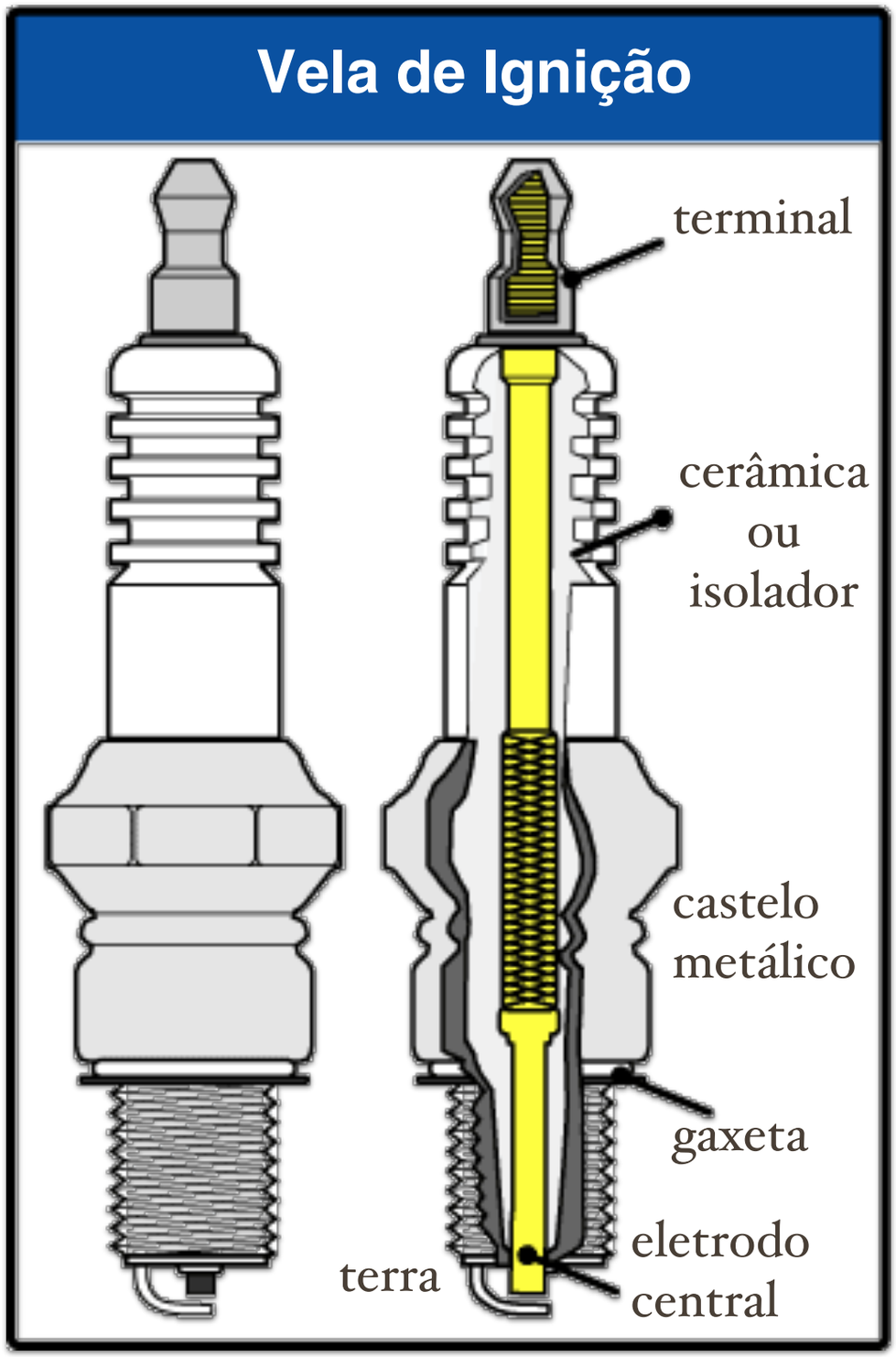
Ignição nos Motores 4T: Princípios Práticos

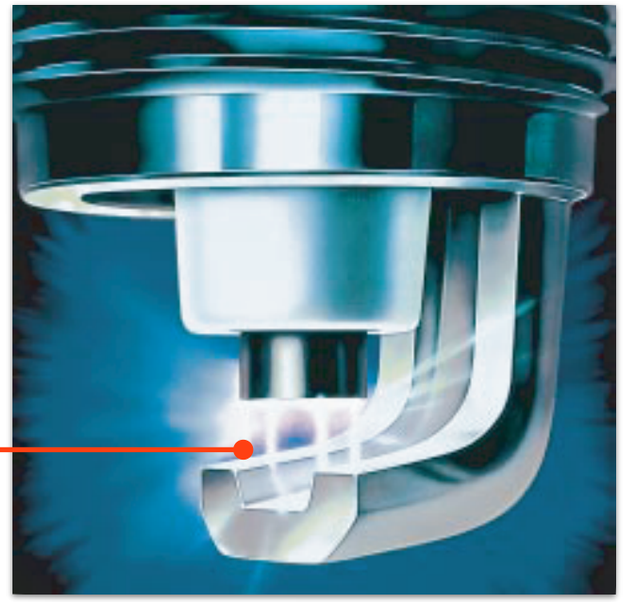
Objetivo do Controle do Avanço da Ignição

- Extrair o máximo rendimento do motor mantendo o compromisso com emissões de gases poluentes, desempenho e economia de combustível.

Vela de ignição

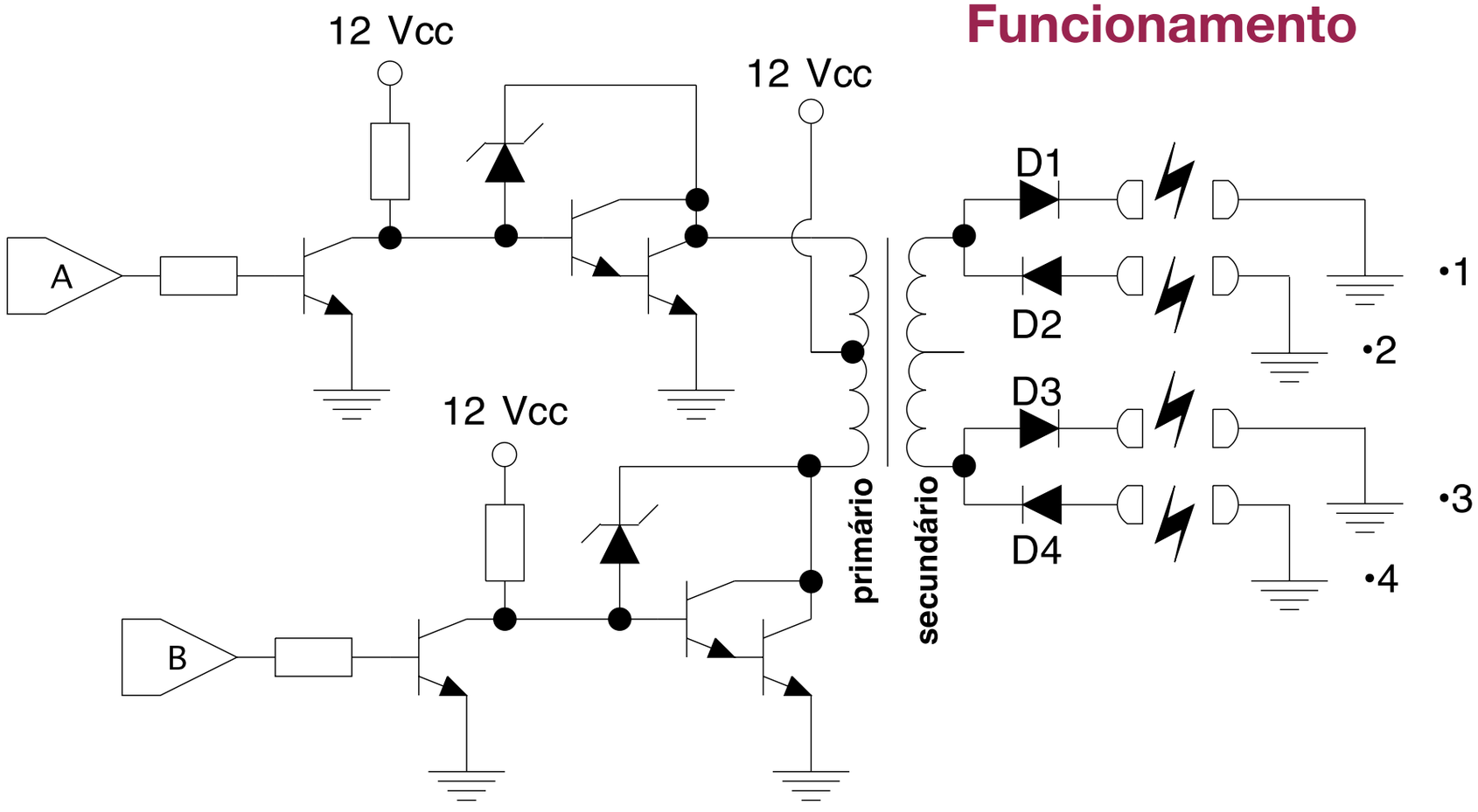


- 20 a 40 kV
- ionização

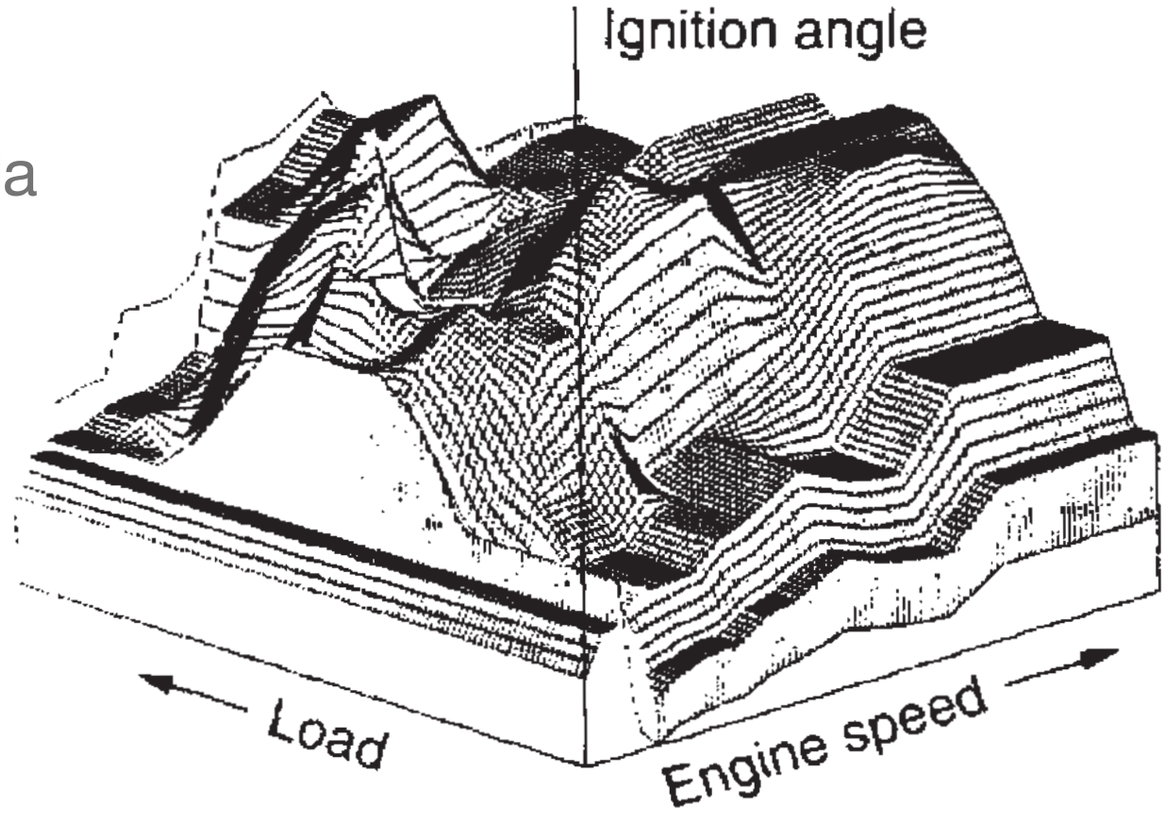


Ignição eletrônica mapeada estática

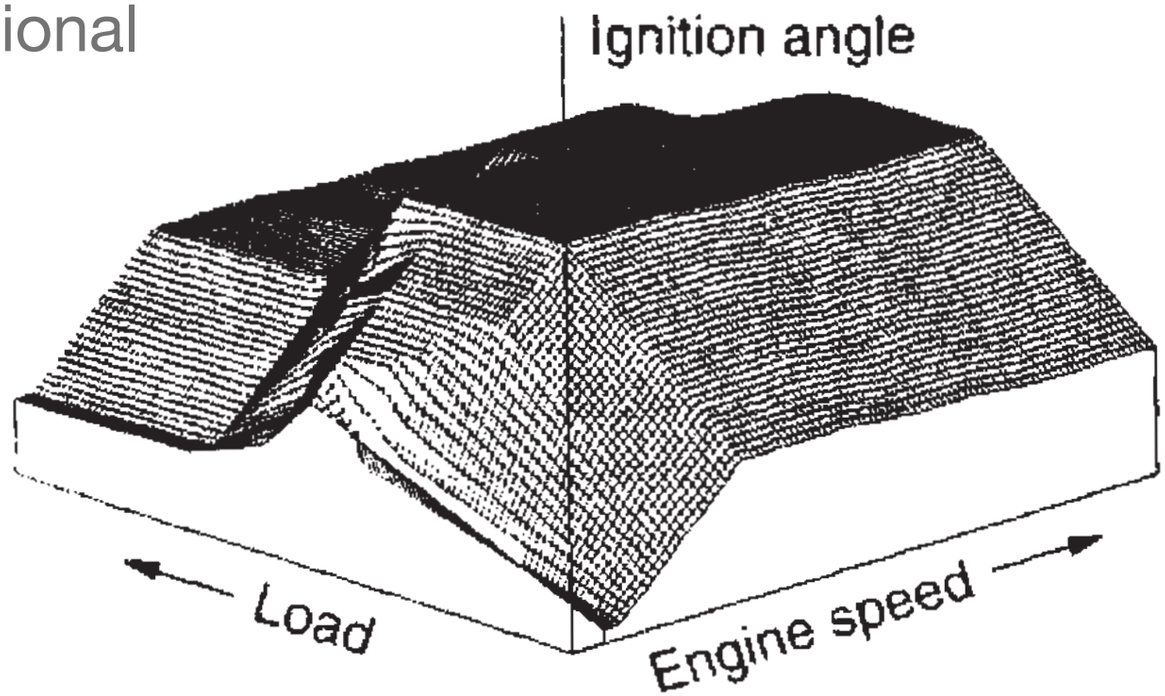
Funcionamento



- ignição eletrônica mapeada estática



- ignição mecânica convencional

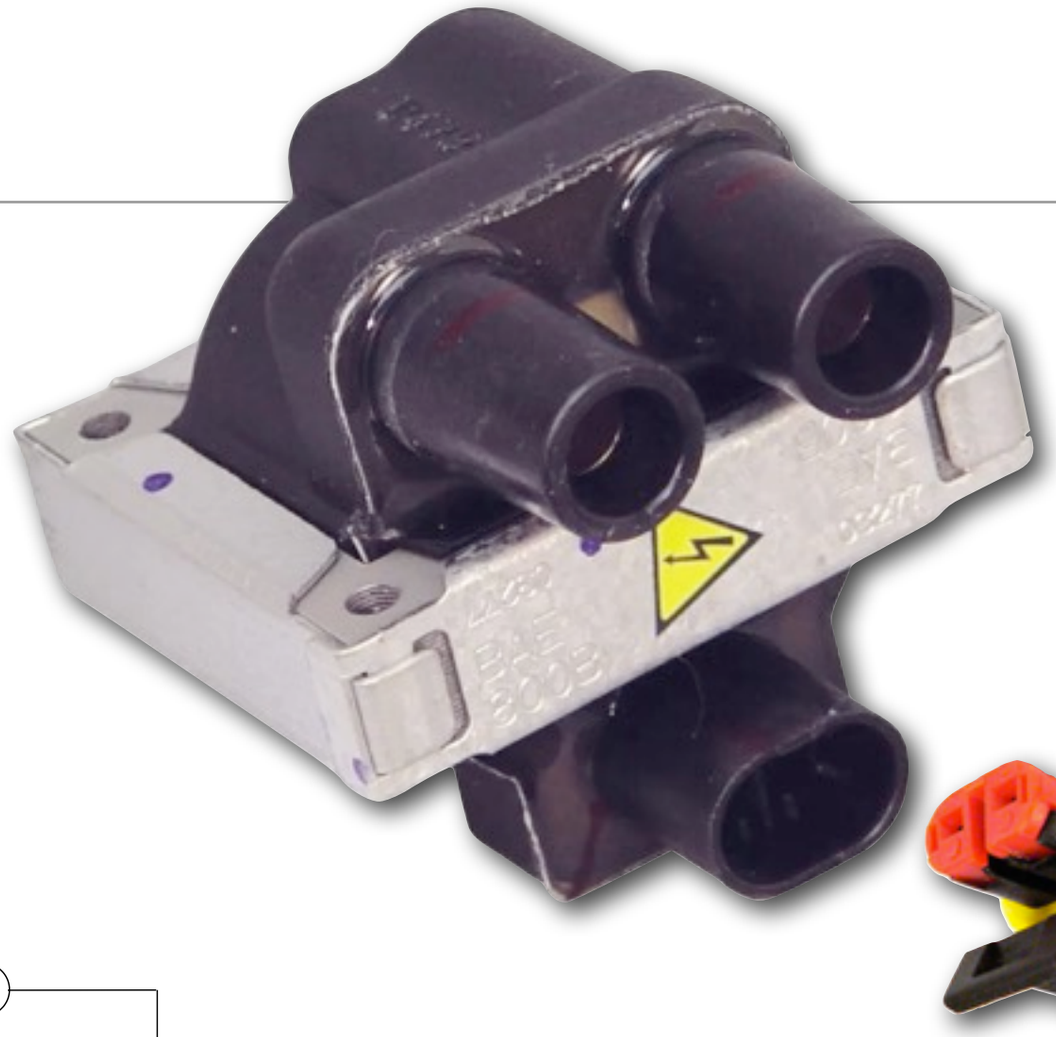


- elimina o distribuidor mecânico:
    - mais barata;
    - mais confiável;
    - menor custo de manutenção;
    - recuperação da potência perdida pelo distribuidor mecânico.

- um par de velas (1 e 4 ou 2 e 3, num motor 4 cil.) é disparado simultaneamente.

- o arranjo é escolhido de forma que enquanto um cilindro estiver no tempo de *compressão*, o outro estará no tempo de *exaustão*.

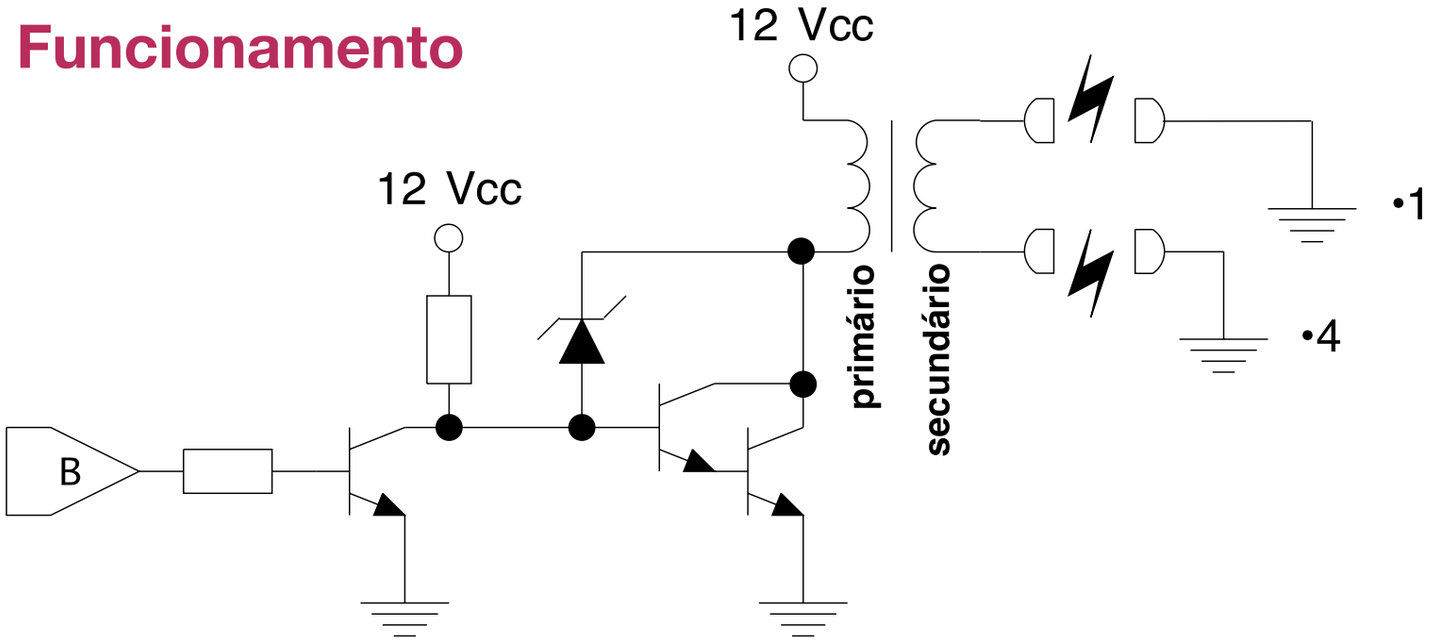
Ignição eletrônica mapeada estática II



Bobina BAE 800B

(uma para dois cilindros)

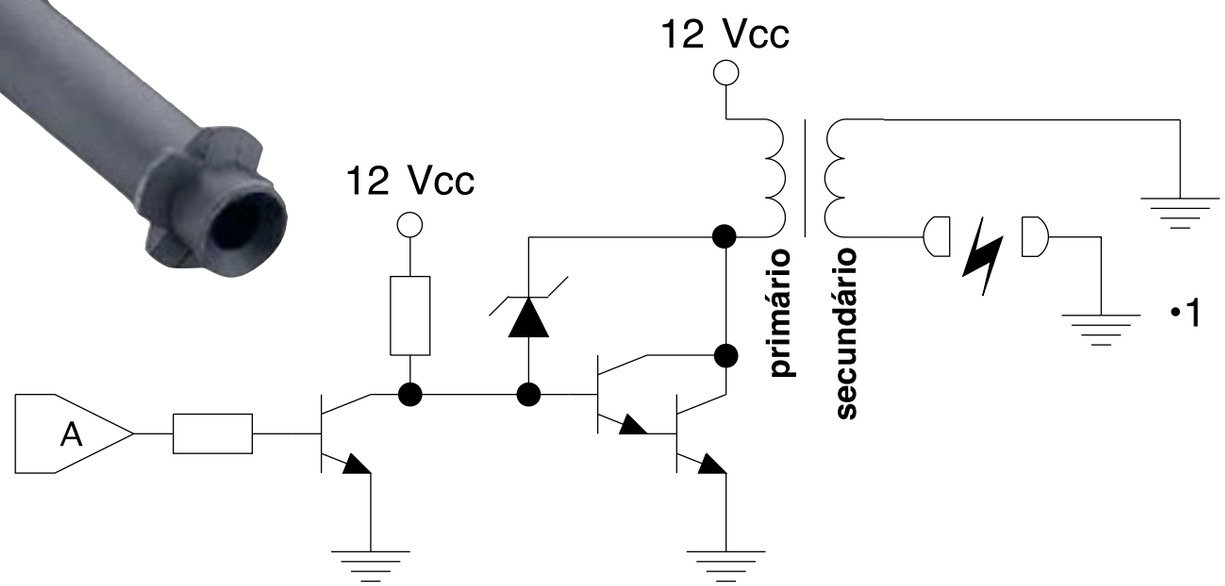
Funcionamento



Ignição eletrônica mapeada estática III

Bobina
(uma por cilindro)

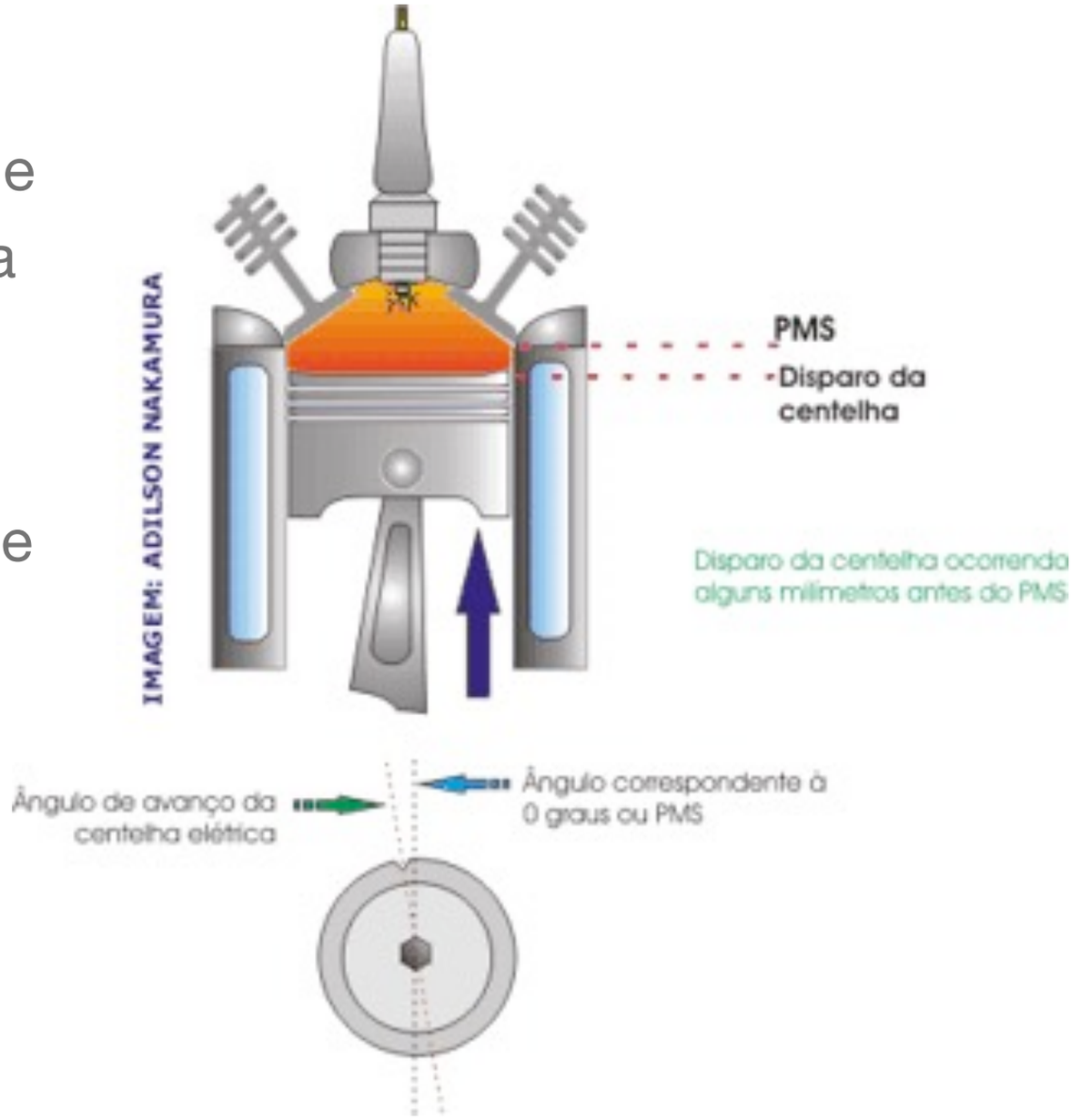
Funcionamento



Ponto ou avanço da centelha

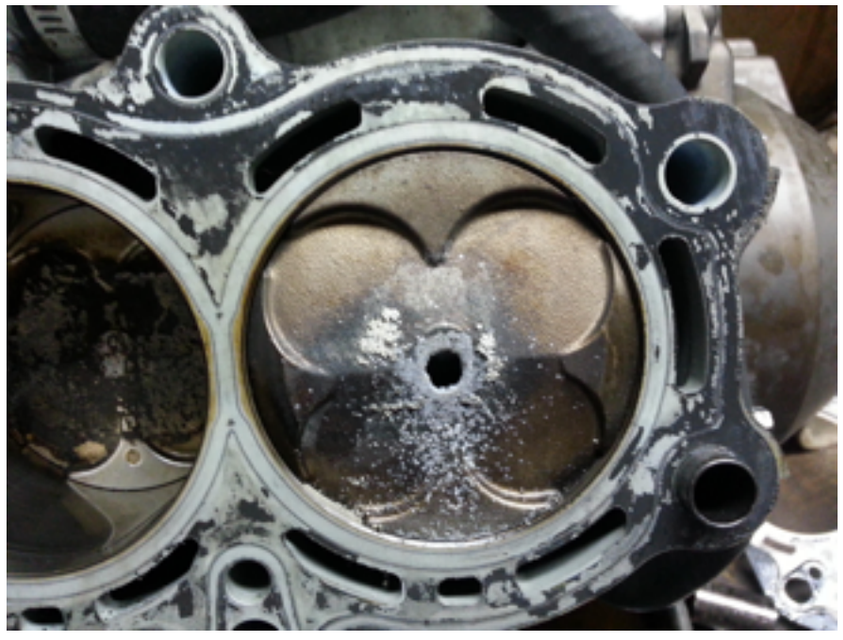
- O ponto de ignição de um motor é o momento em que se inicia o processo de inflamação da mistura ar-combustível na câmara de combustão do motor.

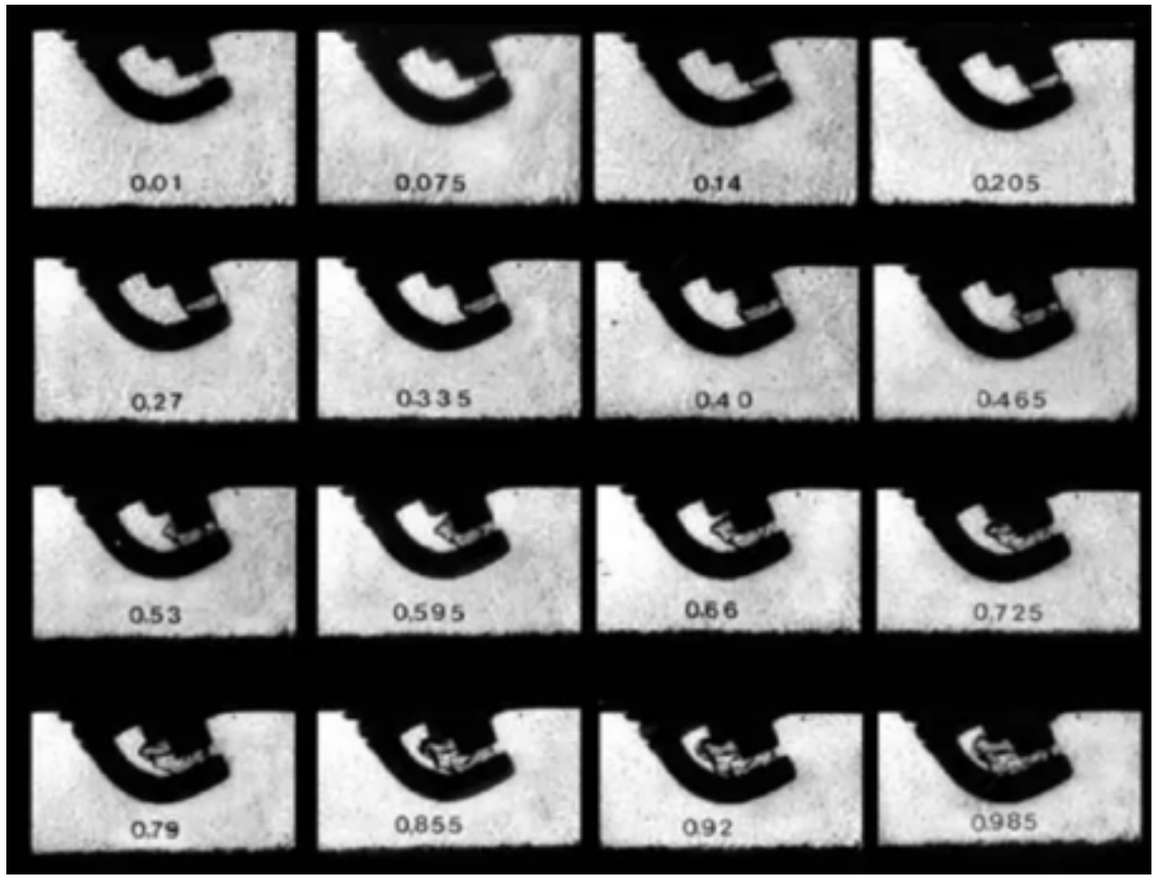
- Um erro bastante comum é acreditar que adiantar o ponto sempre produzirá mais potência. Isso é mito!



- Outro erro bastante comum é acreditar que a combustão ocorre instantaneamente ou com poucos graus do virabrequim (1 a 2°).

- Se isso fosse verdade, após alguns ciclos, bielas, pistões, mancais e o próprio virabrequim “desmanchariam”!

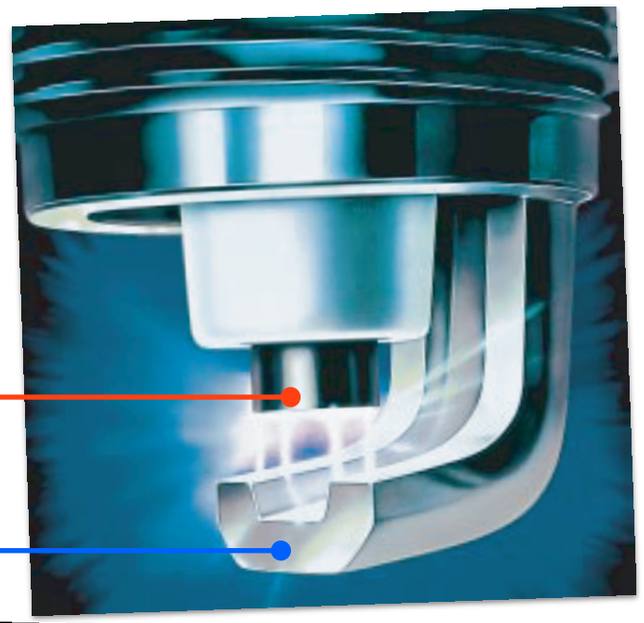




- A combustão é rápida, mas ocorre na ordem de alguns ms.

- Existe uma ordem em que as coisas acontecem:

1. a centelha salta do eletrodo central para o eletrodo de massa (terra);



2. tem início o núcleo da chama;

3. a chama tem que propagar em direção às paredes do cilindro e à cabeça do pistão.

- Durante todo esse processo, o pistão continua seu movimento e espremendo a mistura A/C!

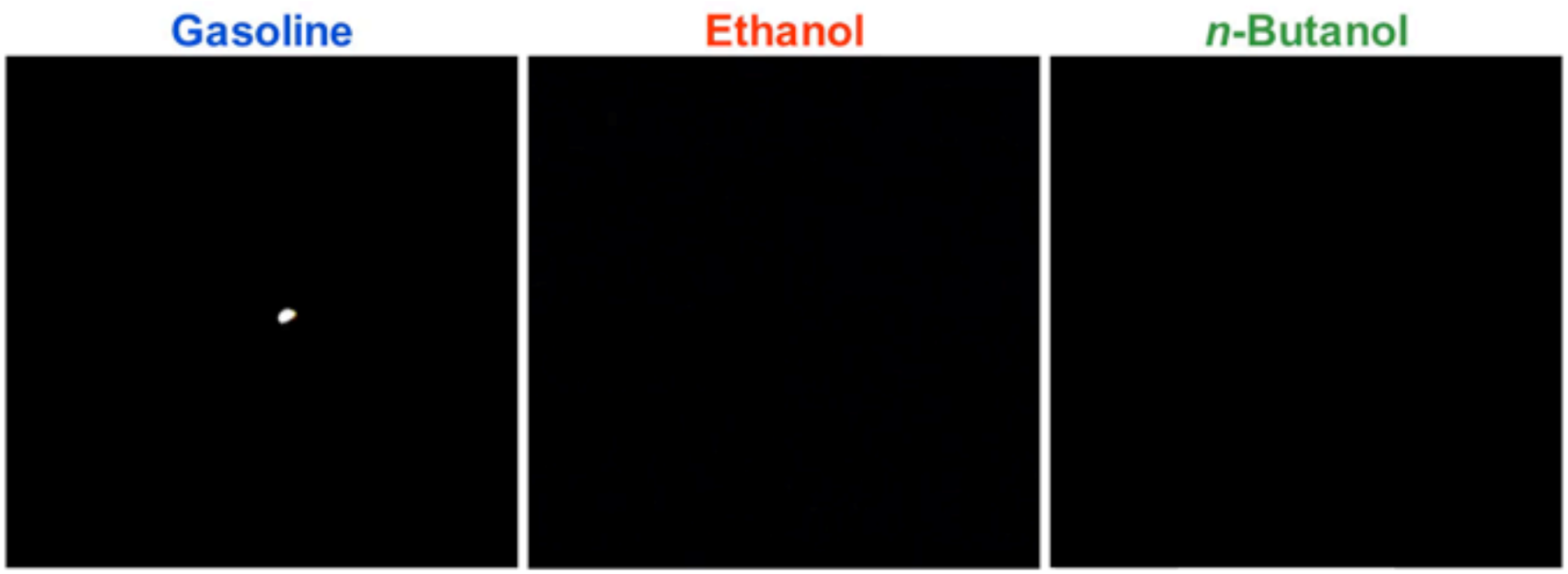
- Por mais homogênea que tenha sido a preparação da mistura A/C, dentro da câmara de combustão, ela se dispõe em camadas (analogia com uma cebola).

- As camadas possuem diferentes relações A/C:

  a) próximo à vela, a mistura é mais rica;

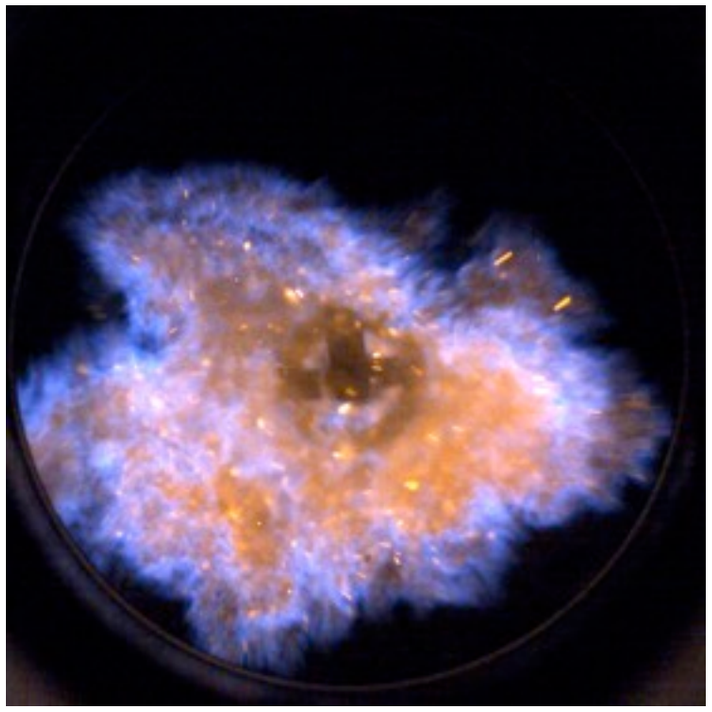
  b) próximo à cabeça do pistão, mais pobre.

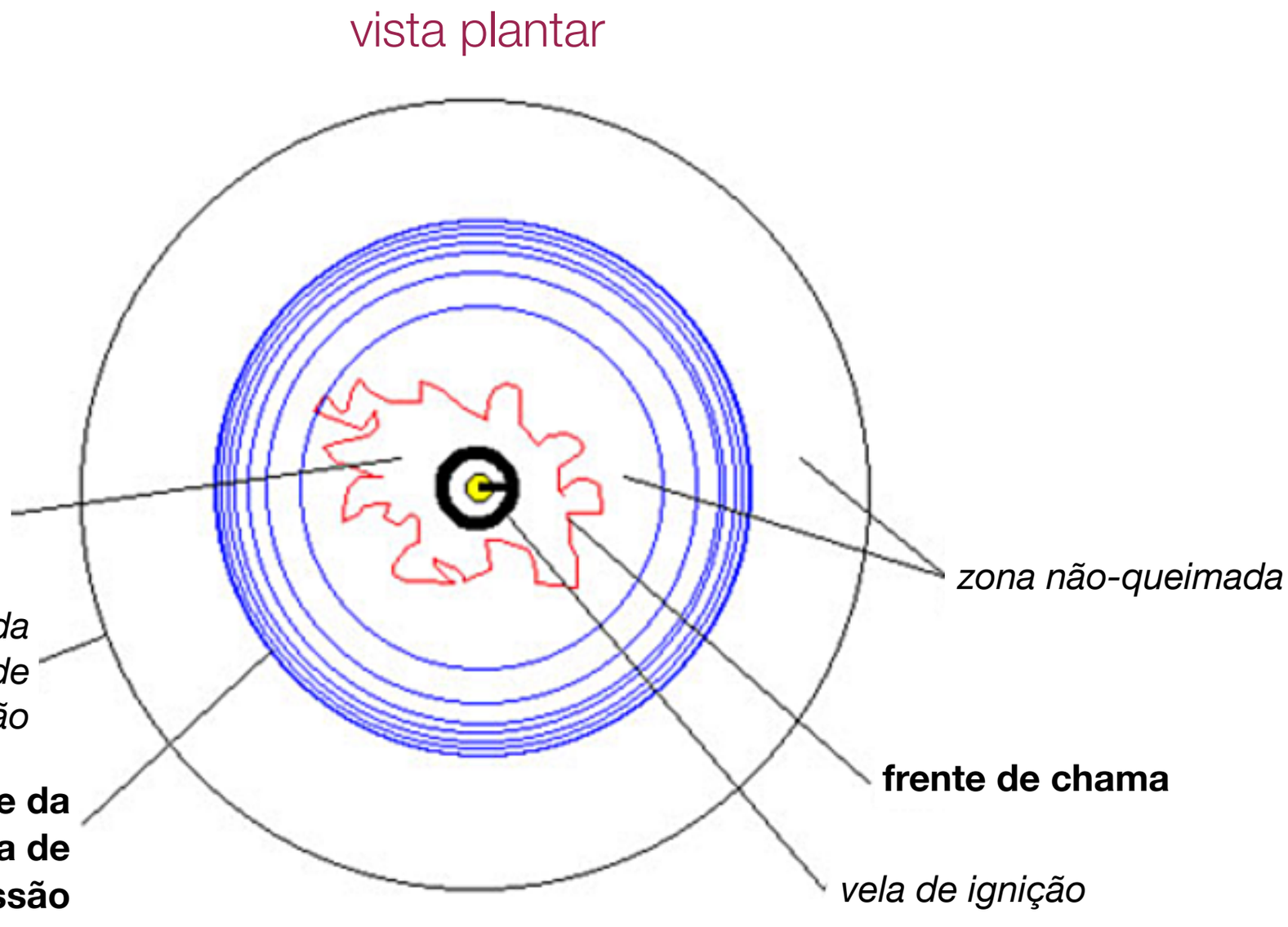
- Essas camadas queimam em seqüência a partir da vela de ignição.
- Durante a queima, cada camada explode criando uma onda expansiva para frente.
- Enquanto a onda expansiva eleva a pressão no cilindro, são consumidos alguns milisegundos.
- Quando avançamos o ponto da centelha, estamos adiantando o início desse processo.



© Prof. Pavlos Aleiferis, Department of Mechanical Engineering
Imperial College London, Exhibition Road, London SW7 2AZ, UK

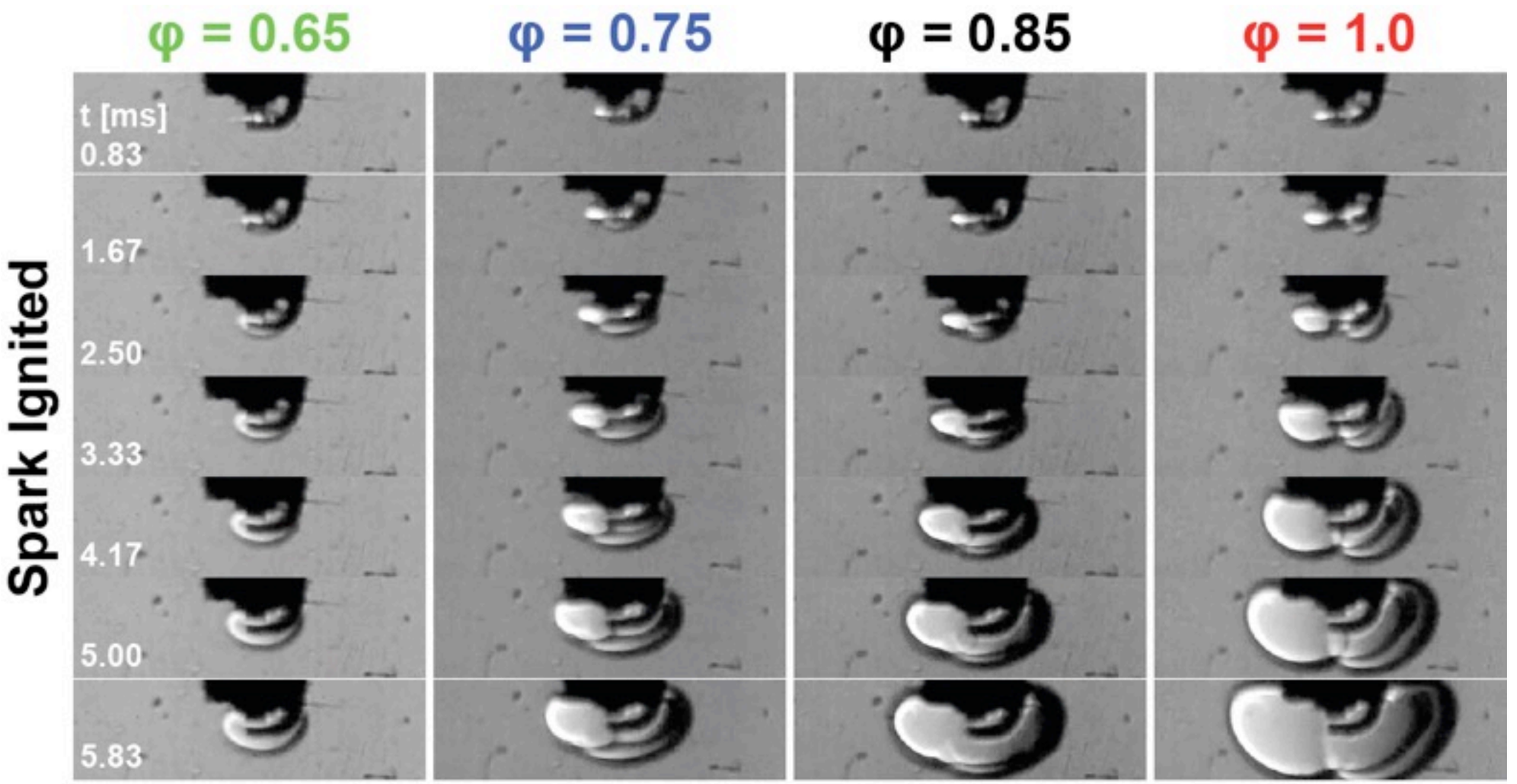
- Desenvolvimento do processo de combustão





- Desenvolvimento do processo de combustão

$$\varphi = \frac{1}{\lambda}$$

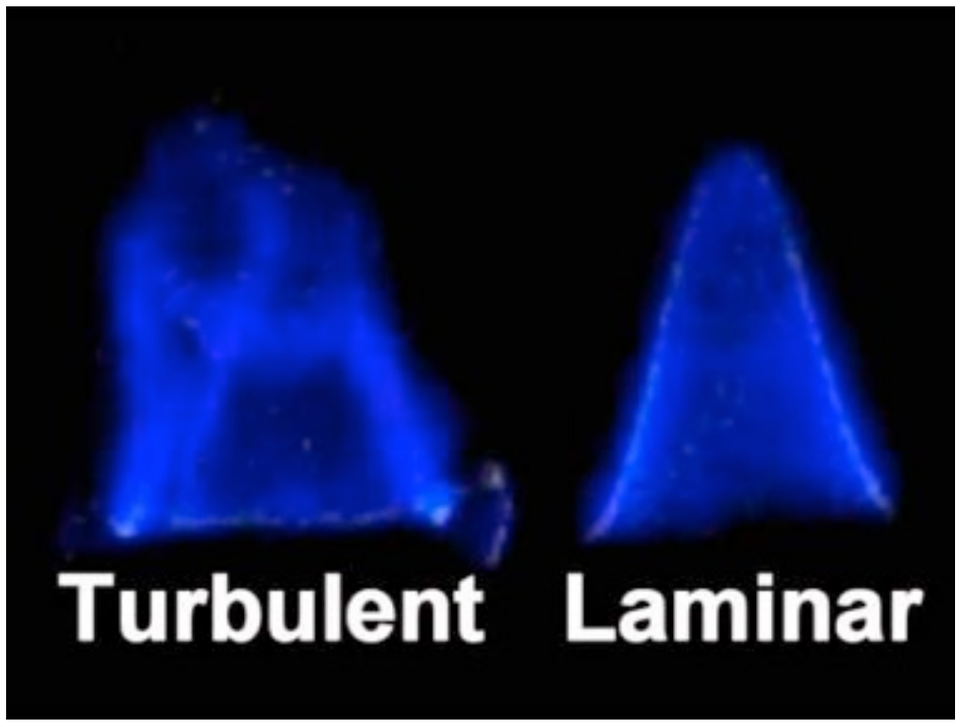


mistura pobre

mistura estequiométrica

- É difícil de prever o correto avanço da centelha.

- Diversos fatores interferem no processo de queima do combustível como: carga do motor, homogeneidade da mistura A/C, dinâmica dos gases dentro da câmara de combustão, etc.



- Para simplificar, usaremos um modelo de regime laminar para estimar o avanço da centelha, embora a combustão da gasolina seja turbulenta. A do etanol tem um comportamento mais laminar.

Honda Civic Type R 2.0L 16v (2006)

- Dados do motor:

1. CC = 1998 cm3
2. $Pe_{máx}$ = 201HP@7800rpm
3. $Te_{máx}$ = 193mN@5600rpm
4. Ø x Curso = 86 x 86mm

- Exemplo: RPM = 7800rpm (potência máxima)

- O tempo que demora para o virabrequim dar uma volta completa é: 7,7 ms.

  - 7800 rev./min x 1 min/60s = 130 rev./s.

  - 130 rev. demoram 1 s. 1 rev., 1/130s = 0,007692s

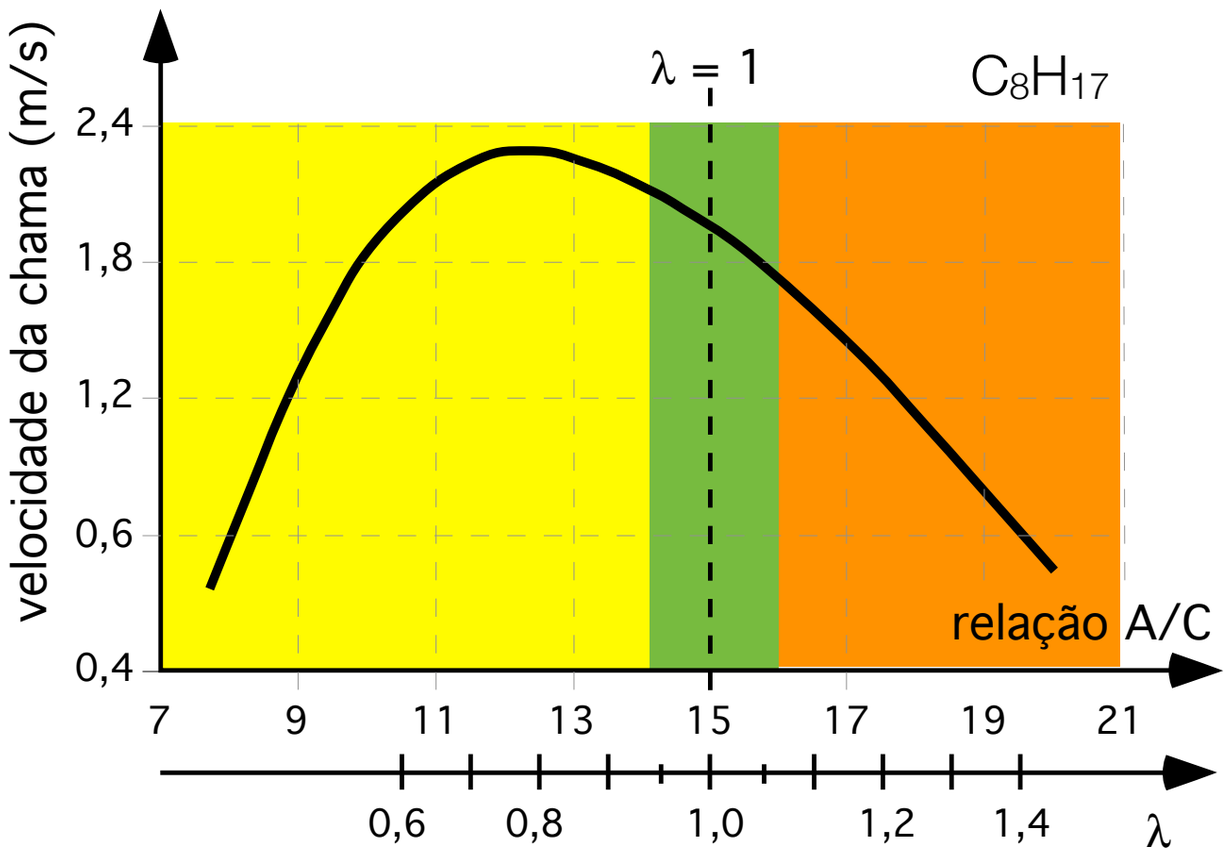
- Exemplo: RPM = 7800rpm (potência máxima)

- O tempo que demora para o virabrequim girar apenas 1° é: 0,021 ms.

  - 1 rev. (360°) demora 1/130s = 0,00769s = 7,7ms

  - 1° demorará 7,7/360 = 0,0214 ms/°

- Na condição de potência máxima, é comum usar relação A/C da ordem de 12,7 a 13,8:1.



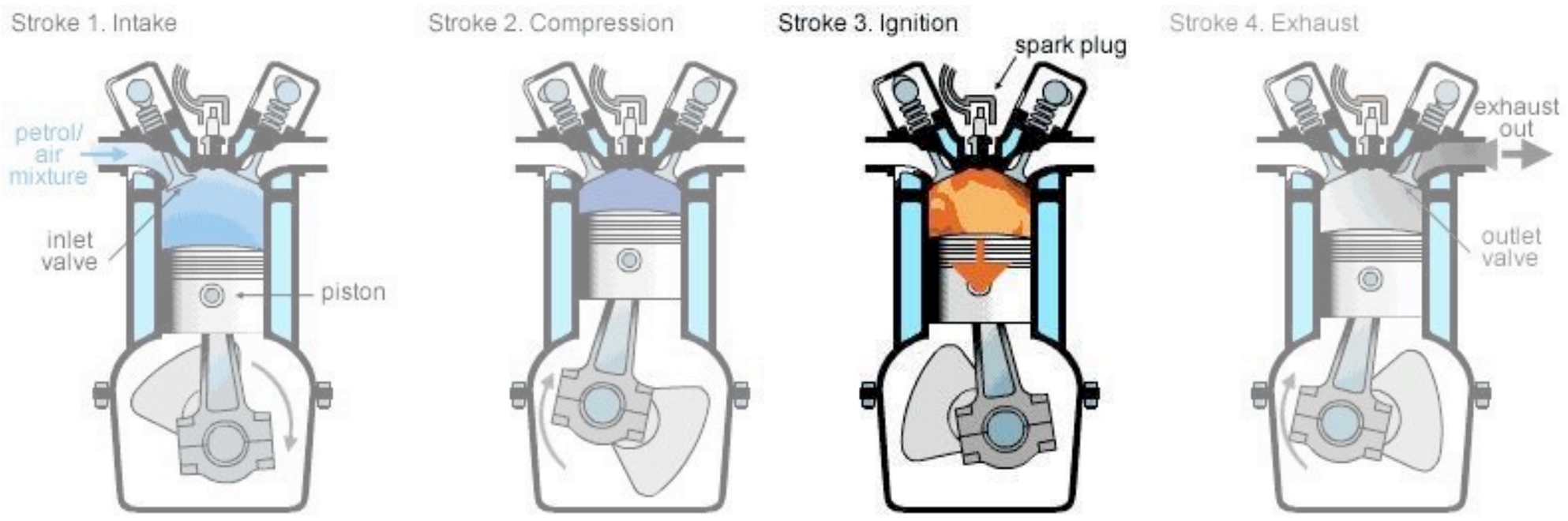
A melhor mistura A/C para produzir potência é aquela que queima mais depressa!

- No gráfico acima, quando A/C = 12,7 a 13,8:1 as chamas se propagarão com velocidades entre 2 a 2,2 m/s.

- Para fins práticos, a literatura adota a faixa de 1,35 a 2,2 m/s para as condições normais de pressão e temperatura no cilindro.

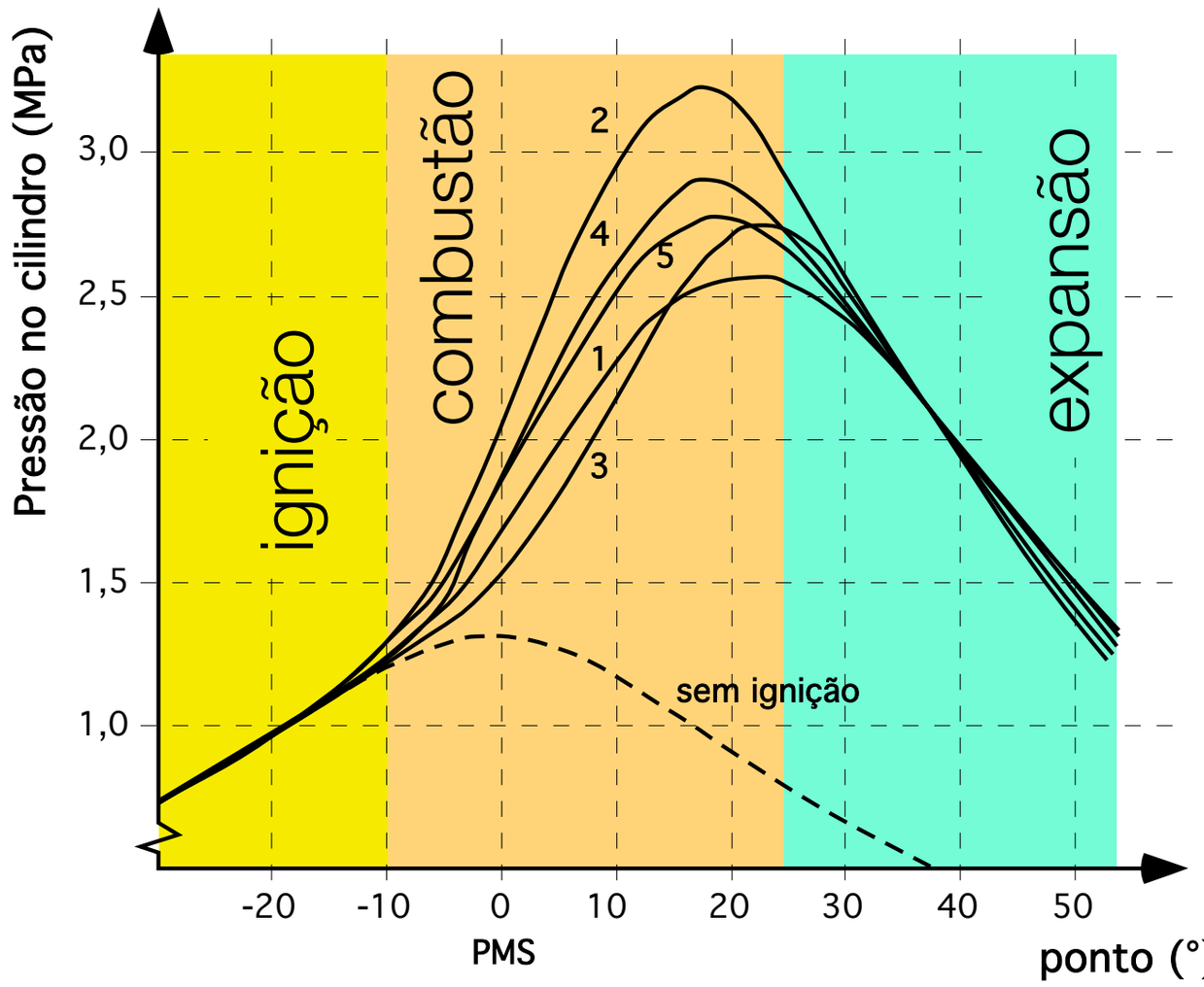
- A combustão da mistura A/C empurra o pistão durante o tempo de expansão.

- A chave para a produção de torque (e conseqüentemente, potência) num motor é o pistão ser empurrado com o máximo de força.



- Toda a mistura A/C precisa ser queimada para que ocorra a máxima explosão.

- **Gráfico da evolução da pressão no cilindro em função da posição angular do virabrequim.**



condições:

motor Mercedes-Benz

combustível: gasolina

ponto: 30° aPMS

RPM = ?

- A pressão máxima aconteceu entre ~15 e ~25° dPMS.

- Esta posição não depende de rotação e carga. Depende da geometria do motor e, segundo alguns autores, marca o final da combustão.

- **Cenários possíveis:**

1. ***$P_{máx}$* ocorre no PMS**: o alinhamento entre o pistão, biela e virabrequim transfere toda força gerada para os mancais e não ajuda a mover o virabrequim. A pressão e a temperatura na câmara tendem a aumentar favorecendo o aparecimento do *knocking*;

2. ***$P_{máx}$* ocorre aPMS**: a força se opõe ao movimento do pistão. Isso retarda o virabrequim;

3. ***$P_{máx}$* ocorre dPMS**: a força fica a favor do movimento. Isso acelera o virabrequim. Considerando os efeitos de inércia, a posição mais favorável para $P_{máx}$ é entre 12 a 15°dPMS.

- O instante do início da combustão influencia seu término e quando ocorrerá o pico da pressão.

- A menor distância que a chama tem que percorrer é a distância entre a vela até a cabeça do pistão. Essa distância determina a duração da combustão.

- **No caso do Honda Cívic Type R:**

essa distância é: 0,89mm.

Assumimos que é a distância entre a vela e a cabeça do pistão quando este está no PMS.

- Exemplo: RPM = 7800rpm (potência máxima)

- Velocidade da chama: 1,35m/s

- O tempo necessário para iniciar e terminar a combustão é de $0,89/1350 = 6,59 \cdot 10^{-4}$ s = 0,66ms

- Esse tempo corresponde a 0,66/0,0214 = 30,85° de giro no virabrequim.

- Exemplo: RPM = 7800rpm (potência máxima)

- Velocidade da chama: 2,2m/s

- O tempo necessário para iniciar e terminar a combustão é de $0,89/2200 = 4,04 \cdot 10^{-4}$ s = 0,4ms

- Esse tempo corresponde a 0,4/0,0214 = 18,93° de giro no virabrequim.

Fatores a serem considerados: carga

- A quantidade de carga imposta ao motor depende do peso do veículo, resistência ao rolamento e arrasto aerodinâmico.

- O aparecimento de *knocking* é bastante propício quando o veículo estiver num aclive com WOT numa marcha alta. Esta é a condição de carga máxima que o motor será submetido.

- Como caso prático, numa bancada de testes, um motor Rover 4L/V8 em regime WOT, na condição de regime admitiu trabalhar com avanço de 31° a 2.200 rpm produzindo cerca de 340 m·N suficientes para tocar um Land Rover 4x4.

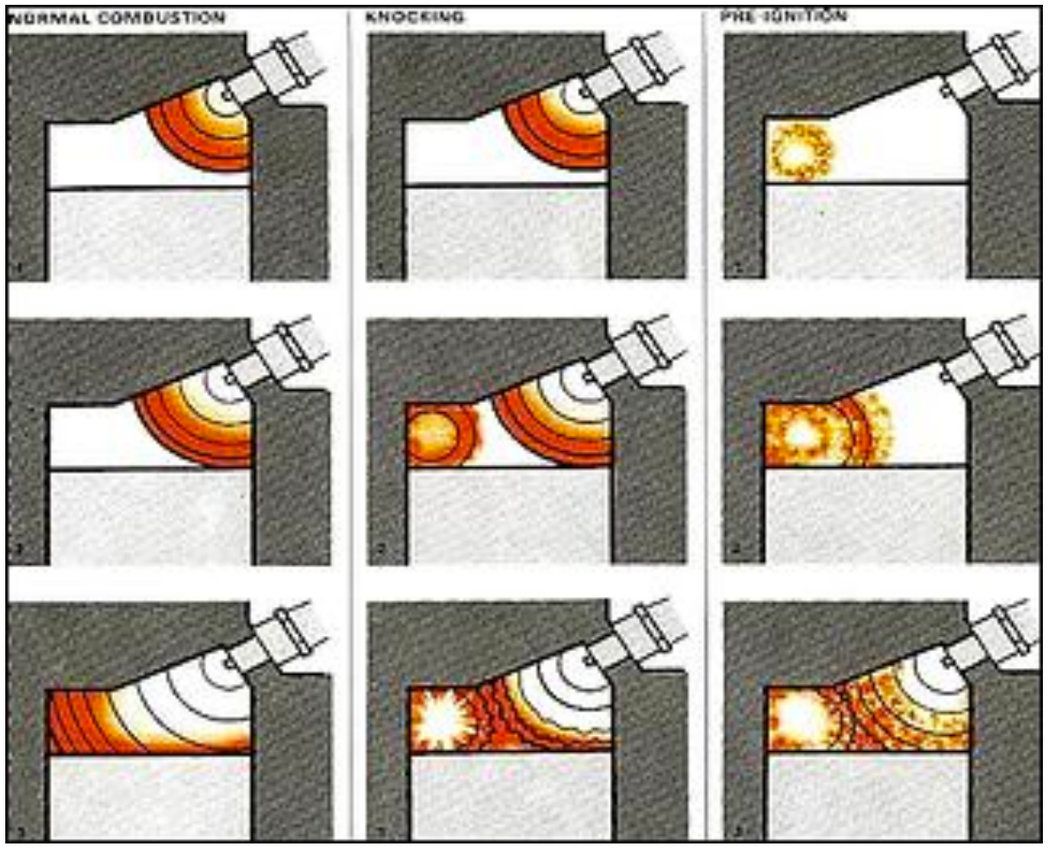
- No entanto, quando este motor foi montado no Land Rover, tolerou apenas 24° no avanço da centelha, produzindo cerca de 300m·N.

- **Conclusão**: o *knock* poderá aparecer quando se carregar um veículo que teve seu mapa de ignição otimizado em condição de pouco peso.

levou apenas um minuto para isto acontecer

- Diferenças entre combustão normal, *knocking* e pré-ignição:

normal *knocking* pré-ignição



Fatores a serem considerados: tamanho do motor

- Um motor maior geralmente tolerará mais avanço do que um motor menor. Entretanto, na prática, um motor que aspira mais ar tolerará menos avanço que outro que aspire menos. Isso também é válido em mudanças de condições atmosféricas.

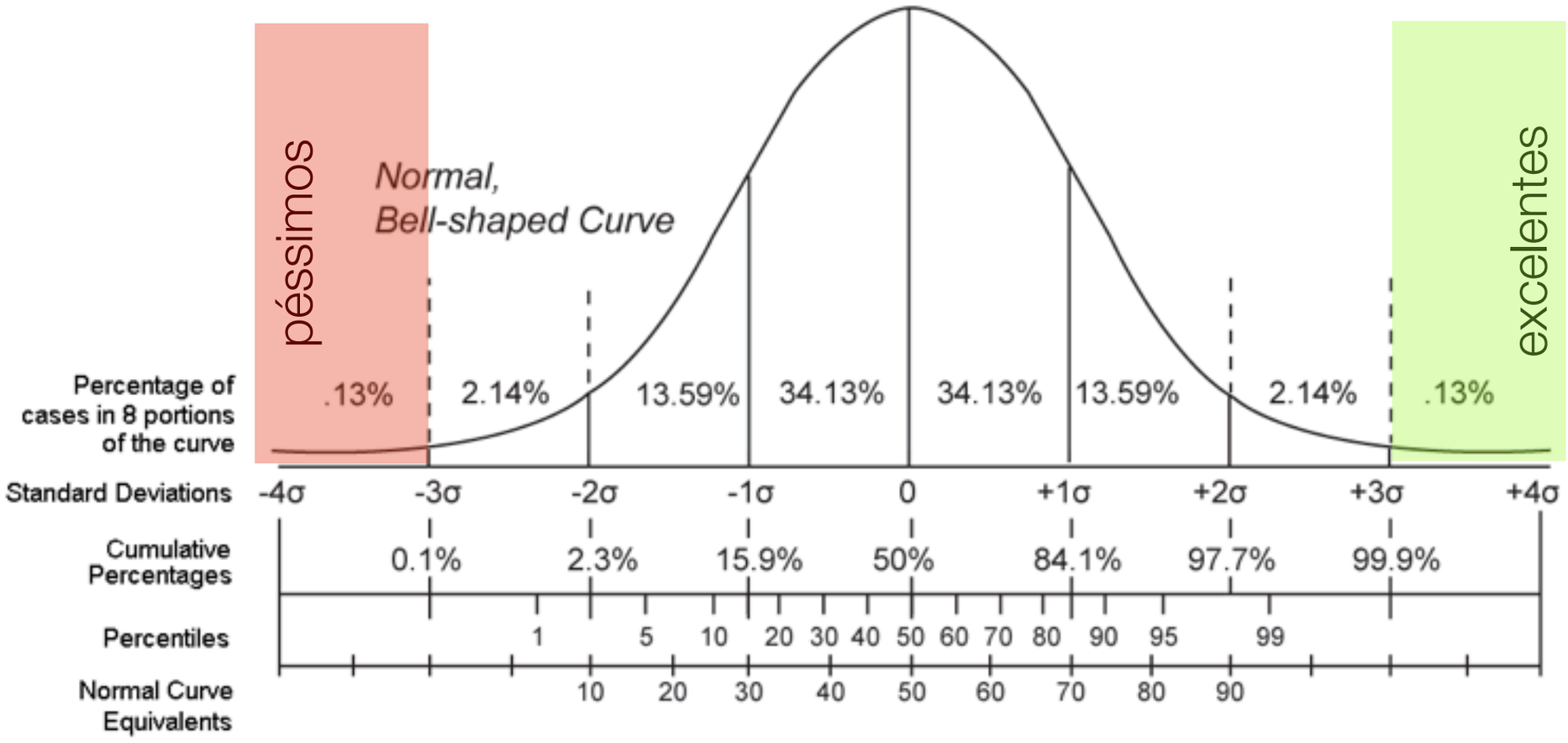
- É freqüente se pensar que motores de mesmo tamanho e tipo requererão o mesmo avanço de ignição. Entretanto, nem sempre este é o caso.

170 cm^3
4 cilindros boxer

5.000 cm^3
8 cilindros V

- Algumas vezes, um motor sai da linha de produção trabalhando melhor que outros.

- **Os fabricantes sempre desenvolvem o mapa de ignição para servir o motor que tolera o menor avanço de ignição** (pior caso).



Fatores a serem considerados: combustível: tipo e octanagem

- Quanto maior a octagem do combustível, mais avanço o motor tolerará (dentro do possível).

- O EECS *flex* funciona adaptando as condições de funcionamento do motor ao tipo de combustível queimado dentro dos cilindros.

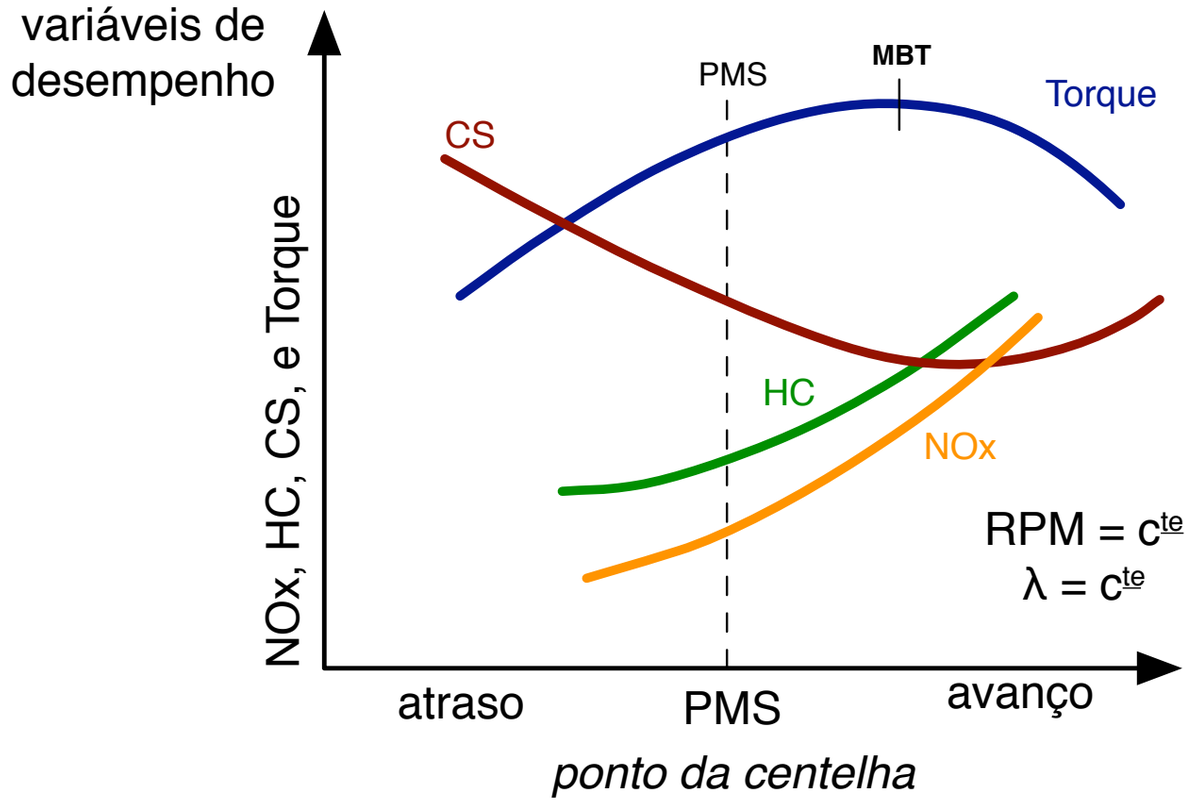
- Quando o motor está queimando etanol, o EECS avança o ponto da centelha.

- No caso do gasohol E25, o EESC precisa atrasar o ponto.

Objetivo do sistema de ignição

- **Extrair o máximo rendimento do motor mantendo o compromisso com emissões de gases poluentes e economia de combustível.**

- Para isso, queremos minimizar o intervalo de tempo que o evento da combustão expansiva ocorre aPMS enquanto o pistão comprime e espreme a mistura A/C.



- Se os gases já estiverem se expandindo enquanto o pistão ainda está comprimindo a mistura A/C aPMS, estaremos fazendo o pistão trabalhar mais.

- Queremos também que posição da pressão máxima no cilindro esteja localizada no mínimo a 12 a 25° dPMS a fim de conseguir um bom ângulo na biela para ajudar a girar o virabrequim.

- Se conseguirmos posicionar $P_{máx}$ para conseguir a máxima força, no ângulo correto entre a biela e o virabrequim, obteremos mais potência.

Caso 1: 16° aPMS (referência)

- Exemplo: RPM = 7800rpm
    - Velocidade da chama: 1,35m/s (λ ~ 1,15)
    - O tempo necessário para iniciar e terminar a combustão corresponde 30,85° de giro no virabrequim.
    - Se a centelha vier a 16° aPMS, $P_{máx}$ deverá ocorrer próximo dos 15° dPMS.
    - Esse é um bom ângulo para gerar torque.

Caso 1: 16° aPMS (referência)

- Exemplo: RPM = 7800rpm
    - Velocidade da chama: 2,2m/s (λ ~ 0,90)
    - O tempo necessário para iniciar e terminar a combustão corresponde 18,93° de giro no virabrequim.
    - Se a centelha vier a 16° aPMS, $P_{máx}$ deverá ocorrer próximo dos 3° dPMS.
    - Esse é um bom ângulo para gerar torque, mas já está no limite.

Caso 2: 18° aPMS (+2° avanço)

- Exemplo: RPM = 7800rpm
  - Velocidade da chama: 1,35m/s (λ ~ 1,15)
  - O tempo necessário para iniciar e terminar a combustão corresponde 30,85° de giro no virabrequim.
  - Se a centelha vier a 18° aPMS, $P_{máx}$ aparecerá próximo dos 13° dPMS. $P_{máx}$ aumentará. Ainda assim, é bom.
  - Porém, uma parte maior da combustão ocorrerá durante a compressão da mistura A/C.

Caso 2: 18° aPMS (+2° avanço)

- Exemplo: RPM = 7800rpm

  - Velocidade da chama: 2,2m/s (λ ~ 0,90)

  - O tempo necessário para iniciar e terminar a combustão corresponde 18,93° de giro no virabrequim.

  - Se a centelha vier a 18° aPMS, $P_{máx}$ aparecerá próximo dos 1° dPMS. $P_{máx}$ aumentará, e....

  - ... neste caso, uma parte considerável da combustão ocorrerá com o pistão comprimindo a mistura A/C.

Caso 3: 22° aPMS (+6° avanço)

- Exemplo: RPM = 7800rpm
  - Velocidade da chama: 1,35m/s (λ ~ 1,15)
  - O tempo necessário para iniciar e terminar a combustão corresponde 30,85° de giro no virabrequim.
  - Se a centelha acontecer a 20° aPMS, $P_{máx}$ ocorrerá em torno dos 9° dPMS. ↑$P_{máx}$ que ocorrerá com um certo alinhamento entre pistão, biela e virabrequim.
  - A maior parte da combustão ocorreu aPMS.

Caso 3: 22° aPMS (+6° avanço)

- Exemplo: RPM = 7800rpm

  - Velocidade da chama: 2,2m/s (λ ~ 0,90)

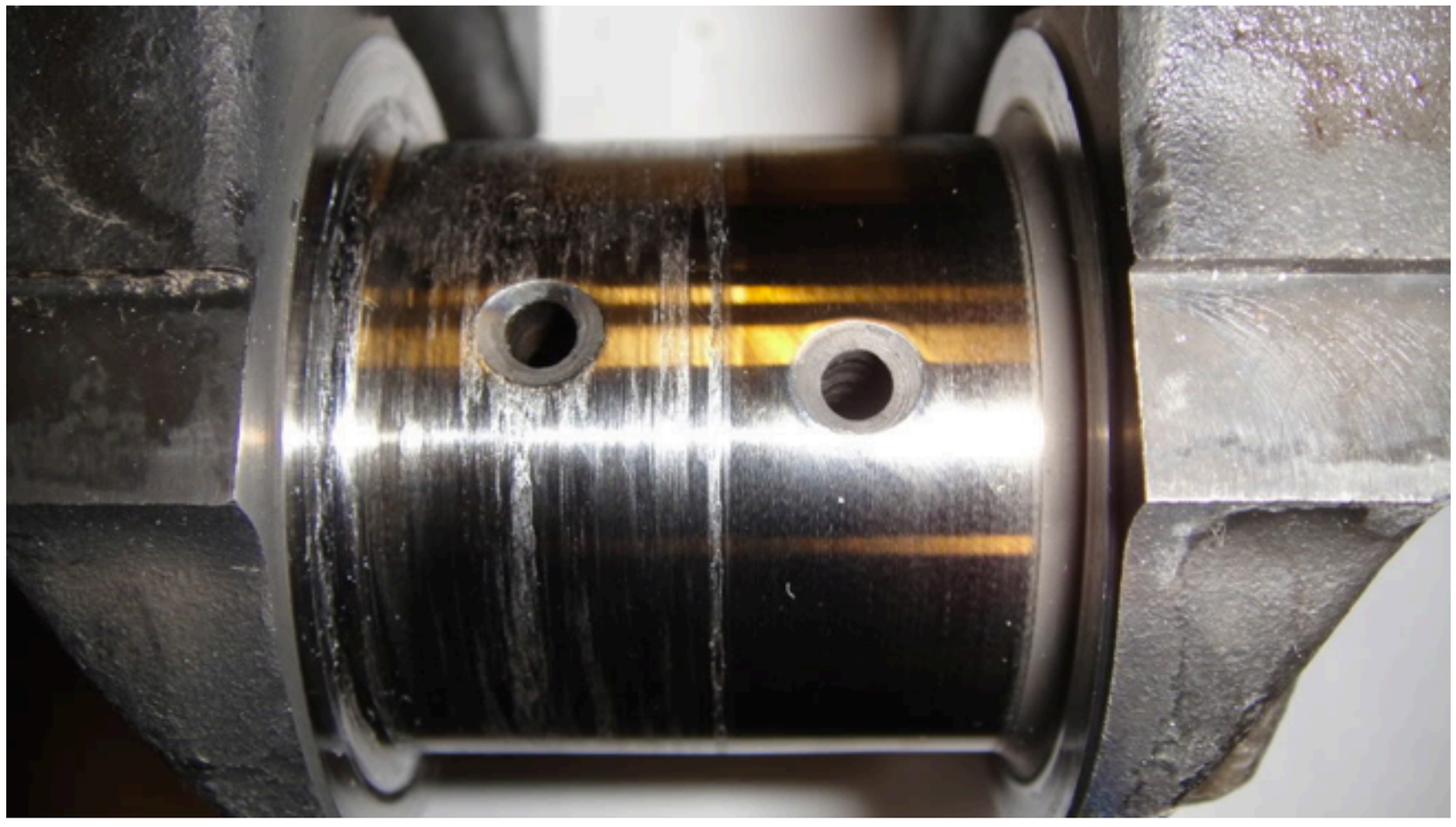
  - O tempo necessário para iniciar e terminar a combustão corresponde 18,93° de giro no virabrequim.

  - Se a centelha acontecer a 20° aPMS, a $P_{máx}$ estará quase no PMS.

  - A ocorrência da detonação está muito favorecida.

- Pressões elevadas no cilindro comprometem a vida útil dos componentes.

- Provocam desgaste prematuro e podem iniciar uma auto-ignição (uma combustão expontânea e fora de hora).



conclusões

1. Durante o avanço, adiantamos o início do processo de ignição. O valor de $P_{máx}$ cresce se movimenta-se para mais próximo do PMS.

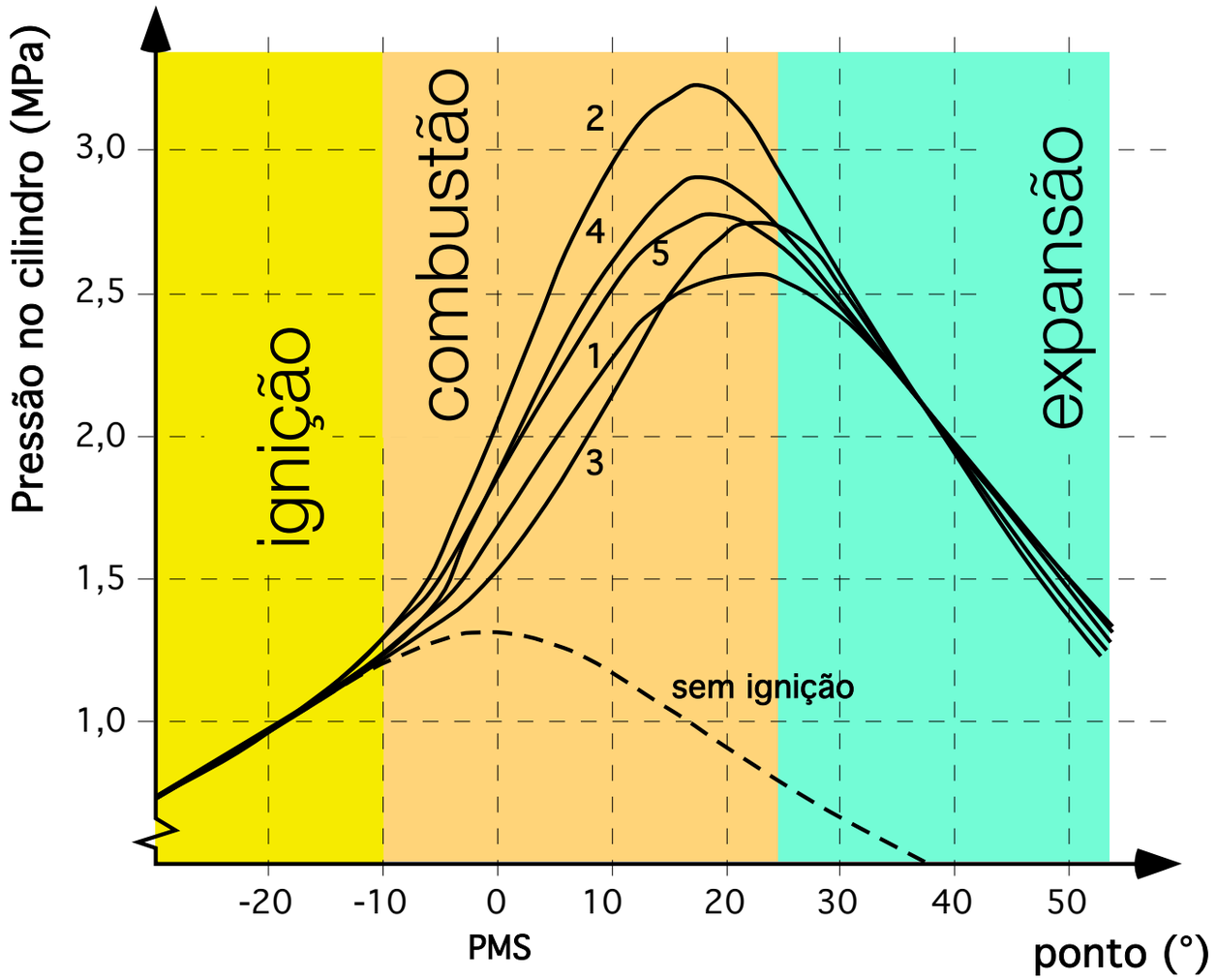
2. Se o movimento produzir um ângulo favorável entre biela e virabrequim, consegue-se maior potência.

3. Se o avanço for excessivo, pode-se favorecer o alinhamento pistão-biela-virabrequim. O valor de $P_{máx}$ e a temperatura maior poderão favorecer o aparecimento da autoignição.

- Se o avanço continuar a aumentar, $P_{máx}$ e T crescerão ainda mais aumentando o risco da autoignição e diminuirá a vida útil do motor.

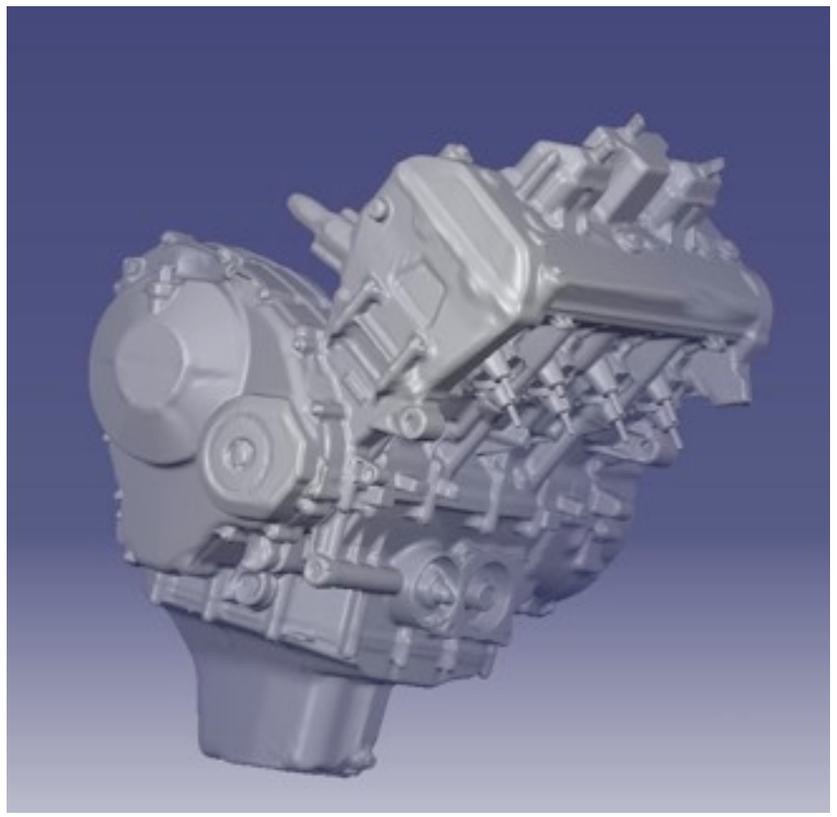
- O melhor caminho é descobrir o avanço mínimo que garanta $P_{máx}$ entre 12 a 25° dPMS.

- Neste caso, o pistão fará menos esforço e porá menor tensão nos componentes da parte inferior do motor.



Exercício: motor Honda CBR600 F

- dados do motor:
  a. cilindrada: 599 cm^3, 4 cilindros.
  b. potência máxima: 71HP (52,9kW) @ 11.500 rpm.
  c. torque máximo: 59 Nm @ 7.500 rpm.
  d. BSFC: 248,5 g/kW-h @ 9.000 rpm
  e. A/C: 12,5:1 (potência máxima)
  f. curso X diâmetro (mm): 42,5 x 67
  g. combustível: gasolina *premium E10*



Exercício: motor Honda CBR600 F

- dados do motor:

h. ordem de explosão: 1 - 2 - 4 - 3

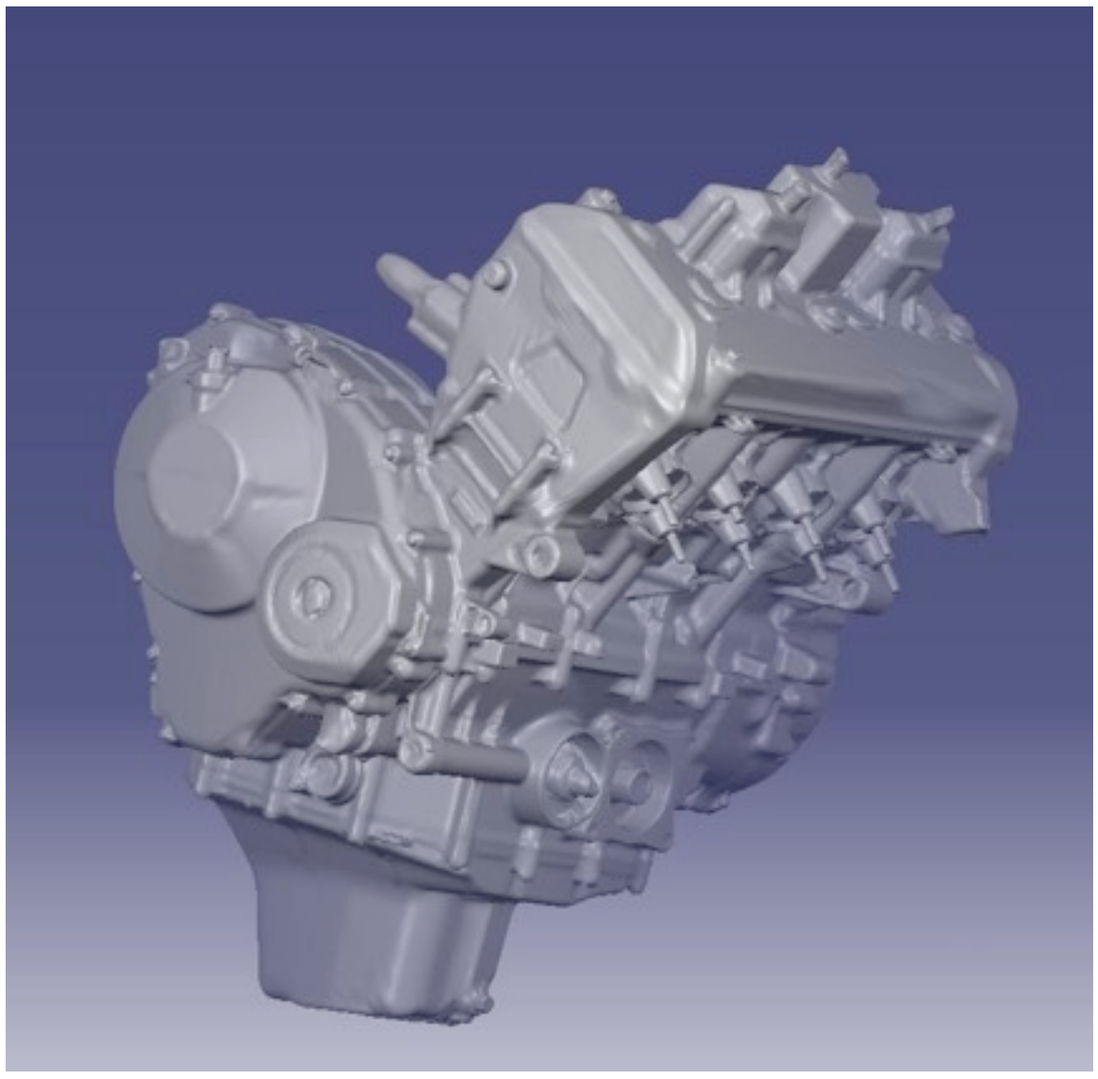
i. admissão: 22°aPMS e 43°dPMI.

j. exaustão: 40°aPMI e 5°dPMS.

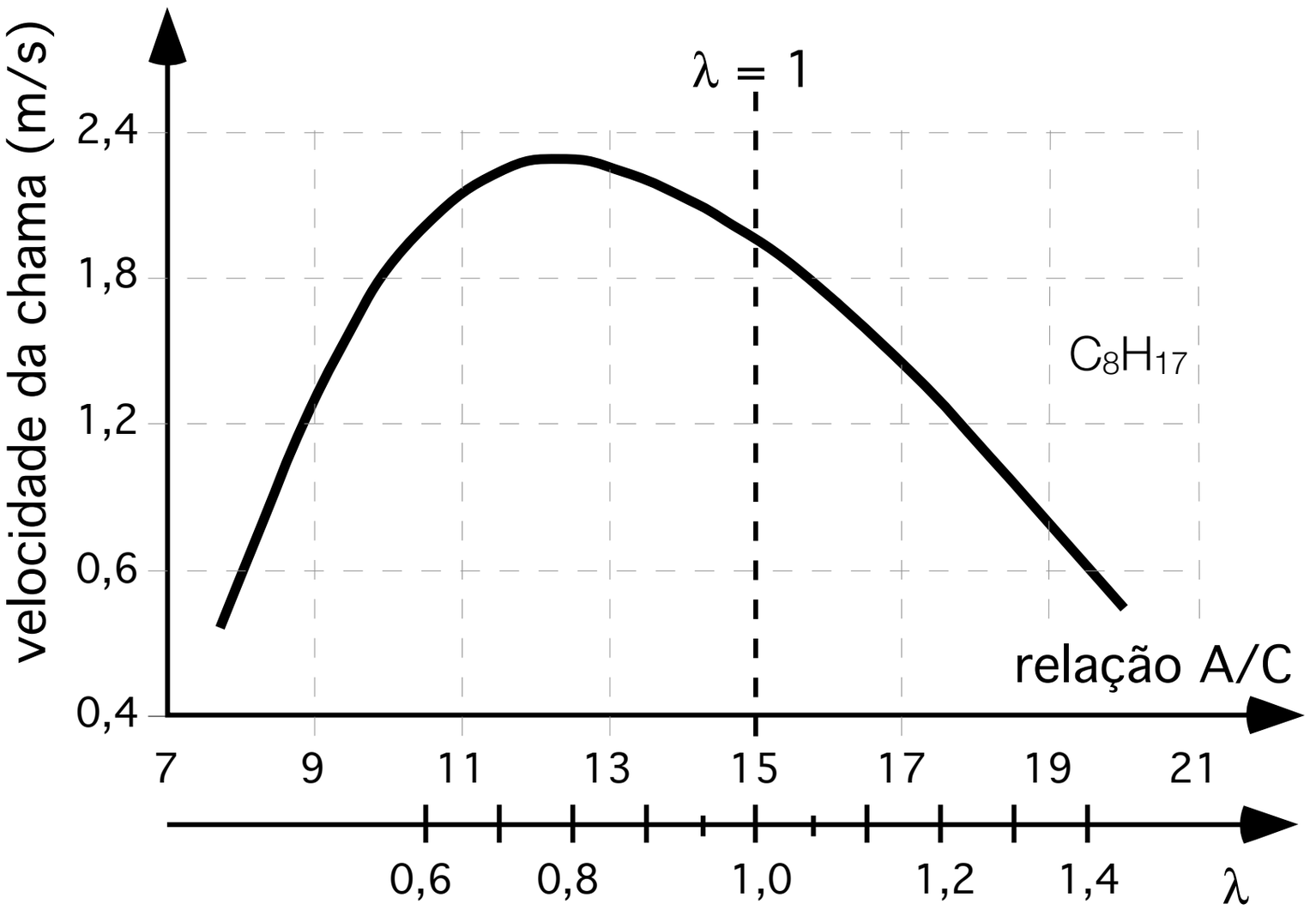
k. corpo da borboleta: 40mm (original)

l. taxa de compressão: 12,2:1

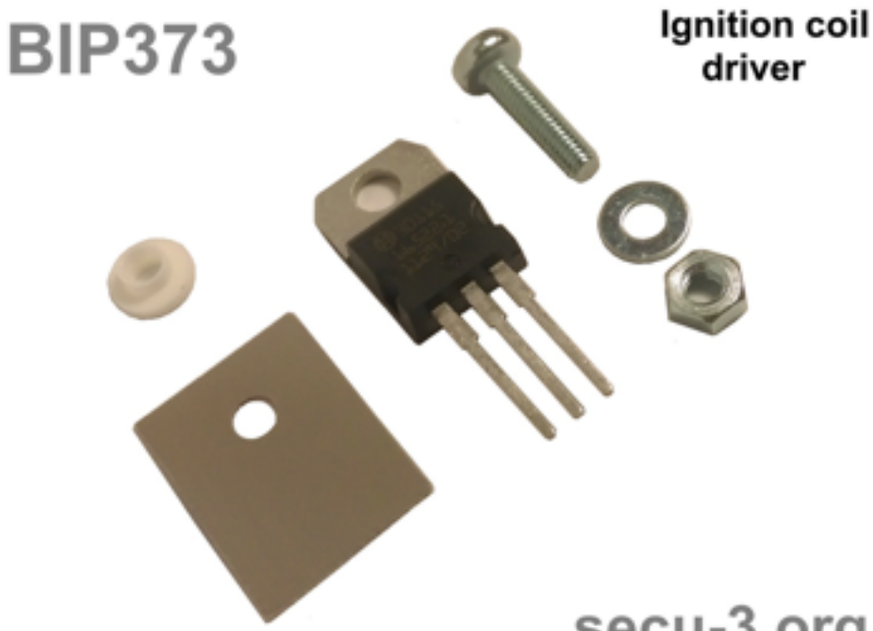
m. distância entre eletrodo central e cabeça do pistão: 2,4mm.

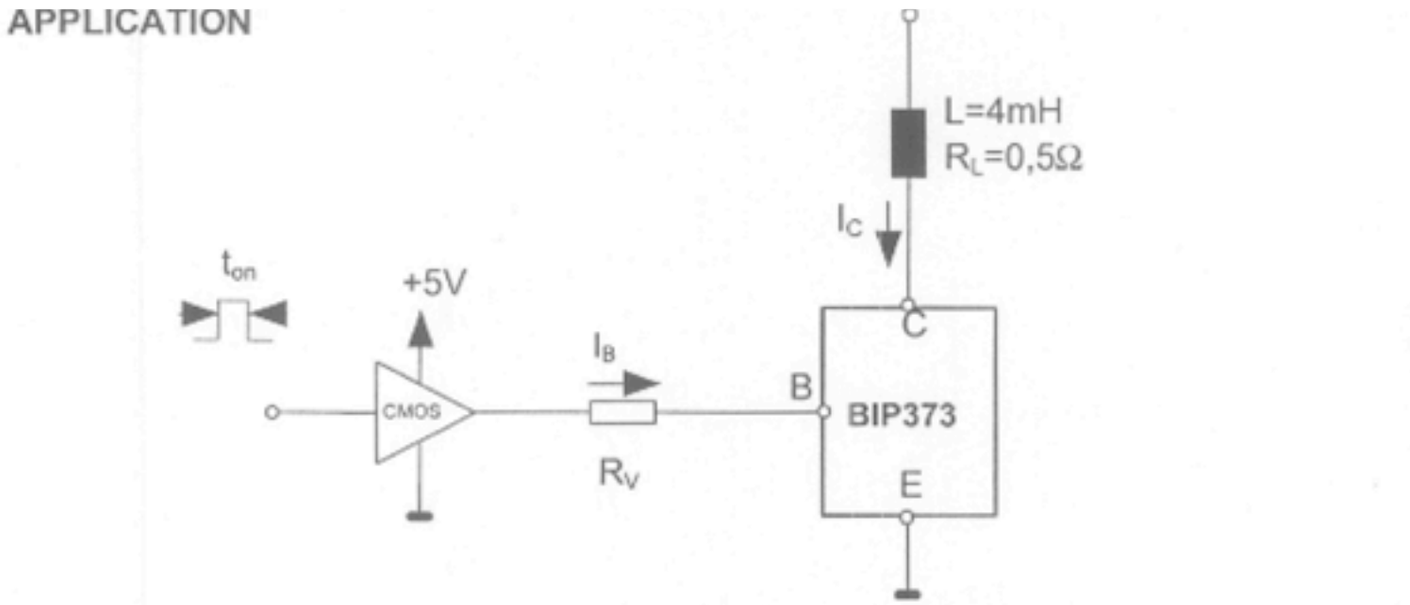


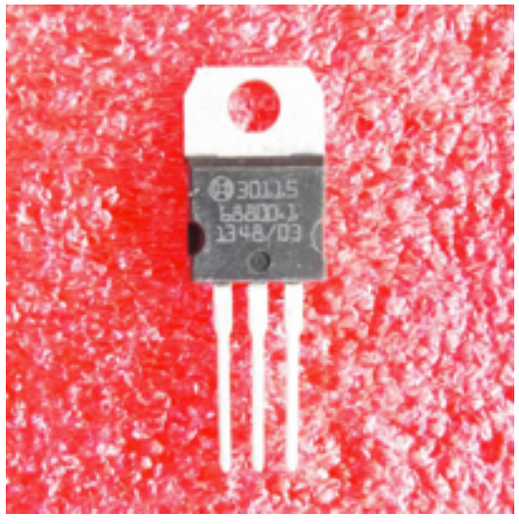
- Seguindo a orientação dada anteriormente, estabeleça os limites teóricos para o avanço da centelha do motor CBR600 considerando a faixa de rotações do motor entre 3.000 a 12.000 rpm e fator lambda entre $0,85 < \lambda < 1,05$.



Circuitos Eletrônicos



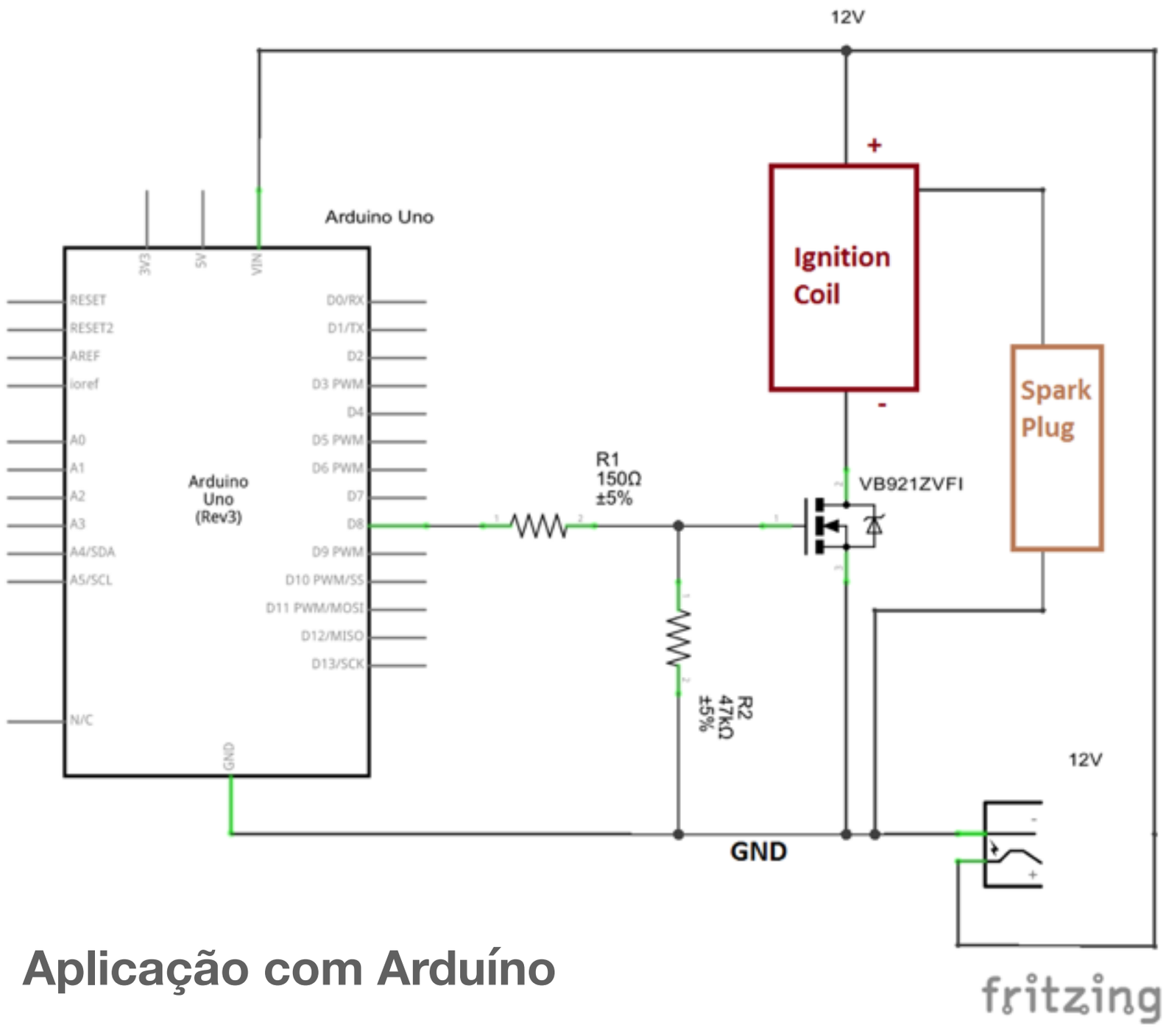




Bosch BIP373 Coil Driver

- Rv = resistor 330 Ohms

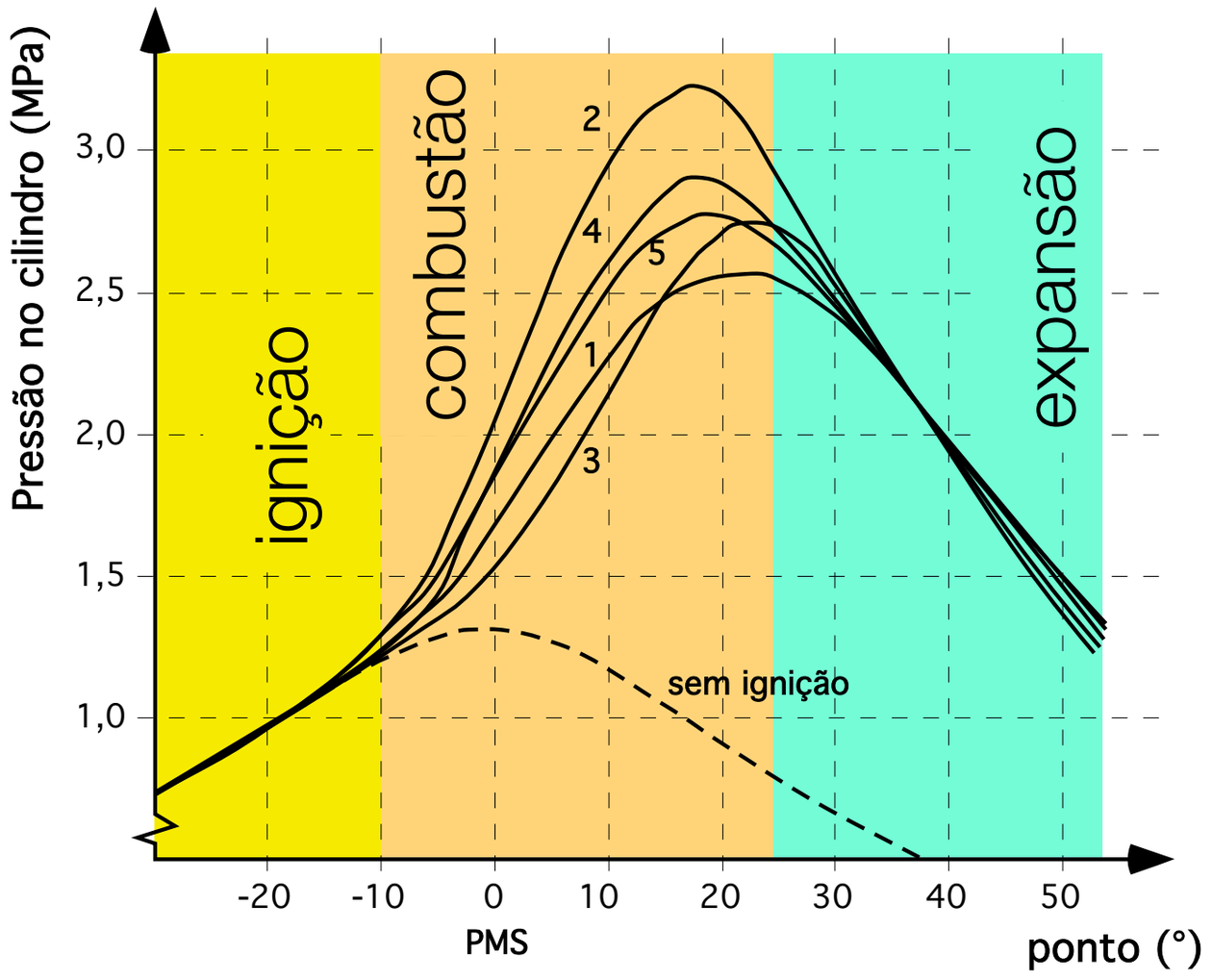
- **STT VB921** (*HIGH VOLTAGE IGNITION COIL DRIVER POWER I.C.*)



Aplicação com Arduíno

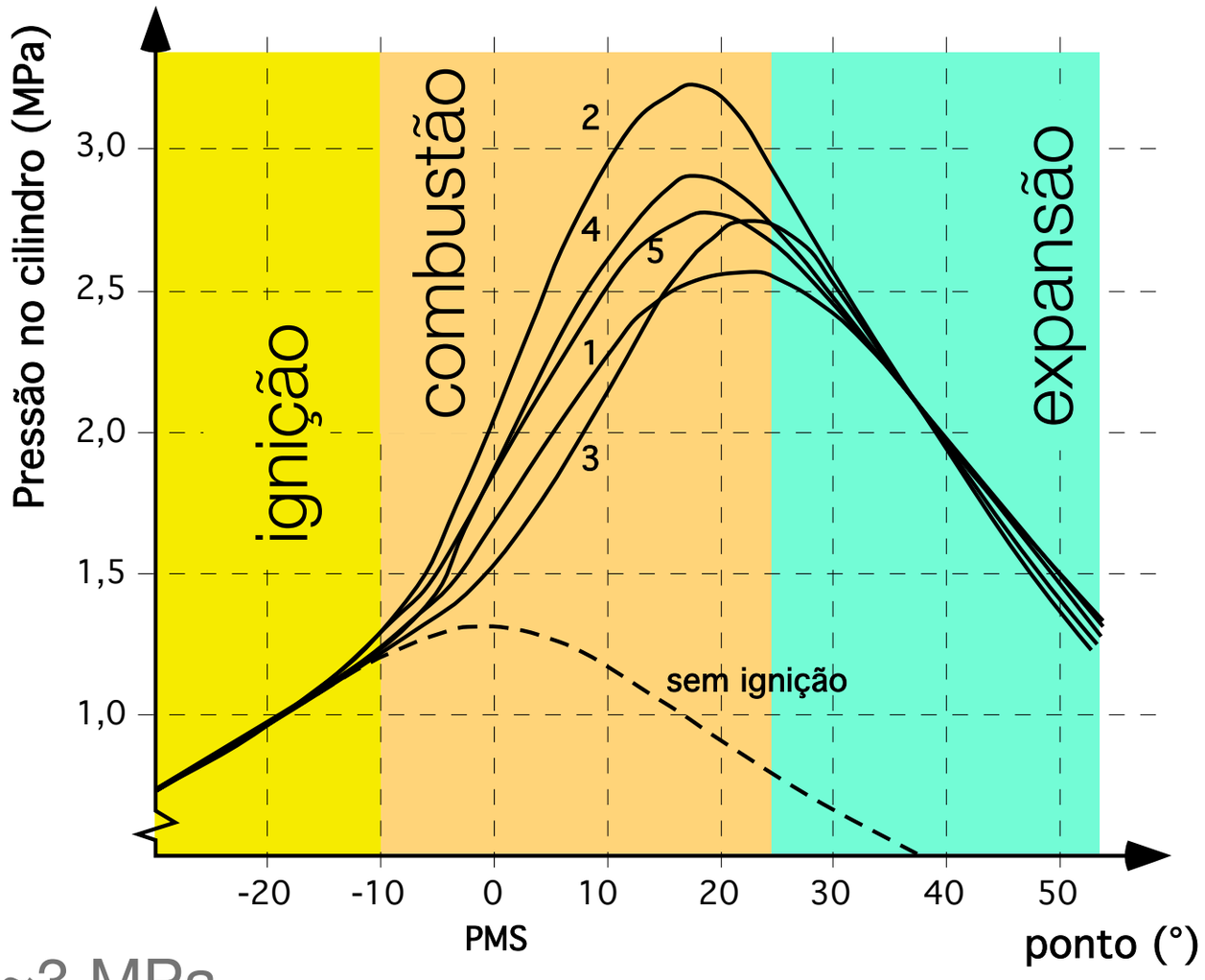
Considerações Complementares

- Considerando novamente o gráfico da pressão:



- Sabermos que a pressão máxima acontece entre ~15 e ~25° dPMS e que esta posição <u>não depende</u> de rotação e carga*.

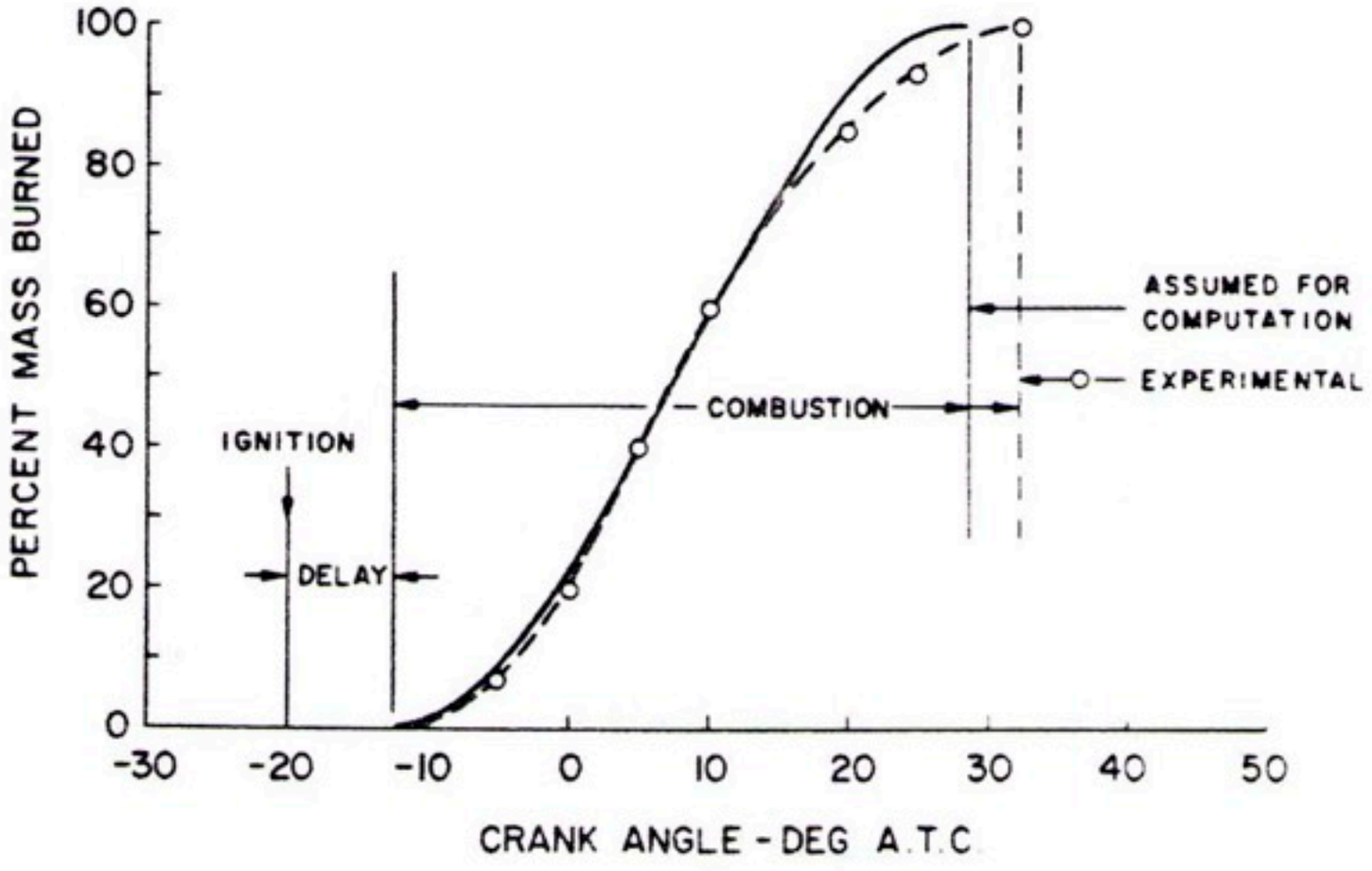
- O modelo matemático para cálculo do torque médio supõe que a pressão age como um pulso retangular que acontece entre o PMS e a posição onde a pressão é máxima.



- A intensidade da pressão é de ~3 MPa.

Modelo Matemático de Huber&Brown

- Huber & Brown (1965) da Ford propuseram um modelo teórico baseando-se num trabalho anterior de Wallace e Robinson (1962).



- O atraso da ignição L_α é dado por:

$$L_\alpha = \left[\frac{\left(\frac{A}{C} - 12{,}5\right)^2}{1{,}1} + 5 \right] f_L$$

em que:

f_L = fator do atraso da ignição ~ 0,8

- A duração do período de combustão Θ_α é dada por:

$$\theta_\alpha = \frac{45}{\left[1+\left(\frac{\left(\frac{A}{C}\right)_{esteq}-\left(\frac{A}{C}\right)}{10}\right)^2\right] f_v}$$

em que:

f_v = fator da velocidade de queima ~ 0,5784

- A porcentagem da massa de combustível queimada dentro da câmara é dada por:

$$Burn_{\alpha} = 0{,}5\left\{1-\cos\left[4\left(1+\left(\frac{\left(\frac{A}{C}\right)_{esteq}-\left(\frac{A}{C}\right)}{10}\right)^{2}\right)\left(\int \omega\, dt + L_{\alpha}\right)\right]\right\}$$

em que:

$P_{cilindro}$ = pressão no cilindro em kPa;

$\int \omega dt$ = posição do virabrequim a partir do início da combustão.
Para $\int \omega dt < L_{\alpha}$, $Burn_{\alpha} = 0$.

- A geometria do pistão, biela e virabrequim é importante.

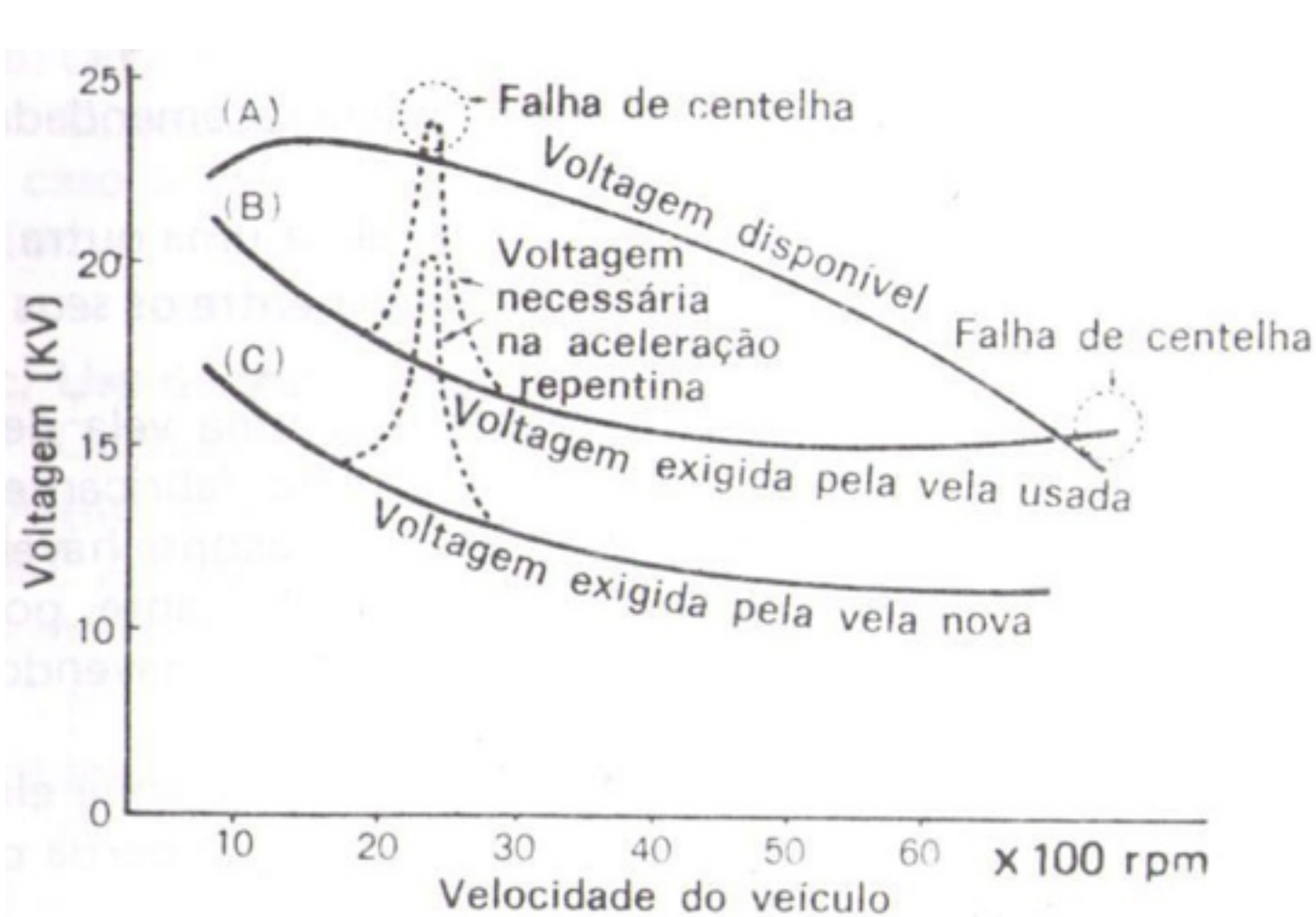
- Numa dada posição angular do virabrequim a posição do pistão é dada pela relação:

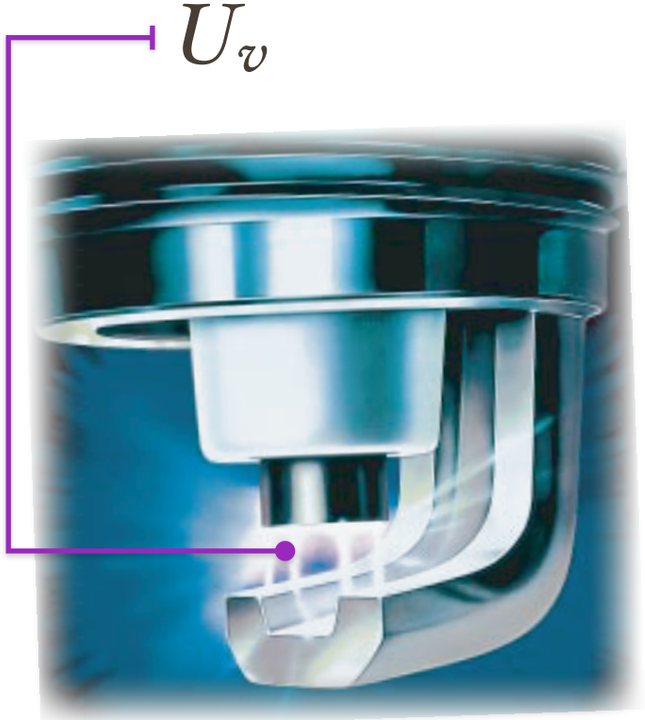
$$y_{pistão} = l\left(1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{l^2}\operatorname{sen}^2\theta}\right) + r\left(1 - \cos\theta\right)$$

l = comprimento da biela;
r = raio do virabrequim;
θ = posição angular do virabrequim. No PMS, $\theta = 0$.

U_V tensão necessária x U_b tensão disponível

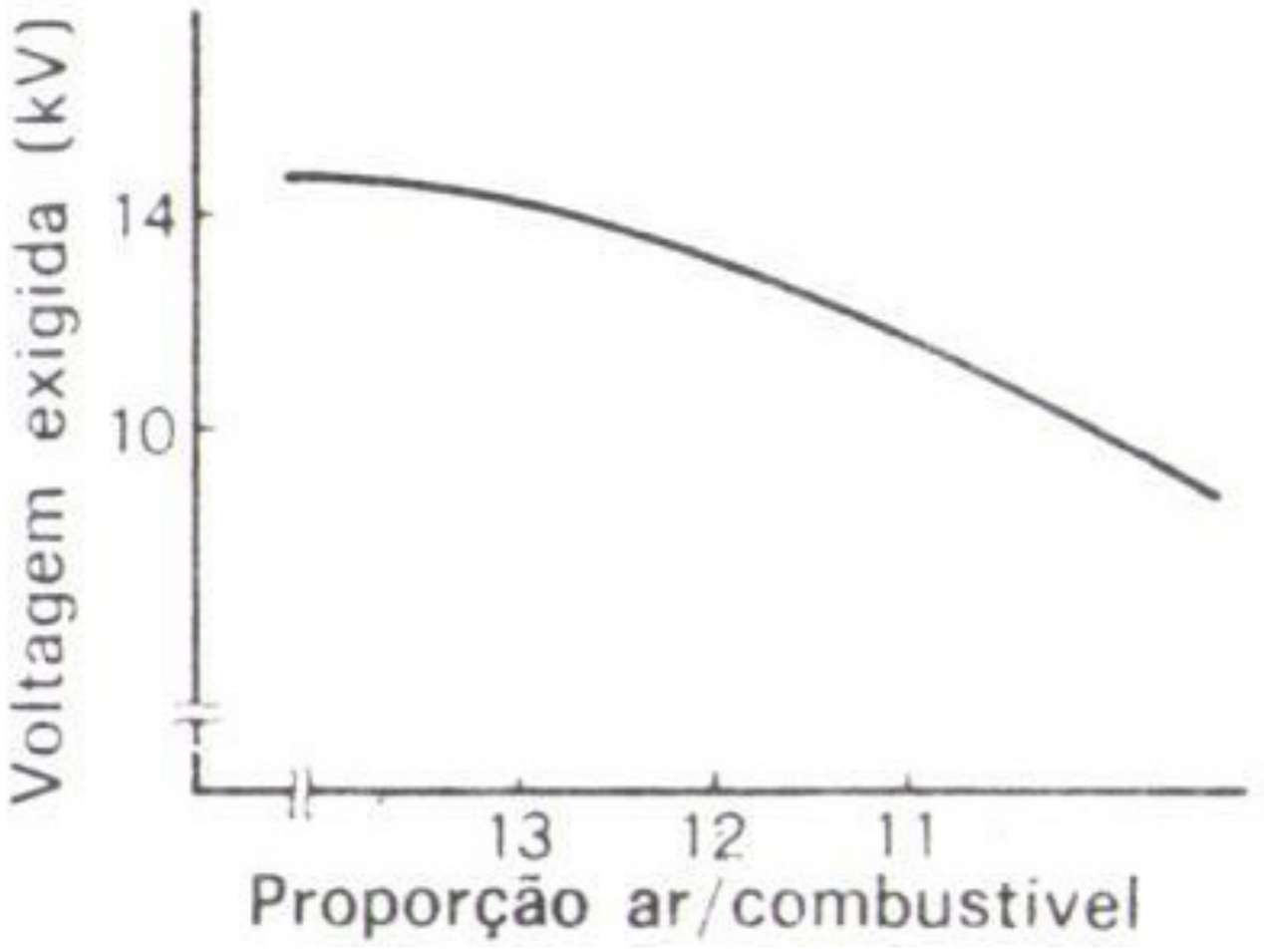
- Se $U_b < U_v$, haverá dificuldade para a centelha saltar entre eletrodos e portanto, comprometimento no funcionamento no motor.

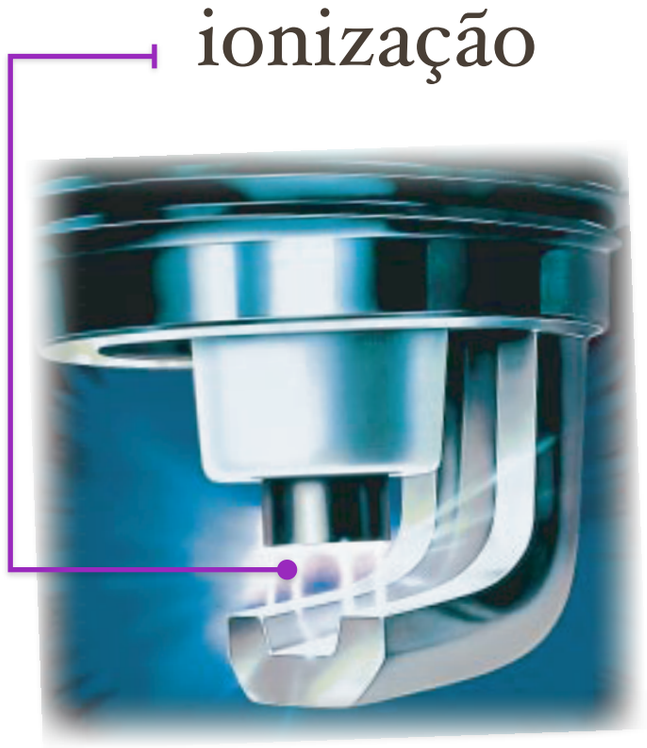


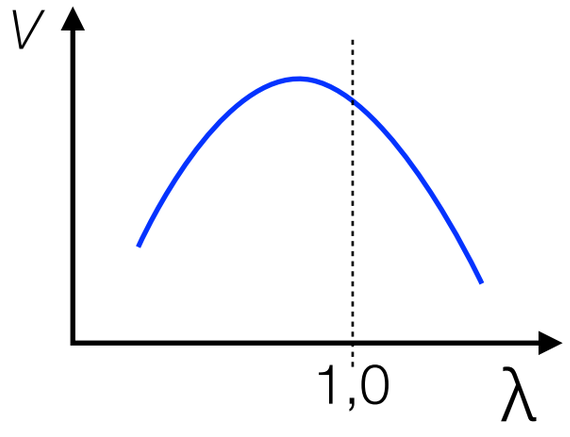


U_v tensão necessária x (A/C) razão ar-combustível

- O enriquecimento da mistura, até certo ponto, aumenta a velocidade da combustão e favorece a combustão.

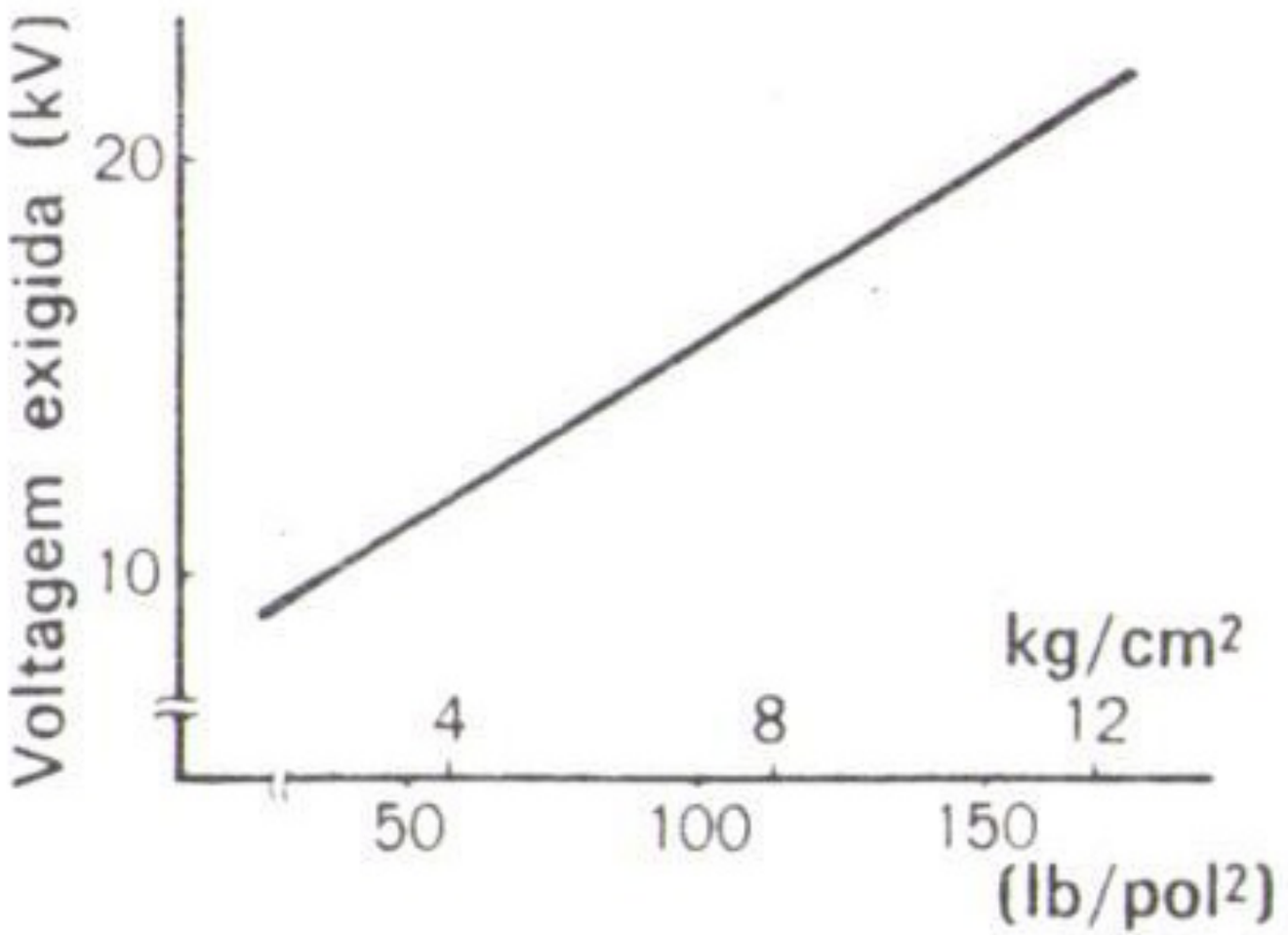






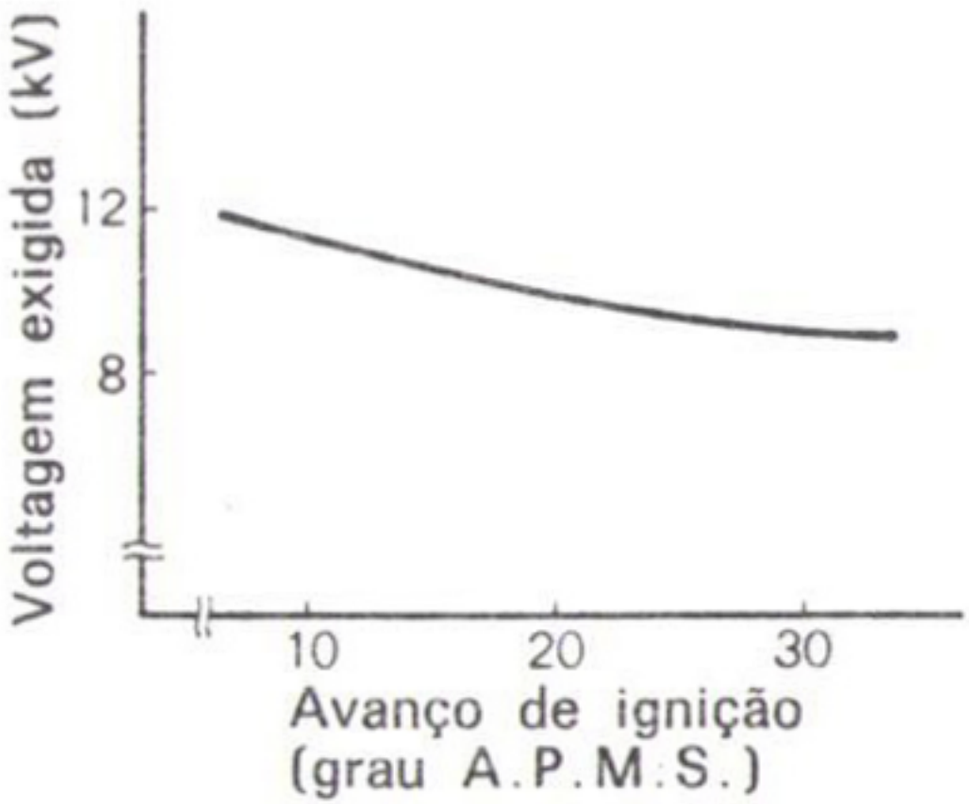
U_V tensão necessária x pressão de compressão

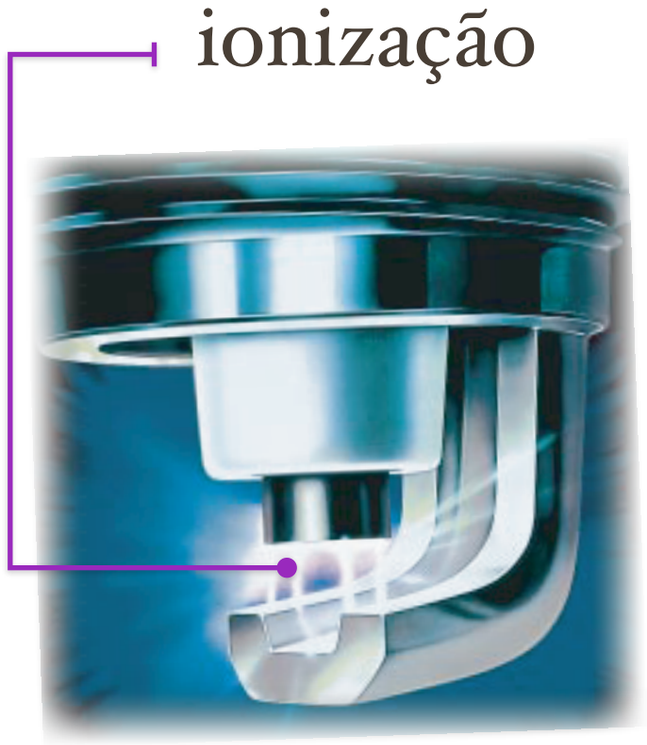
- O aumento da pressão no cilindro dificulta a combustão.



U_V tensão necessária x avanço da centelha

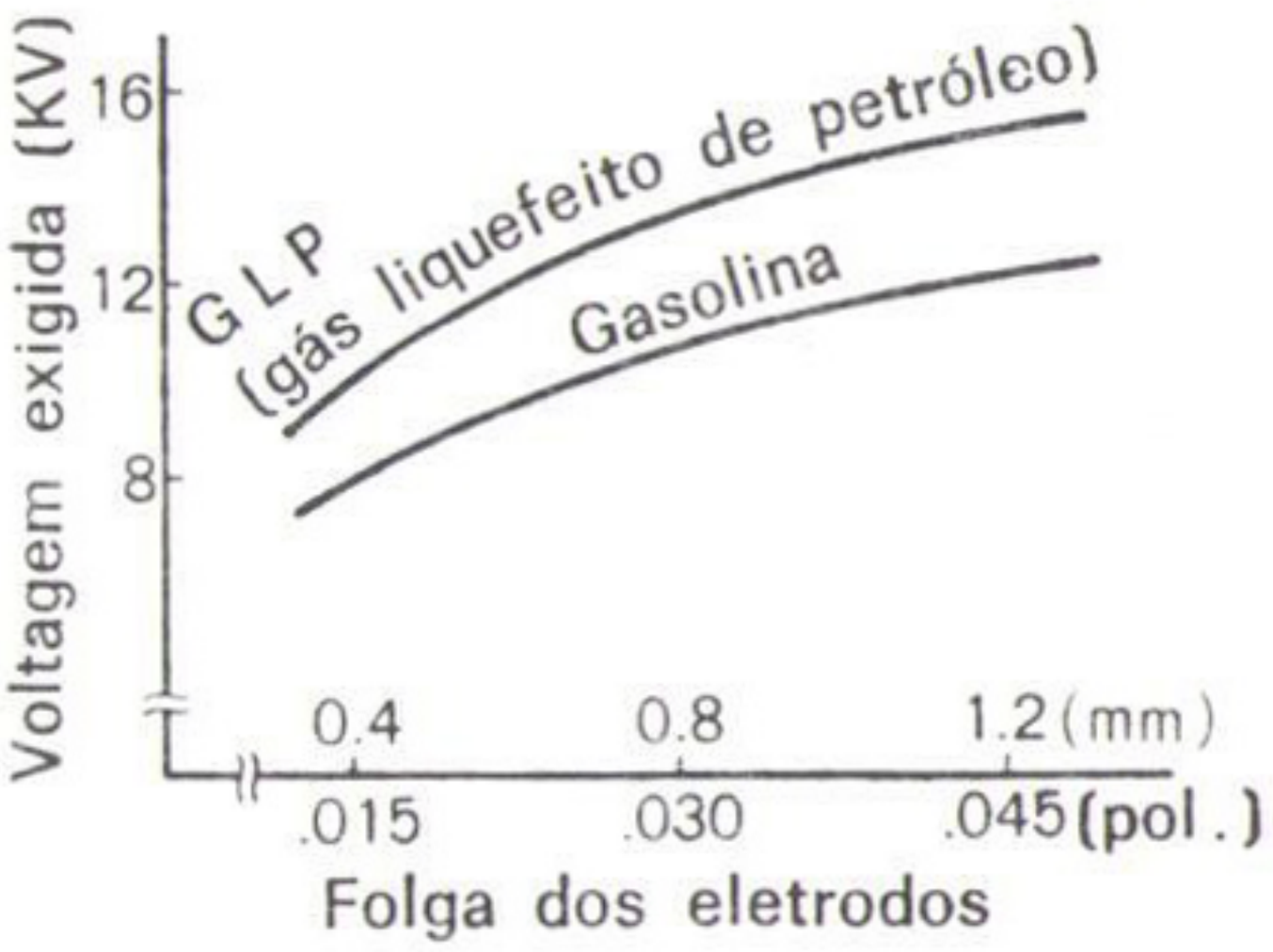
- Quando aumentamos o avanço da centelha, a combustão se dará a uma menor pressão no cilindro, que como visto anteriormente, requer menor tensão para formar a centelha na vela.





U_V tensão necessária x folga dos eletrodos

- O aumento da folga do eletrodo aumenta o dielétrico e com isso, a tensão necessária para o salto da centelha.

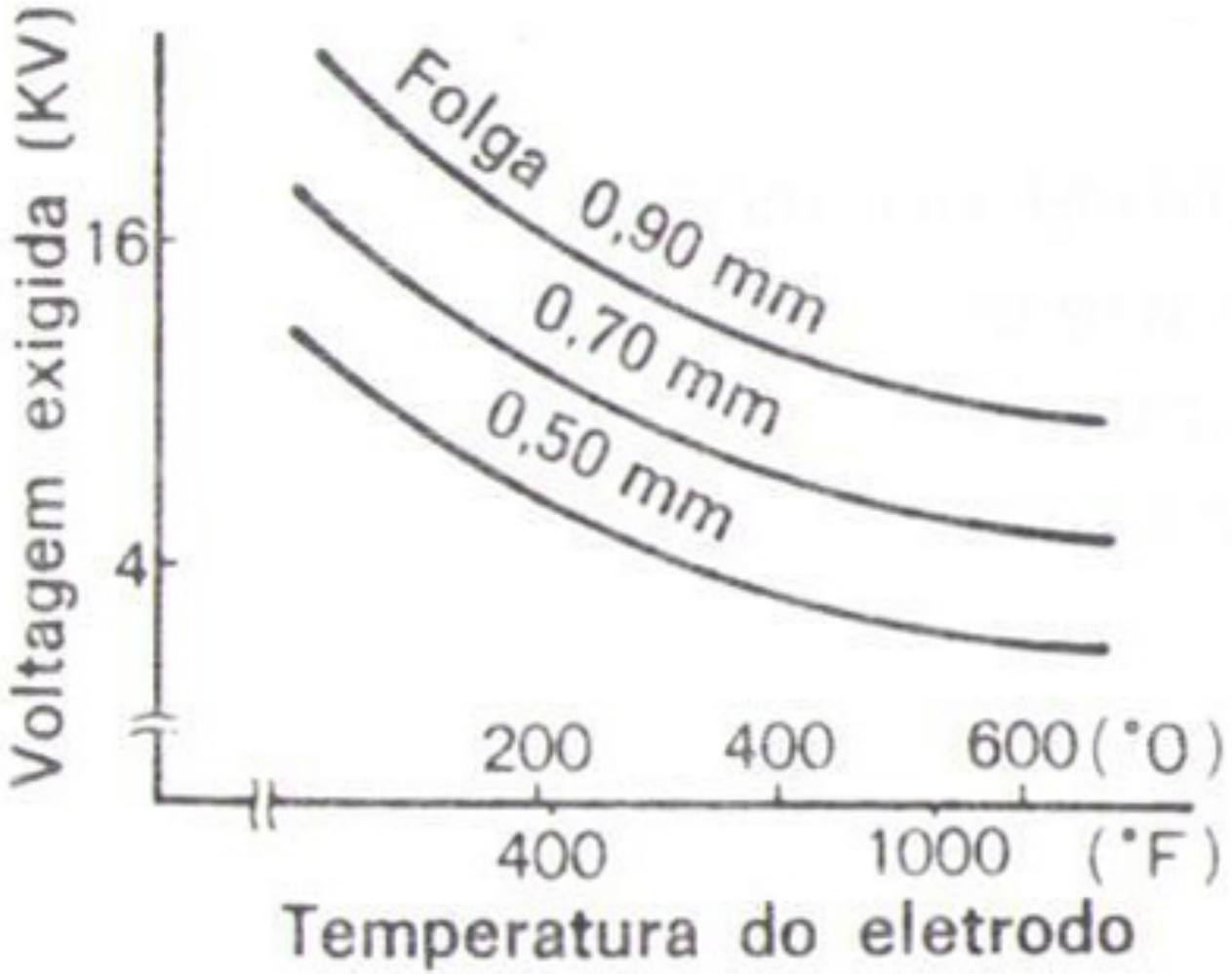


U_V tensão necessária x desgaste dos eletrodos

- O aumento da folga do eletrodo aumenta o dielétrico e com isso, a tensão necessária para o salto da centelha.

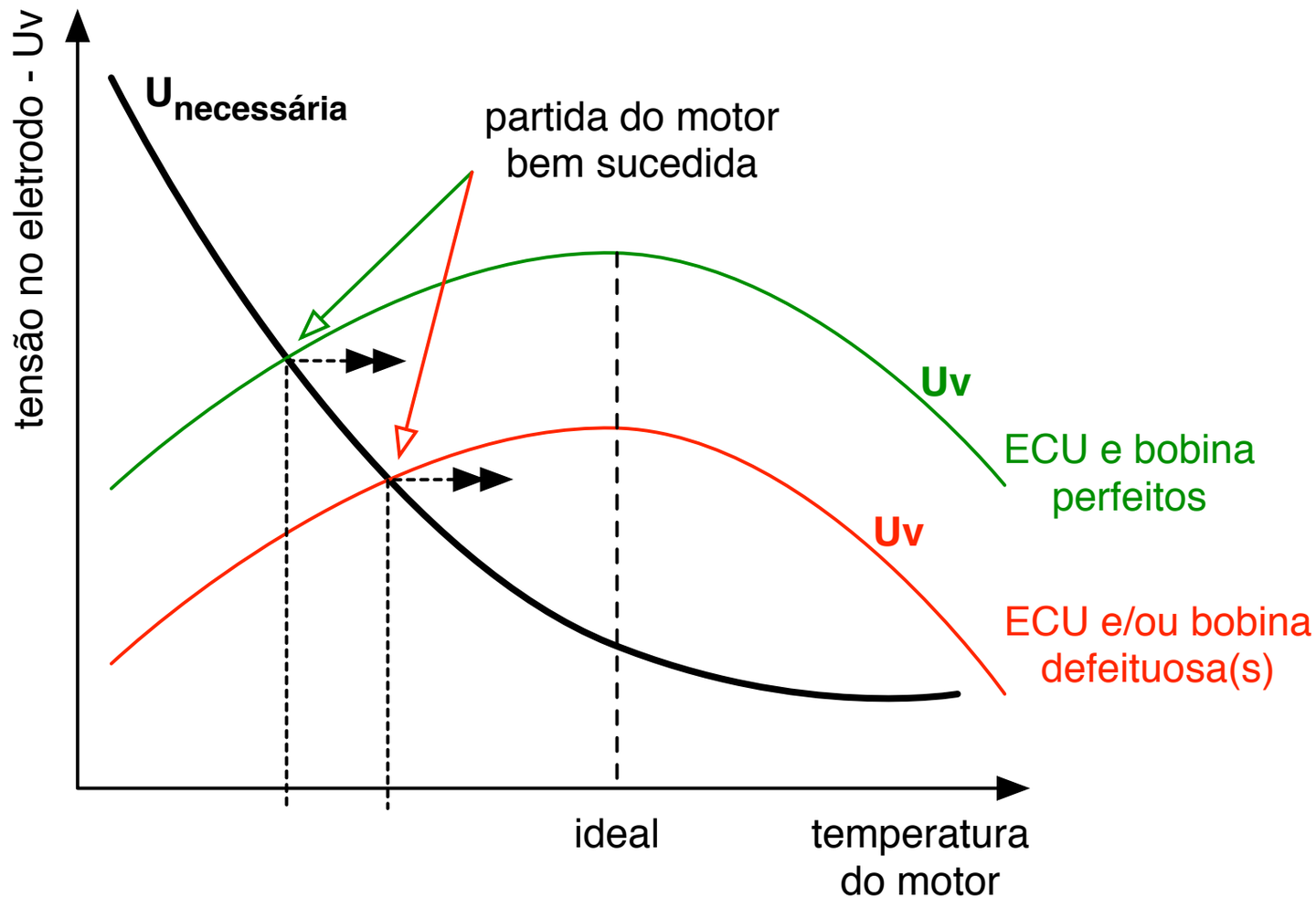
U_V tensão necessária x temperatura dos eletrodos

- A temperatura na câmara de combustão influi favoravelmente na velocidade da combustão.

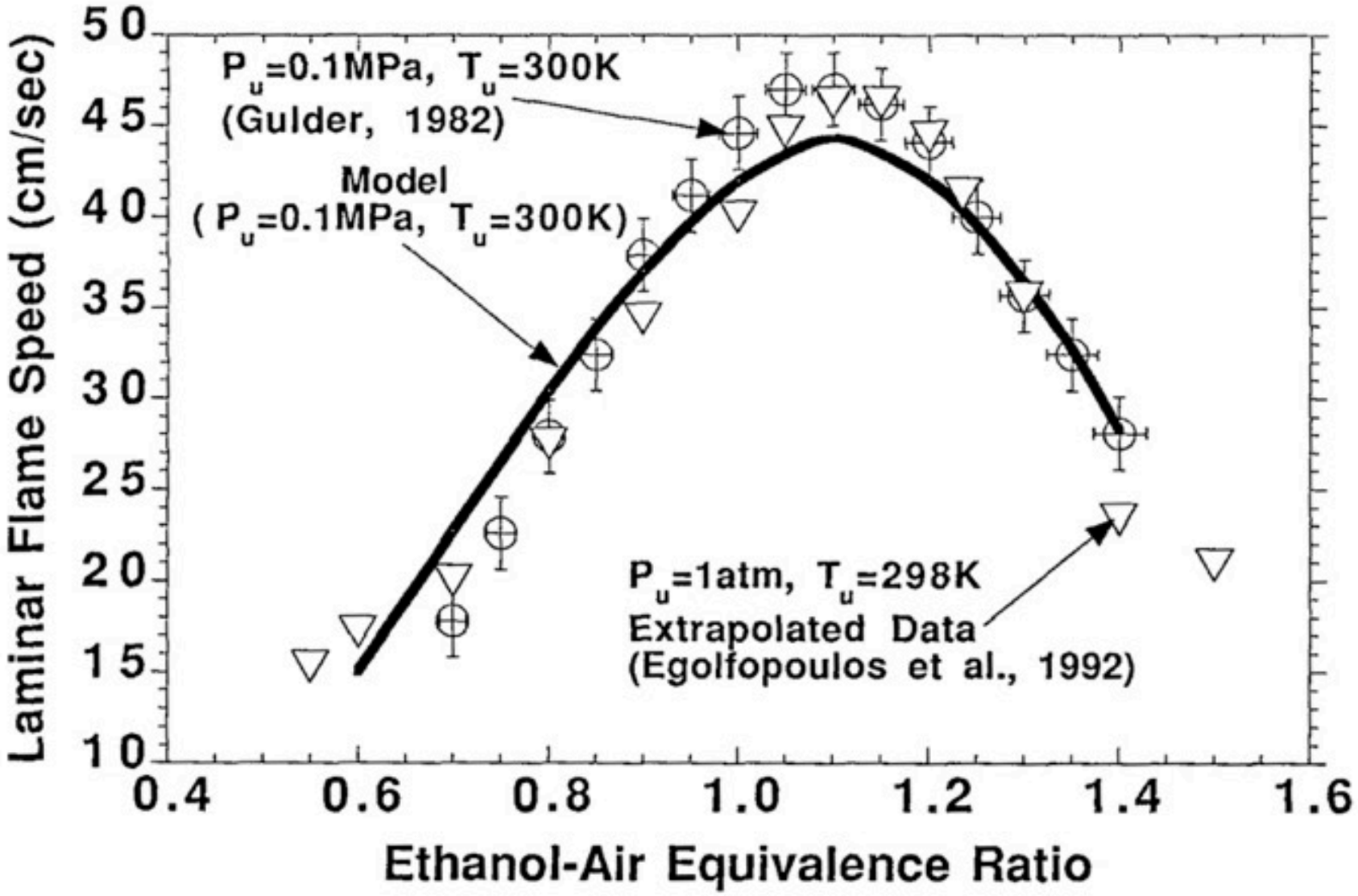


U_V tensão necessária x temperatura do motor

- A temperatura de funcionamento do motor e o estado da ECU influem na velocidade da combustão.



Velocidade da Frente de Chama para o Etanol



Velocidade da Frente de Chama para o Etanol

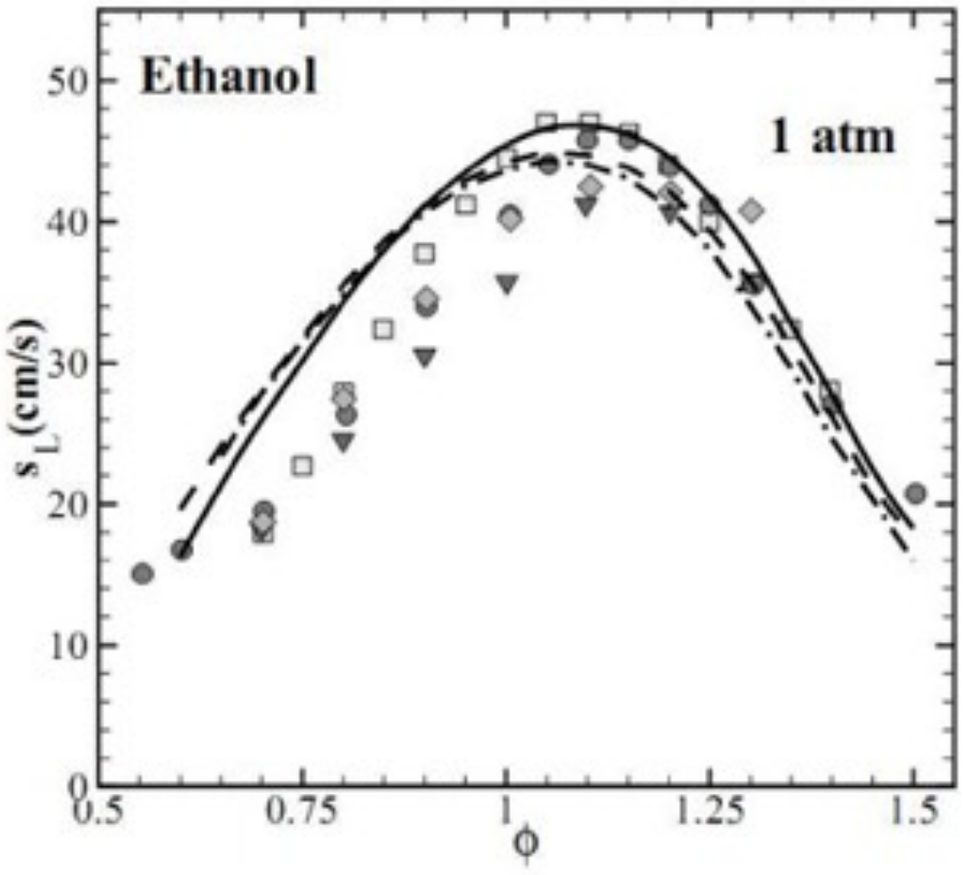
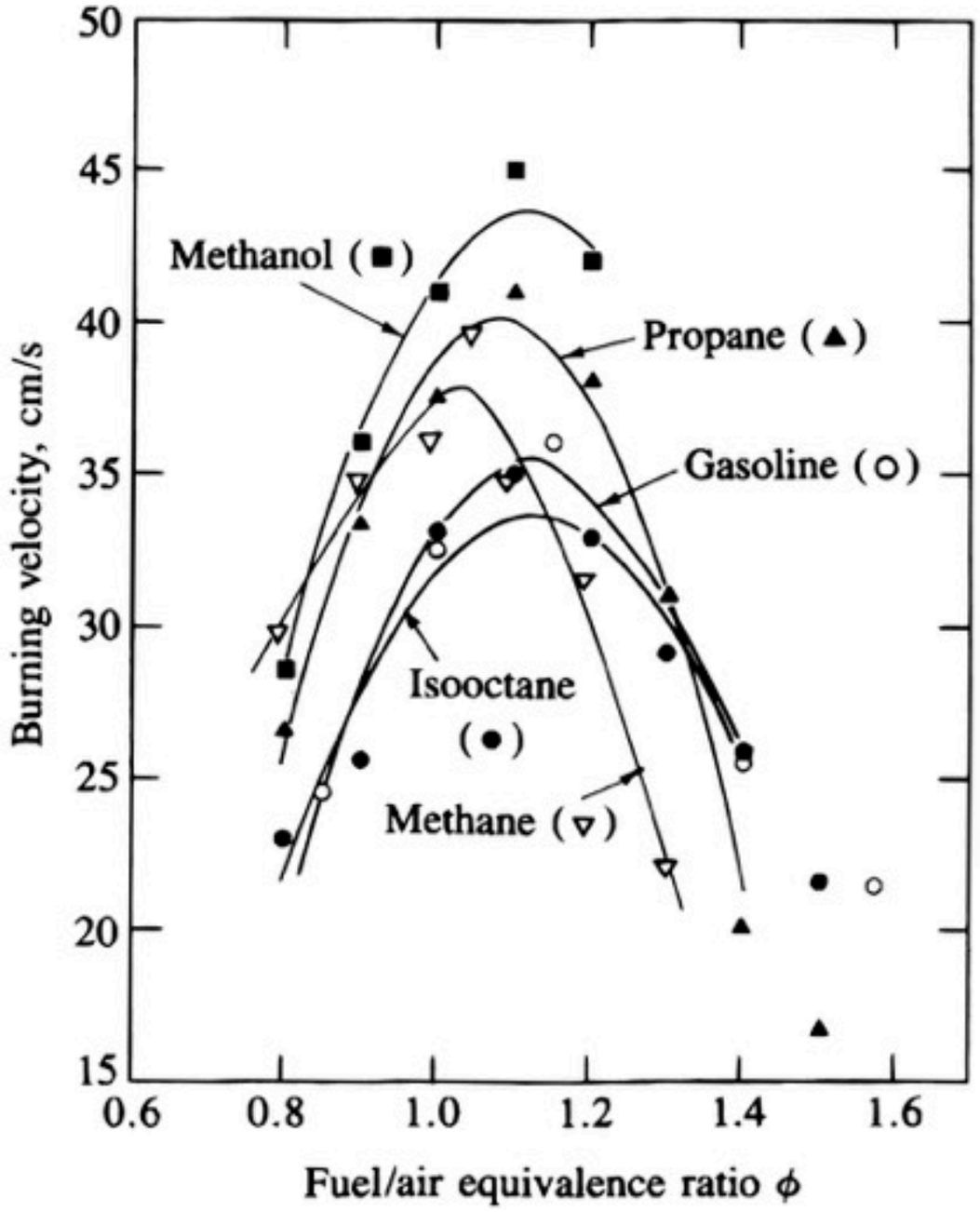
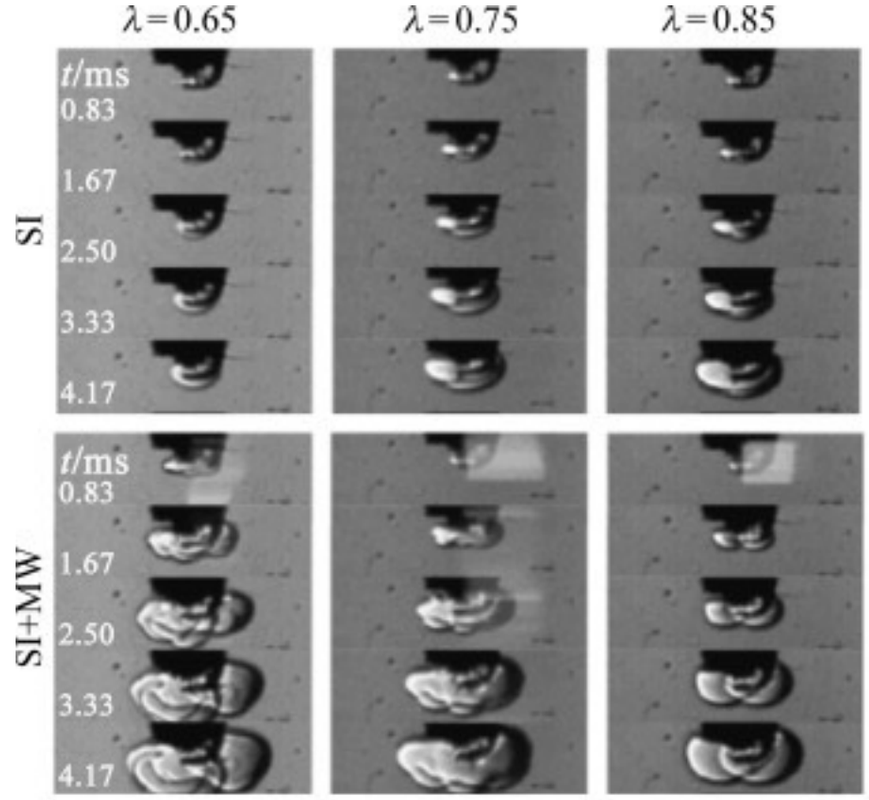


Figure 6. Comparisons among the simulated (lines) and calculated (dots) of the premixed laminar burning velocity in the oxidation of ethanol with air at 1 atm and 300 K. — San Diego 20051201 (Williams, 2005); − − Rohl and Peters (2007); – · – Marinov (1997, 1999); □ Gulder (1982); ○ Egolfopoulos et al. (1992); ▽ Bradley et al. (2009); and ◊ Meuwissen (2009).

Outros Combustíveis



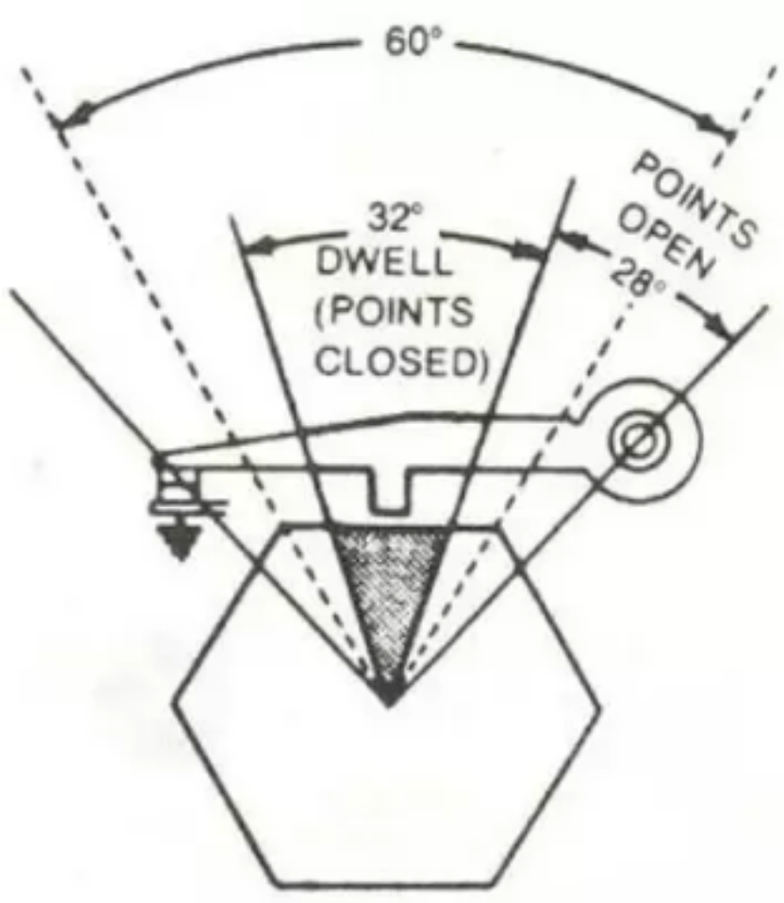


Dwell (tempo de permanência)

- *Dwell* em sistemas de ignição refere-se ao período de tempo em que a bobina está ligada. Ou seja, é o período de tempo que a corrente flui através do enrolamento primário da bobina.

- Nos sistemas antigos de contatos (com platinado), *dwell* é o período em que os contatos estão fechados.

- Nos sistemas modernos, é o período em que o transistor de potência permanece ligado.



O *dwell* é medido em graus do virabrequim. A **folga dos contatos do platinado** determina o ângulo do *dwell* independente da RPM do motor

COP *Carbon Tracking*

- É o nome que se dá a um tipo de fuga provocada por mau isolamento, seja na cerâmica da vela, no isolante do cabo ou da bobina.