


---

# MOTORES TÉRMICOS

AULA 22-23 – MCI: COMBUSTÃO EM MOTORES ALTERNATIVOS

---

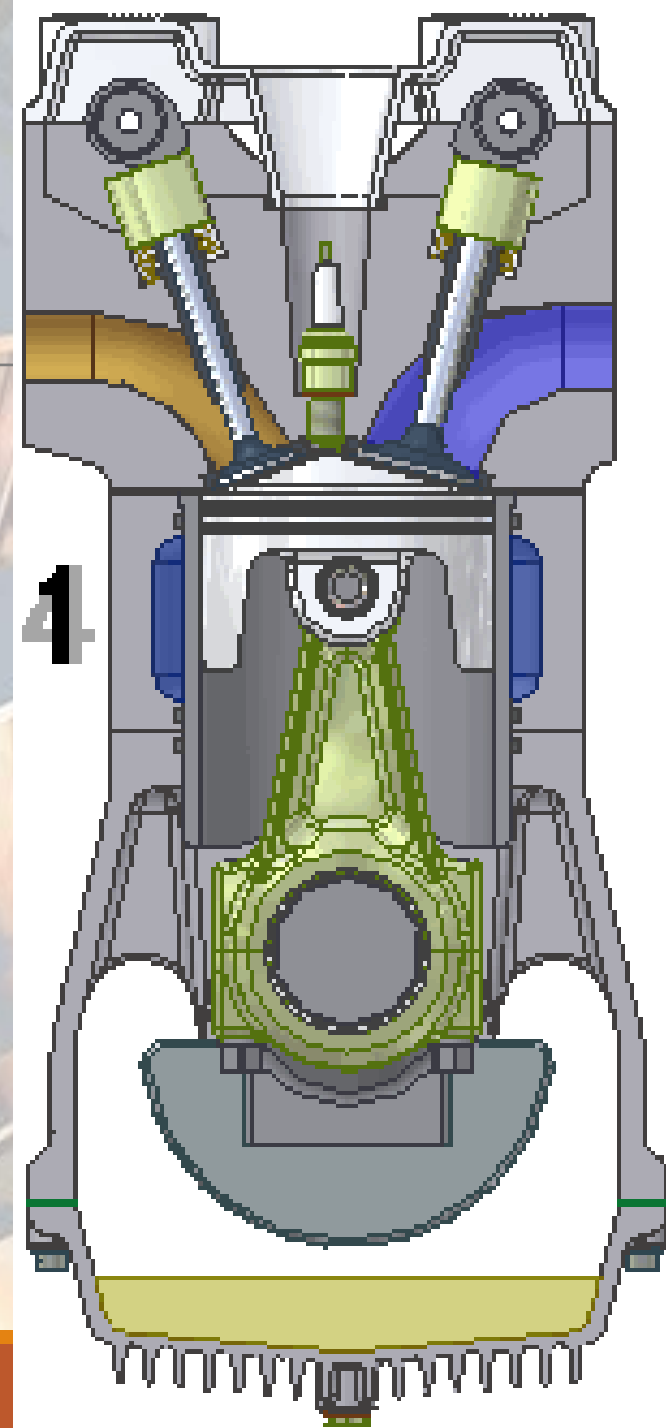
PROF.: KAIO DUTRA



# Combustão em MIF

## Combustão Normal

- Nesses tipos de motores, a **mistura é comprimida** e durante esse processo promove-se a vaporização e homogeneização do combustível com o ar.
- Quando o pistão aproxima-se do **PMS**, ocorre uma **faísca** entre os eletrodos da vela.





# Combustão em MIF

## Combustão Normal

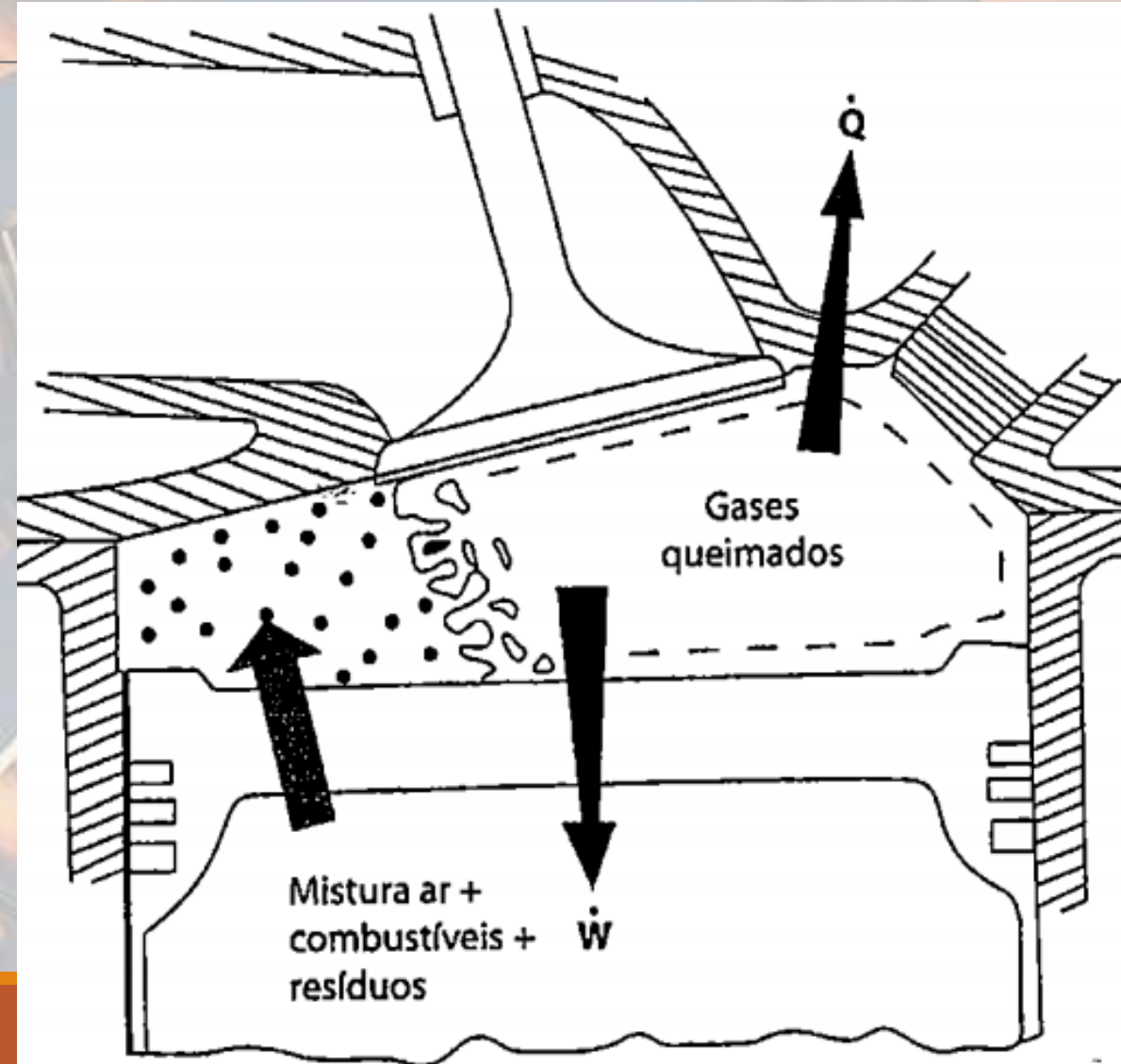
- A partir desse **núcleo inicial**, a combustão vai se propagando e, quando os compostos preliminares atingem certa concentração, a **liberação de calor** já é suficiente intensa para provocar **reações de oxigenação em cadeia**, isto é, a **propagação da chama**.
- Por essa explicação nota-se que a combustão no cilindro apresenta uma primeira fase, durante a qual **não se registra aumento na pressão**. Essa fase, necessária ao desenvolvimento de reações preliminares junto à vela, denomina-se “retardamento químico da combustão” ou “**atraso de ignição**”.



# Combustão em MIF

## Combustão Normal

- Uma vez ocorrido o retardamento, a **combustão propaga-se** na câmara por meio de uma **frente de chama**, deixando para trás gases queimados e tendo à frente mistura ainda não queimada.

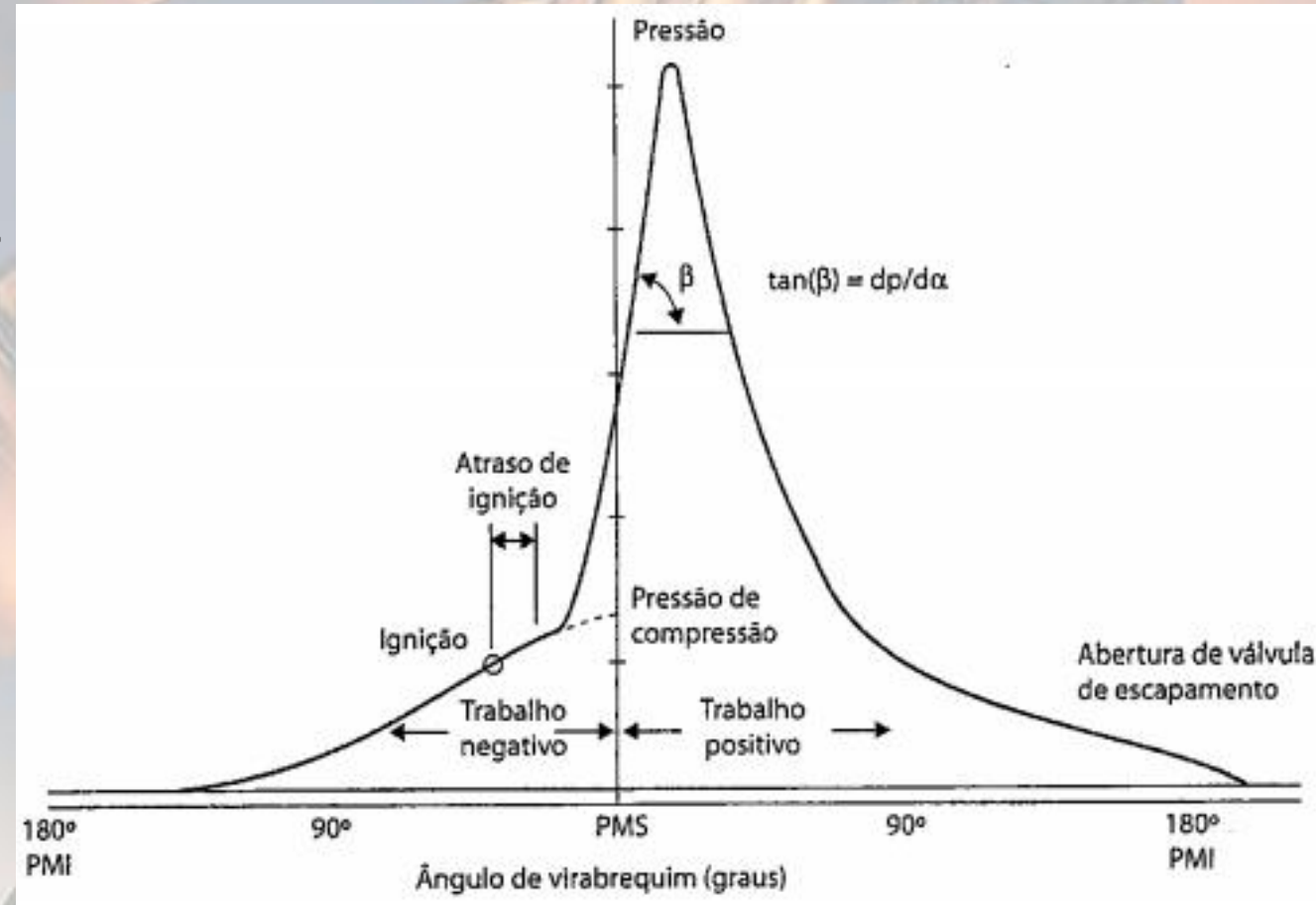




# Combustão em MIF

## Combustão Normal

- A fim de se minimizar trabalho negativo, é desejável que a máxima pressão provocada pela combustão venha a acontecer quando o pistão se encontra no tempo de expansão, **ainda muito próximo do PMS**.
- Como exemplo, a velocidade laminar de frente de chama de uma mistura ar-gasolina, a pressão e temperatura iniciais de 1atm e 300K, é de no máximo 35cm/s.



# Combustão em MIF

## Combustão Normal

- Os fatores que **influenciam** de maneira importante na velocidade de **propagação da chama** são:
  - **Turbulência:** Aumenta a área efetiva da frente de chama por meio do efeito de “enrugamento”, o que promove um maior contato entre as partículas em combustão e as que devem reagir na frente de chama, acelerando a reação.
  - **Temperatura e Pressão:** Temperatura mais alta também ocasionam aumento na velocidade laminar de frente de chama, o que acarreta maiores velocidades de queima.





# Combustão em MIF

## Combustão Normal

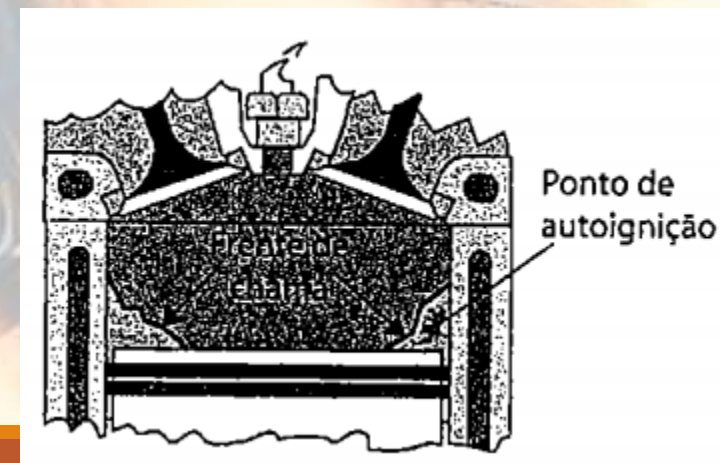
- Os fatores que **influenciam** de maneira importante na velocidade de **propagação da chama** são:
  - **Relação combustível-ar:** As misturas levemente ricas (em até 10% acima do valor estequiométrico) provocam uma maior velocidade de propagação da frente de chama, pois é nesta região em que se encontram os picos de velocidades laminares de frentes de chama.
  - **Presença de gases residuais:** Tende a desacelerar a combustão, pois acarreta redução na velocidade laminar de frente de chama. O avanço da chama normal provoca o aumento da pressão e temperatura da mistura ainda não queimada. Esta poderá, em alguns pontos, atingir a temperatura de auto-ignição do combustível.



# Combustão em MIF

## Combustão Normal

- A **auto-ignição**, quando de uma pequena quantidade de mistura e, portanto, de **pequena intensidade**, auxilia a combustão normal na realização de oxidação, **reduzindo o tempo** do processo.
- Quando a auto-ignição atinge uma **intensidade muito elevada** denomina-se **detonação** e o seu efeito maléfico no motor faz com que seja evitada.

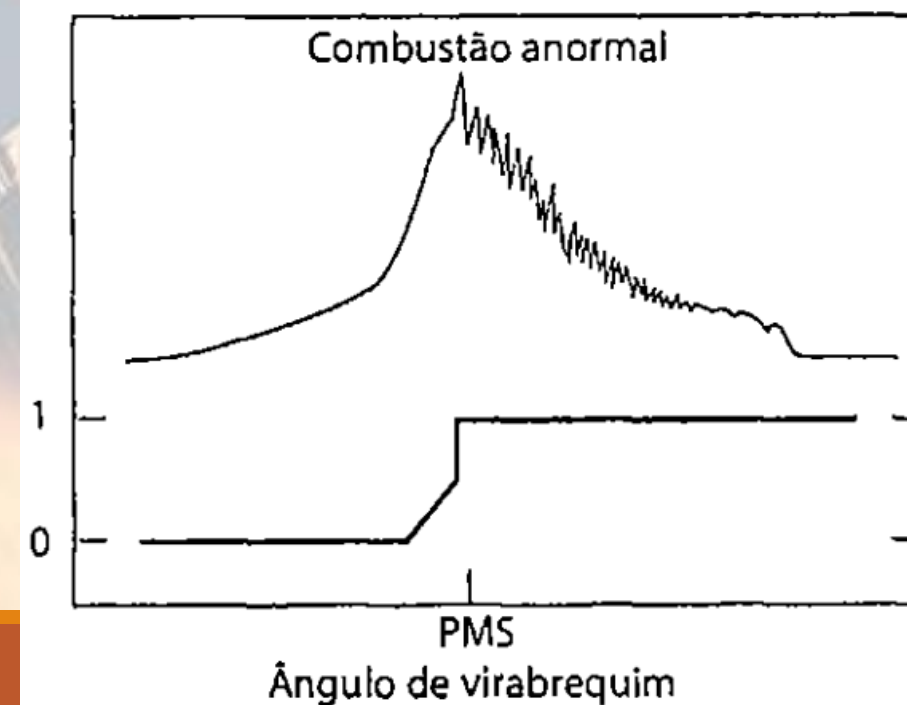
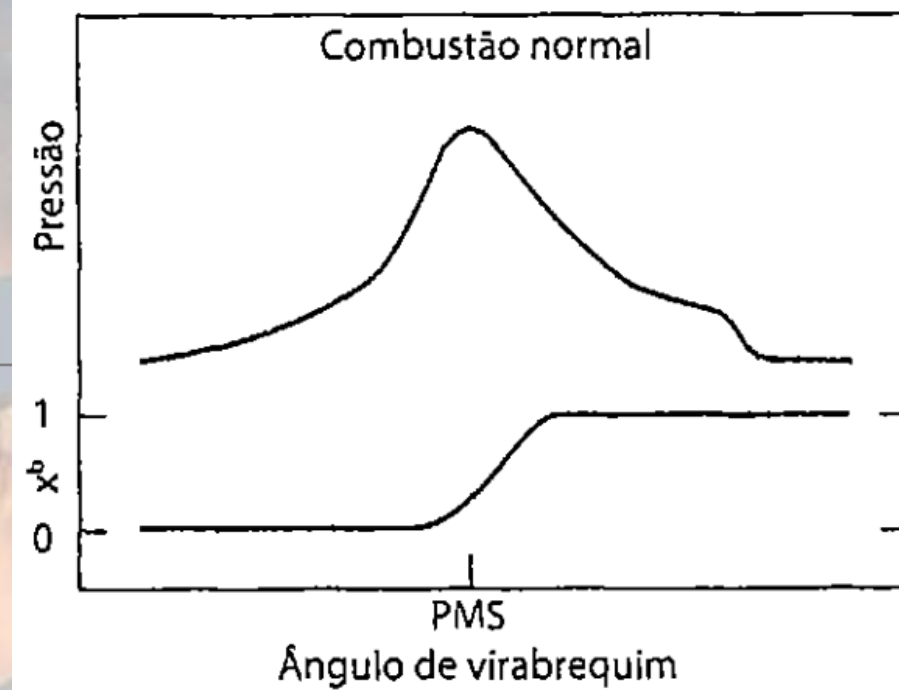




# Combustão em MIF

## Detonação no MIF

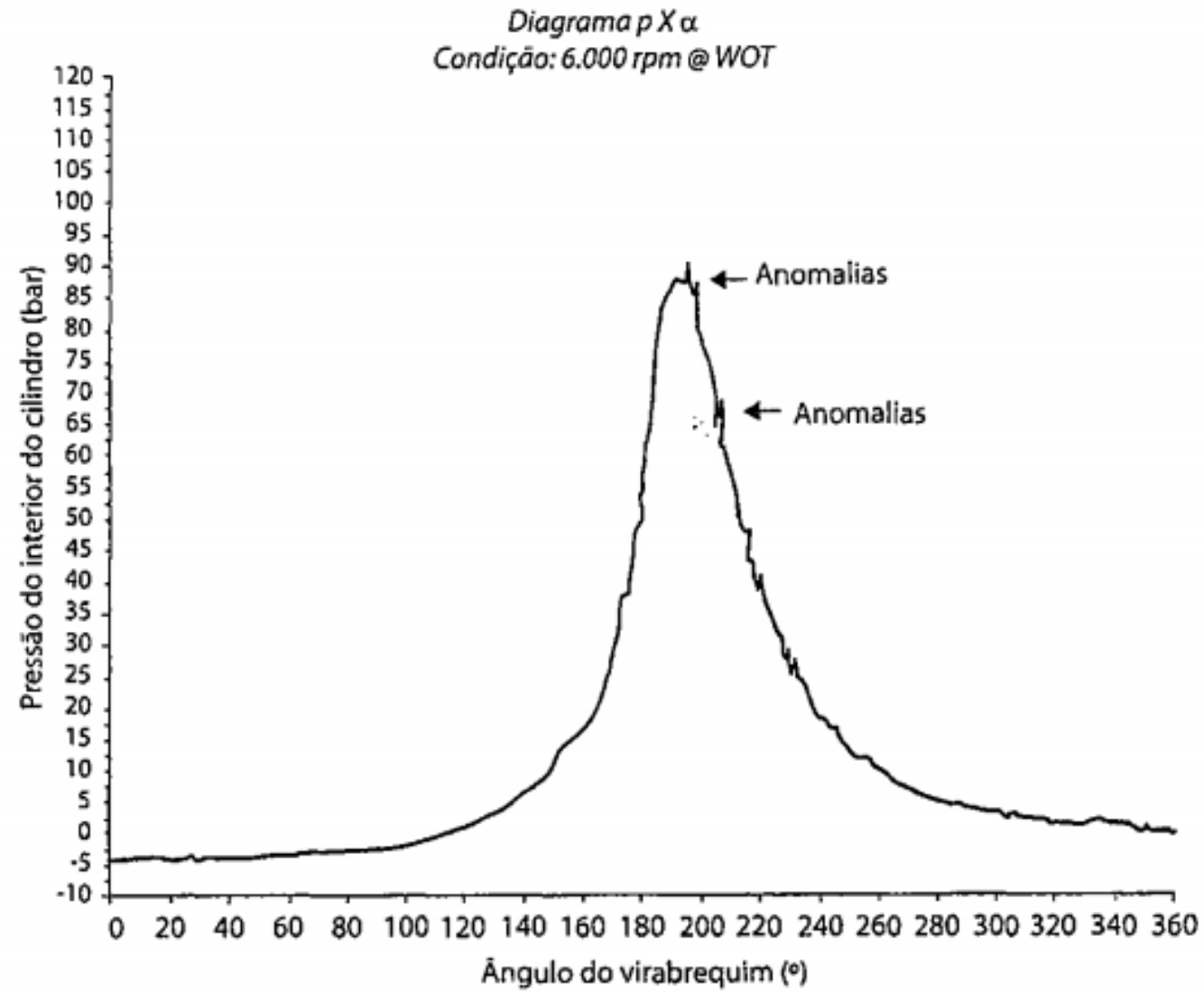
- Se a chama principal varrer a mistura antes que as condições locais de temperatura e pressão promovam a auto-ignição, então a combustão será normal. Em caso contrário, essa porção de mistura irá entrar em **combustão repentinamente**, a volume constante, provocando um aumento muito brusco de pressão, com a consequente propagação de ondas de choque.



# Combustão em MIF

## Detonação no MIF

- Esse fenômeno denomina-se **detonação** e provoca um aumento local das tensões, bem como um ruído característico conhecido popularmente por “**batida de pino**”.





# Combustão em MIF

## Detonação no MIF

- **Detonações** seguidas irão provocar o aparecimento de pontos incandescentes na câmara como, por exemplo, nos eletrodos da vela, em locais carbonizados, nas válvulas de escapamento ou em outros.
- Esses pontos poderão provocar a **ignição da mistura** antes do salto da faísca em ciclos subsequentes, causando um crescimento da pressão antes do pistão atingir o PMS. Este fenômeno muito perigoso denomina-se **pré-ignição**.



# Combustão em MIF

## Detonação no MIF

- Em resumo, a pré-ignição pode ser causa ou consequência da detonação. Muitas vezes, os efeitos de um fenômeno realimentam o outro, mas ambos devem ser evitados pelos seus efeitos normalmente catastróficos aos motores.





# Combustão em MIF

## Detonação no MIF

- Entre os fatores que **influenciam na detonação** nos motores Otto, destacam-se:
  - **Qualidade antidetonante do combustível:** Pelo exposto, os combustíveis adequados à motores Otto devem ter uma elevada temperatura de auto-ignição. A Octanagem ou NO (número de octanas) é a grandeza que representa a resistência da mistura do combustível com o ar à auto-ignição, responsável pela detonação. O aumento de NO permite o dimensionamento de câmaras com maior taxa de compressão o que gera maior eficiência térmica no motor.



# Combustão em MIF

## Detonação no MIF

- Entre os fatores que **influenciam na detonação** nos motores Otto, destacam-se:
  - **Temperatura da Mistura na Câmara:** Quanto menor, menos provável a ocorrência de detonação. Influem na temperatura:
    - A taxa de compressão;
    - A temperatura da mistura na admissão;
    - A temperatura das paredes, em função do arrefecimento do motor.





# Combustão em MIF

## Detonação no MIF

- Entre os fatores que **influenciam na detonação** nos motores Otto, destacam-se:
  - **Pressão da mistura na câmara:** Quanto menor, menos provável a ocorrência de detonação. Influem na pressão:
    - A taxa de compressão;
    - A pressão da mistura na admissão que depende da pressão do ambiente, da abertura da borboleta aceleradora e da existência de sobre-alimentação.



# Combustão em MIF

## Detonação no MIF

- Entre os fatores que **influenciam na detonação** nos motores Otto, destacam-se:
  - **Avanço da faísca:** Quanto mais avançada, mais provável a ocorrência de detonação.
  - **Qualidade da mistura:** Quanto mais próxima da estequiometria, mais provável a detonação.
  - **Turbulência:** Quanto mais intensa, menos provável a detonação, pois reduz a duração da combustão e homogeneiza a mistura e a temperatura da câmara.





# Combustão em MIF

## Câmara de Combustão

- A câmara de combustão, para o bom desempenho dos motores Otto, sem detonação, **deve obedecer a três regras básicas:**
  - Gerar nível adequado de **turbulência** para uma combustão rápida e eficiente;
  - **Ser Compacta;**
  - Ter relação **volume-superfície grande no início** do trajeto da chama e **pequena no fim.**



# Combustão em MIF

## Câmara de Combustão

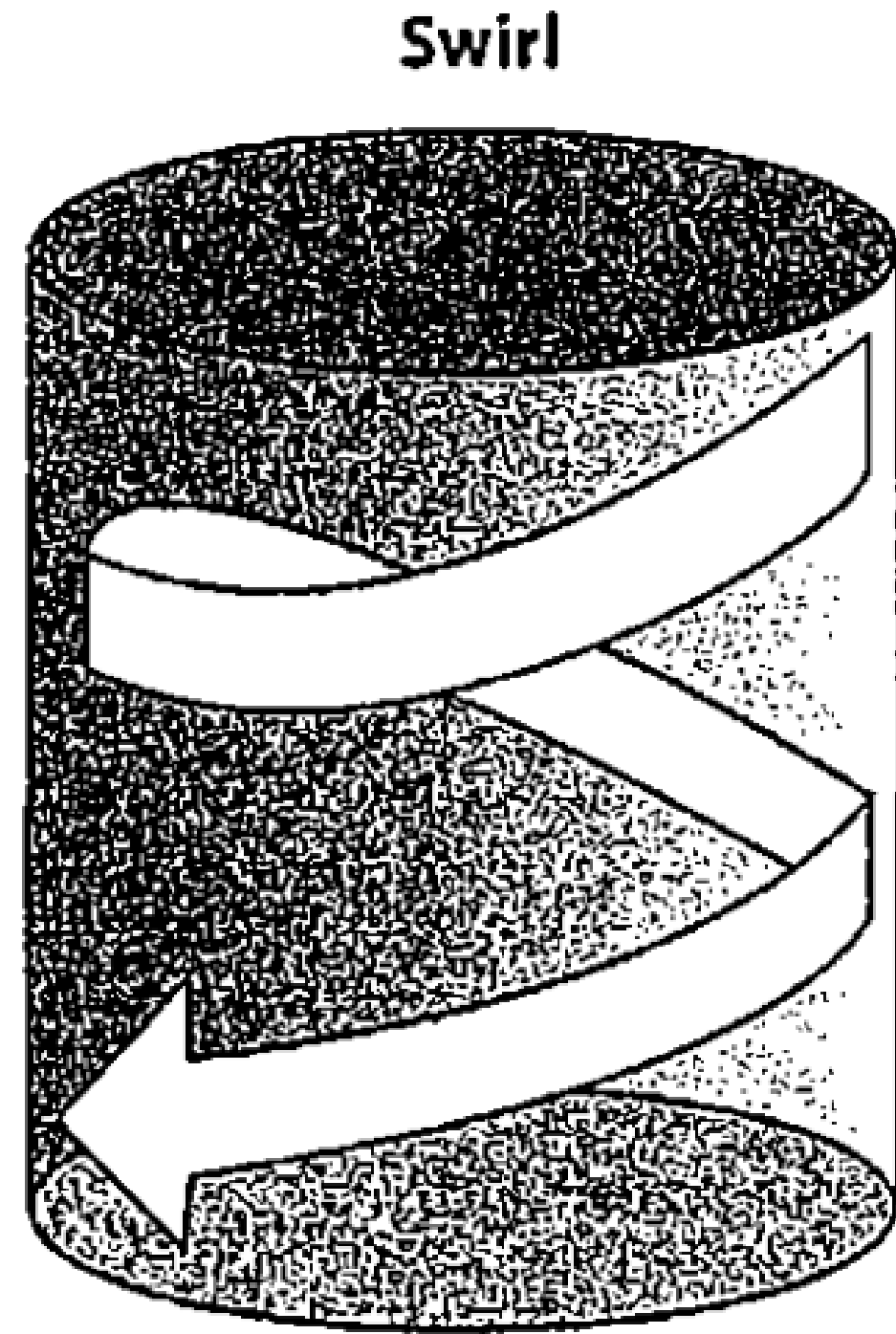
- Gerar nível adequado de turbulência para uma combustão rápida e eficiente: A turbulência pode ser criada ou potencializada por um ou mais **padrões de escoamento** no interior do cilindro.
- São eles:
  - **Swirl;**
  - **Tumble;**
  - **Squish.**





# Combustão em MIF Câmara de Combustão

- **Swirl:** Movimento de corpo rígido do fluxo, ordenado, caracterizado por uma **rotação ao longo do eixo do cilindro**, muito utilizado em MIF. Tende a aumentar a eficiência em carga parcial e **prevenir detonações** em carga plena.

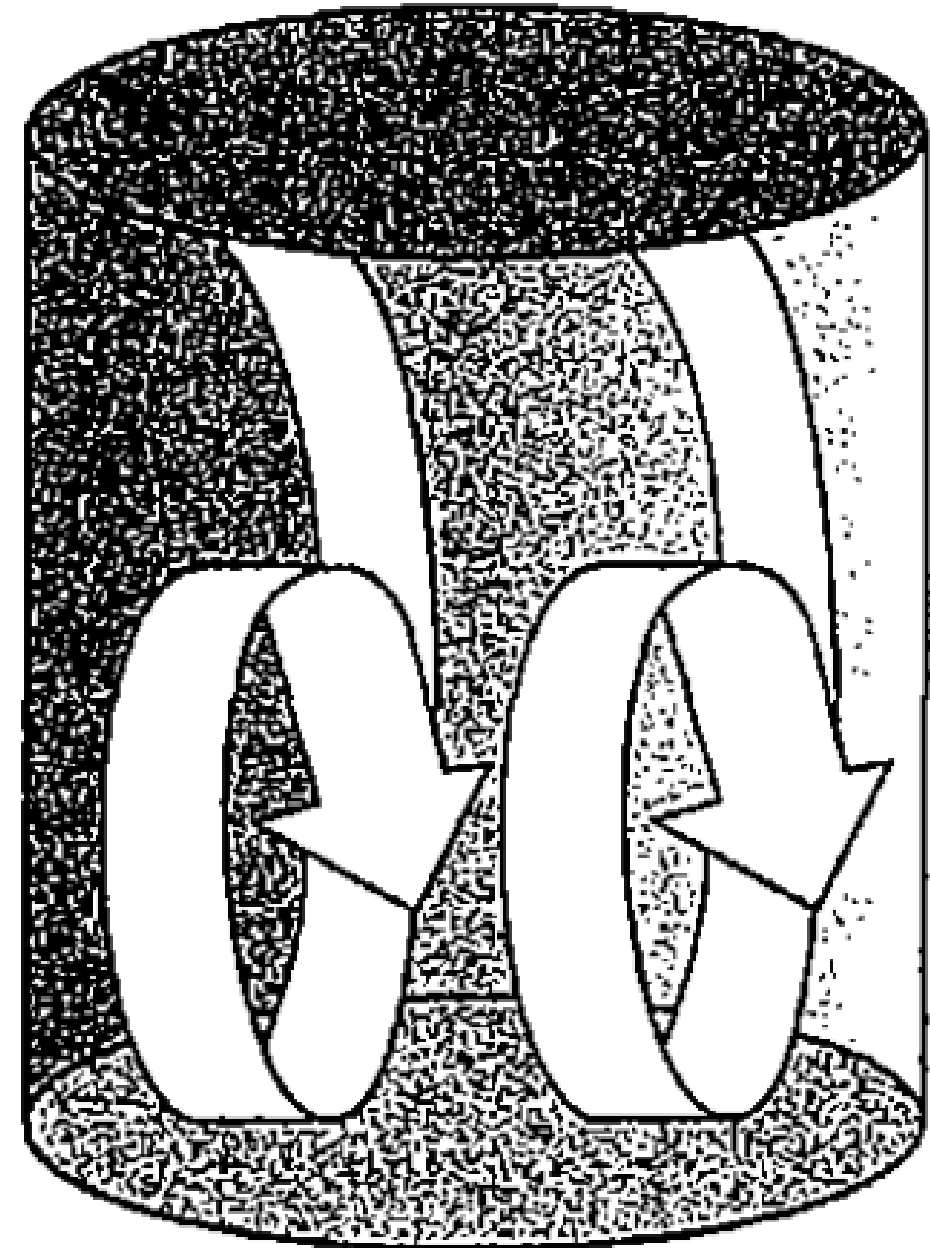


# Combustão em MIF

## Câmara de Combustão

- **Tumble:** Similar ao Swirl, porém com **rotação perpendicular** ao eixo do cilindro, muito utilizado nos motores modernos, de ignição por centelha e em motores de competição.

**Tumble**

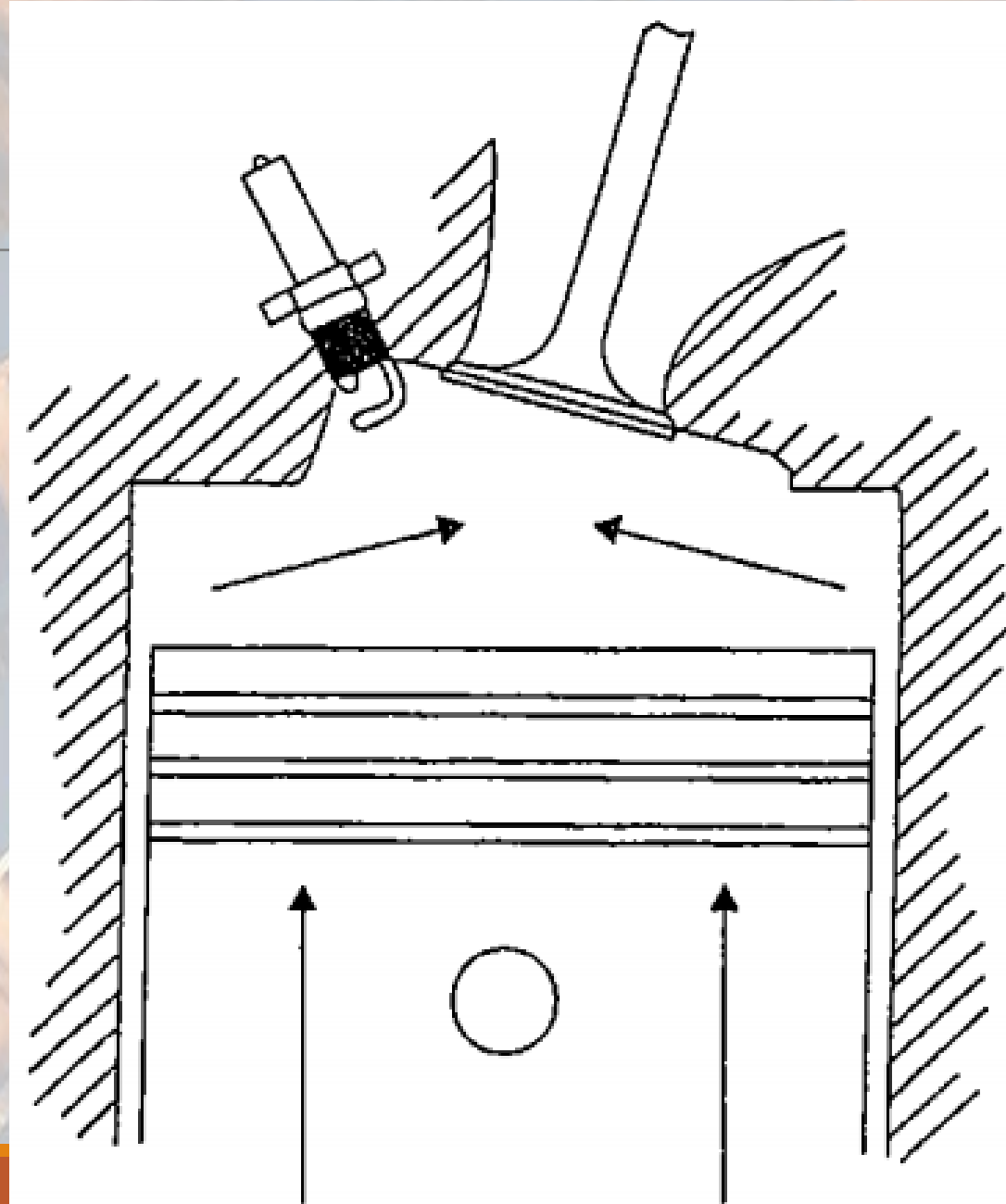




# Combustão em MIF

## Câmara de Combustão

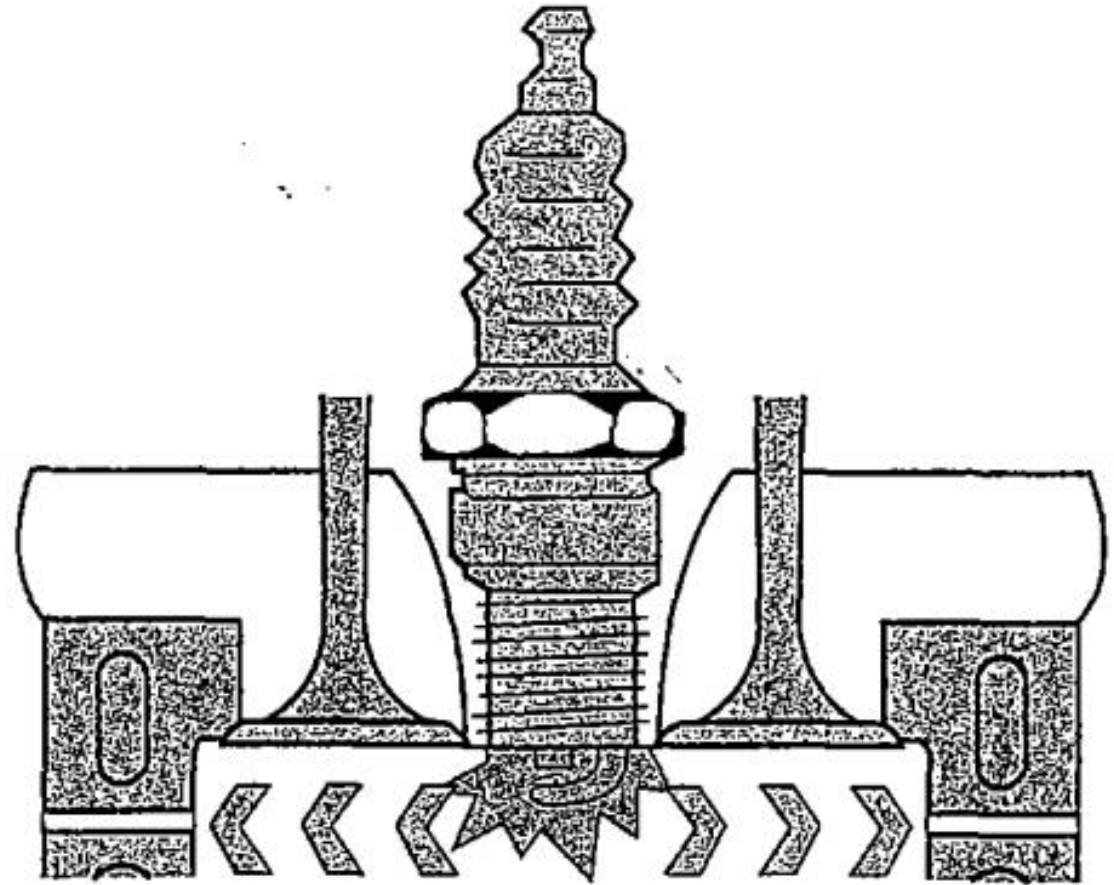
- **Squish:** Jato provocado pelo esmagamento da mistura ao final da compressão, normalmente direcionado para a vela. Aumenta muito a intensidade da **turbulência**, acelerando a combustão. Pode ser gerado pelo fluxo da mistura para o interior de recesso no cabeçote ao no pistão.



# Combustão em MIF

## Câmara de Combustão

- **Ser Compacta:** Essa característica **reduz o caminho** percorrido pela frente de chama, conseqüentemente redução da duração da combustão, reduzindo o tempo de exposição da parte final da mistura ar-combustível aos gases queimados e diminuindo a tendência à ocorrência de detonação. Velas de ignição localizadas no centro do cilindro são ideais para tal.

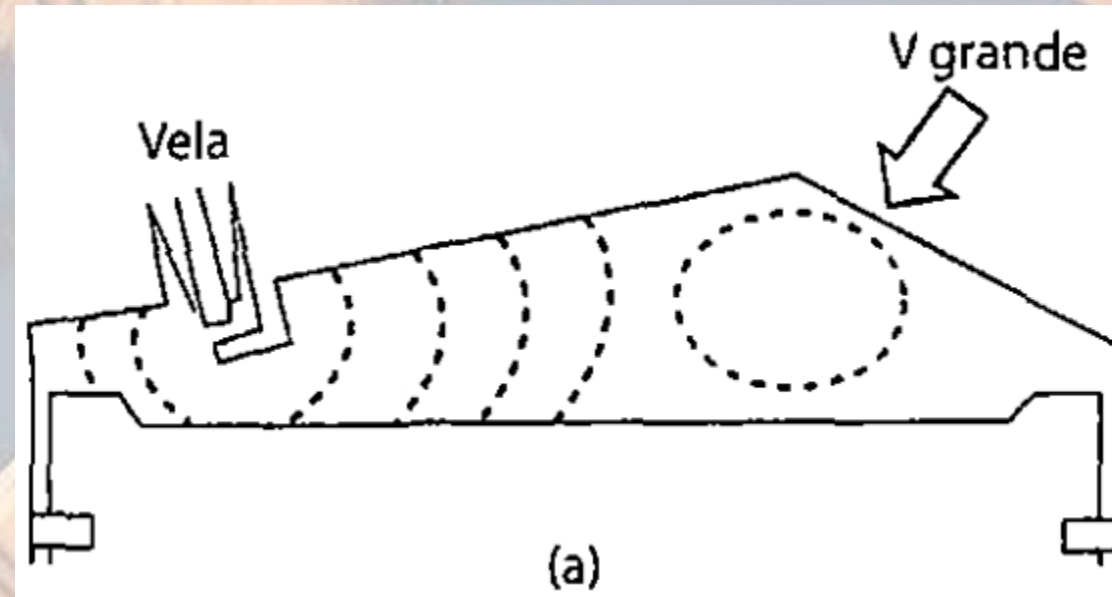




# Combustão em MIF

## Câmara de Combustão

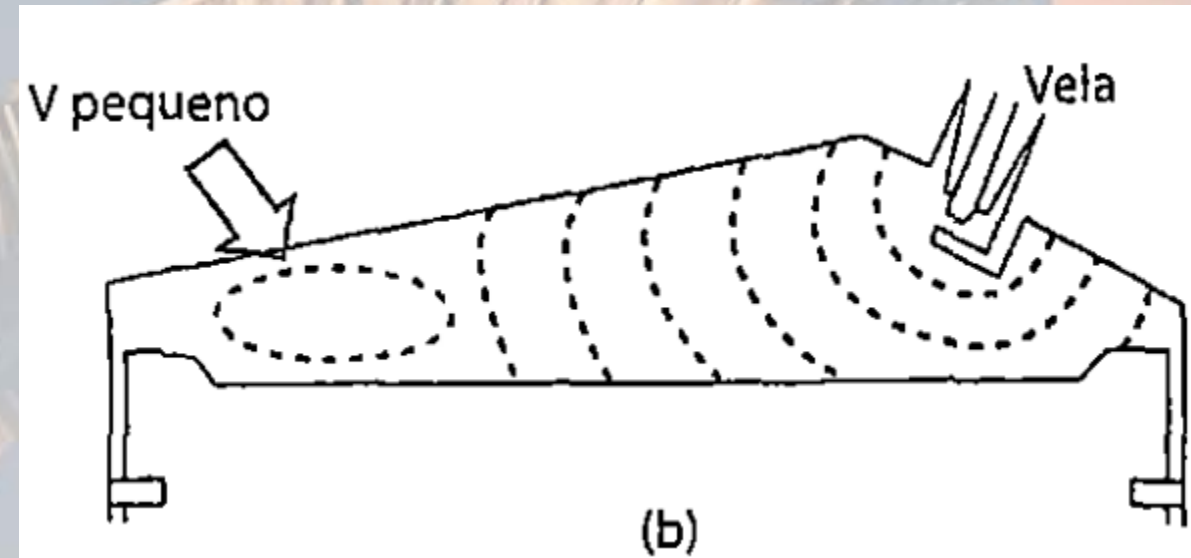
- Ter relação **volume-superfície (V-S) grande no início do trajeto da chama e pequena no fim:**
  - No primeiro exemplo: Na região **próxima à vela de ignição**, uma relação **volume-superfície pequena**, o que **retarda** a propagação da **frente de chama**. Na região mais **afastada da vela** a relação **volume-superfície é grande**, o que acarreta **diminuição do fluxo de calor** dos gases para as paredes. Essa porção de mistura estará sujeita a temperaturas mais elevadas e, portanto, a **maior possibilidade de detonação**.



# Combustão em MIF

## Câmara de Combustão

- Ter relação **volume-superfície (V-S) grande no início do trajeto da chama e pequena no fim:**
  - No segundo exemplo: Obtida pela simples mudança da posição da vela a propagação da chama é rápida **no início**, pois as relações acontecem em uma frente ampla com **pouca interferência de paredes para o resfriamento**. A **região terminal** tem um volume pequeno, com bastante contato com as paredes, o que torna **menos provável se atingir o TAI** (temperatura de auto-ignição)

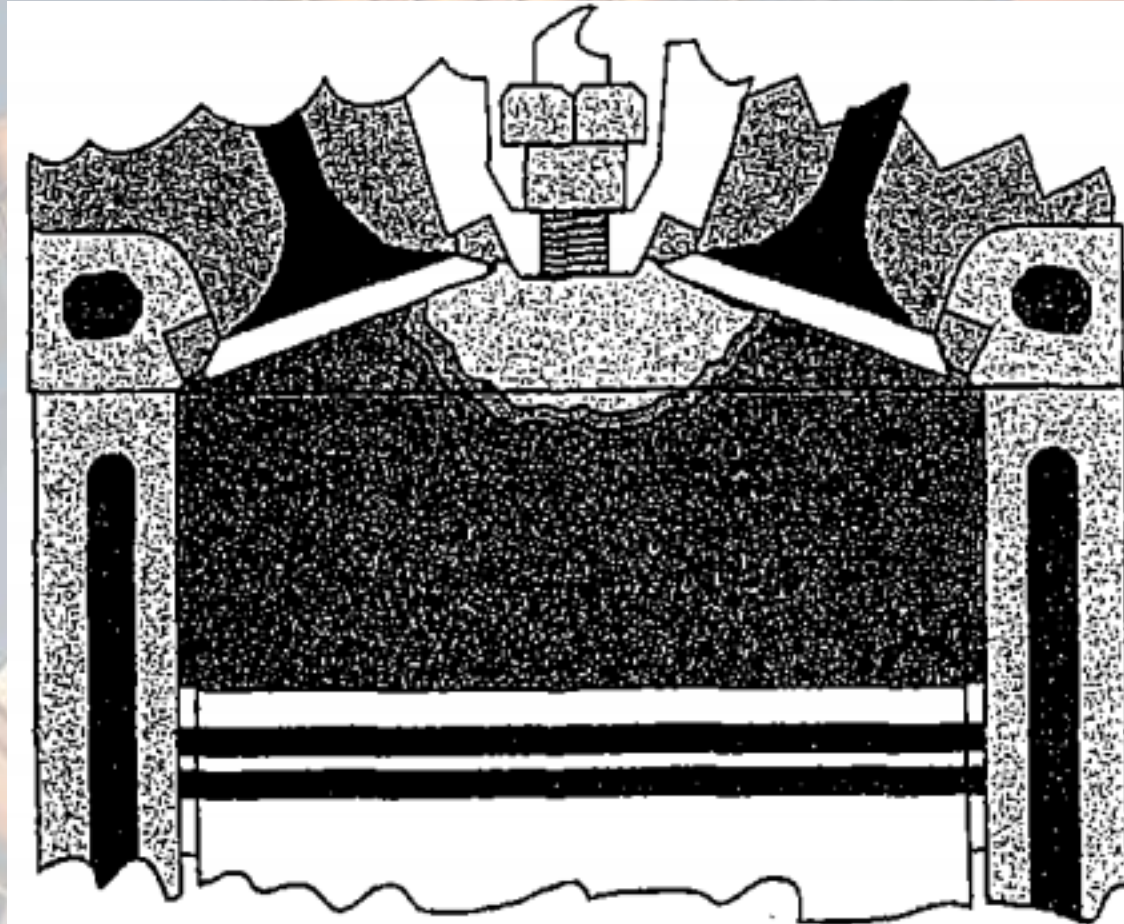




# Combustão em MIF

## Câmara de Combustão

- Ter relação **volume-superfície (V-S) grande no início do trajeto da chama e pequena no fim:**
- No terceiro exemplo: Mostra genericamente uma boa câmara para motores Otto, com vela de ignição centrada, regiões de baixa volume-superfície na fase final da combustão.



# Combustão em MIE

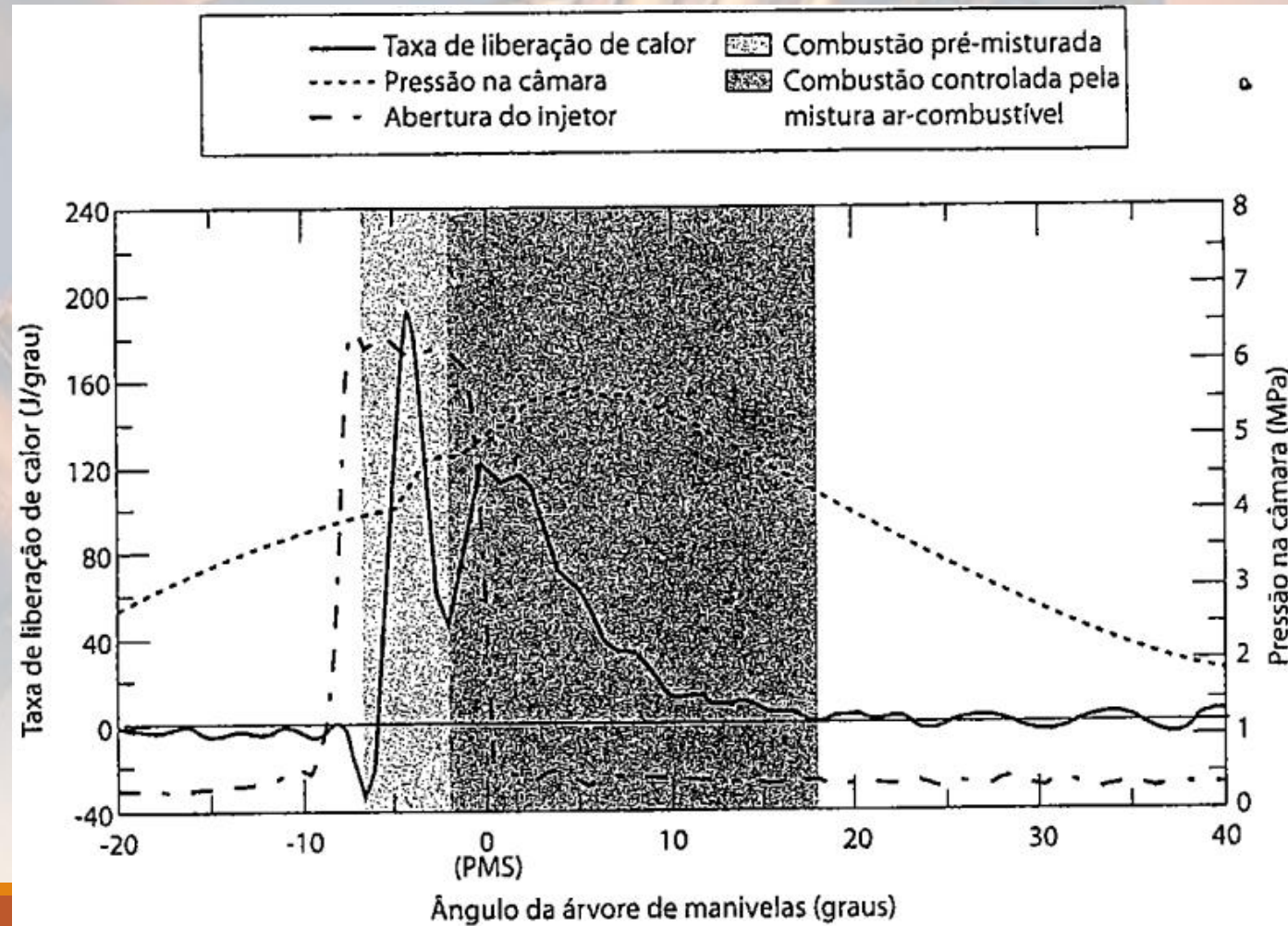
- Nos motores do ciclo **Diesel** a ignição ocorre por **auto-ignição** (TAI) no contato do combustível injetado com o ar aquecido pela compressão provocada pelo pistão.
- O combustível líquido é injetado em alta velocidade na câmara de combustão, em um ou mais jatos, por meio dos pequenos orifícios do injetor, sendo em seguida vaporizado à medida que se mistura com o ar em alta temperatura e alta pressão.





# Combustão em MIE

- A figura mostra um gráfico com o comportamento da pressão no interior da câmara, o curso de levantamento da agulha do injetor e a taxa de liberação de calor em relação ao ângulo de movimento da árvore de manivelas, durante um ciclo de um motor Diesel.

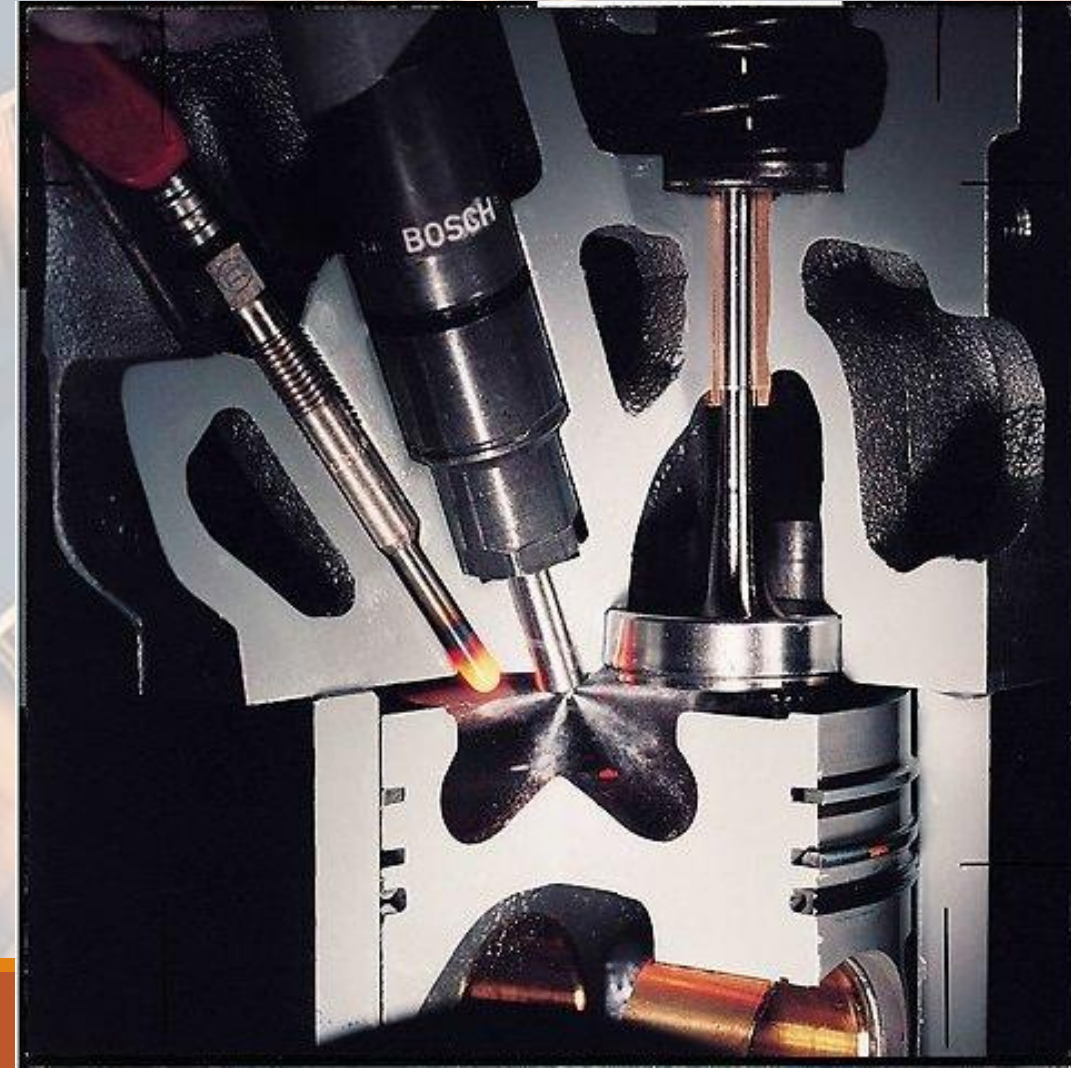




# Combustão em MIE

## Fatores que Influenciam na Auto-ignição

- **Qualidade do combustível:** É definida por comparação de comportamento dos combustíveis comerciais com combustíveis padronizados, em ensaios fixado pela ASTM.

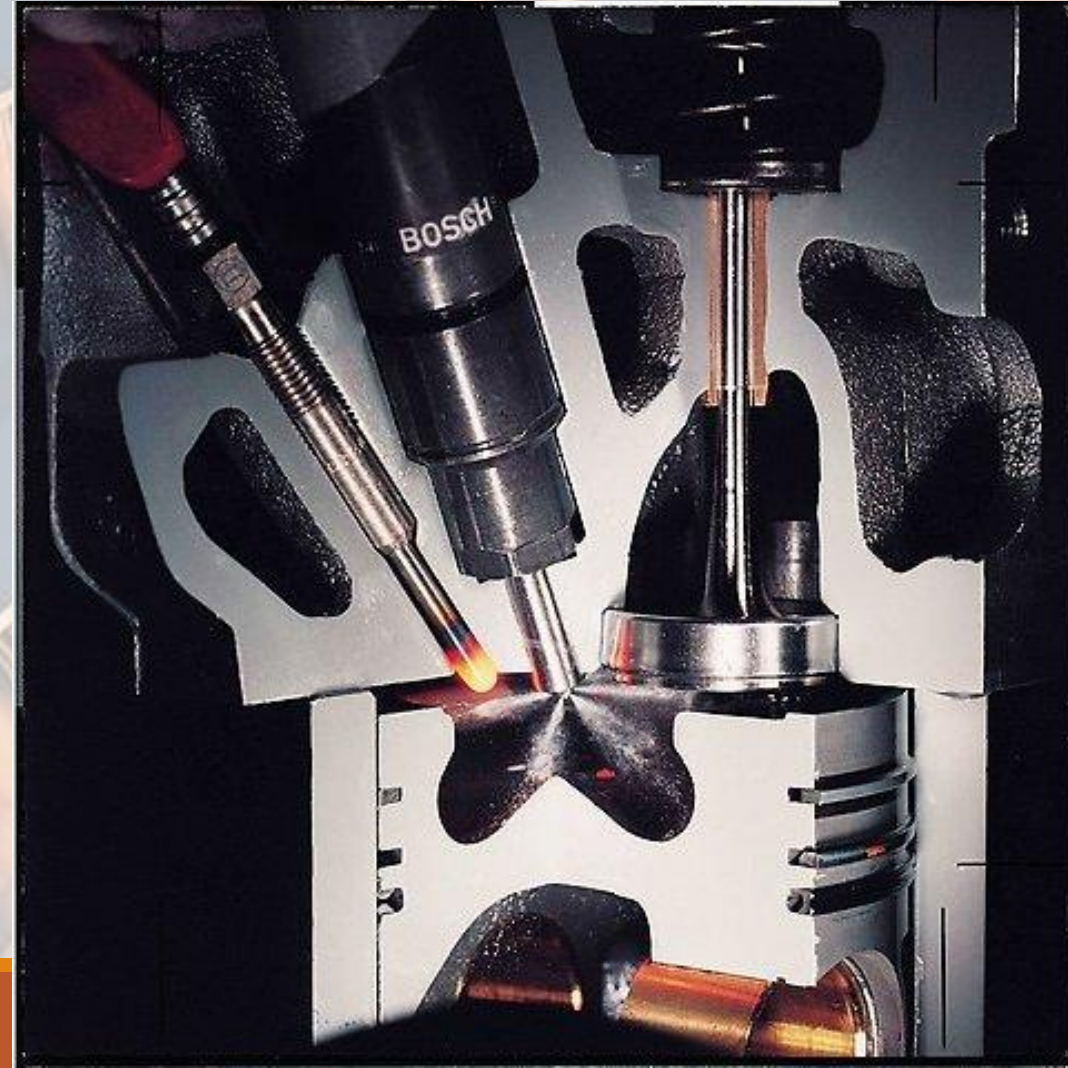




# Combustão em MIE

## Fatores que Influenciam na Auto-ignição

- **Temperatura e Pressão:** A temperatura e a pressão do ar de admissão afetam a auto-ignição por meio das condições da mistura ar-combustível no período de atraso de ignição. A taxa de compressão é um elemento fundamental, um aumento na mesma reduzirá o atraso de ignição melhorando a eficiência indicada.

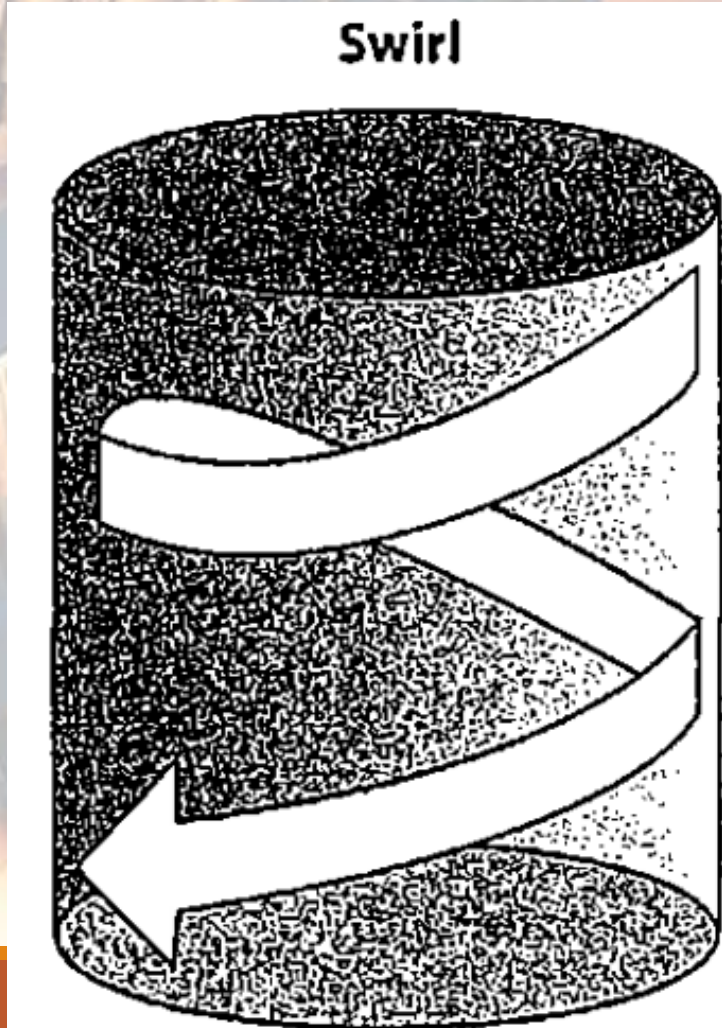




# Combustão em MIE

## Fatores que Influenciam na Auto-ignição

- **Turbulência:** O movimento de corpo rígido chamado Swirl é um criador ou potencializador de turbulência, amplamente utilizado em motores Diesel. O projeto das câmaras de combustão deve considerar o compromisso de redução do atrasado de ignição sem elevar demasiadamente as temperaturas atingidas nas fases iniciais da combustão de pré-mistura, na qual é formada grande parte dos óxidos de nitrogênio (NOx) do ciclo Diesel.

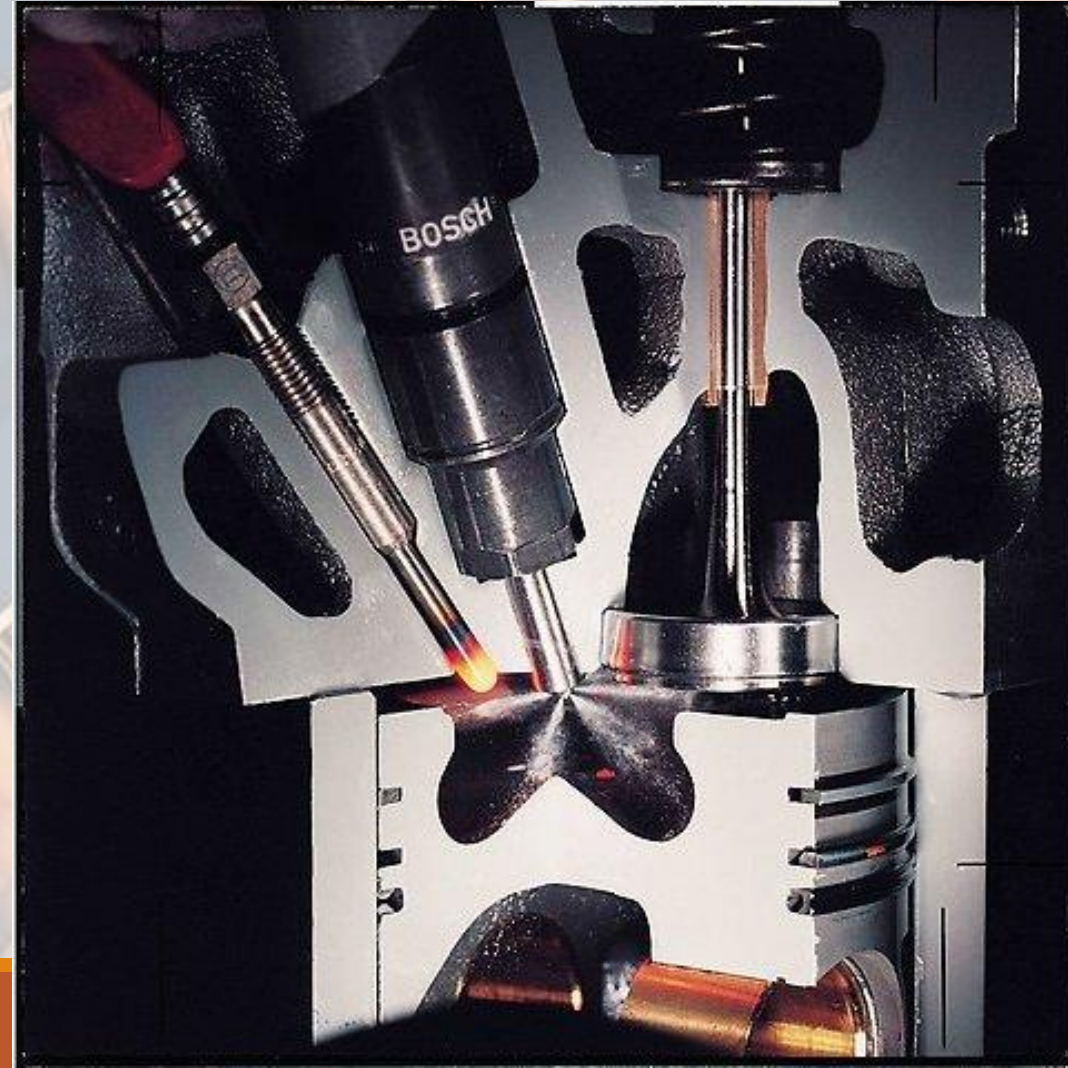




# Combustão em MIE

## Tipos Básicos de Câmaras

- Basicamente, as câmaras para motores Diesel são classificadas em dois grupos fundamentais:
  - **Câmaras de Injeção Direta** (ou abertas): nas quais o combustível é injetado diretamente na câmara;
  - **Câmaras de Injeção Indireta** (ou divididas): Que são divididas em duas regiões e o combustível é injetado em uma pré-câmara conectada à câmara principal.

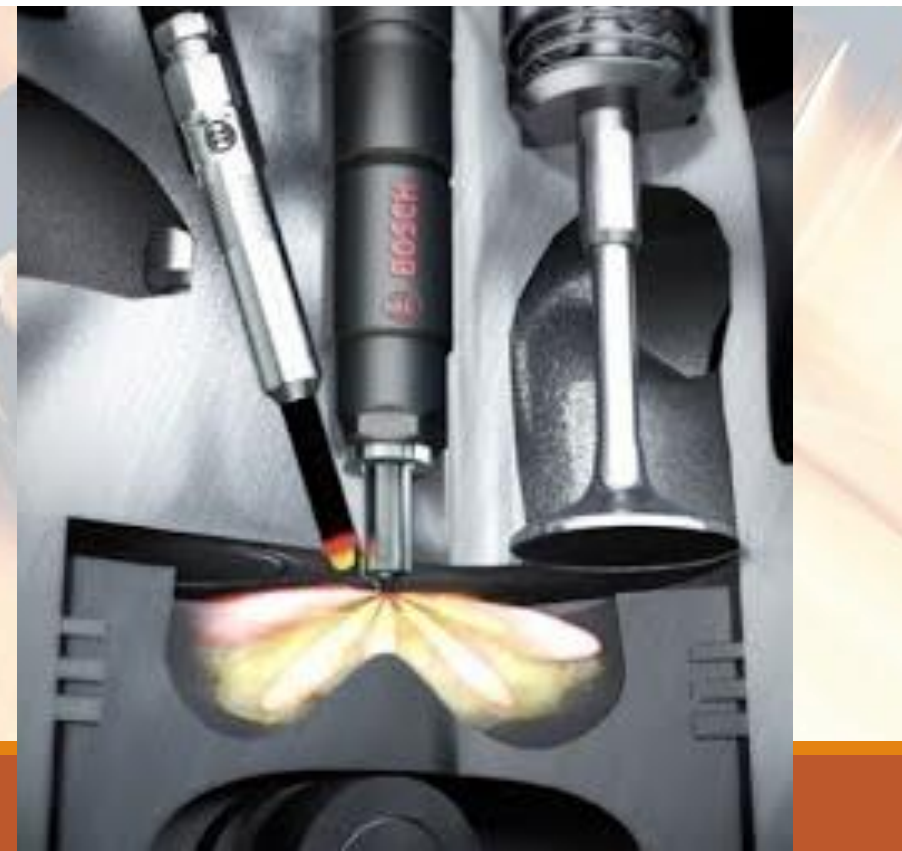
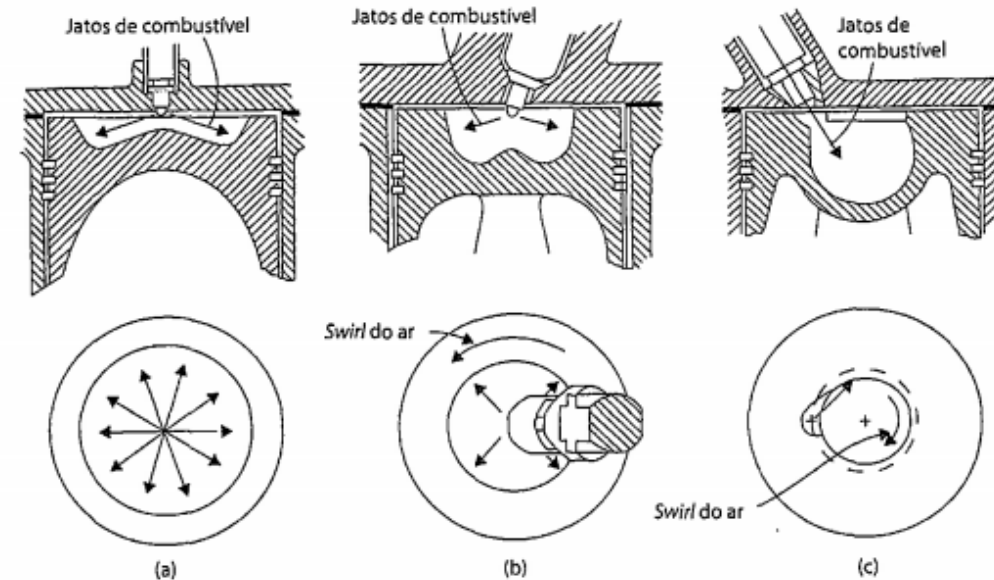




# Combustão em MIE

## Tipos Básicos de Câmaras

- **Câmara de injeção direta** ou abertas: Estas são, em geral, construídas na coroa do pistão, utilizam como mecanismos para produção de turbulência o squish, o swirl e quantidade de movimento do combustível injetado. As câmaras de injeção direta atuais são, em geral, rasas e centradas na coroa do pistão e funcionam com injetores centrados de múltiplos orifícios dispostos radialmente na extremidade do injetor.

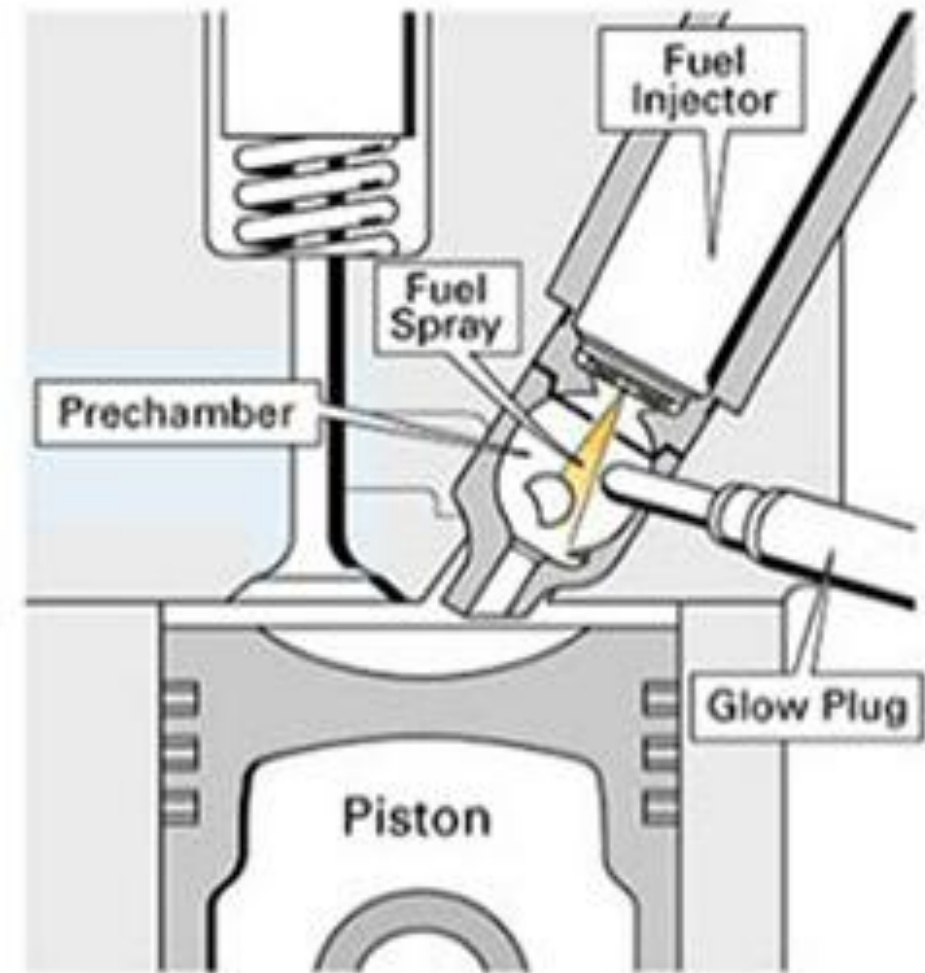




# Combustão em MIE

## Tipos Básicos de Câmaras

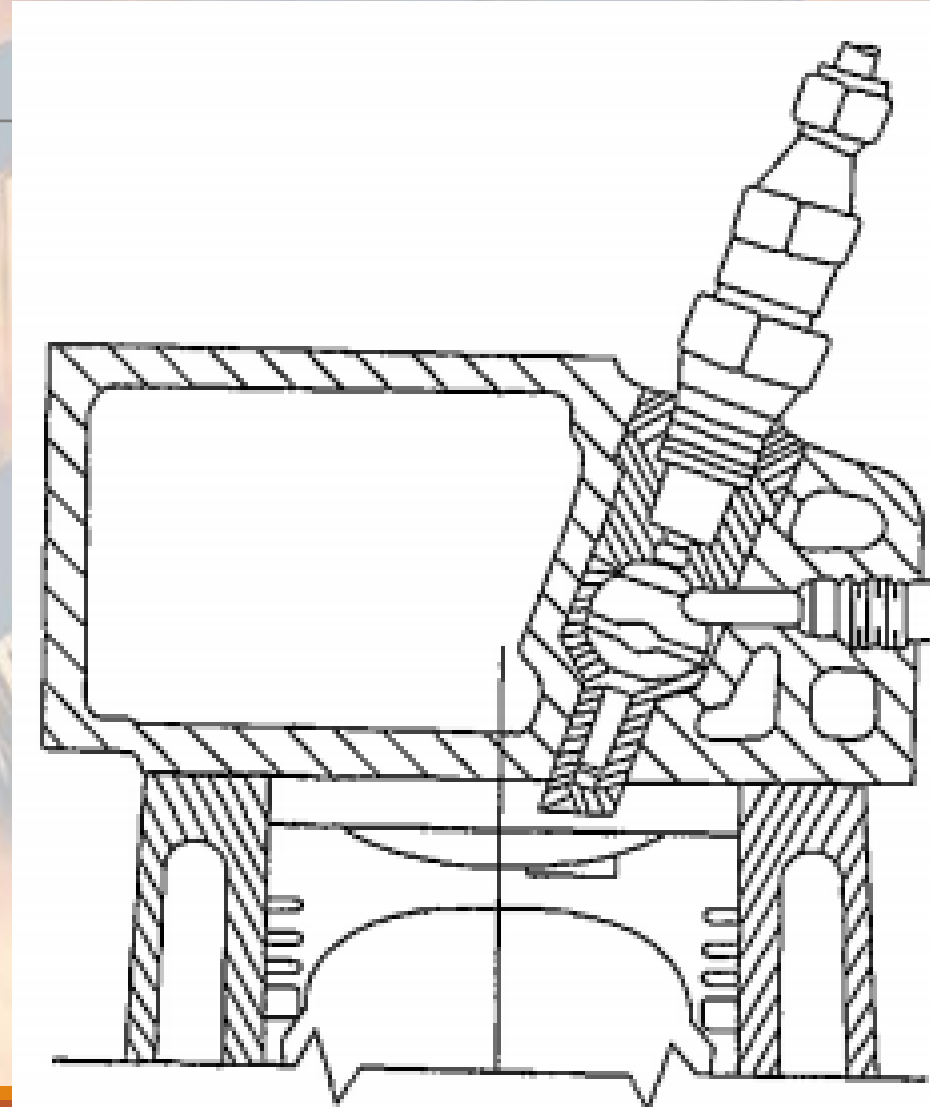
- **Câmara de injeção indireta** ou divididas: São construídas no cabeçote, com o objetivo de produzir turbulências muito intensas. É claro que, se por um lado, as turbulências elevadas reduzem o retardamento físico e, portanto, permitem produzir uma combustão mais suave e mais rápida, por outro lado produzem uma maior perda de calor, com conseqüente redução de eficiência térmica. As câmaras de injeção indiretas podem ser divididas em: Pré-câmara turbulenta e Pré-câmara de Swirl.



# Combustão em MIE

## Tipos Básicos de Câmaras

- Câmara de injeção indireta ou divididas:
- **Pré-Câmara Turbulenta:** Quando o pistão percorre o curso de compressão, o ar é forçado por uma estreita passagem do cabeçote para uma câmara auxiliar logo acima, adquirindo alta velocidade. O combustível é então injetado na câmara auxiliar com uma pressão menor do que aquela utilizada nos sistemas de injeção direta, produzindo a combustão que eleva a pressão e faz com que a frente de chama se propague até a câmara principal através de um canal estreito que gera elevada turbulência.





# Combustão em MIE

## Tipos Básicos de Câmaras

- Câmara de injeção indireta ou divididas:
- **Pré-Câmara Swirl:** O combustível é injetado na câmara secundária, onde sofre combustão parcial com um aumento considerável da pressão. Por causa disso a mistura em combustão é impelida para o câmara principal através de passagens desenhadas para fazer com que o fluxo assuma um movimento rotativo de grande velocidade, induzindo assim o swirl na câmara principal na cabeça do pistão, onde se completa a combustão.

