

Capítulo 4

MOTORES DIESEL

Combustão, emissão, controlo e tratamento de poluentes

Felizardo Alves 2008

3 Combustão nos motores diesel

3.1 Generalidades

Sabemos da física que o calor pode transformar-se em trabalho e vice-versa. Estas duas formas de energia estão portanto intimamente ligadas.

O calor necessário ao funcionamento dos motores diesel é obtido mediante a transformação da energia química do combustível em energia calorífica, a qual depois é transformada em energia mecânica ou trabalho.

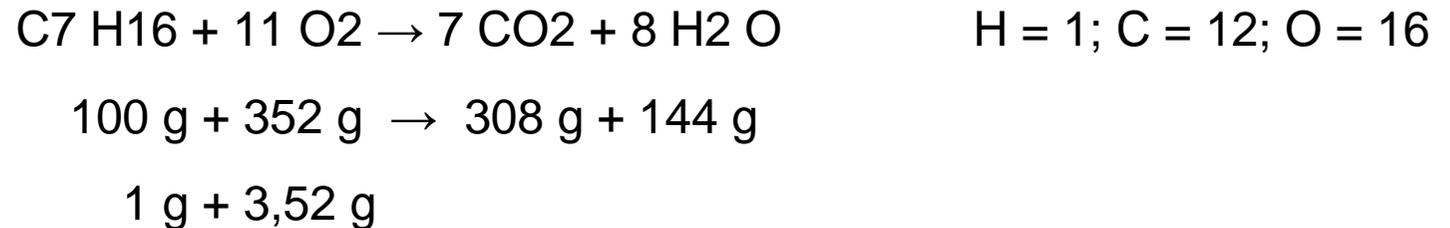
A transformação da energia química em calorífica é efectuada nos cilindros dos motores num espaço próprio, vulgarmente designado por **Espaço de Combustão** ou **Câmara de Combustão**.

Para o efeito, introduz-se ar atmosférico no cilindro, que depois é fortemente comprimido pelo êmbolo para reduzir o seu volume e consequentemente a aumentar a sua temperatura, de modo a atingir o valor suficiente para auto-inflamar o combustível à medida que vai sendo pulverizado no seu seio.

Desenvolve-se assim a combustão, que nos motores diesel deve efectuar-se tanto quanto possível de um modo uniforme e gradual, por forma a que os gases gerados actuem regular e progressivamente sobre o êmbolo.

3.2 Química da combustão

Alguns especialistas consideram os combustíveis líquidos queimados pelos motores diesel semelhantes à **Heptana**, que é um hidrocarboneto saturado da série **C_n H_{2n+2}**, cuja fórmula química é **C₇ H₁₆**. Quando misturada com o ar, reage quimicamente com o oxigénio deste e produz a seguinte reacção:

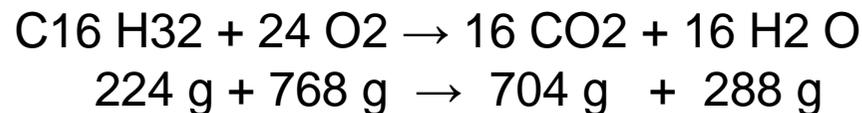


A proporção de oxigénio no ar atmosférico é de 23 g de O₂ para 77 g de N₂, pelo que a massa de ar necessária à combustão de 1 g de **heptana** é:

$$\begin{array}{l} 100 \text{ g ar} \rightarrow 23 \text{ g O}_2 \\ x \text{ g ar} \rightarrow 3,52 \text{ g O}_2 \qquad x = 15,3 \text{ g ar} \end{array}$$

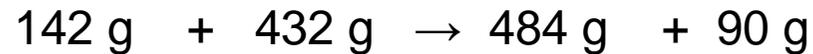
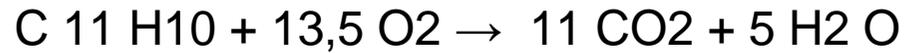
Outros consideram-nos semelhantes a uma mistura de **Ceteno** (C₁₆ H₃₂) e **Alfa-Metil-Naftaleno** (C₁₁ H₁₀). Quando misturados com o ar obtêm-se as seguintes reacções:

Ceteno



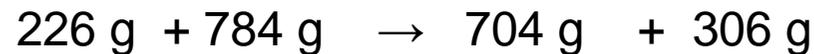
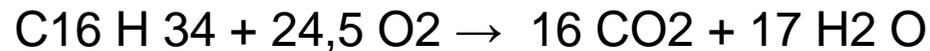
Para queimar 1 g de **Ceteno** serão necessários 14,9 g de ar

Alfa-Metil-Naftaleno



Para queimar 1 g de Alfa-Metil-Naftaleno serão necessários 13,22 g de ar

Dado que o **Ceteno** é muito instável foi substituído pelo Cetano (C₁₆ H₃₄) que é um derivado do petróleo e pertence à família das parafinas. Quando misturado com o ar obtém-se a seguinte reacção:



Para queimar 1 g de Cetano serão necessários 15 g de ar

Pode por isso considerar-se, serem teoricamente necessários cerca de 15 g de ar para queimar 1 g de combustível. Porém, na prática é preciso assegurar um excesso de ar em relação a este valor, a fim de que a combustão seja completa, dadas as dificuldades inerentes à realização das operações necessárias para que a combustão decorra nas melhores condições.

Pode referir-se que dentro de determinados limites, a combustão será tanto mais completa, quanto maior for o excesso de ar disponível em relação às necessidades teóricas. O excesso de ar disponível para a combustão nos actuais motores diesel, pode variar a plena carga entre $\frac{50}{4}\%$ e mais de 100%, consoante as suas características.

3.3 Inflamação e combustão

Se observarmos atentamente a evolução do ciclo de funcionamento de um motor diesel através do respectivo diagrama real aberto, tal como o abaixo apresentado, podemos observar três fases distintas:

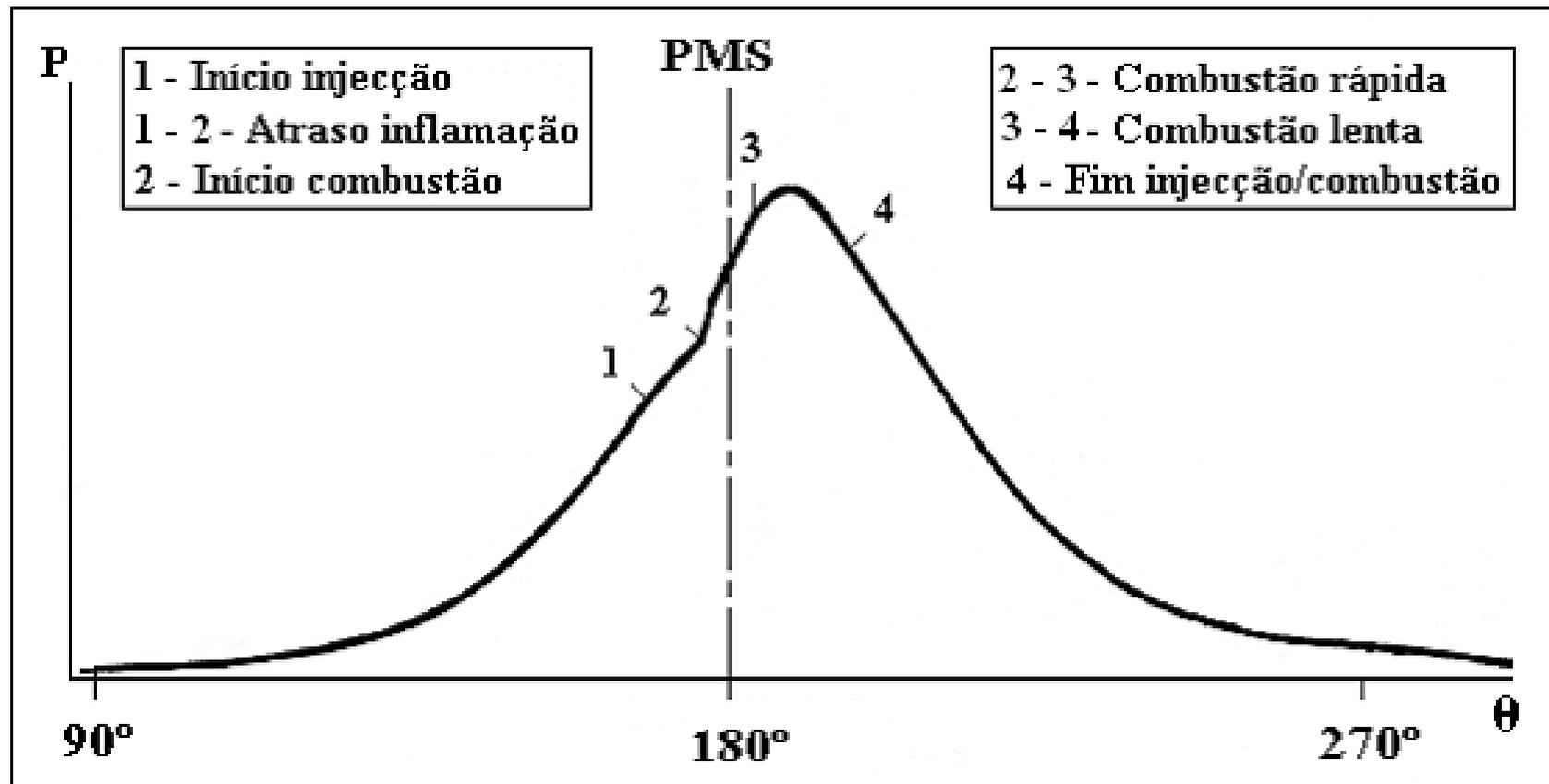


Diagrama real aberto típico de um motor diesel de dois tempos

Fase 1 – 2 – De atraso à inflamação, a qual compreende dois períodos, verificando-se durante o 1.º a entrada do combustível no cilindro, a sua evaporação e mistura com o ar; durante o 2.º normalmente superior ao 1.º, desenvolve-se a acção intermolecular que prepara a mistura para se auto-inflamar.

Fase 2 – 3 – De auto-inflamação e rapidíssima combustão do combustível já injectado, o que gera elevados gradientes de pressão e conseqüentemente um rápido aumento da mesma no cilindro. O gradiente de elevação da pressão depende da quantidade de combustível injectado até ao momento da inflamação e por consequência do atraso à inflamação. O funcionamento do motor será:

Suave: quando aumento pressão for $< 2,1 \text{ bar} / ^\circ$ deslocamento angular veio manivelas

Violento: quando aumento pressão for $> 3, 5 \text{ bar} / ^\circ$ deslocamento angular veio maniv.

Fase 3 – 4 – De combustão lenta do último combustível injectado cilindro, durante a qual se a pressão máxima no cilindro.

3.4 Factores que influenciam o atraso à inflamação do combustível

O atraso à inflamação do combustível, influencia o modo como decorre a combustão, podendo também ter reflexos no arranque e na emissão de fumos na evacuação dos motores diesel.

É portanto de fundamental importância para o funcionamento dos motores diesel, reduzir o atraso à inflamação do combustível, o que pode ser conseguido através do ajuste dos seguintes factores:

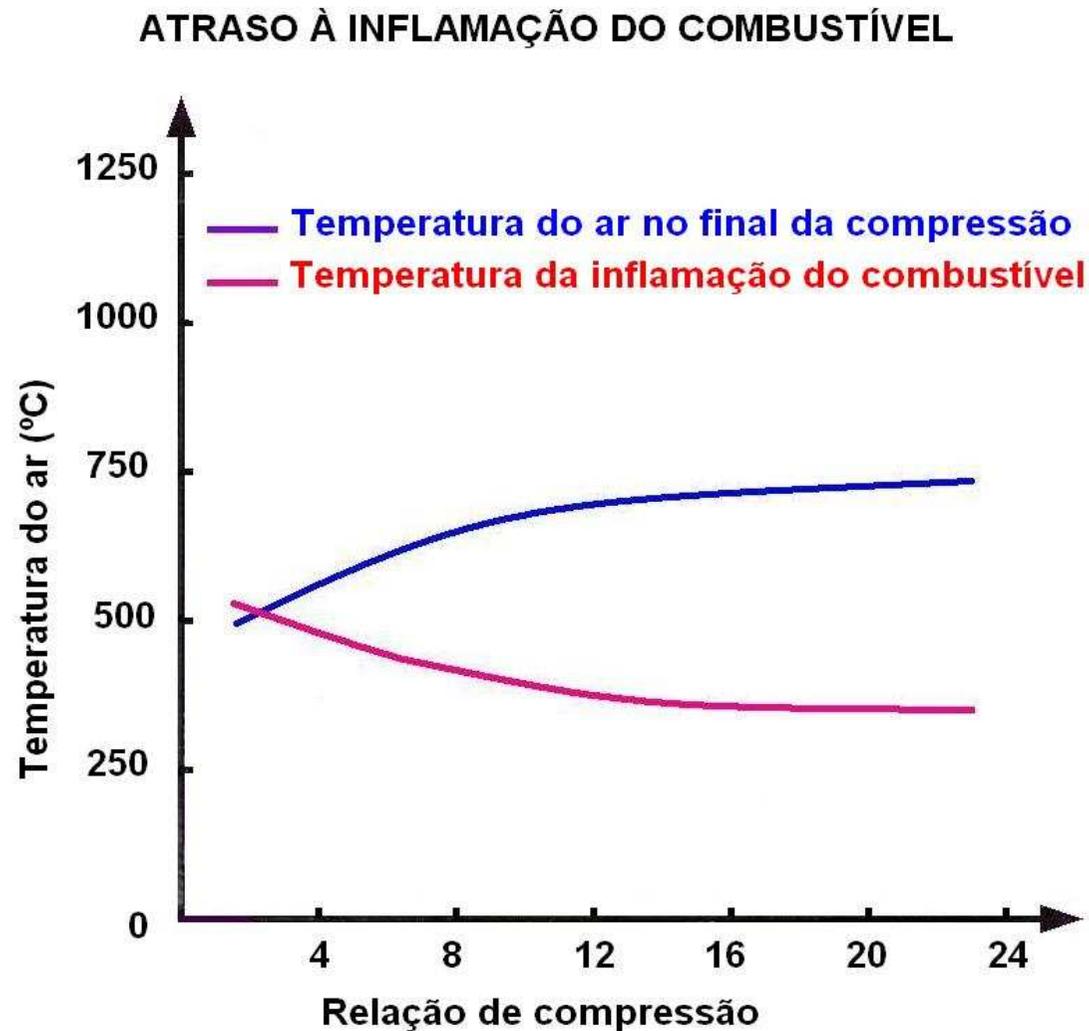
Número de cetano do combustível: quanto maior for, menor será o atraso à inflamação. Pode variar entre 30 e 70.

Pulverização do combustível: a pulverização deve ser o mais fina possível, sem no entanto pôr em causa a sua boa distribuição no seio do ar fortemente comprimido no cilindro.

Turbulência do ar: o grau de turbulência do ar na câmara de combustão no momento da injeção, varia directamente com a velocidade do motor. O aumento do grau de turbulência diminui o atraso à inflamação, uma vez que promove uma melhor mistura do ar com o combustível.

Porém um maior grau de turbulência aumenta a transmissão de calor para o exterior do cilindro, o que origina uma diminuição de temperatura que de certa forma limita os benefícios conseguidos com a redução do atraso conseguido, pelo que se deve procurar o justo equilíbrio.

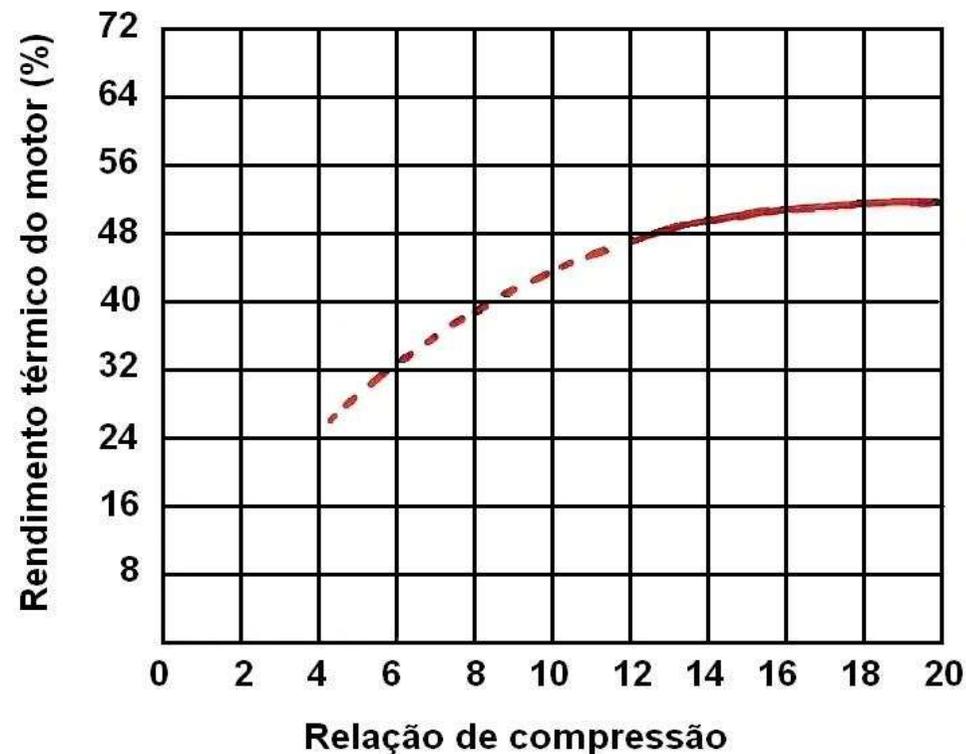
Relação de compressão: o aumento da relação de compressão reduz o atraso à inflamação, uma vez que diminui a temperatura de inflamação do combustível e simultaneamente proporciona uma maior temperatura ao ar no final da compressão, tal como pode observar-se na figura.



Varição da temperatura do ar com a relação de compressão

A relação de compressão adoptada pelos motores diesel, varia directamente com o número de rotações e inversamente com o diâmetro dos cilindros, uma vez que estas variações implicam uma correspondente variação da relação **volume/superfície de transmissão de calor do cilindro para o exterior**.

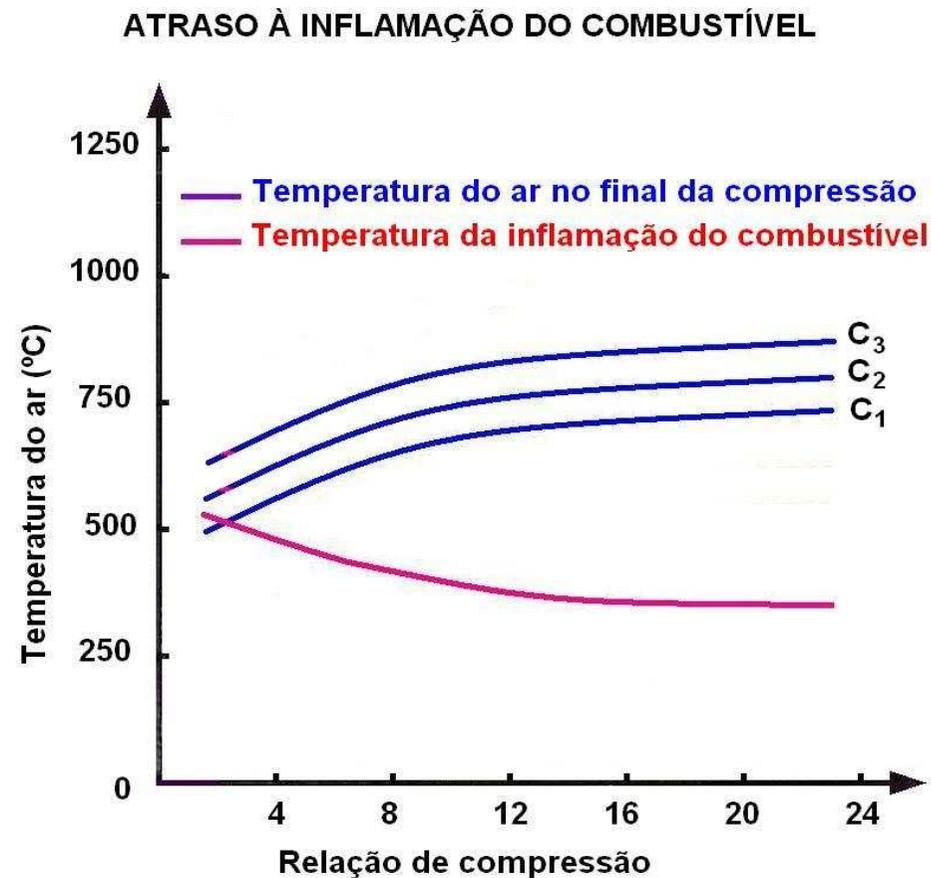
Por outro lado, o **rendimento térmico dos motores varia directamente com a relação de compressão**, mas não de uma forma ilimitada tal como pode ver-se no gráfico, uma vez que a partir de determinado limite, o aumento de rendimento térmico que se obtém é muito pequeno e por isso insuficiente para compensar a diminuição de rendimento mecânico que provoca.



Variação do rendimento térmico com a relação de compressão

Temperatura do ar à entrada no cilindro: influencia directamente a temperatura atingida pelo ar no final da compressão no cilindro, e esta varia inversamente com o atraso à inflamação, pelo que o aumento da temperatura do ar no final da compressão, diminui o atraso à inflamação.

Tal como pode observar-se no gráfico seguinte, para uma dada relação de compressão, a temperatura do ar no final da compressão no cilindro, será tanto mais elevada quanto maior for a temperatura do ar à entrada no mesmo.



Varição da temperatura do ar com a relação de compressão

A curva **C1** corresponde à temperatura mais baixa do ar à entrada do cilindro, enquanto a curva **C3** corresponde à temperatura mais elevada.

Temperatura dos fluidos de refrigeração do cilindro e êmbolo: o atraso à inflamação varia inversamente com a temperatura dos fluidos de refrigeração; o aumento das temperaturas dos fluidos de refrigeração, diminui a transmissão de calor entre o ar fortemente comprimido no cilindro e os referidos fluidos, pelo que provoca a elevação da temperatura do ar no momento da injeção e conseqüentemente favorece a inflamação do combustível.

Pressão do ar no interior do cilindro no momento da injeção: influencia directamente o atraso à inflamação do combustível.

Factores que influenciam a evolução da combustão

De um modo geral, todos os factores que afectam o atraso à inflamação também afectam no mesmo sentido o desenvolvimento da combustão.

Há no entanto uma excepção que é a “**pressão no final da compressão**”, que como já vimos influencia directamente o atraso à inflamação, enquanto que no que se refere à combustão se verifica precisamente o inverso, isto é, influencia inversamente a sua duração. Com efeito, uma vez iniciada, a combustão desenvolve-se tanto mais rapidamente quanto maior for a pressão no interior do cilindro, dada a maior proximidade das moléculas de ar e de combustível.

3.5 Espaço de combustão

É o espaço do cilindro onde a combustão se efectua. A sua forma é extremamente importante para o bom funcionamento dos motores diesel, uma vez que exerce uma enorme influência sobre alguns dos factores acabados de analisar, bem como sob a forma como se efectua a injeção e a combustão.

Os fabricantes dos motores diesel, já experimentaram por isso as mais diversas formas para o espaço de combustão, a fim de conseguir misturar de uma forma rápida e eficiente o combustível com o ar no cilindro, condição fundamental para que o combustível seja queimado nas melhores condições.

3.5.1 Câmaras de combustão

O espaço de combustão pode estar compreendido numa única câmara, a principal, caso dos motores diesel de injeção directa, ou ser distribuído por duas câmaras, a principal e a auxiliar, caso dos motores diesel de injeção indirecta. Neste caso, as câmaras são ligadas por meio de orifícios calibrados ou de uma garganta adequada, conforme o tipo de câmara auxiliar utilizada.

As câmaras de combustão dos motores diesel, podem por isso ser dos seguintes tipos:

Câmaras de combustão principais

Câmaras de combustão auxiliares

3.5.1.1 Câmaras de combustão principais

Podem classificar-se de acordo com a forma como nelas é efectuada a injeção de combustível em:

De injeção directa: contêm todo o espaço de combustão, onde é directamente injectado o combustível e ocorre a sua combustão;

De injeção indirecta: apenas contêm uma parte do espaço de combustão situada entre as cabeças do cilindro e do êmbolo, estando a parte respeitante à câmara de combustão auxiliar contida na cabeça do cilindro; o combustível é injectado e queimado parcialmente na câmara de combustão auxiliar, completando a combustão na câmara de combustão principal.

Câmaras de combustão principais de injeção directa

Todos os motores diesel de dois tempos e a esmagadora maioria dos novos motores diesel de quatro tempos são providos com este tipo de câmaras devido ao melhor rendimento que lhes proporcionam. Conforme o movimento do ar no seu interior no período de injeção dividem-se em :

Câmaras de combustão principais de injeção directa sem turbulência: quando durante a injeção do combustível, o ar está praticamente em repouso;

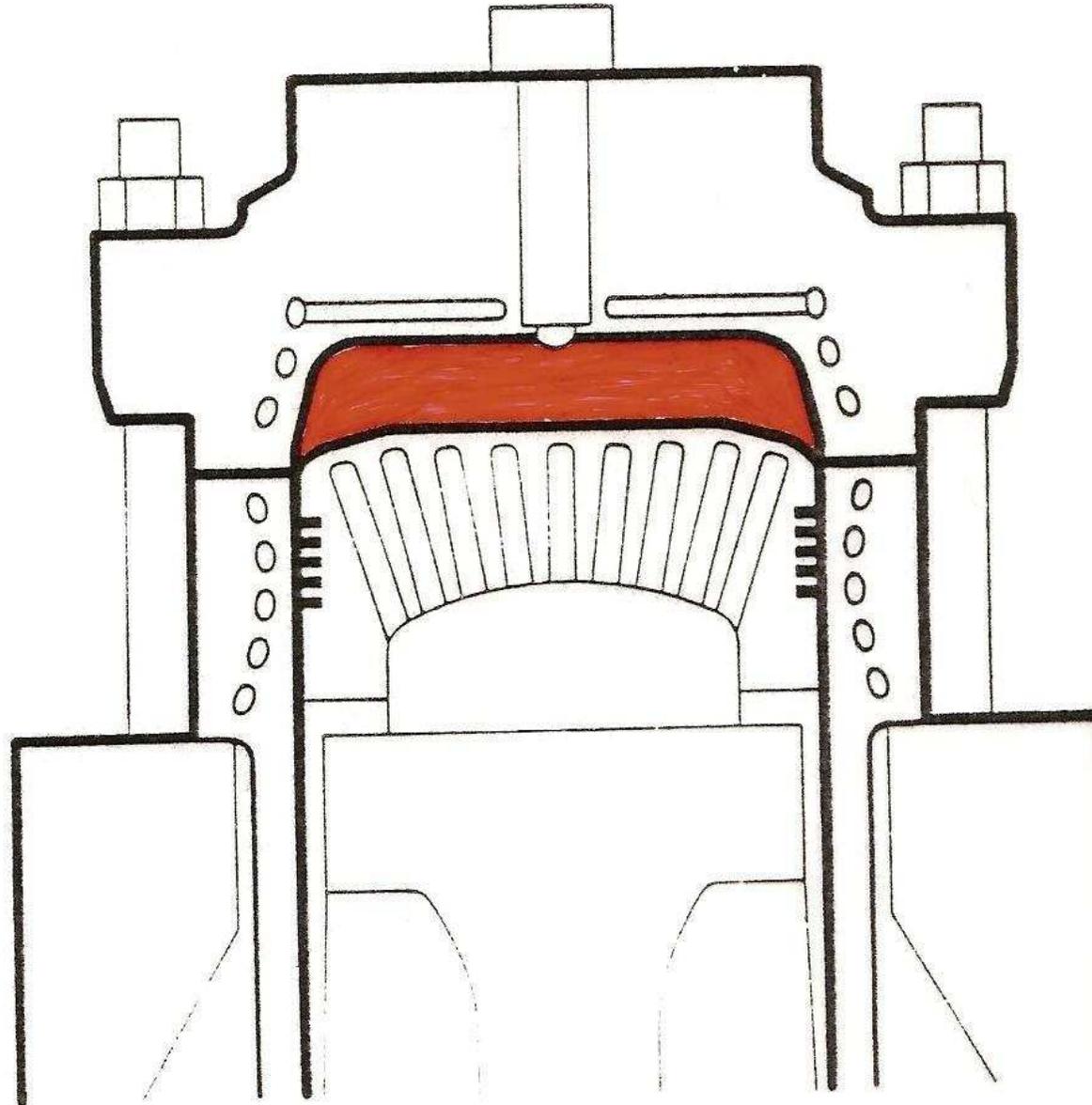
Câmaras de combustão de injeção directa com turbulência: quando durante a injeção do combustível, o ar está animado de um movimento turbilhonar devido às formas aerodinâmicas da câmara de combustão, a fim de misturar melhor o combustível com o ar.

Câmaras de combustão de injeção directa sem turbulência

São utilizadas nos motores diesel de dois tempos de baixa velocidade e nos motores diesel de quatro tempos de média velocidade, que não dispõem de meios para auxiliar o sistema de injeção na tarefa de distribuir o combustível pela massa de ar contido no cilindro.

Por esta razão, praticamente todo o trabalho de distribuição do combustível no seio do ar fortemente comprimido no cilindro, recai sobre o sistema de injeção.

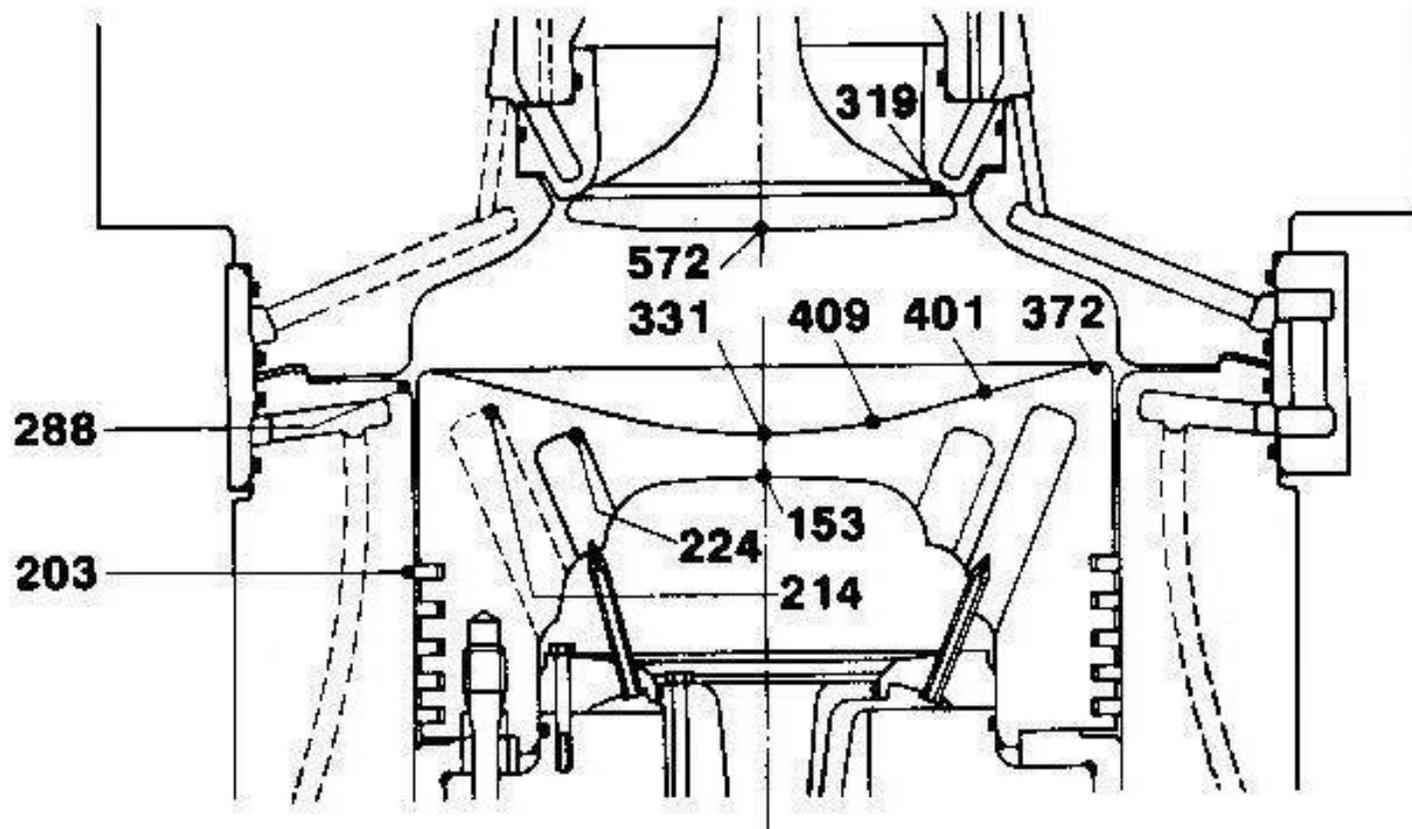
MOTOR DIESEL DE DOIS TEMPOS DE INJEÇÃO DIRECTA



Com câmara de combustão principal sem turbulência

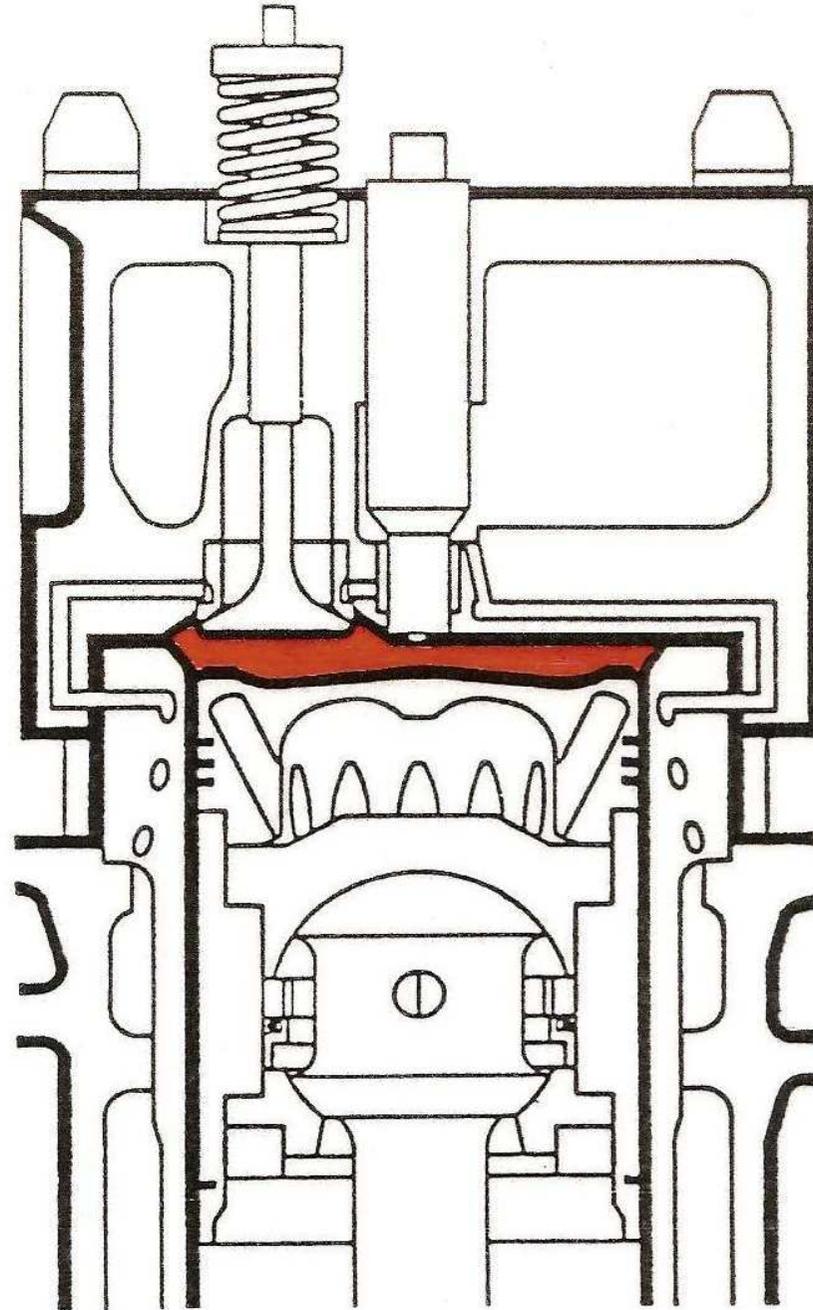
CÂMARA DE COMBUSTÃO PRINCIPAL DE INJEÇÃO DIRECTA

106 rpm - bmep = 16 bar
(100% = R1)



Sem turbulência (temperaturas medidas na zona da câmara de combustão)

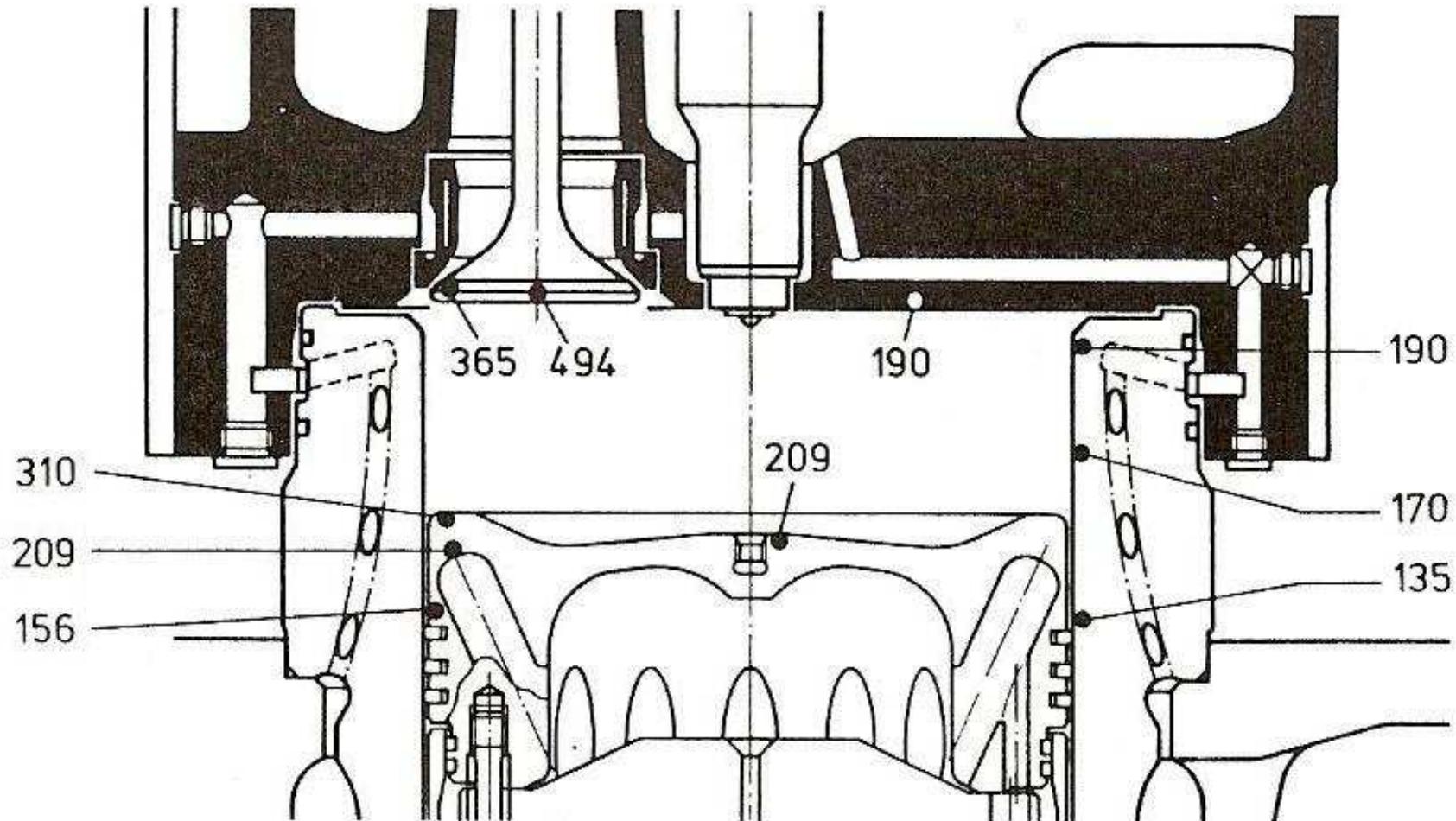
MOTOR DIESEL DE QUATRO TEMPOS DE INJEÇÃO DIRECTA



Equipado com câmaras de combustão principais sem turbulência

Measured temperatures in °C in combustion chamber area

660 kW/cyl. at 514 r.p.m. - b.m.e.p. = 21.9 bar



Measure temperatures in combustion chamber area (°C) for the ZA 40S at full power output

As câmaras de injeção directa sem turbulência, são normalmente caracterizadas da seguinte forma:

Requerem elevado excesso de ar em relação ao teoricamente necessário, para que a combustão seja completa;

Necessitam de uma pulverização extremamente fina, o que apenas é possível mediante a utilização de injectores de múltiplos orifícios cuja secção pode ser muito reduzida, e de pressões de injeção elevadas que em alguns casos podem atingir os 1500 bar;

A relação volume/superfície de transferência de calor conseguida é bastante elevada, o que faz com que as perdas de calor para o exterior do cilindro sejam reduzidas e conseqüentemente proporcionem as seguintes vantagens aos motores: fácil arranque a frio; redução do consumo de combustível e por isso elevado rendimento;

É com este tipo de câmaras que os motores diesel conseguem obter o menor consumo de combustível.

As dificuldades da sua utilização acentuam-se à medida que: diminui o diâmetro dos cilindros e aumenta a velocidade de rotação, dado que a quantidade de combustível injectado por ciclo e o tempo disponível para efectuar a mistura com o ar diminuem.

Os problemas relativos à utilização deste tipo de câmaras devem-se sobretudo ao entupimento a que estão sujeitos os orifícios dos injectores por via da formação de depósitos carbonosos, resultantes das elevadas temperaturas a que estão sujeitos durante o funcionamento a que se associa por vezes a escassa refrigeração;

Os motores diesel equipados com câmaras de injeção directa sem turbulência, normalmente adoptam:

Relações de compressão de 1:12 a 1:16, variando directamente com a velocidade de rotação e inversamente com a potência por cilindro;

Excesso de ar acentuado a baixos regimes e fortes cargas, devido à maior dificuldade em misturar adequadamente o combustível com o ar de modo a assegurar as melhores condições para a combustão;

Injectores de múltiplos orifícios;

Pressões de injeção até 1500 bar;

Elevados gradientes de pressão durante a combustão, sendo o avanço à injeção facilmente influenciado pelo número de rotações e carga do motor.

Câmaras de combustão de injeção directa com turbulência

Utilizam-se nos motores diesel rápidos de quatro tempos, para promover a rápida mistura do combustível com o ar contido no cilindro. Para o efeito a forma especial do êmbolo e o posicionamento do injector contribuem para melhorar a mistura do combustível com o ar do cilindro.

As formas aerodinâmicas da câmara de combustão conjugadas com o movimento do êmbolo originam um movimento turbilhonar do ar no cilindro no momento da pulverização que facilita extraordinariamente a sua mistura com o combustível, o qual também diminui a temperatura de funcionamento do injector, pelo que melhora as suas condições de funcionamento.

Muito embora a turbulência do ar aumente as perdas de calor para o exterior do cilindro, porém este efeito negativo é largamente superado pelo efeito positivo decorrente da melhoria verificada na combustão.

A utilização de câmaras de combustão de injeção directa com turbulência, proporciona aos motores consumos específicos ligeiramente superiores aos obtidos com as câmaras de injeção directa sem turbulência, os quais variam directamente com a velocidade de rotação.

O funcionamento dos injectores continua a ser bastante sensível, pelo que é indispensável assegurar uma boa filtragem do combustível a fim de evitar o entupimento dos seus minúsculos orifícios de pulverização.

Os motores diesel equipados com este tipo de câmaras de combustão possuem as seguintes características:

Cilindros com diâmetros inferiores a 100 mm;

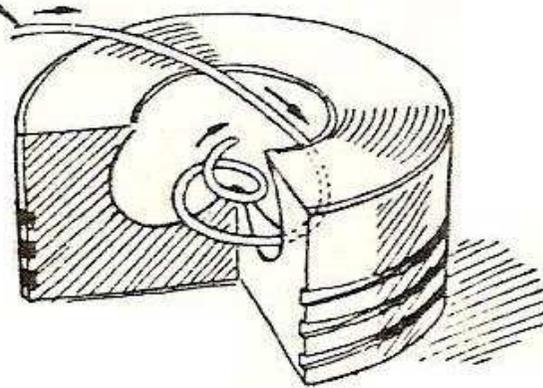
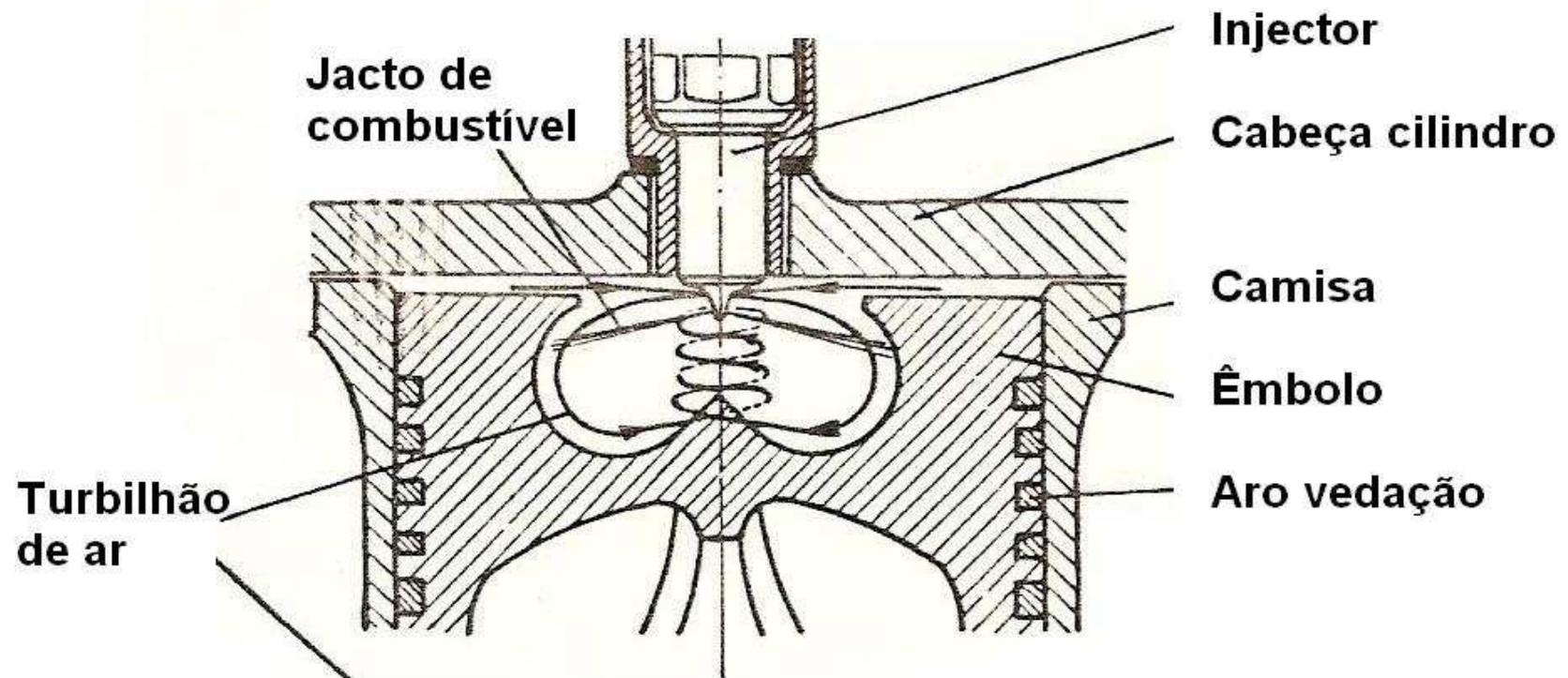
Relações de compressão de 1:15 a 1:19, variando directamente com a velocidade de rotação e inversamente com a potência por cilindro;

Excesso de ar a baixos regimes e fortes cargas, devido a acentuar-se a dificuldade em misturar adequadamente o combustível com o ar;

Injectores de múltiplos orifícios e pressões de injeção até 2050 bar;

Gradientes de pressão elevados durante a combustão.

CÂMARA DE COMBUSTÃO PRINCIPAL DE INJEÇÃO DIRECTA



Com turbulência

3.5.1.2 Câmaras de combustão auxiliares

Como já vimos, inserem-se na cabeça do cilindro e contêm apenas uma parte do espaço de combustão estando a outra parte contida na câmara de combustão principal que neste caso é sempre de injeção indirecta, uma vez que o combustível é injectado na câmara de combustão auxiliar.

Dado o maior consumo dos motores diesel rápidos de injeção indirecta que utilizam câmaras de combustão auxiliares, em relação aos motores rápidos de injeção directa equivalentes, a sua utilização está a ser abandonada, pelo que apenas se encontram nos motores diesel rápidos já com alguns anos de vida.

Existem vários tipos de câmaras de combustão auxiliares, das quais nos permitimos destacar as seguintes:

Câmaras de combustão auxiliares de pré-combustão

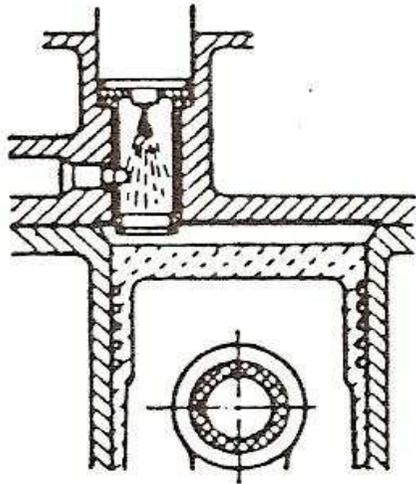
Câmaras de combustão auxiliares de turbulência

Câmaras de combustão auxiliares de pré-combustão

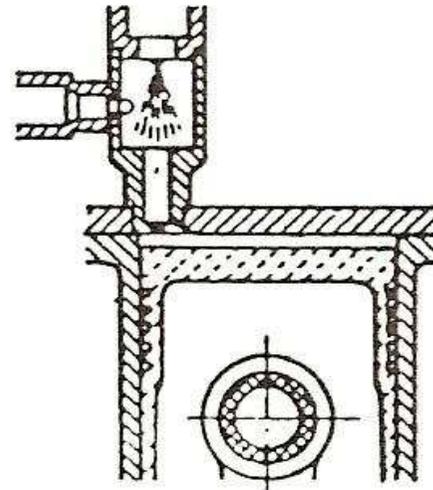
Utilizam-se nos motores diesel rápidos de pequena potência por cilindro, com características tais como:

A câmara de pré-combustão pode conter de 30% a 70% do espaço de combustão e comunica com a câmara de combustão principal através de orifícios calibrados de secção adequada;

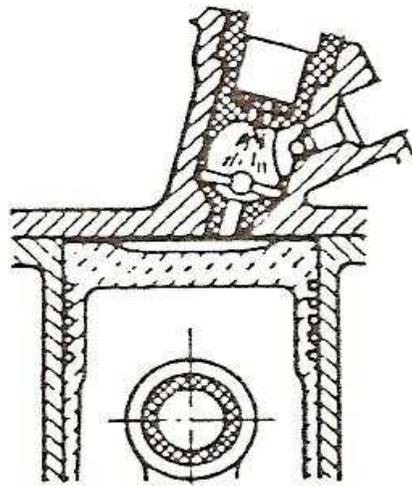
CÂMARAS DE COMBUSTÃO AUXILIARES DE PRÉ-COMBUSTÃO



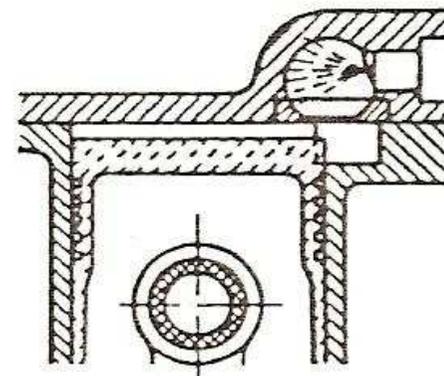
(Deutz)



(Büssing-Nag)



(Mercedes Benz)



(Ferguson)

O combustível é injectado na câmara de pré-combustão, por um injector de um orifício, onde se queima parcialmente;

Como consequência da combustão parcial inicial, a temperatura e a pressão na câmara de pré-combustão elevam-se rapidamente, o que faz com que o combustível não queimado se vaporize e precipite a grande velocidade para a câmara de combustão principal, onde completa a combustão;

Este processo apresenta dificuldades no que respeita ao desenvolvimento da combustão, dado a secção dos orifícios calibrados que comunicam as duas câmaras, apenas permitir obter o melhor rendimento a médias velocidades;

A baixas velocidades de rotação e nas acelerações com carga do motor verifica-se o seguinte:

A combustão é acelerada

O rendimento térmico melhora

A violência de funcionamento e o ruído aumentam

A elevadas velocidades de rotação verifica-se que:

A combustão é prolongada

O rendimento térmico piora

O funcionamento é mais suave

As pressões máximas exercidas sobre os êmbolos são inferiores às que resultam da utilização da injeção directa, razão pela qual os órgãos do motor são menos solicitados durante o funcionamento, o qual é por isso menos violento e conseqüentemente mais silencioso.

Dado a relação **volume/superfície de transferência de calor para o exterior do cilindro**, ser inferior à que resulta da utilização da injeção directa, as perdas de calor são maiores, o que dificulta o arranque a frio e implica a utilização de um sistema de aquecimento do ar de alimentação do motor através de velas de incandescência por forma a obter a temperatura suficiente para que o combustível injectado no cilindro se auto-inflame.

O consumo específico de combustível dos motores diesel equipados com câmaras auxiliares de pré-combustão, é superior ao dos motores diesel de injeção directa e indirecta, equipados com câmaras auxiliares de turbulência. Estes motores diesel de injeção indirecta, normalmente adoptam:

Relações de compressão de 1:16 a 1:22;

Pequeno excesso de ar (permite-lhes obter elevadas potências específicas);

Injectores de um orifício;

Pressões de injeção até cerca de 250 bar;

Gradientes médios de pressão durante a combustão .

Câmaras de combustão auxiliares de turbulência

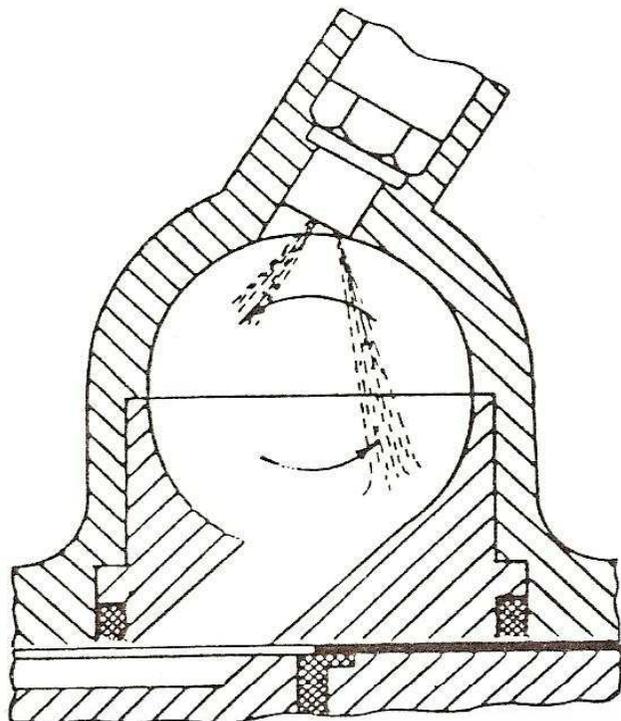
Tal como as câmaras de pré-combustão, inserem-se na cabeça do cilindro e contêm apenas uma parte do espaço de combustão estando a outra contida na câmara de combustão principal, sendo o combustível injectado na câmara de combustão auxiliar.

O princípio de funcionamento em que se baseiam difere do das câmaras de pré-combustão, em virtude de utilizarem uma garganta tangencial à câmara de turbulência para a comunicar com câmara de combustão principal, de modo a provocar um enérgico movimento do ar durante a compressão a fim de promover a mistura do combustível com o ar.

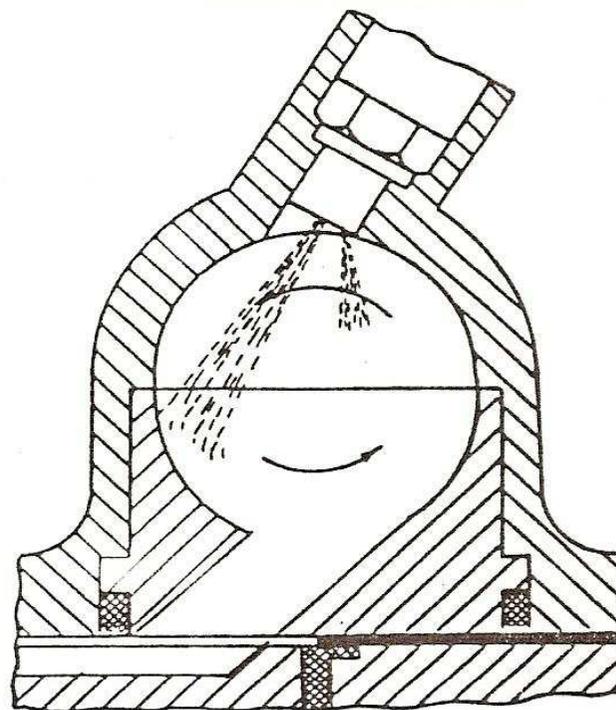
A secção de passagem da garganta, tem de ser suficiente para não limitar o valor das pressões desenvolvidas durante a combustão, a fim de não oferecer demasiada resistência à passagem do ar durante a fase da compressão.

Tal como pode verificar-se na figura seguinte, o injector é posicionado de forma a que a energia cinética do jacto de combustível pulverizado seja adicionada ao turbilhão de ar, conseguindo-se desta forma uma íntima mistura do combustível com o ar. A combustão apenas necessita de um reduzido excesso de ar, inicia-se na câmara auxiliar de turbulência e termina na câmara de combustão principal.

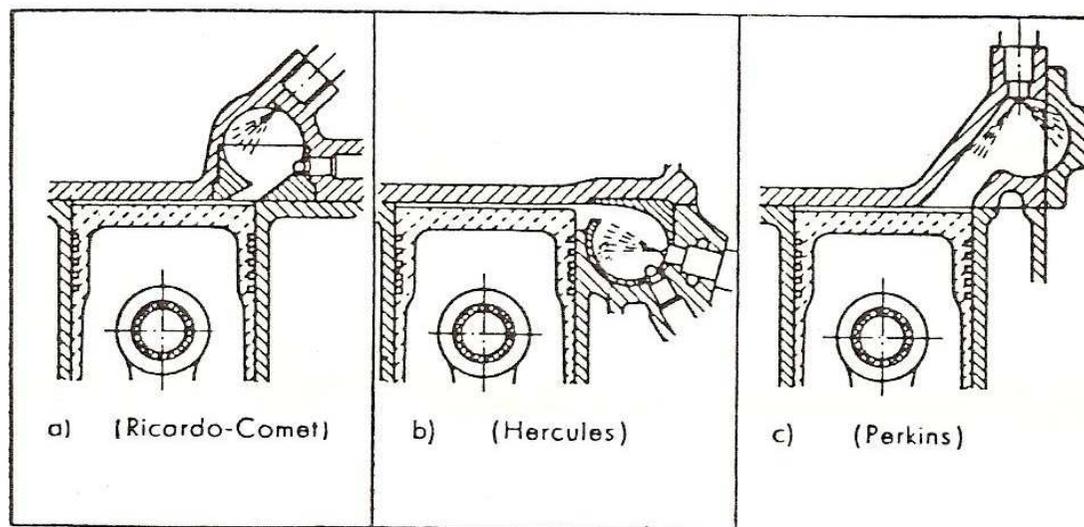
CÂMARAS DE COMBUSTÃO AUXILIARES DE TURBULÊNCIA



Funcionamento em vazio



Funcionamento a plena carga



a) (Ricardo-Comet)

b) (Hercules)

c) (Perkins)

Dado requererem um excesso de ar reduzido, este tipo de câmaras permite obter elevadas pressões médias efectivas.

A duração da combustão varia inversamente com a velocidade de rotação do motor, dado produzir-se um interessante fenómeno de auto-avanço que melhora o comportamento do motor quando a velocidade aumenta, devido à turbulência que gera. Porém quando a velocidade de rotação diminui, tal como sucede nos baixos regimes com fortes cargas, a turbulência também é diminuída e por isso o comportamento do motor piora.

O consumo específico dos motores diesel rápidos que utilizam câmaras auxiliares de turbulência é inferior ao dos motores que utilizam câmaras auxiliares de pré-combustão, mas superior ao dos motores que utilizam a injeção directa.

No que respeita às dificuldades de arranque a frio, são semelhantes às dos motores equipados com câmaras de pré-combustão.

Devido às formas aerodinâmicas das câmaras de turbulência, as cabeças dos cilindros são mais difíceis de fabricar. Os motores diesel rápidos equipados com câmaras auxiliares de turbulência, adoptam:

Relações de compressão de 1:18 a 1:22

Pequeno excesso de ar

Injectores de um orifício

Pressões de injeção até 250 bar

Gradientes médios de pressão durante a combustão

Comparação das características dos motores diesel de injeção directa e indirecta

CARACTERÍSTICAS COMPARADAS	MOTOR DIESEL DE INJEÇÃO DIRECTA	MOTOR DIESEL DE INJEÇÃO INDIRECTA
Consumo combustível	Menor	Maior
Potência específica	Menor	Maior
Relação de compressão	Menor	Maior
Pressão de injeção	Maior	Menor
Pressão de combustão	Maior	Menor
Coeficiente excesso ar	Maior	Menor
Fumos gases evacuação	Mais	Menos
Facilidade de arranque	Maior	Menor
Simplicidade construtiva	Maior	Menor

4 Emissão de poluentes

4.1 Introdução

A emissão de poluentes pelas máquinas de combustão interna é pelo seu impacto ambiental um tema de grande actualidade. Com efeito, estas máquinas são a principal fonte de poluição atmosférica dos centros urbanos e, conseqüentemente, responsáveis pela diminuição da qualidade de vida das populações. É indispensável, por isso, continuar a desenvolver todos os esforços necessários para reduzir a emissão de poluentes dos motores diesel e de explosão.

4.2 Componentes típicos dos gases de evacuação dos motores diesel marítimos

SÍMBOLO	COMPONENTE TÍPICO	SIMBOLO	COMPONENTE TÍPICO
CO	Monóxido de carbono	N2	Azoto
CO2	Dióxido de carbono	NOx	Óxidos de azoto
HC	Hidrocarbonetos	SOx	Óxidos de enxofre
H2 O	Água	PM	Partículas
O2	Oxigénio		

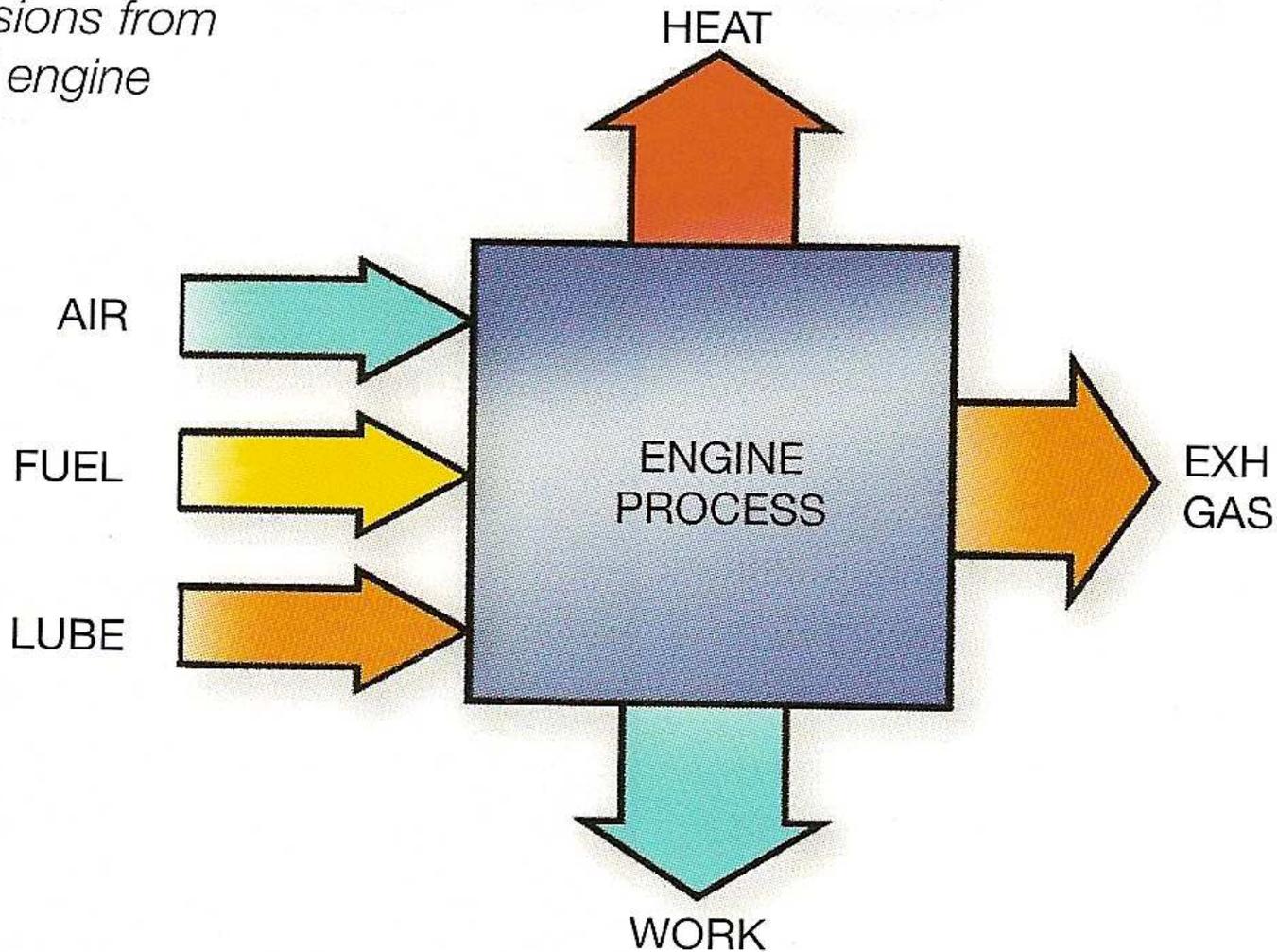
Na tabela seguinte, podem visualizar-se os teores das emissões típicas dos componentes dos gases de evacuação dos motores diesel marítimos de dois tempos lentos *Wartsilla NSD* e *MAN B&W*, em (g/KW.h):

POLUENTE	WARTSILLA NSD (g/KW.h)	MAN G&W (g/KW.h)
Azoto	6200	6500
Oxigénio	1100	1070
CO2	500	590
Água	200	250
NOx	17	18,6
SOx	13,6 (3,5% S)	8,52 (2,25% S)
Partículas	0,6	0,66
HC	0,4	1,17
CO	0,4	0,41

Na figura seguinte pode observar-se a composição típica do ar de alimentação, combustível e óleo de lubrificação dos cilindros, bem como dos gases de evacuação de um motor diesel marítimo de dois tempos de baixa velocidade *MAN*, em %.

Typical emissions from a low speed engine

21% O₂
 79% N₂
 97% HC
 3% S
 97% HC
 2.5% Ca
 0.5% S



13.0% O₂
 75.8% N₂
 5.6% CO₂
 5.35% H₂O
 1500 ppm NO₂
 600 ppm SO₂
 60 ppm CO
 180 ppm HC
 120 mg/Nm³
 PART

4.3 Componentes poluentes dos gases de evacuação

Dos componentes dos gases de evacuação dos motores diesel marítimos, consideram-se poluentes os seguintes:

CO₂	(Dióxido de carbono)
SO_x	(Óxidos de enxofre)
NO_x	(Óxidos de azoto)
HC	(Hidrocarbonetos)
PM	(Partículas)

No que concerne às emissões de **CO₂** dos motores diesel marítimos, as quais são responsáveis pelo **efeito de estufa**, representam **2 a 3%** das emissões a nível mundial.

Para se ter uma ideia mais concreta, refere-se que **o combustível residual gasto** pela frota mercante mundial no ano de **1998**, foi de **140 milhões de toneladas**, cuja combustão gerou **420 a 430 milhões de toneladas de CO₂**.

Estima-se que os transportes europeus, sejam responsáveis pela emissão neste espaço terrestre de cerca de **12% de CO₂** .

Estudos efectuados por técnicos dos Estados Unidos, permitiram determinar os valores de **CO₂ emitidos por tonelada de carga transportada por quilómetro (CO₂/t . Km)** , apresentados na tabela seguinte:

TIPO DE TRANSPORTE	EMISSÃO DE CO₂/t . Km
Marítimo	2 g
Costeiro/rodoviário	30 g
Rodoviário	190 g
Aéreo	Superior aos anteriores

4.4 Regulamentação da emissão de poluentes pelos motores diesel marítimos

É efectuada pelo **anexo VI da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios**, “*Annex VI of Marpol 73/78 Regulations for thr Prevention of air Pollution from Ships and Nox Technical Code*”

4.4.1 Limites da emissão de NOx

De acordo com a **regra 13 do Anexo VI**, todos os motores diesel marítimos com potência **superior a 130 KW**, instalados em navios construídos a partir do **ano 2000**, ou sendo anteriores sofram uma **alteração significativa** tal como a a sua **substituição por outros novos** ou a **alteração das suas performances em mais de 10%** no que se refere à sua **potência e velocidade nominais**, ficam sujeitos aos **seguintes limites de emissão de NOx**:

VELOCIDADE DE ROTAÇÃO	LIMITES DE EMISSÃO DE NOx
$n < 130$ rpm	17 g/KW.h
$130 \leq n < 2000$ rpm	$45 \cdot n^{(-0,2)}$ g/KW.h
$n \geq 2000$ rpm	9,8 g/KW.h

4.4.2 Limites do teor de enxofre dos combustíveis marítimos

A **regra 14 do anexo VI**, fixa o **teor máximo de enxofre** que os combustíveis queimados pelos motores diesel marítimos podem conter, em função das áreas onde os navios operam, de acordo com os valores a seguir indicados:

4,5% em massa: para os combustíveis queimados fora das áreas de controlo das emissões poluentes de SO_x;

1,5% em massa: para os combustíveis queimados na área do Mar Báltico definida na Regra 10 (1) (b) do Anexo 1, bem como em quaisquer outras áreas, incluindo as dos portos designadas pela IMO, de acordo com os critérios e os procedimentos definidos para controlar as emissões de NO_x no que respeita à poluição do ar atmosférico pelos navios, no Apêndice III do referido anexo.

Quando os navios se encontrem nas **áreas onde as emissões de SO_x são controladas**, pelo menos uma das seguintes condições tem de ser satisfeita:

O teor de enxofre do combustível queimado não exceder 1,5%;

Ser utilizado um sistema de limpeza dos gases de evacuação aprovado pela administração que satisfaça os requisitos fixados pela IMO, para reduzir as emissões de SO_x dos motores diesel principais e auxiliares dos navios para 6,0 g/KW.h ou menos. Os resíduos dos sistemas de limpeza, só podem ser descarregados nas águas dos estaleiros, portos e estuários, se for certificado que não produzem qualquer impacto negativo nos seus ecossistemas, conforme os critérios da IMO;

Ser utilizado qualquer outro método tecnológico que seja verificável e capaz de limitar as emissões de SOx a um nível equivalente ao estabelecido no parágrafo anterior.

Estes métodos devem ser aprovados pela Administração, a qual terá em consideração os requisitos definidos pela IMO.

O **teor de enxofre estabelecido pela IMO** deve ser certificado pelo fornecedor de combustível de acordo com o estipulado na **regra 18 do Anexo VI**.

Os navios que utilizam combustíveis com **teor de enxofre superior a 1,5% nas áreas onde as emissões de SOx não são controladas**, devem mudar com suficiente antecedência o consumo para um **combustível com um teor de enxofre até 1,5%** a fim de que todo o combustível remanescente nos sistemas de alimentação dos motores seja queimado antes de entrarem nas áreas controladas.

O volume de combustível de cada tanque com **teor de enxofre até 1,5%**, assim como a data, hora e posição do navio no momento em que é concluída a mudança de consumo de combustível, têm de ser registados no livro adequado prescrito pela administração.

Perante esta regulamentação, implementada a nível mundial, foi necessário conceber sistemas e formas de actuação, susceptíveis de reduzir a emissão de poluentes dos motores diesel marítimos para os níveis prescritos pela IMO.

4.5 Redução da emissão de poluentes

Podem ser adoptadas várias formas de redução da emissão de poluentes dos motores diesel marítimos:

Primárias: reduzem os **NOx** através de uma actuação adequada sobre a combustão recorrendo para o efeito os meios a seguir indicados:

MEIOS	REDUÇÃO NOx	OBSERVAÇÕES	DISPONIBILIDADE
Injecção convencional (turbulência)	30 a 40%	>> Consumo >> Fumos	Imediata
Common Rail Injecção electrónica	20%	> Consumo > Fumos	Imediata
Emulsão fuel água Injecção de água	30 a 40%	Necessário novo controlo	Em desenvolvimento

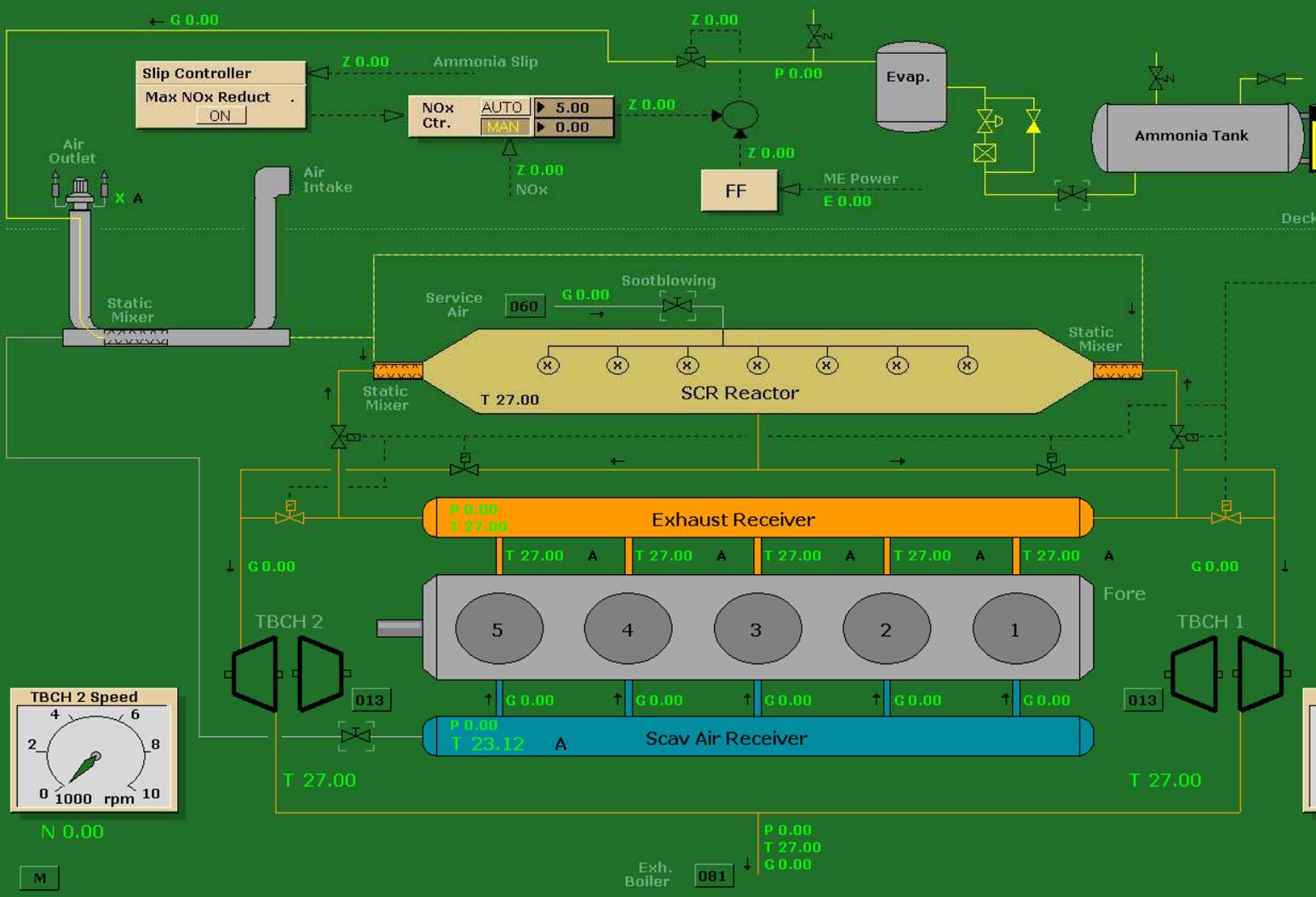
Secundárias: tratam os gases de evacuação através de catalizadores de redução selectiva dos poluentes (*SRC*) do tipo do apresentado na figura seguinte:

00:03:56
Freeze

Picture MD 14

ME Selective Catalytic Reduction

Alarms: 1 2 3 5 6 7 12 16 17 19 20 21 23 25
Silence: 27 28



SCR Control

Ready ON OFF

STATUS

- Stopped
- Active
- Shutting down
- Starting
- Stdby (exh gas temp)

TRIP

- Ammonia supply
- Ammonia pressure
- Mixing air supply
- Excessive ammonia slip
- Ammonia leakage

