

Modelo de Escoamento e Combustão de Biomassa em Grelha

N. Sousa¹ e J.L.T. Azevedo²

¹ Universidade do Algarve, Instituto Superior de Engenharia, Campus da Penha, 8005-139 Faro

² Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais 10, 1049-001 Lisboa

email: toste@ist.utl.pt <http://www.ist.utl.pt>

Sumário.

Este trabalho apresenta a formulação de um modelo de simulação de combustão de biomassa em grelha. O modelo inclui várias aproximações para cada um dos processos considerados, nomeadamente, o movimento dos sólidos já apresentado noutra artigo e o escoamento de gases através de meio granular, considerando a equação de Forchheimer. Para descrever a evolução das propriedades nos sólidos utiliza-se um modelo unidimensional para aproximar as partículas de combustível que é comparado com um modelo detalhado. Apresenta-se ainda o algoritmo em desenvolvimento para acoplar os diversos sub-modelos e a inclusão de balanços de energia e de massa com reacção química.

Palavras-chave: Modelação Computacional; Escoamento em Meio Poroso; Movimento de Sólidos em Grelha.

1 INTRODUÇÃO

A modelação de combustão em grelha apesar de ser um dos métodos mais antigos de queima é dos mais complexos em termos de modelação numérica. A grande dificuldade na sua análise tem a ver com a presença de sólidos cujo movimento depende de se conseguir vencer o atrito. A modelação de combustão em grelha pode ser efetuada considerando os sólidos do leito como um meio contínuo ou como partículas discretas. Os cálculos para esta última aproximação são efetuados considerando equações de balanço de quantidade de movimento linear e angular aplicadas a todos os sólidos presentes no leito [1] incluindo combustão. Devido à complexidade e ao elevado número de cálculos associados, introduzem-se algumas simplificações tais como a geometria esférica para os elementos sólidos e a consideração de tensões devido à fricção de forma a ajustar o comportamento do modelo a situações reais.

A descrição do movimento dos sólidos como uma fase contínua é aplicada de forma corrente para escoamentos com partículas em fase dispersa em que não existem fortes interações entre as partículas. Estes modelos são também utilizados para descrever o movimento dos sólidos em leito fluidizado situação na qual o peso dos sólidos é da mesma ordem de grandeza da força exercida pelo escoamento de um fluido, permitindo tratar os sólidos como um meio contínuo fluido, com porosidade variável, já que pode ser comprimido ou expandido. Um dos modelos de cálculo mais popular para estas situações é o programa MFix distribuído de forma aberta. Este modelo não considera a condição de não escorregamento pelo que considerando inicialmente uma pilha de sólidos, o modelo prevê que estes se espalhem e no caso de uma grelha inclinada, escorram para a saída.

Em face das limitações para representar o movimento dos sólidos, muitos trabalhos que simulam instalações de queima com grelha, apresentam modelos baseados em programas de cálculo de escoamento de fluidos (CFD) considerando como condição fronteira na base da instalação as condições de saída do gás. Estas condições em alguns casos são especificadas com base na experiência e de acordo com as condições de operação globais. Em alguns casos utiliza-se um modelo do tipo coluna em que se considera que as colunas de sólidos se deslocam horizontalmente com uma velocidade prescrita [2]. Nestes casos considera-se que o gás atravessa o leito na direcção vertical, permitindo aplicar os balanços de massa e energia e considerar a evolução das propriedades dos sólidos nas colunas. Esta aproximação já permite a análise da ignição e propagação da conversão dos sólidos alimentados ao leito.

O movimento uniforme do leito é mais representativo de leito com grelha móvel em que o movimento dos sólidos é imposto na base do leito. Este movimento é normalmente imposto através de um movimento

alternativo em vez de contínuo pelo que é de esperar nesta situação que os sólidos em contato com a grelha se movimentem mais rapidamente que os que estão acima. Outro sistema alternativo de movimento dos sólidos consiste em promover uma vibração do leito que é o caso analisado neste artigo e para o qual se desenvolveu e validou um método de cálculo do movimento dos sólidos [3]. Neste artigo apresenta-se a modelação do escoamento do gás que passa através do leito e o modelo que se desenvolveu para caracterizar as partículas no leito. O modelo de combustão não é apresentado em detalhe mas inclui-se uma descrição sobre o algoritmo geral de solução que se encontra em desenvolvimento com base nos modelos apresentados neste artigo.

Na secção 2 apresenta-se o modelo do escoamento para a fase gasosa sendo o movimento dos sólidos descritos em [3]. O movimento do gás através dos sólidos baseia-se na equação de Forchheimer e serve de base para os balanços de massa e energia à fase gasosa. Estes balanços consideram a interação com o combustível sólido, representado por partículas típicas para as quais se considera a variação da conversão e temperatura através de um modelo de multi-camada que é apresentado. Esta secção conclui com uma descrição do algoritmo global de cálculo. Na secção 3 apresentam-se os resultados obtidos para o escoamento da fase gasosa, analisando os termos da equação de balanço de quantidade de movimento. Inclui-se também nesta secção uma comparação entre o modelo de multi-camadas com o cálculo tridimensional de condução de calor. No final da secção 3 apresenta-se uma validação do método de cálculo do movimento dos sólidos comparando os resultados com observações experimentais. A secção 4 termina com as conclusões e perspetiva a aplicação do modelo completo.

2 MODELO NUMÉRICO

A descrição do movimento dos sólidos [3] permite observar que ao longo de um ciclo de funcionamento da grelha ocorrem velocidades significativas no período da vibração que representa uma pequena fracção de tempo total. O cálculo do escoamento dos gases é efetuado considerando regime estacionário como apresentado na secção 2.1. O comportamento das partículas sólidas é descrito por um modelo de multicamada descrito na secção 2.2 que quando associado ao movimento dos sólidos permite avaliar a alteração da composição de uma partícula representativa em cada local do leito. O procedimento de acoplamento entre os vários modelos é apresentado na secção 2.3.

2.1 – Modelo da Fase Gasosa

O escoamento na fase gasosa é calculado na zona ocupada pelos sólidos o que é identificado por uma fracção de sólidos, que permite definir as fronteiras do leito resultantes do cálculo do movimento dos sólidos. A malha empregue na discretização é cartesiana e quadrada, sendo realizado um tratamento especial aos elementos junto à fronteira do leito, grelha e superfície livre, onde os volumes de controlo são adaptados ao preenchimento do leito.

O balanço de massa e de quantidade de movimento ao gás no escoamento no interior do leito pode ser apresentado de uma forma geral por:

$$\frac{d(\varepsilon\rho)}{dt} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{v}_g) = S_g \quad (1)$$

$$\frac{d(\rho\mathbf{v}_g)}{dt} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{v}_g\mathbf{v}_g) = \nabla \cdot (\mu\nabla\mathbf{v}_g) - \nabla P + \rho\mathbf{g} + F_{sg} \quad (2)$$

No primeiro membro da equação de balanço de quantidade de movimento, o primeiro termo considera a variação com o tempo e o segundo a advecção. O primeiro termo do segundo membro representa a transferência de quantidade de movimento devido a efeitos viscosos no gás, o segundo termo o gradiente de pressão, o terceiro o efeito gravítico sobre o gás e por fim o termo das forças de interação entre o gás e o sólido. Em meio poroso ou granular, com uma fase gasosa, os principais termos são o segundo e o último do segundo membro da equação. No interior do leito o termo de interação entre o escoamento de gás e os sólidos, (F_{sg}), provoca um gradiente de pressão nos gases que é maior que o efeito de todos os termos do primeiro membro do balanço de quantidade de movimento. Deste modo a solução do escoamento é determinada a partir do balanço entre o gradiente de pressão e o termo de interação com os sólidos. A importância relativa dos outros termos é avaliada com base nos valores obtidos com a simulação, permitindo verificar que são ordens de grandeza inferiores.

A modelação do termo de interação fluido-sólidos foi inicialmente estudado em meados do século XIX por Henry Darcy em escoamento de água num filtro de areia. Estabeleceu-se uma relação linear entre o gradiente de pressão do fluido e a velocidade que foi interpretada como o efeito das forças viscosas. Posteriormente Philipp Forchheimer em 1901 [4] observou que para velocidades mais elevadas a relação deixa de ser linear devido aos efeitos inerciais do escoamento, permitindo definir:

$$F_{sg} = \frac{\mu}{K} \mathbf{v}_g' + \rho C \mathbf{v}_g' |\mathbf{v}_g'| \quad (3)$$

Apesar da equação ter sido determinada para o caso de velocidade nula dos sólidos a interação deve ser considerada com base na diferença de velocidades entre as fases.

$$\mathbf{v}_g' = (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s) \quad (4)$$

A transição de regime de Darcy para Forchheimer ocorre para valores de Reynolds calculados com base na permeabilidade do leito, Re_K entre 1 e 10, dado por:

$$Re_K = \frac{\rho \mathbf{v}_g' K^{0,5}}{\mu} \quad (5)$$

A solução numérica do método de Forchheimer foi implementada com base numa linearização da equação, ou seja calculou-se um valor de permeabilidade efetiva de modo a incluir o efeito do termo de inércia.

$$\nabla P = \frac{\mu}{K_{ef}} \mathbf{v}_g' \quad (6)$$

onde o valor da permeabilidade efetiva é então dada por:

$$K_{ef} = K + \rho C \mu |\mathbf{v}_g'| \quad (7)$$

Considerando regime estacionário na equação da continuidade da fase gasosa e substituindo a velocidade a partir da equação (6) permite obter uma equação para a pressão na forma:

$$\nabla \left(\rho \frac{K_{ef}}{\mu} \nabla P \right) = \mathbf{S}_g + \nabla(\rho \mathbf{v}_s) \quad (8)$$

Esta equação é resolvida com as equações fronteira de pressão uniforme acima do leito, gradiente nulo nas paredes laterais e pressão constante na zona abaixo da grelha. Para a equação discretizada na superfície livre considera-se a dimensão do volume de controlo corrigida de acordo com o volume de sólidos presente. Na grelha existe uma perda de carga que depende da velocidade do gás e é incluída na permeabilidade efetiva dos volumes de controlo sobre a grelha. A pressão abaixo da grelha é imposta nos plenos de distribuição de ar, sendo o caudal em cada pleno um resultado do cálculo.

O processo de cálculo é iterativo pois inclui a correção da permeabilidade efetiva e adicionalmente existem fontes de massa na equação (8) e uma fonte adicional resultante do movimento do sólido. A massa volúmica também é variável e é determinada com base no balanço de energia. A aplicação do modelo permite calcular a velocidade do gás no leito e com base nos resultados são estimados os termos que não se desprezaram na equação (2).

2.2 – Modelo para as partículas

De forma a simplificar a resolução do balanço de energia na partícula, a primeira aproximação é reduzir a geometria bi ou tridimensional a um problema unidimensional, como realizado por Thunman [5] e Porteiro [6]. Nesta aproximação define-se uma coordenada polar (unidimensional) em que a distância da superfície de um volume de controlo à fronteira exterior é constante em toda a partícula.

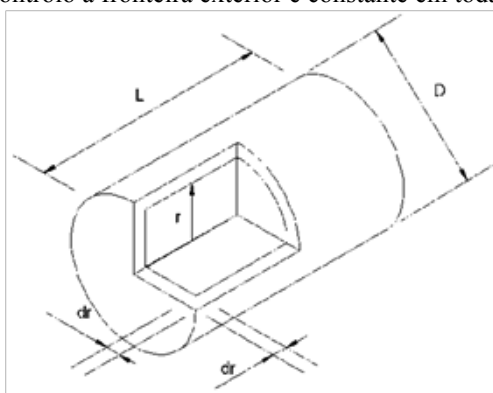


Fig. 1. Modelo unidimensional para partículas cilíndricas.

A equação da transmissão de calor no interior da partícula toma a forma [6]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{A(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left(A(r) k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + S \quad (9)$$

Para as partículas cilíndricas define-se a área dos volumes de controlo e volume em função do comprimento e diâmetro por:

$$A(r)_{cil} = 2\pi r(3r + L - D) \quad (10)$$

$$V(r)_{cil} = \pi r^2(L - D + 2r) \quad (11)$$

Com base na discretização da partícula em camadas, pode-se definir a distância entre camadas e com base nesta distância calcular as trocas de calor a partir do gradiente de temperatura. No presente artigo apresenta-se uma comparação entre a solução obtida e os resultados de uma modelação numérica com uma discretização tridimensional.

O termo S representa as fontes e poços no interior da partícula sólida devido às reacções que são a evaporação da humidade do combustível e a libertação de calor devido à combustão heterogénea. O processo de volatilização considera-se não envolver trocas de energia e considera-se que os voláteis reagem apenas na fase gasosa. O cálculo do processo de secagem, volatilização e combustão do resíduo carbonoso é efetuado em cada camada com base na temperatura local. Os modelos de decomposição térmica de biomassa consideram a formação de gases leves, alcatrões e resíduo carbonoso. Os alcatrões ao deslocarem-se para o exterior da partícula têm algum tempo de residência na partícula onde podem sofrer uma reacção secundária e converter-se em gases leves ou resíduo carbonoso. O modelo da decomposição não é apresentado aqui mas permite calcular a fracção de biomassa inicial, humidade, resíduo carbonoso e inertes (cinzas) no interior da partícula. Utiliza-se um fator de redução das dimensões da partícula representativa. Na fronteira exterior consideram-se as trocas de calor com o gás e com outras partículas através de uma condutibilidade efetiva do leito que inclui uma contribuição de radiação. Estes processos são considerados em sequência e as fracções mássicas de biomassa em cada estágio são armazenadas em cada célula, permitindo considerar a mistura de sólidos como se refere de seguida no algoritmo geral de solução.

O cálculo do movimento dos sólidos no leito baseia-se num método explícito em que se considera o movimento de camadas de partículas sólidas quando se impõe vibração à grelha e o movimento devido ao consumo de massa nos sólidos. Na instalação experimental que se pretende representar, a vibração é realizada com movimentos alternativos, normais à grelha, junto à alimentação do leito. A grelha oscila em torno da outra extremidade junto ao cinzeiro. Durante a operação da instalação, é realizada uma vibração periódica da grelha. Na instalação laboratorial realizou-se uma vibração de 3 segundos de minuto a minuto, rodando a grelha em torno de eixo que passa no final da grelha, de forma a produzir uma movimentação do leito que possa ser comparada com a modelação numérica. Durante a vibração, altura onde as velocidades dos sólidos são maiores, a estabilidade numérica requerida pelo método explícito obriga a utilizar pequenos passos no tempo. Fora do período da vibração, os sólidos no interior do leito apenas se movimentam devido à redução de volume durante a combustão, conduzindo a pequenas velocidades verticais. Nesta condição os requisitos de estabilidade na modelação do escoamento dos sólidos permitem aumentar o passo no tempo, reduzindo assim o esforço computacional.

2.3 – Algoritmo geral de solução

O método computacional empregue na resolução da conversão em leito de grelha recorre a vários blocos de código dedicados aos principais fenómenos em estudo. Para além de existirem múltiplos fenómenos, estes apresentam escalas de tempo muito diferentes o que requer uma estratégia para a construção do algoritmo e método de solução. Hermansson [9] recomenda resolver com um menor passo no tempo o escoamento gasoso e conversão da biomassa e utilizar um maior passo na resolução do escoamento sólido.

Durante o período de simulação é considerado um passo para alimentação em que é resolvido pelo método dos elementos discretos a alimentação do leito. Nesta rotina são seguidas todas as partículas desde que são lançadas até à sua paragem na superfície do leito. Atendendo à dimensão típica das partículas do combustível e ao tempo de movimentação na superfície do leito, a sua conversão é desprezada neste período. Na alimentação do leito apenas se faz um balanço às propriedades, espécies e temperatura do volume de controlo onde chegam os sólidos frescos.

A resolução do deslocamento dos sólidos é resolvida numa rotina que integra também o cálculo do balanço de energia dos sólidos e o cálculo do escoamento gasoso. Os campos de velocidades e pressões no escoamento gasoso são quase estacionários atendendo à forma do leito sólido. Estes são resolvidos por

um método implícito, não acarretando um esforço computacional excessivo quando agregado ao movimento dos sólidos, que como já referido é efetuado por um método explícito.

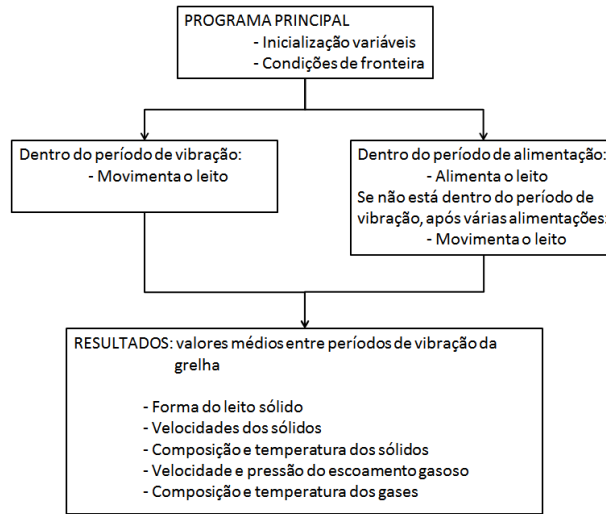


Fig. 1. – Fluxograma geral do programa.

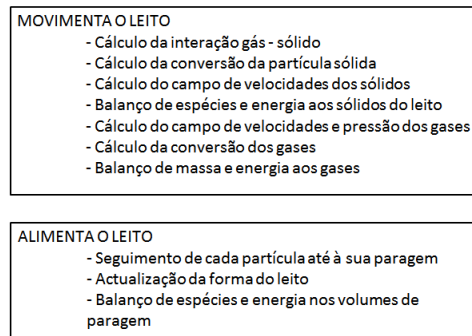


Fig. 2. - Operações nas principais rotinas do programa.

No mesmo passo no tempo da movimentação dos sólidos é resolvida a conversão da partícula sólida e efectuado o balanço de energia e de espécies aos sólidos do leito. É considerado que cada volume de controlo do leito sólido é representado por uma partícula sólida típica. Em cada partícula é resolvida o balanço de energia e conversão de espécies numa discretização polar unidimensional.

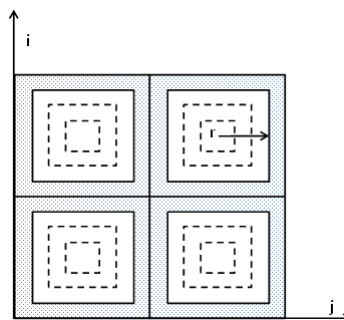


Fig. 3 - Interligação entre a malha unidimensional da partícula e a malha bidimensional do leito.

3 RESULTADOS

3.1 – Escoamento da fase gasosa

Na modelação do escoamento gasoso em modelos de colunas o caudal através de cada coluna de sólidos é fixo independentemente da altura do leito e da conversão. Os resultados da modelação do escoamento gasoso mostram que tal simplificação não é aceitável. A direcção e valor das velocidades dependem da forma do leito.

Apresenta-se de seguida o resultado de uma simulação efetuada para um leito sobre uma grelha que dispõe de alimentação de ar em três zonas diferentes que se podem controlar. O modelo permite determinar a pressão adequada nos plenos de distribuição de ar primário de forma a obter os caudais em cada um destes. A figura 5 apresenta a distribuição da velocidade na zona do leito onde se pode verificar que a velocidade é maior na primeira zona e diminui nas duas seguintes. Este resultado foi obtido impondo valores da pressão nas três zonas da esquerda para a direita com os valores de 30 Pa, 15 Pa e 7,5 Pa em relação à zona acima do leito. A figura 6 apresenta a distribuição da pressão onde se pode observar os maiores gradientes na zona inicial do leito. A velocidade sofre uma deflexão para as zonas em que a espessura do leito é menor e também das zonas onde a velocidade de entrada é maior para as vizinhas.

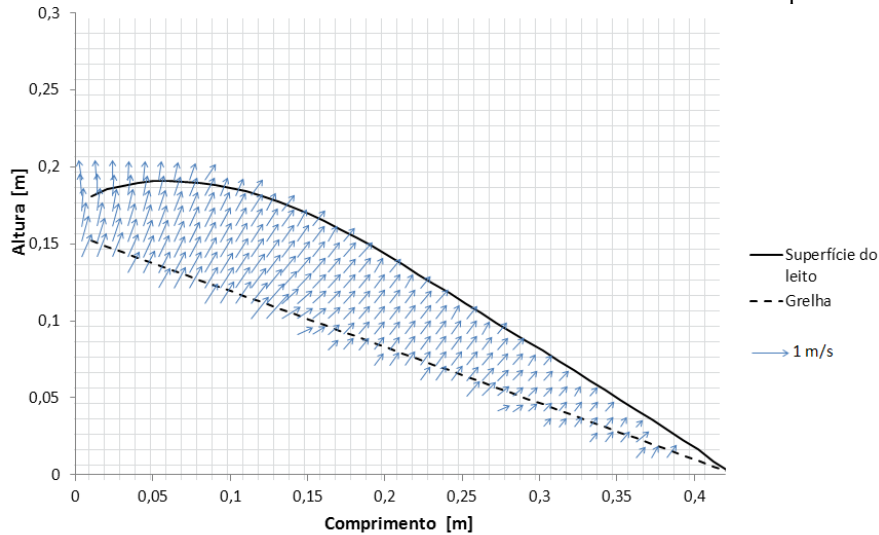


Fig. 4. Distribuição da velocidade média dos gases.

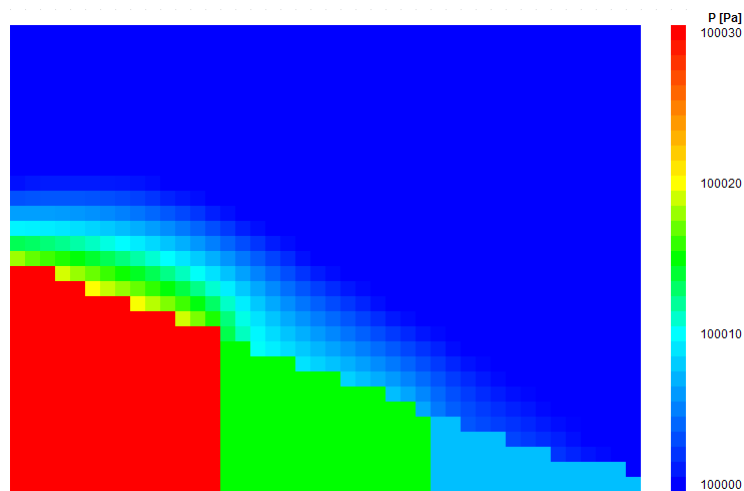


Fig. 5. – Distribuição da pressão do gás na instalação.

A aproximação realizada no modelo foi desprezar o termo transiente, viscoso e de transporte de quantidade de movimento dos gases. Foi feita uma análise ao valor médio no leito dos termos acima referidos ao longo de um ciclo de operação como é apresentado na figura 7. A oscilação dos valores associados ao termo transiente e de transporte de quantidade de movimento devem-se à actualização da forma do leito durante a alimentação. A partir desta figura pode-se facilmente reconhecer que a seguir ao termo de gradiente de pressão e interacção com os sólidos os termos mais importantes são o termo transiente e o de transporte de quantidade de movimento por advecção que se torna mais importante quando ocorre a vibração da grelha. Apenas durante esse período é que as velocidades dos sólidos na superfície do leito atingem velocidades semelhantes às do gás. Contudo, além do período de vibração ser curto, os termos desprezados continuam a ser inferiores ao efeito da interacção gás-sólido. Verificou-se assim que a ordem de grandeza dos termos desprezados é muito abaixo do gradiente de pressão, validando a hipótese sugerida.

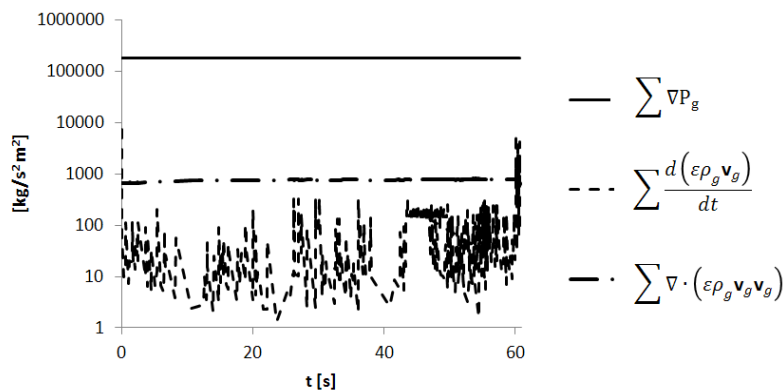


Fig. 6. Comparação entre os termos da equação de quantidade de movimento do escoamento gasoso.

3.2 – Modelo da partícula sólida

A modelação da partícula do combustível sólido requer por natureza uma abordagem tridimensional aos fenómenos de transmissão de calor. Sendo este um sub-modelo que deverá ser integrado no modelo geral do leito é importante utilizar um esquema numérico expedito que represente de forma fiel o fenómeno físico. A figura 8 apresenta a distribuição de temperatura para um problema transiente, comparando a distribuição de temperatura obtida com uma simulação tridimensional com os resultados da análise unidimensional polar apresentada antes. Foi simulada uma partícula cilíndrica com diâmetro de 6mm e comprimento de 24mm, com propriedades ($\rho=1300 \text{ kg/m}^3$; $c=1400 \text{ J/kgK}$; $k=0,5\text{W/mK}$), inicialmente a 20°C que é colocada num meio a 500°C com um coeficiente de convecção na superfície de $40 \text{ W/m}^2\text{K}$. Os resultados apresentados correspondem à distribuição de temperatura ao fim de um tempo de 20 segundos.

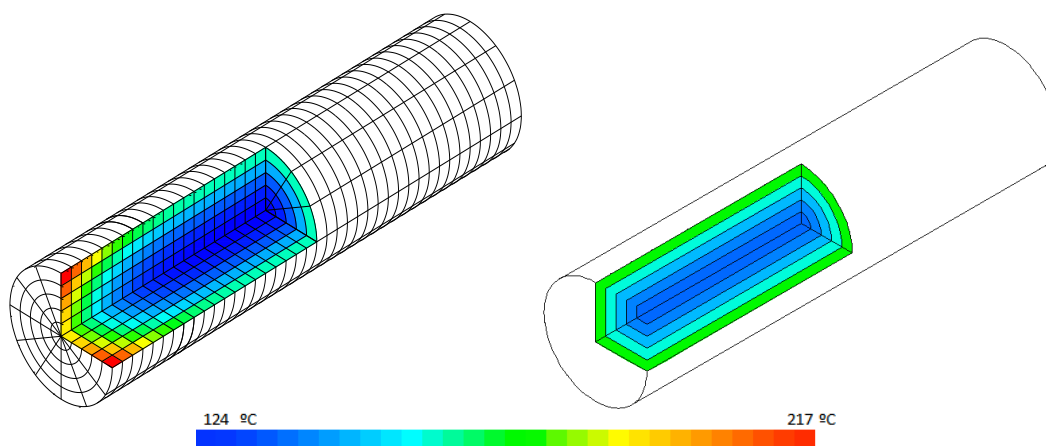


Fig. 7. Distribuição de temperatura numa partícula cilíndrica com discretização tridimensional e unidimensional.

Assumindo que a transmissão de calor é uniforme no exterior da partícula, no caso da geometria cilíndrica não há variações angulares de temperatura, pelo que o problema tridimensional fica reduzido a um problema bidimensional. Considerando ainda que os topos do cilindro apresentam simetria física e térmica, apenas se torna necessário calcular o desempenho térmico de um dos quadrantes do problema. Desta forma, tomando como exemplo a malha apresentada na figura 8, dos 2400 volumes finitos, que na discretização originariam uma matriz heptagonal, apenas se resolve um problema com 100 volumes numa matriz pentagonal. No modelo unidimensional apenas se resolve para 5 pontos uma matriz tridiagonal, com solução exacta e expedita pelo algoritmo Thomas.

Como era espectável, as temperaturas junto às arestas são maiores do que no meio das faces. Para os parâmetros da simulação verifica-se um desvio padrão das temperaturas exteriores de aproximadamente 19°C para o caso apresentado, o que leva que a biomassa junto às arestas seja mais rapidamente convertida. A validação do modelo unidimensional é feita pelo cálculo do erro do modelo unidimensional

face ao bidimensional, em função da razão entre as maiores e menores dimensões da partícula (diâmetro e comprimento na partícula cilíndrica) e do erro em função do número de Biot na partícula. Verifica-se que a escolha do tamanho do passo no modelo unidimensional é fundamental para a exactidão alcançada. Para um Biot inferior a 0,1 (na dimensão radial) o erro do modelo unidimensional face ao bidimensional é inferior a 3%. Também foi analisado o efeito da aproximação unidimensional nos topos das partículas, verificando-se que o erro diminui com o aumento do comprimento da partícula.

As limitações do modelo unidimensional são compensadas pela poupança do tempo de CPU requerido no processo. O modelo tridimensional, como está ilustrado na figura 8, foi simulado considerando a simetria do problema permitida pelos parâmetros enunciados. O tempo de CPU aumenta linearmente no cilindro, note-se que com as simplificações de simetria o modelo tridimensional foi transformado em bidimensional. Para o número de Biot de 0,04 na simulação da partícula cilíndrica o tempo de computação na geometria (bidimensional) é 80 vezes superior ao requerido no modelo unidimensional. Em suma. Atendendo à necessidade de incluir este modelo como submodelo do leito, justifica-se a aproximação unidimensional na discretização do balanço de energia da partícula.

3.3 – escoamento da fase sólida

A simulação do escoamento da fase sólida determina as velocidades que possibilitam efectuar os balanços ao transporte das espécies e o balanço de energia. Este cálculo baseia-se apenas na velocidade dos sólidos sem difusão. No entanto, o movimento dos sólidos permite calcular a mistura de sólidos entre elementos vizinhos e obter uma composição média dos sólidos em cada posição. De seguida apresenta-se a aplicação do método de cálculo da composição dos sólidos para um caso em que inicialmente o leito era constituído por partículas dispostas em colunas de cores diferentes e que devido ao movimento dos sólidos se deslocam e misturam parcialmente.

A figura 9 apresenta a distribuição das velocidades médias dos sólidos durante o período de vibração. Como se pode observar a velocidade é superior junto à superfície livre do leito enquanto os sólidos mais próximos da grelha são afetados pelas camadas que se encontram acima. Verificou-se [3] ser necessário considerar um amortecimento da aceleração promovida pela vibração da grelha de forma a obter um bom acordo com os resultados experimentais para a forma do leito. A figura 10 apresenta a posição final dos sólidos que inicialmente se encontravam em três colunas com superfície livre uniforme como indicado pela linha da forma inicial. A distribuição dos sólidos na situação final encontra-se representada por cores diferentes e a interface entre os três lotes pode ser comparada com as linhas que foram obtidas a partir da observação experimental ilustrada também na figura. A partir desta comparação pode-se observar que o modelo permite representar a movimentação dos sólidos.

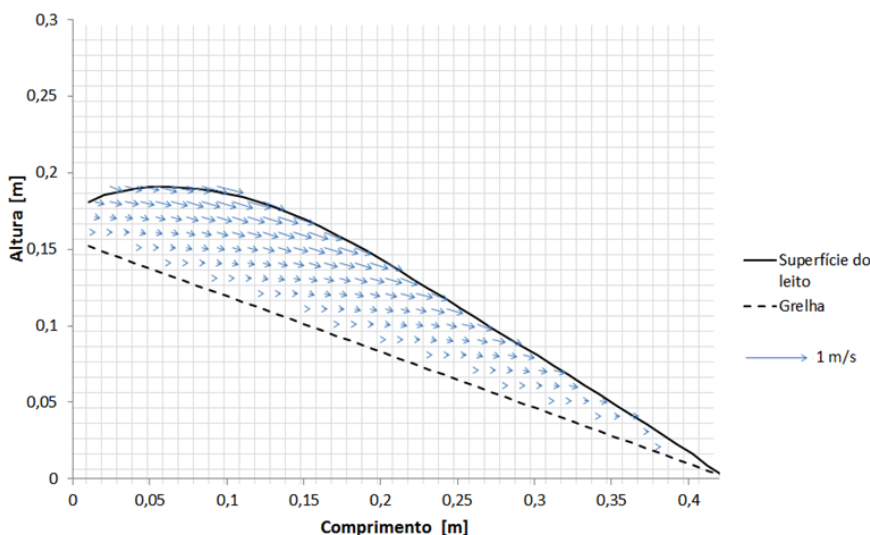


Fig. 8 - Campo médio de velocidades do escoamento sólido durante a vibração.

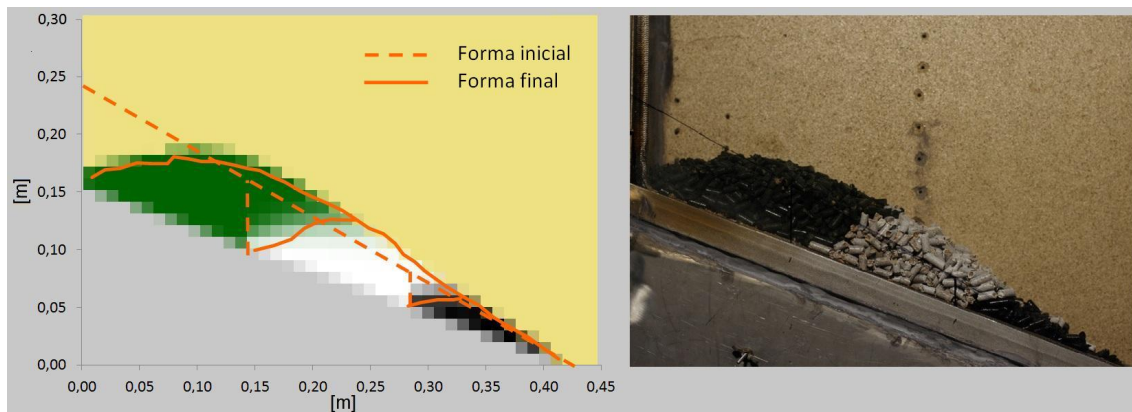


Fig. 9. Comparação entre os resultados numéricos e ensaios laboratoriais para o transporte dos sólidos. Nos resultados numéricos são sobrepostas linhas com a forma inicial e final do leito no ensaio laboratorial. À direita da figura é apresentada uma fotografia da forma final obtida em laboratório.

4 CONCLUSÕES

Este artigo apresenta a formulação de um modelo para a combustão de sólidos em grelha com vibração. Este modelo inclui vários sub-modelos para a movimentação dos sólidos, escoamento dos gases com combustão e transferência de calor e a conversão dos sólidos com um modelo de partículas típicas. Para além da apresentação geral do modelo o presente artigo inclui resultados de alguns dos sub-modelos.

Mostra-se que o modelo para a movimentação dos sólidos reproduz o comportamento do leito sobre a grelha quando sujeito a uma vibração, apesar de ser necessário considerar um amortecimento do movimento. O modelo consegue representar o movimento de colunas iniciais de sólidos que ficam parcialmente misturadas como resultado da vibração aplicada à grelha e a superfície livre do leito é representada de forma realista. Para o escoamento dos sólidos pode-se observar que a velocidade das partículas junto à superfície apresenta valores maiores que na base do leito.

A modelação do escoamento gasoso apresenta a particularidade de ser dominado pelo balanço entre o gradiente de pressão e a interacção entre os gases e os sólidos. Esta análise permitiu simular o escoamento gasoso aplicando um método expedito sem produzir erros significativos. Com base nos resultados obtidos, estimam-se os termos que foram desprezados e mostra-se que têm valores em média várias ordens de grandeza abaixo dos termos principais considerados.

O modelo unidimensional para cálculo da caracterização térmica da partícula sólida, já proposto por outros autores, foi simulado e comparado com os resultados de simulação numérica num domínio bidimensional. Para partículas típicas verifica-se que o erro na temperatura média por camada cifra-se perto de 3%. Contudo perde-se o rigor nos resultados junto às arestas, onde o erro é maior.

Como trabalho futuro ir-se-á concluir a modelação da conversão da partícula de combustível sólido e da combustão no escoamento gasoso.

REFERÊNCIAS

- [1] - E. Simsek, B. Brosch, S. Wirtz, V. Scherer, F. Krüll “Numerical simulation of grate firing systems using a coupled CFD/discrete element method (DEM) Powder Technology Volume 193, Issue 3, 10 August 2009, Pages 266–273
- [2] - Yao Bin Yang, Vida N. Sharifi, Jim Swithenbank, “Converting moving-grate incineration from combustion to gasification – Numerical simulation of the burning characteristics”, Waste Management, Volume 27, Issue 5, 2007, Pages 645–655
- [3] - N. Sousa, J.L.T. Azevedo, “Hydrodynamic Model for a Biomass Grate Fired System”, 11th Conference on Energy for a Clean Environment, Lisbon, June – 2011.
- [4] - Donald. A. Nield, Adrian Bejan, “Convection in Porous Media”, Third Edition, Springer, 2006
- [5] - H. Thunman, B. Leckner, F. Niklasson, F. Johnsson, “Combustion of wood particles—a particle model for eulerian calculations”, Combustion and Flame, Volume 129, Issues 1-2, April 2002, Pages 30-46

[6] - J. Porteiro , , J.L. Míguez, E. Granada, J.C. Moran, “Mathematical modelling of the combustion of a single wood particle”, *Fuel Processing Technology*, Volume 87, Issue 2, January 2006, Pages 169-175

[7] – S. Patankar, “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Taylor & Francis, 1980

[8] - H. Thunman, B. Leckner, “Ignition and propagation of a reaction front in cross-current bed combustion of wet biofuels”, *Fuel* 80 (2001) 473–481

[9] - S. Hermansson, H. Thunman, “CFD modelling of bed shrinkage and channelling in fixed-bed combustion”, *Combustion and Flame*, Volume 158, Issue 5, May 2011, Pages 988–999.

NOMENCLATURA

SIMBOLO	DEFINIÇÃO	UNIDADES
ϵ	Porosidade do leito.	
μ	Viscosidade dinâmica	[kg/m s]
v	Velocidade	[m/s]
P	Pressão	[Pa]
S	Fonte	
F	Força por unidade de volume	[N/m ³]
ρ	Massa volúmica	[kg/m ³]
Re	Número de Reynolds	
K	Permeabilidade leito	[m ²]
D,d	Diâmetro	[m]
K	Permeabilidade	[m ²]
C	Resistência inercial, comprimento	[m]
c	calor específico	[J/kgK]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
ϕ	Escalar	
Γ	Coefficiente de difusão de um escalar	
k	Condutibilidade térmica	[W/mK]
r	Raio	[m]
x	Distância	[m]
σ	Constante Stefan-Boltzmann	[Wm ² K ⁴]
A	Área	[m ²]
V	Volume	[m ³]
T	Temperatura	[K]
q	Potência	[W]

SUBESCRITOS

g	Gás
s	Sólido
sg	Interacção sólido gás
p	Partícula
ef	Efetiva
sup	Superficial
w	Humidade
ext	Exterior
c	Carvão