

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, INOVAÇÃO E PÓS-GRADUAÇÃO

DIRETORIA DE PESQUISA

PROJETOS DE PESQUISA/INOVAÇÃO

Chamada 01/2020 - Interconecta - Coordenador de Projeto

1 - UNIDADE PROPONENTE

Campus: CAMPUS-JP

2 - IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

Título do projeto: DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE MEIOS SÓLIDOS, POR MEIO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO MÉTODO DO PULSO TÉRMICO, UTILIZADO AS EQUAÇÕES DO SÓLIDO SEMI-INFINITO.			
Grande área de conhecimento: ENGENHARIAS		Área de conhecimento: ENGENHARIA MECÂNICA	
Área temática: Engenharias e Automação Industrial		Tema: None	
Período de execução: Início: 01/04/2020 Término: 31/12/2020			
Nome do responsável (coordenador): Marcio Gomes da Silva	Titulação: DOCTORADO	Matrícula: 1063259	Vínculo: Voluntário
Departamento de lotação: DDE-JP	Telefone: (83) 3235-2787 / (83) 3612-1274 (ramal: 1274)		E-mail: marcio@ifpb.edu.br

3 - CARACTERIZAÇÃO DOS BENEFICIÁRIOS

Público alvo	Quantidade
--------------	------------

4 - EQUIPE PARTICIPANTE

PROFESSORES E/OU TÉCNICOS ADMINISTRATIVOS DO IFPB			
Membro	Contatos	Vínculo	Titulação
Nome: Jesus Marlinaldo de Medeiros Matrícula: 1226386	Tel.: (83) 8879-8986 / (83) 3612-1200 E-mail: jesus.medeiros@ifpb.edu.br	Voluntário	DOCTORADO
Nome: Marcio Gomes da Silva Matrícula: 1063259	Tel.: (83) 3235-2787 / (83) 3612-1274 (ramal: 1274) E-mail: marcio@ifpb.edu.br	Voluntário	DOCTORADO

5 - DISCRIMINAÇÃO DO PROJETO

Resumo
Introdução <u>INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA</u>

A determinação das propriedades térmicas dos materiais é um problema de grande importância na engenharia e em diversas outras áreas do conhecimento. Como a energia em forma de calor é um efeito comum em muitos procedimentos, conhecer as propriedades térmicas dos materiais é fundamental para compreender, planejar, intervir e controlar processos.

Os novos materiais (metálicos, cerâmicos, compósitos, biomateriais etc.) e as suas aplicações industriais, em tecnologias de ponta e em diversas faixas de temperatura, têm mostrando a importância da determinação das propriedades térmicas destes materiais (difusividade térmica, condutividade térmica, calor específico) em função da temperatura (FEIT E SHAW, 1991).

A medição das propriedades termofísicas de materiais novos ou antigos está em constante desenvolvimento e os processos que envolvem transferência de calor são continuamente estudados e a cada ano surgem novos métodos e novas propostas de medição e controle das variáveis térmicas.

As propriedades termofísicas a serem abordadas nesta pesquisa são a difusividade térmica, o calor específico e a condutividade térmica. Essas propriedades caracterizam o material termicamente e auxiliam na aplicação em projetos de: isolamento térmico, trocadores de calor, máquinas e equipamentos mecânicos/eletroeletrônicos, entre outros.

A condutividade térmica representa a quantidade de energia térmica que o material pode conduzir pelo processo de difusão e é esta propriedade que demarca a intensidade da temperatura de trabalho do material. A capacidade de calor volumétrica representa a capacidade de um material de armazenar energia térmica e a difusividade térmica é uma medida da rapidez com a qual o calor se propaga através de um material.

Para a determinação dessas três propriedades são empregadas diversas técnicas que basicamente se dividem nas de; regime transitório e regime permanente, considerando se o fluxo de calor fornecido atinge o regime constante ou não. As técnicas de regime em que o fluxo de calor atinge o regime permanente são empregadas basicamente para determinação da condutividade térmica, mas estas técnicas apresentam grandes erros nos valores da condutividade térmica, uma vez que os tempos para se atingir o regime permanente são elevados, o que acarreta perdas significativas de calor e assim interferências igualmente elevadas nos valores desta propriedade. Já as técnicas em regime transitório são mais precisas comparadas as de regime permanente, determinam mais de uma propriedade simultaneamente, contudo são mais difíceis de serem implementadas experimentalmente.

SILVA (2000), propôs uma forma teórica para determinação das propriedades termofísicas difusividade térmica, calor específico e condutividade térmica através da simulação de um experimento onde uma resistência elétrica em forma de disco de baixíssima espessura seria colocada entre duas amostras de um material semicondutor e a mesma dissipava uma quantidade de calor em um intervalo de tempo infinitesimal, com um termopar instalado a uma distância preestabelecida e próxima da resistência as temperaturas deste ponto eram coletadas, o tempo para que a temperatura máxima do ponto fosse atingida também era registrado, de posse destes dados as propriedades eram determinadas. A técnica usada foi em regime transiente, com a discretização das equações da transferência de calor por condução em um sólido semi-infinito e a partir desta foi realizada a simulação usando o método das diferenças finitas. Os resultados obtidos apresentaram discrepâncias com os dados disponível na literatura, o que pode ter sido gerado no método de solução empregado. Portanto, novas técnicas de solução serão utilizadas para obter um melhor ajuste com dados experimentais disponíveis.

Com as simulações e resultados precisos é possível propor a criação de um dispositivo/equipamento que reproduza as condições da simulação aqui realizadas e determinar as propriedades termofísicas de

materiais semicondutores, com acurácia e a um custo baixo.

Justificativa

JUSTIFICATIVA

O domínio das técnicas de determinação de propriedades termofísicas é importante para fornecer dados principalmente para os ramos da física, química e engenharia elaborarem suas teorias e emprego de matérias em projetos diversos. As técnicas também são fortes aliadas do setor de produção de novos materiais, como: ligas de memória de forma, cerâmicos, semicondutores, zeólitas, etc.

A condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico são as três propriedades físicas mais importantes de um material do ponto de vista de cálculos térmicos. Essas propriedades são observadas quando calor é adicionado ou removido do material, e se tornam importantes em qualquer projeto que precise funcionar em qualquer ambiente térmico.

A determinação experimental da condutividade térmica apresenta algumas dificuldades e requer alta precisão na determinação dos fatores necessários para o seu cálculo.

A difusividade térmica pode ser medida por métodos estacionários que medem a condutividade térmica num regime estacionário de troca de calor e métodos não estacionários que medem a condutividade térmica durante um regime transiente de troca de calor. A técnica experimental mais utilizada é o Método do Pulso de Energia introduzido por Parker (1961) e se baseia na solução analítica da equação de difusão de calor unidimensional. Considerando que a distribuição inicial de temperatura no sólido de espessura uniforme L , e $T(x,0)$, a distribuição de temperatura em qualquer instante posterior t será (CARSLAW E JAEGER, 1959).

Os métodos que sejam mais baratos e/ou mais rápidos na determinação das propriedades termofísicas, são sempre bem-vindos, uma vez que aceleram processos, diminuem custos e melhoram produtos. Um equipamento que emprega técnicas que possam baratear custos de produção apresenta, um grande potencial a ser introduzido neste mercado e se transformar em uma opção mais economicamente viável, assim como ser um vetor de implemento de novas tecnologias.

Desta maneira, o principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia diferenciada para determinar as propriedades termofísicas condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico, de materiais semicondutores variando com a temperatura. A obtenção da temperatura numérica ocorrerá pela solução da equação da difusão de calor usando o método dos volumes finitos com formulação implícita.

Neste projeto se pretende também aprimorar a técnica do pulso térmico que possa propor a criação de um dispositivo/equipamento que reproduza as condições das simulações e assim realize a determinação de propriedades termofísicas de materiais semicondutores, de maneiras mais rápida e a custo mais baixo.

O projeto contará com a participação como coorientador do professor Jesus Marlinaldo Medeiros, do Campus Cabedelo, que desenvolve trabalhos utilizando modelagem matemática e métodos numéricos para obter a solução do problema proposto utilizando o método dos volumes finitos e usando programação em linguagem Fortran.

Fundamentação teórica

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

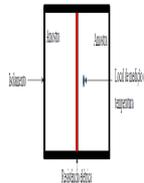
As técnicas de determinação de propriedades termofísicas são a muito tempo motivo de pesquisas e emprego em muitas áreas, as técnicas em regime transitório ou transiente, são bastante vantajosas, comparadas as de regime estacionário, aqui será empregada a técnica do pulso térmico, a mesma que foi empregada no trabalho de Silva 2000, esta consiste em fornecer um pulso de calor de curta duração a uma face, de uma amostra com dimensões pré-estabelecidas, coletar as temperaturas em um ponto localizado a

uma distância fixa da fonte de calor, cronometrar o tempo até que se atinja a temperatura máxima neste ponto e determinar a partir destes dados as propriedades termofísicas.

O método do pulso térmico (flash) trata-se de um método transiente, cujo princípio de funcionamento encontra-se descrito em Santos (2005): “[...] um pulso de energia de curta duração incide na face frontal da amostra a ser ensaiada, e a difusividade térmica é calculada a partir do registro do histórico de temperatura na face posterior da amostra”. Com o valor da difusividade térmica estimado experimentalmente, e conhecendo-se a magnitude do calor específico e da massa específica do material, determina-se então a condutividade térmica. O método (flash) é direto na determinação da difusividade térmica, porém indireto na estimativa da condutividade térmica.

O que caracteriza na condução de calor um sólido semi-infinito e viabiliza a utilização das equações a ela relacionadas é que este se comporta como se na extremidade oposta a que recebe o fluxo não houvesse troca, ou seja, a face oposta seria isolada, explicando de outra forma a que comumente é usada para explicar este evento é que o fluxo de calor fornecido em uma face se perde ao logo da amostra, ou não tem intensidade para atingir a face oposta ao fluxo, mas não se perde pelas outras direções/dimensões da amostra. Na Figura 1 um desenho esquemático ilustra o experimento.

Figura 1. Ilustração do experimento.



Fonte. produzida pelo autor.

A ideia de uma fonte de calor pontual tem sido comprovadamente de muita utilidade no estudo principalmente da condução calor. Uma grande vantagem desta teoria é que a mesma está baseada em uma ideia física de fácil entendimento, e isto a habilita como solução de um grande número de importantes problemas, que são escritos a partir do princípio da conservação da energia. A forma da equação da energia nessas condições é apresentada por Carslaw *et al* (1959) como equação 1:

$$\frac{\partial^2 T_{x,0}}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_{x,0}}{\partial t} \quad -\infty < x < \infty, t > 0 \quad (1)$$

A evolução da temperatura em função do tempo, de um ponto afastado da resistência, obedecendo as equações do sólido semi-infinito pode ser obtida pela equação 2.

$$T(x,t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi\alpha t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) \quad (2)$$

A partir desta equação a difusividade é obtida pela equação 3.

$$\alpha = \frac{x^2}{2t_m} \quad (3)$$

O calor específico foi obtido pela equação 4.

$$c_p = \frac{\dot{q} \Delta t}{T_m(x,t_m) \rho A x \sqrt{2\pi} \exp} \quad (4)$$

E a condutividade térmica por meio da equação 5.

$$K = \alpha * C_p * \rho \quad (5)$$

A quantidade de calor liberada por unidade de área do plano é dada por

$$Q = \frac{\dot{q}}{\rho c_p A}$$

Esta equação fornece a distribuição de temperaturas ao longo de um sólido infinito qualquer, submetido a uma fonte plana instantânea de potência Q no instante $t = 0$, em $x = 0$ que passa através do ponto x' .

As condições de contorno e inicial do problema físico são:

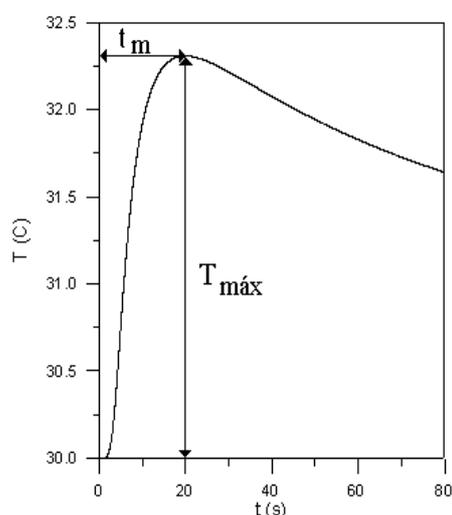
$$x = 0, t = 0, Q = \frac{Q}{\rho C_p A}, T = T_0$$

$$-\infty < x < \infty, t > 0, Q = 0$$

Onde as variáveis representam: T - temperatura, x - comprimento, x' - ponto de medição da temperatura máxima, t - tempo, α - difusividade térmica, Q - quantidade de calor, K - condutividade térmica, C_p - calor específico, ρ - massa específica, A - área da seção perpendicular ao fluxo de calor, t_m - tempo no qual a temperatura do ponto x' atinge o valor máximo.

A representação gráfica da evolução da temperatura do ponto afastado da fonte de calor, em que uma face do material sólido foi submetida a um pulso de calor, por um período de tempo de curtíssima duração (infinitesimal), pode ser visualizada na Figura 2.

Figura 2. Evolução da temperatura.



Fonte. O autor

Com a análise dos dados da figura 2, a temperatura máxima do ponto onde esta é medida e com o tempo no qual essa temperatura é alcançada, é possível determinar as propriedades do material, esse tempo e temperatura são característicos para cada material.

Objetivo geral

OBJETIVO GERAL

A importância de determinar as propriedades termofísicas dos materiais é por si só um feito de extrema relevância para a ciência e tecnologia, a explicação completa do fenômeno que leva a esta determinação é igualmente relevante, desta forma este projeto visa determinar com precisão os valores da difusividade térmica, calor específico e condutividade térmica, por meio da técnica do pulso térmico em um meio semi-infinito, usando a simulação numérica, com discretização por volumes finitos e formulação implícita.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar pesquisa bibliográfica atualizada sobre o assunto
- Discretizar as equações que governam o problema físico
- Desenvolver programa computacional em linguagem Fortran
- Solucionar as equações pelo método numérico dos volumes finitos

- Comparar os resultados com os resultados de outros trabalhos atuais e com a solução analítica do problema.

- Simular os resultados usando materiais condutores de calor e semicondutores, para testar a consistência dos resultados e encontrar limites de utilização do método.

- Submeter trabalhos para eventos e/ou periódicos científicos.

Metas

1 - Pesquisa bibliográfica

2 - Desenvolver programa computacional em linguagem Fortran

3 - Solucionar as equações pelo método numérico dos volumes finitos

4 - Simular os resultados usando materiais condutores de calor e semi-condutores, para testar a consistência dos resultados e encontrar limites de utilização do método

5 - Comparar os resultados com os resultados de outros trabalhos atuais e com a solução analítica do problema

6 - Submeter trabalhos para eventos e/ou periódicos científicos e elaboração de relatório final

Metodologia da execução do projeto

METODOLOGIA

Dentre as técnicas de produção de trabalhos científicos a simulação numérica se aplica como uma forma geralmente mais rápida e barata do que as técnicas experimentais, muitas vezes substitui essa última com muitas vantagens e acurada precisão. Nos dias atuais com o aprimoramento dos meios numéricos, implementação tecnológica e rapidez dos computadores esses meios têm ganho muito mais espaço no mercado científico e industrial.

A metodologia empregada neste projeto será de uma pesquisa científica teórica, partindo inicialmente da fundamentação de conceitos físicos tratando de assuntos envolvendo transferência de calor, propriedades termofísicas, modelagem matemática, métodos numéricos e linguagem de programação para proporcionar uma visão global do problema a ser estudado. Após esse embasamento teórico, será possível compreender como determinar as propriedades termofísicas condutividade térmica, capacidade térmica e difusividade térmica de materiais condutores e semicondutores de calor. Em seguida, será realizado um levantamento bibliográfico das técnicas de medição da propriedade termofísicas. Posteriormente, será tratada a modelagem matemática e método numérico para obtenção da solução do problema. Após o modelamento será desenvolvido o código computacional para simulação do problema proposto. Finalizando com a análise dos resultados obtidos e comparação com dados da literatura. Elaboração de relatórios e confecção de artigos.

O acompanhamento da evolução do projeto será também realizado por meio de reuniões semanais da equipe, as correções no cronograma e da metodologia serão discutidos, e se for o caso corrigidos em função dos resultados destas reuniões.

Disseminação dos resultados

Acompanhamento e avaliação do projeto durante a execução

O acompanhamento da evolução dos trabalhos será realizada a cada semana, por meios de reuniões entre os orientadores e orientados.

CRONOGRAMA

Atividades a cada mês									
	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º
Pesquisa bibliográfica	X	X	X						
Discretização das equações			X	X					
Desenvolver programa computacional em linguagem			X	X	X				

Fortran									
Solucionar as equações pelo método numérico dos volumes finitos				X	X				
Simular os resultados usando materiais condutores de calor e semicondutores, para testar a consistência dos resultados e encontrar limites de utilização do método					X	X	X	X	
Comparar os resultados com os resultados de outros trabalhos atuais e com a solução analítica do problema							X	X	X
Submeter trabalhos para eventos e/ou periódicos científicos e elaboração de relatório final								X	X

Referências bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Carslaw, H. S., Jaeger, J. C., "Conduction of Heat in Solids", Oxford at the cleredom press, London, 1959.
2. Carollo, L. F. S., "Estimação simultânea de propriedades termofísicas de materiais metálicos". Itajubá, (MG), 2010. 78 pg. il.
3. Feit, E.; Shaw, H. "Advances in thermal properties testing at oak ridge national laboratories". Ceramic Bulletin, v. 70, n. 1, p.125-28, 1991.
4. Gurgel, J. M., Kluppel, P. R., "Thermal conductivity of hydrated silica-gel". The chemical Engineering Journal, vol. 61, pp. 133-138, 1996.
5. Malheiros, F C., "Desenvolvimento de uma técnica experimental para a estimativa de propriedades térmicas usando uma única superfície de acesso "in situ"". 2017. 72 pg.
6. Parker, W. J. et al.; J. Appl. Phys., v. 32, p. 1679-1681, 1961.
7. Pinto, J. N. O., Rouver, A. N., Betini, E. G., Correa, L. A., Orlando, M. T. D., Passos, C. A. C., "Descrição matemática do Método Flash para determinação da difusividade térmica". Blucher Proceedings, VI Encontro Científico de Física Aplicada, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2015.
8. Ramesh V.U., Mujiba, S. P., Kinnari, P A., Kuldip, R. "Thermal conductivity of flake-shaped iron particles based magnetorheological suspension: Influence of nano-magnetic particle concentration". Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 503, 1 June 2020.
9. Sandro, M. M. L. S., Guimarães, G., Duart, M. A.V., "Estimador de uma função objetivo de correlação na medição simultânea de propriedades térmicas", Anais do COBEM, Baurú, 1998.
10. Santos, W. N., "Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmicas de materiais cerâmicos: I - O método de pulso de energia". Cerâmica 51, 2005, 205-213.
11. Silva, M. G., "Caracterização de um método de pulso de térmico para determinação de propriedades térmicas de materiais granulares". UFPB, João Pessoa, 2000. 70 pg.

Meta	Atividade	Especificação	Indicador(es) qualitativo(s)	Indicador físico		Período de execução	
				Unid.de Medida	Qtd.	Início	Término
1	1	Realizar revisão bibliográfica atualizada sobre os métodos numéricos, e método do pulso térmico (flash). Realizada a pesquisa bibliográfica sobre métodos do pulso térmico.	Realizar o aplicação das equações corretamente e dominar o método de discretização por volumes finitos.		1	Previsto para 01/04/2020 Iniciado em 01/04/2020	Previsto para 30/06/2020 Concluído em 30/06/2020
2	1	Realizar o equacionamento matemático do problema físico e discretizar as equações pelo método dos volumes finitos. Realizado o equacionamento do problema físico.	Obter o equacionamento e discretização das equações.		1	Previsto para 01/06/2020 Iniciado em 01/06/2020	Previsto para 31/07/2020 Concluído em 31/07/2020
3	1	solucionar as equações analiticamente e numericamente Realizada a solução analítica do problema físico do método do pulso térmico.	Obter as temperaturas do problema numericamente e analiticamente.		1	Previsto para 01/07/2020 Iniciado em 01/07/2020	Previsto para 31/08/2020 Concluído em 31/08/2020
3	2	Elaborar relatório parcial de atividades. Anexo relatório parcial de atividades no sistema suap dentro do prazo estipulado.	Verificar o andamento do trabalho de pesquisa.		1	Previsto para 01/08/2020 Iniciado em 01/08/2020	Previsto para 31/08/2020 Concluído em 31/08/2020
4	1	Simular numericamente os dados das propriedades termofísicas e verificar a fidelidade dos resultados. Atendida	Comparar os resultados analíticos e simulados das equações verificando suas adequações.		1	Previsto para 01/08/2020 Iniciado em 01/08/2020	Previsto para 15/11/2020 Concluído em 15/11/2020
5	1	Comparar os resultados obtidos numericamente e analiticamente, com os dados das propriedades termofísicas da literatura técnico científica existente. Resultados seguem os resultados da literatura técnica sobre o assunto.	Verificar a compatibilidade dos resultados e a consistência do equacionamento e realizados.		1	Previsto para 01/10/2020 Iniciado em 01/10/2020	Previsto para 31/12/2020 Concluído em 31/12/2020
6	1	Realizar a submissão de artigos a periódico Principia. E escrever o relatório final. Elaboração do relatório final executado e anexo ao suap.	Finalizar o trabalho com o relatório final.		1	Previsto para 01/11/2020 Iniciado em 01/11/2020	Previsto para 31/12/2020 Concluído em 31/12/2020

7 - PLANO DE APLICAÇÃO

Classificação da despesa	Especificação	PROEX (R\$)	DIGAE (R\$)	Campus proponente (R\$)	Total (R\$)
339018	Auxílio Financeiro a Estudantes	0	0	3600.00	3600.00
339020	Auxílio Financeiro a Pesquisadores	0	0	6000.00	6000.00
449020	Auxílio Financeiro a Pesquisadores	0	0	6000.00	6000.00
TOTAIS		0	0	15600.00	15600.00

8 - CRONOGRAMA DE DESEMBOLSO

Despesa	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6	Mês 7	Mês 8	Mês 9	Mês 10	Mês 11	Mês 12
339018 - Auxílio Financeiro a Estudantes	0	0	0	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00
339020 - Auxílio Financeiro a Pesquisadores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
449020 - Auxílio Financeiro a Pesquisadores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Anexo A

MEMÓRIA DE CÁLCULO

CLASSIFICAÇÃO DE DESPESA	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE DE MEDIDA	QUANT.	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL	ATIVO
339018 - Auxílio Financeiro a Estudantes	Bagamento de bolsa	Reais	9	400.00	3600.00	Sim
TOTAL GERAL					3.600,00	



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PARAÍBA

Chamada Interconecta IFPB - N ° 01/2020



Período abrangido pelo Relatório (mês/ano): (julho/2020 a março/2021)

1 IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

Título: DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE MEIOS SÓLIDOS, POR MEIO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO MÉTODO DO PULSO TÉRMICO, UTILIZADO AS EQUAÇÕES DO SÓLIDO SEMI-INFINITO

Bolsista 1: Reginaldo José Barbosa Silva¹

**Voluntários: Joao Vitor Monteiro Lisboa²
Lucas Rodrigo do Nascimento Silva²**

**Cursos : 114 - Bacharelado em Engenharia Mecânica¹ e 45 - Tecnologia em Automação Industrial²
Orientador e Coordenador do projeto: Marcio Gomes da Silva, Docente – Campus João Pessoa**

Coorientador: Jesus Marlinaldo de Medeiros, Docente – Campus Cabedelo

Local de execução: IFPB campus João Pessoa

Grande Área / Área: Engenharias / Engenharias e Automação Industrial

Fase de execução:

Etapas	Meses									
	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	
Pesquisa Bibliográfica	P/R	P/R	P/R							
Discretização das equações			P/R	P/R						
Desenvolver programa computacional linguagem Fortran			P/R	P/R	P/RP	R				
Solucionar as equações método numérico dos volumes finitos				P/R	P/RP	R				
Simular os resultados					P/RP	P/R	P/R	P/R		
Comparar os resultados							P/R	P/R	P/Rx	
Elaboração de relatórios e artigos científicos					P/R			P/R	P/R	

O CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO FOI CUMPRIDO CONFORME PROPOSTO. ONDE P – PREVISTO, R – REALIZADO, RP – REALIZADO PARCIALMENTE.

Objetivo Geral:



- A importância de determinar as propriedades termofísicas dos materiais é por si só um feito de extrema relevância para a ciência e tecnologia, a explicação completa do fenômeno que leva a esta determinação é igualmente relevante, desta forma este projeto visa determinar com precisão os valores da difusividade térmica, calor específico e condutividade térmica, por meio da técnica do pulso térmico em um meio semi-infinito, usando a simulação numérica, com discretização por diferenças finitas e formulação implícita.

Objetivos Específicos:

- Realizar pesquisa bibliográfica atualizada sobre o assunto (**Executado**);
- Discretizar as equações que governam o problema físico (**Executado problema difusão**);
- Desenvolver programa computacional em linguagem Fortran (**Executado problema difusão**);
- Solucionar as equações pelo método numérico dos volumes finitos (**Executado problema pulso térmico**);
- Comparar os resultados com os resultados de outros trabalhos atuais e com a solução analítica do problema (**Executado problema pulso térmico**);
- Simular os resultados usando materiais condutores de calor e semicondutores, para testar a consistência dos resultados e encontrar limites de utilização do método (**Executado problema pulso térmico**);
- Submeter trabalhos para eventos e/ou periódicos científicos (**Executado**);

2. RELATÓRIO

2.1 Resumo

A caracterização termofísica dos materiais utilizados na Engenharia é de grande importância para realização de projetos nas mais diversas áreas de conhecimento onde os fenômenos ligados aos processos de transferência de calor exercem um papel fundamental. A difusividade térmica é uma propriedade termofísica importantíssima na análise de problemas de difusão de energia térmica. Este trabalho teve como proposta a determinação desta propriedade utilizando um campo de temperatura periódico, empregando o método do pulso de energia radiante, intenso e curto, uniformemente sobre a face de uma pequena amostra para a determinação do perfil de temperatura ao longo da amostra em função do tempo. O modelo considera um fluxo de calor constante na superfície superior da amostra e condição de isolamento na superfície oposta. A



solução deste problema foi obtida de forma analítica e numérica. A solução do problema de condução de calor em regime transiente e unidimensional com pulso térmico obtido pelo método das diferenças finitas, comparando com a solução analítica e com dados experimentais da literatura para o aço inoxidável 304 e aço carbono 1045. Os resultados obtidos mostraram uma boa concordância.

2.2 Palavras-chave

Propriedades termofísicas, Pulso térmico, Solução numérica, Diferenças finitas.

2.3 Introdução e Fundamentação Teórica

INTRODUÇÃO

A determinação das propriedades térmicas dos materiais é um problema de grande importância na engenharia e em diversas outras áreas do conhecimento. Como a energia em forma de calor é um efeito comum em muitos procedimentos, conhecer as propriedades térmicas dos materiais é fundamental para compreender, planejar, intervir e controlar processos.

Os novos materiais (metálicos, cerâmicos, compósitos, biomateriais etc.) e as suas aplicações industriais, em tecnologias de ponta e em diversas faixas de temperatura, tem mostrado a importância da determinação das propriedades térmicas destes materiais (difusividade térmica, condutividade térmica, calor específico) em função da temperatura (FEIT E SHAW, 1991).

A medição das propriedades termofísicas de materiais novos ou antigos está em constante desenvolvimento e os processos que envolvem transferência de calor são continuamente estudados e a cada ano surgem novos métodos e novas propostas de medição e controle das variáveis térmicas.

As propriedades termofísicas a serem abordadas nesta pesquisa são a difusividade térmica, o calor específico e a condutividade térmica. Essas propriedades caracterizam o material termicamente e auxiliam na aplicação em projetos de: isolamento térmico, trocadores de calor, máquinas e equipamentos mecânicos/eletroeletrônicos, entre outros.

A condutividade térmica representa a quantidade de energia térmica que o material pode conduzir pelo processo de difusão e é esta propriedade que demarca a intensidade da temperatura de trabalho do material. A capacidade de calor volumétrica representa a capacidade de um material de armazenar energia térmica e a difusividade térmica é uma medida da rapidez com a qual o calor se propaga através de um material.



Para a determinação dessas três propriedades são empregadas diversas técnicas que basicamente se dividem nas de; regime transitório e regime permanente, considerando se o fluxo de calor fornecido atinge o regime constante ou não. As técnicas de regime em que o fluxo de calor atinge o regime permanente são empregadas basicamente para determinação da condutividade térmica, mas estas técnicas apresentam grandes erros nos valores da condutividade térmica, uma vez que os tempos para se atingir o regime permanente são elevados, o que acarreta perdas significativas de calor e assim interferências igualmente elevadas nos valores desta propriedade. Já as técnicas em regime transitório são mais precisas comparadas as de regime permanente, determinam mais de uma propriedade simultaneamente, contudo são mais difíceis de serem implementadas experimentalmente.

SILVA (2000), propôs uma forma teórica para determinação das propriedades termofísicas difusividade térmica, calor específico e condutividade térmica através da simulação de um experimento onde uma resistência elétrica em forma de disco de baixíssima espessura seria colocada entre duas amostras de um material semicondutor e a mesma dissipava uma quantidade de calor em um intervalo de tempo infinitesimal, com um termopar instalado a uma distância preestabelecida e próxima da resistência as temperaturas deste ponto eram coletadas, o tempo para que a temperatura máxima do ponto fosse atingida também era registrado, de posse destes dados as propriedades eram determinadas. A técnica usada foi em regime transiente, com a discretização das equações da transferência de calor por condução em um sólido semi-infinito e a partir desta foi realizada a simulação usando o método das diferenças finitas. Os resultados obtidos apresentaram discrepâncias com os dados disponível na literatura, o que pode ter sido gerado no método de solução empregado. Portanto, novas técnicas de solução serão utilizadas para obter um melhor ajuste com dados experimentais disponíveis.

Com as simulações e resultados precisos é possível propor a criação de um dispositivo/equipamento que reproduza as condições da simulação aqui realizadas e determinar as propriedades termofísicas de materiais semicondutores, com acurácia e a um custo baixo.

O domínio das técnicas de determinação de propriedades termofísicas é importante para fornecer dados principalmente para os ramos da física, química e engenharia elaborarem suas teorias e emprego de matérias em projetos diversos. As técnicas também são fortes aliadas do setor de produção de novos materiais, como: ligas de memória de forma, cerâmicos, semicondutores, zeólitas, etc.

A condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico são as três propriedades físicas mais importantes de um material do ponto de vista de cálculos térmicos. Essas propriedades são observadas quando calor é adicionado ou removido do material, e se tornam importantes em qualquer projeto que precise funcionar em qualquer ambiente térmico.



A determinação experimental da condutividade térmica apresenta algumas dificuldades e requer alta precisão na determinação dos fatores necessários para o seu cálculo.

A difusividade térmica pode ser medida por métodos estacionários que medem a condutividade térmica num regime estacionário de troca de calor e métodos não estacionários que medem a condutividade térmica durante um regime transiente de troca de calor. A técnica experimental mais utilizada é o Método do Pulso de Energia introduzido por Parker (1961) e se baseia na solução analítica da equação de difusão de calor unidimensional. Considerando que a distribuição inicial de temperatura no sólido de espessura uniforme L , e $T(x,0)$, a distribuição de temperatura em qualquer instante posterior t será (CARSLAW E JAEGER, 1959).

Os métodos que sejam mais baratos e/ou mais rápidos na determinação das propriedades termofísicas, são sempre bem-vindos, uma vez que aceleram processos, diminuem custos e melhoram produtos. Um equipamento que emprega técnicas que possam baratear custos de produção apresenta, um grande potencial a ser introduzido neste mercado e se transformar em uma opção mais economicamente viável, assim como ser um vetor de implemento de novas tecnologias.

Desta maneira, o principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia diferenciada para determinar as propriedades termofísicas condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico, de materiais semicondutores variando com a temperatura. A obtenção da temperatura numérica ocorrerá pela solução da equação da difusão de calor usando o método dos volumes finitos com formulação implícita.

Neste projeto se pretende também aprimorar a técnica do pulso térmico que possa propor a criação de um dispositivo/equipamento que reproduza as condições das simulações e assim realize a determinação de propriedades termofísicas de materiais semicondutores, de maneiras mais rápida e a custo mais baixo.

O projeto contará com a participação como coorientador do professor Jesus Marlinaldo Medeiros, do Campus Cabedelo, que desenvolve trabalhos utilizando modelagem matemática e métodos numéricos para obter a solução do problema proposto utilizando o método das diferenças finitas e usando programação em linguagem Fortran.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As técnicas de determinação de propriedades termofísicas são a muito tempo motivo de pesquisas e emprego em muitas áreas, as técnicas em regime transitório ou transiente, são bastante vantajosas, comparadas as de regime estacionário, aqui será empregada a técnica do pulso térmico, a mesma que foi empregada no trabalho de Silva 2000, esta consiste em fornecer um pulso de calor de curta duração a uma face, de uma amostra com dimensões pré-estabelecidas, coletar as temperaturas em um ponto localizado a

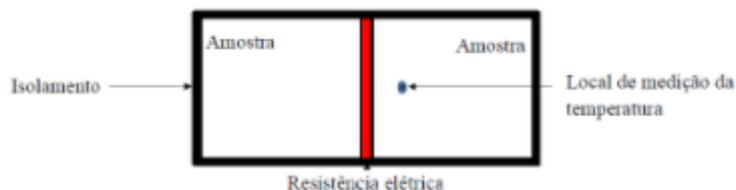


uma distância fixa da fonte de calor, cronometrar o tempo até que se atinja a temperatura máxima neste ponto e determinar a partir destes dados as propriedades termofísicas.

O método do pulso térmico (flash) trata-se de um método transiente, cujo princípio de funcionamento encontra-se descrito em Santos (2005): “[...] um pulso de energia de curta duração incide na face frontal da amostra a ser ensaiada, e a difusividade térmica é calculada a partir do registro do histórico de temperatura na face posterior da amostra”. Com o valor da difusividade térmica estimado experimentalmente, e conhecendo-se a magnitude do calor específico e da massa específica do material, determina-se então a condutividade térmica. O método (flash) é direto na determinação da difusividade térmica, porém indireto na estimativa da condutividade térmica.

O que caracteriza na condução de calor um sólido semi-infinito e viabiliza a utilização das equações a ela relacionadas é que este se comporta como se na extremidade oposta a que recebe o fluxo não houvesse troca, ou seja, a face oposta seria isolada, explicando de outra forma a que comumente é usada para explicar este evento é que o fluxo de calor fornecido em uma face se perde ao logo da amostra, ou não tem intensidade para atingir a face oposta ao fluxo, mas não se perde pelas outras direções/dimensões da amostra. Na Figura 1 um desenho esquemático ilustra o experimento.

Figura 1. Ilustração do experimento.



Fonte: Silva, 2000.

A ideia de uma fonte de calor pontual tem sido comprovadamente de muita utilidade no estudo principalmente da condução calor. Uma grande vantagem desta teoria é que a mesma está baseada em uma ideia física de fácil entendimento, e isto a habilita como solução de um grande número de importantes problemas, que são escritos a partir do princípio da conservação da energia. A forma da equação da energia nessas condições é apresentada por Carslaw et al (1959) como equação 1:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad -\infty < x < \infty, t > 0 \quad (1)$$

A evolução da temperatura em função do tempo, de um ponto afastado da resistência, obedecendo as equações do sólido semi-infinito pode ser obtida pela equação 2.



$$T(x, t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi\alpha t}} e^{\left(\frac{-(x-x')^2}{4\alpha t}\right)} \quad (2)$$

A partir desta equação a difusividade é obtida pela equação 3.

$$\alpha = \frac{x^2}{2t_m} \quad (3)$$

O calor específico foi obtido pela equação 4.

$$c_p = \frac{\dot{q}\Delta t}{T_{\text{máx}}(x, t_m)\rho Ax\sqrt{2\pi\exp(l)}} \quad (4)$$

E a condutividade térmica por meio da equação 5.

$$k = \alpha c_p \rho \quad (5)$$

A quantidade de calor liberada por unidade de área do plano é dada por

$$Q = \frac{\dot{q}}{\rho c_p A} \quad (6)$$

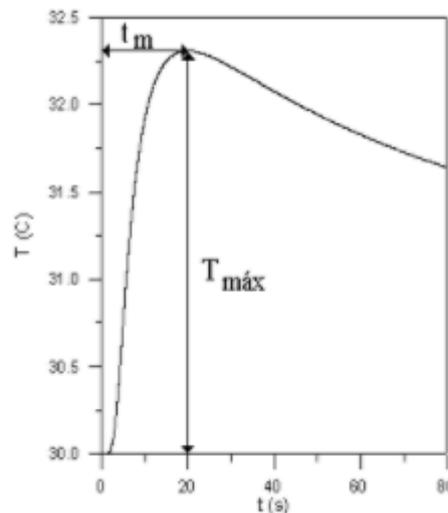
Esta equação fornece a distribuição de temperaturas ao longo de um sólido infinito qualquer, submetido a uma fonte plana instantânea de potência Q no instante t = 0, em x = 0 que passa através do ponto x'.

Onde as variáveis representam: T - temperatura, x - comprimento, x' - ponto de medição da temperatura máxima, t - tempo, α - difusividade térmica, Q - quantidade de calor, K - condutividade térmica, Cp - calor específico, ρ - massa específica, A - área da seção perpendicular ao fluxo de calor, tm - tempo no qual a temperatura do ponto x' atinge o valor máximo.

A representação gráfica da evolução da temperatura do ponto afastado da fonte de calor, em que uma face do material sólido foi submetida a um pulso de calor, por um período de tempo de curtíssima duração (infinitesimal), pode ser visualizada na Figura 2.



Figura 2. Evolução da temperatura.



Fonte: Silva, 2000.

Com a análise dos dados da figura 2, a temperatura máxima do ponto onde está, é medida e com o tempo no qual essa temperatura é alcançada, é possível determinar as propriedades do material, esse tempo e temperatura são característicos para cada material.

2.4 Metodologia

Dentre as técnicas de produção de trabalhos científicos a simulação numérica se aplica como uma forma geralmente mais rápida e barata do que as técnicas experimentais, muitas vezes substitui essa última com muitas vantagens e acurada precisão. Nos dias atuais com o aprimoramento dos meios numéricos, implementação tecnológica e rapidez dos computadores esses meios têm ganho muito mais espaço no mercado científico e industrial.

A metodologia empregada neste projeto será de uma pesquisa científica teórica, partindo inicialmente da fundamentação de conceitos físicos tratando de assuntos envolvendo transferência de calor, propriedades termofísicas, modelagem matemática, métodos numéricos e linguagem de programação para proporcionar uma visão global do problema a ser estudado. Após esse embasamento teórico, será possível compreender como determinar as propriedades termofísicas condutividade térmica, capacidade térmica e difusividade térmica de materiais condutores e semicondutores de calor. Em seguida, será realizado um levantamento bibliográfico das técnicas de medição da propriedade termofísicas. Posteriormente, será tratada a modelagem matemática e método numérico para obtenção da solução do problema. Após o modelamento será desenvolvido o código computacional para simulação do problema proposto. Finalizando com a análise



dos resultados obtidos e comparação com dados da literatura. Elaboração de relatórios e confecção de artigos.

O acompanhamento da evolução do projeto será também realizado por meio de reuniões semanais da equipe, as correções no cronograma e da metodologia serão discutidas, e se for o caso corrigidas em função dos resultados destas reuniões.

Acompanhamento e avaliação do projeto durante a execução.

2.5 Resultados

Atividades desenvolvidas:

1ª Etapa: Fundamentação Teórica

Inicialmente foi repassado o projeto com cronograma de atividades a serem desenvolvidas e parte da literatura para fundamentação teórica de assuntos envolvendo materiais de construção mecânica, transferência de calor, condução de calor, equações diferenciais, métodos analíticos e numéricos, solução do problema proposto utilizando métodos das diferenças finitas e método dos volumes finitos e usando programação em linguagem Fortran. Leitura e entendimento da proposta de iniciação à pesquisa dentro do cronograma proposto com uma reunião semanal com os pesquisadores envolvidos.

O Problema que envolvem transferência de calor causada por uma diferença de temperatura entre duas regiões em um mesmo meio pode ser representado por uma equação diferencial parcial através da equação de calor de Fourier (equação diferencial parcial parabólica de segunda ordem).

As equações diferenciais parciais são de grande importância na engenharia, pois através dessas expressões podemos determinar o comportamento futuro de diversos problemas, com base na variação dos valores presentes. Porém, a resolução de uma equação diferencial parcial pode ser complexa, o que dificulta ou até mesmo impossibilita a obtenção das soluções exatas pelos métodos analíticos existentes.

O avanço computacional e a crescente necessidade de se obter soluções de problemas cada vez mais complexos originaram os métodos numéricos.

A ideia básica desses métodos numéricos é o processo de discretização, que reduz o problema contínuo, com número infinito de variáveis, em um problema discreto com um número finito de variáveis, podendo ser resolvido computacionalmente.

Existem diversos tipos de métodos numéricos utilizados para encontrar a solução de uma equação diferencial parcial, como: método dos elementos finitos, método dos elementos de contorno, método dos volumes finitos, método das diferenças finitas, entre outros.

Em relação a problemas térmicos, os materiais podem ser definidos termicamente por propriedades como a condutividade e a difusividade térmicas. A condutividade térmica é uma propriedade de transporte,



a qual fornece uma indicação da taxa na qual a energia é transferida no processo de difusão. Ela depende da estrutura física da matéria, atômica e molecular, que está relacionada ao estado da matéria. Já a difusividade térmica mede a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação a capacidade de armazenar (INCROPERA et al., 2014).

Dentre os materiais de construção mecânica mais empregados para problemas térmicos destacam-se os metais pois são usados no desenvolvimento industrial, seja na forma pura, elementar ou como novas ligas de alta resistência. Devido a suas aplicações, é altamente desejável poder adaptar as propriedades dos metais para combinar e melhorar o desempenho de seu uso para tarefas específicas.

O parâmetro físico que caracteriza e quantifica a capacidade do material de conduzir calor é chamado de condutividade térmica, muitas vezes designado por compreender a natureza do processo de transferência térmica em metais e ser capaz de prever quão bem uma determinada liga conduzirá o calor, por isso a determinação dessa propriedade é de interesse científico e tecnológico (TRITT, 2005).

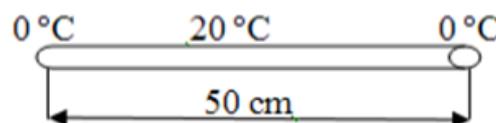
Um método muito utilizado para a determinação da difusividade térmica é o Método Flash, Parker et al. (1961). Esta técnica consiste na aplicação de um pulso de calor radiante, de grande intensidade e de pequena duração, em uma superfície da amostra analisada, e com base no tempo necessário para que a temperatura na face oposta atinja o valor máximo, torna-se possível a obtenção da difusividade térmica.

Como todos os métodos, existem vantagens e desvantagens, sendo que a principal vantagem deste método é a não necessidade do conhecimento da magnitude do fluxo de calor aplicado na superfície da amostra. Por outro lado, as desvantagens se referem às condições necessárias para utilizar a técnica, impostas por Parker et al. (1961), que são as seguintes: a excitação pode não ser pontual no tempo, não homogênea no espaço e a amostra pode estar sujeita a perdas térmicas. Uma limitação para esta técnica é a necessidade do conhecimento da quantidade de energia absorvida na face frontal da amostra para a determinação de λ (CAROLLO, 2010).

2ª Etapa: Simulação de um problema de difusão de calor transiente

Problema exemplo: condução unidimensional transiente numa barra com 50 cm de comprimento, isolada termicamente em ambos os lados de modo a não trocar calor com a ambiente externo. Inicialmente, essa barra foi mantida a uma temperatura constante de 20°C e suas extremidades foram mantidas a 0°C para o tempo, $t > 0$, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Distribuição de temperaturas em uma barra de metal, para o tempo $t > 0$.





A equação de calor que representa a condução de calor unidimensional transiente é equação diferencial parcial parabólica de segunda ordem:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

Condições de contorno:

$$T(0, t) = 0 \text{ e } T(L, t) = 0 \text{ para } t > 0 \quad (2)$$

Condição inicial:

$$T(x, 0) = 20 \text{ para } 0 < x < 50 \quad (3)$$

A difusividade térmica dada por é $\alpha^2 = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$ e a solução exata deste problema é expressa por

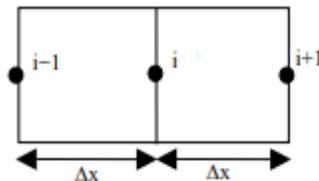
$$T(x, t) = \frac{80}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} e^{\left(\frac{-n^2 \pi^2 \alpha^2 t}{2500}\right)} \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{50}\right) \quad (4)$$

DISCRETIZAÇÃO DA EQUAÇÃO

A primeira etapa para resolução de qualquer método numérico envolvendo as equações diferenciais parciais é discretizar a região onde se procura a solução.

A solução numérica foi obtida via Método da Diferenças Finitas (MDF). Para isso expandiu-se a temperatura nos pontos $i + 1$ e $i - 1$ em torno do ponto i via série de Taylor, usando discretização estruturada, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4: Discretização unidimensional para o MDF



MÉTODO DE SOLUÇÃO

MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS



O método numérico das diferenças finitas é usado para obter a aproximação da solução de uma equação diferencial parcial, com a discretização do domínio e na substituição das derivadas presentes na equação diferencial por aproximações utilizando apenas os valores numéricos da função usando a série de Taylor.

O método das diferenças finitas explícito aplicado na Equação (1) exige aproximações para a segunda derivada no espaço utilizando a diferença finita centrada e para a primeira derivada no tempo a diferença progressiva:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^F - T_i^a}{\Delta t} = \alpha^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha^2 \frac{T_{i+1}^a - 2T_i^a + T_{i-1}^a}{\Delta x^2} \quad (5)$$

que pode ser reescrito na forma

$$T_i^F = T_i^a + Fo(T_{i+1}^a - 2T_i^a + T_{i-1}^a) \quad (6)$$

onde Fo é o número de Fourier

$$Fo = \alpha^2 \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (7)$$

CONVERGÊNCIA E ESTABILIDADE

O método explícito das diferenças finitas é tanto convergente quanto estável se o número de Fourier, Fo < 1/2, portanto deve-se escolher a malha computacional espacial e o passo de tempo, que não provoque divergência ou instabilidade.

SOLUÇÃO DO PROBLEMA

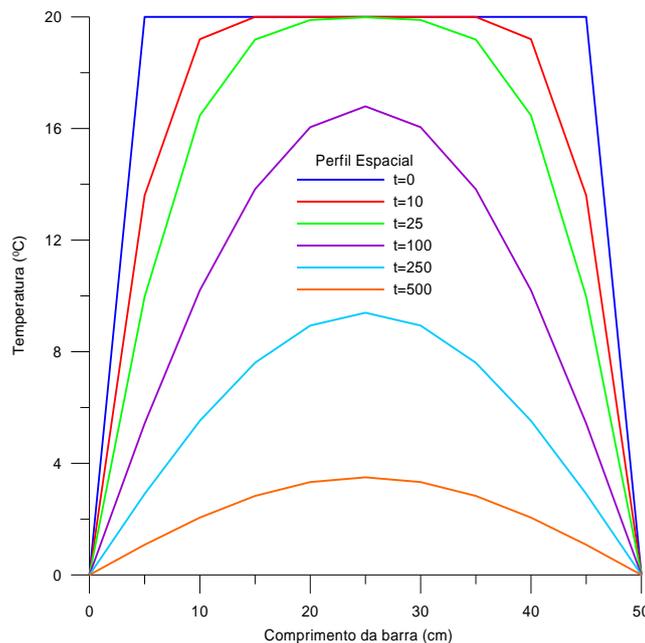
Para calcular a solução do problema exemplo pelo método das diferenças finitas, usou-se a premissa que, para o método convergir, o número de Fourier O deve ser igual ou menor que 1/2. Para atender esse requisito, utilizou-se uma malha uniforme com espaçamento de 5 cm no comprimento da barra (Δx) e 5s em relação ao tempo (Δt), resultando em Fo=1/5. Ao definir a malha obteve-se 11 subintervalos no comprimento da barra e 101 intervalos em relação ao tempo.

RESULTADOS OBTIDOS



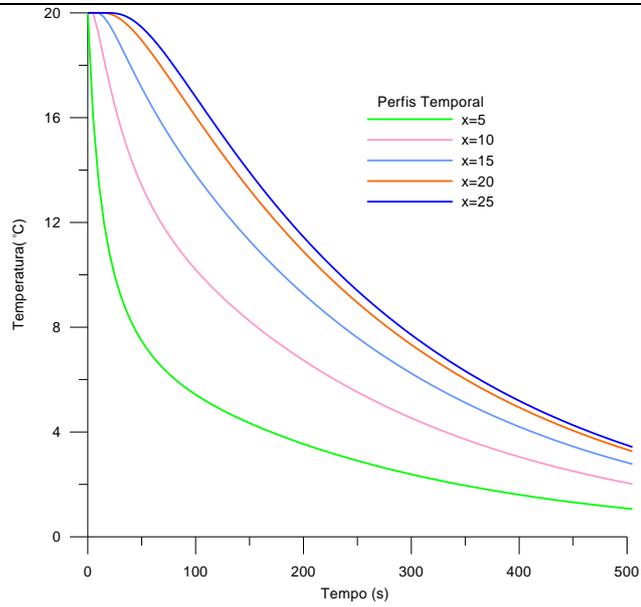
A Figura 5 descreve como ocorre o resfriamento no comprimento da barra com o decorrer do tempo. Observa-se que no instante de tempo $t=10$ s, a região central da barra está com temperatura de 20 °C. Com o passar do tempo essa região vai perdendo calor para as extremidades. Em $t= 500$ s observamos que a temperatura a região central é de aproximadamente $3,5$ °C. Essa troca de calor irá ocorrer até a região central entrar em equilíbrio térmico com suas extremidades.

Figura 5 – Perfis da temperatura em relação ao espaço para diferentes tempos na barra.



A Figura 6 descreve como ocorre o resfriamento ao longo do tempo de acordo com determinada posição do comprimento da barra. Observa-se que o resfriamento no comprimento de $x=25$ cm ocorreu de forma mais lenta em relação à posição $x=5$ cm.

Figura 6 – Perfis da temperatura em relação ao tempo para diferentes posições na barra.



PROGRAMA COMPUTACIONAL

LINGUAGUEM FORTRAN

Programa barra1



```
program barral
!
! resolver problema condução na baara 1d transiente
! solução explicito jacobi euler
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
parameter (m=100)
dimension t(m),tf(m)
open(45,file='saida.dat')

!
! dados
! numeros de pontos
n=11
! comprimento da barra L=50 cm
xl=50
! difusividade 1 cm2/s
alfa=1
! passo de tempo 5 s
dt=5
tempo=0

!
! calculo
! passo malha computacional
dx=xl/(n-1)
! número de Fourier
s=alfa*dt/(dx**2)
write(*,*)dx,s
!
! condição inicial
do i=2,n-1
t(i)=20
enddo

t(1)=0
t(n)=0

k=0

write(45,'(12f7.3)')tempo, T(1),t(2),T(3),t(4),t(5),t(6),
# t(7),T(8),t(9),t(10),t(11)
200 continue
tf(n)=0
do i=2,n-1
tf(i)=s*(t(i+1) -2*t(i) +t(i-1)) + t(i)
enddo
tempo=tempo + dt
write(45,'(12f7.3)')tempo, Tf(1),tf(2),Tf(3),tf(4),tf(5),tf(6),
# tf(7),Tf(8),tf(9),tf(10),tf(11)
if (k.ge.100) goto 100
k=k+1
do i=1,n
t(i)=tf(i)
enddo
goto 200
100 continue
end
```



SOLUÇÃO ANALÍTICA

```
(%i1) alpha:1;  
(alpha) 1  
(%i2) temp(x,t):=(80/pi)*(sum((1/(2*n+1))*exp(-(2*n+1)^2*pi^2*alpha^2*t/2500)*sin((2*n+1)*x*pi/50),n,0,20));  
(%o2) temp(x,t):=80/pi * sum_{n=0}^{20} 1/(2n+1) * exp(-((2n+1)^2 * pi^2 * alpha^2 * t)/2500) * sin((2n+1)x pi / 50)  
(%i3) temp(25,25),numer;  
(%o3) 19.9837219193022  
(%i4) temp(25,100),numer;  
(%o4) 16.9160096793486
```

Figura 7 – Perfis da temperatura na barra solução analítica 3D.

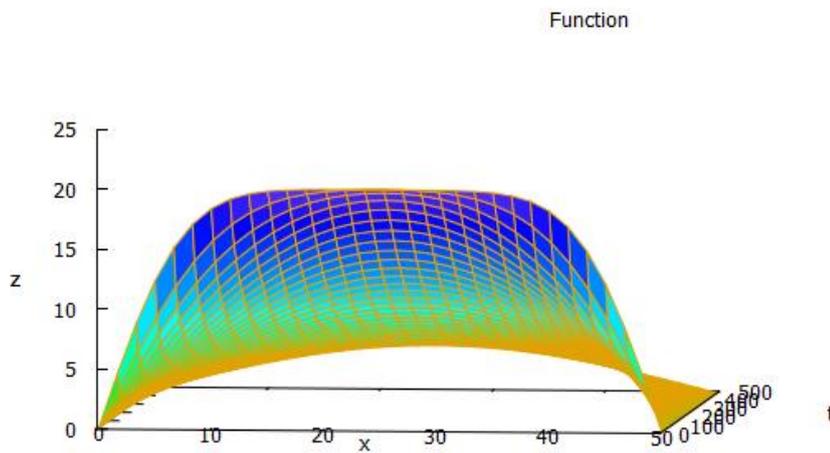
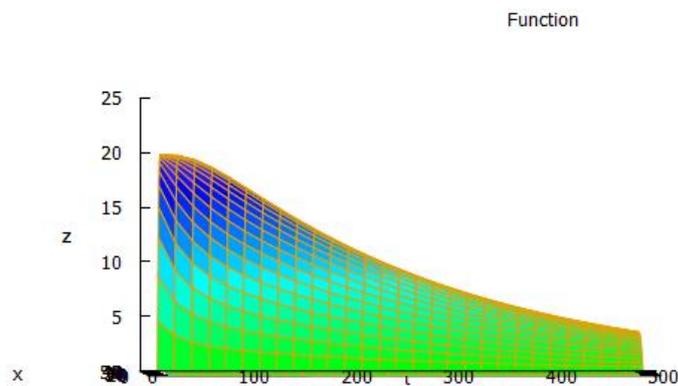


Figura 8 – Perfis da temperatura na barra solução analítica 2D.





3ª Etapa: Levantamento bibliográfico

Foram consultadas teses, dissertações e artigos publicados em periódicos especializados no tema que constava no projeto de pesquisa elaborado pelo coordenador e orientador. Alguns textos digitais foram disponibilizados pelo orientador para os orientandos para nortear o trabalho e consulta no período da pesquisa em caráter remoto devido a pandemia.

De acordo com o proposto no projeto de pesquisa, foram realizadas pesquisas bibliográficas sendo consultados livros, artigos, revistas, dissertações de mestrado, google acadêmico e alguns sites específicos como: www.periodicos.caps.gov.br, www.sciencedirect.com.br, www.scielo.com.br

Em seguida, foi realizada uma busca da produção científica acompanhando a evolução da DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS utilizando o acesso ao portal CAPES no próprio instituto usando as seguintes palavras chaves: THERMAL DIFFUSIVITY, THERMAL CONDUCTIVITY, HEAT CONDUCTION, FINITE PULSE, FLASH METHOD.

Diversos artigos foram encontrados e baixados em pdf via site: sciencedirect.com destacando-se:

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA :

CAROLLO 2010 utilizou um método para a estimativa simultânea da condutividade térmica, λ , e da capacidade de calor volumétrica, ρc_p , das amostras de Aço Inox AISI 304, Titânio ASTM B265 Grau 2 e Aço Inox AISI 316. O modelo térmico baseado na equação da difusão unidimensional transiente considerando a condição de fluxo de calor constante e uniforme na superfície superior da amostra e condição de isolamento na superfície oposta, onde é medida a temperatura através de um termopar. Nas hipóteses consideradas, as amostras foram totalmente isoladas, a espessura da amostra é muito menor que suas dimensões laterais e o tempo total do experimento foi pequeno. A temperatura numérica é obtida pela solução da equação para o modelo proposto utilizando-se o Método das Diferenças Finitas com formulação implícita. As propriedades térmicas estimadas estão de acordo com a literatura e apresentaram diferenças menores que 3 %.

SILVA; GURGEL; MEDEIROS (2012) simularam numericamente o problema de condução de calor unidimensional transiente com pulso de calor via método flash com o objetivo de estudar a influência de diversos parâmetros envolvidos na determinação das propriedades, dentre eles a resistência térmica de contato existente entre a resistência elétrica (responsável pelo fluxo de calor) e a amostra do material a ser estudado. Verificaram que quanto menor o tempo do pulso, menor o erro associado na determinação da difusividade térmica.

ALMEIDA 2013 estudou os compostos cerâmicos com estrutura do tipo dupla perovskitas ordenadas com ampla aplicabilidade em transdutores de pressão utilizando eletrônica de spins. Para tanto uma caracterização da microestrutura e das propriedades térmicas dessas cerâmicas, produzidas através da reação de estado sólido, foi detalhada. Análises de microscopia eletrônica de varredura nos forneceram detalhes e características sobre os contornos de grão e a distribuição dos tamanhos dos mesmos. A análise da difusividade térmica foi feita com uso do Método Flash Laser que tem como vantagem a determinação simultânea dos parâmetros termodinâmicos α , c_p e k em curto intervalo de tempo. Obtendo valores sobre a



difusividade térmica das cerâmicas duplas perovskitas: Ca_2MnReO_6 e dopadas com ítrio ($Ca_{2-x}Y_xMnReO_6$).

CAROLLO (2016) empregou um método para estimar simultaneamente, em função da temperatura, a condutividade térmica, λ , e a capacidade de calor volumétrica, ρc_p , de amostras de Aço AISI 1045 e Aço Inoxidável AISI 304. O modelo térmico utilizado é baseado na equação da difusão unidimensional transiente considerando propriedades térmicas constantes para variações de até 5 °C. O modelo considera um fluxo de calor constante na superfície superior da amostra e condição de isolamento na superfície oposta, onde a temperatura é medida por um termopar tipo T. Desta forma, a estimação das propriedades é realizada baseando-se nos coeficientes de sensibilidade, definidos pela primeira derivada parcial da temperatura em relação ao parâmetro analisado, multiplicado pelo parâmetro analisado. A temperatura numérica foi obtida pela solução do modelo térmico proposto aplicando-se o método das diferenças finitas com formulação implícita. As propriedades estimadas e a análise de incertezas estão em acordo com a literatura.

NASCIMENTO 2018 apresenta a aplicação de uma técnica experimental para a obtenção da difusividade e da condutividade térmicas em materiais sólidos e isotrópicos usando apenas uma única superfície de acesso. Inicialmente, a técnica proposta foi avaliada numericamente com auxílio do programa COMSOL multiphysics. Na análise numérica, as estimativas da difusividade e da condutividade térmicas foram realizadas em materiais não metálicos e metálicos com erros inferiores a 1 %. Na análise experimental, a difusividade térmica foi estimada para amostra de policloreto de vinila (PVC), aço inoxidável AISI 304, AISI 1045, alumínio e fêmur bovino, e os resultados estão de acordo com a literatura. A condutividade experimental foi estimada com maior eficiência no PVC, já no aço inoxidável AISI 304 obteve-se erro na estimativa em torno de 10 %.

CARR 2019 desenvolveu uma nova abordagem alternativa, expressando a difusividade térmica exatamente em termos da área delimitada pela curva de aumento da temperatura da superfície posterior e a temperatura em estado estacionário ao longo do tempo. Aproximar esta integral numericamente leva a uma fórmula simples para a difusividade térmica envolvendo o histórico de aumento de temperatura da superfície traseira. Usando dados experimentais, demonstra-se que a nova fórmula produz estimativas da difusividade térmica, para um caso típico, que são mais precisas e menos variáveis do que a abordagem padrão contabilizando as perdas de calor da amostra.

CARR e WOOD 2019 desenvolveram um método integral da superfície traseira para calcular a difusividade térmica de amostras sob a suposição de que o pulso de calor é instantaneamente absorvido uniformemente em uma camada fina na superfície frontal. Novas fórmulas de difusividade térmica são derivadas para lidar com formas de pulso arbitrárias para uma amostra homogênea ou uma amostra heterogênea compreendendo duas camadas de materiais diferentes. Os experimentos numéricos



apresentados confirmam a precisão das novas fórmulas e demonstram como elas podem ser aplicadas a os tipos de dados experimentais decorrentes do experimento do flash laser.

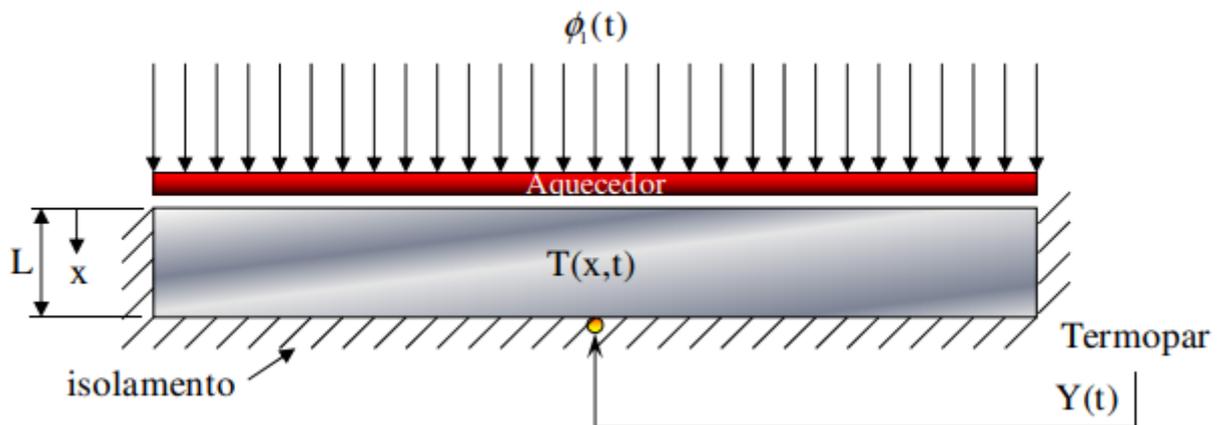
4ª Etapa: Simulação de um problema de difusão de calor transiente com um pulso de calor

Método Flash Laser

O método Flash Laser, desenvolvido por Parker et al (1961), consiste em aplicar um pulso de energia radiante, intenso e curto, uniformemente sobre a face de uma pequena amostra. O pulso de energia difunde unidirecionalmente para a face oposta, obtendo-se um registro do transiente de elevação de temperatura nesta face. A difusividade é calculada a partir da espessura da amostra, e do tempo requerido para a temperatura da face oposta atingir a metade da excursão de temperatura (GROSSI et al, 2007).

Na Figura 9, apresenta-se o modelo térmico unidimensional que consiste em uma amostra localizada entre um aquecedor resistivo e um isolante. Para garantir o fluxo unidirecional a amostra analisada possui espessura muito menor comparada às outras dimensões. Além disso, todas as superfícies da amostra, exceto a aquecida ($x = 0$), foram isoladas.

Figura 9 – Problema físico.



Fonte: Carollo, 2016.

A equação da difusão de calor, considerando a condição de propriedades constantes, que descreve o problema apresentado na Figura 9 pode ser escrita como sendo:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (7)$$

Condições de contorno:



$$\lambda \frac{\partial T}{\partial t}(0, t) = \phi(t) \quad (8)$$

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

Condição inicial:

$$T(x, 0) = T_0 \text{ para } 0 < x < L \quad (10)$$

sendo x a coordenada cartesiana, t o tempo, $\phi(t)$ o fluxo de calor imposto, T_0 a temperatura inicial do corpo e L a espessura da amostra.

DISCRETIZAÇÃO DA EQUAÇÃO

A equação de difusão de calor unidimensional foi discretizada empregando o método das diferenças finitas com formulação totalmente implícita via método TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm) resolve de forma direta sistemas de equações algébricas cuja matriz de coeficientes é do tipo tridiagonal.

O balanço de energia em um volume de controle ao redor do nó na superfície com o aquecimento, condição de contorno $x=0$, tem-se:

$$\phi(t) + \lambda \frac{T_2^F - T_1^F}{\Delta x} = \rho c_p \frac{\Delta x}{2} \frac{T_1^F - T_1^P}{\Delta t} \quad (11)$$

onde ρ é a massa específica do material e c_p é o calor específico do material. λ é a condutividade térmica, F refere-se ao instante de tempo futuro, P instante de tempo atual, Δt o intervalo de tempo e Δx o incremento da malha.

Após realizar um procedimento similar nos nós centrais, $2 < x < n-1$, tem-se:

$$\lambda \frac{T_{j-1}^F - T_j^F}{\Delta x} + \lambda \frac{T_{j+1}^F - T_j^F}{\Delta x} = \rho c_p \Delta x \frac{T_j^F - T_j^P}{\Delta t} \quad (12)$$

E por último, obtém-se a equação para o nó que possui a condição de isolamento, condição de contorno $x=L$, como:



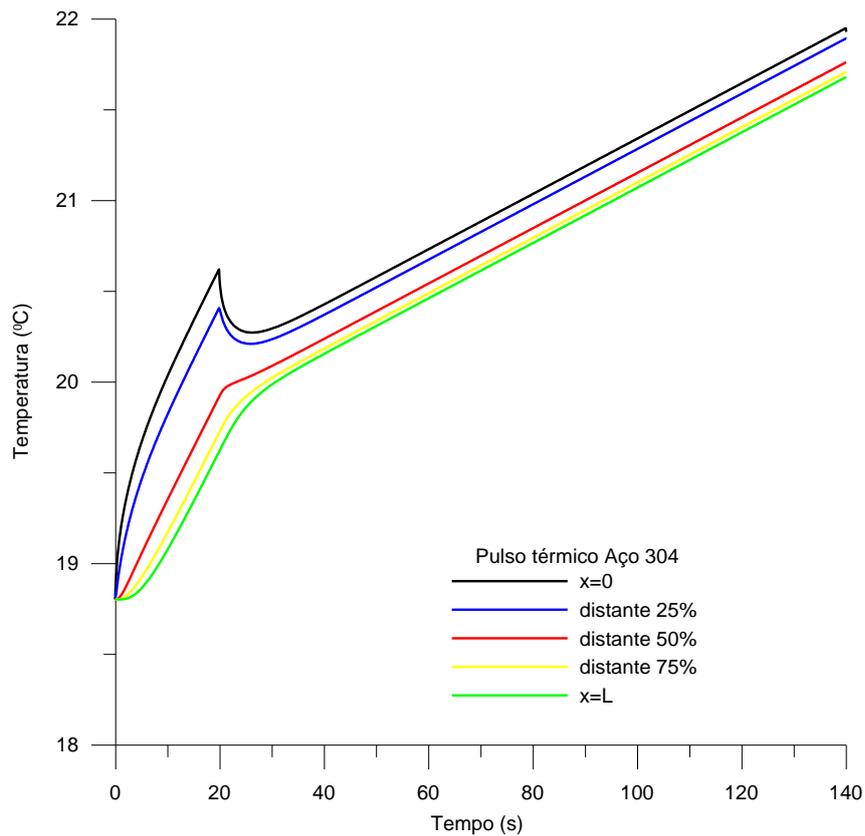
$$\lambda \frac{T_{n-1}^F - T_n^F}{\Delta x} = \rho c_p \frac{\Delta x}{2} \frac{T_n^F - T_n^P}{\Delta t} \quad (11)$$

Para solução do problema é resolvido um sistema linear constituído pelo conjunto de equações para cada ponto da malha com base nos seguintes dados: fluxo de calor prescrito, temperatura inicial, tempo total do experimento, incremento de tempo, espessura da amostra, número de pontos da malha, incremento da malha, condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica.

Aço Inoxidável AISI 304

SOLUÇÃO NUMÉRICA

Figura 10 – Perfil de Temperatura aço 304.



Solução Analítica



```

--> solucao analitica
(%i1) temp_inicial:18.8;
(temp_inicial) 18.8
(%i2) pulso1:2640;
(pulso1) 2640
(%i3) rho_cp:3.77*10^6;
(rho_cp) 3770000.0
(%i4) L:10.88*10^-3;
(L) 0.01088
(%i5) k:14.9;
(k) 14.9
(%i6) f(t):=temp_inicial+pulso1*t/(rho_cp*L)
+sum((-1)^n*(2*pulso1*L)*(1-exp(-n^2*pi^2*k*t/(rho_cp*L^2)))/(k*n^2*(pi)^2), n, 1, 1000), simpsum

```

$$f(t) := \text{temp_inicial} + \frac{\text{pulso1} \cdot t}{\rho_{cp} \cdot L} + \sum_{n=1}^{1000} \frac{(-1)^n (2 \text{ pulso1} L) \left(1 - \exp\left(\frac{(-n^2) \pi^2 k t}{\rho_{cp} L^2}\right) \right)}{k n^2 \pi^2}$$

```

(%i7) pulso2:660;
(pulso2) 660
(%i8) g(t):=pulso2*t/(rho_cp*L)
+sum((-1)^n*(2*pulso2*L)*(1-exp((-n^2)*pi^2*k*t/(rho_cp*L^2)))/(k*n^2*(pi)^2), n, 1, 1000);

```

$$g(t) := \frac{\text{pulso2} \cdot t}{\rho_{cp} \cdot L} + \sum_{n=1}^{1000} \frac{(-1)^n (2 \text{ pulso2} L) \left(1 - \exp\left(\frac{(-n^2) \pi^2 k t}{\rho_{cp} L^2}\right) \right)}{k n^2 \pi^2}$$

```

(%i9) wxplot2d([if t < 20 then f(t) else g(t)+f(20)], [t,0,140])$

```

(%t9)

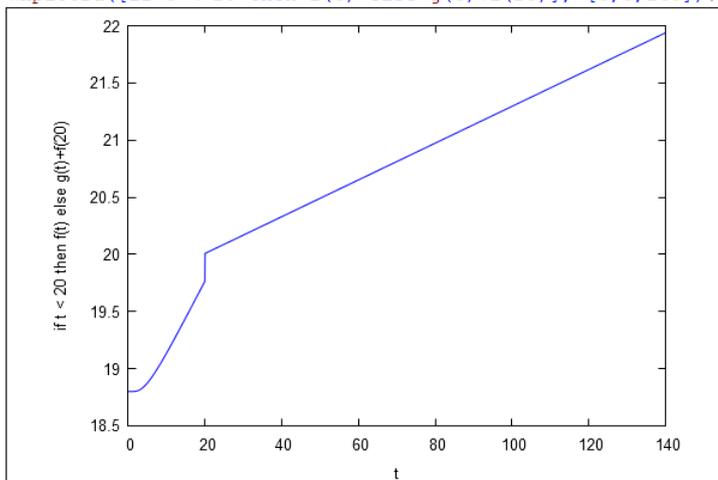
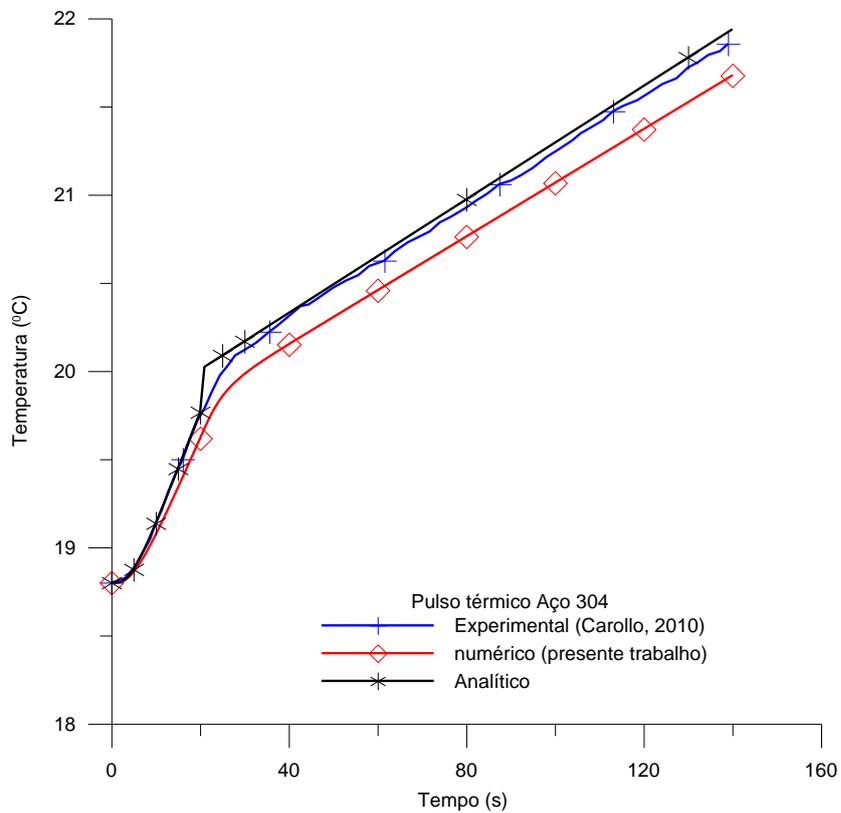




Figura 11 – Perfil da Temperatura do aço 304 em $x=L$.

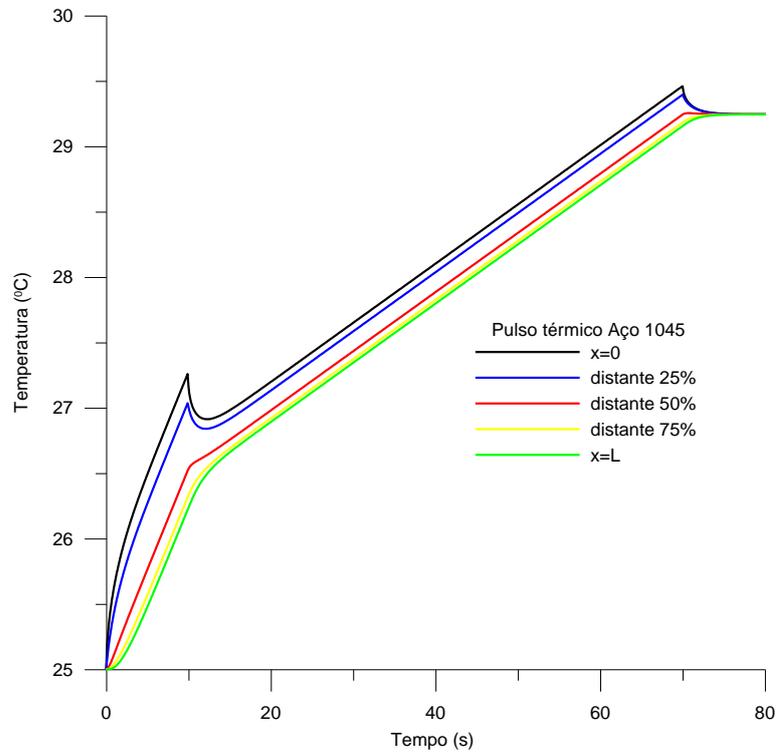


AÇO 1045

SOLUÇÃO NUMÉRICA



Figura 12 – Perfil de Temperatura aço 1045.





```

--> solucao analitica aço 1045
(%i1) temp_inicial:25.0;
(temp_inicial) 25.0
(%i2) pulso1:7709;
(pulso1) 7709
(%i3) rho_cp:3.48*10^6;
(rho_cp) 3480000.0
(%i4) L:11.94*10^-3;
(L) 0.01194
(%i5) k:51.9;
(k) 51.9
(%i6) f(t):=temp_inicial+pulso1*t/(rho_cp*L)
+sum((-1)^n*(2*pulso1*L)*(1-exp(-n^2*pi^2*k*t/(rho_cp*L^2)))/(k*n^2*(pi)^2), n, 1, 100), simpsum

```

$$f(t) := \text{temp_inicial} + \frac{\text{pulso1} \cdot t}{\rho_{cp} \cdot L} + \sum_{n=1}^{100} \frac{(-1)^n (2 \text{ pulso1} L) \left(1 - \exp\left(\frac{(-n^2) \pi^2 k t}{\rho_{cp} L^2}\right) \right)}{k n^2 \pi^2}$$

```

(%i7) pulso2:1854;
(pulso2) 1854
(%i8) g(t):=pulso2*t/(rho_cp*L)
+sum((-1)^n*(2*pulso2*L)*(1-exp((-n^2)*pi^2*k*t/(rho_cp*L^2)))/(k*n^2*pi^2), n, 1, 1000);

```

$$g(t) := \frac{\text{pulso2} \cdot t}{\rho_{cp} \cdot L} + \sum_{n=1}^{1000} \frac{(-1)^n (2 \text{ pulso2} L) \left(1 - \exp\left(\frac{(-n^2) \pi^2 k t}{\rho_{cp} L^2}\right) \right)}{k n^2 \pi^2}$$

```

(%i9) wxplot2d([if t < 10 then f(t) else g(t)+f(10)], [t,0,70])$

```

(%t9)

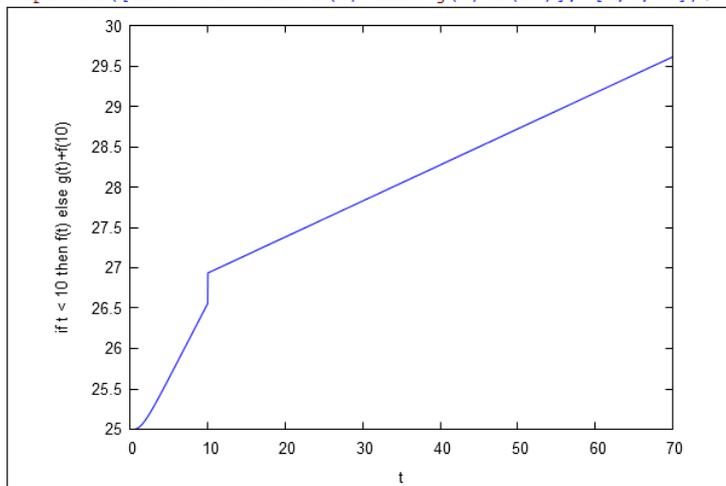
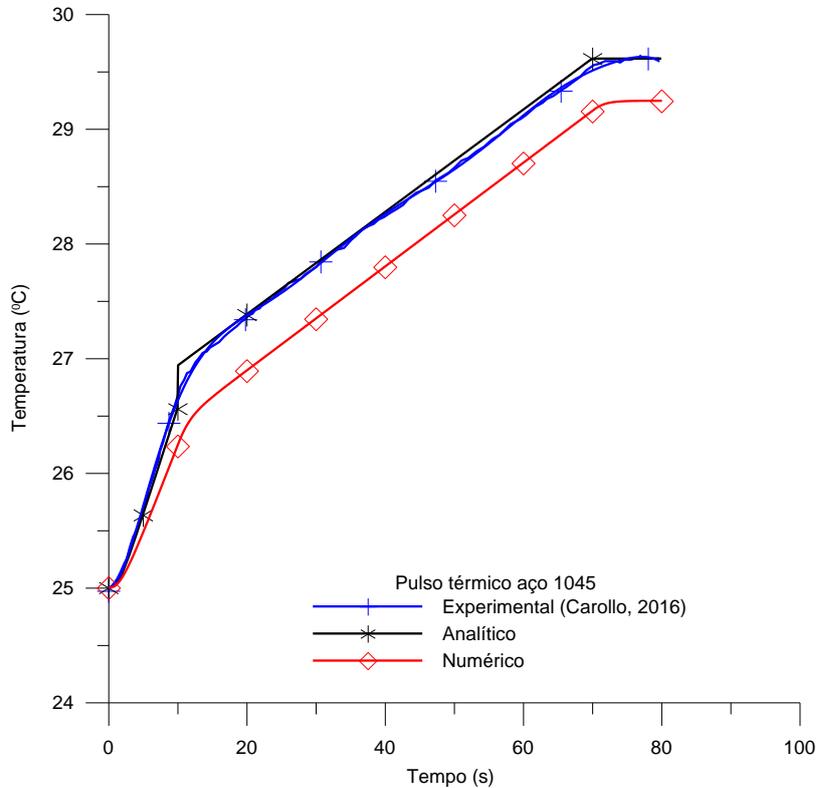




Figura 13 – Perfil da Temperatura aço 1045 em $x=L$



2.6 Discussão

Devido a problemas de uso de computadores, licença de softwares e aprendizado de softwares livres a pesquisa não avançou para fazer uma análise mais consistente e com o número maior de simulações para determinação da difusividade térmica do material. Ficando limitada a obtenção do perfil de temperatura na amostra com aplicação do método flash.

2.7 Conclusão

Os resultados obtidos do perfil de temperatura para o aço inoxidável 304 e para o aço carbono 1045 mostraram que é possível resolver numericamente e analiticamente o problema com o auxílio da ferramenta computacional usando o método das diferenças finitas através da programação em linguagem Fortran e a solução analítica utilizando o software máxima.

A comparação com dados experimentais obtidos por Carollo (2010) para o aço 304 e Carollo (2016) para o aço 1045 com resultados satisfatórios reforçam o desempenho para realizar o trabalho em condições adversas provocada pela impossibilidade de trabalho na instituição devido a pandemia.

A pandemia interferiu significativamente na simulação de resultados pelos alunos.

2.8 Referências



ALMEIDA, L. C. Estudo da difusividade térmica em amostras cerâmicas de $\text{Ca}_{2-x}\text{Y}_x\text{MnReO}_6$ com x entre 0 e 0,3. 2013. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, 2013.

CARR E. J., Rear-surface integral method for calculating thermal diffusivity from laser flash experiments, **Chem. Eng. Sci.** 199 546–51, 2019

CARR E. J.; WOOD C. J., “Rear-surface integral method for calculating thermal diffusivity: Finite pulse time correction and two-layer samples,” **Int. J. Heat Mass Transfer** 144, 118609 (2019).

CARSLAW, H. S., JAEGER, J. C, **Conduction of Heat in Solid**, Oxford University Press, Oxford, London - UK, 1959.

CAROLLO, L. F. S., **Estimação simultânea de propriedades termofísicas de materiais metálicos**, 78 pag. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

CAROLLO, L. F. S., **Aplicação de Diferentes Intensidades de Fluxo de Calor para a Estimação Simultânea de Propriedades Termofísicas de Materiais Metálicos em Função da Temperatura**, Itajubá, 92p. Tese - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2016.

FEIT, E.; SHAW, H. Advances in thermal properties testing at oak ridge national laboratories, **Ceramic Bulletin**, v. 70, n. 1, p.125-28, 1991.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

NASCIMENTO, J. G., **Desenvolvimento e uso de uma técnica experimental para medição de propriedades térmicas “in situ”**, 146 páginas. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

PARKER, W. J. et al.; **J. Appl. Phys.**, v. 32, p. 1679-1681, 1961.

SANTOS, W. N. dos. Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmicas de materiais cerâmicos: I - o método de pulso de energia. **Cerâmica**, São Paulo , v. 51, n. 319, p. 205-213, Sept. 2005.



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PARAÍBA

Chamada Interconecta IFPB - N ° 01/2020



Conselho Nacional de Desenvolvimento
Científico e Tecnológico

SILVA, M. G., **Caracterização de um método de pulso de térmico para determinação de propriedades térmicas de materiais granulares**. 70 pg. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

SILVA M. G., GURGEL J. M., MEDEIROS J. M.; CARACTERIZAÇÃO DE UM MÉTODO DE PULSO TÉRMICO PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TÉRMOFÍSICAS, Anais do VII CONNEPI - Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, Palmas Tocantins, 2012.

TRITT, T. M. **Thermal conductivity: theory, properties, and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2005.

3 PRODUÇÃO TÉCNICA/CIENTÍFICA GERADA ATRAVÉS DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA (trabalhos individuais ou em cooperação, submetidos e/ou publicados)

Tipo	Situação	Meio de Publicação	Título	Evento / Periódico	Ano

Tipo: A – Artigo; NT – Nota Técnica; RS – Resumo; RL – Relatório

Situação: S – Submetido; P – Publicado

Meio de Publicação: EI – Anais de Evento Internacional; EN – Anais de Evento Nacional; PI – Periódico Internacional; PN – Periódico Nacional

4 PARECER DO ORIENTADOR

Classificação de desempenho do bolsista

Excelente [] Bom [x] Regular [] Ruim []

O bolsista **Reginaldo José Barbosa Silva** desenvolveu as atividades necessárias para o andamento do projeto de pesquisa conforme cronograma no formato ensino remoto devido a pandemia. A fundamentação teórica, a revisão bibliográfica, a concepção do projeto, a obtenção de solução numérica via método das diferenças finitas usando software fortran e solução analítica usando software maxima. Desta forma, considero que o estudante obteve um bom desempenho nas atividades realizadas nessa fase do projeto de pesquisa.

Classificação de desempenho do voluntário 1

Excelente [] Bom [x] Regular [] Ruim []

O voluntário **Joao Vitor Monteiro Lisboa** desenvolveu as atividades necessárias para o andamento do projeto de pesquisa conforme cronograma no formato ensino remoto devido a pandemia. A fundamentação teórica, a revisão bibliográfica, a concepção do projeto, a obtenção de solução numérica via método das diferenças finitas usando software fortran e solução analítica usando software maxima. Desta forma, considero que o estudante obteve um bom desempenho nas atividades realizadas nessa fase do projeto de pesquisa.

Classificação de desempenho do voluntário 2

Excelente [] Bom [x] Regular [] Ruim []

O voluntário **Lucas Rodrigo do Nascimento Silva** desenvolveu as atividades necessárias para o andamento do projeto de pesquisa conforme cronograma no formato ensino remoto devido a pandemia. A fundamentação teórica, a revisão bibliográfica, a concepção do projeto, a obtenção de solução numérica via método das diferenças finitas usando software fortran e solução analítica usando software maxima. Desta forma, considero que o estudante obteve um bom desempenho nas atividades realizadas nessa fase do projeto de pesquisa.



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PARAÍBA

Chamada Interconecta IFPB - N ° 01/2020



Conselho Nacional de Desenvolvimento
Científico e Tecnológico

5 ASSINATURAS

Categoria	Matrícula	Nome	Assinatura
Discente Bolsista	202011140001	Reginaldo José Barbosa Silva	Reginaldo J. B. Silva
Discente voluntário	20201450002	João Vitor Monteiro Lisboa	João Vitor M. Lisboa
Discente voluntário	20201450020	Lucas Rodrigo do Nascimento Silva	Lucas Rodrigo N. Silva
Docente Orientador	1226386	Jesus Marlinaldo de Medeiros	Jesus Marlinaldo de Medeiros
Coord./Orientador	1063259	Marcio Gomes da Silva	Marcio Gomes da Silva

Data:30/04/2021.