15    FORMAT(////4X,'FUNCOES TERMODINAMICAS DA POLVORA'////)
      WRITE(IPRNC,999)SOMA0,SOMA1,SOMA2,SOMA3,SOMA4,SOMA5
999   FORMAT(10X,17HCALOR DE FORMACAO,31(1H-),F12.3,12H      KCAL/KG/
     110X,16HPOTENCIAL APARENTE,30(1H-),F12.3,12H      KCAL/KG/
     210X,14HPOTENCIAL REAL,34(1H-),F12.3,12H      KCAL/KG/
     310X,17HMOLECULAS GASOSAS,31(1H-),F12.2,12H      MOLES/
     410X,17HMOLECULAS DE AGUA,31(1H-),F12.2,12H      MOLES/
     510X,11HTEMPERATURA,37(1H-),F12.2,12HGRAUS KELVIN)
      WRITE(IPRNC,1000)SOMA6,SOMA7
1000  FORMAT(10X,5HFORCA,43(1H-),F12.2,13H   DECIMETROS/
     110X,4HGAMA,44(1H-),F12.5)
      WRITE(IPRNC,16)TEOR
16    FORMAT(/10X'TEOR DE NITROGENIO ='F6.3)
      STOP
      END
```

FEHLERFREI

ERNSPEICHERBEDARF: 1519 ZELLEN OHNE COMMON

14.3 - PROGRAMA PARA POLVORA DE BASE DUPLA SEM SOLVENTE

```
TR 66 FORTRAN COMPILER HV09(70)  24.975      FORA.

C
C
C
```

SEITE 2

```
      TANC=T    C- .20
      TEON=PE   C*TANC/100.
      DO 66 J=1,NC  P
   66 CALL(LC  ,20)IDE  T(J),PE CT(J),TEON(J)
    6 FORMAT(I  ,A,2F1  .2)
      DO 44 J=1, C  P
      TE  =TE    +TEO (J)*PE CT(J)/100.
   44 CONTI UE
      SOMA0=-  .77*TE    +1391.4
      SOMA1=13 .2*T      -794.
      SOMA2=13 .5*T      -313.0
      SOMA3=-2.1 4*T     +57.92
      SOMA4=   .  3*T    +1.50
      SOMA5=48 .*TE      -2359.
      SOMA6=1 0 .0.*TE   -196000.
      SOMA7=-  . 147*TE  +1.453
      DO 45 I=1,NC  P
      X=PE C T(I)
        =IDE  T(I)
      SOMA =SOMA +X  (I)*X
      SOMA1=SOMA1+X  (I)*X
      SOMA2=SOMA2+X  (I)*X
      SOMA3=SOMA3+X  (I)*X
      SOMA4=SOMA4+X  (I)*X
      SOMA5=SOMA5+X  (I)*X
      SOMA6=SOMA6+X  (I)*X
      SOMA7=SOMA7+X  (I)*X
   45 CONTINUE
      WRITE(I  ,  C,10)
   10 FORMAT(////)
      WRITE(I  ,  C,2001)
 2001 FORMAT(///,2 X,'COMPOSICAO DA POLVORA',10X,'PERCENTAGEM',10X,'TEOR DE N
     &ITROGENIO',//)
      WRITE(I  ,  C,10)FIX,PERC,TNANC
    3 FORMAT(27X,A4,22X,F6.3,10X,F6.3)
      DO 3  I=1,NC  P
      IDEN=IDE  T(I)
      WRITE(I  ,  C,14)ASSOC(IDEN),PE CT(I),TEON(I)
    4 FORMAT(27X,A4,22X,F6.3,10X,F6.3)
    8 CONTI UE
      WRITE(I  ,  C,15)
   15 FORMAT(///,44X,'PROPRIEDADES TERMODINAMICAS DA POLVORA',////)
      WRITE(I  ,  C,999)SOMA0,SOMA1,SOMA2,SOMA3,SOMA4,SOMA5
  999 FORMAT(1H ,17HCALOR DE FORMACAO,31(1H-),F12.3,12H          KCAL/KG/,
     &/1X,19HCALOR ESPECIAL A PRESSAO,29(1H-),F12.3,12H          KCAL/KG/
     &/1X,14HCALOR ESPECIAL REAL,34(1H-),F12.3,12H          KCAL/KG/
     &/1X,17HMASSA ESPECIFICA DOS GASES,31(1H-),F12.2,12H          MOLES/
     &/1X,17HMASSA ESPECIFICA DE AGUA,31(1H-),F12.2,12H          MOLES/
     &/1X,11HTEMPERATURA,37(1H-),F12.2,12HGRAUS KELVIN)
      WRITE(I  ,  C,1000)SOMA6,SOMA7
 1000 FORMAT(10X,5HENERGIA,43(1H-),F12.2,13H   DECIMETROS/
     &1X,4HGAMA,44(1H-),F12.5)
      CALCULO DA VELOCIDADE DE COMBUSTAO
      KAPA=(SOMA1)/1000.0
      TETA1=-1.220+ .230*(KAPA)
      TETA2=0.4 8+ .24*(KAPA)
      VCB0=EXP(TETA1)*70 .0**(TETA2)
      VCB1=EXP(TETA1)*150.0**(TETA2)
      VCB2=EXP(TETA1)*3  0.0**(TETA2)
      WRITE(I  ,  C,2  03)VCB0,VCB1,VCB2
 2003 FORMAT(10X'VELOCIDADE DE COMBUSTAO A   70 KG/CM2=',F10.3,'MM/SEG'//
```

SEITE 3

```
      WELOCIDADE DE COMBUSTAO A  150 KG/CM2=!F10.3,!M/SEG!//
      WELOCIDADE DE COMBUSTAO A  300 KG/CM2=!F10.3,!M/SEG!)
      TA2=1.27+1.S*(KAPPA)
      TA4=1.-1.2*(KAPPA)
      B=EXP(-(TETA/
      B=EXP(-(TETA/
      B=EXP(-(TETA/
      B=EXP(-(TETA/
      B=EXP(-(TETA/
      B=EXP(-(TETA/
      IT(I,2),I=1,4),CB3,CB4,VC05,VC06,VC07,VC0
      FORMAT(1X,'VELOCIDADE DE COMBUSTAO A   000 KG/CM2=!F10.2,!M/SEG!//
      WELOCIDADE DE COMBUSTAO A 1500 KG/CM2=!F10.3,!M/SEG!//
      WELOCIDADE DE COMBUSTAO A 2000 KG/CM2=!F10.3,!M/SEG!//
      WELOCIDADE DE COMBUSTAO A 2500 KG/CM2=!F10.3,!M/SEG!//
      WELOCIDADE DE COMBUSTAO A 3000 KG/CM2=!F10.3,!M/SEG!)
      IT(I,2),I=5,10)TEOR
16    FORMAT(/1X'TEOR DE NITROGENIO =!F6.3)
      STOP
      END
```

FEHLERFREI

SPEICHERBEDARF: 1937 ZELLEN OHNE COMMON

14.4

```
AGE    1      NC21   ,A

/ JOB T                                                    NC21   ,A

DG DRIVE    CART SPEC    CART AVAIL   PHY DRIVE
 0000         3000          3000         0000

2 M09    ACTUAL 32K  CONFIG 32K

/ FOR
IOCS(CARD,1403 PRINTER)
LIST SOURCE PROGRAM
EXTENDED PRECISION
      DETERMINACAO DAS PROPRIEDADES TERMODINAMICAS DE UMA POLVORA


      DIMENSION CAL(20,11),DEL(8,8),T(3),TA(3)
      WRITE(5,999)
      READ(2,1)((CAL(I,J),J=1,11),I=1,20)
      DO 60 N=1,4
      GO TO(910,920,930,940),N
910   WRITE(5,210)
      GO TO 88
920   WRITE(5,220)
      GO TO 88
930   WRITE(5,250)
      WRITE(5,230)
      GO TO 88
940   WRITE(5,240)
88    READ(2,70)XNC,((DEL(I,J),J=1,8),I=1,8)
      DT=200.
      PNG=18.504*DEL(2,5)
      PNC=XNC*DEL(1,5)
      SIG=0.
      DO 50 I=1,6
      PIG=DEL(I,5)*DEL(I,7)*100.
50    SIG=SIG+PIG
      T(1)=436.*(PNG+PNC)+SIG-2359.
      DO 4 I=1,60
      IF(T(1)-100.*I)2,3,4
2     IF((T(1)-(I-1)*100.)-(100.*I-T(1)))5,5,6
3     T(1)=T(1)
      GO TO 7
4     CONTINUE
5     T(1)=(I-1)*100.
      GO TO 7
6     T(1)=100.*I
7     C=0.
      H=0.
      O=0.
      XN=0.
      DO 8 J=1,4
      DO 8 I=1,8
      Q=0.
      P=DEL(I,J)*DEL(I,5)*1000./DEL(I,6)
      Q=Q+P
      GO TO(9,10,11,12),J
9     C=C+Q
      GO TO 8
10    H=H+Q
```

```
  2     NC21   ,A
 GO TO 8
 O=O+Q
 GO TO 8
 XN=XN+Q
 CONTINUE
 DO 30 L=1,3
 XLK=2.3026*(-2245./T(L)-.2783*ALOG(T(L))/2.3026-9.81E-5*T(L)+2.965
13)
 XK=EXP(XLK)
 A=XK-1.
 B=O-2.*C-XK*H/2.-XK*O+XK*C
 CC=(XK/2.)*(O*H-C*H)
 U1=-B/(2.*A)
 U2=-(SQRT(B**2-4.*A*CC)/(2.*A))
 U=U1+U2
 IF(U)13,14,15
 U=U1-U2
 GO TO 16
 GO TO 110
 U=U
 X=O-C-U
 Y=H/2.-U
 Z=2.*C-O+U
 V=XN/2.
 CO2=94.5*X
 CO=27.2*Z
 H2O=67.5*U
 CF=CO2+CO+H2O
 QF=0.
 DO 17 I=1,8
 P=DEL(I,8)*DEL(I,5)
 QF=QF+P
 QA=CF-QF
 QR=QA-10.*U
 IF(L-3)18,19,20
 DO 24 I=1,20
 GO TO 21
 IF(F-100.)30,18,30
 GO TO 110
 IF(T(L)-CAL(I,1))22,23,24
 GO TO 110
 CV=(X*CAL(I,2)+Z*CAL(I,4)+Y*CAL(I,6)+U*CAL(I,8)+V*CAL(I,10))/1000.
 GO TO 38
 CONTINUE
 CP=(X*CAL(I,3)+Z*CAL(I,5)+Y*CAL(I,7)+U*CAL(I,9)+V*CAL(I,11))/1000.
 TA(L)=QR/CV+291.
 GO TO(25,26,47),L
 IF(TA(1)-T(1))27,28,29
 T(2)=T(1)-DT
 GO TO 30
 T(3)=T(1)
 GO TO 37
 T(2)=T(1)+DT
 GO TO 30
 D=ABS(TA(2)-T(2))
 E=ABS(TA(1)-T(1))
 F=DT*E/(D+E)
 IF(T(2)-T(1))31,32,33
 T(3)=T(1)-F
```

```
 3     NC21   ,A

GO TO 30
GO TO 110
T(3)=T(1)+F
CONTINUE
GO TO 40
WRITE(5,39)TA(3)
GO TO 37
DO 36 I=1,20
IF(T(3)-CAL(I,1))34,35,36
CV1=(X*CAL(I-1,2)+Z*CAL(I-1,4)+Y*CAL(I-1,6)+U*CAL(I-1,8)+
V*CAL(I-1,10))/1000.
CV2=(X*CAL(I,2)+Z*CAL(I,4)+Y*CAL(I,6)+U*CAL(I,8)+V*CAL(I,10))/
1000.
CP1=(X*CAL(I-1,3)+Z*CAL(I-1,5)+Y*CAL(I-1,7)+U*CAL(I-1,9)+
V*CAL(I-1,11))/1000.
CP2=(X*CAL(I,3)+Z*CAL(I,5)+Y*CAL(I,7)+U*CAL(I,9)+V*CAL(I,11))/
1000.
CV=CV1+((CV2-CV1)/100.)*(T(3)-CAL(I-1,1))
CP=CP1+((CP2-CP1)/100.)*(T(3)-CAL(I-1,1))
GO TO 37
GO TO 110
CONTINUE
GAMA=CP/CV
YNM=X+Z+Y+V+U
EFE=103.33*22.4*YNM*T(3)/273.
XX=X*100./YNM
ZZ=Z*100./YNM
YY=Y*100./YNM
UU=U*100./YNM
VV=V*100./YNM
WRITE(5,90)XNC
WRITE(5,100)QF,QA,QR,CV,CP,GAMA,EFE
WRITE(5,101) T(3),YNM,U,XX,ZZ,YY,VV,UU
GO TO 60
WRITE(5,120)
CONTINUE
FORMAT(11F7.1)
FORMAT(10X,33HTEMPERATURA OBTIDA ATRAVES DE CV=,F8.2)
FORMAT(F10.1/(8F10.1))
FORMAT(10X,18HTEOR DE NITROGENIO,30(1H-),F12.3)
FORMAT(10X,17HCALOR DE FORMACAO,31(1H-),F12.3,12H     KCAL/KG,/,
10X,18HPOTENCIAL APARENTE,30(1H-),F12.3,12H     KCAL/KG,/,
10X,14HPOTENCIAL REAL,34(1H-),F12.3,12H     KCAL/KG,/,
10X,2HCV,46(1H-),F12.6,12H       CAL/G,/,10X,2HCP,46(1H-),F12.6,
12H       CAL/G,/,10X,33HRELACAO ENTRE CALORES ESPECIFICOS,15(1H-)
,F12.5,/,10X,5HFORCA,43(1H-),F12.3,12H           DM)
FORMAT(10X,11HTEMPERATURA,
     37(1H-),F12.2, 12HGRAUS KELVIN,/,10X,17HMOLECULAS GASOSAS,
31(1H-),F12.2,/,10X,17HMOLECULAS DE AGUA,31(1H-),F12.2,/,10X,12HPE
RCENTAGENS,/,10X,3HCO2,45(1H-),F12.2,/,10X,2HCO,46(1H-),F12.2,/,
10X,2HH2,46(1H-),F12.2,/,10X,2HN2,46(1H-),F12.2,/,10X,3HH2O,45(1H-
),F12.2,///)
FORMAT(10X,68HPROGRAMA DESCONTINUADO POR N&O OBEDECER AS CONDI&ES
 DE CONVERGENCIA,)
FORMAT(10X,27HPOLVORA              (BD 601),///)
FORMAT(10X,27HPOLVORA              (BD 601),///)
FORMAT(10X,27HPOLVORA              (BD 601),///)
FORMAT(10X,27HPOLVORA              (BD 601),///)
FORMAT(1H1)
```

```
 4      NC21   ,A

FORMAT(10X,35H                                          ,/////)
STOP
END

RENCED STATEMENTS


ES SUPPORTED
DED PRECISION


EQUIREMENTS FOR
N       0  VARIABLES   1054  PROGRAM   2112

 COMPILATION
```

15 - Em trabalho publicado no "Mémorial des Poudres", o balístico Francês PAUL TAVERNIER estabeleceu correlações lineares que permitem determinar as funções termodinâmicas das pólvoras de base simples e das pólvoras de base dupla, a partir do conhecimento do potencial aparente (Q_a) de valor experimehtal obtido na bomba calorimétrica.

Procurando simplificar a determinação das funções o autor estabeleceu as seguintes equações:

$$T_v = T^* + k_o Q_a \qquad {}^oK$$

$$C_v = C^* + k_1 Q_a \qquad Kcal/Kg\ {}^oK$$

$$Q_r = Q^* + k_2 Q_a \qquad Kcal/Kg$$

A tabela IV do trabalho, fornece os valores das constantes T^*, k_o, C^*, k_1, Q^* e k_2

TABELA IV

Q_a Kcal/Kg	T^*	Ko	C^*	K_1	Q^*	k_2	composi conside
> 1100	180	2,971	0,291	$2,02x10^{-5}$	-100	0,988	
900 a 1100	527	2,667	0,283	$2,93x10^{-5}$	- 23	0,928	
700 a 900	465	2,722	0,301	$1,00x10^{-5}$	+ 40	0,858	
< 700	452	2,724	0,290	$2,85x10^{-5}$	+ 21	0,879	
Valor médio 500 - 1300	428	2,768	0,298	$1,44x10^{-5}$	8	0,896	(86)
500 - 1300	423	2,767	0,297	$1,51x10^{-5}$	5	0,897	(194)

Estas constantes foram estabelecidas a partir da observação de mais de duas centenas de composições diversas de BS e BD, e constituem uma valiosa contribuição na solução dos problemas de balística interna bastando, para o cálculo das funções termodinâmicas apenas o conhecimento de Q_a.

.../

Pode-se, em geral, adotar as expressões lineares seguintes:

$$T_v = 423 + 2{,}767\ Q_a \quad {}^oK$$

$$C_v = 0{,}297 + 1{,}51 \times 10^{-5}\ Q_a \quad Kcal/Kg\,{}^oK$$

$$Q_r = 5 + 0{,}897 \cdot Q_a \quad Kcal/Kg$$

O trabalho faz referência ainda ao coeficiente de expansão isentrópica e da força.

$$\gamma = 1{,}3425 - 0{,}1099 \cdot \frac{Q_a}{1000}$$

$$F = 537225 + 566{,}084 \cdot Q_a \quad dm$$

16 - No manual "Simple Calculation of Thermochemical Properties for Use in Ballistics, NDRC A-101, OSRD 935", J.O Hirschfelder e J.Sherman propuseram um método para cálculo de Q através constantes aditivas (Q_i) que são definidas como as contribuições individuais dos ingredientes I ao calor de explosão dos propelentes que as contém. Os cálculos de HIRSCHFELDER_SHERMAN tomam como referência a temperatura de 2500°K. O calor de explosão, Q, do propelente difere do calor necessário para trazer os produtos de combustão à 2500 °K por uma quantidade E, que pode também ser calculada de constantes aditicas (E_i) as quais são propriedades intrínsicas dos ingredientes I.

Finalmente, o calor específico dos produtos de combustão a 2500 °K é estimado a partir de constantes aditivas C_{vi} que são também propriedades intrínsicas dos ingredientes I.

Esses calores específicos são considerados constantes no intervalo 2000°K a 3000°K. A temperatura de combustão a volume constante, T_v, é então dada pela equação:

$$T_v = 2500 + \frac{E}{C_v} \quad {}^oK$$

.../

O volume específico do gás de combustão, $\frac{1}{M}$, é calculado pela equação:

$$\left(\frac{1}{M}\right)_i = Ci + \frac{1}{2} Ni + \frac{1}{2} Hi = x + \frac{1}{2} (y + u)$$

e estão tabelados na Tabela 2 anexa. O desenvolvimento para se chegar à equação é o seguinte:

$$\Sigma C = [CO_2] + [CO]$$

$$\Sigma H = 2 [H_2] + 2 [H_2O] + [HCl]$$

$$\Sigma N = 2 [N_2]$$

$$\Sigma Cl = [HCl]$$

$$\Sigma O = [CO] + 2 [CO_2] + [H_2O]$$

$$[CO_2] + [CO] + [H_2] + [H_2O] + [N_2] + [HCl] = \frac{1}{M}$$

$$\frac{1}{M} = \Sigma C + \frac{1}{2} \Sigma N + \frac{1}{2} \Sigma H + \frac{1}{2} \Sigma Cl$$

onde ΣC é o número total de átomos grama de carbono na unidade de peso (massa) do propelente e $[CO_2]$ é o peso (massa) dos moles de CO_2 no gás de combustão por unidade de peso do propelente.

Se X_i é a percentagem em peso do ingrediente I na composição do propelente e C_i o peso dos átomos gramas de carbono na unidade de peso do ingrediente I, então

$$\Sigma C = \Sigma (X_i \, C_i)$$

Os ΣH, ΣN etc são calculados da mesma maneira.

Exemplo: Acetona $H_3C - CO - CH_3$ ou $C_3 H_6 O_1 N_0$ para 1 grama de acetona teremos:

C	H	O	N
0.05165	0.10330	0.01722	0.0

$$\left(\frac{1}{M}\right) \text{acetona} = 0.05165 + \frac{1}{2} \times 0 + \frac{1}{2} \times 0.010330 = 0.10330$$

.../

A força específica F é dada pela seguinte equação:

$F = \frac{\overline{R} \cdot T_v}{M}$; e mede a capacidade do propelente em executar trabalho.

$\overline{R}$ = constante universal molar dos gases = 847,7 m. Kg /Kgmol ^oK

$\overline{M}$ = massa molecular média dos gases de combustão

Se a temperatura de combustão a volume constante, T_v, for superior a 3000 ^oK, uma melhor aproximação será dada pela expressão:

$$T_v = 3000 + 6046\left\{ - (C_v + 0{,}01185) + \left[(C_v + 0{,}01185)^2 + \right.\right.$$
$$\left.\left. + 3{,}308 \times 10^{-4} \times (E - 500\, C_v) \right] ^{1/2} \right\}$$

A temperatura a pressão constante, T_p e a relação entre os calores específicos γ, na temperatura de combustão, são dados pelas equações:

$$\gamma = 1 + \frac{1{,}987}{C_v . M}$$

$$T_p = \frac{T_v}{\gamma}$$

A velocidade crítica v^*, na garganta da tubeira, pode ser computada das propriedades termodinâmicas dos gases e é dada por

$$v^* = \sqrt{\frac{g . \bar{R} . T_p}{\gamma . M}} \cdot \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right) ^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}$$

$\bar{R}$ = 847,7 metro - Kgf/Kgmol ^oK

$\bar{R}$ = 1,986 cal/$_{^oKgmol}$

.../

O impulso específico, I esp, é definido como o impulso (força x tempo) gerado pela queima de uma unidade de peso do propelente na câmara de combustão do foguete. É dado pela seguinte equação:

$$I_{esp} = \sqrt{\frac{2.\gamma \,.\, \bar{R}.T_p}{g.M(\gamma - 1)} \left[1 - \left(\frac{pa}{po} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]}$$

p_a = pressão atmosférica

p_o = pressão na câmara $\cong$ 70 bar

Esta equação considera o semi-ângulo de expansão da tubeira, α , igual a zero.

As constantes tabeladas na tabela 2 foram estimadas pelas seguintes expressões:

$$C_x \; H_y \; O_z \; N_u$$

$$\left(\frac{1}{M}\right)_i = C_i + \frac{1}{2} N_i + \frac{1}{2} H_i = x + \frac{1}{2}(y + u)$$

$$C_{v_i} = 1{,}620\, C_i + 3{,}265\, H_i + 5{,}193\, O_i + 3{,}384\, N_i$$

$$Q_i = (-\Delta E)_i - 67421 \left[2\, C_i + \frac{1}{2} H_i - O_i \right]$$

$$E_i = (-\Delta E)_i - 132771\, C_i - 40026\, H_i + 51819\, O_i - 6724\, N_i$$

$$C_{v_i} = 1{,}620\, x + 3{,}265\, y + 5{,}193\, z + 3{,}384\, u$$

$$Q_i = (-\Delta E)_i - 67421 \left[2x + 0.5\, y - z \right]$$

$$E_i = (-\Delta E)_i - 132771\, x - 40026\, y + 51819\, z - 6724\, u$$

onde $(-\Delta E)_i$ é o calor de combustão do ingrediente I.

Essas equações não devem ser usadas para propelentes com $T_v > 4000^{o}K$ e não servem para combustão com dissociação (instabilidade térmica) em radicais livres, tais como H., .OH e CL.

.../

16.1 - Exemplo: Para o propelente de base dupla com a composição 20 abaixo, calcular a força específica, velocidade na garganta, e impulso específico pelo método de HIRSCHFELDER_SHERMAN

Composição 20	% peso
Nitrocelulose 12.60 % N	50
Nitroglicerina	49
Etil centralite	1

Etil centralite $C_{17} H_{20} O N_2$

Mol= 268.361 ; para 1 grama $x = 0.063348$

$y = 0.074526$

$z = 0.003726$

$u = 0.007453$

$$Q_i = - (- 8391) - 67421 \left[2x + 0.5 y - z \right] = - 2412$$

$$C_{v_i} = 1.620 x + 3.265 y + 5.193 z + 3.384 u = 0.390522$$

$$(\Delta E)_{\text{centralite}} = - 8391 \text{ cal/g}$$

Ingredientes I	Fração peso Xi	Q_i	$x_i Q_i$	C_{v_i}	$x_i C_{vi}$
NC	0.50	956	478.00	0.3454	0.1727
NG	0.49	1785	874.65	0.3438	0.1685
CENT	0.01	-2412	-24.12	0.3905	0.0039
SOMA			1328.53		0.3451

.../

Ingredientes I	E_i	$x_i E_i$	$\left(\frac{1}{M}\right)_i$	$x_i \left(\frac{1}{M}\right)_i$
NC	198.9	99.45	0.04040	0.02020
NG	951.9	466.43	0.03082	0.01510
CENT	-. 2766	-27.66	0.104334	0.00104
SOMA		538.22		0.03635

- Temperatura de combustão a volume constante

$$T_v = 2500 + \frac{E}{C_v} = 2500 + \frac{538.22}{0.3451} = 4059.6\ ^oK$$

como $T_v > 3000\ ^oK$

$$T_v = 3000 + 6046 \left\{ - (C_v + 0.01185) + \left[(C_v + 0.01185)^2 + 3{,}308 \times 10^{-4} (E - 500\ C_v) \right]^{1/2} \right\}$$

$$T_v = 3000 + 6046 \left\{ - (0.3451 + 0.01185) + \left[(0.3451 + 0.01185)^2 + 3.308 \times 10^{-4} (538.22 - 500 \times 0.3451) \right]^{1/2} \right\}$$

$$T_v = 3855{,}05\ ^oK$$

- Força específica

$$F = \frac{\bar{R} \cdot T_v}{M} = 847{,}7\ \frac{m.\ Kgf}{KGMOL\ ^oK} \cdot 3855{,}05\ ^oK \times 0{,}03635 \frac{Kgmoles}{Kg}$$

$$F = 118\ 789{,}11 \text{ metros } \frac{Kgf}{Kg}$$

- Relação entre calores específicos

$$\gamma = 1 + \frac{1.987}{C_v . M} = 1 + \frac{1.987 \times 0.03635}{0{,}3451} = 1{,}2093$$

.../

- Temperatura de combustão a Pressão constante

$$T_p = \frac{T_v}{\gamma} = \frac{3855,05\ ^oK}{1,2093} = 3187,85\ ^oK$$

- Velocidade crítica v^*

$$v^* = \sqrt{\frac{g.\bar{R}\,T_p}{\gamma.M}} \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

$$v^* = \sqrt{\frac{9.81 \times 847.7 \times 3187.85 \times 0.03635}{1.2093}} \cdot \left(\frac{2.2093}{2}\right)^{\frac{2.2093}{2x0.2093}}$$

$$v^* = 1509,4626\ m/seg$$

- Impulso específico

$$I_{esp} = \sqrt{\frac{2.\gamma.\bar{R}.T_p}{g.M.(\gamma-1)} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_o}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}$$

$$I_{esp} = \sqrt{\frac{2 \times 1.2093 \times 847.7 \times 3187.85 \times 0.03635}{9.81 \times 0.2093} \left[1 - \left(\frac{1}{70}\right)^{\frac{0.209}{1.209}}\right.}$$

$$I_{esp} = 245,4456\ \frac{kgf.sec}{Kg}$$

Obs: Tabela a seguir

16.2 - Tabela 2 - HIRSCHFELDER-SHERMAN

	Q_i	C_{v_i}	E_i	$\left(\frac{1}{M}\right)_i$
Acetone	−1938	0.5104	−2842.5	0.10331
Ammonium dichromate	1290	0.2700	610	0.0200
Ammonium nitrate	1450	0.4424	405.1	0.03748
Ammonium perchlorate	1603	0.3167	800.22	0.2128
Ammonium picrate	539	0.3213	−117	0.04470
Asphalt	−2302	0.2179	−2305	0.09450
Bd-MVP copolymer (90% butadiene, 10% 2-methyl-5-vinylpyridine copolymer)	−2741	0.4132	−3183	0.11544
Butyl carbitol adipate	−1836	0.4923	−2629	0.09899
Butyl carbitol formal	−1802	0.5229	−2652	0.10403
Carbon black	−3330	0.1349	−3187.5	0.08326
Cellulose acetate	−1263	0.3953	−1971	0.06929
Diallyl maleate	−1358	0.3872	−1957	0.08155
Di-*n*-butyl phthalate	−2071	0.4258	−2656	0.09701
Dibutyl sebacate	−2395	0.5108	−3159	0.1113
Di-(2-ethylhexyl) azelate	−2612	0.5272	−2272	0.11876
Diethyl phthalate	−1760	0.3866	−2348.7	0.08550
Diglycol dinitrate	1073	0.3857	232.4	0.04589
Dinitrophenoxyethanol	-15	0.3369	−633.4	0.05698
Dioctyl phthalate	−2372	0.4650	−3020	0.11026
Diphenylamine	−2684	0.3471	−3010	0.10637
Diphenylguanidine	−2270	0.3476	−2626	0.09941
Ether	−2007	0.5970	−2958	0.12143
Ethyl alcohol	−1716	0.6083	−2785	0.10854
Ethyl centralite	−2412	0.3905	−2766	0.10434
Graphite	−3370	0.1349	−3234	0.08326
GR-I rubber	−3257	0.5779	−4006	0.14235
HMX, Cyclotetramethylenetetranitramine	1321	0.3414	575	0.0405
Lead stearate	−2000	0.3976	−2440	0.09180
M & V	−1827	0.3976	−2440	0.09180
N-Methyl-*p*-nitroaniline	−1095	0.35808	−1625	0.07887
Metriol trinitrate	1189	0.3052	377	0.04313
Mineral jelly	−3302	0.5811	−475	0.1426
Nitrocellulose, 12.2% N	900	0.3478	137.7	0.04127
Nitrocellulose, 12.6% N	956	0.3454	198.9	0.04040
Nitrocellulose, 13.15% N	1033	0.3421	283.1	0.03920

	Q_i	C_{v_i}	E_i	$\left(\frac{1}{M}\right)_i$
2-Nitrodiphenylamine	−1813	0.3226	−2201	0.08411
Nitroglycerin	1785	0.3438	951.9	0.03082
Nitroguanidine	713	0.3710	−68.6	0.04808
PETN, Pentaerythritol tetranitrate	1531	0.3424	727	0.0348
Petrin	1202	0.3703	374	0.04109
Polyester	−2184	0.3552	−2620	0.09123
Polyisobutene	−3228	0.5798	−3981	0.14259
Poly (methyl acrylate)	−1404	0.4231	−2111	0.08140
Polystyrene	−2983	0.3739	−3309	0.11523
Polyurethane	−3296	0.4073	−3773	0.10796
Poly(vinyl chloride)	−1614	0.2080	−1851	0.05600
Potassium nitrate	1434	0.2158	24.9	0.00989
Potassium perchlorate	1667	0.2000	800	0.00722
Potassium sulfate	300	0.1250	−800	0.00574
RDX, Cyclotrimethylenetrinitramine	1360	0.3416	615	0.0405
Sucrose octaacetate	−1121	0.3941	−1825	0.06922
Triacetin	−1284	0.4191	−1973	0.07333
Triethylene glycol dinitrate	750	0.40430	−89.24	0.05412
Trinitrotoluene	491	0.3037	−110	0.04343

17 - Avaliação do Impulso Específico

Plotou-se em um gráfico, os impulsos específicos nas ordenadas e os potenciais aparentes nas abcissas, 33 composições com propriedades calculadas pelo primeiro método indicado e verificou-se q para Q_a entre 700 e 1250 cal/g, o impulso específico entre 200 e 25 segundos, a dependência $I_{esp} = f(Q_a)$ aparencia sensilvelmente linear. (gráfico I)

Assim chegou-se a equação

$$I_{esp} \left(\frac{Kgf.sec}{Kg}\right) = 140,55 + 0,08786\ Q_a \left(\frac{cal}{g}\right)$$

Para melhorar a precisão da função, calculou-se a equação da parábola dos mínimos quadrados e chegou-se a

$$I_{esp} = 140,52 + 0,08792\ Q_a - 3,42 \times 10^{-8}\ Q_a^2$$

Em trabalhos precedentes de Paul Tavernier estabeleceu-se uma relação linear entre a temperatura de combustão à volume constante e o potencial aparente. A fórmula, obtida pelo método dos mínimos quadrados é:

$$T_v\ (^oK) = 423 + 2,767\ Q_a$$

Para as 33 composições usadas, a temperatura de combustão à pressão constante foi estabelecida e se expressa por:

$$T_p\ (^oK) = 84 + 2,551\ Q_a \left(\frac{cal}{g}\right)$$

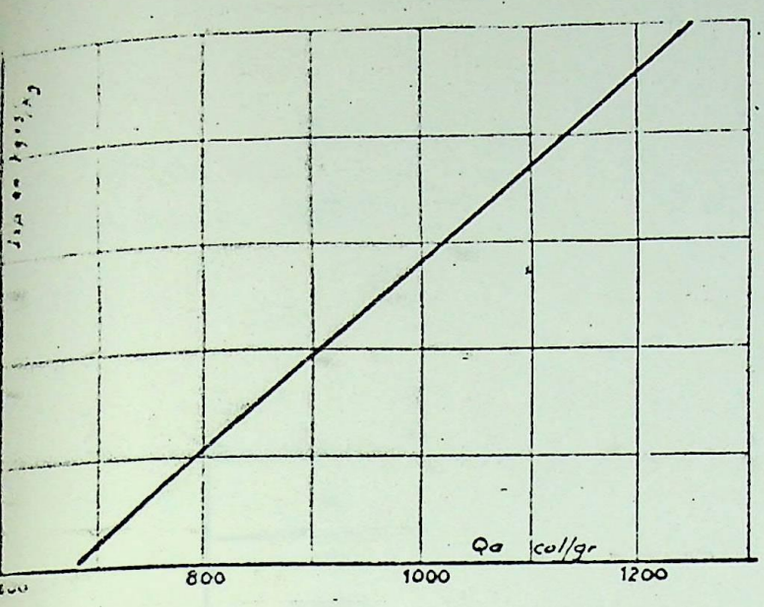


GRAFICO -1-

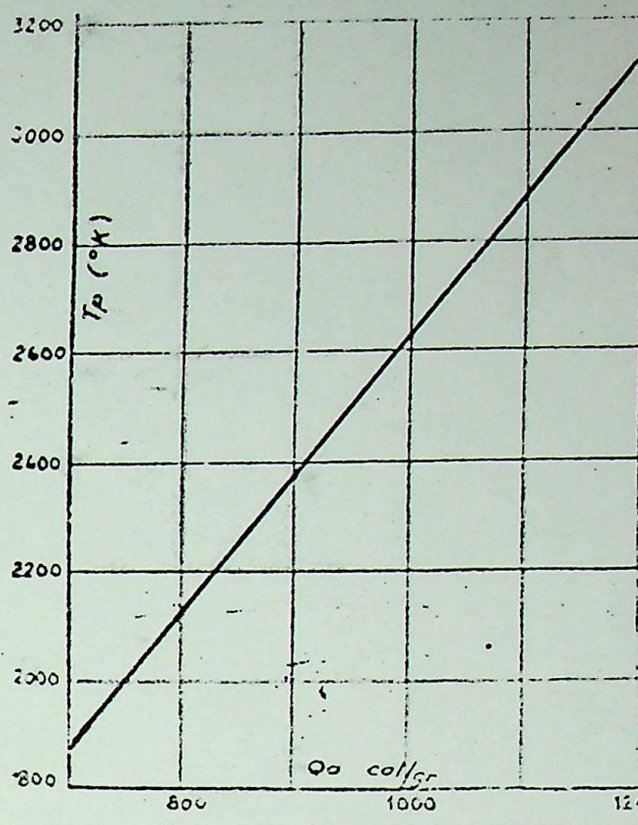


GRAFICO -2-

Avaliação de γ

O valor de γ para as 33 composições utilizadas forneceu a seguinte expressão em função do potencial aparente:

$$\gamma = 1{,}4025 - 0{,}1578 \frac{Q_a}{1000} \quad (cal/g)$$

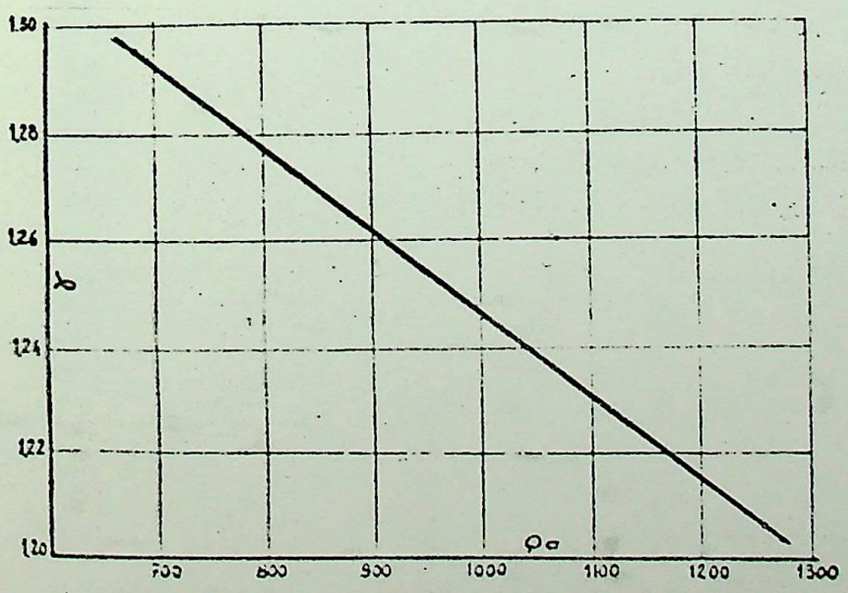


GRAFICO -3-

Valores de Q_a, I_{sp}, T_p e γ para as 33 composições do tipo $C_x H_y O_z N_u$

Q_a	I_{sp}	T_p	$\bar{\gamma}$
cal g	s	°K	
1.243,4	248,2	3.230	1,217
1.202,0	243,3	3.105	1,222
1.160,2	241,8	3.063	1,226
1.100,0	238,1	2.852	1,236
1.094,7	235,4	2.895	1,229
1.072,4	236,5	2.889	1,230
1.044,0	234,1	2.760	1,239
1.031,1	232,2	2.734	1,240
1.018,9	231,5	2.696	1,241
991,5	228,5	2.628	1,243
989,4	225,7	2.600	1,242
963,2	227,5	2.532	1,252
952,1	226,1	2.548	1,251
948,2	222,4	2.500	1,253
920,7	223,3	2.423	1.258
916,7	219,6	2.410	1,257
882,7	216,4	2.305	1,262
861,7	217,5	2.297	1.265
858,9	218,0	2.317	1,265
849,6	214,8	2.221	1,266
837,2	214,3	2,239	1,271
817,9	210,2	2.151	1,270
812,6	213,3	2.108	1,278
796,3	210,2	2.128	1,271
788,5	211,2	2.110	1,277
786,5	210,5	2.103	1,279
785,0	210,7	2.110	1,278
784,8	207,4	2.053	1,276
766,0	209,3	2.050	1,284
762,8	208,1	2.064	1,281
762,4	205,0	1,983	1,292
647,6	198,2	1.825	1,303
689,7	201,0	1.872	1,292

18 - Avaliação da massa molecular média dos produtos de combustã

O cálculo desenvolvido permite que se possa estabelecer o v lor da massa molecular média dos gases da combustão partindo direta mente da fórmula bruta do propergol.

Propelente do Tipo CHON

Um composto $C_x H_y O_z N_u$ se decompondo sem dissociação forne ce os seguintes produtos de decomposição (x, y, z, u são relaciona- dos à unidade de massa - grama):

$$C_x H_y O_z N_u \longrightarrow a\,CO_2 + (x - a)\,CO + \frac{u}{2}\,N_2 + (x + \frac{y}{2} +$$

$$- z + a)\,H_2 + (z - x - a)\,H_2O$$

e seja N_T o número total de moles:

$$N_T = a + x - a + \frac{u}{2} + x + \frac{y}{2} - z + a + z - x - a$$

$$N_T = x + \frac{u}{2} + \frac{y}{2}$$

$$\text{donde } M = 1/N_T = \frac{1}{x + \frac{1}{2}(u + y)}$$

Supondo-se evidentemente, que o equilíbrio do gás d'água exista (condições de sub-oxigenação e sub-carbonação)

Propelentes do Tipo CHONCL ou CHONF

Neste caso teremos:

$$C_x H_y O_z N_u CL_c \longrightarrow a\,CO_2 + (x - a)\,CO + cHCL + \frac{u}{2}\,N_2 +$$

$$+ (x + \frac{y}{2} - \frac{c}{2} - z + a)\,H_2 + (z - x - a)\,H_2O$$

.../

$$N_T = \cancel{a} + x - \cancel{a} + c + \frac{u}{2} + \cancel{z} + \frac{y}{2} - \frac{c}{2} - \cancel{z} + \cancel{a} - \cancel{a} + \cancel{b} - x$$

$$N_T = x + \frac{c}{2} + \frac{u}{2} + \frac{y}{2}$$

$$\text{onde } M = \frac{1}{N_T} = \frac{1}{x + \frac{1}{2}(y + u + c)}$$

Supondo-se, evidentemente, que exista o equilíbrio do gás d'água (condição de sub-oxigenação e sub-carbonação):

$$2x + \frac{y - c}{2} - z > 0$$

$$z - x > 0$$

Propelente do tipo CHONM

Seja um propelente $C_x H_y O_z N_u M_r$ no qual o metal M_r dá um óxido $M_n O_p$. A equação passa a ser, então:

$$C_x H_y O_z N_u M_r \longrightarrow \frac{r}{n} M_n O_p + a\, CO_2 + (x - a)\, CO +$$

$$+ \frac{u}{2} N_2 + (x + \frac{y}{2} - z + \frac{rp}{n} + a)\, H_2 + (z - \frac{rp}{n} - x - a)\, H_2O$$

$$N_T = \frac{r}{n} + \cancel{a} + x - \cancel{a} + \frac{u}{2} + \cancel{x} + \frac{y}{2} - \cancel{z} + \frac{rp}{n} + \cancel{a} + - \frac{rp}{n} - \cancel{x} +$$

$$- \cancel{a} + \cancel{x}$$

$$N_T = \frac{r}{n} + x + \frac{u}{2} + \frac{y}{2}$$

$$M = \frac{1}{N_T} = \frac{1}{\frac{r}{n} + x + \frac{1}{2}(y+u)}$$

Supondo-se, evidentemente, que exista o equilíbrio do gás d'água (condições de sub-oxigenação e sub-carbonação)

$$2x + \frac{y}{2} - z + \frac{rp}{n} > 0$$

$$z - \frac{rp}{n} - x > 0$$

Propelente do Tipo CHONCLM

Os propelentes $C_x H_y O_z N_u CL_c M_r$ são chamados compositos (quando não possuem NC e NGL) ou base dupla modificada (quando possuem NC, NGL, um oxidante como um perclorato e um combustível metálico como o Alumínio). O halogênio CL dará um ácido H CL e o metal M, um óxido do tipo $M_n O_p$.

$$C_x H_y O_z N_u CL_c M_r \longrightarrow \frac{r}{n} M_n O_p + c\ H\ CL + a\ CO_2 +$$

$$+ (x - a) \cdot CO + \frac{u}{2} N_2 + (x + \frac{y}{2} - \frac{c}{2} - z + \frac{rp}{n} + a)\ H_2 +$$

$$+ (z - \frac{rp}{n} - x - a) \cdot H_2O$$

$$N_T = \frac{r}{n} + c + a + x - a + \frac{u}{2} + x + \frac{y}{2} - \frac{c}{2} - z + \frac{rp}{n} + a + z +$$

$$- \frac{rp}{n} - x - a$$

$$N_T = \frac{r}{n} + \frac{c}{2} + \frac{u}{2} + \frac{y}{2} + x$$

$$M = \frac{1}{N_T} = \frac{1}{\frac{r}{n} + x + \frac{1}{2}(u + c + y)}$$

.../

As condições de suboxigenação e sub-carbonação devem, evidentemente, serem satisfeitas

$$2x + \frac{y}{2} - \frac{c}{2} - z + \frac{rp}{n} > 0$$

$$z - \frac{rp}{n_1} - x > 0$$

19 - Cálculo das propriedades termodinâmicas dos propelentes sólidos

Para melhor compreensão do cálculo simplificado, daremos a seguir a sequência de cálculos para a determinação das constantes termodinâmicas:

T_p, I_{sp}, δ e massa molecular M para propelentes de fórmula bruta $C_x H_y O_z N_u$ simples, com introdução de halogênios e/ou de metais redutores.

Propelente do Tipo $C_x H_y O_z N_u$

Composição do Propelente

Nitrocelulose com 12,70 de N_2	58.707%
Nitroglicerina com 18,50 de N_2	27.604%
Triacetina	7.432%
Estabilizante	1.644%
Plastificante	2.581%
Modificador balístico e catalisador de combustão	2.032%

Fórmula Bruta por grama de Propelente

Nitrocelulose a = 12.70

NC = 58.707

.../

$$n = \frac{648.584 \times 12.70}{1400.7 - 44.999 \times 12.70} = 9.933539$$

$$C = \frac{0,240 \times 58.707}{648.584 + 44.999 \times 9.934} = \frac{0,240 \times 58.707}{1095.583} = 0.0128$$

$$H = \frac{0,010 \times 58.707 \times (40 - 9.934)}{1095.583} = 0,016111$$

$$O = \frac{0,020 \times 58.707 \times (10 + 9.934)}{1095.583} = 0.021363$$

$$N = \frac{0,010 \times 58.707 \times 9.934}{1095.583} = 0.005323$$

Nitroglicerina b = 18.50
NG = 27.604

$$x = \frac{92.097 \times 18.50}{1400.7 - 44.999 \times 18.50} = 2.998485$$

$$C = \frac{0,030 \times 27.604}{92.097 + 44.999 \times 2.998} = \frac{0,030 \times 27.604}{227.026} = 0.003648$$

$$H = \frac{0,010 \times 27.604 \times (8 - 2.998)}{227.026} = 0.006081$$

$$O = \frac{0,010 \times 27.604 \times (3 + 2 \times 2.998)}{227.026} = 0.010939$$

.../

$$N = \frac{0{,}010 \times 27.604 \times 2.998}{227.026} = 0.003646$$

Triacetina

C = 7.432 x 9 : 21821.1 = 0.003065
H = 7.432 x 14 : 21821.1 = 0.004768
O = 7.432 x 6 : 21831.1 = 0.002044

Estabilizante

C = 1.644 x 12 : 21422,6 = 0.000921
H = 1.644 x 10 : 21422.6 = 0.000767
O = 1.644 x 2 : 21422.6 = 0.000153
N = 1.644 x 2 : 21422.6 = 0.000153

Plastificante

C = 2,581 x 10 : 19419 = 0.001329
H = 2,581 x 10 : 19419 = 0.001329
O = 2,581 x 1 : 19419 = 0.000532

Modificador balístico e catalisador de combustão

C = 0.000981
H = 0.001750
O = 0.000100

$C_{0.022804}$ $H_{0.030807}$ $O_{0.035131}$ $N_{0.009122}$

Condições de sub-oxigenação

$$2x + \frac{y}{2} - z > 0$$

$$2 \times 0.022804 + \frac{0.030807}{2} - 0.035131 = 0.025881 > 0$$

condição de subcarbonação

$$z - x > 0$$

$$0.035131 - 0.022804 = 0.012327 > 0$$

Determinação do calor de formação à pressão constante do propelente

Constituinte do Propelente	massa em 1 g	h_{fp} 300°K cal/g	h_{fv} 300°K cal/g
Nitrocelulose 12.70	0.58707 g	615	593
Nitroglicerina 18.50	0.27604 g	405	383
Triacetina	0.07432 g	1452.3	1425
Estabilizante	0.01644 g	- 59.3	- 78
Plastificante	0.02581 g	831.9	812.4
Modificador balístico e catalizador de combustão	0.02032 g	*	*

$$Q_{FP} = \sum m_i \, h_{fp_i} = 612,58 \text{ cal/g}$$

$$Q_{FV} = \sum m_i \, h_{fv_i} = 588,27 \text{ cal/g}$$

$$Q_{FV} = Q_{FP} - 298\,(y + z + u) = 612,58 - 298(0.030807 + 0.035131 + 0.009122)$$

$$= 612,58 - 298 \times 0.075060 = 590.21 \text{ cal/g}$$

(coerente com o anteriormente calculado 588,27 cal/g)

Determinação do Potencial Aparente

$$Q_a = 67409\, z - 40698\, x - Q_{FV \text{ propelente}}$$

.../

$Q_a = 67409 \times 0.035131 - 40698 \times 0.022804 - 588,27$ cal/g

$Q_a = 851.8$ cal/g

Determinação do Impulso Específico

Para o cálculo do I_{sp}, com expansão de 70/1, usaremos a expressão

$$I_{sp}\ (seg) = 140,55 + 0.08786\ Q_a\ (cal/g)$$

$$I_{sp}\ (seg) = 140,55 + 0.08786 \times 851.8 = 215.39\ seg$$

Determinação da temperatura de combustão à pressão da câmara p

para o cálculo de T_p, usaremos a expressão

$$T_p\ (^oK) = 84 + 2,551\ Q_a\ (cal/g)$$

$$T_p = 84 + 2,551 \times 851.8 = 2256.94\ ^oK$$

Determinação do coeficiente de Expansão Isentrópica

para o cálculo de γ, usaremos a expressão

$$\gamma = 1,4025 - 0,1578 \times \frac{Q_a}{1000} \quad (cal/g)$$

$$\gamma = 1,4025 - 0,1578 \times \frac{851.8}{1000} = 1.2681$$

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

Determinação da massa molecular média dos produtos de combustão

para o cálculo de $\mathcal{M}$, usaremos a expressão

$$\mathcal{M} = \frac{1}{x + \frac{1}{2}(u + y)}$$

$$\mathcal{M} = \frac{1}{0.022804 + \frac{1}{2}(0.030807 + 0.009122)} = 23.3817\ g/g_1$$

```
1800/81700 FORTRAN COMPILER , MARK 6.1 RC 08/19/77 19.24 ,          THURS
/ROUX      /
:£ NO MAP
:FILE  06=FILE6, UNIT=PRINTER, UNLABELED
       SUPERFICIE DE COMBUSTAO E VOLUME DE BLOCOS ESTRELADOS INIBIDOS SO
:C     ENTE NA SUPERFICIE CILINDRICA EXTERNA
:C                        'PARAMETROS'
:C     XL=COMPRIMENTO DO GRAO MM
:C     TETA=SEMIANGULI DE FACE GRAUS
:C     N=NUMERO DE PONTAS DA ESTRELA
:C     FI=DIAMETRO DO BLOCO NU MM
:C     A=RAIO PONTA ESTRELA RETA MM
:C     A1=RAIO PONTA ESTRELA ADOCADA MM
:C     B=RAIO FUNDO ESTRELA RETA MM
:C     B1=RAIO FUNDO ESTRELA ADOCADA MM
:C     R=RAIO ADOCAMENTO PONTA MM
:C     T=RAIO ADOCAMENTO FUNDO MM
:C           DADOS DO PROBLEMAOXL,TETA,N,FI,A1,B1,R,T
:      LCART=5
:      IMPR=6
:      READ(LCART,1)XL,TETA,N,FI,A1,B1,R,T
:    1 FORMAT(F10.3,F6.2,I2,5F10.3)
:C                ANGULOS EM GRAUS
:      ANG1=90*180/N-(TETA)
:      ANG2=90-(TETA)
:      ANG3=180/N
:      ANG4=(TETA)-180/N
:C                RAIOS
:      A=((1/SIN(ANG4)-1)*R)+A1
:      B=((1-1/SIN(TETA))*T)+B1
:      PI=3.141593
:C                ANGULOS EM RADIANOS
:      RAD1=(ANG1)*(PI)/180
:      RAD2=(ANG2)*(PI)/180
:      RAD3=(ANG3)*(PI)/180
:C                CALCULOS PRELIMINARES
:      X1=B*SIN(ANG3)/SIN(ANG4)
:      X2=T*(RAD2-COS(TETA)/SIN(TETA))
:      X3=R*(RAD1-COS(ANG4)/SIN(ANG4))
:      X4=(FI)**2*(RAD3)/8-A*B*SIN(ANG3)/2+(X2)*T/2-(X3)*R/2
:      X5=X1-T*COS(TETA)/SIN(TETA)-R*COS(ANG4)/SIN(ANG4)
:      X6=X4-(X5)*T-T**2*RAD2/2-RAD1*((R+T)**2-R**2)/2
:      X7=(A1-R)*SIN(ANG3)/COS(TETA)-R
:      X8=X6-(X7-T)*(X1-R*COS(ANG4)/SIN(ANG4)-X7/2*COS(TETA)/SIN(TETA)-
:     *2*COS(TETA)/SIN(TETA))-RAD1/2*((R+X7)**2-(R+T)**2)
:      WRITE(IMPR,2)XL,TETA,N,FI,A1,B1,R,T
:    2 FORMAT(10X,'COMP=',F10.3,/,10X,'TETA=',F10.3,/,10X,'   N=',I6,/,
:     *X,'  FI=',F10.3,/,10X,'  A1=',F10.3,/,10X,'  B1=',F10.3,/,10X,'
:     *R=',F10.3,/,10X,'   T=',F10.3,///)
:      X9=A*SIN(ANG3)-R*SIN(ANG3)/SIN(ANG4)
:      X10=R+X7
:      X11=(R+X7)**2*(RAD1)/2
:      W1=SQRT(ABS(X10**2-X9**2))
:      W2=ALOG(ABS(2*W1+2*X10))
:      W3=(X9)**2*W2/2-(X10)*W1/2
:      W4=W3*COS(TETA)+(X9)*(X7)*SIN(TETA)
:      X12=(X10)*COS(TETA)*W4/(2*X9)
:C    CALCULO  DA SUPERFICIE E VOLUME INICIAIS
:      E=0.
:      SPFO=4*N*X4
:      SPCO=2*N*XL*(X1+X2+X3)
:      SPTO=SPFO+SPCO
:      VOLO=2*N*XL*X4
:      WRITE(6,3)E,SPFO,SPCO,SPTO,VOLO
```

```
    3 FORMAT(1X,'ESPESSURA SUPERFICIE FACE SUPERFICIE CANAL SUPERFICIE
     *OTAL  VOLUME',//,5(F10.2,6X))
      ESP=FI/2-A1
      DO 100 I=1,100
      E=ESP/100*I
      IF(E-T)101,101,102
  101 ARF=X4-(X5)*E-(RAD2)*(T**2-(T-E)**2)/2-(RAD1)*((R+E)**2-R**2)/2
      SPF=4*N*ARF
      SPC=2*N*(XL-2*E)*(X1+X2+X3+(RAD3)*E)
      SPT=SPF+SPC
      VOL=2*N*(XL-2*E)*ARF
      WRITE(IMPR,4)E,SPF,SPC,SPT,VOL
    4 FORMAT(5(F10.2,6X),'PRIMEIRA FASE')
      GO TO 100
  102 IF(E-X7)103,103,104
  103 AFA=X6-(E-T)*(X1-R*COS(ANG4)/SIN(ANG4)-E/2*COS(TETA)/SIN(TETA)-T
     **COS(TETA)/SIN(TETA))-(RAD1)/2*((R+E)**2-(R+T)**2)
      SPFA=4*N*AFA
      SPCA=2*N*(XL-2*E)*(X1+X3+(RAD1-COS(TETA)/SIN(TETA))*E)
      SPTA=SPFA+SPCA
      VOLA=2*N*(XL-2*E)*AFA
      WRITE(IMPR,5)E,SPFA,SPCA,SPTA,VOLA
    5 FORMAT(5(F10.2,6X),'SEGUNDA  FASE')
      GO TO 100
  104 YUT=SQRT(ABS((E+R)**2-X9**2))
      YAT=ALOG(ABS(2*YUT+2*(E+R)))
      YET=(E+R)*YUT/2-X9**2*YAT/2
      YOT=YET*COS(TETA)-X9*E*SIN(TETA)
      YALE=X10*COS(TETA)*YOT/(2*X9)
      AFE=X8+X11+X12+YALE-(R+E)**2*RAD1/2
      STEP1=(X9)/(E+R)
      STEP2=SQRT(ABS(1-(STEP1)**2))
      RATIO=STEP1/STEP2
      BETA=ATAN(RATIO)
      SPFE=4*N*AFE
      RAD4=(90+BETA)*(PI)/180
      SPCE=2*N*(XL-2*E)*(E+R)*RAD4
      SPTE=SPFE+SPCE
      VOLE=2*N*(XL-2*E)*AFE
      WRITE(IMPR,6)E,SPFE,SPCE,SPTE,VOLE
    6 FORMAT(5(F10.2,6X),'TERCEIRA FASE')
  100 CONTINUE
      CALL EXIT
      END

AND NO WARNINGS IN 81 STATEMENTS,CODE EMITTED = 19828 BITS (2479 BYTES)O
IME IS 2 MINUTES AND 43.5 SECONDS FOR 106 CARDS AT 39 CARDS/MINUTE.
```

CAPÍTULO 3

1 - VELOCIDADE DE COMBUSTÃO EM REGIME PERMANENTE

Um bloco de propelente de composição homogênea, queima em camadas paralelas, a combustão se propagando normalmente à superfície.

Esta lei, proposta por PIOBERT em 1.839, têm sido verificada - com precisão suficiente até diversos milhares de bars de pressão.

Nestas condições, pode-se definir a velocidade de combustão para um propelente sólido pela função.

$$V_c = f (p, Ti , W ,....)$$

onde p= pressão na câmara de combustão

Ti= temperatura inicial do propelente

W= velocidade de escoamento dos gases na parede.

O estudo da velocidade de combustão, e eventualente da própria combustão, é feito em laboratório balístico numa câmara de pressão ou na bomba de Crawford, ou no " strand - burner".

Em uma atmosfera inerte e estabilizada (normalmente N_2) à uma pressão p, queimam-se tiras - "strands" - de pólvora inibidas lateralmente (largura e espessura) e registra-se o tempo, num contador de precisão de milisegundos, para queimar uma distância padrão, normalmente 5 polegadas. As condições experimentais podem ser bem definidas (As Ti mais usadas são respectivamente - 40 ^{o}C, + 20^{o}C e + 50^{o}C e as pressões entre 0 e 136 bars) e os ensaios numerosos.

Mas esta simplicidade tem o inconveniente de provocar a deflagração em condições diferentes daquelas existentes na câmara de - combustão.

Perdas de energia da superfície do modelo e da zona gasosa contígua onde se passa o processo de combustão, enquanto que nos propelentes, os gases à alta temperatura enchendo, todo o volume, as perdas por irradiação são reduzidas ao mínimo possível e frequentemente, a carga queima em todo ou em parte por combustão central, - reduzindo ainda mais estas perdas.

Ausência de escoamento de gás paralelo à parede, que pode ati-

var a deflagração em certas condições, combustão chamada "erosiva".

2 - PROCESSO DE COMBUSTÃO

As observações da superfície do propelente em combustão em escala muito pequena, permitiram precisar a estrutura da zona de combustão.

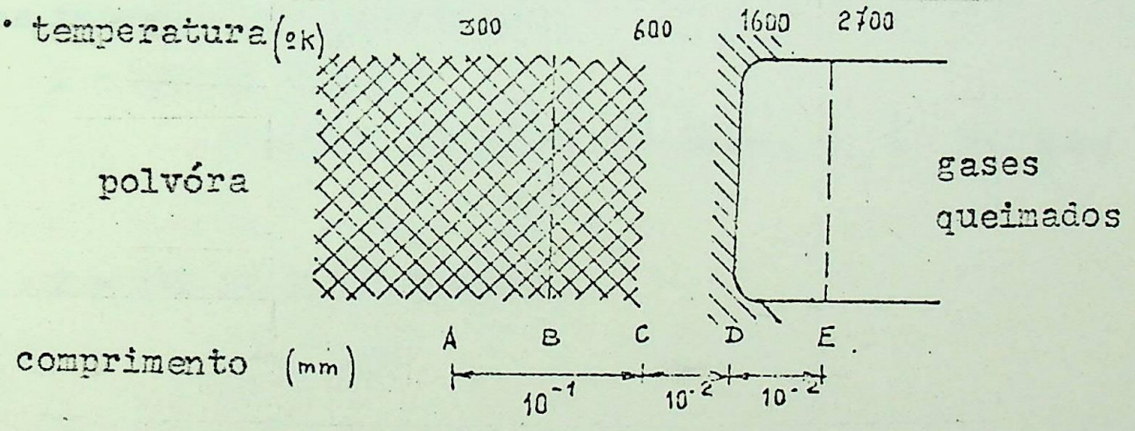
AB - preaquecimento do sólido por condução (algumas vêzes irradiação interna)

BC - processo da reação superficial, alimentando a fase gasosa.

- zona muito delgada nos propelentes composite, as reações sendo frequentemente endotérmicas.
- zona de espessura variável nas pólvoras homogêneas, as reações sendo frequentemente exotérmicas.

CD - preparação dos gases emitidos se aquecendo progressivamente, para as pólvoras composites complicado pela interdifusão dos gases emitidos.

DE - chama, onde a maior parte da energia de combustão é emitida.



As pólvoras homogêneas, por serem mais importantes na autopropulsão, veremos com mais detalhes. As teorias permitiram encontrar por cálculos as leis da velocidade de combustão, devido a homogênidade do sólido aquecido e dos gases emitidos.

A velocidade de decomposição da superfície é dada por estudos de processos físico-químicos de decomposição de um MONERGOL : a cinética química, em particular a energia de ativação da reação (ARRHENIUS) e a transferência de calor através as sucessivas camadas.

Na zona de efervescência, os gases são formados e aparecem sôbre uma certa superfície na Temperatura T_c por aquecimento incidente e decomposição exotérmica; T_c da lei de ARRHENIUS, dando a velo

cidade das reações em fase gasosa.

Estas intervem em três etapas:

- A zona de crepitação contendo partículas sólidas que provem da desagregação da superfície e que se decompõem exotérmicamente
- A zona séde das reações exotérmicas; é sombria e absorve calor para elevar os gases à temperatura de combustão e nela reina um gradiente térmico muito grande.
- A zona de chama possui uma forte luminosidade.

A espessura da zona sede das reções exotérmicas varia fortemente com a pressão, o que permite explicar o comportamento dos propelentes homogêneos em pressões baixas.

3 - LEIS DA VELOCIDADE DE COMBUSTÃO

A pressão de combustão é um fator positivo de aumento da velocidade no caso geral.

Segundo os intervalos de pressão de funcionamento, as seguintes relações são utilizadas:

1 - LEI DE MURAOUR

PRESSÕES ELEVADAS 200 bars $<$ P $<$ 300 bars

$$V_c = V_o + aP$$

2 - LEI DE SAINT ROBERT

$$V_c = aP^n$$

3 - FORMULA GERAL UTILIZADA POR SUMMERFIELD

para as composites

$$V_c = V_o + aP^n$$

Um tipo notável é a pólvora denominada platonisada, onde $n \simeq o$, na qual a velocidade é praticamente independente da pressão e constitui o tipo qualificado de propelente para foguetes.

A temperatura inicial do propelente, Ti, é igualmente um fator positivo de aumento da velocidade no caso geral; denomina-se frequentemente temperatura de armazenagem da pólvora.

Define-se os coeficientes térmicos diferenciais:

de temperatura;

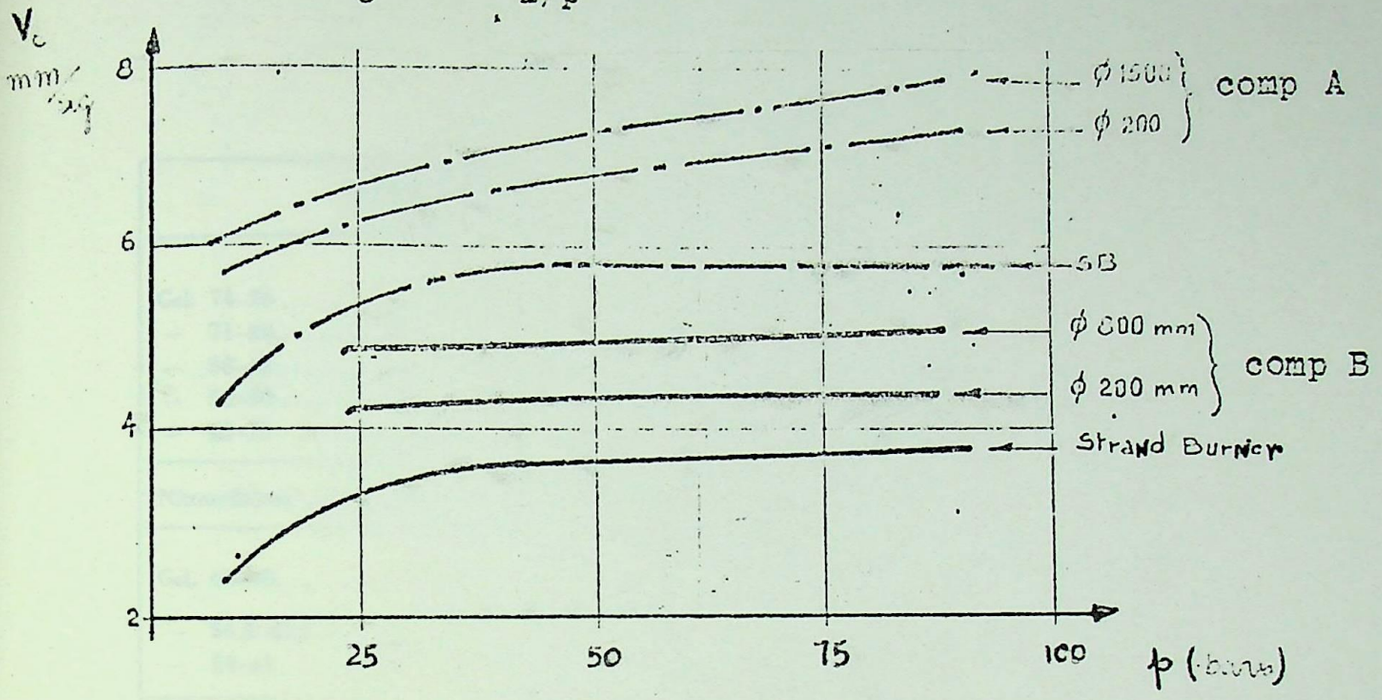
$$\pi_K = \frac{1}{P}\left(\frac{\partial P}{\partial T_i}\right)_K$$

de velocidade;

$$\pi_{V_c K} = \frac{1}{V_c}\left(\frac{\partial V_c}{\partial T_i}\right)_K$$

de velocidade à pressão constante;

$$\pi_p = \frac{1}{V_c}\left(\frac{\partial V_c}{\partial T_i}\right)_p$$



A velocidade de escoamento W paralela à superfície em combustão é um fator do qual a influência é imperceptível ou muito pequena para velocidades de escoamento pequenas e se manifesta de maneira apreciável a partir de um certo limiar. A combustão "erosiva" correspondente a êste fenômeno foi enfocada por MURAOUR.

Chama-se função de erosão " ξ " a relação entre a velocidade real obtida e aquela que ocorreria sem erosão. Uma variável sendo escolhida para caracterisar o escoamento paralelamente à superfície de combustão, teremos que segundo TAVERNIER E BOISSON:

$$"\xi" = 1 + \frac{W}{W_r} = \frac{V_c \text{ real}}{V_c} = 1 + K\,(G-G')$$

W_r sendo fornecido por experiência, igual a aproximadamente 500 m/seg.

4 - RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE LINEAR DE COMBUSTÃO, O POTENCIAL APARENTE E A PRESSÃO DAS PÓLVORAS COMPOSTAS ÚNICAMENTE DE NITROCELULOSE, NITROGLICERINA E CENTRALITE.

Os modelos estudados para o desenvolvimento das equações - $V_c = f(Q_a)$, $V_c = f(Q_r)$ e $V_c = f(P)$, foram fabricados com Nitrocelulose, Nitroglicerina e etil-centralite, a partir das seguintes matérias primas industriais:

GALETTE	NITROCELULOSE N_2	NITROCELULOSE p. 100	NGL p. 100
Gal. 74-26	11,70	76	24
— 71-29	11,90	71	29
— 58-42	12,50	58	42
— 50-50	12,50	58	42
— 25-75	12,50	25	75
Nitrocellulose	12,60	100	0
Gal. 60-40	13,40 12,50	44,4 15,6	40
— 54,5-45,5	13,25	54,5	45,5
— 59-41	12,20	59	41

Por misturação de galetes (mistura de nitrocelulose, com nitroglicerina em percentagens determinadas) entre si e com centrali te, para modificar o potencial, fabricam-se pólvoras de base dupla sem solvente, chamadas base dupla extrusadas ou SD.

A medida da velocidade de combustão é então efetuada, no STRAND BURNER. Escolhem-se pressões para o cálculo da velocidade.

Escolhe-se 70 Kg/cm^2 pois êste valor de pressão é o de funcionamento habitual dos propelentes sólidos.

Os resultados obtidos para diversos potenciais, resultantes de adição de percentagens diferente de centralite na galete, são plotados, para uma pressão de funcionamento escolhida, em gráficos como a FIG 1 FIG 2.

FIG 1

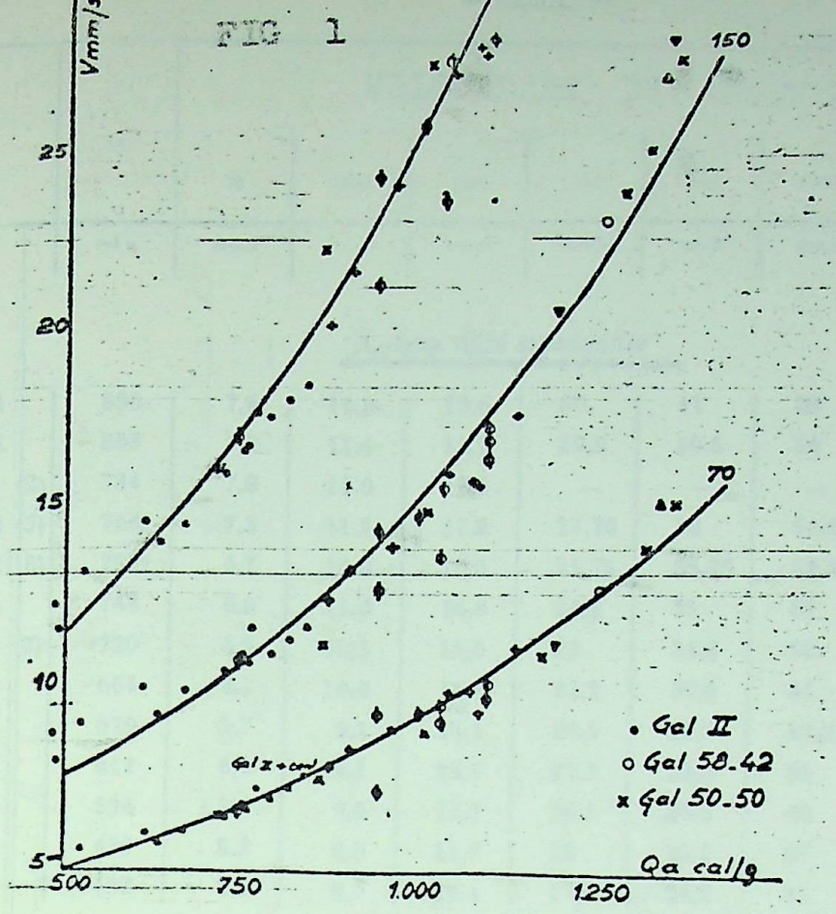
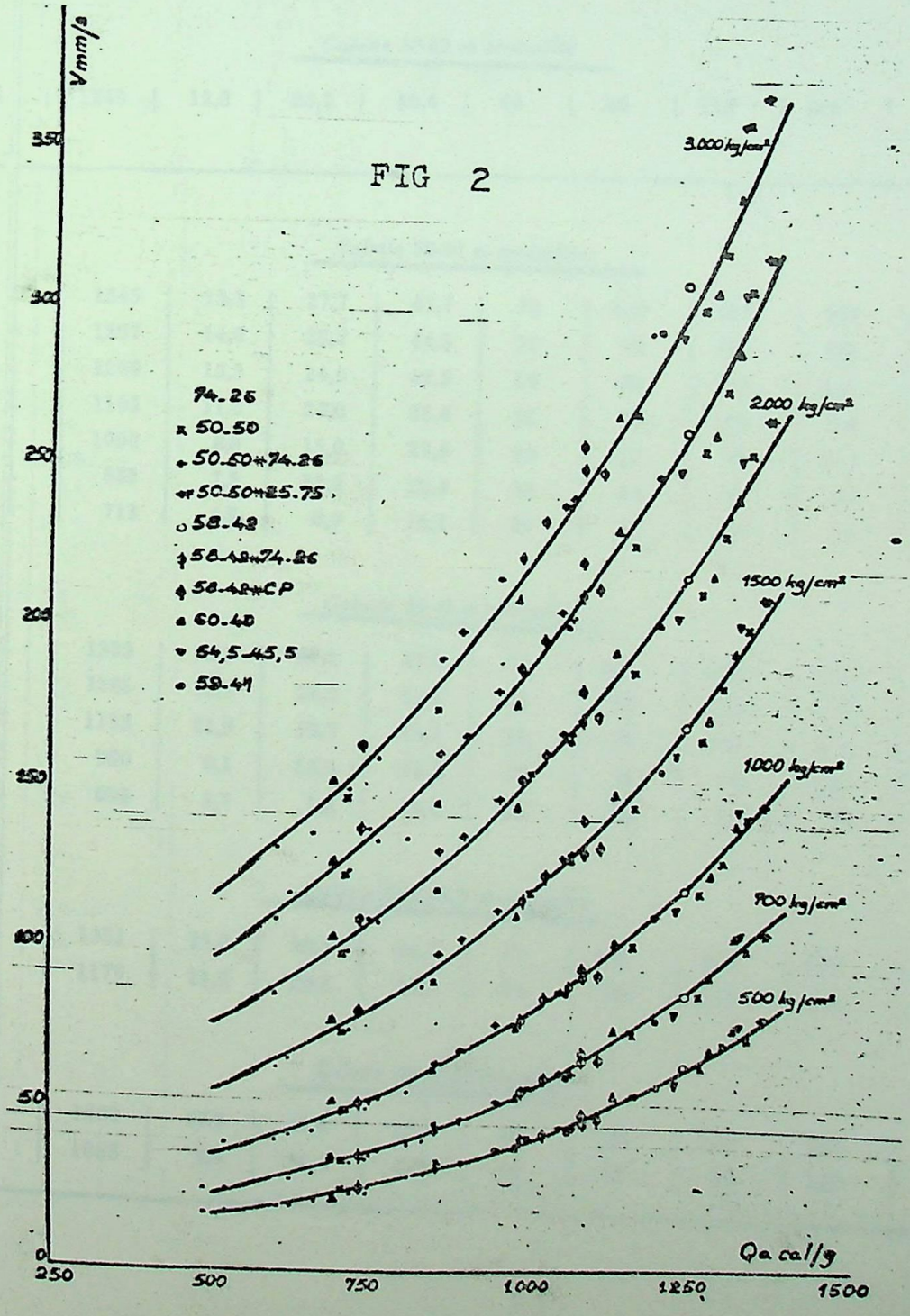

V mm/s
25
20
15
10
5
150
70
Gal z = cost
• Gal II
○ Gal 58.42
× Gal 50.50
500
750
1.000
1.250
Qa cal/g

FIG 2


V mm/s
350
300
250
200
150
100
50
0
3000 kg/cm²
2000 kg/cm²
1500 kg/cm²
1000 kg/cm²
900 kg/cm²
500 kg/cm²
74.26
× 50.50
50.50+74.26
50.50+25.75
○ 58.42
58.42+74.26
58.42+CP
60.40
64,5-45,5
59.41
250
500
750
1000
1250
1500
Qa cal/g

		Q	VELOCIDADE DE COMBUSTÃO A ρ kg/cm²									
			70	150	300	500	700	1000	1500	2000	2500	3000
		cal/g	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s
						Galette 74-26 et centralite						
198-56 B	1	836	7,6	11,8	18,6	30	41	58	88	115	141	167
198-56 C	1	808	7,3	11,4	18,1	29,5	39,5	56	83	109	134	159
66-55	(2)	784	7,0	11,0	17,6	—	—	—	—	—	—	—
124-56	2 (3)	766	7,3	11,7	17,8	27,75	38	54,5	82,25	108	133	158,5
62-56	2 (18)	752	6,7	10,8	16,8	25,75	35,75	52,25	81,5	109	137	164
198-56 E	1	748	6,8	11,0	16,6	24,2	35	51	76	100	126	151
198-56 F	1 (2)	720	6,5	10,5	16,0	24	34,2	50	75	99	124	149
198-56 G	1	664	6,1	10,0	14,6	22,2	30,8	44	67	90	113	135
68-55	1	629	5,7	9,2	14,1	20,5	28,8	42,8	66,5	91	117	142
31-57	1	612	6,0	10,1	14,7	21,2	29,5	41	63,5	86	109	131
40-53 D	1	524	5,6	9,0	13,3	18,5	25,5	40	66,5	90	114	138
15-52	1	489	5,3	8,0	11,7	18	25,5	37	57	80	102	124
32-57	1	482	5,3	8,7	12,4	17,5	24,5	35	54	74	93	112
						Galette 58-42 et centralite						
14-56	1	1243	12,8	23,2	40,4	64	86	118	169	215	261	307
						Galette 50-50 et centralite						
81-55	1	1345	15,3	27,7	47,7	73	100	141	200	254	305	356
61-56	4	1307	14,0	25,2	44,5	71	95	127	181	229	274	317
345-57	1	1269	13,2	24,0	42,5	64	86	117	165	211	255	299
344-57	1	1163	11,0	20,0	36,4	55	74	101	144	186	226	267
343-57	1	1000	8,8	15,0	27,6	42	57	79	117	154	187	220
342-57	1	853	7,5	11,2	22,4	34	46	63	90	118	145	174
341-57	1	713	6,5	8,9	16,1	26	35	50	74	98	122	146
						Galette 60-40 et centralite						
24-58	1	1323	15,3	27,1	47,6	76	104	138	192	240	286	332
25-58	1	1285	13,5	24,0	41,2	68	92	123	171	216	260	304
63-57	1	1135	11,0	19,3	34,1	55	75	102	148	191	230	266
26-58	1	980	8,1	13,6	24,2	39	54	76	110	144	176	208
27-58	1	694	5,7	9,2	16,0	23	36	53	78	103	127	152
						Galette 54,5-45,5 et centralite						
64-57	1	1331	15,8	28,3	46,7	77	104	143	200	252	304	356
65-57	1	1179	11,2	20,6	36,7	59	80	112	160	202	248	290
						Galette 59-41 et centralite						
66-57	1	1202	12,3	21,8	39,3	58	78	110	155	201	247	292
67-57	1	1058	9,4	16,2	29,0	44	61	86	127	164	200	138

RELAÇÃO GAL + GAL / CENTRALITE		Qv	VELOCIDADE DE COMBUSTÃO A kg/cm²									
			70	150	300	500	700	1000	1500	2000	2500	3000
		cal/g	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s
Galette 50-50 + galette 74-26 et centralite												
48,9 + 48,9 / 2,2	358-57	1126	11,2	17,7	31	—	—	—	—	—	—	—
47,85 + 47,85 / 4,30	215-56	1050	9,4	15,7	27,8	45,5	62	87	128	167	205	238
24,3 + 72,8 / 2,9	190-56	1033	10,0	15,8	28	45	62	88	129	167	203	240
19,0 + 76,2 / 4,8	185-56	952	8,9	14,0	24,2	38,5	53,5	76,5	112	146,5	180	215
9,4 + 84,9 / 5,7	184-56	894	8,4	13,3	21,8	34	47,5	69	103	135	166	198
9,3 + 84,1 / 6,5	186-56	864	7,9	12,5	20,3	32	44,5	64,5	98	130	160	190
Galette 58-42 + galette 74-26 et centralite												
68,0 + 29,1 / 2,9	347-57	1110	9,4	16,8	30,1	48	66	92	132	172	212	249
72,1 + 24,0 / 3,8	176-56	1087	10,1	17,0	29,9	47	67	94	140	180	220	257
67,5 + 28,9 / 3,6	124-58	1085	10,1	17,2	30,8	48,5	66	91,5	130	170	210	250
57,9 + 37,3 / 4,7	123-58	1025	9,6	15,6	27,6	43	60	85	123	160	196	233
24,3 + 72,8 / 2,9	356-57	1018	9,1	13,7	23,7	37,5	51	70,5	104	135	166	196
30 + 66 / 4	105-55	991	9,3	14,8	25,8	41,5	56	78	115	152	187	222
46,6 + 46,6 / 6,8	146-57	928	9,3	14,4	24,4	37,5	52	74	112	150	184	217
10 + 80 / 10	106-55	738	6,6	10,8	17,0	26	36	52,5	81	109	137	163
Galette 50-50 + galette 25-75 et centralite												
49 + 49 / 2	71-57	1368	15,4	27,2	50,5	78	104	145	209	265	315	365
Galette 58-42 + Nitrocellulose à 12,60												
72 + 28 / 0	377-58	1190	12,7	22,7	39,7	60	80	109	156	201	247	293

Colocando-se em gráfico, para cada valor de pressão, o logarítmo neperiano da velocidade de combustão em função do potencial da pólvora constata-se que os pontos representativos estão sensível-- mente alinhados, qualquer que seja a pressão e assim, estabelecer' uma expressão para cada valor de pressão.

Assim para P Kg/cm^2 teremos

$$\log_e V_c \ \left(\frac{mm}{seg}\right) = a + b \cdot \frac{Q}{1000} \ \left(\frac{cal}{g}\right)$$

Os coeficientes a e b dependem da pressão . Abaixo são forneci dos os valores de a e b calculados pelo método dos mínimos quadra- dos :

p kg/cm^2	a	b
70	0,978	1,259
150	1,310	1,437
300	1,655	1,606
500	1,996	1,713
700	2,335	1,705

p	a	b
1000	2,769	1,612
1500	3,276	1,486
2000	3,635	1,393
2500	3,902	1,331
3000	4,120	1,267

MURAOUR estabeleceu as expressões para a velocidade de combus- tão sob 1000 Kg/cm^2 de pressão, em função de temperatura de explo- são sob volume constante e do potencial real

$$\log_{10} (2 V_c) = 1,37 + 0,27 \frac{(Tv)}{1000} \qquad (1)$$

$$\log_{10} (2V_c) = 1,47 + 0,846 \frac{(Qr)}{1000} \qquad (2)$$

V_c = velocidade linear de combustão em mm/seg

As relações entre o logarítimo neperiano da velocidade linear' de combustão, a temperatura de explosão a volume constante e o po-- tencial real são:

$$\log. \ V_c = 2,461 + 0,622 \frac{Tv}{1000} \qquad (3)$$

$$\log. \ V_c = 2,692 + 1,948 \frac{Qr}{1000} \qquad (4)$$

Adotando-se as relações entre a temperatura de explosão, o po- tencial real e o potencial aparente abaixo teremos.

$$T_v = 423 + 2{,}767\ Q_a \qquad (5)$$

$$Q_r = 5 + 0{,}897\ Q_a \qquad (6)$$

$$\log_e V_c = 2{,}724 + 1{,}720\ \frac{Qa}{1000} \qquad (7)$$

$$\log_e V_c = 2{,}701 + 1{,}747\ \frac{Qa}{1000} \qquad (8)$$

A equação deduzida de várias experiências, a través o método - dos mínimos quadrados para 1000 Kg/cm^2 de pressão é:

$$\log_e V_c = 2{,}769 + 1{,}612\ \frac{Qa}{1000} \qquad (9)$$

Uma composição entre os valores de

$\log_e V_c$ e de V_c deduzidos através as equações

nº 7, 8 e 9, para diferentes valores do potencial aparente, é mostrado no quadro abaixo:

Q_a	EQ 7		EQ 8		EQ 9		
	$\log_e V$	V	$\log_e V$	V	$\log_e V$	V	ΔV
cal/g		mm/s		mm/s		mm/s	mm/s
500.....	3,585	36,0	3,575	35,5	3,575	35,5	0
600.....	3,757	43,0	3,750	42,5	3,736	42,0	0,5
700.....	3,929	51,0	3,925	50,5	3,897	49,0	1,5
800.....	4,101	60,5	4,099	60,5	4,059	58,0	2,5
900.....	4,273	71,5	4,274	72,0	4,220	68,0	3,5
1000.....	4,445	85,0	4,449	85,5	4,381	80,0	5,0
1100.....	4,617	101,0	4,623	102,0	4,542	94,0	7,0
1200.....	4,789	120,0	4,798	121,5	4,703	110,5	9,5
1300.....	4,961	142,5	4,973	144,0	4,864	129,5	13,0

MURAOUR estabeleceu fórmulas para calcular a temperatura de - explosão dos modelos, segundo seu teor em nitrogênio ativo e sua' composição:

PARA PÓLVORA DE BASE DUPLA

$$T_v = 390\ (N) - 41\ (C) - 1840\ ^oK \qquad (10)$$

N = teor de nitrogênio ativo da pólvora

C = percentagem de centralite na pólvora

PARA PÓLVORA DE BASE SIMPLES

$$T_v = 460\ (N) - 36\ (D) - 2690\ ^oK \qquad (11)$$

N = teor de nitrogênio ativo de pólvora

D = percentagem de difenilamina na pólvora

Também para o cálculo do potencial, MURAOUR estabeleceu a expressão seguinte para pólvoras de Base Dupla (SD)

$$Q = 140\ (N) - 16\ (C) - 820\ cal/g \qquad (12)$$

Para diversas composições, foram calculados temperatura de explosao, velocidade de combustão e potencial aparente, que estão tabeladas abaixo

GALERTE			%	TEMPERATURA EXPLOSÃO	VELOCIDADE COMBUSTÃO	Q_a
TIPO	NC	% GAL	CEN			
				T °K	mm/s	cal/g
60 40.....	CPSD à 11,7	90	10	2762	66	833
60 40.....	CPSD à 11,7	85	15	2244	52,5	651
60 40.....	CPSD à 11,7	93	7	2880	69,5	885
60 40.....	CPSD à 11,7	90	10	2629	58,5	778
60 40.....	CPSD à 11,7	85	15	2107	46,5	599
67,5 27,5..	CPSD à 11,7	97	3	3279	91	989
67-5 27,5..	CPSD à 11,7	96	4	3171	87	954
67,5 27,5..	CPSD à 11,7	95	5	2982	73	918
				2962	74	
				3002	76,5	
				3037	80	
67,5 27,5..	CPSD à 11,7	94	6	2973	74,5	883
67,5 27,5..	CPSD à 11,7	93	7	2889	70,5	847
67,5 27,5..	CPSD à 11,7	92,5	7,5	2839	64	831
67,5 27,5..	CPSD à 11,7	92	8	2781	66	812
67,5 27,5..	CPSD à 11,7	90,7	9,3	2618	56,5	766
67,5 27,5..	CPSD à 11,7	90	10	2488	53,5	741
66 25.....	CPSD à 11,7	96	4	3011	76,5	940
66 25.....	CPSD à 11,7	95	5	2868	70	905
				2873	66,5	
				3033	76,5	
66 25.....	CPSD à 11,7	94	6	2949	71	870
65/25.....	CPSD à 11,7	93	7	2822	66	835
65 25.....	CPSD à 11,7	92	8	2765	65	800
66 25.....	CPSD à 11,7	91,39	8,61	2738	65,5	778
66 25.....	CPSD à 11,7	91	9	2744	63,5	764
				à 2436	à 53,5	
66 25.....	CPSD à 11,7	90,27	9,73	2591	60	734
66 25.....	CPSD à 11,7	90,25	9,75	2630	60	738
				à 2481	à 53,5	
66 25.....	CPSD à 11,7	90	10	2381	51	729
				2672	59	
66 25.....	CPSD à 11,7	89	11	2386	57,5	694
66 25.....	CPSD à 11,7	88	12	2294	50	659
66 25.....	CPSD à 11,7	86	14	2071	40	588
66 25.....	CPSD à 11,7	83	17	1824	37,5	485
65 25.....	CPSD à 11,7	81,3	18,7	1621	30,5	423
66 25.....	CPSD à 11,7	79,1	20,9	1398	29	345

				T °K	mm/s	cal/g	
66/33.....	CPSD à 11,7	93	7	2880	69,5	885	
66/33.....	CPSD à 11,7	90	10	2629	58,5	778	
66/33.....	CPSD à 11,7	85	15	2107	46,5	599	
66,12,24,88	CPSD à 11,7	91	9	2516	59	763	
63,1/26,3..	CPSD à 11,7	89,4	10,6	2604	. 58,5	724	
60/25.....	CPSD à 11,7	85	15	2091	43	568	
				2073	44		
				2030	44,5		
71/29.....	CPSD à 11,7	95	5	3061	77,5	919	
				3029	72,5		
71/29.....	CPSD à 11,7	91	9	2635	59	776	
50/50.....	CP à 12,4	100	0	4053	136	1289	
50/50.....	CP_2 à 12,4	100	0	4096	141,5	1345	
				4068	144		
				4080	144,5		
				4010	135,5		
50/50.....	CP_2 à 12,4	96,5	3,5	3734	128	1212	
50/50.....	CP_2 à 12,4	93,5	6,5	3487	105	1099	
50/50.....	CP_2 à 12,4	90	10	3062	83	966	
50/50.....	CP_2 à 12,4	86,5	13,5	2763	66,5	834	
75/25.....	CP à 11,0	95	5	2587	56,5	864	
75/25.....	CP à 11,0	93	7	2416	49,5	794	
75/25.....	CP à 11,0	90	10	2188	43	690	
62/28.....	CP à 12,66	90	10	2828	70,5	843	contient du CP_1
62/25,7....	CP à 11,95	87,7	12,3	2386	54,5	685	CP_1 (17,4 %) + CP_2 (82,6 %)
62/25,7....	CP à 11,95	94,8	5,2	2997	82,5	938	
66/25.....	CP à 12,13	90,9	9,1	2548	62,5	801	CP_1 (29,64 %) + CP_2 (70,36 %)

Em balística interior, representa-se habitualmente a relação entre a velocidade linear, de combustão da pólvora e a pressão pela equação:

$$V_c = \beta P^{\alpha} \qquad (13)$$

Aplicando-se logarítmo teremos:

$$\lg V_c = \log_e \beta + \alpha \log_e P \qquad (14)$$

A experiência nos tem mostrado que com uma boa aproximação se pode escrever:

$$\lg V_c = a + b \frac{Q}{1000} \qquad (15)$$

É pois interessante procurar a relação entre os coeficientes a e b e log P, para caracterisar a função:

$$V_c = V(P, Q) \qquad (16)$$

Se se coloca os valores obtidos para a e b num gráfico em função do logarítmo da pressão (FIG 3 adiante), vê-se que não é possível expressar as relações entre a e b & log P por uma única equação em todo o domínio de pressões estudadas; pode-se ao contrário, representar de maneira excelente estas relações por duas equações lineares, uma para o intervalo entre 70 e 300 Kgf/cm^2 e outra para o intervalo entre 700 e 3000 Kgf/cm^2.

ENTRE 70 e 300 Kgf/cm^2

$$a = -1{,}020 + 0{,}468 \lg P \qquad (17)$$

$$b = +0{,}236 + 0{,}240 \lg P \qquad (18)$$

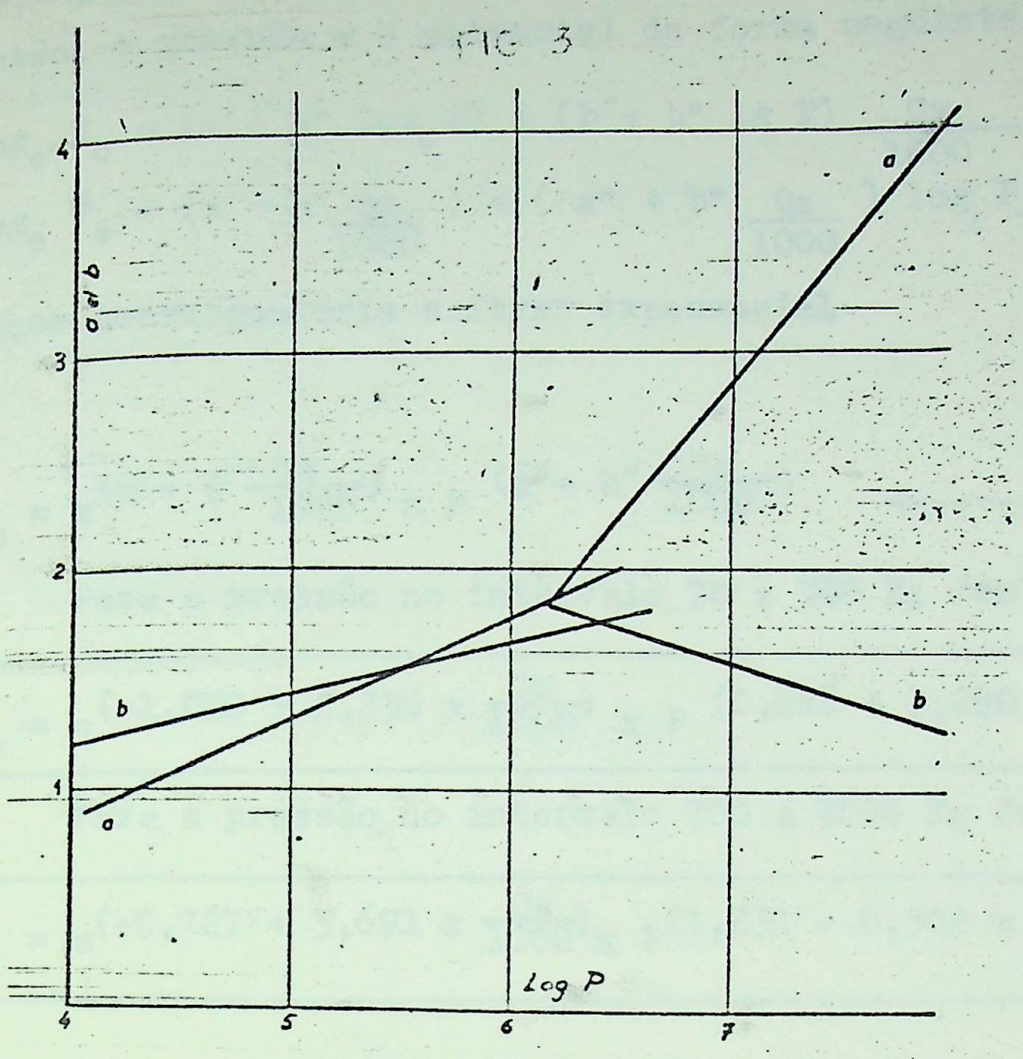
ENTRE 700 e 3000 Kgf/cm^2

$$a = -5{,}727 + 1{,}231 \lg P \qquad (19)$$

$$b = 3{,}691 - 0{,}302 \lg P \qquad (20)$$

É DADO no quadro adiante, os valores experimentais de a e b e aqueles deduzidos das expressões 17, 18, 19 e 20 .

FIG 3



p kg/cm²	a_{exp}	a_{calc}	b_{exp}	b_{calc}
70	0,978	0,972	1,259	1,258
150	1,310	1,323	1,437	1,438
300	1,655	1,648	1,606	1,605
500	1,996		1,713	
700	2,335	2,335	1,705	1,712
1000	2,769	2,774	1,612	1,605
1500	3,276	3,273	1,486	1,482
2000	3,635	3,627	1,393	1,395
2500	3,902	3,902	1,331	1,327
3000	4,120	4,126	1,267	1,273

Assim, pode-se escrever a relação entre a velocidade linear de combustão, a pressão e o potencial da forma seguinte:

$$\log_e V_c = (a' + a'' \log_e P) + (b' + b'' \lg P) \frac{Qa}{1000} \qquad (21)$$

$$\log_e V_c = (a' + b' \frac{Qa}{1000}) + (a'' + b'' \frac{Qa}{1000}) \log_e P \qquad (22)$$

O que corresponderia a forma exponencial

$$V_c = e^{(a' + b' \frac{Qa}{1000})} \times P^{(a'' + b'' \frac{Qa}{1000})} \qquad 23$$

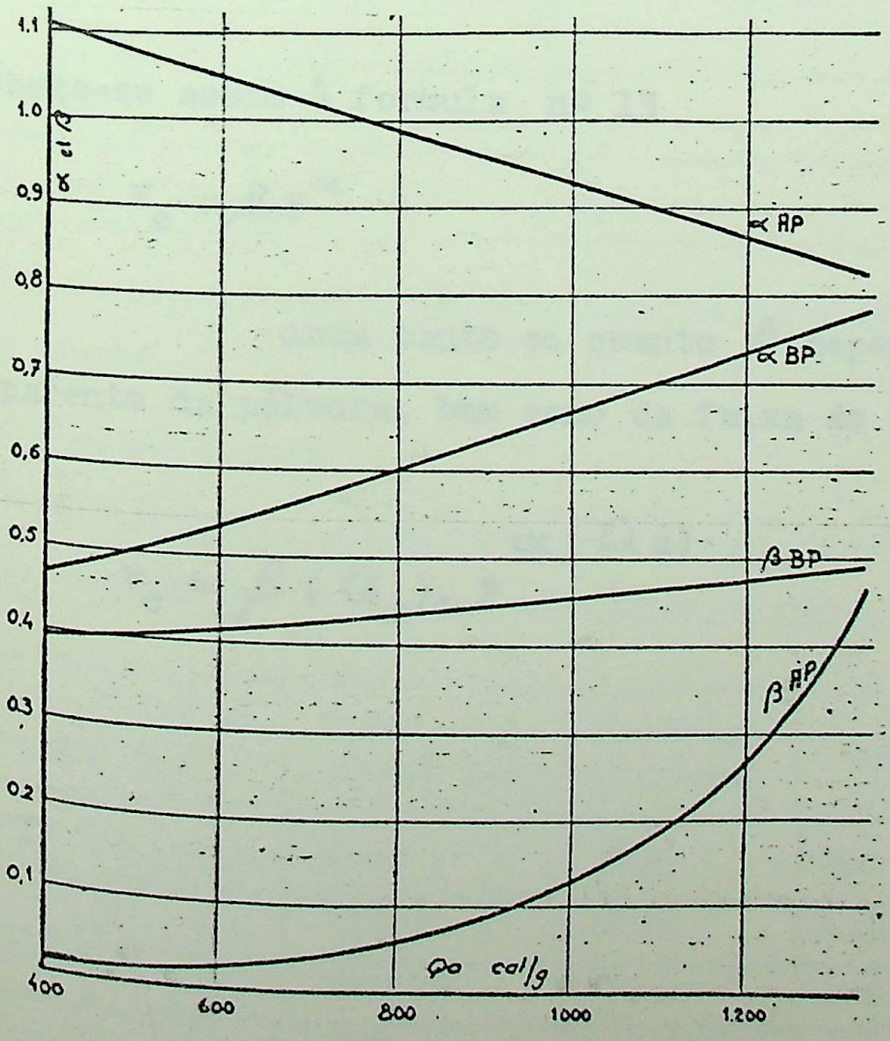
Para a pressão no intervalo 70 a 300 Kg /cm^2

$$V_c = e^{(-1,020 + 0,236 \times \frac{Qa}{1000})} \times P^{(0,468 + 0,240 \times \frac{Qa}{1000})}$$

Para a pressão no intervalo 700 a 3000 Kg /cm^2

$$V_c = e^{(-5,727 + 3,691 \times \frac{Qa}{1000})} \times P^{(1,231 - 0,302 \times \frac{Qa}{1000})}$$

Representamos na Fig. 4 abaixo as curvas dos valores dos coeficientes α e β em função do potencial



BAIXAS PRESSÕES

$$\alpha_{BP} = 0{,}468 + 0{,}240 \times \frac{Qa}{1000}$$

Altas pressões

$$\alpha_{AP} = 1{,}231 - 0{,}302 \times \frac{Qa}{1000}$$

Baixas pressões

$$\beta_{BP} = e^{-1{,}020 + 0{,}236 \times \frac{Qa}{1000}}$$

Altas pressões

$$\beta_{AP} = e^{-5{,}727 + 3{,}691 \times \frac{Qa}{1000}}$$

Chega-se assim à formula nº 13

$$V_c = \beta . P^{\alpha}$$

onde tanto α quanto β dependem do potencial aparente da pólvora, bem como da faixa de pressões

$$V_c = \beta (Q_a) . P^{\alpha (Q a)}$$

CÁLCULO DA FORMA DOS BLOCOS PROPULSORES

1. MÉTODO GERAL DE DETERMINAÇÃO DE FORMAS DE BLOCOS

Dados necessários:

- Diâmetro interno da câmara de combustão - D
- Comprimento máximo da câmara - L
- Força média platô - $\overline{F}$
- Tempo de combustão platô - t_{cr}
- Pressão máxima e pressão de funcionamento
- Composição a ser utilizada

1.1. Determinação do diâmetro máximo do grão - Ø -

Diâmetro máximo do grão = diâmetro mínimo da câmara, menos:

- duas espessuras de inibidor (vernis) - e_i -
- jogo devido à dilatação - e_l -

$$\emptyset = D - 2\,e_i - e_l$$

DIÂMETRO DO BLOCO	ESPESSURA DE VERNIZ INIBIDOR
Ø < 50mm	1 a 2.0mm
50 < Ø < 200mm	1,5 a 3.0mm
200 < Ø < 300mm	2,5 a 6.0mm

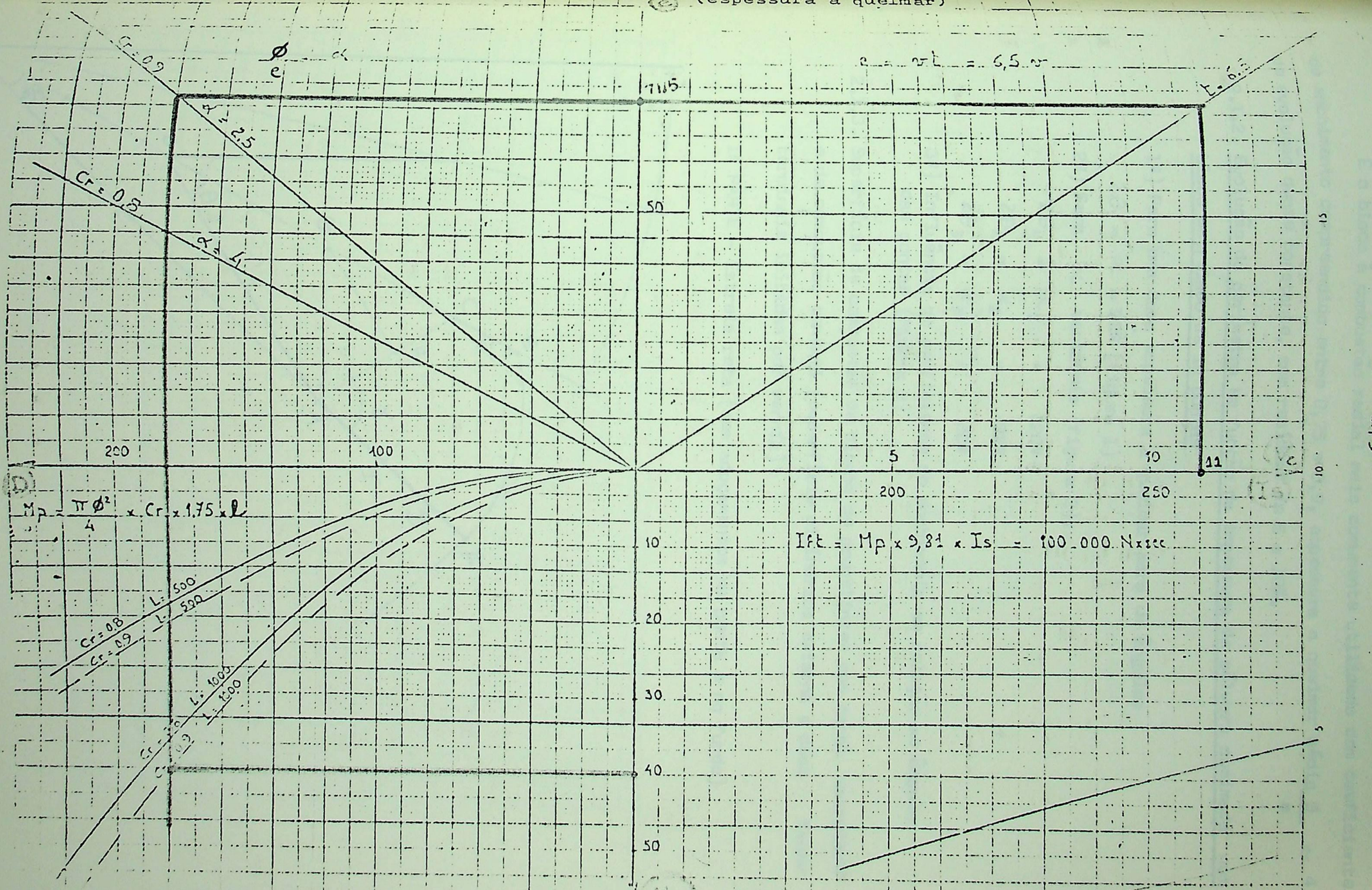
A tabela acima é dada a título informativo, para um bloco de combustão "cigarette".

1.2. Escolha da forma

Encontra-se na tabela seguinte, a título de informação, as principais características dos diferentes tipos de forma.

ORMA	COEFICIENTE DE ENCHIM (C_r)	ESPESSURA A QUEIMAR (e)	SUPERFÍCIE DE COMB. S_c	PLATÔ	RESÍDUOS	$\frac{\emptyset}{e}$
relado	0,75 a 0,9	Média	Média	Bom	5 a 10%	4 a 5
mpette	> 0,9	Grande	Média	M.Bom	0	2,5
elles	0,5 a 0,7	Pequena	M.Grande	Bom	5 a 10%	6 a 15
omposi-	0,9	Média ou Grande	Média	Bom	2%	-
no	1	M.Grande	M.Pequena	M.Bom	0	-

(espessura a queimar)



É o bloco à combustão radial mais comumente utilizado com coeficiente de enchimento compreendido entre 0,75 e 0,9, espessura a queimar média $\frac{\emptyset}{e} \approx 4$ e de evolução quase constante, com resíduos de 5 a 10%.

2.1.2. Evolução do perímetro em função da espessura da pólvora queimada num bloco estrelado de 10 pontas

1º) Para uma dada espessura a queimar para um ângulo:

$2\theta = \alpha = 92º$ (figura 1)

2º) Para α variáveis (figura 2):

$2\theta_1 = \alpha_1 = 120º$

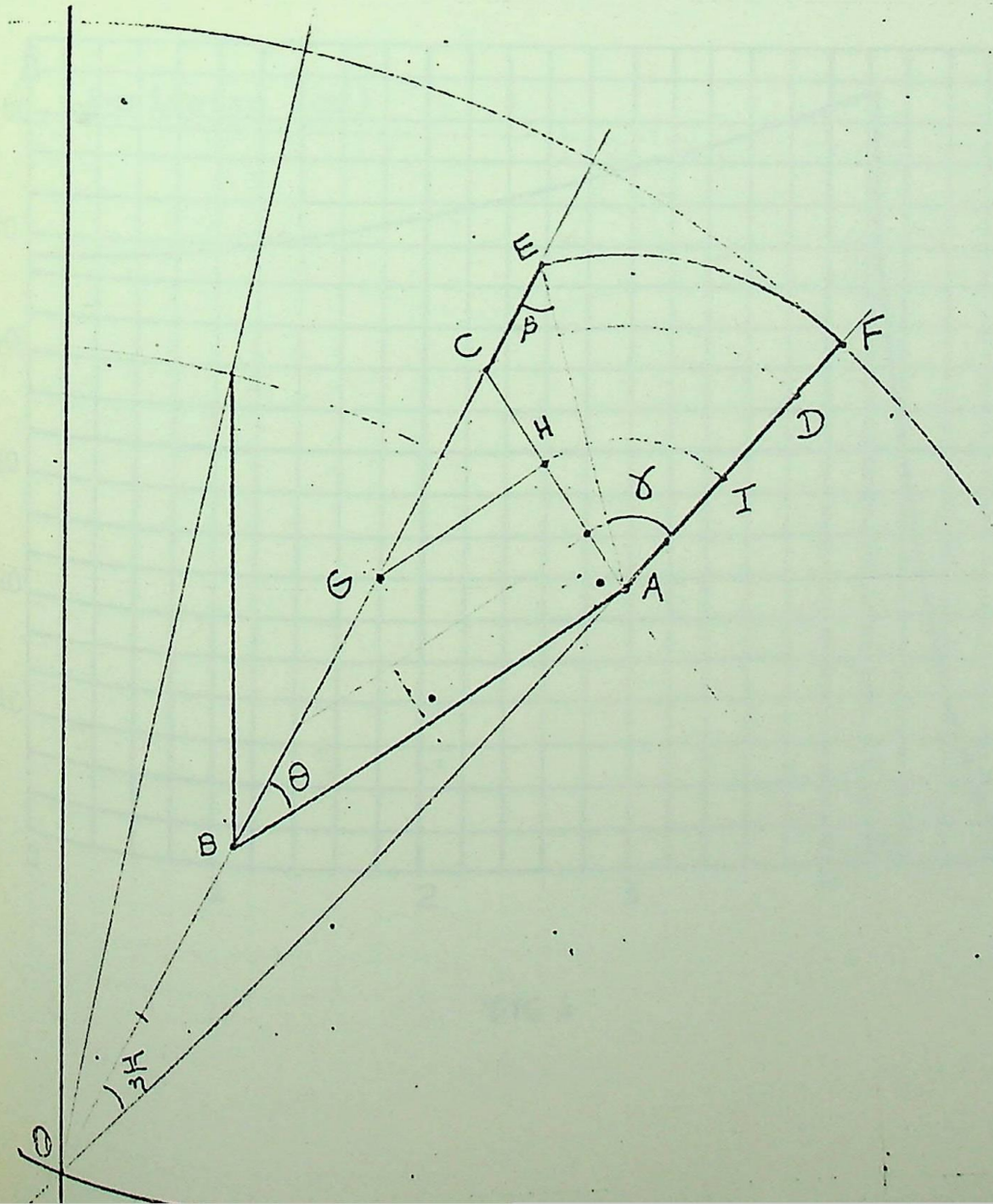
$2\theta_2 = \alpha_2 = 92º$

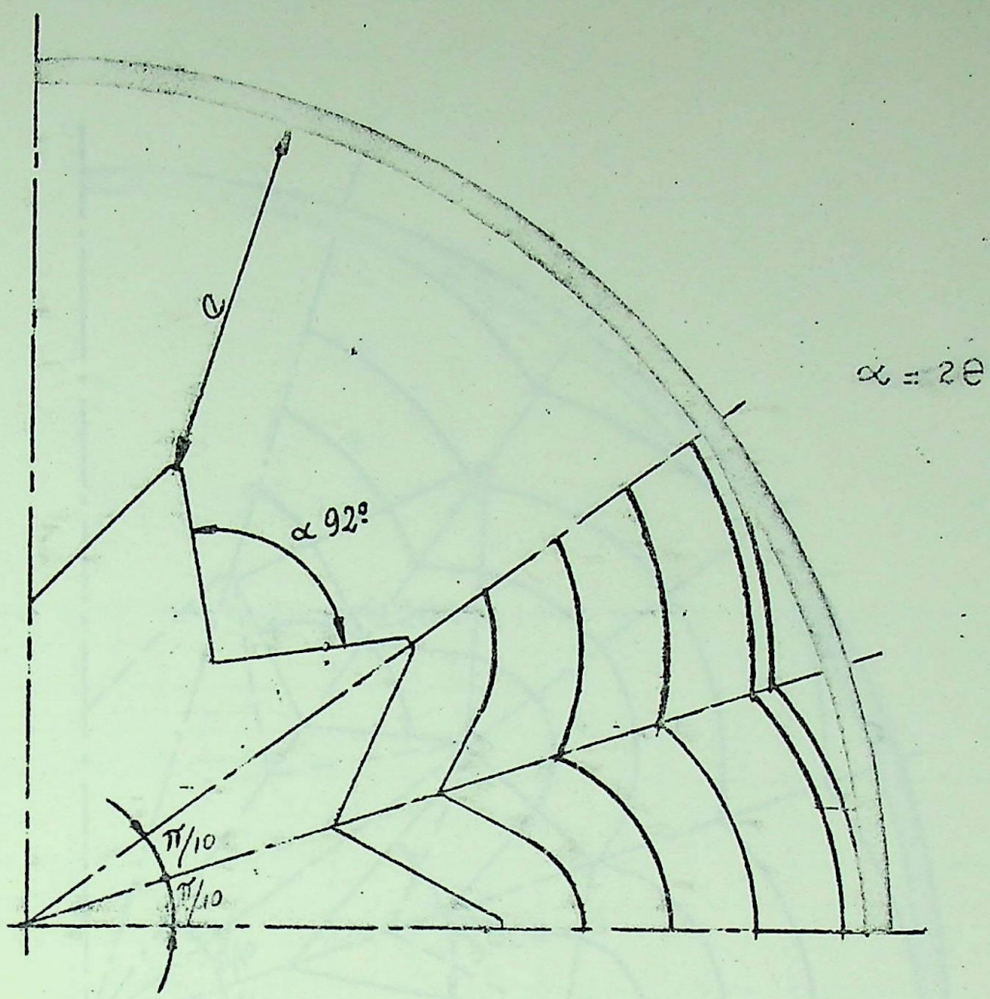
$2\theta_3 = \alpha_3 = 60º$

3º) Influência do coeficiente de enchimento em relação ao ângulo das pontas (figura 3)

2.1.3. Superfície de combustão de blocos de propelentes com canal estrelado e de combustão central (superfície cilíndrica externa e duas faces terminais inibidas por verniz)

1ª PARTE - Estrela reta (sem adoçamentos na ponta e no fundo)




α = 2θ
α 92º
π/10
π/10

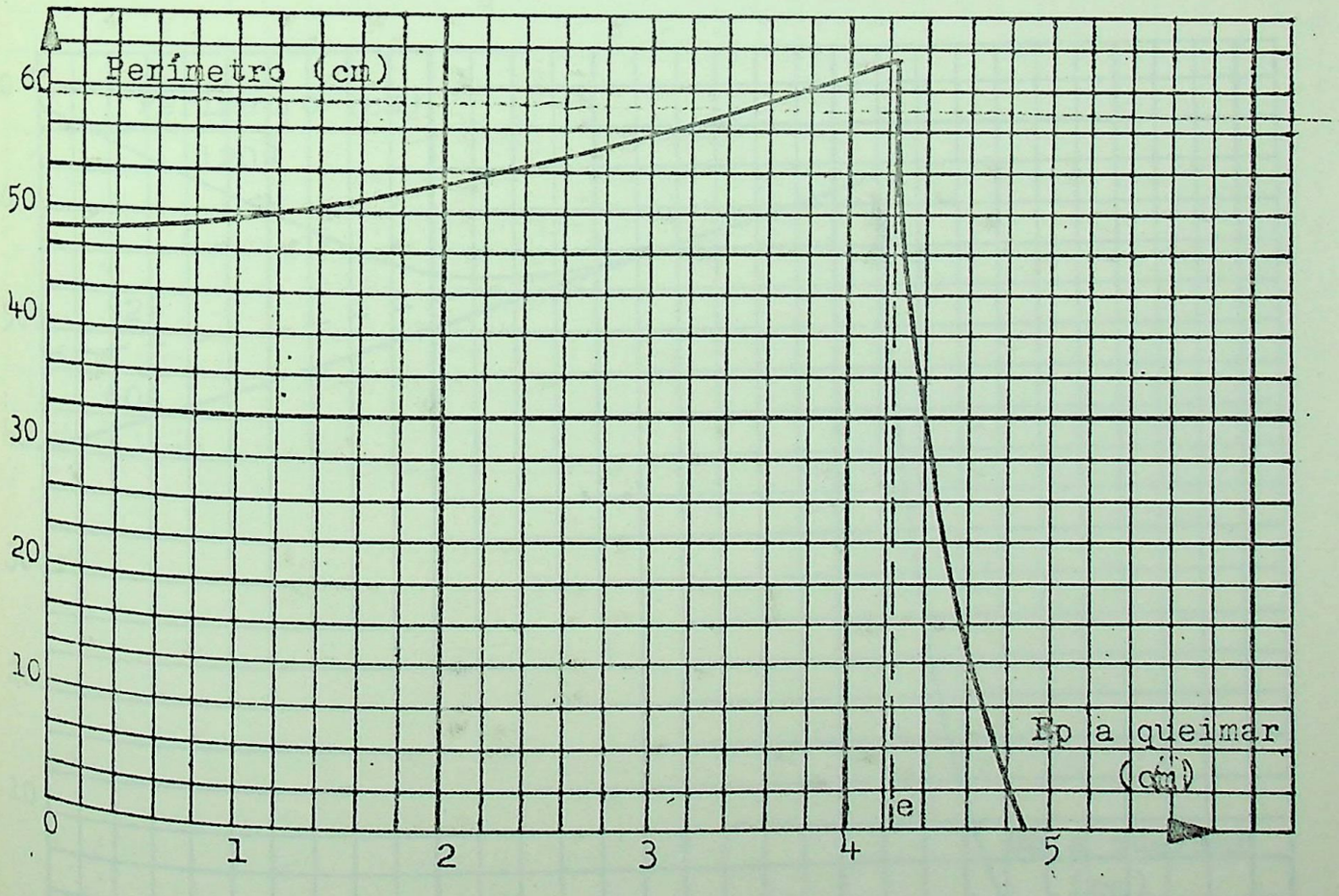
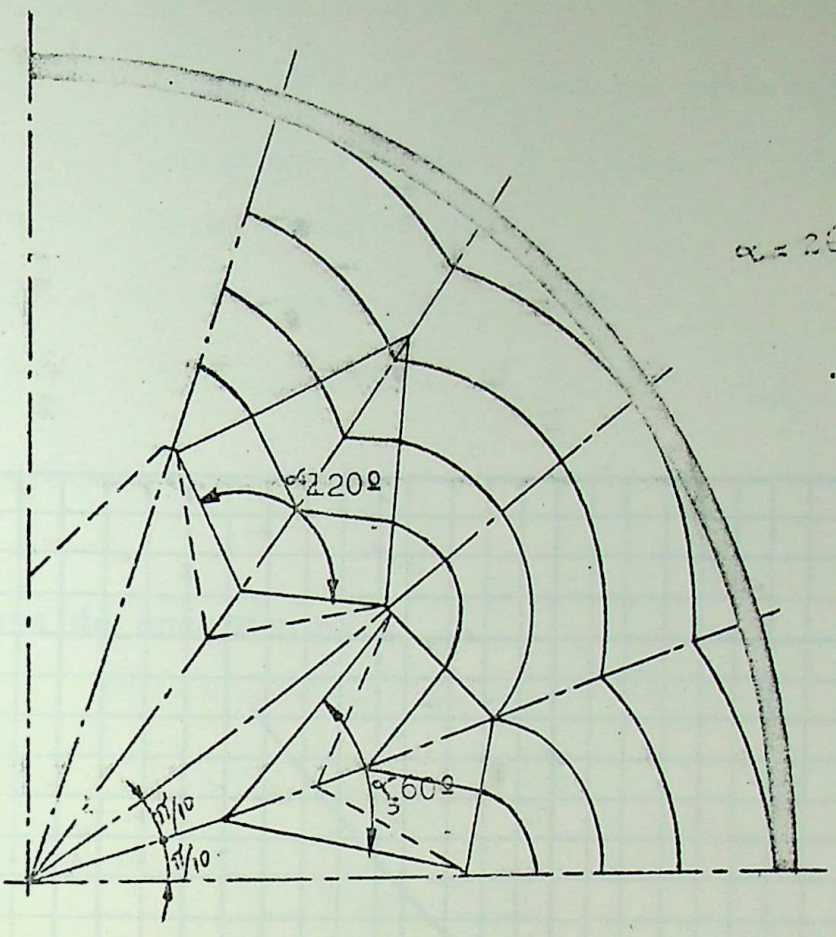

Perímetro (cm)
60
50
40
30
20
10
0
1
2
3
4
5
e
Ep a queimar
(cm)

FIG 1


α = 2θ
α 120º
α 60º
r/10
r/10

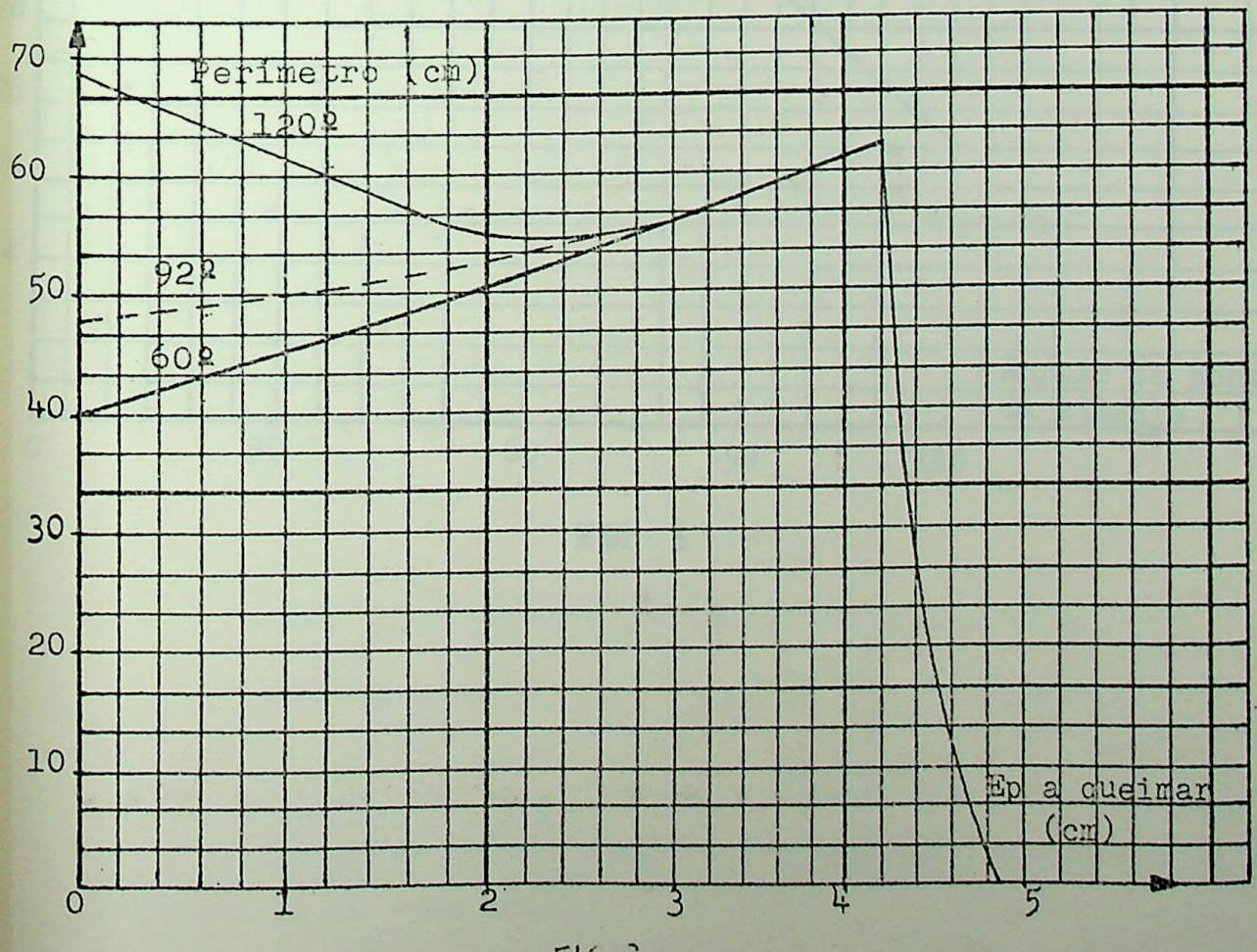

Perímetro (cm)
120º
92º
60º
70
60
50
40
30
20
10
0
1
2
3
4
5
Ep a queimar
(cm)

FIG 2

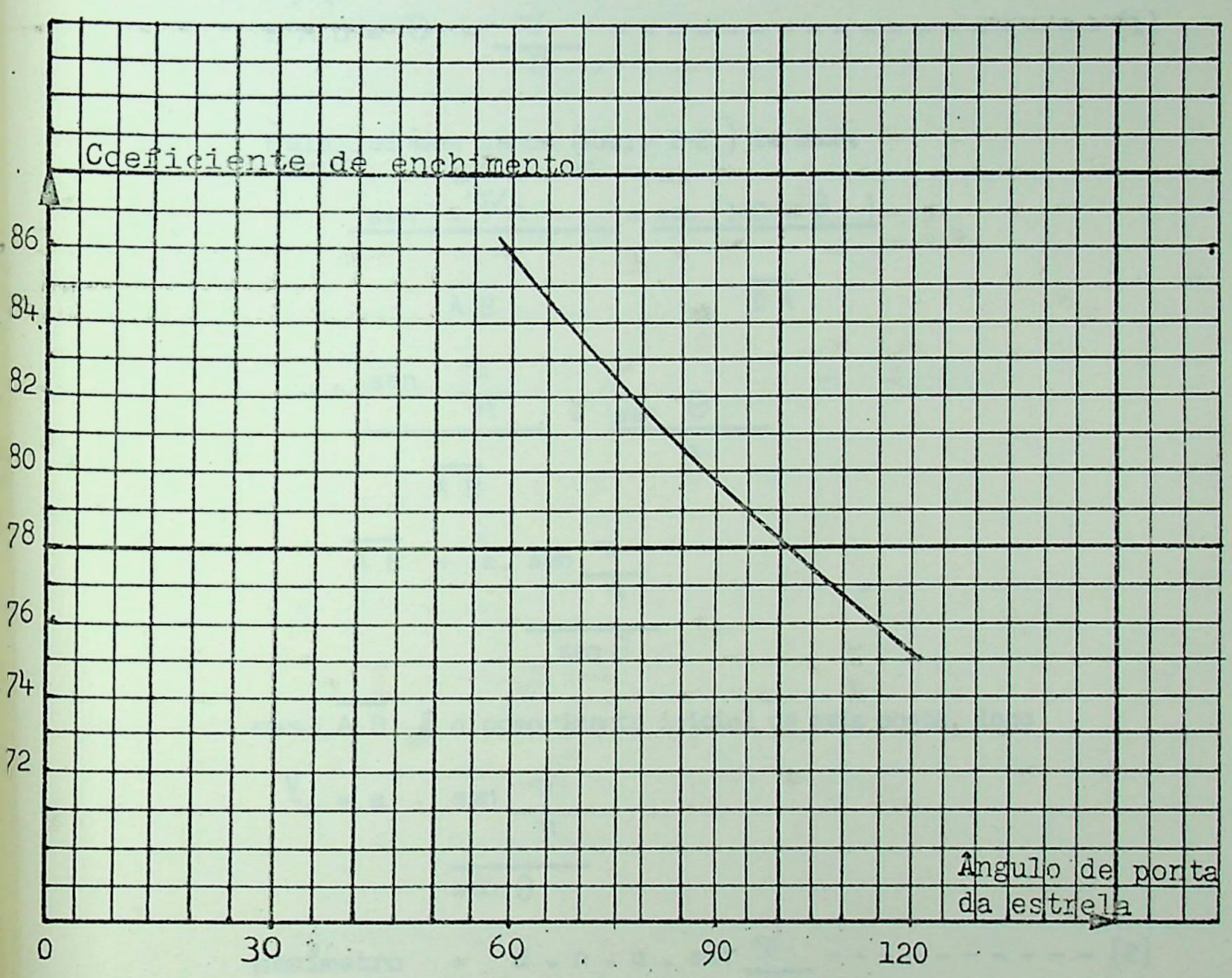

Coeficiente de enchimento
86
84
82
80
78
76
74
72
Ângulo de ponta da estrela
0
30
60
90
120

FIG 3

$\overline{O\,A}$ = raio de ponta da estrela = a

$\overline{O\,B}$ = raio de fundo da estrela = b

no triângulo O A B:

ângulo $\hat{B\,O\,A} = \frac{\pi}{n}$; sendo n = número de pontas da estrela

ângulo $\hat{A\,B\,O} = 180 - \theta$; sendo θ = semi-ângulo de lado da estrela (de face)

$\hat{A\,B\,O} + \hat{B\,O\,A} + \hat{B\,A\,O} = 180$ logo

$$\hat{B\,A\,O} = 180 - (180 - \theta + \frac{\pi}{n}) = \theta - \frac{\pi}{n}$$

$$\hat{B\,A\,O} = \theta - \frac{\pi}{n} \quad \text{----------} \quad (1)$$

Pela lei dos senos (Perry 2-21) teremos:

$$\frac{\operatorname{sen} \pi/n}{\overline{A\,B}} = \frac{\operatorname{sen} (180 - \theta)}{\overline{O\,A}}$$

$$\frac{\operatorname{sen} \frac{\pi}{n}}{\overline{A\,B}} = \frac{\operatorname{sen} \theta}{a}$$

$$\overline{A\,B} = a \cdot \frac{\operatorname{sen} \frac{\pi}{n}}{\operatorname{sen} \theta}$$

mas $\overline{A\,B}$ é o comprimento inicial de meia ponta, logo

$$\ell_o = a \cdot \frac{\operatorname{sen} \frac{\pi}{n}}{\operatorname{sen} \theta}$$

$$\text{perímetro}_o = 2 \cdot n \cdot a \cdot \frac{\operatorname{sen} \frac{\pi}{n}}{\operatorname{sen} \theta} \quad \text{----------} \quad (2)$$

sendo L o comprimento do grão (bloco de propelente)

$$\text{superfície} = 2 \cdot n \cdot a \cdot L \cdot \frac{\operatorname{sen} \frac{\pi}{n}}{\operatorname{sen} \theta} \quad \text{-------} \quad (3)$$

Inicia-se então a primeira fase da combustão, onde teremos um segmento e um arco por meia estrela:

$$\ell = \overline{G\,H} + \overset{\frown}{H\,I}$$

Estudando o trapézio retângulo B A H G, vemos:

base maior = $\overline{A\ B} = \ell_c$

base menor = $\overline{G\ H} = \ell_c - \overline{A\ H} \cdot \operatorname{ctg} \theta$

porém $\overline{A\ H}$ = espessura queimada = e

$\overline{G\ H} = \ell_c - e \operatorname{ctg} \theta$

$$\overline{G\ H} = a \frac{\operatorname{sen} \frac{\pi}{n}}{\operatorname{sen} \theta} - e \operatorname{ctg} \theta$$

Estudando o arco $\overline{H\ I}$, vemos:

raio do arco = $\overline{A\ H} = \overline{H\ I} = e$

ângulo central = $180 - (C\hat{A}B + B\hat{A}O)$

$$= 180 - \left(90 + \theta - \frac{\pi}{n}\right) = 90 + \frac{\pi}{n} - \theta$$

e assim, teremos em radianos

ângulo central = $\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta\right)$ radianos

$$\overset{\frown}{H\ I} = e\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta\right)$$

e $$\ell = a \frac{\operatorname{sen} \frac{\pi}{n}}{\operatorname{sen} \theta} - e \operatorname{ctg} \theta + e\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta\right)$$

$$\ell = a \frac{\operatorname{sin} \frac{\pi}{n}}{\operatorname{sin} \theta} + e\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta - \operatorname{ctg} \theta\right)$$

$$\text{perímetro} = 2 \cdot n \left[a \frac{\operatorname{sin} \frac{\pi}{n}}{\operatorname{sin} \theta} + e\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta - \operatorname{ctg} \theta\right) \right]$$

$$\text{superfície} = 2 \cdot n \cdot L \left[a \frac{\operatorname{sin} \frac{\pi}{n}}{\operatorname{sin} \theta} + e\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta - \operatorname{ctg} \theta\right) \right]$$

▲ O A C ângulo $O\hat{C}A = 180 - \left(\frac{\pi}{n} + 90 + \theta - \frac{\pi}{n}\right) = 90 - \theta$

pela lei dos senos

$$\frac{\operatorname{sen} \frac{\pi}{n}}{\overline{A\ C}} = \frac{\operatorname{sen}(90 - \theta)}{a} = \frac{\cos \theta}{a}$$

$$\overline{A\ C} = a \operatorname{sen} \frac{\pi}{n}$$

O perímetro e a superfície são pois funções lineares da espessura queimada. Para um número determinado de pontas de estrela, esta fase da combustão poderá ser progressiva, constante ou degressiva, segundo o valor do ângulo ϵ

$$e_c = a \frac{\operatorname{sen} \pi/n}{\cos \epsilon}$$

Ao chegar ao arcó C D, inicia-se a segunda fase da combustão onde teremos apenas um arco por meia ponta de estrela.

Vamos estudar os arcos a partir de $\overset{\frown}{C\,D}$

$\hat{D\,A\,C} = \gamma_c$ (varia segundo a

$\hat{D\,A\,E} = \gamma_i$ espessura queimada)

$\hat{O\,C\,A} = \beta_c$ (varia segundo a

$\hat{O\,E\,A} = \beta_i$ espessura queimada)

triângulo O C A

pela lei dos senos (Perry 2-21)

$$\frac{\operatorname{sen} \pi/n}{\overline{C\,A}} = \frac{\operatorname{sen} \beta_c}{\overline{A\,O}}$$

$$\frac{\operatorname{sin} \pi/n}{\overline{C\,A}} = \frac{\operatorname{sin} \beta_c}{a}$$

$$\overline{C\,A} = a \frac{\operatorname{sin} \pi/n}{\operatorname{sin} \beta_c}$$

triângulo O E A

pela lei dos senos (Perry 2-21)

$$\frac{\operatorname{sen} \pi/n}{\overline{E\,A}} = \frac{\operatorname{sen} \beta}{\overline{O\,A}}$$

$$\overline{E\,A} = e = a \frac{\operatorname{sen} \pi/n}{\operatorname{sen} \beta}$$

e tiramos o valor de β em função da espessura queimada e

$$\operatorname{sen} \beta = \frac{a}{e} \operatorname{sen} \frac{\pi}{n}$$

$$\beta = \operatorname{arc} \operatorname{sen} \left(\frac{a}{e} \operatorname{sen} \frac{\pi}{n} \right)$$

Vamos estudar o ângulo central do arco em combustão nesta segunda fase:

o raio do arco é a espessura queimada $\underline{e}$

o ângulo do arco é γ

triângulo E A O

soma dos ângulos internos = 180

$$\beta + \frac{\pi}{n} + E\hat{A}O = 180$$

porém no ângulo raso O A F, temos

$$\gamma + E\hat{A}O = 180$$

comparando as duas últimas expressões

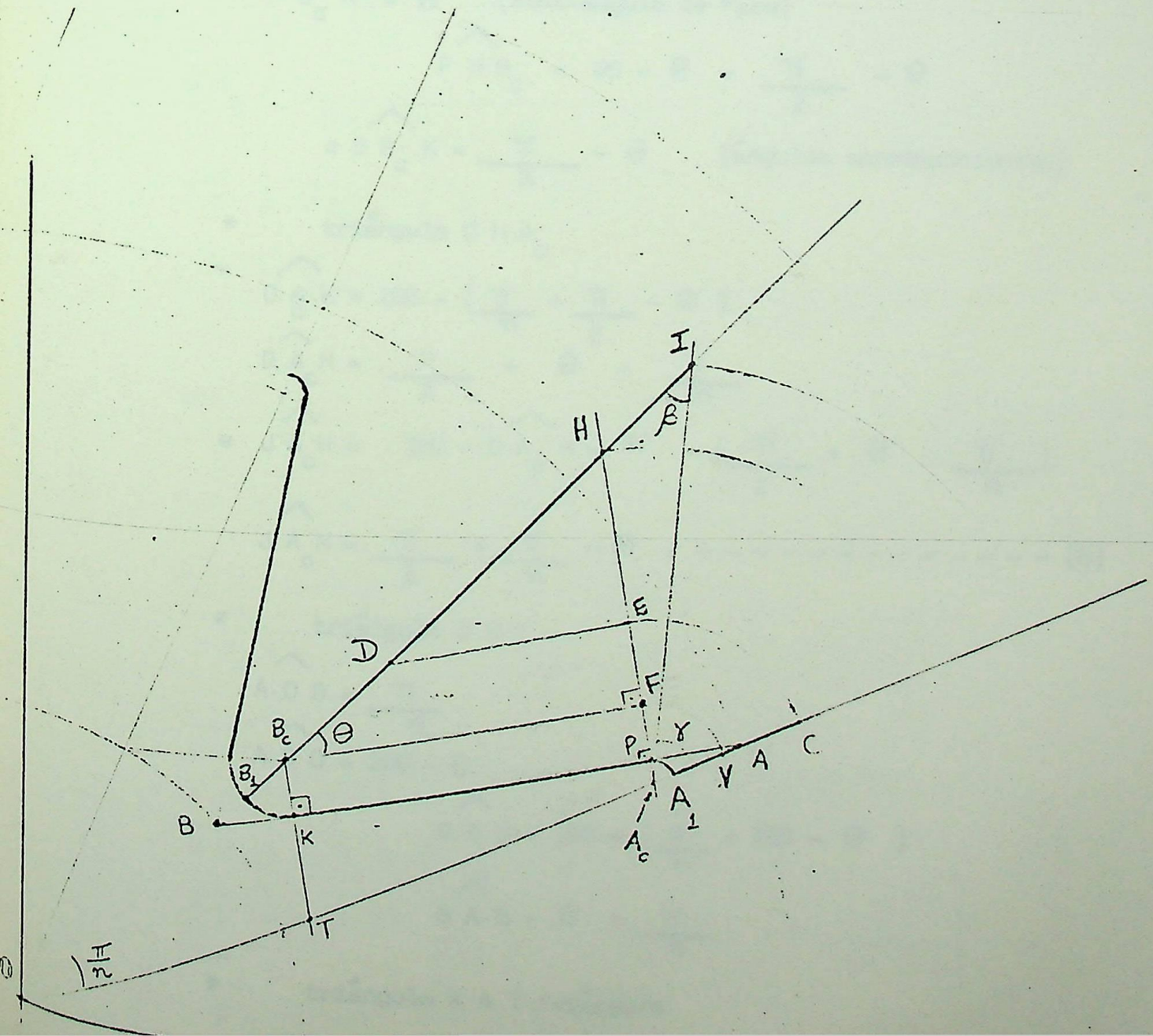
$$\gamma = \beta + \frac{\pi}{n} \quad \text{em radianos}$$

$$e\hat{C}D = \ell = e\left(\beta + \frac{\pi}{n}\right)$$

$$\text{perímetro} = 2 \cdot n \cdot e\left(\beta + \frac{\pi}{n}\right)$$

$$\text{superficie} = 2 \cdot n \cdot L \cdot e\left(\beta + \frac{\pi}{n}\right) \text{ ---------- (5)}$$

2ª PARTE - Estrela com adoçamento na ponta e no fundo



$\overline{OA}$ = raio de ponta de estrela reta = a

$\overline{OA_1}$ = raio de ponta de estrela adoçada = a_1

$\overline{OB}$ = raio de fundo de estrela reta = b

$\overline{OB_1}$ = raio de fundo de estrela adoçada = b_1

$\overline{A_c A_1}$ = raio de adoçamento da ponta = r

$\overline{B_c B_1}$ = raio de adoçamento do fundo = t

n = número de pontas da estrela

θ = semi-ângulo de lados

L = comprimento do grão

ϕ = diâmetro externo do grão não inibido

$\frac{\phi}{2} = R$ = raio externo do grão não inibido

* triângulo B_c F H retângulo

$\hat{FB_cH} = \theta$ (semi-ângulo de face)

$$\hat{FHB_c} = 90 - \theta = \frac{\pi}{2} - \theta$$

e $\hat{OB_cK} = \frac{\pi}{2} - \theta$ (ângulos correspondentes)

* triângulo O H A_c

$$\hat{OA_cH} = 180 - \left(\frac{\pi}{n} + \frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

$$\hat{OA_cH} = \frac{\pi}{2} + \theta - \frac{\pi}{n}$$

e $\hat{JA_cH} = 180 - \hat{OA_cH} = \pi - \left(\frac{\pi}{2} + \theta - \frac{\pi}{n}\right)$

$$\hat{JA_cH} = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta \quad \text{----------} \quad (6)$$

* triângulo B O A

$$\hat{AOB} = \frac{\pi}{n}$$

$$\hat{ABO} = 180 - \theta$$

$$\hat{BAO} = 180 - \left(\frac{\pi}{n} + 180 - \theta\right)$$

$$\hat{BAO} = \theta - \frac{\pi}{n}$$

* triângulo K A T retângulo

$\hat{KAT} = \theta - \frac{\pi}{n}$ (o mesmo que $\hat{BAO}$)

$\hat{KTA} = 90 - (\theta - \frac{\pi}{n}) = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta$

assim: $\hat{KTO} = \pi - (\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta)$

$\hat{KTO} = \frac{\pi}{2} + \theta - \frac{\pi}{n}$

* triângulo $O B_c T$

$\hat{O B_c T} = 180 - (\hat{B_c T O} + \hat{T O B_c})$

$\hat{O B_c T} = 180 - (\frac{\pi}{2} + \theta - \frac{\pi}{n} + \frac{\pi}{n})$

$\hat{O B_c T} = \frac{\pi}{2} - \theta$ ---------- (7)

* triângulo $A A_c P$ retângulo

$\hat{A A_c P} = \hat{J A_c H} = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta$

$\overline{A A_c} = \frac{r}{\cos(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta)} = \frac{r}{\sin(\theta - \frac{\pi}{n})}$

$\overline{OA} = \overline{O A_1} - \overline{A_c A_1} + \overline{A_c A}$

$a = a_1 - r + \frac{r}{\cos(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta)}$

$\cos\left[\frac{\pi}{2} + (\frac{\pi}{n} - \theta)\right] = \cos\left[\frac{\pi}{2} - (\theta - \frac{\pi}{n})\right] = \operatorname{sen}(\theta - \frac{\pi}{n})$

$a = a_1 + r \cdot \left[\frac{1}{\operatorname{sen}(\theta - \frac{\pi}{n})} - 1\right]$

* triângulo $K B_c B$ retângulo

$\hat{B B_c K} = \hat{O B_c T} = \frac{\pi}{2} - \theta$

$\overline{B B_c} = \frac{t}{\cos(\frac{\pi}{2} - \theta)} = \frac{t}{\operatorname{sen}\theta}$

$\overline{OB} = \overline{O B_1} + \overline{B_1 B_c} - \overline{B B_c}$

$\overline{OB} = b_1 + t - \frac{t}{\operatorname{sen}} = b_1 + t \cdot \left[1 - \frac{1}{\operatorname{sen}\theta}\right]$

$b = b_1 + t \cdot \left[1 - \frac{1}{}\right.$

Primeira fase da combustão

$0 \leqslant$ espessura queimada $< t$

* triângulo O A B

Pela lei dos senos (Perry 2-21)

$$\frac{\sin \pi/n}{\overline{B\,A}} = \frac{\sin\left(\theta - \pi/n\right)}{b}$$

$$\overline{B\,A} = b \cdot \frac{\sin \pi/n}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)} = \overline{B\,K} + \overline{K\,P} + \overline{P\,A}$$

$$\overline{B\,K} = \overline{B\,B_c} \quad \sin B\hat{B}_c K = \frac{t}{\operatorname{sen}\theta} \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = t\,\frac{\cos\theta}{\operatorname{sen}\theta}$$

$$\overline{B\,K} = t\,\operatorname{ctg}\theta$$

$$\overline{P\,A} = \overline{A\,A_c} \cdot \operatorname{sen} A\hat{A}_c P = \frac{r}{\operatorname{sen}\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)} \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta\right)$$

$$\overline{P\,A} = r \cdot \frac{\cos\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)}{\operatorname{sen}\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)} = r \cdot \operatorname{ctg}\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right) \quad \text{ou}$$

$$\overline{P\,A} = r \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta\right)$$

$$\overline{K\,P} = \overline{B\,A} - \overline{B\,K} - \overline{P\,A}$$

$$\overline{K\,P} = b\,\frac{\sin \pi/n}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)} - t\,\operatorname{ctg}\theta - r \cdot \operatorname{ctg}\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)$$

Cálculo do comprimento inicial da meia ponta de estrela

$$\ell_c = \overline{K\,P} + \overset{\frown}{P\,A_1} + \overset{\frown}{K\,B_1}$$

$\overset{\frown}{P\,A_1} = r \cdot$ (ângulo $\overset{\frown}{P\,A_1}$ em radianos)

$$\overset{\frown}{P\,A_1} = r \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta\right)$$

ângulo $\overset{\frown}{P\,A_1}$ em radianos = ângulo $\overset{\frown}{P\,A_1}$ em graus $\times \frac{(3{,}141593)}{180}$

$\overset{\frown}{K\,B_1} = t$ (ângulo $\overset{\frown}{K\,B_1}$ em radianos)

$$\overset{\frown}{K\,B_1} = t \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

ângulo $\overset{\frown}{K\,B_1}$ em radianos = ângulo $\overset{\frown}{K\,B_1}$ em graus $\times \frac{(3{,}141593)}{180}$

$$\ell_c = b\,\frac{\sin \pi/n}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)} - t\,\operatorname{ctg}\theta - r\,\operatorname{ctg}\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right) + r\left(\frac{\pi}{n} + \frac{\pi}{2} - \theta\right) + t\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

$$\ell_o = b\left[\frac{\sin \pi/n}{\sin(\theta - \pi/n)}\right] + t\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \operatorname{ctg}\theta\right) + r\left[\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta - \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \right.\right.$$

$$\text{perímetro}_o = 2.n.\left\{ b\,\frac{\sin \pi/n}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)} + t\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \operatorname{ctg}\theta\right) + r\left[\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta + \right.\right.$$

$$\left.\left. - \operatorname{ctg}\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)\right]\right\}$$

$$\text{superfície}_c = 2 \cdot n \cdot L\left\{ b\,\frac{\sin \pi/n}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)} + t\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \operatorname{ctg}\theta\right) + \right.$$

$$\left. + r\left[\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta - \operatorname{ctg}\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)\right]\right\}$$

para qualquer espessura queimada entre $\underline{\underline{0}}$ e $\underline{\underline{t}}$ teremos $\overline{KP}$ constante e :

arco em torno de B_c diminuindo de comprimento constantemente pois raio = t − e

arco em torno de A_c aumentando de comprimento constantemente pois raio = r + e

$\ell = \overline{KP}$ + arco em torno de B_c + arco em torno de A_c

$$\ell = b\,\frac{\sin \pi/n}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)} - t\operatorname{ctg}\theta - r\operatorname{ctg}\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right) + (t - e)\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) +$$

$$+ (r + e)\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

$$\ell_{1ª\ fase} = b\,\frac{\sin \pi/n}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)} + t\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \operatorname{ctg}\theta\right) + r\left[\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta + \right.$$

$$\left. - \operatorname{ctg}\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right) + \frac{\pi}{n} \cdot e\right.$$

$$\text{perímetro} = 2 \cdot n \cdot \ell_{1ª\ fase}$$

$$\text{superfície} = 2 \cdot n \cdot L \cdot \ell_{1ª\ fase}$$

Quando a combustão atinge B_c, começa a segunda fase da combustão onde teremos um segmento e um arco.

O trapézio retângulo B_c F E D terá sua menor base igual a

$$\overline{DE} = \overline{KP} - \overline{EF} \cdot \operatorname{ctg}\theta$$

$$\overline{EF} = e - t$$

$$\overline{DE} = b\,\frac{\sin \pi/n}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)} - t\operatorname{ctg}\theta - r\operatorname{ctg}\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right) - (e - t)\operatorname{ctg}\theta$$

$$\overline{DE} = b\,\frac{\sin \pi/n}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)} - e\operatorname{ctg}\theta - r\operatorname{ctg}\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)$$

arco $\overset{\frown}{EC}$ = raio X ângulo central em radianos

$$= (r + e)\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta\right)$$

assim teremos $\ell = \overline{DE} + \overset{\frown}{EC}$

$$\ell = b\,\frac{\sin \pi/n}{\sin\left(\theta - \pi/n\right)} - e\,\mathrm{ctg}\,\theta - r\,\mathrm{ctg}\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right) + (r+e)\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta\right)$$

$$\ell_{2ª\ fase} = b\,\frac{\sin \pi/n}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)} + e\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta - \mathrm{ctg}\,\theta\right) + r\left[\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta + \right.$$

$$\left. - \mathrm{tg}\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta\right)\right]$$

perímetro = 2 . n . $\ell_{2ª\ fase}$

superfície = 2 . n . L. $\ell_{2ª\ fase}$

Atingida a posição $\overset{\frown}{HG}$, inicia-se a terceira fase, somente com um arco em combustão.

* triângulo $I A_c O$

Pela lei dos senos (Perry 2-21)

$$\frac{OA_c}{\sin\beta} = \frac{IA_c}{\sin\frac{\pi}{n}}$$

$\triangle\ HA_cO$ $\quad \dfrac{\mathrm{sen}\ \pi/n}{r + e_c} = \dfrac{\mathrm{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}{a_1 - r}$

$$e_c = (a_1 - r).\frac{\mathrm{sen}\ \pi/n}{\cos\theta} - r$$

$$\sin\beta = \sin\left(\frac{\pi}{n}\right).\frac{\overline{OA_c}}{\overline{IA_c}} = \sin\left(\frac{\pi}{n}\right).\frac{1}{(e+r)}\left[a - \frac{r}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)}\right]$$

$$\beta = \mathrm{arc\ sin}\left\{\sin\left(\frac{\pi}{n}\right).\frac{1}{(e+r)}\left[a - \frac{r}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)}\right]\right\}$$

arco = raio x ângulo central em radianos

arco = (e + r) . γ

* triângulo $I A_c O$

$\widehat{IA_cO} = 180 - \left(\frac{\pi}{n} + \beta\right)$

ângulo raso - - - - - - - - $\widehat{IA_cO} = 180 - \gamma$

assim $\gamma = \frac{\pi}{n} + \beta$

arco = ℓ = $(e + r)\left(\frac{\pi}{n} + \beta\right)$

$\ell_{3ª\ fase} = (e + r)\left(\frac{\pi}{n} + \beta\right)$

$$\text{perímetro} = 2 \cdot n \cdot (e + r)\left(\frac{\pi}{n} + \beta\right)$$

$$\text{superfície} = 2 \cdot n \cdot L \cdot (e + r)\left(\frac{\pi}{n} + \beta\right)$$

Em geral, temos como dados do problema:

a_1 = raio de ponta de estrela adoçada

b_1 = raio de fundo de estrela adoçada

r = raio de adoçamento da ponta

t = raio de adoçamento do fundo

n = número de pontas da estrela

θ = semi-ângulo de face

L = comprimento do grão

$\emptyset$ = diâmetro externo sem inibição

Um programa para computador ou mesmo para uma calculadora programável como HP-67, pode ser feito para o desenvolvimento do perímetro ou superfície de combustão em função da espessura queimada.

Teremos como cálculos preliminares:

I - ângulos em graus

$$\frac{\pi}{n} = \frac{180}{n} = ANG\,3$$

$$\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta = 90 + \frac{180}{n} - \theta = ANG\,1$$

$$\theta - \frac{\pi}{n} = \theta - \frac{180}{n} = ANG\,4$$

$$\frac{\pi}{2} - \theta = 90 - \theta = ANG\,2$$

II - raios

$$a = a_1 + r\left[\frac{1}{\text{sen}\,(ANG\,4)} - 1\right]$$

$$b = b_1 + t\left[1 - \frac{1}{\text{sen}\,\theta}\right]$$

III - ângulos em radianos

$$\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta = (ANG\,1) \times \frac{3{,}141593}{180} = RAD\,1$$

$$\frac{\pi}{2} - \theta = (ANG\,2) \times \frac{3{,}141593}{180} = RAD\,2$$

$$\frac{\pi}{n} = (ANG\,3) \times \frac{3{,}141593}{180} = RAD\,3$$

IV - outros

$$X1 = b\ \frac{\sin \pi/n}{\sin\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)} = b\ \frac{\sin (A\ N\ G\ 3)}{\sin (A\ N\ G\ 4)}$$

$$X2 = t\left[\frac{\pi}{2} - \theta - \operatorname{ctg}\theta\right]$$

$$X3 = r\left[\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta - \operatorname{ctg}\left(\theta - \frac{\pi}{n}\right)\right]$$

$$X7 = \ell_c = (a_1 - r) \cdot \frac{\sin \pi/n}{\cos \theta} - r$$

$$W15 = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} - \theta - \operatorname{ctg}\theta$$

$$e = 0$$

comprimento de meia estrela $\ell_c = X1 + X2 + X3$

$0 < e \leqslant t$ primeira fase combustão

comprimento de meia estrela $\ell_{1ª\ fase} = X1 + X2 + X3 + e.\ (R\ A\ D\ 3)$

$t < e \leqslant e_c$ segunda fase combustão

comprimento de meia estrela $\ell_{2ª\ fase} = X1 + X3 + e.\ (W\ 15)$

$e_c < e \leqslant \left(\frac{\phi}{2} - a_1\right)$ terceira fase combustão

comprimento de meia estrela $\ell_{3ª\ fase} = (e + r)\ (A\ N\ G\ 3 + \beta) \cdot \frac{\pi}{180}$

2.1.4. Influência da inibição das faces

Evolução da superfície de combustão para um bloco estrelado de 10 pontas, comprimento de 500mm, $2\theta = 92º$

1º) Faces inteiramente nuas

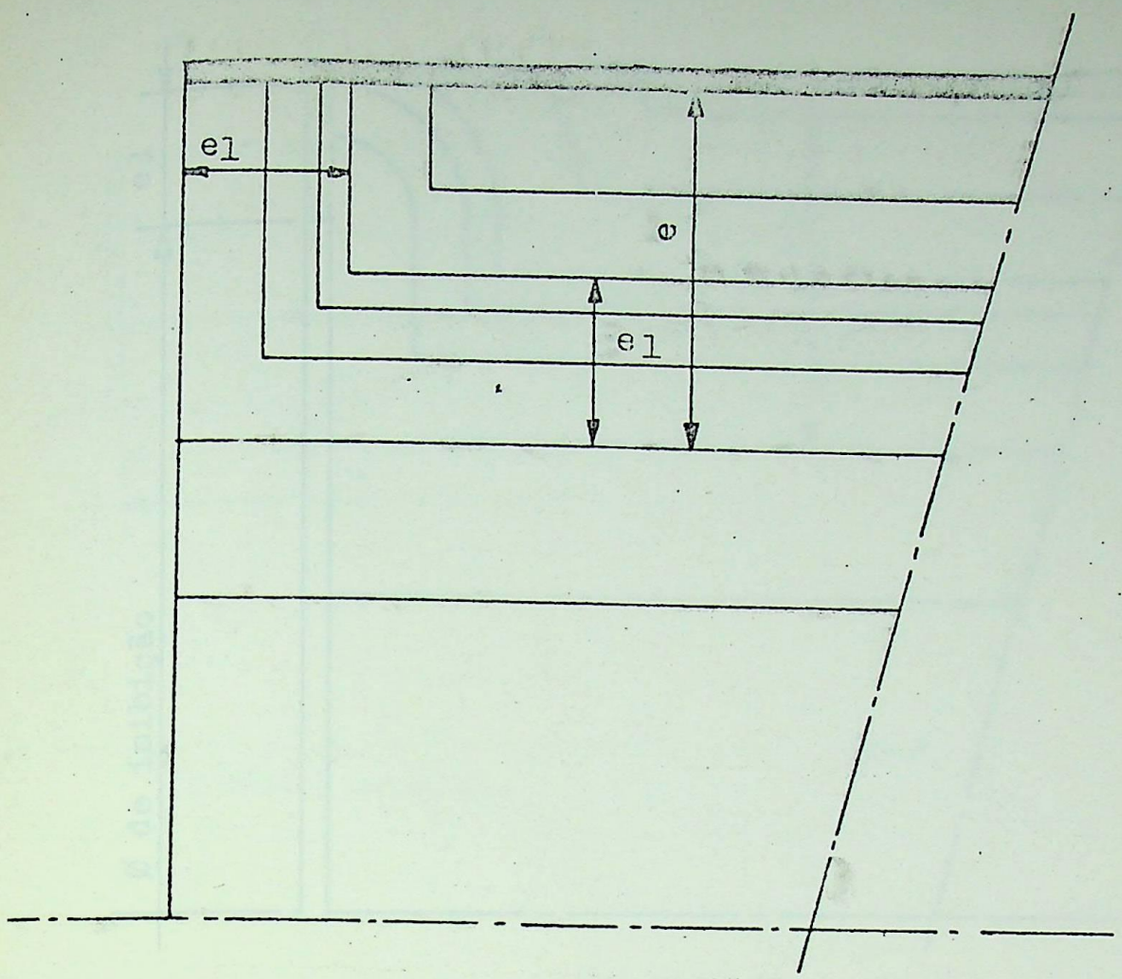
2º) Faces inteiramente inibidas (figura 4)

2.1.5. Influência da inibição parcial das faces

Evolução da superfície de combustão para um bloco estrelado de 10 pontas, comprimento de 500mm, $2\theta = 92º$ e espessura da coroa de inibição de 16mm (figura 5)

2.1.6. Alargamento do canal central num bloco estrelado

Objetivo: limitar o débito unitário instantâneo por unidade de área, no


e1
e
e1

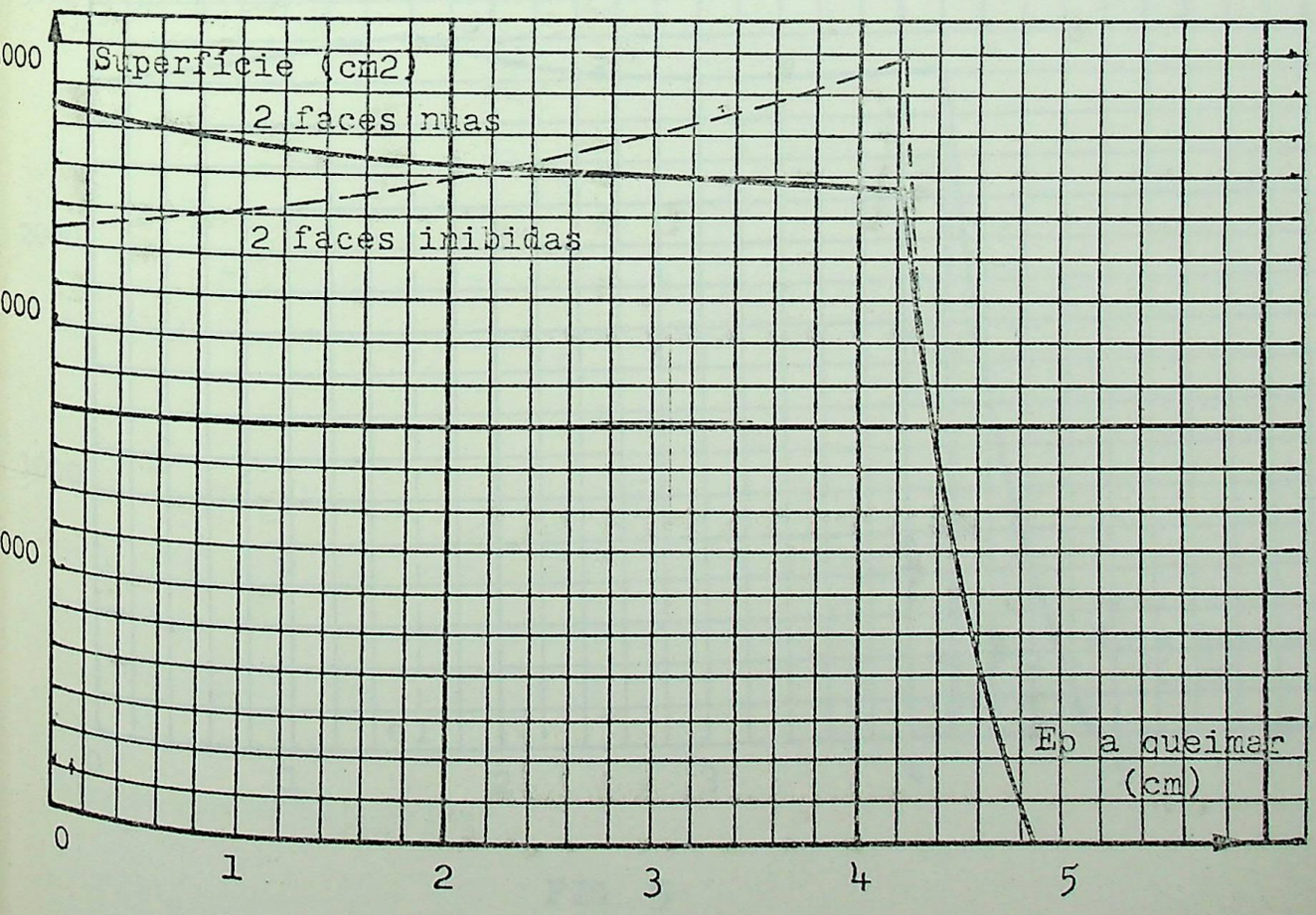
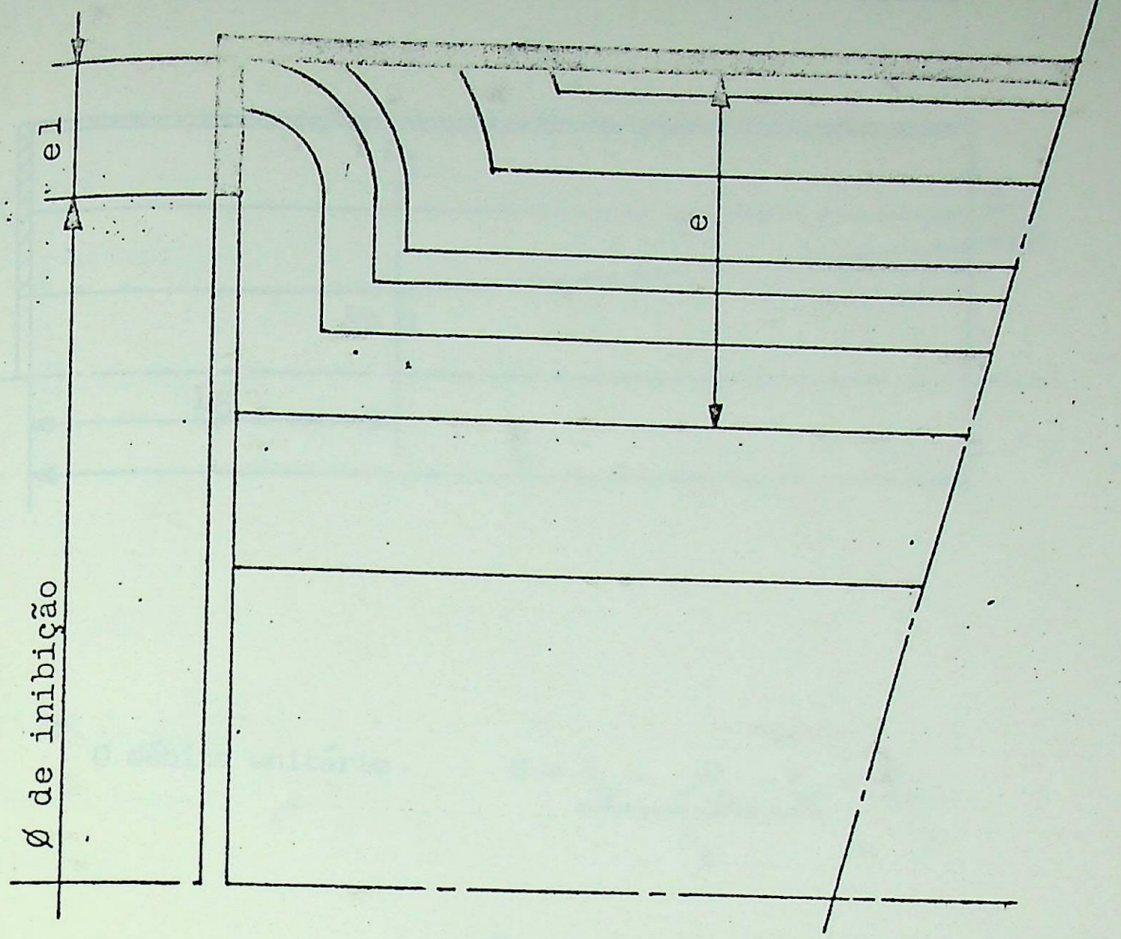

000
000
000
Superfície (cm2)
2 faces nuas
2 faces inibidas
Ep a queimar
(cm)
0
1
2
3
4
5

FIG 4


el
e
Ø de inibição

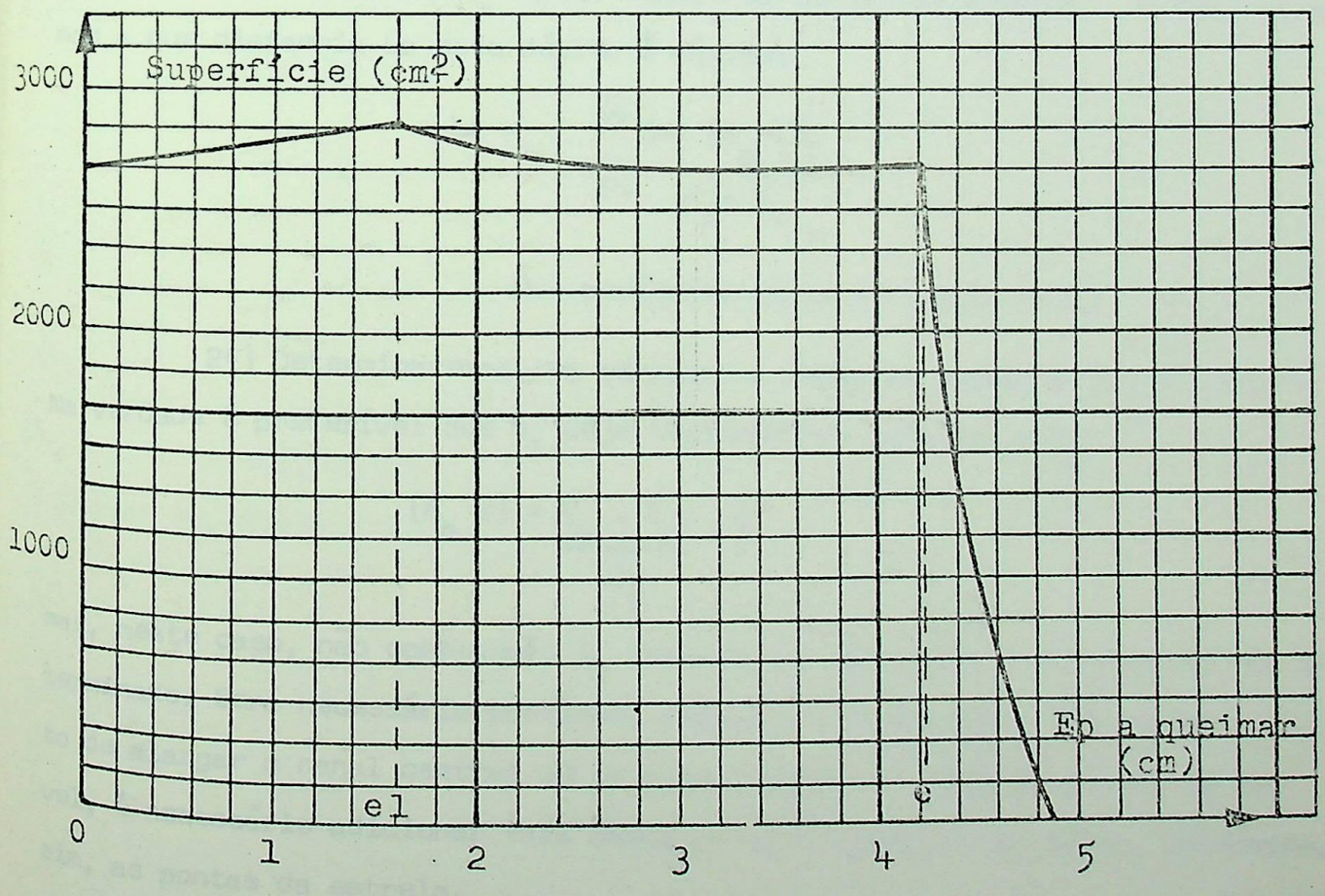
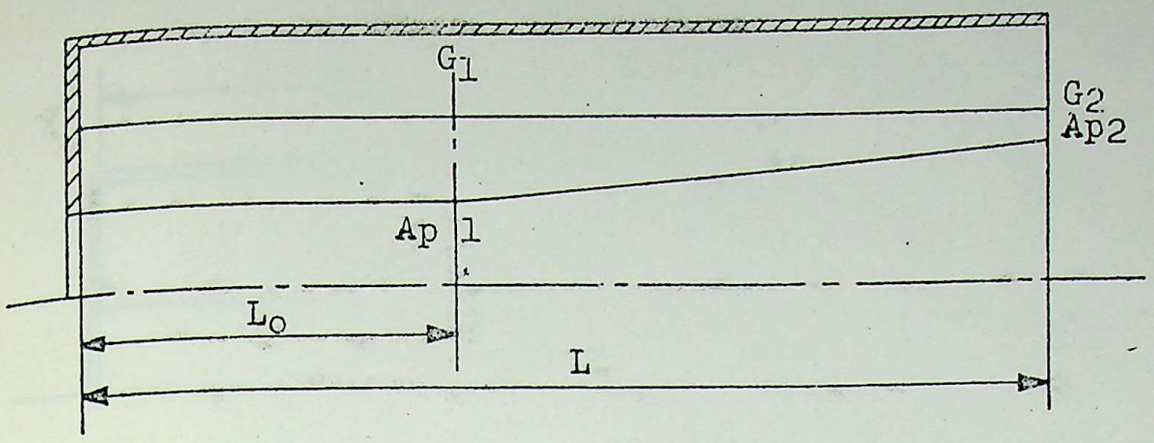

Superfície (cm²)
3000
2000
1000
0
1
2
3
4
5
el
e
Ep a queimar (cm)

FIG 5



O débito unitário $$G = \frac{S_c \cdot \rho_p \cdot V_c}{A_p} = \frac{\dot{m}}{A_p}$$

$$G \leq G_{Max}$$

1º) Conhecendo o débito limite da combustão erosiva G_{Max}, procuraremos a que distancia Lo este débito é máximo:

$$Lo = \frac{G_{Max}\,(A_p\ 1)}{P \cdot \rho_p \cdot V_c}$$

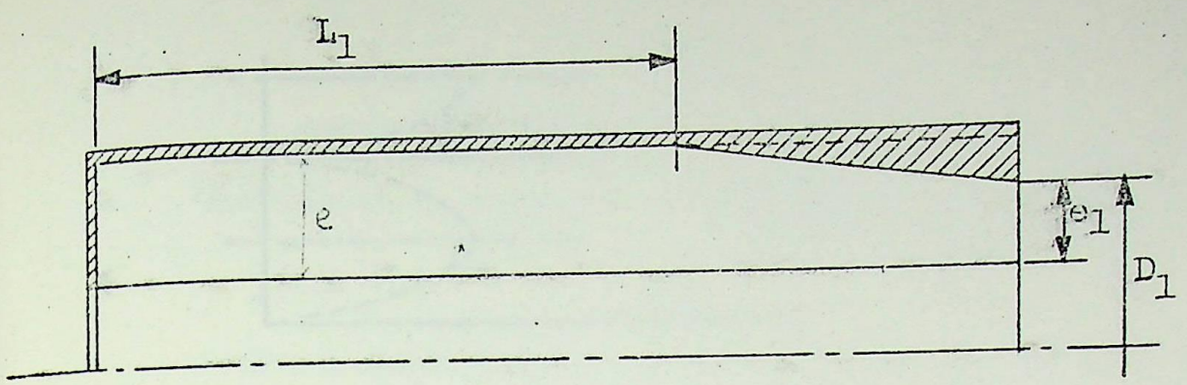
P = perímetro do canal (seção reta)

2º) Determinaremos, em seguida, a seção de passagem $(A_p\ 2)$ para $G_1 = G_2$. Na verdade é preferível que G_1 seja ligeiramente inferior a G_2.

$$(A_p\ 2) = \frac{V_c \cdot S_c}{G_2} \cdot \rho_p$$

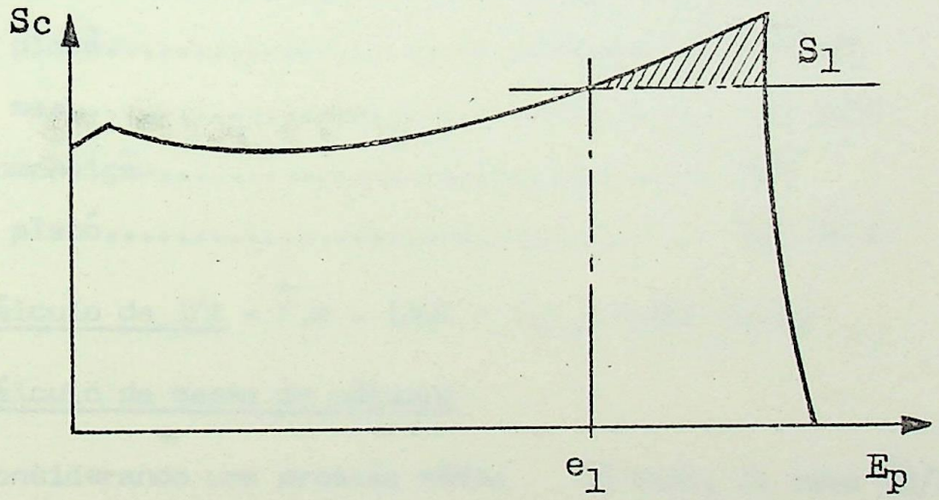
mas, neste caso, não conhecemos S_c exatamente, porquanto o alargamento não está determinado. Será necessário portanto, calcular por iteração. Não esquecer que o fato de alargar o canal central de um bloco, acarreta perda de massa. Se for possível, é necessário adicionar esta massa na parte anterior do bloco, alterando, assim, as pontas da estrela.

2.1.7. Determinação de uma usinagem exterior



e = espessura a queimar

Conhecida a evolução da superfície de um bloco, em função da espessura, de pólvora queimada, desejamos não ultrapassar uma certa superfície S_1 (superfície limite).



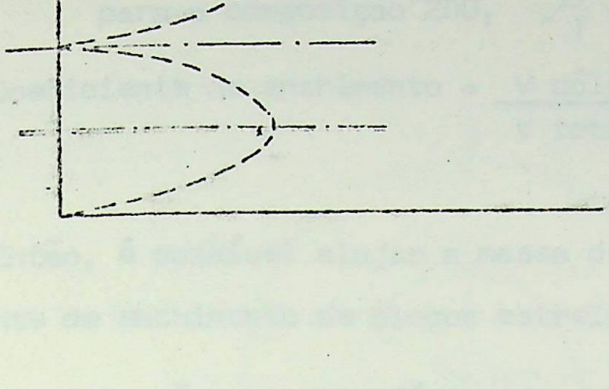
A esta superfície S_1 corresponde, no gráfico S (e), uma espessura a queimar e_1, donde o cálculo de D_1

$$D_1 = \emptyset - 2 (e - e_1)$$

$$L_1 \cong \frac{S_1}{\text{Perímetro final}}$$

Perímetro final = perímetro para espessura de pólvora queimada igual a $\underline{e}$

Verificar a evolução da superfície, tendo em conta a intersecção das pontas da estrela com o cone exterior.



Não esquecer de considerar a perda de massa devida a esta usinagem.

2.1.8. Exemplo de estudo de um bloco de forma estrelada

Dados:

- D interior da câmara..... 61 mm
- comprimento..... 300 mm
- t platô..... 1,5 seg
- P max..... 120 bars
- Composição..... 200
- F platô..... 130 da N
- Cálculo da Ift = $\bar{F}.t$ = 1300 x 1,5 = 1.950 N.seg
- Cálculo da massa de pólvora

Considerando uma pressão média 70 bars, Is para 70/1 = 207 s, donde

$$M_p = \frac{Ift}{Is.\ g} = \frac{1950}{207 \times 9,81} = 0,9603 \text{ kg}$$

- Cálculo da espessura da pólvora a queimar

Para a composição 200, p = 70 bars V_c = 9 mm/seg

$$e = V_c . t = 9 \times 1,5 = 13,5 \text{ mm}$$

$$e_i = 1,5 \text{ mm}$$

$$\emptyset = 61 - 2 \times 1,5 = 58 \text{ mm}$$

$$\left(\frac{\emptyset}{e} = \frac{58}{13,5} = 4,3 \text{ - - - - - - - - - - - bloco estrelado}\right)$$

- Antes da determinação da estrela, verificar se condições de massa podem ser respeitadas

M_p do bloco = M_p platô + 8% de massa total (8% da massa total re-

presenta a massa de propelente, queimando como resíduo da combustão).

$$M_p \text{ do bloco} = 1.08 \times 0,9603 \text{ kg}$$

$$= 1,0371 \text{ kg}$$

para a composição 200, $\rho_p = 1,58$ g/cc

$$\text{Coeficiente de enchimento} = \frac{V \text{ pólvora}}{V \text{ total}} = \frac{\frac{1037,1}{1,58}}{\frac{\pi}{4} \times 5,8^2 \times 30} = 0,8281$$

Então, é possível alojar a massa de pólvora e fazer um bloco estrelado (coeficiente de enchimento de blocos estrelados entre 0.75 e 0.90).

- Determinação das superfícies de emissão

- S_c média de platô

$$V_p \text{ platô} = \frac{M_p}{\rho_p} = \frac{960,3}{1.58} = 607,78 \text{ cm}^3$$

$$\frac{V_p \text{ platô}}{e \text{ a queimar}} = \frac{607,78}{1,35} = 450,2 \text{ cm}^2$$

- S_c final

- Faces inibidas $S_c = \pi \times 5,8 \times L = 546,6 \text{ cm}^2$

- Faces nuas $S_c = \pi \times 5,8 \times (L - 2e) = 497,4 \text{ cm}^2$

Concluímos, então, que é preferível fazer queimar as faces para ter uma progressividade a mais fraca possível.

- S_c inicial

Consideremos a S_c inicial = à S_c média

$$\text{Perímetro} = \frac{S \text{ média} - \text{faces}}{\text{comprimento}} = \frac{450,2 - 2 \cdot \frac{\pi}{4} \times 5,8^2 - 0,8281}{30} = 13,5481$$

Cálculo do número de pontas

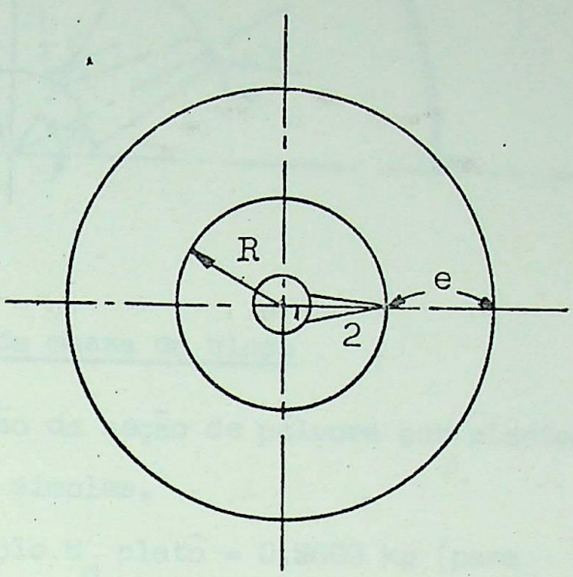
Uma primeira aproximação consiste em dar ao perímetro de uma metade de ponta, um valor igual a 2/3 do raio do círculo circunscrito à estrela.

$$R = \frac{1}{2} (\emptyset - 2e) = \frac{1}{2} (58 - 2 \times 13,5) = 15,50 \text{ mm}$$

Observe que este valor é empírico, dando em geral uma progressividade e um coeficiente de enchimento aceitáveis.

$$\text{número de } 1/2 \text{ b} = \frac{\text{perímetro}}{2/3 \text{ R}} = \frac{13,5481}{1,0333} = 13,1,$$

portanto, poderíamos ter uma estrela com 6 ou 7 pontas; prefere-se escolher uma estrela de 6 pontas, porque sendo a queima das configurações estrela ligeiramente progressivas, não seria conveniente admitir 7 pontas, o que implicaria uma superfície inicial maior que a média.



NOTA: Para os blocos livres, a determinação dos raios de adoçamento (fundo e ponta da estrela) se faz em primeira aproximação com ajuda da tabela seguinte:

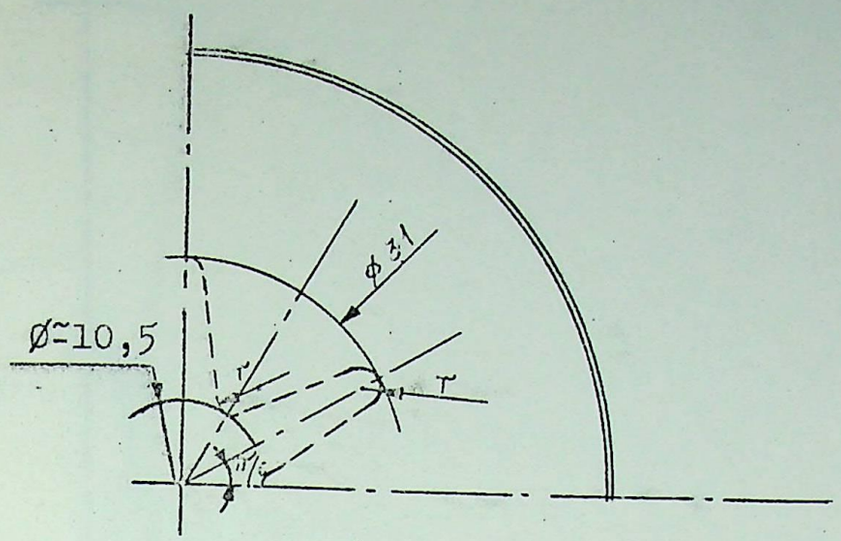
Ø EXTERNO DO BLOCO	RAIO DE ADOÇAMENTO DE PONTA E FUNDO DA ESTRELA
0 à 80 mm	1 à 1,5 mm
80 à 200 mm	1,5 à 3 mm
200 à 300 mm	3 à 5 mm

Para os blocos moldados-colados, uma análise de contração será necessária.

Esses valores correspondem a níveis de contração admissíveis e às facilidades durante a extração dos moldes.

Em certos casos, será preferível fazer uma estrela de forma trapezoidal para limitar a duração do final de combustão e diminuir o débito inicial, admitindo-se sempre, a perda de massa correspondente.

Admitindo raios de adoçamento de 1 mm (fundos e pontas da estrela),por exemplo, basta fazer a concordância destes 2 raios. Estes raios, aliás, poderão ser modificados em função da mecânica de carregamento.



Verificação da massa do bloco

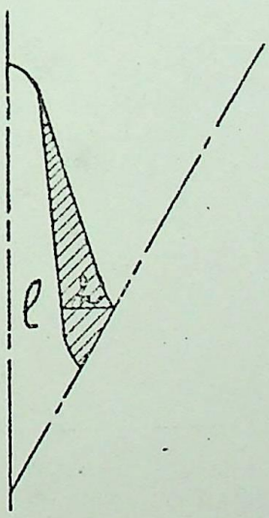
- Determinação da seção de pólvora por planimetria, ou por decomposição em figuras geométricas simples.

Neste exemplo M_p platô = 0,9603 kg (para $\rho_1 = 1{,}58$), seja um Δ massa $\approx$ 60 gr além do especificado.

- Determinação da estrela que dará u'a massa de 0,9603 kg

Assemelhando esta perda a um triângulo na seção reta do bloco,

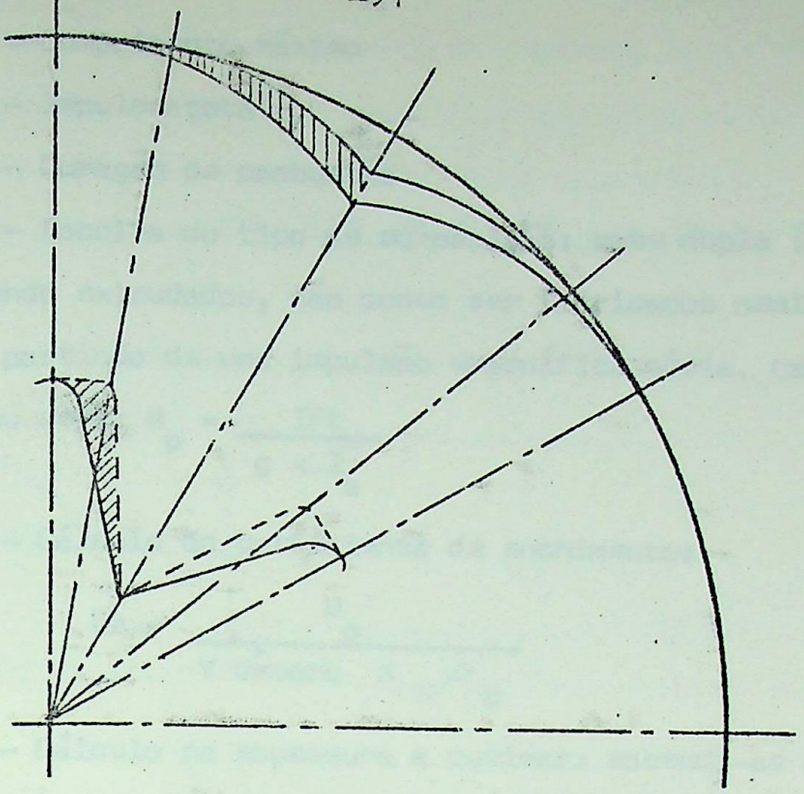
$$h = \frac{\Delta \text{ de massa}}{\rho_1 \times L \times \text{nº de pontas} \times 0{,}5\ l} = \frac{60}{1{,}58 \times 30 \times 12 \times 0{,}5\ l}$$



- Conhecendo agora a forma da estrela, correspondente à massa desejada e a uma progressividade mínima, verificar o valor do débito unitário inicial.

Neste caso:

$$G = \frac{\rho_1 V_c S_c}{A_p} \qquad S_c = (P \cdot L) + 1 \text{ face (anterior)}$$



2.2. Bloco de forma "trompette"

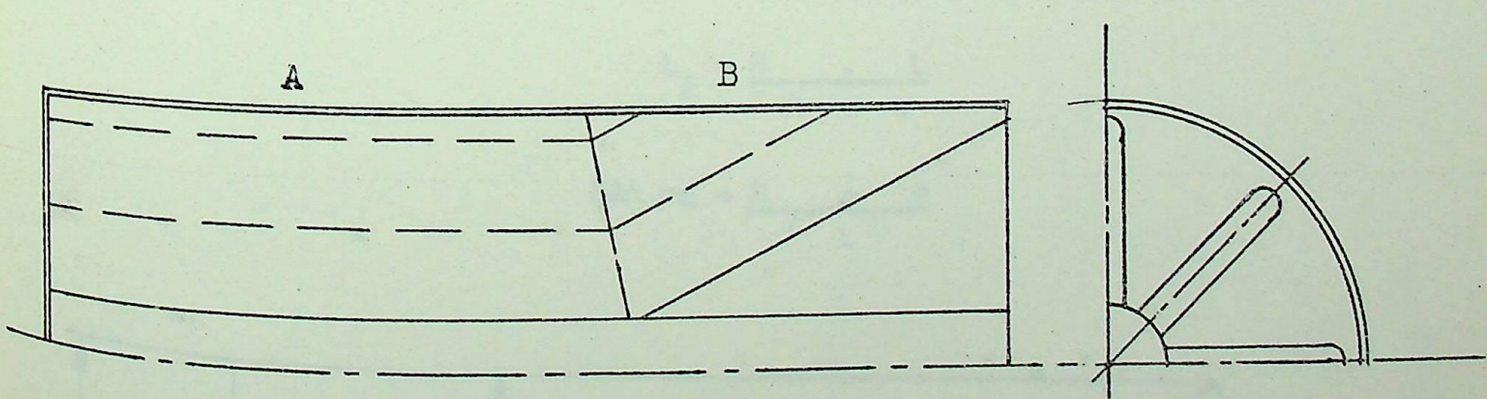
2.2.1. Definição

Bloco de combustão radial com coeficiente de enchimento superior a 0,9 e de espessura a queimar crítica $\frac{D}{e} \approx 2,5$

Evolução S (e) com progressividade inferior a $\pm$ 5%. Resíduos praticamente nulos. Este bloco se apresenta em duas partes:

1º) Uma parte com canal cilíndrico de evolução progressiva - Parte A

2º) Uma parte estrela de evolução degressiva - Parte B, de tal modo que a soma das evoluções seja mais ou menos constante.



2.2.2. Exemplo de estudo de um bloco de forma "trompette"

Dados

- Diâmetro exterior

- Comprimento máximo

- Impulso total

- Duração de combustão

- Escolha do tipo de composição: base dupla (moldado) ou composite. Os blocos BD sendo extrudados, não podem ser fabricados nesta forma. Após esta consideração e partindo de uma impulsão específica média, calculamos a massa de carregamento, ou seja: $M_p = \frac{Ift}{g \times I_s}$

- Cálculo do coeficiente de enchimento:

$$Cr = \frac{M_p}{V \text{ câmara} \times \rho_p}$$

- Cálculo da espessura a queimar: sabendo-se que para um bloco "trompette" $\frac{D}{e} \approx 2{,}5$, a velocidade de combustão será igual a $\frac{e}{t}$, o que acarreduas possibilidades:

  - regular a velocidade de queima da composição para obter a velocidade desejada, se a mesma não existir, ou
  - calcular uma nova espessura de modo a utilizar uma composição, sem regular a velocidade.

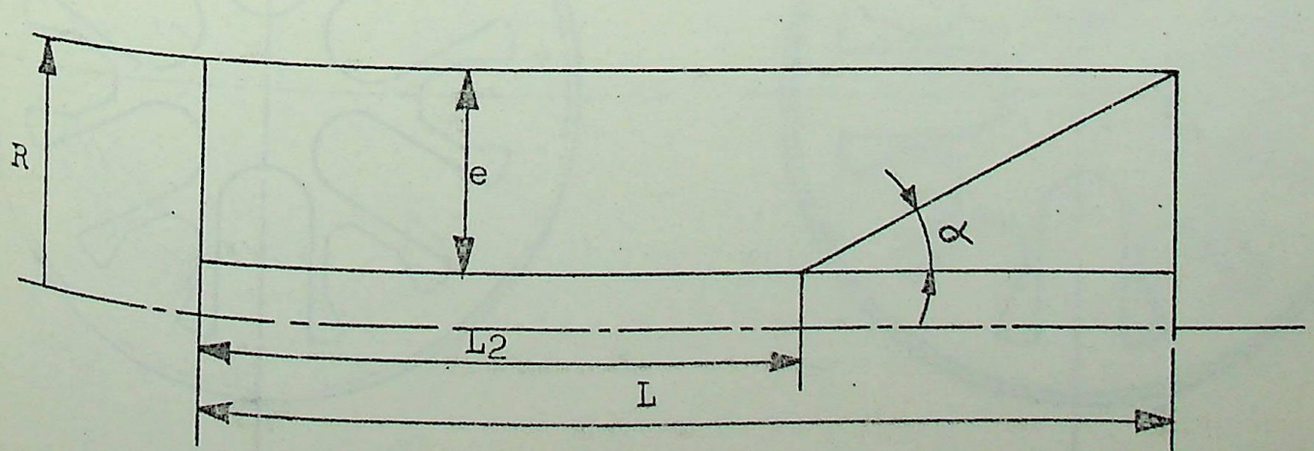
2.2.3. Determinação aproximada do "trompette"

Um cálculo efetuado sobre um modelo teórico, dando uma evolução perfeitamente constante, forneceu os seguintes resultados que permitem traçar um primeiro esboço do bloco.

$$\text{Coeficiente de enchimento} = \frac{2 \quad e}{R + e}$$

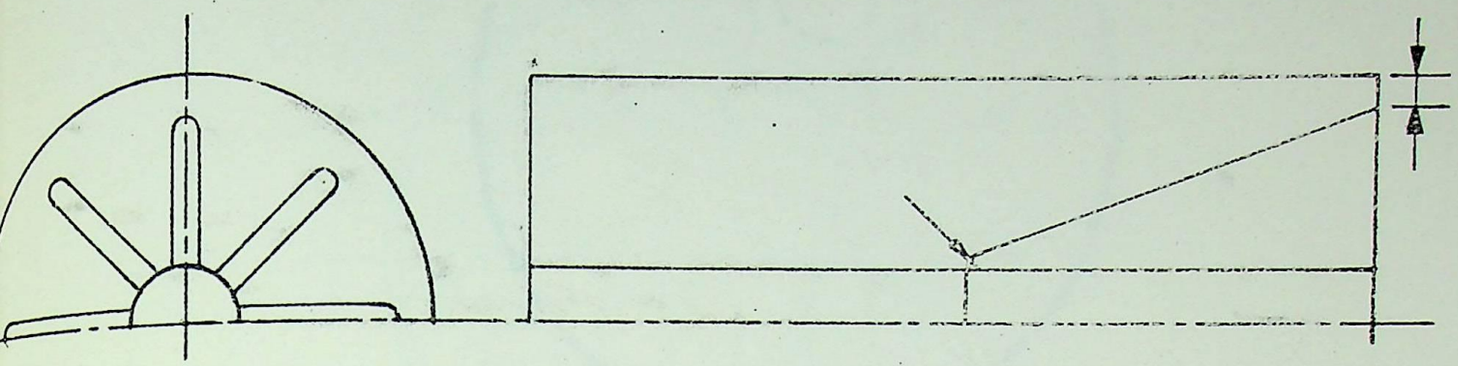
$$L_2 = \frac{R \quad . \quad L}{R + e}$$

$$\text{Sen } \alpha = \frac{R + e}{L}$$



Será necessário a seguir, determinar, na parte cônica do bloco, uma forma estrelada, cuja evolução da superfície permite, tanto quanto possível, uma compensação à evolução da superfície da parte cilíndrica.

Em geral, escolhe-se uma forma estrelada com 7 ou 8 pontas, segundo o perfil abaixo:



2.3. Estudo de um bloco "mamelles"

2.3.1. Definição

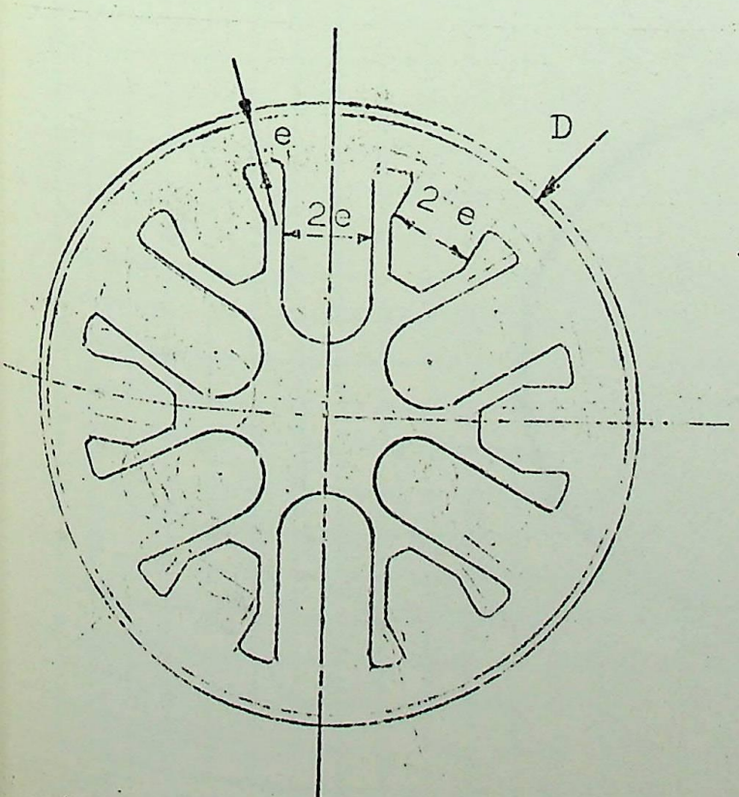
Bloco de perfil constante, do tipo "estrelado" mas cujas pontas têm espessura constante, isto é, lados paralelos.

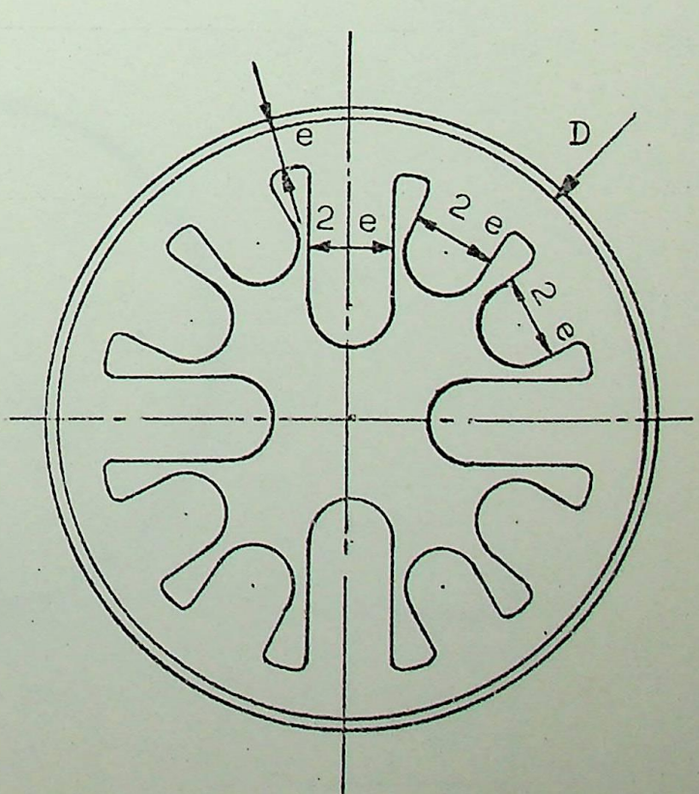
Em geral, a espessura de queima é igual à metade da espessura das pontas.

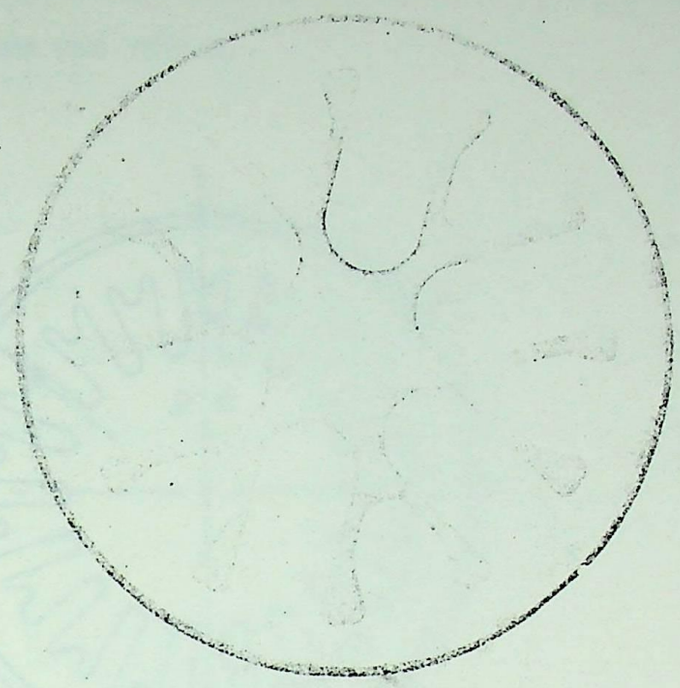
Esses blocos são frequentemente empregados para os carregamentos do tipo "Booster".

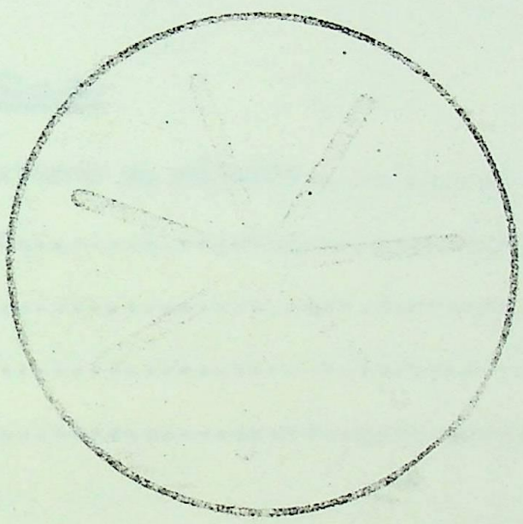
Eles têm um fraco coeficiente de enchimento.

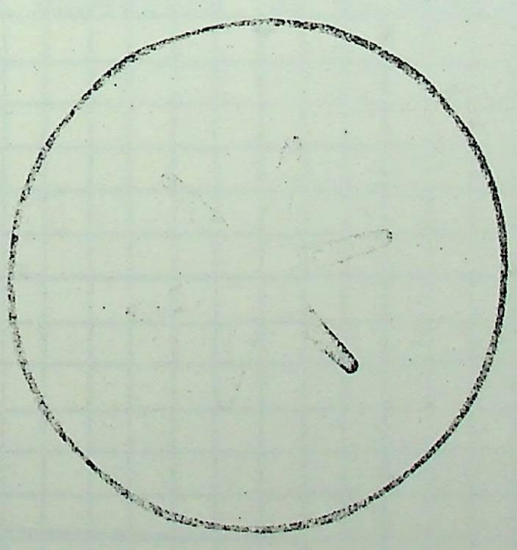
2.3.2. Exemplo de formas de blocos "mamelles"



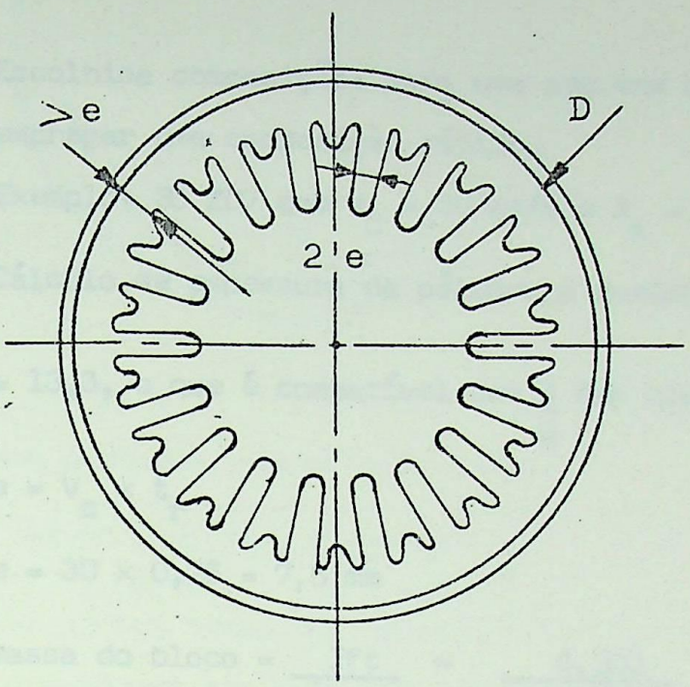






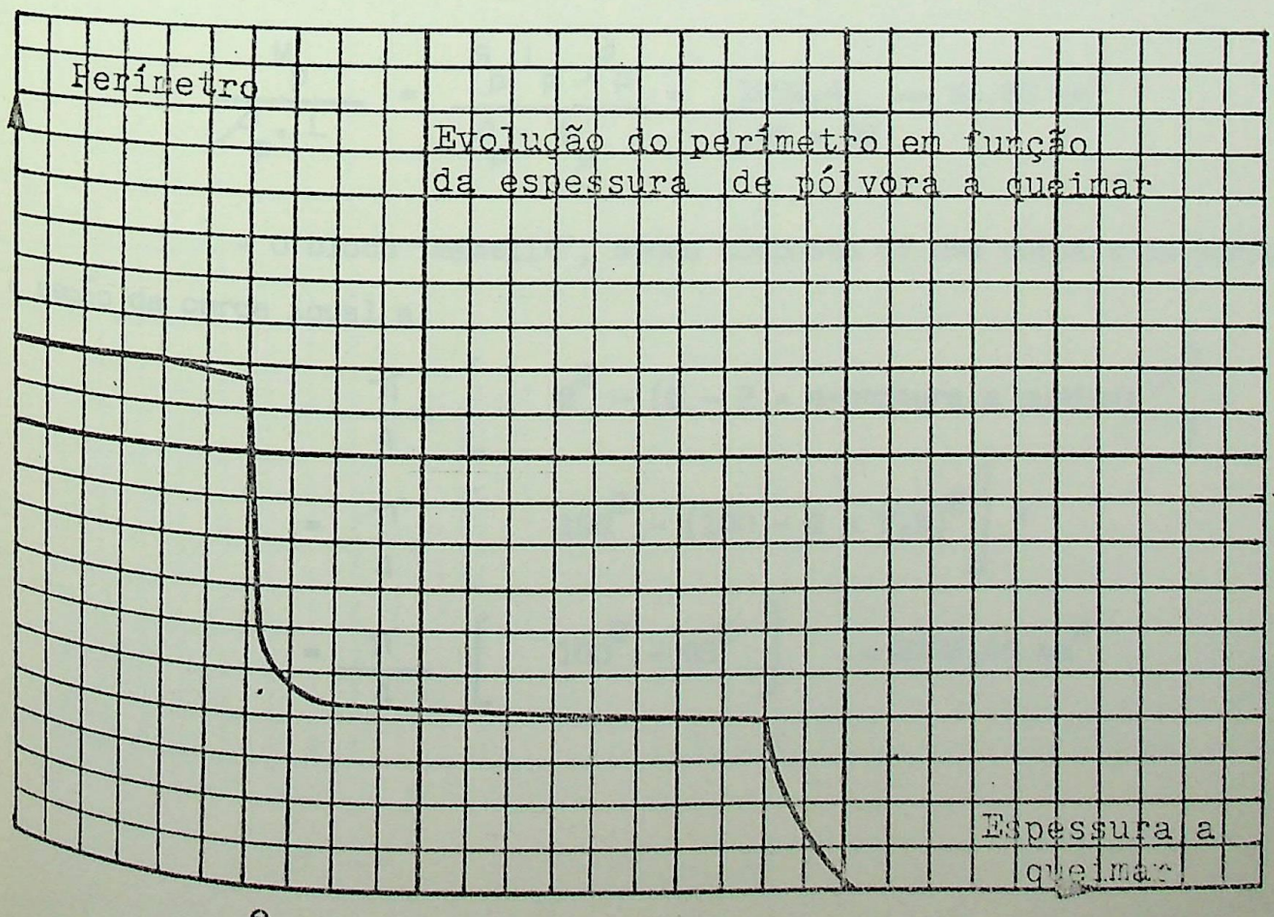


Em certos casos, pode-se utilizar as formas "mamelles" para a confecção de blocos a dois regimes de combustão o que aumentará a espessura da coroa em relação à semi-espessura das pontas.



2.3.3. Exemplo de cálculo

- diâmetro externo da pólvora..... 100 mm
- comprimento..... 220 mm
- Ift..... 4.300 N.Seg
- t.. .. .. 0,25 s
- P..... < 300 bars



BLOCO BI COMPOSIÇÃO

$$\rho_{\text{rápido}} \cdot V_{c_{\text{rápido}}} \cdot S_{c_{\text{rápido}}} \cong \rho_{\text{lento}} \cdot V_{c_{\text{lento}}} \cdot S_{c_{\text{lento}}}$$

- Escolhida composição: para uma pequena duração de combustão, teremos vantagem em empregar uma composição rápida.

Exemplo: SD 207 com V_C = 30 mm/s e I_s = 220 seg

- Cálculo de espessura da pólvora a queimar (notaremos que $\frac{D}{e} = \frac{100}{7,5}$ = 13,3, o que é compatível com $\frac{D}{e}$ dos blocos "mamelles":

$$e = V_c \times t_r$$

$$e = 30 \times 0,25 = 7,5 \text{ mm}$$

$$\text{Massa do bloco} = \frac{\text{Ift}}{I_{S.g}} = \frac{4.300}{220 \times 9,81} = 1,9924 \text{ kg}$$

Coeficiente de enchimento = SD 207 $\quad \rho_p = 1.65 \text{ g/cm}^3$

$$= \frac{1,9924}{1,65 \times \frac{\pi}{4} \times 10^2 \times 22 \times 10^{-3}} = 0,70$$

- Determinação aproximada das dimensões do bloco

Conhecendo a massa ou o coeficiente de enchimento do bloco, podemos calcular a seção do grão, isto é,

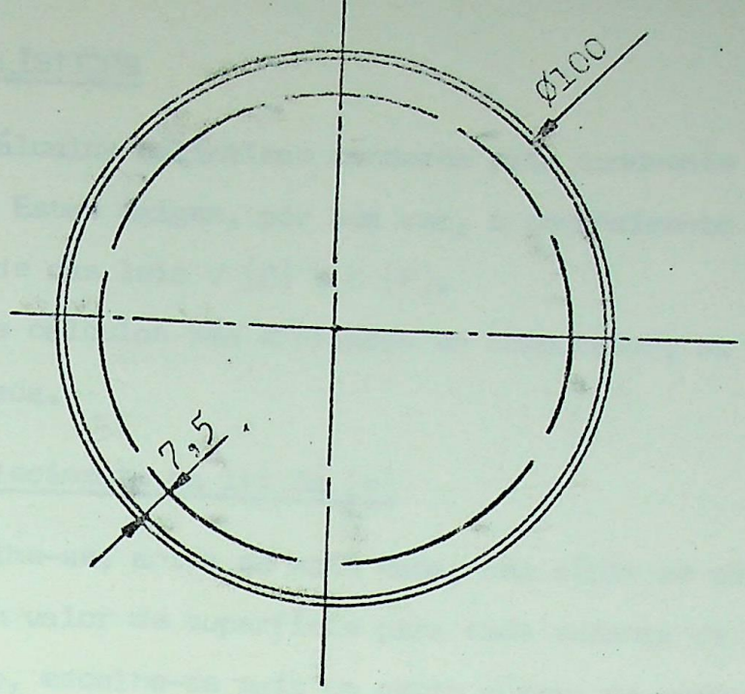
$$\frac{M_p}{\rho_p \cdot L} = \frac{S_p L_p \rho_p}{\rho_p L_p} = \frac{1992,4}{1,65 \times 22} == 54,89 \text{ cm}^2$$

- O bloco "mamelle", sendo composto de uma coroa e de pontas, terá a seção da coroa igual a:

$$\frac{\pi}{4}\left[\quad \phi^2 - (\phi - 2 \times \text{expessura a queimar})^2\right] =$$

$$= \frac{\pi}{4}\left[\quad 100^2 - (100 - 2 \times 7,5)^2\right] =$$

$$= \frac{\pi}{4}\left[\quad 100^2 - 85^2\right] \quad = 2179,48 \text{ mm}^2$$



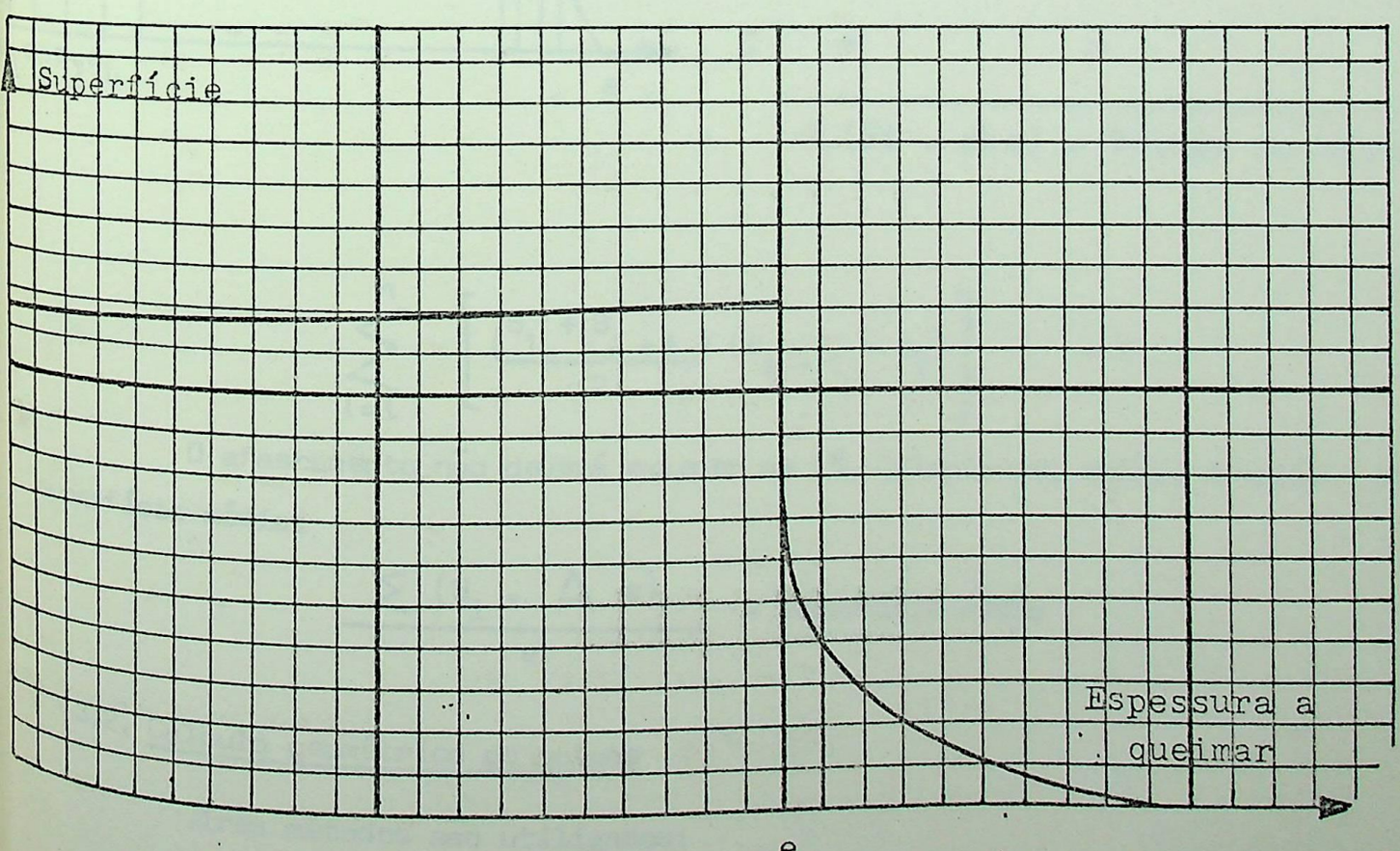
Resta portanto, alojar nas pontas:

$$54,89 - 21,79 = 33,10 \text{ cm}^2$$

Essas pontas terão uma espessura de 7,5 x 2 = 15 mm.

Para conhecer o número e a disposição, pode-se lançar mão da solução gráfica. Esta disposição dependerá essencialmente da viabilidade do molde na extração e da fragilidade do bloco.

Do número de pontas dependerá também a importância dos resíduos. Em geral, os resíduos de um bloco "mamelle" são da ordem 10%. Exemplo da evolução de superfície de combustão de um bloco "mamelle".



3. CÁLCULOS BALÍSTICOS

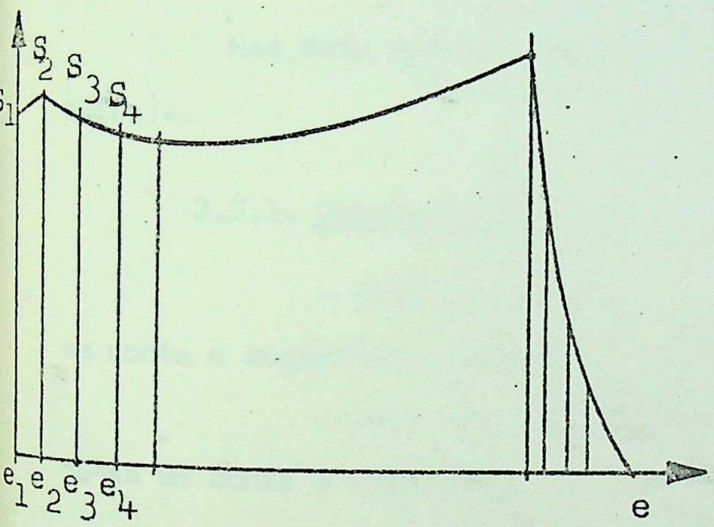
Os cálculos balísticos conduzem mais comumente à previsão das leis $P(t)$ e $F(t)$. Estas exigem, por sua vez, o conhecimento da lei $S_c(e)$ que, por sua vez, depende das leis $V(P)$ e $K(P)$.

Esses cálculos são efetuados em computador, ou manualmente, segundo a precisão desejada.

3.1. Estabelecimento da lei Sc (e)

Escolhe-se, antes de mais nada, uma série de pontos de tal modo que possamos ter um valor de superfície para cada mudança de inclinação da curva $S_c(e)$. Além disso, escolhe-se mais um certo número de pontos intermediários para precisar esta evolução.

Utilizando-se computador, o passo será o menor possível. Verifica-se em seguida, a correspondência entre o volume do bloco, calculado geometricamente, e o volume calculado, integrando-se a curva $S_c(e)$.



$$\frac{S_1 + S_2}{2} \times (e_2 - e_1) = V_1$$

$$+ \frac{S_2 + S_3}{2} \times (e_3 - e_2) = V_2$$

$$+ \quad " \qquad "$$

$$+ \quad " \qquad "$$

$$\Sigma (Si \cdot \Delta e) = \text{Volume do Bloco}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \left[\left(\frac{S_i + S_{i+1}}{2} \right) (e_{i+1} - e_i) \right] = V$$

O afastamento não deverá exceder de 1%. Calcula-se, então, o valor da superfície média:

$$\frac{\Sigma (S_i \cdot \Delta e)}{e} = \text{superfície média}$$

3.2. Cálculo geométrico do volume

Três métodos são utilizados:

1º) Manualmente, por decomposição do grão em elementos simples de su-

perfície.

2º) Manualmente, por planimetria.

3º) Por computador.

Para determinar o volume da pólvora queimando no platô, é necessário conhecer o volume de pólvora queimando como resíduo de combustão e que se calcula como anteriormente.

3.3. Estabelecimento da lei P (t)

A lei P (t) deduz-se da lei S_c (e):

- seja considerando o valor da "serrage" $K = \frac{S_c}{A^*}$ e lendo sobre a curva K (P) a pressão correspondente;

- seja considerando a equação da continuidade $\rho_p V_c S_c = C_D \cdot P_c A^*$, procedendo por iteração com ajuda da curva V (P).

Nos dois casos é necessário a fixação de A^* (área da seção crítica da tubeira).

3.3.1. Determinação da área da tubeira

- seja considerando a pressão média de funcionamento e levando-se em conta a superfície média de emissão, ou

- seja considerando a pressão máxima a todas temperaturas e levando-se em conta a superfície máxima.

Exemplo:

No caso de um bloco fabricado com a composição 200, se a $P_{máx}$ a + 51º C = 120 bars, a "serrage" correspondente à temperatura de 51º C é igual a 490, d'onde a área da tubeira = $\frac{S\ max}{490} = A^*$

É de todo desejável conservar uma margem de segurança e considerar, por exemplo, 100 ou 110 bars com P máx.

3.3.2. Cálculo de P (t)

É comum a utilização do seguinte quadro:

ESPESSURA A QUEIMAR(CM)	SUPERFÍCIE DE COMBUSTÃO(cm2)	$\frac{S_c}{A^*}$ K (cm2) (cm2)	P (bar)	V_c (cm/s)	Δt (s)	t INSTANTÂNEA (s)
ℓ queimando no platô						$t_{platô}$

Fixa-se a área da seção crítica da tubeira, A^*, de maneira a se ter uma serrage entre 250 e 600, segundo as propriedades termodinâmicas da composição utilizada.

$$250 \leqslant K \leqslant 600$$

$e_o = 0.0$

S_{c_o} = superfície de combustão inicial (para e = o)

$$K_o = \frac{S_{c_o}}{A^*}$$

- Para a temperatura inicial do propelente (- 40, + 20 ou + 50º C), entra-se no gráfico $K = \varphi (p, Ti)$ e acha-se a pressão p_o correspondente a K_o e Ti
- Com o valor de p_o, entra-se no gráfico $V_c = \varphi (p, Ti)$ e tira-se o valor de V_{co}, correspondente a p_o e Ti

$t_o = 0.0$

$t_{instantânea_o} = 0.0$

para uma espessura queimada e_1, entramos no gráfico $S_c = \varphi (e)$ e achamos a superfície de combustão correspondente a espessura e_1, S_{c_1}.

e_1

S_{c_1}

$$K_1 = \frac{S_{c_1}}{A^*}$$

- no gráfico $K = \varphi (p, Ti)$ achamos p_1 correspondente a K_1 e Ti

- no gráfico $V_c = \varphi (p, Ti)$ achamos V_{c_1} correspondente a p_1 e Ti

- $$\Delta t_1 = \frac{e_1 - e_o}{\frac{1}{2}(V_{c_1} + V_{c_o})}$$

$$t_{instantâneo_1} = \Delta t_1$$

para uma espessura queimada e_2, entramos no gráfico $S_c = \varphi (e)$ e achamos a superfície de combustão correspondente a espessura e_2, S_{c_2}

e_2

S_{c_2}

$$K_2 = \frac{S_{c_2}}{A^*}$$

- no gráfico $K = \varphi (p, Ti)$ achamos p_2 correspondente a K_2 e Ti

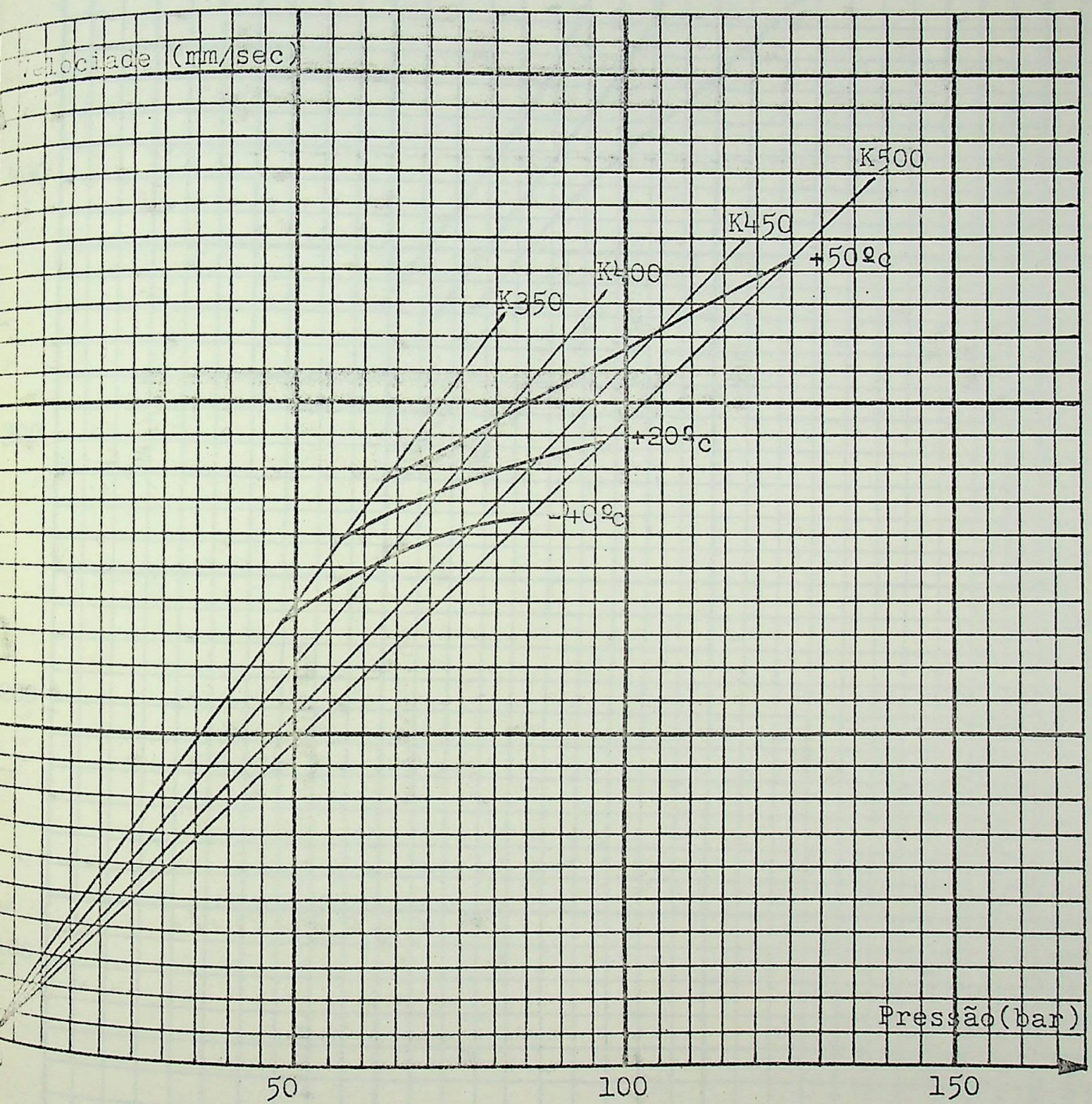
- no gráfico $V_c = \varphi (p, Ti)$ achamos V_{c_2} correspondente a p_2 e Ti

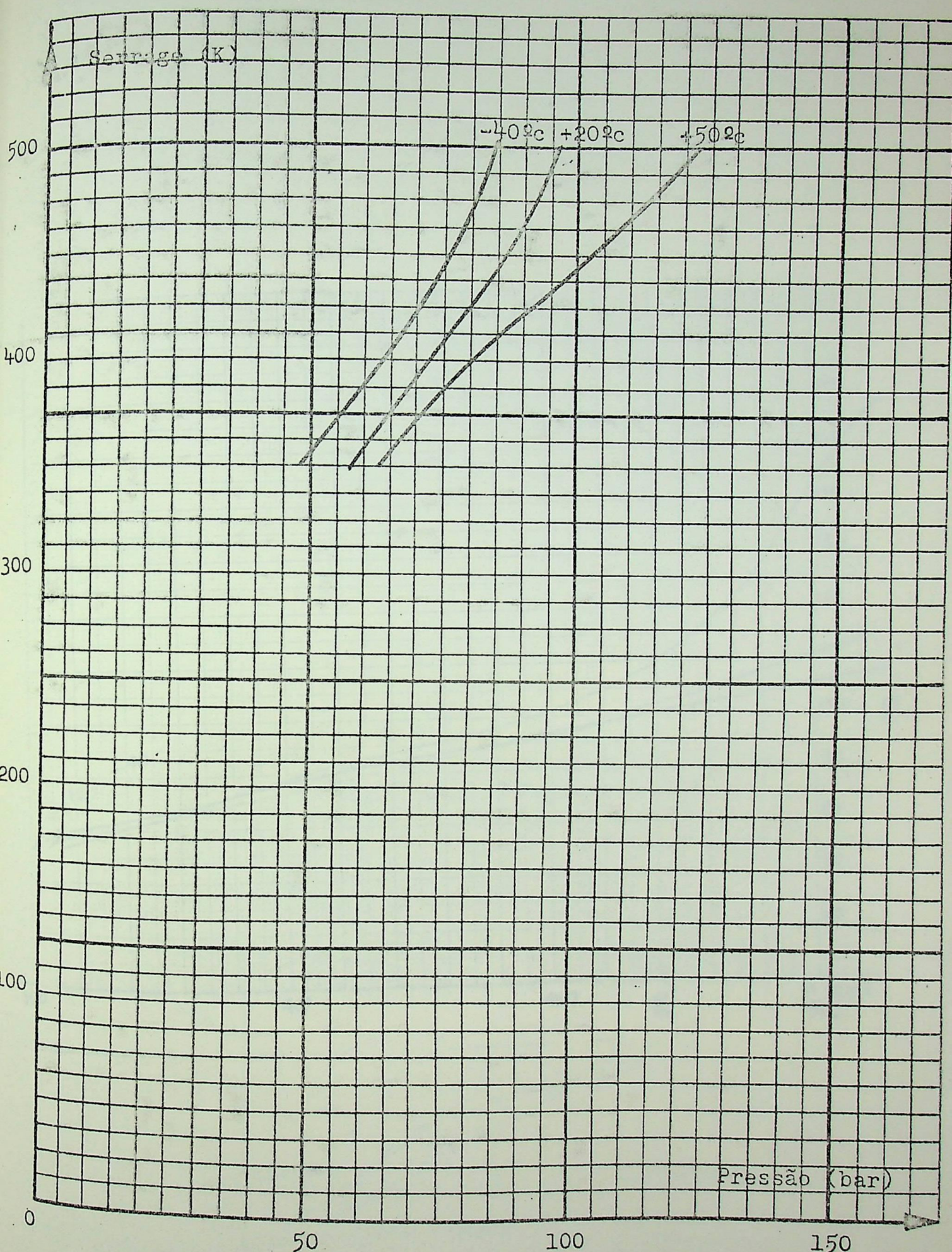
$$\Delta t_2 = \frac{e_2 - e_1}{\frac{1}{2}(V_{c_2} + V_{c_1})}$$

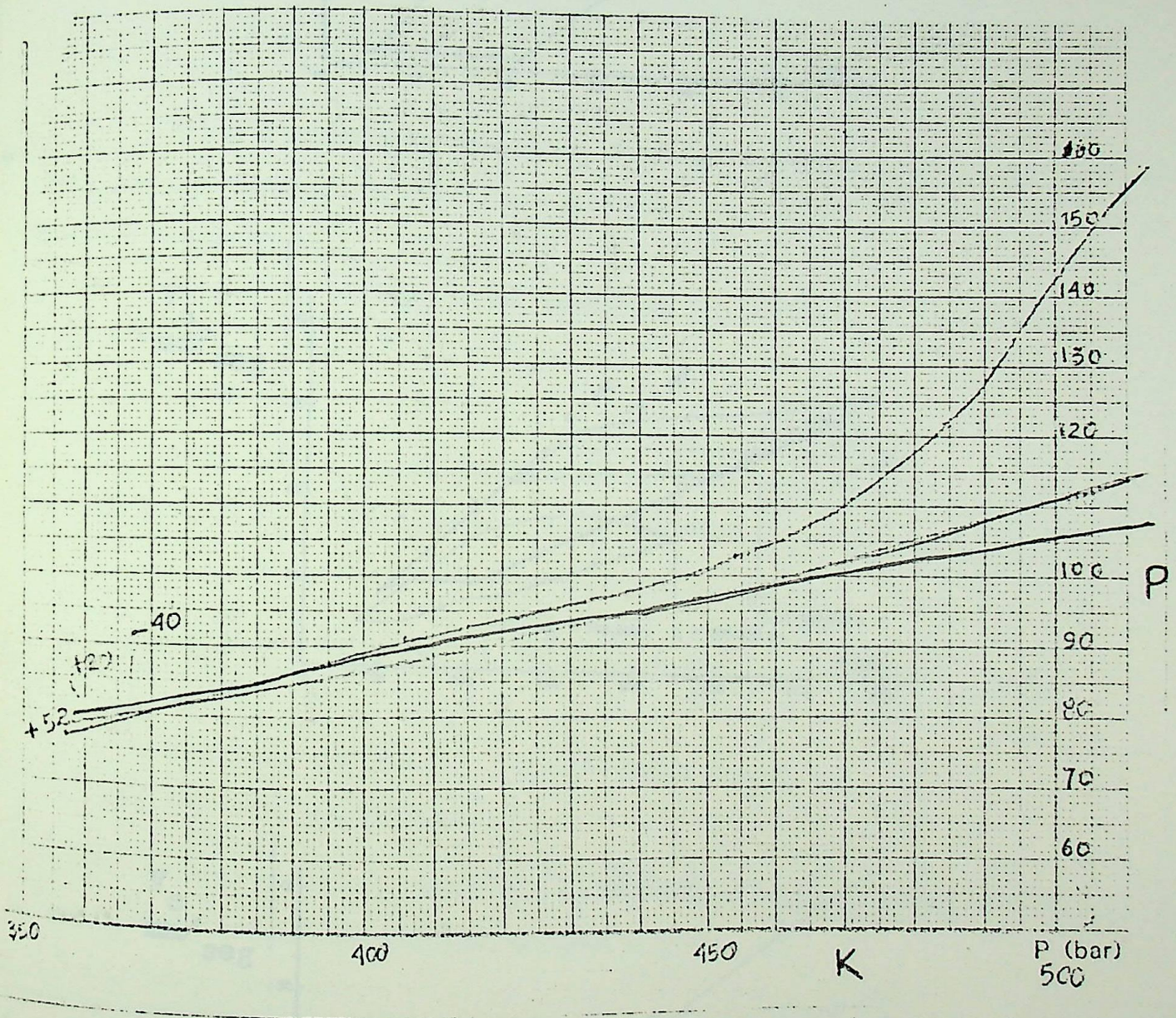
$$t_{instantâneo_2} = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \sum \Delta t$$

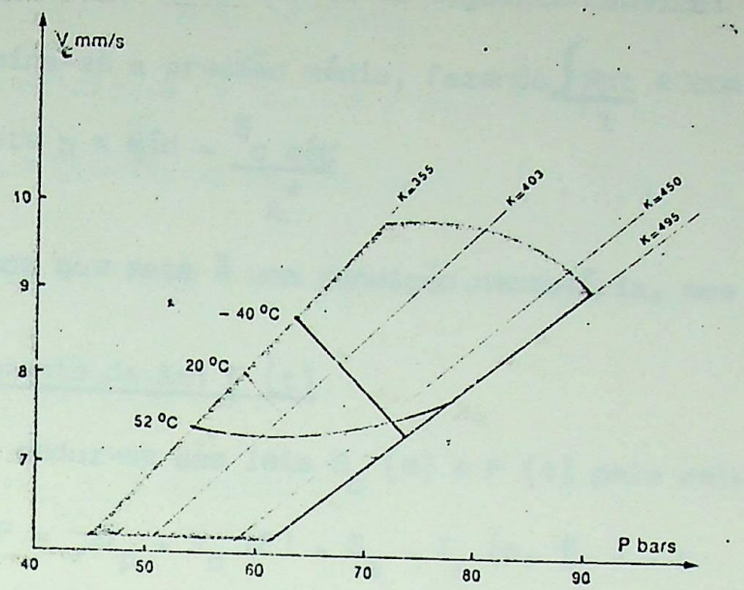
E assim sucessivamente até a espessura total do propelente.

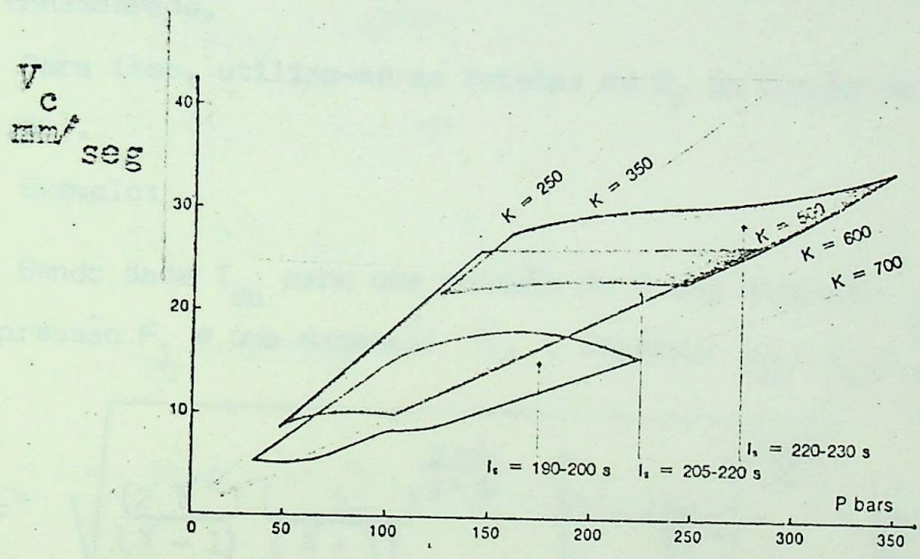
A título de exemplo, dá- e as leis V (P) da composição "Epictète" nº 200

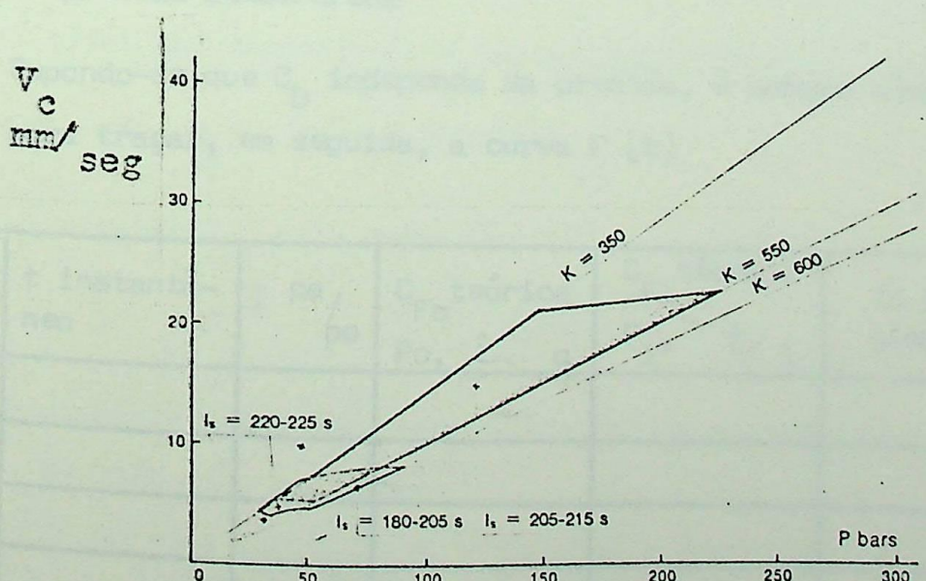



Serviço (K)
-40ºc
+20ºc
+50ºc
500
400
300
200
100
0
50
100
150
Pressão (bar)


160
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
P
-40
+52
350
400
450
K
P (bar)
500


V_c mm/s
K=355
K=403
K=450
K=495
- 40 °C
20 °C
52 °C
P bars


V_c mm/seg
K = 250
K = 350
K = 500
K = 600
K = 700
l_s = 190-200 s
l_s = 205-220 s
l_s = 220-230 s
P bars


V_c mm/seg
K = 350
K = 550
K = 600
l_s = 220-225 s
l_s = 180-205 s
l_s = 205-215 s
P bars

Pode-se então, estabelecer a curva P (t).

Será sempre útil verificá-la da seguinte maneira:

- Determina-se a pressão média, fazendo $\frac{\int P dt}{t}$ e com este valor ao correspondente a $K_{méd} = \frac{S_{c\ méd}}{A^*}$

Observamos que esta é uma condição necessária, mas não suficiente.

3.4. Estabelecimento da lei F (t)

Esta lei deduz-se das leis S_c (e) e P (t) pela relação:

$$F = \rho_p \cdot V_c(P) \cdot S_c \cdot I_s(p, \varepsilon) \cdot g$$

Antes é necessário calcular a impulsão específica padrão da composição (dada por uma expansão de 70/1), nas condições de pressão e de expansão a cada instante considerado.

Para isso, utiliza-se as tabelas de C_F em função de P e por um γ dado (1,00 a 1,66).

Exemplo:

Sendo dada I_{so} para uma pressão Po e uma expansão ε_o, obtem-se I_{sl} para uma pressão P_1 e uma expansão ε_1, fazendo: $I_{sl} = I_{so} \times \frac{C_{Fl}(P_1, \varepsilon_1)}{C_{Fo}(P_o, \varepsilon_o)}$

$$C_F = \sqrt{\frac{(2\gamma^2)}{(\gamma-1)}\left(\frac{2}{(\gamma+1)}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}\left[1-\left(\frac{pe}{Po}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]} + \frac{pe}{Po}\varepsilon - \frac{pa}{Po}\varepsilon$$

pe = pressão estática no plano de saída da tubeira

Pa = pressão atmosférica

Supondo-se que C_D independa da pressão, é sempre cômodo utilizar a tabela abaixo para traçar, em seguida, a curva F (t)

	t instantâneo	pa/po	C_{Fo} teórica Po, ε_o	C_{Fl} téorica P_1, ε_1	Is corrigido (s)	F (Newton)
TABELA P (t)						
	$t_{platô}$					$F_{platô}$

I_{sl} = impulsão específica a cada instante

I_{so} = impulsão padrão da massa

C_{Fl} = coeficiente de impulso a cada instante

C_{Fo} = coeficiente de impulso para $\varepsilon_c = 7{,}95$ e $P_o = 70$

Nas tabelas (Thrust coefficient and expansio rate tables), para: $P_o = 70$ bars

$$\gamma = 1.27$$

$$pa/po = \frac{1}{70} = 0.01428571$$

por interpolação tiramos:

$$\varepsilon_c = 7.94477814$$

$$C_{F\ vácuo} = 1.67879$$

$$\varepsilon \cdot pa/po = 0.11336$$

$$C_{Fo} = C_{F\ vácuo} - \varepsilon \frac{pa}{Po} = 1.67879 - 0.11336$$

$$C_{Fo} = 1.56543$$

- para cada valor de $t_{instantâneo}$, verificar a pressão de câmara p

$$t_{instantâneo\ i} \longleftrightarrow p_i$$

- para cada pressão de câmara p_i, calcular nas tabelas (Thrust coefficient and expansio rate tables) os valores de ϵ, $C_{F\ vácuo}$ e $\epsilon \frac{pa}{Pi}$ para a expansão $\frac{1}{Pi}$

- calcular C_{Fl} pela expressão

$$C_{Fl} = C_{F\ vácuo} - \epsilon \frac{pa}{Pi}$$

- corrigir a impulsão específica da massa, tabelada para uma expansão de 70/1 pela expressão

$$I_{sl} = I_{so} \times \frac{C_{Fl}\ (p_1, \epsilon_1)}{C_{Fo}\ (po, \epsilon\ o)}$$

- calcular a força em Newtons pela expressão

$F = \rho_p \cdot V_c \cdot S_c \cdot I_{sl}\ (p_1, \epsilon_1) \cdot g$, sabendo que a cada instante

teremos um valor de V_c, S_c e I_{sl} dado pelos gráficos e pelas tabelas

$$V_c = \varphi (p, Ti)$$

$$S_c = \varphi (e)$$

como exemplo, suponhamos que para um determinado $t_{instantâneo}$, a pressão da câmara de combustão seja 83 bars e a superfície de combustão 453 cm^2 para uma massa de impulsão específica padrão (expansão 70/1) de 207 seg ; γ = = 1,27, ρ_p = 1.58 g/cc e V_c a 83 bars = 9,10 mm/seg

$$\frac{1}{83} = 0.01204819$$

por interpolação tiramos

$$C_{F\ vácuo} = 1.69234923$$

$$\in \frac{pa}{Pi} = 0.10802615$$

$$C_{Fl} = C_{F\ vácuo} - \in \frac{pa}{Pi} = 1.69234923 - 0.10802615 \cong 1.5843$$

$$I_{sl} = 207 \text{ seg} \times \frac{1.5843}{1.56543} \cong 209,4952 \text{ seg}$$

$$F = 1.58 \frac{g}{cm^3} \times 0,91 \frac{cm}{seg} \times 453\ cm^2 \times 209,4952 \text{ seg} \times 981 \frac{cm}{seg^2} \times$$

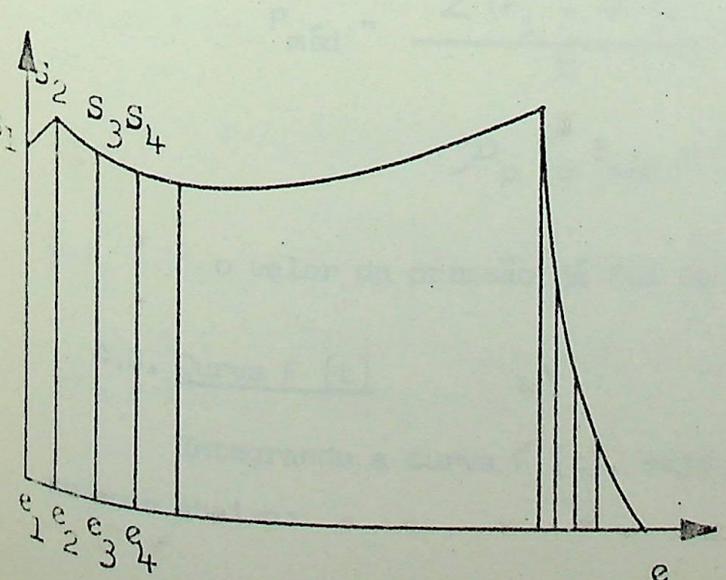
$$\times 10^{-5}\ N$$

$$F = 1338,57\ N$$

4. PROCEDIMENTO DE VERIFICAÇÃO

4.1. Curva Sc (e)

Integrando a curva S_c (e), seja por planímetro, seja por cálculo, procede-se como abaixo:



$$\frac{S_1 + S_2}{2} \times (e_2 - e_1) = V_1$$

$$+ \frac{S_2 + S_3}{2} \times (e_3 - e_2) = V_2$$

$$+ \quad " \qquad "$$

$$+ \quad " \qquad "$$

$$\leq (Si\ \Delta\ e) = \text{Volume do Bloco}$$

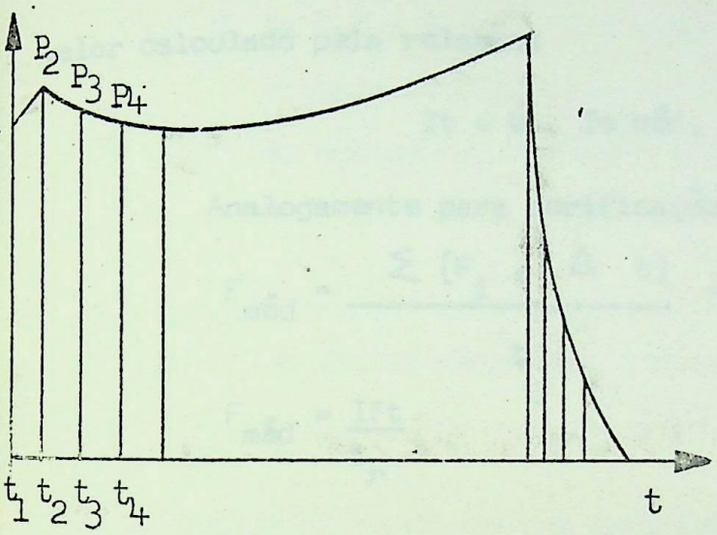
Podemos verificar a correspondência entre o resultado deste cálculo e o valor do volume calculado geometricamente.

O afastamento não deverá exceder de 1%, mesmo para verificação da S_c média.

$$S_{c\ méd} = \frac{\Sigma\ (S_i \cdot \Delta\ e)}{e} = \frac{\text{Volume geométrico do bloco}}{e}$$

4.2. Curva P (t)

Integrando a curva P (t), seja por planímetro, seja por cálculo, procede-se como abaixo:



$$\frac{P_1 + P_2}{2} \times (t_2 - t_1) = I_{pt_1}$$

$$+ \quad \frac{P_2 + P_3}{2} \times (t_3 - t_2) = I_{pt_2}$$

$$+ \quad " \qquad "$$

$$+ \quad " \qquad "$$

$$\Sigma\ (P_i \cdot \Delta t) = I_{pt}$$

Podemos verificar a correspondência entre o resultado deste cálculo e o valor calculado pela relação:

$$I_{pt} = \frac{M}{C_D \cdot A^*}$$

Do mesmo modo, para verificação da pressão média:

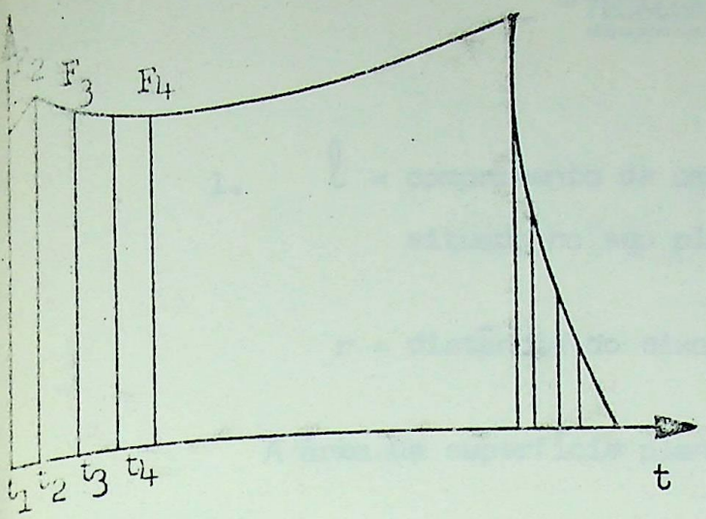
$$P_{méd} = \frac{\Sigma\ (P_i \cdot \Delta\ t)}{t} = P\ méd\ \text{calculada pela relação:}$$

$$\rho_p\ V_c\ S_{méd} = C_D \cdot P_c \cdot A^*$$

o valor da pressão já foi calculado por iteração.

4.3. Curva F (t)

Integrando a curva F (t), seja com planímetro, seja por cálculo, procede-se como abaixo:



$$\frac{F_1 + F_2}{2} \times (t_2 - t_1) = I_f t_1$$

$$+ \frac{F_2 + F_3}{2} \times (t_3 - t_2) = I_f t_2$$

$$+ \quad " \qquad\qquad " \qquad = \quad "$$

$$+ \quad " \qquad\qquad " \qquad = \quad "$$

$$\Sigma (F_i \cdot \Delta t) = I_f t$$

Podemos verificar a correspondência entre o resultado deste quadro e o valor calculado pela relação:

$$It = M \cdot Is_{méd} \cdot g$$

Analogamente para verificação do empuxo médio:

$$F_{méd} = \frac{\Sigma (F_i \cdot \Delta t)}{t} = \rho_p \cdot V_c (P_{méd}) \cdot S_c \cdot I_s (P_{méd}, \in) \cdot g$$

$$F_{méd} = \frac{Ift}{t_r}$$

5. NOÇÕES ÚTEIS PARA OS CÁLCULOS DE SUPERFÍCIE E DE VOLUMES

Os cálculos de superfície e de volume são feitos por decomposição de elementos geométricos simples.

Assim teremos:

5.1. Para as superfícies

Todos os polígonos, dos quais os mais empregados são: o quadrado, o retângulo, o trapézio, o círculo, a coroa e o setor.

Os sólidos, tais como a esfera, a calota esférica, o toro, a porção de toro.

5.2. Para os Volumes

O cubo, o paralelepípedo, o tronco de prisma, a pirâmide, o cilíndro, o cone, o tronco de cone, a esfera, a calota esférica.

Para o cálculo das porções de toro, ou de todo elemento de revolução, a solução mais simples é a aplicação do "teorema de Pappus".

"TEOREMA DE PAPPUS"

1. ℓ = comprimento de uma curva plana, girando em torno de um eixo, situado no seu plano, e não cortando a curva.

   r = distância do eixo ao centro de gravidade da curva.

   A área da superfície plana, girada é:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \ell$$

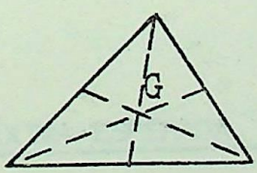
2. Se S é a área de uma superfície plana, girando em torno de um eixo situado no plano que contém a superfície e não a cortando, o volume do sólido da revolução gerado é:

$$V = 2 \cdot \pi \cdot r^{o} \cdot S$$

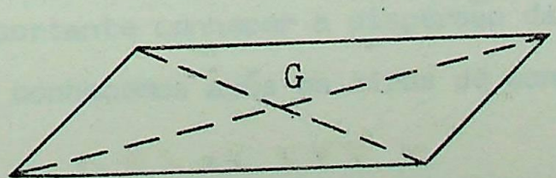
Na determinação dos centros de gravidade empregaremos o método gráfico.

5.3. Determinação do centro de gravidade dos elementos mais empregados

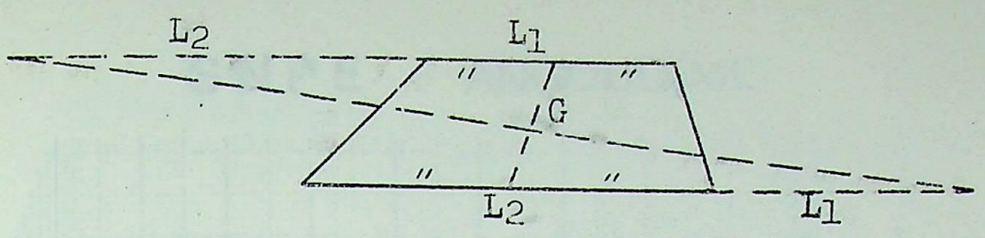
Triângulo — Ponto de concorrência das meridianas



Paralelograma

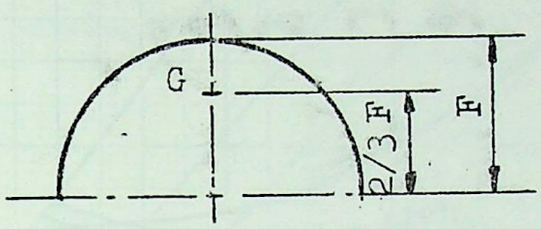


Trapézio



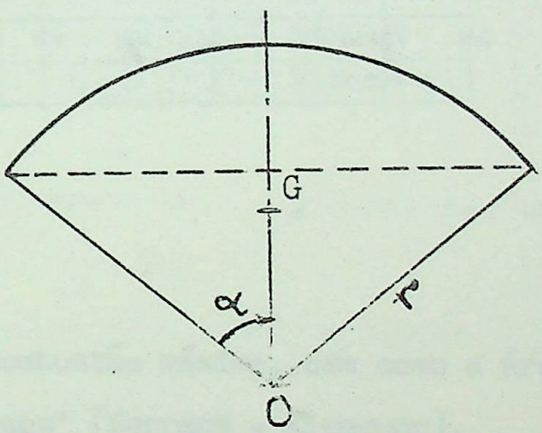
IG ,aproximadamente : 2/3

Arco de Circulo



Para o setor do círculo aplicaremos a relação

$$OG = \frac{120\, r\, \operatorname{sen}\alpha}{\pi\alpha}$$



6. DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO MÁXIMA ESPERADA, PARA UMA TEMPERATURA MÁXIMA

6.1. Em função da velocidade para um valor de superfície máxima

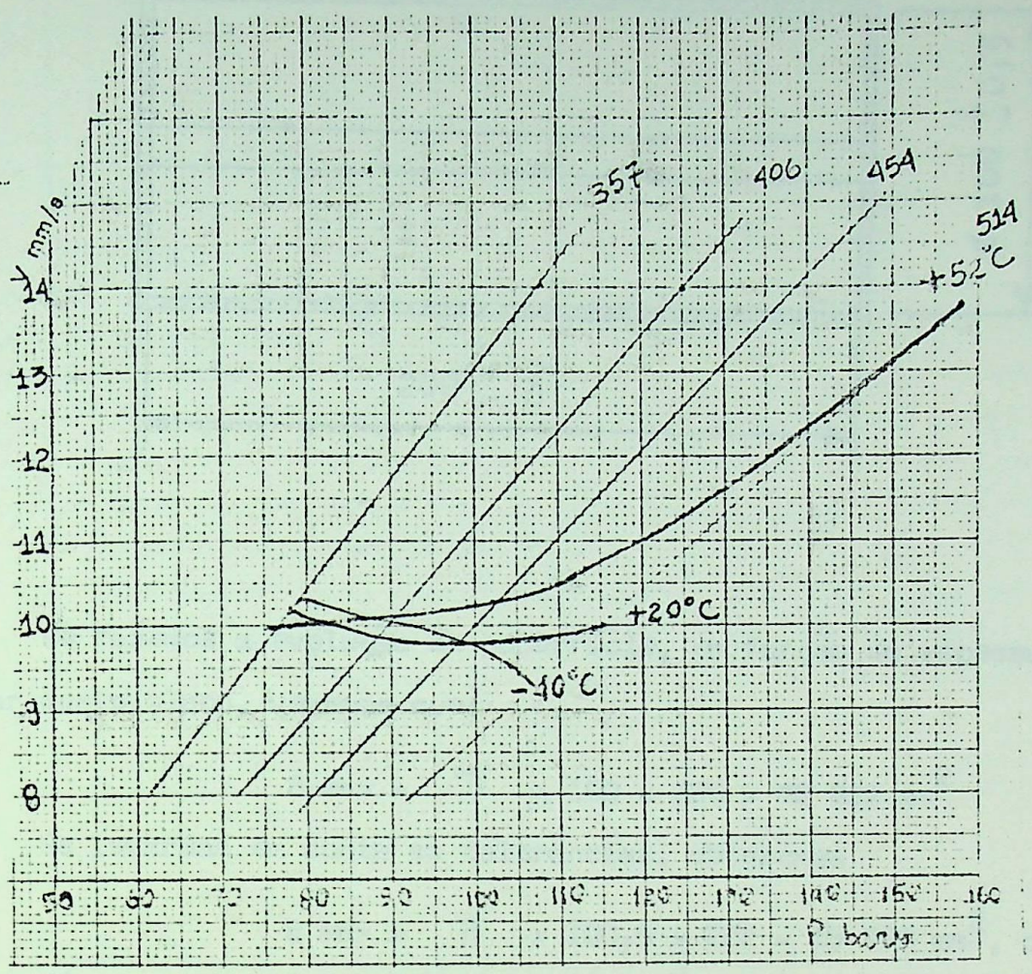
O ante-projeto, tendo sido calculado com a ajuda de uma lei de velocidade nominal, permite-nos determinar a pressão máxima em função da velocidade máxima.

Por isso, é importante conhecer a dispersão da velocidade da composição utilizada, valores que conhecemos após os tiros de controle.

Exemplo:

Dispersão da velocidade de combustão sobre as curvas V_c (P)

SNPE ANGOULEME



Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

Conhecendo a superfície de combustão máxima, bem como a área da tubeira, podemos deduzir daí o valor da "serrage" (Serrage = Klemmung).

$$K = \frac{S_c \text{ max}}{A^*}$$

Para conhecer a pressão máxima, é suficiente a leitura na curva V_c (P) do valor correspondente à intersecção da reta de "serrage" e o valor máximo da velocidade.

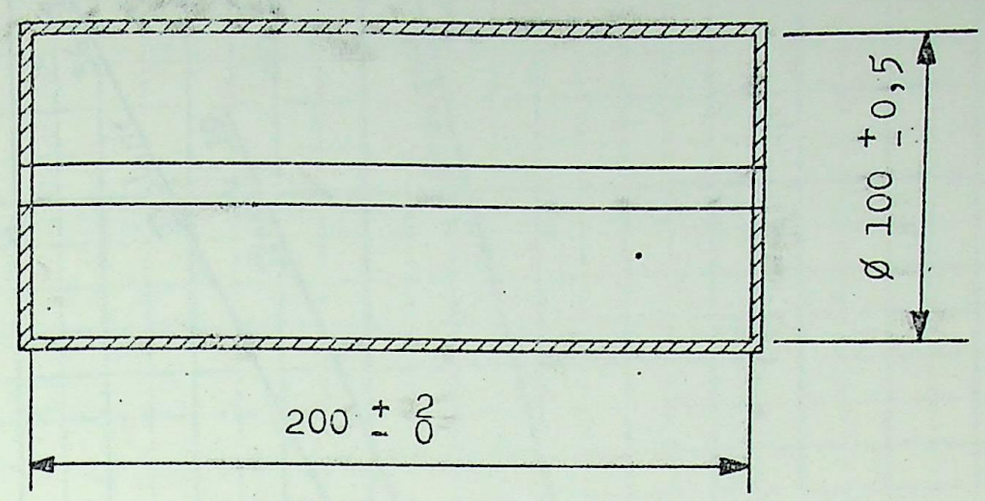
É também possível calcular a P max, aplicando a relação

$$\rho_p \cdot V_c \text{ max} \cdot S_c \text{ max} = C_D \cdot Pe \text{ max} \cdot A^*$$

6.2. Em função da Dispersão sobre as tolerâncias

Em relação as tolerâncias de um bloco, é possível conhecer a superfície de combustão máxima.

Por exemplo:



Se fazemos a evolução de superfície, em função da espessura da pólvora a queimar deste bloco, veremos que:

$$S\ max = \pi \times 100 \times 200 = 62\ 832\ mm^2$$

Se levarmos em conta as tolerâncias, obteremos

$$S\ max = \pi \times 100{,}5 \times 202 = 63\ 777\ mm^2$$, ou seja um aumento de 1,5%.

Este aumento de superfície corresponde a um aumento de "serrage" e, portanto, um aumento de pressão.

Após haver traçado a reta de "serrage", correspondente a $\frac{S\ max}{A^*}$ sobre a curva S_c (e), podemos ler a pressão máxima, da mesma maneira que no caso procedente, ou calcular a P max pela relação: $\rho_p \cdot V_c\ max \cdot S_c\ max = C_D \cdot Pe\ max \cdot A^*$

6.3. Em função da erosão

Quando o número de Mach atinge um valor de aproximadamente 0,2 no canal, a velocidade de combustão local aumenta e traz como consequência, um aumento do débito total e, portanto, também da pressão.

Chega-se a esta nova pressão utilizando-se os ábacos do tipo a seguir, que são estabelecidos para cada composição de propelente.

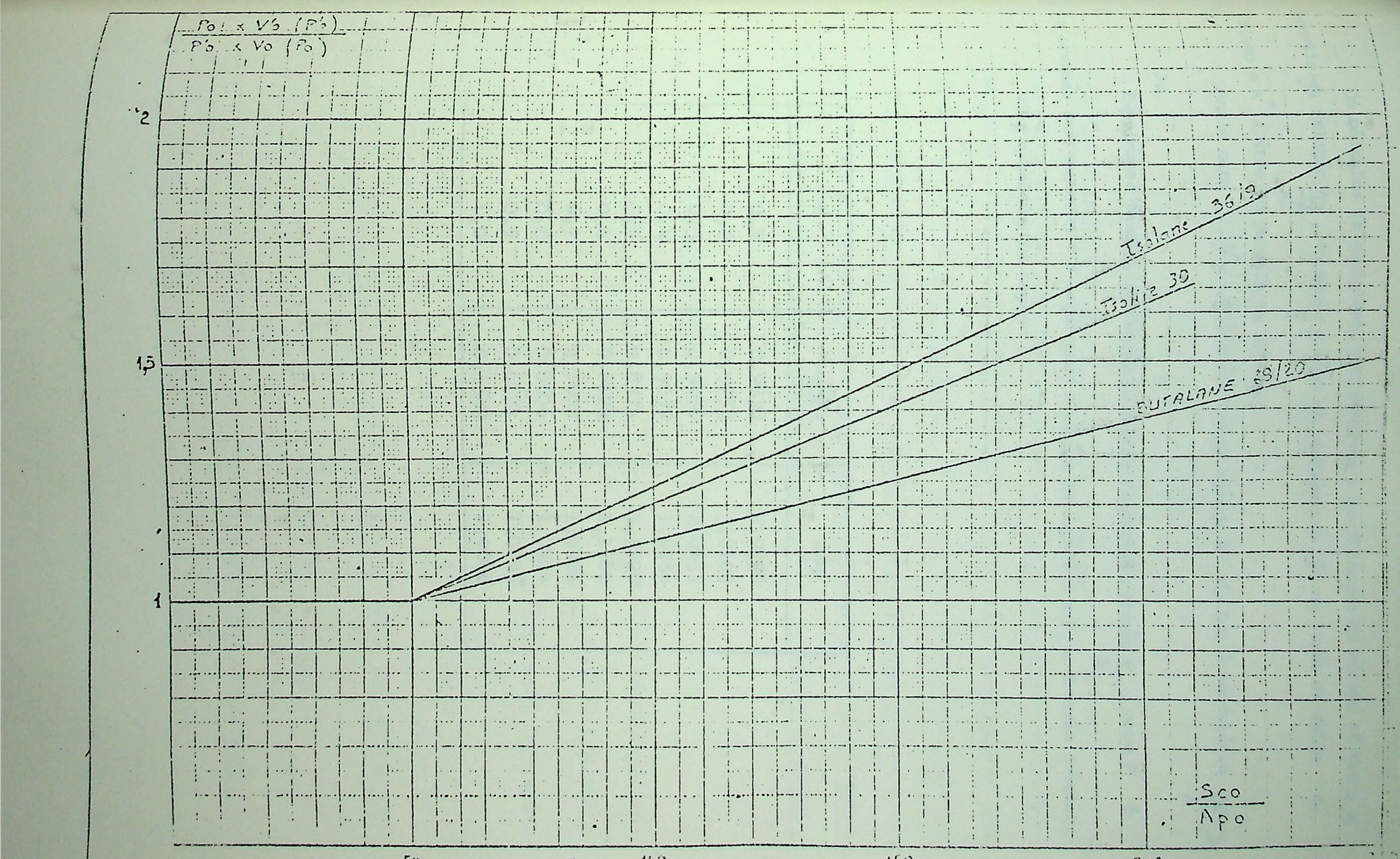
Po = Pressão com erosão

P'o = Pressão sem erosão

Vo, V'o = Velocidade correspondente a Po e P'o

Sc = Superfície de combustão emissora de gás no canal

Apo = Seção de passagem de gás


$\frac{Po_1 \times V_3 (P_3)}{P_3 \times Vo (Po)}$
2
1,5
1
Isolane 36/9
Isolit 30
BUTALANE 28/20
$\frac{Sco}{Apo}$

Os cálculos de escoamento nos permitem a verificação do número de Mach, a partir da relação $\frac{Ap}{A^*}$, Ap sendo a área de passagem do gás na seção de saída do bloco e A^* a área do gargalo da tubeira.

Assim para $\gamma = 1{,}25$, desde que se deseja $M < 0{,}2$ é necessário $\frac{Ap}{A^*} >$

3.

Exprime-se também, em função do número de Mach a relação $\frac{P}{P_i}$, onde P é a pressão correspondente à seção onde o número de Mach é M e P_i a pressão inicial.

Vide a tabela que segue

M	$\frac{P}{Pi}$	$\frac{A}{A^*}$
0,1	0,9938	5,9190
0,2	0,9753	3,0100
0,3	0,9456	2,0633
0,4	0,9057	1,6086
0,5	0,8574	1,3520
0,6	0,8024	1,1960
0,7	0,7428	1,0988
0,8	0,6806	1,0404
0,9	0,6174	1,0095
1,0	0,5549	1,0000

CAPÍTULO 5

A FABRICAÇÃO DE PROPELENTE MOLDADO DE BASE DUPLA

1- O processo de moldagem de propelentes de base dupla é uma técnica desenvolvida para obtenção de blocos de propelentes sólidos constituídos principalmente de um sólido energizante aglutinante polimerizado a NITROCELULOSE e um líquido energizante gelatinizante como a NITROGLICERINA (O mais utilizado atualmente)ou o etilenoglicol dinitrado ou o dietilenoglicol dinitrado ou o 1-1 propanodiol dinitrado ou o 1-3 propanodiol dinitrado ou trinitrato de metriol ou o pentanodiol dinitrado ou o butanotriol trinitrado .

1.1 - NITROCELULOSE (NC)

$$\left(C_{24} H_{40-x} O_{20+2x} N_{x} \right)_{n}$$

N_2 = teor de nitrogênio na nitrocelulose

Q_A = Potencial aparente

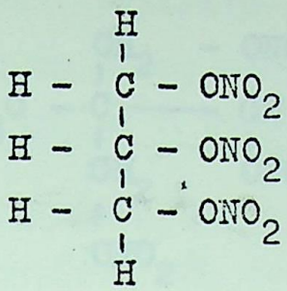
caso 1 - $N_2 < 12{,}90\ \%$

$$Q_A = 140{,}35\ (N_2) - 814{,}386 \text{ cal/g}$$

caso 2 - $N_2 > 13{,}00\ \%$

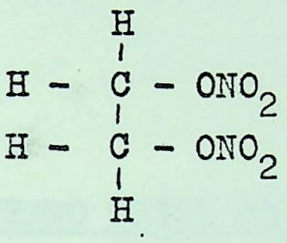
$$Q_A = 140{,}00\ (N_2) - 810 \text{ cal/g}$$

NITROGLICERINA (NGL)



Potencial Aparente = 1750 cal/g

ETILENOGLICOL DINITRADO (EGDN)

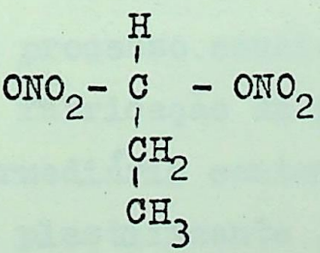


Potencial Aparente = 1740 cal/g

DIETILENOGLICOL DINITRADO (DEGIN)

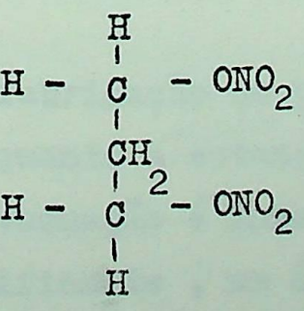
Potencial Aparente = 1050 cal/g

1-1 Propanodiol dinitrado (1.1 PG DN)



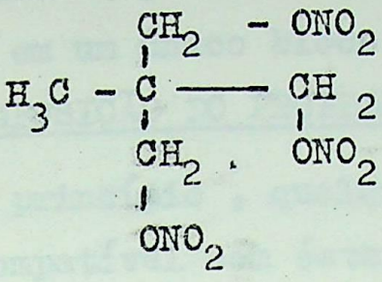
Potencial Aparente = 826 cal/g

1-3 Propanodiol dinitrado (1.3 PGDN)



Potencial Aparente = 728 cal/g

TRINITRATO DE TRIMETILOL ETANO (TMETN)



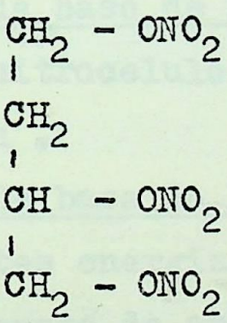
Potencial Aparente = 1.192 cal/g

PENTANODIOL DINITRADO

$$ONO_2 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - ONO_2$$

Potencial Aparente = 950 cal/g

BUTANO TRIOL TRINITRADO



Potencial Aparente = 1.470 cal/g

1.2 - O processo consiste em duas etapas :

1 - A fabricação da pólvora de base (grão base) : um produto intermediário contendo toda a nitrocelulose , um estabilizante , um plastificante , ingredientes sólidos modificadores balísticos, catalizadores de combustão e fabricado na forma de um cilindro reto de aproximadamente 1 mm de diâmetro e de comprimento .

2 - A fabricação do propelente moldado : Um molde é montado , testado quanto a estanqueidade , enchido com a pólvora de base e após evacuação é injetado um solvente de moldagem composto de um plastificante , um óleo explosivo (energizante plastificante como a nitroglicerina) e estabilizante e este preenche os interstícios entre os graõs .

Aquecendo-se a temperaturas moderadas , a interdifusão do polímero e do plastificante ocorre e transforma o sistema de dois componentes (polímero-grão base , plastificante-solvente de moldagem) em um único bloco monolítico .

2 - COMPOSIÇÃO DO PROPELENTE

Em princípio , qualquer ingrediente sólido que seja químicamante compatível com ésteres nitrados (NGL, DEGDN, EGDN, PGDN e TMETN) podem ser introduzidos no propelente durante a fabricação da pólvora de base . Todo ingrediente líquido usado na composição do propelente , deve também ser um plastificante da nitrocelulose.

Na prática , 4 principais tipos de pólvoras de base foram desenvolvidas , diferindo na composição da mesma .

Os quatro tipos de pólvora de base são :

1 - Pólvora de base de base simples- contém apenas um componente energizante , a nitrocelulose .

2 - Pólvora de base de base dupla - contém dois componentes energizantes , a nitrocelulose e um óleo explosivo , normalmente a nitroglicerina .

3 - Pólvora de base de base dupla modificada - contém além dos dois componentes energizantes N C e N G L , um oxidante(normalmente o perclorato de amônio) e um combustível (normalmente o Alumínio) adicionais .

4 - Pólvora de base de base tríplice - contém além dos dois componentes energizantes NC e NGL , um terceiro como o RDX , o mais utilizado atualmente .

A pólvora de base de base dupla modificada pode conter outro oxidante em lugar do perclorato de amônio ; o perclorato de potássio e outro combustível em lugar do Alumínio ; o magnésio ou berílio ou hidreto metálico ou boro ou lítio ou silício .

2.1 - PÓLVORA DE BASE

BASE SIMPLES - É uma pólvora constituída de nitrocelulose (NC) , estabilizante (2 nitrodifenilamina = 2 NDPA) , uma pequena quantidade de plastificante que fornecerá as propriedades

mecânicas desejadas ao propergol final , aditivos sólidos modificadores balísticos e os catalizadores de combustão . A relação normal entre a massa de pólvora de base e a massa do solvente de moldagem situa-se na faixa 1,500 a 2,333 , dando um propelente moldado com cerca de 60 % de nitrocelulose .

Ingredientes	Base Simples %	
	Pólvora de base	Propelente
NITROCELULOSE	88 a 91	53 a 64
ESTABILIZANTE	1.5 a 3	1.3 a 1.60
ADITIVOS MOD. balíst.	3 a 5	1.8 a 3.50
CATALIZADORES COMB	0 a 1	0 a 0.7
PLASTIFICANTE	4 a 8	2.4 a 3.5
TRIACETINA	-	6.3 a 8.4
NITROGLICERINA	-	23 a 32

BASE DUPLA - É uma pólvora constituída de nitrocelulose (NC) , um óleo explosivo (normalmente a nitroglicerina) , estabilizantes (2 NDPA ou centralite) , aditivos sólidos modificadores balísticos e os catalizadores de combustão . O propelente resultante é melhor plastificado e mais energético que o de pólvora de base simples .

	BASE DUPLA %	
Ingredientes	Pólvora de base	propelente
Nitrocelulose	75 a 83	45 a 58
Nitroglicerina	12 a 18	36 a 39
Estabilizante	1 a 2	1.0 a 1.8
Aditivos balísticos	4.5 a 6	2.7 a 4.2
Cat. combustão	0 a 0.3	0 a 0.21
Triacetina	-	6.3 a 8.4

BASE DUPLA MODIFICADA - É uma pólvora de base dupla com significantes quantidades de cristais oxidantes (perclorato de amônio ou de potássio) e combustível metálico (normalmente Alumínio) . Tais composiçoes produzem propelentes altamente energéticos.

A nitrocelulose neste caso fica muito mais plastificada do que nas pólvoras de base dupla comuns .

Ingredientes	Base Dupla Modificada %	
	Pólvora de base	Propelente
Nitrocelulose	28 a 32	18 a 23
Nitroglicerina	9 a 11	31 a 37
Oxidante Sólido	25 a 30	15 a 21
Combustível Sólido	28 a 32	17 a 23
Estabilizante 1	1 a 1.5	1 a 1.35
Estabilizante 2	1.5 a 2	0.9 a 1.4

Obs : Estabilizante 1 é para N C e N G L e normalmente usa-se a 2 NDPA ou a carbamite .

Estabilizante 2 é para o perclorato e normalmente usa-se um produto de nome código ECAM .

Do ponto de vista de fabricação , essas três classes de composição diferem principalmente no tocante à segurança, necessaria na incoporração da nitroglicerina e/ou oxidante sólidos e

refletida na diferença dos equipamentos , operaçoes controladas a distância , etc . O tempo de extração do solvente e secagem para a pólvora de base simples é muito maior que o para pólvora de base dupla e pólvoras de base dupla modificada .

O solvente usado na fabricação de pólvora de base simples pode ser :

a) álcool - éter (normalmente 36 : 64 em peso)

b) acetona - álcool (normalmente 57 : 43 ou 63:37 em peso)

A mistura álcool-éter é recuperada , fracionada na torre de destilação e reutilizada . A mistura álcool-acetona não é recuperada .

O solvente usado na fabricação de pólvoras de base dupla e de base dupla modificada pode ser :

a) álcool-éter (normalmente 31 : 69 em peso)

b) álcool-acetona (normalmente 51 : 49 em peso)

Este solvente é extraído mas nunca reutilizado , pois / contém pequenas percentagens de nitroglicerina (líquida) e portanto não pode ser fracionado em torre de destilação .

3 - HISTÓRICO - O processo de moldagem para se obter um propelente de base dupla foi desenvolvido sob os auspícios do governo dos Estados Unidos da América durante a segunda guerra Mundial, sendo os trabalhos preliminares feito por KINCAID e SHUEY . O processo atendeu a necessidade de cargas para foguetes significativamente maiores do que aquelas feitas pelo processo existente de extrusão , com diâmetros limitados a aproximadamente 150 mm .

Os primeiros trabalhos foram com pólvora de base de base simples na fabricação dos aceleradores de decolagem dos tipos / "JATO " , foguetes de sondagem e mísseis controlados . O sucesso do propelente moldado de base dupla foi atribuido em grandes partes ao desenvolvimento da família de modificadores balísticos , vários sais de chumbo de ácidos orgânicos que criam baixos coeficientes de temperatura e baixa sensibilidade da velocidade de queima à pressão .

Comcas necessidades de maiores energias apareceram a pólvora de base de base dupla foi desenvolvida, continuando a manter as excelentes propriedades balísticas dos propelentes anteriores .

Além disso , como essas composiçoẽs eram mais fortemente plastificadas , foram mais adequadas para moldagem direta na câmara do propulsor (case bonded) ; tais aplicaçoẽs requerem um / baixo módulo de elasticidade e uma alta capacidade de pressão em lugar de alta resistência . Propelentes de base dupla moldados diretamente na câmara do propulsor foram usados inicialmente em lançamentos de foguetes espaciais , ex. Projetos Vanguard e Scout .

Um outro substâncial aumento na energia foi obtido pela / incorporação de quantidades significativas de oxidantes sólidos / (ex . perclorato de amônio NH_4 CLO_4) e combustível metálico / (ex . Alumínio em pó) na pólvora de base .

A família resultante dos propelentes de base dupla modificada (CMDB) encontrou largo emprego em mísseis balísticos e motores de foguetes espaciais .

Acompanhando o desenvolvimento dos propelentes , houve uma evolução nos projetos de grãos mais complexos aumentando a sofisticação no equipamento e nas técnicas de moldagem .

Os primeiros propelentes de base dupla moldados foram feitos em cargas cilíndricas retas , com camisa inibidora de acetato de celulose e exibindo uma perfuração em forma de estrela para / manter uma superfície constante de queima (Fig 1) . Para atender a exigência de

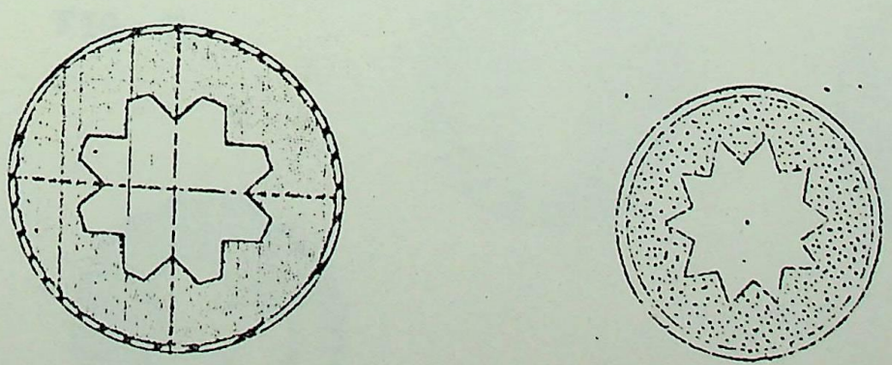


FIG 1

altos impulsos e curtos tempos de queima de cargas maiores de propelentes tendo baixa velocidade de combustão, projetos de grão multiperfurado foram desenvolvidos .

Em princípio , consiste de anéis concêntricos de propelente ligados por suportes (STRUTS) ; na prática , essa moldagem / envolve um complexo arranjo de agulhas em forma de arco (Vazio no propelente) que são montados nos pratos base e suportes ainda dentro do tubo cilíndrico de inibidor (Fig 2) .

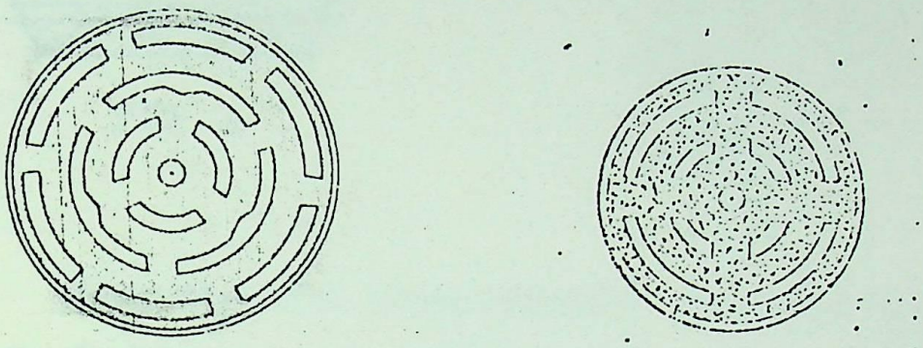


FIG 2

Ao mesmo tempo , o projeto de grão com ranhuras (SLOTTED-TUBE) foi introduzido para aplicaçoẽs de combustoẽs mais longas (Fig 3) .

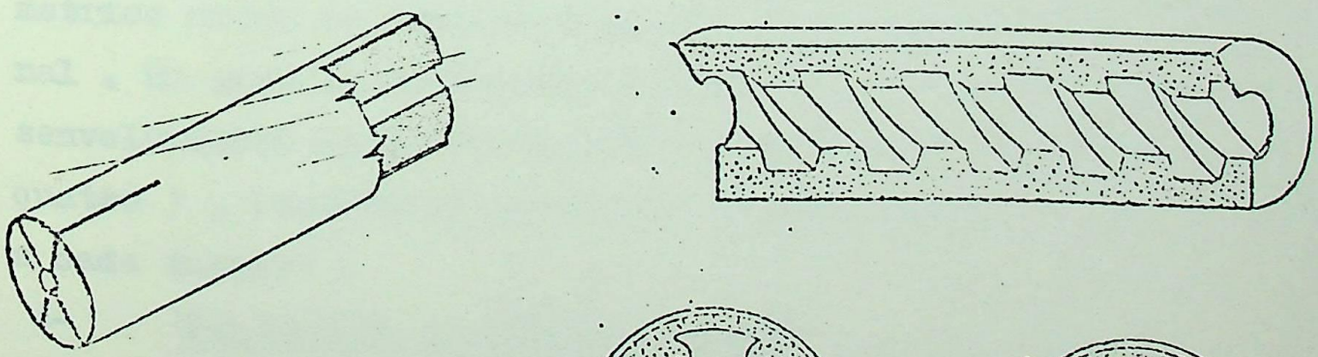
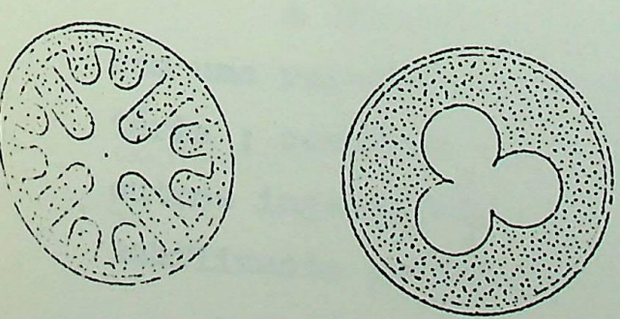


FIG 3



A configuração de cilíndro reto era apropriada para motores de cartucho , isto é , motores que permitem a fabricação separada do grão de propelente e subsequente carregamento nas câmaras . Projetos mais eficientes , em termos de carregamento / volumétrico e fração mássica do propelente , são possíveis na / moldagem na câmara do propulsor (case-bonded motors)

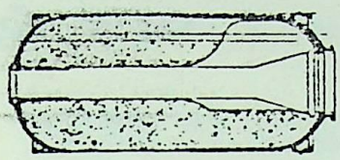
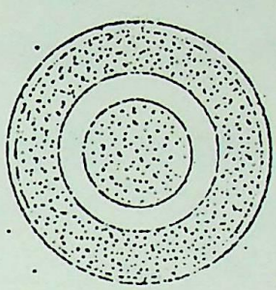


FIG 4



Este tipo foi primeiramente usado com propelente moldado de base dupla no motor ALTAIR para o projeto VANGUARD,SCOUT, e outras missoẽs espaciais . Em tais projetos , tornou-se apropriado carregar ambas cúpulas do motor com o propelente e trabalhar através aberturas relativamente pequenas em cada extremidade da câmara do propulsor para introdução dos componentes e propelente.

Perfuração em estrela e ranhuras (SLOTS) foram ainda usados para controle balístico , contudo o problema do projeto geométrico mudou de predominantemente bidimensional para tridimensional . Um grau de complexidade adicional foi introduzido com o desenvolvimento de configuraçoẽs com múltiplas tubeiras (em geral quatro) , requerendo canais de formato apropriado que conduzisse a cada tubeira .

4- Fabricação da Pólvora de Base

U. S. A - casting powder .

France - poudre Zénon .

A Pólvora de base consiste de cilíndros circulares retos com uma relação comprimento -diâmetro (L/D) aproximadamente unitária ; contém o aglutinante polímero (nitrocelulose), todos os outros ingredientes sólidos , e uma fração de plastificante e estabilizante pretendida para a composição final .

O processo de fabricação assemelha-se ao usado para pólvora sem fumaça de canhão , diferindo sómente na incorporação de novos ingredientes que requer técnicas especiais .

Normalmente quando se utilisa solvente álcool-acetona , a pólvora é fabricada para L= D= 0,90 mm , enquanto que para o solvente álcool-éter , a pólvora é fabricada para L= D= 1,10 mm, sendo estas dimensoẽs para o grão verde recem cortado , o que dará para o grão acabado (seco) aproximadamente $L \cong D \cong 0{,}80$ mm .

PASSOS DO PROCESSO - A fabricação da pólvora de base é basicamente uma operação de gelatinização , utilizando um solvente volátil para dar mobilidade ao polímero aglutinante . O processo é mostrado esquemàticamente na (Fig 5) em termos dos principais / equipamentos usados .

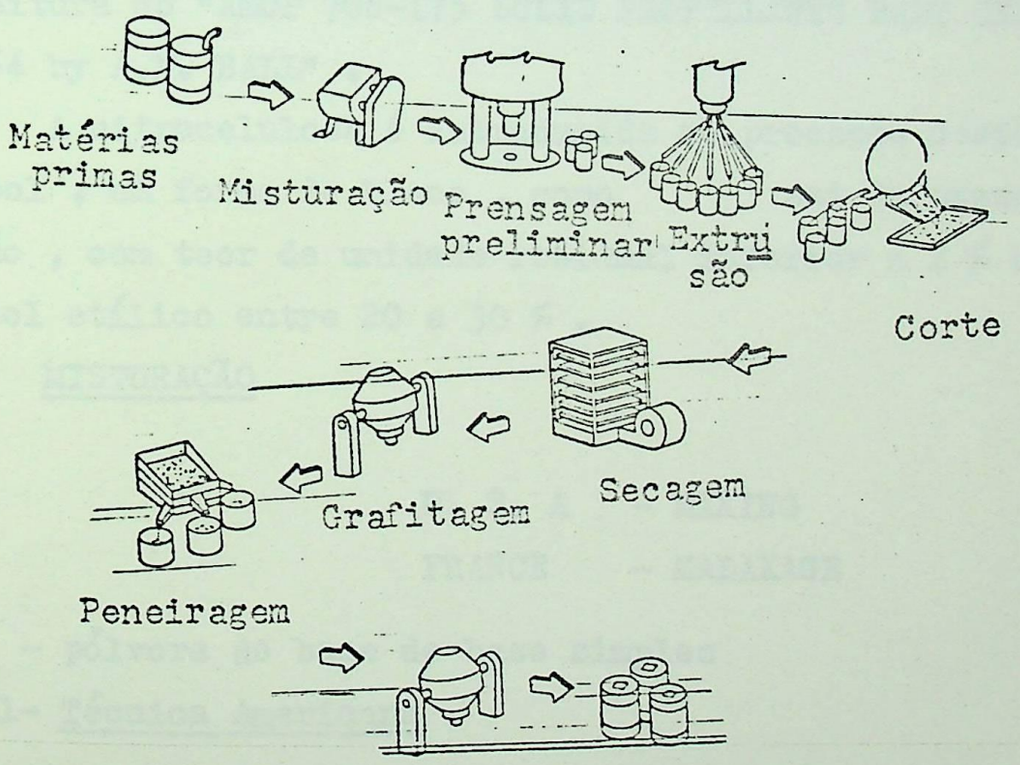


FIG 5

Para melhor compreenção , o processo pode ser dividido / convenientemente nas seguintes operaçoẽs :

(1) - Misturação . Todos os ingredientes são misturados e homogenizados na presença do solvente para produzir uma massa / extrudável .

(2) - CORTE . A massa é transformada em cilindros circulares retos , por extrusão em cordoes que são então cortados .

(3) - SECAGEM . O solvente volátil é removido por exposição a um fluido quente circulante .

(4) - Operaçoes Finais . Os graos são cobertos com grafite, homogenizados em grandes lotes , e peneirados para remover pelotes aglutinados , pó , e material estranho .

Muitas variaçoes são introduzidas em cada um desses passos, dependendo da composição , dos equipamentos disponíveis , e da experiência do fabricante . Descreveremos as técnicas particulares usadas pelos Americanos e pelos Franceses . Para uma complementação sobre técnicas de fabricação de pólvoras , aconselhamos a leitura do "AMCP 706-175 SOLID PROPELLANTS PART ONE SEPTEMBER 1.964 by A.M. BALL" .

A nitrocelulose é introduzida no processo desidratada em álcool , em forma de bloco , como sai da prensa de desidratação , com teor de umidade residual inferior a 2 % e teor em / álcool etílico entre 20 e 30 % .

I - MISTURAÇÃO

U. S. A - MIXING

FRANCE - MALAXAGE

I.a - pólvora de base de base simples

I.a.1- Técnica Americana .

Os blocos de nitrocelulose desidratada saídos da prensa de desidratação são conduzidos a um moinho cilíndrico de eixo na horizontal , provido de dentes em seu interior e uma placa de aço inoxidável perfurada ($\phi \approx 5$ mm) na lateral do mesmo . O conjunto é acionado a distância e gira a aproximadamente 37 rpm. Terminada a moagem , a NC é conduzida à oficina de misturação e colocada no interior do misturador .

O plastificante e o estabilizante são dissolvidos no solvente (álcool-éter ou álcool-acetona) e os ingredientes sólidos (modificadores balísticos e catalisadores de combustão) são misturados com um pouco do solvente formando uma pasta fluida que é adicionado sôbre a NC no misturador , juntamente com o solvente + plastificante + estabilizante .

O tempo de misturação é da ordem de 2 horas , sendo que água à temperatura de 15°C circula pela camisa do misturador .

Terminada a misturação , a massa plástica sofre uma maceração de 10 minutos nos maceradores , onde uma salmoura a 0°C circula pela camisa dos mesmos . Os Americanos usam misturadores de lâminas em Sigma e maceradores de dentes retos .

I.a.2 - Técnica Francesa .

Os blocos de nitrocelulose desidratados em prensa são quebrados num moinho (é mietteur) e são após desagregados normalmente numa peneira de bronze de 3 mm de abertura . É completado o teor de álcool na NC dividida em 5 recipientes . A ordem de adição no misturador é importantíssima . Coloca-se primeiro 2 recipientes de NC + álcool , após coloca-se metade dos ingredientes sólidos (Modificadores balísticos e catalizadores de combustão) , após mais 2 recipientes de NC + álcool , a metade final dos ingredientes sólidos e o último recipiente de NC + álcool . Liga-se o misturador e procede-se uma homogenizacão à seco por 10 a 15 minutos . Após , com o misturador parado , adiciona-se o restante do solvente onde já estão dissolvidos o plastificante , o estabilizante e demais / ingredientes líquidos se houver . Mistura-se até completar um mínimo de 3 horas (incluindo-se a misturação a seco) . O misturador é refrigerado à água que circula pela camisa à aproximadamente 15°C

Os Franceses usam misturadores WERNER e CHAUDEL-PAGE .

I.b - Pólvora de base de base dupla

I.b.1- Técnica Americana .

A primeira operação é a impregnação da nitrocelulose com a nitroglicerina, realizada no misturador SCHRAEDER .

A NC pulverizada é colocada no misturador , este é acionado e NGL desensibilizada pela adição de acetona é adicionada no misturador . O tempo de misturação é de cerca de 8 a 10 minutos .

Esta massa será adicionada então no misturador que já contem o complemento de NC e o álcool necessário , já misturados por um período de 15 minutos .

Adicionada a NC + NGL + acetona , adiciona-se a acetona / contendo o estabilizante e a pasta fluida dos modificadores balísticos e catalisadores de combustão em um pouco de acetona e mistura-se por um período mínimo de 2 horas . A circulação de água à 15 °C pela camisa do misturador é importante .

I.b.2- Técnica Francesa .

A operação de impregnação da nitrocelulose com nitroglicerina é realizada no misturador PETRIN (operação chamada petrissage) e a única diferença é que o estabilizante é dissolvido em parte de acetona , e esta solução é adicionada à nitroglicerina para desensibilizá-la e permitir o transporte e a misturação . O tempo de misturação é de 5 minutos e o misturador gira a 3 rpm e possui camisa refrigerada a água . A misturação propriamente dita é feita a princípio com o complemento de NC + álcool e os ingredientes sólidos (modificadores balísticos e catalizadores de combustão) por um tempo de 15 minutos . Após acrescenta-se a NC impregnada de NGL + estabilizante e o solvente com demais ingredientes líquidos se houver , e mistura-se por um tempo mínimo de 6 horas .

O misturador serve para 3 objetivos .

Primeiramente , êle homogeniza todos os ingredientes fornecendo uma distribuição uniforme no propelente final .

Segundo , êle fornece tempo , calor , e contacto para a solvatação de toda ou parte da nitrocelulose através o solvente volátil e o plastificante .

Terceiro , êle fornece energia mecânica para separar as fibras de nitrocelulose e expô-las à solvatação . Nitrocelulose solvatada é a matriz que aglutina o restante do material e eventualmente dá resistência e elasticidade ao propelente final .

Nesse estágio muitos parâmetros controlam a uniformidade e subsequente extrusão e características do produto como :

(1) - Composição do solvente : Misturas de éter e álcool para fabricação de base simples e misturas de acetona e álcool para / fabricação de base dupla , base tripla ou alta energia , são atualmente as mais utilizadas .

(2) - Quantidade de solvente : A quantidade é determinada principalmente pela quantidade de nitrocelulose na composição .

A figura 6 fornece um exemplo do efeito da quantidade e composição do solvente na densidade do grão base .

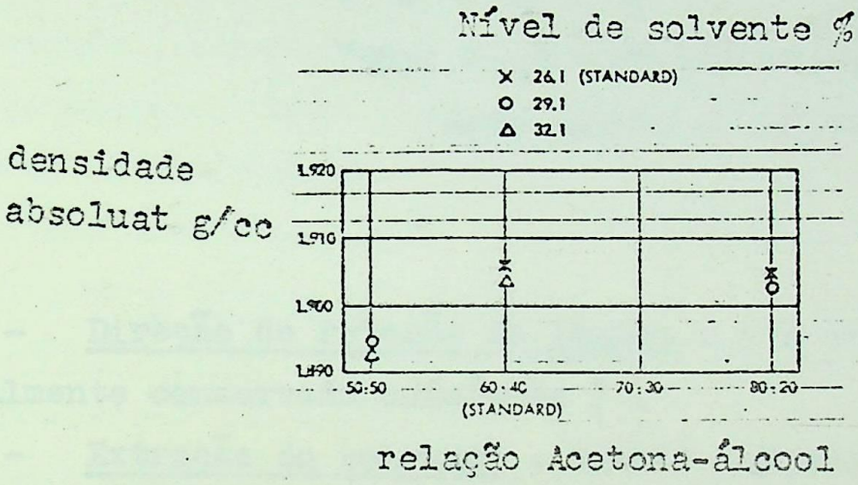


FIG 6

Em relação a nitrocelulose seca , a taxa de solvente é de aproximadamente :

Álcool - éter _____ 130 % da NC seca

Álcool - acetona_____ 80 % da NC seca

(3) - Ordem de adição dos ingredientes . É normalmente vantajoso obter-se primeiro a solvatação parcial da nitrocelulose estabelecendo-se assim uma matriz viscosa que facilita a ditribuição dos outros ingredientes .

(4) - Temperatura . A temperatura é mantida ligeiramente abaixo do ponto de ebulição do solvente para deslocar o ar sem perda excessiva do solvente .

(5) - Tempo . Um exemplo da queda de aglomerados de oxidantes sólidos em função do tempo de misturação é dada no gráfico .

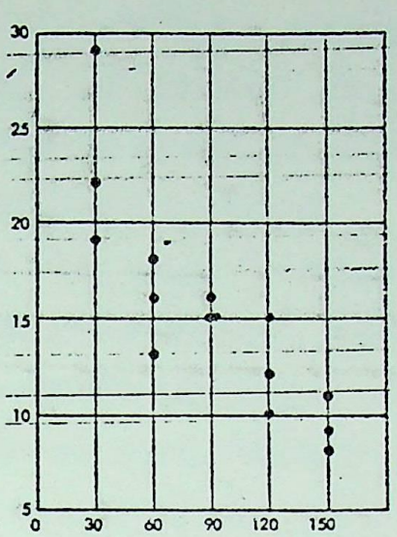


FIG 7

(6) - Direção de rotação da lâmina . (A velocidade da lâmina é normalmente conservada constante) .

(7) - Extração do solvente . Quando a massa é supersolvatada por alguma razão , a tampa do misturador é aberta e/ou ar é circulado sôbre a carga do misturador para remover excesso de solvente .

Técnicas quantitativas não são comumente usadas para caracterizar a massa no término do ciclo de misturação .

Aspecto (aparência) da mistura e avaliação manual da consistência formam as bases para determinação se a massa está macerada adequadamente e apropriada para extrusão . Alguns progressos foram feitos , contudo , no uso da pressão de teste . Nesse teste, uma porção da carga é carregada na prensa , extrudada a uma velocidade padrão , e a pressão resultante anotada . Essa técnica foi bastante bem sucedida na obtenção de uniformidade na misturação uma vez que o teste de pressão tenha sido estabelecido empiricamente para uma formulação particular .

Na operação de misturação , é norma utilizar como parte dos ingredientes estocados para tal , uma percentagem de material já macerado , como aparas da prensa , tiras defeituosas , chamado REMIX

Ao lado da óbvia vantagem econômica , o REMIX contém nitrocelulose presolvatada , promovendo uma melhor distribuição dos ingredientes na misturação e assim melhorando as propriedades mecânicas e balísticas do propelente final .

Como um passo adicional da misturação , a operação chamada "macaroni" é usada com frequência . Consiste da prensagem preliminar da massa macerada e extrusão da mesma através um conjunto de matrizes grandes ou através do porta matriz sem as matrizes . Em adição ao trabalho mecânico fornecido por essa operação , ela também serve para remover , através um filtro (tela de peneira) colocado junto ao porta matriz , alguns aglomerados de nitrocelulose que não gelatinizaram adequadamente . Os cordões de "macaroni" voltam ao misturador e são trabalhados por 10 a 20 minutos (função do teor de solvente) , ou a prensa preliminar .

II - GRANULAÇÃO - A operação de granulação se processa em 3 etapas : preparação da massa para extrusão (prensagem preliminar) , extrusão e corte .

Prensagem preliminar consiste em carregar a prensa com massa macerada (em cordões se a etapa do macaroni foi usada) e submete-la a uma pressão moderada por um tempo relativamente curto . Normalmente para pólvoras de base simples a pressão aplicada é da ordem de 240 bars durante um tempo de 30 segundos . Para pólvoras de base dupla a pressão aplicada é também da ordem de 240 bars mas por um tempo maior , da ordem de 2 minutos , e feita por controle remoto , e durante o carregamento da prensa , uma mangueira injeta gás inerte na massa (N_2) .

A prensagem preliminar é utilisada pelos Americanos mas não pelos Franceses .

Esta operação prepara a alimentação em forma adequada para o carregamento de uma segunda prensa para extrusão .

Além disso , a prensagem preliminar remove a maior parte de ar ocluso com um efeito resultante benéfico na densidade do grão base . Outros efeitos desejados, são melhorar a consolidação, solvatação e homogenização da carga .

A temperatura da prensagem preliminar é mantida no mesmo nível do da prensa de extrusão .

Uma prensa de extrusão contém uma cesta (cilindro) que encerra a massa prensada preliminarmente e um êmbolo , movimentado hidraulicamente , para prensar a massa através um conjunto de matrizes . As cestas são encamisadas para controle de temperatura e contém filtros internos (telas de peneiras) para reter aglomerados maiores .

Como o grão base é não perfurado , as matrizes são simplesmente tubos cilíndricos (buchas) com seção de aproximação cônica . As duas telas usadas como filtro são normalmente uma grossa, em torno de 16 mesh e uma fina , em torno de 40 mesh , e a pressão de extrusão varia de 125 a 200 bars para pólvoras de base simples ou dupla e da ordem de 125 a 165 bars para pólvoras de base dupla / modificada . As velocidades de extrusão são normalmente controladas por orifícios na linha hidráulica , contudo , dispositivos de deslocamento a velocidade constante são também usados .

Após a extrusão , os cordoes são coletados separadamente em recipientes adequados .

Parâmetros da extrusão tais como temperatura do cesto , velocidade de extrusão e projeto da matriz , podem ser ajustados para adaptar um tamanho de grão à uma formulação particular .

Esse é um processo empírico baseado na experiência .

Características de extrusão representam uma profunda interação entre os parâmetros de prensagem e as propriedades da massa, as últimas predominando . O que se deseja é uma produção máxima de um fio homogênio , denso e liso , dessas qualidades , lisura é talves a mais sensível às condiçoes de extrusão .

Após a extrusão , os fios (cordões) são cortados usando-se cortadeiras de pólvoras de braços curtos que contém múltiplas lâminas num disco . Diversos fios de pólvoras são cortados de uma só vez . Comprimento e perpendicularidade de corte são controlados pela sincronização do mecanismo de alimentação (tracionadores dos fios extrudados) com disco de navalhas . A qualidade do corte é muito importante , uma vez que corte desigual ou oblíquo produz extremidades ou caudas nos graõs de pólvora o que conduz a uma pobre densidade de carregamento (SLD screen loading density).

Atenção muito especial (meticulosa) deve ser dada ,portanto ao corte e ajustagem das lâminas . A plasticidade do fio / extrudado também influi no esmero do corte .

Pólvoras de base fabricadas com solvente álcool-éter são cortadas em cortadeiras rotativas e as fabricadas com solvente - acetona-álcool tanto podem ser cortadas nas cortadeiras rotativas como nas cortadeiras guilho tinas .

Um controle preciso da relação L/D é complexo uma vez que depende das contraçoes características da secagem , que normalmente são anisotrópicas . Assim , a operação de corte deve ser conduzida com total informação das mudanças dimensionais a serem experadas durante a operação de extrusão que a antecede e durante a operação de secagem que a segue . Algumas mudanças dimensionais / típicas podem ser vistas na tabela II abaixo :

TABELA II : Mudanças Dimensionais durante a granulação

	Base simples	Base dupla	Base dupla Modificada
bucha	1,245 mm	1,346 mm	1,778 mm
diâmetro do grão verde	1,041 mm	1,118 mm	1,245 mm
diâmetro do " seco	0,864 mm	0,914 mm	1,016 mm
compr. do grão verde	1,016 mm	0,914 mm	1,372 mm
compr. do grão seco	0.889 mm	0.889 mm	1.321 mm
Contração no comprim.	12,50 %	2,78 %	3,70 %
Contração no diâmetro	17.07 %	18.18 %	18.37 %

Em algumas instâncias é vantajoso terminar a granulação com uma operação de queda do grão verde , na qual a pólvora com solventes (verde) é vertida num tambor . Um ligeiro aumento na SLD (densidade de carregamento) ocorre , presumivelmente pela redução na percentagem de calda , pelo ligeiro arredondamento dos grãos .

A técnologia Americana preve o corte logo após a extrusão , sendo a oficina provida de um sistema de exaustão dos vapores de solvente . A técnologia Francesa preve uma pré-secagem dos fios antes do corte , Para a linha acetona-álcool , os fios de pólvoras são enrolados em um tambor , cortados e pendurados numa haste horizontal e vão a uma estufa com circulação de ar quente (40 a 50°C) durante 40 minutos , antes de serem cortados em cortadeiras guilhotina . Para a linha álcool-éter , os fios são recolhidos em recipientes cilíndricos, de paredes e fundo perfurados e uma forte exaustão logo abaixo dos recipientes é feita , para aspirar os vapores de solvente e secar um pouco o fio para o corte posterior nas cortadeiras rotativas . A técnologia Francesa preve para as pólvoras cortadas em cortadeiras guilhotinas uma triage feita em um separador / Alveolar .

III - SECAGEM - Uma quantidade considerável de solvente volátil é removida por evaporação durante os últimos estágios de misturação e por flasheamento nos fios (cordoes) nas operaçoes de extrusão e corte . O remanescente no grão verde deve ser removido na operação de secagem .

Pólvora de Base simples é consideràvelmente mais dificil de secar do que as de Base dupla ou de Base dupla modificada , por que mais nitrocelulose , plastificada a um grau menor , esta presente , reduzindo pois a velocidade de difusão dos voláteis .

Por essa razão , a pólvora de base simples possui uma operação de extração de solvente em meio aquoso , que consiste na permanência num banho de água quente por diversos dias .

Esse mecanismo de transferência de calor evita secagem / prematura e endurecimento da superfície do grão , promovendo assim completa difusão do solvente do interior para fora do grão .

Remoção final de solvente e água é obtida por secagem com ar quente circulante .

Mesmo com secagem vigorosa , é difícil reduzir o conteúdo total de voláteis abaixo de 1 % :

A técnologia Americana e Francesa preveem três fases para a pólvora de base simples :

a) - Recuperação de solvente (apenas o álcool-éter)

b) - Extração aquosa

c) - Secagem a ar

A recuperação de solvente é feita para as pólvoras à / álcool-éter , mediante um arraste de solvente por gás inerte aquecido, que passa num condensador a 20 ^{o}C . O carregamento do reator com a pólvora de base é feito a 35 $\pm$ 3^{o}C , o aumento de temperatura segue constante até atingir 55^{o}C em 12 horas de operação e após , esta temperatura (55 $\pm$ 3^{o}C) é mantida por um mínimo de 20 e um máximo de 50 horas , até o teor de solventes residuais ficar entre 6 e 10 % .

A extração aquosa é feita em grandes tanques com água / circulante através bombeamento e passagem num trocador de calor / controlado automáticamente . A temperatura da água deve ficar entre 60 e 70 ^{o}C durante um tempo de extração compreendido entre 15 horas e 10 dias (função da composição do propelente) . Esta operação é chamada " WATERDRY" pelos Americanos e "TREMPAGE" pelos Franceses ,e deve ir até um teor de solvente residual abaixo de 0.9 % .

A secagem a ar é feita a uma temperatura de 50 a 55^{o}C durante um tempo compreendido entre 12 e 20 horas (função da umidade e solventes residuais) . Esta operação é chamada "AIR DRY" e " ESSORAGE" respectivamente e deve terminar quando a umidade estiver abaixo de 0.2 % para BD e abaixo de 0.9 % para BS .

Para a linha acetona-álcool , em que não se recupera o solvente , a extração inicial do solvente é feita em recipientes de fundo perfurado , por onde entra o ar aquecido , e topo aberto à atmosfera , e a altura crítica de pólvora (se iniciar fogo , queima sem detonar) é de 43 cm .

Escola Federal de ... Biblio... M...

Pólvoras de base dupla e de base dupla modificada são carregadas em bandejas rasas que são empilhadas em um compartimento apropriado e levados para as oficinas de secagem onde são submetidas a um fluxo de ar quente (140° F ou 60 ° C) , por diversos dias .

Resultados de ciclo de secagem típica para grão base de base dupla são mostrados na Fig 8 .

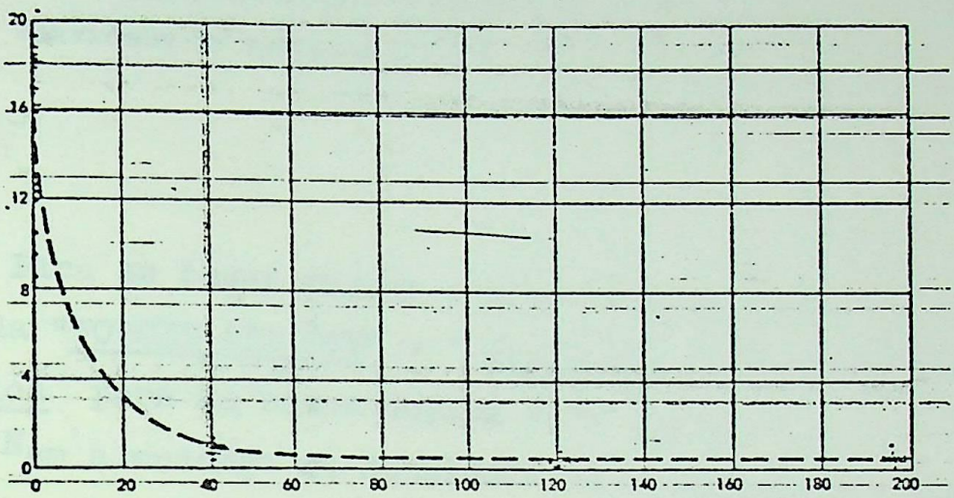


FIG 8 - Voláteis totais vs tempo de secagem.

Secagem inicial é bastante rápida ; porém , extensos ciclos são requeridos para se conseguir valores abaixo da especificação máxima , nesse caso 0,50 % de voláteis (TV) . O ciclo de secagem para BD e BDM é variável para cada tipo , mas dentro do intervalo compreendido entre 120 e 200 horas .

O equipamento parte da temperatura em que se encontra a pólvora e sofre um acréscimo de 3° C por hora , até atingir a temperatura final 60°C .

O efeito dos voláteis totais (TV) na densidade de carregamento (SLD) pode ser surpreendentemente significativo , como pode ser visto pela figura 9 para uma formulação de base dupla modificada .

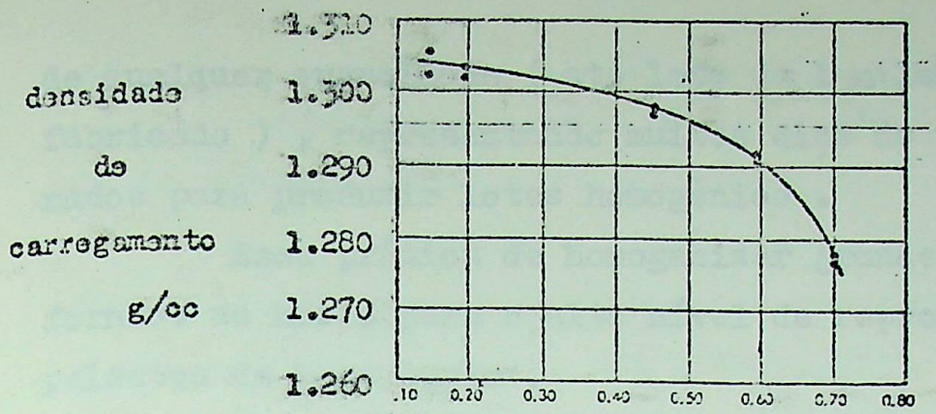


FIG 9 - Efeito da porcentagem de voláteis totais na densidade de carregamento de pólvora de base.

Para as bases duplas e bases duplas modificadas a operação é chamada "FORCED AIR DRY" e " ESSORAGE" respectivamente . A altura crítica para as bases duplas é de 2,5 cm .

Nem a mudança na densidade de carregamento (SLD) nem a correspondente mudança na densidade absoluta podem ser considerados uma mudança na composição . A mudança na densidade de carregamento possívelmente reflete uma mudança nas características de superfície que forma os grãos mais susceptíveis ao alisamento durante a subsequente grafitagem e homogenização .

IV - OPERAÇÕES FINAIS - Depois que a pólvora de base foi seca, diversas operaçoẽs são requeridas para adequá-la ao uso . A primeira é a grafitagem , que reduz a carga eletrostática que possa se acumular na massa de pólvora em movimento (atrito etc) e promove um fluxo fácil (lubrificante) . Uma pequena quantidade (0.03 % a 0.06 %) de grafite é acrescentada à pólvora num tambor giratório e distribuida à superfície dos grãos pela pequena rotação do tambor Um ciclo típico de grafitagem consiste de 2 a 3 horas numa rotação de 5 rpm . Esse processo aumenta a condutibilidade da massa de pólvora seca por um fator de quase 1 milhão .

Visto que o tambor de grafitagem nos Estados Unidos tem uma capacidade de aproximadamente 2268 Kg , a grafitagem constitui o primeiro estágio da operação de homogenização onde lotes de grão base

de qualquer quantidade (até lote de 1 milhão de libras já foi fabricado) , representando muitos dias de operação , são combinados para produzir lotes homogênios .

Essa prática de homogenizar grandes lotes de grão base fornece as bases para o alto nível de reprodutibilidade nos propelentes de Base dupla .

Menores variaçoẽs no material e nas condiçoẽs de processamento durante a fabricação do grão base compensados por essa / técnica ; Desde que as propriedades finais do propelente moldado são determinadas em maior parte pelas propriedades do grão base , a reprodutibilidade é assegurada .

O estágio de homogenização pode também ser usado para fornecer ajuste preciso nas propriedades medidas dos sub lotes .

A figura 10 mostra o efeito da homogenização de 2 sub / lotes , a velocidade de combustão resultante nesse caso reflete a influência desproporcional do sub lote de maior velocidade .

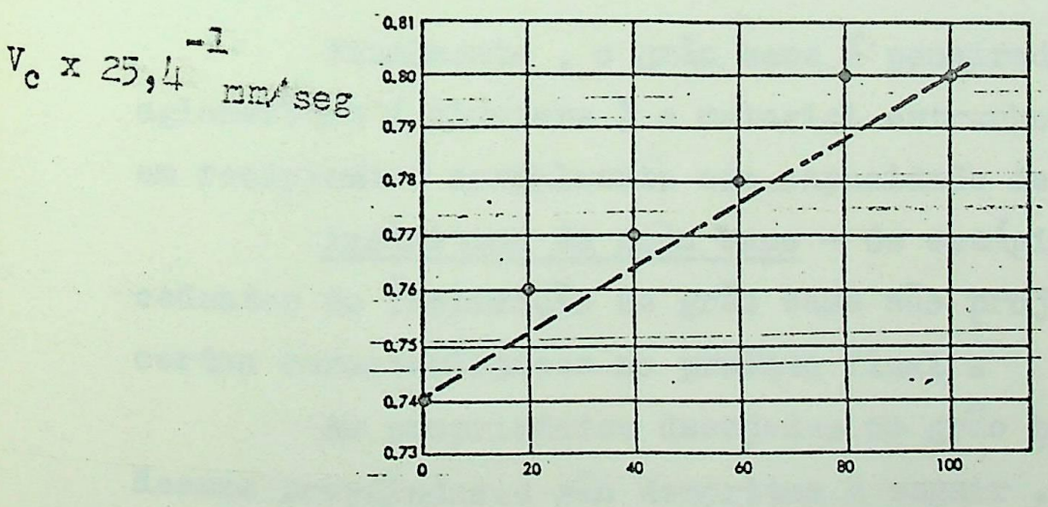


FIG 10 - Velocidade de combustão de lotes misturados

Ajustes similares nas propriedades mecânicas, densidade de carregamento , etc , são possíveis .

Um importante efeito colateral das operaçoes de grafitagem e homogenização é um aumento na densidade de carregamento (SLD) , determinável por uma lisura geral na superfície dos grãos pelo atrito . Uma representação típica é vista na Fig 11 .

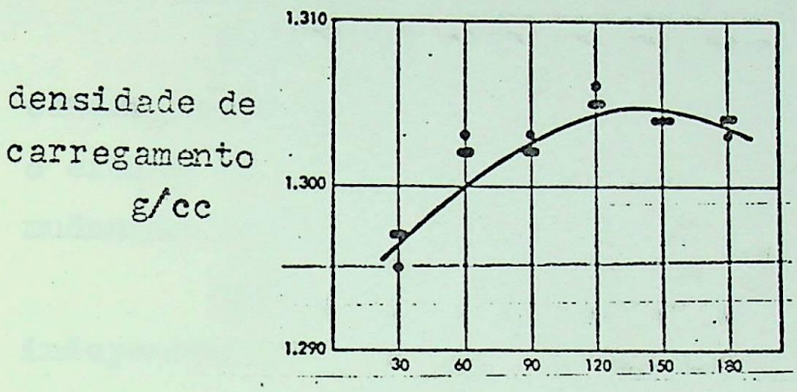


FIG 11 - Efeito do tempo de tamboreamento na densidade de carregamento

Finalmente , o grão base é peneirado para remover os aglomerados (clusters) e material estranho e então embalados em recipientes normalmente com capacidade de 68 Kg .

Parâmetros do grão base - Os estágios na descrição precedentes de fabricação de grão base são projetados para produzir certas características no produto final .

As propriedades desejadas no grão base e o significado dessas propriedades são descritas a seguir .

DENSIDADE = A densidade do grão base deveria ser a mais alta possível , normalmente maior que 97 % da teórica .

Desvios originam-se de duas fontes : vazios e voláteis .

Vazios representam ar que pode não desaparecer durante o processamento final do propelente e pode consequentemente formar buracos ou porosidades no grão .

Os efeitos balísticos resultantes podem ser severos , dependendo do projeto do motor e propriedades balísticas inerentes do propelente . As propriedades mecânicas serão também prejudicadas .

Voláteis tais como umidade e solvente de processamento estão sempre presentes em determinadas quantidades .

Sua completa eliminação por secagem é impossível . Voláteis agem como plastificantes e refrigerantes , e sua presença é levada em consideração na avaliação normal do propelente .

Quantidades em excesso , entretanto alterarão as propriedades mecânicas e características de curagem , paralelamente com o efeito de excesso de plastificante inerte . Resultarão também mudanças balísticas secundárias .

Umidade e Voláteis - Essas são medidas como quantidades independentes , principalmente como uma indicação da eficiência do processo de secagem . Possíveis efeitos indesejáveis foram mencionados . Como a nitrocelulose é ligeiramente higroscópica , os grãos de pólvoras sempre absorverão uma pequena percentagem de umidade da atmosfera (ver figura 12) . Valores normais de voláteis totais ficam no intervalo de 0,4 a 1,8 % .

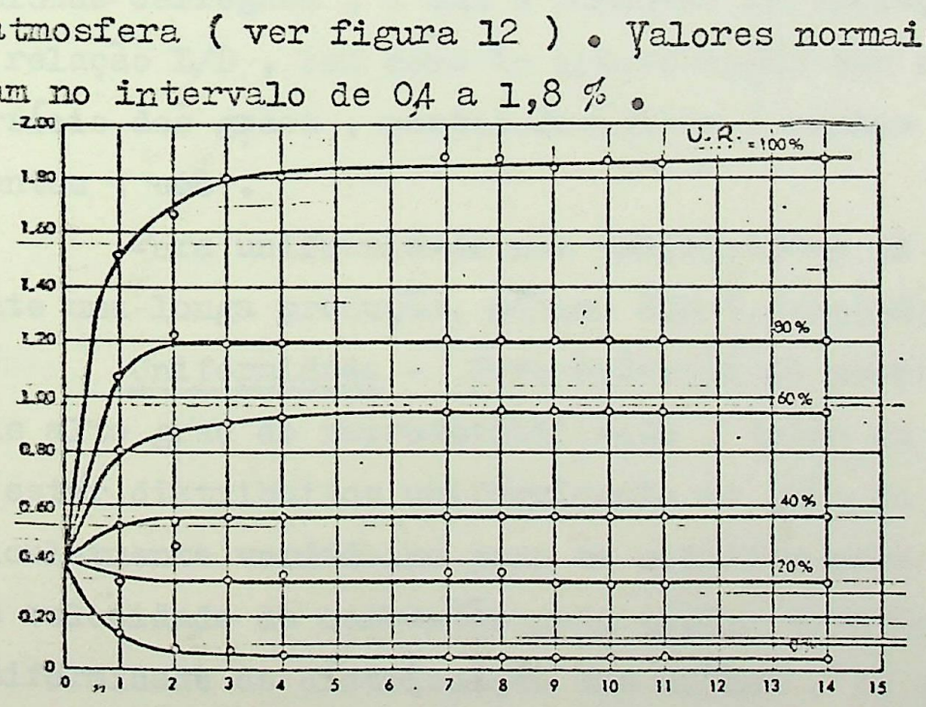


FIG 12 - Ganho de umidade ou perda da mesma nas pólvoras de base

Densidade de carregamento (SLD) . A fração de enchimento do grão base quando carregado no molde determinará a composição final pois ela controla a razão entre o grão base e o solvente de moldagem (P/S) e assim afeta diretamente todas as propriedades do

propelente . Isto é demostrado na figura 13 onde a resistência à tensão é mostrada ser uma propriedade altamente sensível .

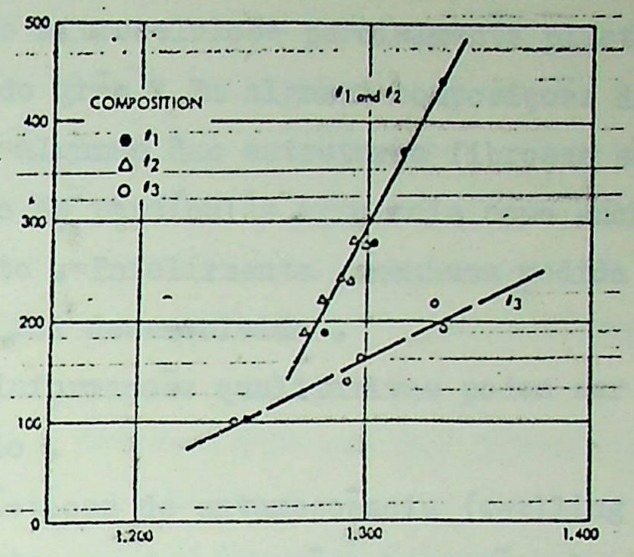


FIG 13 - Efeito da densidade de carregamento da pólvora de base na resistência à tração do propelente.

Como uma medida relativa da fração de enchimento , o parâmetro SLD é usado , referindo-se à técnicas padroes para obter valores quantitativos .

Consiste de encher um recipiente padrão com grão base mediante uma peneira padrão que age como um distribuidor e pesar a quantidade carregada . A SLD é sensível às variaçoes na densidade e na relação L/D , bem como às imperfeiçoes nas características de superfície dos grãos , cortes desiguais (caudas) , grafitagens deficientes , etc .

Para uniformidade nas propriedades do propelente final durante uma longa produção, máxima SLD é desejada .

Uniformidade - Para obtenção de propriedades ótimas e o mais alto grau de reprodutibilidade , todos os ingredientes deveriam estar distribuidos uniformimente no grão da pólvora . Isto é particularmente verdadeiro para os modificadores balísticos uma vez que a velocidade de combustão pode variar drasticamente , dependendo da uniformidade de distribuição dos mesmos . As propriedades mecâni dependem criticamente da disponibilidade da nitrocelulose para plastificação .

Além disso , é importante que uma fração significativa das fibras da nitrocelulose original estejam separadas e que uma matriz homogênea de nitrocelulose parcialmente plastificada esteja presente por todo grão . Em algumas composiçoes de alto teor de nitrocelulose , algumas das estruturas fibrosas são mantidas , e essas terminaçoes de partículas agem mais como enchimento do que como aglutinante . Infelizmente , nenhuma medida quantitativa da uniformidade foi desenvolvida .

Algumas informaçoes qualitativas podem ser obtidas por exame em microscópio .

Características de entumescência (swelling) - A velocidade e uniformidade com que os grãos base são plastificados pelo solvente de moldagem são críticos na determinação das condiçoes apropriadas de curagem e nas propriedades do propelente final .

Características de entumescência são medidas por técnica dilatométricas e microscópicas , que detalharemos mais tarde .

5 - FABRICAÇÃO DO PROPELENTE -

A fabricação do propelente moldado segue os passos descritos na figura 14 .

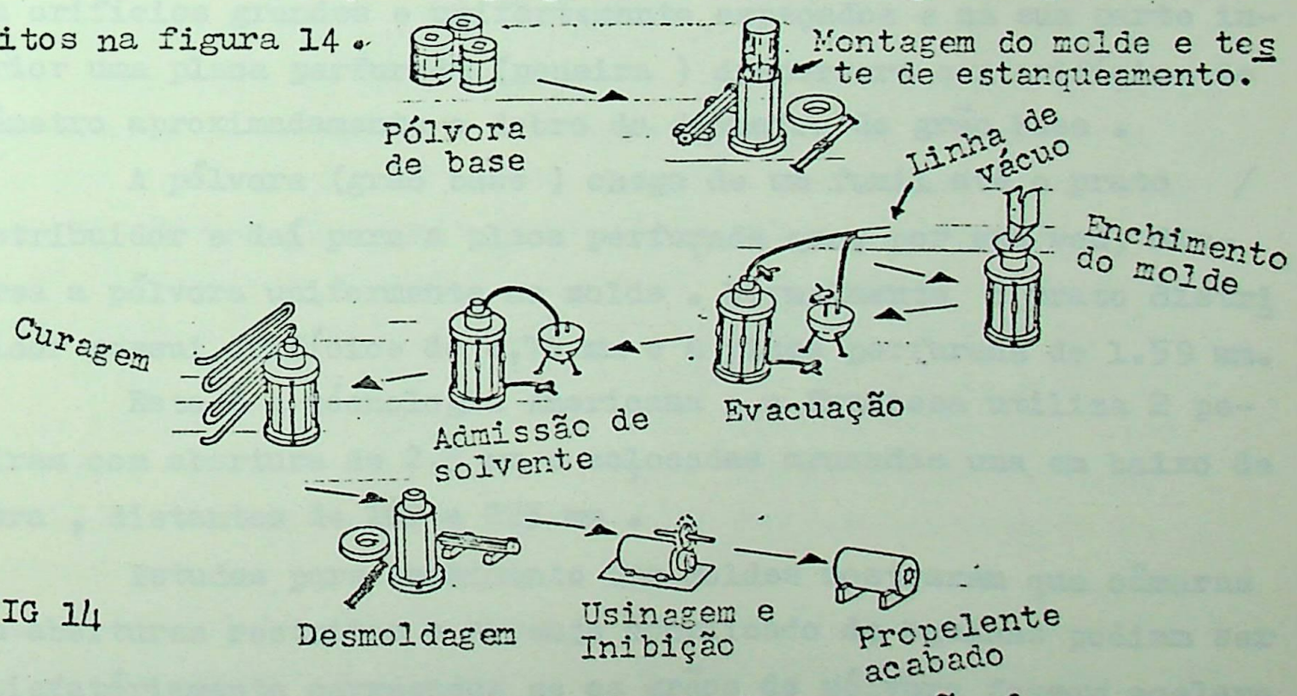


FIG 14

Enchimento do molde - A primeira operação é encher um molde ou a câmara do propulsor com o grão base . Idealmente , a técnica selecionada para o enchimento do molde é aquela que resulta na reprodutibilidade máxima da densidade de carregamento .

Simples derramamento ou verteção do grão base para / dentro do molde produz baixa densidade de acondicionamento e resulta numa muito pequena reprodutibilidade . Em unidades bem carregadas , a densidade de acondicionamento é tal que 68 % do volume do recipiente (molde) é ocupado pelo grão base . Simples derramamento do grão base no molde pode conduzir a apenas 53 % do volume .

No início do desenvolvimento do processo de moldagem , o pricípio do carregamento distribuido (screem loading) foi estabelecido .

Em essência , descobriu-se que uma "chuva" unifortemente distribuida dos grãos base caindo de 2 ou mais pés (61 cm) a uma velocidade controlada , acondicionar-se-ia num molde cilíndrico / vertical densa e uniformente .

Cargas de propelentes cilíndricos , são normalmente fabricadas pelo carregamento de moldes usando uma peneira adaptada para tal .

Esse dispositivo consiste de um tubo de mesmo diâmetro que o molde , tendo na sua parte superior um prato distribuidor com orifícios grandes e unifortemente espaçados e na sua parte inferior uma placa perfurada (peneira) dispersora com orifícios de diâmetro aproximadamente o dobro do diâmetro do grão base .

A pólvora (grão base) chega de um funil até o prato / distribuidor e daí para a placa perfurada que, por sua vez, dispersa a pólvora uniformente no molde . Normalmente o prato distribuidor possui orifícios de 4,76 mm e a placa perfurada de 1.59 mm.

Esta é a técnologia Americana ; a Francesa utiliza 2 peneiras com abertura de 2,5 mm e colocadas cruzadas uma em baixo da outra , distantes de 100 a 225 mm .

Estudos para enchimento dos moldes mostraram que câmaras com aberturas restritas e arranjo complicado de agulhas podiam ser satisfatóriamente carregados se os grãos de pólvora fossem acelerados por um fluxo de ar através tubos a velocidades relativamente / altas e então dispersados e/ou defletido na câmara segundo um ângulo apropriado .

Esse método conhecido como técnica de enchimento do molde através dispersão a ar provou ser igual ou superior ao método padrão de peneiras dispersoras. (Ver figura 15).

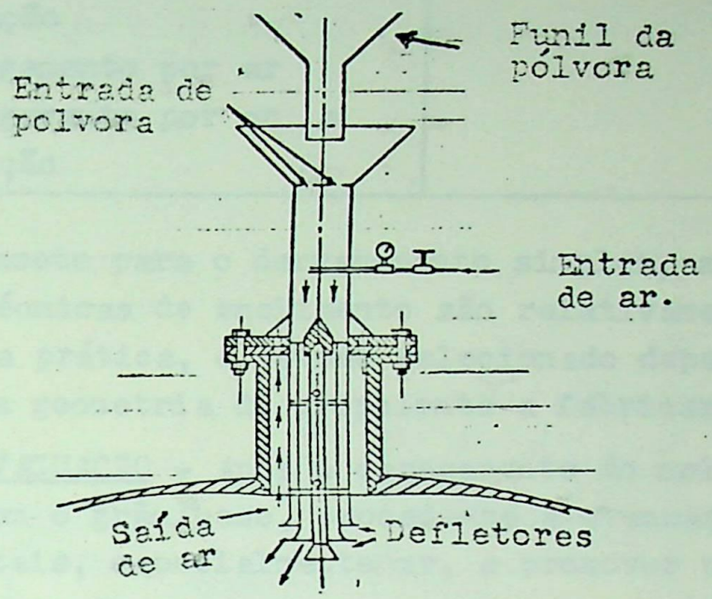


Fig. 15 - Aparelho de carregamento de pólvora em dispersão a ar

Em combinação com as técnicas acima, vibração tem sido também usada para se conseguir máxima densidade mássica no molde ou na câmara de propulsão. O leito de pólvoras é usualmente vibrado por vibradores pneumáticos montados externamente ao molde.

Resultados variáveis foram obtidos nos estudos de efetividade de vibração em unidades completas. Em alguns casos, a densidade mássica foi melhorada, em outros nenhuma melhora foi notada. Mesmo para um aparelho de enchimento do molde, a efetividade da vibração pode depender do tipo particular de grão base.

Os franceses usam martelar, com um martelo de madeira, a superfície lateral do molde, para obter uma boa acomodação da pólvora de base.

A tabela III sumariza os resultados de pesquisa em escala de laboratório dessas técnicas de carregamento do molde com grão base. TABELA III - Densidade mássica relativa pelas várias técnicas de enchimento do molde.

Método de Enchimento	% SLD padrão em Laboratório
Derramamento Simples	88.5
Peneiras Dispersoras	101.0
Peneiras Dispersoras e Vibração	101.6
Carregamento por ar	101.9
Carregamento por ar e Vibração	102.2

Exceto para o derramamento simples, as diferênças entre as várias técnicas de enchimento são relativamente pequenas.

Na prática, o método selecionado depende do tipo de grão base e da geometria do propelente a fabricar.

EVACUAÇÃO - Após o caregamento do molde ou câmara do propulsor com o grão base, procede-se a evacuação do mesmo para remover voláteis, especialmente ar, e promover uma acomodação final da pólvora.

A pressão residual é inferior a 10 mm de Hg, sendo normalmente de 2 mm Hg na fabricação de moldados nos Estados Unidos.

O período de aplicação varia de 16 a 40 horas, dependendo do tamanho do grão base. A técnologia Francesa utiliza uma pressão residual de 40 a 60 mm Hg durante um mínimo de 10 horas.

Antes da moldagem, o solvente de moldagem é normalmente evacuado num desecador por um período, função da umidade do mesmo.

Nos Estados Unidos para uma umidade de até 0.1%, o solvente é submetido a uma pressão de 5 mm Hg abs, durante 8 horas.

Para uma umidade maior geralmente a pressão é menor que 10 mm Hg abs e o tempo de aplicação superior a 16 horas. A técnologia Francesa utiliza uma pressão residual de 50 $\pm$ 10 mm Hg, durante 10 $\pm$ 0,5 horas de tratamento térmico do solvente de moldagem, aquecido pela camisa à 48 $\pm$ 2ºC.

Para aumentar a eficiência na remoção de voláteis, o solvente de moldagem é frequentemente agitado pela passagem de um pequeno fluxo de ar seco pelo fundo do desecador.

Admissão do Solvente - O estágio de admissão de solvente consiste de encher os interstícios no leito de pólvora com o solvente de moldagem, uma mistura de um óleo explosivo (normalmente nitroglicerina), um plastificante (Normalmente a triacetina) e um

estabilizante.

O solvente de moldagem pode ser introduzido no leito pelo topo do molde, pelo fundo, ou radialmente por agulhas perfuradas. Tanto admissão de solventes pelo fundo como pelo topo são usadas atualmente.

A figura 16 mostra um arranjo típico de admissão pelo fundo sob vácuo.

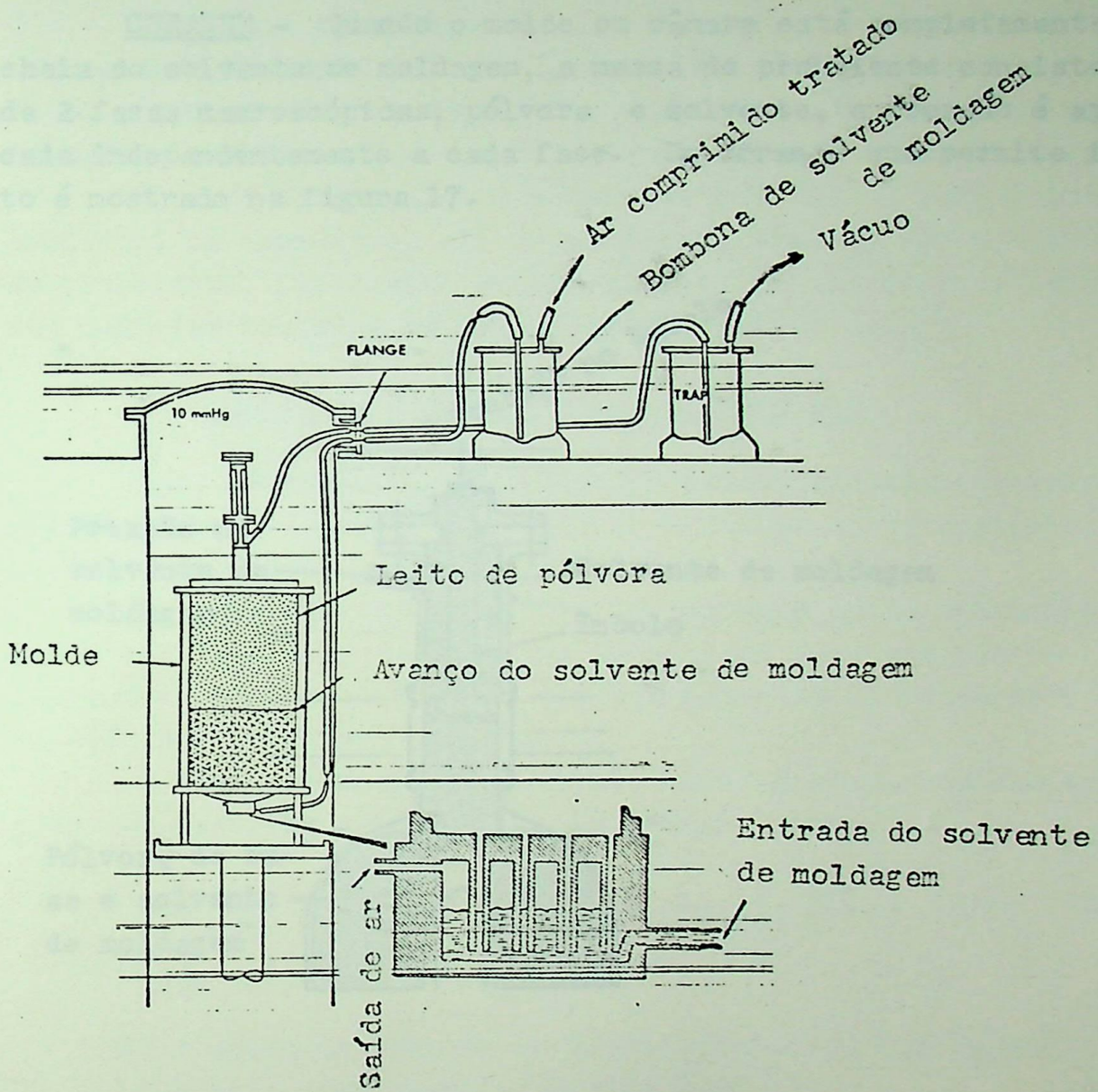


FIG 16

Aquí o solvente é forçado para cima através o leito de pólvora pela aplicação de pressão à superfície do solvente de moldagem na Bombona. Alguns tipos de grão base são mais bem moldados sob vácuo para máxima libertação das porosidades.

Entretanto unidades completas são moldadas com sucesso mantendo o leito de pólvora na pressão atmosférica.

A técnologia Americana utiliza bombona pressurizada a 1,03 bars e fazer admissão do solvente de moldagem pelo topo, nos moldes à pressão atmosférica. Os Franceses admitem o solvente de moldagem pelo fundo, com pressurização da bombona a 0,5 Kg/cm^2 e vácuo no topo do molde (40 a 60 mm Hg)

CURAGEM - Quando o molde ou câmara está completamente cheia do solvente de moldagem, a massa do propelente consiste de 2 fases macroscópicas, pólvora e solvente, e pressão é aplicada independentemente a cada fase. Um arranjo que permite isto é mostrado na figura 17.

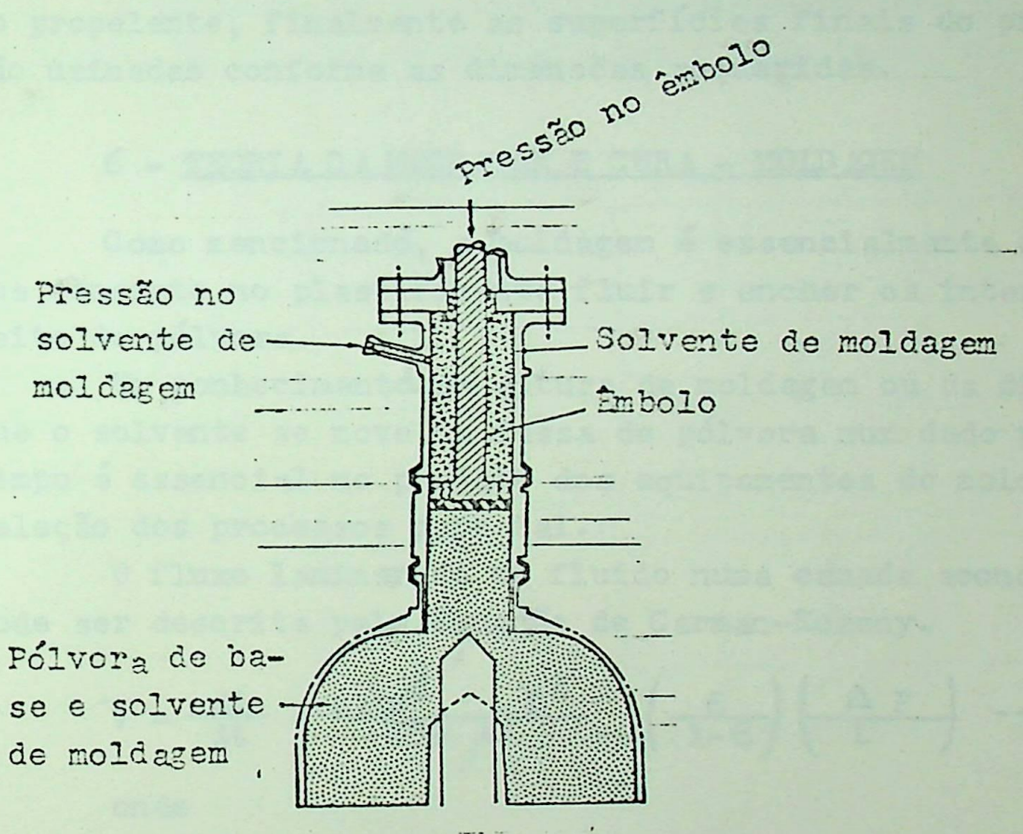


Fig. 17

Na câmara mostrada na figura 17, um êmbolo aplica pressão no leito através uma coluna de pólvora que se prolonga através uma ou mais aberturas da câmara. Perfurações na face do êmbolo permite que pressão hidráulica seja aplicada ao solvente de mol-

dagem independentemente durante os primeiros estágios da cura.

Pressões de solvente até 4 bar e pressões de êmbolo até 13 bar tem sido usadas durante a cura.

Frequentemente, o processo de cura é executado durante 2 períodos distintos: um período de descanço nas condições ambientes no qual a unidade é simplesmente estocada durante um ou mais dias a 27ºC, e um segundo período numa estufa de cura a 50º - 60º, por longo período.

Após diversos dias a 2 semanas na elevada temperatura de cura, o propelente foi convertido numa massa macroscópicamente homogênea por difusão mútua da nitrocelulose e plastificante.

A carga de propelente é deixada resfriar à temperatura ambiente, os conjuntos, são desmontados, agulhas são extraídas do propelente, finalmente as superfícies finais do propelente são usinadas conforme as dimensões requeridas.

6 - TEORIA DA MOLDAGEM E CURA - MOLDAGEM

Como mencionado, a moldagem é essencialmente o processo que consiste no plastificante fluir e encher os interstícios do leito de pólvora.

Um conhecimento da altura de moldagem ou da distância que o solvente se move na massa de pólvora num dado período de tempo é essencial no projeto dos equipamentos de moldagem e na seleção dos processos para tal.

O fluxo laminar de um fluido numa camada acondicionada pode ser descrita pela Equação de Carman-Kozeny.

$$\overline{V} = \frac{dL}{dt} = \frac{g \cdot \psi^2}{180\,\mu} \cdot D^2 \left(\frac{\epsilon}{1-\epsilon}\right)\left(\frac{\Delta P}{L}\right) \quad \text{------ (1)}$$

onde

ΔP = queda de pressão no leito (mínimo de 0.1 Kg/cm^2)
L = comprimento do leito (até 2.80 m)
ϵ = fração volumétrica de vazios no leito (0.32 a 0.39)
μ = viscosidade do fluído (8 a 30 cp)
$\overline{V}$ = velocidade média do pelo leito (8 a 13 cm/min)
ψ = fator de forma do grão
g = constante gravitacional (9.81 m/seg^2)
t = tempo (7 a 25 min)

D = diâmetro dos grãos (0.8 a 0.95 mm)

ψ = 4.87 x (volume do grão) $^{2/3}$ ÷ (superfície do grão)

Aplicando essa equação na moldagem de uma carga de propelente, lembre-se que tanto as características do leito como do fluído estão mudando com o tempo. Quando o solvente de moldagem e a pólvora (grão base) são colocados em contato, inicia-se a cura, os grãos se entumescem (dilatam) e a viscosidade aumenta devido a nitrocelulose começar a se dissolver no solvente de moldagem. Durante o tempo requerido para moldagem (normalmente menor que 1 hora), os grãos de pólvora mudam muito pouco de tamanho, entretanto mesmo pequenas mudanças podem causar mudanças relativamente grandes em ϵ , fração de vazio no leito.

A viscosidade do solvente de moldagem pode quadruplicar em apenas 20 minutos de contato com o grão base (ver fig. 18).

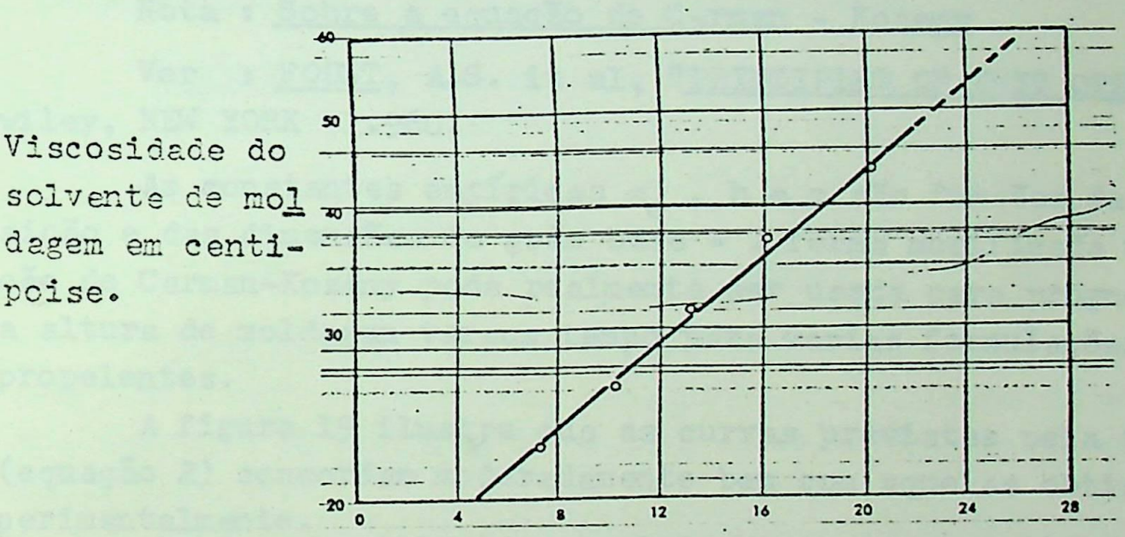


FIG 18 - Viscosidade do solvente de moldagem durante a admissão a 25ºC.

Por substituições empíricas de expressões em função do tempo por $(\epsilon/1-\epsilon)^2$ e μ, é possível se chegar a uma forma integrada da equação Carman-Kozeny que é aplicável na moldagem

de uma carga de propelente:

$$L = 277\ D\ \psi \sqrt{\frac{\Delta P \cdot a_o}{\mu_o \cdot (b-m)} \left(e^{(b-m)t} - 1 \right)} \qquad \text{--------- 2}$$

onde

a_o , b = constantes de entumescimento do grão base determinadas empíricamente.

$a_o \approx 1.47 \times 10^{-7}$

$b - m \approx 2.56 \times 10^{-3}$ seg $^{-1}$

μ_o = viscosidade inicial do solvente de moldagem

m = constante empírica na expressão viscosidade versus tempo de contato.

Nota : Sobre a equação de Carman - Kozeny

Ver : FOUST, A.S. it al, "PRINCIPLES OF UNIT OPERATIONS", wiley, NEW YORK 1.960.

As constantes empíricas a_o , b e m são funções da composição e das dimensões do grão base - A forma modificada da equação de Carman-Kozeny pode realmente ser usada para prognosticar a altura de moldagem versus tempo para varias formulações de propelentes.

A figura 19 ilustra que as curvas previstas pela teoria (equação 2) concordam moderadamente bem com aquelas obtidas experimentalmente.

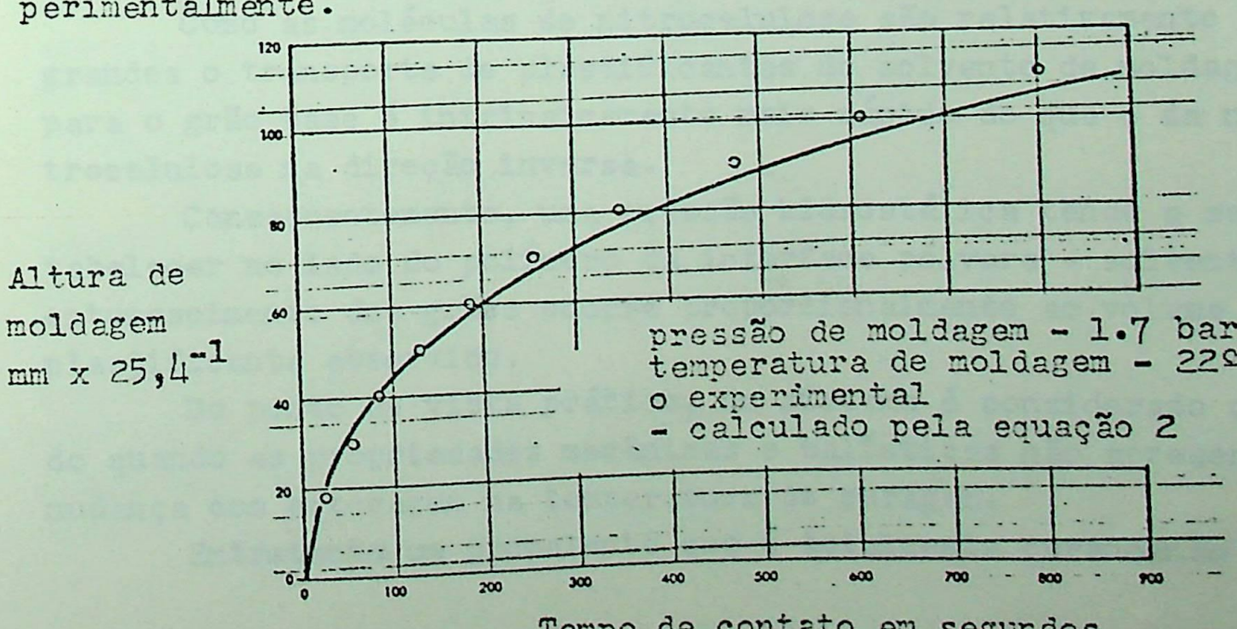


FIG 19 - Alturas de moldagem

Atualmente, a concordância é virtualmente melhor se a equação usada ignora a dependência de tempo de ϵ e considera sómente a mudança de viscosidade com o tempo usando μ e m.

No momento, há duas aproximações práticas no projeto de equipamentos de moldagem e procedimento para propelentes de características não familiarizadas. Uma medindo diretamente a altura de moldagem contra o tempo num longo cilindro de moldagem experimental; outra determinando a viscosidade do solvente como uma função do tempo de contato e usada em conjunto com a equação modificada de Carman - Kozeny.

Até recentemente, a primeira aproximação foi usada exclusivamente.

No futuro, a última aproximação encontrará aplicação porque pode fornecer informações complementares.

CURAGEM = O processo de curagem de um propelente de base dupla converte um leito de grãos de pólvora cujos interstícios são enchidos com o solvente de moldagem numa massa de propelente macroscópicamente homogênia. É conveniente discutir a teoria da cura em microescala separadamente.

MICROESCALA - Quando o grão base é colocado em contato com o solvente de moldagem, o aglutinante polímero do grão base e o solvente de moldagem começam a se dissolver um no outro por mútua difusão.

Como as moléculas de nitrocelulose são relativamente grandes o transporte de plastificantes do solvente de moldagem para o grão base é intrinsicamente mais rápido do que o da nitrocelulose na direção inversa.

Consequentemente, uma pressão hidrostática tende a se estabelecer no lado do polímero da interface pólvora - solvente e entumescimento dos grãos ocorre proporcionalmente ao volume de plastificante absorvido.

Do ponto de vista prático, um sistema é considerado curado quando as propriedades mecânicas e balísticas não apresentam mudança com estocagem na temperatura de curagem.

Entretanto um propelente que é totalmente curado não

apresenta uma distribuição perfeitamente homogênea dos ingredientes.

Transparências radiográfica (raios X) brandas de finas fatias de propelentes indicaram que a concentração relativa de sólidos pode ser aproximadamente 40 % menor nos contornos do grão do que no centro em produção de propelentes bem curados.

Autoradiografia de propelente curado fabricado com plastificante irradiado (carbono 14), mostra que a relação plastificante - NC pode ser desigual, 10 % maior nos interstícios do que nos centro dos grãos.

Uma análise matemática tridimencional de difusão num sistema de base dupla moldado e curado não foi ainda desenvolvido. Entretanto, a teoria geral da difusão estabelece uma relação entre o tempo de cura e as dimensões do grão.

Nos primórdios da curagem, os tempos equivalentes de cura para uma dada composição podiam ser calculados como sendo proporcional ao quadrado do diâmetro do grão (de propelente).

Esse método simples parece ser de aproximação adequada, mesmo para propelentes completamentes curados.

Os coeficientes de difusão da nitroglicerina e triacetina no propelente de base dupla foram medidos no intervalo 25ºC a 60ºC. Energias de ativação para a difusão variam de 10 a 13 Kcal/mol. Assim, as velocidades de curagem para uma dada composição de propelente podem ser consideradas aproximadamente dobradas na mudança de 49ºC para 60ºC.

MACROESCALA - Imediatamente após a moldagem (admissão de solvente), uma carga de propelente consiste de 2 fases em escala macroscópica: uma fase sólida descontínua de grãos base em contacto, e uma fase fluida contínua entrelaçada de solvente de moldagem.

Durante esse estágio de cura o comportamento mecânico e reológico da carga de propelente é aquela do meio poroso, como solo ou cascalho molhados. Depois desse estágio o propelente entra num estágio de precura durante o qual ele pode ser considerado quase contínuo; os grãos base foram acentuadamente amolecidos e os interstícios estão atingindo a viscosidade dos grãos amolecidos. Finalmente, as propriedades mecânicas macroscópicas não apresentam mudanças, e o propelente entrou no

estágio curado.

No passado, as especificações para fabricação de propelentes moldados de base dupla foram selecionados com base na experiência e na tentativa. Se defeitos no propelentes tais como fissuras, separações, porosidade ou manchas fossem encontradas nos primeiros estágios de um programa de desenvolvimento de motores, parâmetros do processo (pressão no solvente e no êmbolo, períodos de acomodação ambiental etc), eram variados até que fossem produzidas consistentemente cargas sem defeitos.

Durante os últimos anos, um modelo matemático de moldagem e curagem de propelente de base dupla tem sido desenvolvido para colocar o processo em bases de investigações científicas. O modelo matemático tenta descrever as deformações e tensões num grão de propelente durante todos os estágios de sua fabricação. Em princípio, deformações e tensões calculadas com o auxílio do modelo juntamente com úteis dados de insucesso, ou critérios defeituosos permitiram o prognóstico da integridade do grão durante o processo integral. Tais cálculos forneceriam um guia direto na especificação de condições ótimas de fabricação de grão sem defeitos.

Métodos estabelecidos para a análise estrutural de propelentes curados podem ser aplicados ao estágio precurado, fornecendo as propriedades do material durante os últimos estágios de curagem. Recentemente, um enfoque de análise estrutural foi desenvolvido para a fase após a admissão do solvente, quando o propelente está em 2 fases, uma mistura pólvora-solvente. Uma vez que a teoria da viscoelasticidade linear não é suficiente geral para predizer o efeito do solvente e pressão no êmbolo, a teoria de BIOT do meio poroso foi usada.

Para manipular a geometria complexa de um grão de propelente sólido, a teoria do meio poroso foi combinada com um programa de elemento finito no computador para a análise de tensão de propelentes curados.

O modelo matemático usado não incluiu os efeitos da viscoelasticidade ou deformações irreversíveis. Para prever a integridade mecânica de qualquer corpo, 3 coisas devem ser conhecidas adicionalmente a uma técnica analítica adequada.

1 - As cargas sustentada pelo corpo

2 - As propriedades mecânicas do sistema

3 - Uma definição útil de falha (perda de integridade).

As cargas no propelente são geralmente conhecidas e registradas como variáveis do processo (pressões), ou podem ser calculadas da temperatura e propriedades mecânicas e térmicas do sistema.

Até recentemente, as propriedades mecânicas desejadas e os critérios de falha não foram identificados para um propelente durante o final da admissão de solvente ou estágio de precuragem.

7 - Propriedades dos Materiais

A forma elementar de análise usada requer as seguintes propriedades do propelente durante a curagem:

Módulo de elasticidade, módulo efetivo de carga e variação de volume do propelente.

Cada uma dessas propriedades varia com a temperatura e o tempo decorrido desde a moldagem. Por causa da natureza do material (grudento, molhado, explosivo), testes especiais, equipamentos, e técnicas foram desenvolvidas para essas medidas.

Um modelo especial para teste de rutura por tração foi feito para medir propriedades elásticas do propelente durante a curagem.

Uma moldagem em miniatura é feita num molde em forma de halteres (DUMBBELL SHAPED). A seção reta do molde é rompida axialmente de maneira que possa ser exposto o propelente parcialmente curado.

O molde é colocado num teste de tração, e o espécime é tracionado pelas extremidades.

A figura 20 mostra que durante o início da cura o propelente possui sómente uma pequena fração da resistência do material totalmente curado.

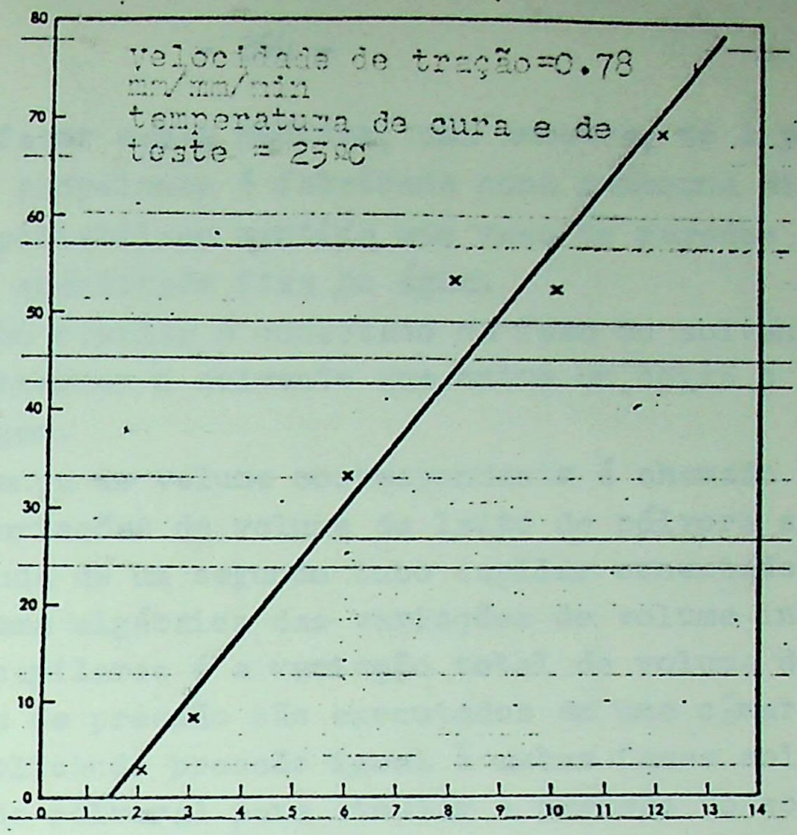


FIG 20

Uma amostra totalmente curada do mesmo propelente produziria uma resistência à tração de 7,5 bar, na velocidade de elongação indicada.

O módulo efetivo de carga e as mudanças de volume durante a cura são determinados num duplo dilatômetro (aparelho para medir o grau de dilatação) especialmente projetado.

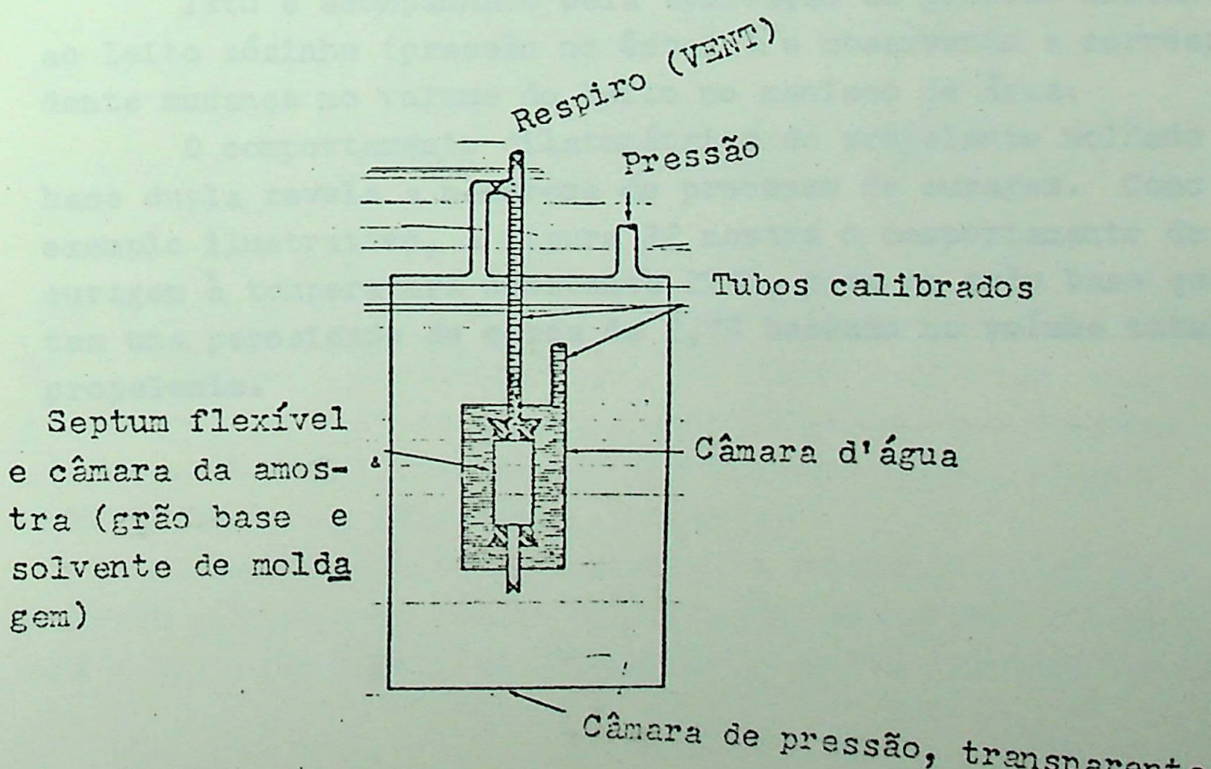


FIG 21

Para fazer essas medidas, uma amostra, de 1 polegada de diâmetro, do propelente é fabricada numa membrana divisória flexível de polietileno mantida num vaso de paredes rígidas contendo uma quantidade fixa de água.

Um tubo capilar é conectado na fase do solvente de moldagem para observar o solvente que entra ou deixa o leito durante a curagem.

A mudança de volume correspondente é chamado absorção do leito. Variações de volume do leito de pólvora são observados com a ajuda de um segundo tubo capilar conectado na fase aquosa. A soma algébrica das variações de volume indicadas por esses 2 capilares é a variação total de volume do sistema.

Testes de pressão são executados em uma câmara externa de pressão aplicando pressão igual à ambas fases solvente e água (leito de pólvora) para simular a pressão do solvente numa moldagem: Pressão no êmbolo é simulada pela aplicação de uma pressão diferencial positiva através da membrana divisória que atua no leito da pólvora.

Assim, a variação de volume do leito, absorção do leito, e a variação de volume total podem ser seguidas durante a cura, como uma função do tempo, temperatura, pressão do solvente, e pressão do êmbolo. Êsse mesmo aparelho permite avaliações a serem feitas na chamada compressibilidade da camisa (o recíproco do módulo de carga efetivo) durante o início da curagem.

Isto é acompanhado pela aplicação de pressão instantânea ao leito sózinho (pressão no êmbolo) e observando a correspondente mudança no volume do leito no menisco de água.

O comportamento dilatométrico do propelente moldado de base dupla revela a natureza do processo de curagem. Como um exemplo ilustrativo, a figura 22 mostra o comportamento da curagem à temperatura constante 27ºC, para um grão base que tem uma porosidade de cerca de 2,7% baseado no volume total do propelente.

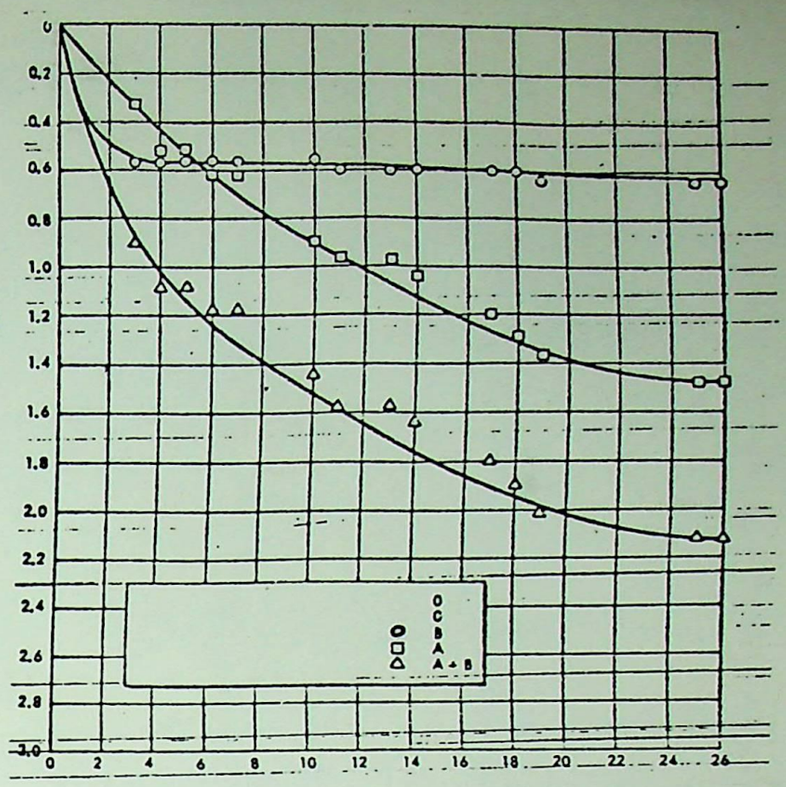


FIG 22

Quando uma plotagem da variação máxima do volume total versus percentagens teórica da densidade do grão base é extrapolada para 100% da densidade teórica, a variação do volume total é usualmente menor que 0.1%.

Assim, durante a curagem de um propelente de base dupla, a variação de volume causada simplesmente pela mistura de polímero e solvente é pequena.

A variação do volume total registrada na figura 22 pode ser atribuida amplamente ao enchimento dos poros dos grãos base.

Embora a pressão nominal no êmbolo seja zero, a pressão média real no leito é de cerca de 0.069 bars devido a tensões na membrana divisória. Contudo, é suficiente para diminuir o volume do leito de 1.4% aproximadamente.

A sensibilidade de variação de volume do leito para pressão aplicada no êmbolo é ilustrada pela figura 23 que mostra a variação máxima de volume do leito (no tempo infinito)

em função da pressão no êmbolo.

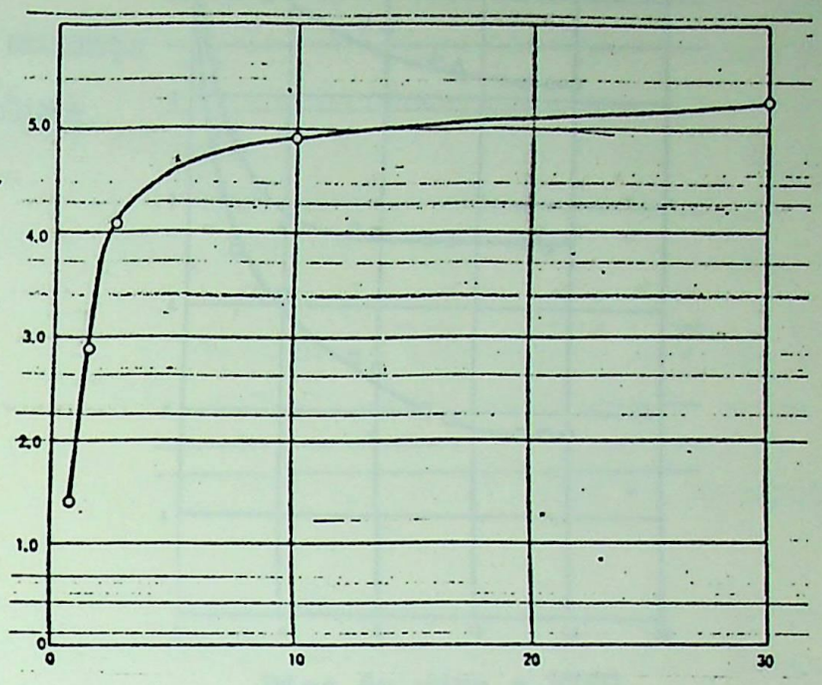


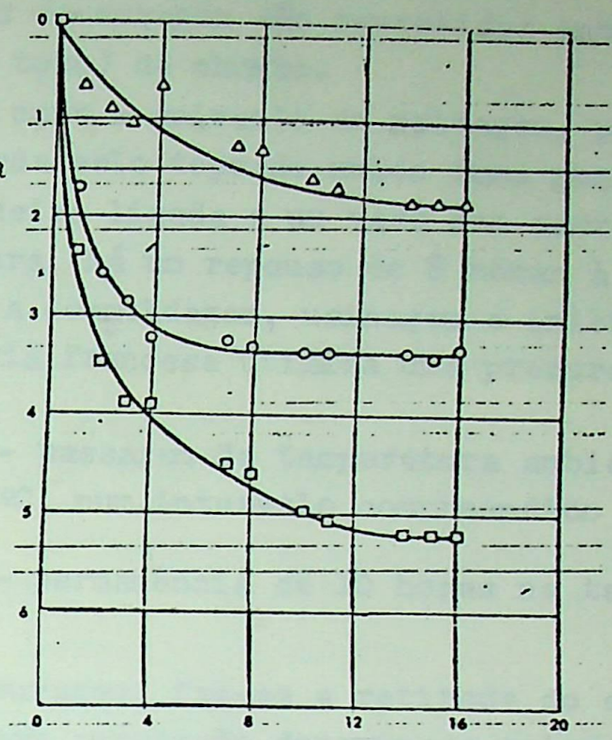
FIG 23

A figura 23 mostra que a mudança relativamente grande do volume do leito observada para 30 psig de pressão no êmbolo considera o solvente comprimido no leito e a mudança do volume total é normalmente muito menor que a mudança de volume do leito.

A primeira vista os resultados podiam insinuar que enormes percursos de êmbolo seriam observados usando 2 bar ou mais de pressão de êmbolo na cura. Tal não é o caso.

Durante os primeiros estágios da cura, a pressão no êmbolo é rápidamente dissipada a uma distância relativamente curta do fim da face do êmbolo.

Consequentemente, compactação do leito de



pólvora devido a pressão no êmbolo é confinada às vizinhanças da face do êmbolo, i e, na coluna de pólvora e apenas dentro do motor. Em alguns motores isto pode produzir um conjunto de propriedades desejáveis na vizinhança da coluna de pólvora.

Em outros motores tais compactações localizadas pelo êmbolo seriam prejudiciais.

MODELO MATEMÁTICO - Esfôrços iniciais foram feitos para aplicar as menos sofisticadas formas de modelo matemático de processos de cura a alguns problemas atuais.

Assim sendo, os resultados serviriam apenas para fornecer um guia qualitativo na seleção de processos variados para um número limitado de novos programas de desenvolvimento de motor. Experiência suficiente com o uso de modelo matemático não tem ainda sido acumulada para fornecer verificações quantitativa de sua validade.

A técnologia americana preve um tempo de curagem para propelentes de pequeno porte, de 96 ± 2 horas a uma temperatu-

ra de 64 ± 1ºC.

As estufas de curagem são revestidas internamente (paredes, chão e teto) de chumbo.

Durante a cura o solvente de moldagem, por aumento de pressão, transborda pelo topo do molde (uma pequena fração), através uma mangueira ligada a um vaso com serragem no interior. Após a cura, há um repouso de 8 horas à temperatura ambiente, depois a desmoldagem, usinagem e inibição.

A técnologia francesa utiliza uma precuragem, constituindo de :

- passagem da temperatura ambiente a uma temperatura de 40ºC, num intervalo compreendido entre 7 e 10 horas.
- permanência de 10 horas na temperatura 40 a 45ºC.

Após a precuragem, faz-se a retirada do excesso de solvente de moldagem, operação denominada pelos franceses de "GIFFARDAGE".

Colocam-se após as placas de aperto no bloco e leva-se para a curagem que consiste numa permanência de 96 ± 24 horas a uma temperatura de 60 a 65ºC.

Após a cura há um repouso de 24 horas na temperatura ambiente e após as operações de desmoldagem, usinagem e inibição. A usinagem compreende operações de serragem e tornea mento e a inibição poderá ser sómente na superfície cilíndri ca externa ou também nas faces terminais (completa ou apenas uma coroa de inibição).

Referência Bibliográfica

AUTOR - LIVRO - EDITORA

1 - Claude Napoly - Mémorial des Poudres - Imprimerie Nationale.

2 - J. Darmois - Propulsion 1ére Partie - poudres propulsives École Nationale Supérieure de Techniques Avancées.

3 - J. Boisson - La propulsion par fusée tome I et II - École Nationale Supérieure de Techniques Avancées.

4 - J. Quinchon - La fabrication et les propriétés des substances explosives 1ère et 2ème partie - École Nationale Supérieure de Techniques Avancées.

5 - A. M. Ball - Solid propellants part one - AMCP 706-175

6 - R. Steinberger and P.D. Drechsel - Manufacture of cast Double-base propellant - Hercules, Inc.

7 - Stanley F. Sarner - Propellant Chemistry - Reinhold Publishing Corporation.

8 - George P. Sutton - Rocket Propulsion Elements - John Wiley & Sons.

9 - Propellants Manufacture, Hazards, and Testing - Advances in Chemistry series 88.

10 - Advanced Propellant Chemistry - Advances in Chemistry Series 54.

11 - P. Tavernier, J. Boisson et B. Crampel - Propergols Hautement Energétiques - North Atlantic Treaty Organization. (AGARD-AG- 141-70)

12 - JANAF Thermochemical Tables, second Edition - NSRDS - NBS 37 - July 1970.

13 - Michel Caire-Maurisier - La nitroglycérine dans les propergols - Thèse à l'université de Bordeaux I.

14 - J. Quinchon - La fabrication et les propriétes des substances explosives, troisième partie - les propergols - École Nationale Supérieure de Techniques Avancées.

15 - J. Perry - Chemical Engineers Handbook - McGraw-Hill

16 - Lange's Handbook of Chemistry - McGraw-Hill

17 - M. R. Spiegel - Mathematical Handbook - Schaum's Outline Series

18 - Paul Tavernier - Mémorial des Poudres - Imprimerie Nationale

19 - D. Quentin - Mémorial des Poudres - Imprimerie Nationale

20 - Rudolf Meyer - Explosivstoffe - Verlag Chemie 3. Auflage

21 - Sebastian Perez Cruzells - Estudio de Propulsores Solidos para Cohetes - Madrid España

22 - Williams, Barrere, Huang - Fundamental Aspects of Solid Propellant Rockets - Agardograph 116

23 - Hill. Peterson - Mechanics and Thermodynamics of Propulsion - Addison Wesley P.C., Inc.

24 - T. L. Davis - The Chemistry of Powder and Explosives, Wiley, New York, 1943.

25 - L. Vennin, E. Burlot and H. Lécorché, Les poudres et explosifs, Béranger, Paris-Liège, 1932.

26 - R. Brun and Rotouis, Mém. poudres 36, 163 (1954).

27 - D. R. Cameron, Encyclopedia of Chemical Technology, Ed R. E. Kirk and D.F. Othmer, Vol. 6, Interscience, New York, 1951.

28 - Chemical & Engineering News 41, No. 8 (February 25) 29 (1963).

29 - 20 th Meeting Bulletin, Joint-Army-Navy-Force-ARPA-NASA Panel on Physical Properties of Solid Propellants, 1961, Riverside, California, Vol. I and II, John's Hopkins University, 1963.

30 - R. Steinberger, Preparation and properties of double base propellants, in The Chemistry of Propellants, AGARD Panel, Paris; 1959 (Ed. S.S. PENNER and J. DUCARME), Pergamon Press, Oxford, 1960.

31 - H. Grosse in The Chemistry of Propellants, AGARD Panel, Paris, 1951 (Ed. S.S. PENNER and J. DUCARME), p. 303, Pergamon Press, Oxford, 1960.

32 - J. Taylor, Solid Propellants and Exothermic Compositions, Newnes, London, 1959.

33 - F. A. Warren, Rocket Propellants, Reinhold, New York, 1958.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUA
Itajubá

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200207
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA