

ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DO PERFIL TÉRMICO EM UMA CÂMARA DE FUSÃO DE UM MÁQUINA DE MANUFATURA ADITIVA POR FSL

Tiago da Cruz Pimenta¹; Morgana Gobbo Zanetti²; Paulo Vitor da Silva³; Juraci de Sousa Araujo Filho⁴; Antonio Carlos Barbosa Zancanella⁵; Rômulo Maziero⁶; Eliane Correia Nascimento Souza⁷; Juan Carlos Campos Rubio⁸

Resumo

Conhecer os mecanismos de transferência de calor inerentes à câmara de fusão é fator primordial no processo de manufatura aditiva por fusão seletiva a laser, visto que o controle da temperatura tem impacto direto nas propriedades do objeto que se deseja fabricar. Neste contexto, a proposta deste trabalho é por meio da análise experimental, realizar um estudo dos mecanismos de transferência de calor no interior de uma câmara de fusão de uma máquina de manufatura aditiva por FSL, visando otimizar a densidade de potência do feixe laser sobre o material particulado presente na câmara. Para tanto, uma câmara de fusão em alumínio foi confeccionada com intuito de fazer a simulação do mecanismo de propagação de calor no interior da mesma.

Palavras-chave: Transferência de Calor, Fusão Seletiva Laser, Temperatura.

Abstract

Knowing the heat transfer mechanisms inherent in the melting chamber is a key factor in the additive manufacturing process for selective laser melting, since the temperature control has a direct impact on object properties that you want to manufacture. In this context, the purpose of this work is through experimental analysis undertake a study of heat transfer mechanisms within a melting chamber of an additive manufacturing machine for SLM to optimize power density of the laser beam on the material particulate

¹ Graduado em Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Campus São Mateus; E-mail: tiagocruzpimenta@gmail.com.

² Graduada em Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Campus São Mateus; E-mail: morganzanetti@gmail.com.

³ Graduado em Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Campus São Mateus; E-mail: paulovsilva@gmail.com.

⁴ Mestre em Engenharia Mecânica e Aeronáutica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica; professor no curso de Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Campus São Mateus; E-mail: juraciaraujo@ifes.edu.br.

⁵ Mestre em Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) da Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC; professor no curso de Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Campus São Mateus; E-mail: antonio.zancanella@ifes.edu.br.

⁶ Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais - PROPEMM do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - IFES; professor no curso de Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Campus São Mateus; E-mail: maziero.ufes@gmail.com.

⁷ Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES); E-mail: elianecns23@gmail.com.

⁸ Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo-USP, professor associado da Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG; E-mail: juan@demec.ufmg.br.

present in the chamber. Therefore, an aluminum melting chamber was made aiming to make the simulation of the heat propagation mechanism inside it.

Keywords: Heat Transfer, Selective Laser Melting, Temperature.

Introdução

No cenário atual da indústria, onde existe uma crescente necessidade de suprir as demandas de um mercado cada vez mais imediatista, que preza por qualidade e preços baixos, é preciso que existam soluções rápidas e eficientes para atender às necessidades de consumo (FRIEDEL; LIEDTKA, 2007).

Neste contexto, o uso da impressão tridimensional, também conhecida como manufatura aditiva, surge como um meio eficaz para suprir essas demandas. No que diz respeito à manufatura aditiva, podemos defini-la como um processo de adição de material aplicado a fabricação, onde a geometria da peça pode ser obtida utilizando de diversos artifícios, dos quais podemos citar os programas de modelagem sólida (CAD), escaneamento 3D, tomógrafos e até mesmo ressonância magnética nuclear (JACOBS, 1992).

Existem diversas tecnologias que podem ser empregadas à manufatura aditiva, contudo, neste estudo foi utilizado apenas a manufatura aditiva por Fusão Seletiva a Laser (FSL), a qual permite o desenvolvimento de produtos a partir de um modelo tridimensional digital, o que facilita a concepção, além de reduzir o tempo de manufatura do produto e possibilitar a fabricação de componentes com geometrias complexas com uma grande variação de materiais, dentre os quais os metais e polímeros.

Inicialmente, no processo FSL, parte-se de um modelo 3D CAD que vem a ser fracionado em camadas finas. Neste processo, a forma de cada camada é enviada para um cabeçote laser onde é feita a varredura precisa de uma superfície composta por grânulos do material a ser fundido, onde é agregada à peça uma fina camada. Posteriormente é adicionada uma nova fração de material particulado, que é novamente fundida pelo laser, o qual utiliza a fatia do modelo 3D desenvolvido (BERTOL, 2008).

Um parâmetro de extrema importância que deve ser considerado no processo de FSL é a densidade de potência do laser, o qual tem influência direta na profundidade do material particulado a ser fundido, ou seja, está diretamente relacionado à espessura de cada camada depositada, afetando a porosidade e por consequência as propriedades mecânicas do produto final.

O controle da temperatura surge como alternativa para o ajuste da potência do laser que incide na superfície dos grânulos, contudo, a medição direta desta temperatura torna-se dificultada pela ação do laser na superfície do material, e também, pela deposição de camadas já fundidas, o que impediria, por exemplo, a utilização de um termopar.

Este trabalho teve como objetivo, por meio da análise experimental, determinar os mecanismos de transferência de calor inerentes à câmara de fusão no processo de manufatura aditiva por FSL utilizando como substrato, material particulado a base de titânio.

1 Referencial Teórico

Os itens contidos nesta seção servem como embasamento teórico para o desenvolvimento pleno da pesquisa.

1.1 Prototipagem rápida e manufatura aditiva

A busca por otimização do processo de desenvolvimento de produtos, aliada à necessidade de mesclar tempo, qualidade e custos como forma de obter competitividade no mercado, alavancou em meados da década de 1980, as pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de protótipos físicos por meio de um modelo digital, ficando conhecida assim, como prototipagem rápida (BERTOL, 2008).

Pallarolas (2013) define o termo prototipagem rápida (PR), como uma série de tecnologias aplicadas a construção de protótipos em estágio inicial de produção, a qual possibilita a partir do conceito do projeto, reproduzir modelos físicos. Tais objetos, inicialmente, visavam auxiliar simultaneamente na visualização, montagem e ensaio de produtos, acelerando o desenvolvimento (BERTOL, 2008).

Segundo Almeida (2007), na prototipagem rápida as peças são geradas a partir da união de materiais em pó, líquidos ou folhas dispostas em diversas camadas a partir de seções transversais obtidas pelo modelo 3D gerados por um sistema CAD em formato STL, onde a superfície do modelo sólido é aproximada por pequenos triângulos ou facetas.

Para Garcia (2010), as principais vantagens na utilização da prototipagem rápida são a otimização da produção, a redução dos custos, a possibilidade de desenvolvimento de geometrias complexas e a precisão na fabricação. Entretanto, uma limitação inerente a este processo é referente ao volume do objeto a ser desenvolvido, que depende do volume do equipamento utilizado.

O emprego primário das tecnologias de prototipagem rápida foi no desenvolvimento de protótipos, entretanto, com passar dos anos e o desenvolvimento de pesquisas, vem-se desenhando o que pode ser considerada a terceira revolução industrial. O uso desta tecnologia aplicada à manufatura direta de produtos vem ganhando força no cenário industrial.

Devido à evolução das tecnologias de PR e o emprego na fabricação direta de produtos, o termo prototipagem rápida vem dando lugar a uma nova denominação. Segundo Gibson et al. (2010) a ASTM (American Society for Testing and Materials) adotou o termo manufatura aditiva como designação aos processos que envolvem o uso das tecnologias de prototipagem.

Dentre os vários tipos de manufatura aditiva utilizados, atualmente a fusão seletiva a laser vem ganhando destaque devido a grande precisão dimensional na fabricação, baixa taxa de rugosidade, além de permitir a criação de componentes geometricamente complexos, os quais não seriam viavelmente concebíveis por outros métodos de manufatura (MARQUES, 2014).

Uma grande variedade de materiais pode ser aplicada a manufatura aditiva, tais como a maioria dos metais, os polímeros e as cerâmicas, o que faz com que a tecnologia tenha uma vasta gama de aplicações em áreas que vão desde o desenvolvimento de produtos industriais, passando pela produção de bens de consumo, até mesmo às pesquisas na área médica e odontológica (PALLAROLAS, 2013).

Segundo Volpato et al. (2007) existem atualmente, diversas tecnologias aplicadas a manufatura aditiva, tais como, a estereolitografia (SLA), sinterização direta de metal a laser (DMLS), fusão seletiva a laser (FSL), deposição de material fundido (FDM), impressão 3D (3DP) e fusão por feixe de elétrons (EBM).

Segundo Marques (2014), os processos que envolvem manufatura aditiva oferecem inúmeras vantagens em comparação com os métodos convencionais, dentre as quais podemos citar:

- Produção de peças com alto grau de complexidade geométrica;
- Economia de energia no processo;
- Redução da matéria prima do processo;
- Produção de peças com massa reduzida, sem a redução das propriedades mecânicas;
- Otimização do processo de produção.

Dentre os vários tipos de manufatura aditiva utilizados, atualmente a fusão seletiva a laser vem ganhando destaque devido a grande precisão dimensional na fabricação, baixa taxa de rugosidade, além de permitir a criação de componentes geometricamente complexos, os quais não seriam viavelmente concebíveis por outros métodos de manufatura (MARQUES, 2014).

1.1.1 Fusão seletiva a laser (FSL)

A tecnologia do uso de lasers para o processamento de materiais é atualmente utilizada nos setores da construção naval, aeroespacial, médica e automotiva. As principais aplicações do laser nos processos de produção estão relacionadas aos processos de corte, solda, marcação, engenharia de superfícies e manufatura aditiva. Atualmente, o controle do feixe laser com grande precisão e o desenvolvimento do laser de fibra, possibilitou a manufatura de uma grande variedade de materiais, tais como, a maioria dos metais, os polímeros e as cerâmicas.

Segundo Marques (2014), a Fusão Seletiva a Laser - FSL (do inglês Selective Laser Melting - SLM) é a evolução de outra tecnologia de manufatura aditiva, a sinterização seletiva a laser, e surgiu da necessidade de se fabricar peças de alta densidade e com características compatíveis às dos materiais forjados ou fundidos.

A FSL permite a criação de peças de baixo volume, o que garante que as mesmas possam ser personalizadas individualmente para atender às diversas necessidades. A indústria médica, por exemplo, utiliza essa vantagem para projetar peças otimizadas, que atendam às necessidades de cada indivíduo, reduzindo assim, o impacto da prótese nos pacientes.

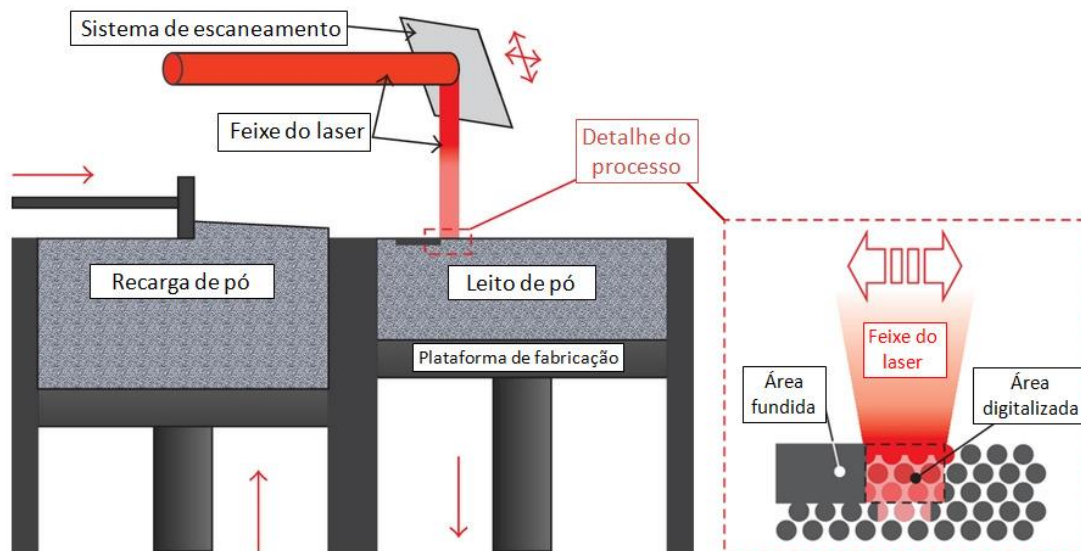
Na indústria aeroespacial, as peças precisam ser otimizadas, considerando a melhor relação peso e resistência mecânica. Atualmente, estão sendo realizadas pesquisas em FSL com o objetivo de construir motores de foguete. A principal vantagem do processo para essa aplicação é a possibilidade de desenvolver motores de foguete com formação monolítica, ou seja, não há conexões, evitando assim, vazamentos e uma provável redução do peso final. Outra grande vantagem é a automatização do processo de fabricação de motores de foguete, o que reduz os custos finais do produto.

1.2 Princípio de funcionamento

Para Marques (2014), o processo de FSL envolve a deposição de material particulado, que é completamente fundido por um feixe laser de alta intensidade de

potência, como mostra a Figura 1. Devido à fusão completa do material, é possível criar peças com geometrias muito complexas, além de garantir que o objeto tenha densidade bem próxima da teórica.

Figura 1 - Princípio de funcionamento FSL



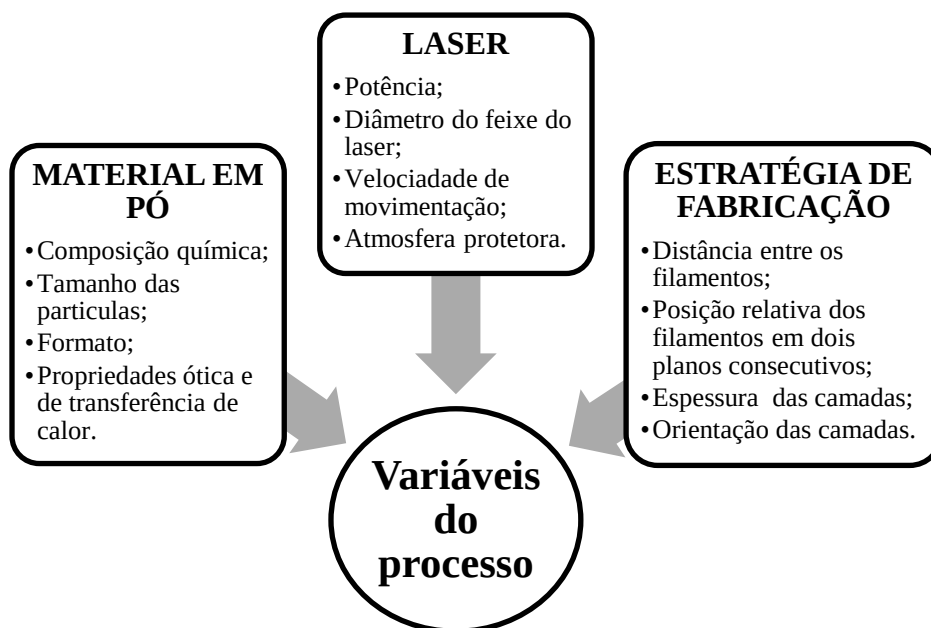
Fonte: Tsouknidas, (2011).

O princípio básico do processo de FSL, envolve a varredura do feixe laser sobre a camada de material particulado, onde cada camada da peça é preenchida com filetes alongados de pó fundido (MARQUES, 2014). Posteriormente outras camadas vão se sobrepondo, dando origem assim ao objeto desejado.

1.3 Variáveis do processo

No processo de FSL, alguns parâmetros de entrada podem afetar diretamente as propriedades mecânicas e morfológicas do objeto a ser fabricado (MARQUES, 2014). Na Figura 2 observa-se as principais variáveis e parâmetros inerentes a este método.

Figura 2 - Variáveis e parâmetros no processo por FSL.



Fonte: Adaptado de Marques, (2014).

Marques (2014, p. 16) discorre o seguinte sobre os parâmetros de fabricação: “A identificação dos parâmetros ideais para cada material é uma tarefa crucial, pois estes parâmetros influenciam diretamente sobre as características da peça (densidade, rugosidade e propriedades mecânicas). Pesquisas estão sendo desenvolvidas a fim de aumentar a densidade, aprimorar as propriedades mecânicas e diminuir a rugosidade e o tempo de fabricação de peças fabricadas por FSL”.

Estudos visando à redução da porosidade na fabricação de peças por FSL vêm sendo realizados, levando em consideração os parâmetros de fabricação e a varredura do laser (YADROITSEV et al., 2009).

1.4 Influência do laser no processo FSL

Segundo Marques (2014), no que diz respeito à potência do laser, temos que o material particulado é fundido por meio de uma fonte de calor que é gerada pelo feixe laser, sendo a densidade de energia do laser um fator primordial no que diz respeito à qualidade das peças fabricadas pelo processo de FSL, podendo ser calculada pela Equação 1.

$$E = \frac{P(w)}{HS(mm).V(mm/s).t(mm)} \left[J/mm^3 \right] \quad (1)$$

Para a fórmula supracitada tem-se que P é a potência do laser, HS a distância entre filetes fabricados, V a velocidade de varredura do laser e t como a distância entre camadas. Portanto, temos com o aumento da potência do laser e a diminuição da

velocidade e/ou espaçamento entre filetes e/ou espessura da camada aumenta-se a densidade de energia (MARQUES, 2014).

Segundo Domingues e Pires (2005), o diâmetro do feixe do laser tem influência sobre a largura dos filetes gerados, onde para uma mesma potência, quanto menor for o diâmetro do feixe, maior será a densidade de potência que pode ser calculada como uma razão entre potência e o quadrado do feixe (W/mm^2).

1.5 Distância entre os filamentos

Marques (2013) discorre sobre os parâmetros que tem influência na espessura dos filetes fabricados, dentre os quais estão a espessura da camada de pó, o material utilizado no processo, a velocidade de varredura do laser e o diâmetro do feixe. O autor salienta ainda que a distância entre os filetes deve ser respeitada, visto que os espaços geram poros que podem afetar diretamente as propriedades mecânicas do objeto fabricado.

Uma alternativa para minimizar a porosidade, rugosidade e tensões residuais é a sobreposição de filetes, de modo que o filete anterior seja sobreposto pelo próximo e refundido (YASA; KRUTH, 2011). A Figura 3 ilustra o processo de refusão de camadas.

Figura 3 - Refusão de camadas.



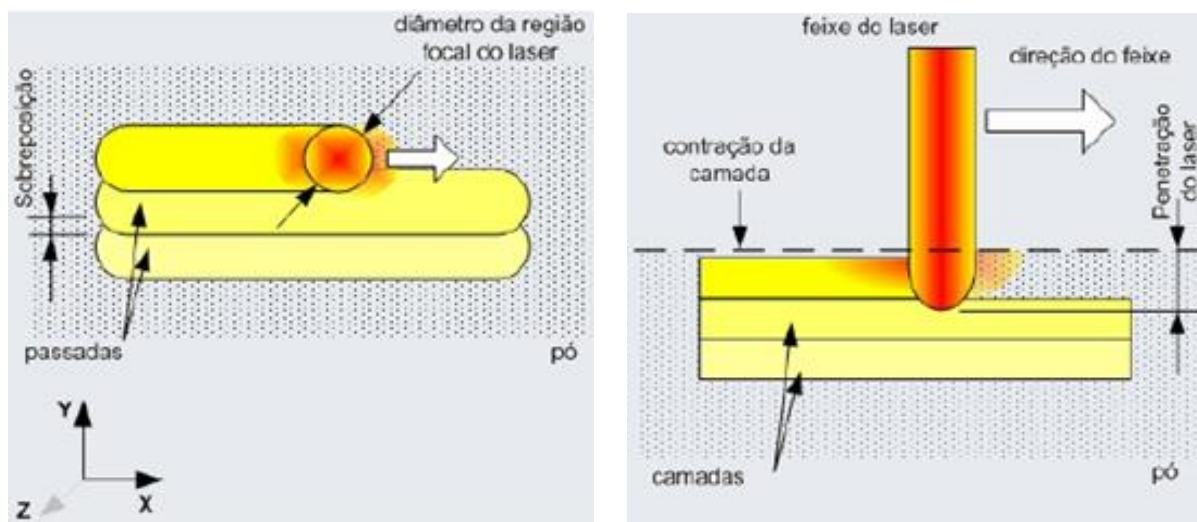
Fonte: Marques, (2014).

A refusão de camadas pode auxiliar no aumento da densidade e minimizar as tensões residuais nas peças, visto que uma baixa densidade e altas tensões residuais podem ter uma influência negativa no que diz respeito às propriedades mecânicas do material (MARQUES, 2014).

1.6 Espessuras das camadas

Em um processo eficiente de FSL é preciso levar em consideração a espessura das camadas depositadas, visto que se forem espessas podem implicar em ligações insuficientes entre as camadas, comprometendo as propriedades, enquanto que camadas muito finas acarretam em maior tempo de fabricação, além de também prejudicar as propriedades da peça devido a alta taxa de refusão da camada anterior (MARQUES, 2013). As Figuras 4a e 4b mostram a sobreposição de camadas e a penetração do laser, respectivamente.

Figura 4 - Sobreposição de camadas (fig. esquerda) e penetração do laser (fig. direita).



Fonte: Pallarolas, (2013).

1.7 Convecção natural

Segundo Çengel (2012), algumas das aplicações mais comuns de transferência de calor envolvem a convecção natural como mecanismo de transmissão de calor. Nos casos da convecção natural em superfícies, tem-se que esta está atrelada a geometria da mesma e a orientação. Outros fatores como a variação da temperatura da superfície e as propriedades termofísicas do fluido envolvido são influenciadores no processo (ÇENGEL, 2012).

Tem-se que a superfície externa de um cilindro pode ser vista como uma placa vertical quando o diâmetro da mesma for relativamente grande, onde assim os efeitos de curvatura podem ser tratados como insignificantes (ÇENGEL, 2012), que pode ser satisfeita pela Equação 2.

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}} \quad (2)$$

Se a condição supracitada for atendida, pode-se utilizar para cilindros verticais as relações para placas verticais. Para cilindros horizontais, o número de Nusselt médio é dado pela Equação 3.

$$N_u = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 \cdot Ra_d^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3)$$

2 Materiais e métodos

Esta seção apresenta um escopo da metodologia utilizada neste trabalho, relacionada com a origem das atividades de projeto, levantamento de informações,

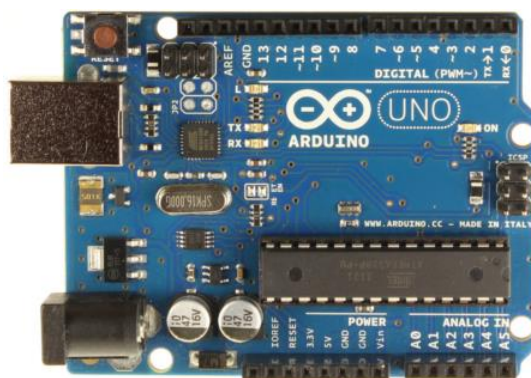
conceitos e definições do mesmo para escolha da concepção adequada para o desenvolvimento da pesquisa.

2.1 Equipamento

2.1.2 Arduino uno

O Arduino Uno é uma placa de microcontrolador ATmega328, que dispõe de 14 pinos digitais de entrada/saída (dos quais seis podem ser usados como saídas PWM), seis entradas analógicas, um ressonador cerâmico 16 MHz, uma conexão USB, um cabeçalho ICSP, e um botão de reset. A Figura 5 mostra o Arduino Uno utilizado no projeto.

Figura 5 - Modelo de Arduino utilizado no experimento.



Fonte: Autores, (2016).

A interface do software Arduino é bem simplificada e intuitiva, permitindo um fácil manuseio. A linguagem de programação utilizada pela plataforma é basicamente C e C++.

2.1.2 Sensores de temperatura

O sensor de temperatura utilizado no experimento foi o Dallas 18B20 a prova d'água, que permite faixas de temperatura entre -55 °C e +125 °C, e voltagem variando entre 3,0 V e 5,5 V.

Os sensores de temperatura têm o funcionamento similar ao de um termômetro, captando a temperatura do ambiente, entretanto ao invés de exibir as informações visuais, o sensor reproduz em forma de tensão de saída.

2.1.3 Sensores resistivos

Este tipo de sensor de temperatura é geralmente obtido a partir de um metal puro, no qual a resistência tende a aumentar de acordo com o aumento da temperatura.

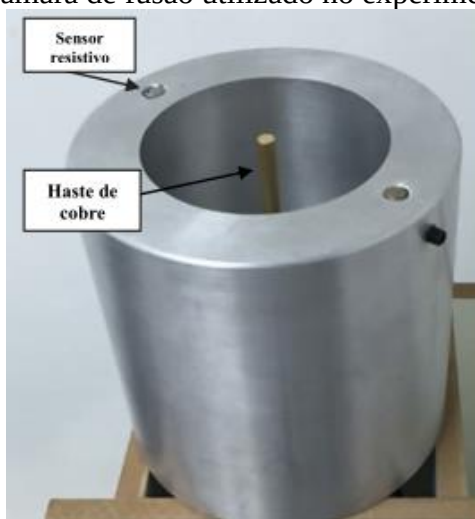
2.2 Material particulado

O pó metálico utilizado no desenvolvimento do experimento foi o Titânio (Ti), o qual apresenta cor branca metálica, lustroso e resistente à corrosão e tem ponto de fusão a 1.668 °C.

Análise experimental

Para uma análise experimental adequada da transferência de calor, optou-se pela confecção de um protótipo de câmara de fusão em alumínio no formato cilíndrico com dimensões de 110 mm de altura e 90 mm de diâmetro, com furo interno de diâmetro 70 mm como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Protótipo de câmara de fusão utilizado no experimento.



Fonte: Autores, (2016).

À câmara de fusão do experimento foram acoplados dois sensores resistivos ligados a uma placa de Arduino responsáveis por fazer as leituras de temperatura em tempo real. Na parte central da câmara de fusão foi fixada uma haste de cobre, responsável por conduzir o calor fornecido à câmara.

No interior da câmara, outro cilindro, com dimensões de 69,8 mm de diâmetro por 40 mm de altura foi instalado, de modo a exercer a função de elevador do material particulado, simulando uma câmara de fusão real.

O procedimento foi idealizado visando caracterizar como viria a ocorrer a transferência de calor no interior da câmara desenvolvida.

2.2.1 Procedimento experimental

O procedimento experimental foi desenvolvido conforme as etapas indicadas a seguir:

a) Para preparação do procedimento experimental foi realizada a montagem do equipamento, como apresenta a Figura 7, seguido pela calibragem dos sensores e testes do software;

Figura 7 - Esquema de montagem do experimento.



Fonte: Autores, (2016).

b) Uma vez realizados os procedimentos preparatórios, colocou-se o material particulado a base de titânio na câmara de fusão, como mostra a Figura 8;

Figura 8 - Nivelamento do material particulado na câmara de fusão.



Fonte: Autores, (2016).

c) Primeiramente, ligou-se a fonte de calor, conectada a haste de cobre. Neste momento os sensores resistivos começaram a registrar a temperatura instantânea na superfície da câmara de fusão;

d) Paralelamente aos registros de temperatura dos sensores resistivos, também foi aferida, com o auxílio de um termopar, as temperaturas na haste de cobre, tanto na parte inferior, de onde partia o calor, até a parte superior da mesma. Estas medições foram realizadas em períodos de 2 minutos, até que a temperatura fosse estabilizada;

e) A estabilidade térmica da câmara de fusão aconteceu em torno de 1 hora e 20 minutos de experimento, onde foram registradas aproximadamente 21 mil leituras dos sensores resistivos;

f) Após experimento em laboratório e de posse dos dados de temperatura, foi realizada a simulação no software ANSYS para estimar a temperatura na parede interna no nível do pó de titânio;

g) A solução numérica da equação de escoamento foi realizada por meio da técnica de volumes finitos. Utilizando os softwares ANSYS e Solid Edge ST7;

h) Com isso temos a modelagem da estrutura a qual ocorrerá a transferência de calor;

i) Posteriormente a verificação do domínio da estrutura, refinamento da malha;

j) Definição das condições de contorno;

h) Resolução das equações de escoamento e acompanhamento da distribuição do calor;

l) Visualizar o comportamento das variáveis do problema por meio de imagens tridimensionais.

3 Resultados e discussões

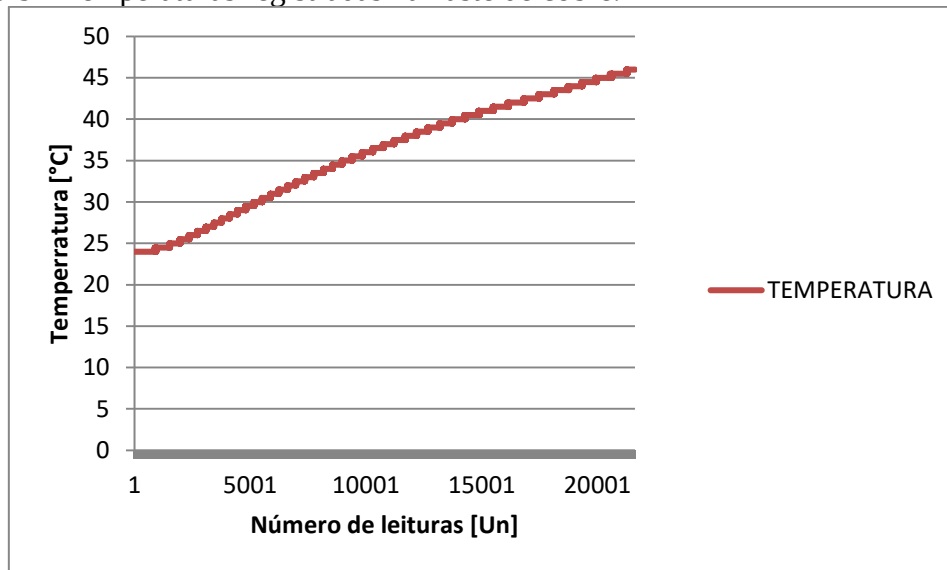
Esta seção apresenta os resultados obtidos por meio do experimento, bem como os cálculos necessários para caracterização da transferência de calor no interior da câmara de fusão.

3.1 Resultados

3.1.1 Superfície da câmara

Os resultados referentes à temperatura superficial da câmara, obtidos no experimento encontram-se na Figura 9, onde é possível verificar o comportamento térmico em que a mesma está submetida.

Figura 9 - Temperaturas registradas na haste de cobre.



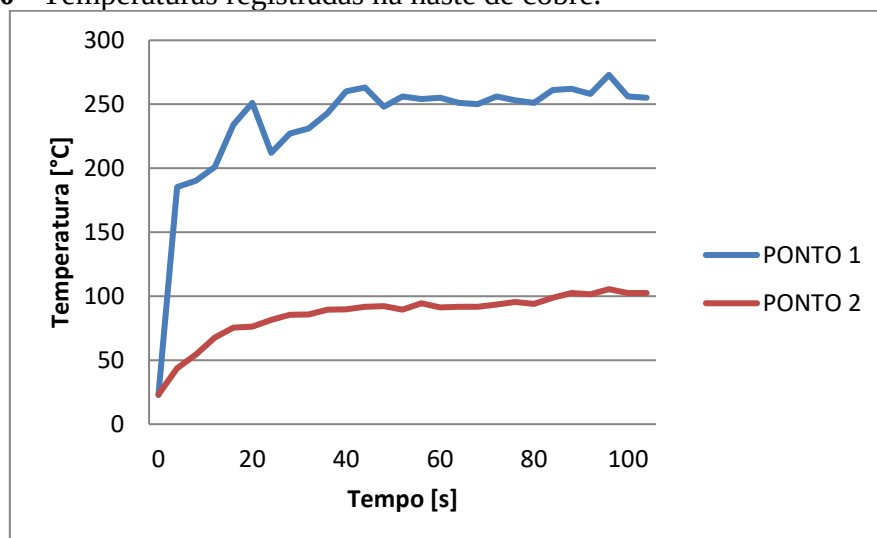
Fonte: Autores, (2016).

Com base na Figura 9 pode-se identificar o aumento gradativo da temperatura em função das leituras obtidas nos sensores resistivos. Este acréscimo é dado em razão da dissipação do calor do centro da câmara (haste de cobre) até a superfície da mesma, onde os sensores foram posicionados. Sendo assim, a estabilidade térmica observada aconteceu em torno de 46 °C na superfície da câmara.

3.1.2 Haste de cobre

As temperaturas registradas na haste de cobre durante o experimento estão apresentadas na Figura 10.

Figura 10 - Temperaturas registradas na haste de cobre.



Fonte: Autores, (2016).

O ponto 1 na Figura 10 representa a parte inferior da haste de cobre, onde o calor consequentemente é mais intenso, por ser o local de origem. O ponto 2 consiste na extremidade da haste, que por vez apresenta temperaturas mais amenas devido a transferência de calor para o material particulado e posteriormente para a superfície da câmara.

3.1.3 Modelagem da transferência de calor

Para que fosse possível traçar o comportamento térmico na câmara de fusão como um todo, fizeram-se necessários alguns cálculos envolvendo a convecção natural para encontrar os parâmetros necessários para simulação no software ANSYS. Partindo deste pressuposto tem-se as seguintes considerações:

- 1º - Ar nas condições de 20 °C;
- 2º - Pressão atmosférica de 1 atm;
- 3º - Utilizando o número de Nusselt médio para convecção natural sobre a superfície para cilindro horizontal.

Propriedades do ar na temperatura do filme: Cálculo para a temperatura:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{49,5 + 20}{2} = 34,75^\circ\text{C e } 1 \text{ atm} \quad (4)$$

Utilizando da literatura, e tendo como referência uma temperatura de 35 °C a pressão de 1 atm, chega-se aos seguintes dados:

$$\begin{aligned} K &= 0,02625 - \text{Coeficiente de convecção} \\ Pr &= 0,7268 - \text{Numero de Prandtl} \\ \nu &= 1,655 \frac{10^{-5} \text{m}}{\text{s}^2} - \text{viscosidade cinematica} \\ \beta &= \frac{1}{T_f} = \frac{1}{305,65} - \text{coeficiente de expansão volumétrica} \end{aligned} \quad (5)$$

O comprimento característico para o caso se torna o diâmetro externo do tubo, com isso teremos que:

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3 Pr}{\nu^2} = \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \left(\frac{1}{305,65} \right) 1/k (45,3 - 20) k (0,090 \text{m})^3 0,7268}{(1,655 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}^2})^2} = 1,5707 \cdot 10^6 \quad (6)$$

Como $Ra_d < d_o^{12}$, utilizou-se a Equação 3, de Nusselt média para a convecção natural. Sendo essa equação para os cilindros horizontais, considerou-se para o experimento, portanto:

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (\frac{0,559}{Pr})^{16}]^{8/27}} \right\}^2 = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (\frac{0,559}{Pr})^{16}]^{8/27}} \right\}^2 = 16,5664 \quad (7)$$

Equação 9-27 pag 512, yunus A. Çengel.

$$Nu = \frac{hD}{k} \rightarrow h = 0,02625 \frac{16,5664}{0,09} = 4,8319 \text{ w/m}^\circ\text{C} \quad (8)$$

Estimando temperatura no plano superior na superfície de interface entre o titânio e o alumínio, 45,3 °C.

Desconsiderando a geração de calor no condutor;

Condução de calor unidimensional, pois existe simetria entre o eixo central, $T=T(r)$;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

K = constante;

Aproximação da temperatura média na parede externa superior material particulado.

Equação geral de condução de calor para coordenadas cilíndricas:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(kr \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{e}_{ger} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

Após aplicadas as condições de contorno chega em $\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0$, desenvolvendo:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \rightarrow \int \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \rightarrow r \frac{dT}{dr} = C_1 \rightarrow \frac{dT}{dr} = \frac{C_1}{r} \rightarrow \int \frac{dT}{dr} = \int \frac{C_1}{r} \quad (11)$$

$$T(r) = \ln r C_1 + C_2 \quad (12)$$

Portanto para os raios especificados:

$$T(r_1) = T_1 \rightarrow T_1 = \ln r_1 C_1 + C_2 \quad (2) \quad (13)$$

$$T(r_2) = T_2 \rightarrow T_2 = \ln r_2 C_1 + C_2 \quad (3) \quad (14)$$

Resolvendo o sistema:

$$T_2 - T_1 = C_1 (\ln r_2 - \ln r_1) + 0 \rightarrow C_1 = \frac{(T_2 - T_1)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (4) \text{ substituindo 4 em 1} \quad (15)$$

$$\frac{(T_2 - T_1)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \ln r_1 + C_2 = T_1 \rightarrow C_2 = T_1 - \frac{(T_2 - T_1)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \ln r_1 \quad (5) \text{ substituindo 5 e 4 em 1} \quad (16)$$

$$T(r) = \ln r \frac{(T_2 - T_1)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} + T_1 - \frac{(T_2 - T_1)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \ln r_1 \rightarrow \frac{(T_2 - T_1)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \ln r - \ln r_1 + T_1 \quad (17)$$

$$T(r) = \frac{(T_2 - T_1)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \ln \frac{r}{r_1} + T_1 \quad (18)$$

Considerando a temperatura uniforme na superfície do condutor de cobre 102,6 °C e na superfície superior da câmara de fusão 45,3 °C, a uma distância de 0,035 m do centro, ou seja, $r = 0,035$ m, tem-se:

$$T(0,035) = \frac{(102,6 - 45,3)^\circ\text{C}}{\ln \left(\frac{0,070}{0,035} \right)} \ln \frac{0,035}{0,070} + 45,3 = 102,3 \rightarrow T(0,035) = 102,3^\circ\text{C} \quad (19)$$

Considerando uma temperatura uniforme na interface de contato entre o titânio e o ar, prosseguiu estimando o coeficiente de convecção.

Propriedades do ar na temperatura do filme a 1 atm:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{102,3 + 20}{2} = 61,15^\circ\text{C} \quad (20)$$

Da literatura consultada tem-se aproximando para 60 °C. Portanto:

$$K = 0,02808 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 0,7202$$

$$\nu = 1,896 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{333} \quad (21)$$

O comprimento será o diâmetro externo do titânio $L_c = D = 0,070 \text{ m}$.

Número de Rayleigh:

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3 Pr}{\nu^2} \quad (22)$$

Fazendo uma aproximação do número de Nusselt, para a convecção natural, pode ser estimado pela Equação 3.

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3 Pr}{\nu^2} = \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \left(\frac{1}{333} \right) 1/k (102,3 - 20) k (0,070 \text{ m})^3 0,7202}{(1,896 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2})^2} = 1,664 \cdot 10^6 \quad (23)$$

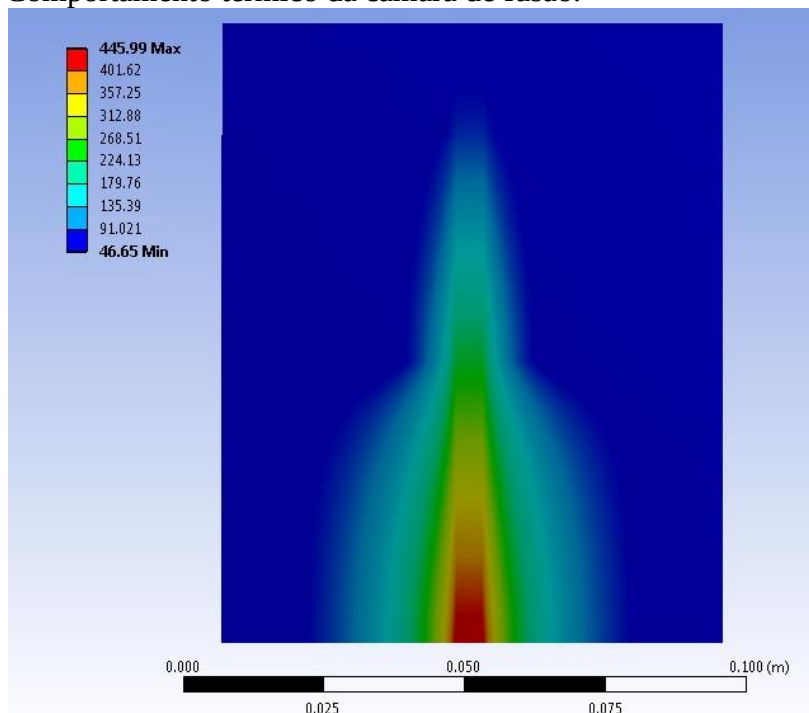
Com isso:

$$Nu = \frac{hD}{k} \rightarrow h = \frac{4,10122 \cdot 0,02808}{0,070} = 1,645 \text{ W/mK} \quad (24)$$

3.1.4 Comportamento térmico

O comportamento térmico apresentado pela câmara por meio das simulações encontra-se na Figura 11.

Figura 11 - Comportamento térmico da câmara de fusão.



Fonte: Autores, (2016).

É possível observar por meio da Figura 11 a forma como o calor é dissipado do centro da câmara para as extremidades, por meio do fenômeno de condução. Neste sentido observa-se uma zona de calor com intensidade máxima de pouco mais de 400 °C e temperatura superficial na câmara em torno de 46 °C, bem próximos dos valores encontrados na etapa experimental. Vale ressaltar que a temperatura na fonte de calor é um pouco discrepante, visto que uma parte da haste fora desconsiderada para simulação.

4 Conclusões

De um modo geral, o experimento realizado e a simulação mostraram coerência, pois são concordantes com o fisicamente esperado, visto que a transferência de calor ocorreu gradativamente do centro (onde havia a fonte de calor) para as extremidades da câmara, onde as temperaturas registradas foram mais amenas. Os gráficos apresentados dentro da seção de resultados mostram de forma prática e sucinta a forma como os fenômenos de transmissão de calor foram precedidos.

As imagens obtidas por meio da simulação no software ANSYS apresentaram regiões com temperaturas distintas, como era de se esperar, visto que o calor é dissipado do centro da câmara para as extremidades.

Com relação a trabalhos futuros sugere-se repetir o experimento variando a altura do elevador da câmara, e adicionando maior quantidade de material particulado ao processo. Outro aspecto a ser considerado em trabalhos futuros é encontrar uma melhor modelagem matemática empregando o número de Nusselt, visando determinar a geometria mais adequada para o experimento.

Referências

- ALMEIDA, W. J. **Otimização estrutural de protótipos fabricados pela tecnologia FDM utilizando o método dos elementos finitos**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- BERTOL, L. S. **Contribuição ao estudo da prototipagem rápida, digitalização tridimensional e seleção de materiais no design de implantes personalizados**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- ÇENGEL, A. Y. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática**. 4ª edição. Cap. 9, p. 520 – 540.
- DOMINGUES, C.; PIRES, M. **Medição de feixes laser: Aplicação à segurança**. 1ª Conferência Nacional da SPMET, Lisboa, p. 28 – 29, 2005.

- GARCIA, L. H. T. **Desenvolvimento e fabricação de uma mini-impressora 3D para cerâmicas**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies, Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. New York: Springer, 2010.
- MARQUES, S. **Estudo da influência da espessura da camada e velocidade do laser na microestrutura e propriedades de peças fabricadas por Fusão Seletiva a Laser no aço Maraging 300**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Centro Universitário Tupy, Joinville, 2014.
- MARQUES, S. **Rapport de Recherche**: Utilisation de la poudre métallique INOX420 (-32µm) par Fusion Selective par Laser. Laboratoire DIPI, École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, 31 de Março, 2013.
- MARQUES, S.; SOUSA, A. F.; ZANATTA, A. M. Fusão seletiva a laser para fabricação de peças metálicas com geometrias complexas. **3º Seminário de Tecnologia, Inovação e Sustentabilidade**. Joinville-SC, 4 e 5 de novembro de 2014.
- PALLAROLAS, E. A. F. F. **Revisão técnica de processos de manufatura aditiva e estudo de configurações geométricas, para estruturas de impressoras tridimensionais**. 2013. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- VOLPATO, N. et al. (2007). **Os principais processos de prototipagem rápida**. Cap. 3, p. 31 – 57.
- YADROITSEV, I. **Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders**. 2008. Tese (Doutorado) – Jean Monnet University, Saint-Etienne, França, 2008.
- YADROITSEV, I. **Selective Laser Melting: Direct Manufacturing of 3D-objects by Selective Laser Melting of Metal Powders**. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Acad. Publ., 2010.
- YADROITSEV, I.; BERTRAND, Ph. **Selective laser melting in micro manufacturing**. *Annals of DAAAM and Proceeding of 21st DAAAM International Symposium*, p. 319 – 321, 2010.
- YADROITSEV, I.; PAVLOV, M.; BERTRAND, Ph.; SMUROV, I. **Mechanical properties of samples fabricated by selective laser melting**. 14th European Meeting of Rapid Prototyping & Manufacturing, 24-25 Junho 2009, Paris.
- YADROITSEV, I.; SMUROV, I. **Surface morphology in selective laser melting of metal powders**. *Physics Procedia*, v. 12, p. 264 – 270, 2011.