

Visto

NOTA DEZ(10)

PMC-500

TRABALHO DE FORMATURA

SISTEMA PNEUMÁTICO DE DRAGAGEM E TRANSPORTE

MARCELO TURRIN
Nº USP 5107760

ORIENTADOR:
Prof. Dr. EDMUNDO KOELLE

1979

Meus agradecimentos ao Prof. Dr. Edmundo Koelle pela sugestão do tema para este trabalho bem como pela orientação e incentivo ao longo do mesmo.

Sinceros agradecimentos ao Prof. Walter Francisco Arruda Alves pelo inestimável auxílio nos trabalhos de computação.

INDICE

	Pág.
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - APRESENTAÇÃO DO SISTEMA	2
CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA	4
CAPÍTULO 4 - DESCRIÇÃO DO CICLO DE OPERAÇÃO DOS CILINDROS DA BOMBA	6
CAPÍTULO 5 - VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO SISTEMA	10
CAPÍTULO 6 - CAMPOS DE APLICAÇÃO DO SISTEMA.	12
CAPÍTULO 7 - MODELO FÍSICO	32
CAPÍTULO 8 - MODELO MATEMÁTICO E EQUACIONAMENTO	35
CAPÍTULO 9 - MÉTODO NUMÉRICO PARA SOLUÇÃO	53
CAPÍTULO 10 - INTERPRETAÇÃO DOS FENÔMENOS QUE OCORREM NAS DIVERSAS FASES DO CICLO DE FUNCIONA MENTO DOS CILINDROS DA BOMBA	55
CAPÍTULO 11 - CONCLUSÕES	68
CAPÍTULO 12 - GENERALIZAÇÃO - REPETIBILIDADE DOS CICLOS .	70

BIBLIOGRAFIA

A - MECÂNICA DOS FLUÍDOS

- (A.1) - STREETER, V.L. - "Fluid Mechanics"
6a. ed. McGraw - Hill Book Co, 1975
- (A.2) - VIEIRA, R.C.C. - "Atlas de Mecânica dos Fluídos"
Ed. Edgard Blücher Ltda., 1971
- (A.3) - AZEVEDO NETO, J.M. - "Manual de Hidráulica" Vol 1
- ALVAREZ, G.A. 6a. Ed. Edgard Blücher Ltda., 1973

B - TERMODINÂMICA - TRANSMISSÃO DE CALOR

- (B.1) - VAN WYLEN, G.J. - "Fundamentos da Termodinâmica Clássica"
SONNTAG, R.E. 2a. Ed. trad., Ed. Edgard Blücher
Ltda., 1976
- (B.2) - SHAPIRO, A.H. - "The Dynamics and Thermodynamics of
Compressible Fluid Flow", Vol. 1,
Ronald Press, New York, 1953
- (B.3) - ÖZISIK, M.N. - "Basic Heat Transfer"
McGraw Hill, Inc., 1977

C - MANUAIS

- (C.1) - ATLAS COPCO - "Manual do Ar Comprimido"
Ed. McGraw Hill
- (C.2) - "PNEUMA SYSTEM" - Pneuma SpA
- (C.3) - "FUGAZI, K." - "CSMP73 Continuous System Modeling
Program for the B6700
Davis Computer Center, University
of California, August 1973.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho constitui-se na apresentação de um sistema pneumático de aplicação nos campos de dragagem e bombeamento de misturas com diversas porcentagens de sólidos em volume.

É ainda escopo deste trabalho a descrição e estudo dos componentes do sistema, seu ciclo e modos de operação, bem como uma descrição das vantagens e campos de sua utilização.

2. APRESENTAÇÃO DO SISTEMA

O sistema foi desenvolvido para atender especificamente aos seguintes requisitos:

- Máxima versatilidade
- Arranjo compacto
- Utilização simples
- Baixo custo de operação
- Mínimo custo de manutenção
- Ausência de peças ou mecanismos sujeitos ao desgaste
- Possibilidade de operação com elevada porcentagem de partículas sólidas em volume
- Profundidade de dragagem ilimitada

Os requisitos acima, tornam o sistema indicado para resolver problemas de dragagem em geral, atendendo às necessidades da moderna tecnologia de exploração de depósitos submarinos e do reprocessamento de leitos aquáticos poluídos. O sistema também é indicado para resolver problemas de bombeamento de fluídos especiais, tais como pastas, misturas com elevada porcentagem de partículas sólidas em volume e misturas com partículas sólidas de tamanho elevado.

O sistema apresenta-se basicamente sob duas formas:

- imerso, no caso de dragagem, sendo que o sistema é usualmente móvel (fig.1);

Nota: Os termos sistema imerso ou sistema de dragagem serão utilizados indistintamente daqui em diante.

- emerso, no caso de bombeamento de misturas e fluídos especiais, sendo que na maioria das vezes é imóvel (fig.2).

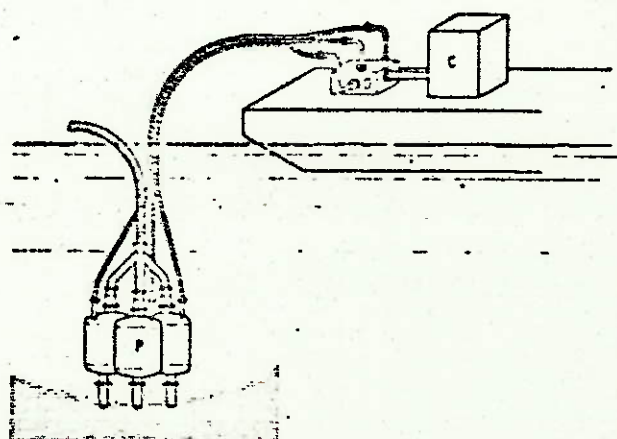


fig. 1

- C - Compressor
D - Distribuidor
P - Bomba
B - Calha

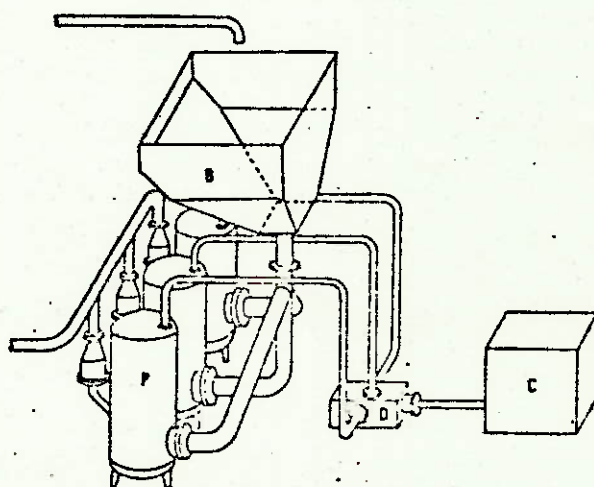


fig. 2

3. DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA

BOMBA

É constituída de dois ou três cilindros, sem mecanismos internos rotativos, possuindo duas válvulas de retenção, uma na tubulação de admissão e outra na tubulação de recalque.

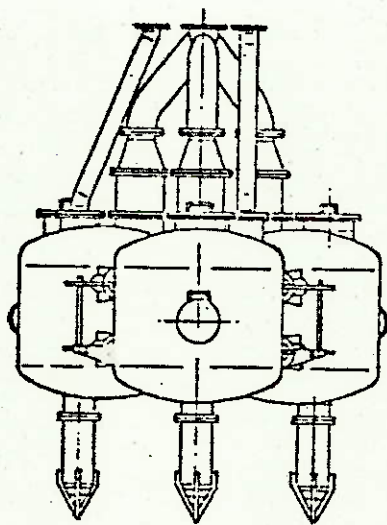


fig. 3

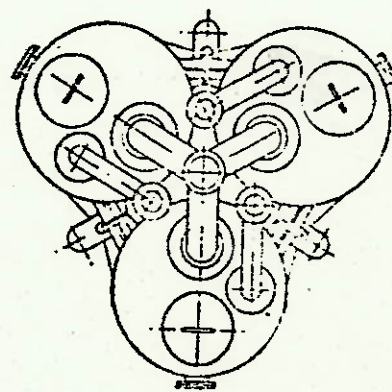


fig. 4

DISTRIBUIDOR

É o cérebro do sistema, estando localizado entre o compressor e a bomba. Sua função é regular a entrada e saída de ar comprimido de cada um dos cilindros que constituem a bomba, assegurando funcionamento uniforme e vazão contínua.

COMPRESSOR

São utilizados compressores de deslocamento positivo de diversos tipos, sendo que o seu acionamento pode ser feito por qualquer tipo de motor.

TUBULAÇÕES FLEXÍVEIS DE AR COMPRIMIDO

Levam o ar comprimido do distribuidor aos cilindros da bomba e vice-versa. Existe uma tubulação para cada cilindro.

TUBULAÇÃO DE RECALQUE

Os vários cilindros da bomba estão ligados a uma única tubulação de recalque.

4. DESCRIÇÃO DO CICLO DE OPERAÇÃO AOS CILINDROS DA BOMBA

O ciclo de operação dos cilindros da bomba pode ser dividido em três fases:

1a. FASE - ENCHIMENTO DA BOMBA

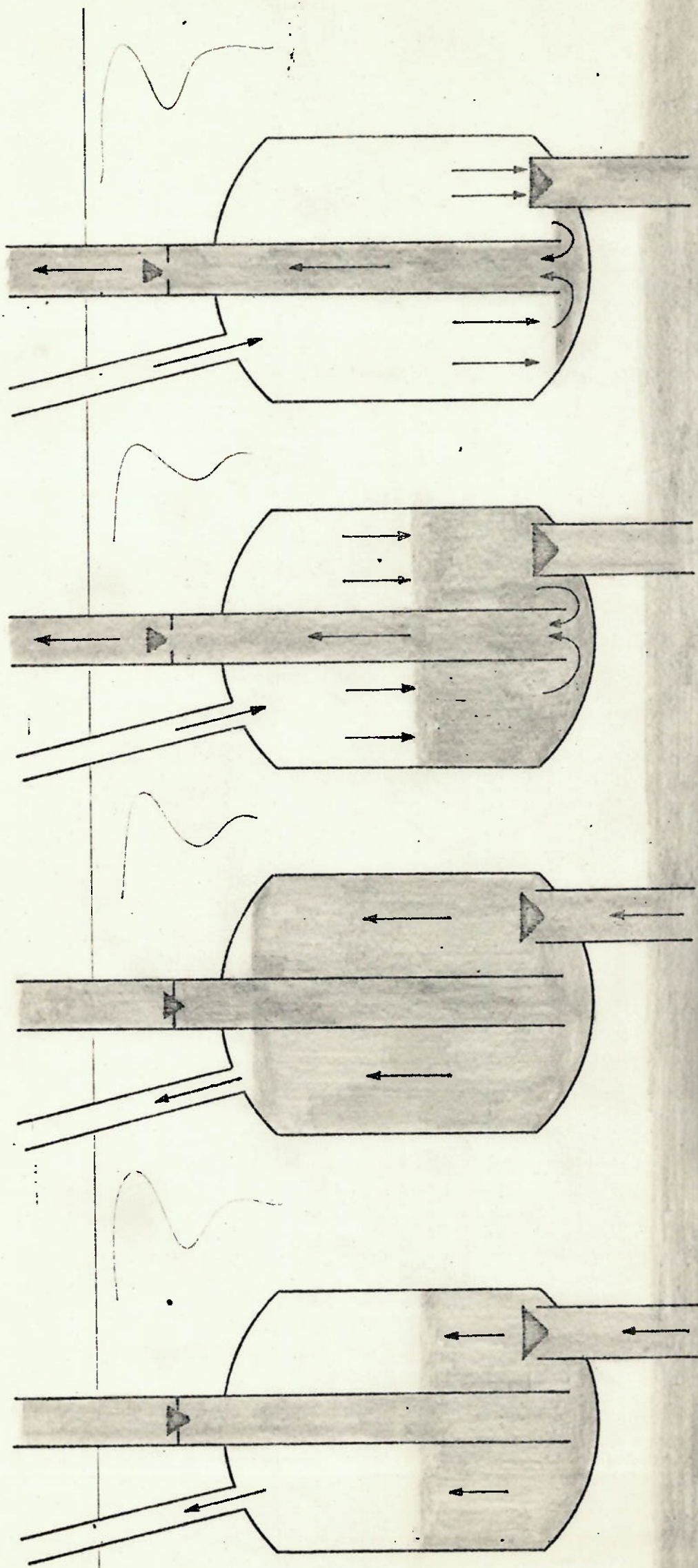
Cada cilindro é rapidamente preenchido com a mistura a ser bombeada, devido à diferença de pressão causada por uma coluna de líquido (no caso da bomba trabalhar submersa), ou através da gravidade (no caso de sistemas emersos).

2a. FASE - ESVAZIAMENTO DA BOMBA E BOMBEAMENTO

Quando o cilindro está totalmente preenchido, o ar comprimido fornecido pelo compressor chega à bomba através do distribuidor e das tubulações flexíveis. A válvula de retenção da tubulação de admissão fecha-se, e o ar comprimido age como um pistão, forçando a mistura através da válvula de retenção de saída para a tubulação de recalque.

3a. FASE - DESCARGA DO AR COMPRIMIDO E PREPARAÇÃO PARA A 1a. FASE

Quando o cilindro está quase vazio, o distribuidor conecta a tubulação de ar que vai até a bomba com a atmosfera ou com um reservatório onde há vácuo (p_{ATM}). A pressão no interior do cilindro cai e novamente o mesmo é preenchido com a mistura a ser bombeada, como descrito na 1a. FASE.



O distribuidor atua alternadamente nos diversos cilindros para proporcionar uma vazão uniforme e contínua.

A bomba, portanto, age como uma bomba de pistão. O ar comprimido desempenha o papel do pistão, substituindo todos os componentes mecânicos, normalmente encontrados nos demais tipos de bombas.

Como somente o ar comprimido contido na tubulação que liga o distribuidor à bomba é perdido a cada ciclo, é vantajoso instalar o distribuidor o mais próximo possível da bomba. Isso é conseguido facilmente no caso de sistemas emersos. No caso de sistemas imersos, para profundidades de até 25 m, o problema é solucionado colocando-se o distribuidor acima do nível da água, sobre uma pequena ponte flutuante.

No caso de maiores profundidades, o distribuidor é instalado perto da bomba, permanecendo imerso.

A partir do ciclo de trabalho da bomba, vemos que a 1a. FASE (enchimento da bomba) e a 2a. FASE (esvaziamento da mesma) são completamente independentes. Elas podem se realizar com velocidades diferentes. Essa importante característica técnica permite a escolha ótima, sob o ponto de vista econômico, do diâmetro da tubulação de recalque, não estando a escolha sujeita a outras limitações, como ocorre normalmente no caso de bombas centrífugas.

A velocidade de admissão está relacionada com a altura da coluna de líquido (no caso de sistemas imersos), sendo que podem ser conseguidas velocidades muito superiores às obtidas com bombas normais de sucção para dragagem, que não podem atingir tais velocidades na tubulação de sucção.

Esses valores elevados da velocidade de admissão mostram porque o sistema é capaz de bombear misturas com até 60/70% de partículas sólidas em volume.

O sistema normalmente opera em ciclo aberto. Isto quer dizer que o ar comprimido, após ter passado por um cilindro da bomba, é descarregado direta ou in diretamente na atmosfera através do distribuidor.

Existe a possibilidade de utilização de um ciclo semi fechado para o qual são necessários dois compressores. Um compressor aspira ar da atmosfera enquanto o outro recomprime o ar que escoa dos cilindros da bomba, fazendo com que este retorne ao circuito na pressão original.

Assim procedendo uma grande quantidade de ar comprimido pode ser recuperada. Essa quantidade é, em média, 50-65% da quantidade de ar comprimido necessária quando da operação em ciclo aberto.

Além de economizar ar comprimido, o sistema operando em ciclo semi fechado necessita compressores de menor capacidade, proporcionando uma economia de energia que, em alguns casos, chega a ser da ordem de 50%.

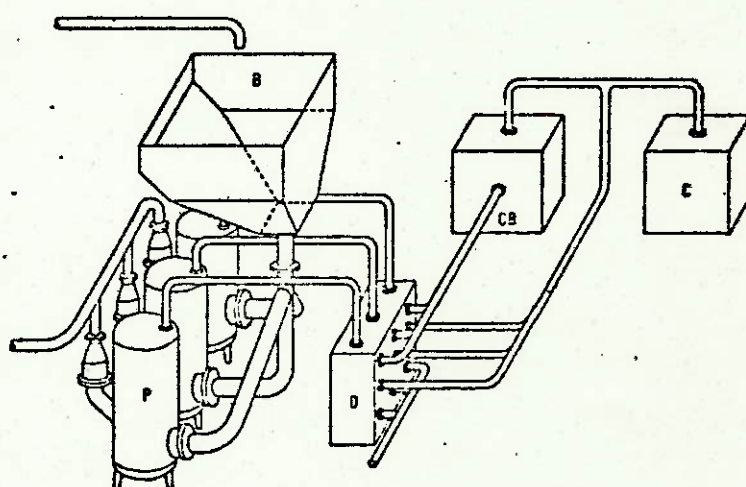


fig. 5

- C - Compressor
- CB - Compressor booster
- D - Distribuidor
- P - Bomba
- B - Calha

5. VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO SISTEMA

5.1. SISTEMAS DE DRAGAGEM

Devido à sua grande versatilidade, facilidade de transporte e possibilidade de instalação em qualquer tipo de embarcação, ponte flutuante ou mesmo em terra firme, o sistema é indicado para resolver praticamente todos os tipos de problemas de dragagem, alguns dos quais, até aqui, eram de solução impossível com os tipos convencionais de equipamento para esse fim.

Como vantagens comuns a todas as aplicações do sistema de dragagem, podemos citar:

- vazão contínua e uniforme
- profundidade de dragagem ilimitada (foram feitos trabalhos a profundidades de até 50 m)
- praticamente não há desgaste, pois não há peças ou mecanismos em contato com a mistura abrasiva que está sendo bombeada, com exceção das válvulas de retenção dos cilindros, que atuam automaticamente. Essa importante condição faz com que a bomba trabalhe 24 horas por dia, durante vários anos, apresentando a mesma vazão e eficiência observadas quando da sua entrada em operação, e torna mínimos os custos de manutenção.
- elevada porcentagem de partículas sólidas em volume na mistura bombeada, proporcionando:
 - . máximo aproveitamento da capacidade de armazenagem das barcas, diminuindo assim os gastos com o transporte marítimo;
 - . possibilidade do uso de tubulações com diâmetro inferior ao utilizado por dragas convencionais, para transportar igual quantidade de partículas sólidas, reduzindo assim os gastos com a instalação.
 - . uma considerável economia de água.
- possibilidade de bombear a mistura, por si próprio, a grandes distâncias.
- capacidade de operar na presença de materiais fragmentados, sem que isto ocasione interrupções no funcionamento ou danos ao sistema.

5.2. SISTEMAS EMERSOS

Além das vantagens mencionadas anteriormente, a maioria das quais também válida para os sistemas emersos, podemos ainda citar:

- capacidade de bombear misturas abrasivas à grande altura, utilizando instalações com cilindros localizados espaçadamente (em série), e com compressores e redes de ar comprimido normais.
- não há perigo de blocagem da tubulação, tanto no caso de bombeamento de materiais muito densos, como no caso de mudança na granulometria. A bomba funciona como uma bomba de pistão, garantindo a continuidade de saída do material.
- não há perigos para o sistema, mesmo quando há uma interrupção na alimentação do material a ser bombeado.

6. CAMPOS DE APLICAÇÃO DO SISTEMA

6.1. SISTEMAS DE DRAGAGEM

- Dragagem de materiais soltos e que se movem facilmente tais como areia, areia misturada com pedregulho e cascalho e materiais arenosos diversos, sendo que, a nivelção do leito submarino não é fator importante.

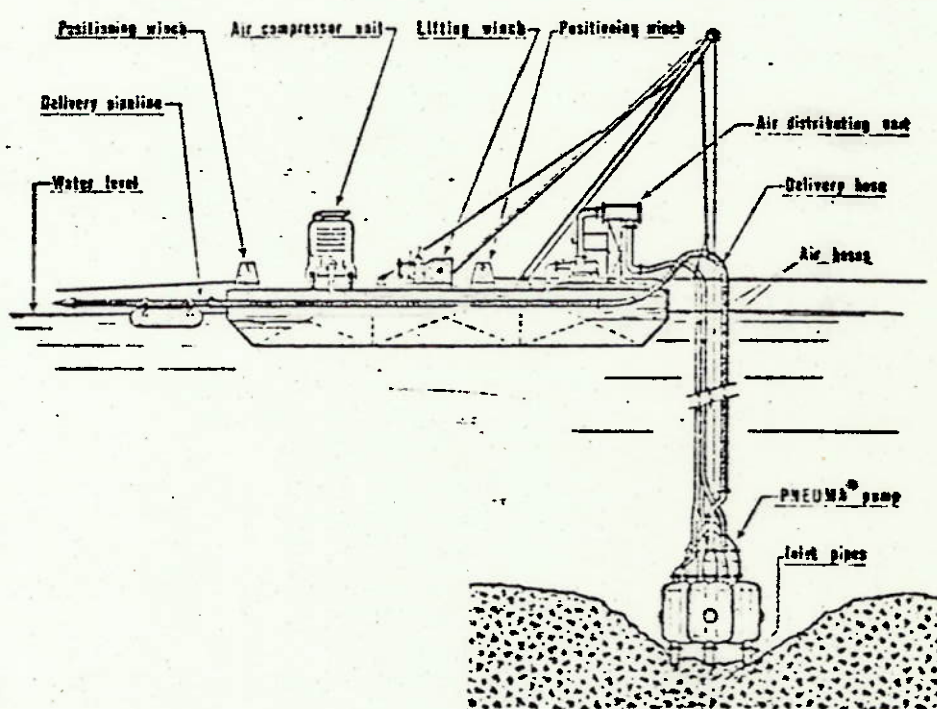


fig. 6

Esse tipo de trabalho pode ser executado em diversas profundidades, sendo que além de 20 m recomenda-se a colocação do distribuidor junto à bomba. Esse procedimento evita o consumo excessivo de ar. São utilizadas duas tubulações flexíveis de ar comprimido: uma ligando o compressor ao distribuidor que está imerso, e a outra ligando o distribuidor à atmosfera ou a um reservatório onde há vácuo.

Em alguns casos, quando está-se dragando a grandes profundidades e a mistura deve ser bombeada à distâncias consideráveis,

pode-se fazer uso de um sistema para diluir a mistura, diminuindo a porcentagem de sólidos e consequentemente a pressão de trabalho e a potência necessária.

Esse sistema é constituído por diversos dutos que ligam as tubulações de sucção dos cilindros a uma tubulação que possui uma válvula que pode ser operada remotamente. Quando esta válvula é aberta, água limpa pode penetrar no sistema, diluindo a mistura que está sendo admitida através das tubulações de sucção dos cilindros (vide fig.7).

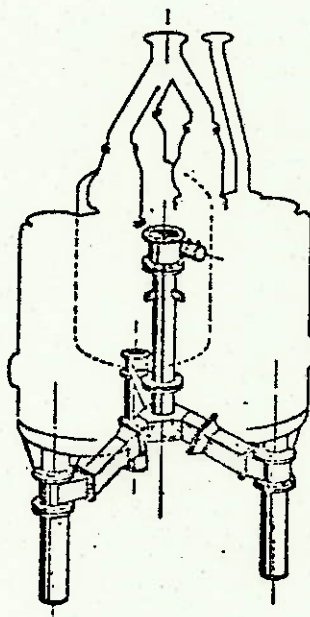


fig. 7

Podem ser dragadas sem problema algum, partículas com dimensão de até $1/3$ do diâmetro da tubulação de recalque.

A elevada velocidade nas tubulações de sucção é responsável pela obtenção de uma eficiência de mais de 70% de partículas sólidas em volume.

O sistema pode operar em águas agitadas, uma vez que a bomba está ligada à barça por cabos frouxos e pelas tubulações de ar comprimido e de recalque que são flexíveis, permanecendo no fundo devido ao peso próprio. Os efeitos de água agitada se fazem sentir somente na barça.

- Dragagem de materiais compactados tais como tufo calcário, lama, lodo, lodo arenoso e materiais poluentes em geral.

Para que fosse possível a dragagem desses materiais, foram desenvolvidos diversos equipamentos que são conectados às tubulações de sucção dos cilindros, facilitando a sua desagregação e admissão. As figuras 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19, ilustram alguns desses equipamentos.

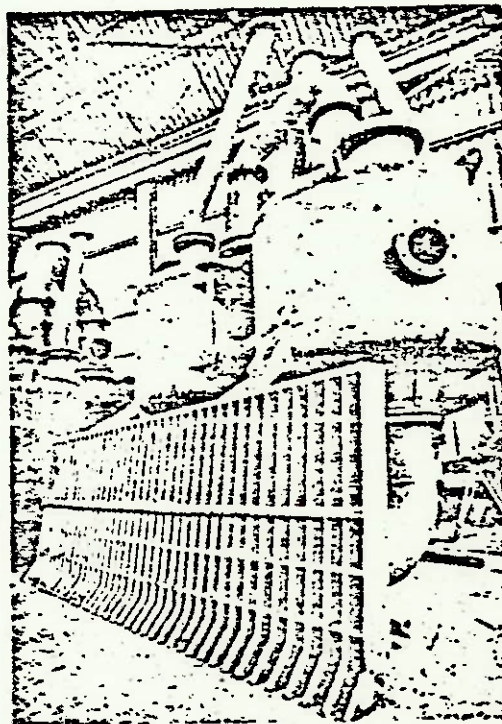


fig. 8

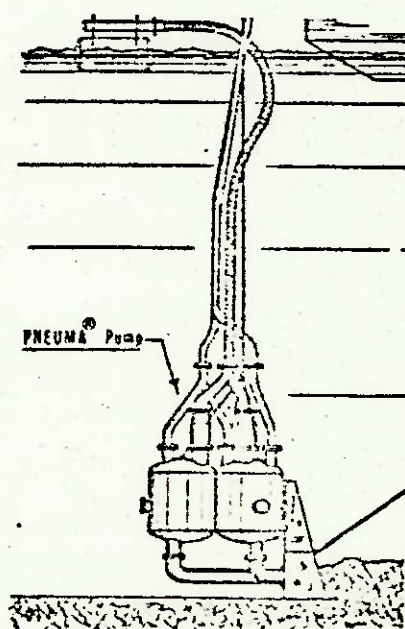


fig. 9

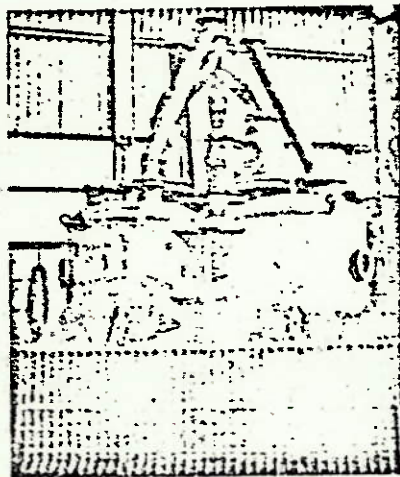


fig. 10

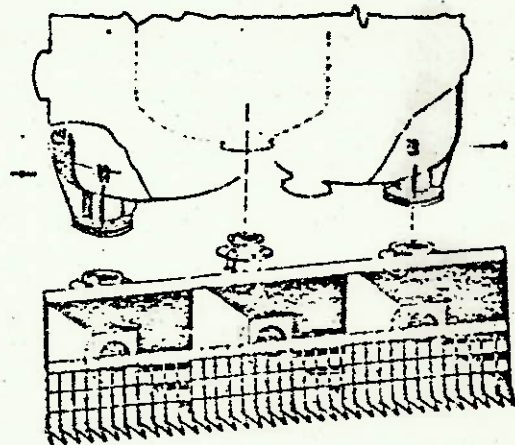


fig. 11

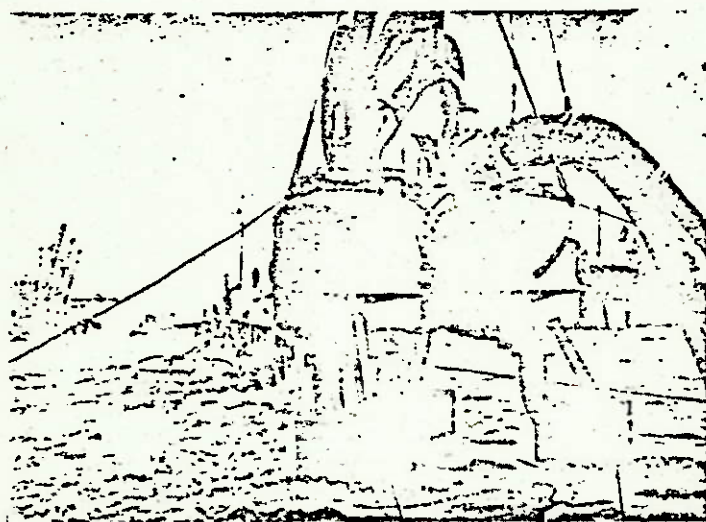


fig. 12

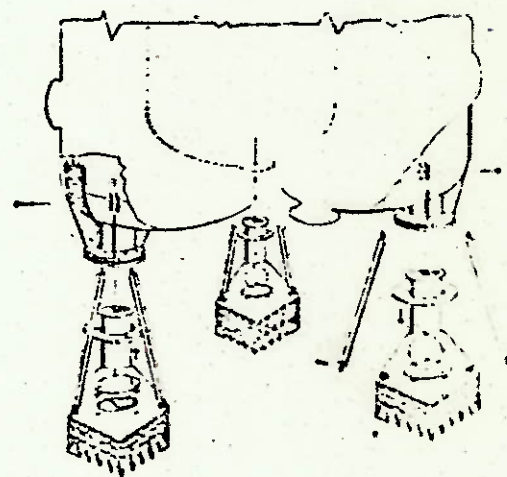


fig. 13

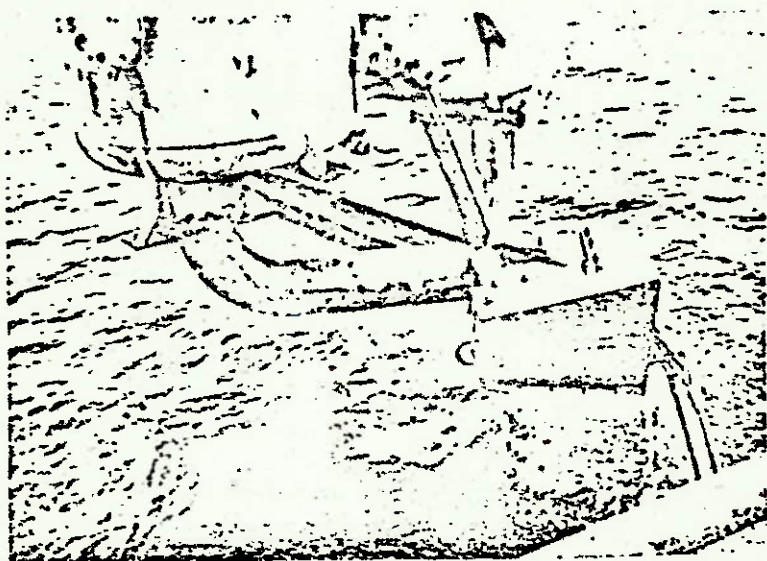


fig. 14

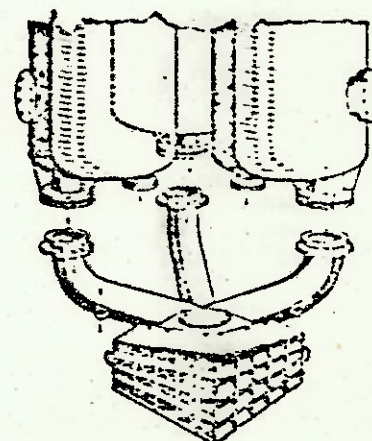


fig. 15

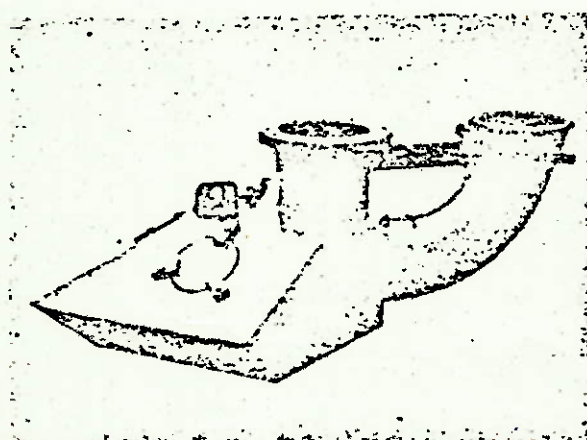


fig. 16

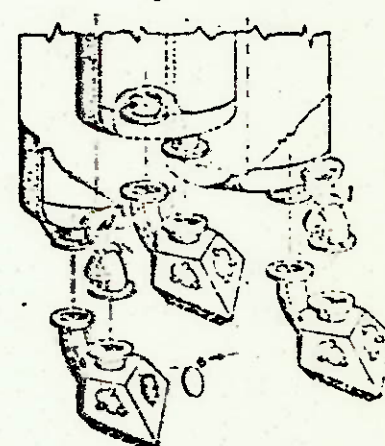


fig. 17

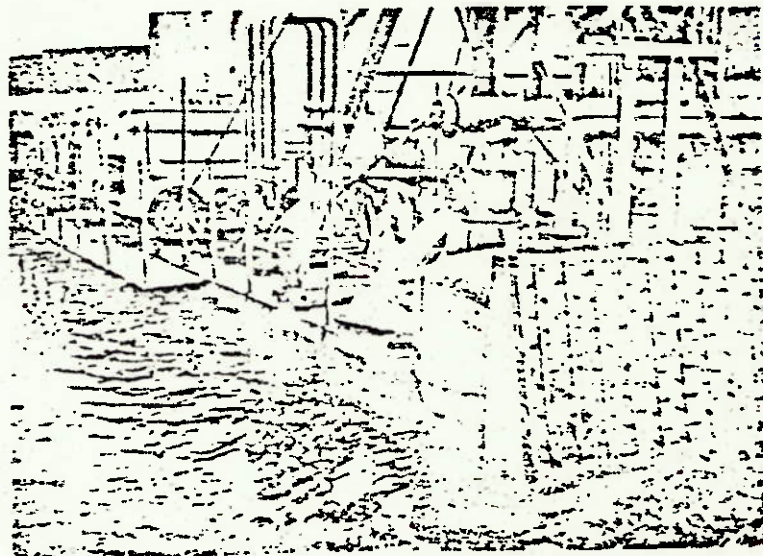


fig. 18

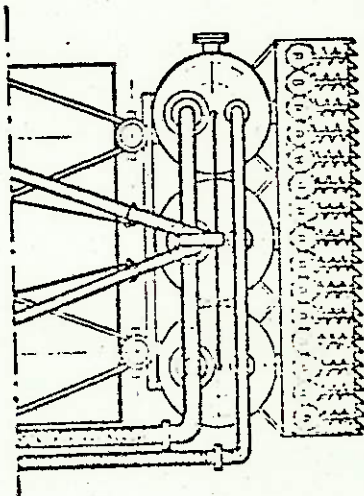


fig. 19

As figuras 20, 21, 22 e 23 mostram um tipo especial de equipamento que faz com que a bomba possa operar em duas direções opostas.

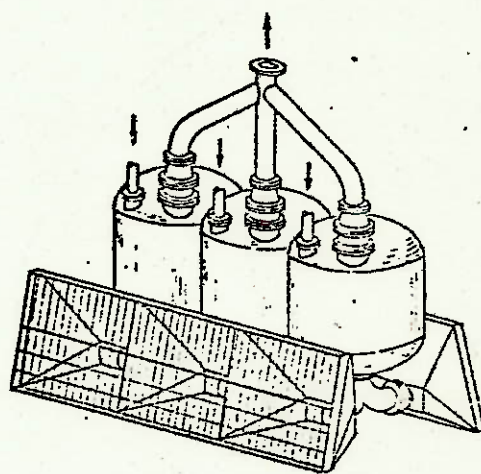


fig. 20

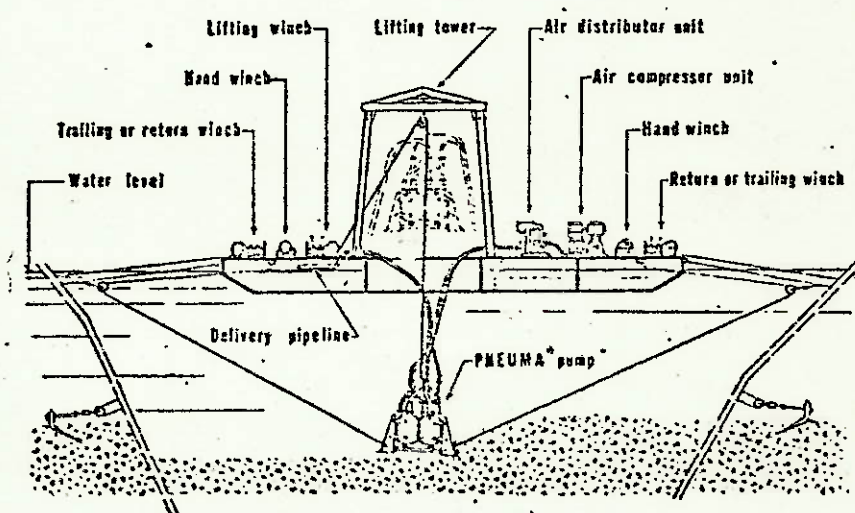


fig. 21

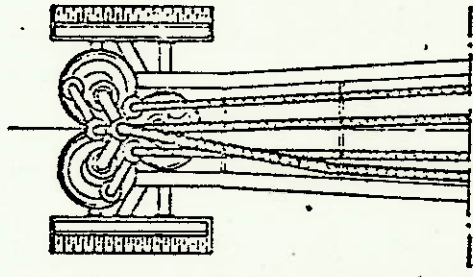


fig. 22

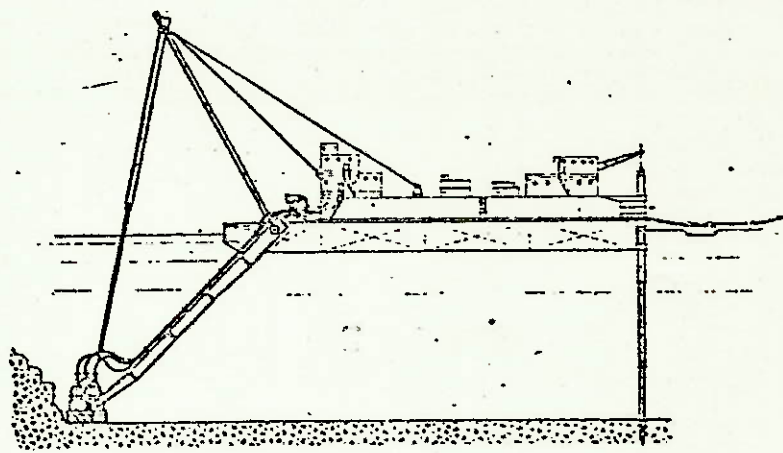


fig. 23

Esses equipamentos são, por si próprios, eficientes na desagregação de materiais compactados, sendo que testes realizados mostram que não é necessário o uso de desagregadores rotativos.

A bomba é continuamente arrastada de encontro ao material, provocando a penetração dos desagregadores no mesmo. Devido a esse fato e também à própria forma dos desagregadores, a penetração de água na tubulação de sucção torna-se mínima, fazendo com que seja possível a obtenção de eficiência da ordem de 80-90% de sólidos em volume.

Com o uso desses equipamentos pode-se obter uma nivelação perfeita do fundo, sem escavações maiores além da profundidade desejada.

- Dragagem em águas rasas.

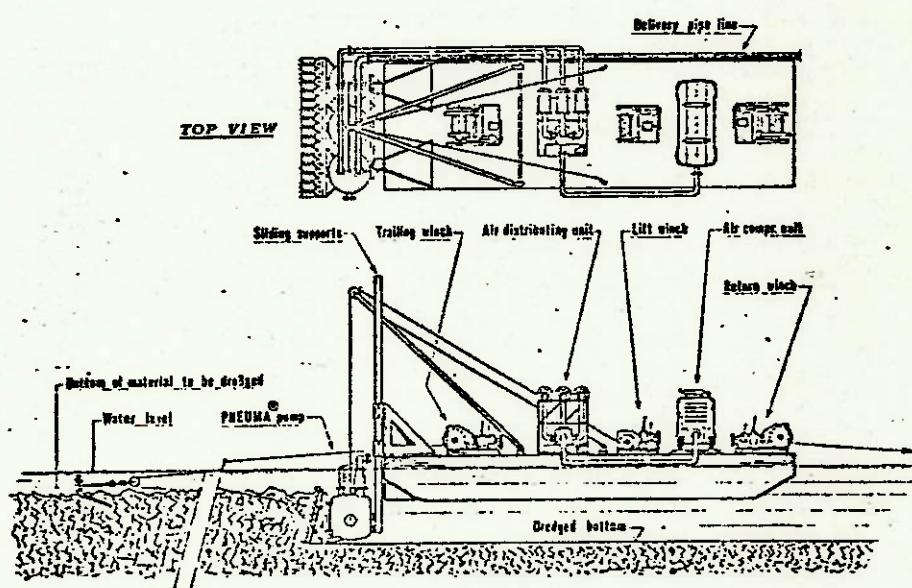


fig. 24

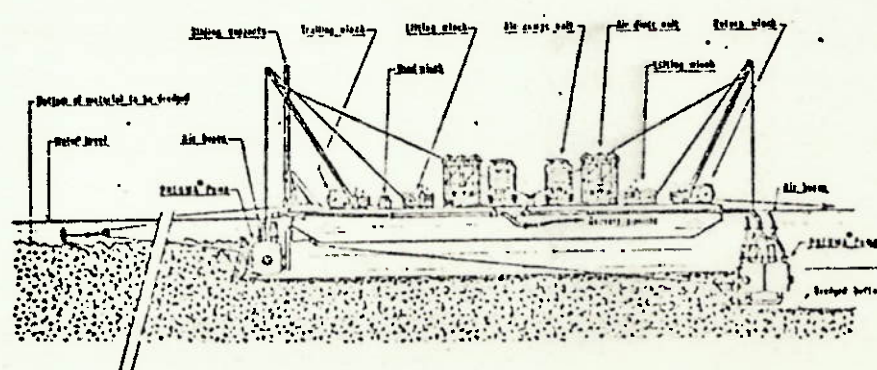


fig. 25

- Dragagem em águas profundas.

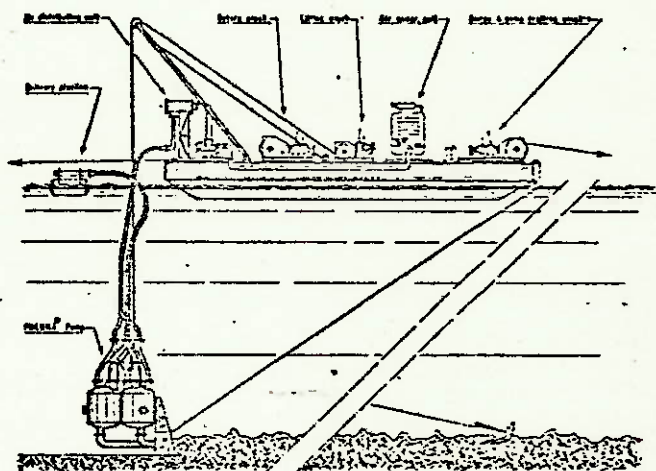


fig. 26

- Dragagem de materiais poluentes.

A dragagem de materiais poluentes envolve dificuldades consideráveis. É necessário que a perturbação do leito poluído seja a menor possível, a fim de evitar, através de correntes submarinas, a poluição e conseqüentemente a contaminação de outras áreas.

Com a utilização de equipamentos descritos anteriormente e pequenas velocidades de varredura, são conseguidas elevadas porcentagens de sólidos em volume, sendo mínima a perturbação do leito poluído.

Testes para constatar a transparência da água, realizados antes e depois da utilização do sistema, revelaram que apenas a água 20-30 cm acima do fundo foi afetada pela perturbação do mesmo.

- Dragagem de canais.

A dragagem de canais pode ser dividida em duas categorias principais:

- dragagem de canais largos (fig.27)

Fazem parte desta categoria os canais para navegação.

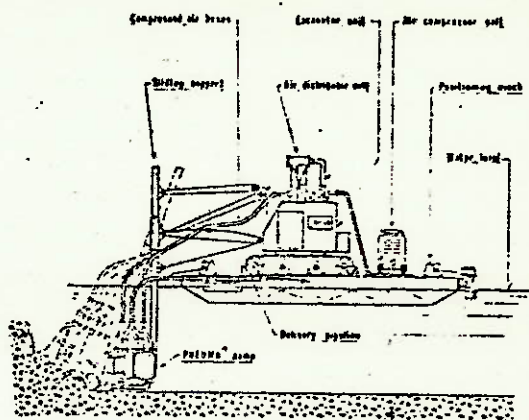


fig. 27

- . dragagem de canais estreitos

Nessa categoria situam-se os canais onde é impossível a utilização de uma barcaça ou ponte flutuante. O sistema pode então ser utilizado das seguintes maneiras:

- suspenso por um guindaste

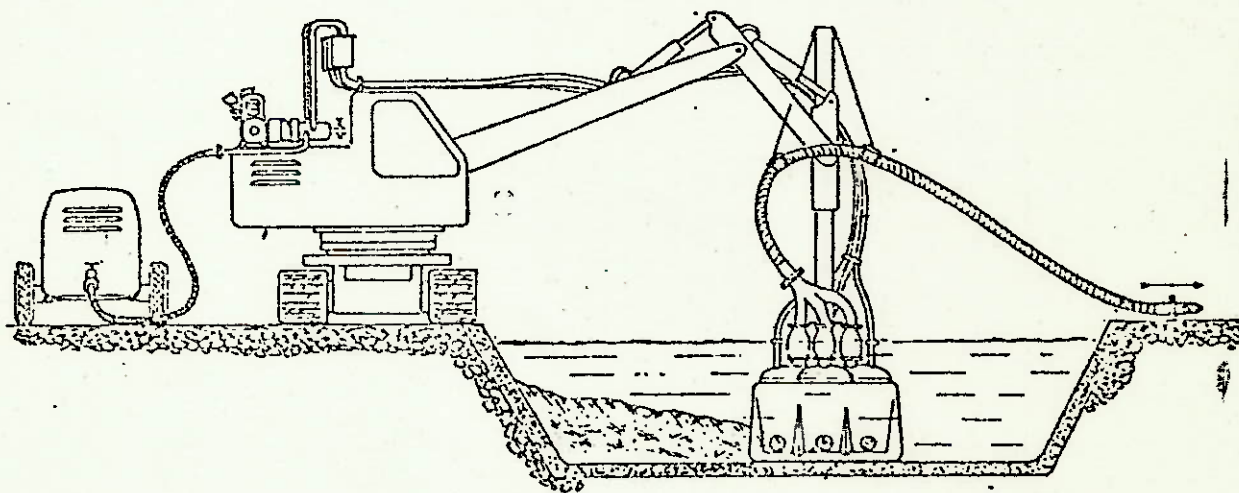


fig. 28

- fixo a um pequeno chassis provido de rodas

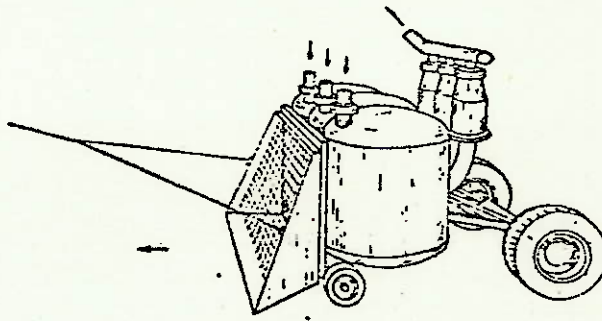


fig. 29

- sobre um sistema semelhante a uma ponte rolante, apoiado sobre rodas em cada margem do canal.

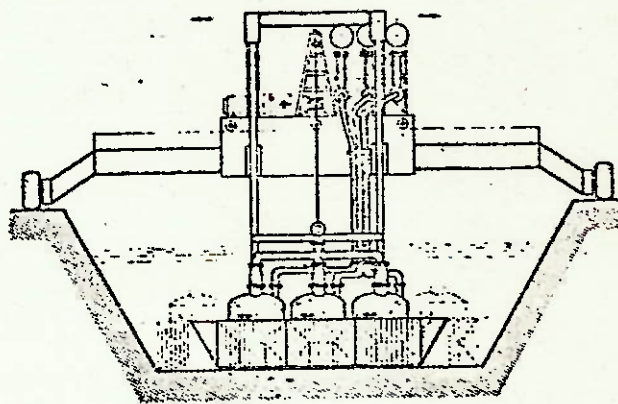


fig. 30

- Dragagem de instalações portuárias
- Limpeza e manutenção da profundidade ao longo de ancoradouros.

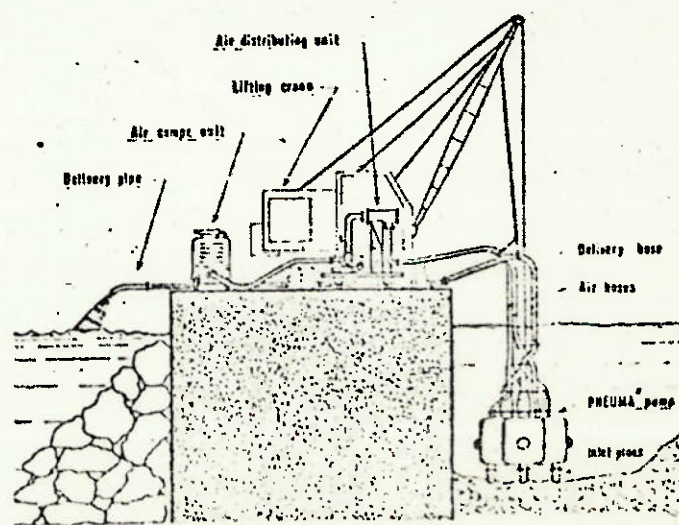


fig. 31

- Dragagem de lagos situados em montanhas e em locais de difícil acesso.
 - Limpeza de diques de hidrelétricas e bacias de sedimentação.
- A fig.32 mostra uma plataforma especialmente construída para trabalhar de dragagem em lagos e diques, podendo ser atingidas profundidades de até 50 m.

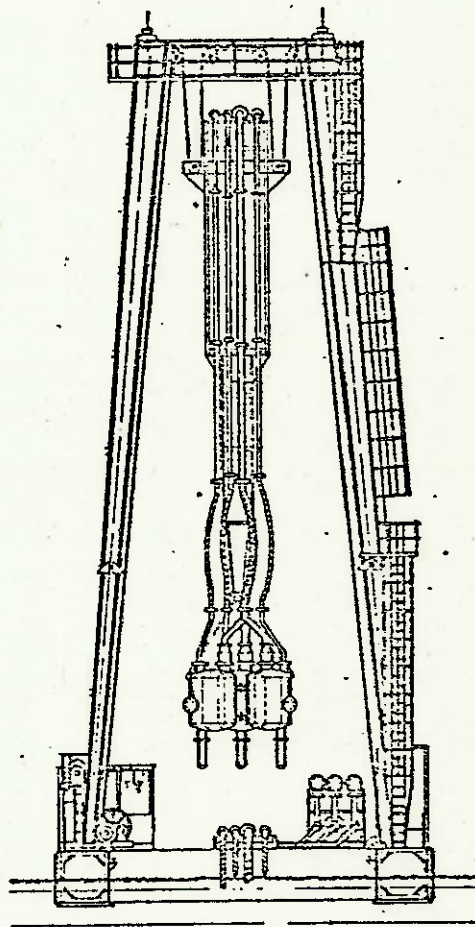


fig. 32

- Dragagem na presença de materiais explosivos.
- A contínua necessidade de se aumentar a profundidade de instalações portuárias e canais torna-se extremamente difícil e perigosa quando os locais de trabalho sofreram bombardeios ou foram palco de ações militares em guerras passadas. Devido à presença de materiais explosivos o uso de dragas convencionais torna-se quase que impossível. Com a grande versatilidade do sistema e com o uso de pequenas

velocidades de penetração, esse problema pode ser facilmente resolvido sem que vidas humanas sofram qualquer risco.

A fig. 33 mostra como o sistema pode ser utilizado nesse caso. A tripulação, os compressores e os guinchos para movimentação encontram-se na primeira barça. A segunda barça é rebocada pela primeira e nela estão situados o distribuidor e um gincho para a elevação da bomba.

Uma grade de malha fina é utilizada com a finalidade de não permitir a entrada de materiais explosivos na bomba.

Se eventualmente ocorrer uma explosão não haverá perigo algum para a tripulação, e se ocorrerem danos para a segunda barça, estes serão mínimos.

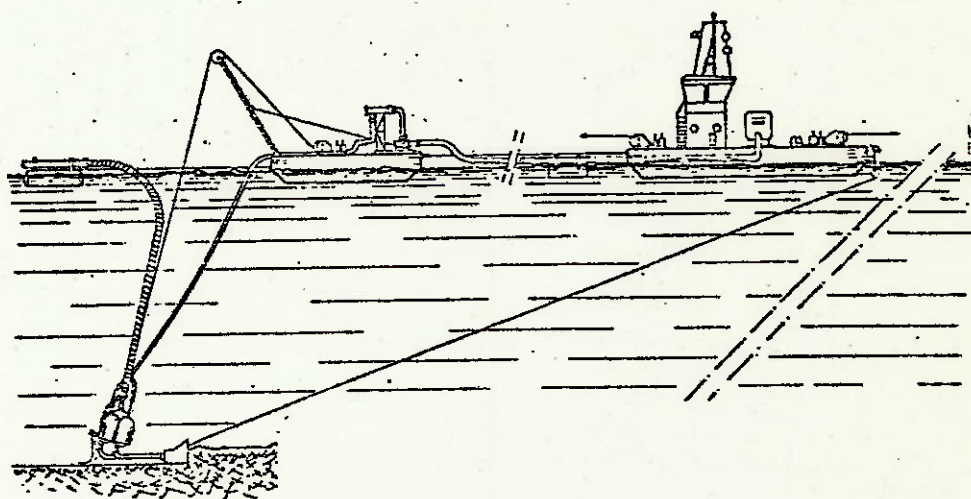


fig. 33

- Dragagem para instalação de dutos submersos.

A fig. 34 mostra uma estrutura projetada especialmente para essa finalidade, podendo ser equipada com 2, 4 ou 6 cilindros.

A abertura do canal e a colocação do duto são executadas simultaneamente.

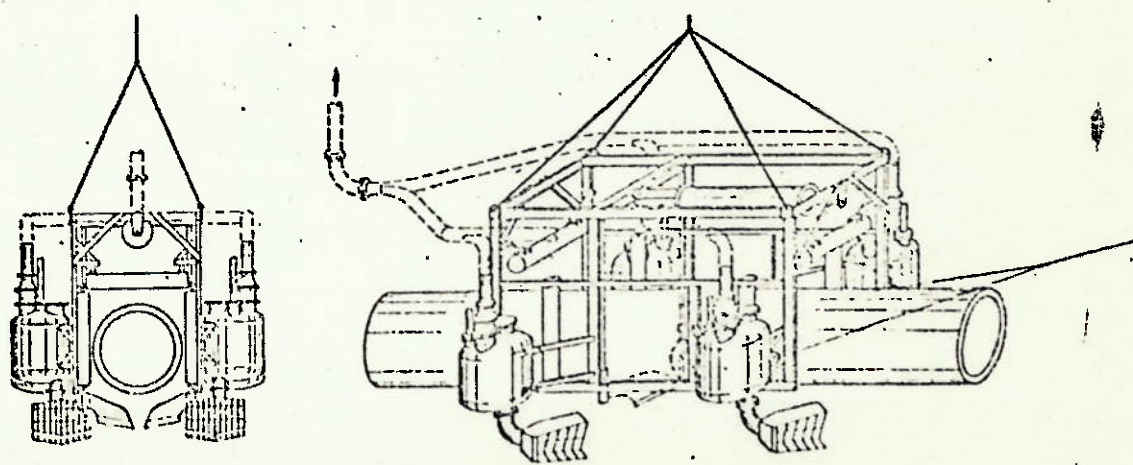


fig. 34

- Obtenção de amostras das camadas que compõem o solo submarino. Com essa finalidade, as tubulações de sucção dos diversos cilindros que constituem a bomba são conectadas a uma única tubulação com diâmetro apropriado e comprimento proporcional ao tamanho de amostra desejado. Se o peso próprio da bomba não for suficiente para causar a penetração, podem ser utilizados jatos de água a alta pressão ao redor da tubulação de admissão, facilitando assim a penetração.

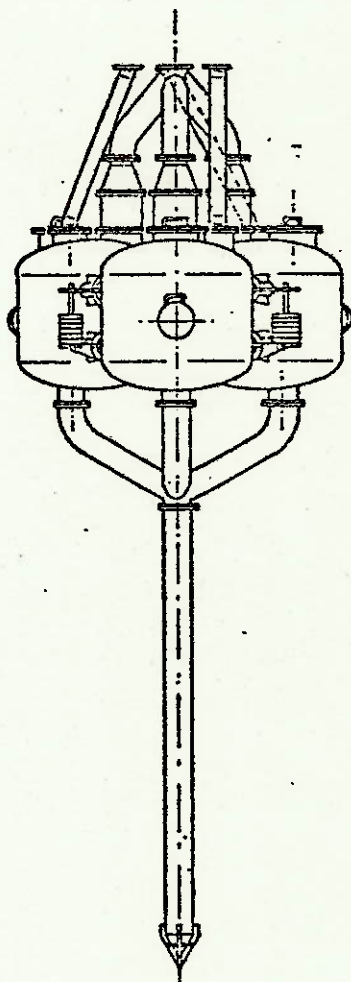


fig. 35

6.2. SISTEMAS EMERSOS

- Transporte de misturas abrasivas, escória e detritos industriais.

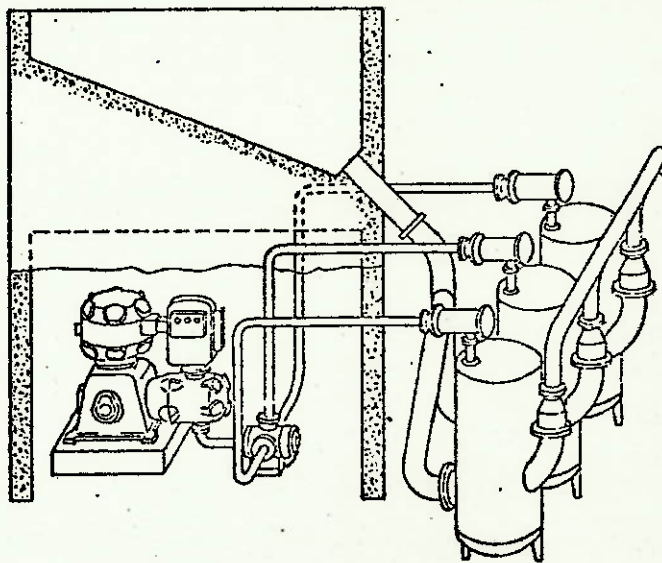


fig. 36

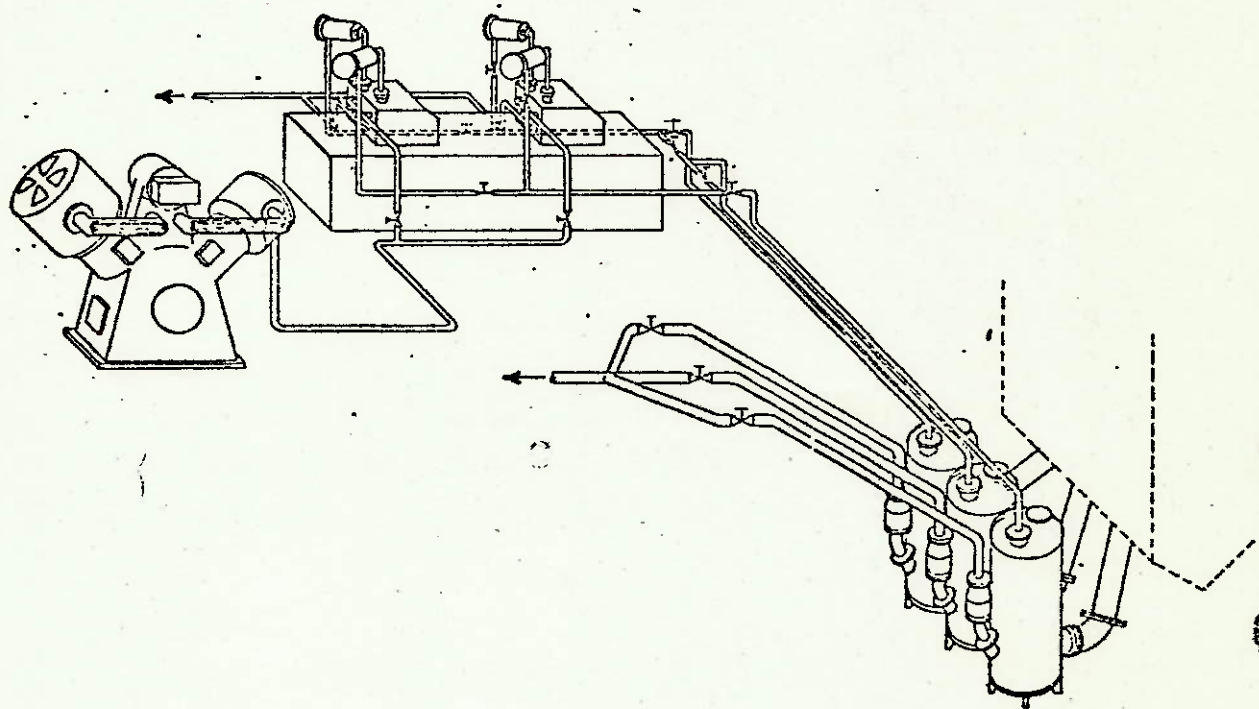


fig. 37

- Bombeamento de líquidos em fossas profundas.

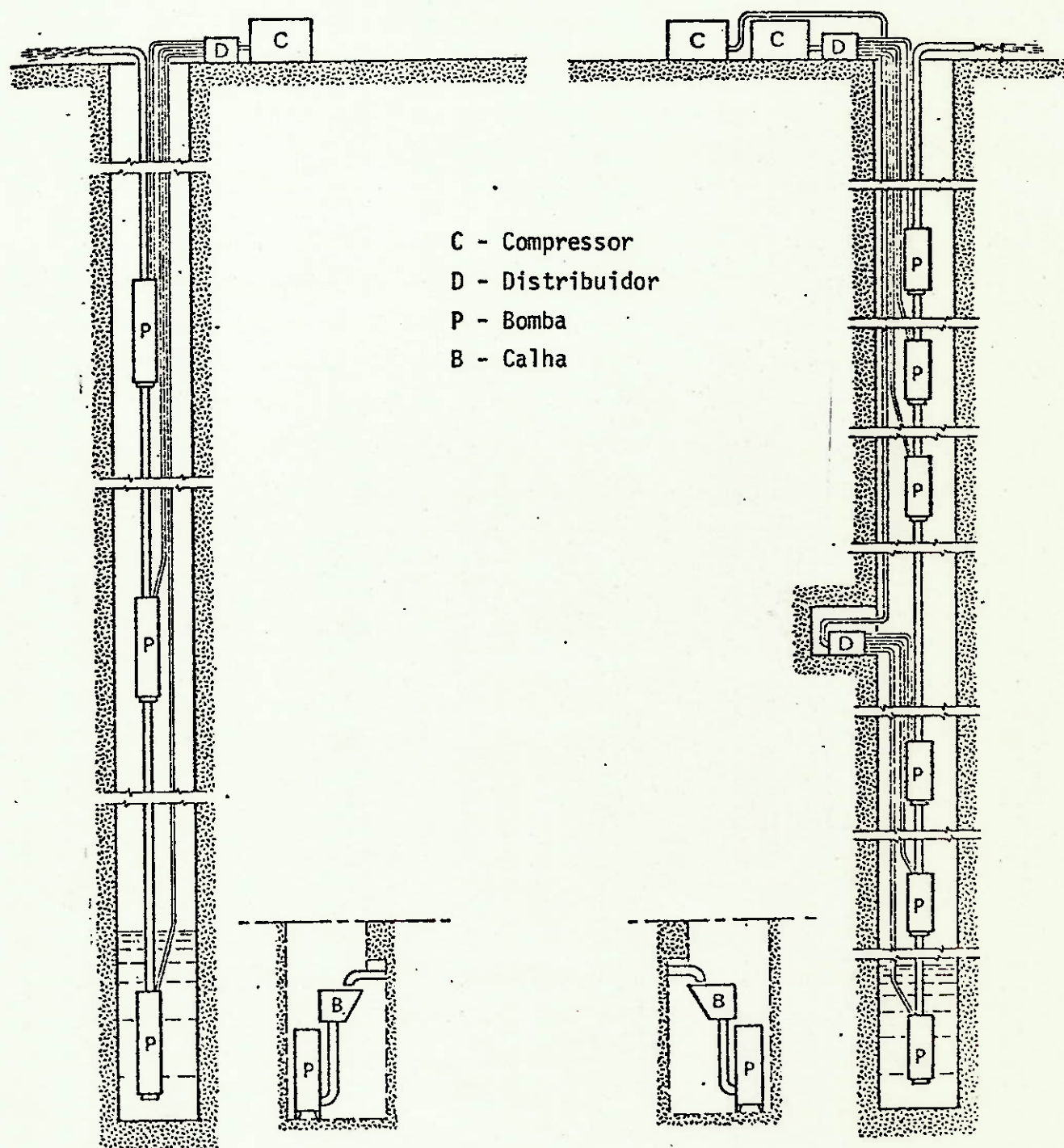


fig. 38

fig. 39

- Sistemas móveis para limpeza de túneis e entradas de minas.

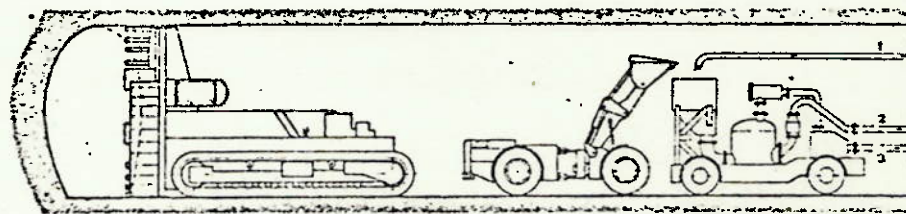


fig. 40

- Transporte de minerais

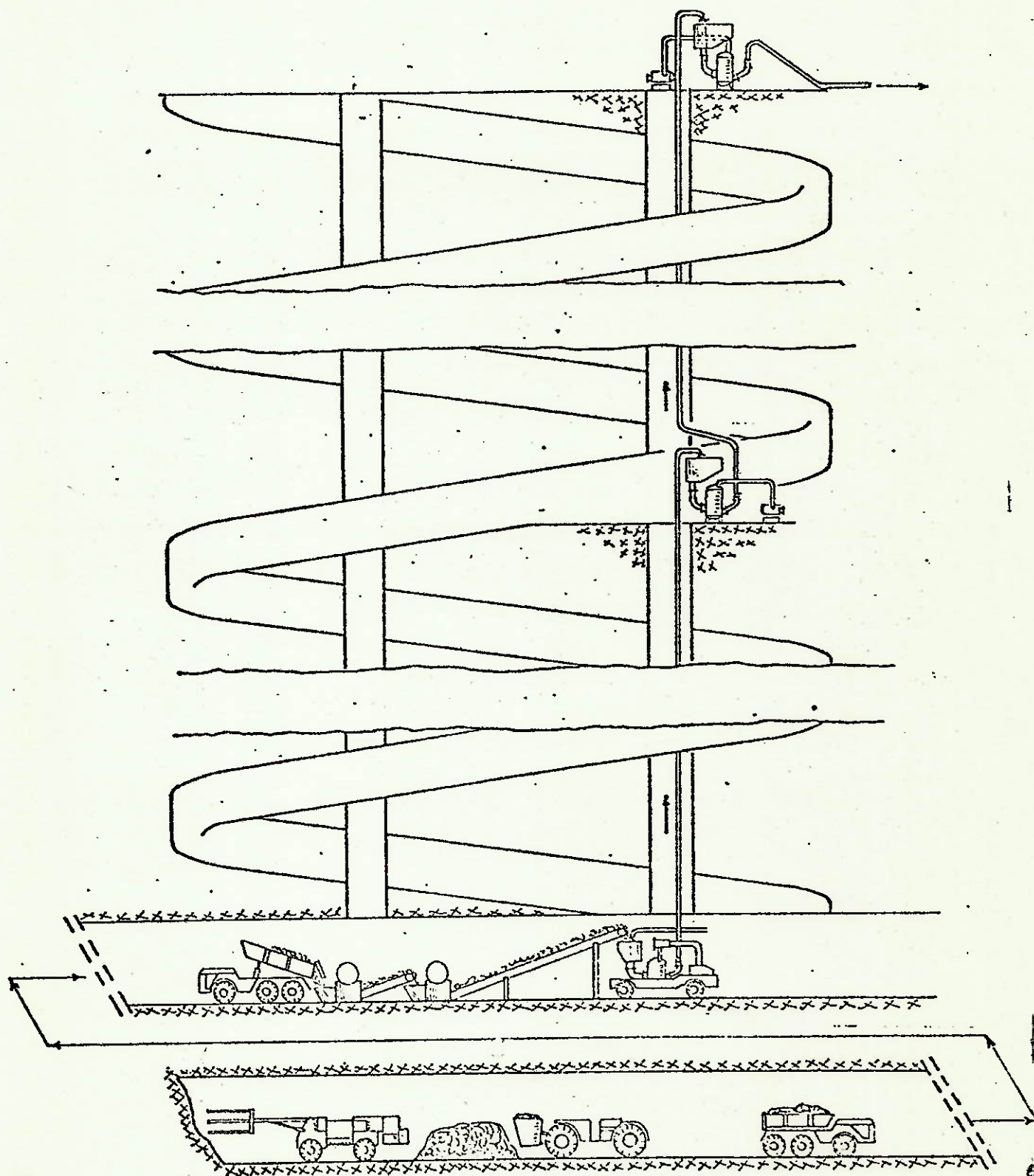


Fig. 1

- Bombeamento de esgoto
- Extração de lama em minas profundas
- Boosters para sistemas de dragagem
- Sistemas móveis para bombear concreto e argamassa.

7. MODELO FÍSICO

Vamos proceder agora a uma análise mais detalhada do ciclo de funcionamento dos cilindros da bomba.

Obs.: Essa análise é válida quando a bomba trabalha submersa.

Vamos começar pela fase de recalque, que se inicia quando o cilindro está totalmente preenchido com a mistura a ser bombeada (fig. 7.1).

Nesse instante, ar comprimido proveniente diretamente de um compressor ou de um reservatório alimentado por um compressor, chega ao cilindro através do distribuidor e da tubulação flexível de borracha.

Com o súbito aumento da pressão, a válvula de retenção da tubulação de sucção se fecha e a mistura é forçada para baixo começando a penetrar na tubulação de recalque (fig. 7.2). A válvula de retenção da tubulação de recalque se abre e o processo continua até que o nível da mistura dentro do cilindro atinja o início da tubulação de recalque (fig. 7.3).

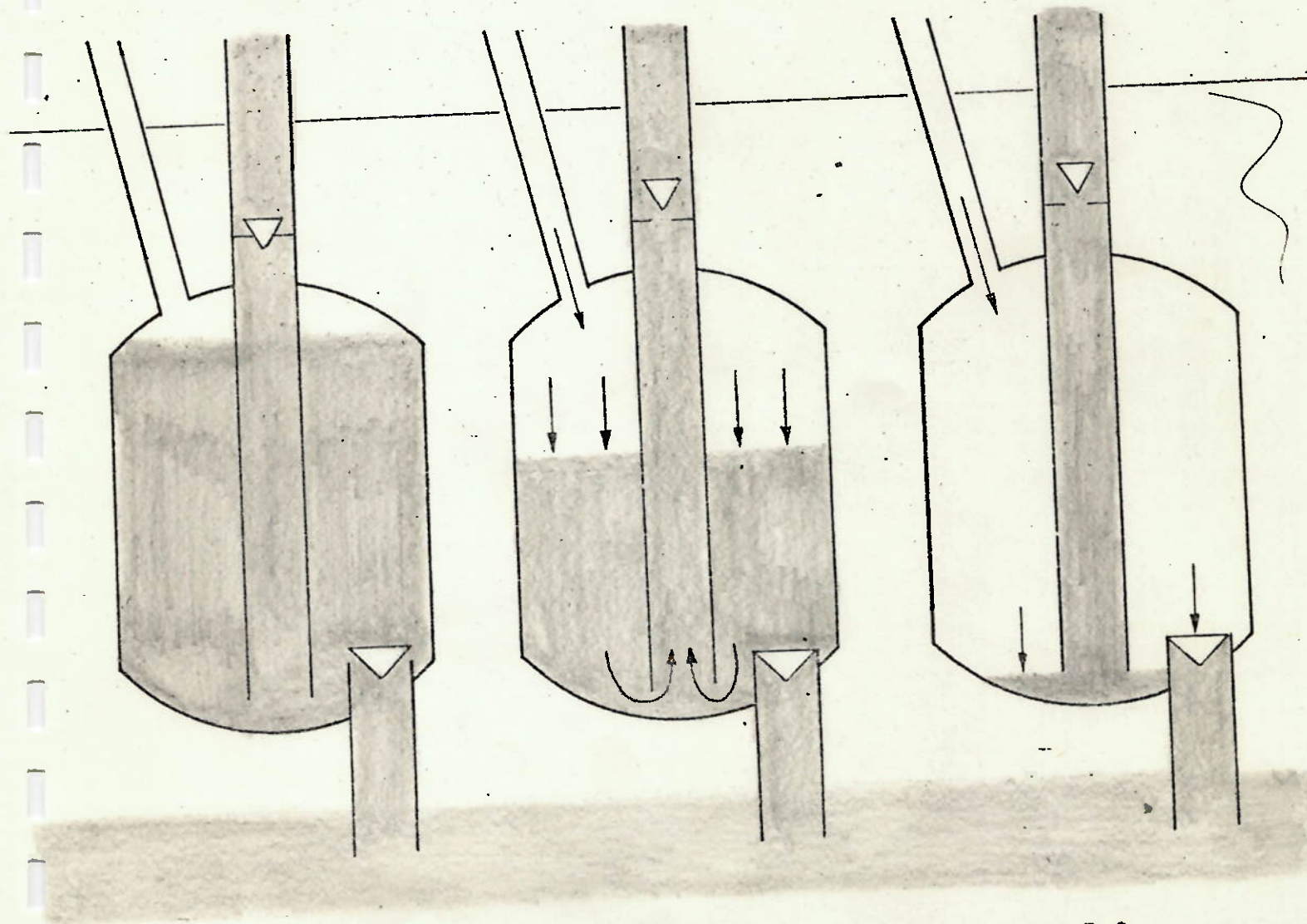


fig. 7.1

fig. 7.2

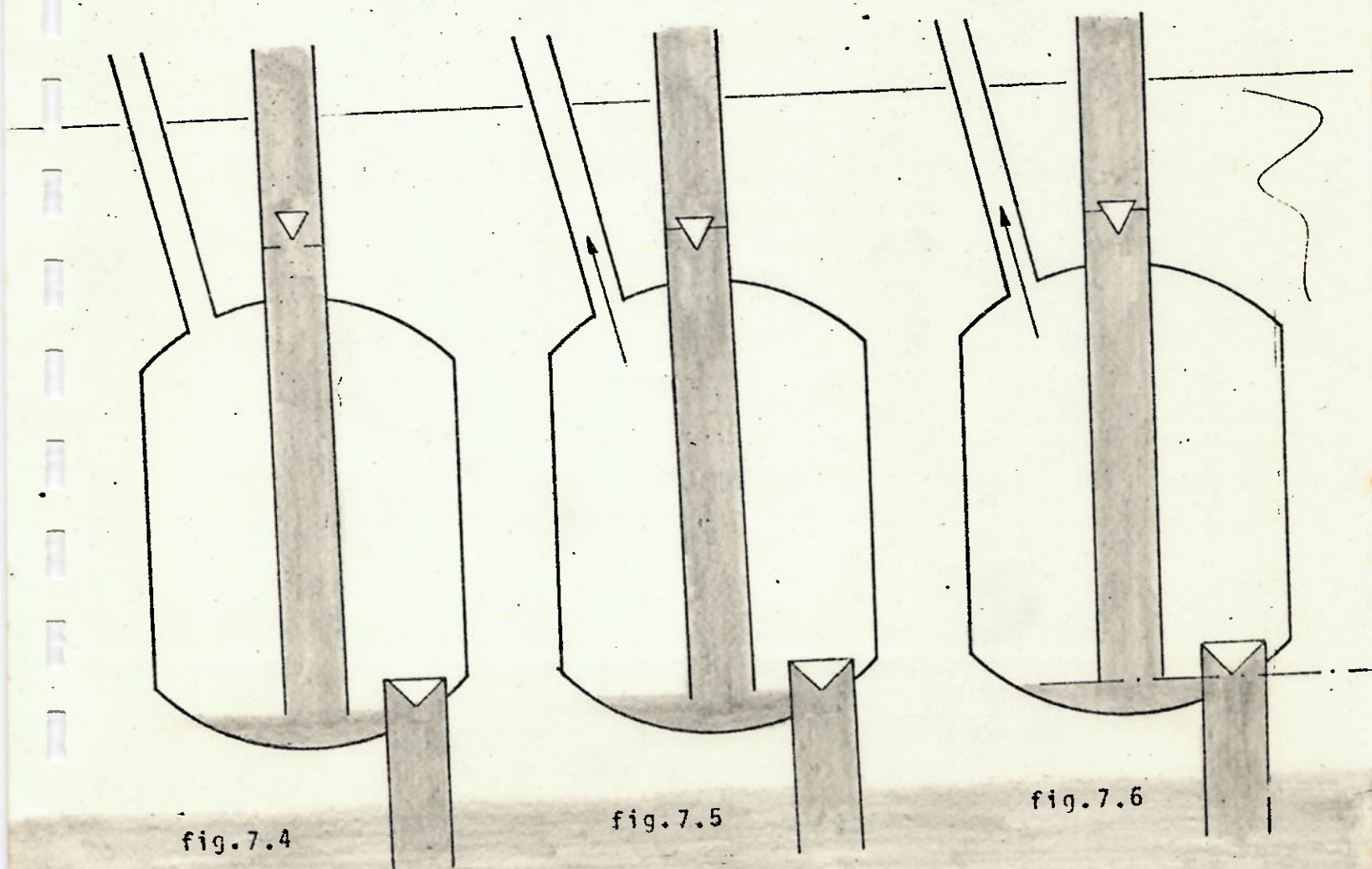
fig. 7.3

Ao ser atingida essa condição, o distribuidor conecta a tubulação de ar comprimido a uma bomba de vácuo, a um reservatório onde previamente tenha sido feito vácuo, ou simplesmente deixa que o ar comprimido dentro do cilindro escoe diretamente para a atmosfera (fig.7.4). A pressão dentro do cilindro começa a cair e a válvula de retenção da tubulação de recalque se fecha (fig.7.5).

Enquanto a diferença de pressão entre a pressão do ar que está dentro do cilindro e a pressão no final da tubulação for superior ou igual a uma certa diferença de pressão crítica, o escoamento de ar irá ajustar-se de modo que o número de Mach no final da tubulação seja igual a 1 (condição sônica). Quando a diferença de pressão cair abaixo do valor crítico, o ar atingirá o final da tubulação com Mach menor do que 1 (condição subsônica).

O processo de alívio da pressão do interior do cilindro continua até que seja atingido um valor suficientemente inferior à pressão da coluna de água até a horizontal definida pelo início da tubulação de recalque (fig.7.6).

A coluna de mistura que se encontra dentro da tubulação de recalque e abaixo da válvula de retenção da mesma, não escoar para baixo, pois a pressão dentro do cilindro é sempre suficiente para mantê-la no lugar.



Quando a pressão do ar dentro do cilindro for suficientemente inferior à pressão da coluna de água na horizontal definida pelo início da tubulação de recalque, a válvula de retenção da tubulação de sucção se abre, dando início assim, à fase de admissão de mistura no cilindro (fig.7.7). A pressão no cilindro continua a cair e o mesmo é rapidamente preenchido com a mistura (fig.7.8). Durante o processo o ar continua escoando com condição subsônica no final da tubulação de ar.

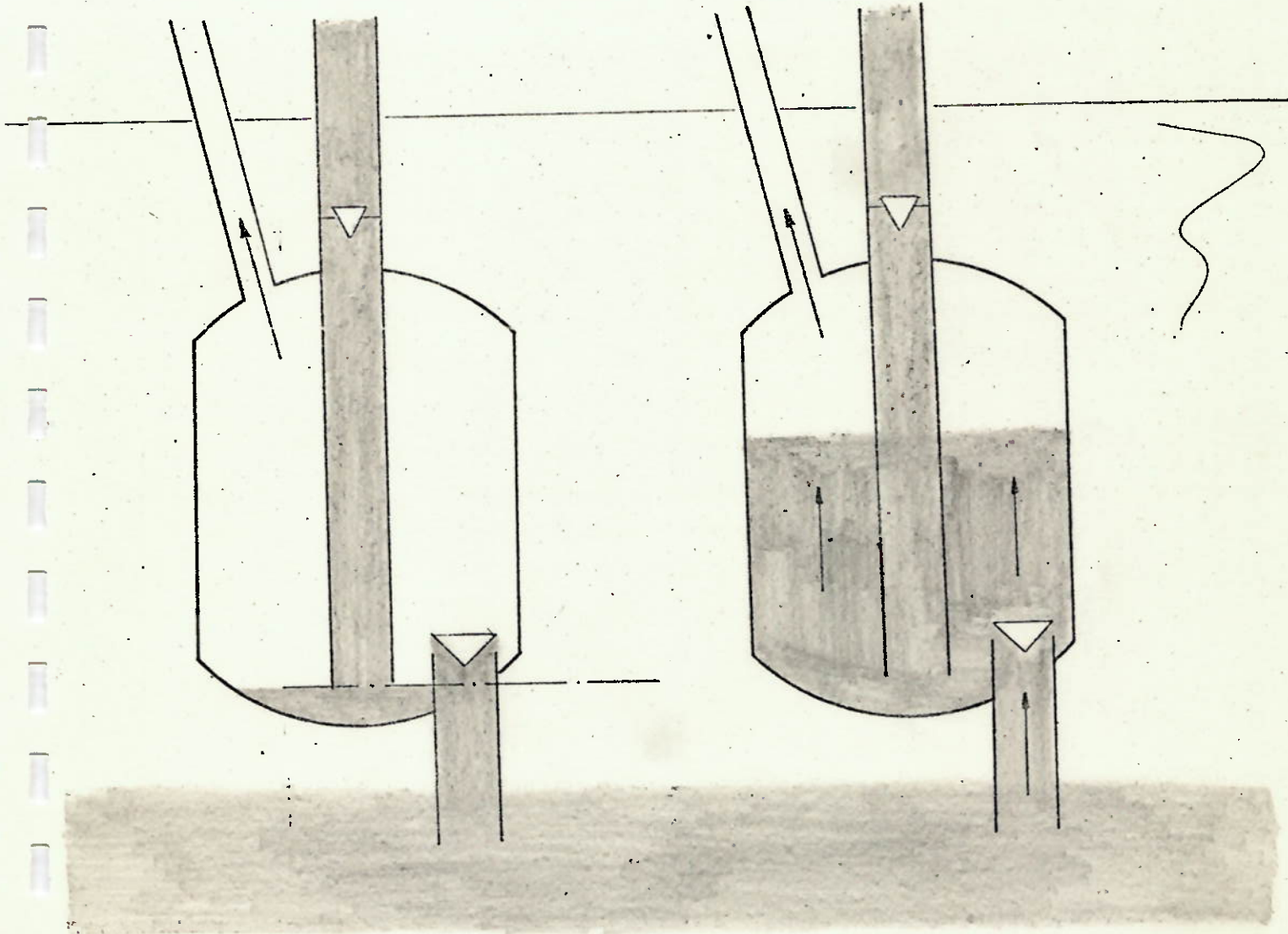


fig.7.7

fig.7.8

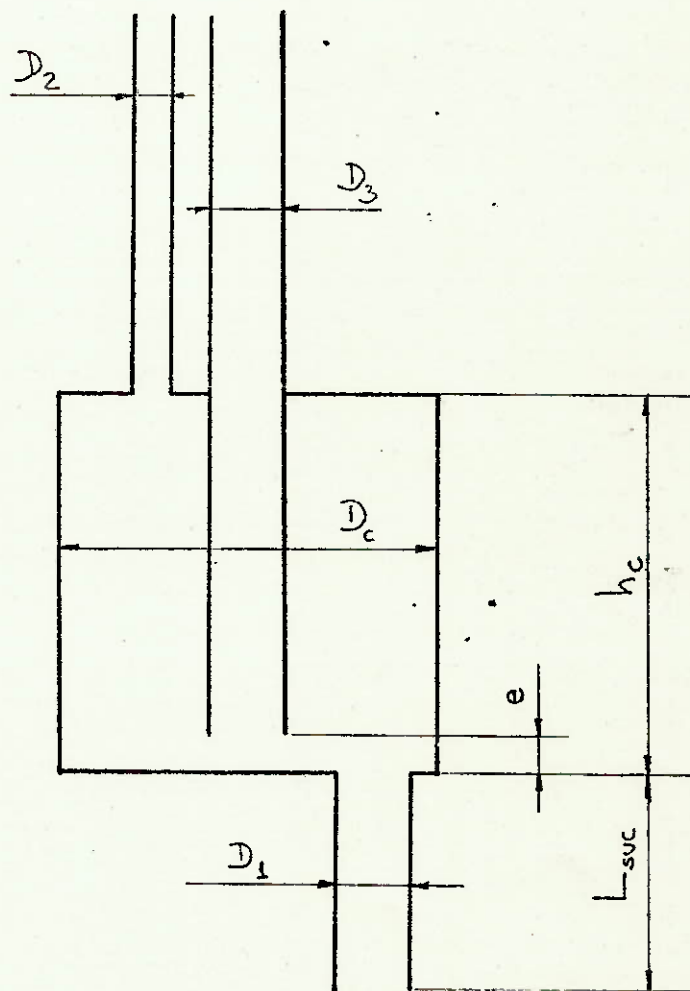
Deste ponto em diante, repete-se o ciclo.

8. MODELO MATEMÁTICO E EQUACIONAMENTO

Passaremos agora à modelagem e ao equacionamento das diversas fases do ciclo de funcionamento dos cilindros da bomba.

Serão discutidas detalhadamente as hipóteses feitas a cada passagem.

Antes de iniciarmos o estudo do ciclo de funcionamento do cilindro, vamos fixar uma geometria para o mesmo:



onde:

D_c = diâmetro do cilindro

D_1 = diâmetro da tubulação de sucção

D_2 = diâmetro da tubulação de ar comprimido

D_3 = diâmetro da tubulação de recalque

h_c = altura do cilindro

e = distância entre o fundo do cilindro e o início da tubulação de recalque

L_{suc} = comprimento da tubulação de sucção

Serão definidos ainda:

h_{uc} = altura útil do cilindro

$h_{uc} = h_c - e$

V_{uc} = volume útil do cilindro

$V_{uc} = A \cdot h_{uc}$

onde $A = A_c - A_3$

A_c = área da seção transversal do cilindro

A_3 = área da seção transversal da tubulação de recalque

A_1 = área da seção transversal da tubulação de sucção

A_2 = área da seção transversal da tubulação de ar comprimido

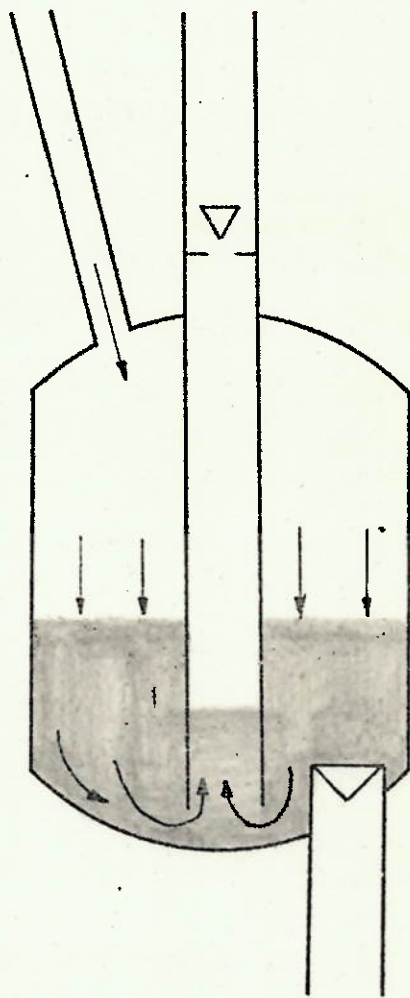
L_{AR} = comprimento da tubulação de ar comprimido

L_{REC} = comprimento total da tubulação de recalque

L_{VREC} = comprimento na vertical da tubulação de recalque

Demais parâmetros físicos e geométricos serão definidos à medida que se tornarem necessários.

Na realidade, os cilindros não possuem esta geometria por razões construtivas e de resistência, bem como, é importante observar a necessidade da parte inferior ter uma curvatura, a fim de orientar e facilitar a penetração da mistura na tubulação de recalque.



O estudo das fases do ciclo de funcionamento envolve fluxos de massa, portanto faremos a análise especificando volumes de controle. Vamos recordar algumas equações, escritas em termos de volume de controle.

Equação de continuidade ou conservação da massa.

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (8.a)$$

Teorema do impulso ou da quantidade de movimento

$$\sum \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{V} dV + \int_{SC} (\rho \vec{V} \cdot \vec{ds}) \vec{V} \quad (8.b)$$

Equação da primeira lei ou conservação da energia

$$\dot{Q}_{VC} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \left(u + \frac{v^2}{2} + zg \right) \rho \, dV + \int_{SC} \left(h + \frac{v^2}{2} + zg \right) \rho \vec{V} \cdot \vec{n} \, dS + \dot{W}_{VC} \quad (8.c)$$

8.1. FASE DE RECALQUE

A fase de recalque se inicia com o cilindro totalmente preenchido pela mistura (fig.8.1).

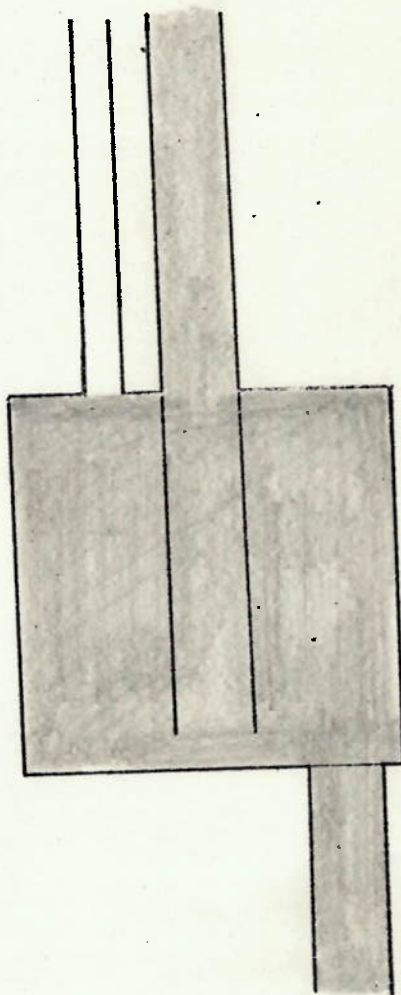


fig. 8.1

A mistura que irá ser recalcada será suposta como sendo um fluido Newtoniano. Muitos fluidos usuais nas aplicações de engenharia têm um comportamento que faz com que possam ser considerados fluidos Newtonianos.

Especificamente nos trabalhos de dragagem, os fluídos encontrados na maioria das vezes não podem ser considerados como Newtonianos, podendo ser classificados entre os plásticos de Bingham e os fluídos pseudoplásticos.

As equações que regem o escoamento desses fluídos diferem bastante das equações que regem o escoamento dos fluídos Newtonianos.

Vamos considerar um volume de controle cuja superfície coincide com a tubulação de recalque em toda a sua extensão (fig.8.2).

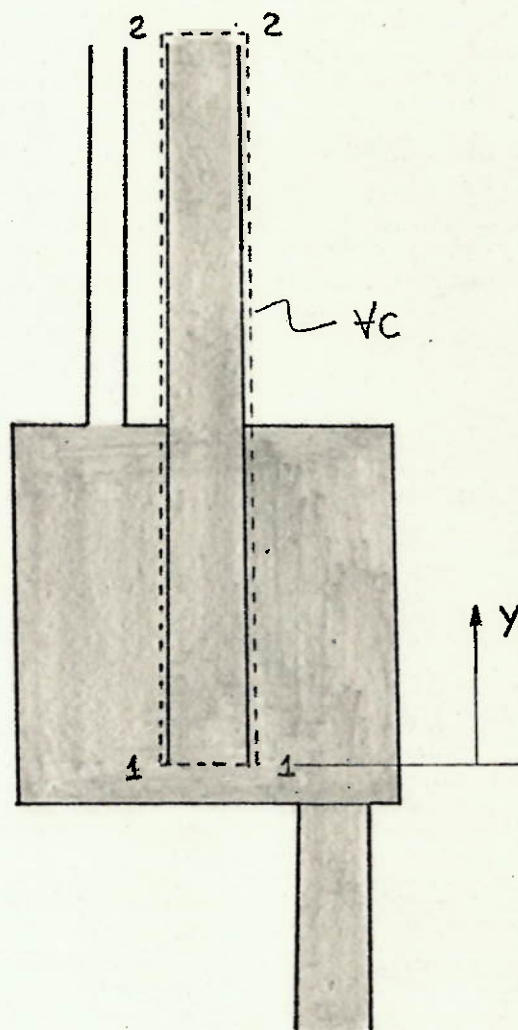


fig. 8.2

Aplicando a equação (8.b) ao volume de controle e, considerando as seguintes hipóteses:

a) o estado da mistura é uniforme ao longo de todo o volume de controle em qualquer instante.

b) as velocidades nas seções 1-1 e 2-2 são iguais,

obteremos a equação (8.1.1.)

As hipóteses a) e b) são válidas apenas quando o comprimento total da tubulação de recalque é pequeno.

Para comprimentos maiores não poderemos desprezar a inércia da mistura dentro da tubulação.

Isto pode ser levado em conta através do método das características.

$$A_3 L_{REC} \rho_m \ddot{y} - (p_1 - p_{ATM}) A_3 + A_3 L_{VREC} \rho_m g + F_{AT} = 0 \quad (8.1.1.)$$

onde:

ρ_m = densidade da mistura

p_1 = pressão na seção 1-1.

F_{AT} = força de atrito na parede da tubulação de recalque.

A pressão na seção 1-1 é constituída por duas parcelas

$$p_1 = p_{comp} + p_{cm} \quad (8.1.2.)$$

A primeira parcela,

p_{comp} , é a pressão do ar que chega ao cilindro através da tubulação de ar comprimido.

Adotaremos como hipótese que esta pressão seja constante. Na realidade esta pressão não é constante, mas sim, função do tempo.

Se o compressor estiver ligado diretamente à tubulação de ar, continuamente existirão pulsos de pressão na tubulação e dentro do cilindro.

Além do mais, durante a fase de recalque a pressão do ar dentro do cilindro irá variar, sendo função de capacidade do compressor.

Se tivermos a tubulação de ar ligada a um reservatório onde há ar comprimido armazenado, poderemos imaginar que ocorrerá um processo politrópico de expansão do ar ($pV^n = \text{cte}$) através da tubulação de ar comprimido e dentro do cilindro.

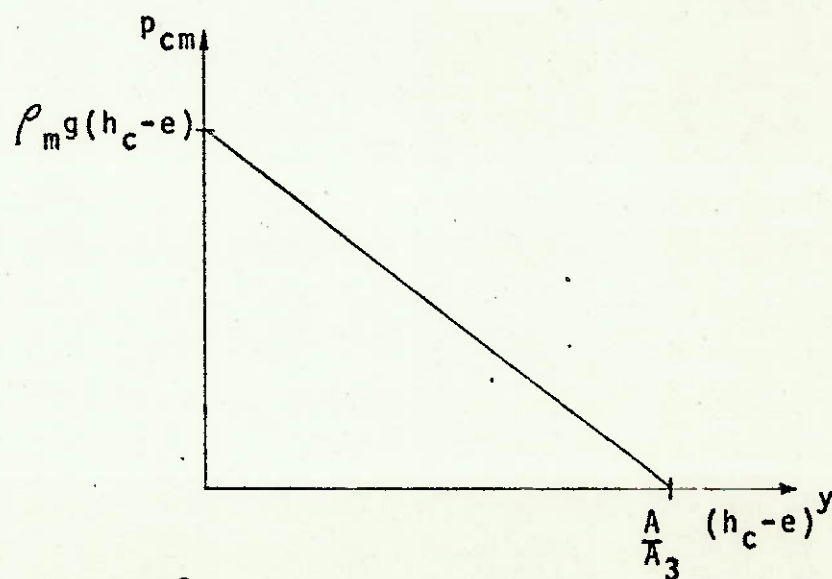
Para que a hipótese adotada (pressão do ar dentro do cilindro constante ao longo da fase de recalque) seja verdadeira, o volume do reservatório deveria ser enorme comparado à soma dos volumes da tubulação de ar e do cilindro.

Para que a diferença entre a pressão no início do processo e no final do mesmo seja pequena, a fim de adotarmos uma pressão média para o processo, o volume do reservatório novamente deveria ser muito maior do que a soma dos volumes da tubulação de ar e do cilindro

Obs.: Quando da análise considerando o reservatório de ar, desprezou-se a massa de ar que existia dentro da tubulação de ar comprimido no início da fase de recalque.

A segunda parcela, p_{cm} , é a pressão devida à coluna de mistura dentro do cilindro.

O gráfico abaixo indica como p_{cm} varia com y



$$p_{cm} = - \frac{A_3 \rho_m g}{A} y + \rho_m g (h_c - e) \quad (8.1.3.)$$

A força de atrito F_{AT} é obtida a partir de:

$$F_{AT} = \tau_o \pi D_3 (L_{REC} + L_E) \quad (8.1.4.)$$

onde

τ_o = tensão de cisalhamento junto à parede da tubulação de recalque, e é expressa através de:

$$\tau_o = \frac{f_3}{8} \rho_m \dot{y}^2 \quad (8.1.5.)$$

f_3 é o coeficiente de atrito da tubulação de recalque que é função da rugosidade relativa $\frac{\lambda}{D}$ e do número de Reynolds (Re)

Por hipótese, vamos assumir f_3 constante.

L_E = comprimento equivalente de tubulação

$$L_E = \frac{D_3 \sum K_i}{f_3} \quad (8.1.6.)$$

onde $K_1, K_2, K_3, \dots$ são os coeficientes de perda de carga singular da tubulação de recalque.

A vazão através da tubulação de recalque a cada instante será obtida a partir de

$$Q = A_3 \dot{y} \quad (8.1.7.)$$

O volume recalcado até o instante t será obtido através de:

$$v_t = \int_0^t Q \quad (8.1.8.)$$

$$v_t = A_3 \cdot y / \quad (8.1.8.)$$

8.2. FASE DE ALÍVIO DA PRESSÃO DO AR NO INTERIOR DO CILINDRO

Esta fase inicia quando o nível da mistura dentro do cilindro atinge o início da tubulação de recalque (fig.8.3.)

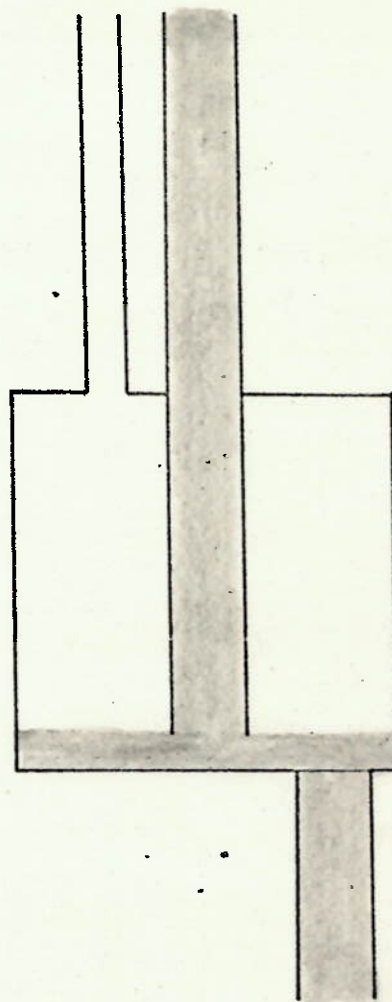


fig. 8.3

Iremos supor que o distribuidor descarrega o ar do cilindro diretamente na atmosfera.
Vamos adotar o volume de controle indicado na figura abaixo:

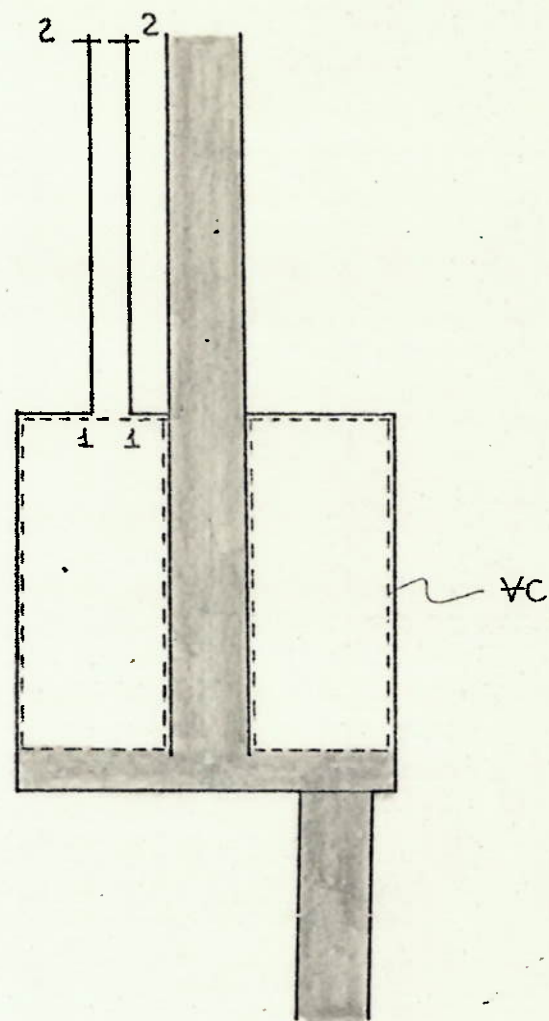


fig. 8.4

As hipóteses adotadas serão as seguintes:

- a) as propriedades do ar são uniformes ao longo de todo o volume de controle (inclusive a seção 1-1) em qualquer instante.
- b) o processo dentro do cilindro e o escoamento do ar na tubulação são adiabáticos.
- c) o ar será considerado como gás perfeito.

- d) os calores específicos a pressão e a volume constante do ar serão considerados constantes.
- e) Para a tubulação de ar serão válidas a cada instante as equações para o escoamento adiabático com atrito de um gás perfeito em regime permanente.

Aplicando a equação (8.a) ao volume de controle obteremos:

$$\frac{d}{dt} \rho_{AR} = - \frac{\rho_{AR} V_1 A_2}{V_{UC}} \quad (8.2.1.)$$

Aplicando a equação (8.c) ao volume de controle obteremos:

$$\frac{d}{dt} T_{AR} = \frac{1}{V_{UC}} \left[T_{AR} V_1 A_2 - V_1 A_2 k T_{AR} - \frac{V_1^3 A_2}{2C_{V0}} \right] \quad (8.2.2.)$$

onde: ρ_{AR} = densidade do ar dentro do volume de controle

T_{AR} = temperatura do ar dentro do volume de controle.

V_1 = velocidade do ar na seção 1-1

k = relação entre os calores específicos

$$k = \frac{C_{p0}}{C_{v0}}$$

C_{p0} = calor específico a pressão constante

C_{v0} = calor específico a volume constante

A pressão do ar dentro do volume de controle a cada instante, pode ser calculada a partir de:

$$p_{AR} = \rho_{AR} R T_{AR} \quad (8.2.3.)$$

Na realidade, quando o distribuidor abre a tubulação de ar para a atmosfera, a diferença de pressão começa a acelerar sucessivas parcelas da massa de ar que entra na tubulação. Teremos portanto ondas de pressão caminhando dentro da tubulação e dentro do cilindro, fazendo com que o estado do ar ao longo do volume de controle não seja uniforme a cada instante.

A hipótese b) pode ser considerada verdadeira, devido à extrema rapidez com a qual o fenômeno ocorre.

Se examinarmos o diagrama de compressibilidade do nitrogênio, veremos que $Z = pv/RT$ é bem próximo de 1 na faixa de pressões entre 1 e 10 bar para temperaturas acima de 150°K. Isto torna aceitável a hipótese c).

Os calores específicos são propriedades termodinâmicas e portanto são função da temperatura e da pressão. Para os gases perfeitos, os calores específicos são função apenas da temperatura. O erro cometido adotando-se a hipótese d) é pequeno. Os valores abaixo exemplificam essa afirmação.

Nitrogênio 300°K $C_{p0} = 1042 \text{ J/kg } ^\circ\text{K}$

1000°K $C_{p0} = 1169 \text{ J/kg } ^\circ\text{K}$

A fase de alívio da pressão pode ser dividida em duas partes:

8.2.1. FASE DE ALÍVIO DA PRESSÃO DO AR COM CONDIÇÃO SÔNICA NA SAÍDA DA TUBULAÇÃO DE AR

Enquanto a pressão na seção 1-1 (e consequentemente dentro do cilindro, por hipótese) for superior ou igual à pressão crítica definida pela equação (8.2.1.1.), teremos na seção 2-2, M_2 constante e igual a 1 (condição sônica).

$$p_1 = \frac{p_{ATM}}{M_1} \sqrt{\frac{k+1}{2(1+\frac{k-1}{2}M_1^2)}} \quad (8.2.1.1.)$$

onde M_1 representa o número de Mach na seção 1-1, que é constante e pode ser obtido iterativamente a partir de:

$$M_1^2 = \frac{1 - M_1^2}{k f_2 \frac{L_{AR}}{D_2}} + \frac{M_1^2 (k+1)}{2 f_2 \frac{L_{AR}}{D_2} k} \ln \frac{(k+1)M_1^2}{2(1+\frac{k-1}{2}M_1^2)}$$

onde f_2 é coeficiente de atrito da tubulação de ar. Podemos calcular agora a velocidade do ar na seção 1-1 (V_1)

$$V_1 = M_1 \sqrt{k R T_1}$$

e, por hipótese

$$V_1 = M_1 \sqrt{k R T_{AR}} \quad (8.2.1.3.)$$

8.2.2. FASE DE ALÍVIO DA PRESSÃO DO AR COM CONDIÇÃO SUBSÔNICA NA SAÍDA DA TUBULAÇÃO DE AR

Quando a pressão na seção 1-1 for inferior ao valor calculado através de (8.2.1.1.), o escoamento atin- girá a seção 2-2 com M_2 menor do que 1.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{M_2}{M_1} \sqrt{\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_2^2}{1 + \frac{k-1}{2} M_1^2}}$$

lembrando que $p_1 = p_{AR}$ e $p_2 = p_{ATM}$, após algumas passagens obtemos:

$$P_{ATM}^2 \frac{(k-1)}{2} M_2^4 + P_{ATM}^2 M_2^2 - P_{AR}^2 M_1^2 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2\right) = 0 \quad (8.2.2.1.)$$

Da equação acima obtemos o valor de M_2 a cada instante, e podemos obter o valor de M_1 , iterativamente, a partir de

$$M_1^2 = \frac{1 - M_2^2}{k f_{2 \frac{L_{AR}}{D_2}}} - \frac{M_1^2 (1 - M_2^2)}{M_2^2 k f_{2 \frac{L_{AR}}{D_2}}} + \frac{M_1^2 (k+1)}{2 f_{2 \frac{L_{AR}}{D_2}}^k} \ln \frac{M_1^2 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_2^2\right)}{M_2^2 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2\right)} \quad (8.2.2.2.)$$

Novamente podemos calcular o valor de V_1 através de
(8.2.1.3.)

8.3. FASE DE ADMISSÃO DA MISTURA NO CILINDRO

A fase de admissão da mistura no cilindro se inicia quando a pressão do ar dentro do cilindro atinge (fig.8.5).

$$p_{AR} = \rho_{AG} g H_{AG} + p_{ATM} - \rho_m g (L_{SUC} + e) \quad (8.3.1.)$$

Consideremos os volumes de controle indicados na fig.8.6

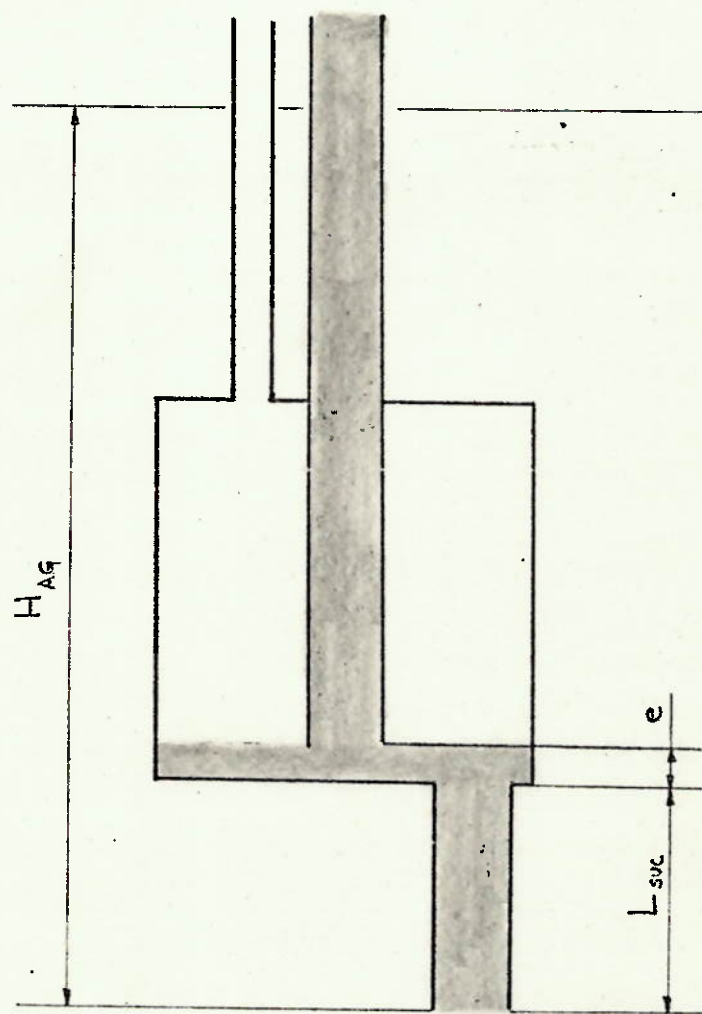


fig. 8.5

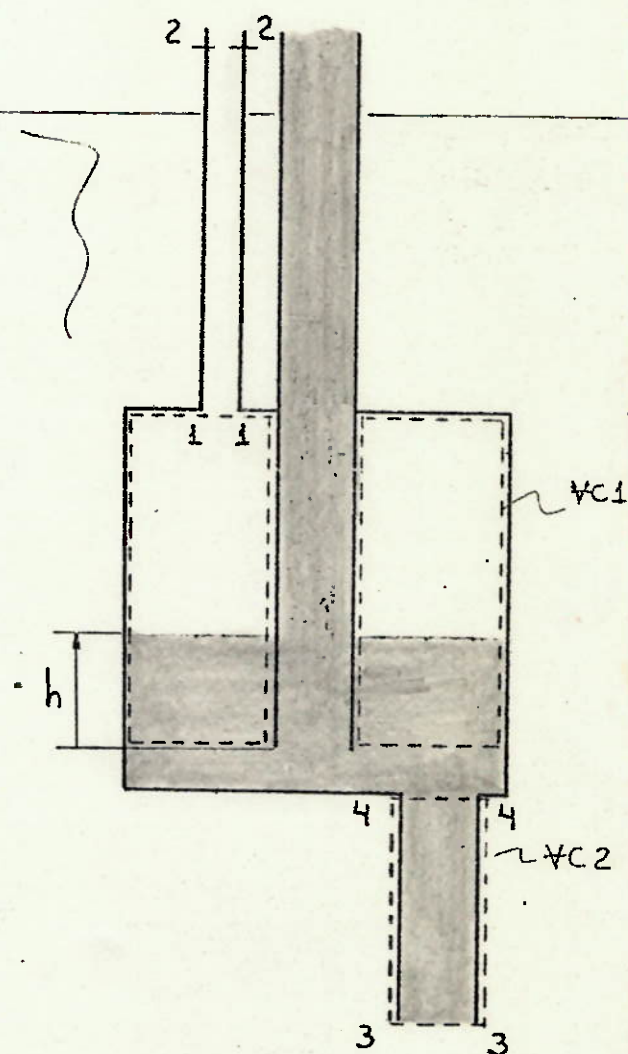


fig. 8.6

e as seguintes hipóteses:

- a) o estado do ar e da mistura ao longo de todo o volume de controle 1 é uniforme em cada instante.
- b) a mistura é incompressível.

- c) o processo dentro do volume de controle 1 é adiabático.
- d) a temperatura da mistura é constante.
- e) o calor específico da mistura é constante.
- f) a energia interna e a entalpia da mistura na mesma temperatura podem ser consideradas iguais.
- g) o ar pode ser considerado como gás perfeito.
- h) o calor específico, a pressão constante e a volume constante do ar serão considerados constantes.
- i) o estado da mistura ao longo de todo o volume de controle 2 é uniforme em cada instante.

As justificativas para as hipóteses a), c), g) e h), são as mesmas que foram apresentadas na fase anterior.

A hipótese d) pode ser justificada, levando-se em conta a rapidez com a qual o fenômeno ocorre.

Para líquidos comprimidos, podemos confundir o calor específico a pressão constante com o calor específico a volume constante, o que torna aceitável a hipótese f). Os líquidos são praticamente incompressíveis (hipótese b).

Aplicando a equação (8.a) ao volume do controle 1, obtemos:

$$\frac{d}{dt} \rho_{AR} = \frac{\rho_{AR} \frac{A}{dt} h - \rho_{AR} V_1 A_2}{V_{UC} - A.h} \quad (8.3.1)$$

Aplicando a equação (8.c) ao volume de controle 1, obtemos:

$$\frac{dT_{AR}}{dt} = \left[\frac{\rho_m}{2} A \left(\frac{dh}{dt} \right)^3 - \rho_{AR} V_1 A_2 C_{PO} T_{AR} - \rho_{AR} \frac{V_1^3}{2} A_2 + \right. \\ \left. - \rho_{AR} V_1 A_2 h_c g + (\psi_{UC} - Ah) C_{VO} T_{AR} \frac{d\rho_{AR}}{dt} + C_{VO} \rho_{AR} T_{AR} A \frac{dh}{dt} \right] / \\ (\psi_{UC} - Ah) C_{VO} \rho_{AR} \quad (8.3.2.)$$

onde ρ_{AR} = densidade do ar dentro do volume de controle

T_{AR} = temperatura do ar dentro do volume de controle

V_1 = velocidade do ar na seção 1-1

A pressão do ar dentro do volume de controle 1 pode ser obtida a cada instante através da equação (8.2.3.)

Aplicando a equação (8.b) ao volume de controle 2, obtemos:

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = \frac{p_3 - p_4 - \Delta p - L_{SUC} \rho_m g}{\rho_m L_{SUC} \frac{A}{A_1}} \quad (8.3.4.)$$

onde

ρ_m = densidade da mistura

p_4 = pressão na seção 4-4

$$p_4 = p_{AR} + \rho_m g (h+e) \quad (8.3.5.)$$

p_3 = pressão na seção 3-3

$$p_3 = \rho_{AG} g H_{AG} + p_{ATM} \quad (8.3.6.)$$

ρ_{AG} = densidade da água

Δ_p = perda de pressão devido às perdas de carga singular e distribuída na tubulação de sucção.

$$\Delta_p = \frac{\rho_m}{2} \left(\sum K_i + f_1 \frac{L_{SUC}}{D_1} \right) v_m^2 \quad (8.3.7.)$$

$K_1, K_2, K_3 \dots$ são os coeficientes de perda de carga singular da tubulação de sucção

V_m é a velocidade da mistura dentro da tubulação de sucção.

$$V_m = \frac{A}{A_1} \frac{dh}{dt} \quad (8.3.8.)$$

Os valores de M_1, M_2 e V_1 podem ser obtidos a partir das equações (8.2.2.1.), (8.2.2.2.) e (8.2.1.3.) respectivamente.

O ar continua escoando com condição subsônica na saída da tubulação de ar.

9. MÉTODO NUMÉRICO PARA SOLUÇÃO

Para solucionar as equações obtidas no capítulo anterior foi utilizado um programa denominado CSMP73.

O CSMP73 (Continuous System Modeling Program) foi criado para facilitar a simulação digital de processos contínuos, no B6700.

O programa possui uma linguagem especial que permite a estruturação de problemas a partir da representação na forma de diagrama de blocos, ou na forma de um conjunto de blocos funcionais, através dos quais os componentes de um sistema contínuo podem ser representados, aceitando comandos para definir as conexões entre esses blocos funcionais.

O programa também aceita comandos FORTRAN.

A saída de dados é produzida através de comandos de controle simples.

Duas características importantes do programa, são a sequência dos comandos e a escolha do método de integração.

Com poucas exceções, os comandos podem ser escritos em qualquer ordem, sendo que por opção do usuário, o programa se encarrega de ordenar os comandos a fim de estabelecer o fluxo correto de informações.

Podem ser escolhidos 6 métodos diferentes de integração e também os intervalos de integração.

Cada processamento do CSMP envolve três fases. Na primeira, o programa é traduzido, e na ausência de erros, é produzido um programa FORTRAN. Na segunda, esse programa é compilado e também na ausência de erros, o programa é executado, o que constitui a terceira fase.

Num mesmo processamento, pode-se simular o mesmo modelo com parâmetros diferentes.

Vide apêndice, onde estão simuladas as diversas fases do ciclo de funcionamento dos cilindros da bomba.

10. INTERPRETAÇÃO DOS FENÔMENOS QUE OCORREM NAS DIVERSAS
FASES DO CICLO DE FUNCIONAMENTO DOS CILINDROS D. BOMBA

Neste capítulo, para cada fase do ciclo de funcionamento dos cilindros, são levantadas curvas que indicam a variação das principais variáveis de interesse.

Para identificação e coleta dos valores das variáveis vide apêndice no final deste trabalho.

10.1. FASE DE RECALQUE

Tempo total de duração da fase: 13,93 s

GRÁFICO	VARIÁVEL	VALOR			
		INICIAL	FINAL	MÍNIMO	MÁXIMO
1	$p_1 \times 10^5$ (N/m ²)	7,2156	7,0000	7,0000	7,2156
2	F_{AT} (N)	0	12199	0	12199
3	$\frac{d^2y}{dt^2} \times 10^2$ (m/s ²)	42,756	1,7693	1,7693	42,756
4	$Q \times 10^{-2}$ (m ³ /s)	0	8,4323	0	8,4323
5	$\psi_t \times 10^{-1}$ (m ³)	0	8,2944	0	8,2944

GRÁFICO 1

$p_1 \text{ (N/m}^2\text{)} \times t \text{ (s)}$

$\times 10^5$

7.2

7.1

7.0

GRÁFICO 2

$F_{AT} \text{ (N)} \times t \text{ (s)}$

$\times 10^3$

10.0

5.0

0

5.0

10.0

15.0

GRÁFICO 3

$$\frac{d^2y}{dt^2} \text{ (m/s}^2\text{)} \times t \text{ (s)}$$

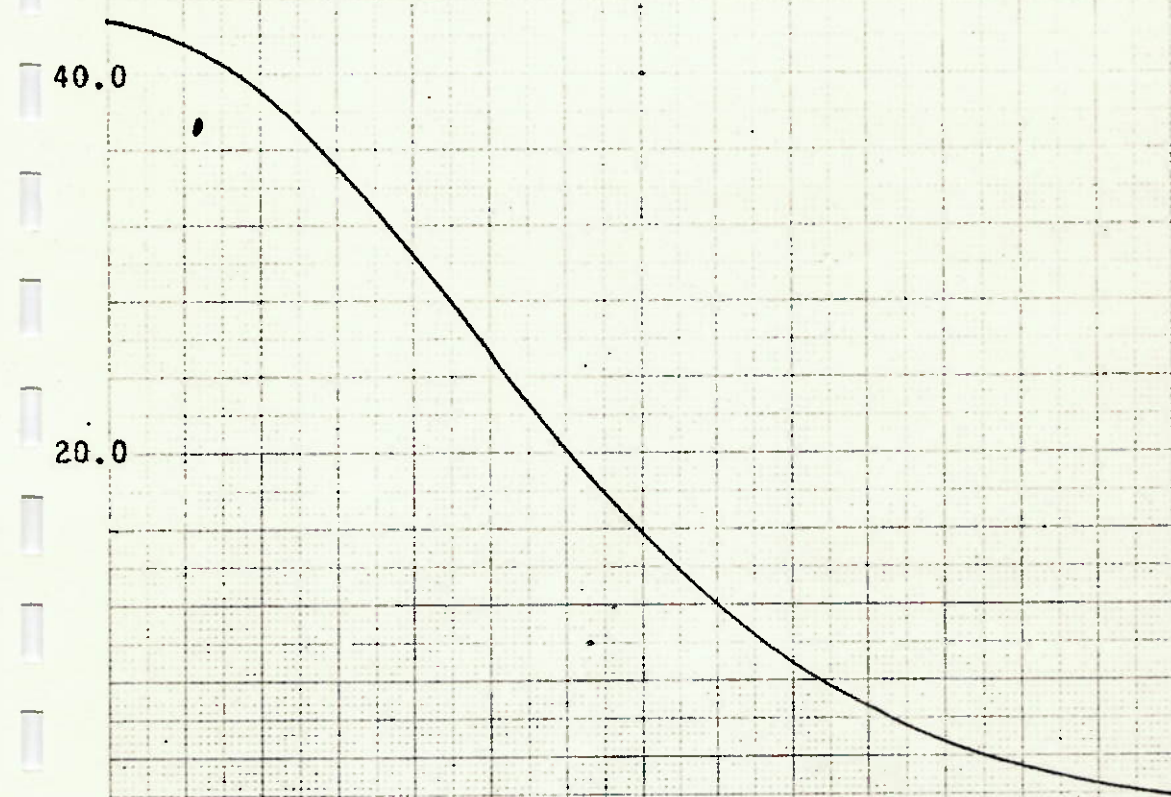


GRÁFICO 4

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} \times t \text{ (s)}$$

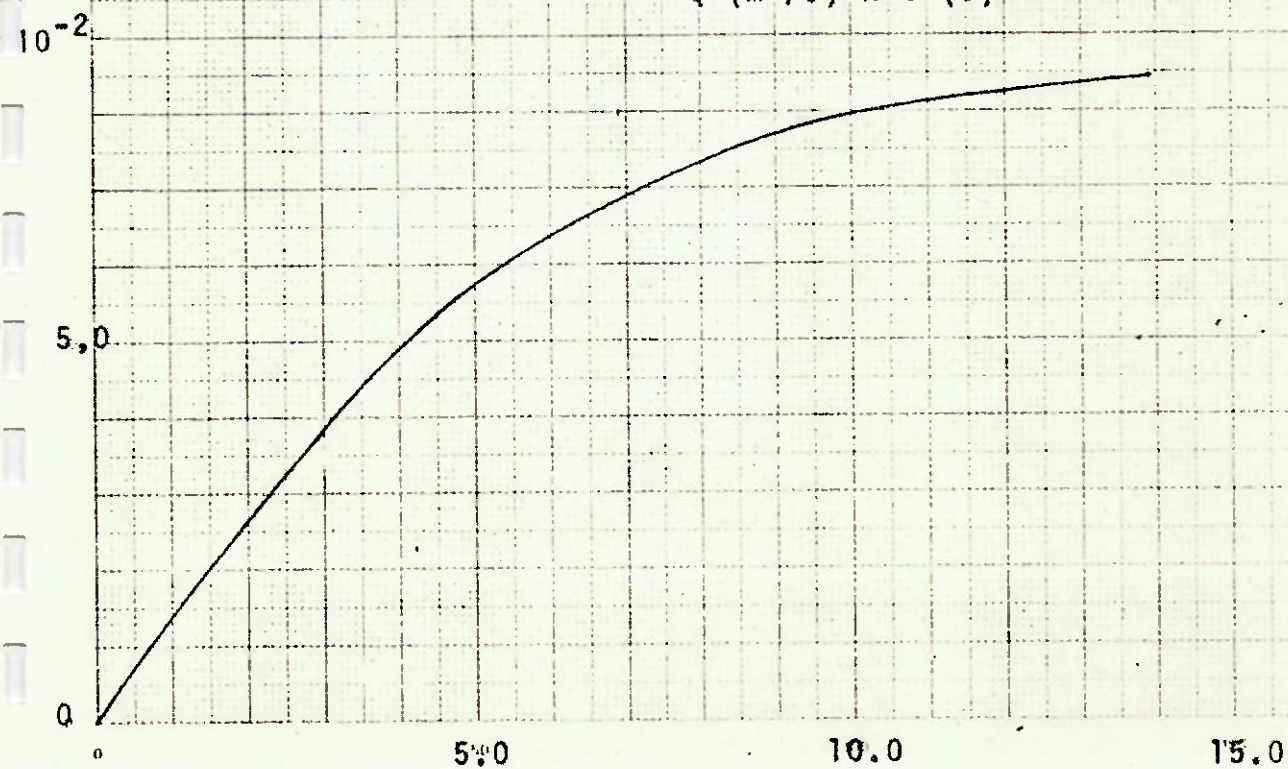


GRÁFICO 5

$$v_t(m^3) \times t(s)$$

$\times 10^{-1}$

8.0

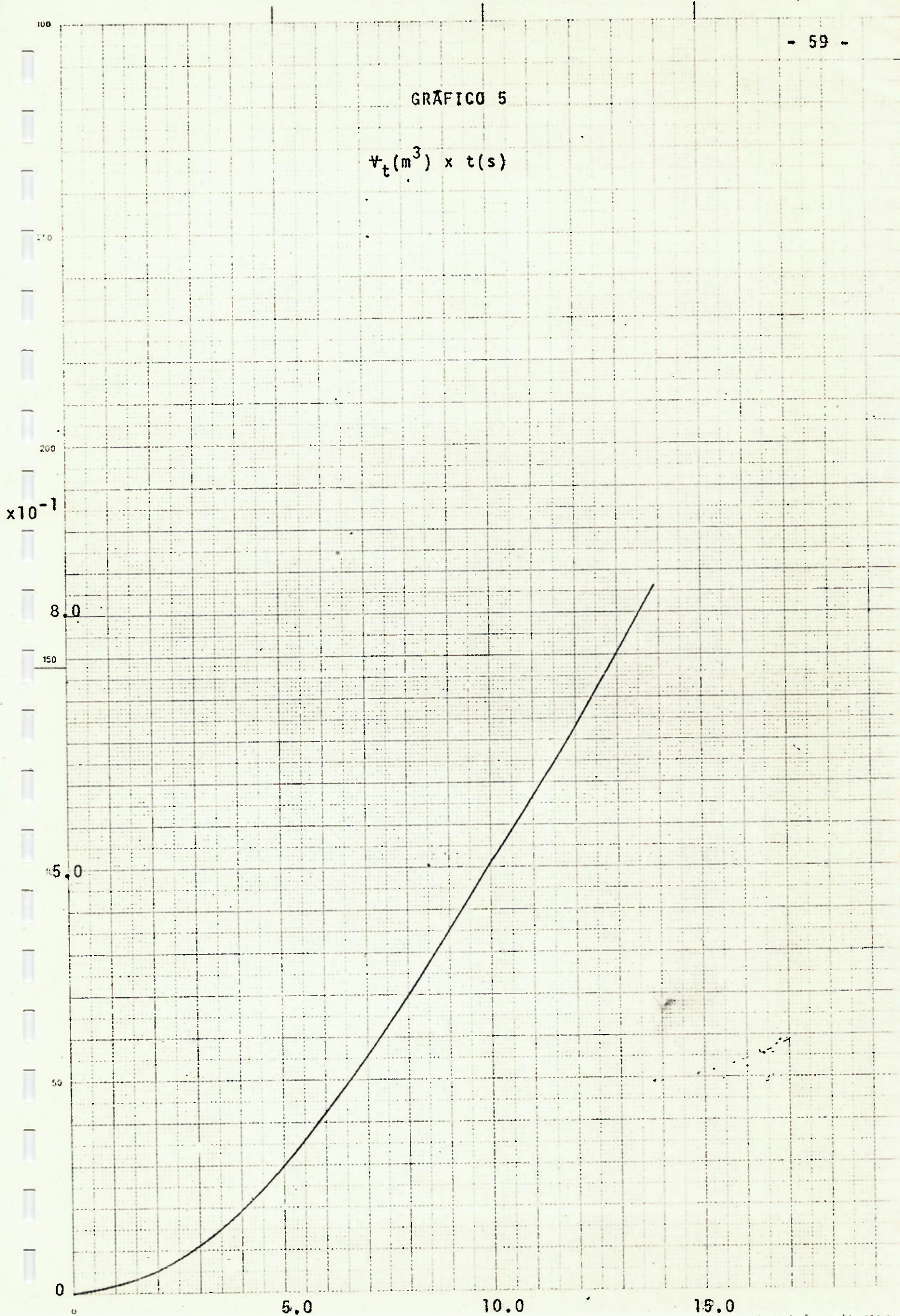
5.0

0

5.0

10.0

15.0



10.2. FASE DE ALÍVIO DA PRESSÃO DO AR NO INTERIOR DO CILINDRO

Tempo total de duração da fase: 0,843 s

<u>GRÁFICO</u>	<u>VARIÁVEL</u>	<u>INICIAL</u>	<u>FINAL</u>	<u>VALOR</u>	
				<u>MÍNIMO</u>	<u>MÁXIMO</u>
6	ρ_{AR} (kg/m ³)	7,7184	3,0234	3,0234	7,7184
7	$T_{AR} \times 10^2$ (°K)	3,1600	2,0980	2,0980	3,1600
8	$p_{AR} \times 10^5$ (N/m ²)	7,0000	1,8204	1,8204	7,0000
9	$V_1 \times 10^2$ (m/s)	1,3083	1,0262	1,0262	1,3083
10	$M_1 \times 10^{-1}$	3,6716	3,5343	3,5343	3,6716
11	M_2	1,0000	0,63909	0,63909	1,0000

GRÁFICO 6

$$\rho_{AR}(\text{kg/m}^3) \times t(\text{s})$$

5.0

2.0

GRÁFICO 7

$$T_{AR}(\text{°K}) \times t(\text{s})$$

200

100

Condição subsônica na saída
da tubulação de ar

Condição sônica na saída
da tubulação de ar

GRÁFICO 8

$$P_{AR}(\text{N/m}^2) \times t(\text{s})$$

x 5

7.0

1.0

0

0.1

50

0.5

150

GRÁFICO 9

$V_1 (m/s) \times t (s)$

130

120

110

GRÁFICO 10

$M_1 \times t (s)$

0.37

0.36

0.35

GRÁFICO 11

$M_2 \times t (s)$

1.0

0.5

Condição sônica na saída da
tubulação de ar

Condição subsônica na saída da
tubulação de ar

0

0.1

0.2

0.5

1.0

10.3 FASE DE ADMISSÃO DA MISTURA NO CILINDRO

Tempo total de duração da fase: 6,8 s

GRÁFICO	VARIÁVEL	INICIAL	VALOR		
			FINAL	MÍNIMO	MÁXIMO
12	h (m)	0	1,0942	0	1,0942
13	v_m (m/s)	0	3,6779	0	4,2258
14	$\frac{d^2h}{dt^2} \times 10^{-2}$ (m/s ²)	0,80981	-1,1152	-1,1152	66,081
15	ρ_{AR} (kg/m ³)	3,0234	8,7655	2,0228	8,7655
16	T_{AR} (°K)	209,80	39,541	39,541	209,80
17	$p_{AR} \times 10^4$ (N/m ²)	18,205	9,9472	9,8450	18,205
18	v_1 (m/s)	102,62	10,490	102,62	10,490
19	$M_1 \times 10^{-1}$	3,5344	0,83221	0,46545	3,5344
20	$M_2 \times 10^{-1}$	6,3911	0,84469	0,46758	6,3911

GRÁFICO 12

$h(m) \times t(s)$

1.0

0.5

0

GRÁFICO 13

$V_m(m/s) \times t(s)$

4.0

2.0

0

2.0

5.0

150

GRÁFICO 14

$$\frac{d^2 h}{dt^2} (m/s^2) \times t(s)$$

$\times 10^{-2}$

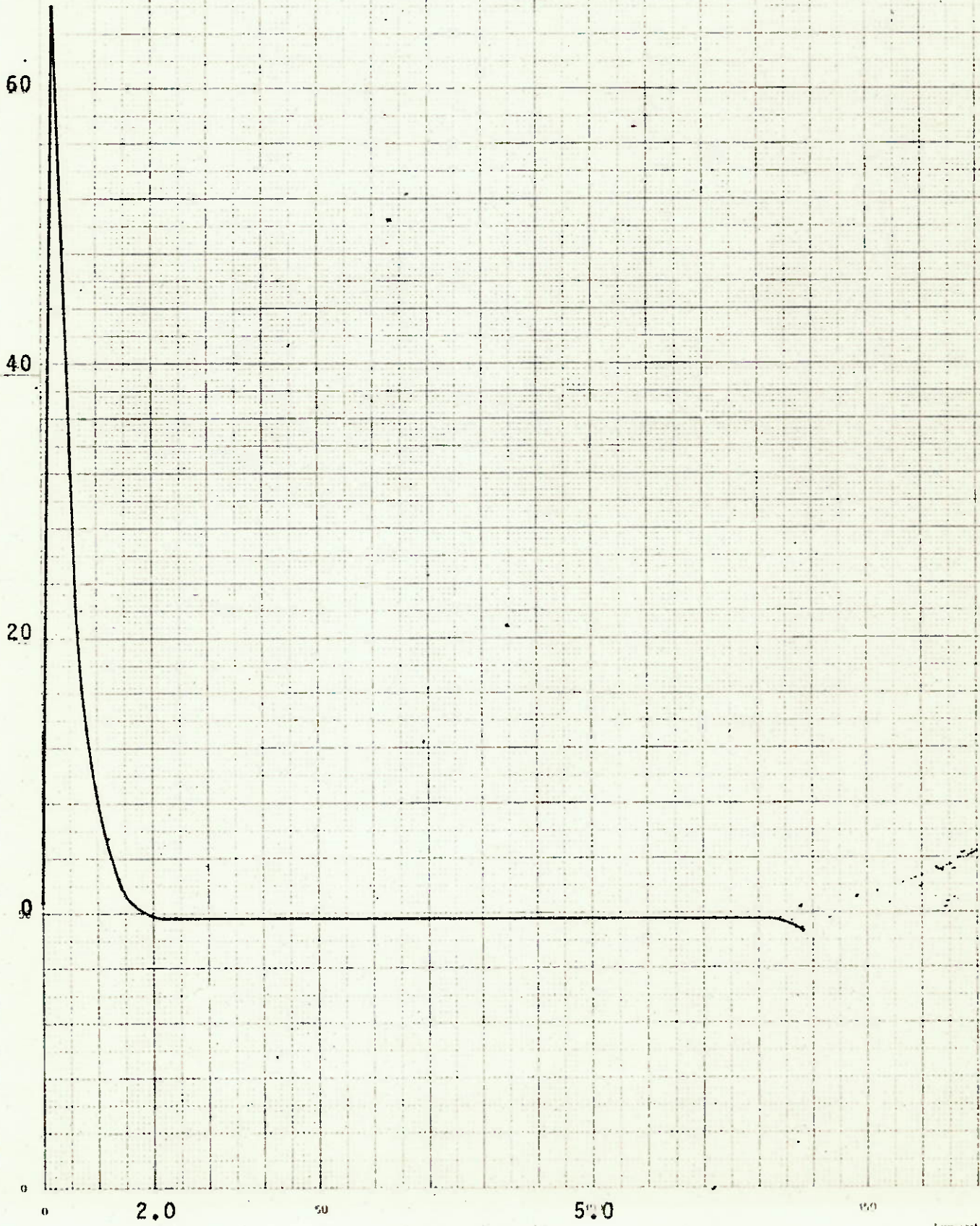


GRÁFICO 15

$\rho_{AR}(\text{kg/m}^3) \times t \text{ (s)}$

8.0

6.0

4.0

GRÁFICO 16

$T_{AR}(\text{°K}) \times t \text{ (s)}$

200

100

GRÁFICO 17

$p_{AR}(\text{N/m}^2) \times t \text{ (s)}$

$\times 10^4$

1.0

0.0

2.0

50

5.0

100

GRÁFICO 18

$V_1 (m/s) \times t (s)$

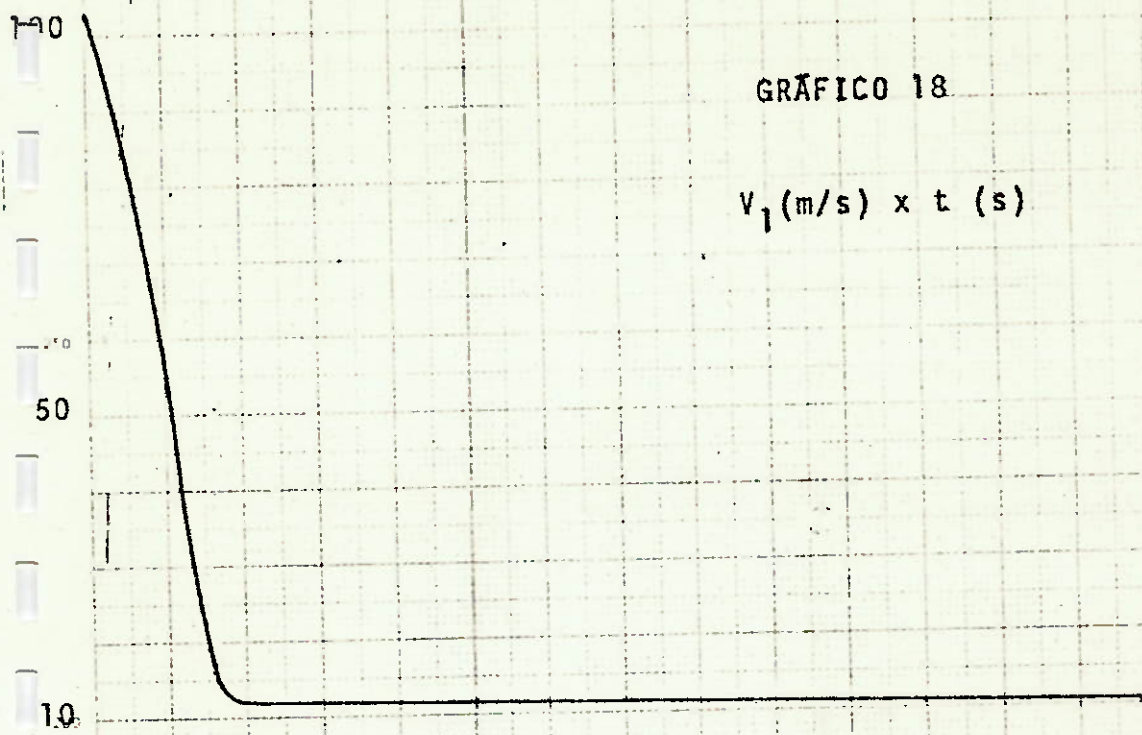


GRÁFICO 19

$M_1 \times t (s)$

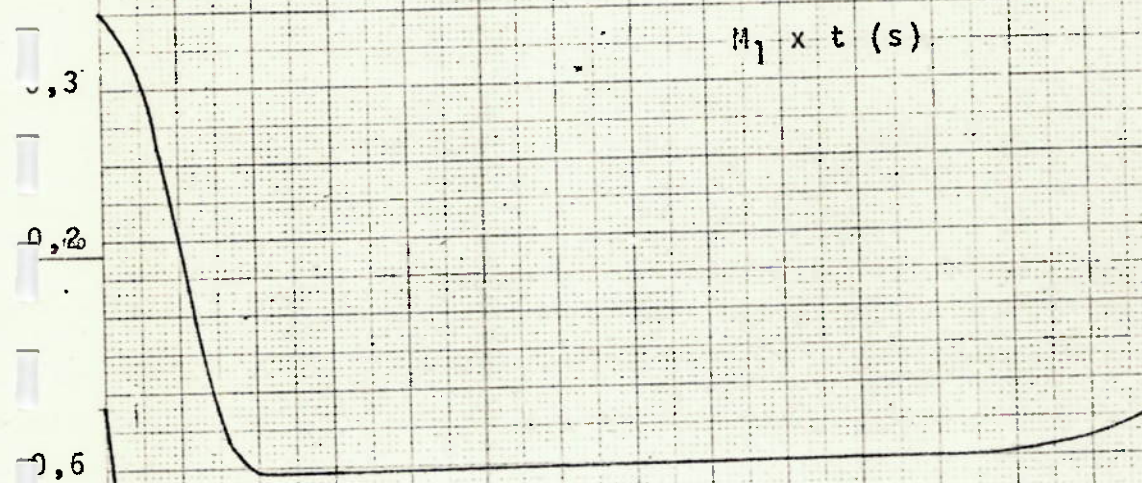
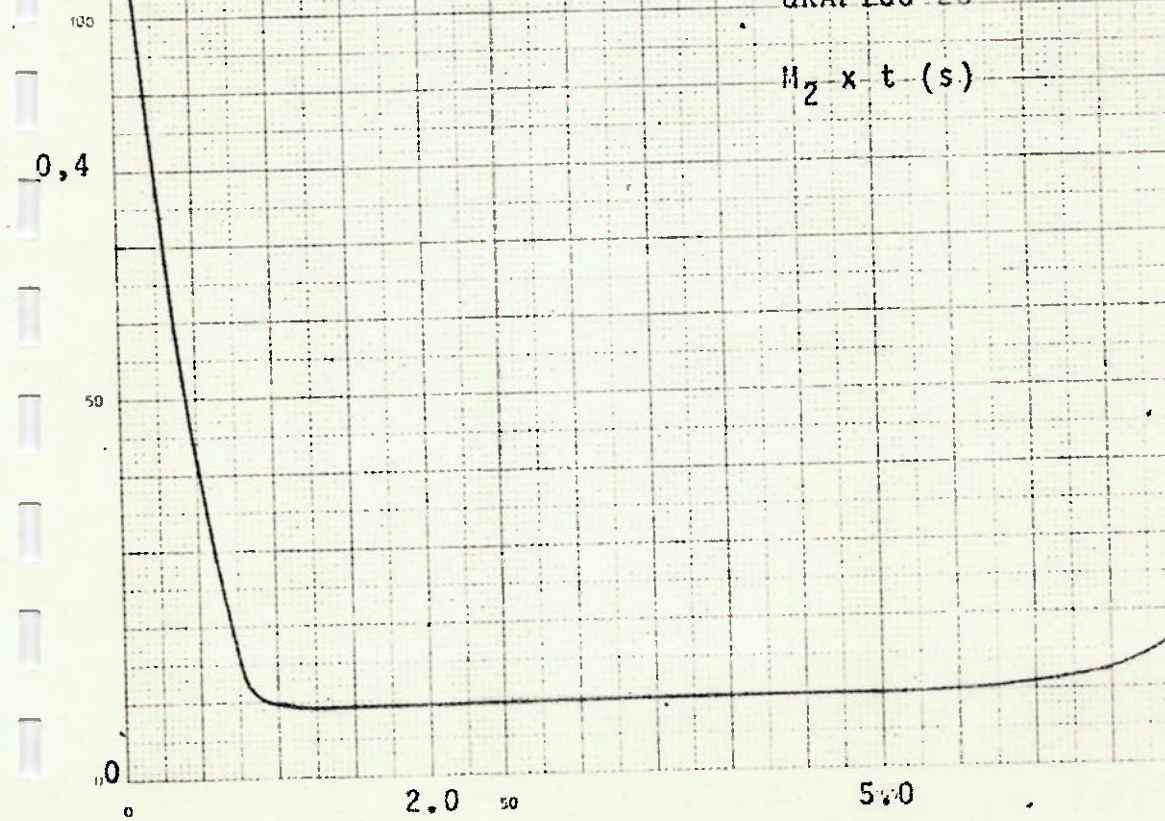


GRÁFICO 20

$M_2 \times t (s)$



11. CONCLUSÕES

Examinando o comportamento das variáveis P_{AR} e T_{AR} ao longo das fases 10.2 e 10.3 do ciclo, podemos concluir o seguinte:

- Para P_{AR} observamos que durante a fase 10.3, seu valor se eleva enormemente quando chegamos ao final da fase.

Esse comportamento pode ser explicado através da eq. (8.3.1).

Quando h tende a h_{UC} vemos que $\frac{dP_{AR}}{dt}$ tende a $+\infty$. Isto nos mostra que a hipótese de que as propriedades do ar são uniformes ao longo de todo o volume de controle a cada instante, compromete os resultados obtidos.

O problema deveria ter sido equacionado em termos das propriedades locais ao longo do volume de controle.

- Para T_{AR} , vemos que no final da fase 10.3, seu valor atinge o absurdo de 390K.

- Examinando a eq. (8.3.2) vemos que quando h tende a h_{UC} , $\frac{dT_{AR}}{dt}$ tende a $-\infty$

Além da hipótese que foi citada no item anterior, há outras que juntamente concorrem para causar esse comportamento. As mais importantes são:

- . o processo dentro do volume de controle para o ar é adiabático.
- . a temperatura da mistura dentro do volume de controle é constante.

Mesmo mantendo a hipótese de que as propriedades do ar e da mistura são uniformes ao longo do volume de controle, poderíamos melhorar os resultados:

- . tentando equacionar as trocas de calor do cilindro e do ar escoando na tubulação, com o meio adjacente, através de fórmulas teórico empíricas.
- . utilizando equações de estado mais sofisticadas para o ar, tal como a de BEATTIE - BRIDGEMAN
- . utilizando equações para C_{po} ou C_{vo} em função da temperatura.

12. GENERALIZAÇÃO - REPETIBILIDADE DOS CICLOS

No estudo que faremos a seguir as diversas fases do ciclo serão assim identificadas:

1a. Fase - fase de recalque

2a. Fase - fase de alívio da pressão do ar no interior do cilindro.

3a. Fase - fase de admissão da mistura no cilindro.

A determinação dos tempos de duração das diversas fases é fundamental para o ajuste do cérebro do sistema, (distribuidor) e conseqüentemente para a repetibilidade dos ciclos.

A 1a. fase é totalmente independente da 2a. e da 3a. Alterando a pressão do ar que é injetado nos cilindros, podemos variar o tempo de duração da 1a. fase.

A diminuição do tempo de duração da 2a. e da 3a. fase, pode ser conseguida fazendo com que o distribuidor conecte a tubulação com uma bomba de vácuo ou com um reservatório onde previamente tenha sido feito vácuo. Assim procedendo pode-se manter durante um tempo maior (ou eventualmente durante todo o tempo de duração da 2a. e da 3a. fase), a diferença de pressão entre o início e o final da tubulação de ar acima da diferença de pressão crítica, fazendo com que o escoamento mantenha a condição sônica no final da tubulação.

Essa alternativa deve ser cuidadosamente estudada.

Examinando o exemplo que se encontra no apêndice, vemos que o tempo de duração da 2a. fase foi de 0,843 s, sendo que durante 0,533 s a diferença de pressão manteve-se superior à diferença crítica. Se tivesse sido utilizada uma bomba de vácuo ou um reservatório com vácuo, o tempo total de duração da 2a. fase pouco teria se alterado.

Durante a 3a. fase porém, a diferença de pressão foi sempre inferior à diferença crítica. O uso dos recursos descritos acima aceleraria o tempo de duração da fase.

Obs.: Considera-se que o escoamento do ar na tubulação é adiabático.

Sejam os seguintes intervalos de tempo:

t_1 = intervalo de tempo que compreende o tempo gasto na 1a. fase e, eventualmente, outro intervalo de tempo gasto para fazer com que as condições no início da 1a. fase sejam as mesmas que as do ciclo anterior.
(por exemplo, quando se utiliza um reservatório de ar entre o compressor e o distribuidor).

t_2 = intervalo de tempo que compreende o tempo gasto na 2a. e 3a. fase e, eventualmente, outro intervalo de tempo gasto para fazer com que as condições no início da 2a. fase sejam as mesmas que as do ciclo anterior (por exemplo, quando se utiliza um reservatório onde há vácuo, ao invés de descarregar o ar diretamente na atmosfera).

Vamos examinar como devem se relacionar os intervalos de tempo t_1 , t_2 e o número de cilindros Z da bomba, para que possamos recalcar de forma contínua.

Obs.: $Z > 1$

1º CASO: $t_1 > t_2$

Quando não pudermos fazer com que t_1 seja menor do que t_2 , poderemos utilizar um número qualquer de cilindros (este é o caso do ensaio realizado, vide apêndice).

2º CASO: $t_1 < t_2$

Neste caso, existem duas possibilidades:

- a) Dispomos de Z cilindros e devemos relacionar t_1 com t_2 .

$$\text{Então } t_1 = \frac{t_2}{Z-1}$$

- b) Queremos adequar o número Z de cilindros aos intervalos de tempo t_1 e t_2 conhecidos.

$$\text{Então } Z = 1 + \frac{t_2}{t_1}$$

APÊNDICE

Neste apêndice encontram-se as listagens com os programas e resultados da simulação das diversas fases do ciclo de funcionamento dos cilindros.

A nomenclatura e o valor dos dados de entrada e a nomenclatura das variáveis de saída, estão especificados separadamente em cada fase.

Os dados de entrada são parâmetros constantes e condições iniciais para as equações diferenciais. Os primeiros são fornecidos ao programa através do comando CONST e as condições iniciais através do comando PARAM.

1. FASE DE RECALQUE1.1. DADOS DE ENTRADA

- Geometria do sistema

D_c	DC
-------	----

D_3	D3
-------	----

h_c	HC
-------	----

e	E
-----	---

L_{REC}	LREC
-----------	------

L_{VREC}	LVREC
------------	-------

- Coeficientes de perda de carga

f_3	F_3
-------	-------

Na simulação assumiu-se:

estreitamento brusco de seção KES3

válvula de retenção KVR3

curva de 90° KC90

- Pressão proveniente do compressor ou reservatório de ar.

P_{comp}	PCOMP
------------	-------

- Condições ambientes

ρ_m	ROM
----------	-----

g	G
-----	---

P_{ATM}	PATM
-----------	------

- Outras constantes

π PI

- Condições iniciais para as variáveis y e $\frac{dy}{dt}$

$$y_0 = 0$$

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_0 = 0$$

1.2. VARIÁVEIS DE SAÍDA

P_1	PI
F_{AT}	FAT
$\frac{d^2y}{dt^2}$	$Y2DT$
Q	Q
v_t	VOL

0001 *PUT 5.0
 0002 *ENSAIO N CI
 0003 *
 0004 *
 0005 *GEOMETRIA DO SISTEMA E COEFICIENTES DE PERDA DE CARGA
 0006 *
 0007 *
 0008 *TUBULACAO DE SUCCAO
 0009 *
 0010 *DIAMETRO D1=0.2 M
 0011 *COMPRIMENTO LSUC=0.6 M
 0012 *COEFICIENTE DE ATRITO F1=0.02
 0013 *ESTREITAMENTO BRUSCO DE SECAC KES1=1.0
 0014 *VALVULA DE RETENCAO KVR1=2.5
 0015 *ALARGAMENTO BRUSCO DE SECAC KAS1=1.0
 0016 *
 0017 *CILINDRO
 0018 *
 0019 *DIAMETRO DC=1.0 M
 0020 *ALTURA HC=1.2 M
 0021 *DISTANCIA ENTRE O FUNDO E O INICIO DA TUBULACAO DE RECALQUE E=0.1 M
 0022 *
 0023 *
 0024 *TUBULACAO DE AR COMPRIMIDO
 0025 *
 0026 *
 0027 *DIAMETRO D2=0.1 M
 0028 *COMPRIMENTO LAR=15.0 M
 0029 *COEFICIENTE DE ATRITO F2=0.02
 0030 *
 0031 *
 0032 *TUBULACAO DE RECALQUE
 0033 *
 0034 *DIAMETRO D3=0.2 M
 0035 *COMPRIMENTO TOTAL LREC=500.0 M
 0036 *COMPRIMENTO NA VERTICAL LVREC=10.0 M
 0037 *COEFICIENTE DE ATRITO F3=0.02
 0038 *ESTREITAMENTO BRUSCO DE SECAC KES3=1.0
 0039 *VALVULA DE RETENCAO KVR3=2.5
 0040 *CURVA DE 90 KC903=0.40
 0041 *
 0042 *
 0043 *CONDICOES AMBIENTES
 0044 *
 0045 *
 0046 *ACELERACAO DA GRAVIDADE G=9.8 M/S2
 0047 *PRESSAO ATMOSFERICA PAT=9.8E+04 N/M2
 0048 *TEMPERATURA AMBIENTE TAB=300.0 K
 0049 *DENSIDADE DA AGUA R0AG=1.0E+03 KG/M3
 0050 *DENSIDADE DA MISTURA DRAGADA ROM=2.0E+03 KG/M3
 0051 *PPCFUNCIDACE PF=10.0 M
 0052 *
 0053 *
 0054 *
 0055 *PROPRIEDADES DO AR
 0056 *
 0057 *
 0058 *


```

0059  *CALCULO ESPECIFICO * PRESS - CONSTANTE C=1013 NM/K
0060  *CALCULO ESPECIFICO A VOLUMEN CONSTANTE CVO=726.0 NM/KGK
0061  *CONSTANTE LO GAS R=287.3 NM/KGK
0062  *RELACIONES DE CALORES ESPECIFICOS K=1.4
0063  *
0064  *
0065  *
0066  *
0067  *FASE DE RECALQUE
0068  *
0069  *
0070  *PAPAM VIN=0, YDTIN=0,
0071  *CONST UC=1, D1=2, D2=1, D3=2, LSUC=6, LAR=15, LREC=500, LVREC=10, ...
0072  *E=1, WL=1.2, F1=0.2, F2=0.2, F3=0.2, KES1=1, KVR1=2.5, KAS1=1, KES3=1, ...
0073  *KVP3=2, KVC903=4, Q=9.8, PF=10, ROM=2, E=0.3, ROAG=1, E=0.3, TAMB=300, ...
0074  *PATM=9, E=0.4, CPO=1013, CVJ=726, R=287, K=1.4, PI=3.1416, ...
0075  *PCMP=7, E=0.5
0076  *Y=INTGAL(VIN, YDT)
0077  *YCT=INTGAL(YDTIN, Y2DT)
0078  *PI=PCO+ROM*G*(HC-E)-PCM*G*(HC-E)*Y/YFIN
0079  *YFIN=A*(HC-E)/A3
0080  *A=AC-A3
0081  *AC=CC+3*PI/4
0082  *A3=CC+3*PI/4
0083  *FAT=F3+1+D3*ROM*(LREC+LE)*YDT*2./8
0084  *LE=CC+3*SIGMA/F3
0085  *SIGMAK=KES3+KVR3+KVC903
0086  *Y2CT=((0.1-PATM)*A3-A3*LVREC+ROM*G*FAT)/(LREC+A3*ROM)
0087  *Q=A3*YDT
0088  *VCL=A3*Y
0089  *FINISH YCL=8294
0090  *TIMER PINTIM=90, OUTDEL=1, DELT=1.E-03
0091  *TITLE FASE LE RECALQUE
0092  *PRINT PI, FAT, Y2CT, Q, VOL
0093  *ENDJOB

```

TIME	M1	FAT	V2OT	Q	VCL
0.00	7.2156E-05	0.00	4.2756E-01	0.00	0.00
1.000E-01	7.2156E-05	3.0955E-03	4.2746E-01	1.3431E-03	6.7159E-05
2.000E-01	7.2156E-05	1.2371E-03	4.2716E-01	2.6856E-03	2.6860E-04
3.000E-01	7.2154E-05	2.7821E-03	4.2666E-01	4.0268E-03	6.0424E-04
4.000E-01	7.2153E-05	4.4435E-03	4.2596E-01	5.3662E-03	1.0739E-03
5.000E-01	7.2152E-05	7.7087E-03	4.2506E-01	6.7030E-03	1.6774E-03
6.000E-01	7.2150E-05	1.1081E-02	4.2397E-01	8.3637E-03	2.1444E-03
7.000E-01	7.2147E-05	1.5053E-02	4.2268E-01	9.3667E-03	3.2644E-03
8.000E-01	7.2145E-05	1.9615E-02	4.2120E-01	1.0692E-02	4.2676E-03
9.000E-01	7.2142E-05	2.4769E-02	4.1954E-01	1.2013E-02	5.4229E-03
1.000E-00	7.2139E-05	3.0477E-02	4.1768E-01	1.3328E-02	6.6900E-03
2.000E-00	7.2135E-05	3.6759E-02	4.1565E-01	1.4633E-02	8.0883E-03
3.000E-00	7.2131E-05	4.3591E-02	4.1343E-01	1.5940E-02	9.6172E-03
4.000E-00	7.2127E-05	5.0968E-02	4.1105E-01	1.7235E-02	1.1276E-02
5.000E-00	7.2122E-05	5.8863E-02	4.0848E-01	1.8523E-02	1.3064E-02
6.000E-00	7.2117E-05	6.7272E-02	4.0576E-01	1.9801E-02	1.4980E-02
7.000E-00	7.2112E-05	7.6177E-02	4.0287E-01	2.1071E-02	1.7024E-02
8.000E-00	7.2106E-05	8.5567E-02	3.9982E-01	2.2333E-02	1.9194E-02
9.000E-00	7.2100E-05	9.5423E-02	3.9663E-01	2.3583E-02	2.1490E-02
1.000E-00	7.2094E-05	1.0573E-03	3.9328E-01	2.4825E-02	2.3910E-02
2.000E-00	7.2087E-05	1.1647E-03	3.8980E-01	2.6054E-02	2.6454E-02
3.000E-00	7.2080E-05	1.2762E-03	3.8618E-01	2.7273E-02	2.9121E-02
4.000E-00	7.2073E-05	1.3917E-03	3.8243E-01	2.8481E-02	3.1909E-02
5.000E-00	7.2065E-05	1.5110E-03	3.7856E-01	2.9676E-02	3.4817E-02
6.000E-00	7.2058E-05	1.6333E-03	3.7457E-01	3.0855E-02	3.7844E-02
7.000E-00	7.2049E-05	1.7601E-03	3.7047E-01	3.2023E-02	4.0988E-02
8.000E-00	7.2041E-05	1.8893E-03	3.6626E-01	3.3187E-02	4.4249E-02
9.000E-00	7.2032E-05	2.0221E-03	3.6196E-01	3.4331E-02	4.7625E-02
1.000E-00	7.2023E-05	2.1574E-03	3.5756E-01	3.5461E-02	5.1115E-02
2.000E-00	7.2014E-05	2.2954E-03	3.5307E-01	3.6577E-02	5.4717E-02
3.000E-00	7.2004E-05	2.4353E-03	3.4851E-01	3.7673E-02	5.8430E-02
4.000E-00	7.1994E-05	2.5783E-03	3.4387E-01	3.8761E-02	6.2252E-02
5.000E-00	7.1984E-05	2.7231E-03	3.3916E-01	3.9840E-02	6.6183E-02
6.000E-00	7.1973E-05	2.8697E-03	3.3439E-01	4.0895E-02	7.0220E-02
7.000E-00	7.1963E-05	3.0177E-03	3.2959E-01	4.1941E-02	7.4436E-02
8.000E-00	7.1952E-05	3.1673E-03	3.2469E-01	4.2968E-02	7.8607E-02
9.000E-00	7.1940E-05	3.3181E-03	3.1977E-01	4.3981E-02	8.2955E-02
1.000E-00	7.1929E-05	3.4705E-03	3.1481E-01	4.4973E-02	8.7403E-02
2.000E-00	7.1917E-05	3.6233E-03	3.0982E-01	4.5953E-02	9.1950E-02
3.000E-00	7.1905E-05	3.7777E-03	3.0480E-01	4.6923E-02	9.6594E-02
4.000E-00	7.1893E-05	3.9322E-03	2.9976E-01	4.7871E-02	1.0133E-01
5.000E-00	7.1880E-05	4.0871E-03	2.9470E-01	4.8803E-02	1.0617E-01
6.000E-00	7.1867E-05	4.2422E-03	2.8964E-01	4.9725E-02	1.1110E-01
7.000E-00	7.1854E-05	4.3977E-03	2.8456E-01	5.0623E-02	1.1611E-01
8.000E-00	7.1841E-05	4.5522E-03	2.7949E-01	5.1515E-02	1.2122E-01
9.000E-00	7.1827E-05	4.7073E-03	2.7442E-01	5.2383E-02	1.2641E-01
1.000E-00	7.1814E-05	4.8622E-03	2.6935E-01	5.3236E-02	1.31370E-01
2.000E-00	7.1800E-05	5.0177E-03	2.6430E-01	5.4075E-02	1.3706E-01
3.000E-00	7.1786E-05	5.1703E-03	2.5926E-01	5.4893E-02	1.4251E-01
4.000E-00	7.1771E-05	5.3233E-03	2.5425E-01	5.5705E-02	1.4804E-01
5.000E-00	7.1757E-05	5.4761E-03	2.4926E-01	5.6536E-02	1.5365E-01
6.000E-00	7.1742E-05	5.6277E-03	2.4429E-01	5.7271E-02	1.5934E-01
7.000E-00	7.1727E-05	5.7777E-03	2.3936E-01	5.8073E-02	1.6510E-01
8.000E-00	7.1712E-05	5.9265E-03	2.3446E-01	5.8735E-02	1.7095E-01
9.000E-00	7.1696E-05	6.0748E-03	2.2960E-01	5.9504E-02	1.7686E-01

BASE REC F IMP NTE HCN

TIME	MI	FAT	Y2DT	Q	VOL
5.500E 00	7.148E 05	6.221E 03	2.2477E-01	6.0218E-02	1.8285E-01
5.600E 00	7.146E 05	6.366E 03	2.2000E-01	6.0916E-02	1.8890E-01
5.700E 00	7.149E 05	6.517E 03	2.1526E-01	6.1600E-02	1.9503E-01
5.800E 00	7.143E 05	6.652E 03	2.1058E-01	6.2269E-02	2.0122E-01
5.900E 00	7.1417E 05	6.793E 03	2.0594E-01	6.2923E-02	2.0748E-01
6.000E 00	7.1400E 05	6.931E 03	2.0136E-01	6.3563E-02	2.1381E-01
6.100E 00	7.1384E 05	7.068E 03	1.9683E-01	6.4188E-02	2.2019E-01
6.200E 00	7.1367E 05	7.204E 03	1.9235E-01	6.4800E-02	2.2664E-01
6.300E 00	7.1350E 05	7.337E 03	1.8794E-01	6.5397E-02	2.3315E-01
6.400E 00	7.1333E 05	7.469E 03	1.8358E-01	6.5981E-02	2.3972E-01
6.500E 00	7.1316E 05	7.598E 03	1.7928E-01	6.6551E-02	2.4635E-01
6.600E 00	7.1298E 05	7.726E 03	1.7504E-01	6.7107E-02	2.5303E-01
6.700E 00	7.1281E 05	7.852E 03	1.7087E-01	6.7651E-02	2.5977E-01
6.800E 00	7.1263E 05	7.975E 03	1.6676E-01	6.8181E-02	2.6656E-01
6.900E 00	7.1245E 05	8.097E 03	1.6271E-01	6.8698E-02	2.7341E-01
7.000E 00	7.1227E 05	8.216E 03	1.5873E-01	6.9203E-02	2.8030E-01
7.100E 00	7.1209E 05	8.334E 03	1.5482E-01	6.9696E-02	2.8725E-01
7.200E 00	7.1191E 05	8.449E 03	1.5097E-01	7.0176E-02	2.9424E-01
7.300E 00	7.1173E 05	8.562E 03	1.4718E-01	7.0644E-02	3.0128E-01
7.400E 00	7.1154E 05	8.673E 03	1.4346E-01	7.1101E-02	3.0837E-01
7.500E 00	7.1136E 05	8.782E 03	1.3981E-01	7.1546E-02	3.1550E-01
7.600E 00	7.1117E 05	8.889E 03	1.3623E-01	7.1979E-02	3.2268E-01
7.700E 00	7.1098E 05	8.993E 03	1.3271E-01	7.2402E-02	3.2990E-01
7.800E 00	7.1080E 05	9.095E 03	1.2926E-01	7.2813E-02	3.3716E-01
7.900E 00	7.1261E 05	9.196E 03	1.2587E-01	7.3214E-02	3.4446E-01
8.000E 00	7.1241E 05	9.294E 03	1.2255E-01	7.3604E-02	3.5180E-01
8.100E 00	7.1222E 05	9.391E 03	1.1930E-01	7.3984E-02	3.5918E-01
8.200E 00	7.1203E 05	9.485E 03	1.1611E-01	7.4354E-02	3.6660E-01
8.300E 00	7.1184E 05	9.577E 03	1.1299E-01	7.4714E-02	3.7405E-01
8.400E 00	7.1164E 05	9.667E 03	1.0993E-01	7.5064E-02	3.8154E-01
8.500E 00	7.1145E 05	9.755E 03	1.0693E-01	7.5405E-02	3.8906E-01
8.600E 00	7.1125E 05	9.841E 03	1.0400E-01	7.5736E-02	3.9662E-01
8.700E 00	7.1105E 05	9.924E 03	1.0113E-01	7.6058E-02	4.0421E-01
8.800E 00	7.1085E 05	1.0007E 04	9.8326E-02	7.6371E-02	4.1183E-01
8.900E 00	7.1066E 05	1.0087E 04	9.5582E-02	7.6676E-02	4.1948E-01
9.000E 00	7.1046E 05	1.0165E 04	9.2898E-02	7.6972E-02	4.2717E-01
9.100E 00	7.1026E 05	1.0241E 04	9.0274E-02	7.7260E-02	4.3488E-01
9.200E 00	7.1005E 05	1.0315E 04	8.7709E-02	7.7539E-02	4.4262E-01
9.300E 00	7.0985E 05	1.0389E 04	8.5203E-02	7.7811E-02	4.5038E-01
9.400E 00	7.0965E 05	1.0458E 04	8.2755E-02	7.8075E-02	4.5818E-01
9.500E 00	7.0945E 05	1.0527E 04	8.0363E-02	7.8331E-02	4.6600E-01
9.600E 00	7.0924E 05	1.0594E 04	7.8027E-02	7.8580E-02	4.7384E-01
9.700E 00	7.0904E 05	1.0658E 04	7.5746E-02	7.8821E-02	4.8171E-01
9.800E 00	7.0883E 05	1.0723E 04	7.3520E-02	7.9056E-02	4.8961E-01
9.900E 00	7.0863E 05	1.0784E 04	7.1346E-02	7.9283E-02	4.9753E-01
1.000E 01	7.0842E 05	1.0845E 04	6.9225E-02	7.9504E-02	5.0547E-01
1.010E 01	7.0821E 05	1.0903E 04	6.7156E-02	7.9718E-02	5.1343E-01
1.020E 01	7.0800E 05	1.0960E 04	6.5137E-02	7.9926E-02	5.2141E-01
1.030E 01	7.0780E 05	1.1015E 04	6.3167E-02	8.0127E-02	5.2941E-01
1.040E 01	7.0759E 05	1.1068E 04	6.1246E-02	8.0323E-02	5.3743E-01
1.050E 01	7.0738E 05	1.1121E 04	5.9373E-02	8.0512E-02	5.4548E-01
1.060E 01	7.0717E 05	1.1172E 04	5.7547E-02	8.0696E-02	5.5354E-01
1.070E 01	7.0696E 05	1.1222E 04	5.5766E-02	8.0874E-02	5.6161E-01
1.080E 01	7.0675E 05	1.1270E 04	5.4031E-02	8.1046E-02	5.6971E-01
1.090E 01	7.0654E 05	1.1316E 04	5.2339E-02	8.1214E-02	5.7782E-01

CASE 15 RECALCULATE

JMP

ITEG

BN

TIME	PI	FAT	V2DT	Q	VOL
1.1000E 01	7.0433E 05	1.1351E 04	5.0691E-02	8.1375E-02	5.8595E-01
1.1100E 01	7.0412E 05	1.1405E 04	4.9085E-02	8.1532E-02	5.9410E-01
1.1200E 01	7.0390E 05	1.1447E 04	4.7520E-02	8.1684E-02	6.0226E-01
1.1300E 01	7.0369E 05	1.1494E 04	4.5996E-02	8.1831E-02	6.1044E-01
1.1400E 01	7.0348E 05	1.1529E 04	4.4512E-02	8.1973E-02	6.1863E-01
1.1500E 01	7.0327E 05	1.1576E 04	4.3066E-02	8.2110E-02	6.2683E-01
1.1600E 01	7.0305E 05	1.1605E 04	4.1658E-02	8.2243E-02	6.3505E-01
1.1700E 01	7.0284E 05	1.1641E 04	4.0287E-02	8.2372E-02	6.4328E-01
1.1800E 01	7.0262E 05	1.1676E 04	3.8952E-02	8.2497E-02	6.5152E-01
1.1900E 01	7.0241E 05	1.1711E 04	3.7652E-02	8.2617E-02	6.5978E-01
1.2000E 01	7.0219E 05	1.1744E 04	3.6387E-02	8.2733E-02	6.6804E-01
1.2100E 01	7.0198E 05	1.1775E 04	3.5156E-02	8.2846E-02	6.7632E-01
1.2200E 01	7.0176E 05	1.1806E 04	3.3957E-02	8.2954E-02	6.8461E-01
1.2300E 01	7.0155E 05	1.1836E 04	3.2791E-02	8.3059E-02	6.9291E-01
1.2400E 01	7.0133E 05	1.1865E 04	3.1656E-02	8.3160E-02	7.0123E-01
1.2500E 01	7.0112E 05	1.1893E 04	3.0552E-02	8.3258E-02	7.0955E-01
1.2600E 01	7.0090E 05	1.1920E 04	2.9477E-02	8.3352E-02	7.1788E-01
1.2700E 01	7.0068E 05	1.1946E 04	2.8432E-02	8.3443E-02	7.2622E-01
1.2800E 01	7.0046E 05	1.1971E 04	2.7415E-02	8.3531E-02	7.3457E-01
1.2900E 01	7.0025E 05	1.1995E 04	2.6426E-02	8.3615E-02	7.4292E-01
1.3000E 01	7.0003E 05	1.2019E 04	2.5464E-02	8.3697E-02	7.5129E-01
1.3100E 01	7.0181E 05	1.2041E 04	2.4528E-02	8.3776E-02	7.5966E-01
1.3200E 01	7.0159E 05	1.2063E 04	2.3618E-02	8.3851E-02	7.6804E-01
1.3300E 01	7.0138E 05	1.2084E 04	2.2733E-02	8.3924E-02	7.7643E-01
1.3400E 01	7.0116E 05	1.2104E 04	2.1672E-02	8.3994E-02	7.8483E-01
1.3500E 01	7.0094E 05	1.2124E 04	2.1035E-02	8.4061E-02	7.9323E-01
1.3600E 01	7.0072E 05	1.2142E 04	2.0221E-02	8.4126E-02	8.0164E-01
1.3700E 01	7.0050E 05	1.2160E 04	1.9430E-02	8.4188E-02	8.1006E-01
1.3800E 01	7.0028E 05	1.2178E 04	1.8661E-02	8.4248E-02	8.1848E-01
1.3900E 01	7.0006E 05	1.2194E 04	1.7913E-02	8.4306E-02	8.2691E-01
1.3930E 01	7.0000E 05	1.2199E 04	1.7693E-02	8.4323E-02	8.2944E-01

2. FASE DE ALÍVIO DA PRESSÃO NO INTERIOR DO CILINDRO2.1. CONDIÇÃO SÔNICA NO FINAL DA TUBULAÇÃO DE AR2.1.1. DADOS DE ENTRADA

- Geometria do sistema

 D_c D_c D_3 D_3 D_2 D_2 h_c H_c e E L_{AR} L_{AR}

- Coeficientes de perda de carga

 f_2 F_2

- Propriedades do ar

 k K C_{VO} C_{VO} R R

- Condições ambientes

 P_{ATM} P_{ATM}

- Outras constantes -

 π π M_2 M_2 Processo iterativo para cálculo de M_1 "Chute" inicial para M_1^2 M_{1Q0}

Condição a ser satisfeita para término do processo

ERROR

- Condições iniciais para as variáveis P_{AR} e T_{AR}

Essas condições iniciais devem ser compatíveis com a pressão atingida dentro do cilindro no final da fase de recalque.

2.1.2. VARIÁVEIS DE SAÍDA

ρ_{AR}	ROAR
T_{AR}	TAR
P_{AR}	PAR
V_1	V1
M_1	M1
M_2	$\dot{M}_2$

2.2. CONDIÇÃO SUBSÔNICA NO FINAL DA TUBULAÇÃO DE AR2.2.1. DADOS DE ENTRADA

Os mesmos do item 2.1.1. com exceção de M_2 .

As condições iniciais para as variáveis ρ_{AR}

e T_{AR} são os valores atingidos pelas mesmas no final da fase 2 com a condição 2.1.

2.2.2. VARIÁVEIS DE SAÍDA

As mesmas do item 2.1.2.

* CSMP73 INPUT LIST * 2.5.05

```

0001 *FASE DE ALIVIO DA PRESSAO NO CILINDRO
0002 *
0003 *ESCALAMENTO DE AR COM CONDICAO SONICA NA SAIDA DA TUBULACAO DE AR COMPRI
0004 *MIGC
0005 *
0006 *
0007 *PARAM NCARIN=7.7184,TARIN=316.
0008 *CONST JC=1.0,D1=.2,D2=.1,D3=.2,LSUC=.6,LAR=15.0,REC=500.0,LVREC=10.0,
0009 *E=1.0,K=1.2,F1=.02,F2=.02,F3=.02,KES1=1.0,KVR1=2.5,KAS1=1.0,KES3=1.0,
0010 *KVP3=2.5,KC903=.4,G=9.8,PF=10.0,RQM=2.0,E+03,ROAG=1.0,E+03,TAMB=300.0,
0011 *PATM=0.0,E+04,CPC=1013.0,CVJ=726.0,R=287.0,K=1.4,PI=3.1416,
0012 *MIGC=.1,EPHQR=1.0,E-03,M2=1.0,PI=7.0E+05
0013 *RCAR=INTGRL(RCARIN,RCAPDT)
0014 *TAP=INTGRL(TARIN,TAPDT)
0015 *RCAPDT=RCAR+V1+A2/VUC
0016 *TAPDT=(TAR+V1+A2-V1+A2+K+TAR-V1+3.0*A2/(2.0+CV0))/VUC
0017 *A2=U2+3.0*PI/A
0018 *A3=U3+3.0*PI/A
0019 *AC=CC+3.0*PI/A
0020 *A=AC-A3
0021 *VUC=A/(1-C-E)
0022 *MIG=INTGRL(MIG0,EPHQR,F3FMI3)
0023 *CMIG=1.0+MIG*(K-1.0)/2.0
0024 *FCFMIG=(1.0-MIG)/(K+2.0*(LAP/DC2)+MIG*(K+1.0)*ALOG((K+1.0)*MIG/(2.0+CV0)))/...
0025 *(2.0+2.0*LAP+V1/02)
0026 *M1=SCRT(MIG)
0027 *V1=M1+5.28T(K+R+TAR)
0028 *PAP=RCAR+R+TAR
0029 *CC=C+PI+PAP
0030 *FINISH COND=4.148E+05
0031 *TIMER FINIM=30.0,OUTDEL=.1,DEL=1.0E-03
0032 *TITLE FASE DE ALIVIO COM CONDICAO SONICA
0033 *PRINT NCAR,TAR,PAP,V1,M1,A2
0034 *ENDJOB

```

FASE DE ALIVIO CUY COMPLETADO SONICA

SIMP INTEGRATION

TIME	WCAP	TAR	PAR	V1	W1	P2
0.00	7.7184E 00	3.1623E 02	7.0000E 05	1.3083E 02	3.6716E-01	1.0000E 00
1.0000E-01	6.7103E 00	2.9955E 02	5.4720E 05	1.7738E 02	3.6717E-01	1.0000E 00
2.0000E-01	6.0336E 00	2.8435E 02	4.9485E 05	1.2411E 02	3.6717E-01	1.0000E 00
3.0000E-01	5.3392E 00	2.7028E 02	4.1683E 05	1.2100E 02	3.6717E-01	1.0000E 00
4.0000E-01	4.8215E 00	2.5723E 02	3.5595E 05	1.1804E 02	3.6717E-01	1.0000E 00
5.0000E-01	4.3174E 00	2.4511E 02	3.0371E 05	1.1522E 02	3.6717E-01	1.0000E 00
5.3303E-01	4.1453E 00	2.4129E 02	2.8845E 05	1.1432E 02	3.6717E-01	1.0000E 00

* CSMF73 INPUT LIST * 2.5.05

```

0001 *FASE DE ALIVIO DA PRESSAO NO CILINDRO
0002 *
0003 *ESCALAMENTO DE AR COM CONJUGAO SUBSONICA NA SAIDA DA TUBULACAO DE AR
0004 *COMPRIMENTO
0005 *
0006 *
0007 *PARAM *ZARIN=4.1653,TARIN=2.4129E+02
0008 *CONST J=1,D1=2,D2=1,DJ=2,LSUC=6,LAR=15,LREC=500,LVREC=10,....
0009 *E=1,MU=1.2,F1=0.02,F2=0.02,F3=0.02,KES1=1,KVR1=2.45,KAS1=1,KES3=1,....
0010 *KVP3=2.5,VC903=4,G=9.8,PF=10,ROM=2,E+03,ROAG=1,E+03,TAMB=300,....
0011 *PATM=9.3E+04,CPG=1013,CVJ=726,PR=287,K=1.4,PI=3.1416,....
0012 *MICO=1,ERHQR=1,E-03,PIH=2.8845E+05
0013 *RCAP=1,VIGPL(RJAFIN,RGARDT)
0014 *TAR=1,VIGPL(TARIN,TARDT)
0015 *RCAPCT=RCAP*V1/A2/VUC
0016 *TARCT=(TAR*V1*A2*V1*A2*K*TAR-V1*3*A2/(2*CV0))/VUC
0017 *A2=U2**2*PI/A.
0018 *A3=U3**2*PI/A.
0019 *AC=CC**2*PI/A.
0020 *AAC=A3
0021 *VUC=A*(C-E)
0022 *MICO=IMPL(MICO,EFROR,F0FM1J)
0023 *AA=(PATV)**2*((K-1)/2.)
0024 *BE=(PATV)**2.
0025 *CMC=1.410*(K-1)/2.
0026 *CC=(PAR**2*MICO*CM10)
0027 *DELTA=5*RT(EB**2-A*AA*CC)
0028 *M2C=(-B3+DELTA)/(2*AA)
0029 *CM2=1.410*(K-1)/2.
0030 *FCF10=(1.410)/(K*F2*LAR/D2)*M10*(1-M20)/(M20*K*F2*LAR/D2)*M10*...
0031 *(K-1)*LOG(M10*CM20/(M20*CM10))/(2*F2*LAR*K/D2)
0032 *M2=SCRT(M2C)
0033 *M1=SCRT(M1C)
0034 *V1=1.5*RT(K*P*TAR)
0035 *PAR=PCAT*P*TAR
0036 *CCAPPLN=PAR
0037 *FINISH CO=0.1,0617E+05
0038 *TIMER FINIM=30,OUTDEL=1,DELT=1,E-03
0039 *TITLE FASE DE ALIVIO COM CONJUGAO SUBSONICA
0040 *PRINT *CAP,TAR,PAR,V1,M1,M2
0041 *ENDJOB

```


FASE LE ALIVIO CUM CONDICAO SUBSISTICA

SIMP INTEGRATION

TIME	ICAP	TAR	PAP	V1	W1	W2
0.00	4.1453E 00	2.4127E 02	2.8045E 05	1.1432E 02	3.6716E-01	9.9978E-01
1.0003E-01	3.7130E 00	2.3127E 02	2.4737E 05	1.1137E 02	3.6614E-01	8.7244E-01
2.0003E-01	3.3739E 00	2.2007E 02	2.1309E 05	1.0775E 02	3.6237E-01	7.5614E-01
3.0003E-01	3.0330E 00	2.1669E 02	1.8460E 05	1.0315E 02	3.5451E-01	6.4931E-01
3.1603E-01	3.0234E 00	2.0980E 02	1.7204E 05	1.0262E 02	3.5343E-01	6.3909E-01

3. FASE DE ADMISSÃO DA MISTURA NO CILINDRO3.1. DADOS DE ENTRADA

- Geometria do sistema

 D_c DC D_3 D3 D_2 D2 D_1 D1 h_c HC e E L_{AR} LAR L_{SUC} LSUC

- Coeficientes de perda de carga

 f_1 F1 f_2 F2

Na simulação assumiu-se:

estreitamento brusco de seção KES1

válvula de retenção KVR1

alargamento brusco de seção KAS1

- Condições ambientes

 ρ_{AG} ROAG ρ_M ROM P_{ATM} PATM g G H_{AG} PF

- Propriedades do ar

 C_{p0} CP0 C_{v0} CV0 k K R R

- Outras constantes

π PI

Processo iterativo para cálculo de M_1

"Chute" inicial para M_1^2 MIQO

condição a ser satisfeita para término do processo ERROR

- Condições iniciais para as variáveis h , $\frac{dh}{dt}$, P_{AR} , T_{AR}

Para as variáveis P_{AR} e T_{AR} as condições iniciais são os valores atingidos pelas mesmas no final da fase 2 com a condição 2.2.

Para as variáveis h e $\frac{dh}{dt}$ temos:

$$h_0 = 0$$

$$\left(\frac{dh}{dt}\right)_0 = 0$$

3.2. VARIÁVEIS DE SAÍDA

P_{AR}	ROAR
T_{AR}	TAR
P_{AR}	PAR
V_m	VM
h	H
$\frac{d^2h}{dt^2}$	H2DT
V_1	V1
M_1	M1
M_2	M2

Obs.: A simulação desta fase foi executada em duas etapas devido ao tempo permissível de processamento que foi insuficiente.

As condições iniciais da segunda etapa são os valores que as mesmas variáveis atingiram no final da primeira etapa.

* CSW17, INPUT LIST * 2.5.05

```

0001 * FASE DE ADMISSAO DA VISTURA NO CILINDRO
0002 *
0003 * ESCOAMENTO DE AR COM CONDIÇÃO SUBSONICA NA SAIDA DA TUBULACAO DE AR
0004 * SUBSONICA
0005 *
0006 *
0007 * PARAM MIN=0, HDTIN=0, RGA4IN=3.0234, TARIN=2.0980E+02
0008 * CCAST JC=1, D1=2, D2=1, D3=2, LSUC=6, LAR=15, LREC=500, LVREC=10, ...
0009 * E=1, HC=1, 2, F1=0.2, F2=0.2, F3=0.2, KES1=1, KVR1=2.5, KAS1=1, MES3=1, ...
0010 * K1=3.2, K2=5, K3=0.3, G=3.8, PF=10, PGM=2.1E+03, RGA8=1, E+03, TAMB=300, ...
0011 * PATM=9.5E+04, CPC=1013, CVJ=720, R=287, K=1.4, P1=3.1416, ...
0012 * W10=1.3, EPRC8=1, E-03
0013 * RGA8=INTGRL(RGA4IN, RGA8DT)
0014 * TAP=INTGRL(TARIN, TARDT)
0015 * H=INTGRL(HIN, HDT)
0016 * HDT=INTGRL(HDTIN, H2DT)
0017 * RGA8DT=(RGA4IN-HDT-HGA8-V1+A2)/(VUC-AH)
0018 * TAPDT=(PGM-AHDT+3./2.-PGAR-V1+A2+CPO+TAR-RGA8+A2+V1+3./2.-RGA8+V1+...
0019 * A2-HC-3*(VUC-AH)*CV0-TAP-RGA8DT+CV0-RGA8-TAR+HDT)/(CV0-RGA8*(VUC-...
0020 * A-H))
0021 * A1=U1+2.*PI/4.
0022 * A2=U2+2.*PI/4.
0023 * A3=U3+2.*PI/4.
0024 * AC=LC+2.*PI/4.
0025 * A=AC-A3
0026 * VUC=AA*(C-E)
0027 * PAR=PGAR+R+TAR
0028 * P1=PGAR+G+PF+PATM
0029 * P2=PAR+PGM+G*(H+E)
0030 * PAT=PGM*(SIGMAK+F1+LSUC/D1)+VM+2./2.
0031 * VM=AHJT/A1
0032 * SIGMAK=(ES1+KVR1+KAS1
0033 * H2DT*((1-P2-PAT)-LSUC*PGM+G))/(PGM*LSUC+A/A1)
0034 * W10=INTGRL(W100, FRRGR, FJFM1, J)
0035 * AA=(PATV)**2.*(K-1.)/2.)
0036 * BB=(PATV)**2.
0037 * CW10=1.*W10*(K-1.)/2.
0038 * CC=(PAR+2.*V10*CW10)
0039 * DELTA=3*GRT(BB+2.*A-AA*CC)
0040 * M2G=(-BB+DELTA)/(2.*AA)
0041 * CW20=1.*M2G*(K-1.)/2.
0042 * FCFW10=((1-M10)/(K+2)*LAR/D2)+W10*((1-M20)/(M20*K+2*LAR/D2)+M10+...
0043 * (K+1.)*LCG(M10*CW20/(M20*CW10))/(2.*F2*LAR*K/D2)
0044 * M2=SORI(CW20)
0045 * W1=SORI(W10)
0046 * V1=V1+3*GRT(M+R+TAR)
0047 * FINISH M=1.1
0048 * TIMEP INTIM=30, OUTDEL=1, UELT=1, E-03
0049 * TITLE FASE DE ADMISSAO DA VISTURA E ESCOAMENTO COM CONDIÇÃO SUBSONICA
0050 * PRINT HCAR, TAR, PAR, M, VM, H2DT, V1, M1, M2
0051 * ENDJOB

```

FASE DE ACESSAO DA MISTURA E ESCALAMENTO COM CONDICAO SUBSONICA				SIMP		INTEGRATION	
TIME							
TIME = 0.00	PCAP	= 3.0234E 00	TAR	= 2.0980E 02	PAR	= 1.8205E 05	H = 0.00
	VM	= 0.00	H2DT	= 8.0991E-03	V1	= 1.0262E 02	M1 = 3.5344E-01
	P2	= 6.3911E-01					
TIME = 1.0000E-01	PCAP	= 2.7544E 00	TAR	= 2.0147E 02	PAR	= 1.5927E 05	H = 1.3786E-03
	VM	= 9.3124E-01	H2DT	= 6.6081E-01	V1	= 9.6534E 01	M1 = 3.3929E-01
	P2	= 5.4201E-01					
TIME = 2.0000E-01	PCAP	= 2.5382E 00	TAR	= 1.9405E 02	PAR	= 1.4136E 05	H = 8.5372E-03
	VM	= 2.4244E 00	H2DT	= 4.8447E-01	V1	= 8.8864E 01	M1 = 3.1825E-01
	P2	= 4.5433E-01					
TIME = 3.0000E-01	PCAP	= 2.3671E 00	TAR	= 1.8755E 02	PAR	= 1.2741E 05	H = 2.0547E-02
	VM	= 3.2385E 00	H2DT	= 2.3033E-01	V1	= 7.9402E 01	M1 = 2.8925E-01
	P2	= 3.7403E-01					
TIME = 4.0000E-01	PCAP	= 2.2332E 00	TAR	= 1.8204E 02	PAR	= 1.1667E 05	H = 3.4996E-02
	VM	= 3.6593E 00	H2DT	= 1.3438E-01	V1	= 6.7962E 01	M1 = 2.5129E-01
	P2	= 2.9841E-01					
TIME = 5.0000E-01	PCAP	= 2.1337E 00	TAR	= 1.7758E 02	PAR	= 1.0874E 05	H = 5.0824E-02
	VM	= 3.9193E 00	H2DT	= 8.6380E-02	V1	= 5.4683E 01	M1 = 2.0472E-01
	P2	= 2.2694E-01					
TIME = 6.0000E-01	PCAP	= 2.0675E 00	TAR	= 1.7420E 02	PAR	= 1.0336E 05	H = 6.7527E-02
	VM	= 4.0843E 00	H2DT	= 5.2683E-02	V1	= 4.0342E 01	M1 = 1.5249E-01
	P2	= 1.6073E-01					
TIME = 7.0000E-01	PCAP	= 2.0324E 00	TAR	= 1.7185E 02	PAR	= 1.0024E 05	H = 8.4763E-02
	VM	= 4.1783E 00	H2DT	= 2.6641E-02	V1	= 2.6757E 01	M1 = 1.0183E-01
	P2	= 1.0415E-01					
TIME = 8.0000E-01	PCAP	= 2.0233E 00	TAR	= 1.7034E 02	PAR	= 9.889E 04	H = 1.0227E-01
	VM	= 4.2185E 00	H2DT	= 8.2766E-03	V1	= 1.7028E 01	M1 = 6.5090E-02
	P2	= 6.5683E-02					
TIME = 9.0000E-01	PCAP	= 2.0270E 00	TAR	= 1.6930E 02	PAR	= 9.8523E 04	H = 1.1987E-01
	VM	= 4.2253E 00	H2DT	= -7.0801E-04	V1	= 1.3072E 01	M1 = 5.0118E-02
	P2	= 5.0386E-02					
TIME = 1.0000E 00	PCAP	= 2.0371E 00	TAR	= 1.6841E 02	PAR	= 9.8460E 04	H = 1.3747E-01
	VM	= 4.2203E 00	H2DT	= -3.2028E-03	V1	= 1.2231E 01	M1 = 4.7020E-02
	P2	= 4.7241E-02					
TIME = 1.1000E 00	PCAP	= 2.0477E 00	TAR	= 1.6752E 02	PAR	= 9.8451E 04	H = 1.5504E-01
	VM	= 4.2113E 00	H2DT	= -3.6571E-03	V1	= 1.2066E 01	M1 = 4.6582E-02
	P2	= 4.6797E-02					
TIME = 1.2000E 00	PCAP	= 2.0586E 00	TAR	= 1.6664E 02	PAR	= 9.8450E 04	H = 1.7257E-01
	VM	= 4.2033E 00	H2DT	= -3.7255E-03	V1	= 1.2044E 01	M1 = 4.6545E-02
	P2	= 4.6753E-02					
TIME = 1.3000E 00	PCAP	= 2.0697E 00	TAR	= 1.6574E 02	PAR	= 9.8451E 04	H = 1.9006E-01
	VM	= 4.1941E 00	H2DT	= -3.7352E-03	V1	= 1.2016E 01	M1 = 4.6562E-02
	P2	= 4.6773E-02					

FASE DE ADMISSÃO DA MISTURA E ESCALAMENTO COM CONDIÇÃO SUBSÔNICA				SIMP INTEGRATION			
TIME	PCAP	VM	P2	TAP	PAR	H	
1.4000E 00	2.0511E 00	4.1151E 00	4.2503E 02	1.6483E 02	9.8451E 04	2.0752E-01	
				H2DT = -3.7360E-03	V1 = 1.1590E 01	M1 = 4.6589E-02	
1.5000E 00	2.0923E 00	4.1761E 00	4.6833E-02	1.6391E 02	9.8452E 04	2.2494E-01	
				H2DT = -3.7375E-03	V1 = 1.1964E 01	M1 = 4.6618E-02	
1.6000E 00	2.1047E 00	4.1672E 00	4.6863E-02	1.6294E 02	9.8452E 04	2.4232E-01	
				H2DT = -3.7380E-03	V1 = 1.1938E 01	M1 = 4.6649E-02	
1.7000E 00	2.1173E 00	4.1583E 00	4.6893E-02	1.6204E 02	9.8453E 04	2.5966E-01	
				H2DT = -3.7385E-03	V1 = 1.1912E 01	M1 = 4.6683E-02	
1.8000E 00	2.1293E 00	4.1492E 00	4.6933E-02	1.6109E 02	9.8454E 04	2.7697E-01	
				H2DT = -3.7390E-03	V1 = 1.1886E 01	M1 = 4.6719E-02	
1.9000E 00	2.1423E 00	4.1403E 00	4.6973E-02	1.6012E 02	9.8454E 04	2.9424E-01	
				H2DT = -3.7395E-03	V1 = 1.1860E 01	M1 = 4.6758E-02	
2.0000E 00	2.1553E 00	4.1313E 00	4.7013E-02	1.5915E 02	9.8455E 04	3.1147E-01	
				H2DT = -3.7401E-03	V1 = 1.1834E 01	M1 = 4.6799E-02	
2.1000E 00	2.1691E 00	4.1223E 00	4.7063E-02	1.5815E 02	9.8455E 04	3.2867E-01	
				H2DT = -3.7407E-03	V1 = 1.1808E 01	M1 = 4.6842E-02	
2.2000E 00	2.1833E 00	4.1133E 00	4.7107E-02	1.5715E 02	9.8457E 04	3.4583E-01	
				H2DT = -3.7414E-03	V1 = 1.1782E 01	M1 = 4.6889E-02	
2.3000E 00	2.1973E 00	4.1043E 00	4.7157E-02	1.5613E 02	9.8458E 04	3.6295E-01	
				H2DT = -3.7420E-03	V1 = 1.1756E 01	M1 = 4.6938E-02	
2.4000E 00	2.2123E 00	4.0954E 00	4.7213E-02	1.5509E 02	9.8459E 04	3.8003E-01	
				H2DT = -3.7427E-03	V1 = 1.1730E 01	M1 = 4.6990E-02	
2.5000E 00	2.2271E 00	4.0864E 00	4.7266E-02	1.5404E 02	9.8460E 04	3.9707E-01	
				H2DT = -3.7435E-03	V1 = 1.1704E 01	M1 = 4.7046E-02	
2.6000E 00	2.2423E 00	4.0774E 00	4.7326E-02	1.5298E 02	9.8461E 04	4.1408E-01	
				H2DT = -3.7443E-03	V1 = 1.1678E 01	M1 = 4.7104E-02	
2.7000E 00	2.2586E 00	4.0684E 00	4.7389E-02	1.5190E 02	9.8463E 04	4.3105E-01	
				H2DT = -3.7451E-03	V1 = 1.1652E 01	M1 = 4.7167E-02	

FASE LE ADMISSAO DA MISTURA E ESCALAMENTO COM CONDICAO SUBSONICA										SIMP INTEGRATION	
TIME	2.8000E 20	POAR	2.2751E 00	TAR	1.5089E 02	PAR	9.8464E 04	H	4.4799E-01		
		VM	4.0594E 00	H2DT	-3.7460E-03	V1	1.1626E 01	M1	4.7233E-02		
		P2	4.7453E-02								
TIME	2.9000E 20	POAR	2.2921E 00	TAR	1.4969E 02	PAR	9.8465E 04	H	4.6488E-01		
		VM	4.0504E 00	H2DT	-3.7470E-03	V1	1.1600E 01	M1	4.7303E-02		
		P2	4.7527E-02								
TIME	3.0000E 20	POAR	2.3097E 00	TAR	1.4854E 02	PAR	9.8467E 04	H	4.8174E-01		
		VM	4.0414E 00	H2DT	-3.7480E-03	V1	1.1574E 01	M1	4.7377E-02		
		P2	4.7603E-02								
TIME	3.1000E 20	POAR	2.3273E 00	TAR	1.4738E 02	PAR	9.8468E 04	H	4.9856E-01		
		VM	4.0324E 00	H2DT	-3.7490E-03	V1	1.1548E 01	M1	4.7456E-02		
		P2	4.7682E-02								
TIME	3.2000E 20	POAR	2.3467E 00	TAR	1.4621E 02	PAR	9.8470E 04	H	5.1534E-01		
		VM	4.0234E 00	H2DT	-3.7502E-03	V1	1.1522E 01	M1	4.7539E-02		
		P2	4.7767E-02								
TIME	3.3000E 20	POAR	2.3661E 00	TAR	1.4501E 02	PAR	9.8472E 04	H	5.3209E-01		
		VM	4.0144E 00	H2DT	-3.7514E-03	V1	1.1496E 01	M1	4.7627E-02		
		P2	4.7857E-02								
TIME	3.4000E 20	POAR	2.3863E 00	TAR	1.4379E 02	PAR	9.8474E 04	H	5.4880E-01		
		VM	4.0054E 00	H2DT	-3.7527E-03	V1	1.1470E 01	M1	4.7721E-02		
		P2	4.7951E-02								
TIME	3.5000E 20	POAR	2.4072E 00	TAR	1.4254E 02	PAR	9.8476E 04	H	5.6547E-01		
		VM	3.9964E 00	H2DT	-3.7541E-03	V1	1.1444E 01	M1	4.7820E-02		
		P2	4.8052E-02								
TIME	3.6000E 20	POAR	2.4289E 00	TAR	1.4127E 02	PAR	9.8478E 04	H	5.8210E-01		
		VM	3.9874E 00	H2DT	-3.7556E-03	V1	1.1418E 01	M1	4.7925E-02		
		P2	4.8159E-02								
TIME	3.7000E 20	POAR	2.4515E 00	TAR	1.3997E 02	PAR	9.8480E 04	H	5.9869E-01		
		VM	3.9784E 00	H2DT	-3.7572E-03	V1	1.1392E 01	M1	4.8037E-02		
		P2	4.8272E-02								

```

0001 *FASE DE ADMISSAO DA MICTURA NO CILINDRO
0002 *
0003 * ESCCAMENTO DE AR COM CONDICAO SUBSONICA NA SAIDA DA TUBULACAO DE AR
0004 *
0005 *
0006 *
0007 *
0008 *
0009 *
0010 *
0011 *
0012 *
0013 *
0014 *
0015 *
0016 *
0017 *
0018 *
0019 *
0020 *
0021 *
0022 *
0023 *
0024 *
0025 *
0026 *
0027 *
0028 *
0029 *
0030 *
0031 *
0032 *
0033 *
0034 *
0035 *
0036 *
0037 *
0038 *
0039 *
0040 *
0041 *
0042 *
0043 *
0044 *
0045 *
0046 *
0047 *
0048 *
0049 *
0050 *
0051 *

```


Fase 1 - Acelerado para Estar en Condición Subsonica				SIMP INTEGRATION			
TIMF	C.C.U	ROAR VM M2	TAR P-2DT P-2	PAR V1	C4 M1		
		2.415E 00 3.9792E 00 4.6283E-02	1.3997E 02 -4.7804E-03	PAR V1	9.848CE 04 1.1395E 01	=	5.9869E-01 4.8046E-02
		2.4750E 00 3.9794E 00 4.6194E-02	1.3864E 02 -3.8073E-03	PAR V1	9.8482E 04 1.1366E 01	=	6.1525E-01 4.8157E-02
		2.4095E 00 3.9704E 00 4.8420E-02	1.3729E 02 -3.7630E-03	PAR V1	9.8485E 04 1.1340E 01	=	6.3177E-01 4.8282E-02
		2.5251E 00 3.9513E 00 4.8456E-02	1.3590E 02 -3.7630E-03	PAR V1	9.8488E 04 1.1314E 01	=	6.4825E-01 4.8415E-02
		2.5119E 00 3.9423E 00 4.8401E-02	1.3448E 02 -3.7651E-03	PAR V1	9.8491E 04 1.1287E 01	=	6.6470E-01 4.8558E-02
		2.5799E 00 3.9332E 00 4.8955E-02	1.3302E 02 -3.7675E-03	PAR V1	9.8494E 04 1.1261E 01	=	6.8110E-01 4.8709E-02
		2.6093E 00 3.9242E 00 4.9119E-02	1.3153E 02 -3.7702E-03	PAR V1	9.8497E 04 1.1235E 01	=	6.9747E-01 4.8871E-02
		2.6402E 00 3.9152E 00 4.9294E-02	1.2999E 02 -3.7731E-03	PAR V1	9.8500E 04 1.1209E 01	=	7.1381E-01 4.9044E-02
		2.6727E 00 3.9061E 00 4.9482E-02	1.2842E 02 -3.7763E-03	PAR V1	9.8504E 04 1.1182E 01	=	7.3010E-01 4.9229E-02
		2.7071E 00 3.8970E 00 4.9683E-02	1.2679E 02 -3.7798E-03	PAR V1	9.8508E 04 1.1156E 01	=	7.4636E-01 4.9426E-02
		2.7435E 00 3.8879E 00 4.9898E-02	1.2512E 02 -3.7837E-03	PAR V1	9.8513E 04 1.1130E 01	=	7.6258E-01 4.9639E-02
		2.7821E 00 3.8789E 00 5.0130E-02	1.2338E 02 -3.7881E-03	PAR V1	9.8518E 04 1.1103E 01	=	7.7876E-01 4.9867E-02
		2.8232E 00 3.8698E 00 5.0380E-02	1.2160E 02 -3.7930E-03	PAR V1	9.8523E 04 1.1077E 01	=	7.9490E-01 5.0113E-02
		2.8671E 00 3.8607E 00 5.0650E-02	1.1974E 02 -3.7985E-03	PAR V1	9.8528E 04 1.1050E 01	=	8.1100E-01 5.0378E-02

FASE DE ADMISSÃO NA MISTURA E ECCAMENTO COM CONDIÇÃO SUBSÔNICA			SIMP		INTEGRATION	
TIME	ROAR	TAR	PAR	VM	M2	
1.4000E 00	2.9141E 00	1.1762E 02	9.8535E 04	3.615E 00	1.1024E 01	8.2707E-01
	3.615E 00	-3.8048E-03	1.1024E 01	5.0642E-02		5.0666E-02
	5.0642E-02					
1.5000E 00	2.9147E 00	1.1561E 02	9.8541E 04	3.624E 00	1.0997E 01	8.4310E-01
	3.624E 00	-3.8119E-03	1.0997E 01	5.1260E-02		5.0979E-02
	5.1260E-02					
1.6000E 00	3.0194E 00	1.1372E 02	9.8549E 04	3.8132E 00	1.0970E 01	8.5909E-01
	3.8132E 00	-3.8201E-03	1.0970E 01	5.1407E-02		5.1320E-02
	5.1407E-02					
1.7000E 00	3.0789E 00	1.1154E 02	9.8557E 04	3.8241E 00	1.0943E 01	8.7504E-01
	3.8241E 00	-3.8297E-03	1.0943E 01	5.1687E-02		5.1694E-02
	5.1687E-02					
1.8000E 00	3.1438E 00	1.0924E 02	9.8566E 04	3.8149E 00	1.0916E 01	8.9096E-01
	3.8149E 00	-3.8468E-03	1.0916E 01	5.2406E-02		5.2105E-02
	5.2406E-02					
1.9000E 00	3.2153E 00	1.0662E 02	9.8576E 04	3.8055E 00	1.0889E 01	9.0663E-01
	3.8055E 00	-3.8541E-03	1.0889E 01	5.2695E-02		5.2561E-02
	5.2695E-02					
2.0000E 00	3.2946E 00	1.0427E 02	9.8587E 04	3.7963E 00	1.0862E 01	9.2267E-01
	3.7963E 00	-3.8700E-03	1.0862E 01	5.3386E-02		5.3069E-02
	5.3386E-02					
2.1000E 00	3.3833E 00	1.0154E 02	9.8600E 04	3.7870E 00	1.0835E 01	9.3847E-01
	3.7870E 00	-3.8894E-03	1.0835E 01	5.3667E-02		5.3639E-02
	5.3667E-02					
2.2000E 00	3.4837E 00	9.8634E 01	9.8615E 04	3.7777E 00	1.0807E 01	9.5423E-01
	3.7777E 00	-3.9136E-03	1.0807E 01	5.426E-02		5.4266E-02
	5.426E-02					
2.3000E 00	3.5986E 00	9.5496E 01	9.8632E 04	3.7682E 00	1.0779E 01	9.6995E-01
	3.7682E 00	-3.9443E-03	1.0779E 01	5.5282E-02		5.5028E-02
	5.5282E-02					
2.4000E 00	3.7329E 00	9.2082E 01	9.8652E 04	3.7587E 00	1.0751E 01	9.8563E-01
	3.7587E 00	-3.9844E-03	1.0751E 01	5.6263E-02		5.5891E-02
	5.6263E-02					
2.5000E 00	3.8927E 00	8.8324E 01	9.8677E 04	3.7491E 00	1.0722E 01	1.0013E 00
	3.7491E 00	-4.0387E-03	1.0722E 01	5.7308E-02		5.6915E-02
	5.7308E-02					
2.6000E 00	4.0844E 00	8.4123E 01	9.8707E 04	3.7393E 00	1.0692E 01	1.0169E 00
	3.7393E 00	-4.1155E-03	1.0692E 01	5.8277E-02		5.8158E-02
	5.8277E-02					
2.7000E 00	4.3373E 00	7.9326E 01	9.8746E 04	3.7293E 00	1.0662E 01	1.0324E 00
	3.7293E 00	-4.2314E-03	1.0662E 01	6.0174E-02		5.9720E-02
	6.0174E-02					

FASZ DE ADMISSÃO DA MISTURA E ESCALAMENTO CCM CONDIÇÃO SUBSUNICA			SIMP			INTEGRATION		
TIME	= 2.8000E 00	FOAR = 4.6726E 00 VM = 3.7190E 00 W2 = 6.2285E-02	TAR = 7.3674E 01 H2O1 = -4.4249E-03	PAR = 9.8799E 04 V1 = 1.0630E 01	M = 1.0440E 00 M1 = 6.1762E-02			
TIME	= 2.9000E 00	FOAR = 5.1679E 00 VM = 3.7080E 00 W2 = 6.5114E-02	TAR = 6.6607E 01 H2O1 = -4.7890E-03	PAR = 9.8879E 04 V1 = 1.0595E 01	M = 1.0634E 00 M1 = 6.4733E-02			
TIME	= 3.0000E 00	FOAR = 6.0440E 00 VM = 3.6956E 00 W2 = 7.0408E-02	TAR = 5.7095E 01 H2O1 = -5.7135E-03	PAR = 9.9022E 04 V1 = 1.0553E 01	M = 1.0786E 00 M1 = 6.9662E-02			
TIME	= 3.1000E 00	FOAR = 8.7455E 00 VM = 3.6779E 00 W2 = 8.4469E-02	TAR = 3.9541E 01 H2O1 = -1.1132E-02	PAR = 9.9472E 04 V1 = 1.0490E 01	M = 1.0942E 00 M1 = 8.9221E-02			