

TURBOCOMPRESSORES

DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO E CARACTERÍSTICAS TERMODINÂMICAS

O turbocompressor, apesar de existir desde 1905, somente passou a ser normalmente utilizado em automóveis a partir de 1977, quando entrou no mercado como equipamento de linha em Saabs suecos, Buicks americanos e Porsches alemães. Até então, os turbos haviam aparecido apenas em carros de competição da década de 50; nos Chevrolet Corvair e Oldsmobile Jetfire de 1964 e em grandes caminhões diesel. Foram experiências e tentativas interessantes, algumas delas com sucesso, porém sempre destinadas a clientela especializada, jamais ao grande público.

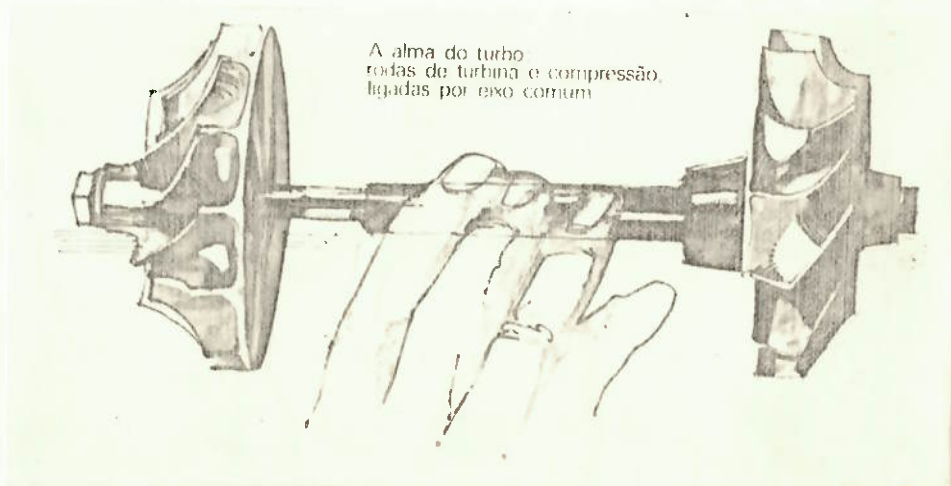
Com o aparecimento em escala mundial de exigências de limpeza ambiental e economia de combustível, os turbos voltaram como uma das principais respostas a problemas aparentemente quase insolúveis.

Para 1980, nada menos que 18 automóveis europeus e americanos turbinados estão à disposição do comprador comum.

I - INTRODUÇÃO :

O turbocompressor é um aparelho conceitualmente bastante simples: aproveita os gases de exaustão como fonte extra e gratuita de energia para o motor. Esses gases são expelidos dos cilindros com muita força. Quanto mais "alto" o funcionamento do motor e quanto mais alta a sua rotação, com mais força eles sairão - mais energia conterão.

Esses gases, quando simplesmente atirados à atmosfera, significam energia jogada fora, desperdiçada. O turbo aproveita essa energia para girar uma roda aletada - o mesmo princípio do moinho de vento.



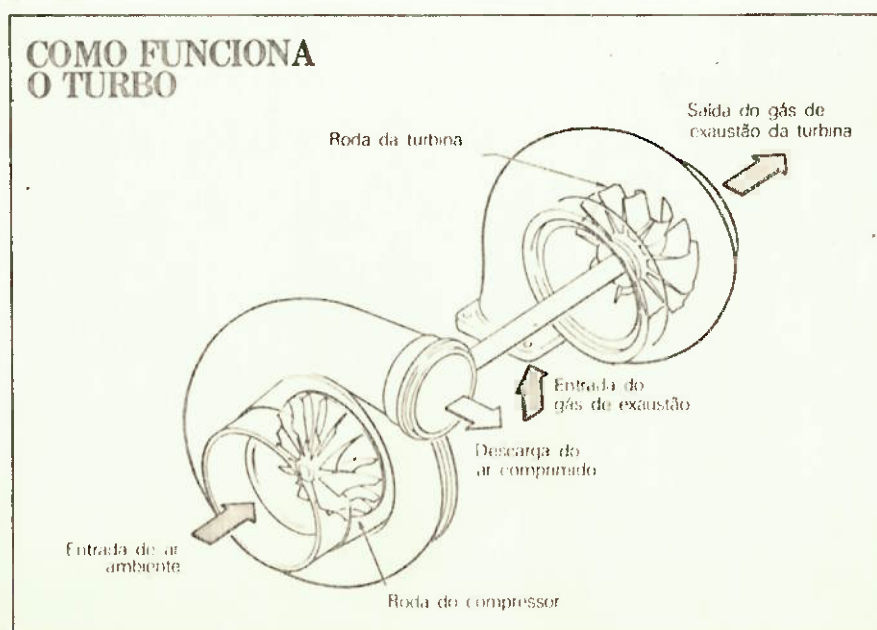
Essa roda possui, naturalmente, um eixo, que tem em sua outra extremidade uma outra roda aletada, que funciona como compressor.

A primeira roda é colocada em funcionamento pela passagem por suas aletas dos gases de escapamento; a segunda, colocada a girar pela rotação do eixo comum, age como um aspirador de ar, aspirando-o do meio externo e empurrando-o para dentro dos cilindros em quantidades e pressões tão mais altas quanto mais alto for o regime de rotação do motor.

A entrada no cilindro de quantidades incomuns de ar tem dois efeitos básicos: supercomprime o motor e provê mais oxigênio para a combustão. No primeiro caso, a maior quantidade de moléculas gasosas dentro de um mesmo cilindro leva a um aumento de compressão semelhante ao obtido por rebaixamento de cabeçote e utilização de pistão cabeçudo, isto é, resulta em mais torque e potência sem necessidade de maiores quantidades de combustível; maior eficiência e economia, portanto. No segundo caso, havendo mais oxigênio presente para garantir a queima de uma mesma quantidade de combustível, há uma combustão mais completa, ecologicamente mais limpa (devido à menor liberação de poluentes) e mais silenciosa (já que ar mais denso abafa mais ruídos).

Maior potência, para mais velocidade; mais torque, para mais aceleração; mais economia de combustível por trabalho executado; menos poluição atmosférica e sonora. O turbocompressor parece ser uma solução mágica para todos os grandes problemas da engenharia automotiva atual.

Mas, é claro, nada neste mundo é tão simples e perfeito assim. O turbo tem suas parcelas de problemas, que devem ser conhecidos e encarados de frente, para que se possa ter uma visão equilibrada de sua existência e utilização.



Como todo mecanismo de precisão - a regime de potência máxima ele está girando a 100 mil RPM - o turbo custa relativamente caro.

Um carro turbinado exige cuidados redobrados com lubrificação do motor (nível do óleo, pureza, trocas constantes de filtros, etc.) , com os dotes de aceleração do veículo (quando o turbo "entra" o carro muda totalmente de personalidade, parecendo possuir subitamente um motor muito maior e mais potente), e com sua potência e torque, para que o motor não seja "esticado" demais nas marchas, entrando em regimes de rotação destrutivos - afinal, eles saíram de fábrica normais e seus sistemas de carburação e distribuição foram desenhados para entrar em perda muito antes das rotações que lhes sejam potencialmente perigosas.

II - TURBOALIMENTAÇÃO - MECÂNICA ATUAL PARA EQUIPAMENTOS PESADOS :

Para o eficiente desempenho das máquinas atualmente solicitadas nas diversas áreas da construção e para os mais diversificados e sofisticados trabalhos, as modernas concepções da engenharia e tecnologia buscam o aperfeiçoamento das operações na integração motor e turbo.

O motor turboalimentado, por operar com condições de alimentação e descarga superiores em relação à pressão atmosférica, tem provado sua capacidade para aumentar a potência específica do motor de combustão e, além disso, por se tratar de um sistema que reduz o consumo de combustível, permite assegurar uma diretriz futura: a maior parte dos motores de combustão interna será desenhada para ser turboalimentada.

Embora muitos motores diesel de serviço pesado tenham aceitado um aumento de pressão média efetiva (BMEP)de 30 a 50% sem grandes modificações, as maiores pressões internas dos motores com maior pressão de admissão, com BMEP's de 150 a 200 PSI (10 a 14 kg/cm²), ou maiores, demandam alterações estruturais nos desenhos e no sistema de injeção de combustível para queimar o mesmo em maiores quantidades e com boa eficiência. Isto é destinado principalmente para os modernos motores diesel de alta rotação na classe de 80 a 800 HP com apenas um turboalimentador. Motores maiores são encobertos com a instalação de múltiplos turbos.

Essa classe de motores é a mais forte no nosso mercado para as aplicações industriais por apresentar excelente economia e garantia de serviços. São também os maiores consumidores dos atuais turboalimen-

tadores, produzidos em larga escala industrial, de preço reduzido, alta rotação e tamanho compacto.

III - MOTORES - ESTADO ATUAL DE DESENVOLVIMENTO :

A engenharia e a tecnologia de produção têm feito o possível para conseguir aumentar o desenvolvimento do motor por sua cilindrada, através de aumento de rotação; diminuição do peso por potência; diminuição do preço de produção; melhor economia de combustível; grande resistência de serviço e simples manutenção.

Essa tendência para maiores velocidades, como recurso dos motores para maiores potências, é verificada na faixa de 1800 a 2500 RPM nos motores atuais, passando para 3000 a 4000 RPM nos motores de menor cilindrada, mais modernos. Contudo, para o desempenho termodinâmico dos motores naturalmente aspirados, constata-se que nos últimos 30 anos a técnica pouco evoluiu.

Os BMEP's dos motores de 4 tempos continuam na faixa de 100 a 110 PSI (7 a 7,5 kg/cm²) e ainda são diminuídos sob o efeito da altitude. Da mesma forma, o consumo específico (BSFC) não superou os 10%.

Para os motores de 2 tempos houve um progresso similar, mas de difícil classificação, visto que eles não são na realidade naturalmente aspirados, e sim "soprados" através de compressores que absorvem força do virabrequim para impulsão. Sacrificam, desse modo, tanto o BMEP como o BSFC.

A razão básica para esse limite no desempenho ou no BMEP é devido ao fato que a utilização do ar na clássica combustão do motor de ciclo diesel não podia mais ser melhorada.

Os motores de combustão interna que funcionam sujeitos e de acordo com a pressão exercida pelo peso do ar, o que varia conforme a localidade, estimulam a técnica ao rompimento dessa dependência. Nesse sistema, a maior pressão é obtida ao nível do mar (760 mmHg ou 29,92"Hg) ou em locais mais elevados como Curitiba-PR, que é de 635 mmHg ou 25"Hg.

Em outras palavras isto representa: quanto maior a altitude, menor a pressão barométrica e, em consequência, a capacidade do motor aspirar o ar atmosférico no interior dos cilindros. Resultado final, menos potência.

Os aviões de pistão que apresentam o seu limite de potência pela pressão do coletor de admissão, determinando a altitude de voo, servem como exemplo típico dos aparelhos movidos pelo motor de combustão.

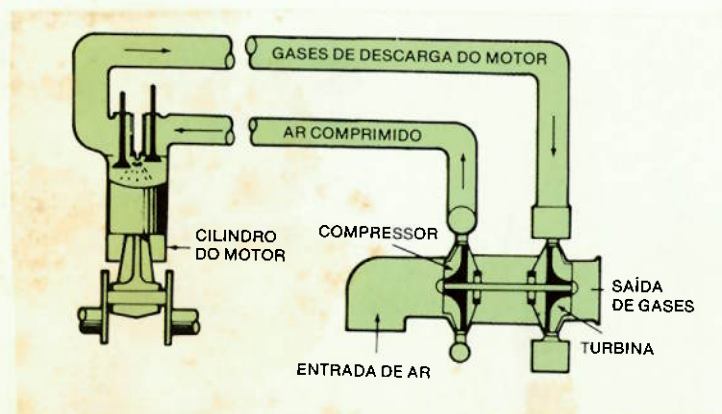
A resposta lógica, no entender de especialistas, para se conseguir transpor essa barreira, consiste em aumentar a densidade do ar a ser suprido para o motor, através de um compressor, da maneira mais econômica. As primeiras tentativas de utilização do compressor tocado pelo próprio motor não foram muito satisfatórias pois, da mesma forma que no motor de 2 tempos, reduziam o BMEP e BSFC, simultaneamente. A disponibilidade dos turboalimentadores de alta rotação, baixo custo e tocados pneumaticamente pelo motor encontra portas abertas para um substancial e econômico aumento na potência específica para essa classe de motores.

IV - TURBOALIMENTADORES :

Os aviões Cessna e Pipers, com motores turboalimentados, além de decolarem com potência elevada, voam a altitudes de 3000 a 5000 metros com pressão no coletor de admissão de 30hg (1 kg/cm²) ou até mais se necessário. Essa potência só seria atingida ao nível do mar.

A introdução do turbocompressor em novos motores pode ser concebida dentro do seguinte esquema: tamanho compacto, alta rotação e produção industrial grande. A idéia de fabricar novos turboalimentadores levou em consideração qualidades como: simplicidade, pequeno peso, robustez para serviços rudes, facilidade de instalação, um mínimo de canalizações, que sejam insensíveis ao clima, de rápida resposta e baratos, para serem acoplados a motores diesel de serviço pesado, com baixo custo por HP.

Partindo desse princípio, os desenhos foram convergindo para os turboalimentadores de alta velocidade, usando compressores centrífugos, com descarga radial de ar e turbinas com entrada de ar radial-cen-



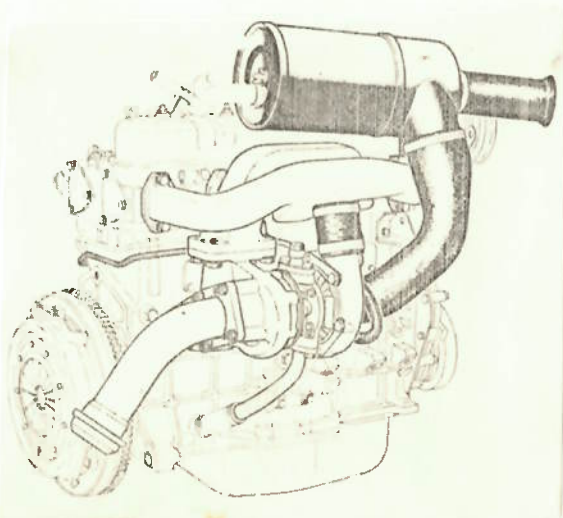
Esquema de
funcionamento de
um turbocompressor

trípeta, com desenhos de roda próprios para grande produção através de modelos de fundição. Os desenhos incluem também mancais flutuantes, próprios para velocidades extremamente altas, lubrificados pelo óleo do motor, sendo esfriado por radiação enquanto o esfriamento interno é feito por meio de óleo lubrificante, sem uso de resfriamento a água, resultando em custo mais baixo e maior simplicidade.

A necessidade de corresponder a uma grande variedade de motores com várias cilindradas e rotações usando basicamente o mesmo tamanho de turbocompressor determinou a criação do conceito de "famílias", para tais peças.

A capacidade do fluxo do compressor é modificada pela alteração do contorno das palhetas, do diâmetro do indutor para a largura do difusor, empregando a mesma roda com um modelo de fundição. Analogamente, o mesmo é válido para a roda da turbina. Assim, o mesmo tamanho e as mesmas peças básicas para os diversos tipos de turbos mantêm uma mesma família. O fabricante, por sua vez, pode limitar o número de modelos e aumentar o de peças idênticas, permitindo ao fabricante de motores o aperfeiçoamento do seu produto ao "casar" o turbo às diferentes aplicações e rotações, sem modificar muito a instalação original do motor.

Primeiramente, os turbocompressores devem ser duráveis, requerendo pouca manutenção e, principalmente, consistentes com os "standards" do motor em que está aplicado. Somente através de alta qualidade no desenho do turbo, junto com um alto desempenho aerodinâmico e uma integridade mecânica, poder-se-ia estabelecer uma boa reputação nas indústrias de motores de hoje.



Turbocompressor
instalado no motor
do Peugeot 604

V - CARACTERÍSTICAS TERMODINÂMICAS - DESCRIÇÃO DO TURBOCOMPRESSOR :

A figura 1 mostra um turbocompressor em corte. Ele consiste de duas máquinas: um compressor e uma turbina. Ambas as rodas são montadas em um eixo, suportado por dois mancais flutuantes em uma carcaça central que contém as passagens de óleo, o mancal de encosto e ainda os retentores para ambos (carcaça e turbina).

O compressor é composto por três partes: a roda, o difusor e a carcaça com as respectivas entrada e saída do ar e suas conexões.

A turbina, por sua vez, é constituída pelas seguintes peças : carcaça, anel impulsor e a roda propriamente dita. Recebe a energia do motor através do fluxo de gases de descarga que, com maior pressão e temperatura, se expandem na roda da turbina, fazendo-a girar enquanto o compressor absorve todo o trabalho exercido pela turbina, exceto as perdas por fricção nos mancais.

Ambos, compressor e turbina, são combinados para condições próprias de fluxo e tipo de serviço, conseguindo melhor eficiência na faixa de serviço desejada.

Os tamanhos mais comuns para estes dois componentes são, em geral, de 8 a 12cm (3 a 5 pol), sendo que os maiores chegam até 16,5cm ou 6,5pol de diâmetro.

O sistema de mancais para essas velocidades foi desenvolvido de forma a resultar em um alto grau de confiança mecânica e vida útil, visto que o óleo lubrificante filtrado e sob pressão deve estar sempre presente enquanto o turbo estiver trabalhando.

Compressores de diferentes tipos e capacidades são disponíveis e podem ser adaptados para as específicas necessidades e combinações de seus componentes: desenho da roda com as palhetas viradas para trás para razão de pressão média, ou com palhetas radiais para alta razão de pressão; desenho do difusor, canaletas para maior eficiência ou sem canaletas para maior faixa de uso, e carcaças do compressor do tipo "bojuda" ou do tipo "voluta".

As rodas da turbina modificam-se do tipo de disco com uma forma de estrela afundada, de alta resistência, para as de alta velocidade, de palhetas de menor massa, para mais rápidas acelerações.

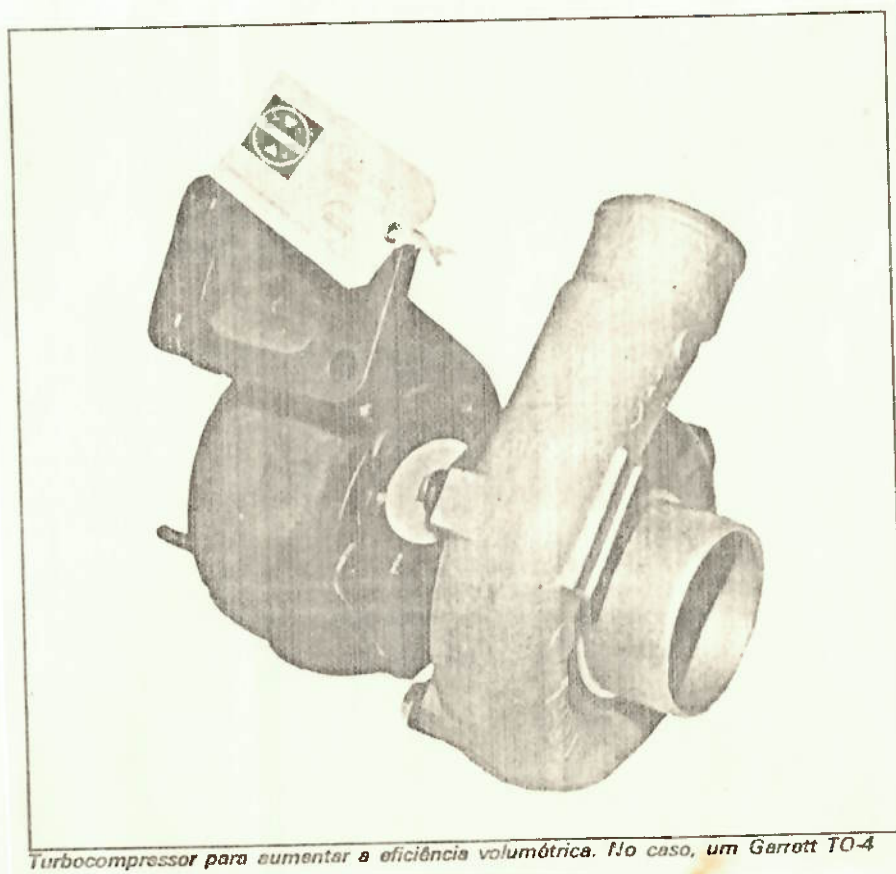
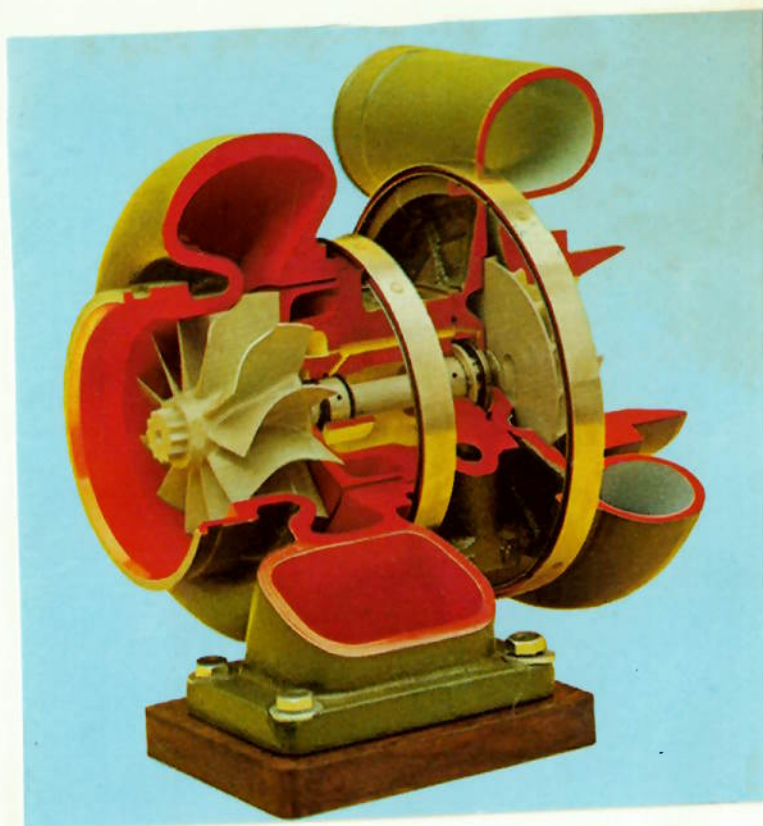
As carcaças de turbina partiram das de simples entrada para a divididas, de 180°, e, recentemente, para as divididas meridionalmente, com dois caracóis para admissão completa de 360° dos gases de descarga, para melhor aproveitar a energia calorífica do motor. As carcaças tipo

A aceitação na indústria começou no início através dos turbo-compressores relativamente pesados, de resposta lenta, com razões de pressões oscilando entre 2:1 e 2,5:1, para que em apenas cinco anos, com as presentes gerações de turbos, eles sejam capazes de comprimir de 3:1 até 4:1, em um só estágio, permitindo inclusive segurança na operação dos rotores na faixa de 100.000 RPM ou mais.

Os maiores conhecimentos nos desenhos das rodas, distribuição de forças, materiais e técnicas de fundição, fizeram possível aumentar a velocidade das palhetas da turbina de 360 a 400 m/s (1200 a 1300ft/s) nas razões de pressão média, para 550 m/s (1800 ft/s) necessários para maiores razões de pressão.

Segundo o departamento técnico da Turboex Ltda., fabricantes de turbocompressores, poderemos em um mesmo motor, numa rotação constante, ter as pressões de admissão variando de 0,1 kg/cm² no plano, por exemplo, para até 0,5 kg/cm² em uma rampa de 6%, pois a turbina responde principalmente a carga no motor. Essa é a razão pela qual o motor não sofre sempre o mesmo esforço. No caso do compressor comum, a pressão do coletor seria sempre a mesma, pois é constante com a rotação do motor, aumentando a pressão média efetiva continuamente. Desde que tomadas as devidas precauções com a temperatura e pressão do óleo lubrificante, a temperatura e o correto "casamento" do turbo com o motor, a Turboex não vê nenhum inconveniente no emprego do turboalimentador.





Turbocompressor para aumentar a eficiência volumétrica. No caso, um Garrett TO-4

Figura 1

Torus, com anéis impulsores intercambiáveis, têm sido largamente trocadas pelo tipo "voluta", sem anel impulsor, com variabilidade de tamanhos dados pela razão entre a área e o raio, denominada A/R.

Assim o tamanho, peso e custo do ar comprimido em lb/min ou kg/min, foram cortados pela metade nesses 10 anos.

O moderno turboalimentador, na sua forma atual, pode ser considerado por possuir elevados padrões de engenharia.

VI - DESEMPENHO DE COMPRESSOR :

O desempenho do compressor é apresentado na forma de um mapa, conforme figura 2, onde temos o aumento da razão de pressão com as linhas de rotação e eficiência constantes "versus" o fluxo de ar em kg/min ou lb/min, em uma dada condição de pressão e temperatura na entrada do compressor, isso entre os limites máximos e mínimos do mesmo. Uma alta eficiência significa maior densidade de ar a qualquer razão de pressão, a uma rotação mais baixa do compressor, sendo portanto tão importante quanto a gama de faixas nas quais o motor trabalha e o compressor atende.

VII - DESEMPENHO DA TURBINA :

A característica do desempenho da turbina pode ser apresentado de duas maneiras: a primeira é a razão de fluxo de ar para a razão de pressão. A turbina consiste de dois orifícios em série: o primeiro, onde fica o anel impulsor, ou a garganta, e o segundo, que é o porto de saída dos gases, na roda da turbina.

O fluxo de gases através da turbina pode ser aumentado ou diminuído modificando-se qualquer um desses orifícios. Na prática isso é conseguido trocando-se os anéis impulsores ou carcaças completas com áreas diferentes, para conseguir-se aumentar ou diminuir a rotação da turbina afim de atender o fluxo de gases do motor.

A segunda característica é uma relação de eficiência mecânica da turbina para as combinações de fluxo de gases entre compressor e turbina.

A figura 3 mostra as linhas com o fluxo de gás corrigido para a turbina com sua eficiência mecânica, "versus" a razão de pressão da turbina.

Esses dados são obtidos num teste combustor afim de se manter os valores constantes de pressão e temperatura na entrada da turbi-

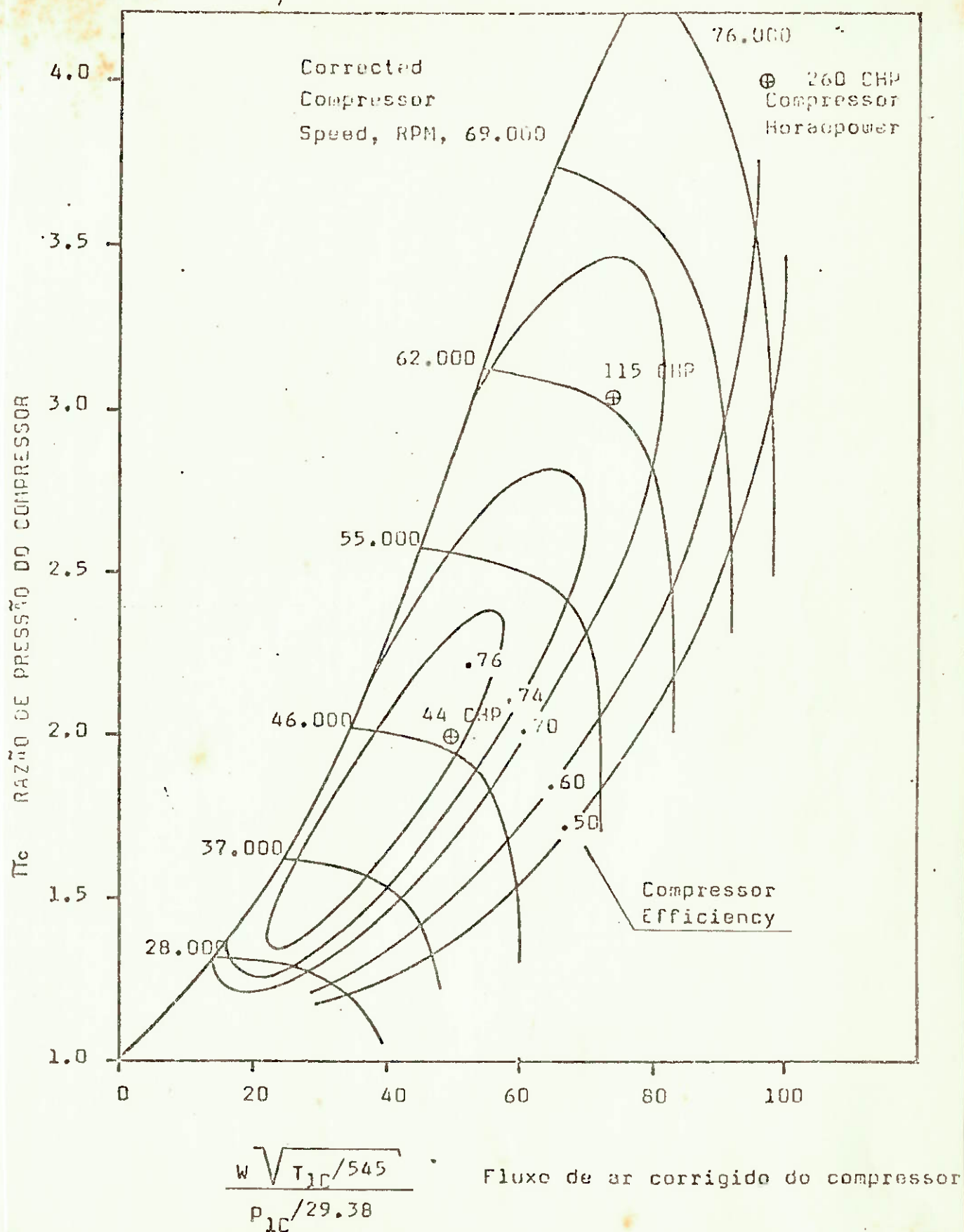


Figura 2: Gráfico típico de desempenho dos compressores.

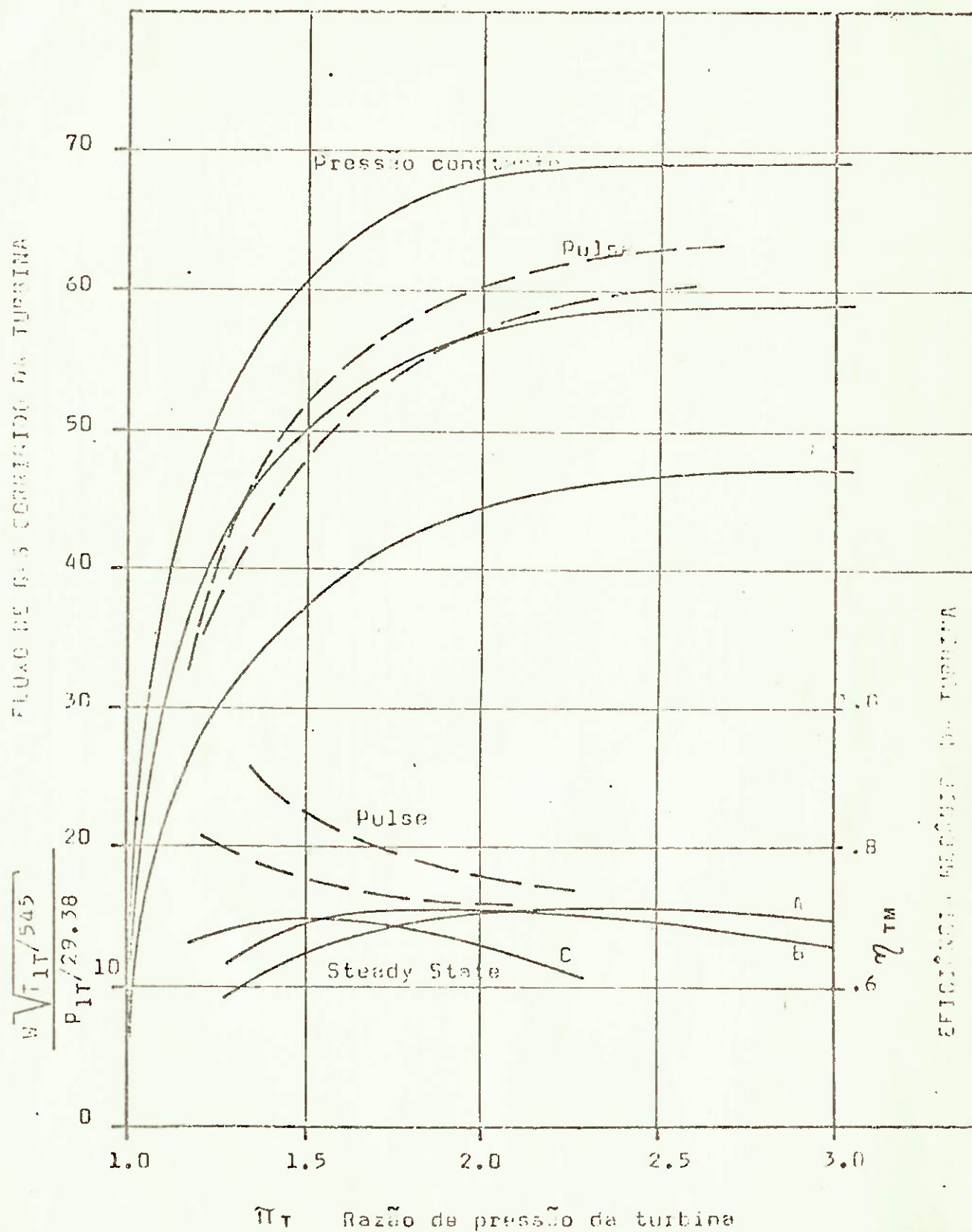


Figura 3: Gráfico típico de desempenho da turbina

na para três tipos: A, B, C.

O perfeito desempenho do compressor e da turbina, quando combinados num turboalimentador, exige um balanço de forças entre a energia dos gases na entrada da turbina e a utilização dessa energia pela turbina, sendo consistente com sua eficiência a qualquer condição de fluxo de gases, temperatura e pressão, e o respectivo trabalho requerido pelo compressor para comprimir a desejada quantidade de ar na pressão necessária e na eficiência da operação. Em função da velocidade e da eficiência volumétrica do coletor de admissão e também da característica do fluxo de gases da turbina, é necessário manter uma continuidade no fluxo através do sistema entre a capacidade do compressor e a capacidade do motor.

O nível de pressão no qual o compressor pode trabalhar em qualquer fluxo de ar, medido pelo motor, é sempre determinado pela capacidade de descarga da turbina, que reverte-se, assim, no ponto-chave para o desempenho final do motor turboalimentado. Sob o ponto de vista da turbina, o motor perfaz a função de um combustor que envia gases de descarga à alta temperatura e pressão à turbina.

Sob o ponto de vista do compressor, o motor é uma bomba de ar de fluxo positivo, que mede a descarga do compressor e determina até onde deve operar.

Com um turboalimentador livre e sem controladores de pressão, o fluxo de ar no compressor, através do motor e dentro da turbina, podem ser considerados iguais. A quantidade de combustível adicionada é pequena, especialmente nos motores diesel que trabalham com razão de ar/combustível (A/C) elevados, e pode ser assumida para ser igual aos vazamentos e perdas causados pela pressão que escapa dos pistões (blow-by) mais os vazamentos nos retentores do turbo para a atmosfera.

VIII - OPERAÇÃO DO MOTOR TURBOALIMENTADO :

O motor turboalimentado é parte de um sistema completo, começando com a entrada do ar no compressor e terminando com a descarga dos gases na saída da turbina.

Cada um dos três componentes (compressor, motor e turbina), trabalham relacionados e reagem em conjunto.

Outros componentes podem ser adicionados como por exemplo, um trocador de calor após o compressor para esfriar e adensar o ar antes de entrar no coletor de admissão. Uma válvula de alívio (by-pass) pode ser

adicionada para melhor controlar o fluxo de gases na turbina e modular a rotação, subsequentemente à pressão de descarga do compressor.

O sistema pode ser alterado com a adição de dois ou mais turboalimentadores em paralelo, ou então, para aplicações especiais de elevado desempenho, dois turbos podem ser instalados em série com um resfriador entre cada estágio e um outro resfriador após o segundo estágio. Os limites são as pressões de explosão, fumaça e temperaturas de compressão e limites de detonação nos motores à gasolina e o limite de velocidade e capacidade de fluxo, no turboalimentador. (O que se aplica ao motor diesel também é válido aos motores à gasolina, ou à gás natural),

Na figura 4, observa-se parte de um diagrama do compressor, com as linhas de operação do motor. Desde que o motor diesel envia um volume mais ou menos contínuo de ar, numa mesma rotação, as linhas de operação do motor são praticamente retas porque só se modificam conforme as variações de eficiência volumétrica. A inclinação dessa linha é determinada por um aumento na densidade da descarga do compressor, quando um pós-resfriamento for usado, visto que a densidade no coletor de admissão será aumentada.

A capacidade de ar do motor determina onde o compressor irá trabalhar, conforme a rotação e a carga do mesmo, enquanto a saída da turbina é responsável pelo controle do nível de pressão. Quando a quantidade de combustível aumenta, em qualquer que seja a rotação do motor, a turbina responderá ao aumento de temperatura, aumentando sua rotação e, dessa forma, aumentando a razão de pressão do compressor e a densidade de descarga com o fluxo de ar.

A velocidade máxima da turbina, como a máxima razão de pressão do compressor, é atingida na rotação máxima do motor, como indica o ponto A da fig.4, onde existe um ponto comum entre o combustível dosado com o motor a plena carga a uma determinada temperatura de descarga, e a união da descarga (área) da turbina, com um compressor, provocando equilíbrio de forças no turbocompressor. Interligando-se os pontos com rotações constantes do motor e variando o débito de óleo, ou seja, a carga propriamente dita, consegue-se a curva de força, na fig.4, entre os pontos A, B e C.

Essa linha pode não satisfazer os requisitos da transmissão, pois o aumento do torque ocorre em meia rotação, que pode ser muito baixa, ou então, se a temperatura de descarga for muito alta no ponto C, p.

ex., sendo as pressões baixas, resultando numa baixa razão A/R, ocorre elevado nível de fumaça. Nesse caso a solução seria usar-se uma carcaça da turbina ou anel impulsor de área menor, que aumentaria a rotação da turbina e a pressão do compressor para o ponto D, sendo que a linha de carga do motor teria um maior fluxo de ar da linha C para a D.

A figura 7 mostra um motor que funciona como um combustor para a turbina, exerce uma característica definida com respeito ao acréscimo de temperatura através dos cilindros, isto é, do coletor de admissão para o de descarga, numa função da razão A/C e da rotação do mesmo. A temperatura do coletor de admissão em um motor turboalimentado pode ser sempre calculada a partir da razão de pressão em que o compressor trabalha, e de sua eficiência, tendo-se como parâmetros a temperatura do ar ambiente. A temperatura do coletor de admissão mais o acréscimo de temperatura através dos cilindros determinam aproximadamente a temperatura dos gases de descarga.

IX - CONCLUSÃO :

Com uma razão A/R maior, o combustível injetado pode queimar mais eficientemente sem fumaça, sendo que a temperatura de descarga seria mais baixa, tornando-se possível inclusive, aumentar-se o combustível, conseguindo-se um maior BMEP seguindo-se uma linha de menores carcaças e maiores pressões. Com relação à velocidade do motor, resulta em um apreciável aumento na razão de pressão e na pressão de admissão nos pontos E e F (fig.4) na rotação máxima do motor. Se o fluxo de ar e a razão A/R no ponto A, com a carcaça maior, eram suficientes para a carga e rotação, não se pode esperar benefício nenhum de um mais baixo BSFC com mais ar nos pontos E e F, com o motor tendo que aceitar as pressões no ponto F, uma vez que uma pressão maior foi requerida para o ponto D.

O método de aumentar-se o fluxo de ar para o motor, aumentando-se a rotação do turbo através de uma área (bico) de menor tamanho, também torna-se possível para se fazer a compensação para altas altitudes, superalimentando o motor para uma sobrenormal razão A/C como no nível do mar. Uma vez que o turbocompressor sobe de rotação automaticamente com a altitude, ele ajudará a dar ao motor ar suficiente para médias e altas BMEP, mesmo nas altitudes, sem a necessidade de descomprimir-se o motor.

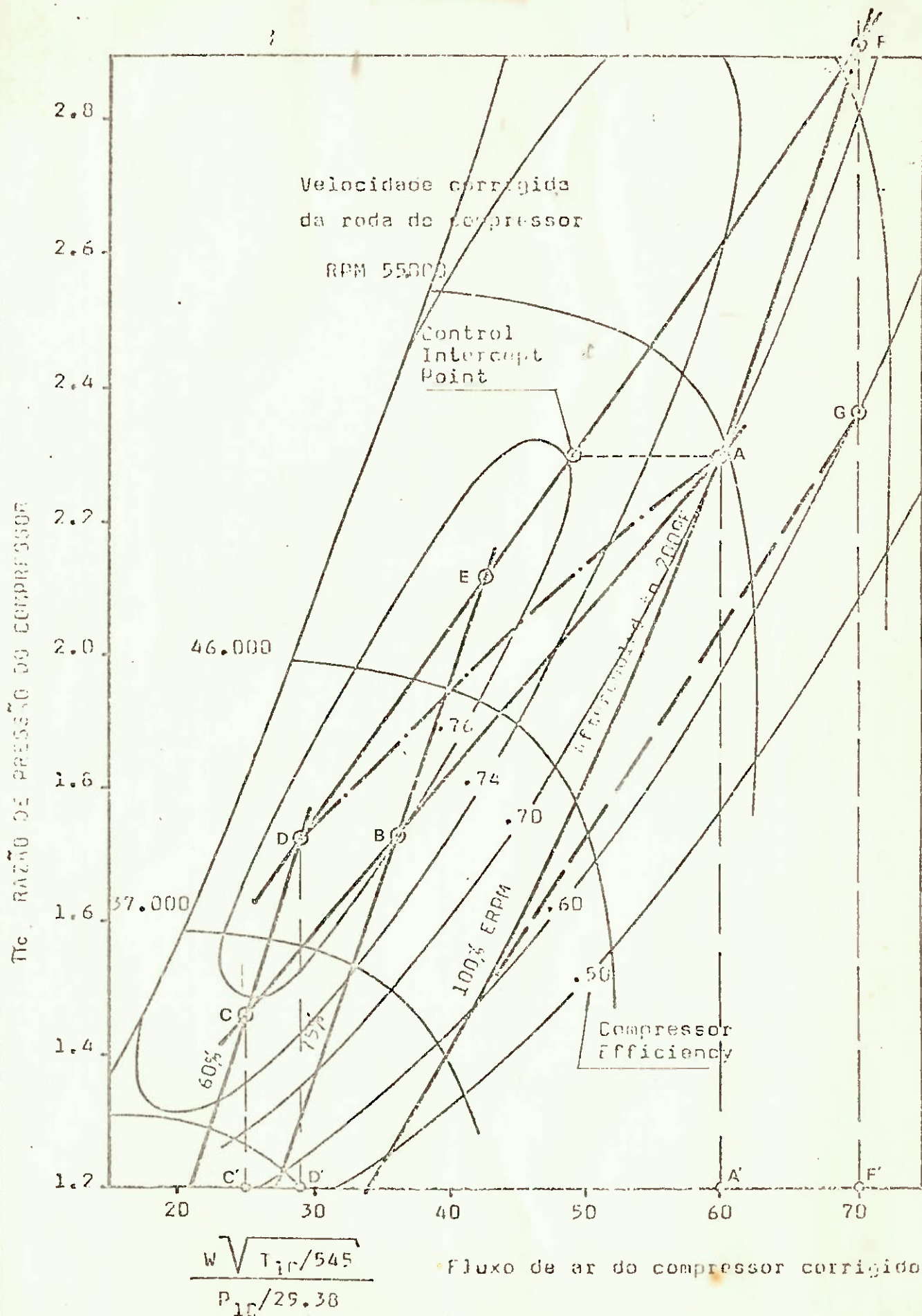


Figura 4: Gráfico do compressor com as linhas de trabalho

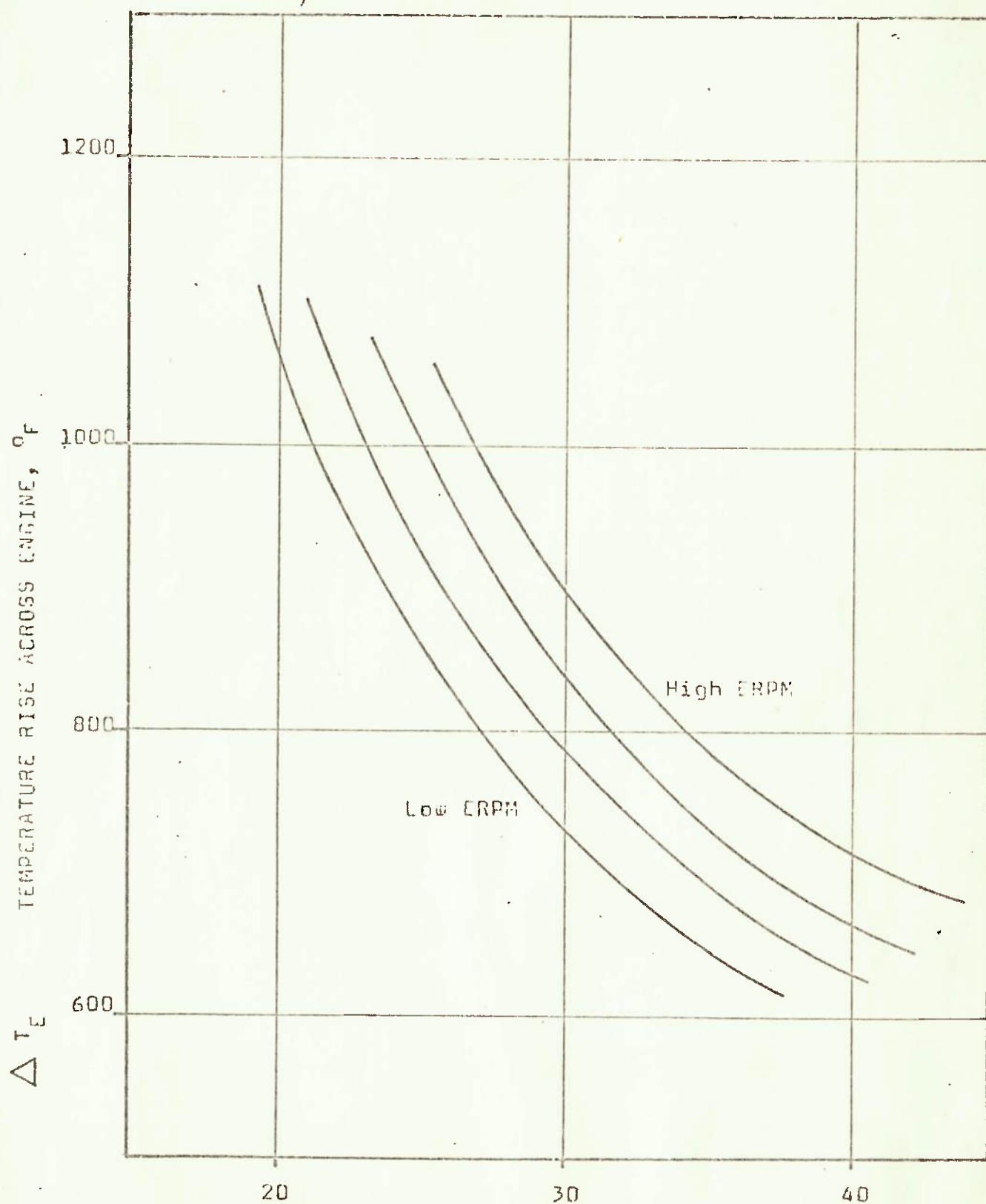


Figura 7: Acréscimo de temperatura no motor versus razão ar/combustível.

XI - GLOSSÁRIO :

- A/C Razão ar/combustível.
- A/R Especificação da dimensão da carcaça da turbina ou do compressor, medido entre o eixo e o meio da voluta (R) e a área da garganta (A).
- ADIABÁTICA Compressão ideal de gás, de maneira reversível, im

plicando que não haja perdas de calor no processo.

ANEL IMPULSOR(BICO).. Anel na carcaça da turbina que acelera a velocidade dos gases, direcionando-os para a roda da turbina.

BSFC (Brake Specific Fuel Consumption) Consumo específico de combustível.- kg/HP-h

BMEP (Brake Mean Effective Pressure) Pressão Média Efetiva - kg/cm² ou lb/pol²(PSI)

BY-PASS Válvula que permite parte dos gases escaparem sem passar pela turbina (válvula de alívio).

BLOW-BY Pressão de suspiro de carter - cm H₂O ou pol H₂O.
valores normais: 13 cm H₂O ou 5 pol H₂O.

CONTRA-PRESSÃO Pressão causada pelo sistema de escapamento.
valores normais: 50 cm H₂O.

DIFERENCIAL DE PRESSÃO Diferença entre a pressão do compressor e a pressão de descarga no coletor.

EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA Razão entre a massa de ar aspirada pelo motor e a que deveria ter entrado no pistão pela aspiração natural.

EFICIÊNCIA MECÂNICA Razão entre a força que o motor desenvolve (BHp) e a força desenvolvida no motor (IHp).

PONTO DE CRUZAMENTO Tempo entre a abertura das válvulas de admissão e descarga.

PRESSÃO CONSTANTE ... Tipo de carcaça de turbina não dividida que não recebe pulsação dos gases, através da ordem de folga do motor.

RAZÃO DE PRESSÃORazão entre a pressão absoluta comprimida e a pressão absoluta admitida.

TEMPERATURA

DE DESCARGATemperatura medida no coletor de admissão antes da entrada na turbina.

TEMPERATURA

DE ADMISSÃOTemperatura medida no coletor de admissão após o compressor.

TORQUE (BACK-UP)Característica de um motor de conseguir recuperar o conjugado máximo.

- CÁLCULO DO CICLO PARA : A) MOTOR ASPIRADO (sem turbo) : $r_v = 7,5:1$
 B) MOTOR ASPIRADO : $r_v = 10:1$
 C) MOTOR TURBINADO : $r_v = 7,5:1$

A) MOTOR ASPIRADO: $r_v = 7,5:1$

p_1 = pressão de aspiração = $14,7 \text{ lb/pol}^2 = 1,0 \text{ atm}$

T_1 = temperatura na aspiração = $27^\circ\text{C} = 300^\circ\text{K} = 567^\circ\text{R}$

F_r = $\frac{\text{relação ar/combustível real}}{\text{relação a/c estequiométrica}} = 1,1$

(a) Da Fig.3-4, pág. do livro "Motores de Combustão Interna" de J. Taylor, tiramos:

h_1 = entalpia do octano líquido a $567^\circ\text{R} = -140 \text{ Btu/lbm}$

Temos, também que a relação a/c real é:

$$F = 1,1 \cdot \frac{0,0678}{(\text{esteq})} = 0,073$$

(b) Supondo ausência de vapor d'água (h) e gás residual (f), para simplificar os cálculos:

Fórmula (3-13) do Taylor:

$$m = \frac{1 + 0,073}{\frac{1}{29} + \frac{0,073}{112}} = 30,5 = \text{mol equivalente ar/combustível}$$

onde: mol do ar = 29
mol do octano = 112

(c) De ábaco C-1 do Taylor, com: $T = 567^\circ\text{R}$

$p = 14,7 \text{ psi}$

$f = 0$

tiramos: $H_1^0 = 1430 \text{ Btu/lb}$

$V_1^0 = 440 \text{ XXXX}$

$E_1^0 = 230 \text{ Btu/lb}$

Temos, ainda: $V_2^0 = \frac{V_1^0}{7,5} = 58,7$

(d) $H_1 = \frac{H_1^0}{29} = 49,3$

Para o processo de mistura (*), segundo equação 3-19 do Taylor:

$$H_1^* = (1 + F) \cdot H_1 + F \cdot (h_1)$$

$$H_1^* = (1 + 0,073) \cdot 49,3 + 0,073 \cdot (-140) = 42,7$$

$$H_1^{0*} = H_1^* \cdot 29 = 1301,7$$

(e) De C-1, com $H_1^{0*} = 1301,7$

$$p = 14,7$$

$$\text{temos: } T = 583^\circ R$$

$$f = 0$$

$$V^0 = 425$$

$$F_r = 1,1$$

$$E^0 = 115$$

(f) Seguindo linha de entropia (s) constante (paralela à $F_r = 1,1$)

em C-1, até $V_2^0 = 58,7$:

$$T_2 = 1105^\circ R = 584^\circ K = 311^\circ C$$

$$p_2 = 210 \text{ psi}$$

$$H_2^0 = 5500 \text{ Btu/lb}$$

$$E_2^0 = 3300 \text{ Btu/lb}$$

Dividindo por $m = 30,5$:

$$V_2 = 1,92$$

$$H_2 = 180,3 \text{ Btu/lb}$$

$$E_2 = 108,2 \text{ Btu/lb}$$

(g) Trabalho = $w = -778 \left(108,2 - \frac{115}{29} \right) = -81094 \text{ lbf.ft}$
de compressão

(h) $E_3^* = E_2^* + (1-f) \cdot F \cdot \text{pci}$

onde: $f = 0$; $\text{pci} = 19200 \text{ Btu/lb}$

$$E_2^* = E_2 (1 + F) = 116$$

$$E_3^* = 116 + 0,073 \cdot 19200 = 1517,7 \text{ Btu/lb}$$

$$V_3 = 1,92$$

$$V_3^* = V_3 \cdot (1+F) = 2,06$$

(i) Em C-3, com $F_r=1,1$: $T_3 = 5350^\circ R$; $p_3 = 1030 \text{ lb/pol}^2$

$$H_3^* = 1920 \text{ Btu/lb} ; s_3 = 0,51 \text{ Btu/lb}^\circ R$$

(j) Estado 4: em C-3, siga uma linha de $s = \text{constante}$ ($s_4 = s_3$) até: $V_4^* = V_1$

$$V_1 = \frac{440}{29} = 15,17 = V_4^*$$

$$p_4 = 100 \text{ lb/pol}^2$$

$$E_4^* = 840 \text{ Btu/lb}$$

$$H_4^* = 1100 \text{ Btu/lb}$$

$$T_4 = 3770^\circ R$$

————— § —————

B) MOTOR ASPIRADO: $r_v = 10:1$

Itens: (a), (b), (c), (d), (e) iguais ao caso A.

$$(f) V_2^0 = \frac{V_1^0}{10} = 44,0$$

Em C-1, com $s = \text{constante}$, paralela a $F_r = 1,1$, desde $V_1^0 = 440$ até

$V_2^0 = 44$, obtemos:

$$p_2 = 290 \text{ psi} ; T_2 = 1200^\circ R = 634,6^\circ K = 361,6^\circ C$$

$$H_2^0 = 6300 \text{ Btu/lb} ; E_2^0 = 3900 \text{ Btu/lb}$$

Dividindo por $m=30,5$:

$$H_2 = 206,5 \text{ Btu/lb} ; E_2 = 127,9 \text{ Btu/lb} ; V_2 = 1,44$$

$$(g) \text{ Trabalho de compressão} = w = -778 \left(127,9 - \frac{115}{29} \right) = -96421 \text{ lbf.ft}$$

$$(h) E_3^* = E_2^* + F. \text{ pci} \quad \dots \text{ onde: } E_2^* = E_2 \cdot (1+F) = 137$$

$$E_3^* = 137 + 0,073 \cdot 19200 = 1539 \text{ Btu/lb}$$

$$V_3 = V_2 = 1,44$$

$$V_3^* = V_3 \cdot (1+F) = 1,54$$

(i) Em C-3, com $F_r=1,1$: $T_3 = 5420^\circ R$; $p_3 = 1230 \text{ psi}$; $H_3^* = 1950 \text{ Btu/lb}$

$$s_3 = 0,49 \text{ Btu/lb}^\circ R$$

(j) Estado 4: Em C-3, com $s = \text{constante} = 0,49 \text{ Btu/lb}^\circ R$, desde

$$V_3^* = 1,54 \text{ até } V_4^* = V_1 = 15,2 \quad \text{. Teremos:}$$

$$p_4 = 95 \text{ psi} ; E_4^* = 775 \text{ Btu/lb} ; H_4^* = 1040 \text{ Btu/lb} ; T_4 = 3550^\circ R$$

26
C) MOTOR TURBINADO: $r_v = 7,5:1$

$$p_1 = 1,6 \text{ atm} = 23,5 \text{ psi}$$

$$T_1 = 60^\circ\text{C} = 333^\circ\text{K} \quad (\text{o ar, após a compressão no turbo, atinge esta temperatura}) = 600^\circ\text{R}$$

$$F_r = 1,1$$

$$(a) \cdot h_1 = \text{entalpia do octano líquido a } 600^\circ\text{R} = -127 \text{ Btu/lbm}$$

$$\cdot 1 + F = \text{relação ar/comb. real}^{-1} = 1,073$$

$$(b) m = 30,5 \text{ (igual aos casos anteriores)}$$

$$(c) \cdot \text{Do diagrama C-1, com } f=0: \quad v_1^0 = 280$$

$$H_1^0 = 1450 \text{ Btu/lb}$$

$$E_1^0 = 210 \text{ Btu/lb}$$

$$\cdot v_2^0 = \frac{v_1^0}{7,5} = 37$$

$$(d) \cdot H_1 = \frac{1450}{29} = 50$$

• Para o processo de mistura, fórmula 3-19 do Taylor:

$$\cdot \cdot H_1^* = (1+F) \cdot H_1 + F \cdot (h_1) = 1,073 \cdot 50 + 0,073 \cdot (-127) = 44,4$$

$$\cdot \cdot H_1^{0*} = m \cdot H_1^* = 30,5 \cdot 44,4 = 1354 \text{ Btu/lb}$$

$$(e) \text{ De C-1, com: } H_1^{0*} = 1354 \text{ Btu/lb}, \quad p_1 = 23,5 \text{ psi, temos:}$$

$$T_1 = 590^\circ\text{R}; \quad E_1^{0*} = 160 \text{ Btu/lb}; \quad v_1^{0*} = 270$$

$$(f) \text{ Em C-1, por uma linha de entropia } (s) = \text{constante (paralela a } F_r = 1,1), \text{ até } v_2^0 = 37, \text{ obtemos o Estado 2:}$$

$$T_2 = 1115^\circ\text{R}; \quad p_2 = 330 \text{ psi}; \quad H_2^0 = 5550 \text{ Btu/lb}$$

$$E_2^0 = 3350 \text{ Btu/lb}$$

Dividindo pelo mol equivalente $m = 30,5$:

$$v_2 = 1,2; \quad H_2 = 182 \text{ Btu/lb}; \quad E_2 = 109,2 \text{ Btu/lb}$$

$$(g) \text{ Trabalho de compressão (de 1 para 2):}$$

$$w = -778 \cdot \left(109,8 - \frac{160}{29} \right) = -81132 \text{ lbf.ft}$$

(h) Estado 3 :

- $E_3^* = E_2^* + F \cdot pci$ onde: $E_2^* = E_2 \cdot (1+F) = 117,8 \text{ Btu/lb}$
 $E_3^* = 1519,5 \text{ Btu/lb}$
- $V_3 = V_2 = 1,2$
 $V_3^* = V_3 \cdot (1+F) = 1,3$

(i) Em C-3, Com $F_r = 1,1$, conhecidos E_3^* e V_3^* , tiramos:

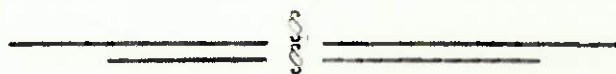
$$T_3 = 4700^\circ R ; H_3^* = 1530 \text{ Btu/lb} ; p_3 = 1470 \text{ psi} = 100 \text{ atm (!)} ;$$

$$s_3 = 0,41 \text{ Btu/lb}^\circ R$$

(j) Em C-3, seguindo linha de $s = 0,41 \text{ Btu/lb}^\circ R = \text{constante}$, do pon-

to 3 até $V_4^* = V_1 = \frac{V_1^0}{2,5} = 9,65$, obtemos o Estado 4 :

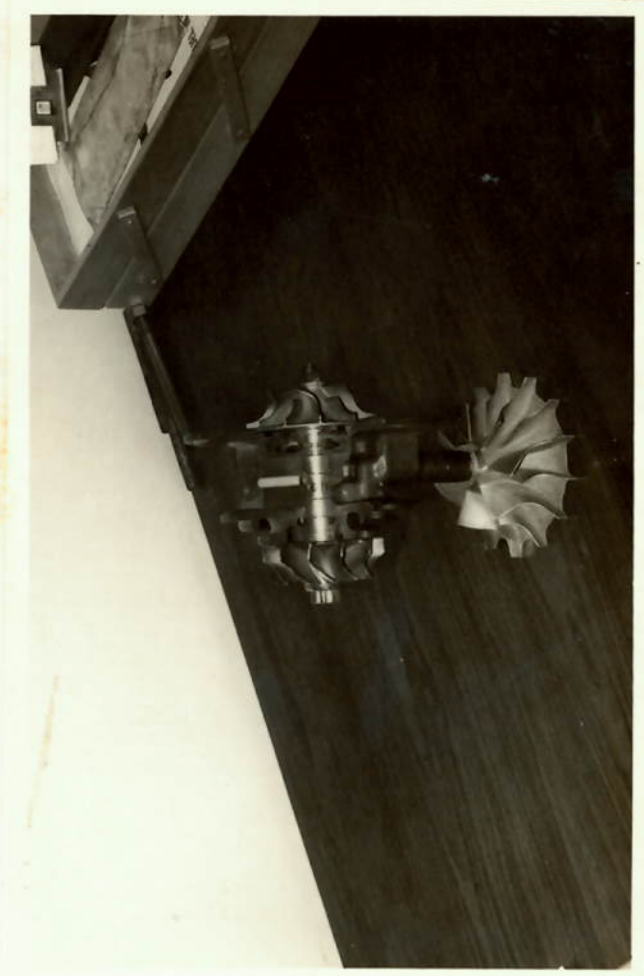
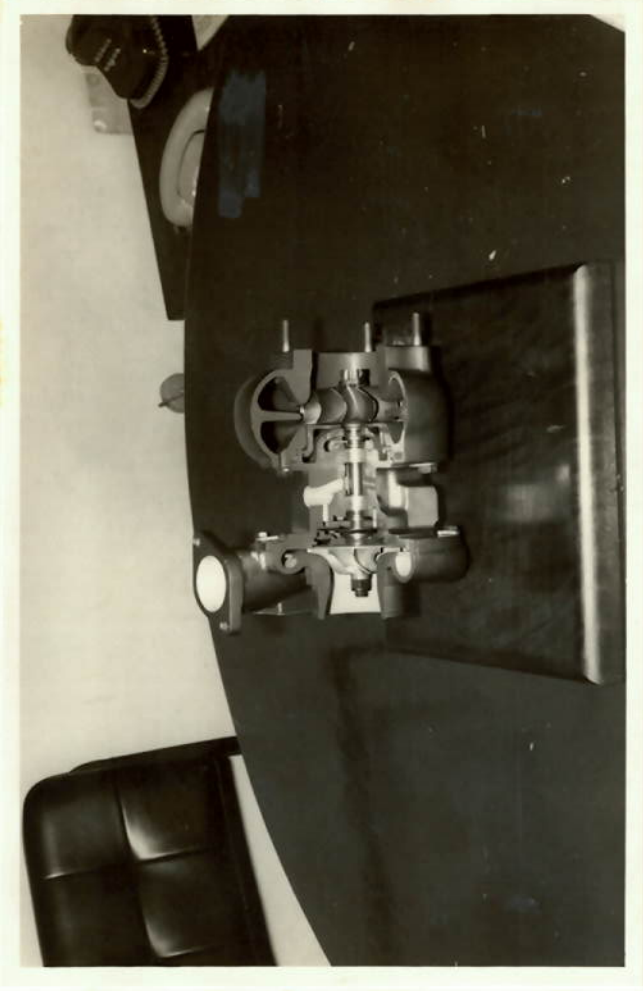
$$P_4 = 120 \text{ psi} ; E_4^* = 600 \text{ Btu/lb} ; H_4^* = 820 \text{ Btu/lb} ; T_4 = 3000^\circ R$$



28

FABRICAÇÃO

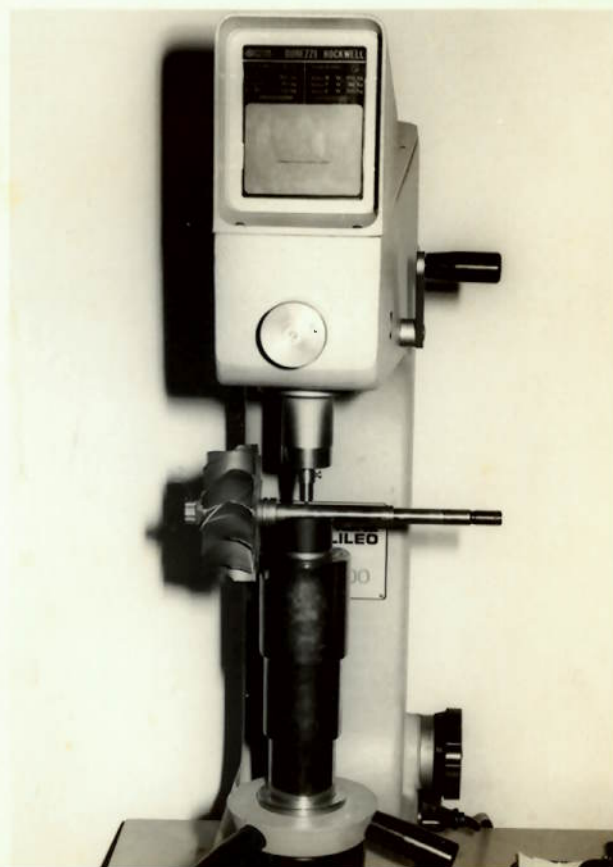
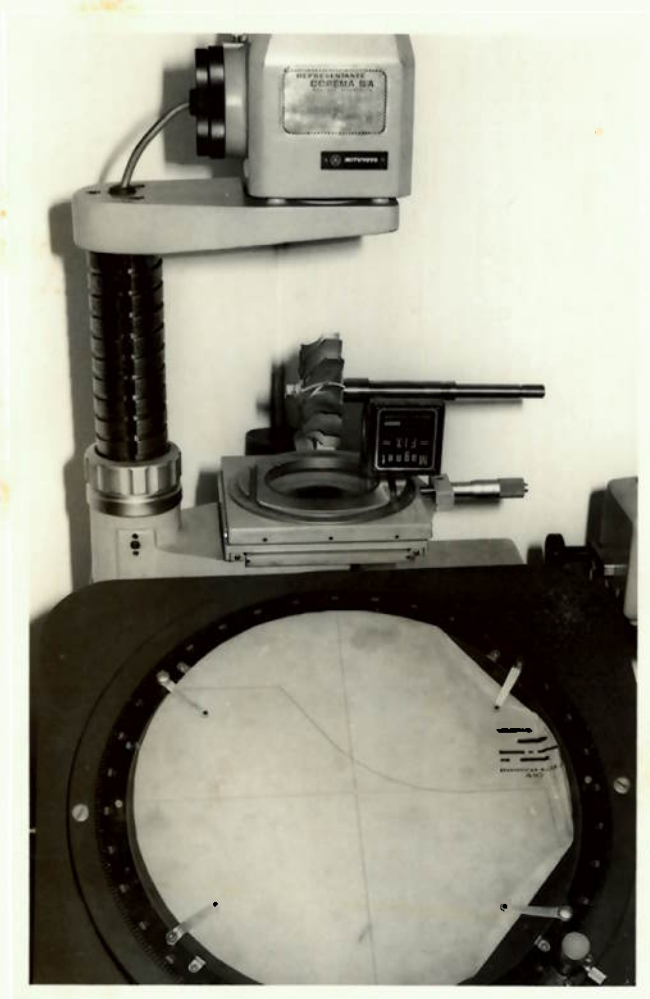
Vemos abaixo dois turbo-compressores em corte. Na foto superior temos a parte quente à esquerda e na inferior a parte quente está a direita.



A carcaça fria é feita em liga de alumínio assim como a roda do compressor. A carcaça quente é feita em liga de ferro assim como a roda da turbina e eixo (que são fundidos em uma peça só).

Depois de fundidas as peças são usinadas e após isso são medidas uma a uma. (Algumas amostras são retiradas para testes de rigidez como vemos abaixo a direita.)

Abaixo a esquerda vemos uma peça sendo conferida por um instrumento que amplia 10 vezes as dimensões da peça e esta é projetada numa tela onde há o desenho que esta tem de corresponder.



Após conferidas todas as medidas, as peças são balanceadas dinamicamente procurando-se atingir a máxima precisão, pois as rodas e eixo atingirão rotações superiores a 100.000 r.p.m. Vemos ao lado uma roda quente e seu eixo sendo balanceados.



Abaixo vemos uma carga de roda fria e o corpo com eixo e roda quente instalados.



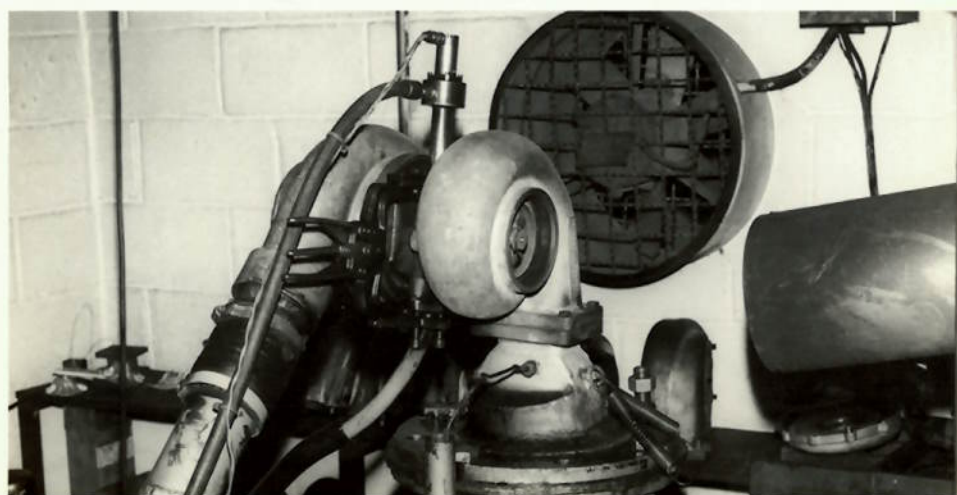
TESTES

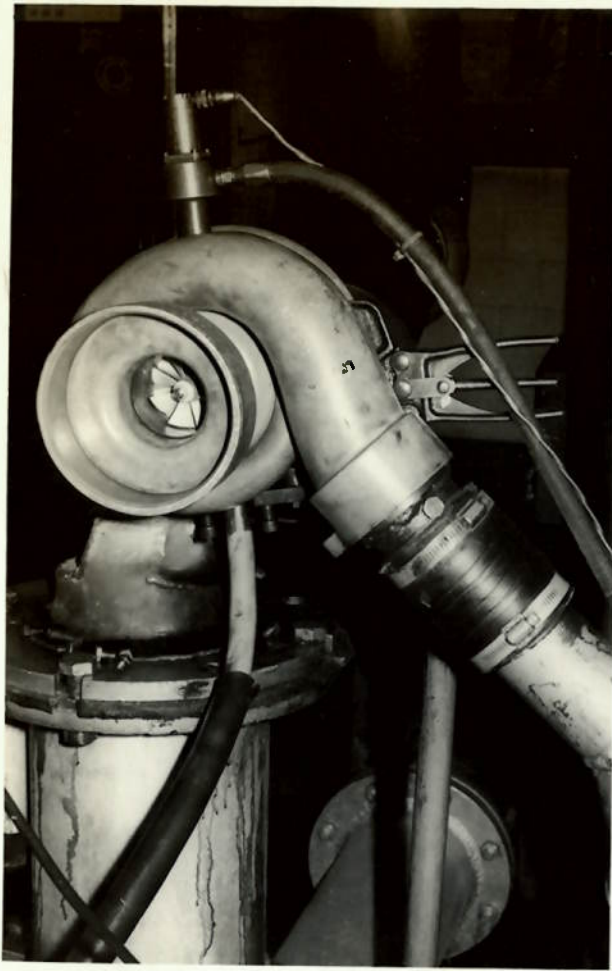
Após usinagens, medições e balanceamentos a turbina é testada em bancada. O teste consiste em verificar se a turbina está em condições de funcionar, isto é, ela é colocada em uma bancada de testes onde é submetida a um alto regime de rotações e é medida a pressão na saída, temperatura da roda quente, vibrações e amplitude das vibrações no eixo. Dependendo dos resultados obtidos a turbina é aceita ou volta ao balanceamento.

Abaixo vemos em primeiro plano o painel de controle da bancada de teste e ao fundo o turbo-compressor sendo testado.



Abaixo temos uma vista geral do turbo-compressor montado na bancada de teste. A parte quente é a da direita que recebe um fluxo de gás proveniente da queima de querosene e ar do próprio compressor. Entre as partes quentes e frias temos o tubo de injeção de óleo com cebolinha de pressão.



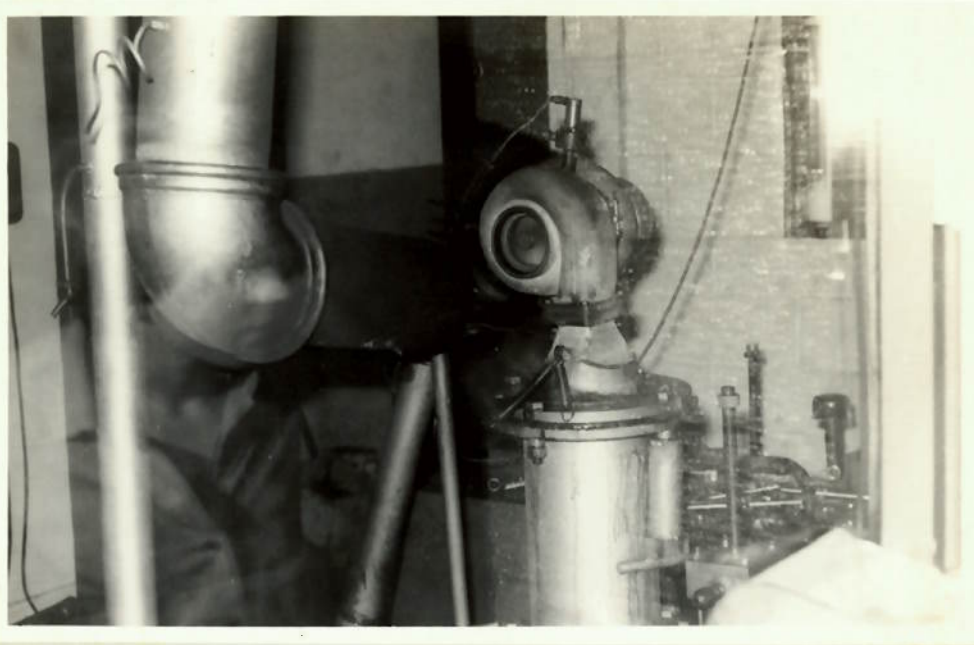


A esquerda vemos a entrada de ar comprimir e a saída de ar comprimido em primeiro plano. O tubo que desce e vai para a esquerda é a saída de óleo.

A direita temos outra vista da parte fria em 1º plano e no fundo a direita compressor de ar que é usado para dar início ao teste injetando ar na roda - quente até que a turbina atinja uma certa rotação quando é iniciada a queima de querosene e o ar - utilizado passa a ser somente o "gerado" por ela própria.

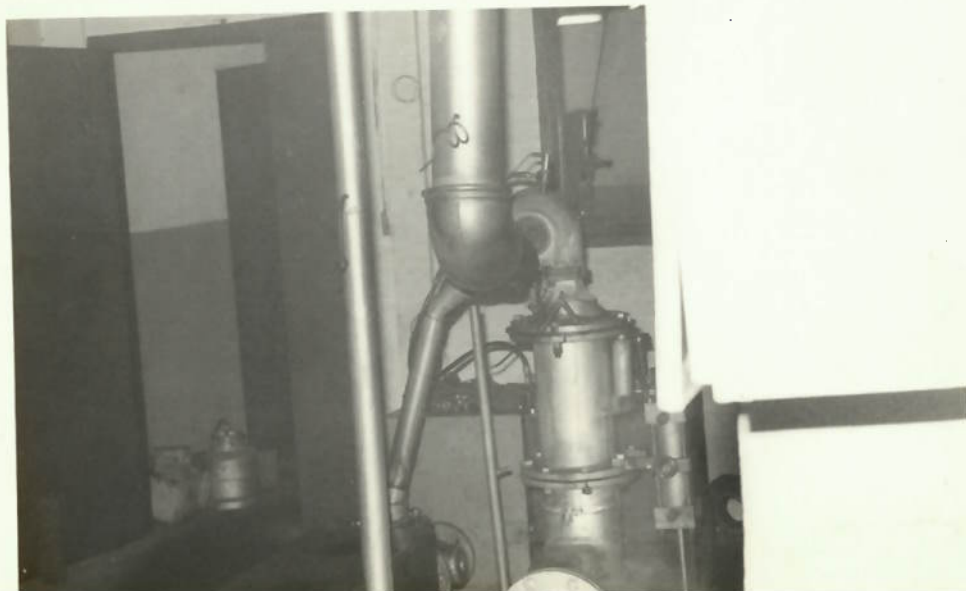


Abaixo vemos a turbina já acionada dando início à fase de testes.

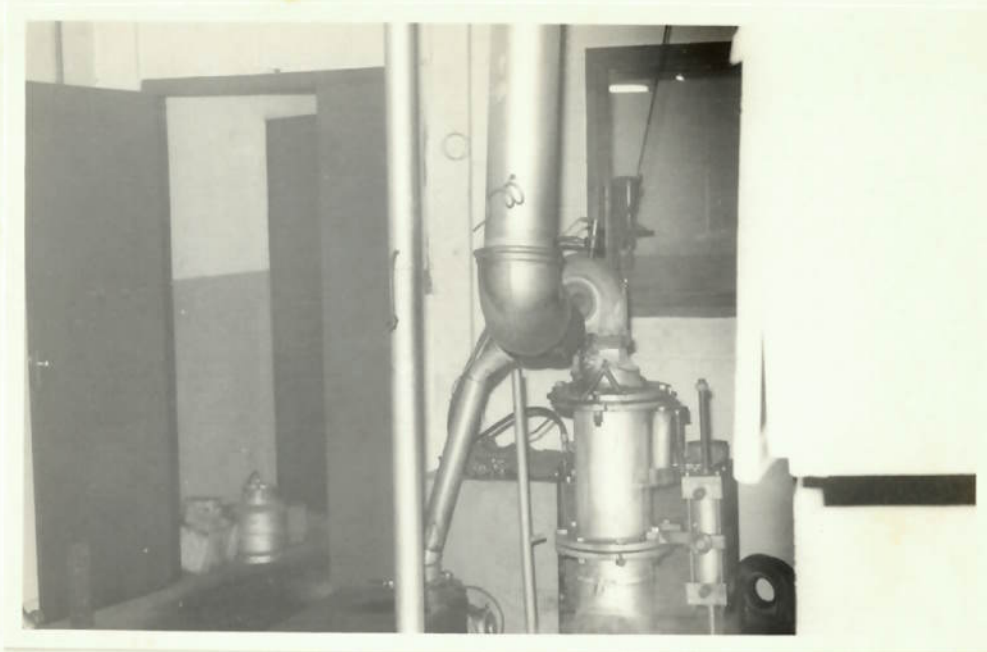


As próximas duas fotos foram tiradas dentro da sala de testes. Após 40.000 r.p.m. a roda da turbina se torna incandescente e a partir de 90.000 r.p.m. saía uma chama de aproximadamente - 1 metro de extensão pela saída de gases de exaustão.

Turbina a 80.000 r.p.m. e temperatura da sala de testes a 65°C.



Turbina a 110.000 r.p.m. e temperatura da sala de testes a 85°C.

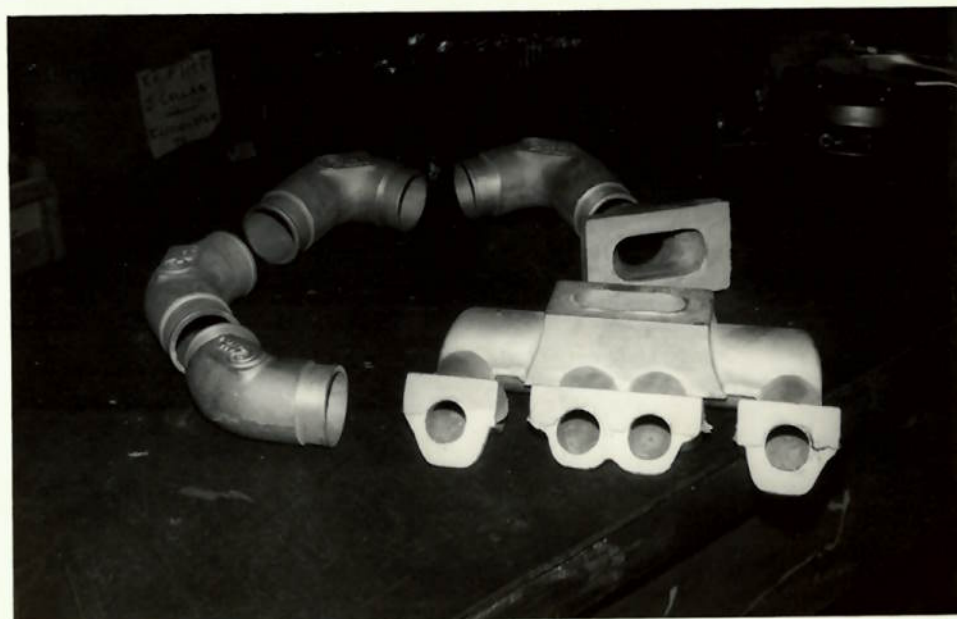


INSTALAÇÃO

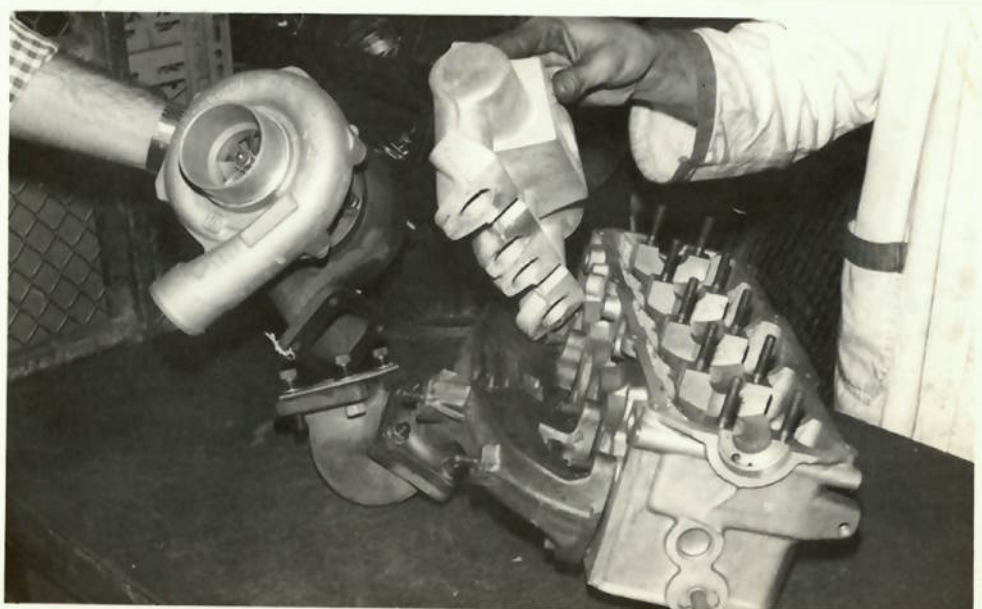
Vemos aqui duas fotos do turbo-compressor Garret TO 4 ao lado do coletor de gases de combustão.



Abaixo vemos a instalação da "parte comprimida" de um Passat. Entre cotovelos há tubos de borracha ligando-os presos por braçadeiras. O cotovelo em primeiro plano a esquerda é ligado na saída do compressor, e os outros são ligados entre si na disposição em que aparecem, e em seguida ao coletor de admissão (em primeiro plano à direita) que é ligado ao bloco do motor .



Temos agora uma vista geral da instalação. À esquerda vemos o turbo-compressor Garret TO 4, no meio o coletor de admissão e à direita um bloco de motor de Passat com coletor de escape já acoplado.

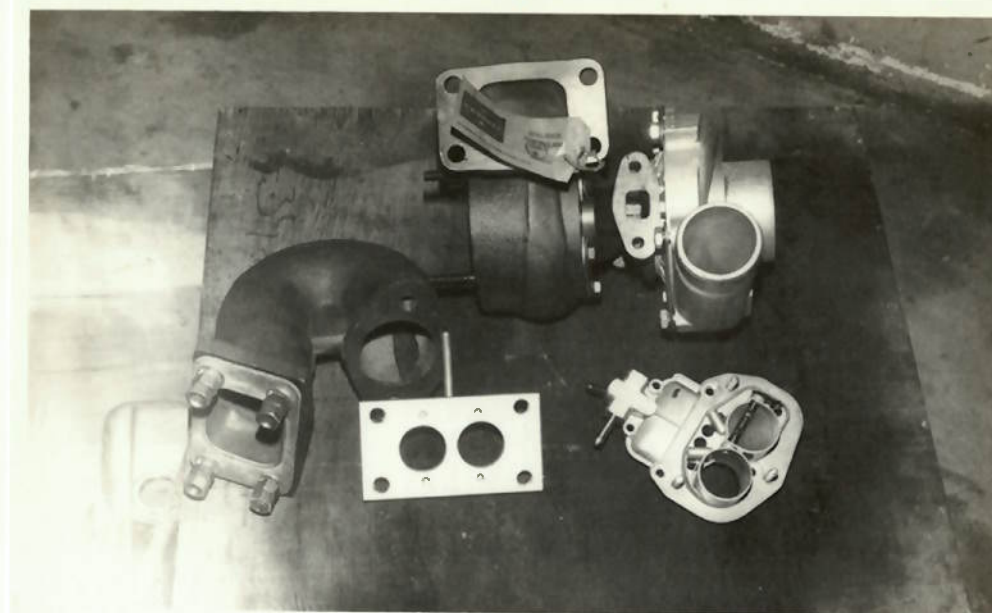




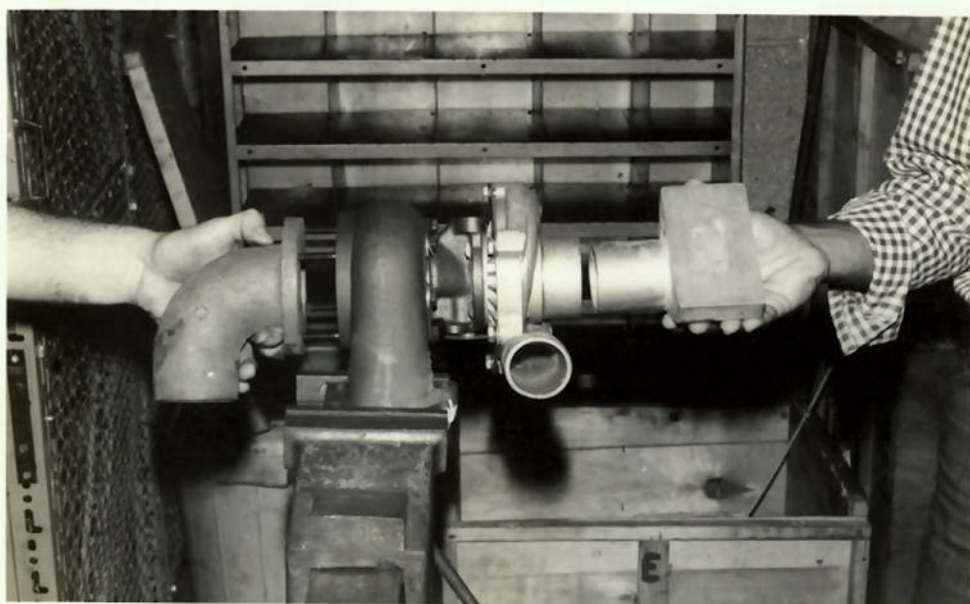
Abaixo vemos o compressor em primeiro plano ao lado da parte superior de um carburador de corpo duplo 24 mm mecânico e a base para tomada de pressão compensadora da cuba.



Vemos agora todas as peças anteriores reunidas. Note-se a abertura entre as partes quente e fria. É aí a entrada de óleo.



Aqui vemos o tubo compressor junto com as peças que vão diretamente ligadas a ele. A esquerda temos a saída de gases de exaustão e à direita entrada de mistura a ser comprimida.



Nesta foto vemos rodas da turbina e a metade da carcaça da parte fria da compressor (ao fundo).



Temos aqui rodas do compressor e sua carcaça ainda não usinados.

