

Taxa de Combustão

Contribuição de Bruno Ferreira Porto
03 de December de 2007
Última Atualização 12 de December de 2007

A superfície de combustão de um propelente sólido regride perpendicularmente a essa superfície. A velocidade dessa regressão, geralmente medida em milímetros por segundo, é chamada de taxa de combustão. Essa taxa muda drasticamente em diferentes propelentes ou mesmo para um propelente em particular dependendo da variação de sua fórmula e métodos de produção. Os principais fatores e suas causas serão discutidos a seguir.

Pressão na câmara de combustão

A taxa de combustão é afetada profundamente pela pressão na câmara. Por exemplo, um propelente de Nitrato de Potássio e Sacarose têm uma taxa de combustão de 3,8 mm/s a 1 ATM, porém a 68 ATM essa taxa se aproxima de 15 mm/s, (2) . A representação mais comum dessa relação é dada pela Lei de Vieille também conhecida por Lei de Saint Robert:

Equação 1

Na equação acima r é a taxa de combustão, a é o coeficiente de combustão, P_c é a pressão na câmara e n é o expoente de pressão. Os valores de do coeficiente e expoente são obtidos empiricamente para cada propelente em particular e não podem ser teoricamente determinados de acordo com diversas das referências. Muitas vezes apenas um coeficiente e um expoente são necessários para definir o comportamento em uma faixa restrita de pressão. Mais de um conjunto poderá ser necessário para determinar todo um regime de comportamento. Quando um gráfico da variação da taxa de combustão em função da pressão é plotado em escala logarítmica representa uma linha reta. Certos propelentes, ou propelentes com aditivos, desviam desse comportamento e exibem mudanças bruscas na curva logarítmica. Esses propelentes são definidos como platô ou mesa e suas curvas características podem ser vistas na Figura 4.

Figura 4 - Gráfico logarítmico da relação taxa de combustão e pressão de três propelentes diferentes. Fonte: NASA, (14).

Esses comportamentos podem ser explicados por diferentes relações de regressão da superfície de combustão (em função da pressão) do constituinte base em relação às partículas oxidantes, de acordo com textos de Nakka, (2) e NASA, (14), outra possibilidade é que a fase condensada dos produtos da combustão não tenha tempo de transferir o seu calor para a superfície de combustão sob altas pressões.

A taxa de combustão é particularmente sensível ao expoente de pressão (a inclinação da curva logarítmica da Figura 4). Valores altos do expoente produzem grandes diferenças na taxa de combustão com pequena variação da pressão, com possíveis conseqüências catastróficas. Outro fator indesejado gerado por altos valores do coeficiente é a baixa sensibilidade do propelente em baixas pressões, isso pode dificultar a ignição do motor, onde mantendo apenas a taxa de combustão a pressão ambiente não se consegue gerar vazão suficiente para aumentar a pressão interna e logo a taxa de combustão para valores de eficiência. Essa baixa sensibilidade fica mais clara ao observar-se a curva de $n=1$ na Figura 5, isso implica que a taxa de combustão seja linearmente relacionada à pressão. Na Figura 5 pode-se ver o resultado para diversos valores do coeficiente. O exemplo de $n=0,2$ mostra a rápida ascendência da taxa de combustão em relação à pressão no início da curva, portanto motor é capaz de atingir rapidamente a pressão de projeto, a ignição é mais eficiente e em pressões mais altas a variação da taxa é mais suave, logo, mais seguro.

Figura 5 - Influência do Expoente de Pressão na Taxa de Combustão

Se o valor de n se aproxima de zero, a taxa de combustão se torna extremamente insensível à pressão e uma combustão instável será observada. Por essas razões os expoentes de propelentes práticos ficam na faixa de $n=0,3$ a $n=0,6$, de acordo com Nakka, (2) e Sutton, (8), dentro das condições de regime permanente do motor.

{mospagebreak title=Outros fatores}

Temperatura inicial do grão de propelente

A temperatura afeta a taxa de reações químicas, logo a temperatura inicial do propelente influencia na taxa de combustão. Mas esse efeito só é considerável, para os tipos de propelentes propostos por este trabalho, em temperaturas abaixo de 0°C e varia muito pouco entre 0°C e 40°C , de acordo com Nakka, (2). Portanto, para lançamentos no clima brasileiro, esse efeito é desprezível.

Velocidade dos gases fluindo paralelos à superfície

Para a maioria dos propelentes uma velocidade de fluxo muito alta leva a variações na taxa de combustão. Essa variação se deve ao aumento da taxa de convecção devido ao fluxo turbulento dos gases. Quando a taxa de combustão aumenta devido ao fluxo o efeito é conhecido por combustão erosiva. A maioria dos propelentes possui uma velocidade inicial onde o fenômeno passa a ocorrer, abaixo dela ou não existe variação ou acontece o que é conhecido por combustão erosiva negativa. A negativa acontece possivelmente pela mudança nos processos físicos de transferência de calor que controlam a taxa de combustão. Nakka, (2) e Gordon, (13).

Na Figura 6 o propelente A tem uma velocidade crítica de aproximadamente 240 ft/s, não apresenta combustão erosiva negativa e exibe um grande aumento da taxa de combustão em relação à velocidade do fluxo. O propelente B (AP/Poliuretano) tem uma velocidade crítica mais baixa, combustão erosiva negativa e combustão erosiva acima da velocidade inicial. Em velocidades baixas o processo de transferência de massa domina a transferência de calor, Nakka, (2), mas à medida que a velocidade aumenta o mecanismo de convecção começa a se tornar mais significativo, como se pode observar na Figura 7.

Figura 6 - Influencia da Velocidade dos gases dentro do grão na Taxa de Combustão. NASA, (14).

Figura 7 - Relação velocidade e natureza de transferência de calor, Kuo, (15).

Para se evitar o efeito da combustão erosiva deve-se projetar o motor com uma relação entre a área de passagem dos gases no propelente e a área da garganta da tubeira. Wang e Feng, (16), sugeriram uma forma de calcular a relação crítica de áreas a partir da qual a combustão erosiva passa a acontecer. Essa relação é dada por:

Equação 2

Onde J é a relação entre a área de passagem e a área da garganta dada por:

Equação 3

Sendo A^* a área da garganta e A_p a área de passagem dos gases no grão. Essa relação foi comprovada por ensaios e a teoria se mostrou muito precisa. Os valores de J giram em torno de 0,56, portanto a regra básica, recomendada por muitas referências, da área de passagem ser duas vezes maior que a área da garganta, é uma boa escolha. A velocidade dos gases dentro do grão é aumenta ao longo do seu comprimento, já que a vazão é gerada em toda área ao longo da seção de passagem. Por isso, a relação entre comprimento e diâmetro externo do grão deve ser limitada para se evitar queima erosiva no fim do grão. A regra geral, é uma relação L/D menor que 5. Acima deste valor podem-se usar grãos de seção variável, aumentando a área A_p quanto mais próximo da tubeira, mas o projeto e a produção de um grão nessa geometria são mais complexos.

{mospagebreak title=Processo físico da combustão}

Processo físico da combustão

Os propelentes nas suas formas mais simples consistem em compósitos de partículas de oxidante de diversos tamanhos dentro de uma matriz, ou material base, de combustível, Sutton, (8). Para entender a taxa de combustão é importante conhecer os principais fenômenos que controlam o processo de combustão. Diferentes modelos teóricos já foram sugeridos como o Beckstead-Derr (BPD) e o Petite Ensemble Model (PEM), (2). O modelo BPD considera todas as partículas de oxidante com o mesmo tamanho, dispersas uniformemente no combustível base, sendo esse completamente uniforme. Esta não é uma imagem real, pois representa no máximo 80% da constituição do propelente, por mais elaborada que seja sua preparação. Partículas com grande variedade de tamanhos inclusive são desejáveis, as partículas menores ajudam a preencher os espaços vazios entre as maiores permitindo porcentagens maiores de oxidante no propelente. Já o modelo PEM reconhece que existe uma grande variedade de tamanhos de partículas. O processo de combustão envolve diversos passos. Envolve a transferência de energia para a mudança de fase dos componentes do propelente, primeiramente para a fase líquida que permite uma melhor transferência de calor e mistura dos componentes que leva a fase gasosa, onde a mistura termina seu ciclo de combustão. O importante dessa análise é descobrir qual é o elemento que leva mais tempo para mudar a fase, esse será o elemento determinante na taxa de combustão. Para propelentes com perclorato de amônia esse é o constituinte que tem maior grau de importância na taxa de combustão, isso pode ser observado na forte relação entre o tamanho médio das partículas desse componente e a taxa de combustão.

Figura 8 - Efeito da granulometria do Perclorato de Amônia na taxa de combustão, NASA, (17).

Já nos propelentes de nitrato de potássio e açúcares como dextrose, sacarose e sorbitol o elemento determinante é o material base, o combustível. Nakka, (2), em estudos com estes propelentes chegou a conclusão de que tamanho da partícula do oxidante não altera de forma significativamente a taxa, mas se for mudado o combustível tem-se grandes variações em relação aos três açúcares. Nos propelentes a base de epóxi usados nesse projeto o elemento que define também é o material base, seu combustível e o epóxi. Ele apresenta uma taxa de combustão muito lenta se comparado a um dos propelentes de açúcar por ser sublimável e não conseguir transferir energia suficiente ao nitrato para se tornar gás e dar continuidade ao processo. É exatamente essa a razão da alta proporção de catalisador (Óxido de Ferro) na mistura, 8%, sendo que o usual para aditivos está entre 1% e 2%.

{mospagebreak title=Manipulando a Taxa de Combustão}

Manipulando a Taxa de Combustão

Existem muitas formas de se manipular a taxa de combustão de um propelente caso seja necessário. Para propelentes onde o oxidante é a principal influência na taxa de combustão a mudança do tamanho do seu particulado altera a taxa. Alterar a proporção de oxidante/combustível é outra forma de manipular a taxa. Podem ser usados aditivos catalisadores ou supressores que, respectivamente, aumentam ou diminuem a taxa. A forma mais simples é alterando a pressão na câmara de combustão.

Tamanho das partículas de oxidante

Essa manipulação só é eficiente em propelentes onde o fator determinante da taxa de combustão é o oxidante, como nos propelentes onde o oxidante é perclorato de amônia, que é o caso da maioria dos propelentes profissionais. Nos propelentes amadores mais comuns, KN-açúcares e KN-Epóxi, o fator determinante é o combustível. A mudança no tamanho da partícula do oxidante, como pesquisou Richard Nakka, (2), não apresenta grande influência.

Proporção Combustível / Oxidante

A maioria dos propelentes é fortemente influenciada por essa relação, mas essa mudança é muito restrita já que tanto o desempenho do propelente quanto suas características mecânicas são afetadas.

Aditivos

O uso de aditivos é a forma mais eficiente e usual de se manipular a taxa de combustão. Um aditivo geralmente é usado em pequenas proporções, tipicamente poucos pontos percentuais da massa total. No caso dos aditivos estes podem agir de diferentes maneiras (ou a combinação de algumas): melhorando o processo de decomposição do combustível ou do oxidante, acelerando a reação dos gases de combustível na zona de combustão e melhorando a taxa de condução de calor da frente de chama para o propelente. Alguns aumentam a taxa de queima alterando o coeficiente de pressão, outros tendem a aumentar o expoente, fazendo o propelente mais sensível a mudanças de pressão. Alguns exemplos de catalisadores citados por Nakka, (2), e Sutton, (8):

- Óxido de ferro (FeO), Óxido de cobre (CuO), Dióxido de manganês (MnO_2) são comumente usados como catalisadores em propelentes de Perclorato de amônia, assim como Cromato de cobre;

- Dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ou Dicromato de amônia para propelentes de Nitrato de amônia;

- Óxido de Ferro (FeO) e Sulfato de ferro (FeSO_4), Dicromato de potássio em propelentes Kn-Açúcar;

- Negro de fumo, basicamente carbono, pode aumentar ligeiramente a taxa de combustão na maioria dos propelentes pelo aumento da transferência de calor da frente de chama para a superfície do propelente.

Figura 9 - Influência do óxido de ferro em propelentes AP/PBAN, NASA, (17).

É importante ressaltar que a adição de um catalisador não só aumenta a taxa de combustão como torna mais fácil o início da combustão. Essa é uma dupla vantagem, ao mesmo tempo em que facilita a ignição e leva a um uso mais eficiente do propelente já que o processo inicial de pressurização do motor se torna mais rápido e a curva de empuxo-tempo é mais próxima do projetado. Em casos extremos o propelente fica mais perigoso de se manipular e estocar exigindo muito cuidado em seu uso para evitar uma ignição acidental, já que atinge rapidamente altas pressões.

Os supressores são usados quando se deseja diminuir a taxa de combustão, ou seja, seu efeito é o oposto dos catalisadores. Em propelentes KN-Açúcares a umidade é um eficiente, mas de difícil controle, supressor. Propelentes suprimidos são mais difíceis de se iniciar o processo de combustão e necessitam de sistemas de ignição mais energéticos.

Alteração na Pressão de Projeto

Para propelentes se comportam dentro da Lei de Vieille alterar a pressão de projeto é um meio muito simples de se alterar a taxa de combustão. Para os que entram nos padrões Mesa ou Platô esse efeito é menos significativo. Os limites dessa técnica podem ser observados na Figura 5, na faixa dos expoentes práticos pode-se observar que será necessária uma grande diminuição de pressão para se reduzir a taxa de combustão de forma significativa, o que pode ser um sério problema em relação ao desempenho. Já, aumentar a pressão é mais limitado, já que uma estrutura mais resistente seria necessária e esbarraria em limites de peso e custo.