Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD Faculdade de Engenharia - FAEN Engenharia de Produção

Rodolfo Timoteo da Silva

O Uso da Simulação Computacional nos Processos de Caracterização Térmica de Materiais

Dourados 2017

Rodolfo Timoteo da Silva

O Uso da Simulação Computacional nos Processos de Caracterização Térmica de Materiais

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação para obtenção de Bacharelado em Engenharia de Produção na Universidade Federal da Grande Dourados

Orientador: Prof Msc. Wagner da Silveira

Dourados 2017

Rodolfo Timoteo da Silva

O Uso da Simulação Computacional nos Processos de Caracterização Térmica de Materiais/ Rodolfo Timoteo da Silva. – Dourados, 2017-188

Orientador: Prof Msc. Wagner da Silveira

Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD
 Faculdade de Engenharia - FAEN
 Engenharia de Produção, 2017.

1. simulação computacional 2. condutividade térmica I. materiais II. produtos III. softwares IV. inovação

CDU 02:141:005.7

A monografia intitulada: "O Uso da Simulação Computacional nos Processos de Caracterização Térmica de Materiais", apresentada ao curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Grande Dourados, de autoria de Rodolfo Timoteo da Silva, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

> **Prof Msc. Wagner da Silveira** Orientador

Prof. Dr. Clivaldo Oliveira Convidado 1

Prof. Dr. Rafael Ferreira Gregolin Convidado 2

Dourados 2017

Dedico este trabalho a você leitor.

Agradecimentos

Os agradecimentos vão à minha família, esposa e filha, que dia após dia me impulsionam a caminhar para frente. Ao Professor Msc. Bruno Henrique Torres que orientou-me durante a Iniciação Científica no projeto que idealizou este. À Engenheira Física Hellen Joyce Ferreira, que durante o curso de Desenho Mecânico ministrado por ela, tantos *insights* trouxe ao meu aprendizado. Ao amigo Eduardo Frazão, pelo apoio técnico inigualável. Ao Professor Msc Wagner da Silveira que pacientemente me guiou livremente ao término deste trabalho. Aos meus professores em geral, que me fizeram pensar e exceder meus limites. E aos amigos e colegas de curso que a cada trabalho, projeto e atividade em laboratório,me fazem lembrar que somos todos seres humanos.

"O aspecto mais triste da vida de hoje é que a ciência ganha em conhecimento mais rapidamente que a sociedade em sabedoria". (Isaac Asimov)

Resumo

Quando da idealização de um novo produto ou da renovação tecnológica relacionada aos materiais utilizados na confecção de um já existente, deve-se considerar todas as características físicas destes materiais. É de suma importância que tais características como durabilidade, tenacidade, resistência, plasticidade e elasticidade, sejam conservadas durante o processo de manufatura e enfim herdadas pelos produtos. Aliado ao fato da escassez de recursos materiais, devido à raridade inerente a alguns e aos custos de obtenção de outros, é sempre necessário que os materiais sejam testados de forma a garantir que suas características físicas estejam condizentes tanto com os dados provindos da literatura ou do fornecedor, quanto com os dados esperados, ou solicitados, pelos projetistas do produto. Infelizmente, nem todos os testes são não-destrutivos, tampouco atinge-se níveis de confiabilidade com poucos testes. Este trabalho tem como intuito demonstrar que as tecnologias de simulação computacional vêm em auxílio a este problema pois é possível que assim como a Engenharia Auxiliada por Computador ou a Simulação de Multi-corpos, verifiquem a possibilidade de adequação de certos materiais, especificamente à necessidade de um determinado produto.

Palavras-chaves: Simulação, Condutividade Térmica, Caracterização, Materiais.

Abstract

When designing a new product or technological renewal related to the materials used in the construction of an existing one, we must consider all the physical characteristics of these materials. It is of paramount importance that such characteristics such as durability, toughness, strength, plasticity and elasticity, are conserved during the manufacturing process and ultimately inherited by the products. Allied to the fact of the scarcity of material resources, due to the rarity inherent in some and the costs of obtaining others, materials are always required to be tested to ensure physical characteristics are consistent with both data from the literature or the supplier, as well as the data expected or requested by the product designers. Unfortunately, not all tests are non-destructive, nor are levels of reliability with few tests. This paper aims to demonstrate that computational simulation technologies come to the aid of this problem because it is possible that as well as Computer-aided Engineering or Multibody and Multiphysics Simulations, verify the possibility of adequacy of certain materials, specifically the need for a particular product.

Key-words: Simulation, Thermal Conductivity, Caracterization, Materials.

Lista de ilustrações

Figura 1	O Modelo Unificado do Processo de Desenvolvimento do Produto	23				
Figura 2	Condução de calor através de uma parede de espessura Δx e área A	28				
Figura 3	Os três tipos de coordenadas utilizados					
Figura 4	Desenvolvimento da Camada de Velocidade Limite em um plano 34					
Figura 5	Desenvolvimento da Camada de Limite Térmico em uma placa plana isotérmica.	36				
Figura 6	Transferência de Calor por Convecção Local e Total.	37				
Figura 7	Uma barra (A) sem restrições e uma barra (B) com restrições					
Figura 8	O processo de aplicação do Método dos Elementos Finitos.	53				
Figura 9	Uma malha típica: elementos, nós e arestas.	54				
Figura 10	Diferentes níveis de refinamento para um setor.	55				
Figura 11	Os vários tipos de materiais sólidos utilizados na indústria.	57				
Figura 12	Peça original dos fixadores de tubulação.	67				
Figura 13	Peça utilizada na simulação estável.	68				
Figura 14	Malha criada pelo Matlab na peça sob análise.	69				
Figura 15	Simulação Estável do Cobre	70				
Figura 16	Simulação Estável do Concreto	70				
Figura 17	Simulação Estável do Poliestireno	71				
Figura 18	Aplicação das condições de contorno para a simulação transiente.	72				
Figura 19	Gráfico da variação de Calor fornecido à peça.	73				
Figura 20	Malha Gerada para Sistema e Peça.	73				
Figura 21	Os dois aspectos da temperatura sob análise	74				
Figura 22	Os dois corpos na simulação do estresse térmico.	75				
Figura 23	Local de injeção de calor na peça.	75				
Figura 24	Restrições aplicadas à base do sistema	76				
Figura 25	Restrições aplicadas à peça analisada.	77				
Figura 26	Malha dos elementos finitos do sistema acoplado.	78				
Figura 27	Design do Dissipador de Calor	79				
Figura 28	Definição do <i>Design</i> e Geometrias do sistema.	79				
Figura 29	Malhas geradas para o sistema.	81				
Figura 30	Gráfico do espectro de temperatura ao longo dos elementos da peça	85				
Figura 31	Gráfico ordenado do espectro de temperatura dos elementos finitos da peça	86				
Figura 32	Comportamento das temperaturas máximas dos materiais metálicos ao longo					
	dos trinta segundos simulados.	88				

Figura 33	Comportamento das temperaturas máximas dos materiais cerâmicos ao longo	
	dos trinta segundos simulados.	89
Figura 34	Comportamento das temperaturas máximas dos materiais poliméricos ao	
	longo dos trinta segundos simulados.	90
Figura 35	Exemplo da diferença da propagação de calor na peça aos 15 segundos em	
	três diferentes materiais.	91
Figura 36	Resfriamento dos materiais a partir dos vinte segundos	92
Figura 37	Leituras das Temperaturas	94
Figura 38	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais dos Materiais Metálicos	96
Figura 39	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Cerâmicas	97
Figura 40	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais dos Materiais Poliméricos	97
Figura 41	Plano Centralizado do Sistema para o Aço	99
Figura 42	Plano Centralizado do Sistema para o Alumínio	99
Figura 43	Plano Centralizado do Sistema para o Cobre	100
Figura 44	Plano Centralizado do Sistema para o Concreto	100
Figura 45	Plano Centralizado do Sistema para o Vidro	101
Figura 46	Plano Centralizado do Sistema para o Policarbonato	101
Figura 47	Plano Centralizado do Sistema para o Poliestireno	102
Figura 48	Plano Centralizado do Sistema para o Polietileno	102
Figura 49	Variação da Temperatura na Leitura Vertical da Peça - Policarbonato	103
Figura 50	Variação da Temperatura na Leitura Vertical da Peça - Poliestireno	104
Figura 51	Variação da Temperatura na Leitura Vertical da Peça - Polietileno	104
Figura 52	Variação da Temperatura na Leitura Vertical da Peça - Concreto	105
Figura 53	Variação da Temperatura na Leitura Vertical da Peça - Vidro	106
Figura 54	Simulação Estável do Aço	120
Figura 55	Simulação Estável do Alumínio	121
Figura 56	Simulação Estável do Cobre	121
Figura 57	Simulação Estável da Alumina	122
Figura 58	Simulação Estável do Concreto	122
Figura 59	Simulação Estável do Vidro	123
Figura 60	Simulação Estável do Policarbonato	123
Figura 61	Simulação Estável do Poliestireno	124
Figura 62	Simulação Estável do Polietileno	124
Figura 63	Comportamento das temperaturas máximas e médias dos materiais metálicos	
	ao longo dos trinta segundos simulados.	125
Figura 64	Estado da peça de aço aos cinco segundos.	125
Figura 65	Estado da peça de aço aos sete segundos e meio	126
Figura 66	Estado da peça de aço aos dez segundos.	126

Figura 67	Estado da peça de aço aos doze segundos e meio.	126
Figura 68	Estado da peça de aço aos quinze segundos.	127
Figura 69	Estado da peça de aço aos vinte segundos.	127
Figura 70	Estado da peça de aço aos trinta segundos.	127
Figura 71	Estado da peça de aluminio aos cinco segundos.	128
Figura 72	Estado da peça de aluminio aos sete segundos e meio	128
Figura 73	Estado da peça de aluminio aos dez segundos.	128
Figura 74	Estado da peça de aluminio aos doze segundos e meio.	129
Figura 75	Estado da peça de aluminio aos quinze segundos.	129
Figura 76	Estado da peça de aluminio aos vinte segundos.	129
Figura 77	Estado da peça de aluminio aos trinta segundos.	130
Figura 78	Estado da peça de cobre aos cinco segundos.	130
Figura 79	Estado da peça de cobre aos sete segundos e meio	130
Figura 80	Estado da peça de cobre aos dez segundos.	131
Figura 81	Estado da peça de cobre aos doze segundos e meio.	131
Figura 82	Estado da peça de cobre aos quinze segundos.	131
Figura 83	Estado da peça de cobre aos vinte segundos.	132
Figura 84	Estado da peça de cobre aos trinta segundos.	132
Figura 85	Comportamento das temperaturas máximas e médias dos materiais cerâmicos	
	ao longo dos trinta segundos simulados.	132
Figura 86	Estado da peça de alumina aos cinco segundos.	133
Figura 87	Estado da peça de alumina aos sete segundos e meio.	133
Figura 88	Estado da peça de alumina aos dez segundos.	133
Figura 89	Estado da peça de alumina aos doze segundos e meio.	134
Figura 90	Estado da peça de alumina aos quinze segundos.	134
Figura 91	Estado da peça de alumina aos vinte segundos	134
Figura 92	Estado da peça de alumina aos trinta segundos	135
Figura 93	Estado da peça de concreto aos cinco segundos.	135
Figura 94	Estado da peça de concreto aos sete segundos e meio	135
Figura 95	Estado da peça de concreto aos dez segundos.	136
Figura 96	Estado da peça de concreto aos doze segundos e meio	136
Figura 97	Estado da peça de concreto aos quinze segundos.	136
Figura 98	Estado da peça de concreto aos vinte segundos.	137
Figura 99	Estado da peça de concreto aos trinta segundos.	137
Figura 100	Estado da peça de vidro aos cinco segundos.	137
Figura 101	Estado da peça de vidro aos sete segundos e meio	138
Figura 102	Estado da peça de vidro aos dez segundos.	138
Figura 103	Estado da peça de vidro aos doze segundos e meio.	138
Figura 104	Estado da peça de vidro aos quinze segundos.	139

Figura 105	Estado da peça de vidro aos vinte segundos	139
Figura 106	Estado da peça de vidro aos trinta segundos.	139
Figura 107	Comportamento das temperaturas máximas e médias dos materiais poliméri-	
	cos ao longo dos trinta segundos simulados.	140
Figura 108	Estado da peça de policarbonato aos cinco segundos.	140
Figura 109	Estado da peça de policarbonato aos sete segundos e meio.	141
Figura 110	Estado da peça de policarbonato aos dez segundos.	141
Figura 111	Estado da peça de policarbonato aos doze segundos e meio	141
Figura 112	Estado da peça de policarbonato aos quinze segundos	142
Figura 113	Estado da peça de policarbonato aos vinte segundos	142
Figura 114	Estado da peça de policarbonato aos trinta segundos.	142
Figura 115	Estado da peça de poliestireno aos cinco segundos.	143
Figura 116	Estado da peça de poliestireno aos sete segundos e meio	143
Figura 117	Estado da peça de poliestireno aos dez segundos.	143
Figura 118	Estado da peça de poliestireno aos doze segundos e meio	144
Figura 119	Estado da peça de poliestireno aos quinze segundos	144
Figura 120	Estado da peça de poliestireno aos vinte segundos	144
Figura 121	Estado da peça de poliestireno aos trinta segundos	145
Figura 122	Estado da peça de polietileno aos cinco segundos.	145
Figura 123	Estado da peça de polietileno aos sete segundos e meio	145
Figura 124	Estado da peça de polietileno aos dez segundos.	146
Figura 125	Estado da peça de polietileno aos doze segundos e meio.	146
Figura 126	Estado da peça de polietileno aos quinze segundos.	146
Figura 127	Estado da peça de polietileno aos vinte segundos.	147
Figura 128	Estado da peça de polietileno aos trinta segundos.	147
Figura 129	Vistas da Base	148
Figura 130	Vistas da Base	149
Figura 131	Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Aço	150
Figura 132	Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Alumínio	151
Figura 133	Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Cobre	152
Figura 134	Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Alumina	153
Figura 135	Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Concreto	154
Figura 136	Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Vidro	155
Figura 137	Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Policarbonato	156
Figura 138	Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Poliestireno	157
Figura 139	Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Polietileno	158
Figura 140	Resultado das Temperaturas Ocorridas no Aço	159
Figura 141	Resultado das Temperaturas Ocorridas no Alumínio	160
Figura 142	Resultado das Temperaturas Ocorridas no Cobre	161

Figura 143	Resultado das Temperaturas Ocorridas no Alumina 162
Figura 144	Resultado das Temperaturas Ocorridas no Concreto
Figura 145	Resultado das Temperaturas Ocorridas no Vidro
Figura 146	Resultado das Temperaturas Ocorridas no Policarbonato
Figura 147	Resultado das Temperaturas Ocorridas no Poliestireno
Figura 148	Resultado das Temperaturas Ocorridas no Polietileno 167
Figura 149	Representação do Fator de Segurança do Aço
Figura 150	Representação do Fator de Segurança do Alumínio
Figura 151	Representação do Fator de Segurança do Cobre 169
Figura 152	Representação do Fator de Segurança do Alumina
Figura 153	Representação do Fator de Segurança do Concreto
Figura 154	Representação do Fator de Segurança do Vidro
Figura 155	Representação do Fator de Segurança do Policarbonato
Figura 156	Representação do Fator de Segurança do Poliestireno 171
Figura 157	Representação do Fator de Segurança do Polietileno
Figura 158	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça 173
Figura 159	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Metais 173
Figura 160	Plano Centralizado do Sistema para o Aço 174
Figura 161	Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Aço
Figura 162	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Aço . 175
Figura 163	Plano Centralizado do Sistema para o Alumínio 175
Figura 164	Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Alumínio
Figura 165	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Alumínio 176
Figura 166	Plano Centralizado do Sistema para o Cobre 177
Figura 167	Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Cobre
Figura 168	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Cobre 178
Figura 169	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Cerâmicas 178
Figura 170	Plano Centralizado do Sistema para o Alumina
Figura 171	Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Alumina
Figura 172	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Alumina 180
Figura 173	Plano Centralizado do Sistema para o Concreto
Figura 174	Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Concreto
Figura 175	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Concreto 181
Figura 176	Plano Centralizado do Sistema para o Vidro
Figura 177	Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Vidro
Figura 178	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Vidro 183
Figura 179	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Poli-
	méricos
Figura 180	Plano Centralizado do Sistema para o Policarbonato

Figura 181	Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Policarbonato			
Figura 182	2 Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Poli-			
	carbonato	185		
Figura 183	Plano Centralizado do Sistema para o Poliestireno	185		
Figura 184	Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Poliestireno	186		
Figura 185	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Poli-			
	estireno	186		
Figura 186	Plano Centralizado do Sistema para o Polietileno	187		
Figura 187	Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Polietileno	187		
Figura 188	Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Polie-			
	tileno	188		

Lista de tabelas

Tabela 1	Condutividade Térmica de alguns materiais à temperatura ambiente $300K$.	30
Tabela 2	Valores Representativos de Fatores de Incrustamento	46
Tabela 3	Valores Representativos do Coeficiente de Transferência de Calor Global	47
Tabela 4	Condutividade Térmica dos Materiais	83
Tabela 5	Estatística das Distribuições de Temperatura	87
Tabela 6	Condutividade e Difusividade Térmica dos Materiais	88
Tabela 7	Resfriamento e possível temperatura de equilíbrio	92
Tabela 8	Deslocamentos e Temperaturas dos Materiais	93
Tabela 9	Deslocamentos e Coeficiente de Expansão Térmica	94
Tabela 10	Temperaturas finais da Troca de Calor	95
Tabela 11	Temperaturas nos extremos horizontais da peça.	98
Tabela 12	Propriedades dos Materiais Metálicos - I	113
Tabela 13	Propriedades dos Materiais Metálicos - II	114
Tabela 14	Propriedades dos Materiais Cerâmicos - I	115
Tabela 15	Propriedades dos Materiais Cerâmicos - II	115
Tabela 16	Propriedades dos Materiais Poliméricos - I	115
Tabela 17	Propriedades dos Materiais Poliméricos - II	116

Sumário

1	Intr	odução					
	1.1	Caracterização do Tema					
	1.2	Formulação do Problema de Pesquisa					
	1.3	Objetivos					
		1.3.1 <i>Objetivos Gerais</i>					
		1.3.2 Objetivos Específicos 20					
1.4 Justificativa da Pesquisa							
	1.5	Estrutura do Trabalho					
2	Rev	isão da Literatura					
	2.1	O Processo de Desenvolvimento do Produto					
	2.2	Engenharia Auxiliada por Computador					
		2.2.1 A Simulação Computacional					
	2.3	Os Fenômenos de Transferência de Calor					
		2.3.1 <i>Condução de Calor</i>					
		2.3.2 <i>A Convecção</i>					
		2.3.3 <i>Estresse Térmico</i> 38					
		2.3.4 <i>Trocadores de Calor</i>					
	2.4 As Ferramentas Matemáticas						
		2.4.1 Equações Diferenciais Parciais 47					
		2.4.2 <i>O Método dos Elementos Finitos</i>					
	2.5	0.5 Os Materiais, suas Características e Propriedades					
		2.5.1 Materiais Metálicos					
		2.5.2 Materiais Cerâmicos					
		2.5.3 <i>Materiais Poliméricos</i> 61					
2.6 As Ferramentas Computacionais		As Ferramentas Computacionais					
		2.6.1 Autodesk Fusion 360 63					
		2.6.2 <i>Autodesk CFD</i> 64					
		2.6.3 <i>Matlab</i>					
3	Met	codologia					
	3.1	Simulação da Transferência de Calor Estável					
	3.2	Simulação da Transferência de Calor Transiente					
	3.3	Simulação do Estresse Térmico					
	3.4	Simulação de Trocadores de Calor					

4	Aná	lise dos Resultados
	4.1	Cenário Estável
	4.2	Cenário Transiente
		4.2.1 <i>Resfriamento</i>
	4.3	Cenário do Estresse Térmico
	4.4	Cenário da Troca de Calor
		4.4.1 <i>Análise Horizontal</i>
		4.4.2 Análise Vertical
5	Con	clusão
_	c o	
Re	teren	cias
AF	PÊND	DICE A Propriedades dos Materiais
AF	PÊND	DICE B Script para MATLAB
AF	PÊND	DICE C Simulação Condução de Calor Estável
AF	ÊND	DICE D As Medicões na Simulação Transiente
	D.1	Materiais Metálicos
		D.1.1 Aco
		D.1.2 Alumínio
		D.1.3 Cobre
	D.2	Materiais Cerâmicos
		D.2.1 Alumina
		D.2.2 Concreto
		D.2.3 Vidro
	D.3	Materiais Poliméricos
		D.3.1 Policarbonato
		D.3.2 Poliestireno
		D.3.3 Polietileno
	ÊNI	NCE E Dadas da Análisa da Estrassa Tármica 148
Ar	ENE E1	Design dos corpos utilizados
	L.1	E 1 1 A Base 148
		E 1 2 A Peca 149
	Е 2	Resultados Gráficos da Análise
	1.2	$E 2 1 \text{Deslocamento} \qquad \qquad 150$
		E.2.1 Destocamento
		$E_{2,1,1}$ Ave 150
		E.2.1.2 Alumino
		E.2.1.5 CODIC

		E.2.1.4	Alumina
		E.2.1.5	Concreto
		E.2.1.6	Vidro
		E.2.1.7	Policarbonato
		E.2.1.8	Poliestireno
		E.2.1.9	Polietileno
	E.2.2	Temperat	ura
		E.2.2.1	Aço
		E.2.2.2	Alumínio
		E.2.2.3	Cobre
		E.2.2.4	Alumina
		E.2.2.5	Concreto
		E.2.2.6	Vidro
		E.2.2.7	Policarbonato
		E.2.2.8	Poliestireno
		E.2.2.9	Polietileno
	E.2.3	Fator de	Segurança
		E.2.3.1	Aço
		E.2.3.2	Alumínio
		E.2.3.3	Cobre
		E.2.3.4	Alumina
		E.2.3.5	Concreto
		E.2.3.6	Vidro
		E.2.3.7	Policarbonato
		E.2.3.8	Poliestireno
		E.2.3.9	Polietileno
		Dedee	de Auglier de Treseder de Celer 173
	JICE F	Dados	
Г.1			.08
	Г.1.1 Е 1 2	Aço	
	Г.1.2 Е 1 2	Cohro	177
F 2	T.I.J Materie	Coult .	
Γ.2		Alumina	170
	Г.2.1 Е 2 2	Aluiillia	
	F.2.2	Vidro	122
Е 2	r.2.3 Motoria	viulu . ais Dolimó	ricos 192
1'.3	F 2 1	Policarbo	neos
	F3.1	Poliestiro	104 105
	F.3.2	Poliotilor	107 107
	1.3.3	1 Onether	10/

1 Introdução

1.1 Caracterização do Tema

No processo de criação e desenvolvimento de produtos, quando do recebimento das especificações provindas da análise do mercado, do *benchmark* dos concorrentes, do desejo de atuais e futuros clientes, os participantes do projeto de desenvolvimento, em específico os engenheiros responsáveis em traduzir desejos subjetivos em soluções tecnológicas, devem se perguntar, quais possíveis materiais podem suprir determinada requisição de dureza, plasticidade, qualidade de acabamento ou até mesmo rigor estético. Cabe então a estes engenheiros fazer escolhas. Não são escolhas fáceis, já que um material pode possuir dureza suficiente para as necessidades do produto, mas ser frágil, ou não ser dúctil o suficiente para ser conformado, moldado. Por outro lado, um determinado material, pode possuir todas as qualidades necessárias, porém com um custo de obtenção exageradamente elevado. Entre estes inúmeros *trade-offs*, ainda resta comprovar, numérica e estatisticamente que o material escolhido irá suportar todas as atividades e uso a que estará sujeito em posse de seus compradores.

Como de costume, na indústria, os aspectos financeiros são muito relevantes e não será toda empresa que poderá lançar mão de inúmeros testes que comprovem que determinado material está de acordo com suas necessidades. Faz-se então necessário que se utilize métodos computacionais. Os métodos computacionais antes restritos a grandes corporações, hoje difundidos entre empresas de médio e grande porte, ainda tem um custo intelectual e tecnológico agregado a ele. Porém, com uma maior oferta de poder computacional, redução de seus custos e a disponibilização de profissionais capacitados no mercado, os chamados Métodos de Engenharia Assistida por Computador tem demonstrado maior relevância na diminuição de custos no processo produtivo. Seja pelo tempo que se chega a um resultado satisfatório, seja por evitar o desperdício de tempo preparando testes customizados ou desperdício de material útil, é importante que os Engenheiros de Produção, ligados a criação de novos produtos ou no aperfeiçoamento de já existentes, sejam conhecedores do tema em questão de modo terem respaldo em suas decisões durantes as fases de desenvolvimento de um Projeto de Desenvolvimento de Produço.

1.2 Formulação do Problema de Pesquisa

Naqueles processos produtivos que envolvam materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos, ao se desejar um rigor no controle da qualidade do produto, é necessário que este mesmo rigor se estenda de forma retrógrada até a matéria prima. Faz-se necessário comprovar tanto que o metal, a cerâmica ou o polímero possuam as características solicitadas ao fornecedor da matéria-prima, bem como se este mesmo material se comportará da maneira prevista quando submetido à regimes específicos de temperaturas. Economicamente, faz-se necessário o uso de testes não destrutivos que possam indicar quais as qualidades necessárias que o material a ser utilizado no projeto deve possuir, quais os níveis de discrepâncias apresentadas pelo material entregue pelo fornecedor podem ser aceitos, etc. Para esta finalidade, a simulação computacional de materiais se mostra muito útil já que facilita a adequação, de maneira aceitável, dos parâmetros para o futuro projeto quando da necessidade de escolha de determinados materiais. Um dos conjuntos de parâmetros é senão as características térmicas que este trabalho vem averiguar.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Gerais

Investigar as características térmicas de exemplos representativos de materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos através de visão sistêmica da base teórica necessária para a utilização das ferramentas de simulação computacional.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Localizar o momento do uso da Simulação Computacional durante o Processo de Desenvolvimento de Produto.
- Identificar e rever a base teórica necessária para o entendimento dos fenômenos físicos da Termodinâmica.
- Compreender o anteparo matemático das Equações Diferenciais Parciais que auxiliam no entendimento dos fenômenos físicos.
- Conceituar o Método dos Elementos Finitos e entender a importância do Cálculo Numérico na engenharia moderna.
- Categorizar termicamente os materiais sólidos que serão objetos de estudo.
- Desenvolver e realizar as Simulações Estáveis e Transientes da Condução de Calor.
- Desenvolver e realizar a Simulação de Estresse Térmico.
- Desenvolver e realizar a Simulação dos Trocadores de Calor.

1.4 Justificativa da Pesquisa

Segundo Indústria (2016), o uso de tecnologias digitais na indústria brasileira é pouco difundido. Do total, 58% desta indústria reconhece a importância destas tecnologias para a competitividade mas menos da metade as utiliza. Talvez por puro desconhecimento, o uso destas tecnologias não é feito, o que acaba se transformando em um ponto negativo na competitividade das empresas quando levado em consideração que a qualidade, durabilidade e estética de um produto vão ter impacto direto na satisfação dos clientes de uma empresa, bem como no retorno de investimentos efetuados. Assim, um aprofundamento nestes conhecimentos e posterior divulgação será de grande ajuda para o aumento da produtividade e competitividade das empresas que se interessem em fazer uso das tecnologias computacionais.

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho terá a seguinte estrutura:

- No capítulo 1, a Introdução presente.
- No capítulo 2 busca-se mostrar toda a Revisão Bibliográfica necessária.
- No capítulo 3 detalhare-se a metodologia.
- No capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos.
- No capítulo 5 têm-se as conclusões.

2 Revisão da Literatura

2.1 O Processo de Desenvolvimento do Produto

Para ser competitivo, os produtos precisam ser mais baratos, de alta qualidade e adaptáveis às necessidades sempre voláteis dos clientes. Mesmo durante o processo de desenvolvimento do produto, essa volatilidade das necessidades e desejos dos cliente implica em maior tempo de desenvolvimento e mudanças frequentes são comuns. Assim, engenheiros precisam usar recursos limitados para produzir um produto de qualidade em pouco tempo. Em tal ambiente extremamente competitivo, o desenvolvimento bem-sucedido de um produto pode não ser suficiente para sustentar uma empresa. Uma empresa bem-sucedida precisará produzir uma série de bons produtos, de alto valor agregado e de qualidade consistente, sendo que o segredo para o sucesso reside na boa execução das tarefas críticas no estágio de definição de produto. Muitas pessoas acreditam que o processo de desenvolvimento de um produto apenas define um produto, mas as atividades reais envolvidas são mais do que isso. O desenvolvimento do produto deve definir corretamente qual a função do produto, e isso exigirá que todos os atributos críticos do produto sejam considerados e, mais importante ainda, o conceito seja validado. Em outras palavras, a definição do produto pode envolver a engenharia concorrente onde muitas atividades são desenvolvidas ao mesmo tempo, tais como aquisição dos requisitos do cliente, declaração de problema, design conceitual, design para montagem (Design for Assembly - DFA), design para fabricação (Design for Manufacturing - DFM) e prototipagem de produtos para validar o conceito, etc. Ser um engenheiro é muito desafiador, pois os clientes querem um produto mais barato e de boa qualidade, e eles querem isso de imediato. Esses atributos desejados muitas vezes contradizem um ao outro, e muitas vezes um fator cria uma restrição ao outro. Felizmente, o nível tecnológico atual oferece uma boa alavancagem para superar alguns destes problemas (LIOU, 2007).

Adicionalmente, Radhakrishnan, Subramanyan e Raju (2008) dizem que os gerentes e engenheiros de fabricação dos bens de consumo estão preocupados com a melhoria da qualidade, redução no custo de fabricação e no tempo de entrega destes produtos. A globalização da economia exige a introdução de novos produtos com recursos aprimorados a custos competitivos, assim como a necessidade de redução de vida útil, compressão do tempo gasto no ciclo de desenvolvimento e a personalização em massa, que requer uma extrema flexibilidade dos métodos produtivos. A manufatura no novo milênio, está se movendo para mais e mais sofisticação na exploração das capacidades de hardware e software do computador. As metodologias robustas de projeto, a integração do design de formas e design funcional, a fabricação otimizada auxiliada

pela utilização da Análise por Elementos Finitos (*Finite Element Analysis* - FEA), que é utilizada para modelar e simular processos de fabricação complexos tornando possível que engenheiros desenvolvam os produtos da maneira correta, nas primeiras tentativas, em todos os projetos.

É lembrado por Cesa (2010), que essa busca incessante de se manterem competitivas, faz com que as empresas se utilizem de metodologias e ferramentas de forma a aprimorar o desenvolvimento de produtos. Uma destas ferramentas é Engenharia Auxiliada por Computador (Computer Aided Engineering - CAE), que faz uso da Análise por Elementos Finitos. O processo de design de engenharia, de acordo com Liou (2007) pode ser dividido em várias etapas: identificar as necessidades dos clientes, converter essas necessidades em especificações de projeto de produto, design de engenharia e prototipagem para avaliar os conceitos. Já pelo Modelo Unificado do Processo de Desenvolvimento do Produto de Rozenfeld, Forcellini e Amaral (2006), que estrutura o Processo de Desenvolvimento do Produto em Pré-desenvolvimento, Desenvolvimento e Pós desenvolvimento, que conforme a Figura 1, pode-se ver que ocorre uma justaposição dos processos de desenvolvimento dos produtos onde durante a fase do Projeto Preliminar, ainda segundo o autor, conhece-se o conceito, a estrutura, as dimensões, os materiais, formas, etc. Rozenfeld, Forcellini e Amaral (2006) estrutura um produto em Sistemas, Subsistemas e Componentes o que facilita o trabalho de utilização das plataformas de Engenharia Auxiliada por Computador, pois detalha profundamente o produto e suas partes, interligando-as funcionalmente. Cesa (2010) diz que a Engenharia Auxiliada por Computador irá diminuir o tempo de desenvolvimento e os custos desta fase do longo processo de desenvolvimento de produto.



Figura 1: O Modelo Unificado do Processo de Desenvolvimento do Produto

FONTE: (ROZENFELD; FORCELLINI; AMARAL, 2006)

2.2 Engenharia Auxiliada por Computador

Segundo Li et al. (2015) e Chang (2015) o design assistido por computador (*Computer Aided Design* - CAD), e a modelagem tridimensional juntamente com a engenharia auxiliada por computador (*Computer Aided Engineering* - CAE), podem ser aplicados de forma eficiente em muitos campos industriais e de pesquisa, incluindo aeroespacial, defesa, automobilístico, bens de consumo e em muitas outras áreas que envolva o desenvolvimento de produtos. Tais eficientes ferramentas de pesquisa e engenharia, aplicam tecnologia assistida por computador para realizar modelagens em três dimensões em diferentes produtos, apoiar o design geométrico, fazer análise estrutural, auxiliar o design ideal do produto, criar gráficos e desenhos de engenharia, assim como gerar documentos de produção. Esta tecnologia ajuda cientistas e profissionais técnicos importarem de forma eficiente dados, informações e geometrias básicas que aceleraram o processo de desenvolvimento em projetos de engenharia, de forma controlada, já que geram documentos de design, que apoiarão futuros processos de produção e fabricação.

Atualmente essas ferramentas de pesquisa e engenharia têm adquirido papéis cada vez mais importantes em diferentes empresas de grande relevância no âmbito das aplicações comerciais, industriais, de engenharia e de fabricação, devido às suas características financeiras e técnicas. A modelagem e análise assistida por computador permite um aprimoramento mais sofisticado, flexível e controlado dos meio de fabricação, tornando-os mais confiáveis e viáveis economicamente. Estas tecnologias automatizam a produção já que usam os sistemas de controle para reduzir a intervenção humana no trabalho durante os processos de fabricação e causar forte impacto econômico-produtivo nas indústrias. A automação, juntamente com o design automatizado dos sistemas, não só aumentam a taxa de produção, mas também melhoram a qualidade do produto. As soluções de engenharia assistida por computador pode melhorar e otimizar e integrar os processos industriais em design, desenvolvimento, análises de engenharia e fabricação de produtos. Também o atual e futuro econômico global requer uma fabricação econômica através de automação industrial, ferramentas de design adequadas e melhor controle de produção (LI et al., 2015).

O processo de desenvolvimento de produto convencional emprega uma filosofia de *design-build-test* onde o processo de desenvolvimento de produto é executado sequencialmente, geralmente resultando em um tempo de execução prolongado e um custo elevado do produto. O paradigma do emprego de tecnologias habilitadas pela tecnologia da informação, inclui ferramentas de design, engenharia e fabricação auxiliadas por computador, bem como avançadas tecnologias de prototipagem para suportar o design do produto, do conceito para projetos detalhados e, em última instância, a fabricação. Tal abordagem possibilita o emprego da tecnologia de prototipagem virtual para suportar uma equipe multifuncional na análise do desempenho, confiabilidade e custos de fabricação do produto desde a etapa de desenvolvimento do produto e na realização de compromissos quantitativos para a tomada de decisões de design. Os protótipos físicos do projeto do produto são então produzidos usando a técnica de prototipagem rápida,

principalmente para verificação de projeto. Isto possibilita o encurtamento do ciclo geral de desenvolvimento de produtos, melhora na qualidade do produto e reduzindo os custos do produto (CHANG, 2015).

Segundo Chang (2015), durante o desenvolvimento de produto, a fase chamada de Avaliação de Performance do Produto, concentra-se na aplicação de tecnologia de engenharia computadorizada (CAE) e ferramentas de software para suportar a avaliação do desempenho do produto, incluindo análise estrutural, fadiga e fratura, comportamento térmico, cinemática e dinâmica do corpo rígidos e previsão de probabilidade de falha e análise de confiabilidade. O desempenho do produto, a confiabilidade e o custo calculado podem então ser reunidos para a equipe multifuncional que realizará as compensações de design com base em dados quantitativos de engenharia obtidos a partir de simulações.

2.2.1 A Simulação Computacional

A avaliação do desempenho do produto, segundo Chang (2015), usando a simulação baseada na física dentro do ambiente computacional, geralmente é chamada, em sentido estrito, de prototipagem virtual. Com o avanço das tecnologias de simulação, mais perguntas de engenharia podem ser respondidas realisticamente através de simulações, minimizando assim a necessidade de testes físicos. No entanto, algumas questões-chave ainda não podem ser respondidas pelos sofisticados problemas de engenharia, como por exemplo, a resistência à colisões dos veículos terrestres. Apesar do fato de que as simulações provavelmente nunca substituirão os testes físicos completamente, a economia atrelada ao seu uso, na resolução de problemas menos sofisticados, são significativas e benéficas.

A função da simulação nos projetos de engenharia é dupla: no início das fases de projeto inicial, suporta a engenharia auxiliada por computador e a tomada de decisões, enquanto em fases posteriores ajuda a validar o design em relação às especificações. A função de validação é amplamente praticada na indústria e é aí onde é feito o maior investimento em simulação. Embora sua importância seja reconhecida, as funções da simulação nos projetos de engenharia ainda são subestimadas em termos de disponibilidade de tecnologia, recursos e investimentos (CERVELLERA, 2011).

De acordo com Chung (2003), Simulação por Modelagem e Análise é o processo de criação e experimentação de um modelo matemático computadorizado de um sistema físico, sendo que um sistema é definido como uma coleção de componentes inter-relacionados que recebe entrada e fornece saída para algum propósito. Tal afirmação é complementada por Alexandru (2012), quando diz que a modelagem é uma parte essencial e inseparável de toda a atividade científica, sendo o processo de geração de modelos abstratos, conceituais, gráficos e matemáticos. Em outras palavras, a modelagem é um método científico tecnológico que consiste na representação esquemática de um objeto ou sistema como modelo similar ou análogo. A modelagem permite a análise de fenômenos reais e prediz os resultados da aplicação de uma ou mais teorias a um determinado nível de aproximação. A simulação é uma imitação utilizada para estudar os resultados de uma ação em um produto (sistema), sem realizar a experiência no produto físico / hardware. Assim, a simulação pode ser definida como a reprodução virtual de sistemas físicos. Uma simulação computacional é uma tentativa de modelar uma situação real ou hipotética em um computador, para que possa ser estudado para ver como o sistema funciona. A simulação computacional tornou-se uma parte útil da modelagem de muitos sistemas de engenharia, para obter informações sobre o funcionamento desses sistemas. O objetivo básico para uma simulação computacional é gerar uma amostra de cenários representativos para um modelo.

Sob um ponto de vista mais filosófico, Morrison (2015) diz que a noção corrente de simulação é usada em uma variedade de contextos científicos onde um tipo de sistema é usado para representar ou imitar o comportamento de outro. Um exemplo é o uso de túneis de vento para simular certas características aerodinâmicas do vôo. A simulação computacional baseia-se nessa noção, não apenas através do poder de cálculo de computadores, mas nos processos reais que estão envolvidos na própria simulação. Embora possa-se capturar uma boa parte dos aspectos diretos da simulação de túnel de vento na estrutura tradicional de modelagem, a simulação via computador vai além. A Simulação Computacional não só nos permite representar a evolução do sistema, mas também "medir" os valores das propriedades específicas à medida que se aproxima do ponto crítico. A questão de saber se essa chamada medição é devidamente caracterizada como tal ou melhor descrita como dependente do cálculo, em grande medida, de que se a simulação pode ser rotulada como um tipo de experiência. Como é tipicamente o caso nesses tipos de debates, há argumentos persuasivos em ambos os lados. Se as simulações desfrutam do mesmo status epistêmico que as experiências, então, por que gastar dinheiro criando grandes colisões, projetadas para testar os resultados produzidos por simulações de Monte Carlo de interações de partículas. Por outro lado, há uma variedade de contextos onde as Simulações Computacionais ocupam o centro do escopo como fonte de conhecimento experimental simplesmente porque os sistemas de interesse são inacessíveis. Um exemplo é a evolução da estrutura em espiral nas galáxias. Como as escalas típicas de tempo e distância são tão vastas, a única maneira de experimentar pode ser realizada simulando o sistema em um computador e experimentando a simulação. No caso da evolução estelar, o que isso envolve é a resolução de Equações Diferenciais Parciais para a transferência de calor dentro de uma estrela, simultaneamente com equações que determinam a queima de combustível nuclear. Este tipo de estudo tem sido tão bem sucedido que as histórias de vida da maioria dos tipos de estrelas, desde o nascimento até a morte e todos os estádios intermediários, são bem compreendidas, sem nenhuma sugestão de que o conhecimento que obtêm-se nesses contextos é em qualquer caminho inferior.

Finalizando, Chung (2003) cita como adquirir informações sobre o funcionamento de um sistema, desenvolver políticas operacionais ou de recursos para melhorar o desempenho de um sistema, testar novos conceitos ou testar novos produtos antes de iniciar o processo de manufatura e obter informações sem perturbar um sistema já existente, como os propósitos das simulação

computacional. Cita ainda que o processo de simulação tem como vantagens a experimentação em menor tempo, redução dos requisitos analíticos e demostração facilitada dos modelos e como desvantagens de que a simulação não pode dar resultados precisos quando é alimentada com dados imprecisos, não pode fornecer respostas fáceis para problemas complexos e não irá nunca resolver problemas por si só.

2.3 Os Fenômenos de Transferência de Calor

Segundo Holman et al. (2010), a transferência de calor é a ciência que busca prever a transferência de energia que pode ocorrer entre corpos materiais como resultado de uma diferença de temperatura. A termodinâmica ensina que esta transferência de energia é definida como calor. A ciência da transferência de calor não busca meramente explicar como a energia calorífica pode ser transferida, mas também para prever a taxa em que esta transferência ocorre sob certas condições específicas. O fato de que uma taxa de transferência de calor seja objetivo desejado de uma análise aponta a diferença entre a transferência de calor e a termodinâmica. A termodinâmica trata de sistemas em equilíbrio, podendo ser usada para prever a quantidade de energia necessária para mudar um sistema de um estado de equilíbrio para outro. Porém a termodinâmica não pode ser usada para prever a rapidez com que ocorrerá uma mudança, já que o sistema não estará em equilíbrio durante o processo. A transferência de calor complementa o primeiro e o segundo princípios da termodinâmica, fornecendo regras experimentais adicionais que podem ser usadas para estabelecer taxas de transferência de energia. Como na ciência da termodinâmica, as regras experimentais utilizadas como base do assunto da transferência de calor são bastante simples e facilmente expandidas para abrangerem uma variedade de situações práticas.

Como um exemplo dos diferentes tipos de problemas que são tratados pela termodinâmica e transferência de calor, considere o resfriamento de uma barra de aço quente que é colocada em um balde de água. A termodinâmica pode ser usada para prever a temperatura de equilíbrio final do aço na combinação barra-água. A termodinâmica não nos diz o tempo que leva para alcançar esta condição de equilíbrio ou qual será a temperatura da barra após um certo período antes da condição de equilíbrio ser alcançada. A transferência de calor pode ser usada para prever a temperatura da barra e da água em função do tempo (HOLMAN et al., 2010).

Sabendo da importância e da aplicabilidade do estudo da Transferência de Calor, a seguir serão revistos os conceitos de dois dos três modos conhecidos: condução e convecção. Adicionalmente, será discutido ainda o fenômeno de estresse térmico e sobre os trocadores de calor.

2.3.1 Condução de Calor

Quando existe um gradiente de temperatura em um corpo, os métodos experimentais demonstram que há uma transferência de energia da região de alta temperatura para a região de

baixa temperatura. Diz-se que a energia é transferida por condução e que a taxa de transferência de calor por unidade de área é proporcional ao gradiente de temperatura normal. Segundo (CENGEL; GHAJAR, 2015), a condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as menos energéticas adjacentes, como resultado de interações entre as partículas. A condução pode ocorrer em sólidos, líquidos ou gases. Nos gases e líquidos, a condução é decorrente das colisões e da difusão das moléculas durante o seu movimento aleatório. Em sólidos, é devido à combinação de vibrações das moléculas em uma rede e o transporte de energia pelos elétrons livres. A taxa de condução de calor através de um meio depende da geometria do meio, sua espessura e das propriedades do material do meio, bem como a diferença de temperatura através do meio. Sabe-se que quanto mais espesso o isolamento, menor a perda de calor. Também é conhecido que um tanque de água quente perde calor a uma taxa mais alta quando a temperatura do ambiente que o mesmo se situa é diminuída. Além disso, quanto maior o tanque, maior será sua superfície e, portanto, maior a taxa de perda de calor.

Figura 2: Condução de calor através de uma parede de espessura Δx e área A.



FONTE: (CENGEL; GHAJAR, 2015)

Considere a condução de calor constante através de uma grande parede plana de espessura $\Delta x = L$ e área A, como mostrado na Figura 2. A diferença de temperatura na parede é $\Delta x = T_2 - T_1$. As experiências mostram que a taxa de transferência de calor Q através da parede é dobrada quando a diferença de temperatura Δx em frente a parede ou a área A normal para a direção da transferência de calor é dobrada, mas é reduzida pela metade quando a espessura da parede L é dobrada. Assim, conclui-se que a taxa de condução de calor através de uma camada plana é proporcional à diferença de temperatura entre as camadas e a área de transferência de calor, mas é inversamente proporcional à espessura da camada. Isso é:

$$Q = \kappa A \left(\frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \right) = -\kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$
(2.1)

onde a constante de proporcionalidade κ é a condutividade térmica do material, que é uma medida da capacidade de um material para conduzir o calor. No caso limite, onde $\Delta x \rightarrow 0$, a Equação 2.1 é reduzida a:

$$Q = -\kappa A \left(\frac{dT}{dx}\right) \tag{2.2}$$

que é chamada de Lei de Fourier da Condução de calor. Aqui $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura, que é a inclinação da curva de temperatura em um gráfico $T \times x$ (a taxa de mudança de $T \operatorname{com} x$), na localização x. A relação acima indica que a taxa de condução de calor em uma determinada direção é proporcional ao gradiente de temperatura nessa direção. O calor é conduzido na direção de temperatura decrescente e o gradiente de temperatura torna-se negativo quando a temperatura diminui com o aumento de x. O sinal negativo na Equação 2.2, garante que a transferência de calor na direção x positiva seja uma quantidade positiva. A área de transferência de calor A será sempre normal na direção da transferência de calor e a espessura da parede não tem influência sobre A (CENGEL; GHAJAR, 2015).

Condutividade Térmica

Sabe-se que diferentes materiais armazenam calor de forma diferente, e é chamado de calor específico a propriedade que mede a capacidade que um material tem para armazenar energia. Por exemplo, o valor de $4, 18kJ/kg \cdot C$ é o calor específico da água e $0, 45kJ/kg \cdot C$ é o calor específico do ferro a uma temperatura ambiente de $25^{\circ}C$, o que indica que a água pode armazenar quase dez vezes mais energia que o ferro, por unidade de massa. De acordo com Cengel e Ghajar (2015), da mesma forma, a condutividade térmica κ , é uma medida da capacidade do material para conduzir o calor. Por exemplo, $\kappa = 0,607W/m \cdot K$ para água e $\kappa = 80, 2W/m \cdot K$ para ferro na temperatura ambiente, o que indica que o ferro conduz o calor mais de cem vezes mais rápido do que a água. Assim, diz-se que a água é um condutor de calor pobre em relação ao ferro, embora a água seja um excelente meio para armazenar energia térmica.

A Equação 2.1 para a taxa de transferência de calor via condução em condições estáveis também pode ser vista como a equação que define a condutividade térmica.

$$\kappa = \frac{Q}{A} \left(\frac{\Delta x}{T_2 - T_1} \right) \tag{2.3}$$

Assim, a condutividade térmica de um material pode ser definida como a taxa de transferência de calor através de uma espessura unitária do material por unidade de área, por unidade de temperatura. A condutividade térmica de um material é uma medida da capacidade do material para conduzir o calor. Um alto valor para a condutividade térmica indica que o material é um bom condutor de calor e um valor baixo indica que o material é um mau condutor de calor ou simplesmente, um isolante térmico.

Material	<i>к</i> ,W/mK		
Diamante	2300		
Prata	429		
Cobre	401		
Ouro	317		
Alumínio	237		
Ferro	80,2		
Aço-carbono	43,0		
Mercúrio (l)	8,54		
Vidro	0,78		
Tijolo	0,72		
Água (l)	0,607		
Etilenoglicol	0,26		
Hidrogênio	0,18		
Madeira	0,17		
Óleo de Motor	0,15		
Freon (1)	0,07		
Fibra de vidro	0,043		
Ar (g)	0.026		

Tabela 1: Condutividade Térmica de alguns materiais à temperatura ambiente 300K

FONTE: (CENGEL; GHAJAR, 2015)

A Tabela 1 mostra em ordem decrescente, a condutividade térmica de alguns materiais importantes no dia a dia da sociedade humana. Observa-se que o Cobre ou mesmo o Ouro possuem muito maior capacidade de transmitir calor que o ar ou o óleo de motor, por exemplo. A condutividade térmica de uma substância é normalmente mais alta na fase sólida e mais baixa na fase gasosa. A condutividade térmica dos líquidos é geralmente insensível à pressão, exceto perto do ponto termodinamicamente crítico. Ao contrário dos gases, as condutividades térmicas da maioria dos líquidos diminuem com aumento da temperatura, sendo a água uma notável exceção. Em sólidos, a condução de calor é devido a dois efeitos: às ondas vibratórias estruturais induzido pelos movimentos vibratórios das moléculas posicionadas em posições relativamente fixas de forma periódica, chamadas de *lattice*, e a energia transportado através do fluxo livre de elétrons no sólido. A alta condutividade térmica de um sólido está fortemente ligada ao seu arranjo estrutural e à configuração eletrônica de seus átomos.

Vale lembrar, que os valores de condutividade térmica dados na Tabelas 1 são de uso apropriado quando as dimensões físicas do material em consideração são relativamente grandes. Em algumas das áreas emergentes da tecnologia, como a microeletrônica, as dimensões físicas são tipicamente na ordem dos micrômetros ou nanômetros. Para estas aplicações, as pequenas dimensões físicas influenciarão no valor da condutividade térmica nos estados sólido e líquido. Nessas situações, à medida que as dimensões físicas diminuem, a distância média percorrida pelos transportadores, os elétrons, de energia geralmente diminui e isso reduz o valor da condutividade térmica. A dependência da condutividade térmica em relação à temperatura causa considerável complexidade na análise de condução calor, por isso é comum avaliar a condutividade térmica κ utilizando uma temperatura média e tratá-la como uma constante nos cálculos. Já na análise de transferência de calor, normalmente um material é considerado isotrópico, ou seja, tem propriedades uniformes em todas as três dimensões. Esta suposição é realista para a maioria dos materiais, exceto aqueles que apresentam diferentes características estruturais em direções diferentes, como materiais compósitos, laminados e madeira (CENGEL; GHAJAR, 2015).

As Diferentes Coordenadas

A força motriz para qualquer forma de transferência de calor é a diferença de temperatura e quanto maior for esta diferença, maior a taxa de transferência de calor. Alguns problemas de transferência de calor na engenharia requerem a determinação da distribuição da temperatura no meio de interesse. Porém, a especificação da temperatura em um ponto em um determinado meio requer uma especifica localização desse ponto. Isso pode ser feito escolhendo um sistema de coordenadas adequado, como o retangular, o cilíndrico ou o esférico, dependendo da geometria envolvida, e um ponto de referência, a origem, conveniente.

A localização de um ponto é especificada como (x, y, z) em coordenadas retangulares, como (r, ϕ, z) em coordenadas cilíndricas, e como (r, ϕ, θ) em coordenadas esféricas, onde as distâncias x, y, z, o raio r e os ângulos ϕ e θ são mostrados na Figura 3.



Figura 3: Os três tipos de coordenadas utilizados.

FONTE: (CENGEL; GHAJAR, 2015)

Então a temperatura em um ponto (x, y, z) no tempo t em coordenadas retangulares pode ser expresso como T(x, y, z, t). O melhor sistema de coordenadas para um dada geometria é a que descreve melhor as superfícies da mesma. Para uma forma arbitrária de um corpo, normalmente usa-se coordenadas retangulares, por ser mais fácil lidar com distâncias do que com ângulos.

Estável ou Transiente

Os problemas de transferência de calor são frequentemente classificados como estáveis (também chamados de *steadystate*) ou transitórios (também chamados de instável ou evolutivo). O termo estável não implica mudança com tempo em qualquer ponto dentro do meio, enquanto transiente implica variações dependentes do tempo. Portanto, em problemas estáveis, a temperatura ou o fluxo de calor permanecem inalterado com o tempo durante a transferência constante de calor através de um meio em qualquer localização, embora ambas as quantidades possam variar de um local para outro. Por outro lado, em um problema transiente de transferência de calor a temperatura ou o fluxo não serão mais constantes durante o processo de transferência de calor.

A Equação da Condução de Calor

De acordo com (EPSTEIN, 2017) e (CENGEL; GHAJAR, 2015), a equação diferencial parcial que governa a condução de calor em sólidos é obtida a partir do conceito de conservação de energia. Por motivo de simplificação será ignorada a geração de calor interna do sólido que ocorre por exemplo nos fios condutores de energia devido a resistência inerente do material.

Considere um elemento fino de espessura Δx em uma parede plana. Suponha que a densidade da parede é ρ , o calor específico é c, e a área da parede normal à direção da transferência de calor é A. Um balanço de energia neste elemento fino durante um pequeno intervalo de tempo Δt pode ser expresso como:

$$Q_x = Q_{x+\Delta x} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \tag{2.4}$$

podendo expressar a variação de energia da seguinte forma:

$$\Delta E = E_{t+\Delta t} - E_t = mc(T_{t+\Delta t} - T_t) = \rho c A \Delta x (T_{t+\Delta t} - T_t)$$
(2.5)

substituindo em 2.4...

$$Q_x = Q_{x+\Delta x} = \rho c A \Delta x \frac{(T_{t+\Delta t} - T_t)}{\Delta t}$$
(2.6)

... e dividindo tudo por $A\Delta x$

$$-\frac{1}{A}\frac{Q_{x+\Delta x}}{\Delta x} = \rho c \frac{T_{t+\Delta t} - T_t}{\Delta t}$$
(2.7)

Por fim, toma-se os limites de $\Delta x \to 0$ e $\Delta t \to 0$.

$$\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial x}\left(\kappa A\frac{\partial T}{\partial x}\right) = \rho c\frac{\partial T}{\partial t}$$
(2.8)

A condutividade térmica κ de um material, em geral, depende da temperatura T e de x, portanto, não pode ser retirada da derivada. No entanto, a condutividade térmica nas aplicações mais práticas pode ser assumida como constante em algum valor médio. Assim, para o caso de apenas uma única dimensão avaliada tem-se:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \tag{2.9}$$

no caso de análise estática, e

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$
(2.10)

no caso de uma análise transiente, onde, $\alpha = \frac{\kappa}{\rho c}$ representa a difusividade térmica que mostra quão rápido o calor se propaga no material.

Generalizando está equação para o uso de três dimensões e representando-as nos três sistemas de coordenadas que foram citadas acima, tem-se:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$
(2.11)

para coordenadas retangulares.

Se supor-se $x = r \cos \phi$ e $y = r \sin \phi$, tem-se:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\kappa r\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(\kappa\frac{\partial T}{\partial \phi}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\kappa\frac{\partial T}{\partial z}\right) = \rho c\frac{\partial T}{\partial t}$$
(2.12)

para coordenadas cilíndricas.

No caso de coordenadas esféricas, toma-se $x = r \cos \phi \sin \theta$, $y = r \sin \phi \sin \theta$ e $z = \cos \theta$.

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr^2\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial}{\partial\phi}\left(\kappa\frac{\partial T}{\partial\phi}\right) + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\kappa\sin\theta\frac{\partial T}{\partial\theta}\right) = \rho c\frac{\partial T}{\partial t}$$
(2.13)

2.3.2 A Convecção

De acordo com Incropera e Bergman (2011), a convecção, além de ser uma possível condição de contorno nos problemas de condução de calor, inclui a transferência de energia tanto pela massa do fluido em movimento (advecção), quanto pelo movimento aleatório de moléculas (condução ou difusão). O conceito de camadas limite é de suma importância para a compreensão da transferência de calor e massa entre uma superfície e um fluido que passa por ela.

A Camada Limite de Velocidade

Figura 4: Desenvolvimento da Camada de Velocidade Limite em um plano.



FONTE: (INCROPERA; BERGMAN, 2011)

Para introduzir o conceito de uma camada limite, considere o fluxo sobre a placa plana da Figura 4. Quando as partículas fluidas fazem contato com a superficie, sua velocidade é reduzida significativamente em relação à velocidade do fluido que se desloca da parte mais próxima para a parte mais distante (montante) da placa, e para a maioria das situações é válido assumir que a velocidade da partícula é zero na parede. Essas partículas agem retardando o movimento das partículas na camada de fluido adjacente, que atuam para retardar o movimento de partículas na próxima camada, e assim por diante até, a uma distância $y = \delta$ da superfície, onde o efeito torna-se insignificante. Esse atraso no movimento do fluido está associado às tensões de cisalhamento τ que agem em planos paralelos à velocidade do fluido. Com o aumento da distância y da superfície, o componente de velocidade x do fluido, μ , deve aumentar até se aproximar do valor do fluxo livre μ_{∞} . O subíndice ∞ é usado para designar condições no fluxo livre, fora da camada limite (INCROPERA; BERGMAN, 2011).

A quantidade δ é denominada a espessura da camada limite, e geralmente é definida como o valor de y para $\mu = 0,99\mu_{\infty}$. O perfil de velocidade da camada limite refere-se à maneira em que μ varia com y através da camada limite. Consequentemente, o fluxo de fluido é caracterizado por duas regiões distintas, uma fina camada de fluido (a camada limite) em que os gradientes de velocidade e tensões de cisalhamento são grandes e uma região fora da camada limite em que tanto os gradientes de velocidade quanto as tensões de cisalhamento são insignificantes. Com o aumento da distância da borda de ataque, os efeitos da viscosidade penetram mais na corrente livre e a camada limite cresce (a jusante).

Como se refere à velocidade do fluido, a camada limite anterior pode ser referida para mais especificamente como a camada de limite de velocidade. Desenvolve sempre que há fluxo de fluido sobre uma superfície, e é de fundamental importância para problemas de transporte com convecção. Na mecânica de fluidos, seu significado para o engenheiro decorre da relação com o estresse de cisalhamento da superfície e, portanto, com os efeitos de fricção da superfície. Para fluxos externos, fornece a base para determinar o coeficiente de fricção local

$$C_f \equiv \frac{\tau_S}{\rho \mu_\infty^2 / 2} \tag{2.14}$$

um parâmetro adimensional a partir do qual o arrasto de fricção da superfície pode ser determinado. Supondo um fluido newtoniano, o esforço de cisalhamento da superfície pode ser avaliado a partir do conhecimento do gradiente de velocidade na superfície

$$\tau_S = \mu \frac{\partial u}{\partial y}\Big|_{y=0} \tag{2.15}$$

onde μ é uma propriedade do fluido conhecida como a viscosidade dinâmica. Em uma camada limite de velocidade, o gradiente de velocidade na superfície depende da distância x da borda de início da placa. Portanto, o coeficiente de tensão e fricção da superfície também dependente de x (INCROPERA; BERGMAN, 2011).

A Camada Limite de Temperatura

Assim como uma camada limite de velocidade se desenvolve quando há fluxo de fluido sobre uma superfície, uma camada limite térmica se desenvolve se tanto o fluxo de fluido quanto as temperaturas da superfície diferirem. Considere o fluxo através de uma placa plana isotérmica conforme a Figura 5. Na borda de ataque, o perfil de temperatura é uniforme, com $T(y) = T_{\infty}$. No entanto, as partículas fluidas que entram em contato com a placa atingem o equilíbrio térmico na temperatura da superfície da placa. Por sua vez, essas partículas trocam energia com as da camada fluida adjacente e os gradientes de temperatura se desenvolvem no fluido. A região do fluido em que esses gradientes de temperatura existem é a camada limite térmica, e sua espessura δ_t é tipicamente definida como o valor de y para o qual a relação $[(T_S - T)/(T_S - T_{\infty})] = 0,99$. Com o aumento da distância da borda de ataque, os efeitos da transferência de calor penetram mais na corrente livre e a camada limite térmica cresce.


Figura 5: Desenvolvimento da Camada de Limite Térmico em uma placa plana isotérmica.

FONTE: (INCROPERA; BERGMAN, 2011)

A relação entre as condições nesta camada limite e o coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser facilmente demonstrada. A qualquer distância x a partir da borda de ataque, o fluxo de calor da superfície local pode ser obtido aplicando a *Lei de Fourier* em y = 0. Isto é,

$$q_s'' = -\kappa_f \frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=0}$$
(2.16)

O subscrito S tem sido usado para enfatizar que este é o fluxo de calor da superficie. Esta expressão é apropriada porque, na superficie, não há movimento de energia e a transferência de energia ocorre apenas pela condução. Recordando a lei de Newton sobre o resfriamento, observa-se que

$$q_s'' = h(T_S - T_\infty)$$
(2.17)

que combinando com a Equação 2.16, obtêm-se:

$$h = \frac{-\kappa_f \frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=0}}{T_S - T_\infty}$$
(2.18)

Assim, as condições na camada limite térmico, que influenciam fortemente o gradiente de temperatura da parede $\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=0}$, determinam a taxa de transferência de calor através da camada limite. Uma vez que o valor de $(T_S - T_\infty)$ seja uma constante, independente de x, enquanto δ aumenta com o aumento de x, os gradientes de temperatura na camada limite devem diminuir.

Consequentemente, a magnitude do valor de $T_S - T_{\infty}$ diminui conforme x aumenta. assim como os valores de E segue que q''_s e h (INCROPERA; BERGMAN, 2011).

Ainda segundo Incropera e Bergman (2011), em um fluxo sobre qualquer superfície, sempre existirá uma camada limite de velocidade e, portanto, fricção superfícial. Do mesmo modo, uma camada de limite térmico, e, portanto, transferência de calor por convecção, sempre existirá se a superfície e a temperatura de fluxo forem diferentes. A camada limite de velocidade é de extensão x e é caracterizada pela presença de gradientes de velocidade e tensões de cisalhamento. A camada limite térmica é de extensão δx e é caracterizada por gradientes de temperatura e transferência de calor. Para o engenheiro, as principais manifestações das duas camadas de limite são, respectivamente, fricção superfícial e transferência de calor por convecção. Os parâmetros da camada limite chave são então o coeficiente de fricção C_f e o coeficiente de convecção de calor h.

Troca de Calor na Convecção

Considere as condições da Figura 6a. Um fluido de velocidade V e temperatura T_{∞} flui sobre uma superfície de forma arbitrária de área A_s .

Figura 6: Transferência de Calor por Convecção Local e Total.



FONTE: (INCROPERA; BERGMAN, 2011)

A superfície é presumida estar a uma temperatura uniforme, T_S , e se $T_S \neq T_{\infty}$, sabe-se então que a transferência de calor por convecção ocorrerá, assim como também se sabe que o coeficiente de transferência de calor de superfície e de calor de convecção, ambos variam ao longo da superfície. A taxa de transferência de calor total q pode ser obtida integrando o fluxo local sobre o fluxo de toda a superfície. Isso é,

$$q = \int_{A_S} q_s'' dA_S \tag{2.19}$$

ou da Equação 2.17,

$$q = h(T_S - T_\infty) \int_{A_S} dA_S \tag{2.20}$$

Definir um coeficiente médio de convecção que pode ser expresso como \overline{h} para toda a superfície, a transferência total de calor pode ser expressa como:

$$q = \overline{h}A_S(T_S - T_\infty) \tag{2.21}$$

e usando a Equação 2.20:

$$\overline{h} = \frac{1}{A_S} \int_{A_S} h dA_S \tag{2.22}$$

A Equação de Convecção

Muitas aplicações da vida real de fluxos que se deslocam sobre um corpo sólido, podem ser modeladas como um fluxo de camada-limite de duas dimensões e problemas de transferência de calor. Precisa-se conhecer os perfis de velocidade 2D u(x, y, t) e v(x, y, t) para calcular o estresse de cisalhamento da parede (relacionado à perda de pressão) e o fator de fricção ao longo da superfície para um determinado fluido em condições de fluxo fornecidas, bem como os perfís de temperatura também em 2D, T(x, y, t) para calcular o fluxo de calor da parede (relacionado à taxa de transferência de calor) e o coeficiente de transferência de calor ao longo da superfície para um dado fluido em fluxo térmico e as condições térmicas de contorno. Como o fluxo se move devido a diferença de pressão entre o fluxo a montante e a jusante e o efeito da viscosidade da camada limite sobre a superfície sólida, é necessário realizar a conservação de massa (equação de continuidade) e momentum (equação de momento) através da camada de limite para resolver as distribuições de velocidade ao longo da superfície. Da mesma forma, como a transferência de calor se dá devido à diferença de temperatura entre o fluxo livre e a superfície sólida e o fluxo que move-se transportando energia, é necessário realizar conservação de energia (equação de energia) através da camada de limite térmico para resolver as distribuições de temperatura sobre a superfície aquecida (ou arrefecida) (HAN, 2016).

Conforme visto acima, a dedução de uma equação para o fenômeno de convecção foge em complexidade do escopo deste trabalho, por isso pode ser consultada na referência.

2.3.3 Estresse Térmico

O estresse térmico são tensões que resultam quando uma mudança de temperatura do material ocorre na presença de restrições. As tensões térmicas são tensões mecânicas resultantes de forças causadas por uma parte tentando expandir ou contrair quando é constrangido. Sem

restrições, não haveria tensões térmicas. Por exemplo, considere a barra mostrada na Figura 7. Se a barra foi submetida a uma variação de temperatura em torno de $20^{\circ}C$ e as extremidades foram livres para se mover, o estresse na barra seria zero. Por outro lado, se a mesma barra fosse submetida à mesma mudança de temperatura e as extremidades foram rigidamente fixadas (sem deslocamento nas extremidades da barra), tensões seriam desenvolvidas na barra como resultado das forças de tração ou de compressão nas extremidades da barra. Tais tensões são chamadas de tensões térmicas (BARRON; BARRON, 2011).

Ainda segundo Barron e Barron (2011) existem dois tipos de restrições quanto aos estresses térmicos:

- 1. Restrições Externas.
- 2. Restrições Internas.

Restrições Externas são restrições em todo o sistema que impedem a expansão ou contração do sistema quando as mudanças de temperatura ocorrem. Por exemplo, se um comprimento de tubo fosse fixado em dois lugares por suportes, essa restrição seria externa. Restrições Internas são restrições presentes no material devido ao mesmo se expandir ou se contrair em diferentes quantidades em vários locais ao longo do seu corpo, porém permanecendo contínuo. Supõe-se que um tubo aquecido internamente em $10^{\circ}C$, porém com sua temperatura externa permanecendo constante, surgiriam tensões entre a estrutura interna no tubo que sofrerá deslocamento, e a superfície que está rígida.

Figura 7: Uma barra (A) sem restrições e uma barra (B) com restrições.



FONTE: (BARRON; BARRON, 2011)

No estudo das tensões térmicas algumas propriedades físicas são muito importantes:

- 1. Coeficiente de Expansão Térmica Linear
- 2. Coeficiente de Expansão Térmica Volumétrica
- 3. Módulo de Young
- 4. Razão de Poisson
- 5. Difusividade Térmica

Coeficiente de Expansão Térmica Linear

O coeficiente de expansão térmica linear é definido como a variação fracionada em comprimento (ou qualquer outra dimensão linear) por unidade de mudança de temperatura enquanto o estresse sobre o material é mantido constante. Eis a definição matemática do coeficiente de expansão térmica linear:

$$\alpha = \frac{1}{L} \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_{\sigma} \tag{2.23}$$

Normalmente, o coeficiente de expansão térmica linear é medido em condições de estresse aplicado zero onde $\sigma = 0$.

Coeficiente de Expansão Térmica Volumétrica

O coeficiente de expansão térmica volumétrica é definido como o fracionamento da mudança de volume por unidade de mudança de temperatura enquanto a pressão (ao redor do corpo) é mantida constante. A definição matemática para o coeficiente de expansão térmica volumétrica é:

$$\beta_t = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \tag{2.24}$$

Por lógica, para um material isotrópico, aquele em que suas propriedades não variam nas três dimensões, a relação entre o coeficiente de expansão térmica linear e volumétrica será:

$$\beta_t = 3 \times \alpha \tag{2.25}$$

A variação do coeficiente de expansão térmica com a temperatura pode ser entendido considerando as forças intermoleculares do material (HOFMANN, 2015). À medida que o átomo adquire mais energia (ou como a temperatura é aumentada), o espaçamento médio dos dois átomos torna-se maior, ou seja, o material se expande.

Módulo de Young

O módulo de Young dá uma medida da flexibilidade de um material, sendo então outra importante propriedade dos materiais na determinação de tensões térmicas. O modelo de Young geralmente é medido sob condições isotérmicas onde a temperatura se mantém constante. A definição matemática do módulo de Young será então dada por:

$$E = \left(\frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon}\right)_T \tag{2.26}$$

O nível de estresse σ está abaixo do limite proporcional para o material. A quantidade ε é a tensão mecânica causada pelo estresse σ . O módulo de Young está relacionado principalmente com as forças entre átomos em um material.

Razão de Poisson

Quando os átomos de um material são separados por uma força aplicada em um certo direção, há uma contração correspondente do material na direção lateral, perpendicular à força aplicada. A Razão de Poisson μ , é a magnitude proporcional da tensão lateral para a tensão na direção da força aplicada. Para uma força aplicada na direção x, a Razão de Poisson pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\mu = \frac{-\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \tag{2.27}$$

A quantidade ε_y é a tensão mecânica na direção y quando é aplicada uma força na direção x, e ε_x é a tensão mecânica na direção x (a direção da força aplicada). O sinal negativo é introduzido porque a tensão na direção transversal será uma contração (tensão negativa), se a força for um alongamento (deformação positiva) na direção x. A Razão de Poisson é uma propriedade que depende principalmente da geometria ou organização dos átomos no material. Devido a essa característica, a Razão de Poisson é praticamente independente da temperatura.

Difusividade Térmica

Em muitas situações envolvendo estresse térmico, estão envolvidas distribuições de temperatura transitórias ou dependentes do tempo. Nestes casos, a distribuição de temperatura e a distribuição do estresse térmico dependem de uma propriedade de material chamada de difusividade térmica κ . A difusividade térmica é definida em termos da condutividade térmica do material κ_t , densidade ρ e calor específico c:

$$\kappa \equiv \frac{\kappa_t}{\rho c} \tag{2.28}$$

As unidades para a difusividade térmica no sistema SI são m^2/s . O valor da difusividade térmica dá uma medida da rapidez com que a energia pode ser conduzido em um material sólido. Um grande valor de difusividade térmica significa que a energia pode difundir rapidamente para o material e não será desenvolvido gradientes acentuados de temperatura ou seja, não haverá grandes mudanças de temperatura a pequenas distâncias. Esse comportamento tende a resultar em menores estresses térmicos na situação transitória do que no caso de um material com uma pequena difusividade térmica (HOFMANN, 2015).

2.3.4 Trocadores de Calor

Segundo Kakac, Liu e Pramuanjaroenkij (2012), os trocadores de calor são dispositivos que fornecem a transferência da energia térmica entre dois ou mais fluidos a diferentes temperaturas. Os também conhecidos como permutadores de calor são usados em uma ampla variedade de aplicações, como na produção de energia, em processos das indústrias químicas e alimentares, eletroeletrônicos, engenharia ambiental, controle de resíduos, recuperação de calor, indústria de fabricação de ar condicionado, refrigeração, aplicações aeroespaciais, etc.

As tarefas mais comuns no design de um trocador de calor são a classificação e o dimensionamento. O problema de classificação está preocupado com a determinação da taxa de transferência de calor e as temperaturas de saída do fluido em relação às taxas de fluxo de fluido prescritas, temperaturas de entrada e possíveis quedas de pressão admissíveis para um trocador de calor. Consequentemente, a área de superfície de transferência de calor e as dimensões de passagem de fluxo serão facilmente encontradas. O problema de dimensionamento, por outro lado, envolve a determinação das dimensões do trocador de calor, ou seja, selecionar um trocador de calor apropriado para atender aos requisitos de entrada e saída de fluxo quente ou frio, a taxas específicas e com quedas de pressões aceitáveis.

De acordo com Karwa (2017), com base no princípio de operação, os trocadores de calor pode ser organizados como recuperadores, regeneradores e do tipo de contato direto. Em um recuperador, as correntes fria e quente circulam simultaneamente através do trocador e o calor é transferido através de uma superfície que separa os fluidos. Caldeiras a vapor, condensadores de superfície e pré-aquecedores de ar, são alguns exemplos de recuperadores. Em um regenerador, uma mesma superfície de aquecimento e resfriamento é expostas ao à fluidos quentes e frios. O calor do fluido quente é removido e acumulado nas paredes ou matriz do trocador que é então transferido para o fluido frio. Portanto, há um fluxo contínuo no recuperador, porém um fluxo periódico no regenerador. Recuperados e regeneradores também são classificados como trocadores de calor de superfície porque os fluidos são separados por uma superfície sólida. Em um permutador de contato direto, o calor é transferido através do contato direto e mistura das correntes de fluido quente e frio. Assim, a transferência de calor também é acompanhado da transferência de massa. Os trocadores de calor são empregados em instalações variadas, como usinas de energia, indústrias químicas, sistemas de ar condicionado e refrigeração automotiva,

assim como usinas de energia. Portanto, eles são frequentemente conhecidos por suas aplicações, por exemplo, caldeira, condensador, economizador, evaporador, pré-aquecedor de ar, torre de resfriamento, radiador e refrigerador, etc.

É lembrado por Holman et al. (2010), que a aplicação dos princípios de transferência de calor para a concepção de equipamentos para atingir um determinado objetivo de engenharia é de extrema importância, pois, ao aplicar os princípios para a concepção de um produto, o indivíduo estará trabalhando no objetivo do desenvolvimento de produtos para ganhos econômicos. Eventualmente, a economia desempenha um papel fundamental na concepção e seleção de equipamentos de troca de calor, e o engenheiro deve ter isso em mente ao embarcar em qualquer novo problema de design de transferência de calor. O peso e o tamanho dos permutadores de calor utilizados em aplicações espaciais ou aeronáuticas são parâmetros muito importantes e, nestes casos, as considerações de custo são frequentemente subordinadas no que diz respeito aos custos de construção do material e do permutador de calor. No entanto, o peso e o tamanho são fatores de custo importantes na aplicação geral destes campos e, portanto, ainda podem ser considerados como variáveis econômicas. Uma aplicação específica ditará as regras que se devem seguir para obter o melhor design comparável a considerações econômicas, tamanho, peso, etc. Uma análise de todos esses fatores está além do alcance do trabalho atual, mas é bom lembrar que todos devem ser considerados na prática.

Adicionalmente Saha et al. (2016) diz que em outras aplicações, o objetivo pode ser recuperar ou rejeitar o calor, ou esterilizar, pasteurizar, fracionar, destilar, concentrar, cristalizar ou controlar um fluido de processos industriais. Em alguns trocadores de calor, os fluidos que trocam calor estão em contato direto enquanto na maioria dos permutadores de calor, a transferência de calor entre fluidos ocorre através de uma parede de separação ou dentro e fora de uma parede de maneira transitória. Em muitos permutadores de calor, os fluidos são separados por uma superfície de transferência de calor e, idealmente, não misturam nem escapam. Esses permutadores são do tipo de transferência direta, ou simplesmente recuperadores. Em contraste, os permutadores em que há intercâmbio de calor intermitente entre os fluidos quente e frio - via armazenamento de energia térmica e liberação através da superfície ou matriz do permutador são de transferência indireta, ou simplesmente regeneradores. Tais trocadores geralmente têm vazamento de fluido de uma corrente de fluido para o outro, devido a diferenças de pressão e rotação da matriz / troca de válvula. Exemplos comuns de trocadores de calor são radiadores de automóveis, condensadores, evaporadores, pré-aquecedores de ar e torres de resfriamento.

Se não ocorrer qualquer alteração de fase em qualquer dos fluidos no permutador, às vezes é referido como um permutador de calor sensível. Poderá haver fontes de energia térmica interna nos permutadores, como em aquecedores elétricos e elementos de combustível nuclear. A combustão e a reação química podem ocorrer dentro do permutador, como em caldeiras, aquecedores a lenha e permutadores de leito fluidizado. Para uma compreensão completa dos permutadores de calor em relação às suas funções e aos fatores que afetam o desempenho, é preciso

entender os fundamentos e princípios de transferência de calor envolvidos no funcionamento dos permutadores de calor. Sabe-se que o calor sempre flui do corpo de temperatura mais alta para o corpo de temperatura inferior por três modos primários chamados de condução, convecção e radiação. Em sólidos, a transferência de calor ocorre através do modo de condução, enquanto que no modo de convecção de fluidos domina (SAHA et al., 2016).

A equação de transferência de calor por condução é

$$Q_{cond} = \frac{\kappa A \Delta T}{L} \tag{2.29}$$

onde Q é a taxa de fluxo de calor, κ é a condutividade térmica do material, L é o comprimento, A é a área da seção transversal, e ΔT é a diferença de temperatura entre as extremidades quente e fria do sólido. A equação de condução pode ser reescrita em termos da resistência térmica. Se,

$$R = \frac{L}{\kappa A} \tag{2.30}$$

para R sendo a resistividade térmica do material, então

$$Q_{cond} = \frac{\Delta T}{R} \tag{2.31}$$

A convecção é um meio muito eficiente de transferência de calor. Ao contrário da condução, onde a as moléculas são estacionárias, em convecção, as moléculas estão se movendo, por isso, a taxa de transferência de calor pode ser consideravelmente maior que em condução. A equação para transferência de calor por convecção é:

$$Q_{conv} = hA(T_{(s)} - T_{(f)})$$
(2.32)

Onde A é a área onde a superfície sólida e o fluido interagem, $T_{(s)}$ e $T_{(f)}$ são as temperaturas da superfície sólida e do fluido, respectivamente, e h é o coeficiente. O coeficiente varia muito dependendo das propriedades do fluido e quão rápido ele está se movendo. A equação de convecção pode ser reescrita em termos de resistência térmica, pois se $R = \frac{1}{hA}$, então:

$$Q_{conv} = \frac{(T_{(s)} - T_{(f)})}{R}$$
(2.33)

A partir da discussão acima, é claro que, à medida que o fluxo de calor ocorre devido à diferença de temperatura, ele experimenta resistência, chamada resistência térmica. Agora, como nos permutadores de calor, meios sólidos e fluidos estão envolvidos com o objetivo de troca de calor, é fundamental identificar as fontes de resistência térmica para o alcance de melhorar o desempenho da transferência de calor. Escopos de melhoria da condutividade térmica de materiais sólidos que podem ser usado em permutadores de calor são limitados ao desenvolvimento da

alta condutividade de materiais, portanto, redução na resistência térmica condutora é limitada e, portanto, a maioria dos trabalhos de pesquisa relacionados à melhoria do desempenho do permutador de calor foca na redução da resistência térmica convectiva nos permutadores de calor para o aumento da transferência do mesmo (SAHA et al., 2016).

Uma parte essencial, e muitas vezes a mais incerta, de qualquer análise do permutador de calor é a determinação do coeficiente de transferência de calor global. Este coeficiente é definido em termos da resistência térmica total à transferência de calor entre dois fluidos. Para uma parede que separa dois fluxos de fluido, o coeficiente global de transferência de calor pode ser expresso como:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_f A_f} = \frac{1}{U_q A_q} = \frac{1}{(hA)_f} + R_s + \frac{1}{(hA)_q}$$
(2.34)

onde f e q se referem aos fluidos frios e quentes, respectivamente. Observe que o cálculo do produto UA não requer a designação do lado quente ou frio $(U_fA_f = U_qA_q)$. No entanto, o cálculo de um coeficiente global depende se se basear na área de superfície lateral fria ou quente, já que a $U_f \neq U_q$ se $A_f \neq A_q$. R_s é a resistência de condução na superfície de contato.

É importante reconhecer, no entanto, que a Equação 2.34 se aplica apenas para superfícies limpas. Durante a operação normal do trocador de calor, as superfícies são frequentemente sujeitas a incrustações por impurezas de fluidos, formação de ferrugem ou outras reações entre o fluido e o material de superfície. A deposição subsequente de uma película ou escamas na superfície pode aumentar consideravelmente a resistência à transferência de calor entre os fluidos. Este efeito pode ser tratado introduzindo uma resistência térmica adicional na Equação 2.34, denominado fator de incrustação, R_i . Seu valor depende da temperatura de operação, da velocidade do fluido e do tempo de serviço do trocador de calor.

Além disso, sabe-se que invaginações são frequentemente adicionadas às superfícies expostas a um ou a ambos os fluidos e que, ao aumentar a área de superfície, reduzem a resistência geral à transferência de calor. Consequentemente, com a inclusão de efeitos de incrustação superfícial e de aleta (superfície estendida), o coeficiente de transferência de calor geral é modificado da seguinte forma:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{(\eta_0 hA)_f} + \frac{R_{i,f}''}{(\eta_0 A)_f} + R_s + \frac{1}{(\eta_0 hA)_q} + \frac{R_{i,q}''}{(\eta_0 A)_q}$$
(2.35)

Embora fatores de incrustação representativos (R_i) estejam listados na Tabela 2, o fator é variável durante a operação do permutador de calor (iniciando em zero para uma superfície limpa e aumentando conforme ocorre deposição de substrato na superfície). A quantidade η_0 na Equação 2.35 é denominada eficiência global da superfície. É definido de tal forma que, para a superfície quente ou fria sem incrustação, a taxa de transferência de calor é:

Fluido	$R_i'', m^2 \times K/W$
Água de alimentação de caldeira tratada (abaixo de 50 ° C)	0,0001
Água de alimentação de caldeira tratada (acima de 50 ° C)	0,0002
Água do rio (abaixo de 50 ° C)	0,0002 - 0,0001
Óleo combustível	0,0009
Líquidos de refrigeração	0,0002
Vapor	0,0001

Tabela 2: Valores Representativos de Fatores de Incrustamento

FONTE: (INCROPERA; BERGMAN, 2011)

$$q = \eta_o h A (T_b - T_\infty) \tag{2.36}$$

onde T_b é a temperatura da superfície base e A é a área total da superfície. Derivou-se a seguinte expressão:

$$\eta_0 = 1 - \frac{A_s}{A} \times (1 - \eta_s)$$
(2.37)

onde A_s é toda a área da superfície da invaginação e η_s é a eficiência de uma única invaginação. Para ser consistente com a nomenclatura comumente utilizada na análise do permutador de calor, a proporção da área da superfície da invaginação para a área da superficial total foi expressa como $\frac{A_s}{A}$.

Notar que, conforme escrito, a Equação 2.36 corresponde a uma incrustação insignificante (ou não considerada). No entanto, se a incrustação for significativa, o coeficiente de convecção na Equação 2.36 deve ser substituído por um coeficiente total de transferência de calor global da forma:

$$U_p = \frac{h}{1 + hR_i''}$$
(2.38)

Ao contrário da Equação 2.34, que fornece o coeficiente de transferência de calor global entre os fluidos quente e frio, U_p é denominado coeficiente parcial porque inclui apenas o coeficiente de convecção e o fator de incrustação associados a um fluido e a sua superfície adjacente. Os coeficientes parciais para os lados frio e quente são então

$$U_{p,f} = \frac{h_f}{1 + h_f R_{i,f}''} \tag{2.39}$$

e

$$U_{p,q} = \frac{h_q}{1 + h_q R_{i,q}''} \tag{2.40}$$

respectivamente. A Equação 2.37 ainda pode ser usada para avaliar η_0 para o lado quente e/ou frio, mas U_p deve ser usado em vez de h para avaliar a eficiência das invaginações correspondentes. Além disso, é facilmente mostrado que o segundo e quarto termos no lado direito da Equação 2.34, podem ser excluídos se os coeficientes de convecção no primeiro e quinto termos forem substituídos por $U_{p,f}$ e $U_{p,h}$, respectivamente.

Tabela 3: Valores Representativos do Coeficiente de Transferência de Calor Global

Fluido (combinação)	$U(W/m^2 \times K)$
Água para água	850 - 1700
Água para o petróleo	110 - 350
Condensador de vapor (água em tubos)	1000 - 6000
Condensador de amônia (água em tubos)	800 - 1400
Condensador de álcool (água em tubos)	250 - 700
Permutador de calor em tubo de amônia (água em tubos, ar em fluxo cruzado)	25 - 50

FONTE: (INCROPERA; BERGMAN, 2011)

2.4 As Ferramentas Matemáticas

2.4.1 Equações Diferenciais Parciais

Muitas das Equações Diferenciais Parciais utilizadas na Engenharia e na Física são resultado da aplicação de leis de conservação ou de equilíbrio em sistemas envolvendo campos, ou seja, quantidades definidas sobre um fundo contínuo de duas ou mais dimensões, como espaço e tempo. Sob condições adequadas de continuidade e diferenciabilidade, uma lei genérica de equilíbrio tem ambas as suas formas, a saber, global (integral) ou local (diferencial), passíveis de derivação e aplicáveis a vários contextos de importância prática, como fluxo de tráfego, mecânica de sólidos, mecânica dos fluidos, transferência e condução de calor, propagação de ondas e certos problemas relacionados a eventos econômicos e financeiros (EPSTEIN, 2017).

Em termos simples, pode-se descrever uma Equação Diferencial Parcial como uma ferramenta matemática que pode ser usada para descrever um determinado fenômeno físico. Esta descrição é dada sob a forma de uma relação matemática entre diferentes taxas de mudança dos fenômenos em questão, em relação a diferentes variáveis, por exemplo, as coordenadas da posição e o tempo. Portanto, muitos problemas físicos no mundo real podem ser descritos matemáticamente por algumas formas de Equações Diferenciais Parciais (UGAIL, 2011).

Segundo Borthwick (2017), os fenômenos contínuos, ditos não discretos, como a propagação de ondas ou o fluxo de calor, geralmente são modelados com equações diferenciais parciais, que expressam relações entre taxas de mudança em relação a múltiplas variáveis independentes. Em contraste, fenômenos que podem ser descritos com uma única variável independente, como o movimento de um corpo rígido na física clássica, são modelados por equações diferenciais ordinárias.

Uma equação diferencial parcial para uma função qualquer *u* têm a forma:

$$F\left(\mathbf{x}, u(\mathbf{x}), \frac{\partial u}{\partial x_j}(\mathbf{x}, ..., \frac{\partial^m}{\partial x_{j_1}, ..., \partial x_{j_m}}\right) = 0$$
(2.41)

A ordem desta equação é *m*, a ordem da derivada mais alta que aparece (que é suposto ser finita). Uma solução clássica que você admite derivadas parciais contínuas até a ordem *m* e satisfaz a Equação 2.41 em todos os pontos *x* no seu domínio. Em determinadas situações, os requisitos de diferenciação podem ser relaxados, permitindo-nos definir soluções fracas que não resolvem a equação literalmente. Um aspecto um tanto sutil da definição mostrada na Equação 2.41, é o fato de que a equação obrigatoriamente será local. Isso significa que as funções e as derivadas que aparecem na equação são todas avaliadas no mesmo ponto. Embora a física clássica tenha fornecido o ímpeto original para o desenvolvimento das teorias envolvendo as Equações Diferenciais Parciais, os modelos destas desempenharam desde então um papel crucial em muitos outros campos, incluindo a engenharia. Muitas das aplicações industriais da matemática são baseadas na análise numérica das Equações Diferenciais Parciais ou EDP. A maioria das EDP não são solucionáveis no sentido explícito de que um simples problema de cálculo pode ser resolvido a mão, ou analiticamente. Ou seja, normalmente não se pode obter uma fórmula exata para *u*(*x*). Assim sendo, grande parte da análise das EDP está focada em tirar conclusões significativas de uma equação sem realmente escrever uma solução (BORTHWICK, 2017).

As EDP são classificadas de acordo com diversos critérios. De acordo com Ugail (2011), tais critérios são definidos de acordo com a ordem, a linearidade e a homogeneidade da EDP. Os critérios serão explicados a seguir.

A Ordem

A ordem de uma EDP, considerado a de mais fácil classificação, é determinada pela ordem mais alta de todas as derivadas parciais envolvidas na equação. A equação,

$$\frac{\partial^4 h}{\partial x^4} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \tag{2.42}$$

é uma equação diferencial parcial de quarta ordem, enquanto que a equação determinada por

$$\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial z} = 0$$
(2.43)

é da primeira ordem.

A Homogeneidade

A homogeneidade de uma equação diferencial parcial depende da existência de termos dependendo das variáveis independentes, isto é, se houver termos em que variáveis independentes estejam envolvidas, a equação é considerada não homogênea e homogêneo se esses termos não existirem. Por exemplo, a equação

$$\frac{\partial^4 h}{\partial x^4} + \frac{\partial h}{\partial t} + x = 0 \tag{2.44}$$

é uma equação diferencial parcial não homogênea, enquanto que a equação determinada

$$\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial z} = 0$$
(2.45)

é homogênea. A identificação neste caso é apenas uma questão de escrever todos os termos relevantes que incluem a função que está sendo diferenciada de um lado deixando o resto dos termos do outro. Se houver um termo não-zero no lado direito da equação é descrito como não homogêneo.

A Linearidade

A linearidade de uma equação é determinada pela ordem da função derivada envolvida para descrever esta mesma EDP. Em outras palavras, a função desconhecida e seus derivados devem aparecer com expoente um em todos os momentos e nenhum produto entre as funções desconhecidas e seus derivados são permitidos. Caso contrário, a EDP será considerada nãolinear. Exemplos de equações diferenciais parciais lineares e não-lineares estão listados abaixo. A equação

$$\frac{h^3 \partial^4 h}{\partial x^4} + \frac{\partial h}{\partial t} + x = 0 \tag{2.46}$$

é uma equação diferencial parcial não-linear enquanto a já conhecida

$$\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial z} = 0$$
(2.47)

é linear.

O Discriminante

Muitas vezes na matemática, os discriminantes são usados para determinar a natureza das raízes associadas a uma determinada equação algebraica de segunda ordem. Um discriminante pode facilmente dizer se ambas as raízes são reais e diferentes, se houver apenas uma raiz ou se elas serão complexas. Da mesma forma, EDP podem ser classificados em diferentes tipos de

equações dependendo do comportamento do discriminante. Esta classificação é bastante útil pois irá orientar o analista para um método específico de solução de uma determinada EDP. Suponha a generalização da equação diferencial parcial de segunda ordem em duas variáveis dada por:

$$A\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + B\frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x} + C\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 0$$
(2.48)

A classificação se dá da seguinte forma:

- 1. $B^2 4AC < 0$: Equação Diferencial Parcial Elítpica. ex: Equação de *Laplace*. A solução deste tipo de EDP geralmente é dada em termos de funções harmônicas. Além disso, se os coeficientes multiplicarem os termos que envolvem a função desconhecida e suas derivadas, a solução pode ser encontrada usando a Transformada de *Fourer*.
- B² 4AC = 0: Equação Diferencial Parcial Parabólica. ex: Equação de Calor de *Fourier*. As EDP parabolicas, geralmente estão relacionadas a problemas de evolução, como a difusão do calor através de um meio. Por esta razão, eles também são conhecidos como equações de evolução pois elas descrevem como uma propriedade física muda ao longo do tempo em um determinado domínio.
- 3. $B^2 4AC > 0$: Equação Diferencial Parcial hiperbólica. ex: Equação de Onda.

Valor Inicial e Condições de Contorno

As infinitas soluções encontradas para uma dada equação diferencial parciais quando analisa-se problemas de engenharia podem não ser adequadas, assim é necessário que limite-se as soluções. Uma fora de realizar isso, seria a definição de *Condições Iniciais* ou de *Condições de Contorno* onde somente as soluções que se adequasse a estas condições seriam aceitas.

De acordo com Zill (2013), já que a Equação 2.11 depende do tempo t para ser solucionada, pode-se prefixar o que ocorre em t = 0, ou seja estipula-se uma *condição inicial*. Se f(x) denota a distribuição inicial de temperatura em um corpo qualquer, então a solução T(x, y, z, t) de 2.11 pode satisfazer a condição inicial T(x, y, z, 0) = f(x). Em termos matemáticos:

$$T(x, y, z, 0) = f(x), \frac{\partial u}{\partial t}\Big|_{t=0} = g(x)$$
(2.49)

Em relação às condições de contorno, ainda segundo Zill (2013), existem três tipos:

- 1. *T*
- 2. $\frac{\partial T}{\partial n}$
- 3. $\frac{\partial T}{\partial n} + hT$

O termo $\frac{\partial T}{\partial n}$ define a derivada normal de T (a derivação direcional de T na direção perpendicular ao limite). Uma condição de contorno do tipo 1 é chamada de condição *Dirichlet*. Já uma condição de contorno do segundo tipo, 2 é chamada de condição de *Neumann*. E uma condição de limite do terceiro tipo 3 é conhecida como condição de *Robin*.

A condição (1) simplesmente afirma que nos valores limites de $x, y \in z$ é mantida uma temperatura constante em todos os momentos onde t > 0. A condição (2) indica que os limite $x, y \in z$ então isolados. Da lei empírica de transferência de calor, o fluxo de calor através de um limite (ou seja, a quantidade de calor por unidade de área por unidade de tempo limite) é proporcional ao valor da derivada normal? $\frac{\partial T}{\partial n}$ da temperatura T. Assim, quando os limites $x, y \in z$ são isolados termicamente, nenhum fluxo de calor entra ou sai do corpo em análise, logo:

$$\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{x_{max}, y_{max}, z_{max}} = 0 \tag{2.50}$$

Pode-se interpretar (3) como o calor que é perdido nas extremidades do corpo (opostas às fontes de calor) por estar em contato com um meio, como ar ou água, que é mantido a uma temperatura constante. Da lei de Newton sobre o resfriamento, o fluxo de calor externo da haste é proporcional à diferença entre a temperatura $u(x_{max}, y_{max}, z_{max}, t)$ no contorno e a temperatura do meio circundante.

Métodos Numéricos

Conforme dito acima nesta seção, a solução das equações diferenciais parciais não são, quando expressam problemas do mundo real, resolvidas de forma analítica ou mesmo se consegue obter algum resultado. Entretanto, Ugail (2011) nos diz que entre muitos dos métodos numéricos para solucionar problemas que envolvam Equações Diferenciais Parciais, o chamado *Método dos Elementos Finitos*, é uma técnica que pode resolver indistintamente as EDP. O princípio de funcionamento desta técnica consiste em aproximar a EDP original por um sistema de equações diferenciais ordinárias que podem ser integradas numericamente usando métodos bem conhecidos, como por exemplo o método de Gauss-Legendre. O principal desafio ao aplicar tal técnica para resolver o EDP consiste em se aproximar da equação original de forma estável. Na próxima seção será aprofundado o Método dos Elementos Finitos.

2.4.2 O Método dos Elementos Finitos

No trabalho de Moaveni (2011), é dito que o método de elementos finitos é um procedimento numérico que pode ser usado para obter soluções para uma grande classe de problemas de engenharia envolvendo análise de tensões, transferência de calor, eletromagnetismo e fluxo de fluido. Em geral, problemas de engenharia são modelos matemáticos de situações físicas. Modelos matemáticos de muitos problemas de engenharia são equações diferenciais que são construídas aplicando as leis e os princípios fundamentais da natureza a um sistema ou a um volume de controle. Estas equações governantes representam equilíbrio de massa, força ou energia.

Adicionalmente, Lee (2017) diz que a maioria dos problemas do mundo real são muito complicados para serem resolvidos de forma analítica, devido à complexidade da geometria ou as condições do sistema a ser analisado. Adicionando-se complexidades de não-linearidade ou efeitos dinâmicos aos problemas, suas soluções analíticas são praticamente impossíveis de serem alcançáveis. Uma ideia básica do método dos elementos finitos é dividir todo o corpo estrutural em corpos pequenos e geometricamente simples, chamados elementos para que as equações de equilíbrio de cada elemento possam ser tomadas, e todas as equações de equilíbrio sejam resolvidas simultaneamente. Os elementos têm tamanhos finitos, portanto, o nome Método dos Elementos Finitos e são assumidos como sendo conectados por nós localizados nas bordas e vértices dos elementos. Outra ideia é resolver valores discretos desconhecidos (por exemplo, deslocamento). Uma vez que o deslocamento em cada nó é um vetor e tem três componentes (no caso da análise ser realizada em três dimensões), o número total de quantidades desconhecidas a serem resolvidas é três vezes o número de nós.

Seguindo a literatura, Rao (2010) diz que no método de elementos finitos, o contínuo ou corpo real de matéria, como um sólido, líquido ou gás, é representado como um conjunto de subdivisões denominadas elementos finitos. Esses elementos são considerados interligados em articulações especificas, chamadas de nós ou pontos nodais. Os nós geralmente ficam nos limites do elemento onde os elementos adjacentes são considerados conectados. Uma vez que a variação real da variável de campo (por exemplo, deslocamento, estresse, temperatura, pressão ou velocidade) dentro do contínuo não é conhecida, assume-se que a variação das variáveis de campo dentro de um elemento finito pode ser aproximada por uma função simples. Essas funções de aproximação (também chamadas de modelos de interpolação) são definidas em termos dos valores das variáveis de campo nos nós. Quando as equações de campo (como equações de equilíbrio) para todo o continuo são escritas, as novas incógnitas serão os valores nodais da variável de campo. Ao resolver as equações de elementos finitos, que geralmente são na forma de equações de matriz, os valores nodais da variável de campo serão conhecidos. Uma vez que estas são conhecidas, as funções de aproximação definem a variável de campo ao longo da montagem de elementos.

Conforme Lewis, Nithiarasu e Seetharamu (2004), para os engenheiros cuja experiência reside na dinâmica dos fluidos e na transferência de calor, as abordagens de elementos finitos introduzidas por matemáticos ou engenheiros estruturais podem ser difíceis de seguir. Um modelo numérico para um problema de transferência de calor começa com o modelo físico do problema, um exemplo do qual é mostrado na Figura 8. Como pode ser visto, uma parte do modelo trata da discretização do domínio e a outra realiza a discreta aproximação das equações diferenciais relacionando espaço e tempo, quando necessário. Finalmente, ao combinar os dois, a solução

numérica para o problema é alcançada. A seguir, o processo é detalhado segundo o autor.



Figura 8: O processo de aplicação do Método dos Elementos Finitos.

FONTE: (LEWIS; NITHIARASU; SEETHARAMU, 2004)

Discretização do continuum: divide-se a região da solução em elementos ou sub-regiões não sobrepostas. A discretização em finitos elementos permite a utilização variada das formas com que estes elementos são adotados, por exemplo, triângulos, quadriláteros, etc. Cada elemento é formado pela conexão de um certo número de nós, como visto na Figura 9. O número de nós utilizados para formar um elemento depende do tipo de elemento (ou da função de interpolação utilizada).



Figura 9: Uma malha típica: elementos, nós e arestas.

FONTE: (LEWIS; NITHIARASU; SEETHARAMU, 2004)

Seleção das funções de interpolação ou forma: escolher o tipo de função de interpolação que representa a variação da variável de campo sobre um elemento. O número de nós forma um elemento e a natureza do problema juntamente com o número de incógnitas em cada nó decide a variação de uma variável de campo dentro do elemento.

Formulação da Equação de Forma do Elemento: determinar a matriz das equações que expressam as propriedades do elementos individuais. Por exemplo, uma matriz típica pode ser descrita como:

$$[\mathbf{K}]_e = \frac{Ak}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1\\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.51)

$$\mathbf{f}_e = \begin{bmatrix} Q_i \\ Q_j \end{bmatrix}$$
(2.52)

onde o subscrito e representa um elemento, Q é o calor total transferido, k é a condutividade térmica, l é o comprimento de um elemento linear unidimensional e i e j representam o nó que forma um elemento. As incógnitas são os valores de temperatura nos nós.

Montagem do Sistema de Equações Diferenciais: para encontrar as propriedades do sistema geral, é necessário reunir todos as equações de cada um dos elementos, isto é, combinar as equações matriciais de cada elemento de uma maneira tal que a matriz resultante representa o

comportamento de toda a região da solução do problema. As condições de contorno devem ser incorporadas após a montagem das contribuições individuais de cada elemento, ou seja:

$$[\mathbf{K}][\mathbf{T}] = [\mathbf{f}] \tag{2.53}$$

onde [K] é a matriz global, que é a montagem das matrizes individuais de cada elemento, conforme indicado na Equação 2.51, [f] é o vetor de carga global, que é a montagem dos vetores de carga individuais de cada elemento conforme a Equação 2.52 e [T], é o vetor global desconhecido.

Resolver o sistema de equações: O conjunto resultante de equações algébricas, Equação 2.53, pode agora ser resolvido para obter o valores nodais da variável de campo, por exemplo, temperatura.

Calcular as quantidades secundárias: utilizando os valores nodais da variável de campo, no caso, temperaturas, pode-se então calcular as quantidades secundárias, por exemplo, fluxos de calor espacial.

O caminho acima não é trivial, pois é necessário que os engenheiros que estejam envolvidos no projeto tenham conhecimentos relacionados à física do problema e principalmente as maneiras de se modelar matematicamente o problema. Felizmente, os *softwares*, seguindo o caminho da computação em geral, evoluíram deixando este trabalho, como por exemplo a criação das malhas nas representações geométricas, praticamente automáticas ficando a cargo do usuário apenas escolher o nível de refinamento que será utilizado. Isto se dá pois, quanto maior o refinamento, ou número de elementos utilizados, maior será a precisão do resultado exigindo entretanto maior poder computacional para obtê-lo. Na Figura 10 tem-se o setor de uma placa onde foi realizado o refinamento da malha sob diferentes níveis.

Figura 10: Diferentes níveis de refinamento para um setor.



FONTE: Desenvolvido pelo próprio autor

2.5 Os Materiais, suas Características e Propriedades

Os materiais estão profundamente enraizados em nossa cultura, porém são poucos que se dão conta disto. Seja no setor transporte, no ramo da construção civil, no setor têxtil, na comunicação, na recreação, na produção alimentícia ou em qualquer outro seguimento dos bens de consumo, que se relacionam com nossas atividades diárias, o uso dos materiais influenciará na forma com que se usa o bem, no valor dado ao bem ou mesmo no custo de fabricação ou manutenção do bem. O fato é que o uso de diferentes materiais está em ligação profunda nos caminhos que a história da humanidade tomou, tendo os mesmos sido utilizados na definição das eras de nossa civilização (Idade da Pedra, Idade do Bronze, Idade do Ferro) (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

Já Gupta (2014), adiciona que os avanços nos vários ramos da engenharia não seriam possíveis sem o desenvolvimento dos materiais, sua ciência, sua engenharia e suas tecnologias. O avanço dos computadores valvulados para os eletrônicos na engenharia de computação, o uso do concreto de cimento para o uso destes constituídos de polímeros reforçados na engenharia civil, o uso de metais puros na engenharia mecânica sendo substituídos por aço inoxidável duplo são exemplos de desenvolvimento das tecnologias humanas que só foram possíveis com o concomitante avanço da ciência dos materiais. Vale citar o que nos diz Callister e Rethwisch (2014), quando diferencia *ciência dos materiais* e *engenharia dos materiais*. A primeira envolve investigar o relacionamento existente entre a estrutura e as propriedades de um determinado material, a segunda envolve correlacionar este conhecimento da *estrutura-propriedade* de um material com a produção de um *design* ou um conjunto de propriedades predeterminadas neste mesmo material. A grosso modo a ciência dos materiais desenvolve ou sintetiza novos materiais. A engenharia dos materiais cria novos produtos (ou melhora existentes) fazendo uso destes novos materiais.

Segundo Jahan, Edwards e Bahraminasab (2016), a seleção do material mais apropriado para um determinado propósito tem função crítica no desenvolvimento de um produto. O material utilizado irá influenciar a função que terá o produto, a satisfação do consumidor que adquire-o, o sistema de produção deste bem, assim como o seu ciclo de vida, sua usabilidade, os seus custos (de produção e manutenção), etc. O autor diz ainda que a seleção de material pode ainda ser determinada na escolha de alternativas quando se muda o *design* de um produto já existente, ou quando se objetiva reduzir seu custo, otimizar seu peso, se adequar a uma nova legislação, ou simplesmente satisfazer a necessidade de um cliente. O esforço interdisciplinar requerido, na maioria dos casos, para a escolha de um material constituinte em um novo ou já existente produto não é trivial e o time de engenheiros envolvidos deve ter total acesso às informações existentes a cerca das características de cada material.

Na Figura 11, pode-se ver a classificação existente dos diversos materiais sólidos que de acordo com Callister e Rethwisch (2014) são agrupados em três categorias básicas: metais, cerâmicas e polímeros. Essa classificação é baseada primariamente na estrutura atômica e nas

características físico-químicas destes materiais. Adicionalmente aos materiais ditos básicos, pode-se ver que existem ainda os compósitos, que são combinações de dois ou mais materiais onde se almeja que o novo material tenha características que não exista nos materiais base e que possua as melhores características de cada um dos materiais que o constitua (CALLISTER; RETHWISCH, 2014). As ligas dizem respeito à mistura de dois ou mais metais ferrosos ou não, sendo que possuirão propriedades ligeiramente diferentes dos metais que a constituem e terão sido preparadas como requerimento para aplicações específicas, de acordo com Gupta (2014).





FONTE: (GUPTA, 2014)

A seguir os materiais a serem utilizados neste estudo.

2.5.1 Materiais Metálicos

Segundo Callister e Rethwisch (2014), os metais são constituídos por um ou mais elemento metálico (ferro, alumínio, cobre, titânio, ouro, níquel, etc) e em quantidades extremamente menores por não metais (carbono, nitrogênio, oxigênio). Sua estrutura atômica está arranjada de forma extremamente organizada e são muito mais densos que os materiais cerâmicos ou poliméricos. Os metais são caracteristicamente rígidos e duros sendo ainda dúcteis (podendo deformar sem sofrer fratura, sem quebrar), sendo por isso largamente usados em aplicações estruturais. Por possuírem grande quantidade de elétrons não ligados fortemente aos átomos, possuem grande condutividade térmica e elétrica (Alumínio, Cobre, Prata e Ouro), pouca ou nenhuma transparência, superfície lustrosa ao ser polida e em alguns casos (Ferro, Cobalto e Níquel) valiosas propriedades magnéticas (GUPTA, 2014).

Aço

O aço, de acordo com Tver (2012), é uma liga que tem como componentes o ferro e o carbono sendo resultado do refino e tratamento do ferro gusa e/ou de sucata. A quantidade de carbono contido na liga variará de 0.08% a 2%, sendo chamado de *ferro fundido*, quando a quantidade ultrapassa este intervalo. Outros elementos podem ser adicionados para se obter outras características desejáveis ou remover algumas características indesejáveis além de alterarem o limite de 2% de carbono. O aço tem plasticidade suficiente para ser forjado a quente ou a frio, sendo que sua força e dureza diretamente controlada por um ou mais dos seguintes métodos:

- 1. Variação da quantidade de carbono na liga.
- 2. Introdução de outros elementos na liga.
- 3. Tratamento térmico adequado.

Alumínio

O alumínio e as ligas formadas por este elemento são caracterizadas pela leveza, alta relação peso-força, boa resistência à corrosão, alta condução térmica e elétrica, não toxicidade e facilidade de fabricação. Eles são usados tanto no forjamento quanto em muitas outras aplicações, como na construção de aeronaves, em produtos e indústrias de processos químicos e da construção civil, bem como uso doméstico. A força do alumínio puro é aumentada tanto pelo trabalho a frio quanto pela constituição da liga, mas isso também reduz sua resistência à corrosão. Uma das principais limitações do alumínio é o seu baixo ponto de fusão 1220°F ou 660°C, e sua incapacidade de ser utilizado a temperaturas acima de 572°F (300°C) pela ocorrência de deformação do material, apesar da sua alta resistência à oxidação. Apesar disto, o alumínio, tendo uma célula unitária cúbica centrada, mantém sua ductilidade a temperaturas muito baixas. O alumínio de alta pureza, 99,9% AI, é muito macio e dúctil, mas é consideravelmente reforçado pela adição de pequenas pequenas quantidades de elementos de liga como silício, manganês, ferro e cobre. Alumínio comercialmente puro e algumas de suas ligas sólidas pode ser endurecido apenas pelo trabalho frio, mas muitas ligas que foram desenvolvidas contêm elementos como cobre, zinco ou magnésio. A liga usada mais conhecida é chamada de Duralumim, contendo de 2,5 a 5,5% de cobre e pequenas quantidades de magnésio e manganês. As ligas de alumínio que contêm o magnésio atingem as suas propriedades ótimas por envelhecimento natural à temperatura ambiente, enquanto que aqueles sem magnésio requerem envelhecimento artificial a temperaturas elevadas (TVER, 2012).

Cobre

É semelhante ao níquel em sua capacidade de formar ligas com uma ampla gama de metais. Os minérios de cobre geralmente são sulfetos. A natureza e o teor de cobre encontrado

no minério de cobre determinam o melhor método de produção de cobre metálico. O cobre pode se apresentar da seguinte forma no ambiente:

- 1. Minérios em que o cobre está presenta na forma de sulfetos fundidos a partir de escória derretida.
- 2. Cobre presente em minérios na forma de óxidos, em cobre nativo ou quase puro.
- 3. Minérios oxidados com baixo grau de cobre.

Nos dois primeiros casos, podem ser fundidos no alto-forno ou em lareira aberta utilizando algum tipo de fundição, depois refinado a fogo, em alguns casos, eletro-refinado. Para o terceiro caso geralmente são lixiviados com soluções de ácido sulfúrico e depois concentrados e classificados, sendo que aproximadamente 90% de cobre estará pronto para a fundição. São produzidos vários tipos de cobre, dependendo da fonte a partir da qual foram obtidos e do método utilizado. Estes incluem cobre catódico, cobre eletrolítico e cobre de alta condutividade livre de oxigênio.

O cobre é conhecido por sua alta condutividade tanto para o calor quanto para a corrente elétrica, com uma grande quantidade usada em barramentos e outros tipos de condutores elétricos. A condutividade terminal do cobre, cerca de $655 \frac{kWC}{cm}$, é quase dez vezes maior do que o aço. O cobre é usado para arrefecedores, moldes contínuos e outros equipamentos que devem remover o calor. O cobre puro é quase ineficaz devido à dificuldade de manter calor de soldagem suficiente na área da solda. Raramente é soldado por resistência. O cobre puro tem um módulo de elasticidade de $1, 1 \times 10^8 kPa$, uma força de elasticidade de $6, 2 \times 10^4 kPa$ e uma força máxima de $2, 2 \times 10^5 kPa$. O alongamento é de cerca de 50% em 5, 1cm). O ponto de fusão do cobre puro é de $1083^{\circ}C$. Contudo, o cobre não pode ser utilizado a temperaturas muito baixas devido à perda de força e oxidação. As notas de cobre atuais devem ser relativamente puras, uma vez que as adições de liga, mesmo em pequenas quantidades, aumentam consideravelmente a resistividade. O cobre eletrolítico, contendo 0,04% de oxigênio, é usado para condutores. Este cobre, livre de alto teor de oxigênio, é o melhor disponível. O cobre não é usado nas indústrias de processamento de alimentos porque muitos compostos de cobre são tóxicos. As ligas de cobre são numerosas: zinco, estanho, alumínio e silício, todos servindo como endurecedores nestas ligas. Em geral, os latões são ligas de cobre e zinco, e bronze são ligas de cobre e elementos que não o zinco.

2.5.2 Materiais Cerâmicos

Cerâmicas são combinações de materiais metálicos e não-metálicos. Os mais frequentes são óxidos, nitretos e carbonetos. Por exemplo:

1. Óxido de Alumínio Al_2O_3 , a Alumina

- 2. Dióxido de Silicone SiO_2
- 3. Carboneto de Silicone SiC
- 4. Nitreto de Silicone Si_3N_4

além das chamadas cerâmicas tradicionais como a porcelana, o cimento e o vidro.

Mecanicamente, os materiais cerâmicos possuem dureza e rigidez como os metais, porém tem baixa ductilidade, pouca ou nenhuma maleabilidade, e são altamente suscetíveis à fratura quando submetidos a alguma força. Além disso, as cerâmicas possuem baixa condutividade térmica e elétrica sendo usados como isolantes em ambos os casos, sendo também mais resistentes que metais e polímeros a altíssimas temperaturas. As cerâmicas podem ser transparentes, translúcidas, ou opacas podendo ainda ter características magnéticas, como em alguns óxidos (Fe_3O_4) (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

Alumina - Óxido de Alumínio

De acordo com Heimann (2010), a alumina é o material de engenharia estrutural mais econômico e amplamente utilizado na família das cerâmicas avançadas. As matérias-primas a partir das quais este material de alto desempenho e excelente qualidade técnica é produzido, estão prontamente disponíveis e com preços razoáveis, resultando em um bom custo benefício para sua manufatura.

Por isso, a alumina (*corundum*, $\alpha - Al_2O_3$) é considerada a "matéria-prima da indústria de cerâmica estrutural". Sua alta dureza, resistência à abrasão e inércia química a torna um material ideal para se comportar bem em uma variedade de ambientes agressivos, que vão desde a indústria de mineração e a indústria química, assim como na indústria metal-mecânica e nas aplicações biomédicas. Sua natureza intrinsecamente isolante, juntamente com a sua condutividade térmica moderada, sua permissividade dielétrica razoavelmente baixa e baixa perda dielétrica, oferecem uma infinidade de aplicações que incluem substratos eletrônicos para circuitos integrados e velas de ignição automotivas. No entanto, essas propriedades vantajosas são parcialmente compensadas pelo baixo nível do material em relação à resistência à tração e flexão e resistência à fratura e baixo choque térmico. Assim, a decisão de incluir a alumina em em projetos de engenharia sujeitos à abrasão devem ser avaliadas parcimoniosamente de modo a evitar falhas catastróficas durante o serviço em condições difíceis (HEIMANN, 2010).

Concreto

Segundo Miron e Koleva (2017), o concreto é um material moldável em que pedras de cascalho naturais de tamanhos bem classificados são unidos por uma matriz de cimento, que fornece força ao concreto. O concreto é um material durável e sustentável, amplamente utilizado para edificação e infra-estrutura. Quando devidamente projetado e construído, ele pode resistir

a graves tempestades e terremotos, bem como ambientes agressivos. No entanto, o concreto é um material quebradiço sendo então reforçado com barras de aço (concreto armado) ou com tendões de aço pré-esforçados (concreto pré-esforçado), tendo sua aplicabilidade grandemente aumentada. Mesmo o concreto armado, também é propenso a vários mecanismos de degradação, principalmente corrosão do aço, que afeta sua durabilidade e vida útil. Isso leva a uma forte preocupação financeira, ambiental e de segurança.

A importância do concreto armado como material de construção é devido à suas propriedades estruturais, físicas e químicas, e sua relação custo-eficiência aliada à eficácia. O concreto é uma entidade consciente, capaz de criar formas incríveis enquanto fornece estruturas resistentes. É um material capaz de suportar demandas modernas. Essa singularidade de concreto pode fazer parecer que é um material estranho à luz dos avanços científicos de hoje. Na verdade, todos os concretos podem parecer os mesmos. Certamente, o produto básico permaneceu inalterado desde a sua invenção. Não obstante, as propriedades de concreto dependem em grande parte das condições de exploração (por exemplo, ambiente) e a quantidade e qualidade de seus componentes, incluindo o cimento Portland. A seleção, o uso dos componentes são importantes para projetar adequadamente e, tanto quanto economicamente quanto possível, as características desejadas de qualquer tipo particular de concreto (MIRON; KOLEVA, 2017).

Vidro

O vidro é um estado de matéria que apresenta características semelhantes a sólidos cristalinos e líquidos. Em um nível macroscópico, o vidro parece ser como sólido. É rígido e permanece em uma peça quando removido de um recipiente. No entanto, em um nível molecular, os vidros são mais como líquidos. Em sólidos cristalinos, as moléculas são organizadas de forma ordenada. Em líquidos, eles são organizados aleatoriamente. Este arranjo aleatório também é uma característica do vidro.

O vidro é tipicamente feito por aquecimento de compostos cristalinos a temperaturas suficientemente altas para derreter. O derretimento quebra a estrutura molecular ordenada, deixando-os em um estado desordenado. Quando o material derretido é arrefecido, as moléculas ficam trancadas antes de poderem se reformar na estrutura cristalina ordenada. As propriedades de um vidro específico, como dureza, fragilidade, clareza e resistência química e térmica dependem da sua composição química (MADE, 2017).

2.5.3 Materiais Poliméricos

Os polímeros, que incluem plásticos e borrachas, em sua maioria são compostos orgânicos quimicamente baseados em carbono, hidrogênio e algum outro elemento não-metálico tais como oxigênio, nitrogênio ou enxofre. Possuem estrutura molecular muito extensa. Os mais comuns são o Polietileno, o nylon, o Policloreto de vinil, o Poliestireno, etc. Tais materiais possuem caracteristicamente baixa densidade, não são rígidos nem fortes, possuindo porém maleabilidade

sendo utilizados na confecção de produtos de formatos complexos. Tem baixa reatividade, porém baixa resistência a temperaturas modestas ou altas limitando seu uso. Ainda, possuem baixa condutividade elétrica e são totalmente não magnéticos (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

Policarbonato

É considerado um tipo especial de poliésteres, onde grupos de fenóis di-hídricos estão ligados através de ligações carbonatadas. Eles podem ser produzidos por um variedade de métodos. Os aditivos podem ser usados para melhorar a estabilidade térmica, a coloração e reatividade à luz ultravioleta do polímero, enquanto a fadiga e algumas propriedades mecânicas podem ser melhoradas pelo reforço de fibra de vidro. Os policarbonatos têm alta resistência ao impacto, excelente resistência à fluência, limites de temperatura amplos, alta estabilidade dimensional, boas propriedades elétricas. Outras vantagens são a não toxicidade, resistência química, colorabilidade, resistência à abrasão, dureza e rigidez apesar da sua ductilidade. Eles têm alta resistência ao impacto. Eles têm limites de temperatura excepcionalmente largos e um encolhimento baixo e uniforme das dimensões do molde permitindo seu uso em projetos onde a produção de peças de precisão com baixa tolerância (TVER, 2012).

Poliestireno

Relacionado aos plásticos de polivinilo, sendo feito de vinil benzeno, comumente chamado estireno, sendo encontrado no alcatrão do carvão, mas a maior parte é produzida sinteticamente. A polimerização ocorre a partir da aplicação de calor e catalisadores. A resina é cristalina, leve, inodora e insípida. Não é afetado por ácidos e álcalis. Tem a menor absortividade de água de todos os plásticos e tem uma excelente estabilidade dimensional. O poliestireno é um tanto quebradiço e tem apenas resistência à tração moderada, mas não mostra perda de força até temperaturas de -40° F (-40° C). Está disponível em cores ilimitadas, mas tem uma tendência a descolorir quando exposto à luz solar. O poliestireno é comercialmente preparado via reação de benzeno e etileno numa fase gasosa para obter etil-benzeno, que é desidrogenado a 1112°F (600°C). O monômero de estireno resultante, vinil benzeno, é então polimerizado para o poliestireno que é um termoplástico sólido transparente. Muitos tipos de resina estão disponíveis para se adequar a uma variedade de usos finais. O estireno também é copolimerizado ou misturado com outros termoplásticos para melhorar propriedades específicas ou modificado com aditivos para auxiliar o processamento. Artigos para casa, embalagens, brinquedos, telhas de parede, botões, e outras muitas utilidades novas são moldadas em uma ampla escolha de cores sólidas e manchadas (TVER, 2012).

Polietileno

Os polímeros de etileno estão disponíveis como centenas de compostos de estruturas muito diferentes: copolímeros, misturas de polímeros, composições preenchidas, produtos vinculáveis,

etc. Como uma classe geral de materiais, o Polietileno é conhecido por possuir excelentes propriedades dielétricas, excelente resistência química a solventes, ácidos e álcalis, alta tenacidade, boas propriedades de barreira e sua adaptabilidade relativa a vários técnicas de processamento. As principais características estruturais do polímero que influenciam nas propriedades do Polietileno são:

- 1. grau de cristalinidade.
- 2. peso molecular médio.
- 3. distribuição de peso molecular.

O polietileno é parcialmente cristalino e parcialmente amorfo e a porcentagem de cristalinidade tem um efeito marcante nas propriedades físicas. A ramificação da cadeia lateral é o fator chave que controla o grau de cristalinidade. A ramificação no homopolímero de Polietileno de baixa densidade, ocorre principalmente com grupos etil e butil (ramificações de cadeia curta) a uma concentração de cerca de 10 a 20 ramos ou 100 átomos de carbono. Alguns ramos de cadeia longa também estão presentes. O polietileno consiste em uma mistura de moléculas de tamanhos variados, consequentemente, sua estrutura deve ser descrita em termos de tamanho, peso molecular e distribuição de tamanhos, distribuição de pesos moleculares. As propriedades do Polietileno podem ser ajustadas pelo uso de aditivos como antioxidantes e estabilizadores de luz ultravioleta. As várias classes e tipos de antioxidantes utilizados no Polietileno incluem fenóis, aminas e fosfitos. O grau de cristalinidade influencia a fabricação das propriedades desejadas do Polietileno. Os polietilenos e seus copolímeros são matérias-primas essenciais em grandes indústrias como embalagem, eletrodomésticos, transporte, comunicação, eletricidade energia, construção civil e utensílios domésticos. Alguns dos principais usos dos filmes de polietileno, são as embalagens de alimentos, sacos de vestuário, revestimentos de construção, filme agrícola, sacos de lixo e sacos de transporte (TVER, 2012).

2.6 As Ferramentas Computacionais

2.6.1 Autodesk Fusion 360

O Fusion 360 é uma ferramenta CAD / CAM / CAE baseada em nuvem para o desenvolvimento de produtos colaborativos. O Fusion 360 combina modelagem rápida, fácil, sólida e precisa, permitindo que você faça seus projetos manufaturáveis. O Fusion 360 é uma plataforma de colaboração habilitada para a nuvem que permite que os designers compartilhem instantaneamente, reveja os dados do projeto, gerencie as versões e compartilhe ideias em qualquer dispositivo, a qualquer momento. É um aplicativo CAM 3D com ferramentas de modelagem de forma livre perfeitamente integradas em uma única aplicação. É o software de simulação e um aplicativo CAM para operações de torneamento e moagem. Devido aos recursos de armazenamento em nuvem do Fusion 360, ele pode funcionar sem problemas no MacOS e no Windows, oferecendo exatamente a mesma funcionalidade em ambos os sistemas operacionais. O suporte à nuvem também permite o fácil armazenamento de arquivos e pode ser acessado a partir de várias máquinas e compartilhado entre qualquer número de colaboradores. O Fusion 360 também oferece um conjunto robusto de ferramentas de modelagem e o software pode manipular facilmente várias peças e componentes para montagem em um único projeto e também importar e exportar uma enorme variedade de tipos de arquivos.

O Autodesk Fusion 360 permite ainda que engenheiros inovadores projetem de forma diferente usando uma única ferramenta que combina *design* industrial e mecânica colaborativa, em um pacote fácil de usar e acessível (AUTODESK, 2018).

2.6.2 Autodesk CFD

O software CFD fornece ferramentas flexíveis de fluxo de fluido e simulação térmica com maior confiabilidade e desempenho. A solução Autodesk CFD oferece simulações rápidas e precisas, além de ferramentas para cálculos de fluxo flexível e térmicos, no qual permitem prever a performance de um produto, otimizar projetos e validar comportamentos antes mesmo da fabricação, minimizando assim, possíveis custos de protótipos físicos e tornando todo o fluxo de projeto ainda mais rápido.

O Autodesk CFD pode ajudar diretamente no fluxo de fabricação e controle, como válvulas, reguladores, turbinas e compressores ao simular todo o fluxo de fluídos de um modelo 3D. O software Autodesk CFD fornece ferramentas rápidas, precisas e flexíveis de fluxo de fluido e simulação térmica para ajudar a prever o desempenho do produto, otimizar projetos e validar o comportamento do produto antes da fabricação, minimizando a dependência de protótipos físicos dispendiosos e ajudando você a obter produtos inovadores no mercado mais rapidamente.

O Autodesk CFD é uma ferramenta que solucionará quase qualquer problema de transferência de calor ou fluxo de fluido (AUTODESK, 2017).

2.6.3 Matlab

Matlab é um ambiente de análise numérica e linguagem de programação de quarta geração que integra computação, visualização e programação em um ambiente fácil de usar onde os problemas e as soluções são expressas em notação matemática familiar (MATHWORKS, 2017). Os usos típicos incluem:

- 1. Matemática e Computação.
- 2. Desenvolvimento de algorítimos.
- 3. Modelagem, simulação e prototipagem.

- 4. Análise, exploração e visualização de dados.
- 5. Gráficos científicos e de engenharia.

O Matlab é usado por engenheiros e cientistas em vários campos, como processamento de imagem e sinal, comunicações, sistemas de controle para indústria, design de grade inteligente, robótica e computação aplicada à finanças. É um sistema interativo cujo elemento básico de dados é uma matriz que não requer dimensionamento. Isso permite que você resolva muitos problemas de computação técnica, especialmente aqueles com formulações de matriz e vetor, em uma fração do tempo que levaria para escrever um programa em uma linguagem não-interativa escalar, como C ou Fortran.

O programa evoluiu ao longo de um período de anos com a contribuição de muitos usuários. Em ambientes universitários, é a ferramenta de ensino padrão para cursos introdutórios e avançados em matemática, engenharia e ciência. Na indústria, é a ferramenta de escolha para pesquisa, desenvolvimento e análise de alta produtividade.

O Matlab possui uma família de soluções específicas de aplicativos, chamadas de caixas de ferramentas. Muito importante para a maioria dos usuários, as caixas de ferramentas permitem que você aprenda e aplique tecnologia especializada. As caixas de ferramentas são coleções abrangentes de funções (arquivos com extensão "m") que estendem o ambiente para resolver classes específicas de problemas. As áreas em que as caixas de ferramentas estão disponíveis incluem processamento de sinal, sistemas de controle, redes neurais, lógica difusa, wavelets, simulação, equações diferenciais parciais e muitos outros.

3 Metodologia

Este trabalho, de caráter exploratório, realizado através de procedimentos técnicos de pesquisa e fundamentado sobre revisão bibliográfica dentro dos vários temas propostos é estruturado da seguinte forma:

- 1. Simulação da Transferência de Calor Estável.
- 2. Simulação da Transferência de Calor Transiente.
- 3. Simulação do Estresse Térmico.
- 4. Simulação de Trocadores de Calor.

3.1 Simulação da Transferência de Calor Estável

As simulações estável e transiente de transferência de calor será feita na análise simplificada dos discos de fixação dos tubos utilizados na peça da Figura 12. Os tubos em questão são para transporte de água a altas temperaturas e a simulação se dá para análise do melhor material a ser o constituinte dos discos de forma a não dilatarem demasiadamente oferecendo risco de rompimento dos tubos ou desafixação dos próprios discos fixadores.



Figura 12: Peça original dos fixadores de tubulação.

FONTE: desenvolvida pelo autor

O cenário proposto para esta primeira simulação, consiste em uma peça exposta a uma temperatura ambiente de $0^{\circ}C$, com fontes de calor em algumas de suas faces, onde os fenômenos de condução e convecção irão determinar sua situação de equilíbrio. Neste sentido, só serão necessários os dados da peça, o coeficiente de condutividade térmica do material constituinte e o coeficiente de transferência de calor por convecção do ambiente.

A peça possui formato cilíndrico, com de raio 50,00 milímetros, espessura de 10,00 milímetros, possuindo orifício central quadriculado com aresta de 5,00 milímetros e oito orifícios circulares de raio no valor de 2,00 milímetros, distribuídos pela peça conforme a Figura 13. Tais orifícios serão os locais que terão fonte de calor no valor de 5W.



Figura 13: Peça utilizada na simulação estável.

FONTE: desenvolvida pelo autor

Os materiais que serão utilizados nesta simulação Aço, Alumínio, Cobre, Concreto, Alumina, Vidro, Policarbonato, Poliestireno e Polietileno, possuem seus respectivos Coeficientes de Condutividade Térmica nas tabelas do Apêndice A. Como coeficiente de transferência de calor, supõem-se que a peça está envolta em ar, então com valor de $10\frac{W}{m^2s}$.

O *software* utilizado nesta simulação será o Matlab, fazendo uso do pacote de ferramentas das Equações Diferenciais Parciais. O Matlab aceita que os comandos sejam inseridos um a um em seu "*prompt*", porém, o mais sensato é a confecção de um *script* onde os comandos são inseridos em um arquivo e executados de uma só vez. Assim, no Apêndice B, é possível a visualização completa do *script*, este baseado no trabalho de (RAMASWAMY, 2017).

O *script* realiza em seis passos os procedimentos necessários para a resolução do problema. No primeiro passo, importa-se a geometria da peça que desenhada em programa específico, foi importada em um arquivo que a descreve numericamente mas que pode ser lido facilmente pelo Matlab. No segundo passo informa-se os coeficientes que serão utilizados na Equação Diferencial Parcial que rege o fenômeno.Assim, informado os coeficientes de condutividade térmica de cada material na variável c e fixa-se os coeficientes da equação como zero.

Já no terceiro passo, as condições de contorno são configuradas. É definida a temperatura ambiente, o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, e as faces da peça que estarão sob a ação da convecção e as que serão origem de calor com o respectivo valor em $\frac{W}{m^2s}$.

No passo quatro, após todas as condições de contorno terem sido estipuladas, é criada a malha da peça. A visualização do *meshing* pode ser vista na Figura 14.



Figura 14: Malha criada pelo Matlab na peça sob análise.

FONTE: desenvolvida pelo autor

Finalmente, no quinto e sexto passo ocorre a solucionamento e a visualização do problema respectivamente. Na Figuras 15, 16 e 17, tem-se uma demostração dos resultados obtidos para representantes dos três tipos de materiais analisados.

Figura 15: Simulação Estável do Cobre



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 16: Simulação Estável do Concreto



FONTE: desenvolvida pelo autor





FONTE: desenvolvida pelo autor

3.2 Simulação da Transferência de Calor Transiente

O segundo cenário a ser simulado, agora considerando a variação do tempo, será da mesma peça utilizada no cenário anterior, agora envolta em ar a temperatura de zero graus Celsius, porém a quantidade de calor irá variar nos primeiros dez segundos, ocorrendo então um resfriamento da peças nos vinte segundos restantes da simulação. Na Figura 18 pode-se ver como foi montando o cenário, observando que a envoltura é suficiente para apenas não tocar a peça com seus limites, sendo assim o cenário isolado do meio externo.


Figura 18: Aplicação das condições de contorno para a simulação transiente.

FONTE: desenvolvida pelo autor

Neste cenário, faz-se uso de um segundo *software*, o *Autodesk CFD v2018*, que também se utiliza do método dos elementos finitos para realizar suas análises. Diferentemente do método utilizado no Matlab, apesar de possível, não será utilizada mais a criação de *scripts* para a automatização dos processos, porém o processo de "montagem"é semelhante.

Inicialmente é construída a peça, que já havia sido feito para o cenário anterior, utilizando o *software* de desenho técnico apropriado e em seguida o sistema ar mais peça é modelado já dentro do *Autodesk CFD* conforme a Figura 18. Após a modelagem do sistema, construiu-se as condições de contorno que neste cenário serão primeiramente as faces dos orifícios que receberão a injeção de calor, de acordo com a curva na Figura 19, variando positivamente nos primeiros dez segundos e esfriando nos vinte segundos restantes, conforme já informado.



Figura 19: Gráfico da variação de Calor fornecido à peça.

FONTE: desenvolvida pelo autor

Por fim, as faces restantes da peça são declaradas com coeficiente de convecção para $10W/m^2$ sob temperatura de 0°C e é ainda necessário que o isolamento com o meio externo seja declarado também como uma condição de contorno. Como única condição inicial, o sistema é declarado com temperatura de 0°C. Como etapa final, é construída a malha do sistema. Diferentemente do cenário anterior não apenas a peça possuirá malha, mas também o ambiente em que a malha está inserida, pois este meio irá receber o calor proveniente da peça através da convecção. Cabe ressaltar, que neste cenário o ar está configurado para não apresentar velocidade em nenhuma das dimensões. Nas Figuras 20a e 20b pode-se ver a malha gerada para o sistema e para a peça, respectivamente.



Figura 20: Malha Gerada para Sistema e Peça.

FONTE: desenvolvida pelo autor

Os dados serão analisados para cada material, porém abaixo têm-se as duas formas de medições que foram realizadas:

Figura 21: Os dois aspectos da temperatura sob análise.

(a) Comportamento das Temperaturas Máximas







FONTE: desenvolvida pelo autor

Na Figura 21a observa-se o comportamento das temperaturas máximas do sistema ao longo dos trinta segundos de medição. Já na Figura 21b, medições realizadas transversalmente à peça, no instante de dez segundos dos diferentes materiais.

3.3 Simulação do Estresse Térmico

Neste terceiro cenário os materiais analisados serão submetidos novamente a uma fonte de calor. Porém, já analisados sob o aspecto da simples condução deste calor, agora verifica-se um dos efeitos que diferentes materiais podem sofrer: o estresse térmico. Para que esta análise seja realizada serão utilizados dois corpos que estarão em contato. Um dos corpos, a base, de um material qualquer será acoplada ao segundo corpo, este sim sob análise. Abaixo nas Figuras 22a e 22b, pode-se ter uma ideia geral do *design* de cada uma dos corpos.



Figura 22: Os dois corpos na simulação do estresse térmico.

FONTE: desenvolvida pelo autor

O problema proposto neste terceiro cenário consiste de um dissipador de calor, a peça, acoplado à uma base que remete a ideia de uma placa mãe de um computador. Este dissipador, em contato direto com o processador desta placa mãe, irá receber um calor constante de 25W na região em destaque na Figura 23. Será observado então o comportamento dos diferentes materiais quando estes foram utilizados na "manufatura"da peça.

Figura 23: Local de injeção de calor na peça.



FONTE: desenvolvida pelo autor

A modelagem do problema, assim como nos cenários anteriores, segue uma determinada ordem. Primeiramente tem-se a confecção dos *designs* que já foi realizada previamente. Em seguida são definidos os materiais que constituirão a base e a peça. Para a base, o material constituinte conforme será explicado a seguir, se torna irrelevante. Já para a peça, o material será cada um dos estudados, efetuando-se então nove simulações.

Em seguida, torna-se necessário definir-se as cargas que irão agir sobre o sistema. Neste caso, três:

- Força da gravidade.
- Fonte de calor.
- Convecção.

O sistema então estará todo ele sofrendo ação da força gravitacional. Conforme dito antes, irá receber de forma constante um calor de 25W na base da peça e todas as superfícies estarão sob a ação de um coeficiente de convecção para $10W/m^2$ sob temperatura de $20^{\circ}C$, sendo esta a temperatura inicial do sistema.

Além das cargas ao que o sistema estará sujeito, para que exista o *estresse* é necessário que o sistema esteja sujeito a restrições. Então, tanto a base quanto a peça estarão sujeitas às mesmas. Primeiramente a base, motivo pelo qual o material constituinte não é relevante, estará totalmente restrita conforme a Figura 24 não possibilitando que a mesma efetue influência sobre o comportamento da peça sob análise. Pode-se observar os cadeados indicando as faces restritas, estas que estão relacionadas a qualquer tipo de deslocamento nos eixos x, y ou z.

Figura 24: Restrições aplicadas à base do sistema



FONTE: desenvolvida pelo autor

Adicionalmente, de forma que a peça também não sofra um estresse térmico de difícil análise em relação à base, a mesma também teve seus pontos de contato restringidos de expansão conforme a Figura 25.





FONTE: desenvolvida pelo autor

Por último, será criado novamente a malha de todo o sistema e no caso dos dois corpos, deve se estar atento ao limite dado para o tamanho dos elementos da malha em relação a tolerância e o valor da distância entre os corpos. Após, a criação da malha do sistema, Figura 26, o mesmo está pronto para ser solucionado pelo *software*.



Figura 26: Malha dos elementos finitos do sistema acoplado.

FONTE: desenvolvida pelo autor

3.4 Simulação de Trocadores de Calor

O último cenário a ser analisado é aquele onde ocorre a troca de calor entre um sólido e um fluido. O desenvolvimento e montagem ocorreu de forma que a peça fosse posicionada na região central de um *túnel de vento*. A peça, semelhante à usada no cenário anterior também possui formato de um dissipador de calor que pode ser encontrado em dispositivos computacionais tendo dimensões cúbicas aproximadas a 5cm em cada aresta conforme a Figura 27.



Figura 27: Design do Dissipador de Calor

FONTE: desenvolvida pelo autor

O *Túnel* entretanto possui dimensões diversas, tendo comprimento de 100cm e tanto largura como altura de 20cm acomodando a peça satisfatoriamente em seu interior optando-se por utilizar a circulação de ar sob regime turbulento em todas as simulações.

Como no cenário da condução de calor em modo transiente, utilizou-se o *software* Autodesk CFD 2018, tendo então todo o processo de construção da simulação sido realizado da mesma forma.

Após a realização do *design* e a confecção da geometria do cenário, conforme Figura 28, restaram a definição dos fatores e valores de contorno, valores iniciais e por fim a criação da malha.



Figura 28: Definição do Design e Geometrias do sistema.

FONTE: desenvolvida pelo autor

As condições de contorno serão o coeficiente de convecção para o ar em uma velocidade de 10m/s a $25^{\circ}C$ calculado automaticamente pelo software, uma fonte de calor de 95W na região inferior da peça similar ao contato do processador no dissipador de calor, idêntico ao cenário anterior e um túnel simetricamente fechado tendo à sua saída pressão de 0Mpa.

Como condições iniciais, configura-se a temperatura inicial em $25^{\circ}C$ e velocidade de entrada no túnel de 10m/s.

Por fim, o a geração da malha de elementos finitos é realizada pelo software de modo conjugado para a realização dos cálculos, contendo tanto a peça como todo o ambiente que a circunda conforme Figura 29a. Na Figura 29b pode-se ver somente a peça destacada do sistema.

Figura 29: Malhas geradas para o sistema.

(a) Malha gerada para todo o sistema túnel e peça



(b) Malha da peça destacada.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Após toda a configuração dos parâmetros, o sistema pode ser solucionado.

4 Análise dos Resultados

Este capítulo se destina à apresentação geral dos resultados tendo como foco maior a análise dos mesmos, sendo que a integra destes resultados encontra-se nos Apêndices C, D, E e F, seguindo a ordem dos cenários para Simulação Estável da Condução de Calor, Simulação Transiente da Condução de Calor, Simulação do Estresse Térmico e Simulação dos Trocadores de Calor, respectivamente.

4.1 Cenário Estável

A simulação efetuada de modo estável da condução de calor utilizando o *software* Matlab foi feito de forma simples, já que foi utilizado uma única Equação Diferencial Parcial. O resultado então desta simulação ou resolução da equação é então também simples. Entretanto, a simplicidade se deve não somente ao uso de uma única equação, mas também ao contexto em si:

• Apenas uma informação de cada material: Condutividade Térmica.

Material	Condutividade Térmica		
	W/mK		
Aço	51,9		
Alumínio	222,0		
Cobre	388,0		
Alumina	16,0		
Concreto	1,5		
Vidro	1,4		
Policarbonato	0,2		
Poliestireno	0,13		
Polietileno	0,48		

Tabela 4: Condutividade Térmica dos Materiais

FONTE: (CALLISTER; RETHWISCH, 2014)

- Simplicidade e dimensões reduzidas da peça.
- Constância das condições iniciais e de contorno.

Sendo assim, como poucos dados de entrada, o que se verificou foi que os resultados apenas se diferenciam na distribuição da temperatura ao longo dos 41820 elementos da peça no final da simulação, conforme os gráficos das distribuições nas Figuras 30 e 31.

Figura 30: Gráfico do espectro de temperatura ao longo dos elementos da peça



(a) Materiais metálicos: Aço (azul), Alumínio (laranja), Cobre (amarelo)

(b) Materiais cerâmicos: Alumina (azul), Concreto (laranja), Vidro (amarelo)



(c) Materiais poliméricos: Policarbonato (azul), Poliestireno (laranja), Polietileno (amarelo)



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 31: Gráfico ordenado do espectro de temperatura dos elementos finitos da peça



(a) Materiais metálicos: Aço (azul), Alumínio (laranja), Cobre (amarelo)

(b) Materiais cerâmicos: Alumina (azul), Concreto (laranja), Vidro (amarelo)



(c) Materiais poliméricos: Policarbonato (azul), Poliestireno (laranja), Polietileno (amarelo)



Na primeira figura, têm-se as distribuições de temperatura da forma que elas se apresentaram ao final da simulação e na segunda figura, as temperaturas foram ordenadas de modo que possa-se identificar que os diferentes materiais acabam se comportando em níveis. Traz-se então os gráficos para mais próximo do entendimento, através dos números com a Tabela 5.

Material	Máxima °C	Média °C	Mínima ° C	Desvio Padrão $^{\circ}C$
Aço	1,2680	0,7235	0,1230	0,2403
Alumínio	0,4130	0,2861	0,1366	0,0563
Cobre	0,3014	0,2289	0,1415	0,0322
Alumina	38,800	19,880	0,0946	8,3130
Concreto	3,7750	2,0030	0,1161	0,7793
Vidro	41,570	21,290	0,0929	8,9070
Policarbonato	290,10	148,10	-0.1031	62,350
Poliestireno	446,20	227,80	-0,2578	95,930
Polietileno	120,90	61,810	0,0458	25,980

Tabela 5: Estatística das Distribuições de Temperatura

FONTE: desenvolvida pelo autor

Ao utilizar-se a Tabela 4 comparando com os resultados acima confirma-se uma ordem proporcional inversa: quanto maior o valor da Condutividade Térmica do material analisado, menor serão as temperaturas atingidas. Ou seja, os metais possuindo maior valor de condutividade térmica, apresentaram menor valor de temperatura. O inverso ocorre para os polímeros, que possuem os menores valores de condutividade térmica, tendo elementos que atingiram até $446, 2^{\circ}C$ como o Poliestireno. No caso dos materiais cerâmicos, que possuem valores médios de condutividade térmica, suas temperaturas atingiram valores intermediários sendo porém possível observar que dentre estes mesmos materiais cerâmicos, os que possuem menor condutividade térmica atingiram as maiores temperaturas.

4.2 Cenário Transiente

Neste cenário, adicionalmente à relação da temperatura com a condutividade térmica, tem-se também a difusividade térmica que diz o quão rápido o calor se propaga pelo material. Esta informação inicial é necessária, já que no cenário transiente o tempo se torna parte do problema.

Conforme informado no capítulo sobre a metodologia, neste cenário pode-se dizer que existem dois momentos. Nos primeiros dez segundos da simulação ocorre a injeção de um calor crescente, a partir de então, nos próximos vinte segundos o sistema estará sujeito a um resfriamento. Na Tabela 6 estão os dados de entrada dos materiais estudados e nas Figuras 63a,

85a e 107a pode-se observar o comportamento das temperaturas máximas dos materiais através do tempo de simulação.

Material	Condutividade Térmica	Difusividade Térmica	
	W/mK	$10^{-6} \frac{m^2}{s}$	
Aço	51,90	13,60	
Alumínio	222,00	90,62	
Cobre	388,00	113,36	
Alumina	16,00	5,73	
Concreto	1,50	0,08	
Vidro	1,40	0,74	
Policarbonato	0,20	0,20	
Poliestireno	0,13	0,11	
Polietileno	0,48	0,27	

Tabela 6: Condutividade e Difusividade Térmica dos Materiais

FONTE: (CALLISTER; RETHWISCH, 2014)

Figura 32: Comportamento das temperaturas máximas dos materiais metálicos ao longo dos trinta segundos simulados.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 33: Comportamento das temperaturas máximas dos materiais cerâmicos ao longo dos trinta segundos simulados.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 34: Comportamento das temperaturas máximas dos materiais poliméricos ao longo dos trinta segundos simulados.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Utilizando tanto a tabela acima, quanto as figuras citadas é possível verificar que as características dos materiais acabam corroborando o comportamento das curvas nos gráficos. Juntamente com as figuras completas visualizadas no Apêndice D, onde as temperaturas são medidas e colocadas no gráfico nos tempos de cinco, sete e meio, dez, doze e meio, quinze, vinte e trinta segundos fica claro que os materiais metálicos por possuírem maiores valores de condutividade e difusividade térmica têm as menores temperaturas apresentadas. Além disso, observa-se um espalhamento do calor pela peça, confirmado pela distribuição mais ampla da temperatura, mesmo nos segundos iniciais da simulação. Em contrapartida, materiais cerâmicos tem pouca difusão do calor ao longo da peça durante toda a simulação e os materiais poliméricos atingem altíssimas temperaturas, indo muito além do suportado pelo material, coisa que ocasionaria completa degradação da peça.

Figura 35: Exemplo da diferença da propagação de calor na peça aos 15 segundos em três diferentes materiais.



FONTE: desenvolvida pelo autor

É importante ressaltar que o resfriamento mais acelerado do Aço se dá pelo Calor Específico do mesmo ser menor do que o do Alumínio, ou seja, tendo menor calor específico, menor é a quantidade de energia perdida para que a temperatura diminua, sendo que este Aço também possui densidade maior que a do Alumínio. Outro fato é da Alumina possuir características e portanto comportamento muito semelhante aos materiais metálicos, lembrando que a mesma também é conhecida como Óxido de *Alumínio*.

4.2.1 Resfriamento

Observando-se atentamente os gráficos de resfriamento dos materiais, verifica-se que a taxa de perda de temperatura não é constante o que leva a concluir que não é um processo linear. Provavelmente por não prever este comportamento o sistema tenha sido mal elaborado e por fim não ocorra um resfriamento por exemplo às condições iniciais já que isolado o calor inserido não será perdido além de suas fronteiras (o pequeno compartimento de ar). Dito isso, o gráfico na Figura 36 foi estudado encontrando as equações que descrevessem a queda de temperatura de cada um dos materiais afim de chega-se a uma provável temperatura de equilíbrio. Para este processo utilizou-se a ferramenta *Basic Fitting* do Matlab.



Figura 36: Resfriamento dos materiais a partir dos vinte segundos.

FONTE: desenvolvida pelo autor

A Tabela 7 faz um resumo desta ideia onde por extrapolação da curva de resfriamento de cada material, tenta-se encontrar a temperatura máxima na condição de equilíbrio do sistema.

Material	Equação quadrática	Instante de Equilíbrio	Temperatura
Aço	$0,080263x^2 - 6,7275x + 334,58$	42,9091s	$194^{\circ}C$
Alumínio	$0,0086x^2 - x + 310$	58,1395s	$274^{\circ}C$
Cobre	$0,0038x^2 - 0,51x + 220$	67,1053s	$200^{\circ}C$
Alumina	$0,082x^2 - 7,8x + 430$	47,561s	$250^{\circ}C$
Concreto	$2,3x^2 - 160x + 3800$	34,7826s	$801^{\circ}C$
Vidro	$4,9x^2 - 330x + 6800$	33,6735s	$1270^{\circ}C$
Policarbonato	$27x^2 - 1800x + 38000$	33,333s	$6990^{\circ}C$
Poliestireno	$33x^2 - 2300 + 50000$	34,8485s	$9629^{\circ}C$
Polietileno	$12x^2 - 790x + 16000$	32,9167s	$3110^{\circ}C$

Tabela 7: Resfriamento e possível temperatura de equilíbrio

FONTE: desenvolvida pelo autor

Assim, observa-se que além da condutividade e da difusividade térmica, o calor específico e a densidade do material também influenciam no comportamento térmico dos materiais, mesmo durante uma simulação transiente.

4.3 Cenário do Estresse Térmico

Abaixo, na Tabela 8 estão os resultados colhidos para cada uma das simulações. Adicionalmente, para melhor compreensão, o Apêndice E apresenta os resultados gráficos da simulação para cada material.

Material	Deslocamento (mm)	Temp. Mínima (° <i>C</i>)	Temp. Máxima (° <i>C</i>)
Aço	0,0477	320, 6	336, 9
Alumínio	0,0995	320, 6	329, 2
Cobre	0,0684	320,7	328, 0
Alumina	0,0282	315, 0	348, 6
Concreto	0,0500	294, 0	545, 8
Vidro	0,0326	293, 5	605, 4
Policarbonato	2,5490	293, 1	2729, 0
Poliestireno	1,8150	293, 2	1866, 0
Polietileno	4,0520	293, 2	1927,0

Tabela 8: Deslocamentos e Temperaturas dos Materiais

FONTE: desenvolvida pelo autor

A simulação do estresse térmico foi antes de tudo de difícil análise. Adicionalmente a isto, a escolha de uma peça complexa como a que foi escolhida também não facilitou. Foi observado que para os diferentes materiais, a peça se comportou de maneira totalmente diferente e apesar da tabela acima auxiliar o entendimento através dos números ela não é fiel ao que ocorreu.

Assim, a análise pode ser feita inicialmente considerando a distribuição de temperaturas a partir do ponto de origem de calor ao longo da peça para os diferentes materiais. Como nos cenários anteriores observa-se a ação da condutividade térmica que nos metais, assim como na Alumina, possibilita uma distribuição ao longo de toda a peça, desde a base até as aletas superiores. O calor, ou a temperatura, fica então bem melhor distribuída por toda a peça não causando sobrecarga térmica em regiões isoladas já que não se detectou grandes temperaturas nas mesmas.

O mesmo não se pode dizer dos materiais cerâmicos restantes e dos materiais poliméricos. Houve concentração de calor na base da peça, o que fez com que as maiores tensões fossem registradas ali, quase que tensões internas, e diferentemente do que aconteceu nos materiais metálicos (e a Alumina), houvesse um maior deslocamento.

É possível observar que as deformações, causadas por esse "acúmulo" de calor, é bem diferente daquela ocorrida quando o calor se distribui melhor. Adicionalmente a este fato, vale comparar os valores exatos de deformação com o Coeficiente de Expansão Térmica. Veja na Tabela 9.

Material	Deslocamento (mm)	Expansão Térmica ($10^{-6} \frac{m^2}{s}$)
Aço	0,0477	11,70
Alumínio	0,0995	23,60
Cobre	0,0684	17,00
Alumina	0,0282	7,00
Concreto	0,0500	11,80
Vidro	0,0326	9,00
Policarbonato	2,5490	122,00
Poliestireno	1,8150	120,00
Polietileno	4,0520	152,00

Tabela 9: Deslocamentos e Coeficiente de Expansão Térmica

FONTE: desenvolvida pelo autor

Respeitando as características comentadas anteriormente, e comparando os valores verifica-se uma proporcionalidade direta entre os valores do Coeficiente de Expansão Térmica e o nível de Deslocamento que cada material sofreu (de maneira específica em cada caso).

Como esta simulação não foi transiente, pouco pode se dizer do que ocorreu durante o processo ficando limitada a análise ao resultado final apresentado acima.

4.4 Cenário da Troca de Calor





FONTE: desenvolvida pelo autor

Para a análise dos resultados da simulação da Troca de Calor, foram realizadas dois conjuntos de leituras. Primeiramente situou-se um plano central e longitudinal a todo o sistema tendo como foco a peça sob análise. Na Figura 37 observa-se este plano e as duas setas representam onde foram feitas as leituras de temperatura. Ou seja mediu-se a temperatura da peça em sua base, centralmente, da frente para trás horizontalmente. Posteriormente fez-se a medição de posição ligeiramente anterior ao início da base até o término da peça, de baixo para cima, verticalmente. Os gráficos destas medições estão todos no Apêndice F, assim como a visualização do momento final da simulação, já que esta também não foi uma simulação transiente.

Material	Temp. Máxima °C	Temp. Mínima °C
Aço	400,388	257,782
Alumínio	203, 126	151,384
Cobre	182,620	148,751
Alumina	352,485	165, 231
Concreto	928, 253	176, 378
Vidro	937,609	176,684
Policarbonato	1172,360	178,093
Poliestireno	1272,990	225, 141
Polietileno	1084, 340	180, 201

Tabela 10: Temperaturas finais da Troca de Calor

FONTE: desenvolvida pelo autor

É possível notar na Tabela 10 que novamente a Condutividade Térmica influencia a forma como o calor se distribui na peça. Novamente este se distribui melhor nos metais e na Alumina, porém tendo então performance inferior nos materiais cerâmicos restantes assim como nos materiais poliméricos.

4.4.1 Análise Horizontal

Figura 38: Gráficos das Temperaturas dos Perfís Horizontais dos Materiais Metálicos



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 39: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Cerâmicas



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 40: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais dos Materiais Poliméricos



FONTE: desenvolvida pelo autor

Partindo dos gráficos nas Figuras 38, 39 e 40 verifica-se que o comportamento da temperatura, como esperado, tem nos metais um comportamento de suave distribuição, não atingindo patamares elevados mesmo na região central da peça. O Aço ao distribuir o calor, por ter menor condutividade térmica, acaba apresentando maiores temperaturas. Já as cerâmicas também tem comportamento semelhante aos outros cenários, com a Alumina assemelhando-se aos metais. Enquanto isto, os polímeros, não possuem uma boa distribuição do calor, como já foi visto, apresentando as mais altas temperaturas.

O que tem-se de novidade nestes gráficos é o que ocorre após a passagem da curva de temperatura pelo pico de temperatura na região central da peça. Percebe-se que em todos os exemplos os gráficos não são simétricos. Nos metais, ao final da peça, ocorre uma diferença negativa de até $1^{\circ}C$, no caso do Aço. Já nos outros materiais, a diferença é sempre positiva, conforme a Tabela 11.

Material	$T_i(^{\circ}C)$	$T_{end}(^{\circ}C)$	$\Delta T(^{\circ}C)$
Aço	287,772	286,719	-1,053
Alumínio	170, 251	171,423	1,172
Cobre	162,866	163,280	0,414
Alumina	192,933	229,036	27,103
Concreto	197, 819	259,334	61, 515
Vidro	198,255	259,847	61,592
Policarbonato	211,712	259,626	47,914
Poliestireno	273,462	305, 225	31,763
Polietileno	205, 593	266,671	61,078

Tabela 11: Temperaturas nos extremos horizontais da peça.

FONTE: desenvolvida pelo autor

Os resultados, novamente, trazem dois comportamentos distintos. Os metais, com diferença mínima entre os dois extremos. Já as cerâmicas e os polímeros com uma variação moderada. Nos metais, com temperaturas mais altas devido à uma condutividade térmica menor, o aço acaba tendo uma diferença de temperatura negativa, pequena é verdade, mas muito provavelmente causada pelo sua relação com o ar, devido ao seu calor específico.

Os materiais cerâmicos e poliméricos apresentam a porção dianteira da peça com baixas temperaturas, tendo o calor da porção central arrastado para a porção traseira. A Alumina, ainda com um comportamento semelhante aos metais possui uma diferença menor, mas os materiais seguintes acabam por ter suas porções, após a fonte de calor (em relação ao sentido de deslocamento do ar), com temperatura maior que a porção inicial.

Não se pode inquirir que o arrasto não ocorra nos metais, mas a relação dos metais com o ar se dá de forma muito diferente visto que o calor produzido em uma pequena região se espalha por todo o sistema. Isto é facilmente observável nas Figuras 41, 42 e 43, quando nota-se que a

porção final da base está com coloração indicando temperatura menor que o ar que se arrasta após a peça.



Figura 41: Plano Centralizado do Sistema para o Aço

FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 42: Plano Centralizado do Sistema para o Alumínio

FONTE: desenvolvida pelo autor



Figura 43: Plano Centralizado do Sistema para o Cobre

FONTE: desenvolvida pelo autor

Isto também ocorre nas Figuras 44, 45, 46, 47 e 48. Ainda, as maiores temperaturas da porção final das peças, quando cerâmicas e polímeros são analisados, estão nas regiões próxima a superfície, o que corrobora a hipótese deste aumento de temperatura ser causado pelo ar.



Figura 44: Plano Centralizado do Sistema para o Concreto

FONTE: desenvolvida pelo autor



Figura 45: Plano Centralizado do Sistema para o Vidro

FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 46: Plano Centralizado do Sistema para o Policarbonato



FONTE: desenvolvida pelo autor



Figura 47: Plano Centralizado do Sistema para o Poliestireno

FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 48: Plano Centralizado do Sistema para o Polietileno

FONTE: desenvolvida pelo autor

4.4.2 Análise Vertical

No conjunto de leituras realizadas verticalmente que iniciam imediatamente abaixo da peça, verifica-se que ao chegar no ponto central de origem de calor, todos os materiais sofrem um pico de temperatura. É lógico que este pico é ditado pela condutividade e difusividade térmica.

Então é fácil de se supor que Polímeros terão as maiores temperaturas, seguidos pelas cerâmicas, e por fim os metais. Nada de novo.

As diferenças começam no declínio das temperaturas ao longo das hastes.

De forma mais fácil, começando de trás para frente, os Polímeros, simplesmente tem suas temperaturas em declínio assim que a leitura começa a se afastar do ponto crítico. Não importando se ainda a leitura de temperaturas provém do material da peça ou do ar, a curva não se altera, mostrando que o calor proveniente da base distribuiu-se proporcionalmente à distância da mesma. Ver Figuras 49, 50 e 51.

Figura 49: Variação da Temperatura na Leitura Vertical da Peça - Policarbonato



FONTE: desenvolvida pelo autor



Figura 50: Variação da Temperatura na Leitura Vertical da Peça - Poliestireno

FONTE: desenvolvida pelo autor





FONTE: desenvolvida pelo autor

Já os materiais Cerâmicos, tem uma *quebra* sutil na curva de leitura. Esta ocorre quando dá-se o fim da parte sólida e inicia a leitura dos valores do meio gasoso, demonstrando que estes, ainda que de forma reduzida, conseguem que o calor seja conduzido através do material. Ver Figuras 52 e 53.





FONTE: desenvolvida pelo autor



Figura 53: Variação da Temperatura na Leitura Vertical da Peça - Vidro

FONTE: desenvolvida pelo autor

Por fim os metais. Estes apresentam comportamento bem diferente dos anteriores. Primeiramente o pico de temperatura é menor nos três casos, com leve aumento no Aço. A queda de temperatura a partir da fonte é menos acentuada até o final do meio sólido de leitura. Posteriormente tem-se a leitura do meio gasoso, porém em região entre as abas, que demonstra queda na temperatura, mas de forma mais gradual. Isto, evidencia que a relação dos metais com o ar é muito mais favorável à perda de calor, do que àquela que ocorre com os outros materiais. Além é claro, de conduzir o calor no meio sólido, os metais são capazes de perder calor para o meio mais facilmente. Ao final da região *intra-sólida*, aí sem observa-se uma queda brusca da temperatura.

A simulação então, evidencia o melhor capacidade dos metais em trocar calor.

5 Conclusão

A utilização de tecnologias que facilitem a indústria nacional na nova revolução industrial, que ocorre no exterior tanto em meios acadêmicos como na indústria, seja no ensino, no aprendizado ou na produção de bens é fundamental para que o Brasil se desenvolva. Assim, a Engenharia Auxiliada por Computador já não é em si só o mais avançado em Simulação Computacional. Mas, ainda que tecnologias como Prototipagem Virtual, Impressão 3D ou Inteligência Artificial Industrial sejam o *hype*, é importante que a indústria brasileira e seus profissionais conheçam e apliquem as tecnologias anteriores à Prototipagem Virtual, visando alcançar seus concorrentes externos.

O presente trabalho, buscou trazer pequenas porções do conhecimento que um engenheiro necessita para o desenvolvimento profissional no âmbito do desenvolvimento de produto, aplicando-nas em uma maneira de conhecer as características de materiais básicos em relação à suas capacidades térmicas com implicações em seu uso prático através da Simulação Computacional. O trabalho teve então como seu primeiro objetivo localizar o momento de uso da Simulação Computacional quando do Processo de Desenvolvimento do Produto, que se dá durante a fase preliminar onde se estrutura um produto em sistemas, subsistemas e componentes, facilitando o processo de visualização e testes realizados por engenheiros na Engenharia Auxiliada por Computador. É inegável que para que se desenvolva por completo um produto, como um *trocador de calor*, são necessários muito mais conhecimentos e embasamento teórico do que os que foram apresentados aqui. Entretanto, os demais assuntos podem muito bem servir para trabalhos futuros.

Além do aspecto prático do uso da simulação na indústria, ao longo do desenvolvimento deste trabalho ficou claro que o processo de construção de ambientes de simulação são muito úteis para fazer a junção de teorias aprendidas desde o início de um curso de graduação em engenharia, até a visualização da aplicabilidade destas teorias. Evidencia-se que estudos relacionados à ciência das trocas de calor, à ciência dos materiais, ao próprio cálculo, ao desenho técnico ou à programação de computadores, devem ser bem compreendidos e sintetizados, possibilitando que se faça um bom uso prático dos mesmos. Assim, o segundo objetivo deste trabalho foi atingido quando a base teórica foi identificada e revista instigando uma melhor compreensão da física, da matemática e da computação envolvidas nas simulações realizadas.

Compreender a física por detrás dos eventos simulados não é suficiente para uma boa execução das atividades relacionadas à simulação computacional. Assim, o anteparo matemático relacionado ao entendimento da relação das Equações Diferenciais Parciais com os fenômenos físicos foi revisto e compreendido. Entretanto, esta compreensão também se torna insípida se
os métodos computacionais de resolução não forem estudados. Por isso, sabendo que a grande maiorias dos softwares fazem uso deste, o Método dos Elementos Finitos foi analisado para que possa ser bem explorado nas ferramentas computacionais quando se realiza a configuração das malhas, da quantidade de elementos, etc.

Para que se possa trabalhar com os vários tipos existentes de materiais, é necessário que se categorize cada um deles. Esta tarefa é facilitada pela existência de diversos *handbooks* que podem ser consultados nas referências bibliográficas. Tais livros possuem a nomenclatura adequada para a categorização dos materiais em metais, cerâmicas e polímeros como os materiais básicos e ainda as ligas e compósitos para materiais mais avançados.

A caracterização dos materiais estudados iniciou-se de forma simples através da solução de uma única equação diferencial parcial utilizando-se o software Matlab. Nesta simples simulação, foi possível constatar que quando se utiliza apenas uma variável, a condutividade térmica, é possível caracterizar e diferenciar os materiais em relação aos níveis de temperatura e o grau de distribuição de calor pelo corpo sólido, ao se injetar calor nos mesmos. A primeira simulação foi capaz de mostrar que metais, possuindo os maiores valores de condutividade térmica, conseguem distribuir de melhor forma o calor evitando que a peça sob análise eleve sua temperatura em demasia. Em sentido oposto, materiais cerâmicos em menor escala, e os materiais poliméricos, possuindo baixa condutividade e recebendo a mesma quantidade de calor, atingiram altas temperaturas em relação aos metais. Resumidamente, metais apresentaram um desvio padrão máximo na temperatura de apenas 0, 2, cerâmicas de 8, 0 e polímeros de 95, 0, sendo que as temperaturas dos metais atingem apenas 0, 28% das temperaturas atingidas pelos polímeros. Como ponto negativo é nítida a baixa interatividade da primeira simulação, mas isto se dá devido à ferramenta utilizada que não é específica para o uso dado.

Em seguida foi realizada a Simulação Transiente onde fez-se necessário o uso da Difusividade Térmica, já que o tempo agora influencia o resultado final. A Difusividade Térmica diz o quão rápido o calor que o corpo recebe irá se distribuir pela peça de acordo com as propriedades previstas pela Condutividade Térmica. Assim, possuindo também os maiores valores de difusividade mostram que aquecem de maneira mais uniforme, mais rapidamente, que os outros materiais. Estes últimos materiais, quando da análise dos resfriamentos estabilizam mais rapidamente, porém a partir de temperaturas, que segundo a literatura, deteriorariam as peças estudadas em caso de experimento real. Além disso, os polímeros e as cerâmicas resfriaram-se em média mais rapidamente que os metais, 33, 69s, 38, 67s e 56, 05s respectivamente. Porém, as temperaturas média de equilíbrio são inversamente maiores: $6576^{\circ}C$ para polímeros, $773^{\circ}C$ para as cerâmicas e $222^{\circ}C$. Verifica-se também então uma vantagem da Simulação Computacional, a ausência de perda de materiais como poderia ter ocorrido nas peças de material polimérico.

A simulação do Estresse Térmico dos materiais mostrou-se complexa quando se avalia uma peça que não foi desenvolvida de forma simples. Foi percebido que cada material comportase de maneira diferente em relação ao calor e a região da peça afetada pelo mesmo. Os metais, que distribuem muito melhor o calor pela peça tiveram poucas deformações tendo quase que somente um aumento da altura da peça. Já os outros materiais, muito pela baixa distribuição de calor, tiveram deformações na área superior e frontal da peça assim como foi notado um estufamento próximo às regiões de concentração de calor. No final do Apêndice E é possível visualizar que alguns materiais, como o concreto, tiveram deformações irreversíveis, que em uma análise mais profunda deste tipo de fator, descartariam totalmente o material em um projeto. Porém, é consenso que um *design* mais simples facilitaria a análise da simulação.

Os resultados da Simulação dos Trocadores de Calor possibilitaram a visualização de que além da Condutividade e da Difusividade o Calor Específico de um material é um fator muito importante na caracterização do mesmo para um projeto do tipo analisado. Novamente os metais se mostraram muito mais propensos às trocas de calor com um meio fluido que cerâmicas e polímeros. Além da melhor e mais rápida distribuição do calor, tendo os metais calor específico menor que os outros dois tipos de materiais, os metais mostram capacidade de esfriar muito mais facilmente já que precisam liberar para o fluido menos energia para que sua temperatura caia. O projeto acaba sendo enviesado quando se modela um trocador de calor muito semelhante àqueles utilizados em computadores para o resfriamento dos processadores. Mesmo assim elucida por que se escolhe metais para aquecimento de fluidos ou cerâmicas para isolá-los. É possível verificar esta vantagem quando observamos que o calor gerado em metais, além de se "locomover"melhor pelo material, ele também é carregado mais facilmente pelo fluido. Em casos como o aço, é verificada uma diferença negativa de $1,053^{\circ}C$ na simetria da peça antes e após a passagem do fluido pela fonte de calor mesmo tendo a maior temperatura máxima registrada. Metais tiveram então a melhor distribuição de temperatura com média de $0,87^{\circ}C$ na diferença de temperatura. Já cerâmicas e polímeros $50,07^{\circ}C$ e $46,91^{\circ}C$ respectivamente, mostrando que o Poliestireno tem uma melhor interação com os fluidos ainda que muito inferior que os materiais poliméricos.

É imprescindível citar que Balci (1994), Balci (1995) e Harmon e Youngblood (2005) dizem que para que uma simulação seja aceita no ambiente industrial é necessário que a mesma seja então embasada em validações e verificações via experimentação física. Não se pode inferir que só por simular esteja correto, já que o modelo inicial da simulação pode haver erros em relação ao mundo real que de forma recorrente destrói qualquer verossimilhança levada ao mundo virtual. Para trabalhos futuros em simulação é então correto que, mesmo minimamente, as simulações sejam confrontadas com experimentos.

Concluindo, as simulações cumprem seu papel em caracterizar termicamente os materiais estudados oferecendo numérica e visualmente formas de identificar a que grupo determinado material pertence e se este mesmo material seria ou não adequado para determinado projeto. Como trabalhos futuros ficam as possibilidades de aprofundamento seja na temática do estresse térmico, seja na temática da Dinâmica Computacional de Fluidos em relação ou não aos diferentes materiais utilizados na engenharia, na indústria ou na pesquisa em geral.

Referências

ALEXANDRU, C. *Modeling and Simulation in Engineering*. [S.1.]: Intech, 2012. Citado na página 25.

AUTODESK. *Autodesk CFD*. 2017. Acessado em 27/11/2017. Disponível em: https://www-.autodesk.com/products/cfd/. Citado na página 64.

AUTODESK. *Autodesk Fusion 360*. 2018. Acessado em 27/11/2017. Disponível em: <<u>http://help.autodesk.com/view/fusion360</u>>. Citado na página 64.

BALCI, O. Validation, verification, and testing techniques throughout the life cycle of a simulation study. *Annals of operations research*, 1994. Springer, v. 53, n. 1, p. 121–173, 1994. Citado na página 109.

BALCI, O. Principles and techniques of simulation validation, verification, and testing. In: IEEE COMPUTER SOCIETY. *Proceedings of the 27th conference on Winter simulation*. [S.I.], 1995. p. 147–154. Citado na página 109.

BARRON, R. F.; BARRON, B. R. *Design for thermal stresses*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado na página 39.

BORTHWICK, D. *Introduction to Partial Differential Equations*. [S.l.]: Springer, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials Science and Engineering An Introduction*. 9. ed. [S.I.]: John Wiley & Sons NY, 2014. Citado 10 vezes nas páginas 56, 57, 60, 62, 83, 88, 113, 114, 115 e 116.

CENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. *Heat and Mass Transfer Fundamentals and Application*. 15. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 28, 29, 30, 31 e 32.

CERVELLERA, P. The evolving role of computer-aided engineering: A case study in the aeronautical structural design. In: *Innovation in Product Design*. [S.l.]: Springer, 2011. p. 97–115. Citado na página 25.

CESA, T. R. *Design de uma Estrutura de Proteção Contra Capotamento para Tratores Agrícolas Utilizando Simulação Computacional*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010. Citado na página 23.

CHANG, K.-H. *e-Design: Computer-Aided Engineering Design*. [S.l.]: Academic Press, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

CHUNG, C. A. *Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach*. [S.1.]: CRC Press, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

EPSTEIN, M. *Partial Differential Equations: Mathematical Techniques for Engineers*. [S.l.]: Springer, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 47.

GUPTA, K. *Engineering materials: research, applications and advances*. [S.l.]: CRC Press, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 57.

HAN, J.-C. Analytical heat transfer. [S.1.]: CRC Press, 2016. Citado na página 38.

HARMON, S.; YOUNGBLOOD, S. M. A proposed model for simulation validation process maturity. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 2005. SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 2, n. 4, p. 179–190, 2005. Citado na página 109.

HEIMANN, R. B. *Classic and advanced ceramics: from fundamentals to applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. Citado na página 60.

HOFMANN, P. *Solid state physics: an introduction*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 42.

HOLMAN, J. P. et al. *Heat transfer*. 10. ed. [S.1.]: McGraw-hill New York, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 43.

INCROPERA, F. P.; BERGMAN, T. L. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado 7 vezes nas páginas 33, 34, 35, 36, 37, 46 e 47.

INDÚSTRIA, C. N. da. *Indústria 4.0: Novo Desafio para a Indústria Brasileira*. 2016. Citado na página 21.

JAHAN, A.; EDWARDS, K. L.; BAHRAMINASAB, M. *Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design*. [S.1.]: Butterworth-Heinemann, 2016. Citado na página 56.

KAKAC, S.; LIU, H.; PRAMUANJAROENKIJ, A. *Heat exchangers: selection, rating, and thermal design.* 3. ed. [S.1.]: CRC press, 2012. Citado na página 42.

KARWA, R. Heat and Mass Transfer. [S.l.]: Springer, 2017. Citado na página 42.

LEE, H.-H. *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 17*. [S.l.]: SDC publications, 2017. Citado na página 52.

LEWIS, R. W.; NITHIARASU, P.; SEETHARAMU, K. N. *Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 52, 53 e 54.

LI, J. Z. et al. *CAD*, *3D Modeling, Engineering Analysis, and Prototype Experimentation*. [S.l.]: Springer, 2015. Citado na página 24.

LIOU, F. W. *Rapid prototyping and engineering applications: a toolbox for prototype development.* [S.1.]: CRC Press, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

MADE, H. P. A. *How Pyrex is made - materials, production process, manufacture, making, history, used, processing, components.* 2017. Acessado em 30/11/2017. Disponível em: http://www.madehow.com/Volume-7/Pyrex.html. Citado na página 61.

MATHWORKS. *Mathworks: Makers of Matlab and Simulink*. 2017. Acessado em 27/11/2017. Disponível em: https://www.mathworks.com/. Citado na página 64.

MIRON, L. E. R. D.; KOLEVA, D. A. *Concrete Durability: Cementitious Materials and Reinforced Concrete Properties, Behavior and Corrosion Resistance*. [S.l.]: Springer, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 61.

MOAVENI, S. *Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS, 3/e*. [S.l.]: Pearson Education India, 2011. Citado na página 51.

MORRISON, M. *Reconstructing reality: Models, mathematics, and simulations*. [S.l.]: Oxford Studies in Philosophy, 2015. Citado na página 26.

RADHAKRISHNAN, P.; SUBRAMANYAN, S.; RAJU, V. *Cad/cam/cim*. [S.l.]: New Age International, 2008. Citado na página 22.

RAMASWAMY, D. *3D Finite Element Analysis with Matlab.* 2017. Acessado em 30/11/2017. Disponível em: https://youtu.be/4c-sPXolD0w. Citado na página 68.

RAO, S. S. The finite element method in engineering. [S.l.]: Elsevier, 2010. Citado na página 52.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F. A.; AMARAL, D. C. *Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo*. [S.l.]: Editora Saraiva, 2006. Citado na página 23.

SAHA, S. K. et al. *Advances in heat transfer enhancement*. [S.l.]: Springer, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 43, 44 e 45.

TVER, D. F. *Encyclopedic Dictionary of Industrial Technology: Materials, Processes and Equipment.* [S.I.]: Springer Science & Business Media, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 58, 62 e 63.

UGAIL, H. *Partial differential equations for geometric design*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 47, 48 e 51.

ZILL, D. G. *Differential Equations with Boundary-Value Problems*. 8. ed. [S.l.]: Cengage Learning, 2013. Citado na página 50.

APÊNDICE A – Propriedades dos Materiais

A seguir a base de dados com as respectivas propriedades dos materiais que foram analisados no trabalho e de maneira comparativa outros materiais semelhantes.

Material	Densidade	Young	Poisson	Expansão Térmica
	g/cm^3	GPa		$10^{-6}/^{\circ}C$
Aço 1020	7,85	207,00	0,30	11,70
Aço 1040	7,85	207,00	0,30	11,30
Aço A36	7,85	207,00	0,30	11,70
Alumínio 1100	2,71	69,00	0,33	23,60
Alumínio 2024	2,77	72,40	0,33	22,90
Alumínio 356,0	2,69	72,40	0,33	21,50
Alumínio 6061	2,70	69,00	0,33	23,60
Alumínio 7075	2,80	71,00	0,33	23,40
Cobre C11000	8,89	115,00	0,33	17,00
Cobre C17200	8,25	128,00	0,30	16,70
Cobre C26000	8,53	124,00	0,35	19,90
Cobre C36000	8,50	97,00	0,34	20,50
Cobre C71500	8,94	150,00	0,34	16,20
Cobre C93200	8,93	100,00	0,34	18,00
Ferro 60-40-18	7,10	169,00	0,29	11,20
Ferro 80-55-06	7,10	168,00	0,31	10,60
Ferro G1800	7,30	81,50	0,26	11,40
Ferro G3000	7,30	101,50	0,26	11,40
Ferro G4000	7,30	124,00	0,26	11,40
Molibidênio	10,22	320,00	0,32	4,90
Ouro	19,32	77,00	0,42	14,20
Platina	21,45	171,00	0,39	9,10
Prata	10,49	74,00	0,37	19,70
Titânio ASTM puro	4,51	103,00	0,34	8,60
Titânio Ti-5-Al2,5Sn	4,48	110,00	0,34	9,40
Titânio Ti-6Al4V	4,43	114,00	0,34	8,60
Tungstênio	16,60	400,00	0,28	4,50

Tabela 12: Propriedades dos Materiais Metálicos - I

FONTE: Baseada no trabalho de (CALLISTER; RETHWISCH, 2014)

Material	Condutividade Térmica	Calor Específico	Difusividade Térmica
	W/mK	J/kgK	$10^{-6}m^2/s$
Aço 1020	51,90	486,00	13,60
Aço 1040	51,90	486,00	13,60
Aço A36	51,90	486,00	13,60
Alumínio 1100	222,00	904,00	90,62
Alumínio 2024	190,00	875,00	78,39
Alumínio 356,0	151,00	963,00	58,29
Alumínio 6061	180,00	896,00	74,40
Alumínio 7075	130,00	960,00	48,36
Cobre C11000	388,00	385,00	113,36
Cobre C17200	117,50	420,00	33,91
Cobre C26000	120,00	375,00	37,51
Cobre C36000	115,00	380,00	35,60
Cobre C71500	29,00	380,00	8,54
Cobre C93200	59,00	376,00	17,57
Ferro 60-40-18	36,00	544,00	9,32
Ferro 80-55-06	36,00	544,00	11,58
Ferro G1800	46,00	544,00	11,58
Ferro G3000	46,00	544,00	11,58
Ferro G4000	46,00	544,00	11,58
Molibidênio	142,00	276,00	50,34
Ouro	315,00	128,00	127,38
Platina	71,00	132,00	25,08
Prata	428,00	235,00	173,62
Titânio ASTM puro	16,00	528,00	6,72
Titânio Ti-5-Al2,5Sn	7,60	470,00	3,61
Titânio Ti-6Al4V	6,70	610,00	2,48
Tungstênio	155,00	138,00	67,66

Tabela 13: Propriedades dos Materiais Metálicos - II

FONTE: Baseada no trabalho de (CALLISTER; RETHWISCH, 2014)

Material	Densidade	Young	Poisson	Expansão Térmica
	g/cm^3	GPa		$10^{-6} / {}^{\circ}C$
Concreto	19,30	31,00	0,20	11,80
Diamante	3,51	950,00	0,20	0,67
Óxido de Alumínio 90%	3,60	275,00	0,22	7,00
Óxido de Alumínio 96%	3,72	303,00	0,21	7,40
Óxido de Alumínio 99%	3,98	380,00	0,22	7,40
Silício	2,33	16,13	0,32	2,50
Vidro (cal de soda)	2,50	69,00	0,23	9,00
Vidro (pyrex)	2,23	70,00	0,20	3,30

Tabela 14: Propriedades dos Materiais Cerâmicos - I

FONTE: Baseada no trabalho de (CALLISTER; RETHWISCH, 2014)

Material	Condutividade Térmica	Calor Específico	Difusividade Térmica
	W/mK	J/kgK	$10^{-6}m^2/s$
Concreto	1,50	985,00	0,08
Diamante	3005,00	520,00	1646,39
Óxido de Alumínio 90%	16,00	775,00	5,73
Óxido de Alumínio 96%	35,00	775,00	12,14
Óxido de Alumínio 99%	39,00	775,00	12,64
Silício	141,00	700,00	86,45
Vidro (cal de soda)	1,70	840,00	0,81
Vidro (pyrex)	1,40	850,00	0,74

Tabela 15: Propriedades dos Materiais Cerâmicos - II

FONTE: Baseada no trabalho de (CALLISTER; RETHWISCH, 2014)

Material	Densidade	Young	Poisson	Expansão Térmica
	g/cm^3	GPa		$10^{-6} / {}^{\circ}C$
Cloreto de Polivinila (PVC)	2,60	3,28	0,38	135,00
Náilon	1,14	2,69	0,39	144,00
Poli-etileno-tereftalato (PET)	1,35	3,45	0,41	117,00
Policarbonato	1,20	2,38	0,36	122,00
Poliestireno (PS)	1,05	2,78	0,33	120,00
Polietileno (PEAD)	0,96	1,08	0,46	152,00
Polietileno (PEBD)	0,93	0,23	0,37	290,00
Polipropileno	0,91	1,35	0,40	163,00
Politetrafluoretileno (PTFE)	2,17	0,48	0,46	171,00

Tabela 16: Propriedades dos Materiais Poliméricos - I

FONTE: Baseada no trabalho de (CALLISTER; RETHWISCH, 2014)

Material	Condutividade Térmica	Calor Específico	Difusividade Térmica
	W/mK	J/kgK	$10^{-6}m^2/s$
Cloreto de Polivinila (PVC)	10,58	1255,00	3,24
Náilon	0,24	1670,00	0,13
Poli-etileno-tereftalato (PET)	0,15	1170,00	0,09
Policarbonato	0,20	840,00	0,20
Poliestireno (PS)	0,13	1170,00	0,11
Polietileno (PEAD)	0,48	1850,00	0,27
Polietileno (PEBD)	0,33	2300,00	0,16
Polipropileno	0,12	1925,00	0,07
Politetrafluoretileno (PTFE)	0,25	1050,00	0,11

Tabela 17: Propriedades dos Materiais Poliméricos - II

FONTE: Baseada no trabalho de (CALLISTER; RETHWISCH, 2014)

APÊNDICE B – Script para MATLAB

O *script* abaixo foi utilizado para a simulação estável através do *software* Matlab dos materiais analisados .

```
%% Passo = 1: mportar Geometria
minhaEDP = createpde(1);
importGeometry(minhaEDP, 'peca-final -1.stl');
%figure
%pdegplot(minhaEDP, 'FaceLabels', 'on ');
%% Passo = 2: Especificação dos Coeficientes da EDP
% Coeficientes da EDP para Equação de Laplace (Condução de Calor)
c = [51.9 222 388 16 1.5 1.4 0.2 0.13 0.48];
a = 0;
f = 0;
```

```
% Passo - 3: Especificação das Condições de Contorno
% Temperatura Ambiente
temperaturaAmbiente = 0;
```

```
% Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção
hc = 10;
```

% Faces da peça em condição de contorno faceLado = 1; faceProtusa = minhaEDP.Geometry.NumFaces;

```
% Aplicar condições de contorno de convecção
minhaEDP.applyBoundaryCondition ('Face', [faceLado, faceProtusa], 'q', hc, 'g
```

```
% Faces da peça que possuem origem de calor
facesEntrada = [4,9,10,11,12,13,14,15];
```

%Aplicação do fluxo de calor nas faces que originam o calor minhaEDP.applyBoundaryCondition('Face', facesEntrada, 'g',5);

```
%% Passo - 4: Geração da Malha (Meshing)
% Gerar a malha com 'hmax' = 1/4 do raio dos orifícios
minhaEDP.generateMesh();
%figure
%pdemesh(minhaEDP);
```

```
%% Passo - 5: Solução do Problema
resultado1 = assempde(minhaEDP, c(1), a, f);
resultado2 = assempde(minhaEDP, c(2), a, f);
resultado3 = assempde(minhaEDP, c(3), a, f);
resultado4 = assempde(minhaEDP, c(4), a, f);
resultado5 = assempde(minhaEDP, c(5), a, f);
resultado6 = assempde(minhaEDP, c(6), a, f);
resultado7 = assempde(minhaEDP, c(7), a, f);
resultado8 = assempde(minhaEDP, c(8), a, f);
resultado9 = assempde(minhaEDP, c(9), a, f);
```

```
% Passo – 6: Visualizar
figure
subplot(3,3,1);
pdeplot3D (minhaEDP, 'colormapdata', resultado1);
title ('Aço');
subplot(3,3,2);
pdeplot3D (minhaEDP, 'colormapdata', resultado2);
title('Alumínio');
subplot(3,3,3);
pdeplot3D (minhaEDP, 'colormapdata', resultado3);
title('Cobre');
subplot(3,3,4);
pdeplot3D (minhaEDP, 'colormapdata', resultado4);
title('Concreto');
subplot(3,3,5);
pdeplot3D (minhaEDP, 'colormapdata', resultado5);
title ('Alumina');
subplot(3,3,6);
pdeplot3D (minhaEDP, 'colormapdata', resultado6);
```

```
title('Vidro');
subplot(3,3,7);
pdeplot3D(minhaEDP, 'colormapdata', resultado7);
title('Policarbonato');
subplot(3,3,8);
pdeplot3D(minhaEDP, 'colormapdata', resultado8);
title('Poliestireno');
subplot(3,3,9);
pdeplot3D(minhaEDP, 'colormapdata', resultado9);
title('Polietileno');
```

APÊNDICE C – Simulação Condução de Calor Estável

Figura 54: Simulação Estável do Aço



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 55: Simulação Estável do Alumínio



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 56: Simulação Estável do Cobre



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 57: Simulação Estável da Alumina



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 58: Simulação Estável do Concreto



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 59: Simulação Estável do Vidro



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 60: Simulação Estável do Policarbonato



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 61: Simulação Estável do Poliestireno



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 62: Simulação Estável do Polietileno



FONTE: desenvolvida pelo autor

APÊNDICE D – As Medições na Simulação Transiente

A seguir as medições coletadas durante as simulações realizadas utilizando cada um dos nove materiais analisados na condução de calor transiente.

D.1 Materiais Metálicos

Figura 63: Comportamento das temperaturas máximas e médias dos materiais metálicos ao longo dos trinta segundos simulados.

(a) Temperaturas Máximas dos Materiais Metálicos





(b) Temperaturas Médias dos Materiais Metálicos

FONTE: desenvolvida pelo autor

D.1.1 Aço

Figura 64: Estado da peça de aço aos cinco segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor





FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 66: Estado da peça de aço aos dez segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 67: Estado da peça de aço aos doze segundos e meio.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 68: Estado da peça de aço aos quinze segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 69: Estado da peça de aço aos vinte segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 70: Estado da peça de aço aos trinta segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

D.1.2 Alumínio





FONTE: desenvolvida pelo autor





FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 73: Estado da peça de aluminio aos dez segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 74: Estado da peça de aluminio aos doze segundos e meio.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 75: Estado da peça de aluminio aos quinze segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 76: Estado da peça de aluminio aos vinte segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor





FONTE: desenvolvida pelo autor

D.1.3 Cobre

Figura 78: Estado da peça de cobre aos cinco segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 79: Estado da peça de cobre aos sete segundos e meio.

(a) Peça

(b) Plotagem



FONTE: desenvolvida pelo autor





FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 81: Estado da peça de cobre aos doze segundos e meio.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 82: Estado da peça de cobre aos quinze segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor





FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 84: Estado da peça de cobre aos trinta segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

D.2 Materiais Cerâmicos

Figura 85: Comportamento das temperaturas máximas e médias dos materiais cerâmicos ao longo dos trinta segundos simulados.





(b) Temperaturas Médias dos Materiais Cerâmicos



FONTE: desenvolvida pelo autor

D.2.1 Alumina

Figura 86: Estado da peça de alumina aos cinco segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 87: Estado da peça de alumina aos sete segundos e meio.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 88: Estado da peça de alumina aos dez segundos.



(b) Plotagem



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 89: Estado da peça de alumina aos doze segundos e meio.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 90: Estado da peça de alumina aos quinze segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 91: Estado da peça de alumina aos vinte segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 92: Estado da peça de alumina aos trinta segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

D.2.2 Concreto

Figura 93: Estado da peça de concreto aos cinco segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 94: Estado da peça de concreto aos sete segundos e meio.

(a) Peça (b) Plotagem

FONTE: desenvolvida pelo autor





FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 96: Estado da peça de concreto aos doze segundos e meio.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 97: Estado da peça de concreto aos quinze segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 98: Estado da peça de concreto aos vinte segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 99: Estado da peça de concreto aos trinta segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

D.2.3 Vidro

Figura 100: Estado da peça de vidro aos cinco segundos.

(a) Peça

(b) Plotagem





Figura 101: Estado da peça de vidro aos sete segundos e meio.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 102: Estado da peça de vidro aos dez segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 103: Estado da peça de vidro aos doze segundos e meio.

(a) Peça

(b) Plotagem



FONTE: desenvolvida pelo autor





FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 105: Estado da peça de vidro aos vinte segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 106: Estado da peça de vidro aos trinta segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

D.3 Materiais Poliméricos

Figura 107: Comportamento das temperaturas máximas e médias dos materiais poliméricos ao longo dos trinta segundos simulados.







(b) Temperaturas Médias dos Materiais Poliméricos

FONTE: desenvolvida pelo autor

D.3.1 Policarbonato

Figura 108: Estado da peça de policarbonato aos cinco segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 109: Estado da peça de policarbonato aos sete segundos e meio.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 110: Estado da peça de policarbonato aos dez segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 111: Estado da peça de policarbonato aos doze segundos e meio.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 112: Estado da peça de policarbonato aos quinze segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 113: Estado da peça de policarbonato aos vinte segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 114: Estado da peça de policarbonato aos trinta segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

D.3.2 Poliestireno





FONTE: desenvolvida pelo autor









Figura 117: Estado da peça de poliestireno aos dez segundos.

(a) Peça

(b) Plotagem



FONTE: desenvolvida pelo autor
Figura 118: Estado da peça de poliestireno aos doze segundos e meio.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 119: Estado da peça de poliestireno aos quinze segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 120: Estado da peça de poliestireno aos vinte segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 121: Estado da peça de poliestireno aos trinta segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

D.3.3 Polietileno

Figura 122: Estado da peça de polietileno aos cinco segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 123: Estado da peça de polietileno aos sete segundos e meio.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 124: Estado da peça de polietileno aos dez segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 125: Estado da peça de polietileno aos doze segundos e meio.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 126: Estado da peça de polietileno aos quinze segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 127: Estado da peça de polietileno aos vinte segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 128: Estado da peça de polietileno aos trinta segundos.



FONTE: desenvolvida pelo autor

APÊNDICE E – Dados da Análise do Estresse Térmico

E.1 Design dos corpos utilizados

E.1.1 A Base





FONTE: desenvolvida pelo autor

E.1.2 A Peça



Figura 130: Vistas da Base

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2 Resultados Gráficos da Análise

E.2.1 Deslocamento

E.2.1.1 Aço

Figura 131: Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Aço



FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.1.2 Alumínio



Figura 132: Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Alumínio

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.1.3 Cobre



Figura 133: Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Cobre

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.1.4 Alumina



Figura 134: Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Alumina

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.1.5 Concreto



Figura 135: Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Concreto

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.1.6 Vidro



Figura 136: Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Vidro

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.1.7 Policarbonato



Figura 137: Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Policarbonato

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.1.8 Poliestireno



Figura 138: Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Poliestireno

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.1.9 Polietileno



Figura 139: Resultado dos Deslocamentos Ocorridos no Polietileno

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.2 Temperatura

E.2.2.1 Aço

Figura 140: Resultado das Temperaturas Ocorridas no Aço



FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.2.2 Alumínio



Figura 141: Resultado das Temperaturas Ocorridas no Alumínio

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.2.3 Cobre



Figura 142: Resultado das Temperaturas Ocorridas no Cobre

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.2.4 Alumina



Figura 143: Resultado das Temperaturas Ocorridas no Alumina

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.2.5 Concreto



Figura 144: Resultado das Temperaturas Ocorridas no Concreto

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.2.6 Vidro



Figura 145: Resultado das Temperaturas Ocorridas no Vidro

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.2.7 Policarbonato

Figura 146: Resultado das Temperaturas Ocorridas no Policarbonato



FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.2.8 Poliestireno



Figura 147: Resultado das Temperaturas Ocorridas no Poliestireno

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.2.9 Polietileno



Figura 148: Resultado das Temperaturas Ocorridas no Polietileno

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.3 Fator de Segurança

Todos os objetos têm limites de estresse que dependem do material que está sendo usado. Especificamente, os limites de tensão são representados como força de resistência à tração final. Os fatores de segurança são expressos como a proporção da força máxima do material e o estresse real na região em estudo.

Os fatores de segurança de design geralmente excedem 1,0 por uma margem significativa. Um fator de segurança inferior a 1 indica que ocorrerá algum tipo de falha (deformação permanente ou ruptura). Um fator de segurança exatamente igual a 1.0 significa que o estresse real é igual ao limite de força do material, de modo que o projeto está à beira da falha. A seguir, os gráficos do fator de segurança da peça para os materiais estudados.

E.2.3.1 Aço

Figura 149: Representação do Fator de Segurança do Aço



FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.3.2 Alumínio

Figura 150: Representação do Fator de Segurança do Alumínio



FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.3.3 Cobre



Figura 151: Representação do Fator de Segurança do Cobre

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.3.4 Alumina

Figura 152: Representação do Fator de Segurança do Alumina



FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.3.5 Concreto



Figura 153: Representação do Fator de Segurança do Concreto

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.3.6 Vidro

Figura 154: Representação do Fator de Segurança do Vidro



FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.3.7 Policarbonato



Figura 155: Representação do Fator de Segurança do Policarbonato

FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.3.8 Poliestireno

Figura 156: Representação do Fator de Segurança do Poliestireno



FONTE: desenvolvida pelo autor

E.2.3.9 Polietileno



Figura 157: Representação do Fator de Segurança do Polietileno

FONTE: desenvolvida pelo autor

APÊNDICE F – Dados da Análise do Trocador de Calor

Figura 158: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça



FONTE: desenvolvida pelo autor

F.1 Materiais Metálicos

Figura 159: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Metais



FONTE: desenvolvida pelo autor

F.1.1 Aço



Figura 160: Plano Centralizado do Sistema para o Aço

FONTE: desenvolvida pelo autor



Figura 161: Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Aço



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 162: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Aço



FONTE: desenvolvida pelo autor

F.1.2 Alumínio





FONTE: desenvolvida pelo autor



Figura 164: Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Alumínio

FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 165: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Alumínio





FONTE: desenvolvida pelo autor

F.1.3 Cobre



Figura 166: Plano Centralizado do Sistema para o Cobre

FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 167: Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Cobre



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 168: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Cobre



FONTE: desenvolvida pelo autor

F.2 Materiais Cerâmicos

Figura 169: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Cerâmicas



FONTE: desenvolvida pelo autor

F.2.1 Alumina



Figura 170: Plano Centralizado do Sistema para o Alumina

FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 171: Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Alumina



FONTE: desenvolvida pelo autor
Figura 172: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Alumina



FONTE: desenvolvida pelo autor

F.2.2 Concreto





FONTE: desenvolvida pelo autor



Figura 174: Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Concreto

FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 175: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Concreto





FONTE: desenvolvida pelo autor

F.2.3 Vidro



Figura 176: Plano Centralizado do Sistema para o Vidro

FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 177: Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Vidro



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 178: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Vidro



FONTE: desenvolvida pelo autor

F.3 Materiais Poliméricos

Figura 179: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Poliméricos



FONTE: desenvolvida pelo autor

F.3.1 Policarbonato



Figura 180: Plano Centralizado do Sistema para o Policarbonato

FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 181: Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Policarbonato



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 182: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Policarbonato



FONTE: desenvolvida pelo autor

F.3.2 Poliestireno





FONTE: desenvolvida pelo autor



Figura 184: Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Poliestireno

FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 185: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Poliestireno







F.3.3 Polietileno



Figura 186: Plano Centralizado do Sistema para o Polietileno

FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 187: Detalhamento Frontal e Inferior da Peça - Polietileno



FONTE: desenvolvida pelo autor

Figura 188: Gráficos das Temperaturas dos Perfis Horizontais e Verticais da Peça - Polietileno



FONTE: desenvolvida pelo autor