

DIAGNÓSTICO DA ESTRUTURA DE FRENTES DE DETONAÇÃO POR MEIO DE FOLHAS COM FULIGEM

DETONATION FRONT STRUCTURE DIAGNOSTICS THROUGH SOOTED FOILS

Frederico Cardoso Faria Della Bidia¹, Carla Simone Tafuri Marques², Amilcar Porto Pimenta³, Jonathan Brandão Ramos Santos⁴

¹Mestrando em Ciências e Tecnologias Espaciais, Aerodinâmica e Hipersônica. Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos. E-mail: freddbida@gmail.com

²Professora Dra. da Divisão de Aerodinâmica e Hipersônica, EAH-D Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos. E-mail: carlatm@ieav.cta.br

³Professor Dr. do Departamento de Propulsão, Engenharia Aeronáutica do Instituto de Tecnologia da Aeronáutica (ITA), São José dos Campos. E-mail: amilcar@ita.br

⁴Engenheiro Mecânico pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus de Guaratinguetá. E-mail: jonbrsatos@gmail.com

RESUMO

Este trabalho trata do método de diagnóstico da estrutura de frentes de detonação por meio de folhas com fuligem. O objetivo principal é desenvolver o método para uso nas pesquisas sobre detonação a serem desenvolvidas no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Brasil. O método consiste no uso de placas lisas impregnadas de fuligem em sua superfície, expostas ao meio onde ocorre a detonação. A passagem da onda de detonação remove seletivamente a fuligem, revelando a trajetória dos pontos tripos presentes na estrutura da onda de detonação. As marcas de trajetória formam um padrão característico, similar a escamas de peixe, denominado célula de detonação. O principal parâmetro a ser avaliado pela técnica é a largura da célula de detonação, grandeza associada com a detonabilidade da mistura. A técnica de deposição de fuligem foi testada, variando combustíveis, tempo de deposição e posição de deposição da folha. Foram realizados seis ensaios, em que em duas ocasiões células de detonação foram detectadas na fuligem. As células de detonação foram medidas por meio de técnicas óticas para, então, serem comparadas com modelo teórico e medição de emissão luminosa, validando os resultados. Os tamanhos de células de detonação determinados indicam uma variação da velocidade de detonação aceitável para um Motor de Detonação Pulsada (Pulse Detonation Engine – PDE).

Palavras-chave: Combustão, detonação, diagnóstico, PDE.

ABSTRACT

This work deals with a method for detonation wave front diagnostics through soot foils. The main goal is to develop the method for further detonation research to be developed at the Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Brazil. The method consists in the use of smooth plates with soot impregnated surface, exposed to the medium where detonation will occur. The passing wave front selectively removes the soot, revealing triple points trajectories present on detonation waves structure. The trajectory tracks forms a distinctive pattern, like fish scale, called detonation cell. The main evaluating parameter is the detonation cell width, a dimension associated with the mixture's detonability. The soot deposition technique was tested, varying fuels, deposition time and deposition position. Six test runs were made, were in two occasions detonation cells were detected in the soot. The detonation cells were measured through optical techniques, then were compared with a theoretical model and light emissions measurements, validating results. Detonation cell sizes measured pointed out changes in Chapman-Jouguet velocity on detonation propagation within flow fluctuations usual in Pulse Detonation Engine (PDE).

Keywords: Combustion, Detonation, Diagnostics, PDE.

1 – INTRODUÇÃO

O estudo de fenômenos de detonação é aplicado a diversos campos de atuação das ciências físicas e da engenharia, como explosivos, segurança de ambientes com material particulado inflamável e até fenômenos físicos no interior de corpos celestes.

1.1 Motivação

Uma das áreas de estudo desse fenômeno é a propulsão de veículos aéreos, que considera desde ocorrências indesejáveis, como a detonação em motores ciclo Otto, até novas formas de propulsão de aeronaves e mísseis, como os motores SCRAMJET e Motor de Detonação Pulsada (*Pulse Detonation Engine – PDE*). Estes dois últimos tem sido alvos de extenso estudo nas últimas décadas, na busca de velocidades hipersônicas e ganhos em eficiência de propulsão.

O Motor de Detonação Pulsada é uma forma de propulsão aspirada de veículos aéreos que promete ganhos em simplicidade e eficiência. Mas também apresenta enormes desafios de engenharia, tanto que ainda hoje, mesmo após décadas de estudo, ainda não existe uma aplicação prática em uso (KAILASANATH, 2000).

O PDE funciona de maneira análoga ao pulso-jato. A grande diferença é que o pulso-jato opera em um regime de deflagração turbulenta, enquanto o PDE opera em regime de detonação com ignições sucessivas de mistura combustível controlada. O PDE é composto de um tubo em geral acoplado a uma tubeira, que serve de câmara de combustão e duto de escape, um sistema de ignição da mistura e um sistema para admissão da mistura combustível. Pode-se ter um sistema de ignição que inicie a detonação de maneira direta, mas isso exige uma quantidade de energia muito grande dependendo da mistura combustível usada, o que o torna inviável. Normalmente, a ignição inicia uma deflagração, esta realiza uma transição para uma detonação, em um processo denominado DDT (*Deflagration to Detonation Transition* ou *Transição de Deflagração para Detonação*) associada a um obstáculo gerador de turbulência. O regime de detonação apresenta uma frente de onda supersônica; a ignição da mistura ocorre por meio da onda de choque, associada à frente de onda, e esta é tão rápida que se pode aproximar uma detonação do ciclo termodinâmico devolúme constante, ou ciclo Humphrey. Pode-se comparar o ciclo Humphrey com o ciclo Brayton, este último representando os outros tipos de motores aspirados, funcionando em pressão constante (pulso-jatos, turbojatos, turbofans, ramjet etc.). Os ganhos de eficiência térmica do ciclo Humphrey sobre o ciclo Brayton são de aproximadamente 20% para um conjunto de valores de razão de pressão (BROPHY; HANSON, 2006).

1.2 Propagação de ondas de combustão

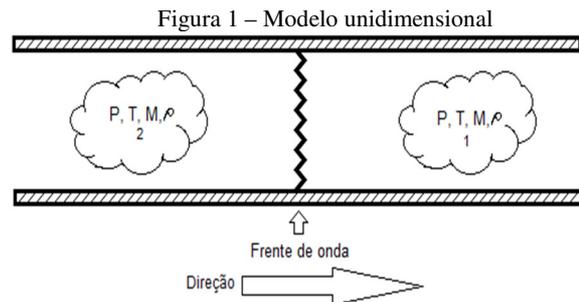
Reações de combustão transformam reagentes em produtos por meio de uma frente de onda em um meio adequado. As ondas de combustão propagam-se para longe da fonte de ignição, em processos que são sustentados pelos gradientes físicos e químicos gerados pelas reações em questão. Existem dois tipos de ondas de combustão autossustentadas: as ondas de deflagração e as de detonação.

Ondas de deflagração propagam-se a baixas velocidades, subsônicas, dependendo de sua estrutura. As deflagrações laminares movem-se a velocidades mais baixas, da ordem de 1 m/s, enquanto deflagrações turbulentas podem atingir velocidades de propagação maiores que 5 m/s (LEFEBVRE; BALLAL, 2010).

Ondas de detonação são supersônicas, apresentando velocidades da ordem de 1000 m/s. Por causa de sua velocidade, os reagentes à frente da onda não são perturbados por esta. A ignição dos reagentes se realiza por compressão adiabática, e as partículas dos produtos de reação têm seu vetor de velocidade na mesma direção e sentido da frente de onda.

1.2.1 Modelo unidimensional

As relações entre reagentes e produtos de uma frente de onda de combustão podem ser descritas por meio do modelo unidimensional proposto por Chapman e Jouguet (LEE, 2008) (Figura 1). Para um conjunto de condições iniciais e de contorno, as ondas de combustão possíveis de acontecer são dadas pela solução das equações contínuas unidimensionais por meio da frente de reação, sendo estas equações de conservação de massa, de quantidade de movimento, de energia e a equação de estado dos gases.



A curva de Hugoniot, mostrada na Figura 2, descreve as diferentes condições termodinâmicas possíveis para os produtos de uma reação, na geometria descrita na Figura 1. Embora todas as regiões descritas sejam matematicamente possíveis, nem todas as condições ocorrem na realidade. A análise da curva de Hugoniot mostra que existem dois processos de combustão possíveis: aqueles cuja pressão e densidade dos reagentes aumenta (detonação) e aqueles em que a pressão e densidade dos reagentes diminui (deflagração) após a passagem da onda. A curva de Hugoniot é um gráfico da pressão (P_2) versus o volume específico ($1/\rho_2$) correspondente aos produtos da reação de uma dada massa reativa, q , e esta equação pode ser derivada combinando as equações de conservação de quantidade de movimento, conservação de energia e a equação de estado dos gases ideais com o seguinte resultado: Equação de Hugoniot:

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \left(\frac{P_2}{\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1} \right) - \frac{1}{2} \cdot (P_2 - P_1) \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) = q \quad (1)$$

A inclinação da curva de Hugoniot indica a velocidade da onda de combustão. A linha de Rayleigh é obtida unindo as equações de conservação de massa e conservação de quantidade de movimento:

Equação da linha de Rayleigh:

$$\rho_1^2 \cdot u_1^2 = \left(\frac{P_2 - P_1}{\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}} \right) \quad (2)$$

A curva de Hugoniot é ilustrada na Figura 2. Na figura pode-se notar a origem A, que representa a pressão (P_1) e o volume específico ($1/\rho_1$) dos reagentes. Os dois pontos tangenciais das linhas que partem da origem A são definidos como pontos de Chapman-Jouguet (CJ) superior

e inferior. Os pontos CJ, bem como os limites estabelecidos pela origem das linhas de Rayleigh definem cinco regiões que descrevem os fenômenos de combustão. Dos cinco, apenas três tem significado físico real: Região 1 (detonação forte), Região 2 (detonação fraca) e Região 4 (Deflagração).

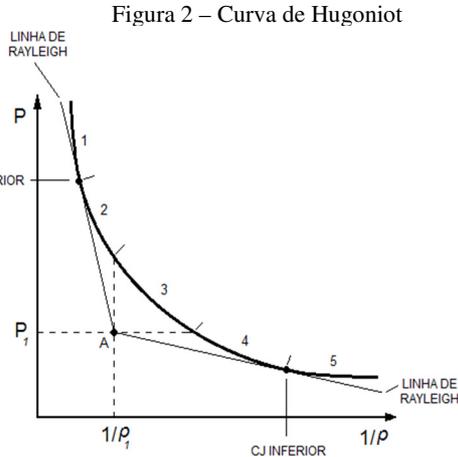
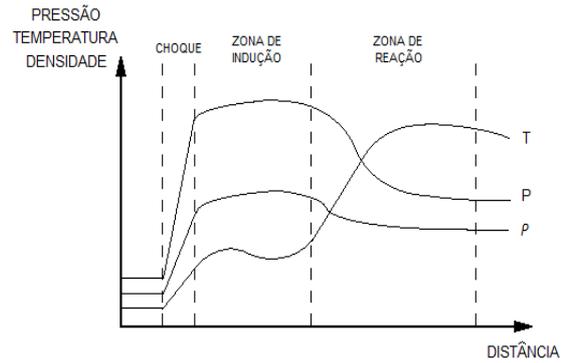


Figura 2 – Curva de Hugoniot

1.2.2 Estrutura da onda de detonação

A sustentação de uma onda de detonação pode ser descrita de maneira simples por meio do chamado modelo ZND, desenvolvido de maneira independente por Zeldovich, Von Neumann e Döring (LEE, 2008). O modelo é ilustrado na Figura 3. Consiste em uma onda de choque que se move a uma velocidade de detonação, seguida por uma zona de rarefação. O choque é extremamente fino, infinitesimal. Portanto, não há muito espaço para ocorrerem reações químicas nessa região. Por meio do choque, as propriedades de pressão, temperatura e densidade sofrem um aumento abrupto. A zona de rarefação após a onda de choque é muito maior, da ordem de 1 cm (KUO, 2005), e é composta por uma zona de indução e uma zona de reação. As propriedades termodinâmicas na zona de indução, imediatamente atrás do choque, quase não sofrem variação. As reações começam a aumentar vagarosamente devido ao aumento da temperatura. Quando o período de indução termina, as temperaturas começam a subir rapidamente, com liberação de grande energia decorrente das reações na zona de reação, que sustentam a propagação da onda de choque. As propriedades termodinâmicas atingem o equilíbrio ao final da zona de reação. Portanto, o período de indução ou zona de indução é de grande importância para capturar corretamente as temperaturas, pressões e densidades para uma simulação precisa de uma onda de detonação.

Figura 3 – Modelo ZND



1.2.3 Célula de detonação

Células de detonação são efeitos tridimensionais da onda de detonação, que podem ser medidos por meio da técnica de impressão em folhas impregnadas com fuligem. Uma onda de detonação, criada por meio de uma mistura combustível gasosa típica, deixa impressões no formato de escama de peixe (ou diamantes) em folhas metálicas com depósitos de fuligem, instaladas dentro de tubos ou dutos com misturas propensas a detonação. Na Figura 4 é mostrado um resultado de uma onda de detonação em uma folha impregnada com fuligem (PINTGEN; AUSTIN; SHEPHERD, 2002). Uma onda de detonação é um fenômeno tridimensional, onde há interação de várias ondas de choque, formando a frente de onda de detonação. A frente de onda de detonação, induzida pela energia liberada pelas reações químicas na zona de reação, é resultado da interação do tronco de Mach (Mach stem), choque incidente e choque refletido, a qual é condição mandatória para uma frente de onda autossustentada. A interação das três ondas de choque transversais produz uma descontinuidade cisalhante conhecida como ponto triplo. Na Figura 5 é ilustrada esta condição. Como resultado, as ondas propagam-se dentro do tubo deixando este padrão característico impresso na folha impregnada de fuligem. A distância transversal entre cada marca é chamada de largura da célula, um parâmetro fundamental para a caracterização da reação de detonação dentro do tubo. Uma mistura combustível mais propensa à detonação, como aquelas com hidrogênio, quando comparada as de qualquer hidrocarboneto, apresenta tamanhos de célula muito inferiores. De modo similar, a queima de uma mistura combustível com um oxidante mais diluído, como o ar, ao invés de oxigênio puro, apresenta células de detonação maiores, indicando uma mistura menos propensa à detonação.

Figura 4 – Típico resultado de folha impregnada com fuligem em um tubo de choque (PINTGEN; AUSTIN; SHEPHERD, 2002)

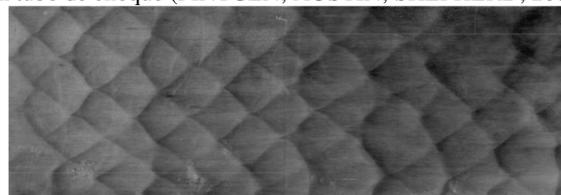
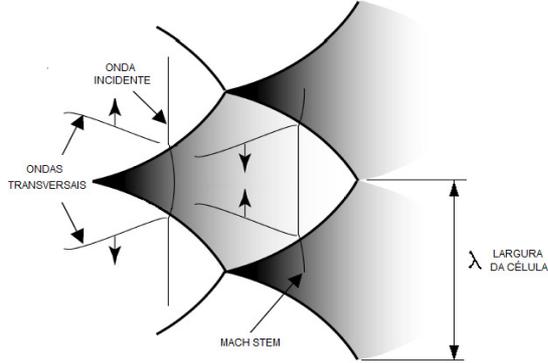


Figura 5 – Estrutura da frente de detonação (LAM *et al.*, 2003)



A largura da célula de detonação é relacionada com a energia crítica de iniciação de detonação direta. A energia crítica de iniciação de detonação direta é a energia determinada experimentalmente, requerida por uma mistura combustível para iniciar uma detonação direta, sem fase de transição (Tucker, 2005). Tais experimentos demonstram uma relação simples entre a largura de célula e a energia de iniciação de detonação direta:

$$e_{1DD} = 3,375 \cdot \lambda^3 \quad (3)$$

Em que: e_{1DD} é a energia de iniciação de detonação direta, em Joules, e λ é a largura da célula, em milímetros (TUCKER, 2005). É importante notar que a energia de detonação varia com o cubo da largura de célula.

1.3 Descrição e uso da técnica

A técnica de diagnóstico visual das células de detonação, por meio de folhas impregnadas com fuligem, é adequada para a visualização da estrutura das frentes de onda de detonação. Ao se deslocar dentro de um tubo, as ondas de choque transversais da frente de onda que formam os pontos triplos de Mach deixam um rastro. O rastro corresponde com a maior taxa de reação, conseqüentemente com maior variação de pressão e emissão luminosa. Tal rastro pode ser registrado por meio da fuligem; impregnada em uma placa (folha) inserida no tubo, que se desprende e é transportada pela frente de onda, seletivamente, revelando a estrutura da frente de onda como se fosse uma fotografia de exposição prolongada, em que o obturador da câmera fotográfica fica aberto durante todo o tempo da passagem da onda. O mecanismo exato do processo de remoção seletiva foi alvo de grande discussão durante muito tempo (LAM *et al.*, 2003); testes e simulações sugeriram que a fuligem é removida por meio das forças de cisalhamento existentes no gás no momento da passagem da onda (LAM *et al.*, 2003). Estudos mais recentes afirmam que tais forças de cisalhamento não são capazes de remover as partículas de fuligem, mas talvez esforços de flexão em partículas empilhadas passando por gradientes de pressão na camada limite (ISHII *et al.*, 2013). As placas podem ser de diferentes materiais e formatos, sendo utilizados os mais adequados para cada tipo de experimento. Em tubos de detonação de seção cilíndrica, as placas podem ser conformadas para adquirir um formato de cilindro cortado

ao meio, ou podem ser inseridas em sua forma plana diretamente. As placas planas são utilizadas também em experimentos em tubos de seção retangular, e em experimentos de detonação esférica não confinada. Diversos materiais foram utilizados historicamente, desde vidro (VAN TIGGELEN, 1999), passando por metais como aço e alumínio, e indo até filmes finos como Mylar (DUFF, 1961). Um fator importante é a espessura da placa; seu valor em relação ao diâmetro do tubo não deve ser grande o suficiente para trazer impacto no experimento. Valores históricos de espessura de chapa em relação ao tubo não ultrapassam 1%, constatado pelo autor em referências que citaram espessura da folha (DUFF, 1961; LAM *et al.*, 2003; ROMANO *et al.*, 2002; SHEPHERD *et al.*, 1986; KANESHIGHE; AKBAR; SHEPHERD, 1997 e YOSHIDA *et al.*, 2005).

Por meio da técnica de folha com fuligem pode-se medir um dos parâmetros mais importantes da estrutura de uma frente de onda de detonação: a largura da célula, ou λ . Vimos anteriormente que a largura da célula é relacionada diretamente com a detonabilidade de uma mistura, ou seja, a quantidade de energia necessária para iniciar uma detonação diretamente. Além da detonabilidade, pode-se utilizar a folha com fuligem para medir a variação do tamanho das células de detonação, parâmetro relacionado com a estabilidade da onda de detonação (Lee, 2008). Pode-se, também, investigar a interação entre diversos choques dentro de um mesmo tubo (BOTROS *et al.*, 2007). Na ausência de instrumentação adequada, a folha com fuligem pode ser usada para medir distâncias de transição em fenômenos DDT, ou mesmo determinar se houve ou não uma detonação, quando este for o parâmetro determinante e o experimento for de evento único (ou seja, uma só onda de detonação será gerada). Estas são algumas das principais aplicações para a técnica; concluímos que seu uso é bem amplo dentro do estudo dos fenômenos de detonação, e considerando a análise das trilhas de detonação, as possibilidades da técnica parecem ser somente limitadas pela imaginação do usuário. Talvez seja este o motivo pelo qual a técnica é utilizada até hoje.

1.4 Aspectos práticos da técnica

Depois ter sido realizada a escolha mais adequada das dimensões, do material e da espessura da placa onde será depositada a fuligem, é necessário determinar o método da deposição da fuligem sobre sua superfície. Os dados encontrados na literatura raramente dão detalhes sobre a forma de deposição de fuligem. Dos poucos que a descreveram, podem ser citados Kaneshige, Akbar e Shepherd (1997), que revelaram o uso da queima de querosene em uma chama rica para atingir a deposição. Lam (2003), em outro trabalho, revela mais detalhes quanto a forma de deposição: realizada em uma chaminé improvisada, com uma tampa.

2 – DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

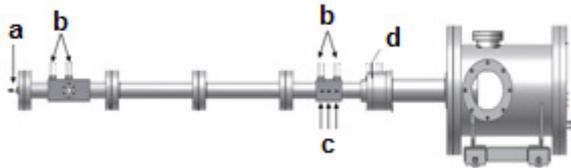
Este trabalho se propõe desenvolver a técnica de folha com fuligem, baseado nas informações encontradas na

literatura, para uma aplicação específica, que é o sistema de detonação pulsada com um tubo de detonação de diâmetro de 36 mm, existente no IEAv

2.1 Sistema de detonação pulsada do IEAv

O dispositivo de detonação pulsada de tiro único foi idealizado para realização de experimentos simulando motores PDE em diferentes condições ideais de detonação (Marques *et al.*, 2010). É composto de um tubo de aço inox de 36 mm de diâmetro interno, feito de quatro seções, estas tendo um comprimento de 380 mm (Figura 6). O tubo termina em um bocal divergente de expansão, e este se comunica com uma seção de expansão, de diâmetro muito maior que o tubo (320 mm), com 500 mm de comprimento. Entre a quarta e a quinta seção do tubo existe um diafragma, que separa os ambientes do tubo de detonação e da seção de expansão. Com esta separação é possível variar as pressões e conteúdo de gases nas duas seções do dispositivo, permitindo a realização de testes em diversas condições de mistura (no tubo de detonação) e atmosféricas (na seção de expansão).

Figura 6 – Dispositivo de detonação pulsada de tiro único: 6-a: Vela; 6-b: Sensores; 6-c: Linhas de vácuo e alimentação; 6-d: Diafragma (MARQUES *et al.*, 2010)



Na primeira seção do tubo existe um flange com uma vela de ignição automotiva instalada. Tal vela, do tipo BP5ET da NGK, é ligada a um sistema de ignição de alta energia, capaz de realizar descargas em nanossegundos, produzindo ondas de choque capazes de iniciar a detonação da mistura de maneira praticamente direta. A energia liberada fica entre 15 e 34 J, com tensões de 20 a 30 kV.

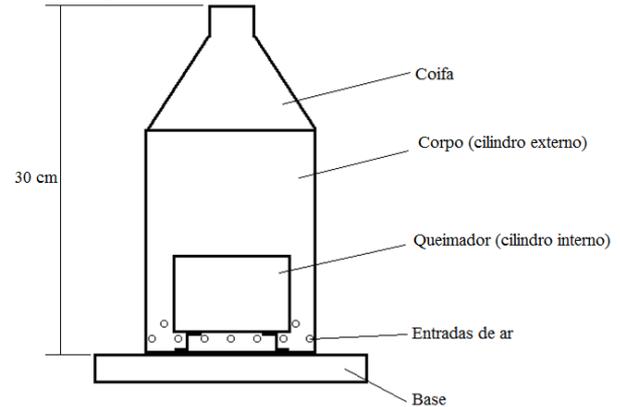
2.2 Dispositivo para deposição

Um dispositivo para deposição de fuligem na folha se fez necessário para este trabalho, pois os parâmetros da deposição precisam ser controlados para assegurar a repetibilidade dos resultados, e para estabelecer a influência de cada variável do processo no resultado final. Os parâmetros a serem controlados são:

- O tempo de deposição;
- O combustível utilizado;
- O ar fornecido ao combustível, e
- A posição da folha durante a deposição

Foi concebido um dispositivo composto por um queimador feito com chapas e tubos de aço, conforme Figura 7.

Figura 7 – Dispositivo de deposição de fuligem



2.3 Arranjo de medição de emissão

A seguir será descrito o arranjo experimental para a aquisição das medidas de emissão luminosa, utilizada para determinar a velocidade da onda de combustão nos experimentos realizados, e confirmar a existência de uma onda de detonação. Para a obtenção da emissão com resolução temporal aplicou-se o monocromador Cornestone 260, posicionando-o perpendicularmente à janela ótica presente na primeira seção do tubo de detonação e localizada na seção de expansão do dispositivo de detonação pulsada. A luz emitida é coletada por lente de sílica fundida com abertura relativa de $f/10$ e $f/3.7$, respectivamente, ambas com comprimento focal de 250 mm. O alinhamento do monocromador é realizado por meio de laser visível de hélio/neônio, com emissão em 632,8 nm. Os sinais de emissão são registrados por um osciloscópio de 500 MHz (Yokogawa, DL7450). Na primeira seção, monitorou-se a emissão na região do visível (~ 450 nm) da densidade total do fluido. A metodologia é baseada na medida da frequência de oscilação da emissão da detonação em propagação, que é resultante das colisões periódicas das ondas de choque transversas (Achasov e Penyazkov, 1999), identificando-se a detonação em uma dada região espacial / temporal. Na seção de expansão do dispositivo de detonação pulsada, observou-se a emissão de moléculas de H_2O ($651,7 \pm 1,05$ nm) para a determinação do tempo de ciclo do motor e, conseqüentemente da velocidade de detonação.

3 – MÉTODO

Os métodos de deposição podem ser classificados quanto as seguintes variáveis: tipo de combustível, forma de emprego do combustível, uso de substâncias aderentes, tempo de deposição, forma de suporte da folha impregnada e direção da deposição.

3.1 Planejamento do ensaio

Com base nas variações possíveis, uma matriz de ensaio completa, que considera a interação de cada tipo de variável com todas as outras, se torna extensa e impraticável com o tempo e os recursos existentes. A fim de eliminar alguma variável a ser testada, suprimiu-se a

direção de deposição vertical, uma vez que nenhum exemplo similar foi encontrado na literatura. A preferência inicial foi dada a estopa embebida em óleo vegetal; esperando-se que este tipo de combustível gerasse fuligem oleosa, altamente aderente, evitando assim, a remoção completa da fuligem depositada.

Para os testes de impressão das células de detonação, utilizou-se uma mistura de hidrogênio gasoso e ar, em razão estequiométrica e pressão de uma atmosfera no sistema de detonação pulsada.

3.2 Determinação do tempo de ciclo teórico

Existem duas maneiras possíveis de se medir a velocidade de deslocamento da onda de detonação: por meio dos sensores de pressão, ou por meio da medida de emissão luminosa (fotodiodos alocados como os sensores de pressão ou sistemas com acesso ótico). Os sensores de pressão da PCB foram instalados no tubo; porém devido a baixa isolamento elétrica ($10^8 \Omega$) e da impossibilidade de isolamento elétrico do terra do sistema de ignição, os sinais adquiridos refletem apenas a propagação da descarga elétrica, o que impediu a determinação da variação da pressão. No entanto, a medida de emissão luminosa com alta resolução temporal permite adequadamente obter a velocidade de detonação média ao longo de todo o sistema, por meio da determinação do tempo de ciclo. O objetivo da medição da velocidade da onda para o presente trabalho é confirmar que houve uma onda de detonação dentro do tubo, para os casos de falha da folha com fuligem em produzir uma imagem.

Para a comparação com os valores experimentais obtidos, o tempo de ciclo para um PDE foi calculado utilizando-se um modelo simplificado, sugerido por Endo e Fujiwara (2002). O cálculo foi realizado por Santos e Marques (2012) para o mesmo tubo de detonação, nas mesmas condições dos testes deste trabalho. O tempo de ciclo teórico segundo o modelo utilizado foi calculado em 10,75 ms.

3.3 Largura teórica da célula de detonação

O objetivo principal da técnica da folha impregnada com fuligem é realizar a medição da largura de célula de detonação. A fim de realizar uma comparação dos resultados práticos com a teoria, foram calculados os tamanhos de célula para as condições fixas presentes no tubo de detonação: mistura de hidrogênio gasoso e ar, em razão estequiométrica e pressão de uma atmosfera.

O cálculo teórico da largura de célula foi realizado para as condições de teste padrão no tubo de detonação, utilizando o código CELL_H2 (VERSION 1.1 – LAST MOD ON 22 May 98), baseado no trabalho desenvolvido por Gavrikov, Efimenko e Dorofeev (2000). Tal código é baseado em um método semi-empírico que utiliza as curvas calculadas na referência citada, bem como na termoquímica do Chemkin-II para determinar a largura da célula de misturas combustíveis do hidrogênio. Os dados utilizados pelo código são a velocidade CJ, temperatura e pressão, a composição da mistura e as frações molares de

cada constituinte. O valor de largura de célula encontrado para as condições do ensaio foi de 10 mm.

4 – RESULTADOS

Foram realizados 6 testes de folha de fuligem no sistema de detonação pulsada alimentado com uma mistura estequiométrica de H_2 /ar a pressão atmosférica. O tempo de execução de cada experimento considerando a deposição da fuligem na folha, a inserção da folha no sistema, o teste para a obtenção dos resultados, a limpeza completa do sistema de detonação pulsada, posteriormente a execução do teste, e os testes de vácuo para verificar não haver comprometimento da segurança do sistema, é de cerca de duas semanas.

4.1 Ensaio realizados

A seguir são apresentados os ensaios realizados, com a descrição dos parâmetros de ensaio e o resultado obtido.

4.1.1 Primeiro teste

Deposição: Horizontal indireta (Figura 8);
Tempo de deposição: 30 minutos;
Combustível: óleo vegetal em estopa;
Resultado: Remoção completa da fuligem depositada sobre a folha, conforme Figura 9.

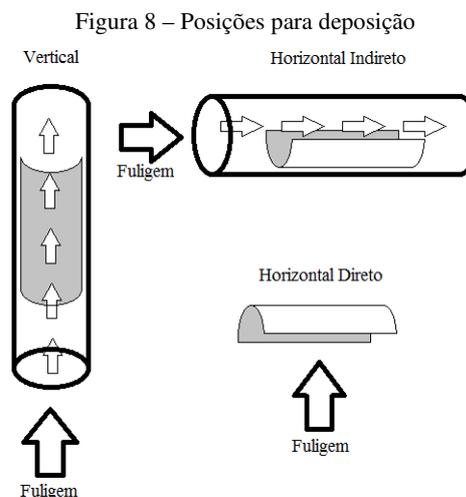


Figura 8 – Posições para deposição



Comentários: A camada de fuligem foi completamente removida pela passagem da onda de detonação. Provavelmente não houve aderência suficiente da fuligem ao substrato. Duas hipóteses podem ser formuladas: ou a direção horizontal indireta não gera a aderência desejada, ou o tempo de deposição foi curto demais.

4.1.2 Segundo teste

Deposição: Horizontal direta (Figura 8);
Tempo de deposição: 60 minutos;
Combustível: óleo vegetal em estopa;
Resultado: Fuligem removida em alguns pontos, conforme Figura 10. Formação das primeiras imagens, nos locais removidos.

Figura 10 – Resultado do segundo teste



Comentários: Devido ao insucesso da primeira tentativa, decidiu-se alterar a matriz de ensaio para aumentar o tempo de deposição, ao mesmo tempo em que a direção foi alterada de indireta para direta. O tempo de deposição de uma hora e a troca da direção deixaram uma camada muito mais espessa, quando comparado ao primeiro teste. Ao final, a fuligem foi removida em alguns locais, enquanto que em outros ela permaneceu aderida. Nos pontos em que a fuligem foi removida, algumas células de detonação foram impressas. Pode-se, ainda, observar na Figura 10 que a fuligem foi removida em placas, permanecendo unida mesmo após a remoção. Coloca-se a hipótese que, dependendo da espessura, a fuligem gerada por óleo queimado se aglutina devido a existência de oleosidade na mesma; por ser uma queima rica em combustível. O problema da aderência da fuligem parece ter sido resolvido.

4.1.3 Terceiro teste

Deposição: Horizontal direta (Figura 8);
Tempo de deposição: 100 minutos;
Combustível: parafina;
Resultado: Fuligem depositada sobre a folha permaneceu quase que totalmente aderida, conforme Figura 11.

Figura 11 – Resultado do terceiro teste



Comentários: Observada a tendência de aglutinação de fuligem com o combustível estopa + óleo vegetal foi realizada sua troca para parafina. O tempo de deposição se manteve elevado, quase dobrando o tempo de deposição do

teste anterior. O aspecto da fuligem depositada se assemelha ao do teste anterior. Depois do teste verificou-se que quase nenhum material foi removido; foram notadas algumas formas serrilhadas na superfície da fuligem, mas a falta de contraste impede uma visualização direta e inviabiliza fotografia. Com este ensaio pode-se confirmar que a direção de deposição e um maior tempo de deposição resolvem o problema de aderência, mesmo com a troca do material combustível. Porém, nenhuma imagem aproveitável foi gerada; como foi possível observar a remoção de pequenas quantidades de fuligem na superfície da folha, pode-se concluir que a camada está espessa demais. Um tempo de deposição menor, aliado à direção de deposição direta deve ser testado.

Vale ressaltar que o sistema de ignição estava operando em condição degradada, produzindo pulsos de alta tensão com nível de energia próximo ao mínimo.

4.1.4 Quarto teste

Deposição: Horizontal direta (Figura 8);
Tempo de deposição: 20 minutos + 10 minutos (com QAV);
Combustível: óleo de cozinha em estopa + QAV em estopa
Resultado: Falha na remoção, conforme Figura 12. Uma região teve a fuligem completamente removida, enquanto em outras houve remoção de uma camada superficial.

Figura 12 – Resultado do quarto teste



Comentários: A deposição realizada teve seu tempo encurtado para 20 minutos, resultando em uma camada de fuligem menos espessa. Seu aspecto lembrou muito a deposição do primeiro teste e temeu-se resultado semelhante a este (remoção de toda a fuligem). Por isso foi realizada mais uma deposição de fuligem, sobre a anterior, utilizando estopa embebida em querosene de aviação (QAV). Realizado o teste foi observado que a primeira camada de fuligem permaneceu aderida ao substrato, exceto por uma pequena região. Foram removidas áreas da segunda camada de fuligem depositada; por falta de contraste, nenhuma imagem pôde ser observada. Não houve problema de aderência da primeira camada, conforme havia se imaginado; o próximo ensaio pode ser realizado com deposição na direção direta e tempo de deposição curto.

4.1.5 Quinto teste

Deposição: Horizontal direta (Figura 8);
Tempo de deposição: 10 minutos;
Combustível: óleo vegetal em estopa;
Resultado: Segundo teste com formação de imagem, conforme Figura 13.



Figura 13 – Resultado do quinto teste

Comentários: Os parâmetros de deposição sugeridos após o teste anterior foram utilizados, ou seja, deposição em menor tempo, na direção direta, usando estopa + óleo como combustível. O sistema de ignição estava completamente reparado, com a troca dos capacitores defeituosos. A energia fornecida ao sistema foi acima do normalmente utilizado para iniciação direta; a medição de tempo de emissão indica uma maior velocidade, em torno de 10 ms, conforme valor medido na Figura 14. Um número maior de células foi observado; estas parecem ter grande variação do seu tamanho, indicando influência do choque incidente (BOTROS *et al.*, 2007) gerado pela descarga de nanosegundos ou ocorrência de detonação instável. A ausência de impressões próximas ao bordo de ataque da folha indica influência da presença deste no resultado, conforme comentado por Yoshida (2005). Próximo ao bordo de fuga foram registrados diversas impressões em formato de célula, porém com baixa definição de suas bordas. Esta característica difere bastante das imagens geradas no meio da folha. Duas hipóteses podem ser formuladas: ou existe alguma forma de interação com a frente de onda causada por alguma deformidade geométrica da folha, ou a deposição de fuligem pode ter sido não homogênea ao longo do comprimento da folha.

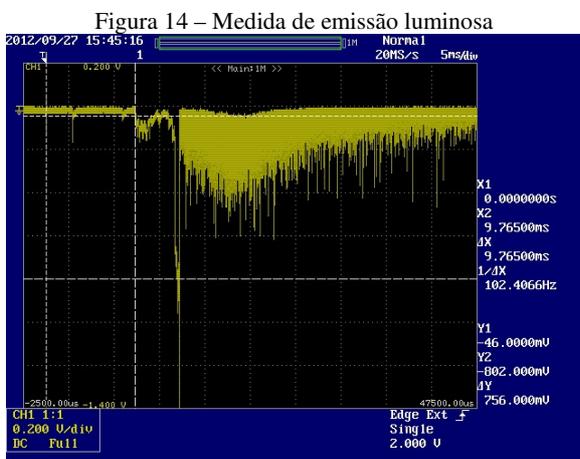


Figura 14 – Medida de emissão luminosa

4.2 Medição da largura de célula

Dois testes produziram imagens de célula com nitidez suficiente para sua medição.

4.2.1 Imagens do segundo teste

A medição da largura de célula foi realizada por meio do *software* de medição de imagens ImageJ, comparando se a imagem da célula com uma característica da imagem de dimensão conhecida. Foi obtido $\lambda=5,5$ mm. Na Figura 15 observa-se a imagem utilizada para a medição.

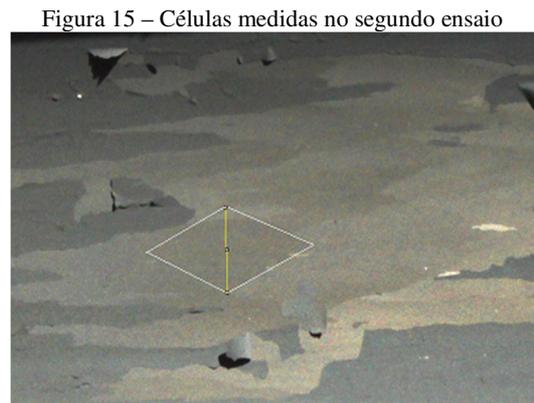


Figura 15 – Células medidas no segundo ensaio

4.2.2 Medições do quinto teste

No quinto teste a medição foi realizada da mesma maneira do segundo teste, por meio do ImageJ. O valor de largura de célula obtido foi de $\lambda=6,4$ mm \pm 1. A incerteza da medida se deve ao método utilizado para se determinar a referência da medição, por causa da qualidade da imagem utilizada. Na figura 16 é mostrada a célula que foi medida.

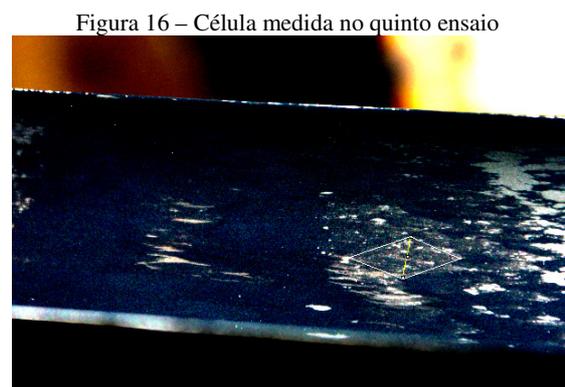


Figura 16 – Célula medida no quinto ensaio

4.3 Análise dos resultados

Os resultados indicam algumas direções quanto ao método de deposição de fuligem. O combustível utilizado produz resultados, mas sua resolução é baixa. Nas referências estudadas foi possível encontrar imagens de maior nitidez. A direção de deposição horizontal direta também demonstrou ser a mais adequada para o combustível utilizado. Tempos de deposição menores tiveram maior sucesso nos resultados, o que indica que um controle visual pode ser o bastante para determinar se a deposição de

fuligem está adequada. A homogeneidade da distribuição também pode influir no resultado; o dispositivo de deposição deve ser capaz de impregnar com fuligem toda a superfície da placa de uma só vez; do contrário, a placa ou o dispositivo devem se movimentar a fim de fazer com que a deposição de fuligem seja a mais homogênea possível. Por ausência de testes de combustíveis sólidos, como carvão ou tecidos embebidos em combustíveis voláteis, não foi possível fazer uma comparação direta entre eles.

Os resultados obtidos por meio da aplicação da técnica de folhas com fuligem, neste trabalho, indicam que pelo menos dois dos três objetivos do uso da técnica foram atingidos:

- Demonstração da ocorrência de uma detonação, e
- Determinação do parâmetro largura de célula.

O terceiro objetivo do uso da técnica é a determinação da instabilidade da detonação, por meio da medição da largura de diversas células. O reduzido número de células obtido nas imagens geradas impediu a determinação da instabilidade.

A emissão luminosa observada na seção inicial do tubo de detonação indicou a ocorrência de detonação, antes da inserção da folha de fuligem, concordante com as células de detonação experimentalmente visualizadas nas folhas impregnadas de fuligem. O tempo de ciclo medido por meio da emissão luminosa da onda de detonação (10 ms) está muito próximo do valor esperado teoricamente (10,75 ms). Isso indica que a velocidade média atingida dentro do tubo corresponde a de uma detonação próxima da condição CJ. A diferença do valor medido de largura de célula (em torno de 6 mm) para o calculado ($\lambda=10$ mm) também indicam uma aceleração da onda de detonação na seção inicial do tubo, já que a largura de célula é inversamente proporcional ao valor da velocidade da onda de detonação. Cálculos da célula de detonação, simulando-se diferentes velocidades de detonação maiores que CJ e, que resultam em células de largura ao redor de 6 mm, mostraram velocidades no ponto de inserção da folha de fuligem no máximo 10% acima de CJ, variação aceitável para um PDE. Isso é concordante com a medida de emissão na seção inicial do tubo em que se constatou uma detonação, antes da posição de inserção da folha. Um número maior de medições de largura de células se faz necessário para obter um tamanho médio mais significativo, bem como um número maior de células de detonação seria necessário para se avaliar a estabilidade da onda de detonação.

CONCLUSÃO

As principais conclusões deste trabalho são:

- 1) A técnica de impregnação de folhas com fuligem utilizada foi capaz de registrar células de detonação, com definição suficiente para realizar duas medições de largura de célula;
- 2) Os resultados de largura de célula obtidos mostram correlação adequada com o modelo teórico e a técnica de medição de emissão luminosa utilizados.

3) Os valores de célula de detonação obtidos indicam uma variação da velocidade de detonação CJ aceitável para um PDE.

4) Ajustes à técnica de impregnação de fuligem são necessários para aumentar a nitidez das imagens obtidas, para permitir a medição de instabilidade da onda de detonação.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo financiamento do sistema de detonação pulsada do IEAV (Proc. 2008/10548-5).

REFERÊNCIAS

- ACHASOV, O. V.; PENYAZKOV, O. V. Light emission method for studying cellular structure of multifront gaseous detonation. **Journal of Engineering Physics and Thermophysics**, n. 72, p. 177–180, 1999. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02699134>.
- BOTROS, B. B.; NG, H. D.; ZHU, Y. J.; JU, Y.; LEE, J. H. The evolution and cellular structure of a detonation subsequent to a head-on interaction with a shock wave. **Combustion and Flame**, n. 151, p. 573–580, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.07.018>.
- BROPHY, C. M.; Hanson, R. K. Fuel Distribution Effects on Pulse Detonation Engine Operation and Performance. **Journal of Propulsion and Power**, v. 22, n. 6, p. 1155–1161, 2006. <http://dx.doi.org/10.2514/1.18713>.
- DUFF, R. E. Investigation of spinning detonation and detonation stability. **The Physics of Fluids**, v. 4 n. 11, p. 1427–1433, 1961. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1706235>.
- ENDO, T.; FUJIWARA, T. A Simplified Analysis on a Pulse Detonation Engine Model. **Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences**, v. 44, n. 46, p. 217–222, 2002. <http://dx.doi.org/10.2322/tjsass.44.217>.
- GAVRIKOV A. I.; EFIMENKO, A. A.; DOROFEEV, S. B. A Model for Detonation Cell Size Prediction from Chemical Kinetics. **Combustion and Flame**, v. 120 p. 19–33, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-2180\(99\)00076-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00076-0).
- ISHII, K.; MORITA, K.; OKITSU, Y.; SAYAMA, S.; KATAOKA, H. Cellular Pattern formation in detonation propagation. In: **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 34, p. 1903–1911, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2012.07.004>.
- KAILASANATH, K. Review of Propulsion Applications of Detonation Waves. **AIAA Journal**, v. 38, n. 9, p. 1698–1708, 2000. <http://dx.doi.org/10.2514/2.1156>. <http://dx.doi.org/10.2514/3.14599>.
- KANESHIGE, M.; AKBAR, R.; SHEPHERD, J. E. Hydrocarbon – air – nitrous oxide detonations. In: Combustion Institute Spring Meeting, Western States section, April 15-17, 1997, Livermore. **Proceedings of the Combustion Institute Spring Meeting, Western States Section**, Livermore, s/n, 1997.
- KUO, K. K. **Principles of Combustion**. 2 ed. Hoboken: John Wiley and Sons Incorporated, 2005.

- LAM, A. K. W.; AUSTIN, J.; PINTGEN, F.; WINTENBERGER, E.; SHEPHERD, J. E.; INABA, K.; MATSUO, A. On the mechanism of soot track formation: experimental study In: International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 19th, July 27 – August 1, 2003 Hakone, Japan. **Proceedings of the International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems**, Hakone, s/n, 2003.
- LEE, J. **The Detonation Phenomenon**, 1 ed. Cambridge: Cambridge Press, 2008.
- LEFEBVRE, A.; BALLAL, D. **Gas Turbine Combustion – Alternative fuels and emissions**. 3 ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- MARQUES, C. S. T.; OLIVEIRA, A. C.; DOVICH, F. B.; FERRAZ, W. C.; CHANES, J. B. Single-shot pulsed detonation device for PDE combustion simulation In: Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 13, 2010. **Proceedings of Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering**, Uberlândia, 2010.
- PINTGEN, F.; AUSTIN, J. N.; SHEPHERD, J. E. Detonation front structure: Variety and characterization. In ROY, G. D. *et al.* (org.). **Advances in Confined Detonations**, Moscow: Torus Press, p. 68-72, 2002.
- ROMANO, M. P.; RADULESCU, M. I.; HIGGINS, A. J.; LEE, J. H.; PITZ, W. J.; WESTBROOK, C. K. Sensitization of hydrocarbon-oxygen mixtures to detonation via cool-flame oxidation. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 29, p. 2833-2838, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S1540-7489\(02\)80346-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1540-7489(02)80346-7).
- SANTOS, J. B. R.; MARQUES, C. S. T. Caracterização da detonação pulsada por emissão com resolução temporal. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS, n. 1, 2012, São José dos Campos. **Anais do Simpósio de Ciência e Tecnologia do Instituto de Estudos Avançados**. São José dos Campos, IEAv, 2012, p. 14-18.
- SHEPHERD, J. E.; MOEN, I. O.; MURRAY, S. B.; THIBAUT, P. A. Analyses of the Cellular Structure of Detonations In: SYMPOSIUM (INTERNATIONAL) ON COMBUSTION, 21st, Pittsburgh, EUA, 1986. **Proceedings of the 21st Symposium (International) on Combustion**, Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1986, p. 1649-1658.
- TUCKER, K. C. **A Flash Vaporization System for Detonation of Hydrocarbon Fuels in a Pulse Detonation Engine**. Wright-Patterson AFB: Air Force Institute of Technology, 2005.
- VAN TIGGELEN, P. J. **Experimental aspects on detonation cells: past, present and future**. Louvain: Université Catholique de Louvain, 1999.
- YOSHIDA, A.; OKUDA, Y.; YATSUFUSA, T.; ENDO, S.; TAKI, S.; AOKI, S.; UMEDA, Y. Detonation properties of mixed fuel and air gas mixtures. In: International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive systems, 20th, 2005, Montreal. **Proceedings of the 20th International Colloquium on Dynamics of explosions and reactive systems**. ICDERS Montreal: McGill University, 2005, paper 77.