

### 3 Aparato Experimental

A utilização da MCR permite estudar o comportamento dos combustíveis quando são testados em processos de combustão por compressão ou ignição por centelha. A MCR está instalada no Laboratório de Engenharia Veicular (LEV) da Universidade (PUC-Rio). Esta máquina é capaz de operar de forma rápida e fácil, simulando ciclos Otto e Diesel. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram uma foto da MCR e seu esquema de operação, respectivamente.

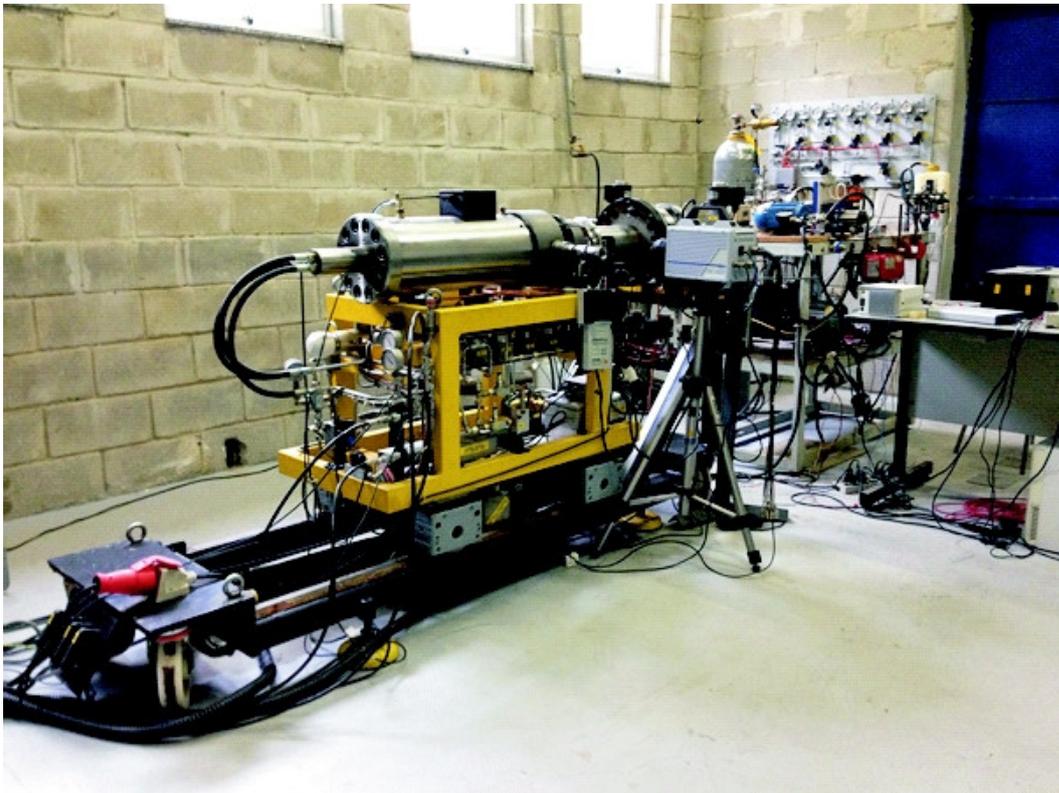


Figura 3.1: MCR instalada no LEV (PUC-Rio).

A máquina de compressão rápida executa um único processo de compressão e um processo de expansão parcial para cada teste. Possui acessos óticos por baixo do pistão ou por janelas laterais. Desta forma, possibilita estudos detalhados da injeção, vaporização, ignição, frente de chamas e com-

bustão como um todo. A Tabela 3.1 resume as principais especificações da MCR.

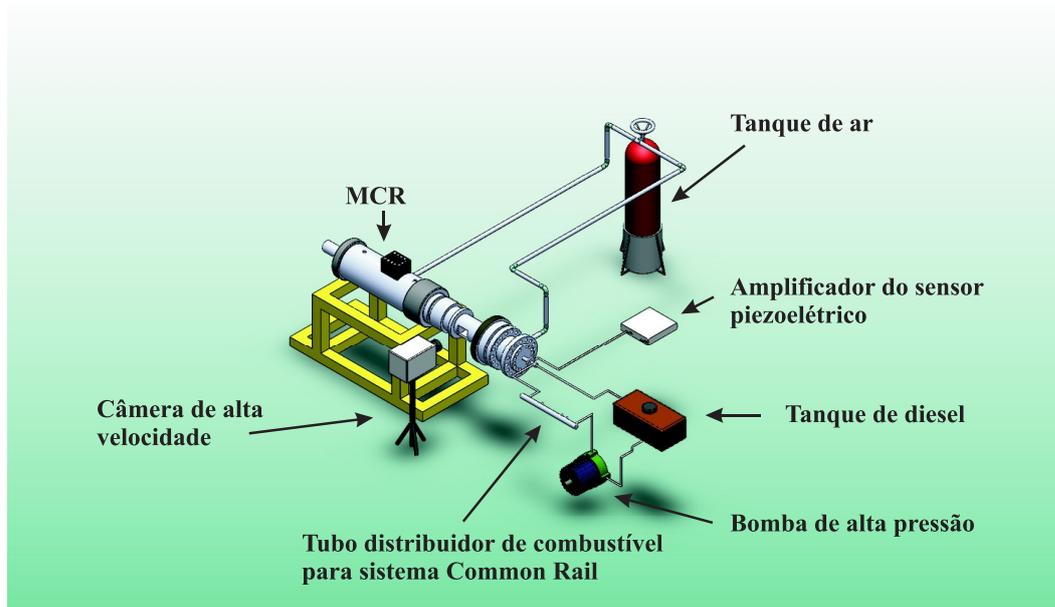


Figura 3.2: Adaptação e instalação da MCR para testes de ignição por compressão.

A operação deste equipamento pode ser explicada mediante três sistemas interligados com funções predeterminadas: pneumático, hidráulico e de injeção de combustível. O sistema pneumático controla o sistema de ar para o acionamento do pistão da MCR e fornece o ar para o processo de combustão. Basicamente é composto por um cilindro de armazenamento de ar comprimido, um compressor, transdutores de pressão e válvulas de controle e admissão. O sistema hidráulico é o encarregado das funções principais da MCR, o qual permite a geração do processo de compressão no teste e, também garantir a vedação entre o cabeçote e o corpo da MCR. Este sistema é composto por um reservatório de óleo, uma bomba de pistão, válvulas e sensores de alta pressão. O sistema de injeção é composto de um reservatório de combustível, uma bomba de alta pressão, um rail de alta pressão e o injetor instalado no cabeçote da MCR.

### 3.1

#### Bancada de Teste

O teste é iniciado uma vez que a pressão de acionamento do pistão e do ar no interior do cilindro, alcançam os valores determinados pelo usuário. A velocidade do pistão, no processo de compressão, é determinada pela pressão do ar no interior do cilindro, a pressão de acionamento do pistão e também

pela quantidade de óleo que flui dentro da MCR. A área de passagem do óleo é ajustável e permite que a MCR simule diferentes velocidades de rotação do motor. Em relação à mesma área de fluxo, as pressões de acionamento mais elevadas significam razões de compressão mais elevadas. A pressão de acionamento deve ser compatível com o curso do pistão para evitar danos mecânicos (choque entre o pistão e o cabeçote). O sistema de injeção de combustível pode operar com injetores de alta e baixa pressão de injeção. Este sistema está equipado com um controlador que permite ajustar a pressão e a duração da injeção de combustível. Adicionalmente, este sistema é capaz de controlar e coletar dados de diversos outros componentes, como um sensor de pressão indicada, a vela de ignição utilizada nos processos de ignição por centelha, outros injetores de combustível, bomba de alta pressão e, o mais importante, o sensor de posição.

A seguir se faz uma breve descrição dos componentes e partes principais da bancada de teste.

### 3.1.1 MCR

A Máquina de Compressão Rápida é o aparato utilizado no desenvolvimento desta tese. Como mencionado, a MCR é capaz de simular uma compressão única, incluindo parcialmente os processos de expansão de um motor, sob condições termodinâmicas iguais às de um motor real, dentro de um intervalo de  $\pm 40$  graus de ângulo de manivela próximos ao ponto morto superior. Permite estudo mais detalhado dos processos de injeção, vaporização das gotas de combustível, mistura ar-combustível, ignição e combustão, incluindo diagnóstico ótico, bem como coleta de dados de deslocamento do pistão e de pressão na câmara de combustão.

A concepção do funcionamento da MCR está baseada no movimento de dois pistões cilíndricos em direções opostas, montados de forma concêntrica como se mostra na Figura 3.3. Isto permite que haja um equilíbrio de massas e, conseqüentemente, uma drástica diminuição das vibrações, facilitando a coleta dos dados de forma mais precisa, através de diversos sensores da máquina. Além disso facilita a visualização dos fenômenos que ocorrem no interior da câmara de combustão [80].

A Figura 3.4 mostra a esquematização do processo de auto-ajuste da máquina, antes de uma compressão típica. O pistão responsável pelo equilíbrio de massa (3) pode ser ajustado a pressões entre 15 e 50 bar, reguladas via tubos de ar e, em seguida, pressionado em direção a válvula estranguladora (4). Enquanto isso, o pistão externo (2) se move para a área cilíndrica livre.

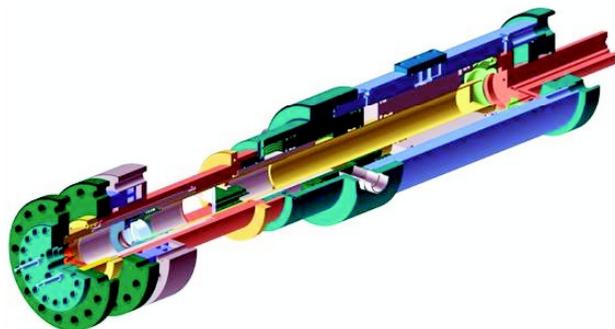


Figura 3.3: Desenho representativo do interior da MCR.

Fonte: Testem - Picture 1.1: Rapid compression machine RCM in sectional view with central parts Experimental area (above) and drive area [80].

Esta área contém um anel radial de vedação (5) que evita que o óleo, em baixa pressão, circule por esta área e impede que este escoe para fora desta região. O pistão principal (1) localiza-se no interior do pistão externo. O pistão externo neste momento se encontra no PMI (Ponto Morto Inferior), ou seja, no início da área onde ocorrem os experimentos.

A válvula Bypass (6), é uma válvula magnética, que funciona à base de óleo em baixa pressão. Esta está conectada à parte de fora do pistão externo e está fixada no interior da área cilíndrica livre. Uma vez aberta, o óleo começa a fluir nos tubos, dando início ao movimento do pistão principal, que é empurrado lentamente para fora da área cilíndrica livre. O processo da compressão rápida se inicia antes que o pistão externo retorne ao espaço cilíndrico livre, possibilitando assim a circulação do óleo, sem que o anel de vedação o restrinja. Então, o pistão externo, junto com trabalho do pistão principal, é acelerado em direção à cabeça do cilindro. Assim, durante o processo, o pistão principal permite que o óleo seja pressionado de fora para dentro do tubo, acelerando o pistão externo em direção ao ponto morto superior (início ao processo de compressão).

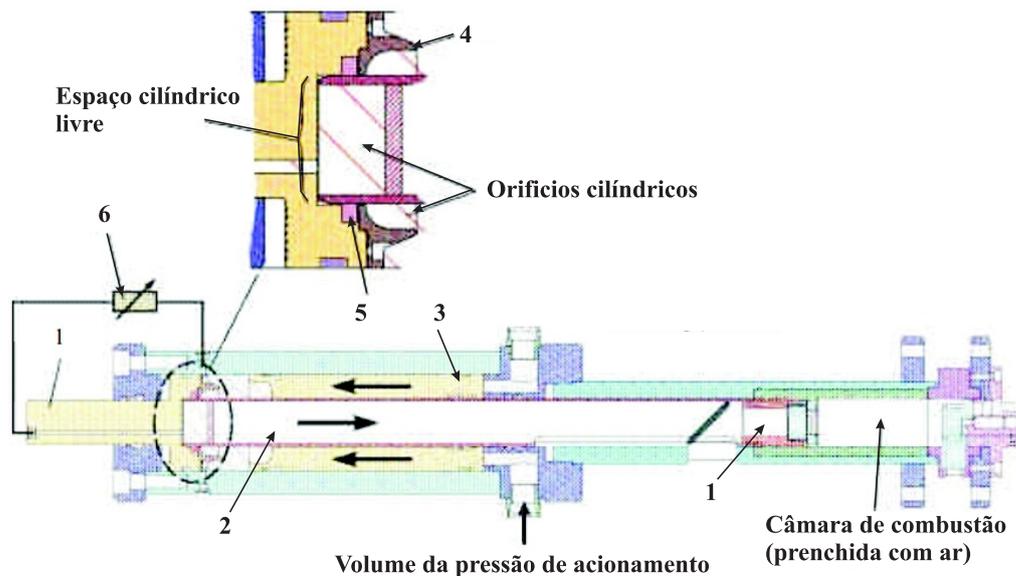


Figura 3.4: Posição do sistema no início do processo de compressão.

Fonte: Picture 1.4: Basic status of machine elements at experiment start [80].

Pelo aumento da pressão, devido ao processo de compressão, o pistão principal, perto do fim da compressão, é recolhido pela ação da válvula de estrangulamento mostrada na Figura 3.5. Este, além de exercer o papel de impulsionar o pistão até a cabeça do cilindro, controla a forma como progride o deslocamento até o ponto em que se inicia o processo de combustão, tal como se mostra na Figura 3.6. Esta é a maneira de simular os movimentos de um pistão, obtendo resultados típicos de um motor real.

É essencialmente importante que a quantidade de óleo dos componentes hidráulicos do pistão de equilíbrio, das massas e do pistão externo, sejam definidos para se alcançar o "Stop- PMS (ponto morto superior), no processo de combustão. Uma vez alcançado o PMS, o pistão retorna ao ponto neutro, fazendo um balanço entre as pressões de acionamento e a pressão no interior do cilindro.

Para alcançar as condições ideais para a combustão de um motor a partir de simulações, são necessárias algumas adaptações. Primeiro seria proporcionar aos fluidos uma condição real, já que isto é essencialmente importante para formação do *spray*. Deve ser também considerado o *swirl*, redemoinho que ocorre durante o primeiro processo (processo de admissão de ar) no motor de combustão interna. Este processo é simulado na MCR pela injeção de uma quantidade pequena de ar, a uma pressão determinada, que ingressa tangencialmente para o interior do cilindro. Isto ocorre exatamente antes do início da fase de compressão.

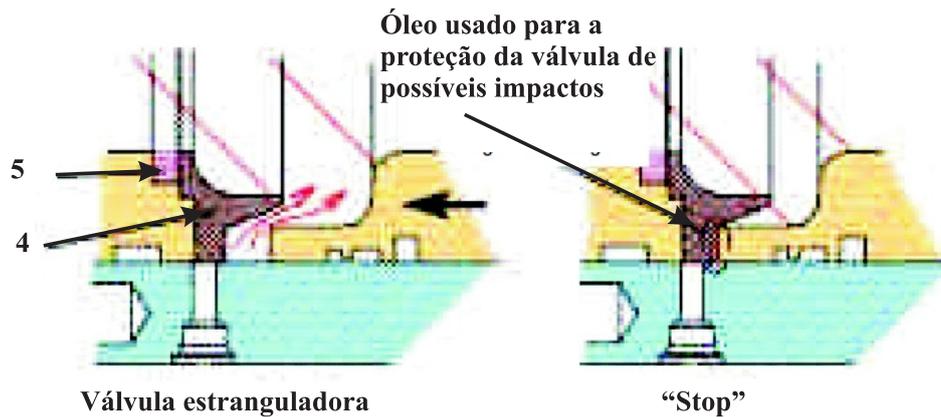


Figura 3.5: Ação do fluido da válvula de estrangulamento entre o pistão de equilíbrio mássico e a ação da válvula quando o pistão está próximo ou no PMS (Stop).

Fonte: Picture 1.6: Oil throttle valve flow between mass balance and throttle valve when operation piston arrives near TDC or at TDC (Stop) [80].

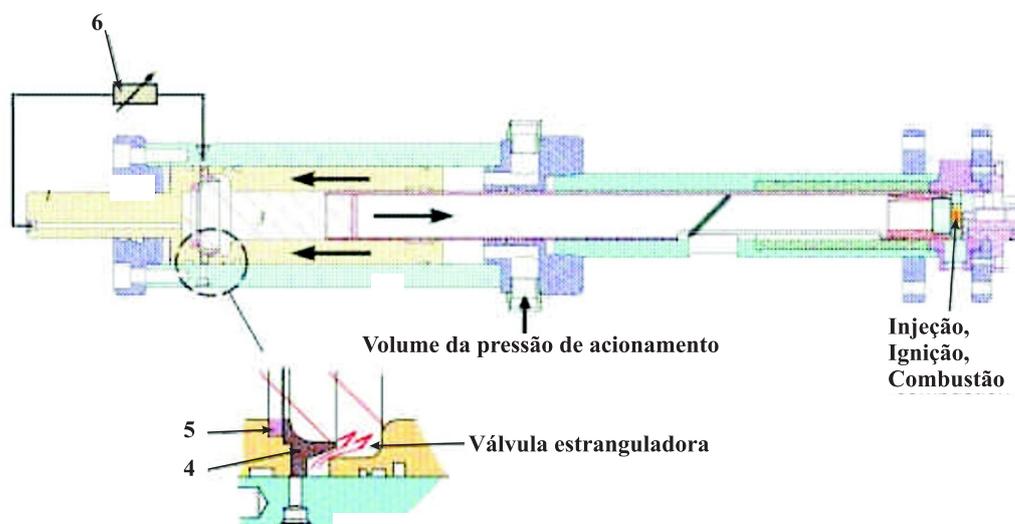


Figura 3.6: Posição do sistema no final do processo de compressão.

Fonte: Picture 1.5: Status of parts when top dead center (TDC) is reached [80].

A MCR funciona por meio de dois sistemas: hidráulico e pneumático. O sistema hidráulico é responsável pelo acionamento do pistão principal, gerando o *shot* (movimento do pistão) de ensaio e por garantir vedação entre o cilindro e o cabeçote da MCR, onde se encontra o sensor de pressão e o injetor (Figura 3.7). O sistema pneumático fornece pressão para acionamento da MCR, além

de disponibilizar ar/gases para preparo das misturas de teste.

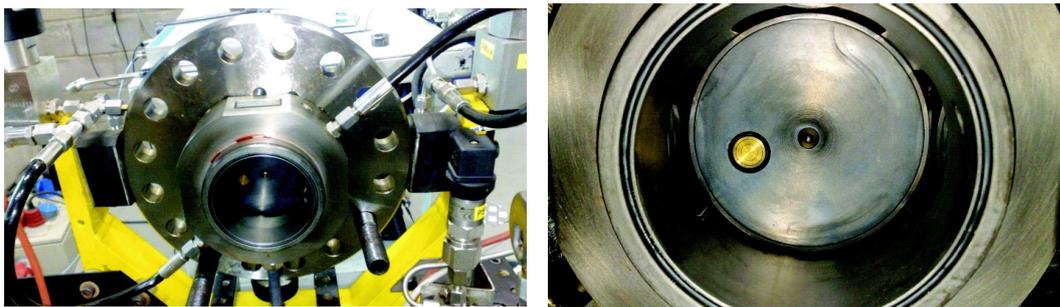


Figura 3.7: Fotografias do cabeçote da MCR.

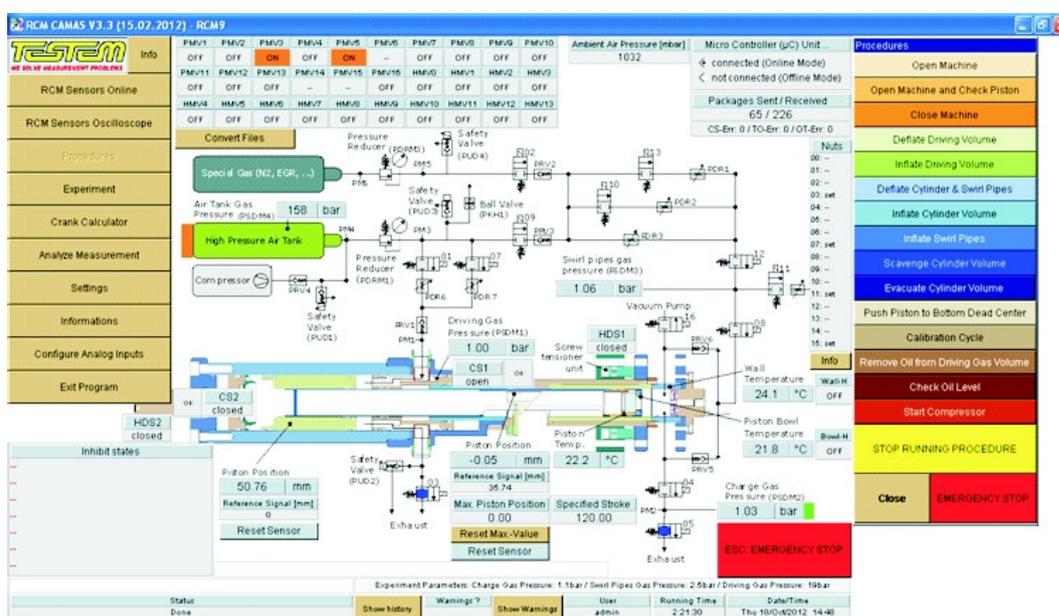


Figura 3.8: Tela de interface do usuário na MCR(RCM CAMAS V3.3).

A máquina de compressão rápida é operada através de seu software próprio, chamado CAMAS, que consiste em um programa que permite controlar todos os comandos eletrônicos do equipamento (controle de válvulas, sensores, aquecimento de paredes do cilindro etc.), através de uma interface amigável. Em sua janela, Figura 3.8, podem ser vistos praticamente todos os comandos usados, dos quais podem-se destacar: abrir e fechar a máquina, calibração, checar nível de óleo, interrupção de emergência etc. Além disso, pode-se verificar o status de válvulas e medições feitas pelos sensores como: a pressão do driving (pressão que impulsiona o pistão), as posições instantânea e máxima do pistão, temperaturas da cabeça do mesmo e da parede do cilindro, entre outros. Quanto às dimensões da MCR, a Tabela 3.1 apresenta as principais características:

Tabela 3.1: Especificações da MCR

Diâmetro do pistão (mm)	84
Curso do Pistão (mm)	110 - 250
Razão de compressão	5 - 25
Rotações de simulação (RPM)	1500 - 3500
Ensaio por hora	30
Aceso Visual	Cabeça do Pistão (45mm), Parede do Cilindro (35mm x25mm - 3x90°) Cabeçote (20 mm)
Injeção	Direta (Diesel e Otto), Mistura Pré-Vaporizada (Otto), Combinada
Pressão máxima na câmara de combustão	200 bar
Pressão de acionamento	15 - 50 bar
Temperatura máxima de aquecimento da parede do cilindro	120 °C
Combinação de gases na admissão	Sim
Geração de Swirl na câmara de combustão	Sim
Resolução de medição do curso	0,05 mm
Area necessaria	3 m <sup>2</sup>
Massa do equipamento	1000 kg
Controle	Software específico (RCM CAMAS)

Fonte: Table 1. Important specification of the RCM. [81].

Sua razão de compressão pode ser ajustada para valores que vão desde 5:1 até 25:1 (i.é, a faixa típica operacional dos motores de ignição por centelha e de ignição por compressão). Isto, por sua vez, é possível pela variação do curso do pistão desde 120 até 249 mm [80]. O pistão é oco e possui o centro de sua cabeça composto de quartzo, permitindo que se filme a combustão. Através de um espelho posicionado a 45° do eixo imaginário que passa pelo centro do pistão, a filmagem pode ser realizada posicionando-se a câmara externamente à MCR, a 90° do referido eixo. É importante mencionar que, a pesar de que a resolução na medição do curso é de 0,05 mm, mostrado na Tabela 3.1, a resolução na determinação do ponto de injeção é de 1 mm.

### 3.1.2

#### Sistema Common Rail

O sistema Common Rail de injeção eletrônica Diesel é um dos mais modernos e flexíveis sistemas de injeção existentes no mercado, preenchendo

todos os requisitos de níveis de emissões e, ao mesmo tempo, oferecendo baixo nível de ruído e consumo [82]. Os componentes principais de um sistema Common Rail são descritos a seguir:

### Bomba CP 3.3

Bomba radial de três pistões que recebe o óleo diesel do circuito de baixa pressão e o comprime a pressões de até 1600 bar [82], sendo que o fluxo de óleo é definido pela válvula reguladora de fluxo (ZME), que é comandada pela caixa de comando. Este modelo de bomba, mostrado na Figura 3.9, é lubrificado com o próprio óleo diesel do sistema.

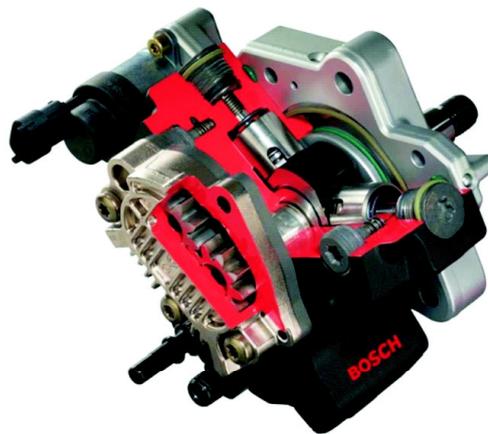


Figura 3.9: Vista em corte de uma bomba de alta pressão Bosch modelo CP3.3.

Fonte: Bosch [82].

### Rail ou acumulador de pressão

O "*rail*" é basicamente um tubo forjado com conexões roscadas, sendo que uma é para receber o óleo que vêm da bomba CP e as restantes (a quantidade de conexões depende do número de cilindros do motor) são para a transferência de óleo pressurizado para os injetores. Além disso, o rail é equipado com o sensor de pressão do sistema e com uma válvula de segurança, que limita a pressão no sistema [82]. O acumulador de pressão instalado na bancada de teste (Figura 3.10) é o Bosch 445 224 213.

### Injetor Common Rail

Os injetores recebem o óleo diesel pressurizado do rail e o injetam na câmara de combustão do motor. A injeção é comandada pela caixa de comando,

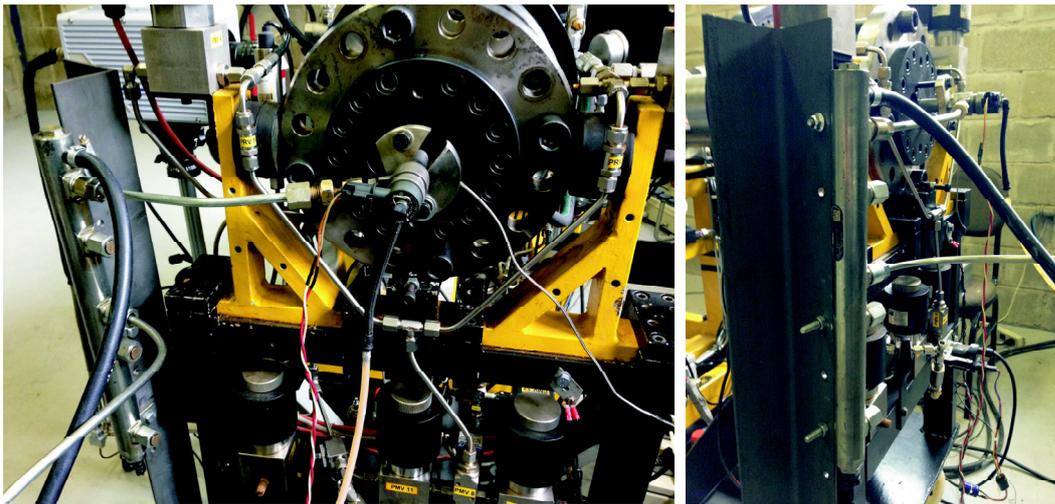


Figura 3.10: Acumulador de pressão e injetor instalado na bancada de teste.

que aciona eletricamente o magneto (solenóide) de cada injetor. Como a pressão está sempre "disponível" no rail, a injeção pode ser feita de maneira bastante flexível, podendo-se realizar até duas préinjeções, uma injeção principal e duas pós injeções, Figura 3.10. Isto é importante para a diminuição do ruído do motor, otimização da combustão e redução de emissões gasosas. Nas Figuras 3.11 e 3.12 mostra-se o injetor (Bosch 0 499 A05 058 - CRIN3) instalado no cabeçote da MCR, que pode trabalhar até 1800 bar [83]

### 3.1.3 Sistema de Injeção EFS

O sistema de injeção é controlado pelo sistema EFS que consta de dois módulos, Figura 3.13: um módulo de controle da injeção e um módulo de energização do injetor. O módulo de controle da injeção (EFS 8412) é o encarregado do gerenciamento da sincronização de todas as diferentes peças que compõem a bancada de teste. Este módulo controla o tanto o acionamento do injetor assim como da câmera e do sistema de visualização via laser, se estiveram presentes [84].

O módulo de energização do injetor (EFS 8427) é o encarregado da condução de energia para o injetor, utilizando a tecnologia de electro - magneto. Possui vários modos de condução diferente e suas inúmeras funções avançadas permitem que se possa trabalhar com a maioria dos injetores encontradas hoje no mercado [85].

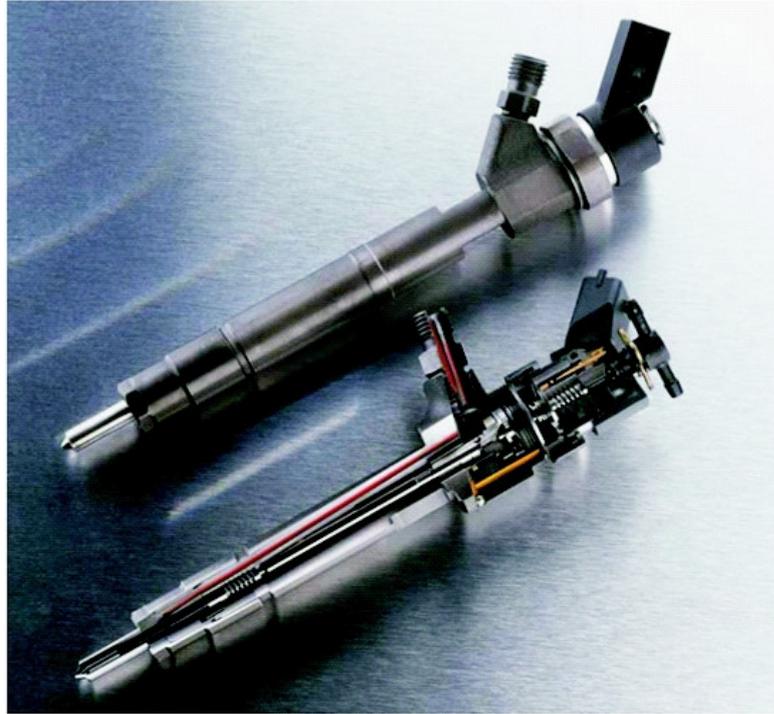


Figura 3.11: Injetor Common Rail (acima) e em corte (abaixo).

Fonte: Bosch [82].

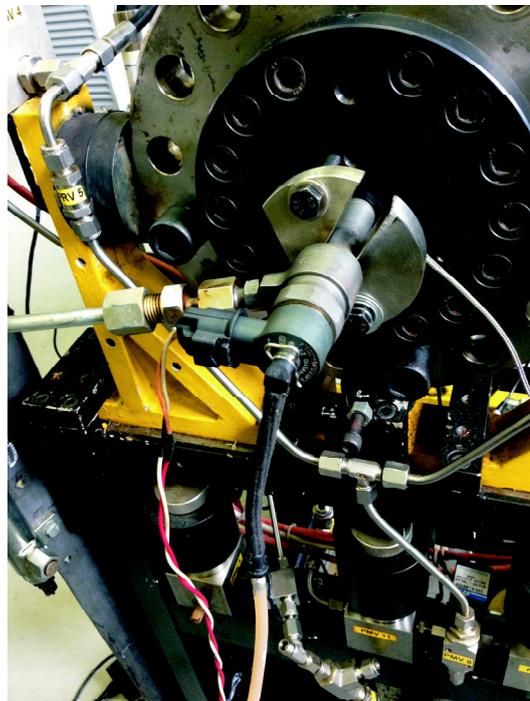


Figura 3.12: Injetor Common Rail instalado no cabeçote da MCR.

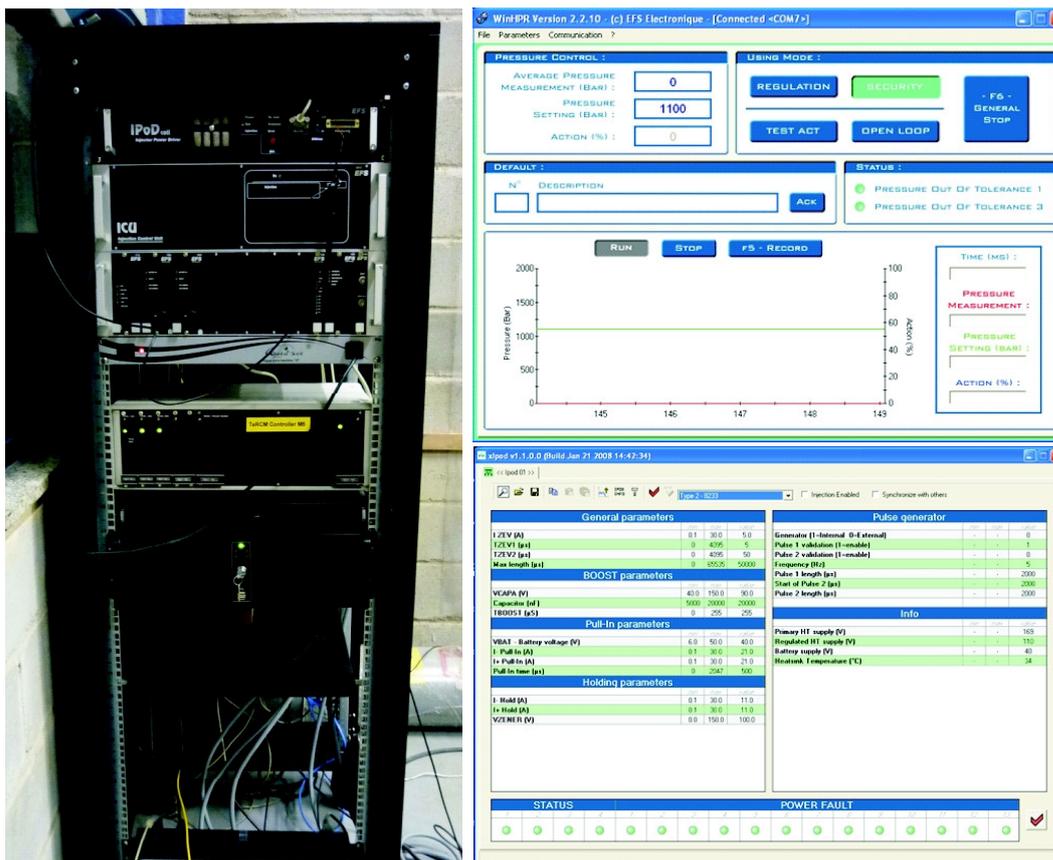


Figura 3.13: Sistema de injeção EFS e fotos da tela da interface do usuário no EFS.

### 3.1.4 Câmara de Alta velocidade

O laboratório é equipado com uma câmera de alta velocidade (Fastcam SA1.1 - Photron), Figura 3.14, que permite filmagens em até 675.000 quadros por segundo. Com isso, pode-se analisar, através de imagens, o momento exato da injeção do combustível na câmara de combustão, do atraso da ignição, do início da propagação das frentes de chamas e a duração do evento de combustão.

### 3.1.5 Sistema de Aquisição de Dados de Pressão

O sensor de pressão piezoelétrico (Kistler 7061BS31) está instalado no cabeçote da MCR. Este sensor é conectado a um amplificador (Kistler 2852A12). Este sistema é encarregado de coletar os dados de pressão ao longo de todo o teste. Na Figura 3.15 mostra-se a instalação do sensor dentro da MCR e a ligação deste ao amplificador.

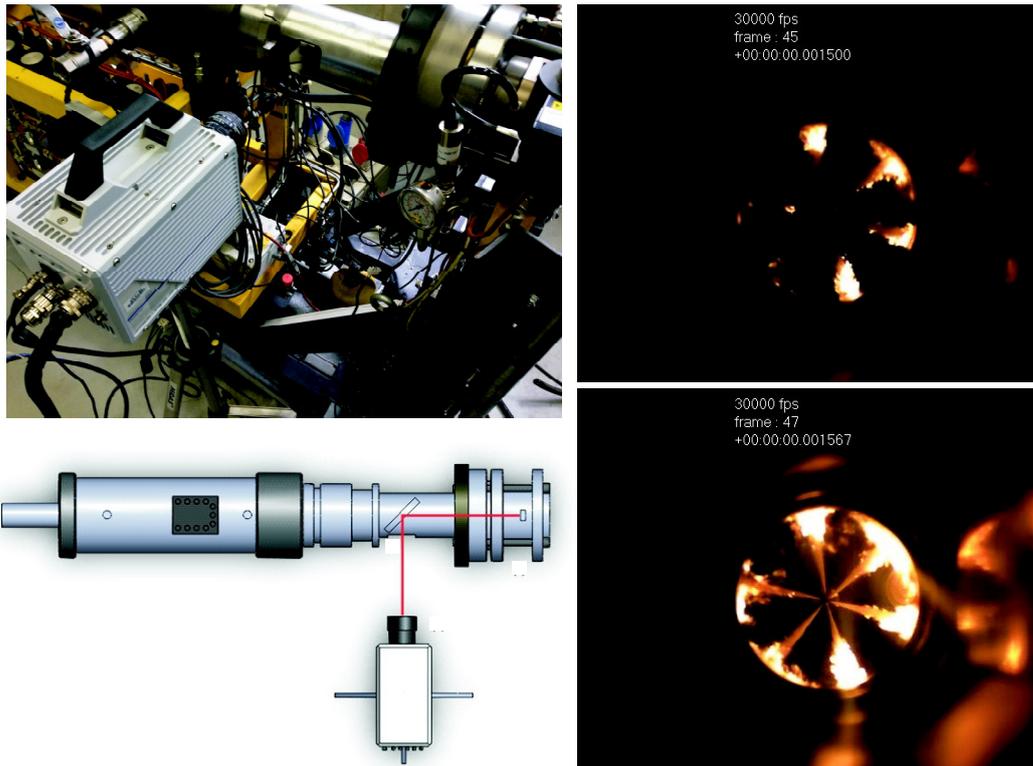


Figura 3.14: Câmera de alta velocidade, esquema de filmagem dos ensaios e capturas do vídeo de combustão de diesel.

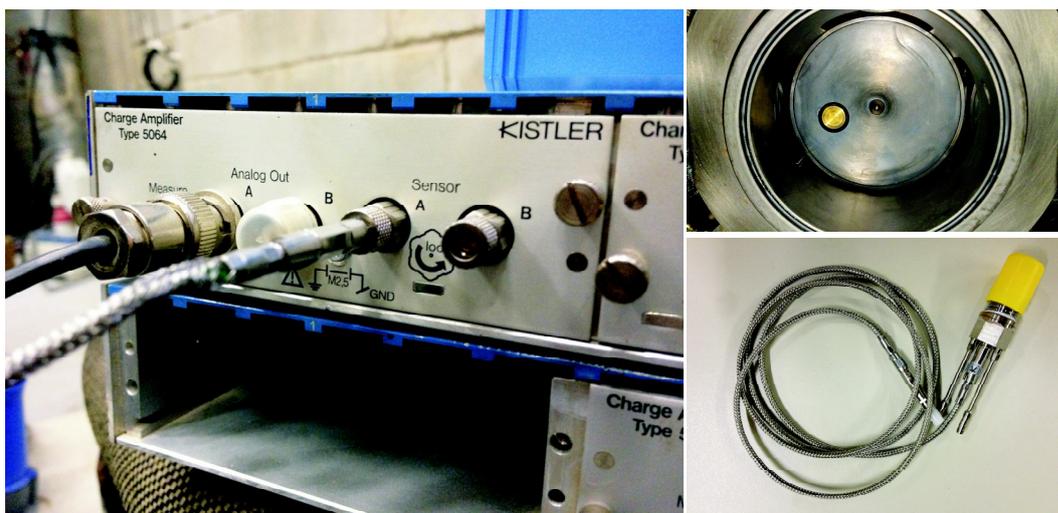


Figura 3.15: Sistema de aquisição de dados de pressão na bancada de teste.