

## 5 Resultados e Discussões

Para o melhor entendimento do presente capítulo, observou-se que seria interessante dividir as cargas em dois grupos: um denominado “cargas baixas”, composto por 10%, 25% e 50% da plena carga, e outro “cargas altas”, com 75% e 100% da carga máxima.

A **Figura 26** apresenta as curvas típicas de desempenho em plena carga do motor MWM 4.10 TCA, operando no modo Diesel e no modo Diesel-gás com a máxima taxa de substituição. Em termos comparativos, pode-se verificar uma boa aproximação entre as curvas de torque e potência. Na operação Diesel-gás, o valor do torque a 2100 rpm foi superior, em aproximadamente 3%, ao valor encontrado na operação Diesel. O torque máximo, para os dois casos, foi de aproximadamente 437 Nm a 1600 rpm e a potência máxima de aproximadamente 100 kW em 2600 rpm. Estes resultados foram diferentes dos informados pelo fabricante (500 Nm a 1600 rpm e 107 kW a 2600 rpm), conforme Tabela 4. Tais resultados, em parte, poderiam ser atribuídos às diferentes condições em que foram efetuados os testes e também ao fato do motor utilizado nos testes não estar “amaciado”.

Em motores com turbocompressor, segundo Heywood (1988), podem-se alcançar valores de consumo específico de combustível (c.e.c.) entre 210 e 220 g/kW.h, com valores de rendimento térmico de 0,4 a 0,38, respectivamente. A Figura 26, também apresenta a evolução do consumo específico de combustível em plena carga, com a variação da rotação. Na operação Diesel, o consumo específico alcançou 220 g/kW.h a 1600 rpm (rotação de torque máximo). No modo Diesel-gás, os pontos relativos a 1000 rpm, 1850 rpm e 2100 rpm alcançaram os menores consumos específicos em relação à operação Diesel. Assim, estes pontos indicam quão bem o motor transformou a combinação de ambos os combustíveis em trabalho útil. Tal efeito é, entretanto, mais acentuado a 2100 rpm, onde o consumo específico foi de 217 g/kWh. A 1600 rpm o valor do c.e.c. foi igual ao valor do modo Diesel, porém superior ao valor da MWM (211 g/kW.h a 1600 rpm).

**Motor MWM 4.10 TCA**  
**Curvas de Desempenho em Plena Carga**

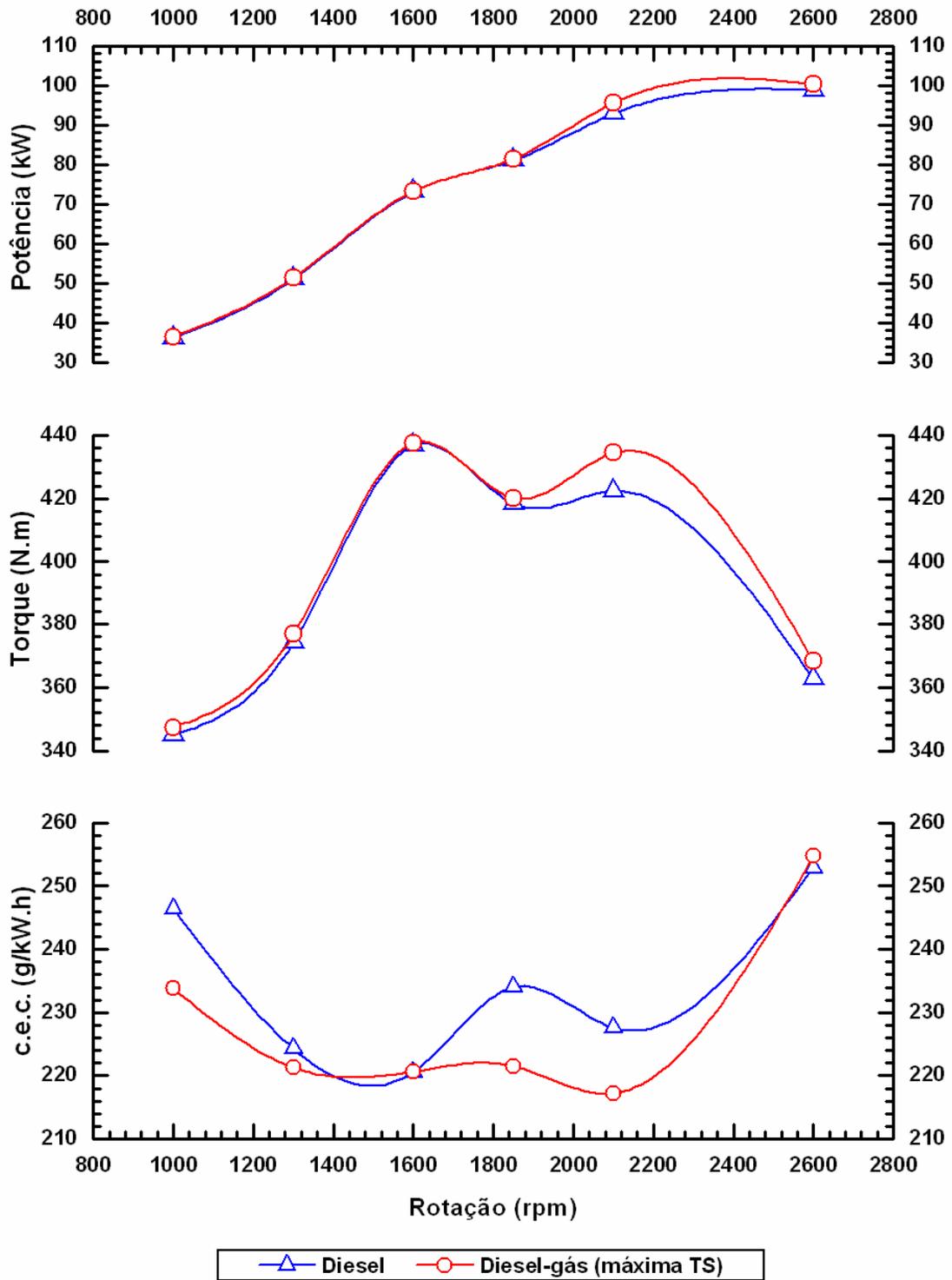


Figura 26 – Curvas de potência, torque e consumo específico de combustível em plena carga variando com a rotação, para as operações Diesel e Diesel-gás (com máxima taxa de substituição).

Cabe citar que, exceto em plena carga, o consumo específico de combustível é consideravelmente superior quando comparado à operação Diesel (vide tabelas e planilhas no apêndice B). Tal incremento é, entretanto, maior em baixas cargas, onde o c.e.c. da operação Diesel-gás tende a dobrar, comparado ao modo Diesel original. Nestas condições, como será detalhado mais adiante, as emissões de hidrocarbonetos não queimados alcança os maiores patamares, o que confirma simplesmente que o gás natural não é queimado completamente.

A razão de equivalência é definida pela relação entre o consumo de ar estequiométrico e o consumo de ar real para a mesma massa de combustível, ou combustíveis, utilizados (equações 43 e 45). Observa-se, na **Figura 27**, que a razão de equivalência no modo Diesel-gás é superior ao modo Diesel em toda a faixa de rotação a diferentes cargas avaliadas. Tal constatação poderia ser atribuída à mistura ar-gás. O gás natural, aspirado pelo motor, deslocaria alguma porção de ar que poderia ter ocupado o cilindro. Como menos ar é admitido, é de se esperar que a razão de equivalência aumente.

Nota-se que a razão de equivalência sofre grandes influências do aumento da carga do motor. Observa-se que, com o aumento da carga, as razões de equivalência das misturas das operações Diesel-gás e Diesel tendem a se aproximar. Assim, por exemplo, para 10% da carga máxima a 1600 rpm, a diferença entre as razões de equivalência foi da ordem de 55%, caindo até aproximadamente 7% a plena carga. Por outro lado, em altas cargas, a razão de equivalência Diesel-gás diminui ligeiramente conforme se aumenta a rotação do motor.

Embora haja muita variação em função da carga e da rotação, o motor Diesel-gás não aceitou misturas com razões acima de 0,83 da estequiométrica e praticamente não trabalhou com razões inferiores a 0,30 para as máximas taxas de substituição.

### **5.1. Resultados das Emissões nas Operações Diesel e Diesel-gás**

As **Figuras 28 a 30** mostram as curvas características das emissões específicas de CO, HC e NO<sub>x</sub> com a variação da rotação e da carga do motor nas operações Diesel e Diesel-gás (com máxima taxa de substituição).

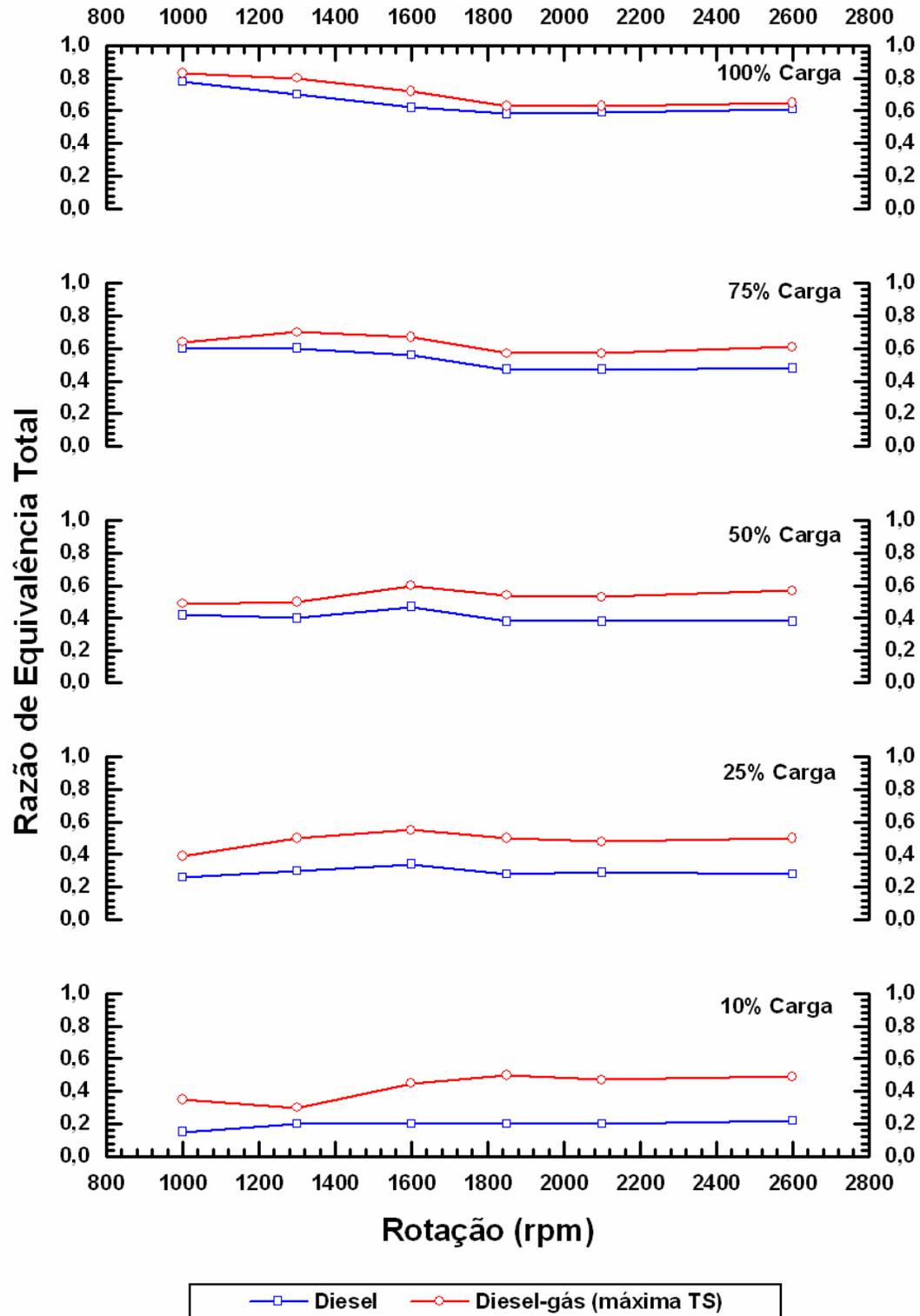


Figura 27 – Razão de equivalência versus rotação e carga, para as operações Diesel e Diesel-gás (com máxima taxa de substituição).

As emissões de material particulado (MP) não serão apresentadas nesta seção, já que não foi possível medir o MP em todas as rotações e cargas pré-fixadas.

### Emissões de Monóxido de Carbono

A taxa de formação de CO é uma função da quantidade disponível do combustível não queimado (HC) e da temperatura da mistura, já que ambos controlam a taxa de decomposição e oxidação do combustível. Essa relação pode ser confirmada nas Figuras 28 e 29. Por outro lado, como será visto mais adiante, conforme foram reduzidas as emissões de NO<sub>x</sub> (Figura 30), verificou-se o correspondente aumento nas emissões de CO. Tal relação inversa poderia ser atribuída à menor temperatura da combustão.

Em baixas cargas, nota-se um comportamento mais complexo, que varia não só em função da rotação, mas também de quanto é rica a mistura e, possivelmente, das diferentes temperaturas atingidas. Observa-se, para cargas de até 25%, que a faixa de emissões de CO esteve entre 20 e 85 g/kWh.

Com o aumento da carga do motor, as emissões de CO entre os modos de operação Diesel-gás e Diesel, tendem a se aproximar, como resultado da elevada temperatura e das taxas de combustão mais rápidas, originadas pela maior “riqueza” da mistura. Entre 50% e 100% da plena carga, a faixa de emissões de CO esteve entre 20 e 3 g/kWh respectivamente.

### Emissões de Hidrocarbonetos não Queimados

A **Figura 29** apresenta as emissões específicas de HC com a variação da rotação, para diferentes cargas do motor. Os resultados do modo original Diesel, confirmaram os baixos níveis de HC, típicos desta operação. Por outro lado, como foi afirmado anteriormente, na operação Diesel-gás, verificou-se a relação existente entre as emissões de HC e as de CO.

As maiores emissões de HC foram observadas em baixas cargas. Assim, para cargas de até 25%, a faixa de emissões de HC esteve entre 88 e 416 g/kWh. Isto confirma um dos grandes problemas envolvendo a combustão bi-combustível: a queima incompleta do gás natural em misturas pobres. Tal efeito, como explicado

no item 2.4, é devido à propagação da frente de chama, que a partir de vários centros de ignição não se estende por toda a mistura pobre, sendo que parte do gás permanecerá inalterado, aumentando as já observadas emissões de HC e CO.

Em altas cargas do motor, onde ocorrem as maiores razões de equivalência, são evidentes as reduções significativas de HC. Para cargas de 75% a 100%, o nível das emissões de HC esteve entre 1,8 e 23 g/kWh. Novamente, pode-se associar tais resultados ao incremento da temperatura do gás, consequência do aumento da carga, a qual poderia promover a oxidação dos hidrocarbonetos não queimados.

De forma geral, pode-se dizer que as emissões de CO e HC, durante a operação Diesel-gás, são consideravelmente elevadas quando comparadas à operação Diesel.

### Emissões dos Óxidos de Nitrogênio

Na **Figura 30**, pode-se verificar as reduções significativas de  $\text{NO}_x$  na operação Diesel-gás (com máxima taxa de substituição) em relação ao modo Diesel. Como é reconhecido amplamente, a formação de  $\text{NO}_x$  é favorecida pelas altas concentrações de oxigênio e altas temperaturas da mistura.

Em altas cargas da operação Diesel-gás, as emissões de  $\text{NO}_x$  foram reduzidas conforme era incrementada a rotação do motor. Tal efeito é, entretanto, acentuado a partir de 1600 rpm. Assim, o tempo de residência dos gases dentro do cilindro poderia ser considerado um fator importante na formação de  $\text{NO}_x$ . Observa-se também que a redução de  $\text{NO}_x$  poderia ter uma relação com a variação da razão de equivalência (Figura 27), a qual diminui ligeiramente a partir de 1600 rpm. Este efeito induziria uma propagação de chama mais lenta e, conseqüentemente, uma menor oxidação do nitrogênio.

Em baixas cargas da operação Diesel-gás, as emissões de  $\text{NO}_x$  foram sempre inferiores quando comparadas ao modo Diesel. Foram alcançadas reduções da ordem de até 50%, o que pode ser explicado pela menor temperatura. Tal fato, já observado por muitos pesquisadores (capítulo 2.3), também poderia ser atribuído à menor quantidade de oxigênio, devido à presença do gás natural, e ao maior atraso da ignição, o que resultaria em menores temperaturas de combustão.

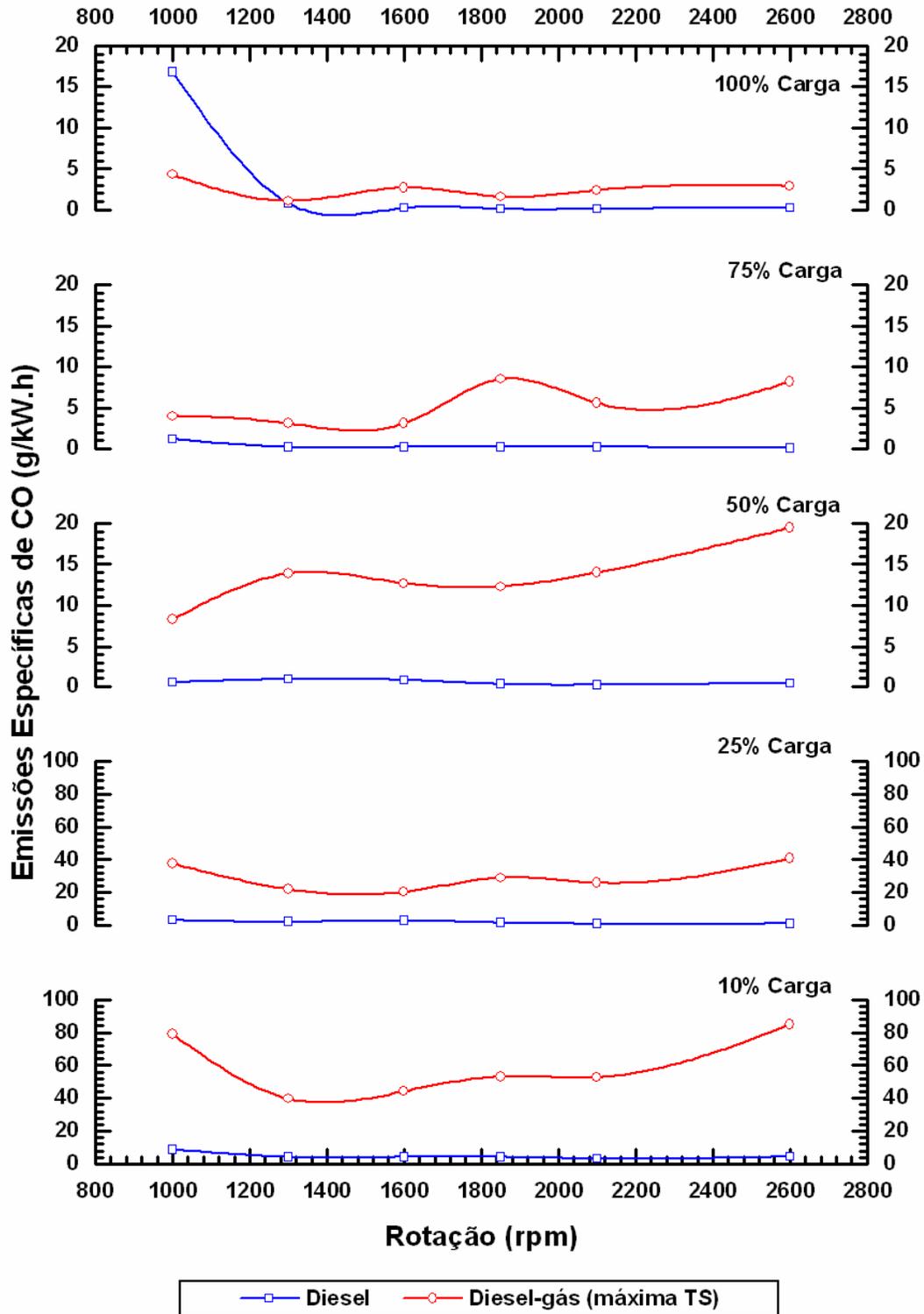


Figura 28 – Emissões específicas de monóxido de carbono (CO) com variação da rotação e carga para as operações Diesel e Diesel-gás (com máxima taxa de substituição).

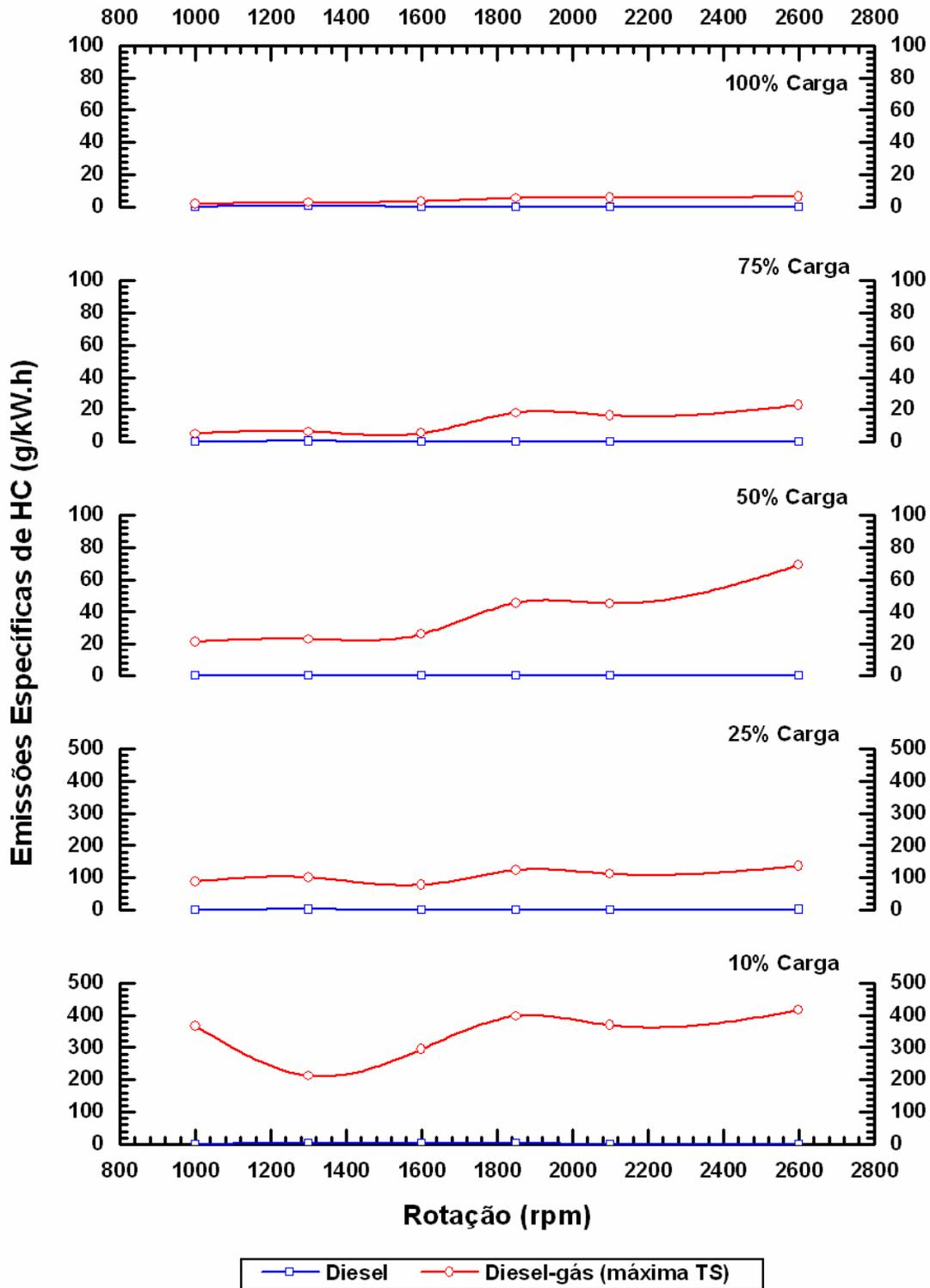


Figura 29 – Emissões específicas de hidrocarbonetos não queimados (HC) com variação da rotação e carga para as operações Diesel e Diesel-gás (com máxima taxa de substituição).

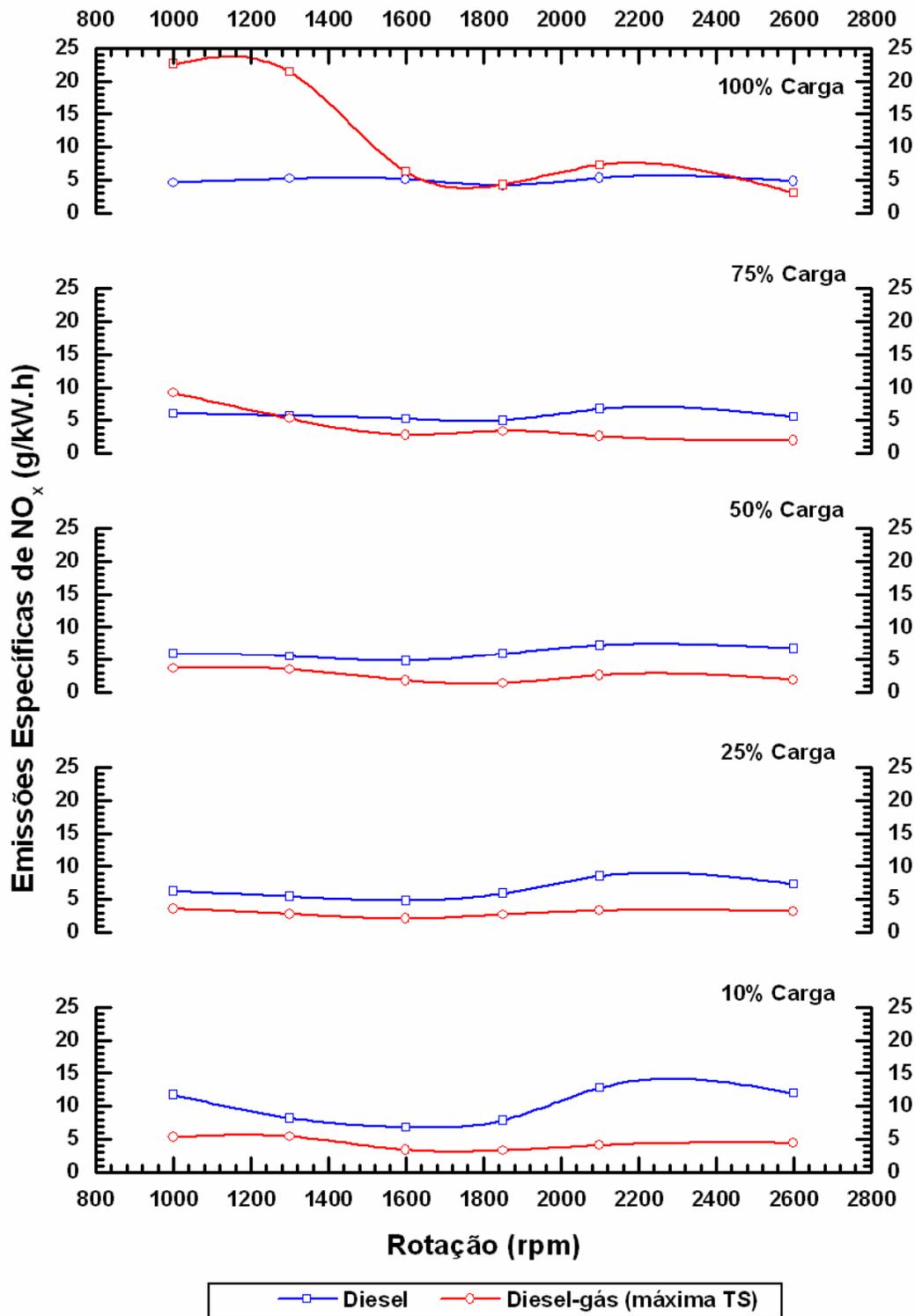


Figura 30 – Emissões específicas de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) com variação da rotação e carga para as operações Diesel e Diesel-gás (máxima taxa de substituição).

## 5.2. Resultados das Emissões e Parâmetros de Desempenho na Operação Diesel-gás com Restrição Parcial do Ar de Admissão

As **Figuras 31 a 37** ilustram alguns dos resultados obtidos em função das taxas de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão. Embora se tenha mapeado o motor por toda a sua faixa de funcionamento, aqui apenas são mostrados os pontos experimentais levantados a **1600 rpm**, rotação que melhor representa o comportamento dos resultados obtidos.

Com respeito à taxa de substituição, ressalta-se que estas foram superiores em altas cargas. Assim, observa-se que até 25% da plena carga, a máxima taxa de substituição esteve entre 60% e 80%. Para cargas acima de 50%, o intervalo ficou entre 80% e 92%.

A restrição parcial do ar foi monitorada através da queda de pressão no coletor de admissão. Os resultados experimentais mostram que, conforme aumenta a carga do motor, a faixa aceitável de pressão do ar fica mais restrita, ou seja, torna-se mais difícil diminuir a massa admitida de ar. Em baixas cargas, como é o caso das curvas relativas a 10% e 25% da plena carga, foi possível reduzir a pressão do ar entre 29% e 40% do valor original. Para cargas superiores, de 50% a 100%, a queda de pressão esteve entre 17% e 27%.

A 75% e 100% da plena carga, foi realizado um “refinamento” da pressão do ar de admissão, onde somente foram consideradas as medições na máxima taxa de substituição; estes dois pontos são reconhecidos nos gráficos pela cor rosa. Este refinamento consistiu, basicamente, da redução gradual da pressão do ar até que valores mínimos de emissões fossem alcançados, sem prejudicar a taxa de substituição e a operação normal do motor.

É interessante ressaltar que, em todas as cargas avaliadas, existe uma relação direta entre a mínima pressão do ar e sua reduzida taxa máxima de substituição. Tal efeito é, entretanto, mais acentuado em altas cargas, onde a máxima taxa de substituição, para a máxima redução do ar, caiu entre 28% e 38% do seu valor encontrado na operação Diesel-gás sem restrição do ar. Esta situação pode ser explicada devido ao incremento do consumo de óleo Diesel, que foi adicionado, através da atuação do dinamômetro, de forma a evitar a queda do par pré-fixado (torque x rotação), induzida pela redução da massa de ar.

Nas Figuras 31 a 36, chama-se também atenção para o fato de se ter obtido taxas de substituição negativas. Estes valores correspondem à operação Diesel, avaliadas a diferentes pressões do ar admitido. As taxas negativas representam o maior consumo de óleo Diesel, quando o ar é restringido. Deste resultado, se constata que o desempenho do motor Diesel original está relacionado com a sua capacidade de aspiração (ver também figura 35).

### Emissões de Monóxido de Carbono

A **Figura 31** apresenta o comportamento das emissões de monóxido de carbono (CO) para diferentes cargas do motor, variando com a taxa de substituição e a pressão do ar no coletor de admissão.

A operação Diesel-gás, sem restrição do ar, gera um aumento nas emissões de CO em relação ao modo Diesel convencional. Nota-se que, conforme aumenta a carga do motor, os níveis máximos de CO começam a diminuir. Para cargas superiores a 25% da plena carga, as emissões de CO aumentam conforme é incrementada a taxa de substituição. Quando a substituição Diesel/gás alcança um valor entre 60% e 70%, as emissões de CO diminuem. Isto, provavelmente, se deve ao aumento da temperatura da mistura e a taxa de combustão mais rápida. Para 10% da carga, o incremento da taxa de substituição causa um aumento agudo das emissões específicas de CO (45 g/kWh a 69% de substituição). Isto, possivelmente, se deve à taxa mais lenta da combustão do gás natural, a qual mantém a temperatura da mistura em níveis mais baixos resultando numa redução do processo de oxidação do monóxido de carbono.

Em forma geral, as emissões de CO sobre a operação Diesel-gás são consideravelmente elevadas comparadas ao modo Diesel original.

### **Operação Diesel-gás com restrição parcial do ar**

A restrição parcial do ar ocasionou uma notável diminuição nas emissões de CO, especialmente em cargas baixas. Porém, tal efeito é mais evidente em 50% de carga e com 56% da taxa de substituição, onde as emissões de CO reduziram de aproximadamente 13,6 g/kWh (verificado na operação Diesel-gás sem restrição do ar, 19,5 psia), para 4,4 g/kWh a 73% da pressão original do ar (14,2 psia). Esta redução corresponde a 68 % das emissões de CO.

1600 rpm

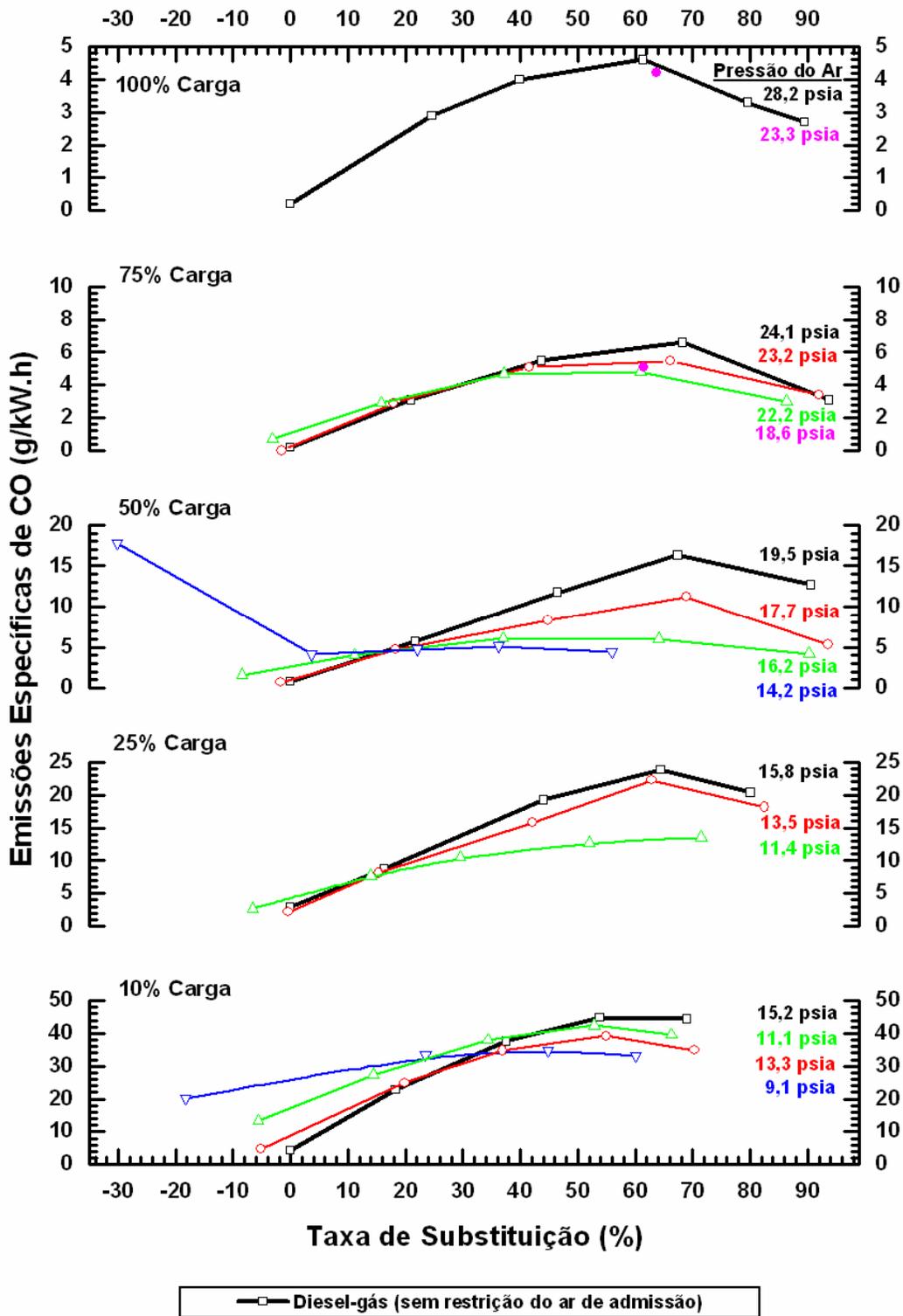


Figura 31 – Emissões específicas de monóxido de carbono com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão.

Nas cargas dedicadas ao refinamento pontual da pressão do ar, 75% e 100% da plena carga, as reduções de CO foram pequenas. Contudo, tal efeito é mais proeminente à plena carga e com 62 % de taxa de substituição, onde o CO diminuiu ligeiramente de aproximadamente 4,4 g/kWh (na operação sem restrição do ar, 24,1 psia), para 4,2 g/kWh a 77% da pressão original do ar (18,6 psia). Esta redução corresponde a 5% das emissões de CO.

### Emissões de Hidrocarbonetos Não Queimados

A **Figura 32** apresenta as emissões específicas dos hidrocarbonetos não queimados (HC), para as diferentes cargas do motor, variando com a taxa de substituição e a pressão do ar no coletor de admissão.

Na operação Diesel-gás sem restrição do ar, verifica-se uma elevação abrupta nas emissões de HC, que diminuem conforme se aumenta a carga do motor. Em baixas cargas, o aumento da substituição eleva os patamares de HC. Porém, tal resultado é mais agudo em 10% de carga, onde as emissões alcançam 295 g/kWh a 69% de substituição. Para altas cargas, as emissões de HC aumentam conforme é incrementada a taxa de substituição. Quando a substituição alcança um valor entre 62% e 68%, os níveis de HC começam a diminuir. Normalmente associa-se isto ao acréscimo da temperatura do gás queimado, o qual promoveria a oxidação dos hidrocarbonetos não queimados.

### **Operação Diesel-gás com restrição parcial do ar**

Observando os efeitos da restrição parcial do ar, nota-se uma expressiva redução das emissões de HC. É interessante observar que as menores emissões de HC são alcançadas na combinação de mínima pressão do ar admitido e a máxima taxa de substituição.

Em baixas cargas, é notável a queda das emissões de HC. Tal efeito é, analogamente ao CO, mais evidente em 50% de carga e 56% de substituição, onde o HC diminuiu de aproximadamente 14,2 g/kWh (na operação sem restrição do ar, 19,5 psia), para 3,9 g/kWh a 73% da pressão original do ar (14,2 psia). Este valor corresponde a 72% na redução das emissões de HC.

1600 rpm

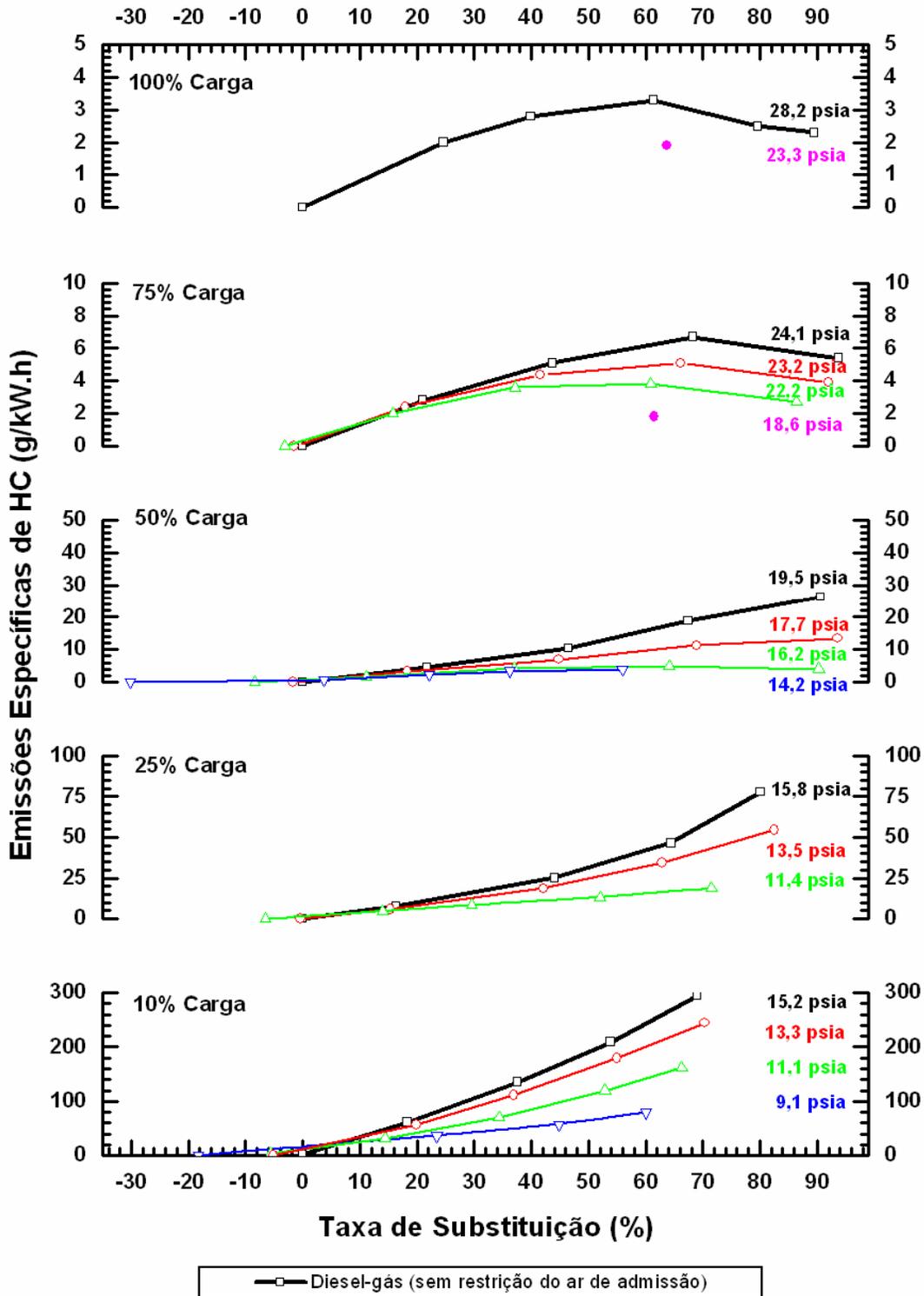


Figura 32 – Emissões específicas de hidrocarbonetos não queimados com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão.

Em altas cargas, os ganhos foram menores. Assim, a plena carga e 64 % de substituição, o HC diminuiu de aproximadamente 3,2 g/kWh (na operação sem restrição do ar, 24,1 psia), para 1,9 g/kWh a 77% da pressão original do ar (18,6 psia). Isto corresponde a 41% na redução de HC.

### Emissões dos Óxidos de Nitrogênio

A **Figura 33** mostra as emissões dos óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) com variação da carga do motor, taxa de substituição e a pressão do ar no coletor de admissão.

Na operação Diesel-gás, sem restrição do ar, com exceção da curva a plena carga, observa-se uma notável diminuição das emissões de  $\text{NO}_x$  conforme aumenta-se a taxa de substituição. A maior redução foi encontrada a 50% da carga com 90% de substituição, onde as emissões de  $\text{NO}_x$  diminuíram de 4,8 g/kWh, verificado na operação apenas com Diesel, para 1,8 g/kWh. Isto corresponde a uma redução de 62% nas emissões de  $\text{NO}_x$ . Já em plena carga, conforme se aumentou a substituição Diesel/gás, verificou-se um ligeiro acréscimo de  $\text{NO}_x$  devido principalmente ao incremento da temperatura. Assim, de 5,1 g/kWh, observado no funcionamento convencional, verificou-se o aumento das emissões para 6,3 g/kWh, em 90% de substituição. Tal diferença corresponde ao incremento de 19% nas emissões específicas de  $\text{NO}_x$ .

### **Operação Diesel-gás com restrição parcial do ar**

A restrição parcial do ar originou um aumento nas emissões de  $\text{NO}_x$ . A plena carga e a 64% de taxa de substituição, estas, aumentaram de aproximadamente 6 g/kWh (verificados na operação Diesel-gás sem restrição do ar, 28,2 psia), para 8,6 g/kWh a 82% da pressão original do ar (23,3 psia). Isso corresponde a um incremento de 30% nas emissões específicas de  $\text{NO}_x$ . Para 25%, 50% e 75% da plena carga correspondem os maiores aumentos destas emissões. Sendo, contudo, mais acentuado em 25% de carga e 71,5% de substituição Diesel/gás, onde as emissões de  $\text{NO}_x$  aumentaram de aproximadamente 2,2 g/kWh (verificado na operação Diesel-gás sem restrição do ar, 15,8 psia), para 4 g/kWh a 72% da pressão original do ar (11,4 psia). Isso corresponde a 82% no incremento de  $\text{NO}_x$ .

Para 10% da carga, a redução do ar quase não causou efeito nenhum.

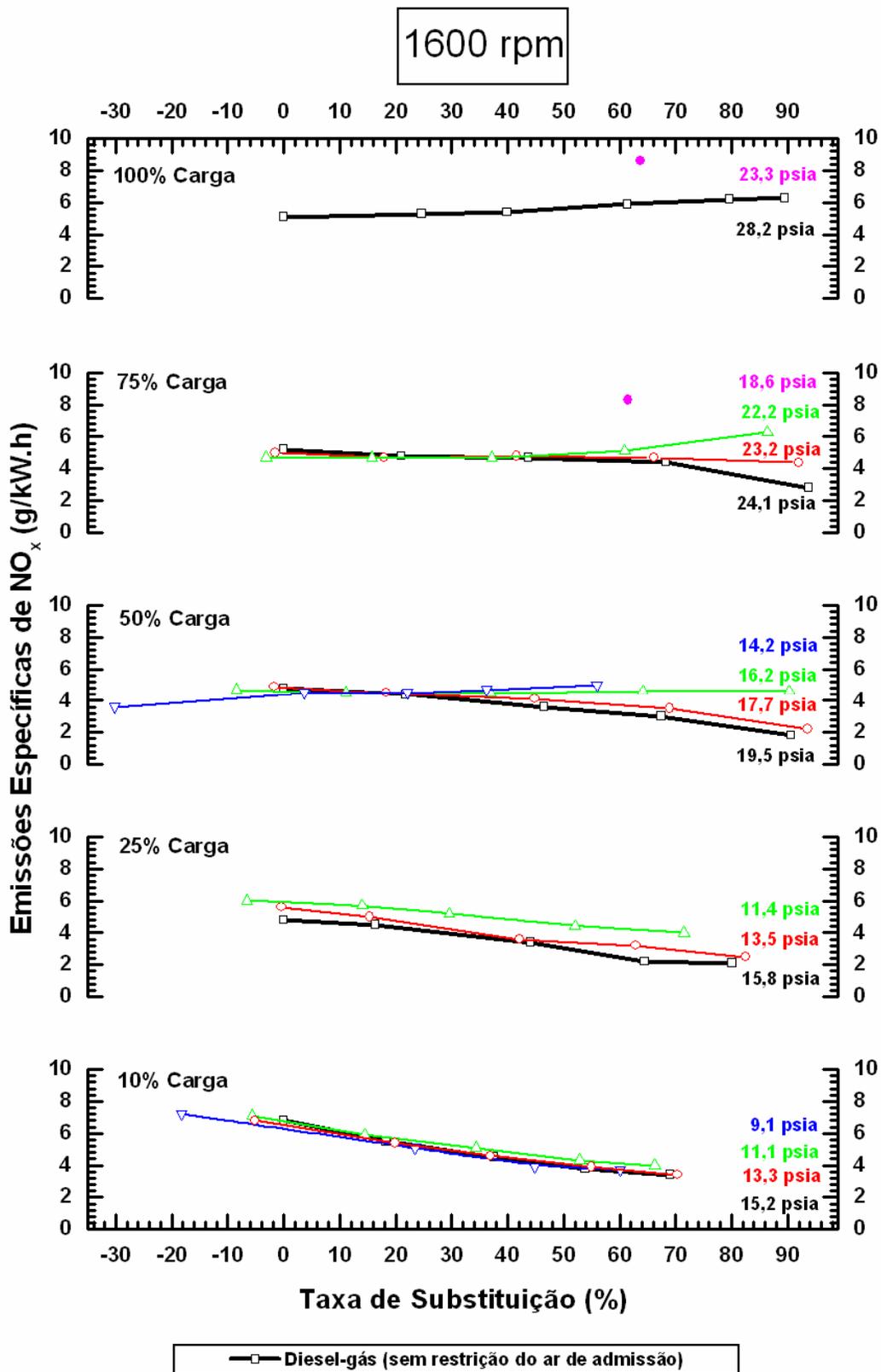


Figura 33 – Emissões específicas dos óxidos de nitrogênio com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão.

## Emissões de Material Particulado

A **Figura 34** ilustra as emissões específicas do material particulado (MP) versus taxa de substituição para diferentes cargas e pressões do ar admitido.

Na operação Diesel-gás, sem restrição do ar, observa-se que as emissões de MP decaem conforme se aumenta a taxa de substituição. Nota-se que, em altas taxas de substituição, os valores de MP alcançam valores ínfimos. Logo, é evidente que a redução do consumo de óleo Diesel leva a uma notável queda das emissões de MP.

### **Operação Diesel-gás com restrição parcial do ar**

Para 10% da carga, conforme é reduzida a pressão do ar e elevada a taxa de substituição, conseguiu-se reduzir as emissões específicas de MP. Caso bem distinto se verifica em curvas acima de 25% da plena carga, onde as emissões de MP apresentam um aumento, na medida em que é reduzida a pressão do ar. Entretanto, esta diferença começa a diminuir conforme se aumenta a taxa de substituição, tornando-se insignificante em máximas taxas.

É interessante também ressaltar o refinamento pontual da pressão do ar, realizado em 75% e 100 da plena carga. Nestes casos, os valores de MP foram quase desprezíveis.

## Rendimento Térmico

A **Figura 35** indica a variação do rendimento térmico em função da carga do motor, taxa de substituição e pressão do ar no coletor de admissão.

O rendimento térmico é afetado pela presença do gás natural. Em baixas cargas na operação Diesel-gás, sem restrição do ar, o rendimento térmico é consideravelmente menor em comparação ao modo Diesel convencional. Uma tendência semelhante é observada em altas cargas, mas neste caso a queda é menos acentuada conforme se aumenta a taxa de substituição. À plena carga e máxima taxa de substituição (90%), o rendimento térmico foi igualado ao valor registrado no modo Diesel.

Estes resultados revelam uma deficiente utilização do gás natural, como já verificado através das emissões dos hidrocarbonetos não queimados (Figura 34).

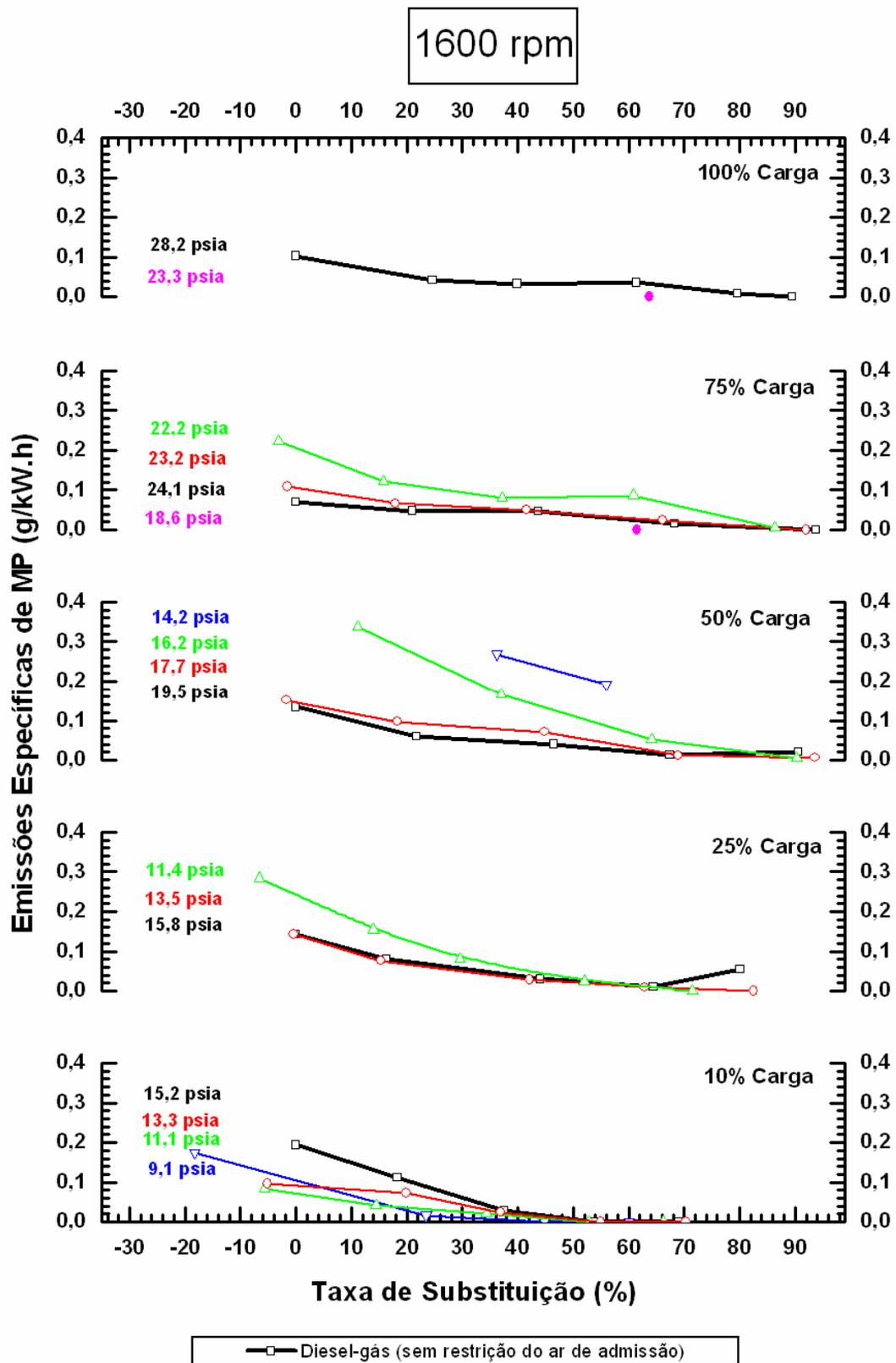


Figura 34 – Emissões específicas do material particulado com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão.

Tal fato, já observado por muitos pesquisadores (capítulo 2), é atribuído principalmente pela menor temperatura no interior da câmara de combustão e pelo maior atraso da ignição. Embora o gás natural possua um poder calorífico maior que o óleo Diesel (Tabela 2), a sua energia de combustão é inferior à esperada, favorecendo o rendimento térmico da operação Diesel convencional.

### **Operação Diesel-gás com restrição parcial do ar**

A redução da pressão do ar resulta numa diminuição do rendimento térmico, o qual cai conforme cresce a taxa de substituição. Nota-se que, alcançado certo valor de substituição (entre 20% a 50%, para baixas cargas), as curvas de rendimento térmico invertem a sua tendência, i.e. tendem a aumentar conforme é reduzida a pressão do ar e incrementada a taxa de substituição.

À plena carga e a 64% de taxa de substituição, o rendimento térmico aumenta ligeiramente de aproximadamente 37,4% (verificados na operação Diesel-gás sem restrição do ar, 28,2 psia), para 38,4 g/kWh a 82% da pressão original do ar (23,3 psia). Isso corresponde a um pequeno incremento de 2,7% no rendimento térmico.

Para cargas 50% e 75% da plena carga, os melhores ganhos foram exibidos antes de alcançar a pressão mínima do ar. Contudo, isto é mais evidente em 50% da carga e 90% de substituição, onde o rendimento térmico aumentou de 28,7% (verificado na operação Diesel-gás sem restrição do ar, 19,5 psia), para 32,8% a 83% da pressão original do ar (16,2 psia). Tal diferença corresponde ao incremento de 14% no rendimento térmico. Ressalta-se que, nesta mesma carga, para a mínima pressão do ar (14,2 psia) e com 56% de taxa de substituição, o rendimento térmico foi de 32,5% (valor perto do alcançado a 16,2 psia), porém, o incremento do rendimento térmico correspondeu a 1% em relação ao modo sem restrição do ar de admissão.

Por outro lado, os melhores ganhos no rendimento térmico, através do método da restrição parcial, foram alcançados em 10% e 25% da plena carga. Tal efeito é mais relevante em 10% de carga, onde o rendimento térmico aumentou de aproximadamente 10,3% a 60% de substituição (correspondente à operação Diesel-gás sem restrição do ar, 15,2 psia), para 13% a 60% da pressão original do ar (9,1 psia). Isto representou um incremento de 26% do rendimento térmico.

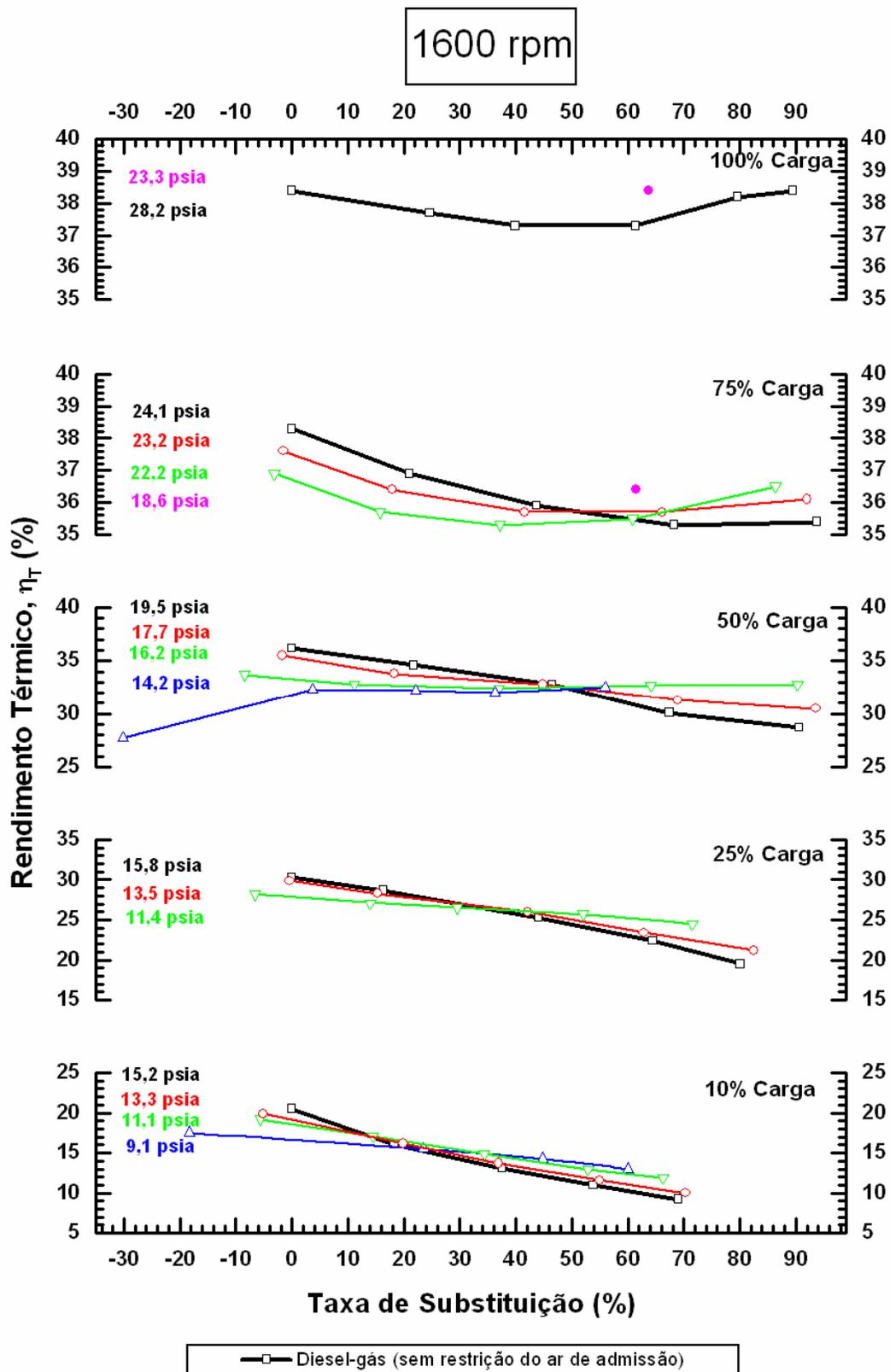


Figura 35 – Rendimento térmico com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão.

## Eficiência Volumétrica

A eficiência volumétrica com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar admitido são apresentadas na **Figura 36**.

Observa-se que, no modo Diesel a eficiência volumétrica, em geral, é maior que 100%. Isto, devido à operação do turbocompressor, que eleva a pressão do ar no coletor de admissão acima da pressão atmosférica, fazendo com que, no mesmo volume, seja possível depositar maior massa de ar. Entretanto, tal efeito aumenta conforme é incrementada a carga do motor.

Na operação Diesel-gás, sem restrição do ar, observa-se que a eficiência volumétrica diminui ligeiramente em relação ao modo Diesel conforme aumenta a taxa de substituição. Esta diminuição é menor em 10% e 50% da plena carga (~2%). Para 25% de carga, a maior diferença encontrada foi de 8,9% em 44,1% de substituição. Já em altas cargas e com as máximas taxas de substituição, verificou-se uma queda entre 10% e 15%. Nota-se que a maior diferença acontece em máxima carga, onde o consumo de gás tende a aumentar. Assim, a queda da eficiência volumétrica ocorre basicamente pelo deslocamento parcial do ar, devido ao gás natural.

### **Operação Diesel-gás com restrição parcial do ar**

Neste modo, como era esperado, observa-se uma diminuição da eficiência volumétrica comparada ao modo Diesel-gás sem restrição do ar. Isto ocorre em função de dois motivos: o aumento da perda de carga pelo estrangulamento do ar através da borboleta eletrônica e o deslocamento parcial do ar pelo gás natural admitido. Quantitativamente, observa-se que as menores diferenças ocorrem em altas cargas, onde a borboleta operou com uma restrição inferior, comparado às cargas baixas, provocando a menor perda de carga. Por outro lado, em baixas cargas, surgem as menores eficiências volumétricas devido ao maior fechamento da borboleta. Assim, para 10% de carga e 60% de taxa de substituição (no modo Diesel-gás sem restrição do ar, 15,2 psia), a eficiência volumétrica foi de 98,1% para 61,9% a 58% da pressão original do ar (9,1 psia). Isso corresponde a 37% na redução da eficiência volumétrica. É interessante chamar a atenção para a relação existente entre a eficiência volumétrica e as emissões de CO e HC (Figuras 31, 32 e 36).

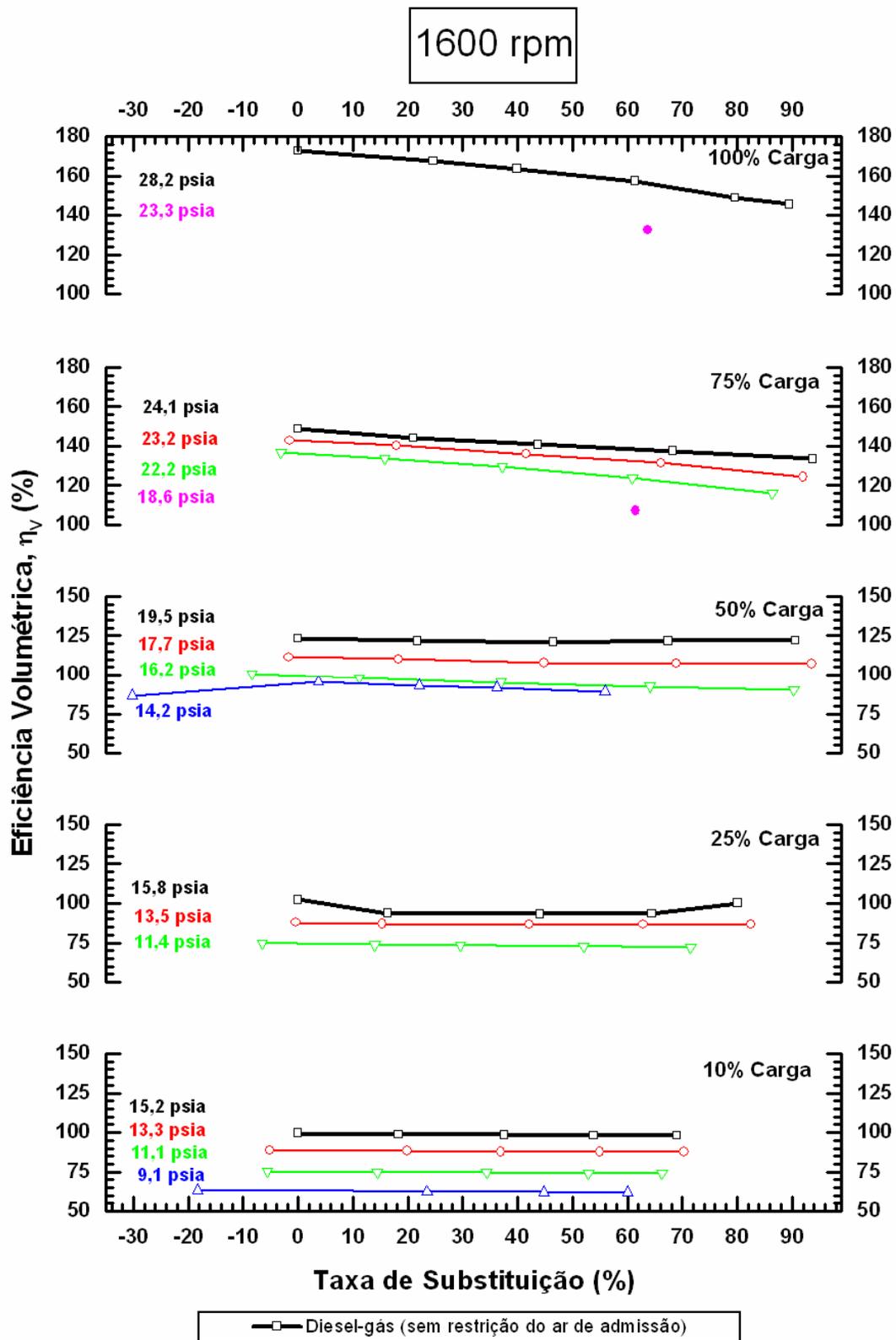


Figura 36 – Eficiência volumétrica com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão.

As menores eficiências volumétricas, em baixas cargas, originam as maiores reduções das emissões de CO e HC. Neste ponto vale ressaltar que, no período de cruzamento de válvulas, aumentaria a tendência da mistura “queimada”, total ou parcialmente, ser novamente aspirada pelo motor, uma vez que a queda de pressão causada pela borboleta faz com que a pressão de escapamento seja maior que a de admissão. Assim, esta mistura já “queimada” ocuparia o lugar da nova mistura, contribuindo também para uma adicional queda da eficiência volumétrica. Isto explicaria, em parte, a mencionada relação em baixas cargas. Entretanto, como dito por Taylor (1976), este efeito diminui rapidamente com o aumento da velocidade, porque diminui o tempo no cruzamento de válvulas.

### Temperatura de Escape

O comportamento da temperatura dos gases de escape em função da taxa de substituição, cargas do motor e pressões do ar admitido são apresentadas na **Figura 37**. Observa-se que até 75% da plena carga, na operação Diesel-gás sem restrição do ar, a temperatura de escape aumenta à medida que se eleva a taxa de substituição. Já em plena carga, verifica-se uma redução de 23 graus na diferença das temperaturas de escape entre o funcionamento original Diesel (487 °C) e o funcionamento Diesel-gás com 90% de substituição (464 °C). Nota-se que existe uma relação entre esta redução e o incremento do rendimento térmico (Figura 35). Nestas condições, existe um melhor aproveitamento da energia liberada na combustão para o trabalho efetivo, resultando numa menor quantidade de energia perdida pelo escapamento.

### **Operação Diesel-gás com restrição parcial do ar**

É verificada a relação existente entre a temperatura de escape e a redução parcial do ar de admissão. A redução do ar admitido ocasiona aumento na temperatura de escape. Isto ocorre como consequência de uma maior parcela de calor liberado na combustão, da qual parte é transformada em trabalho mecânico e parte é liberada pelo escapamento. Tal fato pode ser verificado pelos resultados das emissões e rendimento térmico (Figuras 31 a 35).

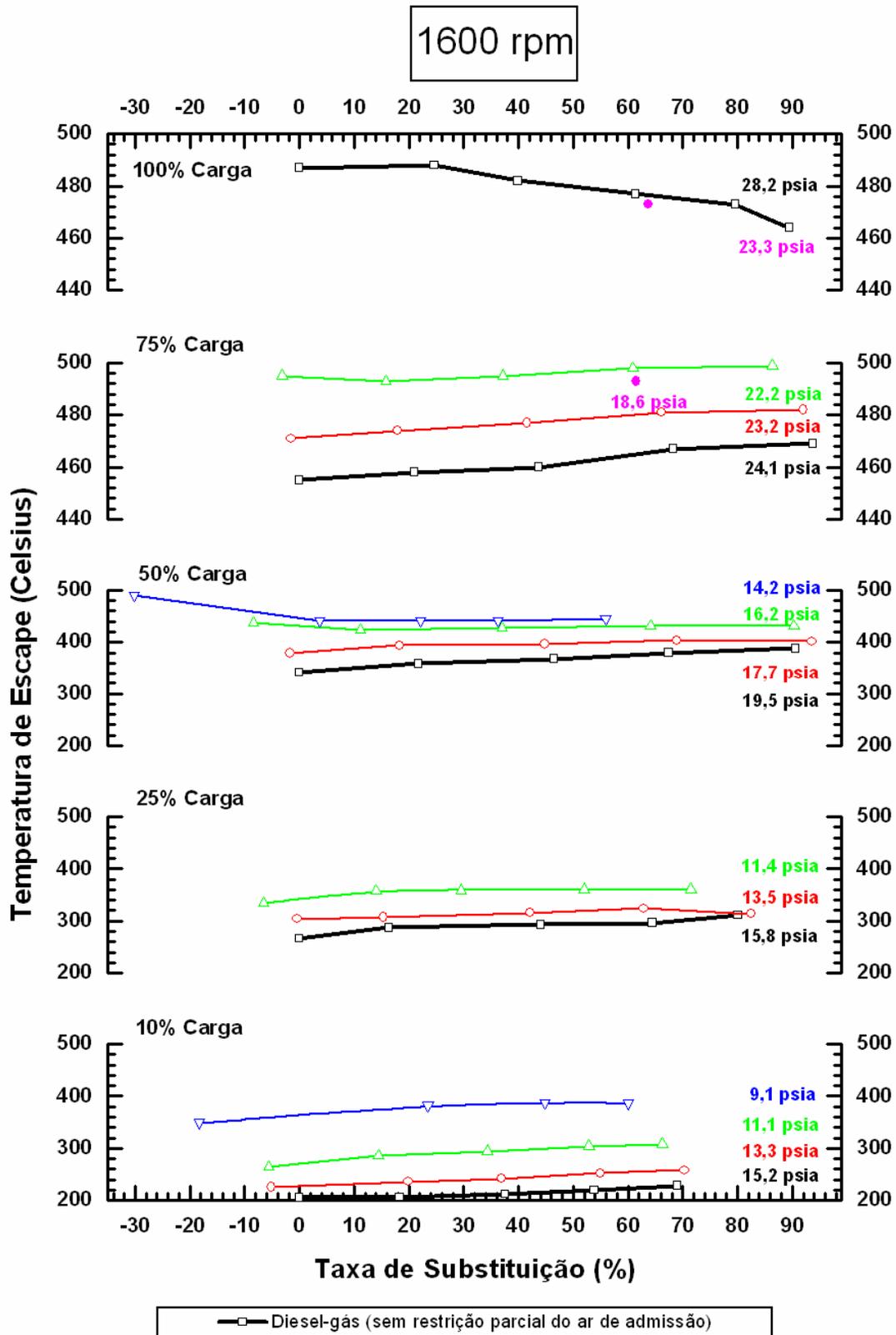


Figura 37 – Temperatura de escape com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão.

Para cargas entre 10% e 75%, a redução da pressão do ar origina um aumento da temperatura de escape. Entretanto, tal diferença cai conforme se aumenta a carga do motor. Assim, para 10% de carga e 60% de substituição (no modo Diesel-gás sem restrição do ar, 15,2 psia) a temperatura de escape foi de 223 °C para 386 °C a 60% da pressão original do ar (9,1 psia). Tal diferença corresponde a 73% no incremento da temperatura de escape. Já em plena carga, esta diferença foi quase imperceptível.

### Emissões de HC, CO e NO<sub>x</sub> versus a Razão de Equivalência

As **Figuras 38 a 39** apresentam a variação das emissões específicas de HC, CO e NO<sub>x</sub> com a razão de equivalência total, para **1600 rpm** e máximas taxas de substituição Diesel/gás. A operação Diesel-gás sem restrição do ar é reconhecida pela notação de “100% AR”. As diminuições parciais da vazão de ar são identificadas por seus respectivos percentagens. Outro detalhe, já observado na Figura 27, é que acréscimos da carga ocasionam o aumento da razão de equivalência total.

Cabe destacar que, para cada carga, também foram representados os pontos correspondentes às pressões parciais do ar com taxa máxima de substituição. Tais pontos obtiveram os melhores índices de redução nas emissões de HC e CO e, conseqüentemente, os melhores rendimentos em relação ao modo Diesel-gás sem restrição do ar (vide Figuras 31, 32 e 35).

Nas Figuras 38 e 39, somente para demonstração, também foram representadas as barras de incerteza correspondentes aos valores médios das emissões específicas. Observa-se que as incertezas são mais representativas, em ordem de grandeza, nos pontos correspondentes às baixas cargas. Entretanto, todas as incertezas calculadas, em todas as rotações e cargas do motor, são apresentadas nas planilhas do Apêndice B.

### **Emissões de HC e CO (1600 rpm)**

Observa-se que as emissões de HC e CO decaem conforme aumenta a carga do motor, originado pelo incremento da razão de equivalência total. Nestas curvas, pode-se também apreciar os pontos relativos às reduções parciais da vazão do ar, os mesmos que levam à diminuição destas emissões.

Verifica-se que as emissões de HC e CO diminuem numa elevada ordem de grandeza quando alcançam uma razão de 0,73 (valor correspondente 50% da carga com a mínima redução da vazão do ar, 71%). Logo, a partir deste valor, as emissões de hidrocarbonetos não queimados e monóxido de carbono, tornam-se praticamente inalteradas por uma maior razão de equivalência. Isto é o indicativo do limite da razão de equivalência para o qual a propagação da chama, desde os centros de ignição, seja bem sucedida.

Verifica-se também que, com razões de equivalência acima de 0,73, as emissões de CO resultam em níveis semelhantes aos obtidos em baixas cargas da operação Diesel tradicional.

### **Emissões de NO<sub>x</sub> (1600 rpm)**

Na operação Diesel-gás, sem restrição do ar, verifica-se que para cargas até 25% da plena carga (0,55 da razão de equivalência), as emissões de NO<sub>x</sub> tendem a diminuir. Já em cargas superiores a este valor, as emissões de NO<sub>x</sub> aumentam conforme é incrementada a carga do motor.

Diminuições da vazão do ar acarretam aumentos da razão de equivalência total e, conseqüentemente, aumentos nas emissões de NO<sub>x</sub>. Note-se que esta tendência é contrária ao comportamento das emissões de HC e CO.

Novamente, é interessante ressaltar o ponto correspondente a 50% da carga com 71% da vazão de ar e conseqüente razão de equivalência de 0,73. Observa-se que razões de equivalência abaixo deste valor resultam em menores emissões de NO<sub>x</sub> em relação às encontradas no modo Diesel. Já em razões de equivalência acima deste valor, onde foram encontradas as menores emissões de HC e CO, as emissões de NO<sub>x</sub> aumentaram conforme foi incrementada a razão de equivalência.

Por outro lado, a maior razão de equivalência (0,8) foi alcançada em plena carga com a mínima redução da vazão de ar (85%). Neste ponto, o valor de HC foi o mínimo encontrado (1,9 g/kW.h) e, como era de se esperar, as emissões de NO<sub>x</sub> chegaram ao valor máximo (8,6 g/kW.h). Embora, as emissões de CO também foram baixas (4,2 g/kW.h), este valor foi superior ao mínimo encontrado, à mesma carga sem restrição do ar (2,7 g/kW.h com razão de equivalência igual a 0,72). Este incremento de CO poderia ser atribuído ao maior consumo de óleo Diesel quando o ar de admissão é restringido. Isto é observado na elevada queda da máxima taxa de substituição, de 89,5% para 63,7% (vide Figura 31).

As **Figuras 40 a 42** tratam das emissões específicas de HC, CO e NO<sub>x</sub> (funcionamentos Diesel-gás e Diesel-gás com restrição do ar) **em todas as rotações** e cargas do motor, correlacionando estas com a razão de equivalência total. Como comentado anteriormente, nos pontos dedicados à restrição parcial do ar, somente foram considerados aqueles correspondentes à taxa máxima de substituição.

Embora haja muita variação em função da carga e da rotação, o motor Diesel-gás não aceitou misturas com razões acima de 0,83 da estequiométrica e praticamente não trabalhou com razões inferiores a 0,30 para as máximas taxas de substituição. Observe que este resultado já foi mostrado anteriormente na operação Diesel-gás sem restrição do ar (Figura 27).

#### **Emissões de HC e CO (todas as rotações)**

Comparando as Figuras 38a, 38b, 41 e 42, observa-se o mesmo comportamento na queda das emissões de HC e CO. Em baixas cargas, conforme aumentam as rotações do motor, são elevadas as razões de equivalência total.

É observado que as emissões de HC e CO diminuem significativamente até a razão de equivalência total de 0,67. Acima deste valor, estas emissões tornam-se praticamente inalteradas. Os pontos onde a razão é superior a 0,67, foram obtidos tipicamente acima de 50% da plena carga. Nesta região, entre 0,67 e 0,83 da razão de equivalência, as emissões de CO apresentaram valores compreendidos entre 2 g/kWh e 7 g/kWh, assim como as emissões de HC apresentaram um valor próximo a 2 g/kWh.

Os máximos valores de HC e CO foram, respectivamente, 416 g/kWh e 85 g/kWh, ambos em 2600 rpm, 10% da plena carga e 100% do ar admitido.

#### **Emissões de NO<sub>x</sub> (todas as rotações)**

Das Figuras 39 e 42, pode-se confirmar a mesma tendência relativa às emissões específicas de NO<sub>x</sub>, ou seja, o comportamento destas emissões se mostrou o inverso dos resultados de CO e HC. Para o intervalo entre 0,67 a 0,83 da razão de equivalência total, os valores de NO<sub>x</sub> alcançaram os máximos patamares, compreendidos entre 4,3 g/kWh e 22,6 g/kWh.

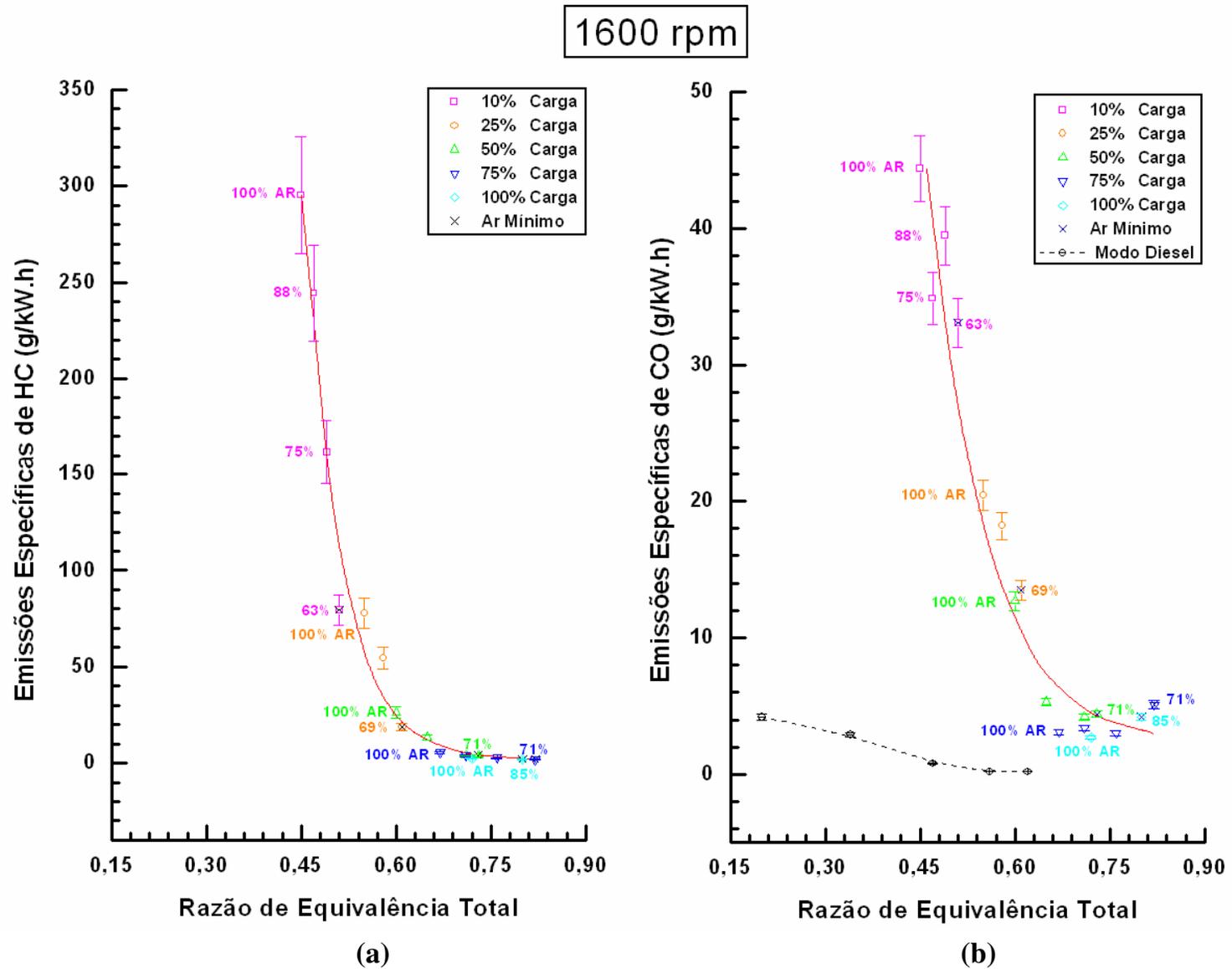


Figura 38 – Emissões específicas de hidrocarbonetos não queimados e monóxido de carbono com variação da razão de equivalência total, para diferentes cargas e restrições parciais do ar de admissão. Operação Diesel-gás com máxima taxa de substituição.

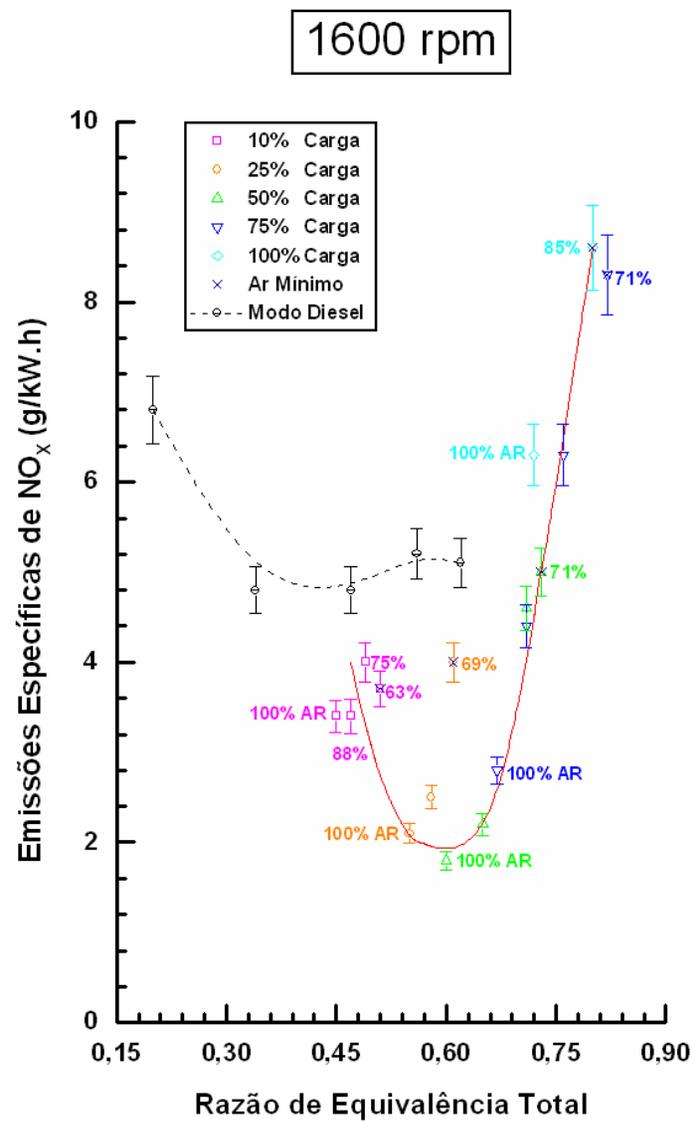


Figura 39 – Emissões específicas de óxidos de nitrogênio com variação da razão de equivalência total, para diferentes cargas e restrições parciais do ar de admissão. Operação Diesel-gás com máxima taxa de substituição.

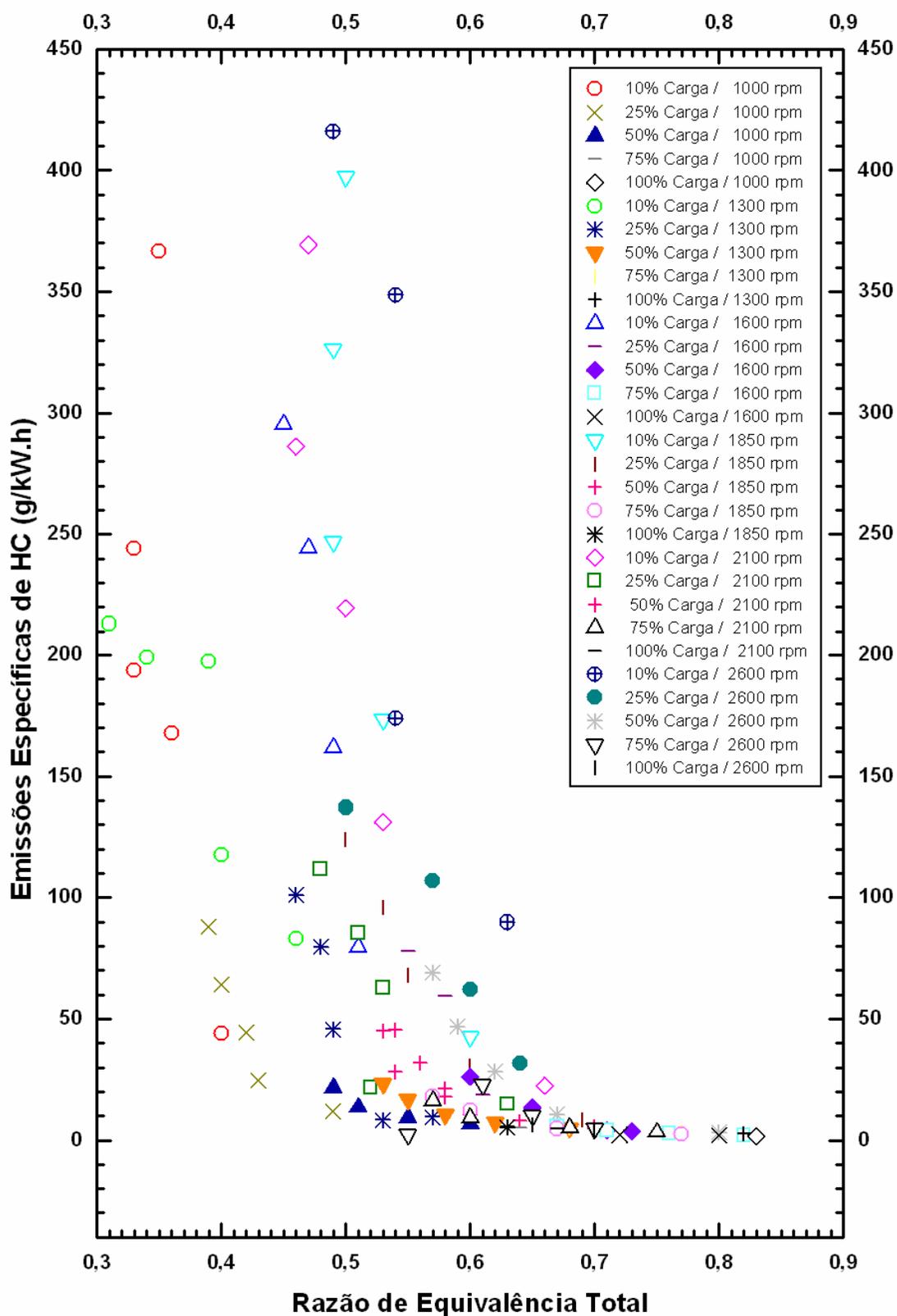


Figura 40 – Emissões específicas de HC com variação da razão de equivalência total (originadas pelas restrições parciais do ar de admissão), para diferentes cargas e rotações do motor. Operação Diesel-gás com máxima taxa de substituição.

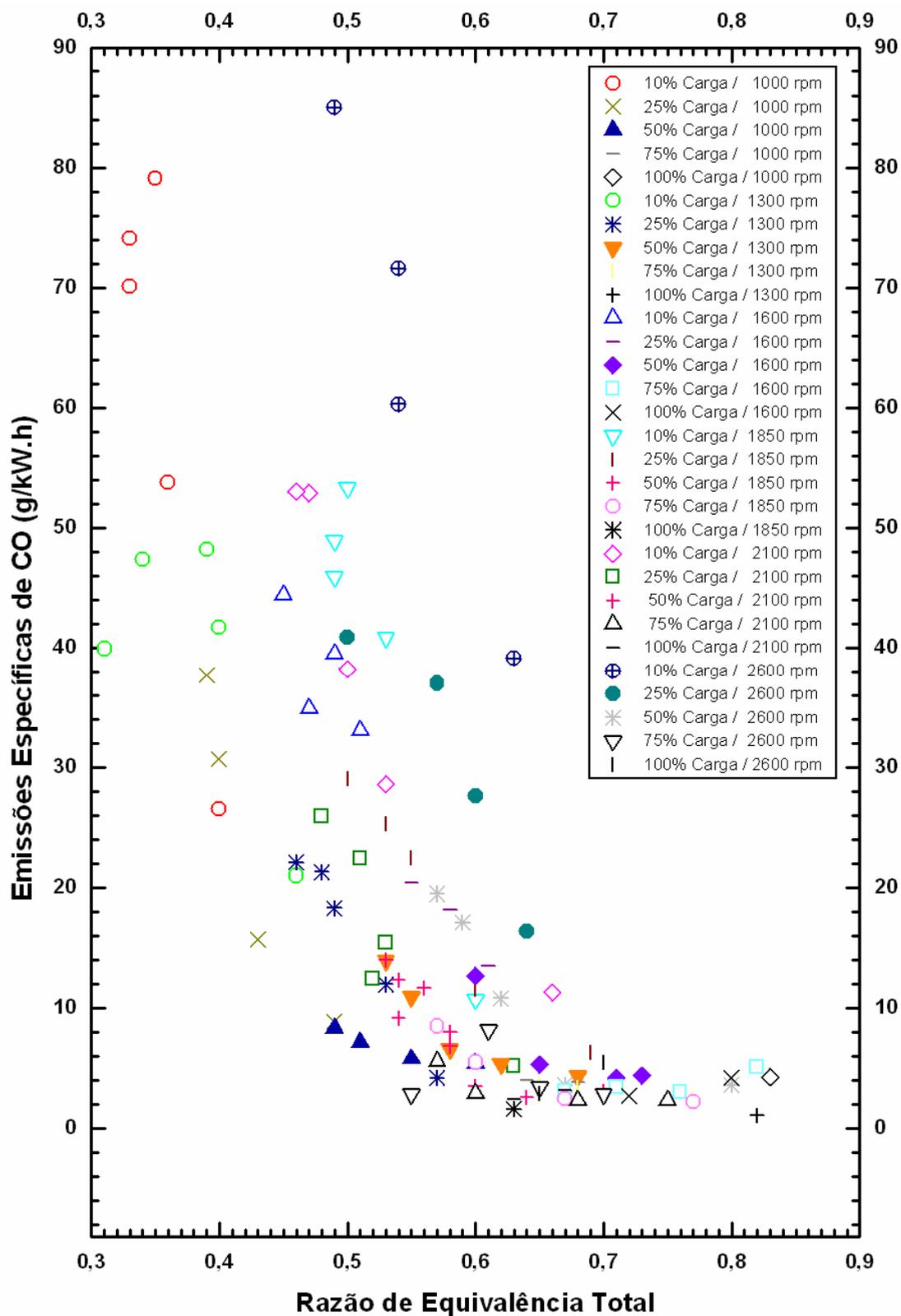


Figura 41 – Emissões específicas de CO com variação da razão de equivalência total (originadas pelas restrições parciais do ar de admissão), para diferentes cargas e rotações do motor. Operação Diesel-gás com máxima taxa de substituição.

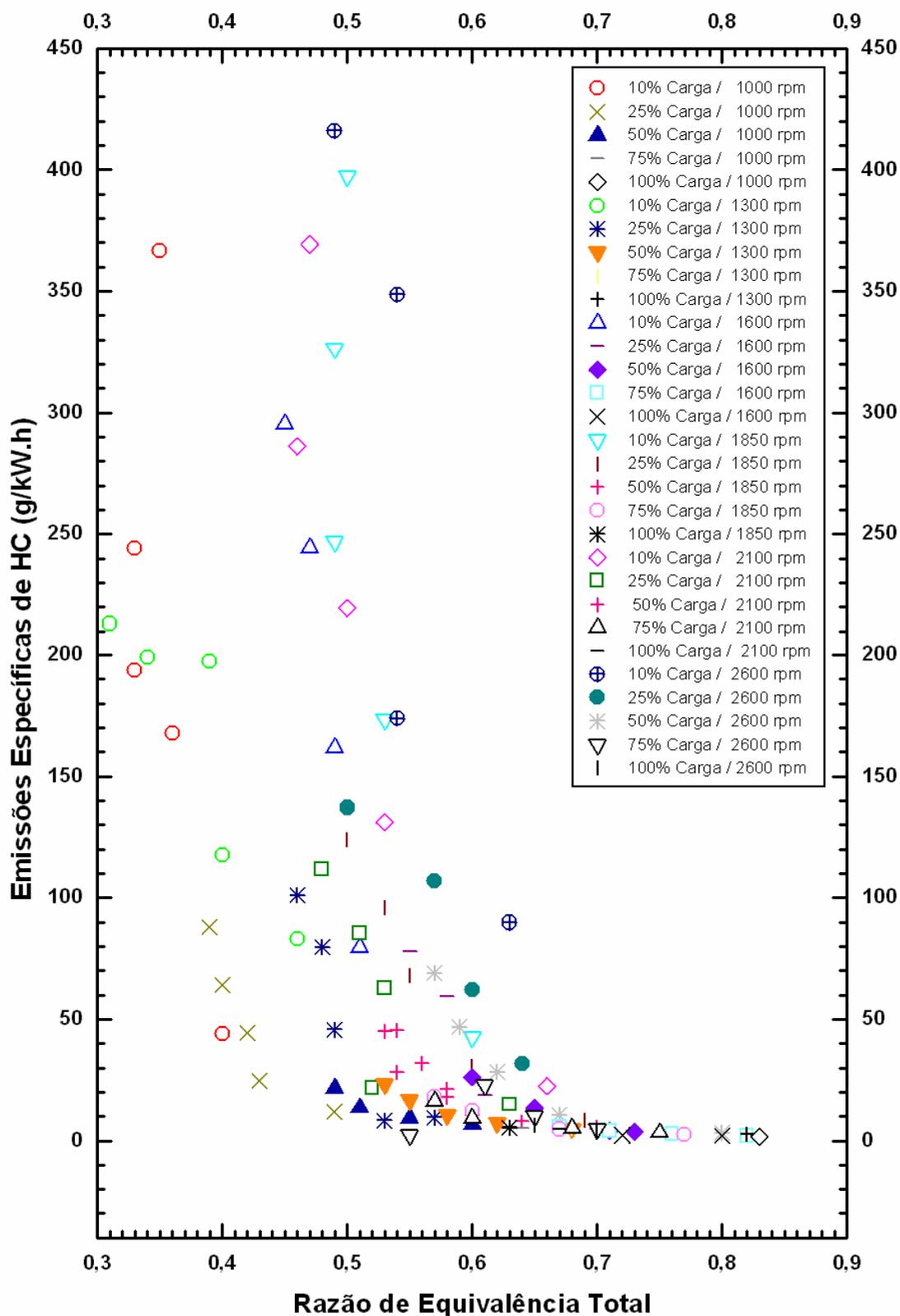


Figura 42 – Emissões específicas de  $\text{NO}_x$  com variação da razão de equivalência total (originadas pelas restrições parciais do ar de admissão), para diferentes cargas e rotações do motor. Operação Diesel-gás com máxima taxa de substituição.