

## Combustão em motores de ignição por faísca

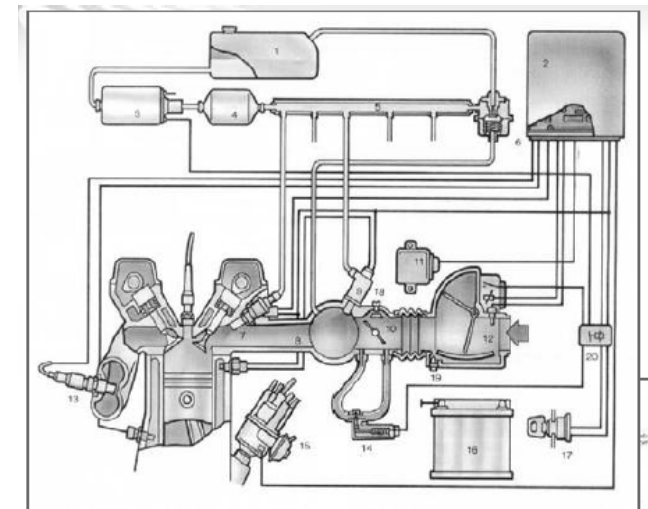
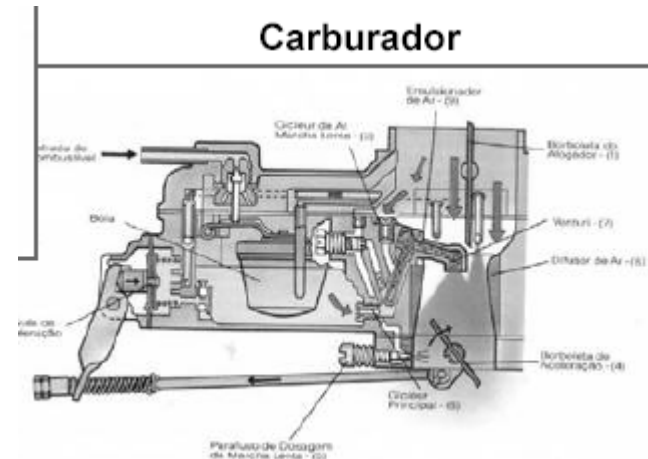
### Objetivos

- Apresentar os modelos clássicos de combustão em MCI e suas anomalias.
- Relacionar e explicar os parâmetros que interferem no desenvolvimento das combustões em motores de ignição por faísca e de ignição por compressão.

## Motores de ignição por faísca

### Modelo básico:

A mistura combustível-ar é formada com a dosagem prévia do combustível na massa de ar e fornecida ao cilindro durante o tempo de admissão e é homogeneizada durante o tempo de compressão (exceto em sistemas com injeção direta).



Sistema de injeção eletrônica de combustível

### Motores de ignição por faísca

#### Modelo básico:

Combustão normal:

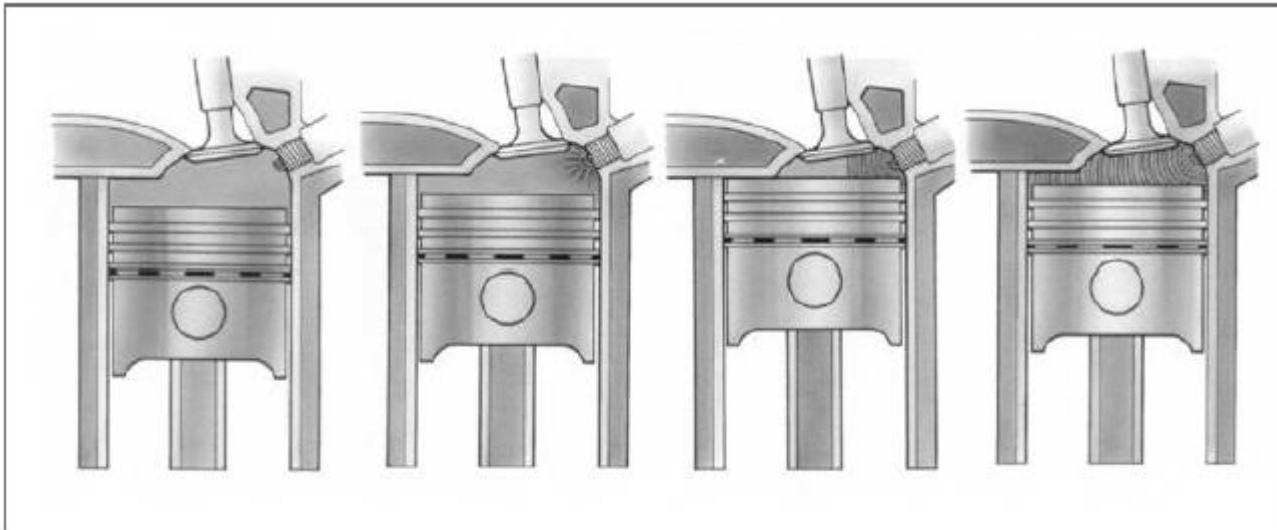
A combustão se inicia após o início do estabelecimento da faísca entre os eletrodos da vela de ignição, com a formação de plasma em torno dela .

Imediatamente na sequência, ocorrem as reações preliminares de combustão (que caracterizam o denominado retardamento químico) e inicia-se a formação da frente de chama (linha limítrofe entre as regiões da câmara de combustão que contém os gases queimados e as que contém mistura combustível-ar não queimada).

A combustão se desenvolve na frente de chama até percorrer toda a câmara de combustão, atingindo as paredes do cilindro.

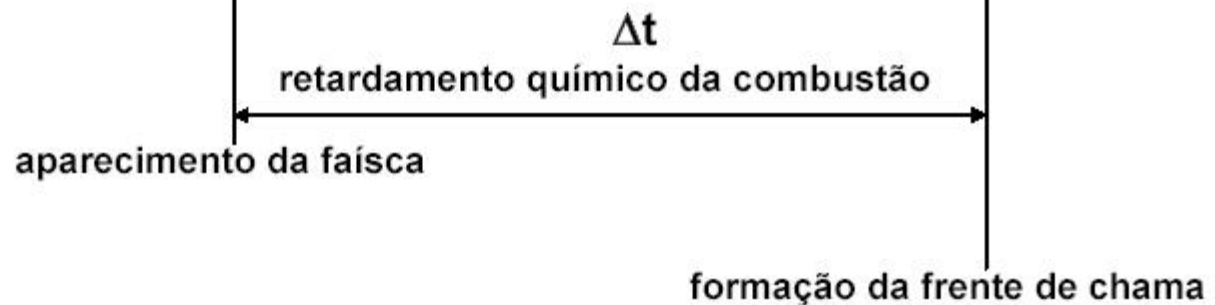
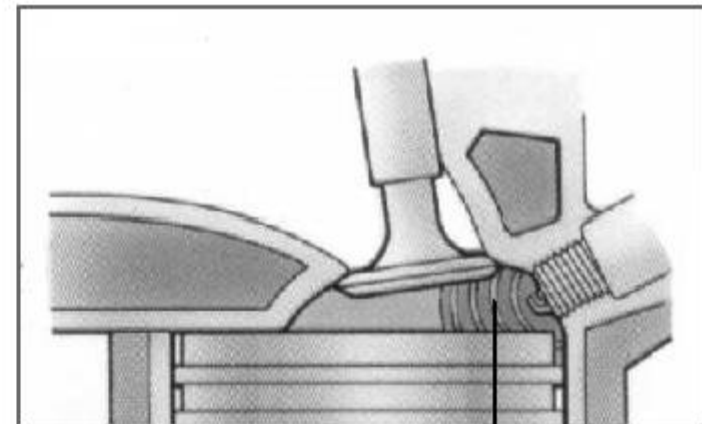
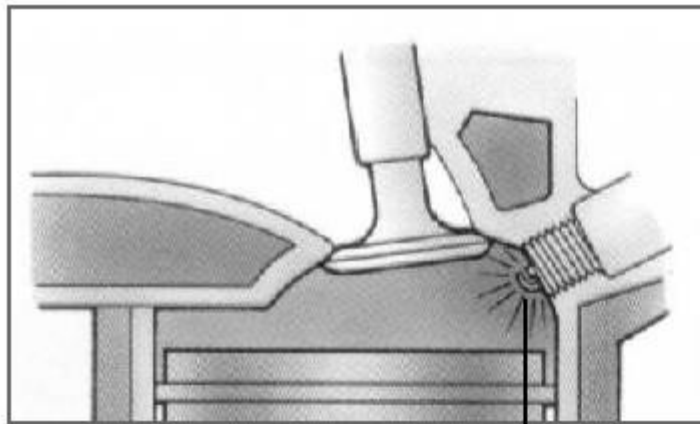
## Motores de ignição por faísca

### Modelo básico



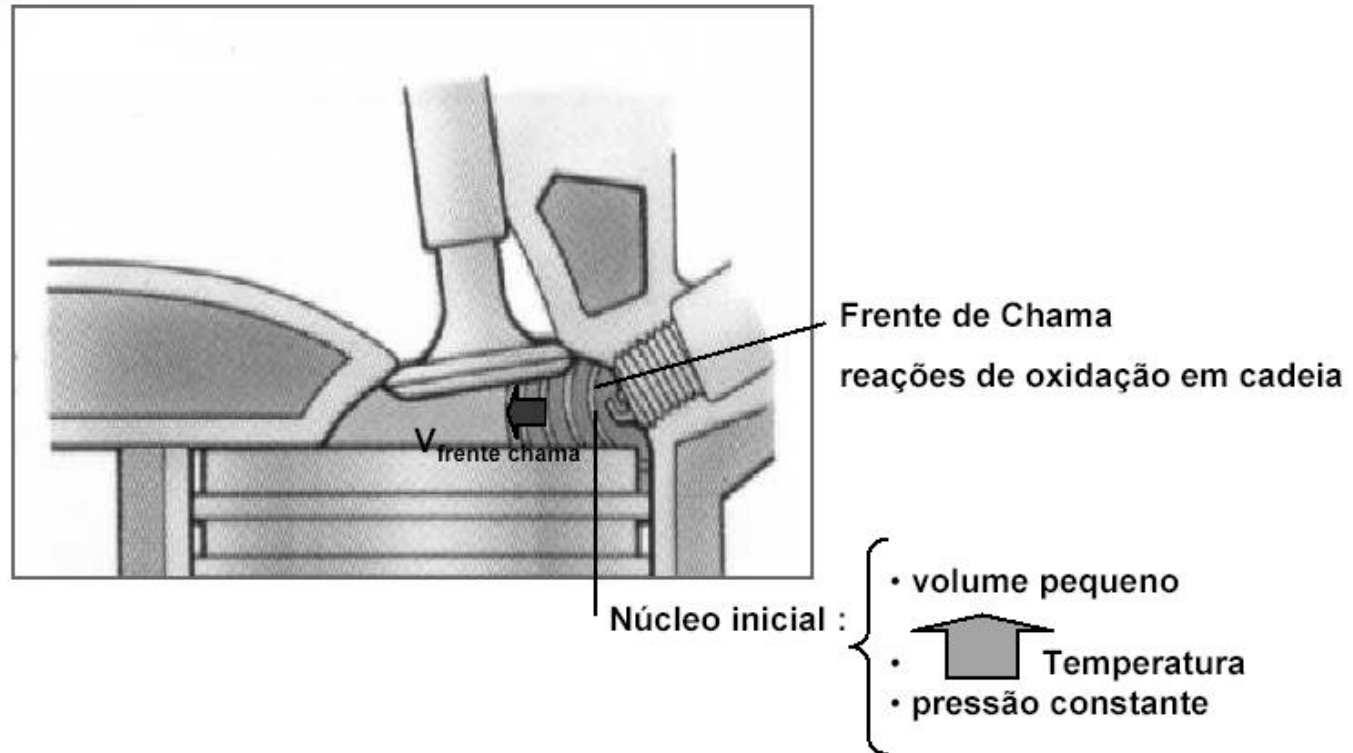
## Motores de ignição por faísca

### Modelo Básico:



## Motores de ignição por faísca

### Modelo Básico:



### Motores de ignição por faísca

#### Modelo básico:

Combustão normal:

O retardamento químico depende do combustível, bem como a velocidade de propagação da frente de chama ( $V_{fc}$ ).

Exemplos: gasolina:  $V_{fc} < 10$  m/s

etanol:  $V_{fc} > 10$  m/s

OBS: Quanto maior a velocidade da frente de chama, mais isovolumétrica é a combustão, gerando maior rendimento térmico.

Entretanto, é necessário que outros efeitos (auto-ignições a jusante da frente de chama e swirl, por exemplo) ocorram simultaneamente para que a combustão ocorra rápida o suficiente para que o motor trabalhe em altas rotações, permitindo fornecer maiores potências (combustão esparsa).

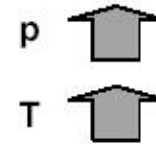


## Motores de ignição por faísca

### Modelo básico



Avanço normal da chama

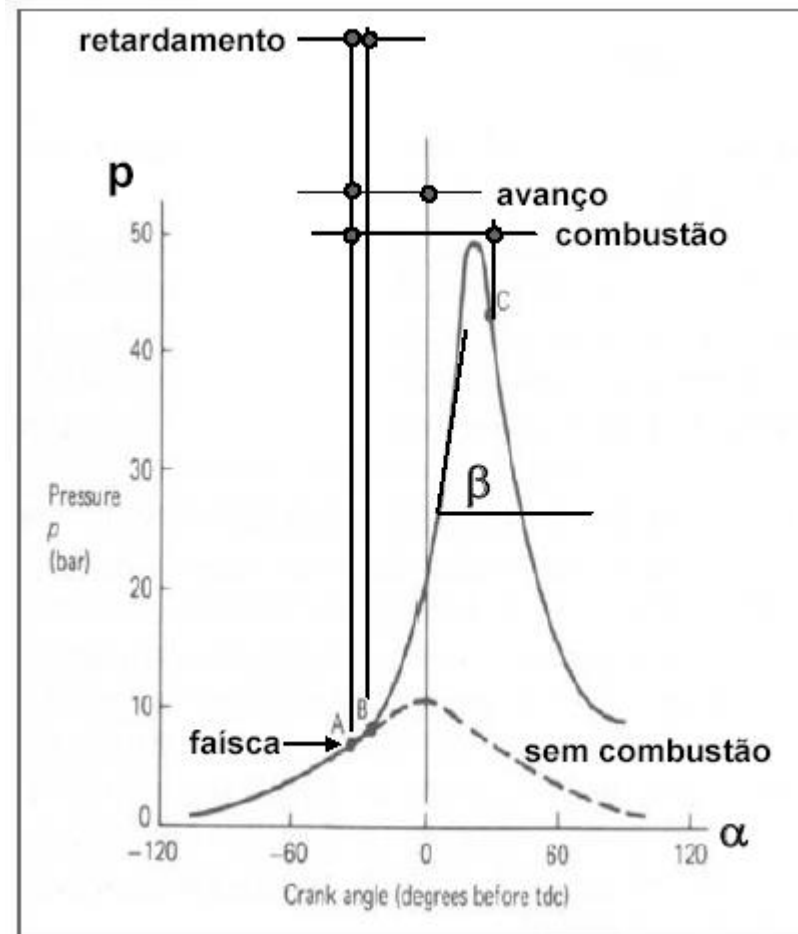


originam chamas secundárias

chamas secundárias de auto-ignição  
baixa intensidade : auxiliam a combustão normal  
aumentam a  $v_{\text{frente chama}}$   
alta intensidade : originam o fenômeno da detonação

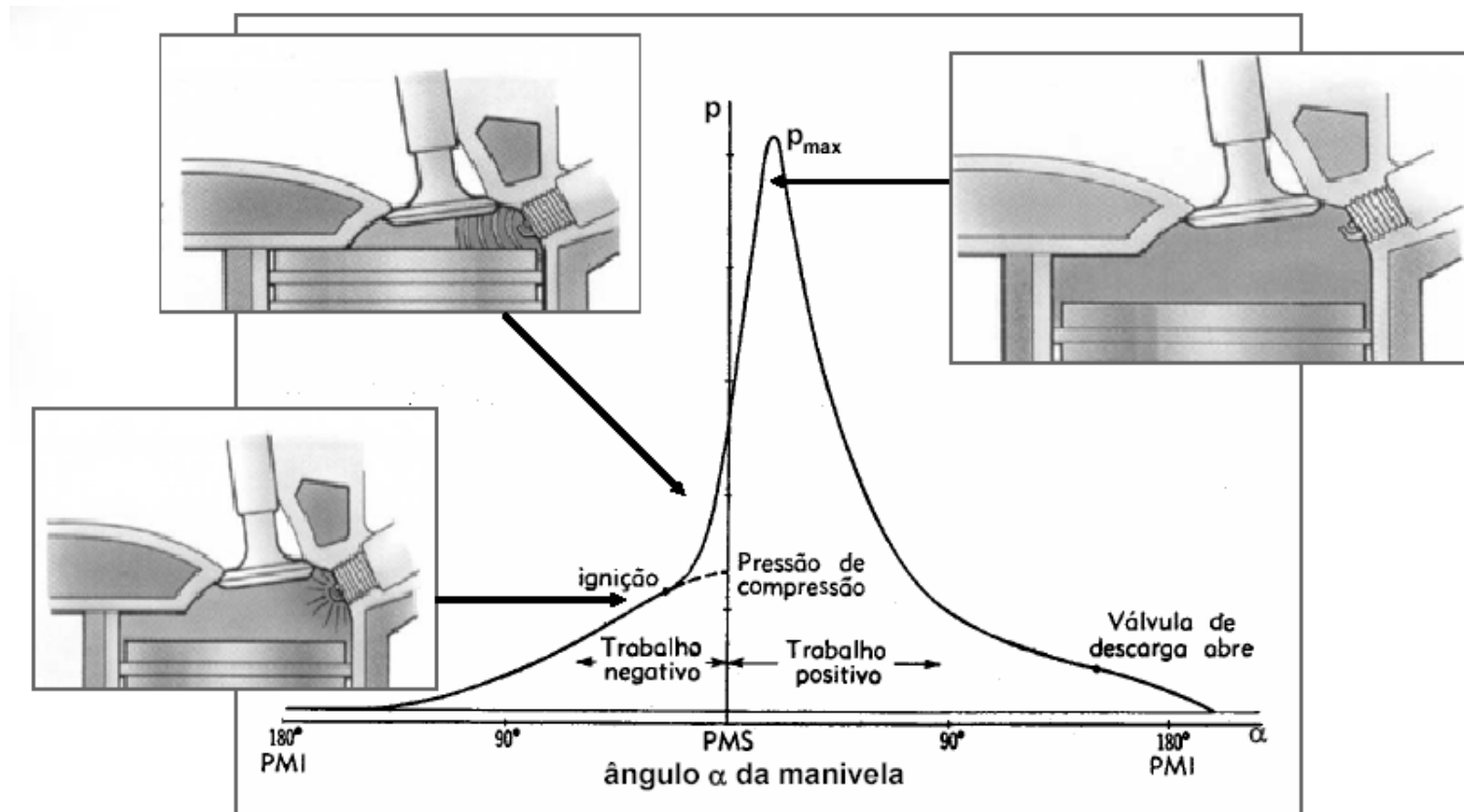
## Motores de ignição por faísca

### Modelo básico



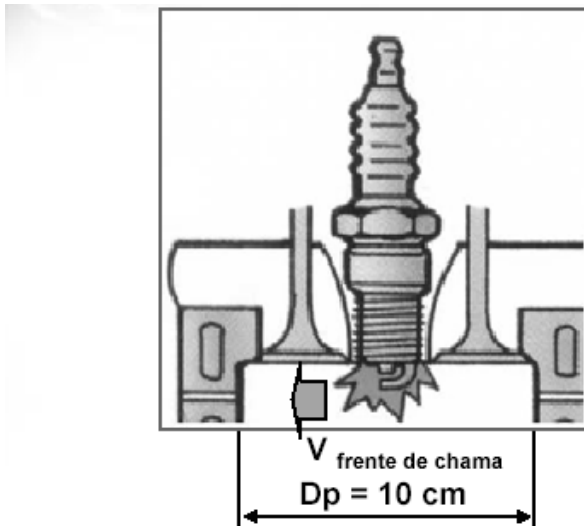
## Motores de ignição por faísca

### Modelo básico



## Motores de ignição por faísca

### Modelo básico



Admitindo

$$V_{\text{frente de chama}} = 10 \text{ m/s}$$

$$\Delta t = \frac{D_p}{2 \times v_{fc}}$$

$\Delta t_{\text{frente chama}} = 0,005 \text{ s}$   
tempo para a frente de chama atingir a parede do cilindro

Admitindo que a combustão completa se dá em  $30^\circ$

$\Delta t = 0,005 \text{ s}$   $\longrightarrow$   $30^\circ$   
 $\Delta t''$   $\longrightarrow$   $360^\circ$ ,  $\Delta t'' = 0,06 \text{ s}$ ; tempo para uma volta do virabrequim

1 volta  $\longrightarrow$   $0,06 \text{ s}$   
 $n$   $\longrightarrow$   $60 \text{ s}$ ,  $n = 1.000 \text{ rpm}$

Para rotações maiores  $\uparrow$   $V_{\text{frente de chama}}$

### Motores de ignição por faísca

#### Anomalias de combustão:

##### Detonação:

É um fenômeno caracterizado pela propagação de ondas de pressão de grande intensidade geradas por auto-ignições que ocorrem a jusante da frente de chama.

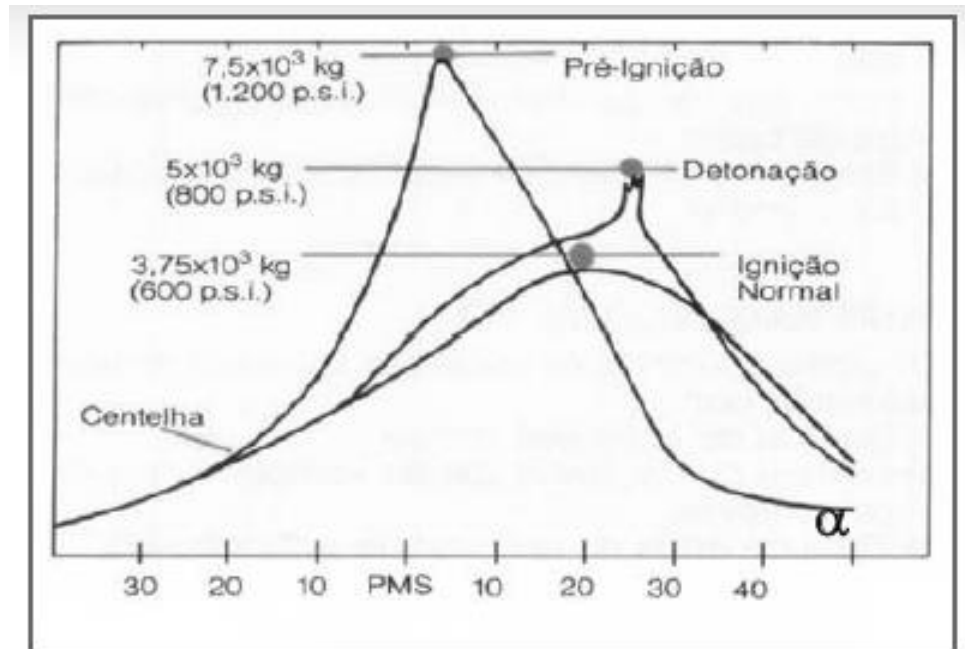
É, portanto, uma anomalia de final de combustão.

##### Pré-ignição:

Trata-se da auto-ignição da mistura combustível-ar, em significativa intensidade, que ocorre antes do instante do estabelecimento da centelha, pelo atingimento da temperatura de auto-ignição durante a compressão.

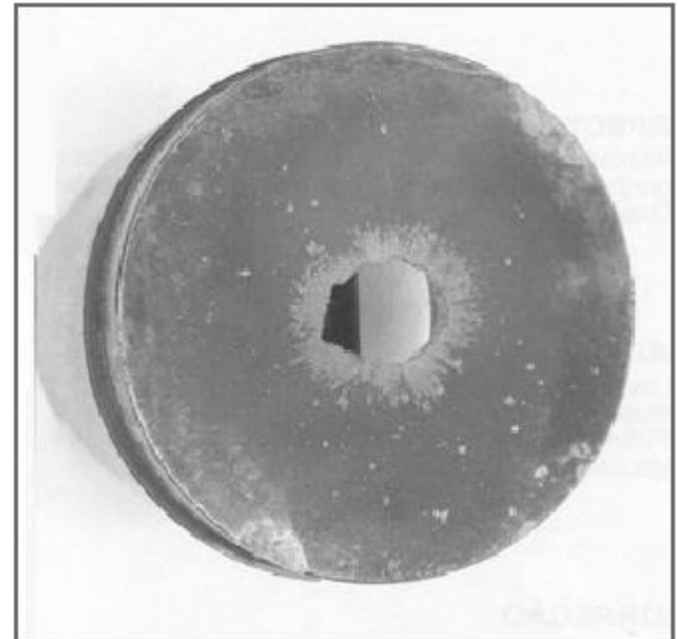
## Motores de ignição por faísca

### Anomalias de combustão:



## Motores de ignição por faísca

### Anomalias de combustão:



### Motores de ignição por faísca

#### Anomalias de combustão:

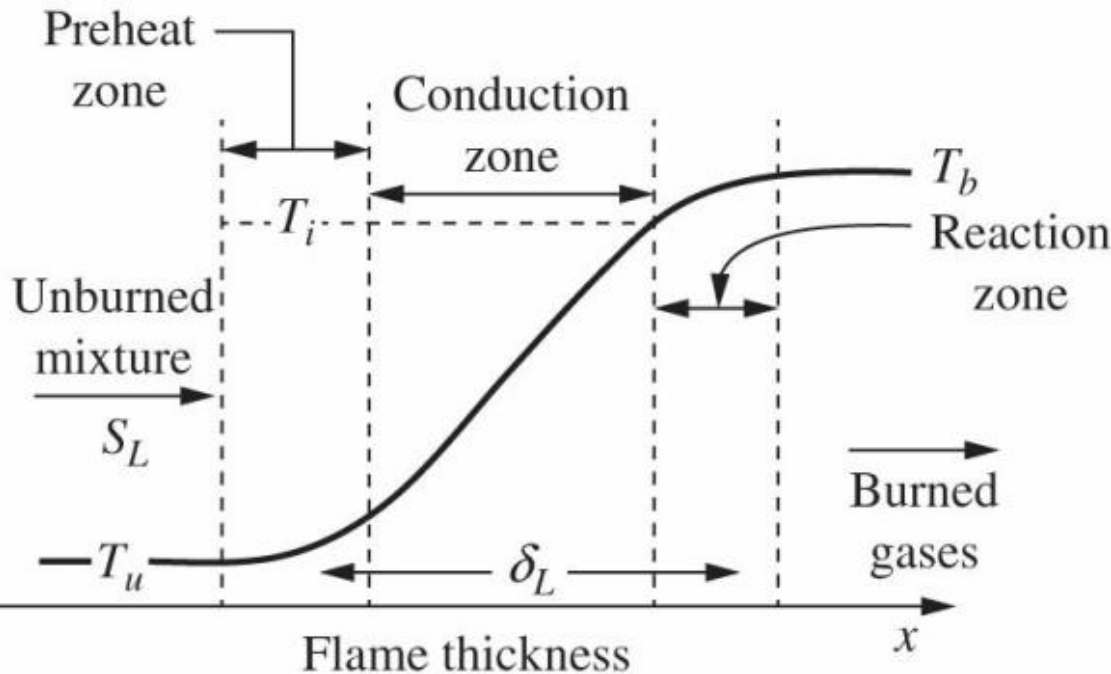
Tanto a Pré-ignição como a Detonação podem ser potencializadas por:

- baixa qualidade de ignição do combustível;
- temperaturas e/ou pressões elevadas da mistura de admissão;
- uso de misturas excessivamente ricas;
- presença de depósitos nas velas, válvulas, cabeçotes e cilindros;
- avanço de ponto de ignição;
- relações inadequadas de pressões de escape e admissão;
- baixos níveis de turbulência.



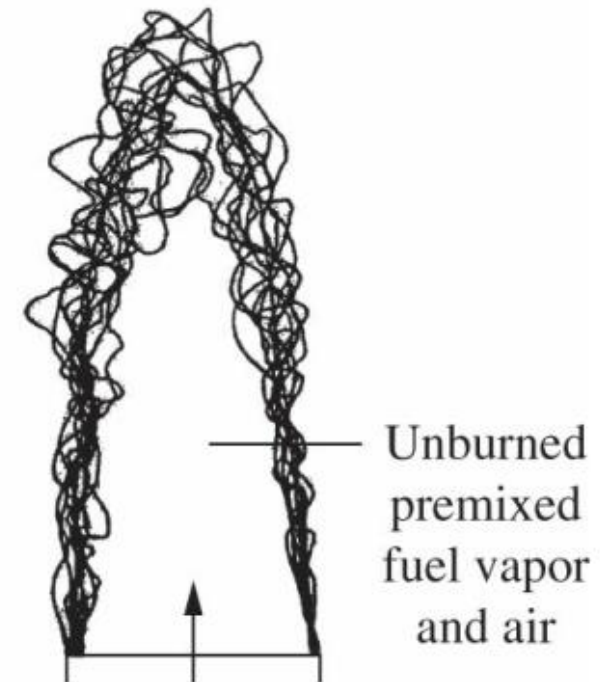
## Chama pré-misturada Laminar X Turbulenta

Laminar premixed flame



(a)

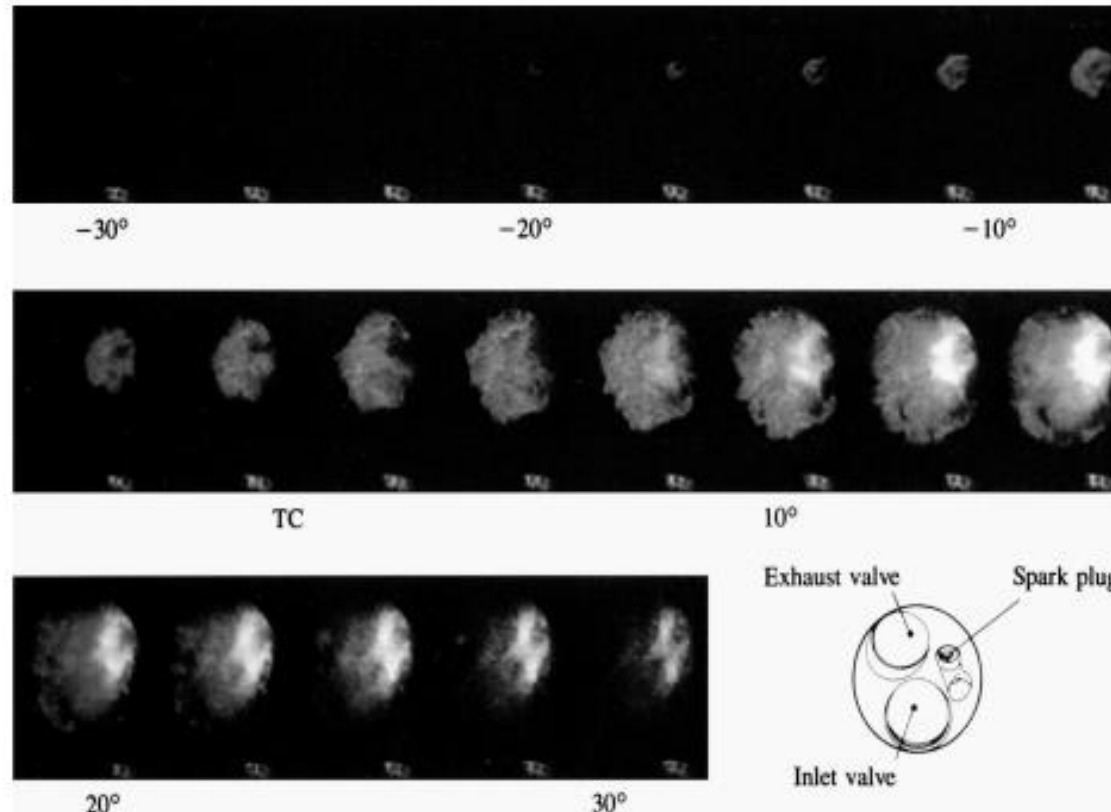
Turbulent premixed flame



(b)

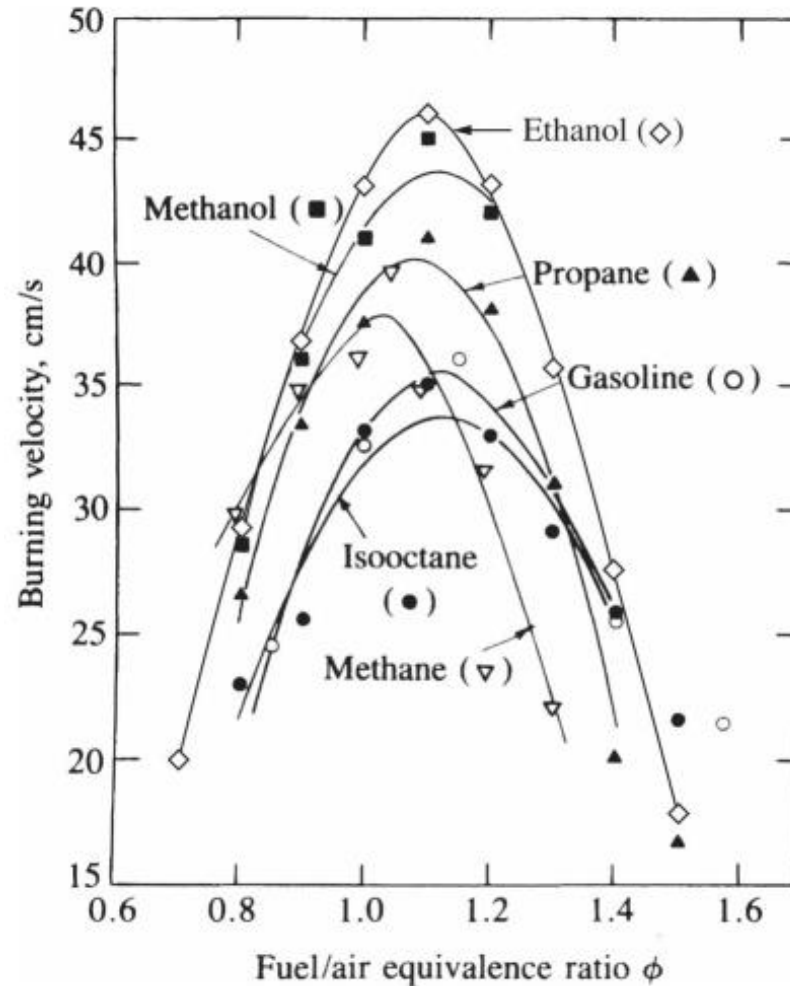
A velocidade de chama laminar ( $S_L$ ) é função da mistura e do EGR

## Chama pré-misturada Laminar X Turbulenta



A velocidade de chama turbulenta ( $St$ ) é formulada em função da velocidade  $SI$  com a área da frente de chama aumentada “amarrotada”.

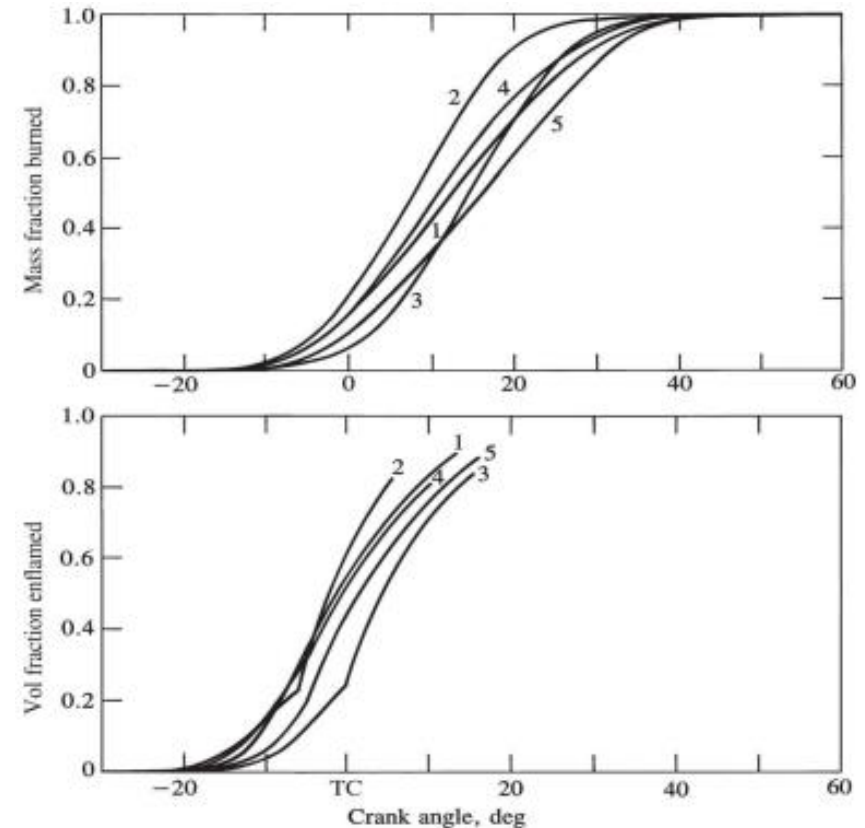
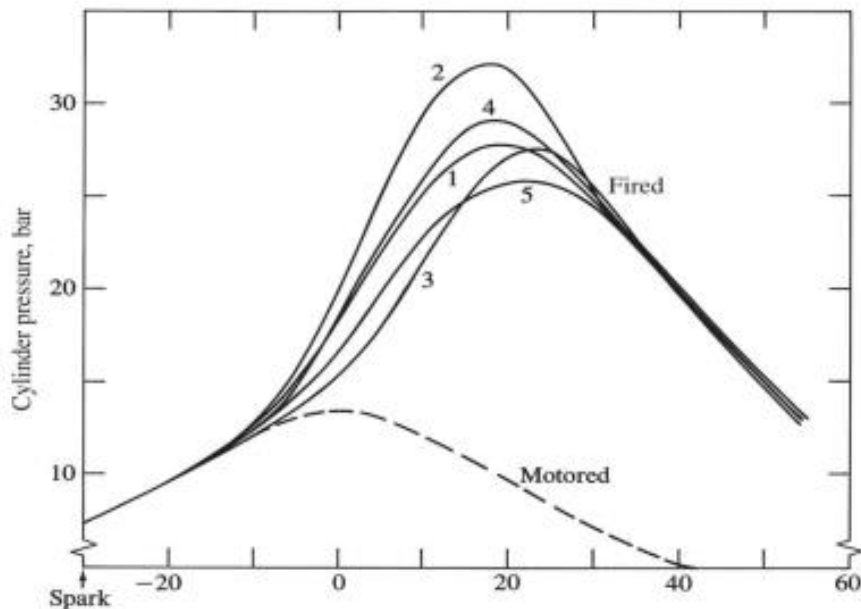
## Velocidade de queima



### Chama pré-misturada Laminar X Turbulenta

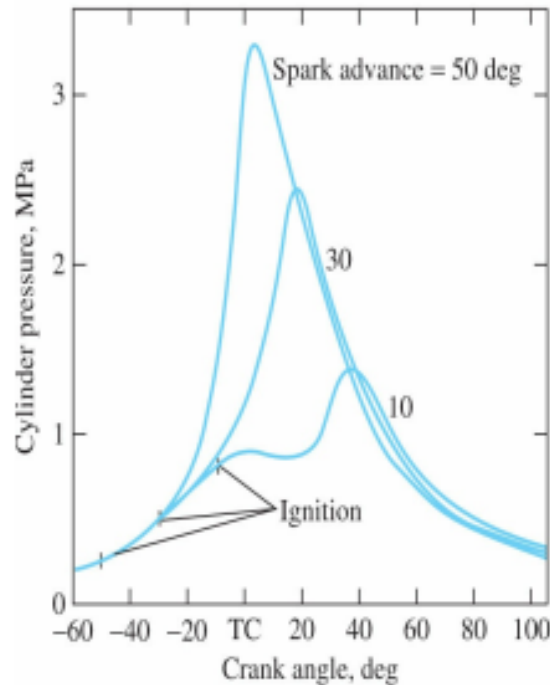
- Maior turbulência resulta maior velocidade de chama turbulenta;
- Turbulência correlaciona com a velocidade do pistão e possibilita combustão estável em diferentes rotações do motor;
- Escalas de comprimento da turbulência: comprimento integral ( 1mm) e comprimento de Kolmogorov (0,01mm)

## Pressão no cilindro e combustão

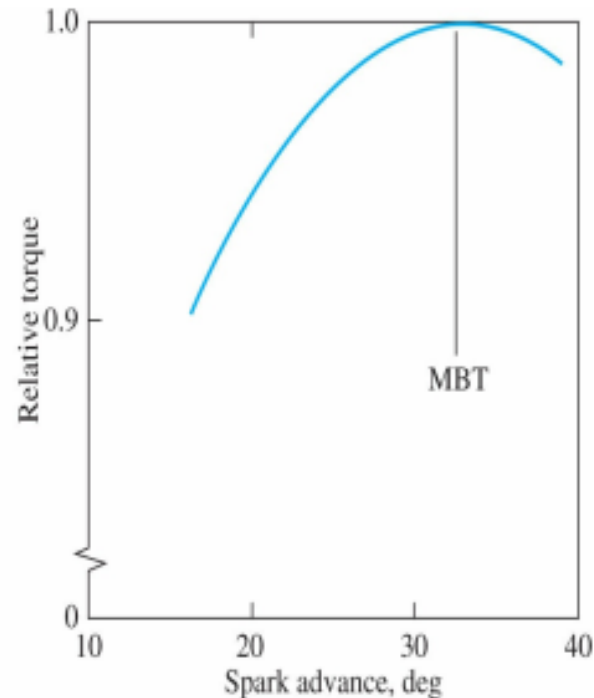


- Pressão máxima após TDC;
- Queima da carga até 30°- 40° ATDC;
- Cycle-to-cycle variation
  - - formação da mistura e condições de pressão, temperatura e turbulência próximo da vela de ignição

## Ajusta de ignição e combustão



(a)



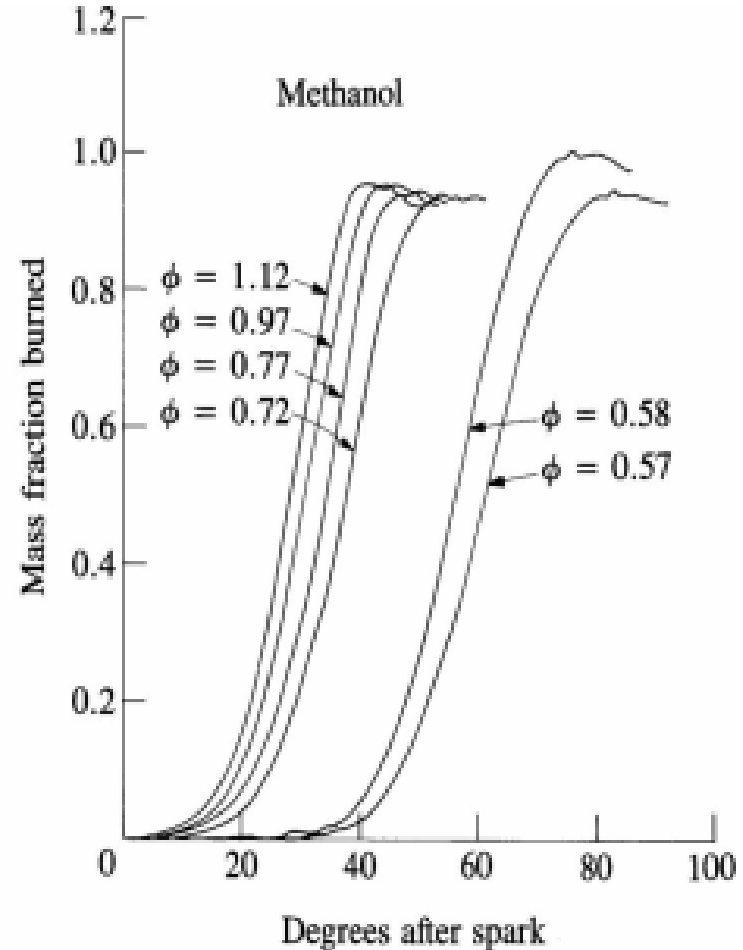
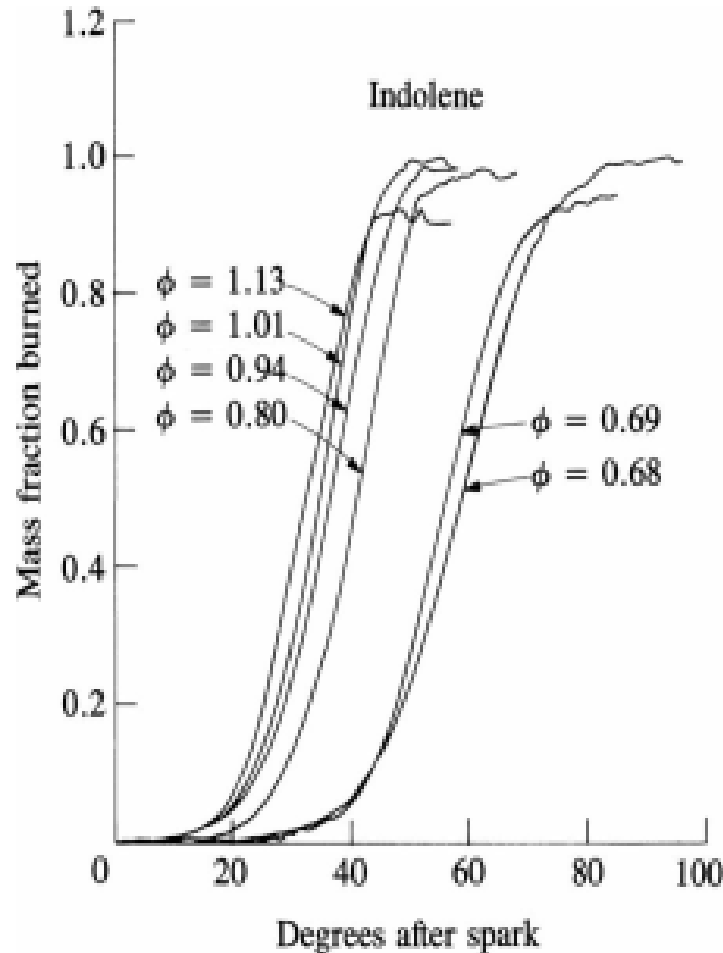
(b)

- Avanço – trabalho negativo sobre o gás resulta em maiores P e T e transferência de calor para as paredes;
- Atraso – Pmax após o TDC e reduz trabalho do gás sobre o pistão;
- Maximum Brake Torque (MBT) timing

## Ajusta de ignição e combustão

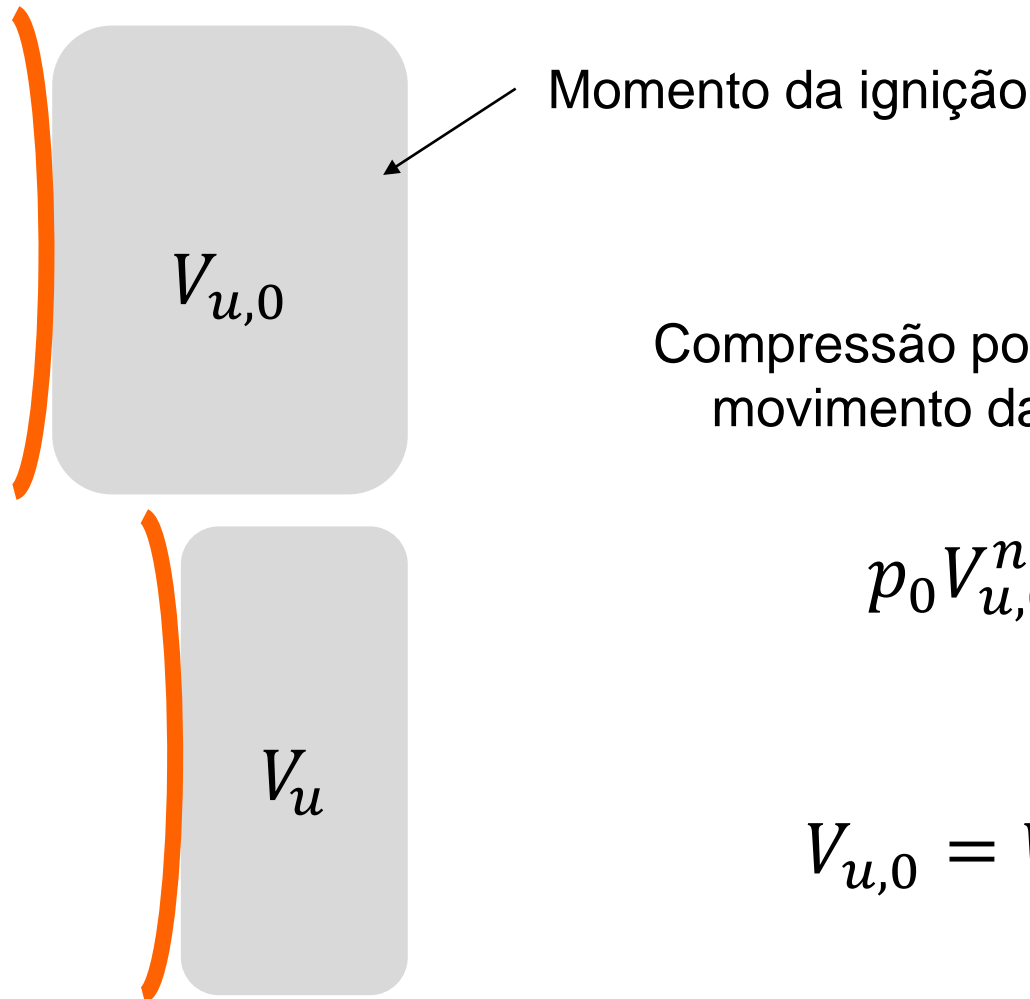
- Maximum Brake Torque (MBT) timing
  - Propriedades da mistura;
  - Velocidade de chama turbulenta;
  - Condições de operação;
  - Transferência de calor para as paredes
- Ponto ótimo:
  - $P_{max}$  13° a 15° ATDC
  - 50% de queima da carga em 8° ATDC

## Analise de pressão e combustão





## Volume de gás não queimado

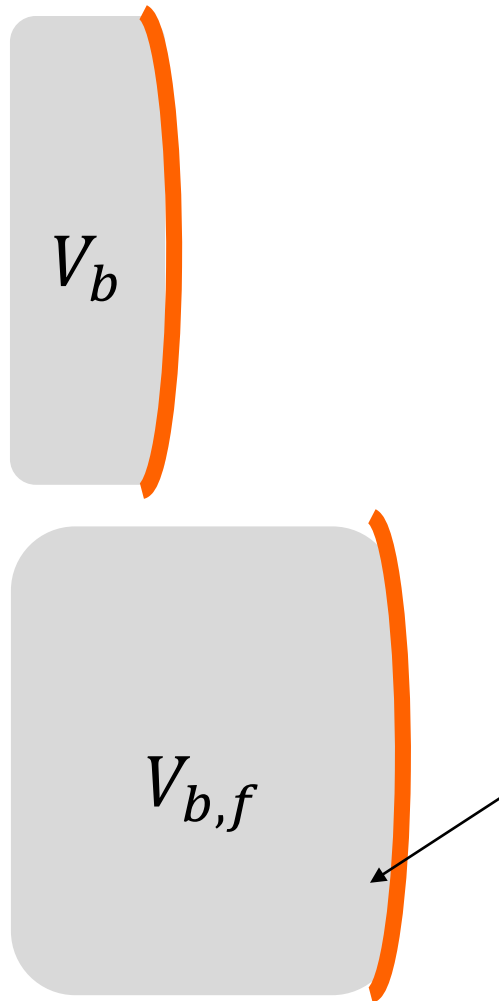


Compressão politrópica do gás pelo movimento da frente de chama

$$p_0 V_{u,0}^n = p V_u^n$$

$$V_{u,0} = V_u \left( \frac{p}{p_0} \right)^{1/n}$$

## Volume do gás queimado



Expansão politrópica do gás pelo movimento da frente de chama

$$p_f V_{b,f}^n = p V_b^n$$

$$V_{b,f} = V_b \left( \frac{p}{p_f} \right)^{1/n}$$

Final da combustão

## Fração mássica de gás queimado

$$x_b = \frac{V_b}{V_0} = \frac{V_0 - V_{u,0}}{V_0} = 1 - \left( \frac{V_{u,0}}{V_0} \right) = \frac{V_{b,f}}{V_f}$$

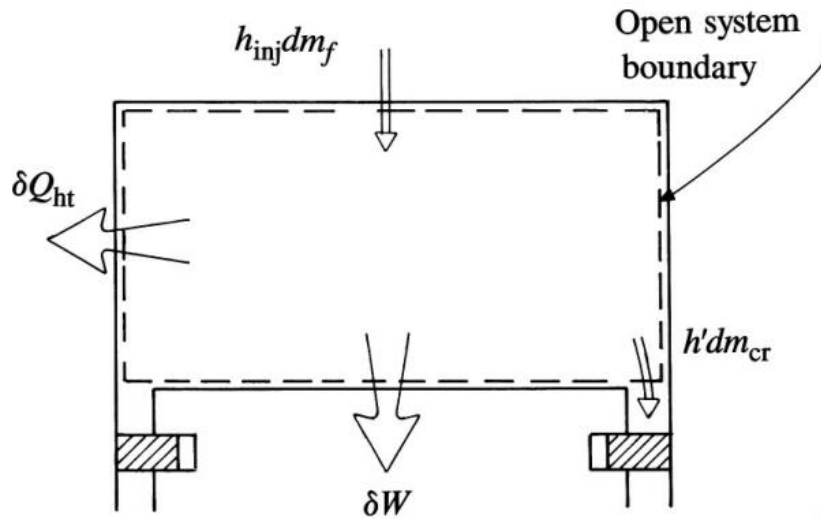
Vol. Total  
imediatamente antes da  
ignição

Vol. Total ao fim do  
processo de combustão

$$V = V_u + V_b$$

$$x_b = \frac{V p^{1/n} - V_0 p_0^{1/n}}{V_f p_f^{1/n} - V_0 p_0^{1/n}}$$

## Análise de pressão e combustão

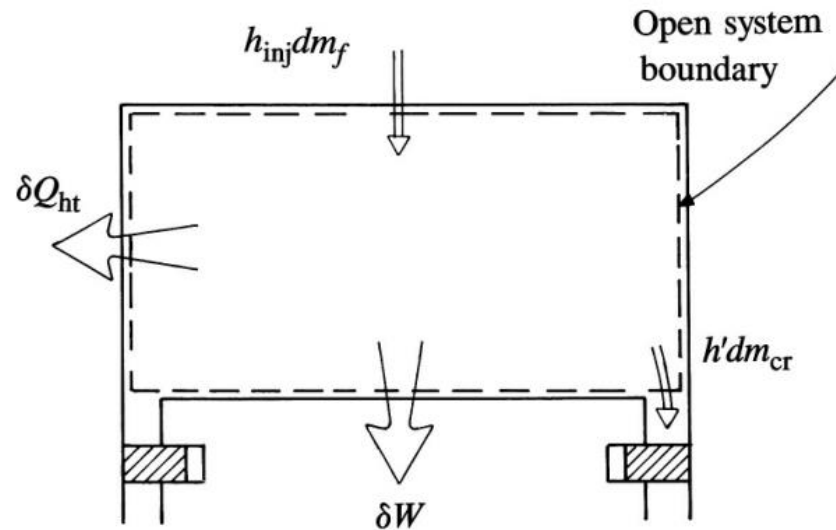


$$\delta Q_{ch} = dU_s + \delta Q_{ht} + \delta W + \sum h_i dm_i$$

$$\delta Q_{ch} = mc_v dT + (h' - u) dm_{cr} + pdV + \delta Q_{ht}$$

$$\delta Q_{ch} = \left( \frac{c_v}{R} \right) V dp + \left( \frac{c_v}{R} \right) p dV + (h' - u + c_v T) dm_{cr} + \delta Q_{ht}$$

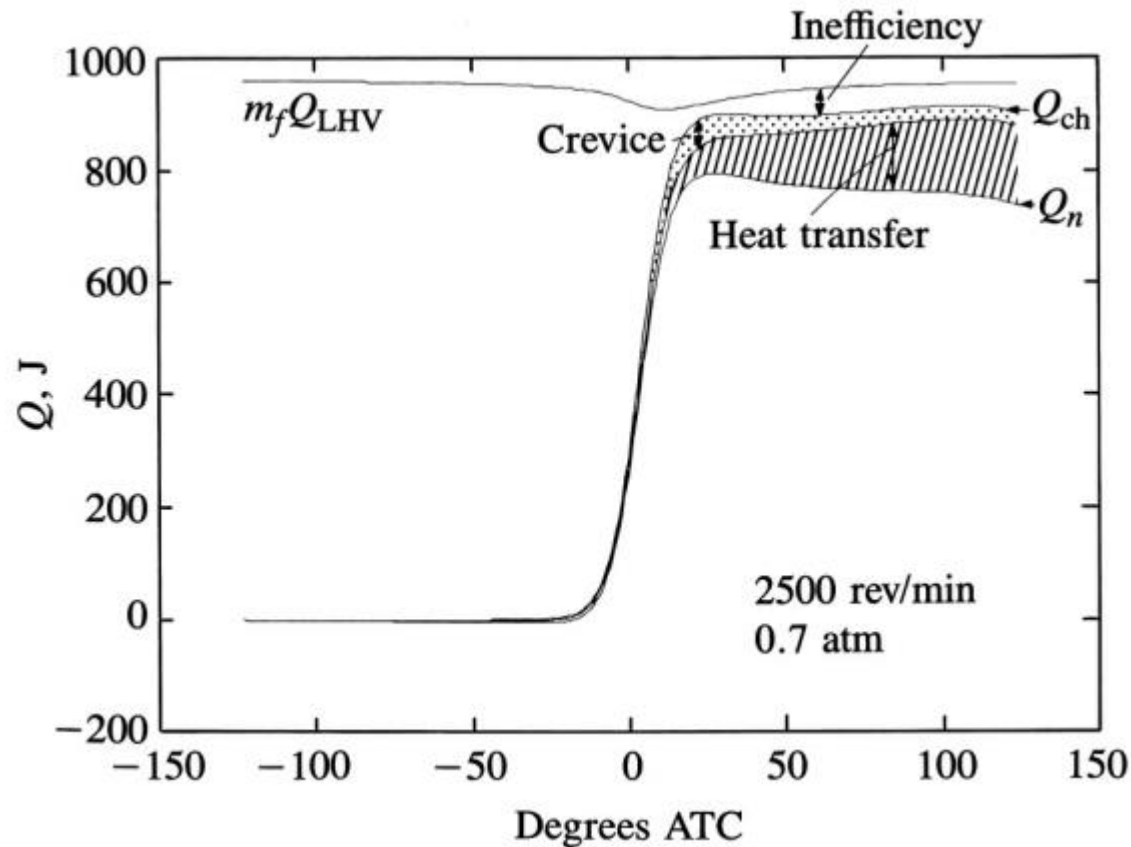
## Análise de pressão e combustão - Taxa de liberação de calor



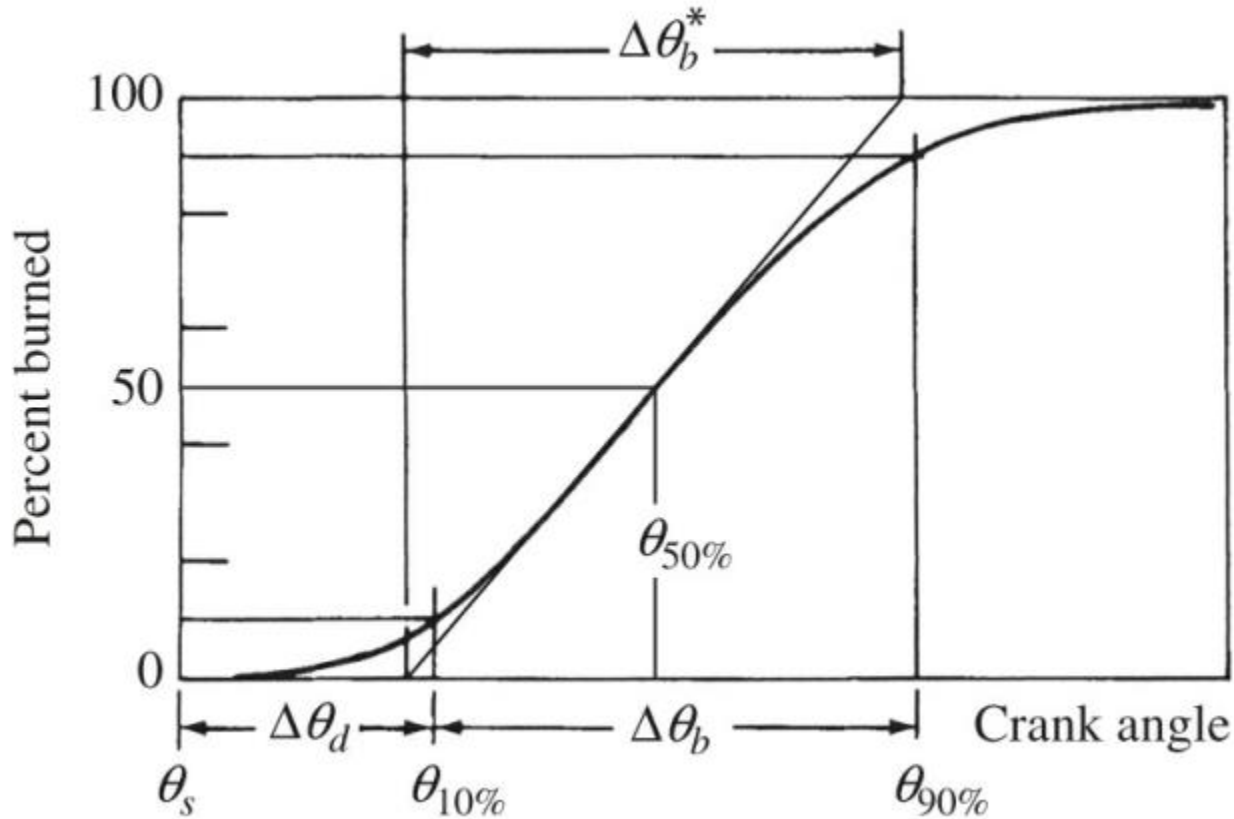
$$\delta Q_{ch} = \left( \frac{c_v}{R} \right) V dp + \left( \frac{c_v}{R} \right) p dV + (h' - u + c_v T) dm_{cr} + \delta Q_{ht}$$

$$\frac{dQ_{ch}}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{d\theta} + V_{cr} \left[ \frac{T'}{T_w} + \frac{T}{T_w(\gamma-1)} + \frac{1}{bT_w} \ln \left( \frac{\gamma-1}{\gamma'-1} \right) \right] \frac{dp}{d\theta} + \frac{dQ_{ht}}{d\theta}$$

## Análise de pressão e combustão - Taxa de liberação de calor



## Função de Wiebe



$$\frac{\Delta\theta_d}{\Delta\theta_{d,\text{ref}}} = \left(\frac{N}{N_{\text{ref}}}\right)^{1/3} \left(\frac{S_{L,\text{ref}}}{S_L}\right)^{2/3}$$

$$x_b = 1 - \exp\left[-a\left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta}\right)^{m+1}\right]$$

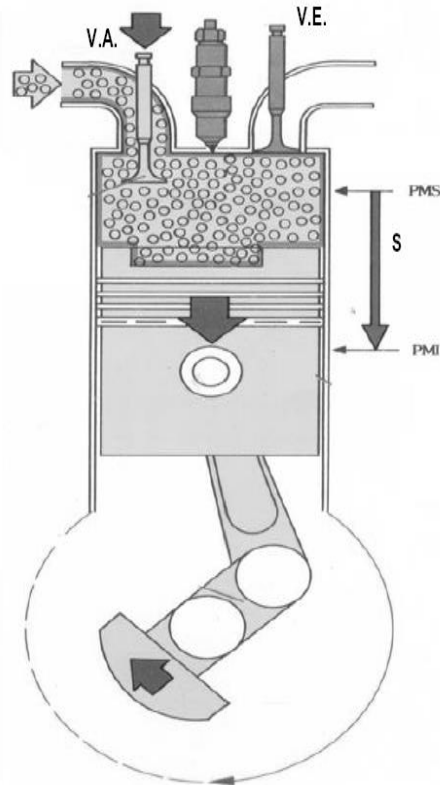
# Combustão em motores de ignição por compressão

## Motores de Combustão Interna

### Motores de ignição por compressão

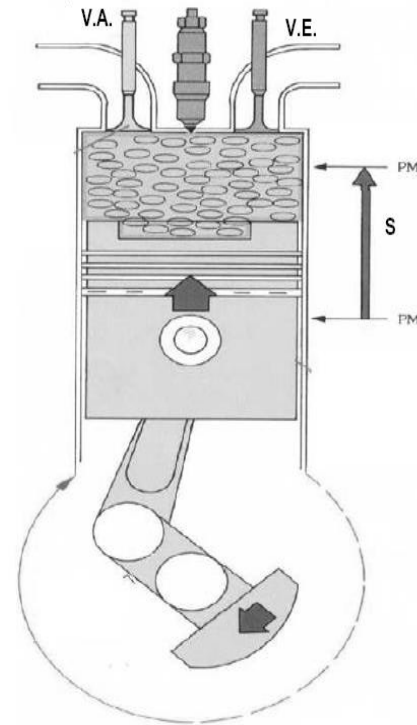
#### Admissão:

Somente de ar é admitido



#### Compressão:

Somente ar é comprimido até ocorrer a injeção de combustível próximo ao PMS



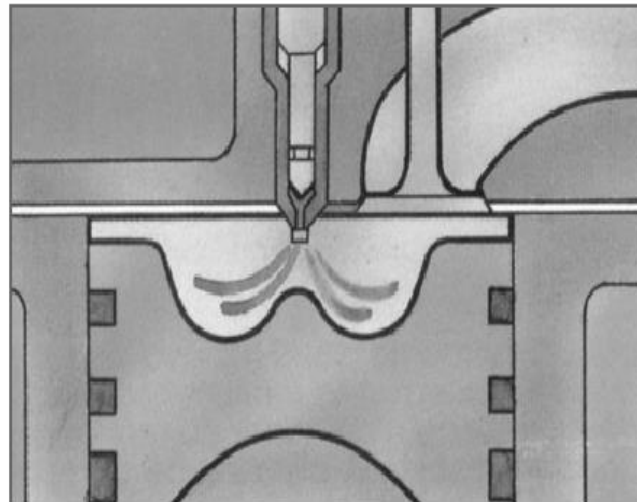


## Motores de ignição por compressão

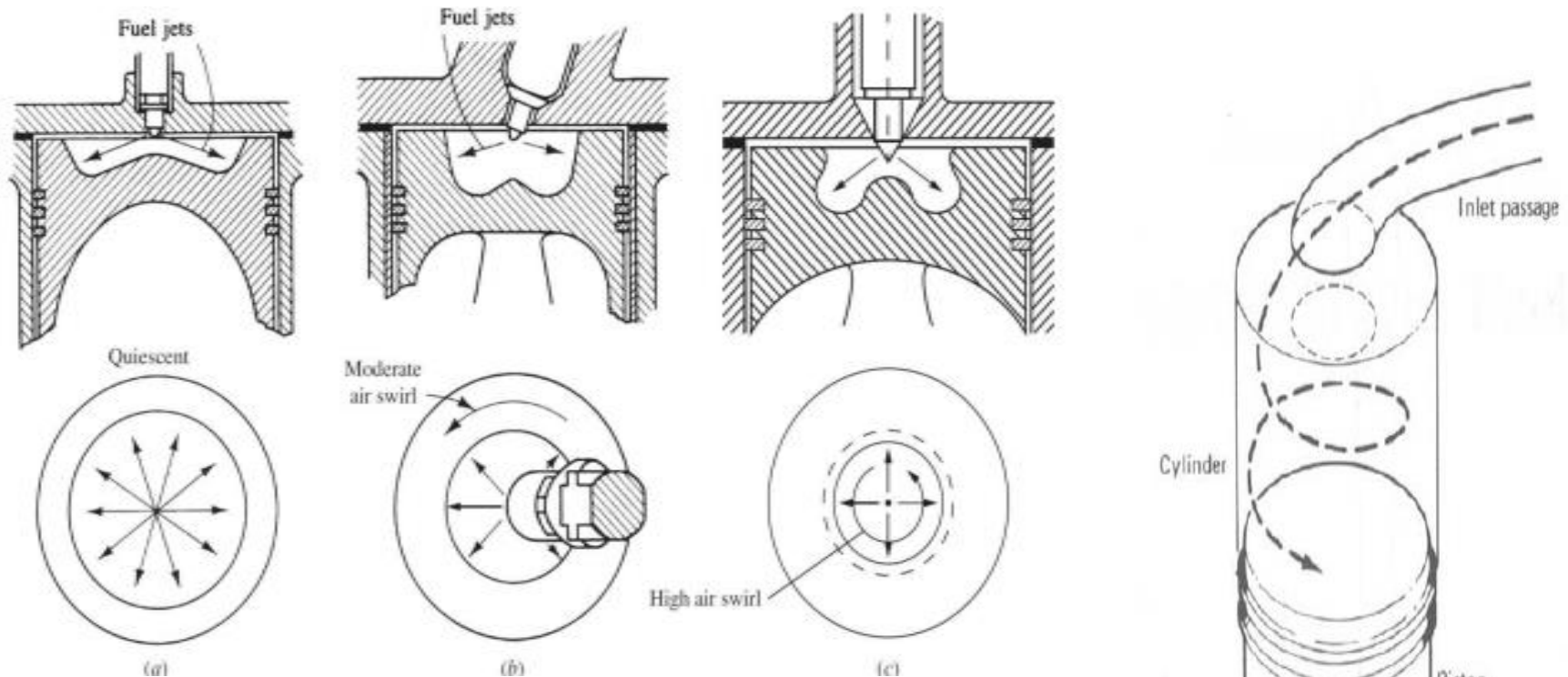
### Câmaras de combustão:

Câmaras de Injeção Diretas ou Abertas

- são construídas na cabeça do pistão
- turbulência usam: { squish  
swirl



## Motores de ignição por compressão

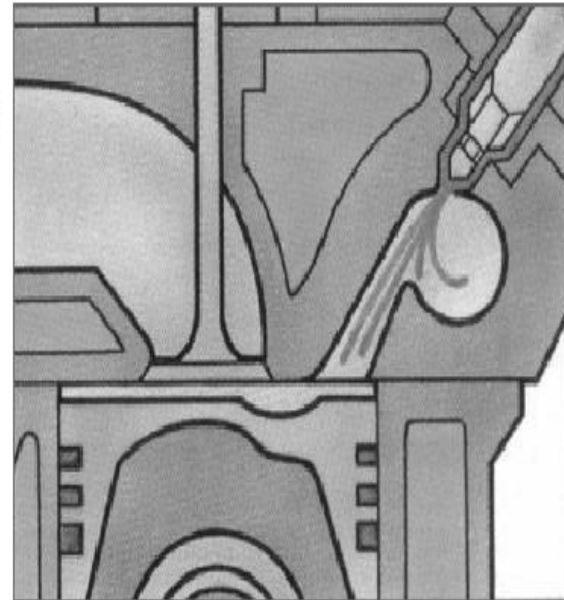


**Figure 10.1** Common types of direct-injection diesel engine combustion systems: (a) quiescent chamber with multi-hole nozzle typical of larger engines; (b) bowl-in-piston chamber with moderate swirl and multi-hole nozzle; (c) re-entrant bowl-in-piston chamber with high swirl and multi-hole nozzle: (b) and (c) are used in medium and smaller DI engine size ranges, respectively.

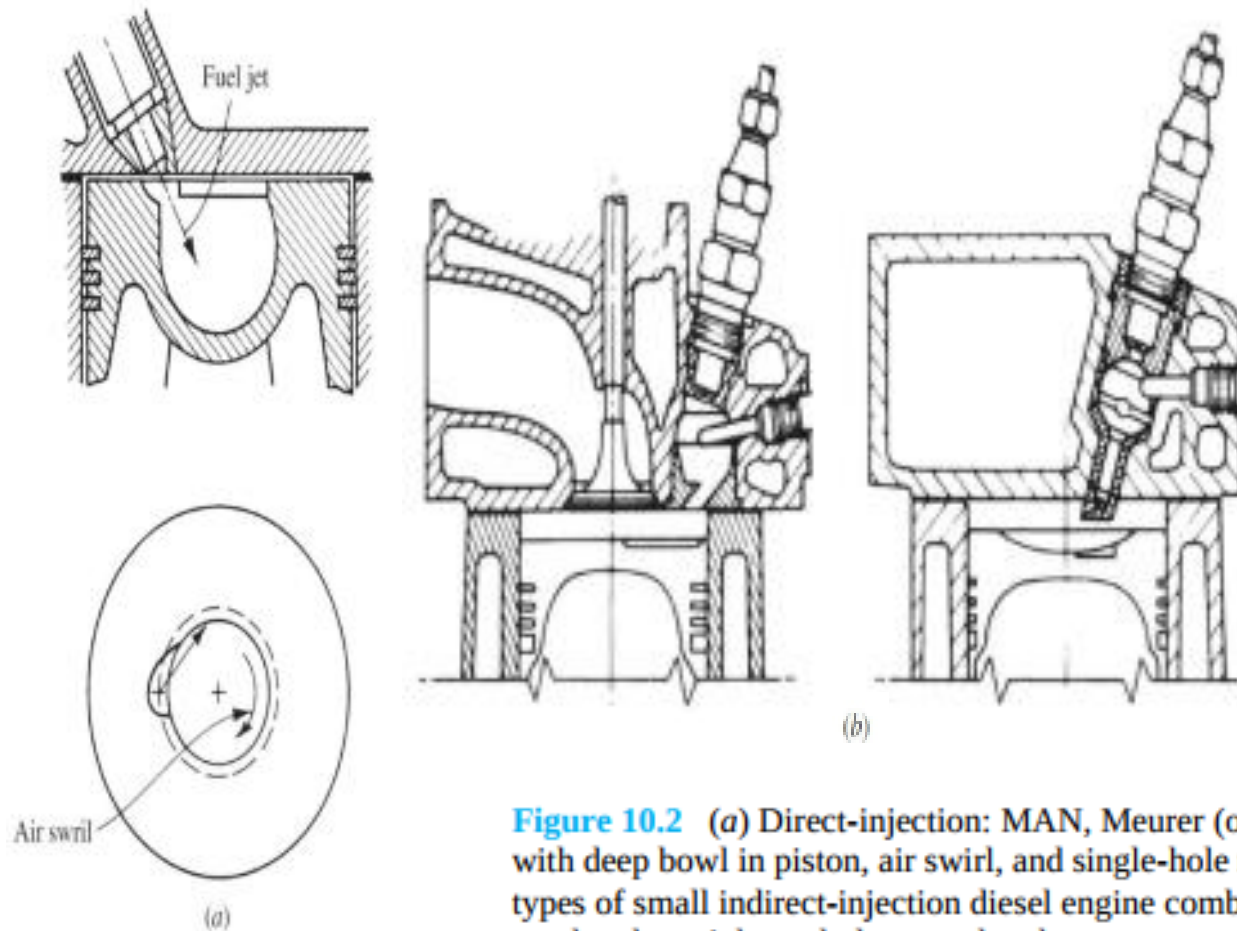
## Motores de ignição por compressão

### Câmaras de combustão (de injeção indireta ou dividida):

- são construídas no cabeçote
- objetivo é produzir turbulências intensas
- turbulências maiores que nas câmaras diretas
- reduzem o retardamento químico
- produzem uma combustão mais suave
- promovem maior perda de calor
- redução no rendimento térmico



## Motores de ignição por compressão



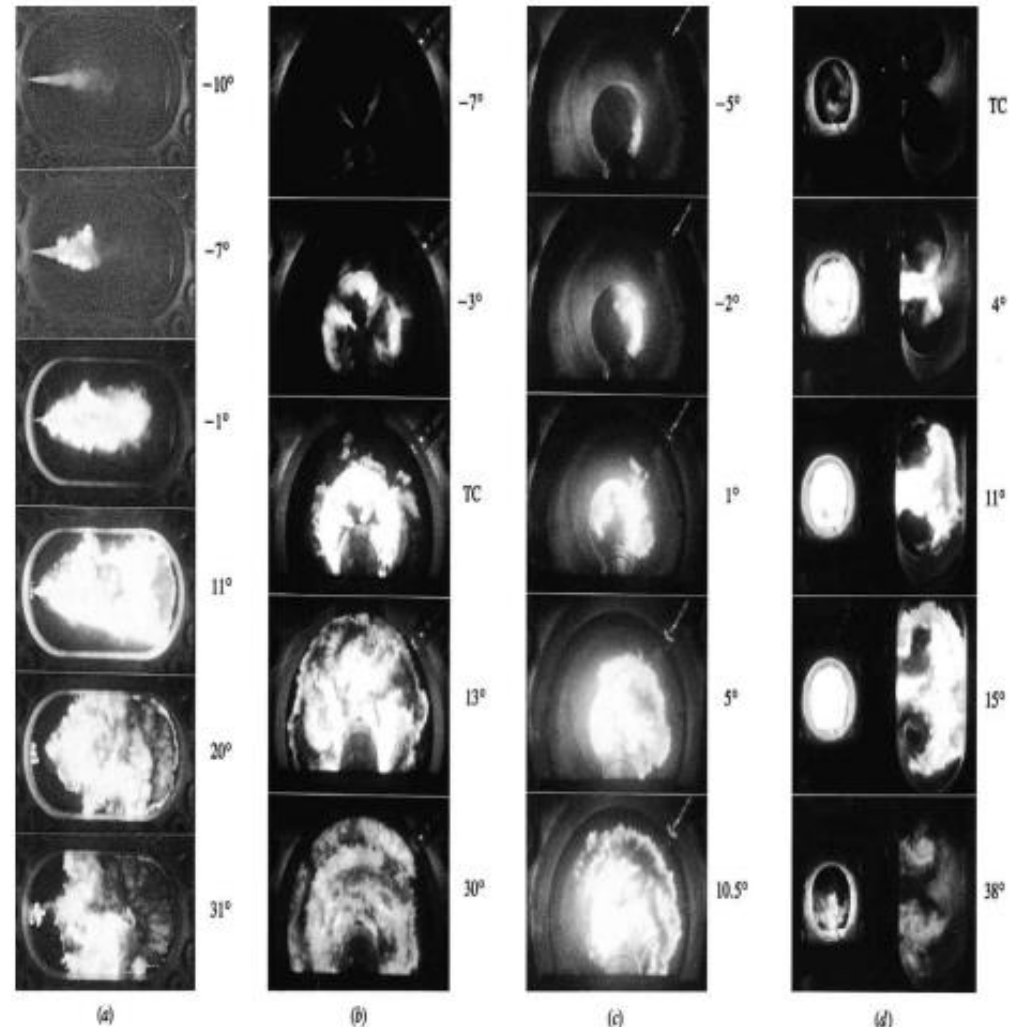
**Figure 10.2** (a) Direct-injection: MAN, Meurer (or M) combustion system with deep bowl in piston, air swirl, and single-hole nozzle. (b) Two common types of small indirect-injection diesel engine combustion systems: left, swirl prechamber; right, turbulent prechamber.

## Características de sistemas de combustão Diesel

System	Direct injection systems				Other combustion chambers	
	Quiescent multi-spray	Medium swirl multi-spray	High swirl multi-spray	High swirl "M"	Swirl chamber	Prechamber
Size	Largest	Medium	Smallest	Medium	Smallest	Smallest
Cycle	2-/4-stroke	4-stroke	4-stroke	4-stroke	4-stroke	4-stroke
TC/S/NA*	TC/S	TC/NA	NA/TC	TC/NA	NA/TC	NA/TC
Maximum speed, rev/min	120-2100	1800-3500	2500	4000-4500	3600-5000	4500
Bore, mm	900-150	150-100	100-75	130-100	95-70	95-70
Stroke/bore	3.5-1.2	1.3-1.0	1.1-0.9	1.2-0.9	1.1-0.9	1.1-0.9
Compression ratio	12-15	15-17	18-22	16-18	20-24	22-24
Chamber	Open or shallow dish	Bowl-in-piston	Re-entrant deep bowl-in-piston	Deep bowl-in-piston	Swirl pre-chamber	Single/multi-orifice prechamber
Air-flow pattern	Quiescent	Medium swirl	Highest swirl	High swirl	Very high swirl in prechamber	Very highly turbulent in prechamber
Number of nozzle holes	Multi 6-10	Multi 4-8	Multi 4	Single	Single	Single
Injection pressure	Very high	High	High	Medium	Lowest	Lowest

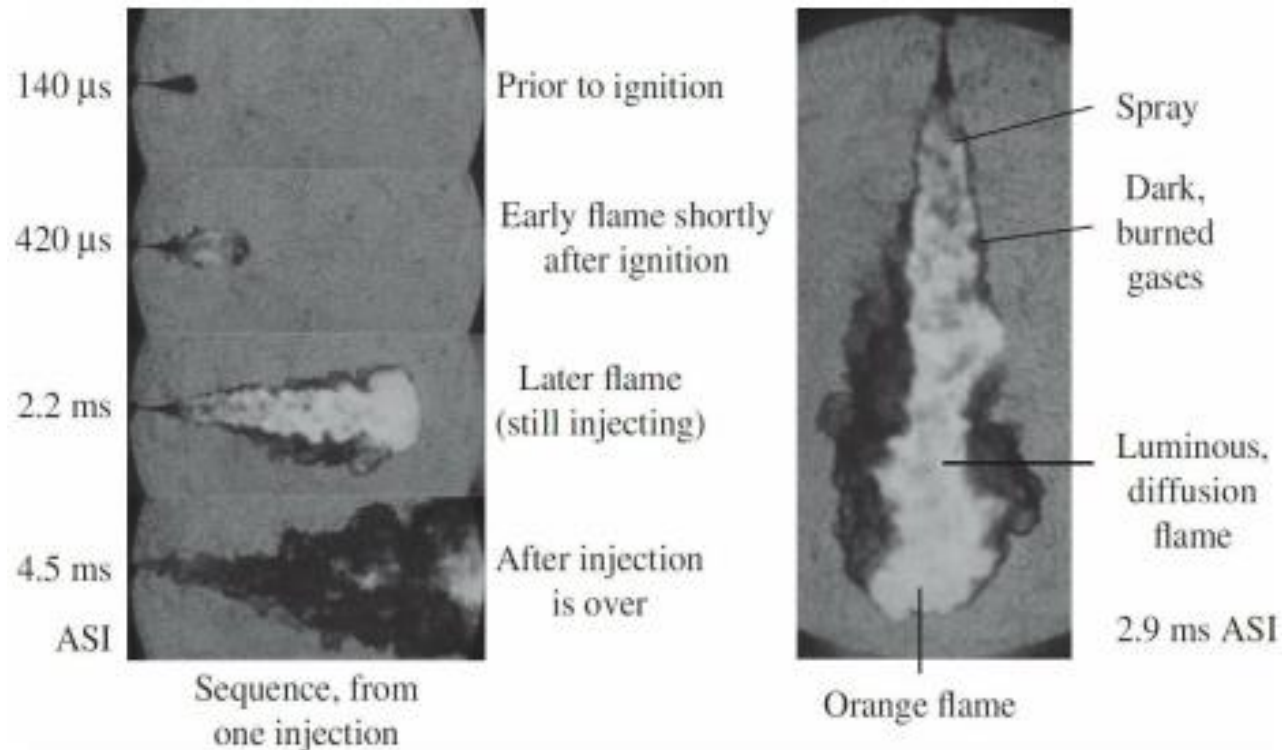
\*Turbocharged/supercharged/naturally-aspirated.

## Combustão



**Figure 10.4** Sequence of photographs (originally in color) from high-speed movies taken in the special visualization diesel engines shown in Fig. 10.3: (a) combustion of single spray burning under large DI engine conditions; (b) combustion of four sprays in DI engine with counterclockwise swirl; (c) combustion of single spray in M.A.N. "M" DI diesel; (d) combustion in prechamber (on left) and main chamber (on right) in Ricardo Comet IDI swirl chamber diesel. 1250 rev/min, imep = 827 kPa (120 lb/in.)<sup>1, 2</sup> (Courtesy: Ricardo Consulting Engineers.)

## Combustão



**Figure 10.5** Shadowgraph and flame radiation emission images of combustion of a single diesel spray in a constant volume combustion facility at typical diesel engine charge conditions at TC. Sequence of four images: spray prior to ignition, early spray and diffusion flame, later spray and flame, spray and flame after injection has ended. Separate image on right shows hot burned gas (dark) diffusing outward from the diffusion flame. ASI, time after start of fuel injection. (Courtesy: Dr. Dennis Siebers, Sandia National Laboratories.)

## Taxa de liberação de calor (Heat release rate)

1ª Lei para o sistema:

$$\frac{dQ}{dt} - p \frac{dV}{dt} + \sum_i \dot{m}_i h_i = \frac{dU}{dt}$$

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{dQ_{ch}}{dt} - \frac{dQ_{ht}}{dt} = p \frac{dV}{dt} + \frac{dU_s}{dt}$$

$$\frac{dQ_n}{dt} = p \frac{dV}{dt} + mc_v \frac{dT}{dt}$$

Da equação de estado de gás ideal:

$$\frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} = \frac{dT}{T}$$



## Taxa de liberação de calor (Heat release rate)

Eliminando T:

$$\frac{dQ_n}{dt} = \left(1 + \frac{c_v}{R}\right) p \frac{dV}{dt} + \frac{c_v}{R} V \frac{dp}{dt}$$

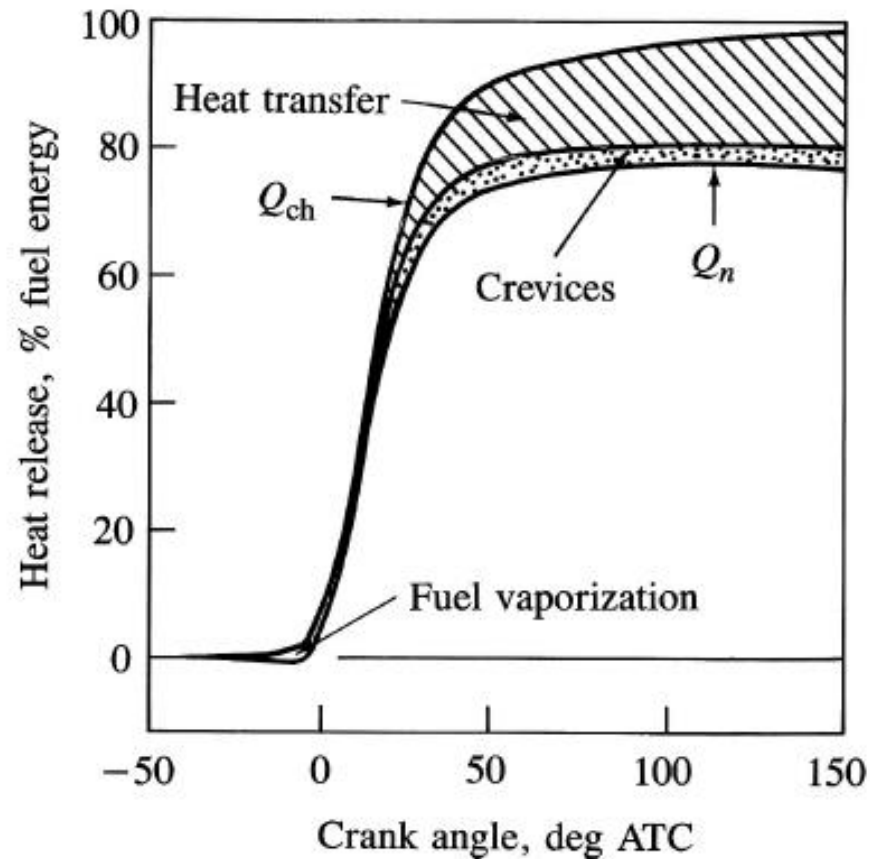
Ou:

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} p \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma - 1} V \frac{dp}{dt}$$

A integral a taxa de calor liberado deve ser aproximadamente igual a energia vinda do combustível, portanto:

$$Q_{ch} = \int_{t_{start}}^{t_{end}} \frac{dQ_{ch}}{dt} dt = m_f Q_{LVH}$$

## Taxa de liberação de calor (Heat release rate)

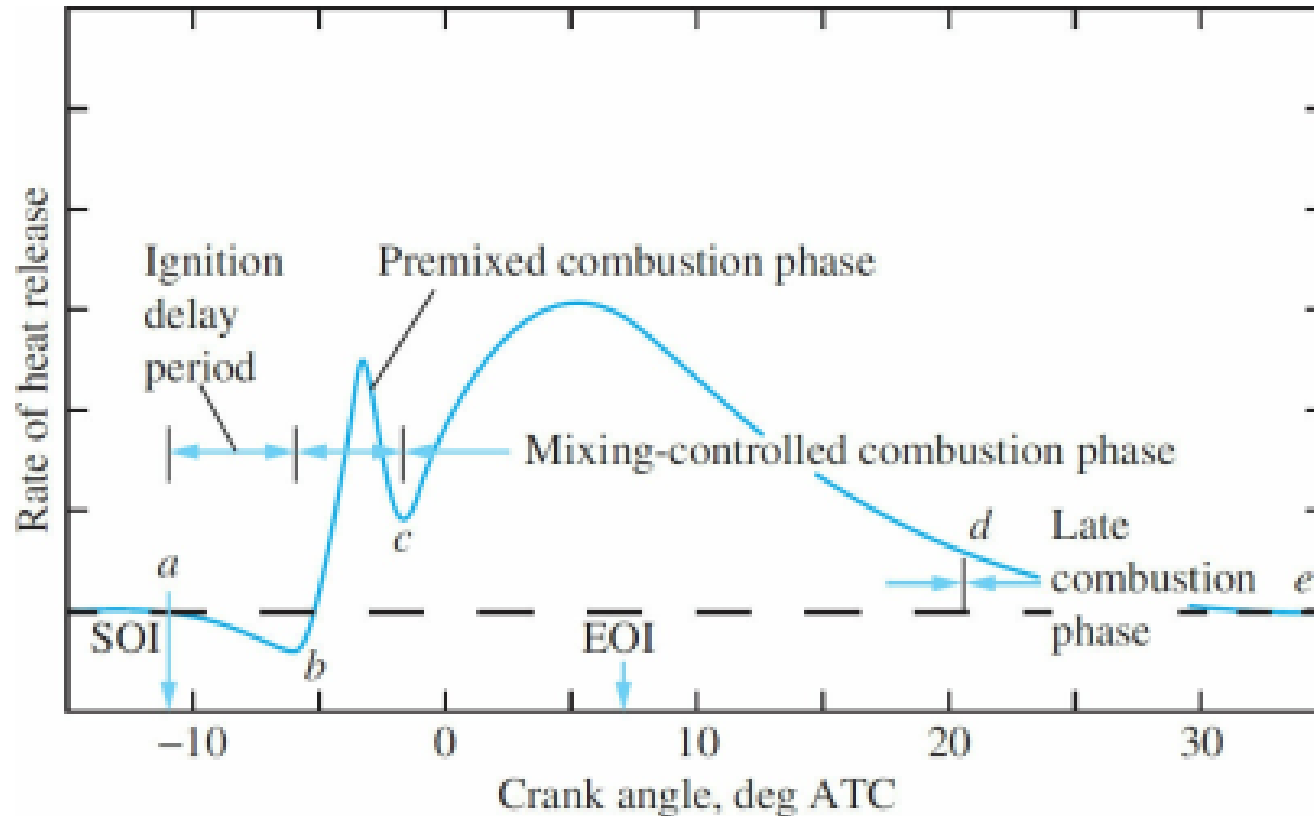


## Taxa de liberação de calor (Heat release rate)

Se as energias internas do ar, combustível e gases queimados da equação oriunda da 1ª Lei são avaliadas com relação a dados experimentais consistentes, então pode-se utilizar essa formulação para obter uma taxa de massa de queima do combustível a partir da curva de pressão do cilindro em função do ângulo do virabrequim. Segundo Krieger e Borman, escreve-se:

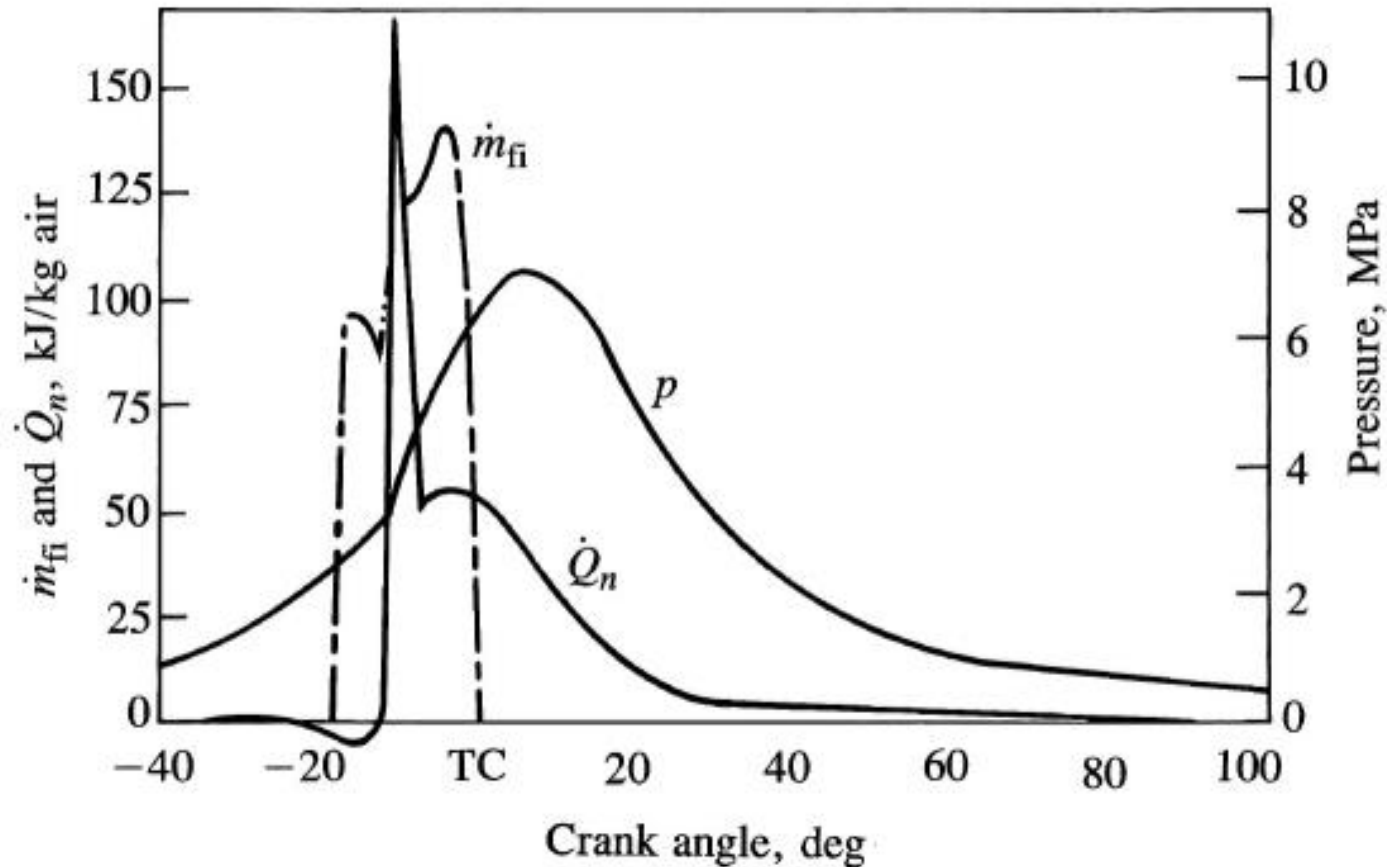
$$\frac{d}{dt}(mu) = p \frac{dV}{dt} + \frac{dQ}{dt} + h_f \frac{dm}{dt}$$

## Taxa de liberação de calor (Heat release rate)

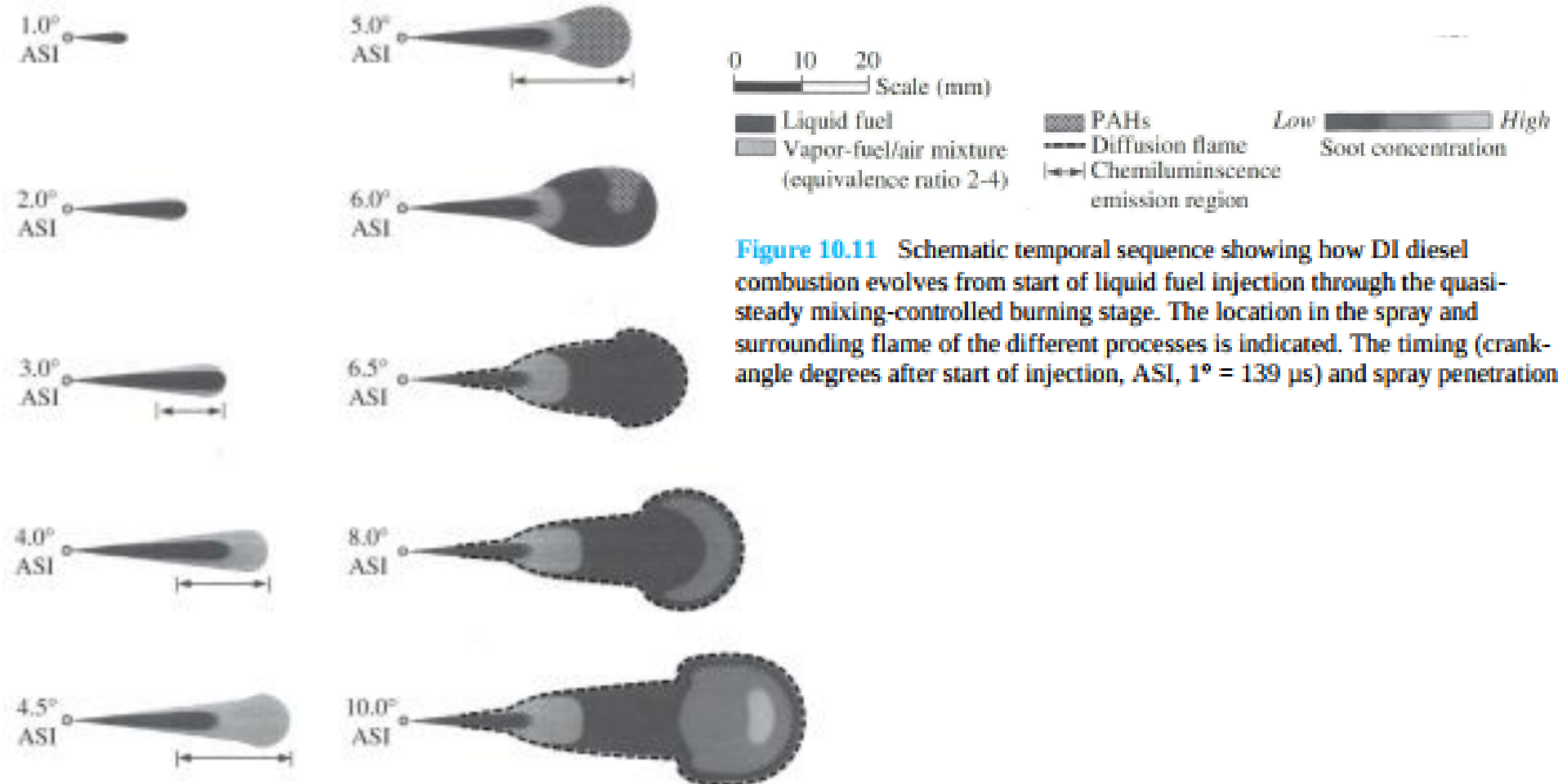


**Figure 10.8** Typical DI engine heat-release-rate diagram identifying the different phases of the diesel combustion process.

## Evolução da combustão a partir do início da injeção

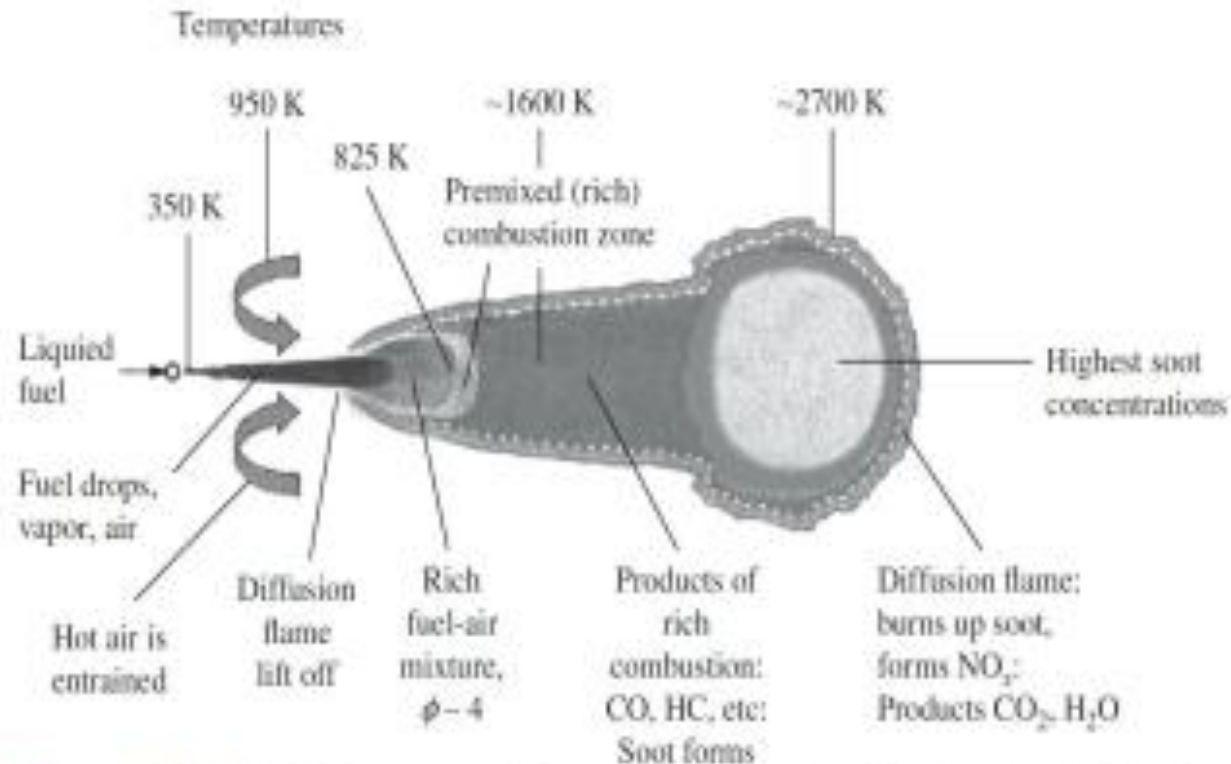


## Evolução da combustão a partir do início da injeção



**Figure 10.11** Schematic temporal sequence showing how DI diesel combustion evolves from start of liquid fuel injection through the quasi-steady mixing-controlled burning stage. The location in the spray and surrounding flame of the different processes is indicated. The timing (crank-angle degrees after start of injection, ASI,  $1^\circ = 139 \mu\text{s}$ ) and spray penetration

## Evolução da combustão a partir do início da injeção



**Figure 10.13** Key features, and gas temperature distribution, in a DI diesel fuel spray: injection, atomization, air entrainment, premixed-combustion process, soot formation region, diffusion-flame location, and lift-off distance from nozzle orifice. (Developed from Ref. 11.)