

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO**

**EFEITOS DE ONDULAÇÃO E RUGOSIDADE DE
SUPERFÍCIES SOBRE SUAS ABSORTÂNCIAS E
EMITÂNCIAS: MODELO TEÓRICO E EXPERIMENTAL**

Victor Figueiredo Roriz

CAMPINAS

2011

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO**

Victor Figueiredo Roriz

**EFEITOS DE ONDULAÇÃO E RUGOSIDADE DE
SUPERFÍCIES SOBRE SUAS ABSORTÂNCIAS E
EMITÂNCIAS: MODELO TEÓRICO E EXPERIMENTAL**

Tese de doutorado apresentada à
Comissão de Pós-Graduação da Faculdade
de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo da Universidade Estadual de
Campinas, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Civil, na área de concentração em
Arquitetura e Construção

Orientadora: Rosana Maria Caram

CAMPINAS

2011

i

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

R69e Roriz, Victor Figueiredo
Efeitos de ondulação e rugosidade de superfícies
sobre suas absorptâncias e emitâncias: modelo teórico e
experimental / Victor Figueiredo Roriz. --Campinas, SP:
[s.n.], 2011.

Orientador: Rosana Maria Caram.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Conforto térmico. 2. Calor - Radiação e absorção.
3. Emissividade. 4. Materiais - Efeito da radiação. I.
Caram, Rosana Maria. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Effects of undulations and roughness of surfaces on absorptances and
emittances: theoretical and experimental models

Palavras-chave em Inglês: Thermal comfort, Heat - Radiation and absorption,
Emissivity, Materials - Effect of radiation

Área de concentração: Arquitetura e Construção

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora: Lucila Chebel Labaki, Eduvaldo Paulo Sichieri, José Tomaz
Vieira Pereira, Roberto Lamberts

Data da defesa: 22-09-2011

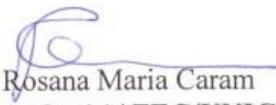
Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

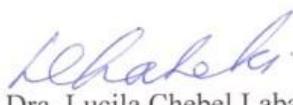
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

EFEITOS DE ONDULAÇÃO E RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIES
SOBRE SUAS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS: MODELO
TEÓRICO E EXPERIMENTAL

Victor Figueiredo Roriz

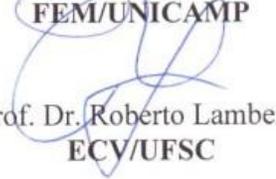
Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:


Profa. Dra. Rosana Maria Caram
Presidente e Orientador(a)/ FEC/UNICAMP


Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki
FEC/UNICAMP


Prof. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri
IAU/EESC-USP


Prof. Dr. José Tomaz Vieira Pereira
FEM/UNICAMP


Prof. Dr. Roberto Lamberts
ECV/UFSC

Campinas, 22 de setembro de 2011

AGRADECIMENTOS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente auxiliaram a produção deste trabalho. Família, amigos e professores por sua atenção e paciência.

À Professora Dr^a. Rosana Caram, por sua dedicação, estímulo e amizade, além da objetividade e clareza com que conduziu este trabalho.

À FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela bolsa de doutorado que permitiu o desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Unicamp, especialmente à toda equipe da secretaria de Pós Graduação.

Aos Professores Dr^a Lucila Chebel Labaki, Dr. José Tomaz Vieira Pereira, Dr. Roberto Lamberts, Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri, Dr^a Karin M. S. Chvatal, Dr. João R. Gomes de Faria, Dr^a Silvia A. Mikami G. Pina e Dr. Edson Matsumoto, por gentilmente aceitarem participar da banca de avaliação desta dissertação trazendo importantes contribuições para a mesma.

Agradeço à aos colegas e funcionários da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), pelo apoio em diversos momentos.

Em especial agradeço à minha esposa, por abraçar este trabalho, com todas as dificuldades impostas por ele, à minha mãe, por todo o apoio e carinho e a meu pai pela constante ajuda e orientação.

RESUMO

Saliências e reentrâncias existentes nas superfícies típicas das edificações, tanto na escala da rugosidade quanto das ondulações (de uma telha, por exemplo), constituem obstáculos que podem diferenciar o comportamento das mesmas em relação aos fluxos por radiação, se comparadas a superfícies perfeitamente lisas e planas. Absortividades e emissividades são propriedades dos materiais, enquanto absortâncias e emitâncias são características das superfícies, sendo influenciadas não apenas pelo material de que são constituídas, mas também por sua geometria. Esta pesquisa objetivou verificar tais influências, por meio de desenvolvimentos teóricos, e por procedimentos experimentais. Foi desenvolvido um modelo teórico de cálculo para o chamado “efeito cavidade”, que permite estimar as absortâncias e emitâncias efetivas de uma superfície. As estimativas resultantes foram comparadas às obtidas em procedimentos clássicos para cálculo deste mesmo efeito. Foram realizados ensaios de campo, a céu aberto e sob condições climáticas reais, possibilitando uma análise do fenômeno na presença de outros fluxos de calor e sob a influência das diversas variáveis do clima. Para complementar os dados, experimentos foram realizados sob condições controladas, possibilitando aferir o modelo teórico. A fim de quantificar as implicações dos efeitos acima mencionados, simulações foram feitas no software EnergyPlus, considerando uma edificação de geometria simples, submetida ao clima da cidade de Brasília, com diferentes propriedades radiantes para as telhas. Adotando-se absortâncias e emitâncias efetivas, as simulações revelaram diferenças acima de 2.5°C nas temperaturas internas do ar, em relação às obtidas supondo-se que a cobertura fosse lisa e plana. No caso de uso de condicionadores de ar, esta diferença pode provocar uma variação de até 30% nas estimativas de consumo de energia elétrica. A pesquisa demonstrou que, para as superfícies normalmente encontradas nas edificações, o modelo proposto é adequado e pode contribuir para o aperfeiçoamento dos estudos de comportamento térmico e energético dos edifícios.

Palavras-chave: absortividade, emissividade, absortância efetiva, emitância efetiva.

ABSTRACT

On surfaces perfectly flat and smooth, there are no obstacles to the radiant flow. However, typical surfaces of buildings have bumps and hollows that can significantly change the behaviour of them. The absorptivity and emissivity are properties of materials, while the emittance and absorptance are surface characteristics, being influenced not only by the material they are made, but also by its geometry and surface feature. This research aimed to verify such influences by means of theoretical and experimental procedures. A theoretical model for calculating the so-called "cavity effect" was developed, which allows to estimate the effective absorptance and Emittance of a surface. The resulting estimates were compared with those obtained in classical procedures for calculating the same effect. Field tests were conducted under actual weather conditions, allowing an analysis of the phenomenon in the presence of other heat fluxes and under the influence of different climate variables. To complement the data, experiments were performed under controlled conditions, allowing to test the theoretical model. In order to quantify the implications of the effects mentioned above, simulations were made with the software EnergyPlus considering a simple geometry building, submitted to the climate of the city of Brasilia, with different radiant properties of the roofs Adopting effective absorptances and emittance, simulation results show differences of up to 2.5 ° C in the internal air temperature, compared to those obtained ignoring the influences that the ripples of the tiles have on radiant flows. Considering the use of air conditioners, this could represent up to 30% variation in the energy consumption estimative. Research has shown that for surfaces typically found in buildings, the proposed model is adequate and may contribute to the improvement of thermal and behavioral studies of buildings.

Keywords: absorptivity, emissivity, effective emittances, effective absorptances.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-1: FLUXOGRAMA DA PESQUISA	4
FIGURA 3-1: EXEMPLO DE SUPERFÍCIES DE MESMA COR E DIFERENTES ABSORTÂNCIAS.....	11
FIGURA 3-2: INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE NAS ABSORTÂNCIAS	13
FIGURA 3-3: RELAÇÃO ENTRE A RUGOSIDADE DAS SUPERFÍCIES E SUAS ABSORTÂNCIAS	13
FIGURA 3-4: ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	17
FIGURA 3-5: REFLEXÕES EM UMA CAVIDADE.....	20
FIGURA 3-6: EXEMPLOS DE FATOR DE FORMA	25
FIGURA 3-7: FATOR DE FORMA. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E RADIAÇÃO ENTRE DUAS SUPERFÍCIES	25
FIGURA 3-8: SEÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE CONVEXA.....	26
FIGURA 3-9: SUPERFÍCIES QUE LIMITAM UMA CAVIDADE	27
FIGURA 3-10: ESQUEMA DE MONTAGEM DO EQUIPAMENTO.....	29
FIGURA 3-11: CABEÇOTE DE MEDIÇÃO COM O FLUXÍMETRO.	30
FIGURA 3-12: ESPECTRO SOLAR PADRÃO E SENSIBILIDADE DA VISÃO HUMANA.	33
FIGURA 3-13: ESPECTRO SOLAR PADRÃO	34
FIGURA 3-14: REFLETIVIDADE E ESPECTRO SOLAR PADRÃO.....	35
FIGURA 3-15: ESQUEMA DE MEDIÇÃO DE REFLETÂNCIA	37
FIGURA 3-16: EMISSIVIDADE ESPECTRAL DE 2 AMOSTRAS DE ALUMÍNIO ANODIZADO	39
FIGURA 3-17: PROCEDIMENTO DE REFERÊNCIA JIS A 1423:1983.....	40
FIGURA 3-18: PROCEDIMENTO DE REFERÊNCIA JIS A 1423:1983 NO IPT.....	41
FIGURA 3-19: D&S EMISSOMETER MODEL AE1	42
FIGURA 3-20: RADIAÇÃO DIRETA INCIDENTE SOBRE SUPERFÍCIES PLANAS.....	43
FIGURA 3-21: RADIAÇÃO DIRETA INCIDENTE SOBRE SUPERFÍCIE.	44
FIGURA 3-22: RADIAÇÃO INCIDENTE SOBRE SUPERFÍCIE QUALQUER.....	44
FIGURA 3-23: FLUXO POR RADIAÇÃO EM SUPERFÍCIES DE UMA CAVIDADE	46
FIGURA 3-24: CIRCUITO EQUIVALENTE AO FLUXO POR RADIAÇÃO EM SUPERFÍCIES DE UMA CAVIDADE.....	46
FIGURA 3-25: INTER-REFLEXÃO	48
FIGURA 3-26: CAVIDADE RANHURA RETANGULAR	49

FIGURA 3-27: CAVIDADE RANHURA EM V	50
FIGURA 3-28: CAVIDADE ESFÉRICA	50
FIGURA 3-29: EXEMPLO DE CAVIDADE PARA AUMENTO DE EMITÂNCIA EFETIVA	52
FIGURA 3-30: EMISSIVIDADE APARENTE DE SUPERFÍCIE ESFÉRICA	53
FIGURA 4-1: ENERGIA EMITIDA POR UMA SUPERFÍCIE CÔNCAVA (1) PARA O SEU ENTORNO (2) ..	55
FIGURA 4-2: EFEITO DA FORMA NA EMITÂNCIA EFETIVA (EQ. 4-35)	63
FIGURA 4-3: EFEITO DA FORMA NA EMITÂNCIA EFETIVA (EQ. 4-35)	63
FIGURA 4-4: EFEITO CAVIDADE PARA RANHURA RETANGULAR. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DA EQUAÇÃO 4-35	64
FIGURA 4-5: EFEITO CAVIDADE PARA RANHURA EM V. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DA EQUAÇÃO 4-35	65
FIGURA 4-6: EFEITO CAVIDADE PARA CAVIDADE ESFÉRICA. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DA EQUAÇÃO 4-35	65
FIGURA 4-7: EFEITO DA FORMA NA ABSORTÂNCIA EFETIVA (EQ 4-39)	67
FIGURA 4-8: INCREMENTO NA ABSORTÂNCIA POR EFEITO DA FORMA	68
FIGURA 4-9: INCREMENTO NA ABSORTÂNCIA POR EFEITO DA FORMA	72
FIGURA 5-1: EXPERIMENTO PROPOSTO	76
FIGURA 5-2: PEÇAS PARA EXPERIMENTO PROPOSTO.....	77
FIGURA 5-3: PEÇA SEM PINTURA	77
FIGURA 5-4: PRIMER E TINTA	78
FIGURA 5-5: PEÇAS PREPARADAS	78
FIGURA 5-6: EXPERIMENTO PROPOSTO	78
FIGURA 5-7: MONTAGEM DA AMOSTRA.....	79
FIGURA 5-8: FECHAMENTO DO TOPO	79
FIGURA 5-9: MONTAGEM “ONDULADA”	79
FIGURA 5-10: MONTAGEM “LISA”	79
FIGURA 5-11: MONTAGEM “LISA”, PEÇAS ADICIONAIS PARA AJUSTE DA MASSA	80
FIGURA 5-12: SENSORES SOB O ISOLANTE DURANTE A MONTAGEM	80
FIGURA 5-13: AMOSTRAS MONTADAS	81
FIGURA 5-14: AMOSTRAS MONTADAS	81
FIGURA 5-15: CORTE ESQUEMÁTICO - AMOSTRAS MONTADAS.....	82

FIGURA 5-16: VISTAS EXPLODIDAS.	82
FIGURA 5-16: LOCALIZAÇÃO DAS CÉLULAS DE TESTE	83
FIGURA 5-17: PIRANÔMETRO	83
FIGURA 5-18: TERMISTOR	83
FIGURA 5-19: UNIDADE DE TRATAMENTO DE SINAIS - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	83
FIGURA 5-20: BALANÇO DE ENERGIA EM UMA SUPERFÍCIE	84
FIGURA 5-21: MODELO FÍSICO PROPOSTO.....	85
FIGURA 5-22: ESPECTROFOTÔMETRO CARY 5G.....	87
FIGURA 5-23: AMOSTRAS PARA MEDIÇÃO DE REFLETIVIDADE.....	87
FIGURA 5-24: REFLETIVIDADE DAS AMOSTRAS.	88
FIGURA 5-25: REFLETIVIDADE SOLAR DAS AMOSTRAS.	88
FIGURA 5-26: REFLETIVIDADES DAS AMOSTRAS.....	89
FIGURA 5-27: SOFTWARE DE CÁLCULO DOS FLUXOS DE CALOR.....	91
FIGURA 5-28: REGISTROS DE 01/07/2010 NA CARTA PSICROMÉTRICA	95
FIGURA 5-29: EVOLUÇÃO DE TEMPERATURAS SUPERFICIAIS.	95
FIGURA 5-30: TEMPERATURAS SUPERFICIAIS E TEMPERATURA AMBIENTE.	96
FIGURA 5-31: TEMPERATURA AMBIENTE E SOMA DOS FLUXOS.	96
FIGURA 5-32: TEMPERATURA AMBIENTE E SOMA DOS FLUXOS PARA AS AMOSTRAS “CINZA”	96
FIGURA 5-33: EVOLUÇÃO DE TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS AMOSTRAS “ALUMÍNIO”.....	97
FIGURA 5-34: EVOLUÇÃO DE TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS AMOSTRAS “BRANCA”.....	97
FIGURA 5-35: EVOLUÇÃO DE TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS AMOSTRAS “CINZA”	97
FIGURA 5-36: EVOLUÇÃO DE TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS AMOSTRAS “PRETA”	97
FIGURA 5-37: EVOLUÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR.....	98
FIGURA 5-38: EVOLUÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR PARA AS AMOSTRAS “CINZA”.....	98
FIGURA 5-39: FLUXOS DE CALOR E SOMA DOS FLUXOS.	99
FIGURA 5-40: FLUXOS DE CALOR E SOMA DOS FLUXOS DAS AMOSTRAS CINZA.....	100
FIGURA 5-41: FLUXOS DE CALOR E SOMA DOS FLUXOS DAS AMOSTRAS “ALUMÍNIO”	100
FIGURA 5-42: FLUXOS SOLARES E SOMA DOS FLUXOS.....	101
FIGURA 5-43: FLUXOS SOLARES DAS AMOSTRAS “ALUMÍNIO” E SOMA DOS FLUXOS.	102
FIGURA 5-44: FLUXOS SOLARES DAS AMOSTRAS “BRANCA” E SOMA DOS FLUXOS.	102
FIGURA 5-45: FLUXOS SOLARES DAS AMOSTRAS “CINZA” E SOMA DOS FLUXOS.....	103

FIGURA 5-46: FLUXOS SOLARES DAS AMOSTRAS “PRETA” E SOMA DOS FLUXOS.....	103
FIGURA 5-47: FLUXOS SOLARES DAS AMOSTRAS “CINZA” E SOMA DOS FLUXOS $I > 400 \text{ W/M}^2$	104
FIGURA 5-48: FLUXOS SOLARES.	105
FIGURA 5-49: FLUXOS POR CONDUÇÃO E SOMA DOS FLUXOS.....	106
FIGURA 5-50: FLUXOS POR CONDUÇÃO DAS AMOSTRAS “ALUMÍNIO” E SOMA DOS FLUXOS.	106
FIGURA 5-51: FLUXOS POR CONDUÇÃO DAS AMOSTRAS “BRANCA” E SOMA DOS FLUXOS.	107
FIGURA 5-52: FLUXOS POR CONDUÇÃO DAS AMOSTRAS “CINZA” E SOMA DOS FLUXOS.....	107
FIGURA 5-53: FLUXOS POR CONDUÇÃO DAS AMOSTRAS “PRETA” E SOMA DOS FLUXOS.....	108
FIGURA 5-54: FLUXOS POR CONDUÇÃO.	108
FIGURA 5-55: FLUXOS POR CONDUÇÃO DAS AMOSTRAS “ALUMÍNIO”.	109
FIGURA 5-56: FLUXOS POR CONDUÇÃO DAS AMOSTRAS “BRANCA”.	109
FIGURA 5-57: FLUXOS POR CONDUÇÃO DAS AMOSTRAS “CINZA”.	110
FIGURA 5-58: FLUXOS POR CONDUÇÃO DAS AMOSTRAS “PRETA”.	110
FIGURA 5-59: FLUXOS POR RADIAÇÃO EM ONDAS LONGAS E SOMA DOS FLUXOS.....	112
FIGURA 5-60: FLUXOS POR RADIAÇÃO EM ONDAS LONGAS DAS AMOSTRAS “ALUMÍNIO” E SOMA DOS FLUXOS.....	113
FIGURA 5-61: FLUXOS POR RADIAÇÃO EM ONDAS LONGAS DAS AMOSTRAS “BRANCA” E SOMA DOS FLUXOS.....	113
FIGURA 5-62: FLUXOS POR RADIAÇÃO EM ONDAS LONGAS DAS AMOSTRAS “CINZA” E SOMA DOS FLUXOS.....	114
FIGURA 5-63: FLUXOS POR RADIAÇÃO EM ONDAS LONGAS DAS AMOSTRAS “PRETA” E SOMA DOS FLUXOS.....	114
FIGURA 5-64: FLUXOS POR RADIAÇÃO EM ONDAS LONGAS.....	115
FIGURA 5-65: FLUXOS POR RADIAÇÃO EM ONDAS LONGAS E TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA.	116
FIGURA 5-66: FLUXOS DE CALOR E SOMA DOS FLUXOS (SEM CONVECÇÃO FORÇADA).....	117
FIGURA 5-67: EVOLUÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR (SEM CONVECÇÃO FORÇADA).....	118
FIGURA 5-68: EVOLUÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR PARA AS AMOSTRAS “CINZA” (SEM CONVECÇÃO FORÇADA).	118
FIGURA 5-69: FLUXOS POR CONVECÇÃO E SOMA DOS FLUXOS.....	119
FIGURA 5-70: FLUXOS POR CONVECÇÃO DAS AMOSTRAS “ALUMÍNIO” E SOMA DOS FLUXOS.....	120

FIGURA 5-71: FLUXOS POR CONVECÇÃO DAS AMOSTRAS “BRANCA” E SOMA DOS FLUXOS.....	120
FIGURA 5-72: FLUXOS POR CONVECÇÃO DAS AMOSTRAS “CINZA” E SOMA DOS FLUXOS.....	121
FIGURA 5-73: FLUXOS POR CONVECÇÃO DAS AMOSTRAS “PRETA” E SOMA DOS FLUXOS.....	121
FIGURA 5-74: FLUXOS POR CONVECÇÃO.....	122
FIGURA 5-75: FLUXOS POR CONVECÇÃO DAS AMOSTRAS “ALUMÍNIO”.....	123
FIGURA 5-76: FLUXOS POR CONVECÇÃO DAS AMOSTRAS “BRANCA”.....	123
FIGURA 5-77: FLUXOS POR CONVECÇÃO DAS AMOSTRAS “CINZA”.....	124
FIGURA 5-78: FLUXOS POR CONVECÇÃO DAS AMOSTRAS “PRETA”.....	124
FIGURA 5-79: FLUXOS POR CONVECÇÃO DAS AMOSTRAS “CINZA”.....	125
FIGURA 5-80: FLUXOS POR CONVECÇÃO DAS AMOSTRAS “CINZA” PARA IRRADIÂNCIA > 400 W/M ²	126
FIGURA 5-81: COEFICIENTES DE CONVECÇÃO E SOMA DOS FLUXOS.....	126
FIGURA 5-82: COEFICIENTES DE CONVECÇÃO E SOMA DOS FLUXOS PARA AMOSTRAS “CINZA”.....	127
FIGURA 5-83: COEFICIENTES DE CONVECÇÃO E SOMA DOS FLUXOS PARA AMOSTRAS “CINZA”.....	127
FIGURA 5-84: EVOLUÇÃO DE TEMPERATURAS PARA PERÍODO NOTURNO.....	129
FIGURA 5-85: EVOLUÇÃO DE TEMPERATURAS SUPERFICIAIS NOTURNAS DAS AMOSTRAS “ALUMÍNIO”.....	130
FIGURA 5-86: EVOLUÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR PARA PERÍODO NOTURNO.....	130
FIGURA 5-87: EVOLUÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR PARA PERÍODO NOTURNO DAS AMOSTRAS “CINZA”.....	131
FIGURA 5-88: EVOLUÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR PARA PERÍODO NOTURNO DAS AMOSTRAS “ALUMÍNIO”.....	131
FIGURA 5-89: FLUXOS DE CALOR NOTURNOS E SOMA DOS FLUXOS.....	132
FIGURA 5-90: FLUXOS DE CALOR NOTURNOS E SOMA DOS FLUXOS AMOSTRAS “ALUMÍNIO”.....	132
FIGURA 5-91: FLUXOS DE CALOR NOTURNOS E SOMA DOS FLUXOS AMOSTRAS “CINZA”.....	133
FIGURA 6-1: CORTE ESQUEMÁTICO DO EXPERIMENTO E DETALHE DE AMOSTRA.....	136
FIGURA 6-2: MONTAGEM DAS AMOSTRAS - MATERIAL PARA PEÇA 1.....	136
FIGURA 6-3: MONTAGEM DAS AMOSTRAS - PEÇA 1.....	136
FIGURA 6-4: MONTAGEM DAS AMOSTRAS - MATERIAL PARA PEÇA 2.....	137
FIGURA 6-5: MONTAGEM DAS AMOSTRAS – PEÇA 2.....	137
FIGURA 6-6: AMOSTRAS COM DIFERENTES FATORES DE FORMA.....	138

FIGURA 6-7: FIXAÇÃO DOS SENSORES	138
FIGURA 6-8: PREENCHIMENTO COM ISOLANTE	138
FIGURA 6-9: MONTAGEM DAS AMOSTRAS	139
FIGURA 6-10: MONTAGEM DAS AMOSTRAS NO BLOCO ISOLANTE	139
FIGURA 6-11: VISTA SUPERIOR DA CÂMARA DE VÁCUO	139
FIGURA 6-12: CONJUNTO DAS AMOSTRAS	139
FIGURA 6-13: CÂMARA DE VÁCUO COM AS AMOSTRAS.....	140
FIGURA 6-14: CÂMARA DE VÁCUO FECHADA.....	140
FIGURA 6-15: INDICADOR DE VÁCUO E VÁLVULA	141
FIGURA 6-16: TEMPERATURAS REGISTRADAS, DESTACANDO OS MOMENTOS DE RESFRIAMENTO (DET. 1) E DE AQUECIMENTO (DET. 2).....	145
FIGURA 6-17: DET. 1: TEMPERATURAS REGISTRADAS, DESTACANDO OS MOMENTOS DE RESFRIAMENTO.....	145
FIGURA 6-18: DET. 2: TEMPERATURAS REGISTRADAS, DESTACANDO OS MOMENTOS DE AQUECIMENTO	146
FIGURA 6-19: ERRO CALCULADO.....	148
FIGURA 6-20: RELAÇÃO ENTRE O ERRO E O INTERVALO ENTRE REGISTROS.....	148
FIGURA 6-21: FLUXOS DE CALOR CALCULADOS PELA EQUAÇÃO 3-25	150
FIGURA 6-22: FLUXOS DE CALOR NO MOMENTO DE SÚBITO AQUECIMENTO.....	151
FIGURA 6-23: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE MODELOS DE CÁLCULO	152
FIGURA 6-24: CAVIDADE CILÍNDRICA CIRCULAR (SPARROW E CESS, 1978).....	153
FIGURA G-1: EMISSIVIDADES EFETIVAS CALCULADAS POR 2 MODELOS	154
FIGURA G-2: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE 2 MODELOS DE CÁLCULO DE FLUXO DE CALOR	154
FIGURA G-3: GEOMETRIA DA TELHA ADOTADA NOS EXEMPLOS	156
FIGURA G-4: GEOMETRIA DO AMBIENTE SIMULADO NOS CASOS DOS EXEMPLOS 1 A 3.....	157
FIGURA G-5: TEMPERATURAS OBTIDAS NA SIMULAÇÃO DO CASO 1.	158
FIGURA 6-30: TEMPERATURAS OBTIDAS NA SIMULAÇÃO DO CASO 2.....	158
FIGURA G-7: TEMPERATURAS OBTIDAS NA SIMULAÇÃO DO CASO 3.	159
FIGURA G-8: GEOMETRIA DO AMBIENTE SIMULADO NO EXEMPLO 4.....	160
FIGURA 6-9: TEMPERATURAS OBTIDAS NA SIMULAÇÃO DO CASO 4.....	161

FIGURA 6-34: TEMPERATURAS DAS TELHAS OBTIDAS NA SIMULAÇÃO DO CASO 4.	161
FIGURA G-10: RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO DO CASO 5.	162
FIGURA 7-1: FLUXOGRAMA DO SOFTWARE.	163
FIGURA 7-2: SELEÇÃO DE PERFIL.	164
FIGURA 7-3: PERFIL SELECIONADO.	164
FIGURA 7-4: DEFINIÇÃO DE PERFIL.	165
FIGURA 7-5: DEFINIÇÃO DA ABSORTIVIDADE E EMISSIVIDADE	166
FIGURA 7-6: SENSIBILIDADE: TONALIDADE MÉDIA.	166
FIGURA 7-7: SENSIBILIDADE: TONALIDADE BAIXA.	166
FIGURA 7-8: SENSIBILIDADE: SEGMENTOS PEQUENOS.	167
FIGURA 7-9: SENSIBILIDADE: SEGMENTOS GRANDES.	167
FIGURA 7-10: ZOOM	168
FIGURA 7-11: BASE DE DADOS.	168
FIGURA 7-12: DIMENSÕES TELHA VOGATEX.	169
FIGURA 7-13: DIMENSÕES TELHA OLINDA.	169
FIGURA 7-14: DIMENSÕES TELHA MODULADA.	169
FIGURA 7-15: DIMENSÕES TELHA CANALETE 44.	169
FIGURA 7-16: DIMENSÕES TELHA CANALETE 49.	169
FIGURA 7-17: DIMENSÕES TELHA ETERMAX.	170
FIGURA 7-18: DIMENSÕES TELHA ETERCALHA	170
FIGURA 7-19: ABSORTÂNCIAS EFETIVAS	172
FIGURA 7-20: LIXA 1.	172
FIGURA 7-21: LIXA 2.	172
FIGURA 7-22: LIXA 3.	172
FIGURA 7-23: LIXA 4.	172
FIGURA A-1: CAVIDADE	191
FIGURA D-1: O NÚMERO DE BIOT	204
FIGURA D-2: VISCOSIDADE DO AR ÚMIDO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DA FRAÇÃO MOLAR DE VAPOR	208
FIGURA D-3: CONDUTIVIDADE DO AR ÚMIDO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DA FRAÇÃO MOLAR DE ÁGUA (ADAPTADO DE,	213

FIGURA D-4: REGIMES LAMINAR E TURBULENTO	215
FIGURA D-5: NÚMERO DE RAYLEIGH E TRANSIÇÃO LAMINAR-TURBULENTO.....	215
FIGURA D-6: CORTE DA SUPERFÍCIE CELESTE À TEMPERATURA TCEU E SUPERFÍCIE DA AMOSTRA	217
FIGURA D-7: CORTE DA SUPERFÍCIE CELESTE À TEMPERATURA TCEU E SUPERFÍCIE DA AMOSTRA	218
FIGURA D-8: PIRGEÔMETRO MODELO CG1: KIPP & ZONEN	220
FIGURA D-9: EVOLUÇÃO DA RADIAÇÃO DE ONDA LONGA ATMOSFÉRICA HORÁRIA DO PERÍODO DE 2000 A 2006 EM BOTUCATU	220
FIGURA D-10: EMISSÃO ATMOSFÉRICA DE RADIAÇÃO EM ONDAS LONGAS (LW) EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE	222
FIGURA D-11: EMISSÃO ATMOSFÉRICA DE RADIAÇÃO EM ONDAS LONGAS (LW) PARA PERÍODO DE TEMPERATURA CRESCENTE	222
FIGURA D-12: EMISSÃO ATMOSFÉRICA DE RADIAÇÃO EM ONDAS LONGAS (LW) PARA PERÍODO DE TEMPERATURA DECRESCENTE	223
FIGURA D-13: REGRESSÃO DE VALORES DA FIGURA D-11, PARA PERÍODO DE TEMPERATURA CRESCENTE.....	224
FIGURA D-14: REGRESSÃO DE VALORES DA FIGURA D-12 PARA PERÍODO DE TEMPERATURA DECRESCENTE.....	224
FIGURA D-15: CORRELAÇÕES ENTRE A EMISSIVIDADE DO CÉU E O PONTO DE ORVALHO.....	226
FIGURA E-1: SOFTWARE ESPECTRO SOLAR	228
FIGURA E-2: IRRADIÂNCIA SOLAR ESTIMADA PELO SOFTWARE ESPECTRO.....	228
FIGURA E-3: REFLETIVIDADES SOLAR DAS AMOSTRAS.	229
FIGURA E-4: TEMPERATURAS SUPERFICIAIS REGISTRADAS EM 22/04/2010.....	230
FIGURA E-5: FLUXO SOLAR E SOMA DOS FLUXOS.	231
FIGURA E-6: FLUXO SOLAR E SOMA DOS FLUXOS.	231
FIGURA F-1: CALIBRAÇÃO DO PIRANÔMETRO.	234
FIGURA F-2: CALIBRAÇÃO DOS TERMISTORES.....	235
FIGURA F-3: PESAGEM DAS PEÇAS	235
FIGURA H-1: EXTRAPOLAÇÃO DAS CURVAS DA FIGURA 6-24	238

FIGURA H-1: FLUXOS POR CONVECÇÃO E SOMA DOS FLUXOS PARA AMOSTRAS PINTADAS (PERÍODO NOTURNO).....	239
FIGURA H-2: REGRESSÃO LINEAR DA SOMA EM RELAÇÃO À Q_{CONV}	240
FIGURA H-3: FLUXOS POR CONVECÇÃO E FLUXO POR CONVECÇÃO AJUSTADO VERSUS SOMA DOS FLUXOS PARA AMOSTRAS PINTADAS (PERÍODO NOTURNO)	241
FIGURA H-4: FLUXOS POR CONVECÇÃO AJUSTADO PARA AMOSTRAS PINTADAS E SOMA DOS FLUXOS (PERÍODO NOTURNO).....	242
FIGURA H-5: REGRESSÃO LINEAR DA SOMA EM RELAÇÃO À Q_{IV}	242
FIGURA H-6: FLUXOS POR INFRAVERMELHO E FLUXO POR INFRAVERMELHO AJUSTADO VERSUS SOMA DOS FLUXOS PARA AMOSTRAS PINTADAS (PERÍODO NOTURNO).	243
FIGURA H-7: FLUXOS E FLUXOS AJUSTADOS PARA AMOSTRAS CINZA LISA (PERÍODO NOTURNO)	244
FIGURA H-8: FLUXOS E FLUXOS AJUSTADOS PARA AMOSTRAS CINZA ONDULADA (PERÍODO NOTURNO).....	244

LISTA DE TABELAS

TABELA 3-1: EMITÂNCIA DE SUPERFÍCIES COM DIFERENTES RUGOSIDADES	12
TABELA 3-2: EMISSIVIDADES DAS AMOSTRAS.	42
TABELA 3-3: EMISSIVIDADE APARENTE PARA CAVIDADES CILÍNDRICAS	51
TABELA 4-1: PARCELAS DA ENERGIA EMITIDA PELA SUPERFÍCIE 1.....	57
TABELA 4-2: ENERGIA EMITIDA PELA SUPERFÍCIE 1.	57
TABELA 4-3: CORREÇÃO DA ABSORTÂNCIA POR EFEITO DA FORMA	66
TABELA 5-1: REFLETIVIDADES DAS AMOSTRAS.	89
TABELA 5-2: COMPARAÇÃO DAS REFLETIVIDADES DAS AMOSTRAS NO 1º E 2º TESTES.....	89
TABELA 5-3: ABSORTIVIDADES (α_1) E ABSORTÂNCIAS EFETIVAS (α_e)	93
TABELA 5-4: EMISSIVIDADES(ε_1) E EMITÂNCIAS EFETIVAS(ε_e) (%).	94
TABELA 6-1: DIMENSÕES DAS AMOSTRAS.	138
TABELA 6-2: CAPACIDADE TÉRMICA DAS AMOSTRAS.....	147
TABELA 6-3: EMITÂNCIAS EFETIVAS DAS AMOSTRAS.....	151
TABELA G-1: EMITÂNCIAS EFETIVAS DAS AMOSTRAS POR REGRESSÕES DA FIGURA 6-24.....	153
TABELA G-2: CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS..	157
TABELA G-3: CARGAS TÉRMICAS CONSIDERADAS.....	160
TABELA 7-1: ABSORTÂNCIAS MEDIDAS EM ESPECTROFOTÔMETRO E AJUSTADAS AO ESPECTRO SOLAR PADRÃO (%).	170
TABELA 7-2: ABSORTÂNCIAS SOLARES EFETIVAS (%).	171
TABELA 7-3: ABSORTÂNCIAS SOLARES EFETIVAS (%).	173
TABELA C-1: CORREÇÃO DA ABSORTÂNCIA POR EFEITO DA FORMA	199
TABELA D-1: RADIAÇÃO ATMOSFÉRICA EM ONDA LONGA EM BOTUCATU-SP (MJ/M2)	220
TABELA E-1: CONDIÇÕES CLIMÁTICAS PARA DIA 22/04/05 NO AEROPORTO LEITE LOPES.	227
TABELA E-2: REFLETIVIDADES DAS AMOSTRAS.	229
TABELA E-3: RESUMO DOS DADOS ATMOSFÉRICOS.	229
TABELA E-4: TEMPERATURAS SUPERFICIAIS.	230
TABELA E-5: SOMA DOS FLUXOS DE CALOR PARA DIFERENTES MÉTODOS DE AJUSTE DAS ABSORTIVIDADES SOLARES.	232

TABELA H-1: EQUAÇÕES DAS CURVAS DA FIGURA 6-24.	237
TABELA H-2: EXTRAPOLAÇÃO DAS EQUAÇÕES DAS CURVAS DA FIGURA 6-24.....	237
TABELA H-3: RESULTADOS DA EQUAÇÃO H-3.....	237

SÍMBOLOS ADOTADOS

α	Absortância
A	Área (m ²)
c	Calor específico da amostra (J/(Kg·K))
h_c	Coefficiente de convecção (W/(m ² .K))
σ	Constante de Stefan Boltzmann (5,67.10 ⁻⁸ W/(m ² .K ⁴))
q	Densidade de fluxo de calor (W/m ²)
ε	Emitância
E	Energia (W) / Poder emissivo (W/m ²)
L	Espessura (m)
FF	Fator de forma
Q	Fluxo de calor (J)
I	Irradiância (W/m ²)
m	Massa (kg)
Bi	Número de Biot
J	Radiosidade (W/m ²)
ρ	Refletância
T	Temperatura (°C,K)
τ	Transmitância

Subscritos e índices

bs	Ar ambiente
ceu	Céu
λ	Comprimento de onda
<i>cn</i>	Corpo negro
θ	Direção
e	Efetiva
g	Global
Ls	Lisa
On	Ondulada
0	Propriedade do material
s	Solar
sup	Superficial
1	Superfície 1
2	Superfície 2
se	Superfície externa
si	Superfície interna

SUMÁRIO

RESUMO	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	XVI
SÍMBOLOS ADOTADOS	XVIII
SUMÁRIO	XX
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	7
3 REFERENCIAL TEÓRICO	9
3.1 CONCEITOS E DEFINIÇÕES	17
3.1.1 <i>CORPO NEGRO</i>	20
3.1.2 <i>EMISSIVIDADE E EMITÂNCIA, ABSORTIVIDADE E ABSORTÂNCIA</i>	21
3.1.3 <i>A SUPERFÍCIE CINZA</i>	24
3.1.4 <i>FATOR DE FORMA</i>	25
3.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES RADIATIVAS	28
3.2.1 <i>AVALIAÇÃO DA REFLETIVIDADE COM O ESPECTROFOTÔMETRO</i>	31
3.2.2 <i>AJUSTE DA ABSORTÂNCIA PARA O ESPECTRO SOLAR PADRÃO</i>	32
3.2.3 <i>AVALIAÇÃO DA REFLETÂNCIA SOLAR DE AMOSTRAS DE GRANDE DIMENSÕES</i>	37
3.2.4 <i>MEDIÇÕES LABORATORIAIS DA EMISSIVIDADE</i>	39
3.3 IRRADIÂNCIA SOBRE SUPERFÍCIE ONDULADA.....	43
3.4 FLUXO DE CALOR POR RADIAÇÃO EM UMA CAVIDADE	46
3.5 EMITÂNCIA EFETIVA	48
3.6 CONVECÇÃO EM CAVIDADES.....	54

4 DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.	55
4.1 INCREMENTO MÁXIMO NA ABSORTÂNCIA POR EFEITO DA FORMA	68
5 PRIMEIRA ETAPA DA PESQUISA.....	75
5.1 MODELO TEÓRICO ADOTADO	84
5.2 MEDIÇÕES DE REFLETIVIDADE.....	87
5.3 CALCULADORA PARA FLUXOS DE CALOR.....	91
5.4 RESULTADOS PARCIAIS E SUA DISCUSSÃO	93
5.4.1 AVALIAÇÃO DO MODELO TEÓRICO - FLUXOS DE CALOR	98
5.4.1.1 FLUXO SOLAR	101
5.4.1.2 FLUXO POR CONDUÇÃO.....	106
5.4.1.3 FLUXO POR RADIAÇÃO DE ONDAS LONGAS.....	112
5.4.1.4 FLUXO POR CONVECÇÃO	117
5.4.1.5 FLUXOS NOTURNOS	129
6 SEGUNDA ETAPA DA PESQUISA	135
6.1 MODELO TEÓRICO 2	142
6.2 RESULTADOS DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 2 E SUA DISCUSSÃO	145
6.2.1 ESTIMATIVA DO ERRO	147
6.2.2 FLUXOS – COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ESTIMATIVA.....	149
6.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	156
6.3.1 PRIMEIRO EXEMPLO	156
6.3.2 SEGUNDO EXEMPLO.....	158
6.3.3 TERCEIRO EXEMPLO	159
6.3.4 QUARTO EXEMPLO.....	159

6.3.5	QUINTO EXEMPLO.....	162
7	O SOFTWARE.....	163
7.1	EXEMPLO DE APLICAÇÃO.....	169
8	CONCLUSÕES.....	175
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	179
A.	APÊNDICE A: AVALIAÇÃO DA EMITÂNCIA.....	191
B.	APÊNDICE B: EMITÂNCIA DA CAVIDADE ESFÉRICA.....	195
C.	APÊNDICE C: DEDUÇÃO DA ABSORTÂNCIA EFETIVA.....	199
D.	APÊNDICE D: FLUXOS DE CALOR.....	203
D.1	FLUXO DE CALOR POR CONDUÇÃO.....	203
	O NÚMERO DE BIOT.....	203
D.2	FLUXO DE CALOR POR CONVECÇÃO.....	204
	O NÚMERO DE NUSSELT:.....	205
	O NÚMERO DE REYNOLDS:.....	207
	O NÚMERO DE PRANDTL:.....	211
	O NÚMERO DE GRASHOF:.....	213
	O NÚMERO DE RAYLEIGH:.....	214
D.3	FLUXO DE CALOR SOLAR.....	216
D.4	FLUXO DE CALOR POR RADIAÇÃO EM INFRAVERMELHO.....	216
D.5	TEMPERATURA E EMISSIVIDADE DO CÉU.....	225
E.	APÊNDICE E: TESTE DO ESPECTRO SOLAR PADRÃO.....	227
F.	APÊNDICE F: CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS E PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS.....	233
G.	APÊNDICE G: REGRESSÕES RELATIVAS À FIGURA 6-24.....	237
H.	APÊNDICE H: AJUSTE ESTATÍSTICO.....	239

1 INTRODUÇÃO

O mercado da construção civil tem sofrido importantes mudanças nas últimas décadas. Há um crescente esforço na melhoria da qualidade de seus produtos, em seus processos de produção e processos de projeto (SOUZA, 2003). Consumidores e órgãos de regulamentação começam a exigir construções e métodos construtivos que cumpram condições mínimas de desempenho, sobre diversos aspectos, até então pouco considerados. Estas mudanças ocorrem em sintonia com o crescimento da consciência ambiental por parte da sociedade, implicando, para toda a indústria, na necessidade de adoção de técnicas e processos mais eficientes, e que melhor aproveitem os recursos naturais.

O processo de projeto pode ser auxiliado pela utilização de métodos de controle e planejamento. Tais métodos buscam restringir o espaço ou o escopo do problema para reduzir o tempo de desenvolvimento do projeto e elevar sua qualidade.

No caso das edificações, a qualidade envolve, entre diversos outros parâmetros, o comportamento térmico e a eficiência energética das mesmas. Estes objetivos podem ser atingidos através da aplicação de técnicas bioclimáticas, ou seja, projetar edifícios e sistemas respeitando o ambiente em que estão inseridos, visando o conforto térmico e a economia de energia. A história da arquitetura indica que a arquitetura vernácula de diferentes povos se beneficiava, mesmo que empiricamente, de algumas destas técnicas. Nota-se as diferentes formas que cada povo adotou para se abrigar, adequando-se às várias regiões e a cada clima do globo, ao longo do tempo. Se em épocas anteriores pouca importância foi dada a estes conceitos, este descuido resultou em desconforto e alto consumo energético. Aparentemente este quadro vem se alterando e estes princípios gradativamente vem sendo incorporados ao processo de projeto.

Estudos sobre o tema são mais e mais frequentes sendo que, segundo a ELETROBRÁS (2007), as edificações são responsáveis por cerca de 48% do consumo

de energia elétrica no Brasil, considerando-se os setores residencial e comercial, sendo grande parte dessa energia destinada a proporcionar conforto ambiental aos usuários.

“Com a implantação de medidas para redução do consumo de energia em prédios já existentes, o consumo pode ser reduzido em aproximadamente 30%. Em prédios já projetados dentro do conceito de eficiência energética, a economia pode chegar a 50%” (MACIEL e LAMBERTS, 2003).

Para incorporar estas ideias aos projetos e às construções em si, é imprescindível conhecer as características e propriedades físicas dos materiais empregados e, além disso, os princípios físicos envolvidos. O ato, aparentemente simples, do projetista em definir as cores e o acabamento de uma fachada, será sempre decisivo sobre o desempenho térmico de uma edificação, pois definem dois fatores que exercem grande influência sobre os fluxos de calor nos edifícios, sua absorvância e emitância.

Do total de radiação solar absorvida por um edifício, uma parte significativa ocorre através da cobertura. Quanto mais baixa for a latitude e menor o número de pavimentos, maior será esta porcentagem. Isso ocorre porque estas são as superfícies mais expostas à radiação solar e podem causar ganho excessivo de calor em períodos quentes (CHEIKH e BOUCHAIR, 2004). Desta forma, em toda a região tropical as coberturas têm fundamental importância no desempenho térmico dos edifícios.

O desempenho térmico de telhas também sofre considerável influência da cor externa, a qual geralmente esta relacionada às parcelas de refletância e a absorvância nos espectros de luz visível e infravermelho (CASTRO, LABAKI, *et al.*, 2003).

Sistemas de isolamento térmico como telhas “sanduíche” e de barreiras contra radiação (“foils”) têm sido utilizados na tentativa de reduzir os fluxos térmicos através das coberturas. O uso deste tipo de barreira no Brasil começou em meados dos anos 1990 e desde então tornou-se popular para o isolamento térmico de telhados de edifícios (MICHELS, LAMBERTS e GUTHS, 2008).

Entretanto, além de onerarem a construção, nem sempre são indicados, uma vez que reduzem tanto a entrada quanto a saída de calor, dificultando o resfriamento dos ambientes, o que pode vir a causar desconforto, particularmente no período noturno.

Por estes motivos, para regiões de clima quente o melhor desempenho térmico de coberturas está associado, sobretudo, à aplicação de técnicas de resfriamento radiante e evaporativo (LABAKI, TEIXEIRA e TAVARES, 2005).

Uma alternativa interessante para controle do fluxo térmico por radiação, pode ser obtida através dos efeitos conjugados entre absorvâncias e emitâncias dos materiais utilizados nas coberturas. Menores absorvâncias reduzem os ganhos de calor solar do edifício, sem necessariamente alterar a capacidade de emissão de calor por radiação. Além disso, aumentar a emitância deve incrementar as trocas de calor por radiação em ondas longas. Por exemplo, uma chapa de alumínio tem uma absorvância solar que é, em média para as temperaturas atmosféricas, o dobro de sua emissividade, enquanto um acabamento com caiação branca tem uma emissividade aproximadamente 3 vezes maior que sua absorvância (GOMES, 1962).

Granja (2002) utilizando um modelo de transmissão de calor em regime periódico, observou que a absorvância adquire maior importância em fechamentos opacos com menor inércia térmica.

Alterações na forma de uma superfície implicam em uma mudança nos valores efetivos destas propriedades. Enquanto uma superfície perfeitamente lisa e plana tem uma determinada absorção de calor, uma superfície interna a uma cavidade absorve maior parcela da energia incidente. Por este efeito, considera-se uma cavidade com pequena abertura, como a representação física experimental de um corpo negro.

Pretende-se com esta pesquisa contribuir com o processo de melhoria da qualidade na construção civil, equacionando as relações entre as propriedades radiantes das superfícies, fornecendo critérios para auxiliar aos projetistas, no processo de tomada de decisão.

O fluxograma de trabalho adotado foi estruturado em duas vertentes interligadas, procedimentos teóricos e experimentais conforme mostra a Figura 1-1.

Um modelo teórico foi elaborado relacionando a absorvidade à absortância e a emissividade à emitância, em função do fator de forma da superfície de interesse. Para comprovar este modelo, realizaram-se duas séries de experimentos. Na primeira, através da exposição de amostras à condições climáticas reais, foram monitorados os comportamentos de diferentes superfícies. A partir dos dados obtidos, foi possível avaliar a proporção em que a forma interfere na radiação na presença de outros fluxos de calor e, desta forma, identificar a maior influência. Esta foi a primeira etapa da pesquisa.

Em um segundo conjunto de experimentos, foram identificadas em laboratório as temperaturas de amostras de diferentes fatores de forma, sendo as velocidades de alteração destas temperaturas relacionadas às propriedades radiativas das amostras.

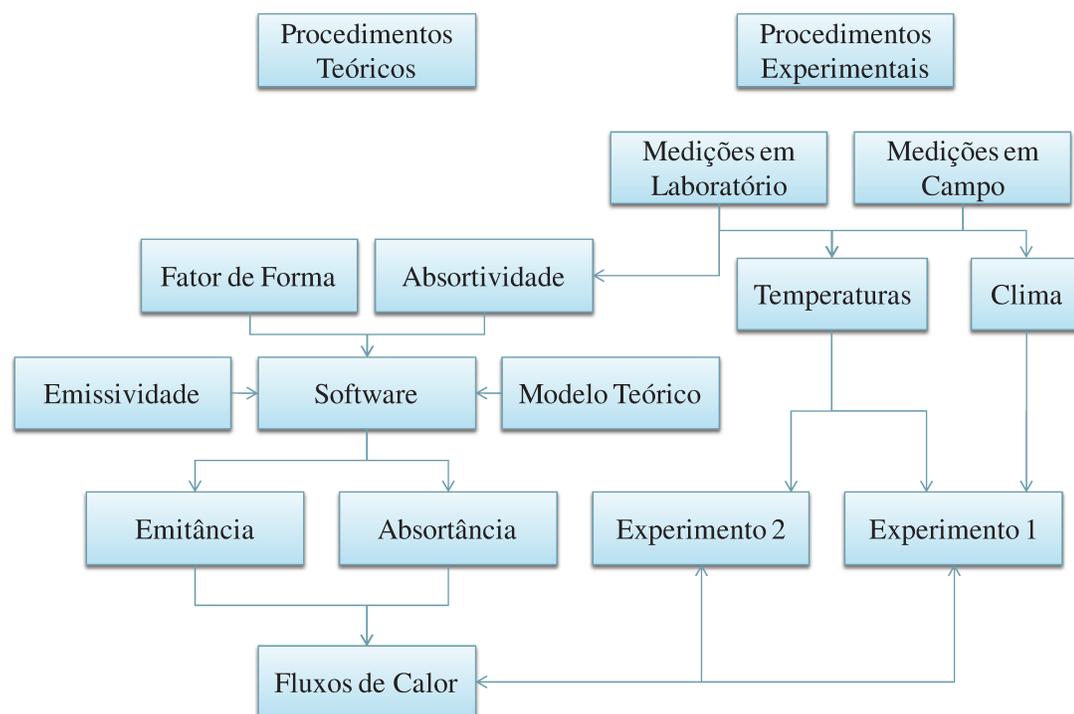


Figura 1-1: Fluxograma da pesquisa

O capítulo 1 apresenta a introdução aos temas aqui abordados. No capítulo 2 os objetivos são explicitados. O capítulo 3 mostra o referencial teórico usado. O modelo teórico proposto é descrito no capítulo 4. No capítulo 5 o procedimento experimental 1 é descrito, são apresentados os procedimentos metodológicos e seus resultados analisados. A segunda parte da pesquisa se refere ao procedimento experimental 2 e é abordada no capítulo 6. Destaca-se a importância das grandezas em estudo no capítulo 6.3, onde são apresentados alguns exemplos de aplicação de cálculo por simulação. No capítulo 7 é descrito um software desenvolvido ao longo do estudo. O capítulo 8 apresenta as conclusões do trabalho.

2 OBJETIVOS

Os objetivos principais desta pesquisa são:

Equacionar os efeitos que a geometria de uma superfície tem sobre sua absorptância e sua emitância.

Verificar a hipótese de que as inter-reflexões da radiação, em ondas curtas ou longas, exercem influência significativa nas temperaturas superficiais das edificações.

Elaborar um modelo matemático que quantifique a influência da forma sobre as absorptâncias e emitâncias de telhas onduladas, com diferentes perfis regulares, identificando e dimensionando as variáveis mais significativas no processo.

Estabelecer um procedimento experimental que possibilite a observação dos fenômenos discutidos neste estudo.

Desenvolver um software que calcule as absorptâncias e a emitâncias efetivas de superfícies regulares, a partir de sua geometria, rugosidade, absorptividade e emissividade. Este software permitirá identificar os valores efetivos destas propriedades para diferentes telhas disponíveis no mercado nacional, de modo a oferecer uma referência aos projetistas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os fundamentos, conceitos, definições e equações adotados neste trabalho.

Akbari, Levinson e Berdahl (1996) estudaram as temperaturas de superfícies de pavimentos urbanos e desenvolveram a equação 3-1, que ilustra a importância da absorptância e da emitância sobre estas temperaturas:

$$\alpha \cdot I_g = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{\text{sup}}^4 - T_{\text{ceu}}^4) + h_c \cdot (T_{\text{sup}} - T_{\text{bs}}) \quad (\text{Eq. 3-1})$$

Onde:

α = Absortância solar

ε = Emitância

I_g = Irradiância solar global [W/m²]

σ = Constante de Stefan Boltzmann (5,67.10⁻⁸ W/(m².K⁴))

T_{sup} = Temperatura da superfície [K]

T_{ceu} = Temperatura do céu [K]

h_c = Coeficiente de convecção [W/(m².K)]

T_{bs} = Temperatura do ar ambiente [K]

Esta equação é válida para condições de regime térmico permanente e considera uma superfície sobre um isolamento infinito.

Conforme indica a equação 3-1, absorptância e emitância são fatores determinantes sobre a temperatura de uma superfície e, portanto, aspectos extremamente importantes a serem considerados no equacionamento dos fluxos de calor. Usualmente entretanto, utiliza-se como referência para avaliação de seus valores, tabelas de cores que mencionam intervalos tão grandes de absorptâncias, que pouco

contribuem para informar sobre o real comportamento de uma superfície. Castro (2002) cita, por exemplo, a cor azul que abrange intervalos entre 5 e 55% e a cor verde no intervalo de 12 a 60%.

Roriz, Dornelles e Roriz (2007) exemplificam este caso como: “uma tabela adotada pela ASHRAE (2001) apresenta um intervalo de absorções entre 65 e 80% para pintura preta, 50 a 70% para pintura amarela e 23 a 49% para pintura branca. A incerteza provocada por esses intervalos é completamente incompatível com a alta precisão dos modelos de simulação térmica hoje disponíveis. No caso da pintura branca, por exemplo, a aplicação dessa tabela implica em uma variação superior a 100% na quantidade de energia supostamente absorvida pela cobertura ou pelas fachadas de um edifício.”

Medições em espectrofotômetro revelam que cores consideradas mais escuras podem apresentar refletâncias menores do que outras mais claras, devido à baixa refletância na região do infravermelho próximo (CASTRO, et al 2003).

Dornelles, Roriz e Roriz (2007) também demonstram que superfícies de mesma cor podem apresentar diferentes absorções. Por exemplo, a Figura 3-1 apresenta as curvas espectrais das absorções de duas amostras cerâmicas de mesma cor. Uma delas pintada com tinta acrílica na cor “Tile” (Telha) e outra sem pintura. A amostra pintada apresentou uma absorção solar 12.5% superior à sem pintura. O comportamento espectral das amostras é diferenciado, sendo que na região de infravermelho (portanto não visível), a tinta absorve mais energia.

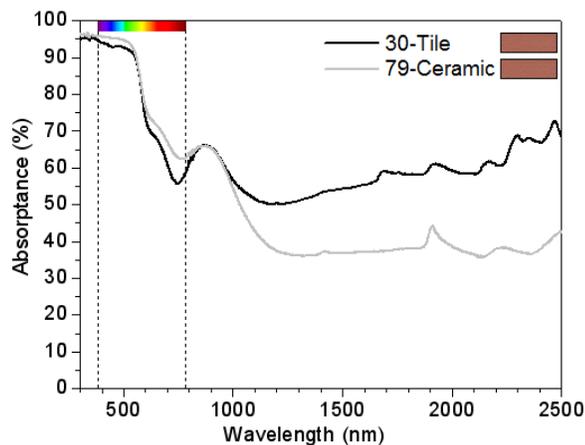


Figura 3-1: Exemplo de superfícies de mesma cor e diferentes absortâncias (DORNELLES, RORIZ e RORIZ, 2007)

Para a absortância no espectro visível, Oiticica et al (2000) realizaram medições a fim de que estes valores fossem adicionados aos mostruários de um fabricante de tintas e revestimentos. O interesse deste fabricante em divulgar estas informações demonstra uma maior maturidade do mercado. Da mesma forma, em relação à emissividade, Caram (1998) afirma que os fabricantes de vidro já na década de 80 participaram ativamente do desenvolvimento de películas de baixa emissividade. Estas películas são obtidas pela deposição de um óxido metálico sobre um filme fino e em 1987 representaram cerca de 17% das vendas de janelas nos EUA.

Maciel e Lamberts (2003) em uma avaliação experimental da eficiência de estratégias passivas aplicadas a um edifício de escritórios na cidade de Brasília, avaliaram sistemas como resfriamento evaporativo, isolamento térmico da cobertura e ventilação natural. Obtiveram resultados bastante interessantes, como por exemplo, o fato de utilizar isolamento praticamente não alterar a temperatura interna (naquele caso específico), enquanto, pintar as telhas de branco a reduziu em 2°C.

Dornelles, Roriz e Roriz (2007) demonstram que a rugosidade e a forma da superfície que absorve calor interferem na porcentagem de energia absorvida, uma vez que os raios solares refletidos por um ponto da superfície podem incidir sobre um segundo ponto da mesma, configurando o efeito chamado de inter-reflexão. Esta discussão pode ser observada com mais detalhes no item 3.5 deste texto.

A questão das trocas por radiação é complexa, uma vez que, cada elemento da superfície de um corpo, emite e recebe radiação de todas e para todas as direções que o “veem” (LAVIGNE, 1994).

Barbirato et al (2000), desenvolveram pesquisas medindo refletâncias no espectro visível, de tintas usadas na construção civil utilizando para isso um céu artificial. Concluíram que quando um acabamento de superfície é alterado do convencional, passando para rugoso, baixo relevo, a refletância pode diminuir em aproximadamente 7%, especialmente se a superfície tem cor média. Berdahl e Bretz (1997), também verificaram sua redução na medida em que era aumentada a rugosidade. Estes autores realizaram ensaios com revestimento branco para telhas e constatou-se que a superfície lisa apresentou uma refletância 25% maior do que a superfície rugosa.

Marchetti, Boudenne e Candau (2008), em estudo sobre o comportamento radiativo de materiais para pavimentação, mediram o impacto que a rugosidade exerce sobre a emitância, obtendo os resultados apresentados na Tabela 3-1:.

Tabela 3-1: Emitância de superfícies com diferentes rugosidades
Adaptado de (MARCHETTI, BOUDENNE e CANDAU, 2008).

Tinta aluminizada, sobre superfície lisa	Tinta aluminizada, sobre superfície ligeiramente áspera	Tinta aluminizada, sobre superfície muito áspera
		
$\varepsilon_e = 0.34$	$\varepsilon_e = 0.42$	$\varepsilon_e = 0.69$

Os efeitos da rugosidade da superfície também foram estudados por Dornelles (2008) que, através de ensaios de medida de refletâncias utilizando um

espectrofotômetro, obteve uma comparação entre as absorptâncias de superfícies com rugosidades diferentes, conforme mostra a Figura 3-2.

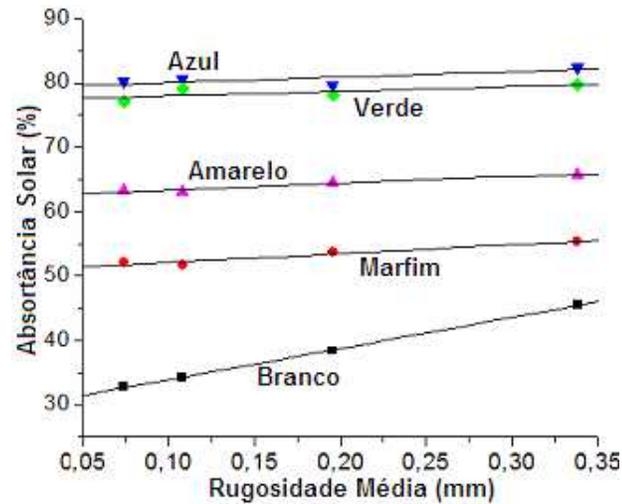


Figura 3-2: Influência da rugosidade nas absorptâncias (DORNELLES, 2008)

Tal fenômeno também foi observado por Seker e Tavil (1996), que encontraram os resultados indicados na Figura 3-3.

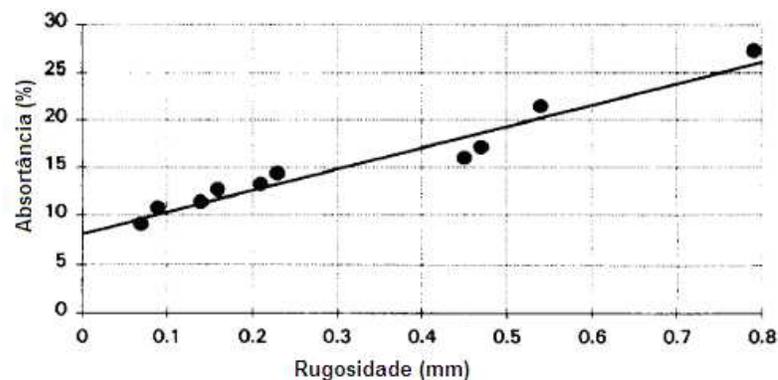


Figura 3-3: Relação entre a rugosidade das superfícies e suas absorptâncias (SEKER e TAVIL, 1996)

No caso de superfícies perfeitamente planas e lisas, a absorptância (α) corresponde à própria absorptividade do material. Para considerar o efeito conjunto que a rugosidade e a ondulação exercem sobre a absorptância efetiva de uma superfície, Roriz (2007) desenvolveu a seguinte equação (3-2):

$$\alpha_2 = \sum_0^n \alpha_1 \cdot FF_{ss}^n \cdot \rho_1^n \quad (\text{Eq. 3-2})$$

Sendo:

α_1 = absorptância da superfície com efeitos da rugosidade (escala de microns)

α_2 = absorptância da superfície incluindo a ondulação (escala de centímetros).

ρ_1 = Refletância da superfície com efeitos da rugosidade

n = Número considerado de inter-reflexões

FF = Fator de forma da superfície s em relação a ela mesma (conforme 3.1.4)

Akbari, Levinson e Berdahl (1996) afirmam que para superfícies de alta absorptância, a diferença de temperatura com o ambiente pode chegar a 50°C, enquanto nas de baixa absorptância essa diferença é em torno de 10°C. Afirmam ainda que em numerosas experiências em edifícios na Califórnia e Flórida a pintura branca em telhados, reduz a carga de ar condicionado em até 50%.

Akbari, Levinson e Stern (2008) discutem métodos para medir a refletância solar de coberturas e, normas técnicas da ASTM (E1918, E903 e C1549) relativas à refletância, definindo técnicas e procedimentos relacionados.

Escolheu-se utilizar na presente pesquisa a cobertura como foco do trabalho, por seu importante papel nos ganhos térmicos de um edifício, tendo em vista que nas construções baixas (com 1 a 2 pavimentos), em geral, a cobertura é responsável por grande parte dos fluxos de calor.

Diversos estudos têm tido este foco Synnefa, Santamouris e Akbari (2007) estudam o impacto do uso de revestimentos especiais para coberturas (“cool coatings”), nas cargas de refrigeração e aquecimento, para o conforto térmico do interior de edifícios residenciais, em diversas condições climáticas. Os resultados mostram que o aumento da refletância solar de telhas reduz as cargas de refrigeração de 18 a 93%.

Akbari et al (1997) monitoraram o consumo de energia de uma casa localizada em Sacramento, Califórnia, cuja economia de energia para o período de verão foi de 63% e a redução do pico de energia, foi de 25%, a partir da aplicação de películas refletivas na cobertura da edificação. Para uma escola, também localizada em Sacramento, a economia de energia foi de 46% e a redução do pico de 20%, com a aplicação da mesma película. Konopacki e Akbari (2001) estimaram para um grande edifício comercial em Austin (USA), economias de energia diárias em torno de 11% através da substituição na cobertura do edifício do acabamento em borracha escura por uma película plástica branca. Em estudo sobre o revestimento dos telhados para três edifícios na Califórnia, com a adição de uma camada reflexiva, a temperatura da superfície do telhado em tardes quentes de verão ensolarado caiu de 79,44 °C para 48,89 °C (KONOPACKI et al., 1998).

O impacto destas reduções no consumo de energia para estes casos é inversamente correlacionado ao isolamento da cobertura. Obtendo grandes economias em construções mal isoladas, e menores em construções bem isoladas (AKBARI et al., 1997).

Danny Parker e John Sherwin, do Florida Solar Energy Center (FSEC), mediram o desempenho térmico de verão em áticos de seis coberturas, em testes fortemente instrumentados, com variações de cores, da ventilação, da massa do telhado e da utilização de sistemas de barreira radiante. Os testes mostram que a refletividade do sistema de cobertura influencia muito as temperaturas do ático no verão. Das opções avaliadas a cobertura de telhado branco é a que melhor controla o ganho de calor do ático. Outra grande melhoria vem da maior massa do telhado (PARKER e SHERWIN, 1998).

Em outro estudo (PARKER et al., 1997), a equipe do Florida Solar Energy Center (FSEC) examinou o impacto de revestimentos reflexivos sobre o consumo de energia do sistema de ar condicionado, em nove edifícios residenciais ocupados, obtendo em média 19% de redução do consumo. No entanto, os resultados do teste

mostraram também a degradação da refletância solar e resultando em queda no desempenho térmico, após um ano de exposição.

Apesar de ser significativo o número de publicações relacionadas ao assunto da presente pesquisa, não existe uniformidade na terminologia empregada por seus autores. Por este motivo, os principais conceitos utilizados neste trabalho são definidos a seguir. Utiliza-se como principais referências a terminologia estabelecida pela norma ASHRAE (2001) e por INCROPERA e DEWITT (1996).

3.1 CONCEITOS E DEFINIÇÕES

O termo radiação se refere à emissão contínua de energia a partir da superfície de qualquer corpo. Esta energia, denominada radiante, é transportada por ondas eletromagnéticas que, no vácuo, viajam com a velocidade de 3×10^8 m/s. Alternativamente, seu transporte é explicado pela propagação de um conjunto de partículas chamadas Fótons.

As ondas de rádio, as radiações infravermelhas, a luz visível, a luz ultravioleta, os raios X e os raios gama, são diferentes regiões do espectro eletromagnético (Figura 3-4).

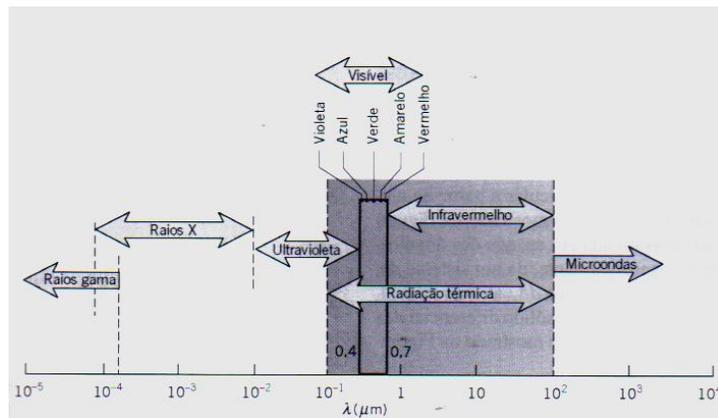


Figura 3-4: Espectro eletromagnético (INCROPERA e DEWITT, 1996)

Considera-se que a energia emitida pelas partículas no interior dos corpos, seja absorvida pelas partículas a elas adjacentes, e que, portanto, a radiação seja um “fenômeno de superfície”.

O poder emissivo hemisférico total, E (W/m^2), é a taxa na qual a radiação é emitida por unidade de área, em todos os comprimentos de onda possíveis e em todas as direções possíveis.

Com o aumento da temperatura, o poder emissivo espectral máximo é deslocado para comprimentos de onda menores, a uma razão constante. A este efeito denomina-se lei do deslocamento de Wien, que é descrita pela equação 3-3.

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2898 \quad (\mu\text{m} \cdot \text{K}) \quad (\text{Eq. 3-3})$$

O Sol emite aproximadamente como um corpo negro a 5800 K e, por isso, para a radiação solar este valor máximo fica no centro da faixa visível, em aproximadamente $0,5 \mu\text{m}$. Para um corpo à temperatura ambiente (300 K) a emissão máxima ocorre em torno dos $10 \mu\text{m}$.

O poder emissivo hemisférico total de um corpo negro, ou seja, a quantidade de radiação emitida em todas as direções em qualquer comprimento de onda, pode ser calculado pela lei de Stefan Boltzmann (Eq.3-4), bastando conhecer-se a temperatura do corpo negro.

$$E_{\text{CN}} = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{Eq. 3-4})$$

Onde σ = Constante de Stefan Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

Intensidade de radiação, $I_{\lambda,e}$ ($\text{W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$), é a taxa na qual energia radiante é emitida no comprimento de onda λ em uma direção qualquer, por unidade de área da superfície emissora normal a essa direção, por unidade de ângulo sólido no entorno dessa direção e por unidade de intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ no entorno de λ . Da mesma forma é possível estender o conceito para a radiação incidente.

Emissor difuso é a superfície para a qual a intensidade de radiação emitida é independente da direção. Embora a distribuição direcional da emissão de uma superfície varie de acordo sua natureza, esta aproximação é bastante razoável para grande parte dos casos de interesse na construção civil.

Irradiância, I (W/m^2), representa a taxa na qual a radiação incide em uma superfície por unidade de área.

Radiância, H (W/m^2), representa a taxa na qual radiação emana de uma superfície por unidade de área.

Irradiação total, G (W/m^2), representa a taxa na qual radiação incide por unidade de área a partir de todas as direções e em todos os comprimentos de onda.

Radiosidade total, J (W/m^2), representa toda a energia radiante que deixa uma superfície, incluindo tanto a energia diretamente emitida, quanto a parcela refletida pela superfície em todas as direções e em todos os comprimentos de onda.

3.1.1 CORPO NEGRO

O Corpo Negro é um absorvedor e emissor perfeito adotado como padrão em relação ao qual as propriedades radiantes de superfícies reais podem ser comparadas. Um corpo deveria ter as seguintes características para ser considerado negro:

- Absorver toda a radiação incidente, independente de seu comprimento de onda e de sua direção.

- Para dada temperatura e comprimento de onda, nenhuma outra superfície poderia emitir mais energia que um corpo negro.

- A emissão independe da direção, ou seja, o corpo deve ser um emissor difuso.

Apesar de não existir tal corpo, uma boa aproximação é atingida por uma cavidade cuja superfície interna se encontra a temperatura uniforme.

Caso energia radiante entre em uma cavidade por uma pequena abertura (Figura 3-5), é muito provável que ela sofra muitas reflexões até que saia através do mesmo orifício. Dessa forma, ela seria praticamente toda absorvida pela superfície interna da cavidade, aproximando seu comportamento ao de um corpo negro.

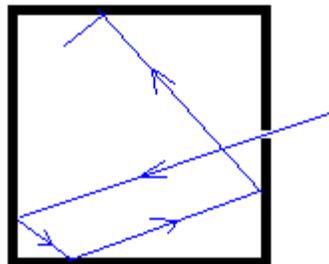


Figura 3-5: Reflexões em uma cavidade (SANTANA, 2010)

Este modelo é bastante antigo, tendo sido proposto por W. Wien e O. Lummer em 1895 (GREENBERGER, HENTSCHEL e WEINERT, 2009).

3.1.2 EMISSIVIDADE E EMITÂNCIA, ABSORTIVIDADE E ABSORTÂNCIA

Palmer (1994) descreve a existência de uma discussão sobre a terminologia, particularmente entre os sufixos *ade* e *ia*, e sugere o uso de termos terminando com *ade* (tais como transmissividade, absorptividade e refletividade) para propriedades de um material puro enquanto emprega o sufixo *ia* para as características de uma amostra. Por exemplo, pode-se distinguir entre a refletividade de alumínio puro e a refletância de uma amostra particular de alumínio 6061-T6 com uma camada de óxido natural. Esta distinção pode ser estendida a diferenças entre emissividade (de uma substância pura) e emitância (de uma amostra).

Segundo a ASHRAE (1991):

“**Absorptance**: absorbed portion of the radiant energy striking a surface.”

“**Absorptivity**: absorbed portion of the radiant energy striking unit area of a substance.”

Em tradução livre, absorptância é a parcela absorvida da energia radiante que atinge uma superfície, enquanto a absorptividade é a porção absorvida da energia radiante que atinge uma unidade de área de uma substância. Desta forma, a absorptividade é uma propriedade do material enquanto a absorptância é uma propriedade da superfície. Esta mesma norma define emissividade como a propriedade radiativa de um material, avaliada com sua superfície limpa e polida e com espessura suficiente para ser opaca. Apenas as camadas moleculares mais externas de uma superfície têm influência em sua absorptância, não importando os materiais empregados em suas camadas mais internas (RIVERO, 1986). Para as temperaturas normalmente observadas nos edifícios, os materiais empregados na construção civil emitem radiação de grande comprimento de onda (na faixa do Infravermelho). Em outras palavras:

A Emitância (ϵ) é uma propriedade radiante de uma superfície, definida como a razão entre a radiação emitida pela mesma (E) e a radiação emitida por um corpo negro de mesma área à mesma temperatura (E_{CN}), (Eq.3-5).

$$\varepsilon = \frac{E}{E_{CN}} \quad (\text{Eq. 3-5})$$

Uma vez que a forma e a rugosidade da referida superfície, interferem na sua capacidade de emitir energia, se faz necessário definir uma segunda propriedade chamada Emissividade Hemisférica Total, ou apenas Emissividade (ε_0), uma propriedade relacionada à capacidade do material em emitir. A Emissividade poderia ser definida como a Emitância de uma superfície perfeitamente lisa e plana.

Da mesma forma, Absortividade (α_0) é uma propriedade do material, referente à razão entre a energia radiante absorvida e o total incidente. Enquanto a absortância (α) é uma propriedade da superfície, referente à razão entre a energia radiante absorvida e o total incidente. Duas superfícies de mesmo material, e portanto com mesma absortividade, podem ter absortâncias diferentes.

Para enfatizar as diferenças entre as propriedades dos materiais e as propriedades das superfícies, alguns autores (SPARROW e CESS, 1978), denominam “efetivas” as absortâncias e emitâncias que realmente ocorrem em superfícies que não são perfeitamente planas e lisas. Outros autores (MODEST, 1993), se referem às absortâncias efetivas como “absortividades aparentes” e às emitâncias efetivas como “emissividades aparentes”. Uma descrição mais completa destes termos pode ser vista no item 3.5.

É possível definir distribuições direcionais e espectrais destas propriedades para diversos materiais, entretanto tendo em vista simplificar as equações e o modelo de cálculo envolvido, de maneira geral, considerar-se-á neste trabalho estas propriedades em sua forma integrada.

Além da Absortividade e da Emissividade, podem ser definidas a Refletividade (ρ_0) como uma propriedade do material, referente à razão entre a energia radiante refletida e o total incidente, e a Transmissividade (τ_0) como uma propriedade do material translúcido, referente à razão entre a energia radiante transmitida e o total incidente.

Estas razões aplicadas a superfícies específicas definem a Refletância (ρ) e Transmitância à radiação (τ).

Para um meio semitransparente estas propriedades são relacionadas pela equação 3-6.

$$\alpha_0 + \rho_0 + \tau_0 = 1 \quad (\text{Eq. 3-6})$$

Caso a superfície seja opaca, esta equação se reduz a:

$$\alpha_0 + \rho_0 = 1 \quad (\text{Eq. 3-7})$$

ou

$$\alpha + \rho = 1 \quad (\text{Eq. 3-8})$$

3.1.3 A SUPERFÍCIE CINZA

Define-se Superfície Cinza como aquela onde a absorptância e a emitância são independentes do comprimento de onda (λ), ou seja, a irradiação e a emissão superficiais estão concentradas em uma região na qual as propriedades espectrais da superfície são aproximadamente constantes. Neste caso, a superfície está sob irradiação difusa, ou é uma superfície difusa. Portanto, emite e reflete em todas as direções com mesma intensidade, condição bastante razoável para o caso dos materiais de construção.

Para tais superfícies a lei de Kirchhoff (Eq. 3-9) pode ser reduzida ao caso apresentado na equação 3-10.

$$\varepsilon_{\lambda,\theta} = \alpha_{\lambda,\theta} \quad (\text{Eq. 3-9})$$

$$\varepsilon = \alpha \quad (\text{Eq. 3-10})$$

Na prática esta simplificação é válida para a troca de calor entre superfícies de temperaturas próximas, como paredes de um mesmo ambiente, entretanto não é válida para superfícies com grande diferença de temperaturas, como no caso entre uma telha e o Sol.

3.1.4 FATOR DE FORMA

O Fator de Forma da superfície A em relação à superfície B (FF_{AB}), é a razão entre a parcela da energia radiante que é interceptada por B, de toda a energia radiante que sai de A e a energia radiante que sai de A. Trata-se, portanto, de uma grandeza adimensional. Exemplos de fator de forma são apresentados na Figura 3-6.

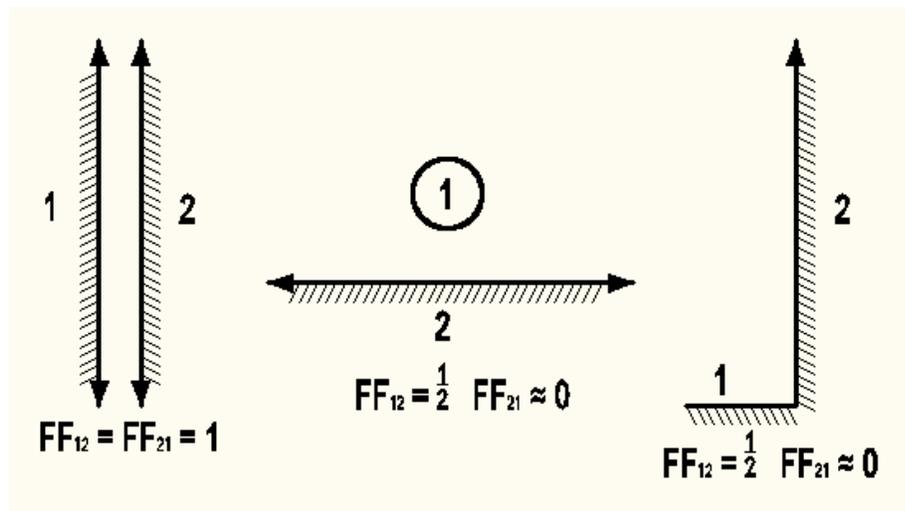


Figura 3-6: Exemplos de Fator de Forma (LIENHARD e LIENHARD, 2002)

Outro modo de definir o fator de forma é dado pela equação 3-11 ilustrada pela Figura 3-7 (ORDENES, LAMBERTS e GÜTHS, 2005).

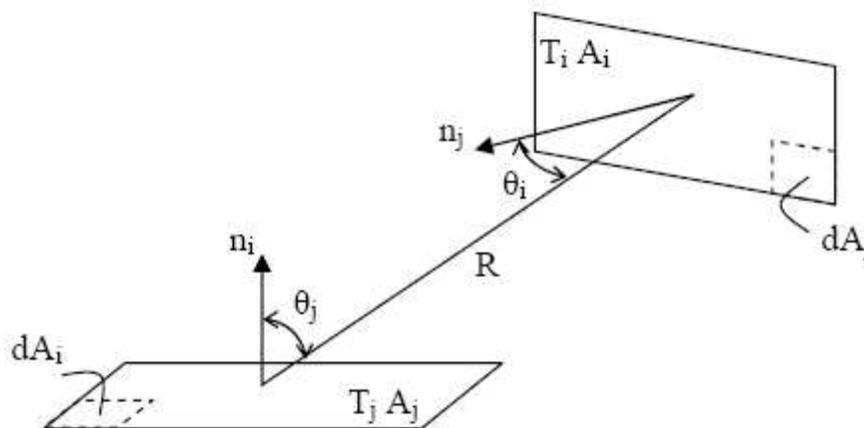


Figura 3-7: Fator de Forma. Características geométricas e radiação entre duas superfícies

$$FF_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cdot \cos\theta_j}{\pi \cdot R^2} \cdot dA_i \cdot dA_j \quad (\text{Eq. 3-11})$$

Considerando 2 superfícies isotérmicas e difusas, conforme o corte apresentado na Figura 3-8, parte da energia que deixa a superfície 1, incide sobre ela própria. Nesse caso, além do fator de forma FF_{12} , é possível definir o fator de forma FF_{11} , relacionado a esta parcela de energia.

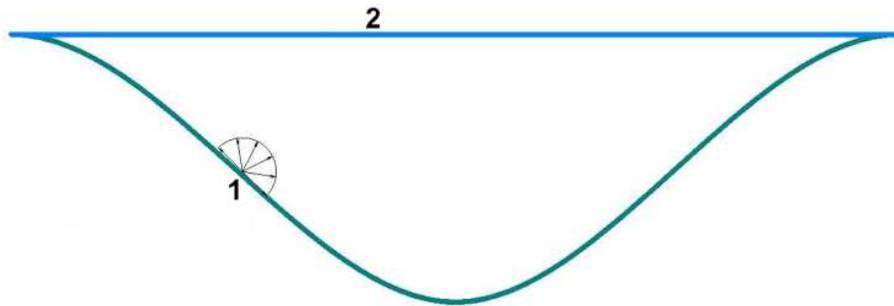


Figura 3-8: Seção de uma superfície convexa

A superfície 1 “vê” a si mesma, portanto $FF_{11} > 0$ e $FF_{12} < 1$

Uma importante propriedade dos fatores de forma é sua “relação de reciprocidade”, definida pela equação 3-12.

$$A_i \cdot FF_{ij} = A_j \cdot FF_{ji} \quad (\text{Eq. 3-12})$$

No caso de superfícies de uma cavidade fechada, uma segunda propriedade pode ser admitida, conforme a equação 3-13.

$$\sum_{j=1}^N FF_{ij} = 1 \quad (\text{Eq. 3-13})$$

Considerando a cavidade fechada representada pelas Figura 3-9, onde a superfície 2 é um plano que fecha a cavidade definida pela superfície 1, é possível concluir que (Eq. 3-14):

$$FF_{21} = 1 \quad (\text{Eq. 3-14})$$

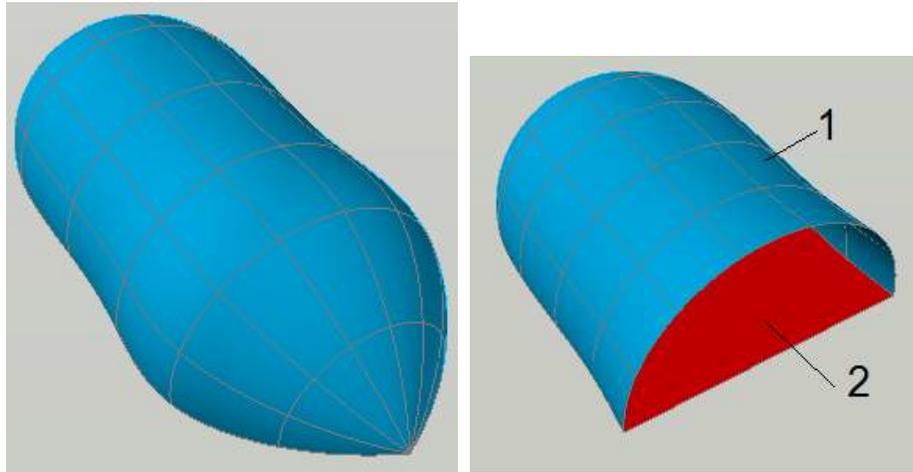


Figura 3-9: Superfícies que limitam uma cavidade

Da equação 3-12, vem:

$$FF_{12} = \left(\frac{A_2}{A_1} \right) FF_{21} \quad (\text{Eq. 3-15})$$

De 3-14 e 3-15:

$$FF_{12} = \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \quad (\text{Eq. 3-16})$$

Ou

$$A_1 \cdot FF_{12} = A_2 \quad (\text{Eq. 3-17})$$

E, de 3-13

$$FF_{11} + FF_{12} = 1 \quad (\text{Eq. 3-18})$$

Portanto, de 3-16 e 3-18

$$FF_{11} = 1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \quad (\text{Eq. 3-19})$$

3.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES RADIATIVAS

Teoricamente, é possível avaliar os fluxos de calor por radiação, através de um procedimento estatístico denominado Método de Monte Carlo, ou através de modelos analíticos.

O método de Monte Carlo é uma forma de resolver problemas usando números aleatórios. Neste caso, a ideia básica é seguir o provável caminho de um “pacote” de energia emitida em suas reflexões e re-reflexões entre as superfícies participantes. (SPARROW e CESS, 1978).

Segundo o Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (LMPT, 2010), para a medição de propriedades radiativas, dois tipos de métodos podem ser utilizados, os radiométricos e os calorimétricos.

“Nos métodos calorimétricos, estabelece-se uma situação de troca de calor por radiação em regime permanente entre superfícies, como por exemplo, no caso de duas placas paralelas submetidas ao vácuo, de modo a se eliminar a transferência de calor por condução. Através de medições das taxas de troca térmica envolvidas, obtém-se a emissividade (total-hemisférica) das superfícies”.

Nos métodos radiométricos, detectores são usados para a medição das quantidades espectrais de radiação, tanto incidente, refletida, transmitida ou emitida. Relacionando-se estas quantidades obtêm-se as respectivas propriedades radiativas espectrais: refletividade, transmissividade, absorvidade e emissividade.

Para temperaturas acima de 500 K e comprimentos de onda acima de 2000nm, pode-se medir a emissividade espectral direcional. Abaixo desta temperatura, a energia emitida pela superfície se confunde com a energia emitida pelo seu entorno, impondo assim uma restrição.

A medição da emissividade total hemisférica, é normalmente feita por comparação, usando um cabeçote no qual estão inseridos um fluxímetro, uma resistência elétrica plana, bem como um termopar (Figura 3-10). A resistência elétrica plana, mantém a temperatura do conjunto estável em um certo valor escolhido e registrado pelo termopar.

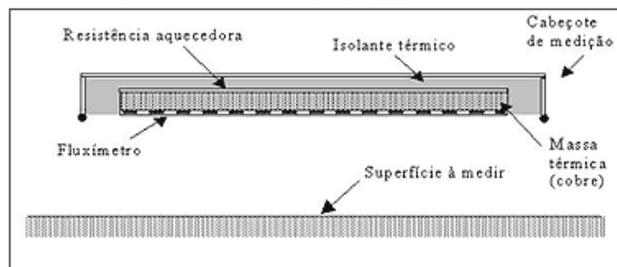


Figura 3-10: Esquema de montagem do equipamento (LMPT, 2010).

O cabeçote é apoiado sucessivamente sobre a superfície de interesse e em duas superfícies de referência, uma de alta e outra de baixa emissividade. Anota-se o valor do sinal liberado pelo fluxímetro em cada uma. De posse destes valores e das emissividades das superfícies de referência, calcula-se o valor da emissividade da superfície ensaiada.

“O fluxímetro é quadrado com 5 cm de lado e possui em sua superfície inferior 12 faixas de alta emissividade, intercaladas por 12 faixas de baixa emissividade. A distância de separação entre as superfícies do fluxímetro e da amostra durante a medição deve ser constante e de 2 a 3 mm, de forma a evitar o contato direto e a desprezar as trocas radiativas com as extremidades“ (LMPT, 2010).

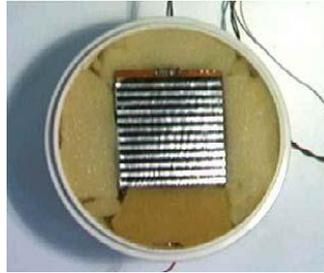


Figura 3-11: Cabeçote de medição com o fluxímetro (LMPT, 2010).

3.2.1 AVALIAÇÃO DA REFLETIVIDADE COM O ESPECTROFOTÔMETRO

“Espectrofotômetros, em geral, são instrumentos compostos por uma fonte de radiação eletromagnética, um conjunto de componentes ópticos que levam esta radiação até a amostra, um compartimento de amostra e um ou mais detectores que medem a intensidade de radiação. Neste caso específico, denomina-se radiação eletromagnética o feixe proveniente de uma fonte emissora (lâmpada)” (DORNELLES, 2008).

Para obtenção da refletividade, é necessária a utilização de um acessório adicional, chamado esfera integradora. Este acessório tem a função de detectar a distribuição difusa da luz. A esfera integradora é usada para medições de transmitância de amostras transparentes e de refletâncias de amostras opacas.

O equipamento deve ser calibrado com uma amostra de referência, também chamada de “branco de referência”. Este aparelho trabalha simultaneamente com dois feixes paralelos um passando pela amostra e um segundo de referência. Um ajuste inicial é feito colocando-se o "branco de referência" nos dois compartimentos e regulando-se o aparelho para refletância de 100%. Este equipamento varre a região espectral relativa ao ultravioleta, visível e infravermelho-próximo, na faixa de operação entre 185 nm e 3300 nm, possibilitando escolher as regiões do espectro pertinentes à pesquisa.

3.2.2 AJUSTE DA ABSORTÂNCIA PARA O ESPECTRO SOLAR PADRÃO

Através do uso do espectrofotômetro é possível medir a refletividade de uma superfície, para um grande intervalo de frequências (neste caso, entre 300 e 2500 nm) e, para superfícies opacas, calcular a absorptividade desta superfície através da equação:

$$\alpha_0 + \rho_0 = 1 \quad (\text{ou } 100\%) \quad (\text{Eq. 3-7})$$

Sendo:

α_0 = Absorptividade do material da superfície

ρ_0 = Refletividade do material da superfície

Este equipamento entretanto, emite com mesma intensidade em todas as frequências analisadas, diferentemente do que ocorre com as superfícies dos corpos.

O Sol emite de forma mais acentuada no espectro visível que em outras faixas de frequências (Figura 3-12). Cerca de 90% da radiação solar se encontra entre 300 e 1500 nm (CARAM, 1998).

Desta forma, é necessário que uma correção seja feita, a fim de obter-se a porcentagem real de energia emitida pelo sol que é absorvida por uma superfície.

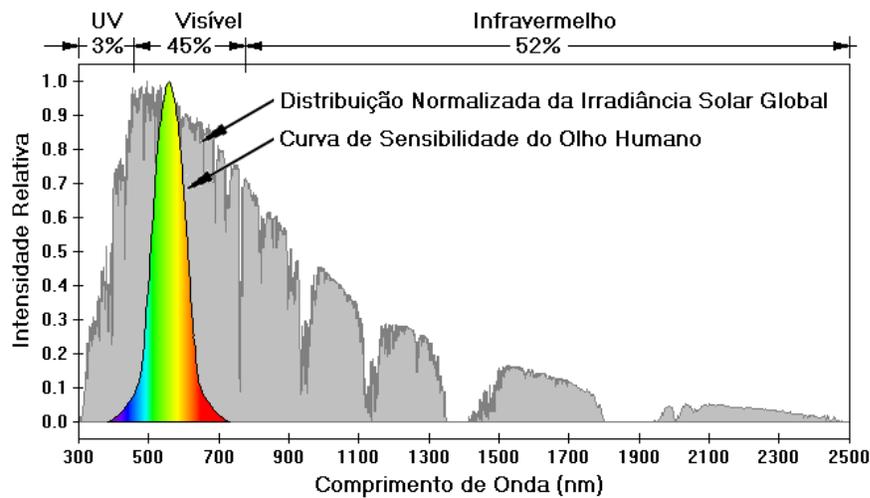


Figura 3-12: Espectro solar padrão e sensibilidade da visão humana. (RORIZ e DORNELLES, 2005).

Um fato relacionado é que uma vez que a radiação solar tem grande parte não visível, sobre a qual as cores não exercem efeito, os materiais reflexivos solares podem ser produzidos em diversas cores (BRETZ, AKBARI e ROSENFELD, 1995).

Pela falta de um espectro solar padrão para o Brasil, adotou-se como referência o definido pela norma ASTM-G173-03 (ASTM, 2003) (Figura 3-13). Esta norma apresenta a distribuição da irradiância solar espectral terrestre para condições médias nos Estados Unidos. Este espectro padrão considera a radiação hemisférica solar global, composta pela radiação direta, que atinge a Terra vinda diretamente do Sol, e a radiação difusa, que sofre espalhamento pela atmosfera.

As concentrações de diferentes gases e impurezas, presentes na atmosfera, alteram a intensidade da irradiância solar em determinados comprimentos de onda. Cada elemento da atmosfera absorve diferentemente os comprimentos de onda da radiação solar, alterando as intensidades de radiação que atingem o solo. Entre eles, os mais eficientes absorvedores de radiação solar são vapor d'água, dióxido de carbono e ozônio (OLIVEIRA, 2003).

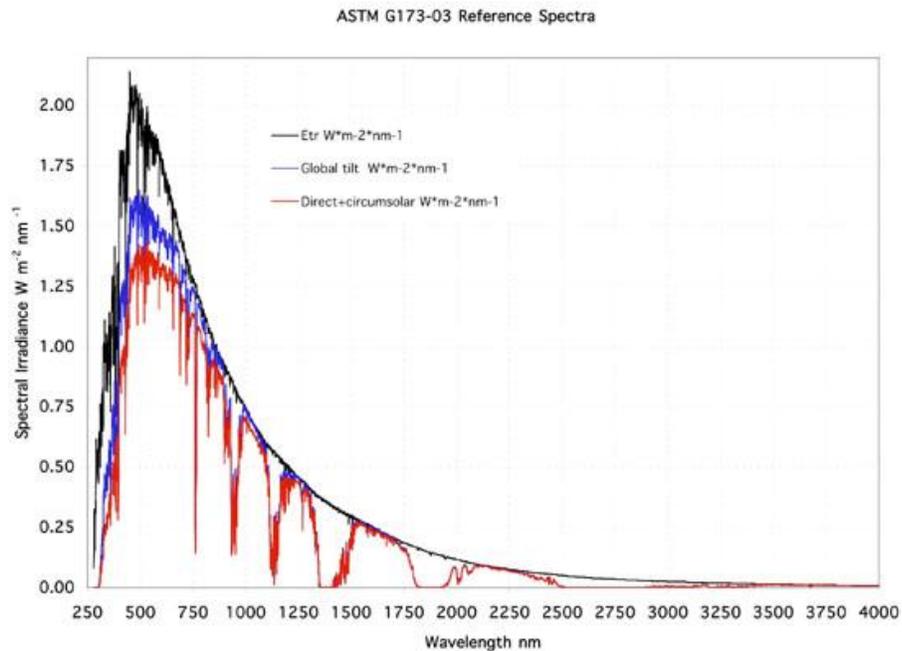


Figura 3-13: Espectro Solar Padrão (SMARTS, 2010)

Os dados de refletância solar obtidos pelo espectrofotômetro caracterizam o comportamento ótico de diferentes superfícies quando expostas a uma energia constante ao longo de todo o espectro solar. A norma ASHRAE 74-1988 (1988) define procedimentos para as medições de refletância.

Para cada frequência, a quantidade de energia refletida é a refletividade obtida no espectrofotômetro, multiplicada pela energia emitida pelo sol nesta frequência (Figura 3-14 e equações 3-20 e 3-21). A refletividade desta superfície para todo o espectro solar é a integral destes valores (RORIZ, DORNELLES e RORIZ, 2007).

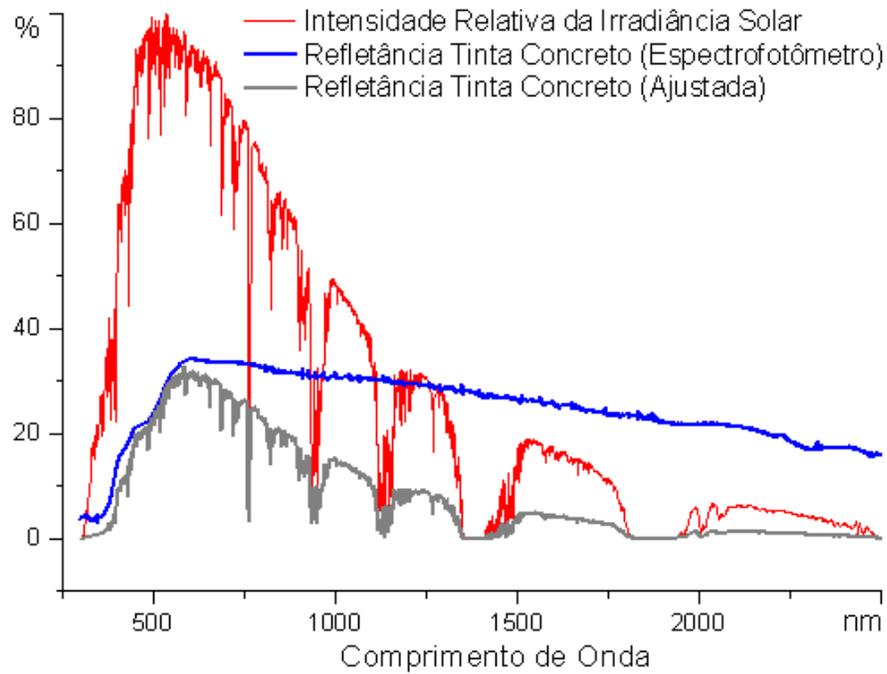


Figura 3-14: Refletividade e Espectro Solar Padrão

$$\rho_{s(\lambda)} = \frac{ISP_{(\lambda)} \cdot \rho}{100} \quad (\text{Eq. 3-20})$$

$$\rho_s = \frac{\int_{300}^{2500} \rho_{s(\lambda)} \cdot d\lambda}{\int_{300}^{2500} ISP_{(\lambda)} \cdot d\lambda} \quad (\text{Eq. 3-21})$$

Onde:

ISP = Intensidade Relativa da Irradiância Solar no Espectro Padrão (%)

ρ = Refletividade Medida em Espectrofotômetro (%)

A equação 3-21 representa a razão entre toda a energia refletida, dividida por toda a energia incidente.

Para o exemplo da Figura 3-14, a leitura do espectrofotômetro indica uma refletividade de 24,7 % (para uma intensidade relativa de emissão de 100% ao longo de todo o intervalo de frequências), e através da correção observa-se uma refletividade para o espectro solar de 28,4 %.

Consequentemente a absortividade desta superfície é:

$$\alpha_s + \rho_s = 1 \quad (\text{ou } 100\%) \quad (\text{Eq. 3-7})$$

$$\alpha_s = 1 - \rho_s$$

$$\alpha_s = 1 - 0,284 = 0,716$$

$$\alpha_s = 71,6 \%$$

Onde:

α_s = Absortividade da superfície sob radiação solar

ρ_s = Refletividade da superfície sob radiação solar

Espectros Solares alternativos ao proposto pela ASTM foram estudados. Uma distribuição espectral foi proposta através do uso de um software (“Espectro Solar”) desenvolvido pela equipe do GESTE (Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos) da UFRGS. Outra distribuição foi encontrada com o software “SMARTS” desenvolvido pelo Dr. Christian Gueymard, fonte de referência para as normas da ASTM e disponível no site do “National Renewable Energy Laboratory” do “U.S. DEPARTMENT OF ENERGY” (NREL, 2010). Resultados obtidos na comparação destes resultados são apresentados no APÊNDICE E, entretanto pela falta de informações acerca de diversos dados de entrada destes softwares, como por exemplo, aerossóis na atmosfera, ozônio e visibilidade, utilizou-se os valores indicados pela ASTM.

3.2.3 AVALIAÇÃO DA REFLETÂNCIA SOLAR DE AMOSTRAS DE GRANDES DIMENSÕES.

A janela de observação de um espectrofotômetro cobre uma área de aproximadamente 2 cm^2 e aplica-se exclusivamente a superfícies planas. Assim, para avaliar objetos de maiores dimensões, se faz necessário o uso de outros métodos. Para medir a refletância solar de telhas, por exemplo, Akbari, Levinson e Stern (2008), descrevem um método onde, através de uma série de medidas com um piranômetro, em posições diferentes e utilizando “máscaras” cujas refletâncias sejam conhecidas, estima-se a refletância de uma superfície de aproximadamente 1 m^2 (Figura 3-15).

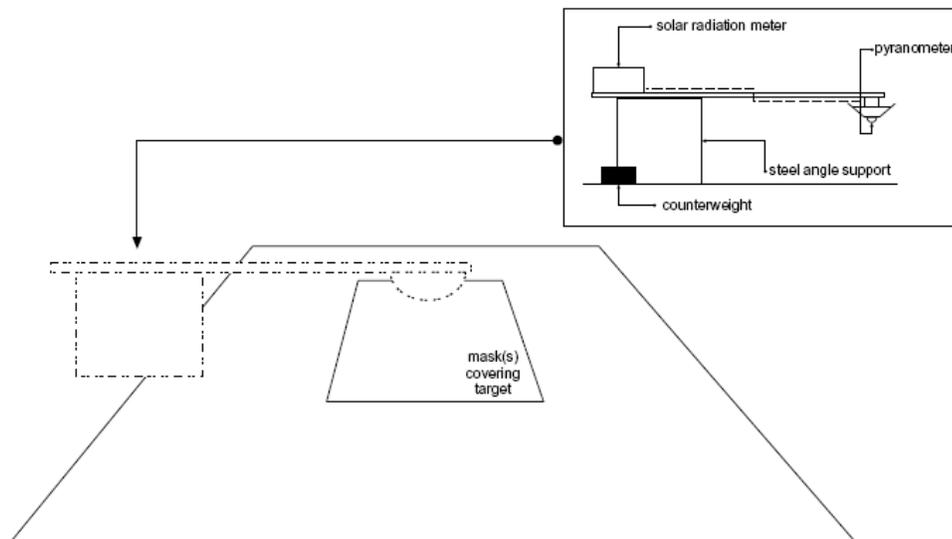


Figura 3-15: Esquema de medição de refletância (AKBARI, LEVINSON e STERN, 2008)

Os passos do referido método são transcritos a seguir:

1. Centralizar o piranômetro sobre a área de alvo.
2. Obscurecer a área de alvo com uma máscara preta, e sobre ela colocar uma máscara branca. Garantir que a máscara branca cubra totalmente a máscara preta.
3. Direcionar o sensor do piranômetro para cima, registrando a irradiância solar global horizontal (I_H). Comparar este registro com o obtido de um sensor padrão.
4. Posicionar o piranômetro para baixo.

4.1 Configuração 1: o piranômetro registra a irradiância solar refletida pela máscara branca (I_1).

4.2 Configuração 2: Remove-se a máscara branca e o piranômetro registra a irradiância solar refletida pela máscara preta (I_2).

4.3 Configuração 3: Remove-se a máscara preta e o piranômetro registra a irradiância solar refletida pela superfície sob avaliação (I_3)

5. Posicionar o piranômetro para cima, para novamente medir a irradiação solar (I_{OH}). Se $|I_{OH} - I_H| > 20W/m^2$, repetir passos 2 a 5.

6. Os cinco registros (I_H , I_1 , I_2 , I_3 , I_{OH}) deverão ser executados em um intervalo de tempo menor que 10 minutos. Para cada medida, aguardar 30 segundos para estabilização do piranômetro.

7. Calcular a refletância solar da amostra usando a equação 3-22.

$$R_T = R_B + \left(\frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} \right) (R_W - R_B) \quad (\text{Eq. 3-22})$$

Onde R_T é a refletância solar calculada; R_B e R_W são as refletâncias solares das máscaras opacas preta e branca, respectivamente, medidas por um instrumento padrão, e I_1 , I_2 , e I_3 são irradiâncias registradas nas configurações 1, 2, e 3.

8. Repetir os passos 2 a 7 mais duas vezes, para obter um total de três valores de R_t .

9. Caso a variação dos três valores de R_t exceder 0.02 repetir os passos 2 a 8.

A metodologia descrita foi inicialmente considerada indicada para a realização dos procedimentos experimentais deste trabalho. Entretanto, ao longo do desenvolvimento da pesquisa, outros métodos foram propostos e aplicados conforme apresentar-se-á.

3.2.4 MEDIÇÕES LABORATORIAIS DA EMISSIVIDADE

Em dado momento desta pesquisa pretendeu-se incluir a medição das emissividades das amostras. Discutiui-se a possibilidade de equipar um laboratório para este fim, o que poderia apoiar diversas pesquisas além desta.

De maneira geral, para efeitos de cálculo, as emissividades dos materiais são considerados, basicamente 0.1 ou 0.9, dependendo do aspecto da amostra, respectivamente com ou sem brilho metálico .

Entretanto, em pesquisa bibliográfica, observou-se que esta propriedade pode apresentar variação bastante significativa. Gustavsen e Berdahl (2003), analisando amostras de alumínio de perfis para esquadrias, observaram que suas emissividades sofrem forte influência do processo termoquímico de anodização, causando diferenças muito expressivas, como demonstra a Figura 3-16.

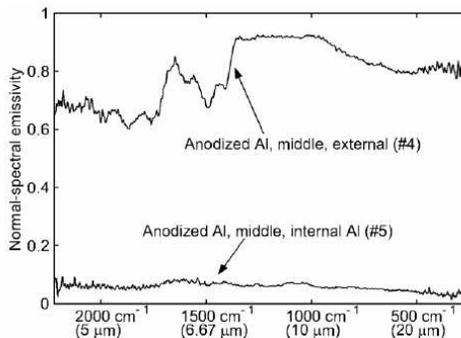


Figura 3-16: Emissividade espectral de 2 amostras de alumínio anodizado

Em uma amostra de alumínio exposta ao ambiente é possível observar o crescimento de uma camada de óxido. Essa camada evita que a oxidação se propague para o interior da peça. Touloukian e Dewitt (1970), apud Gustavsen e Berdahl (2003), relatam que uma folha de alumínio exposta ao ambiente úmido e salgado, à beira-mar, após um período de dois anos, alcança uma emissividade normal total de 0,1. Manuais técnicos, por exemplo Lide (1993) apud Gustavsen e Berdahl (2003), relatam que o alumínio altamente oxidado tem uma emissividade hemisférica total de 0,2. Incropera e Dewitt (1996) indicam para amostras a 300 K valores de emissividade

de 0.04 para alumínio altamente polido, enquanto para alumínio anodizado indicam 0.82.

O procedimento de referência internacional para medida desta propriedade é descrito na Norma JIS A 1423 (1983) e ilustrado pela Figura 3-17.

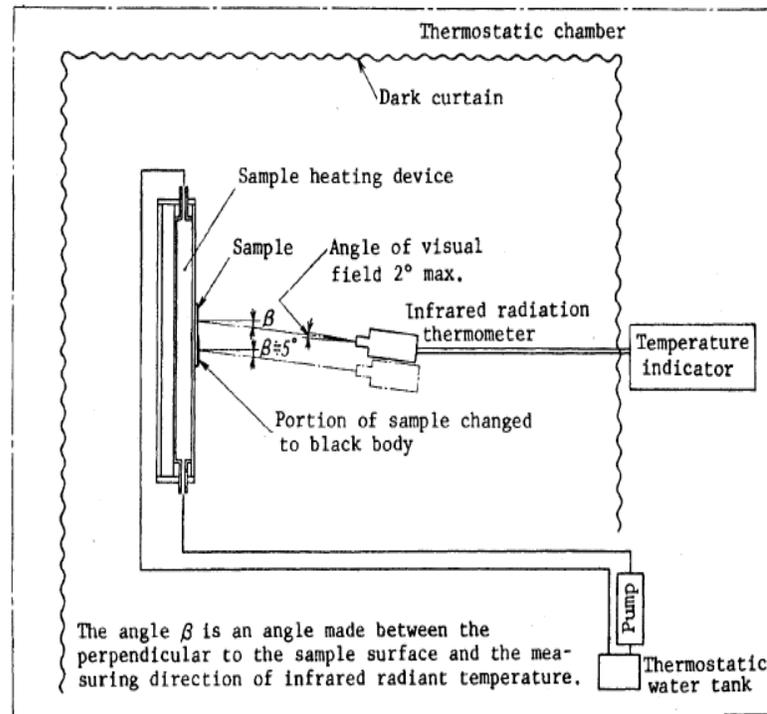


Figura 3-17: Procedimento de referência JIS A 1423:1983.

Resumidamente, trata-se de uma série de medidas da temperatura de uma amostra, através de termômetros com sensores infravermelhos, sob condições controladas. Cerca de metade da amostra é recoberta com material de emissividade acima de 0.95 e através de uma placa de aquecimento em uma câmara isolada, atribui-se uma temperatura conhecida à amostra. Com este termômetro, lê-se a temperatura da amostra e, com a diferença entre as temperaturas lidas na porção recoberta e não recoberta, através da equação a seguir (equação 6.18), determina-se sua emissividade.

$$\varepsilon = \frac{T_2 - T_1}{T_{b2} - T_{b1}} \quad (\text{Eq. 3-23}) \quad (\text{JIS A 1423, 1983})$$

Onde os índices “b” correspondem à leitura da porção recoberta da amostra e os índices 1 e 2, à leitura de temperaturas subsequentes, com diferença real de temperatura não menor que 10 K.

Em visita ao CETAC (Centro Tecnológico do Ambiente Construído) do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), onde são realizados experimentos estabelecidos pela referida norma, observou-se entretanto que o equipamento montado para esta finalidade envolve grande complexidade nos seus sistemas auxiliares (bombeamento de água quente, isolamento do ambiente de estudo, etc.), conforme a Figura 3-18.



Figura 3-18: Procedimento de referência JIS A 1423:1983 no IPT

Outros procedimentos de medição desta propriedade são descritos pelas normas ASTM E 408 (2008), “Standard Test Methods for Total Normal Emittance of Surfaces Using Inspection-Meter Techniques” e ASTM C 1371-04 (2004), “Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers”.

Para viabilizar a realização dos procedimentos descritos por esta segunda norma da ASTM, um emissômetro portátil, seria necessário (Figura 3-19).



Figura 3-19: D&S Emissometer Model AE1 (D&S, 2010)

Pela impossibilidade de aplicação desses equipamentos, nesta pesquisa, considerou-se apenas uma análise dos efeitos da emissividade. Para minimizar a incerteza, as amostras estudadas no experimento 1 (capítulo 5) foram lixadas e adotou-se os valores médios de referência (ABNT NBR 15220-2, 2005) apresentados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2: Emissividades das Amostras.

Emissividade	Alumínio	Branca	Cinza	Preta
	0.10	0.90	0.90	0.90

3.3 IRRADIÂNCIA SOBRE SUPERFÍCIE ONDULADA

O fluxo de calor por radiação que incide em uma superfície pode ser calculado em 3 parcelas. No caso de edificações, a primeira se referente à radiação direta (emitida diretamente pelo Sol), uma segunda, proveniente da radiação difusa (dispersa pela atmosfera) e uma terceira, refletida por superfícies do entorno. A soma destas três parcelas corresponde à irradiância global, definida como o fluxo de energia radiante que atinge cada unidade de área de uma determinada superfície. A componente referente à reflexão de superfícies no entorno será significativa ou não, dependendo de cada caso. Neste trabalho considerou-se que esta esteja incluída na radiação difusa.

Para a radiação direta, a quantidade de energia que atinge uma superfície é função de sua área de projeção sobre um plano normal aos raios, como mostra a Figura 3-20. Embora a irradiância (W/m^2) varie entre as superfícies em função do ângulo de incidência (ρ), o total de energia que cada uma recebe é o mesmo (RORIZ, 2007).

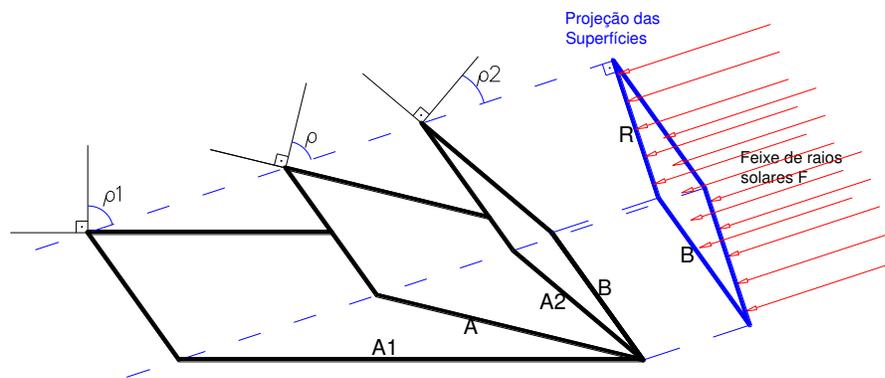


Figura 3-20: Radiação Direta Incidente Sobre Superfícies Planas.

No caso de objetos muito altos em relação à sua base, ou de ângulos de incidência muito próximos à 90° , ou seja, praticamente paralelos à superfície, existe a possibilidade da radiação incidente no objeto ser superior à radiação que incidiria sobre a base, como o caso da Figura 3-21, onde a radiação incidente sobre a superfície corresponde a $R + R_1$ e a radiação que incidiria sobre a base (A) seria apenas R .

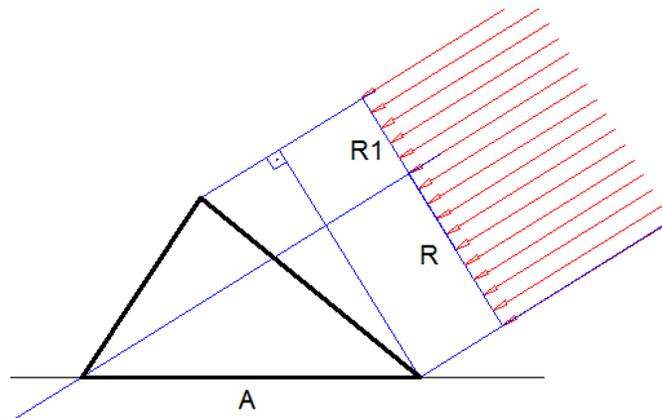


Figura 3-21: Radiação Direta Incidente Sobre Superfície.

Para superfícies côncavas, como as das amostras propostas para os experimentos deste trabalho (capítulos 5 e 6) este efeito pode ser desconsiderado.

Para a radiação difusa, considera-se que exista uma calota de céu que emita uniformemente em todas as direções. Assim, a radiação incidente sobre uma superfície é proporcional à sua área e à sua forma.

Considerando na Figura 3-22, uma superfície qualquer como a representada pela linha 1 e uma superfície imaginária plana 2 (linha 2), para que a radiação proveniente do exterior (superfície 3), atinja a superfície 1, terá de passar por 2. Assim, o fluxo de 3 para 1 é igual ao de 3 para 2.

$$Q_{31} = Q_{32} \quad (\text{Eq. 3-24})$$

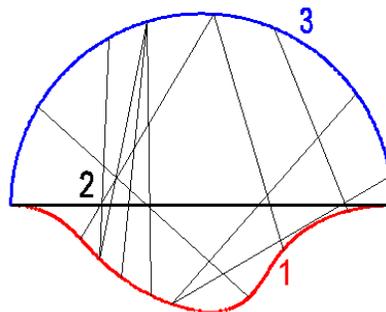


Figura 3-22: Radiação Incidente Sobre Superfície qualquer

Alterar a forma da superfície 1 não implica em alterar os fluxos de 3 para 2 (Q_{32}). Portanto, pela equação 3-24, esta alteração também não interfere no fluxo de 3 para 1 (Q_{31}). Assim, para interferir no fluxo Q_{31} seria necessário alterar a dimensão da superfície plana 2.

3.4 FLUXO DE CALOR POR RADIAÇÃO EM UMA CAVIDADE

Considerando-se:

- A- Uma cavidade fechada composta por 2 superfícies isotérmicas (Figura 3-23), onde 1 representa a superfície de interesse e 2 é um plano de fechamento da superfície 1;
- B- A simplificação de que estas superfícies sejam difusas;
- C- Para estas superfícies e para a faixa de frequências de interesse, a emissividade é praticamente constante ao longo do espectro, ou seja, as superfícies são “Cinza”;

É possível calcular o fluxo de calor líquido entre estas superfícies, através da representação da cavidade por um circuito equivalente (figura 3-24 e equação 3-25) (LIENHARD e LIENHARD, 2002).

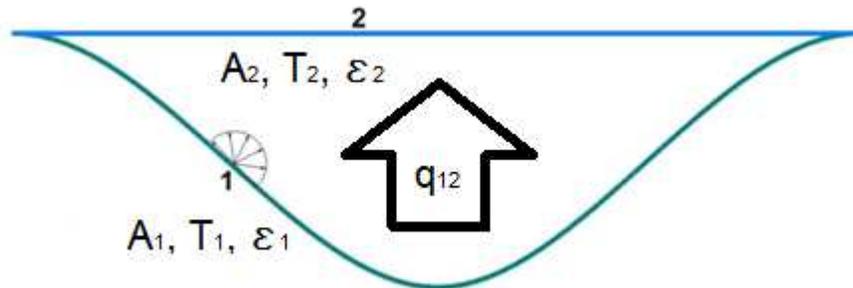


Figura 3-23: Fluxo por radiação em superfícies de uma cavidade

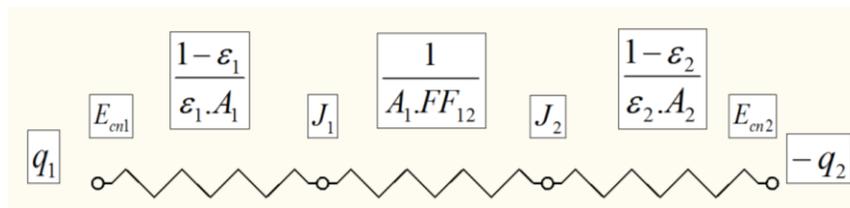


Figura 3-24: Circuito equivalente ao fluxo por radiação em superfícies de uma cavidade

$$q_{12} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} + \frac{1}{A_1 \cdot FF_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot A_2}}$$

(Eq. 3-25)

3.5 EMITÂNCIA EFETIVA

Conforme definido no item 3.1.2, para uma superfície perfeitamente lisa e plana, a absorptância (α) equivale à absorptividade (α_0) do material da superfície. Para o caso de superfícies com irregularidades, isto não é exato, pois os raios refletidos em um ponto podem incidir sobre outro ponto da superfície, o que causa uma nova absorção e nova reflexão. Por exemplo, considerando que a superfície apresentada na Figura 3-25 reflita de forma difusa, uma parte da energia de um raio incidente que atinja a superfície no ponto 1 será refletida sobre a própria superfície, como por exemplo, sobre o ponto 2. Desta parcela, uma nova reflexão ocorrerá em 2 e resultará em uma nova reincidência partindo de 2 para, por exemplo, o ponto 3 e assim se repetindo indefinidamente. Este efeito pode ser observado em relação à rugosidade da superfície, bem como em relação à sua ondulação (RORIZ, DORNELLES e RORIZ, 2007).

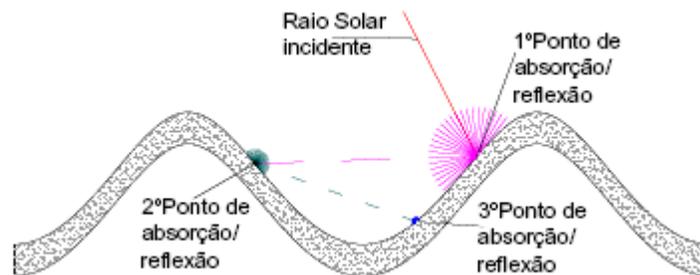


Figura 3-25: Inter-reflexão (RORIZ, 2007)

Tendo em vista a lei de Kirchhoff (Eq. 3-9), é possível considerar a emitância da mesma forma.

Múltiplas reflexões têm um enorme efeito na intensidade refletida. Esse fato é conhecido como “efeito cavidade” e pode ser utilizado como meio de aumentar a emissividade de superfícies de baixa emissividade ((CRAVEIRO, 2008), (SANTOS, 2006)).

Em relação ao impacto da forma sobre a absorptância e a emitância, estes efeitos ocorrem, não pelo fato do corpo real emitir mais energia por área superficial, e

sim por aumentar a área real de superfície, apesar desta superfície ampliada não emitir com eficiência total, por criar ela mesma uma barreira à saída de energia.

O Software Energy Plus do “U.S. Department of energy” (DOE, 2010) adota o modelo atualmente considerado mais completo de simulação do comportamento térmico de edifícios. Em seu procedimento padrão, desconsidera a inter-reflexão adotando a simplificação de que uma superfície não “vê” a si mesma (DOE, 2010). Entretanto o software já oferece uma possibilidade de cálculo em que se considera tais variáveis, através de uma sub-rotina denominada “User Input View Factors”, onde os fatores de forma devem ser informados pelo usuário.

A emitância efetiva, também chamada emissividade aparente (conforme definidos no item 3.1.2), foi estudada por Sparrow e Jonsson (1963), que desenvolveram modelos de cálculo para este efeito para algumas geometrias simples, conforme as figuras 3-26 a 3-28.

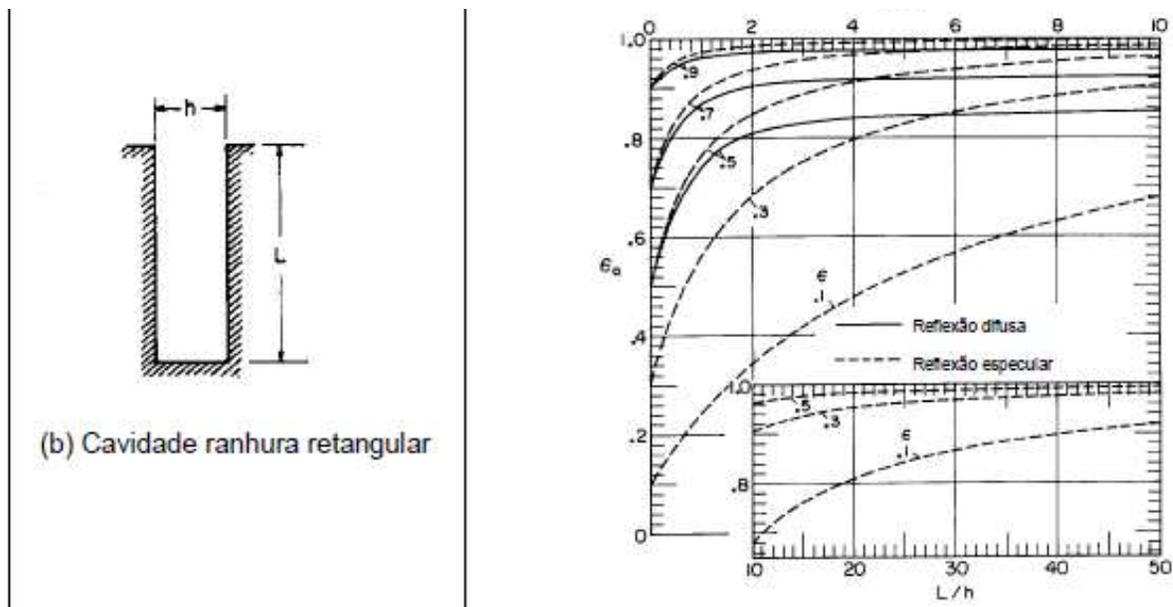


Figura 3-26: Cavidade ranhura retangular (SPARROW e CESS, 1978)

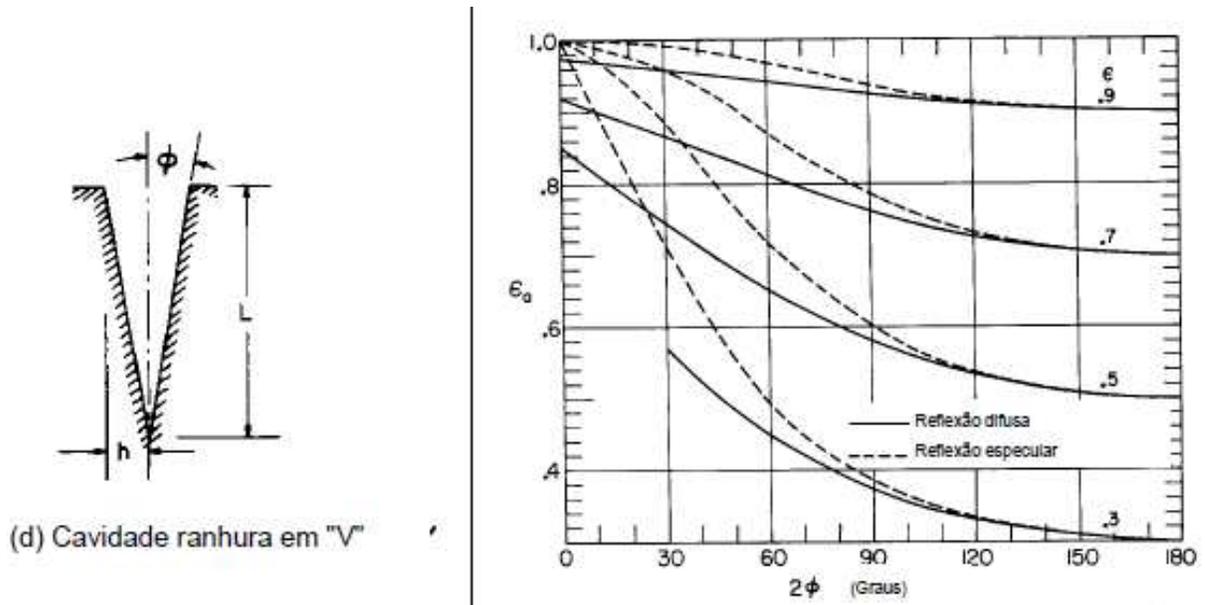


Figura 3-27: Cavidade ranhura em V (SPARROW e CESS, 1978)

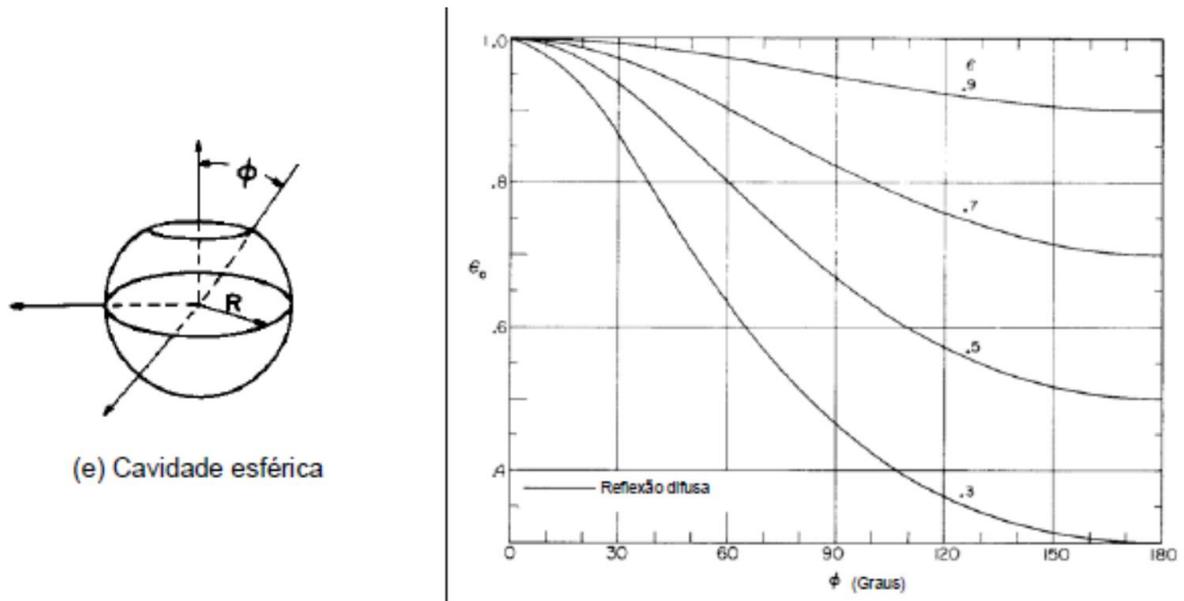


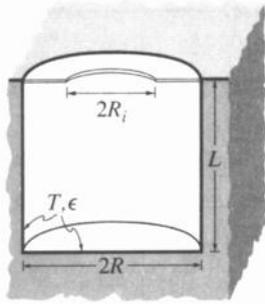
Figura 3-28: Cavidade esférica (SPARROW e CESS, 1978).

Modest (1993), apresenta valores de emitância efetiva (ou emissividade aparente) para a cavidade cilíndrica, parcialmente coberta, com paredes isotérmicas,

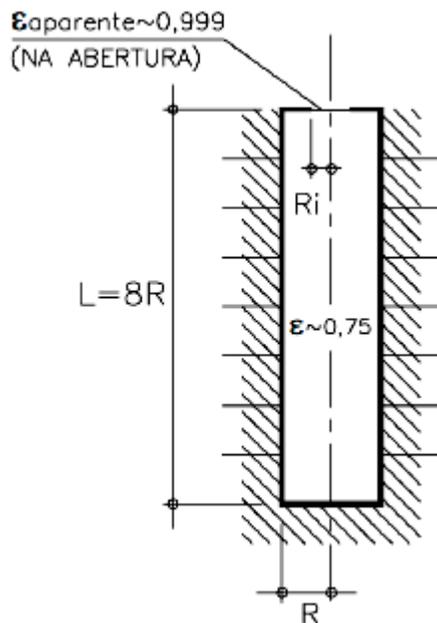
conforme apresenta a Tabela 3-3. Siegel e Howell (2002) apresentam estes mesmos valores.

Tabela 3-3: Emissividade aparente para cavidades cilíndricas (MODEST, 1993).

ϵ	R_i/R	ϵ_a		
		$(L/R = 2)$	$(L/R = 4)$	$(L/R = 8)$
0.25	0.4	0.916	0.968	0.990
	0.6	0.829	0.931	0.981
	0.8	0.732	0.888	0.969
	1.0	0.640	0.844	0.965
0.50	0.4	0.968	0.990	0.998
	0.6	0.932	0.979	0.995
	0.8	0.887	0.964	0.992
	1.0	0.839	0.946	0.989
0.75	0.4	0.988	0.997	0.999
	0.6	0.975	0.997	0.998
	0.8	0.958	0.988	0.997
	1.0	0.939	0.982	0.996



Perin (2009), aplica esta tabela a um caso específico, conforme a Figura 3-29.



UMA CAVIDADE CILÍNDRICA
COM PARÂMETROS
GEOMÉTRICOS
 $L/R = 8$
 $R_i/R = 0.4$
E UMA SUPERFÍCIE INTERNA
COM EMISSIVIDADE $\epsilon \sim 0.75$
RESULTA EM UMA ABERTURA COM
EMISSIVIDADE APARENTE DE
 $\epsilon_a \sim 0.999$

Figura 3-29: Exemplo de cavidade para aumento de emitância efetiva (PERIN, 2009)

Superfícies em cavidade, como as do tipo V apresentadas, são usadas como concentradores da energia solar em placas absorvedoras. São empregados em instalações que requerem temperaturas mais altas do que aquelas que podem ser obtidas com coletores planos, tais como usinas termossolares, na produção de vapor, fogões solares, entre outras (MOREIRA, 2009).

A emissividade aparente de uma cavidade paralelepipedica é calculada por método iterativo para obter uma resolução exata da equação integral no estudo de Derycket et al (1991).

Virial (2010) fornece um software para cálculo da emissividade aparente de uma superfície esférica. Na realidade este sistema apenas reproduz a curva apresentada na Figura 3-30, calculada pela equação 3-26.

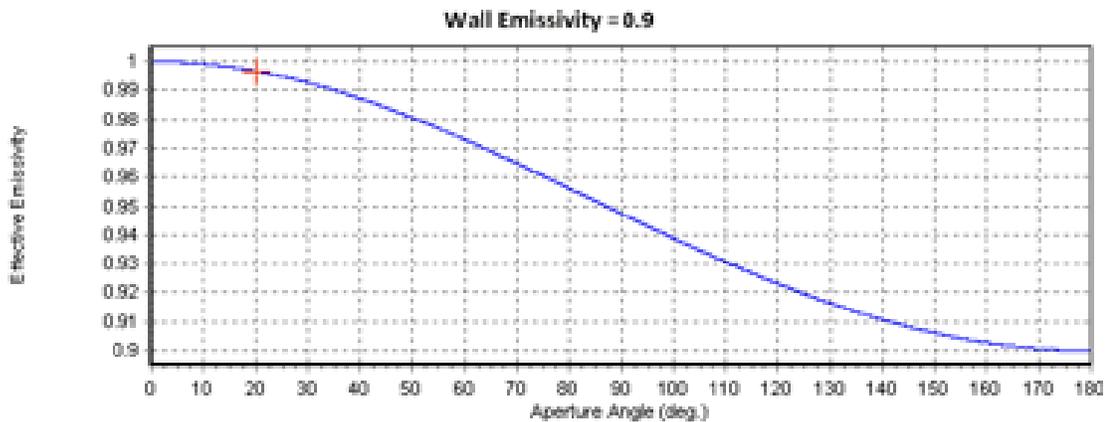


Figura 3-30: Emissividade aparente de superfície esférica (VIRIAL, 2010)

$$\varepsilon_E = \frac{\varepsilon_1}{1 - (1 - \varepsilon_1) \left(\frac{1 + \cos \phi}{2} \right)} \quad (\text{Eq. 3-26})$$

Outro trabalho que apresenta equação similar (Eq. 3-27) é Caola (2001).

$$\varepsilon_E(\lambda) = \frac{\varepsilon_1(\lambda)}{1 - [1 - \varepsilon_1(\lambda)] \left(\frac{A_{cav}}{A_{esf}} \right)} \quad (\text{Eq. 3-27})$$

Sparrow e Cess (1978) relatam que a emissividade aparente de uma cavidade sempre será maior que a emissividade do material, para qualquer caso. A diferença entre estes valores será maior, conforme a profundidade da cavidade é ampliada. No caso de paredes de reflexão difusa, existe um valor limite para a emissividade aparente, a partir da qual o aumento da profundidade não causa mais alteração.

Estes modelos de cálculo têm grande precisão matemática e consideram o efeito da diferença na radiosidade da superfície. Entretanto, por se tratarem de integrações de geometrias regulares e específicas, são limitados à formas pré-determinadas, não sendo aplicáveis a diversos casos.

3.6 CONVECÇÃO EM CAVIDADES

Apesar de não ser o objetivo principal deste trabalho, os fluxos de calor por convecção estão intimamente relacionados aos fluxos de radiação e, portanto, devem ser abordados simultaneamente. No procedimento experimental descrito no item 5 estes fluxos são considerados.

Kumar e Reddy (2010) e Reynolds, Morrison e Behnia (2010) descrevem que muitas investigações experimentais e numéricas foram realizadas sobre a transferência de calor por convecção natural em cavidades de diferentes formas, tais como quadradas, retangulares, cilíndricas e esféricas, demonstrando que o fluxo de convecção é função da geometria e que mesmo a inclinação da cavidade já tem significativa influência no número de Nusselt (item D.2).

Para amostras regulares, um procedimento possível de cálculo para o fluxo por convecção, seria seguir um método semelhante aos utilizados para superfícies aletadas, onde, a partir da configuração geométrica, estima-se uma eficiência para as aletas. Outra possibilidade é dividir a amostra em áreas verticais e horizontais e aplicar aquele método a estas áreas, separadamente. Neste caso, o fluxo por convecção pode ser calculado pela equação 3-28.

$$Q_{conv} = (hc_{Hor} \cdot A_{Hor} + hc_{vert} \cdot A_{vert}) (T_{bs} - T_{sup}) \quad (\text{Eq. 3-28})$$

4 DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

Este capítulo, por meio de um estudo teórico, apresenta equações que descrevem os efeitos das irregularidades superficiais nas emitâncias e absortâncias efetivas de uma superfície. Este estudo pode ser feito conforme o seguinte desenvolvimento ou pelo método alternativo apresentado no APÊNDICE A.

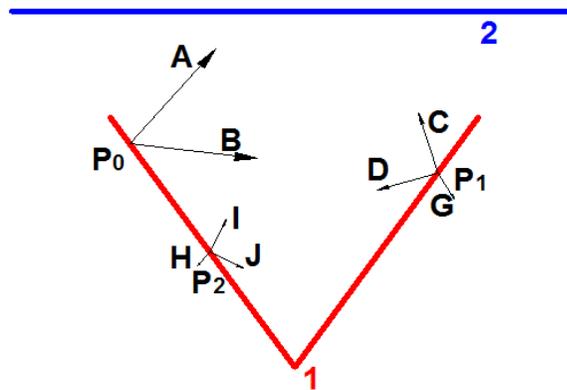


Figura 4-1: Energia emitida por uma superfície côncava (1) para o seu entorno (2).

Considere-se uma superfície que emite calor e seu entorno, representados na Figura 4-1 pelas superfícies 1 e 2, respectivamente. Se toda a energia emitida pela superfície 1 (E) for representada em um único ponto (P_0), uma parcela da mesma (A) poderá ser emitida para o exterior e uma segunda parcela (B) em direção à própria superfície. Desse modo:

$$A = E.FF_{12} \quad (\text{Eq. 4-1})$$

$$B = E.FF_{11} \quad (\text{Eq. 4-2})$$

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

Considerando que a parcela representada por B incida sobre um ponto qualquer P1 da mesma superfície 1, uma fração de B, que denominaremos G será absorvida pela superfície. Uma parte, denominada C, será refletida para o exterior, somando-se à fração A, enquanto uma parte D será refletida sobre a própria superfície, conforme descrevem as equações:

$$G = B.\alpha \rightarrow G = E.FF_{11}.\alpha \quad (\text{Eq. 4-3})$$

$$C = B.\rho.FF_{12} \rightarrow C = E.FF_{11}.\rho.FF_{12} \quad (\text{Eq. 4-4})$$

$$D = B.\rho.FF_{11} \rightarrow D = E.FF_{11}.\rho.FF_{11} \rightarrow D = E.FF_{11}^2.\rho \quad (\text{Eq. 4-5})$$

Vale destacar que os valores de α e ρ se referem aos intervalos de comprimentos de onda pertinentes a cada estudo.

Repetindo o raciocínio, considerando que a parcela representada por D incida sobre um ponto qualquer P₂ da superfície 1, uma parcela H será absorvida pela superfície. Uma parte I desta energia será refletida para o exterior, enquanto uma fração J será refletida novamente sobre a própria superfície, conforme descrevem as equações:

$$H = D.\alpha \rightarrow H = E.FF_{11}^2.\rho.\alpha \quad (\text{Eq. 4-6})$$

$$I = D.\rho.FF_{12} \rightarrow I = E.FF_{11}^2.\rho^2.FF_{12} \quad (\text{Eq. 4-7})$$

$$J = D.\rho.FF_{11} \rightarrow J = E.FF_{11}^2.\rho^2.FF_{11} \rightarrow J = E.FF_{11}^3.\rho^2 \quad (\text{Eq. 4-8})$$

Considera-se, então, 3 possibilidades. Na primeira, a energia efetivamente sai da superfície 1 e alcança a superfície 2. Na segunda a energia sai de 1 e volta para 1. Na terceira, a energia é absorvida pela superfície 1. As Tabela 4-1 e Tabela 4-2 resumem estes casos.

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS
IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

Tabela 4-1: Parcelas da energia emitida pela superfície 1

Sai	Volta	Absorve
A	B	
C	D	G
I	J	H

Tabela 4-2: Energia emitida pela superfície 1.

Sai	Volta	Absorve
$A = E.FF_{12}$	$B = E.FF_{11}$	-
$C = E.FF_{11} \cdot \rho.FF_{12}$	$D = E.FF_{11}^2 \cdot \rho$	$G = E.FF_{11} \cdot \alpha$
$I = E.FF_{11}^2 \cdot \rho^2.FF_{12}$	$J = E.FF_{11}^3 \cdot \rho^2$	$H = E.FF_{11}^2 \cdot \rho \cdot \alpha$

A parcela de E que realmente é emitida (E_R), pode então ser considerada como:

$$E_R = \sum SAI = A + C + I + \dots \quad (\text{Eq. 4-9})$$

$$E_R = E.FF_{12} + E.FF_{11} \cdot \rho.FF_{12} + E.FF_{11}^2 \cdot \rho^2.FF_{12} + \dots \quad (\text{Eq. 4-10})$$

$$E_R = E.FF_{12} + \sum_{i=1}^{i=n} E.FF_{12} \cdot FF_{11}^i \cdot \rho^i \quad (\text{Eq. 4-11})$$

Ou

$$E_R = \sum_{i=0}^{i=n} E.FF_{12} \cdot FF_{11}^i \cdot \rho^i \quad \text{P/ } FF_{12}, FF_{11} \text{ e } \rho > 0 \quad (\text{Eq. 4-12})$$

Onde i representa o número de inter-reflexões considerado.

Leithold (1986) define a série geométrica como a série que se obtém quando se tenta somar os infinitos termos de uma progressão geométrica:

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS
IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

$$\sum_{n=0}^{\infty} r^n = 1 + r + r^2 + r^3 + \dots$$

Esta série é convergente se e somente se $|r| < 1$ e, neste caso, a soma vale:

$$\sum_{n=0}^{\infty} a.r^n = a \cdot \frac{1}{1-r} \quad (\text{Eq. 4-13})$$

Onde "a" é o termo inicial da série.

Assim, considerando a série apresentada na equação 4-12, observa-se que o incremento é:

$$r = (FF_{11} \cdot \rho) \quad (\text{Eq. 4-14})$$

Como FF_{11} e ρ_0 são ambos > 0 e < 1 , seu produto invariavelmente será > 0 e < 1 e, portanto, a condição de convergência é atendida e a série tende para o valor indicado pela equação 4-17.

$$\text{Se } 0 < FF_{11} < 1 \text{ e } 0 < \rho < 1 \rightarrow |FF_{11} \cdot \rho| < 1$$

$$\rightarrow \sum_{i=0}^{i=n} (FF_{11} \cdot \rho)^i = \left(\frac{1}{1 - (FF_{11} \cdot \rho)} \right) \quad (\text{Eq. 4-15})$$

De 4-11 e 4-17:

$$E_R = E \cdot FF_{12} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} (FF_{11} \cdot \rho)^i \quad (\text{Eq. 4-11})$$

$$\rightarrow E_R = E \cdot FF_{12} \cdot \left(\frac{1}{1 - (FF_{11} \cdot \rho)} \right) \quad (\text{Eq. 4-16})$$

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

$$E_R = \frac{E.FF_{12}}{1-(FF_{11}.\rho)} \quad (\text{Eq. 4-17})$$

Testes:

Ex: caso a superfície seja perfeitamente plana:

$$FF_{11} = 0 \text{ e } FF_{12} = 1$$

$$E_R = \frac{E.1}{1-(0.\rho)} = E \rightarrow \text{c.q.d.}$$

Ex: caso a superfície seja a interna de um sólido fechado:

$$FF_{11} = 1 \text{ e } FF_{12} = 0$$

$$E_R = \frac{E.0}{1-(1.\rho)} = 0 \rightarrow \text{c.q.d. Nenhuma energia é emitida.}$$

Ex: Se $\rho \rightarrow 1$

$$E_R = \frac{E.FF_{12}}{(1-FF_{11})} = E \rightarrow \text{c.q.d. Reflete até toda energia sair}$$

Ex: Se $\rho \rightarrow 0$

$$E_R = \frac{E.FF_{12}}{1-(FF_{11}.\rho)} = E.FF_{12} \rightarrow \text{c.q.d. Só o vetor } \vec{A} \text{ é emitido}$$

Portanto a energia que realmente sai da cavidade, ou seja, que cruza a superfície 2 (plana), pode ser calculada através da equação 4-17.

Considerando as propriedades do fator de forma:

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS
IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

$$FF_{12} = \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \quad (\text{Eq. 3-16})$$

$$FF_{11} = 1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \quad (\text{Eq. 3-19})$$

De 4-17 e 3-19:

$$E_R = \frac{E \cdot FF_{12}}{1 - (1 - FF_{12}) \cdot \rho} \quad (\text{Eq. 4-18})$$

$$E_R = \frac{E \cdot FF_{12}}{1 - \rho + FF_{12} \cdot \rho} \quad (\text{Eq. 4-19})$$

Considerando, a energia emitida por um corpo negro à temperatura T_1 e com a área superficial A_2 , da lei de Stefan-Boltzmann vem:

$$E_{CN} = A_2 \cdot \sigma \cdot T_1^4 \quad (\text{Eq. 4-20})$$

Da definição de emitância

$$\varepsilon = \frac{E}{E_{CN}} \quad (\text{Eq. 4-21})$$

Onde

$$E = A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 \quad (\text{Eq. 4-22})$$

Portanto, de 4-21 e 4-19

$$\varepsilon_e = \frac{E_R}{E_{CN}} \quad (\text{Eq. 4-23})$$

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS
IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

$$\varepsilon_e = \frac{\frac{E.FF_{12}}{A_2 \cdot \sigma \cdot T_1^4}}{1 - \rho + FF_{12} \cdot \rho} \quad (\text{Eq. 4-24})$$

De 4-22:

$$\varepsilon_e = \frac{\frac{A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 \cdot FF_{12}}{A_2 \cdot \sigma \cdot T_1^4}}{1 - \rho + FF_{12} \cdot \rho} \quad (\text{Eq. 4-25})$$

$$\varepsilon_e = \frac{\frac{A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot FF_{12}}{A_2}}{1 - \rho + FF_{12} \cdot \rho} \quad (\text{Eq. 4-26})$$

$$\varepsilon_e = \frac{A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot FF_{12}}{1 - \rho + FF_{12} \cdot \rho} \cdot \frac{1}{A_2} \quad (\text{Eq. 4-27})$$

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1 \cdot FF_{12}}{1 - \rho + FF_{12} \cdot \rho} \cdot \frac{A_1}{A_2} \quad (\text{Eq. 4-28})$$

De 3-16:

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1 \cdot FF_{12}}{1 - \rho + FF_{12} \cdot \rho} \cdot \frac{1}{FF_{12}} \quad (\text{Eq. 4-29})$$

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1}{1 - \rho + FF_{12} \cdot \rho} \quad (\text{Eq. 4-30})$$

Da lei de Kirchhoff, considerando a superfície como cinza:

$$\varepsilon = \alpha = 1 - \rho \quad (\text{Eq. 4-31})$$

Portanto, de 4-30 e 4-31:

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS
IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1}{1 - (1 - \varepsilon_1) + FF_{12} \cdot (1 - \varepsilon_1)} \quad (\text{Eq. 4-32})$$

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + FF_{12} - \varepsilon_1 FF_{12}} \quad (\text{Eq. 4-33})$$

Ou

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \left(\frac{A_2}{A_1}\right) - \varepsilon_1 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)} \quad (\text{Eq. 4-34})$$

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1 \cdot A_1}{A_2 - \varepsilon_1 \cdot A_2 + \varepsilon_1 \cdot A_1} \quad (\text{Eq. 4-35})$$

Testes:

Se $A_2 = A_1$

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + (1) - \varepsilon_1(1)} = \frac{\varepsilon_1}{1} \rightarrow \text{c.q.d.}$$

Se $A_2 \rightarrow 0$ (Cavidade como aproximação de um corpo negro)

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + (0) - \varepsilon_1(0)} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1} = 1 \rightarrow \text{c.q.d. Emitância de um corpo negro}$$

O APÊNDICE A apresenta outro método de dedução da equação 4-35.

Conforme observável, a equação 4-35 indica que o aumento da razão entre as áreas A_2 e A_1 , implica no aumento da emitância da superfície 1, sem alterar suas emissividade e absorvidade, uma vez que essas são propriedades do material.

O efeito da forma na emitância efetiva é apresentado nas figuras 4-2 e 4-3, resultantes da aplicação da equação 4-35.

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

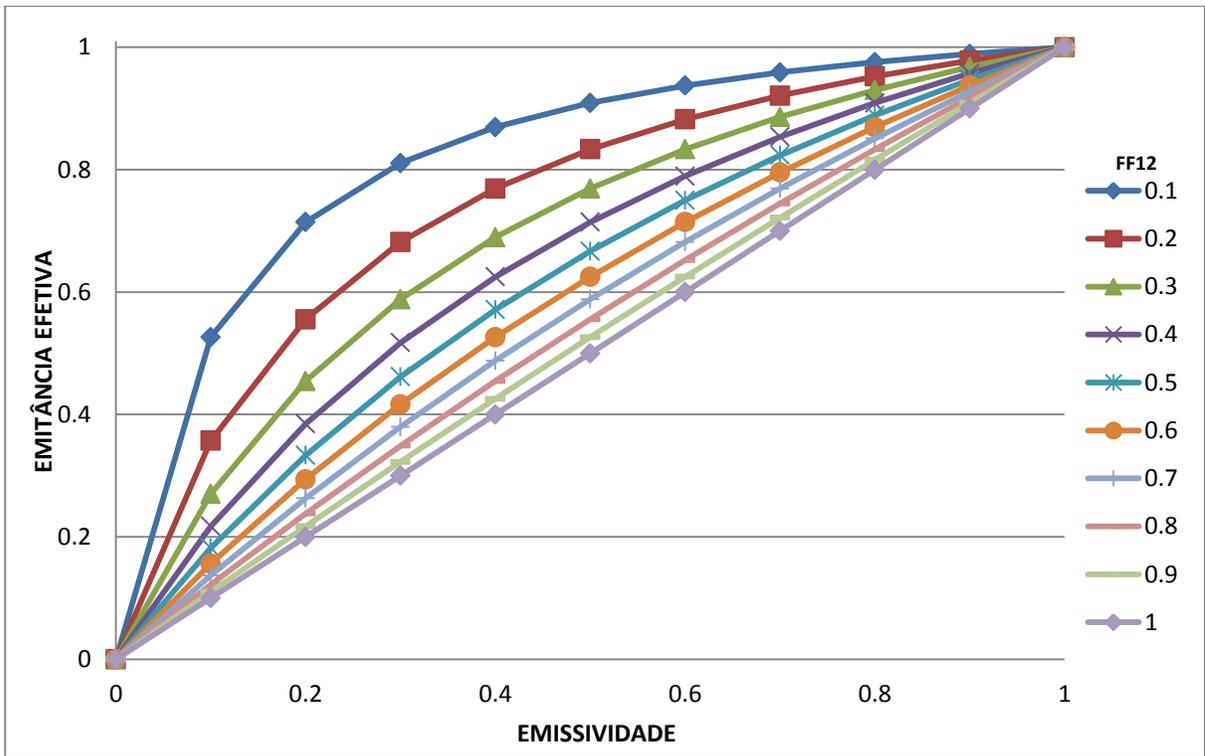


Figura 4-2: Efeito da forma na emitância efetiva (Eq. 4-35).

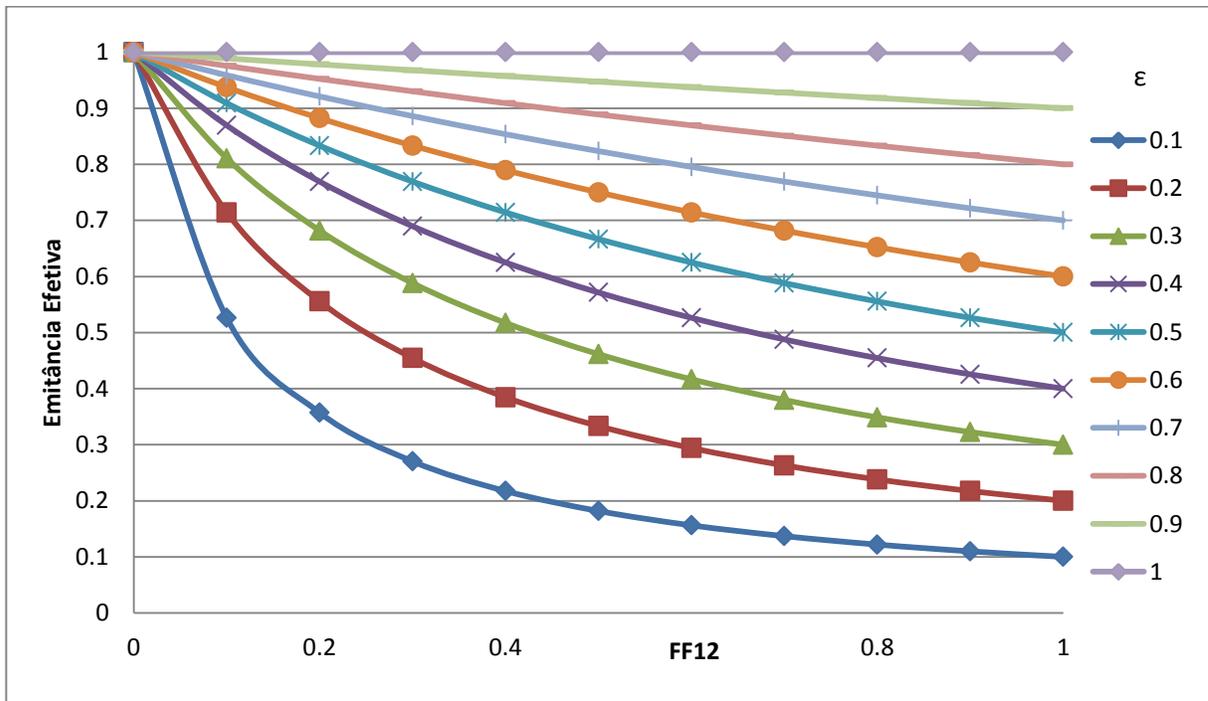


Figura 4-3: Efeito da forma na emitância efetiva (Eq. 4-35).

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

Comparando os resultados obtidos pela equação 4-35 e os apresentados por Sparrow e Cess (1978) para reflexão difusa, obtêm-se as curvas apresentadas nas figuras 4-4 a 4-6.

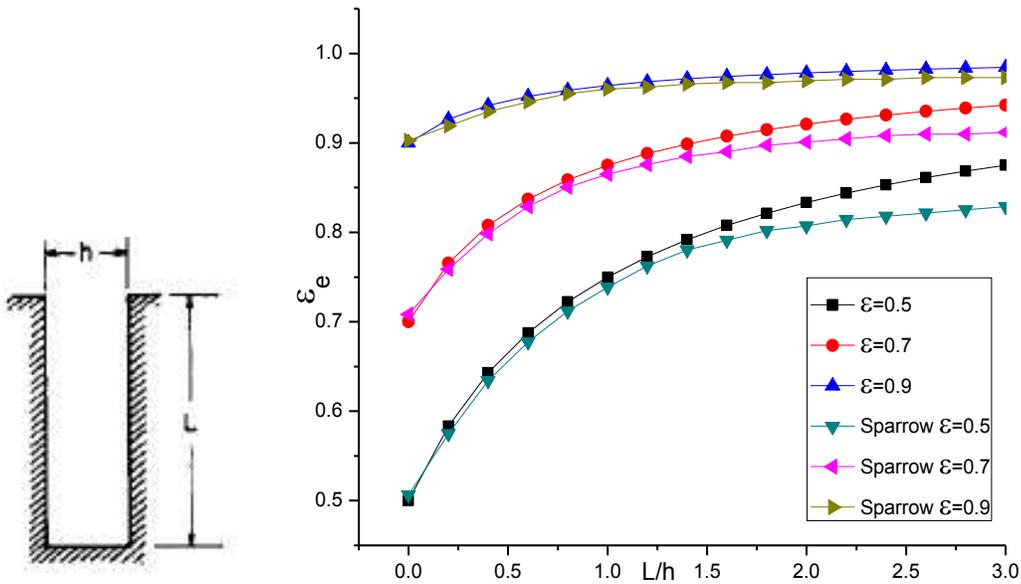
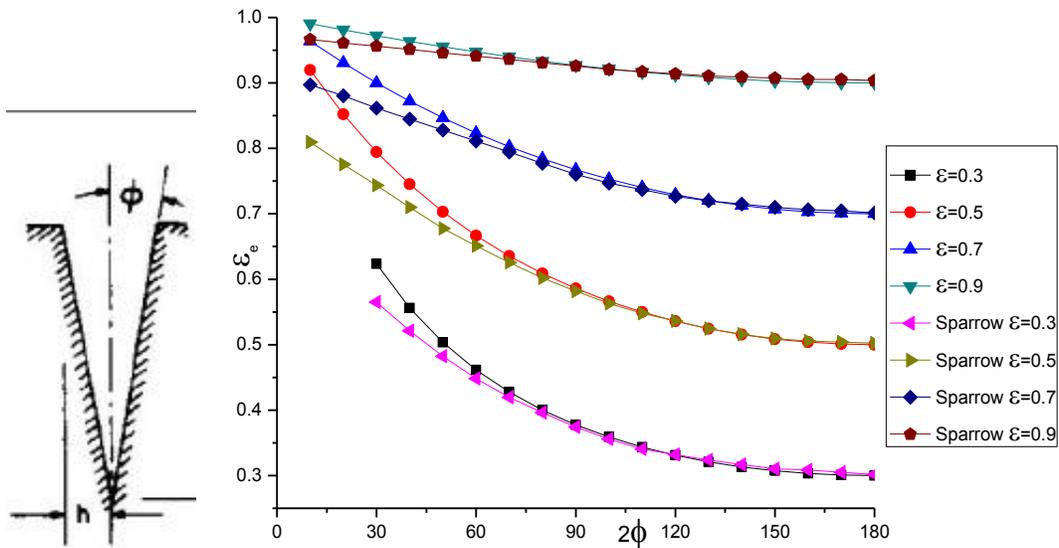


Figura 4-4: Efeito cavidade para ranhura retangular. Comparação de resultados da equação 4-35 a valores teóricos apresentados por Sparrow e Cess (1978)



DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

Figura 4-5: Efeito cavidade para ranhura em V. Comparação de resultados da equação 4-35 a valores teóricos apresentados por Sparrow e Cess (1978)

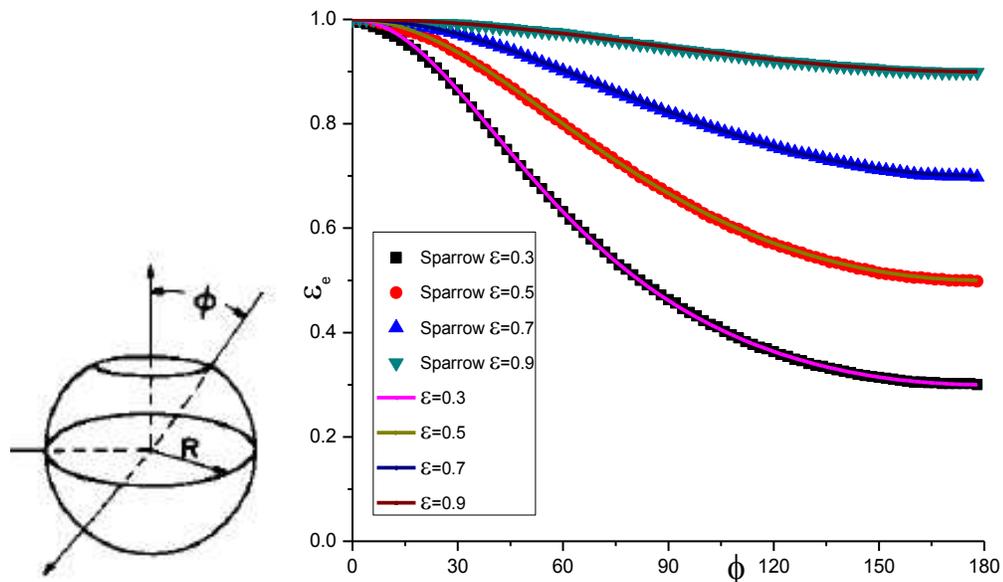


Figura 4-6: Efeito cavidade para cavidade esférica. Comparação de resultados da equação 4-35 a valores teóricos apresentados por Sparrow e Cess (1978)

A diferença entre estes modelos é resultado de que Sparrow considera a variação na radiosidade entre os pontos da superfície. No caso da ranhura retangular (figura 4-4), por exemplo, a proximidade da abertura implicaria em radiosidades mais altas do que em pontos mais profundos. No modelo proposto, considera-se que todos os pontos da superfície têm o mesmo comportamento. Por este motivo, para cavidades esféricas as soluções são idênticas (conforme demonstrado no APÊNDICE B), enquanto para ranhuras retangulares a aproximação é admissível até uma relação L/h de aproximadamente 1.5, que representa um $FF_{12}=0.25$ (equação 3-16). Estes limites satisfazem a maior parte dos componentes da construção civil.

As vantagens do uso da equação 4-35 são sua simplicidade de cálculo e sua possibilidade de aplicação a quaisquer formas.

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS
IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

Um raciocínio similar pode ser desenvolvido para a absorptância. Detalhadamente, este procedimento é apresentado no APÊNDICE C. Em resumo, através da soma de n parcelas absorvidas, fruto de n-1 inter-reflexões (Tabela 4-3), obtém-se para a energia absorvida (E_a) considerando uma irradiância I, a equação 4-36.

Tabela 4-3: Correção da absorptância por efeito da forma

	Irradiância	Parcela Absorvida	Parcela Refletida
Direta	I _s	α ₀ .I _s	I _s .ρ ₀
1ª Inter-Ref.	FF ₁₁ .I _s .ρ ₀	α ₀ .FF ₁₁ .I _s .ρ ₀	FF ₁₁ .I _s .ρ ₀ ²
2ª Inter-Ref.	FF ₁₁ ² .I _s .ρ ₀ ²	α ₀ .FF ₁₁ ² .I _s .ρ ₀ ²	FF ₁₁ ² .I _s .ρ ₀ ³
3ª Inter-Ref.	FF ₁₁ ³ .I _s .ρ ₀ ³	α ₀ .FF ₁₁ ³ .I _s .ρ ₀ ³	FF ₁₁ ³ .I _s .ρ ₀ ⁴
nª Inter-Ref.	FF ₁₁ ⁿ .I _s .ρ ₀ ⁿ	α ₀ .FF ₁₁ ⁿ .I _s .ρ ₀ ⁿ	FF ₁₁ ⁿ .I _s .ρ ₀ ⁿ⁺¹

$$E_a = \alpha_e \cdot I = \alpha_1 \cdot I + (\alpha_1 \cdot FF_{11} \cdot \rho_1 \cdot I) + (\alpha_1 \cdot FF_{11}^2 \cdot \rho_1^2 \cdot I) + \dots \quad (\text{Eq. 4-36})$$

$$E_a = \alpha_e \cdot I = \sum_{i=0}^n \alpha_1 \cdot FF_{11}^i \cdot \rho_1^i \cdot I \quad (\text{Eq. 4-37})$$

Resolvendo a série (equação 4-13) obtém-se:

$$\alpha_e = \frac{\alpha_1}{1 - (FF_{11} \cdot \rho_1)} \quad (\text{Eq. 4-38})$$

Para uma superfície opaca (α + ρ = 1) fica:

$$\alpha_e = \frac{\alpha_1}{1 - FF_{11} + FF_{11} \cdot \alpha_1} \quad (\text{Eq. 4-39})$$

Ou, considerando as equações 3-16 e 3-18:

$$\alpha_e = \frac{\alpha_1 \cdot A_1}{A_2 - \alpha_1 \cdot A_2 + \alpha_1 \cdot A_1} \quad (\text{Eq. 4-40})$$

Em relação a FF₁₂:

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

$$\alpha_e = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + FF_{12} - \alpha_1 \cdot FF_{12}} \quad (\text{Eq. 4-41})$$

O efeito da forma na absorvância efetiva é apresentado na Figura 4-7.

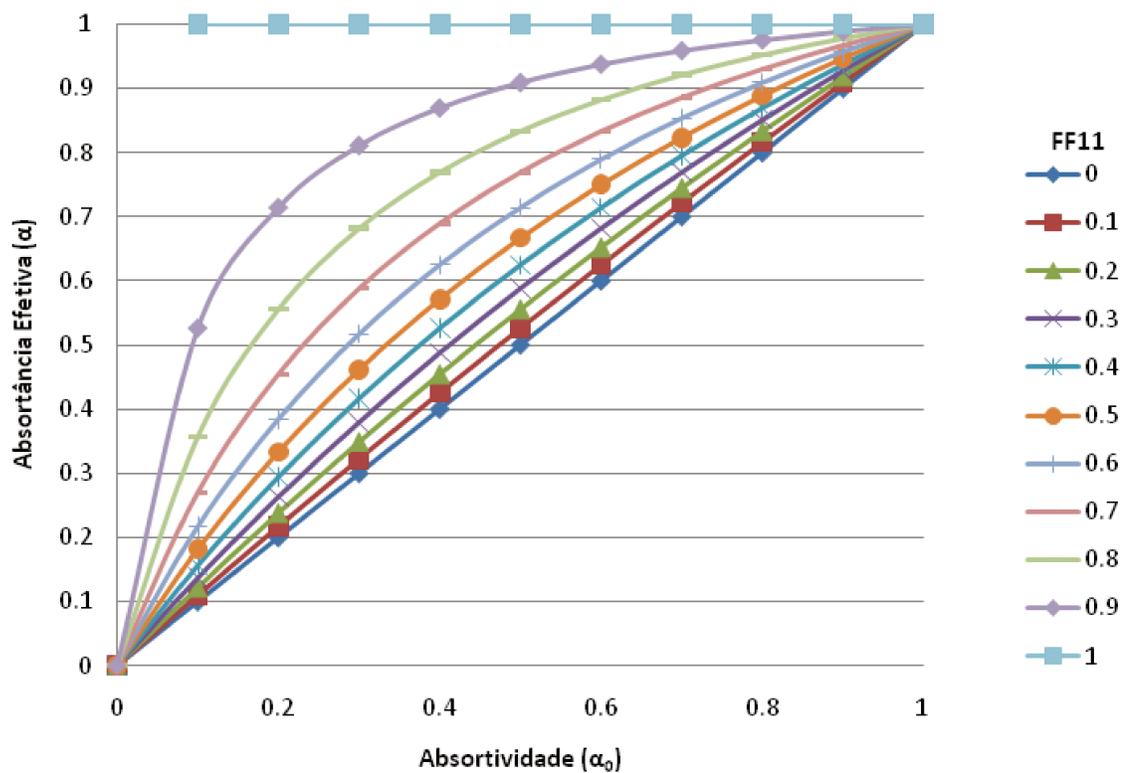


Figura 4-7: Efeito da forma na absorvância efetiva (Eq 4-39).

4.1 INCREMENTO MÁXIMO NA ABSORTÂNCIA POR EFEITO DA FORMA

O incremento na absorvância causado pela forma ($\Delta\alpha$) pode ser calculado pela equação 4-42 e é apresentado na Figura 4-8.

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0 = \frac{\alpha_0}{1 - FF_{11} + FF_{11}\alpha_0} - \alpha_0 \quad (\text{Eq. 4-42})$$

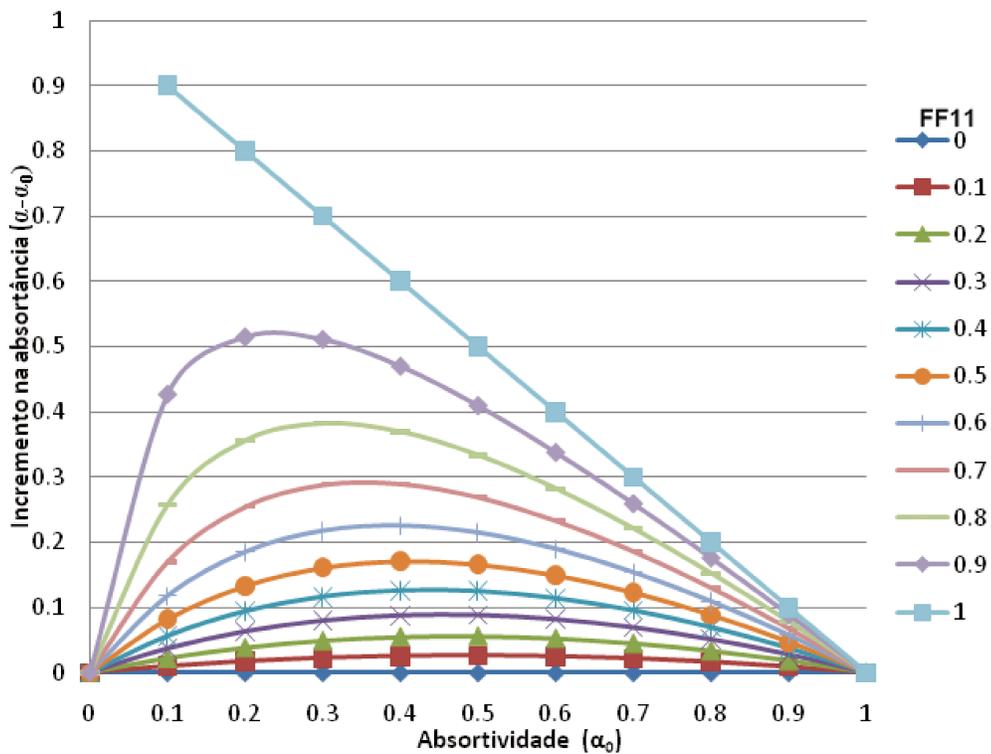


Figura 4-8: Incremento na absorvância por efeito da forma.

É possível quantificar os máximos valores das curvas apresentadas na Figura 4-8, ou seja, os máximos valores deste incremento em função do fator de forma, igualando a 0, a derivada da equação 4-42.

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0 = \frac{\alpha_0}{1 - FF_{11} + FF_{11}\alpha_0} - \alpha_0 \quad (\text{Eq.4-42})$$

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS
IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_0}{1 - FF_{11} + FF_{11} \cdot \alpha_0} - \alpha_0 \quad (\text{Eq. 4-43})$$

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_0 - (1 - FF_{11} + FF_{11} \cdot \alpha_0) \alpha_0}{1 - FF_{11} + FF_{11} \cdot \alpha_0} \quad (\text{Eq. 4-44})$$

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_0 - (\alpha_0 - FF_{11} \cdot \alpha_0 + FF_{11} \cdot \alpha_0^2)}{1 - FF_{11} + FF_{11} \cdot \alpha_0} \quad (\text{Eq. 4-45})$$

$$\Delta\alpha = \frac{FF_{11} \cdot \alpha_0 - FF_{11} \cdot \alpha_0^2}{1 - FF_{11} + FF_{11} \cdot \alpha_0} \quad (\text{Eq. 4-46})$$

$$\Delta\alpha = \frac{FF_{11} \cdot \alpha_0 \cdot (1 - \alpha_0)}{1 - FF_{11} + FF_{11} \cdot \alpha_0} \quad (\text{Eq. 4-47})$$

Para:

$$B = \frac{1 - FF_{11}}{FF_{11}} \quad (\text{Eq. 4-48})$$

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_0 \cdot (1 - \alpha_0)}{B + \alpha_0} \quad (\text{Eq. 4-49})$$

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_0 - \alpha_0^2}{B + \alpha_0} \quad (\text{Eq. 4-50})$$

Derivando em relação a α_0 obtém-se:

$$\Delta\alpha' = \frac{1 - 2 \cdot \alpha_0}{B + \alpha_0} - \frac{(\alpha_0 - \alpha_0^2)}{(B + \alpha_0)^2} \cdot 1 \quad (\text{Eq. 4-51})$$

$$\Delta\alpha' = \frac{(1 - 2 \cdot \alpha_0)(B + \alpha_0) - (\alpha_0 - \alpha_0^2)}{(B + \alpha_0)^2} \quad (\text{Eq. 4-52})$$

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS
IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

$$\Delta\alpha' = \frac{B - 2.\alpha_0.B + \alpha_0 - 2.\alpha_0^2 - \alpha_0 + \alpha_0^2}{(B + \alpha_0)^2} \quad (\text{Eq. 4-53})$$

$$\Delta\alpha' = \frac{B - 2.\alpha_0.B - \alpha_0^2}{(B + \alpha_0)^2} \quad (\text{Eq. 4-54})$$

Igualando a derivada (eq. 4-54) a 0 obtém-se:

$$\Delta\alpha' = \frac{B - 2.\alpha_0.B - \alpha_0^2}{(B + \alpha_0)^2} = 0 \quad (\text{Eq. 4-55})$$

$$\Delta\alpha' = B - 2.\alpha_0.B - \alpha_0^2 = 0 \quad (\text{Eq. 4-56})$$

$$\Delta\alpha' = \alpha_0^2 + 2.B.\alpha_0 - B = 0 \quad (\text{Eq. 4-57})$$

As soluções desta equação são dadas por:

$$R = \frac{-2.B \pm \sqrt{(2.B)^2 - 4.1. - B}}{2} \quad (\text{Eq. 4-58})$$

$$R = \frac{-2.B \pm \sqrt{4B^2 + 4B}}{2} \quad (\text{Eq. 4-59})$$

$$R = -B \pm \sqrt{B + B^2} \quad (\text{Eq. 4-60})$$

Substituindo a variável B pelo indicado na equação 4-48:

$$R = -\left(\frac{1 - FF_{11}}{FF_{11}}\right) \pm \sqrt{\frac{1 - FF_{11}}{FF_{11}} + \left(\frac{1 - FF_{11}}{FF_{11}} \cdot \frac{1 - FF_{11}}{FF_{11}}\right)} \quad (\text{Eq. 4-61})$$

$$R = -\left(\frac{1 - FF_{11}}{FF_{11}}\right) \pm \sqrt{\frac{FF_{11} - FF_{11}^2 + 1 - 2.FF_{11} + FF_{11}^2}{FF_{11}^2}} \quad (\text{Eq. 4-62})$$

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS
IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

$$R = -\left(\frac{1 - FF_{11}}{FF_{11}}\right) \pm \sqrt{\frac{1 - FF_{11}}{FF_{11}^2}} \quad (\text{Eq. 4-63})$$

$$R = \frac{FF_{11} - 1}{FF_{11}} \pm \sqrt{\frac{1 - FF_{11}}{FF_{11}^2}} \quad (\text{Eq. 4-64})$$

$$R = \frac{FF_{11} - 1}{FF_{11}} \pm \frac{\sqrt{1 - FF_{11}}}{FF_{11}} \quad (\text{Eq. 4-65})$$

Como os resultados de R devem estar entre 0 e 1, descarta-se as soluções em que se subtrai a segunda parcela da equação 4-65, por resultar em valores negativos.

Assim:

$$R = \frac{FF_{11} - 1}{FF_{11}} + \frac{\sqrt{1 - FF_{11}}}{FF_{11}} \quad (\text{Eq. 4-66})$$

$$R = \alpha_{0MAX} = \frac{FF_{11} - 1 + \sqrt{1 - FF_{11}}}{FF_{11}} \quad (\text{Eq. 4-67})$$

Onde, α_{0MAX} é a absorvidade em que o incremento na absorvância é máximo.

Na Figura 4-9, a reta que cruza o ponto B, corresponde à relação entre as absorvidades (α_{0MAX} , equação 4-67) e os respectivos incrementos máximos na absorvância ($\Delta\alpha_{MAX}$, equação 4-42).

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

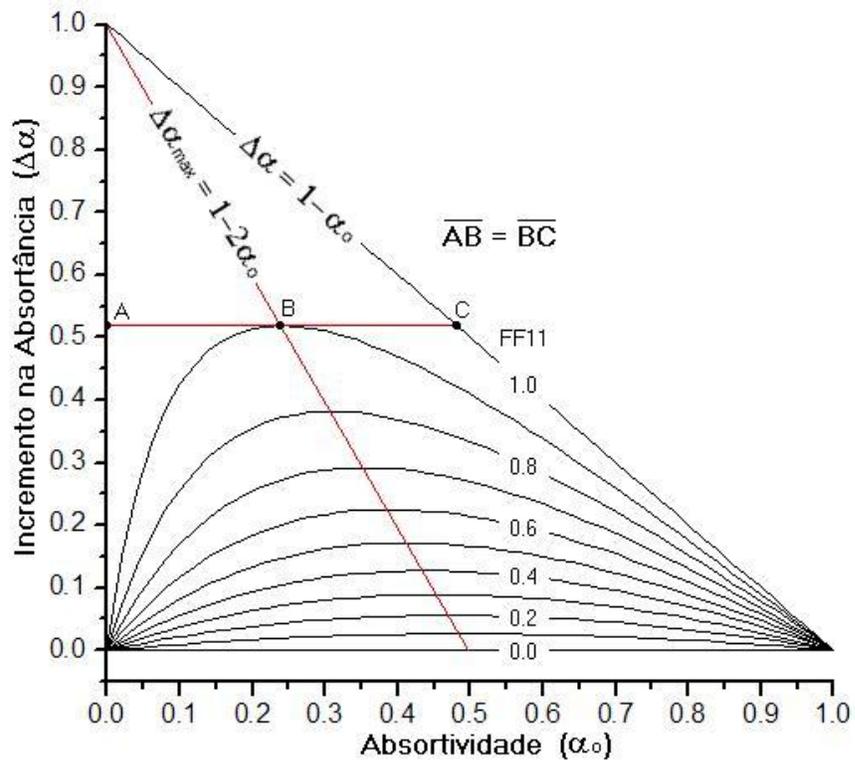


Figura 4-9: Incremento na absortância por efeito da forma.

Algebricamente, é possível determinar a equação que correlaciona a absortividade ao incremento máximo ($\Delta\alpha_{max}$), considerando quaisquer 2 pontos da reta e a equação 4-68.

$$y = m.x + b \quad (\text{Eq. 4-68})$$

Onde:

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \quad (\text{Eq. 4-69})$$

$$b = \frac{X_2.Y_1 - X_1.Y_2}{X_2 - X_1} \quad (\text{Eq. 4-70})$$

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS
IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

Por exemplo, para os fatores de forma (FF_{11}) 0,1 e 0,9, obtém-se:

FF_{11}	α_{0MAX} (Eq. 4-71)	$\Delta\alpha$ (Eq.4-42)
	X	Y
0,1	0,486833	0,026334
0,9	0,240253	0,519494

$$m = \frac{0,519494 - 0,026334}{0,240253 - 0,486833} = -2$$

$$b = \frac{0,240253 \cdot 0,026334 - 0,486833 \cdot 0,519494}{0,240253 - 0,486833} = 1$$

$$\Delta\alpha_{max} = 1 - 2 \cdot \alpha_0 \quad (\text{Eq. 4-72})$$

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS EFEITOS DAS
IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS SOBRE AS ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS.

5 PRIMEIRA ETAPA DA PESQUISA

Apesar do foco principal deste trabalho permanecer nos fluxos de calor por radiação, estes, normalmente não ocorrem de maneira isolada. Por este motivo, um procedimento experimental foi realizado, para que pudesse ser observado o efeito conjugado entre os diferentes fluxos de calor.

A montagem do experimento sofreu diversas modificações e revisões. Em cada uma, procurou-se aliar a simplicidade da montagem à precisão dos dados medidos. Avaliou-se, a cada etapa, dimensões das amostras e do conjunto, áreas de exposição, peso das amostras, facilidade para movimentação, número de amostras, tempo de exposição, sensores necessários, forma de instalação dos sensores, tipos de dados esperados, local de aplicação dos experimentos, materiais de fabricação, correlação com o modelo teórico, entre outras.

Optou-se por um conjunto leve, que pudesse ser facilmente exposto às condições do clima ambiente ou protegido contra intempéries, resultando em um sistema com oito amostras, com variação de absorvância e emissividade em pares de diferentes formas.

Adotou-se o alumínio como material para confecção das amostras por sua elevada condutividade, facilitando a medição da temperatura. Para valores de Biot menores que 0,1, como é o caso, é razoável assumir que a temperatura do sólido seja uniforme (APÊNDICE D). Assim:

$$\text{Se } Bi \leq 0,1 \rightarrow T_{\text{sup1}} \approx T_{\text{sup2}} \quad (\text{Eq. 5-1})$$

Esta simplificação é necessária para que se possa instalar os sensores de temperatura sob as amostras, não interferindo portanto, na irradiação das faces expostas ao clima.

O sistema proposto consiste de um conjunto de chapas metálicas pintadas expostas às condições do clima local. Um sistema de aquisição de dados registrou as

temperaturas das superfícies inferiores destas chapas, em intervalos constantes de tempo. Simultaneamente, outros dados climáticos foram registrados, tais como a temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento e a irradiância solar.

Para que as massas de todas as amostras fossem iguais, adotou-se para cada par, em lugar de uma placa plana comparada a uma segunda ondulada, um conjunto de peças cortadas de um mesmo perfil, montadas e expostas ao ambiente de forma diferente.

As peças foram cortadas e lixadas de forma a apresentar as mesmas características dimensionais e superficiais. Foram fixadas entre si, inicialmente com cola (“super bonder”) e posteriormente com fita adesiva em sua face inferior.

Construiu-se um sistema de testes conforme apresentado na Figura 5-1 e descrito a seguir.



Figura 5-1: Experimento proposto.

Utilizou-se em cada amostra 8 peças de 15 cm de um perfil em T com 25 mm de altura (Figura 5-2).

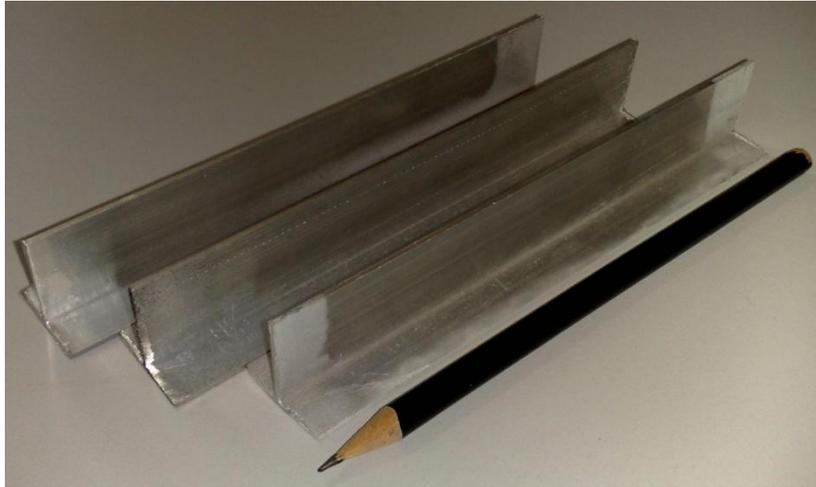


Figura 5-2: Peças para experimento proposto.

Após serem cortadas e lixadas, as peças foram pintadas de forma diferenciada. Uma parte das peças foi mantida sem pintura para constituir as amostras denominadas “Alumínio Lisa” e “Alumínio Ondulada” (Figura 5-3).

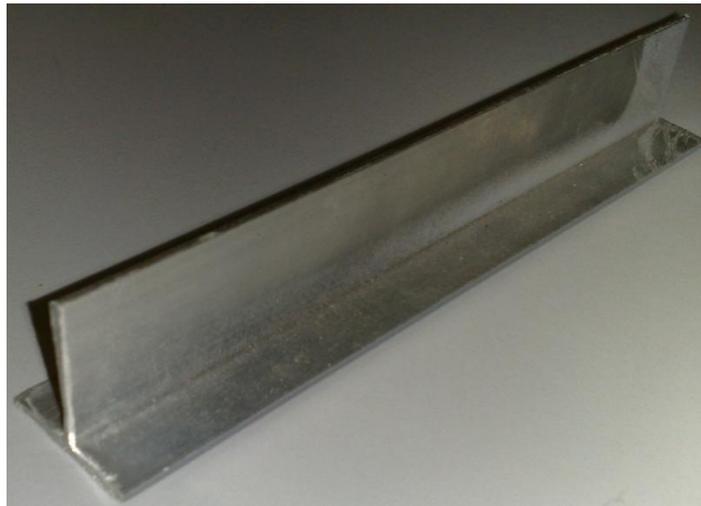


Figura 5-3: Peça sem pintura.

Nas demais peças aplicaram-se duas demãos de primer cinza em spray (Figura 5-4) e posteriormente efetuou-se a pintura de 16 peças com resina acrílica preta em spray e outras 16 peças na cor branca (Figura 5-5).

PRIMEIRA ETAPA DA PESQUISA



Figura 5-4: Primer e tinta.

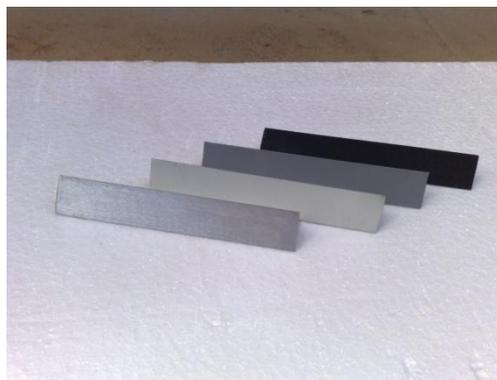


Figura 5-5: Peças preparadas.

Adotaram-se estas opções de tratamento superficial para possibilitar a comparação entre superfícies de diferentes absorções (ao comparar amostras de cores distintas) e diferentes emissividades (ao comparar amostras “Alumínio” com as amostras pintadas).

Para evidenciar os efeitos da radiação, adotou-se o perfil em T em lugar do perfil U, pela menor relação entre a massa e área de exposição, a menor massa e portanto menor inércia térmica do sistema,. Para instalar 8 amostras em uma única placa de isolante (1 x 0,5 m) (Figura 5-6), definiu-se os comprimentos das amostras em 155 mm.



Figura 5-6: Experimento proposto.

Foram adicionadas peças ao topo das amostras onduladas, para fechar lateralmente as cavidades mantendo as mesmas propriedades superficiais (figuras 5-7 e 5-8).

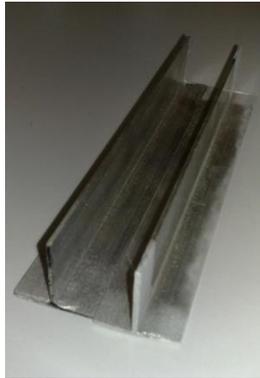


Figura 5-7: Montagem da amostra.



Figura 5-8: Fechamento do topo.

Enquanto nas amostras “Ondulada” (Figura 5-9) foram necessárias 8 peças para cobrir a área prevista, nas “Lisas”, apenas 5 seriam necessárias (Figura 5-10). Para manter o mesmo numero de peças e portanto a mesma massa, peças adicionais foram encaixadas sob as amostras “Lisas” (Figura 5-11.)

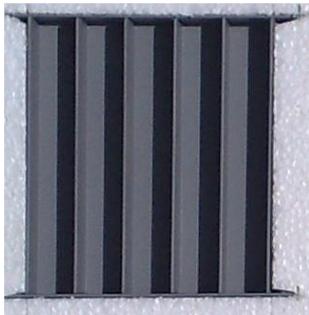


Figura 5-9: Montagem “Ondulada”.

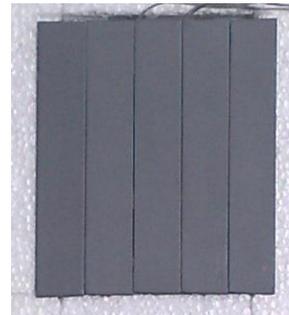


Figura 5-10: Montagem “Lisa”.



Figura 5-11: Montagem “Lisa”, peças adicionais para ajuste da massa.

Para possibilitar a coleta de dados de um maior número de pontos distribuiu-se os sensores de temperatura de forma diferenciada, obtendo simultaneamente mais informações de interesse. Optou-se por manter 2 sensores por amostra, e um terceiro sob uma camada de 5 cm de isolante, para averiguar o fluxo por condução (Figura 5-12).



Figura 5-12: Sensores sob o isolante durante a montagem.

Inicialmente os registros foram feitos a cada 5 minutos, por ser este o menor tempo de registro possível para a estação climatológica disponível. Posteriormente, adotou-se o registro de outra estação climatológica para a TBS e interpolou-se as UR, possibilitando um intervalo de 1 minuto entre os dados.

As áreas superficiais das amostras onduladas são aproximadamente 3,3 vezes maiores que a área das amostras lisas, resultando em diferentes fatores de forma. A amostra lisa ficou com uma área exposta de $0,019 \text{ m}^2$ (5 x 25 mm por 155 mm), enquanto a ondulada ficou com uma área de exposta de $0,064 \text{ m}^2$ (15 x 25mm por 155 mm + 10 x 25mm por 25 mm). As Figura 5-13 e Figura 5-14 mostram a montagem final das amostras, a Figura 5-15 apresenta um corte esquemático com os dois tipos de amostras, também apresentados na Figura 5-16 em vistas explodidas.



Figura 5-13: Amostras montadas.



Figura 5-14: Amostras montadas.

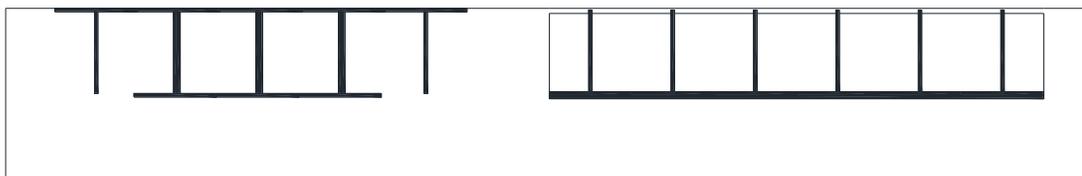


Figura 5-15: Corte esquemático - amostras montadas.

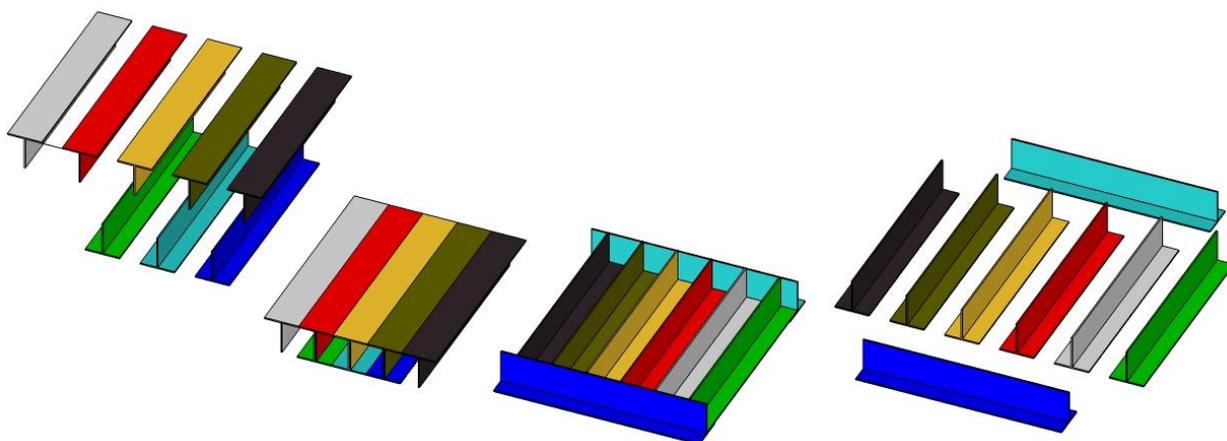


Figura 5-16: Vistas explodidas.

Para instalação do experimento, procurou-se um local em que este não sofresse influência de superfícies próximas, permanecesse sob as condições reais do clima local e pudesse abrigar o sistema eletrônico de aquisição de dados, com facilidade no acesso e segurança para os equipamentos.

Em contato com um grupo de pesquisa da UFSCar de São Carlos (RORIZ, 2009), firmou-se um acordo de cooperação obtendo-se, assim, autorização para o uso da área de suas células de teste. Adicionalmente este acordo permitiu o uso de instrumentos de monitoramento térmico e climático (Figura 5-17).



Figura 5-17: Localização das células de teste

Utilizou-se uma estação climatológica, disponível nas células de teste mencionadas, um piranômetro com célula de silício, com faixa de medição de 0 a 1200 W/m² e incerteza de 4% (Figura 5-18) e 22 sensores de temperatura superficial tipo “termistor” (Figura 5-19), com faixa de medição de 0 a 100 °C e incerteza de 0.2 °C.



Figura 5-18: Piranômetro



Figura 5-19: Termistor

Utilizaram-se ainda duas unidades de tratamento de sinais e um computador para a aquisição de dados (Figura 5-20).



Figura 5-20: Unidade de tratamento de sinais - Sistema de aquisição de dados.

A fim de garantir a precisão dos dispositivos de medição adotados, foi necessária uma série de aferições e calibrações descritas no apêndice F.

5.1 MODELO TEÓRICO ADOTADO

Adotou-se modelo baseado nas equações clássicas dos fenômenos de transporte, considerando o balanço entre os diversos fluxos de calor envolvidos, conforme descritos no capítulo 3 e no APÊNDICE D. Para esta análise, considera-se uma superfície de controle, sem massa (Figura 5-21). Como esta superfície não acumula energia, a soma dos fluxos de calor em cada instante deve ser nula (Eq. 5-2).

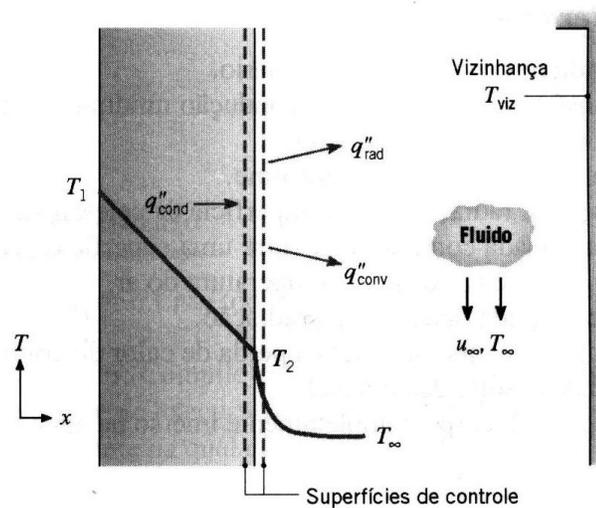


Figura 5-21: Balanço de energia em uma superfície (INCROPERA e DEWITT, 1996).

$$Q_{solar(t)} + Q_{Conv(t)} + Q_{IV(t)} + Q_{Cond(t)} = 0 \quad (\text{Eq. 5-2})$$

Ou

$$q_{solar(t)} + q_{Conv(t)} + q_{IV(t)} + q_{Cond(t)} = 0 \quad (\text{Eq. 5-3})$$

Para que esta igualdade seja válida, o sentido do fluxo deve ser levado em conta. Assim, adota-se o valor positivo para o fluxo que trouxer energia para o sistema (a amostra) e negativo em caso contrário.

Para o experimento proposto, o balanço de energia na superfície superior das amostras pode ser adotado conforme a Figura 5-21.

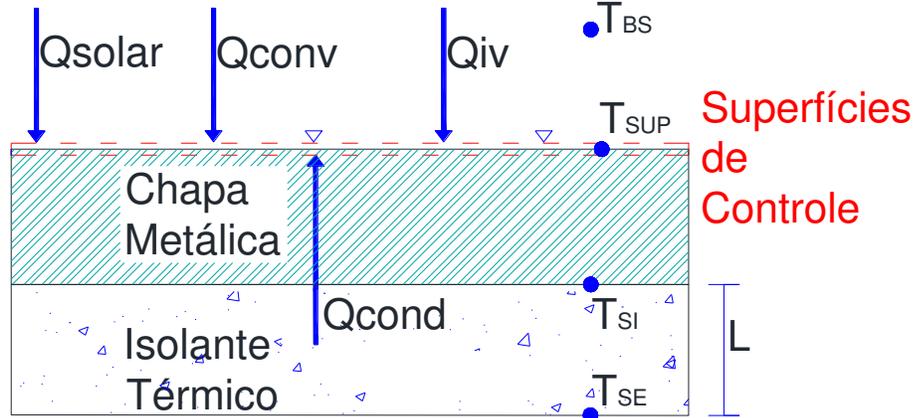


Figura 5-22: Modelo físico proposto.

Esta forma de análise tem a vantagem de não envolver as variáveis de massa do sistema (m) e calor específico da amostra (c), excluindo do modelo eventuais erros associados a estas variáveis. Além disso esta exigência de conservação de energia vale tanto para regime estacionário quanto transiente.

Neste modelo, o erro a ser avaliado pode ser considerado a soma dos fluxos e define-se então a variável Soma (Eq. 5-4):

$$Soma_{(t)} = q_{solar(t)} + q_{Conv(t)} + q_{IV(t)} + q_{Cond(t)} \quad (\text{Eq. 5-4})$$

Onde :

$$q_{cond} = \frac{A.k.(T_{se} - T_{si})}{L} \quad (\text{Eq. D-1})$$

$$q_{conv} = hc.A.(T_{bs} - T_{sup}) \quad (\text{Eq. D-3})$$

$$q_{solar} = I.\alpha.A \quad (\text{Eq. D-39})$$

$$q_{IV} = \sigma \cdot A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot (T_{\text{sup}}^4 - T_{\text{ceu}}^4) \quad (\text{Eq. D-40})$$

Este modelo foi aplicado aos dados coletados no experimento 1, com o objetivo de verificar se os resultados do método descrito no capítulo 4 têm boa correlação com valores medidos.

5.2 MEDIÇÕES DE REFLETIVIDADE

As refletividades das superfícies das amostras foram medidas por procedimento padrão segundo a norma ASHRAE 74-1988 (1988), realizado em espectrofotômetro Varian modelo CARY 5G (Figura 5-23), no Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica da Universidade Federal de São Carlos.



Figura 5-23: Espectrofotômetro CARY 5G.

As amostras para medição de refletividade (Figura 5-24) foram feitas em chapas de alumínio de aproximadamente 4x2 cm, cortadas da mesma barra metálica empregada na montagem do experimento 1 e submetidas aos mesmos processos de limpeza e pintura.



Figura 5-24: Amostras para medição de refletividade.

As amostras foram ensaiadas a cada 1nm, no intervalo de 300 a 2500 nm, por ser a região do espectro solar com maior concentração de energia, de acordo com o espectro solar padrão definido pela ASTM (ASTM, 2003). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5-25.

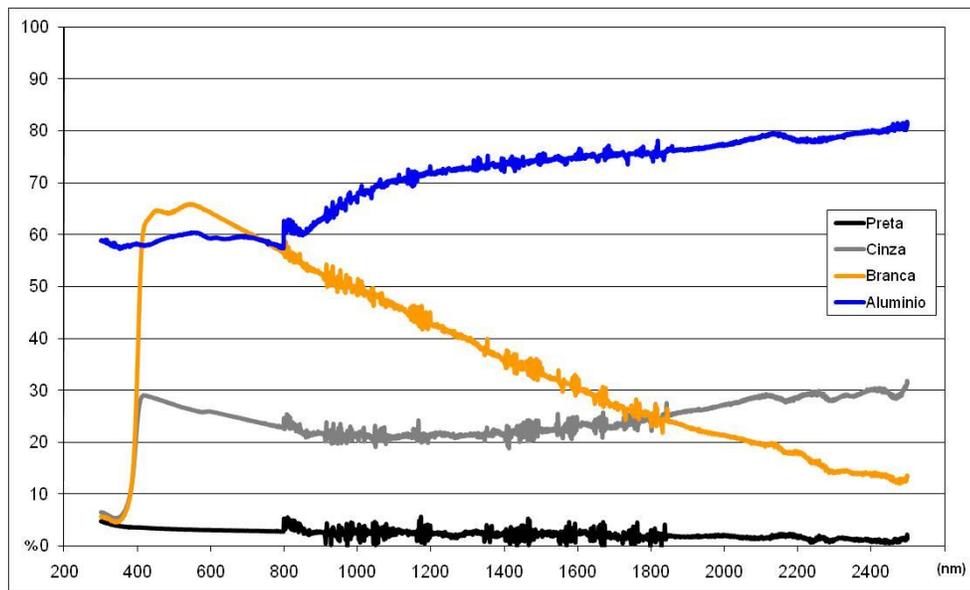


Figura 5-25: Refletividade das amostras.

Conforme descrito no ítem 3.2.2, para a obtenção da refletância, a refletividade lida no espectrofotômetro deve ser corrigida para o espectro solar, obtendo assim a refletividade solar. Considerando o espectro solar padrão definido pela ASTM (2003), as curvas de refletividade solar são apresentadas na Figura 5-26.

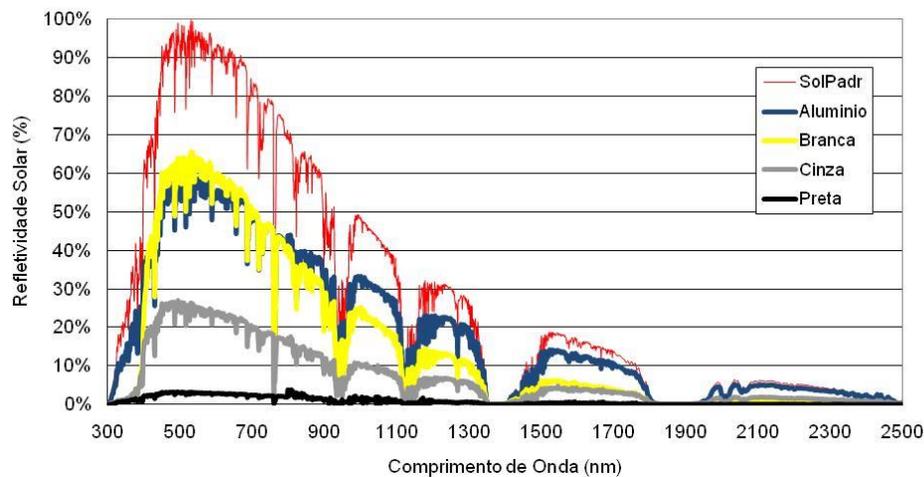


Figura 5-26: Refletividade solar das amostras.

Uma vez que as refletividades das amostras Cinza e Pretas são praticamente constantes ao longo do espectro, este procedimento pouco altera os resultados. Por outro lado, no caso da amostra branca, o efeito é bastante significativo (Tabela 5-1).

Tabela 5-1: Refletividades das Amostras.

%	Alumínio	Branca	Cinza	Preta
Refletividade Espectrofotômetro	70.62	35.67	23.96	2.36
Refletividade Solar	63.45	52.31	23.79	2.91

Para confirmar os resultados iniciais, realizou-se nova medição de absortividade em espectrofotômetro, pelo mesmo procedimento e mesmas amostras. Os resultados desta nova medição são comparados aos resultados do primeiro teste na Figura 5-27 e na Tabela 5-2.

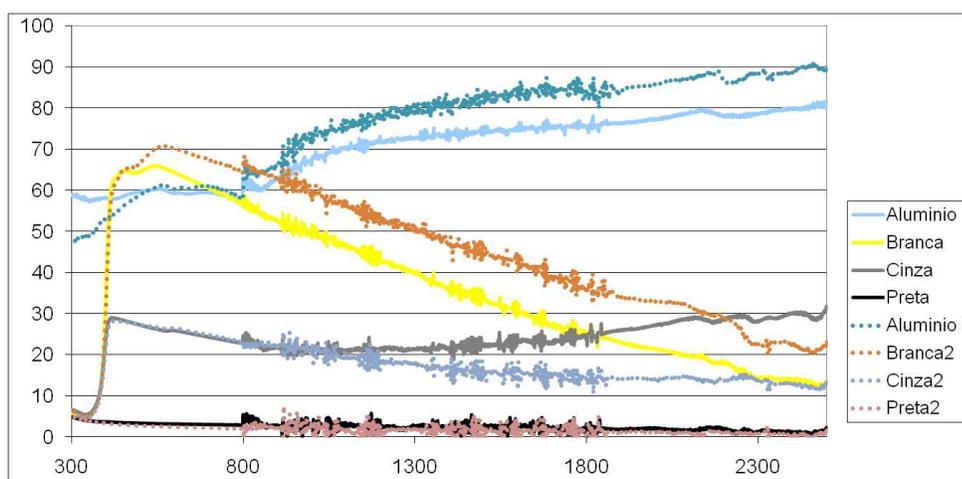


Figura 5-27: Refletividades das amostras.

Tabela 5-2: Comparação das Refletividades das Amostras no 1º e 2º Testes.

%	Alumínio	Branca	Cinza	Preta
Refletividade Espectrofotômetro 1º Teste	70.62	35.67	23.96	2.36
Refletividade Solar 1º Teste	63.45	52.31	23.79	2.91
Absortividade Solar 1º Teste	36.55	47.69	76.21	97.09
Refletividade Espectrofotômetro 2º Teste	76.03	44.65	17.65	1.66
Refletividade Solar 2º Teste	65.79	59.20	22.53	2.19
Absortividade Solar 2º Teste	34.21	40.80	77.47	97.81

As diferenças nos resultados são significativas. Os resultados do 1º teste foram desconsiderados por falta de calibração do equipamento. Providência só adotada no 2º teste.

5.3 CALCULADORA PARA FLUXOS DE CALOR

Para possibilitar os cálculos do modelo apresentado em 5.1, um software foi desenvolvido. As rotinas computacionais foram implementadas utilizando a linguagem Visual Basic 6.0 em sistema operacional Windows.

Suas principais rotinas podem ser vistas na Figura 5-28.

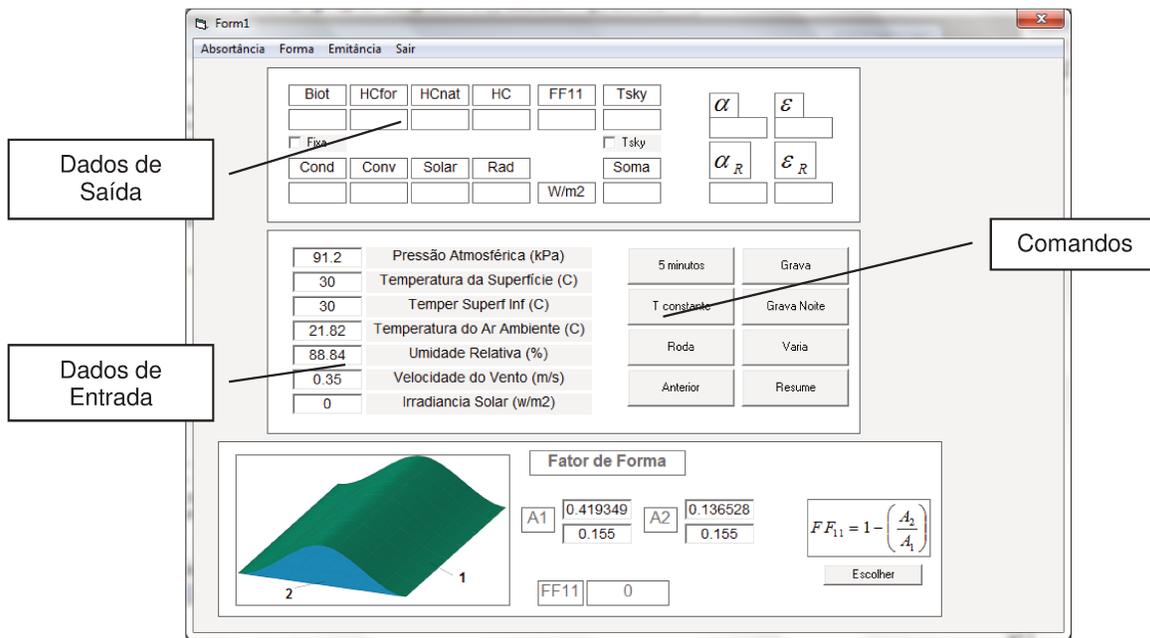


Figura 5-28: Software de cálculo dos Fluxos de Calor.

Resumidamente, os principais comandos atualmente implementados têm as seguintes funções:

Roda: Calcula fluxos de calor para condições dos dados de entrada

5 minutos: Considerando os fluxos de calor calculados e as características das amostras (massa e calor específico) calcula a temperatura prevista passados 5 minutos nas condições dos dados de entrada, conforme equação 6-4.

Tconstante: Calcula de forma iterativa a temperatura da superfície superior capaz de zerar a soma dos fluxos de calor.

Anterior: Restabelece últimas condições de entrada simuladas, nos dados de entrada.

Grava: Lê base de dados previamente preparada de um dia de medição, alimenta dados de entrada, roda cálculo, salva nova base de dados com resultado do modelo para cada instante da primeira base de dados.

No preparo da base de dados de entrada deste software, é necessário, além de calibrar os dados brutos das diversas fontes de informação (3 data-loggers), ajustá-los em relação a seus intervalos de medição e sincronizá-los. Uma vez que os intervalos de registro não são precisamente constantes (têm uma variação de alguns segundos), em determinados casos descarta-se dados de uma das fontes para um melhor sincronismo.

5.4 RESULTADOS PARCIAIS E SUA DISCUSSÃO

Neste tópic são apresentados os dados obtidos no experimento 1, os fluxos de calor calculados pelo modelo teórico (5.1), bem como sua avaliação.

Para as amostras onduladas apresentadas no item 5, através do fator de forma (FF_{11}) calculado pela equação 3-19, a aplicação da correção proposta no item 4 (equação 4-39) para o conjunto das absorvidades medidas (α_1 , item 5.2) obtém-se os valores da tabela 5-3.

$$FF_{11} = 1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \quad (\text{Eq. 3-19})$$

$$\rightarrow FF_{11} \approx 0.699$$

$$\alpha_e = \frac{\alpha_1}{1 - FF_{11} + FF_{11} \cdot \alpha_1} \quad (\text{Eq. 4-39})$$

Tabela 5-3: Absorvidades (α_1) e Absorvências efetivas (α_e)

Amostra	α_1	α_e	$\left(\frac{\alpha_e - \alpha_1}{\alpha_1} \right)$
Alumínio	34.21	63.34	85.1%
Branca	40.80	69.60	70.6%
Cinza	77.47	91.95	18.7%
Preta	97.81	99.33	1.6%

Para estas amostras, a aplicação da correção indicada pela equação 4-35, considerando valores tabelados de emissividade (INCROPERA e DEWITT, 1996), obtém-se os valores da tabela 5-4.

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1 \cdot A_1}{A_2 - \varepsilon_1 \cdot A_2 + \varepsilon_1 \cdot A_1} \quad (\text{Eq. 4-35})$$

Tabela 5-4: Emissividades (ε_1) e Emitâncias efetivas (ε_e) (%).

Amostra	ε_1	ε_e	$\left(\frac{\varepsilon_e - \varepsilon_1}{\varepsilon_1}\right)$
Alumínio	10.0	26.96	169.6
Branca	90.0	96.76	7.5
Cinza	90.0	96.76	7.5
Preta	90.0	96.76	7.5

Em experimento realizado a céu aberto, em 01/07/2010, conforme o método descrito no item 5, obteve-se os registros de temperatura e umidade ambiente apresentados na carta psicrométrica da Figura 5-29 e as temperaturas superficiais das amostras (Figura 5-30), relacionadas à temperatura ambiente (TBS, Figura 5-31).

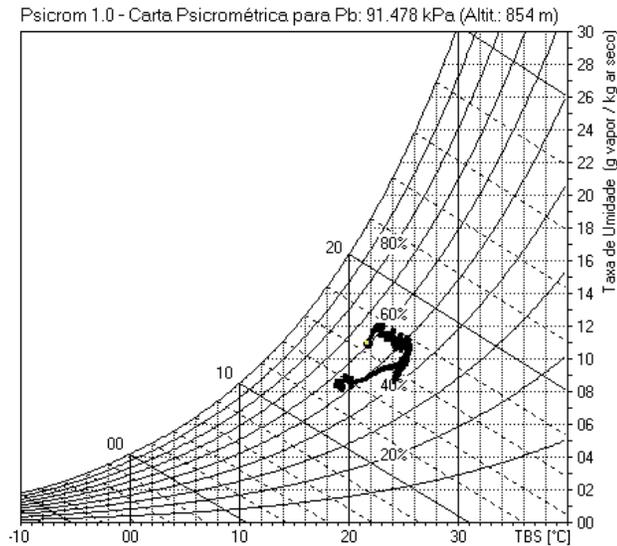


Figura 5-29: Registros de 01/07/2010 na carta psicrométrica (PSICROM 1.0).

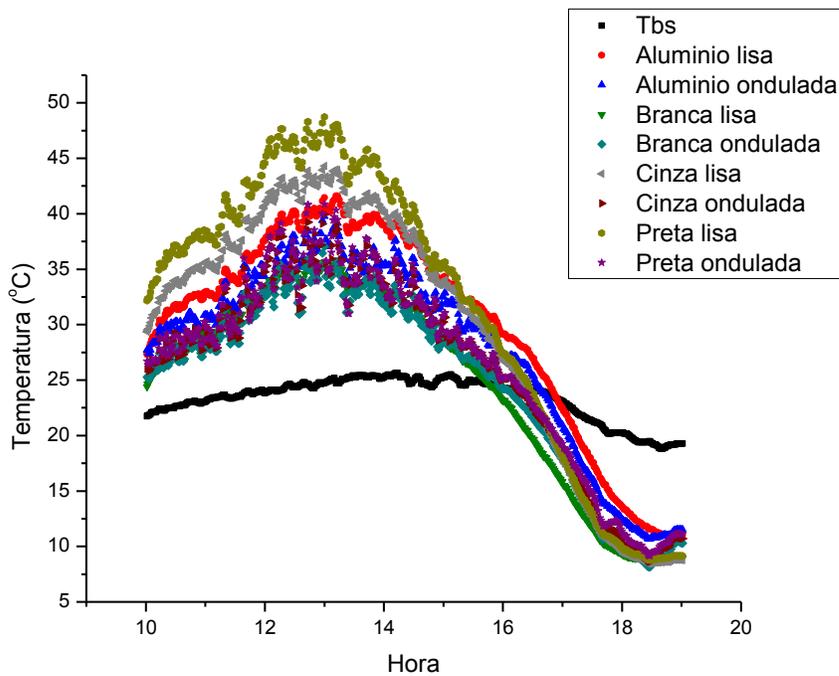


Figura 5-30: Evolução de temperaturas superficiais.

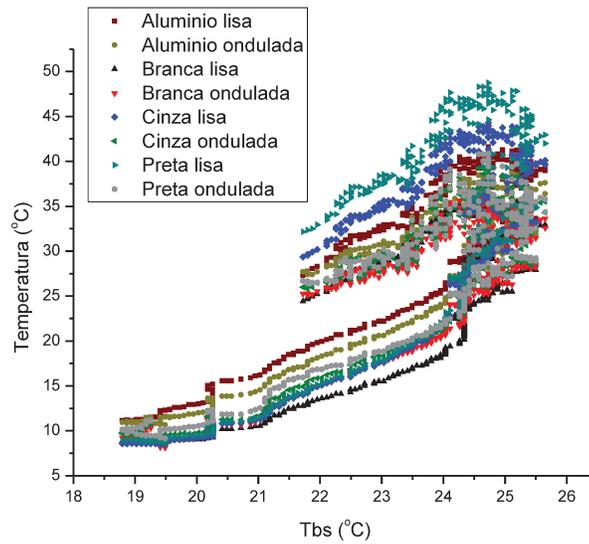


Figura 5-31: Temperaturas superficiais e temperatura ambiente.

Na Figura 5-32, apresenta-se a relação entre a TBS e a soma dos fluxos, para o conjunto de amostras. Conforme apresentado no capítulo 5.1, esta soma foi considerada como erro do modelo.

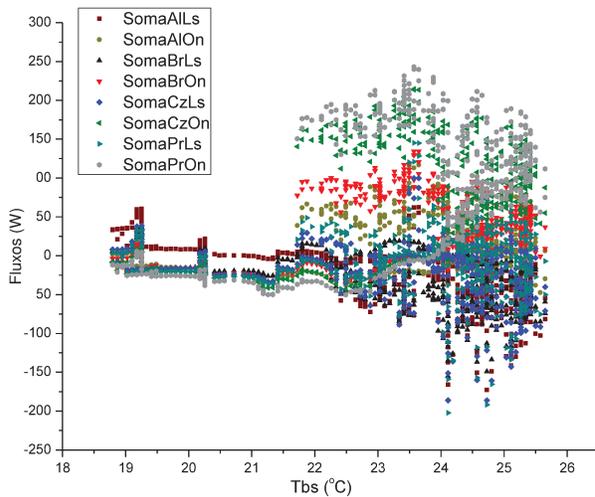


Figura 5-32: Temperatura ambiente e Soma dos fluxos.

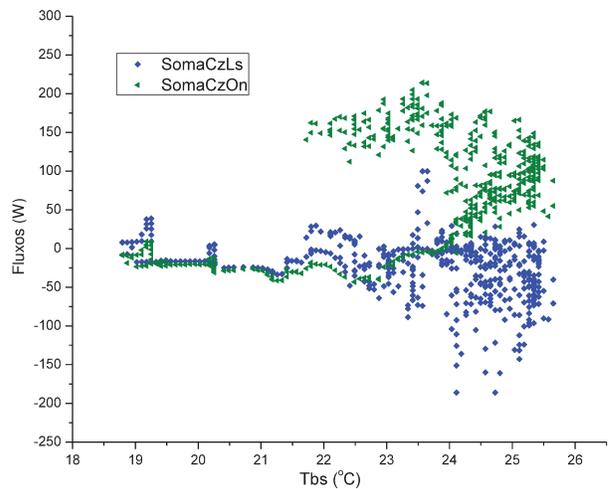


Figura 5-33: Temperatura ambiente e Soma dos fluxos para as amostras “Cinza”.

A Figura 5-33 destaca como exemplo a relação entre a TBS e o erro, dado pela soma dos fluxos, para as amostras cinza.

A fim de observar o comportamento das diferentes amostras plotou-se as curvas de temperaturas de cada tipo de pintura separadamente entre as Figura 5-34 e Figura 5-37.

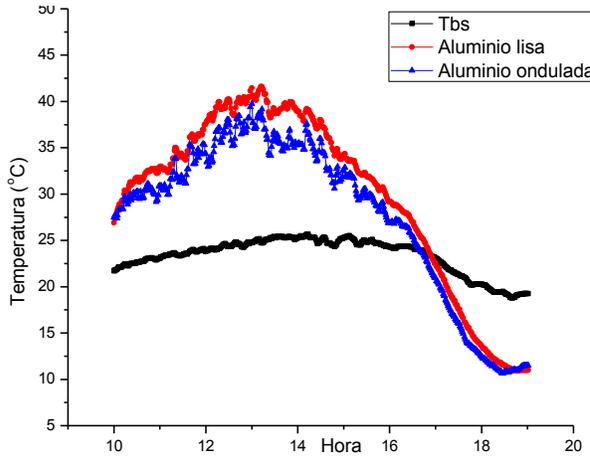


Figura 5-34: Evolução de temperaturas superficiais das amostras "Alumínio".

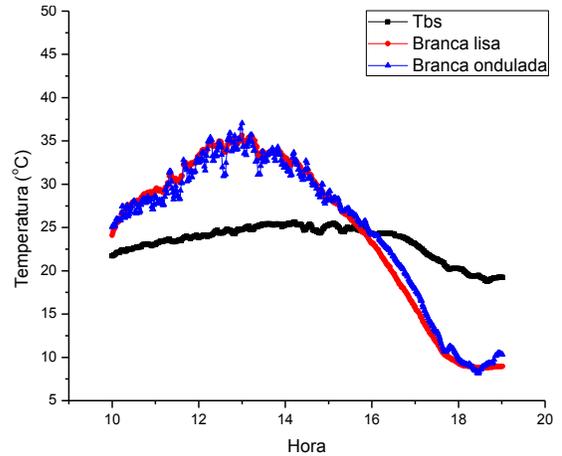


Figura 5-35: Evolução de temperaturas superficiais das amostras "Branca".

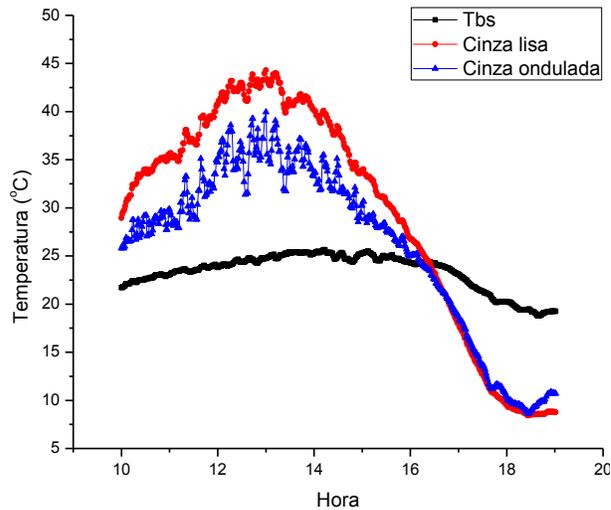


Figura 5-36: Evolução de temperaturas superficiais das amostras "Cinza".

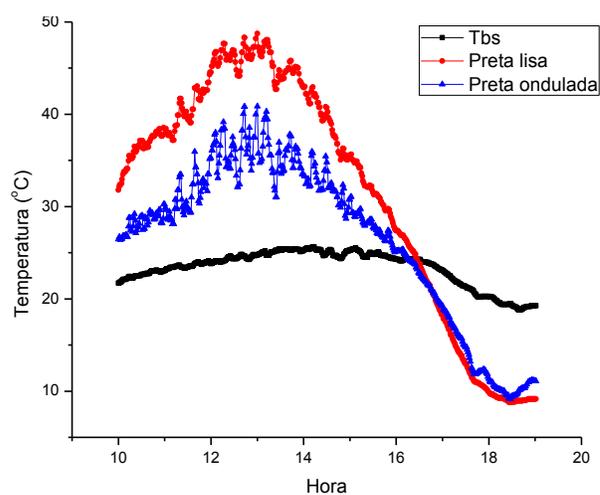


Figura 5-37: Evolução de temperaturas superficiais das amostras "Preta".

Conforme observável, as temperaturas superficiais máximas registradas neste experimento são função das absortâncias das amostras. As amostras onduladas têm uma maior instabilidade e de modo geral, se aproximam mais da temperatura ambiente (Tbs), indicando uma maior influência do fluxo por convecção do que a observada nas amostras lisas.

5.4.1 AVALIAÇÃO DO MODELO TEÓRICO - FLUXOS DE CALOR

Aplicando os modelos de cálculo apresentados no capítulo 5.1 aos registros apresentado no capítulo 5.4, obtêm-se os fluxos de calor indicados na figura 5-38.

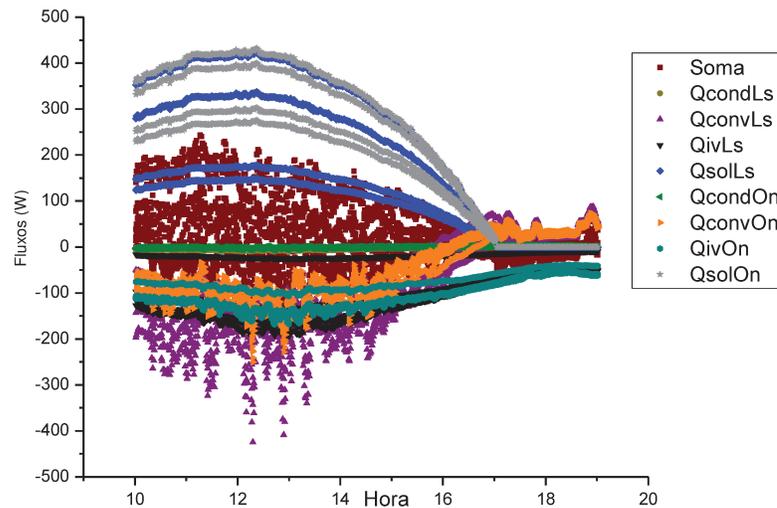


Figura 5-38: Evolução dos fluxos de calor.

Para facilitar a visualização, a Figura 5-39 apresenta, isoladamente, os fluxos calculados para as superfícies cinza como exemplo. Percebe-se que o erro associado às amostras lisas (SomaCzLs) é menor que o que correspondente às amostras onduladas (SomaCzOn).

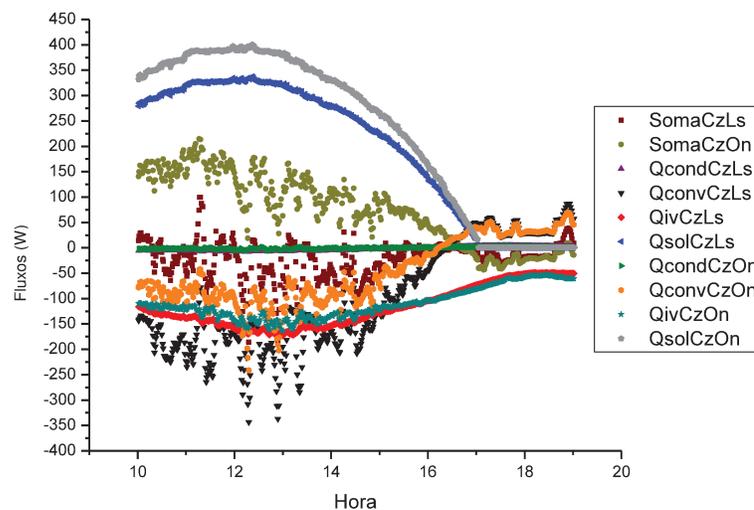


Figura 5-39: Evolução dos fluxos de calor para as amostras "Cinza".

Em torno das 16:30 (Figura 5-39), o fluxo por convecção sofre uma inversão e passa a agregar calor à superfície. Este fato é explicável pela maior velocidade na queda da temperatura superficial em relação à da temperatura do ar.

Para avaliar os erros associados ao modelo de cálculo, na Figura 5-40 plotou-se a relação entre cada fluxo de calor e a soma de todos os fluxos.

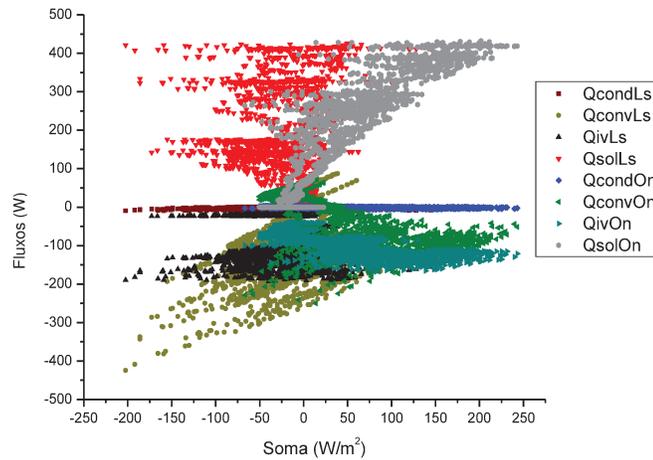


Figura 5-40: Fluxos de calor e soma dos fluxos.

Para facilitar a visualização destas relações, como exemplos, detalhou-se estes fluxos para as amostras em cinza na Figura 5-41 e para as amostras em alumínio na Figura 5-42.

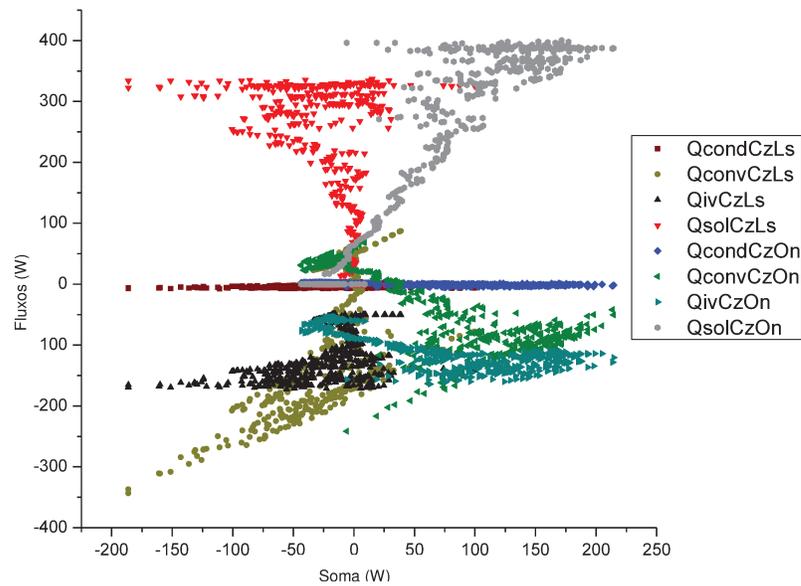


Figura 5-41: Fluxos de calor e soma dos fluxos das amostras cinza.

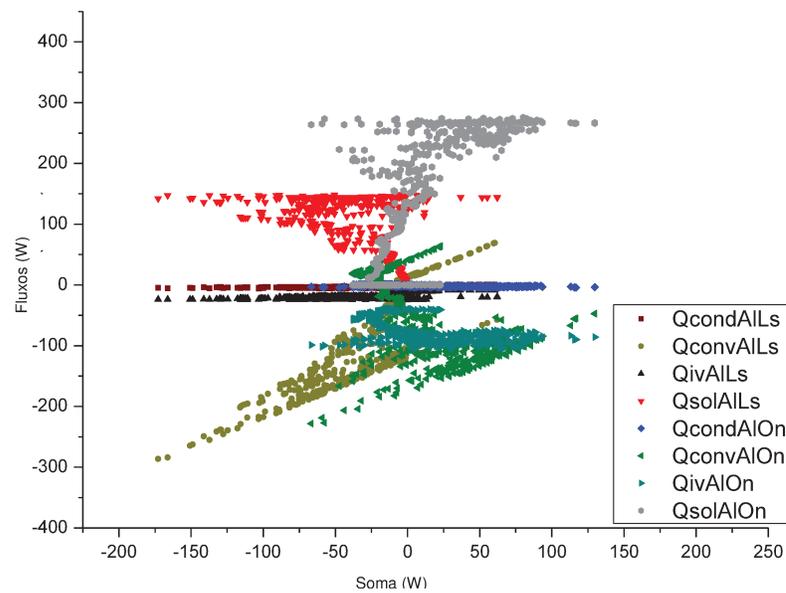


Figura 5-42: Fluxos de calor e soma dos fluxos das amostras “Alumínio”.

Observa-se diferença entre as relações para as amostras lisas e entre as onduladas. Observa-se ainda que a amplitude dos erros é bastante significativa e, portanto uma análise detalhada de cada um dos fluxos seria necessária para observar onde existe correlação com o erro. Esta análise é feita nos itens 5.4.1.4 a 5.4.1.3.

5.4.1.1 FLUXO SOLAR

A Figura 5-43 mostra o fluxo solar calculado para cada amostra.

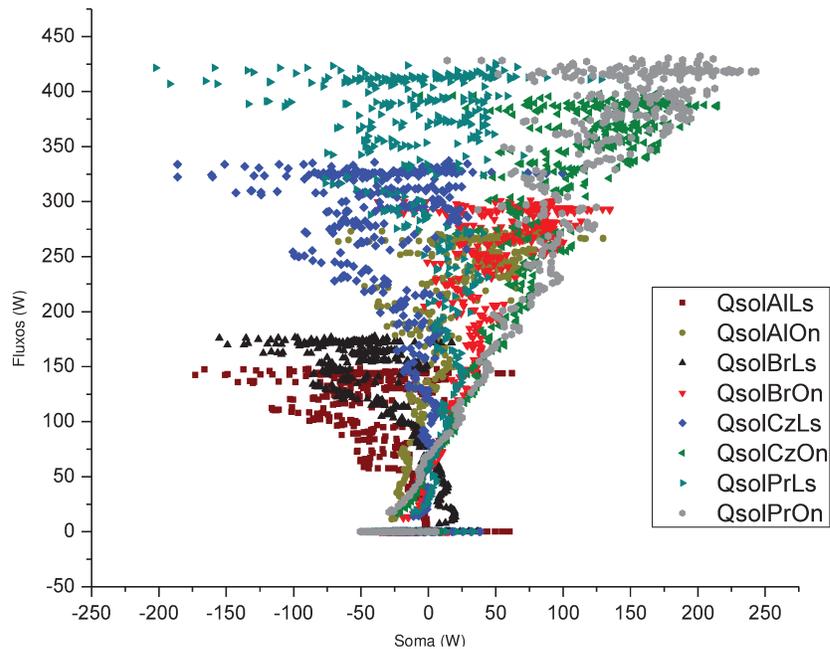


Figura 5-43: Fluxos solares e soma dos fluxos.

Por ser este o fluxo que mais agrega calor ao sistema e, portanto, mais altera a temperatura do modelo, seria de se esperar uma correlação com o erro, esta correlação entretanto pode ser indireta, na medida em que influencia fortemente as temperaturas superficiais e, conseqüentemente, todos os outros fluxos. As figuras 5-44 a 5-47 apresentam os fluxos solares calculados para cada par de amostras.

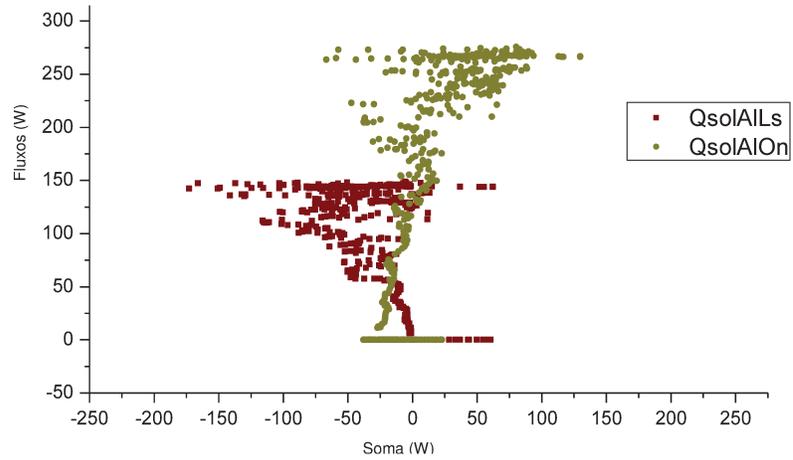


Figura 5-44: Fluxos solares das amostras “Alumínio” e soma dos fluxos.

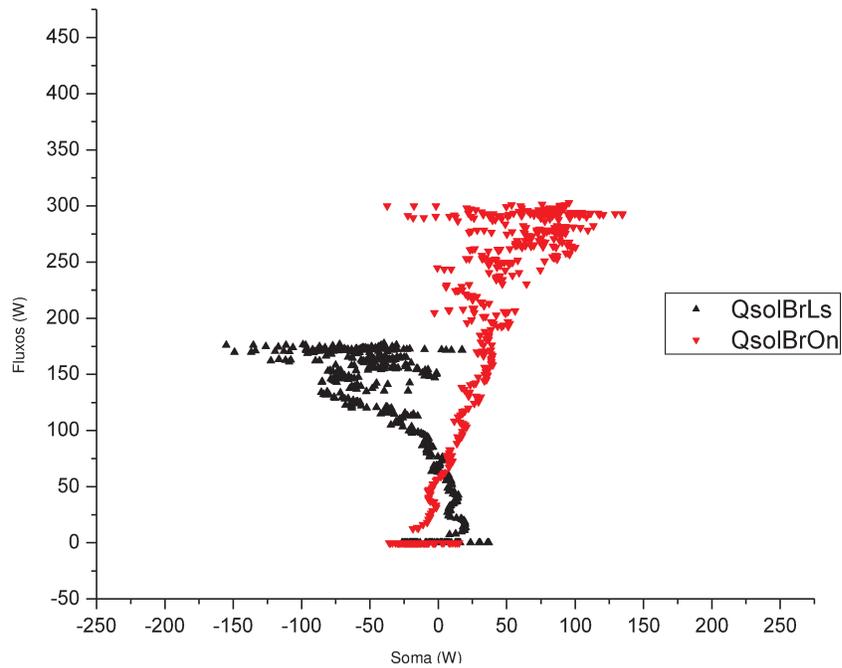


Figura 5-45: Fluxos solares das amostras “Branca” e soma dos fluxos.

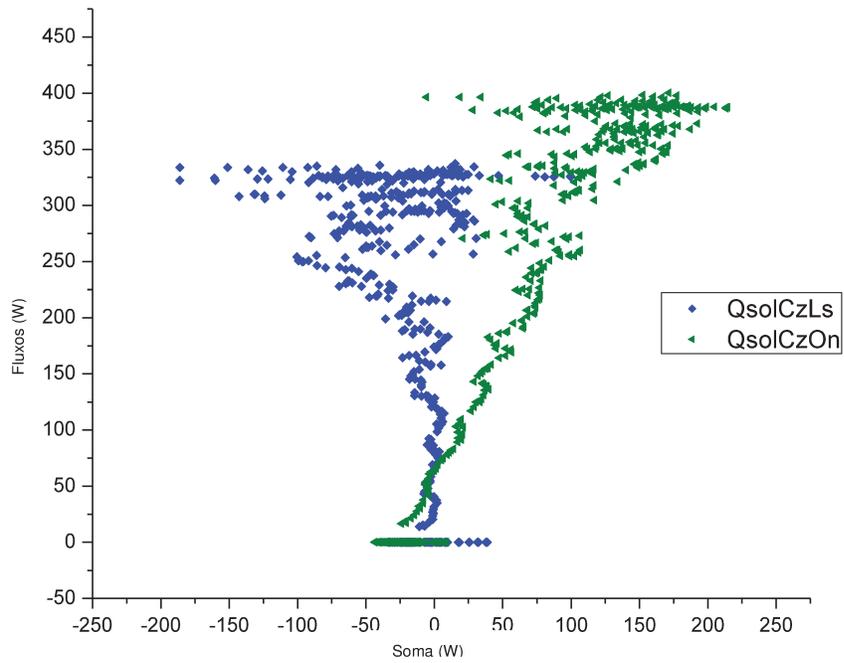


Figura 5-46: Fluxos solares das amostras “Cinza” e soma dos fluxos.

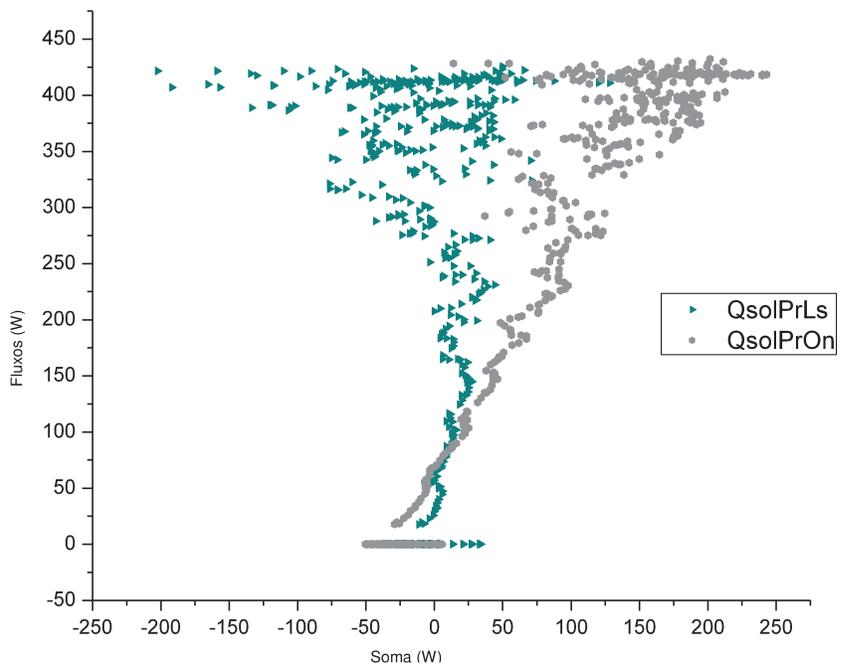


Figura 5-47: Fluxos solares das amostras “Preta” e soma dos fluxos.

Tomando como exemplo as amostras na cor cinza (Figura 5-46), em uma análise inicial seria possível relacionar o aumento do fluxo solar para as amostras lisas a uma redução da Soma e, da mesma forma, relacionar o aumento do fluxo solar a um aumento da Soma para as amostras onduladas. Entretanto, é possível observar que esta relação só é válida para os registros em que os fluxos solares, para estas amostras, estão abaixo de cerca de 250 W/m^2 , ou seja, para o período de menor irradiância. Considerando apenas o período em que a irradiância registrada esteve acima de 400 W/m^2 , para as amostras cinza, obtém-se a relação apresentada na Figura 5-48, onde observa-se que apesar da soma dos fluxos para as amostras lisas apresentar uma média negativa, enquanto a soma para as amostras onduladas apresenta uma média positiva, estes fluxos não apresentam qualquer correlação com a soma e portanto com o erro.

A evolução destes fluxos ao longo do período de medição é apresentada na Figura 5-49.

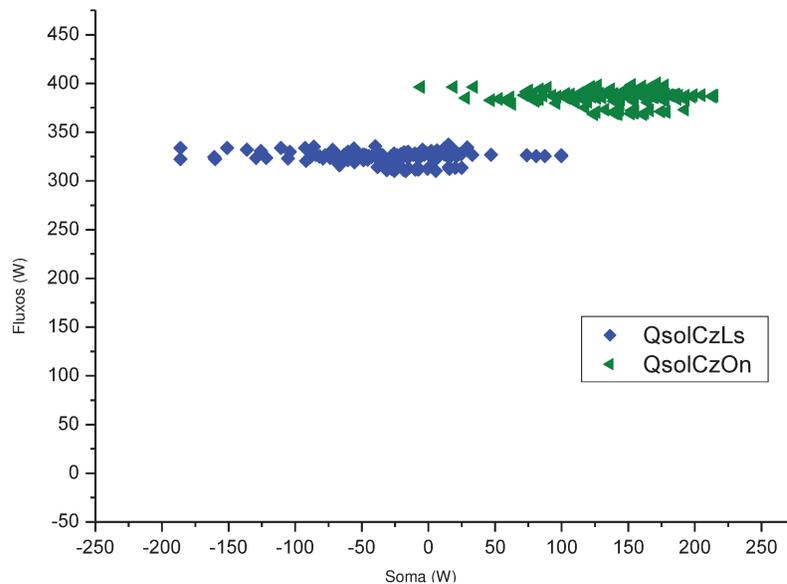


Figura 5-48: Fluxos solares das amostras “Cinza” e soma dos fluxos $I > 400 \text{ W/m}^2$.

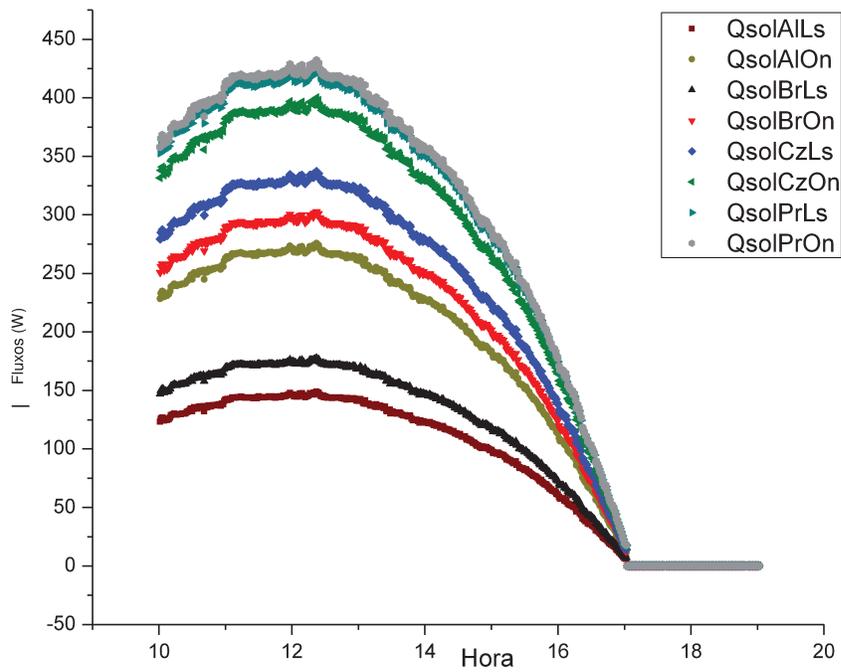


Figura 5-49: Fluxos solares.

Os dados referentes a situações sem o fluxo de calor solar, ou seja, condições noturnas, são estudados separadamente no item 5.4.1.5.

5.4.1.2 FLUXO POR CONDUÇÃO

Os resultados dos cálculos para este fluxo são apresentados nas figuras 5-50 a 5-59.

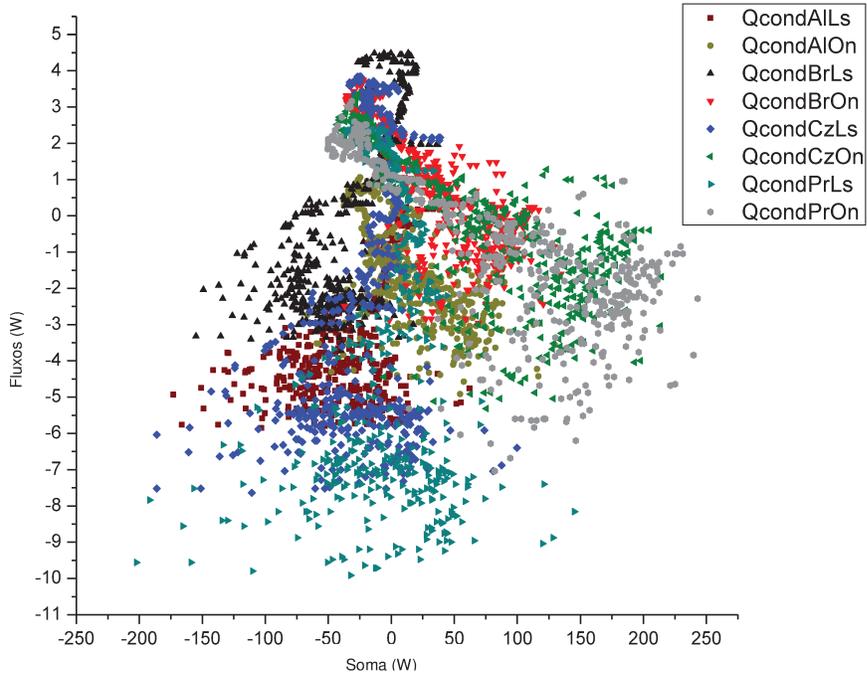


Figura 5-50: Fluxos por condução e soma dos fluxos.

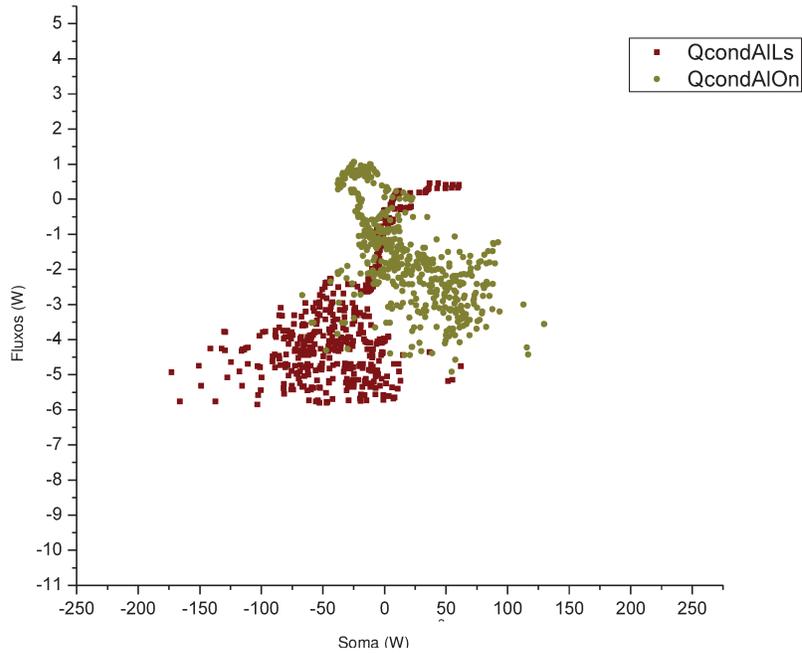


Figura 5-51: Fluxos por condução das amostras "Alumínio" e soma dos fluxos.

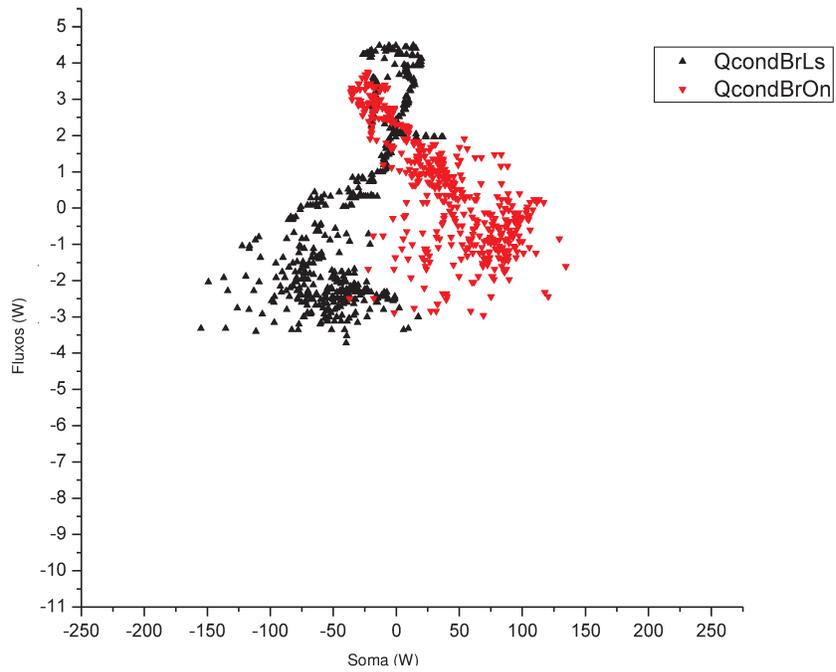


Figura 5-52: Fluxos por condução das amostras “Branca” e soma dos fluxos.

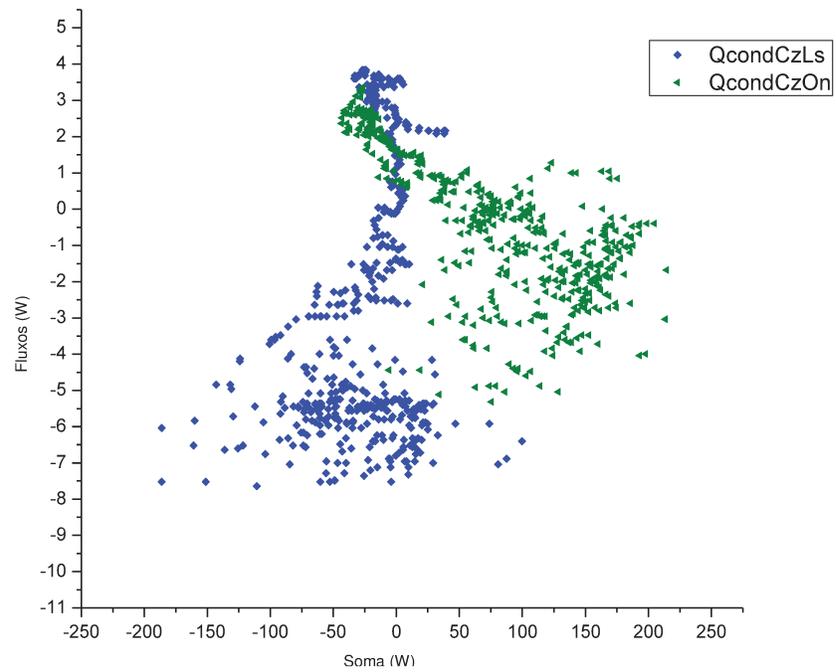


Figura 5-53: Fluxos por condução das amostras “Cinza” e soma dos fluxos.

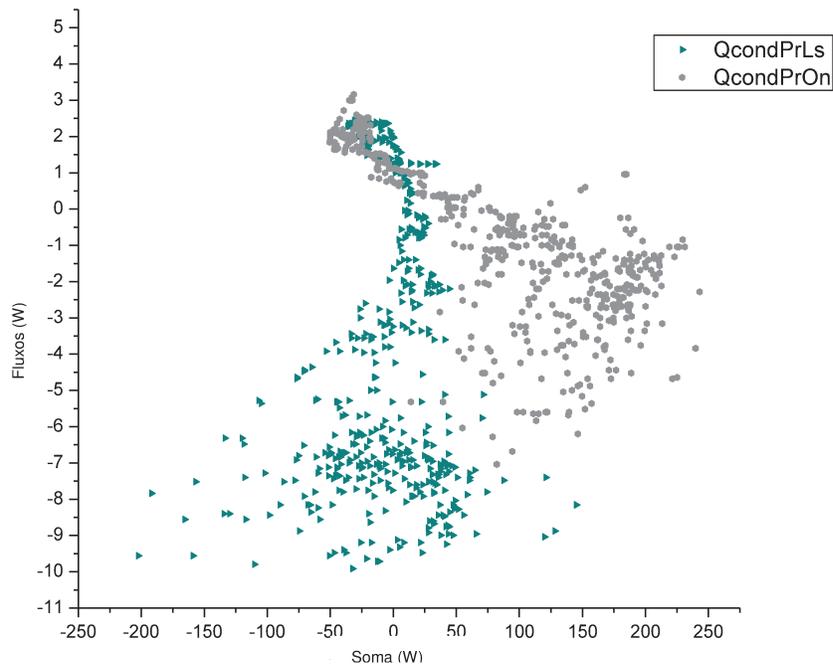


Figura 5-54: Fluxos por condução das amostras “Preta” e soma dos fluxos.

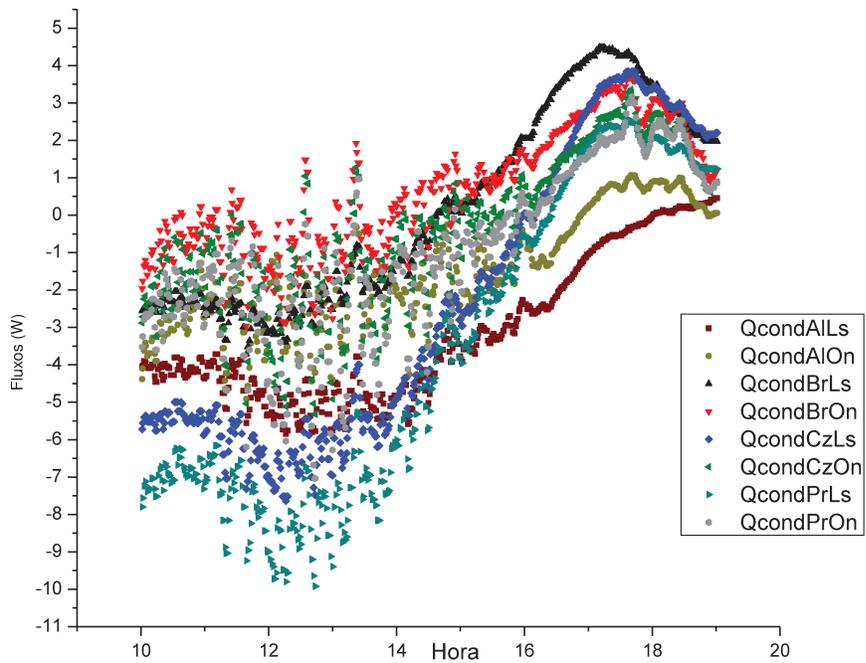


Figura 5-55: Fluxos por condução.

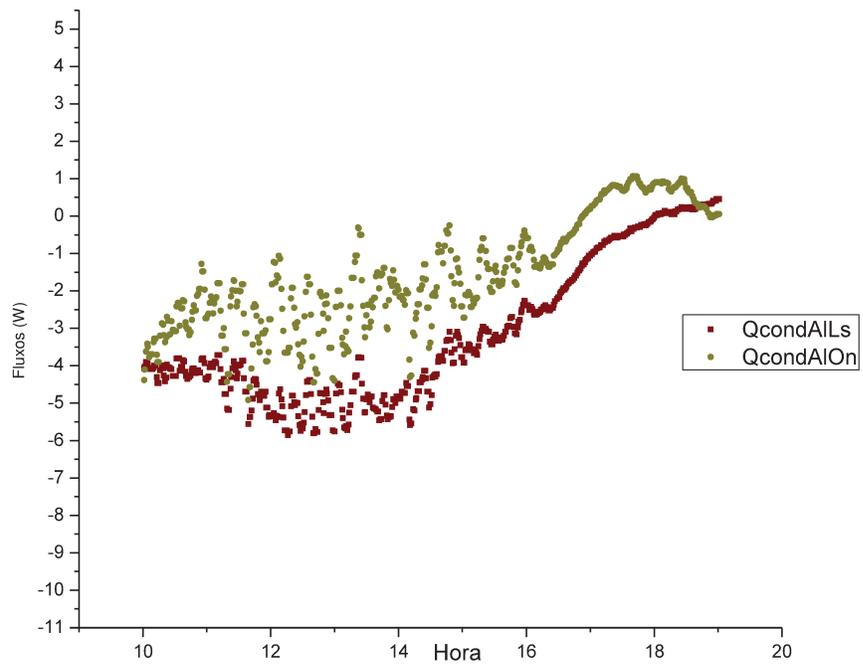


Figura 5-56: Fluxos por condução das amostras “Alumínio”.

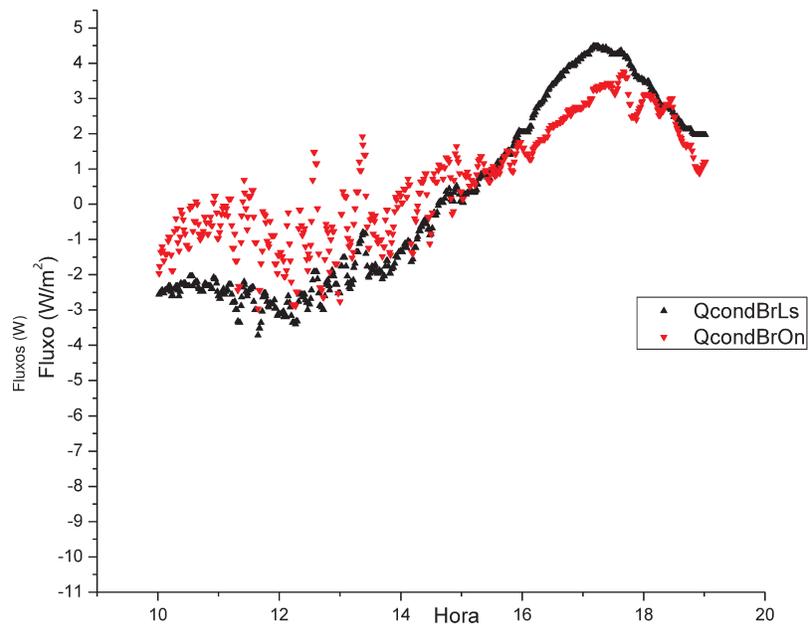


Figura 5-57: Fluxos por condução das amostras “Branca”.

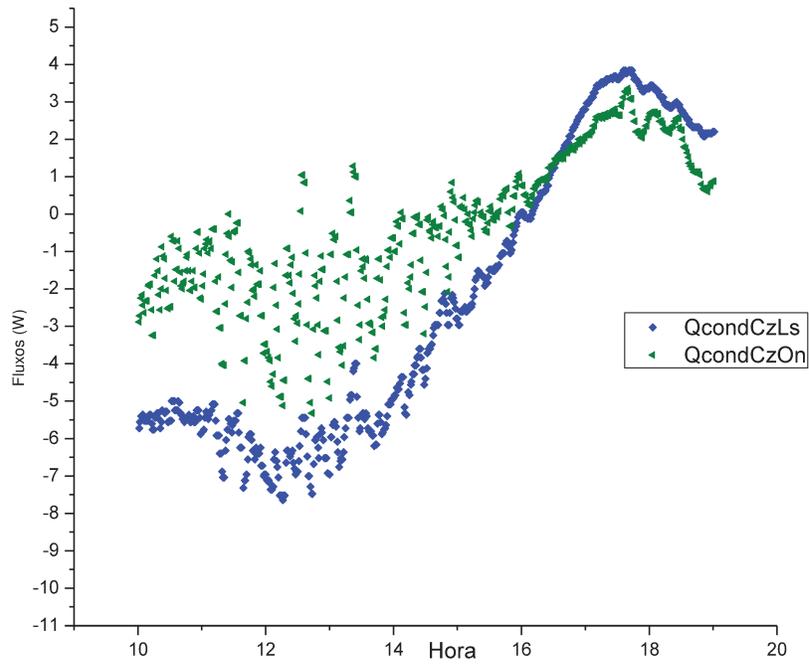


Figura 5-58: Fluxos por condução das amostras "Cinza".

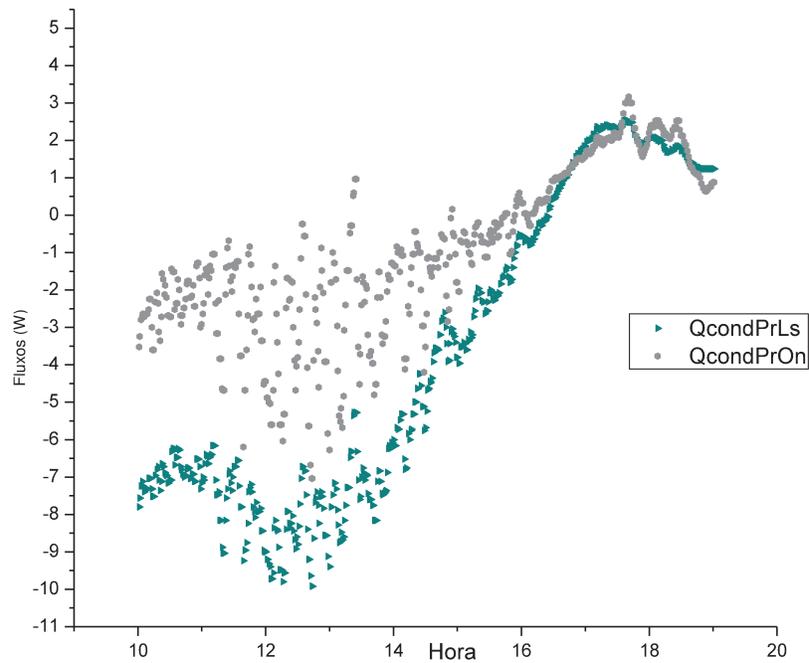


Figura 5-59: Fluxos por condução das amostras "Preta".

Devido ao sistema de isolamento, a intensidade do fluxo por condução é desprezível em relação às dos demais. A dispersão apresentada na Figura 5-50, sugere baixa correlação do erro com estes fluxos.

5.4.1.3 FLUXO POR RADIAÇÃO DE ONDAS LONGAS

A Figura 5-60 apresenta os resultados calculados dos fluxos por radiação em ondas longas.

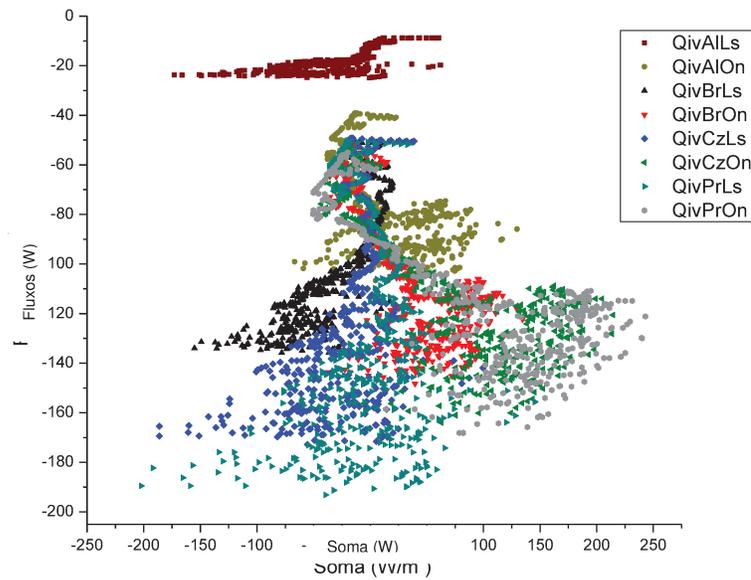


Figura 5-60: Fluxos por radiação em ondas longas e soma dos fluxos.

Nota-se na Figura 5-60 que os valores calculados estão coerentes com a referência de 100 W/m^2 mencionada por BUENO (1994) (item D.4). Para este fluxo, destacou-se o comportamento de cada par de amostras nas figuras 5-61 a 5-64.

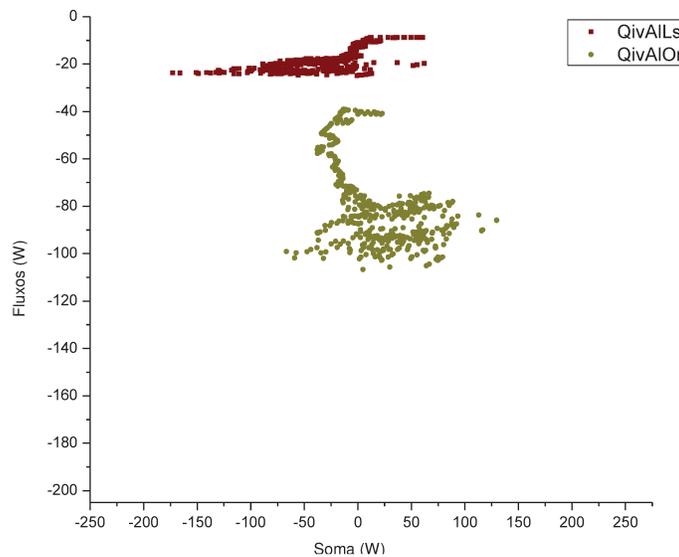


Figura 5-61: Fluxos por radiação em ondas longas das amostras “Alumínio” e soma dos fluxos.

As figuras 5-60 e 5-61 indicam que a amostra lisa em alumínio (baixa emitância), em relação ao fluxo por ondas longas, tem um comportamento bastante diferente do apresentado por todas as outras, inclusive da ondulada em alumínio.

Os fluxos apresentados nas figuras 5-62 a 5-64 se referem a amostras de alta emissividade.

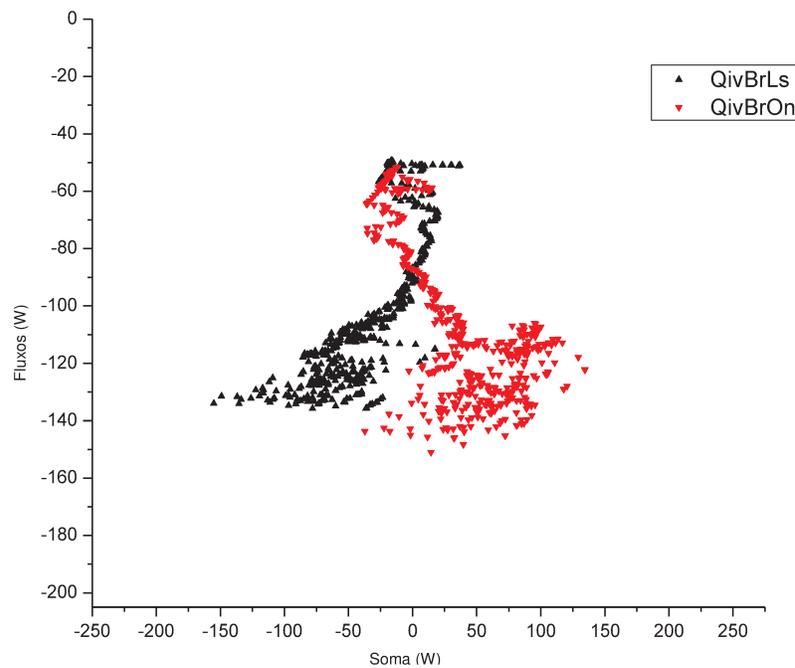


Figura 5-62: Fluxos por radiação em ondas longas das amostras “Branca” e soma dos fluxos.

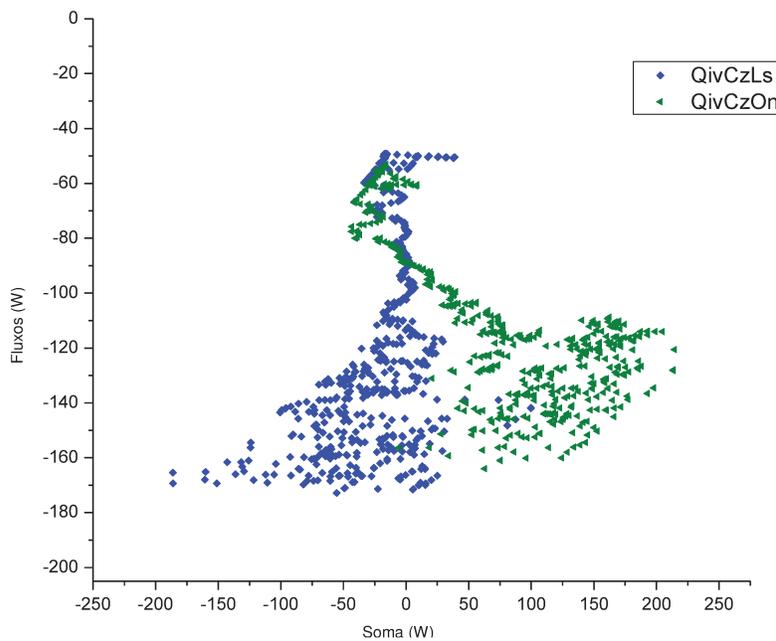


Figura 5-63: Fluxos por radiação em ondas longas das amostras “Cinza” e soma dos fluxos.

Comparando as figuras 5-61 e 5-62, é possível afirmar que a diferença causada pelas ondulações nos fluxos por radiação em ondas longas, tem uma influência maior para amostras de pequena emissividade, fato resultante das hipóteses do modelo teórico proposto.

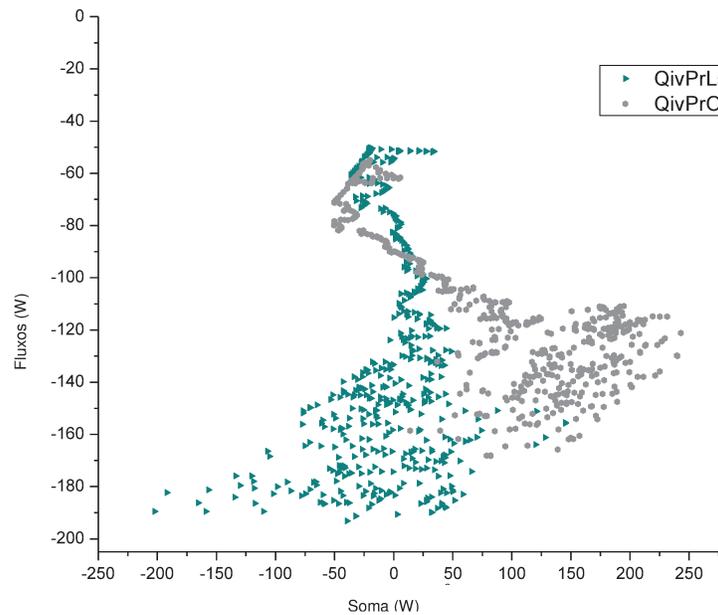


Figura 5-64: Fluxos por radiação em ondas longas das amostras “Preta” e soma dos fluxos.

A figura 5-65 apresenta a evolução desse fluxo ao longo do período de medição.

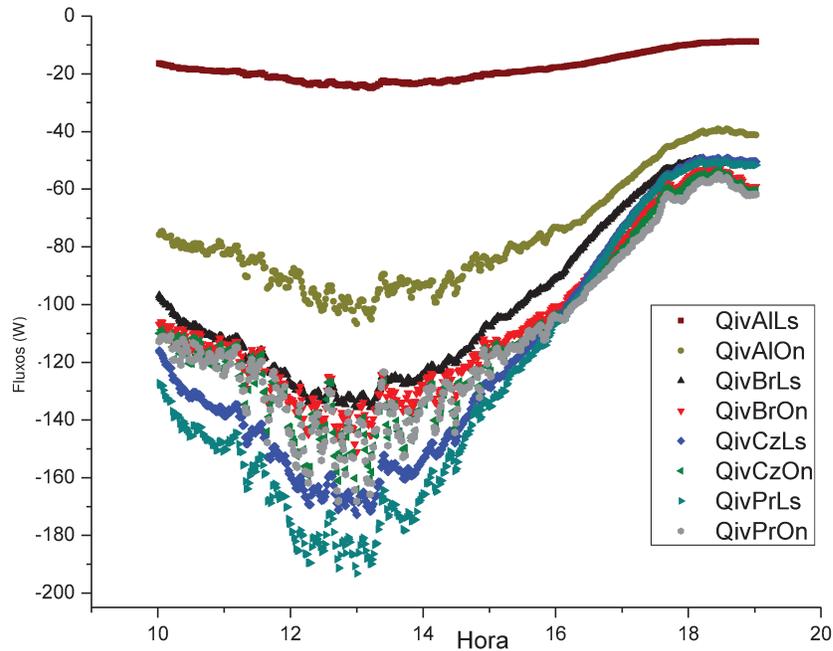


Figura 5-65: Fluxos por radiação em ondas longas.

Observa-se que, para as amostras pintadas e o período diurno, a diferença entre os fluxos entre as onduladas e as lisas está relacionada à cor das superfícies. Como a cor não interfere nas emitâncias, este efeito decorre de uma alteração nas temperaturas superficiais devido à alteração nas absortâncias. A Figura 5-66 apresenta a relação entre os fluxos por radiação emitidos calculados e a temperatura da superfície para cada amostra.

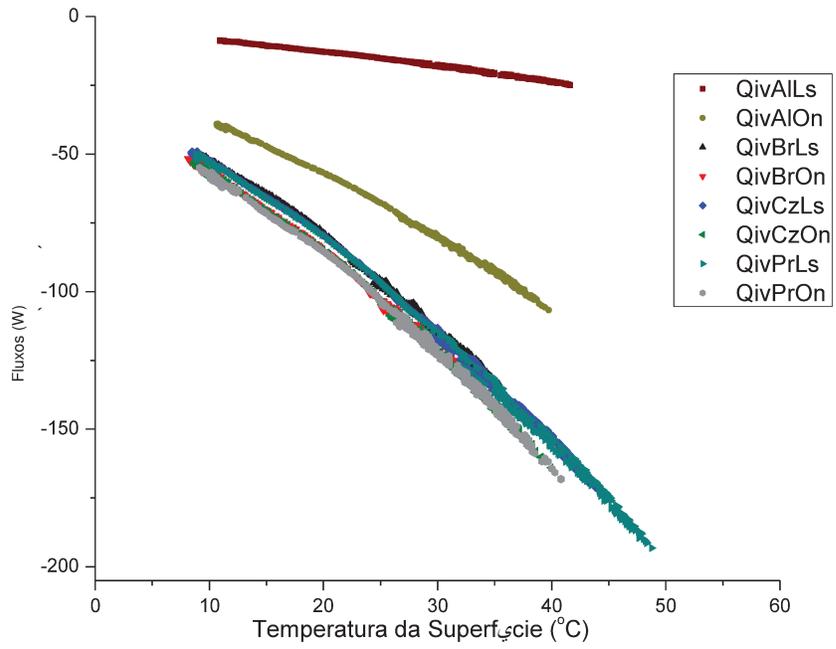


Figura 5-66: Fluxos por radiação em ondas longas e temperatura da superfície da amostra.

5.4.1.4 FLUXO POR CONVECÇÃO

A análise feita no item 5.4 sugere que este fluxo de calor tenha sido o maior causador do erro neste modelo, além disso a baixa correlação entre os demais fluxos de calor com a soma dos fluxos e a dificuldade nos cálculos dos coeficientes de convecção e dos registros de velocidade do vento, levaram a crer que esta tivesse sido a principal fonte de erro.

Sugeriu-se que as ondulações protegeriam as amostras do efeito do vento, de forma que os fluxos por convecção ocorreriam muito mais pelo processo decorrente da diferença de densidades no processo chamado “convecção natural”, que pelo efeito direto dos ventos. Para verificar esta suposição, os fluxos de calor e sua soma foram calculados para a hipótese de que houvesse apenas convecção natural. Os resultados podem ser observados nas figuras 5-67 a 5-69. Novamente, os fluxos nas amostras de cor cinza foram detalhados como exemplo para análise (Figura 5-69).

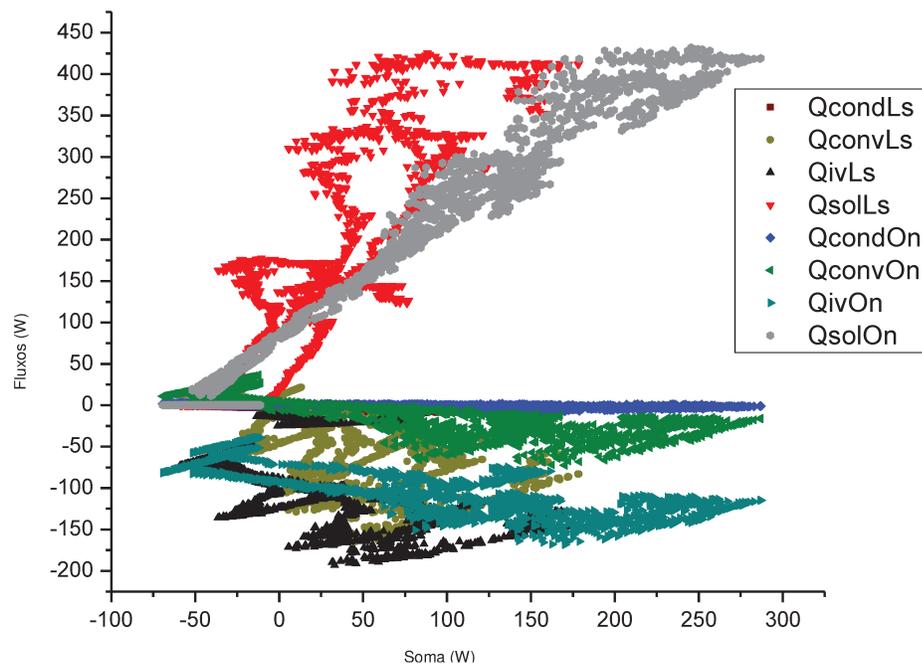


Figura 5-67: Fluxos de calor e soma dos fluxos (sem convecção forçada).

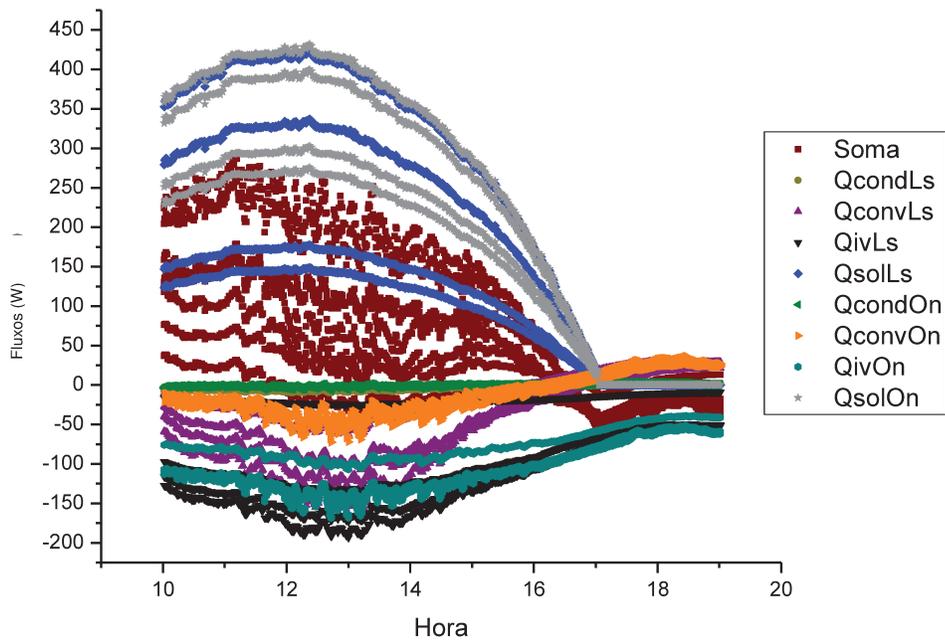


Figura 5-68: Evolução dos fluxos de calor (sem convecção forçada).

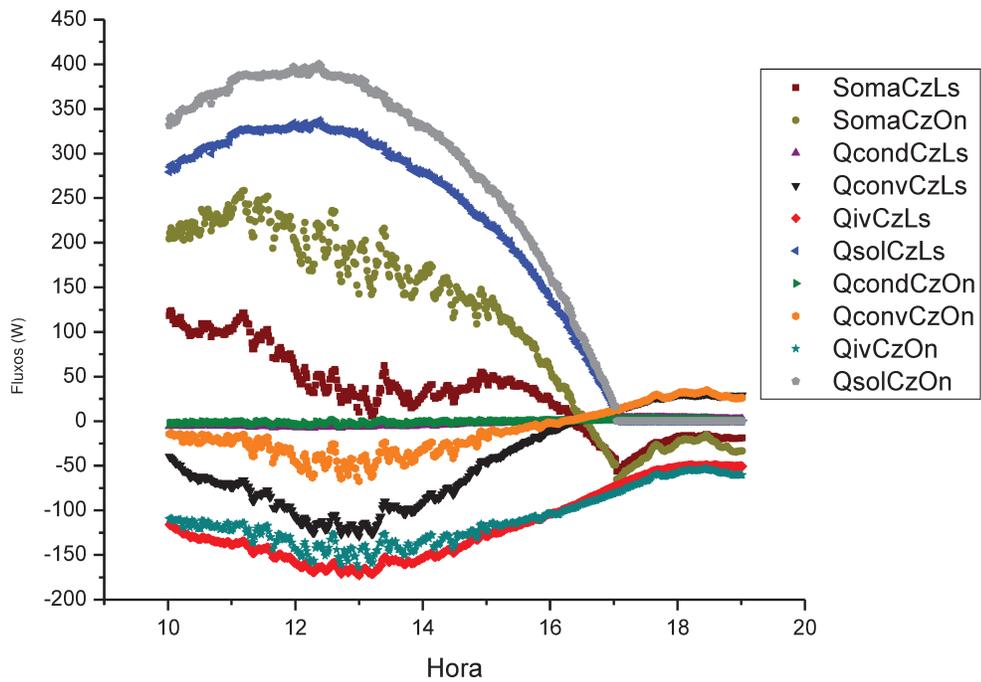


Figura 5-69: Evolução dos fluxos de calor para as amostras “Cinza” (sem convecção forçada).

Comparando os resultados (Figura 5-38 e Figura 5-68 ou Figura 5-39 e Figura 5-69), nota-se que a soma dos fluxos para as amostras lisas cresce consideravelmente quando a convecção é suposta apenas natural, como seria de se esperar. Para as amostras onduladas este crescimento, embora menor, também está presente, indicando que as ondulações não anulam o efeito do vento. Como as somas dos fluxos correspondem ao erro do modelo, a avaliação feita considerando a convecção forçada demonstra ser mais adequada.

Plotando os fluxos de calor por convecção para cada amostra contra a soma de todos os fluxos, obtém-se a Figura 5-70.

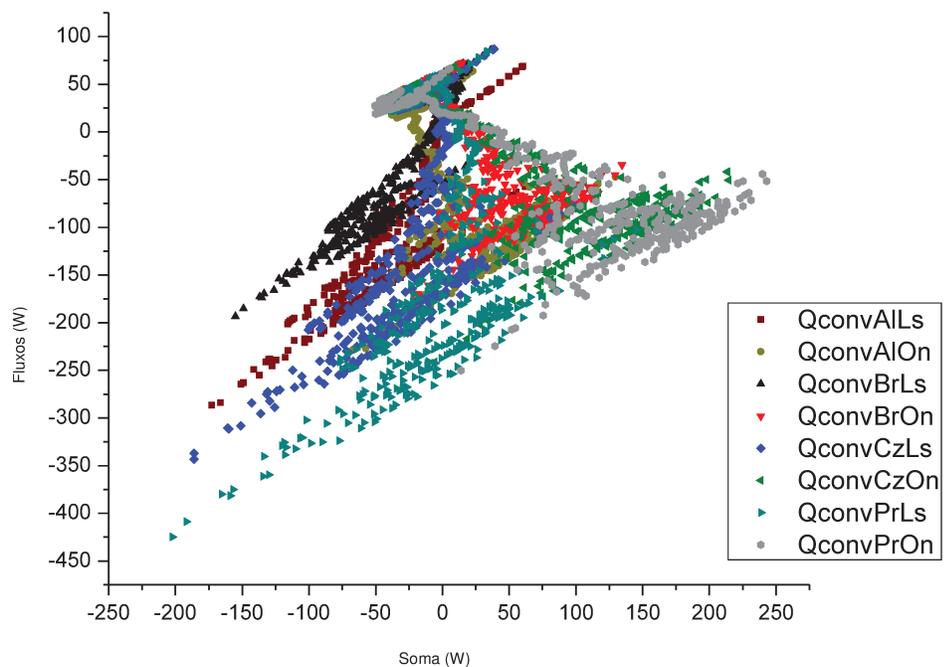


Figura 5-70: Fluxos por convecção e soma dos fluxos.

Conforme descrito anteriormente e evidenciado pela Figura 5-70, existe clara correlação entre os fluxos de calor por convecção de cada amostra e o respectivo erro. Para facilitar a visualização destas relações detalhou-se estes fluxos nas figuras 5-71 a 5-74.

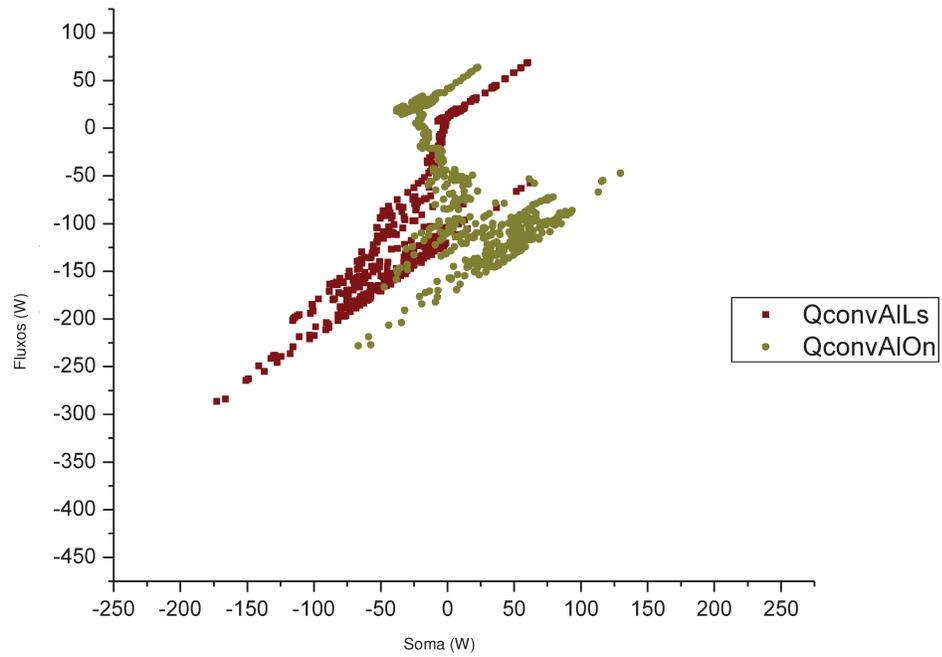


Figura 5-71: Fluxos por convecção das amostras “Alumínio” e soma dos fluxos.

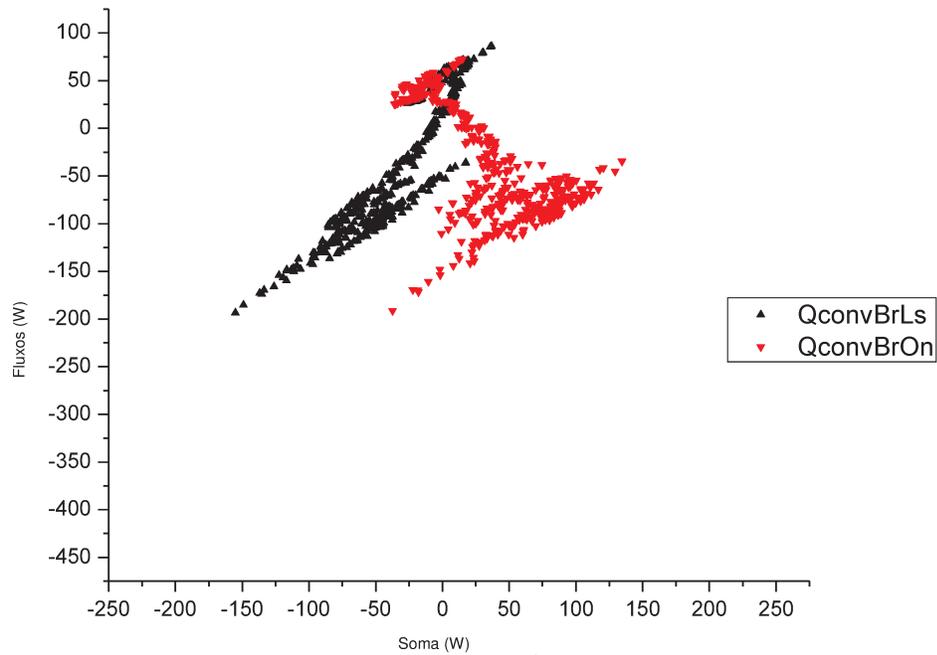


Figura 5-72: Fluxos por convecção das amostras “Branca” e soma dos fluxos.

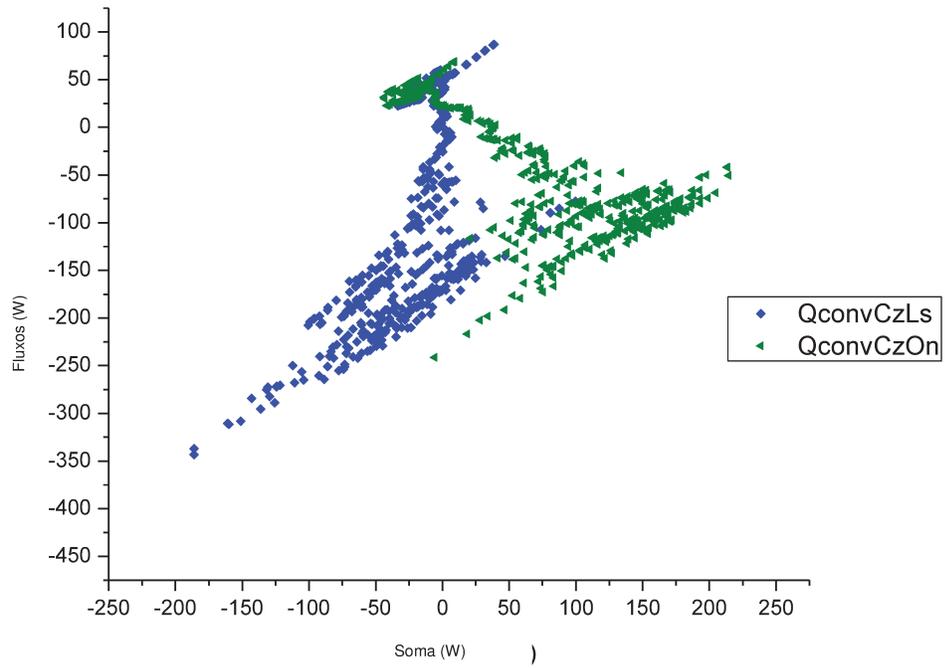


Figura 5-73: Fluxos por convecção das amostras “Cinza” e soma dos fluxos.

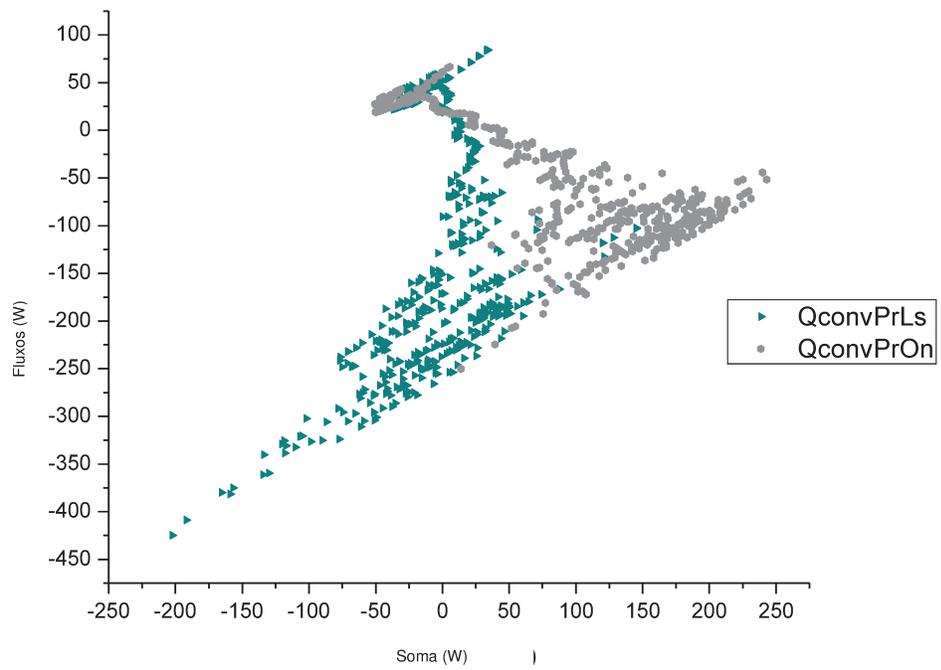


Figura 5-74: Fluxos por convecção das amostras “Preta” e soma dos fluxos.

Em todos os casos (figuras 5-71 a 5-74), a soma dos fluxos das amostras onduladas é predominantemente positiva, enquanto a das lisas é negativa. A causa mais plausível para este fato é um subdimensionamento do coeficiente de convecção para as amostras onduladas, e o oposto para o coeficiente das lisas.

Em relação à evolução deste fluxo ao longo do tempo, os dados calculados são apresentados nas figuras 5-75 a 5-79.

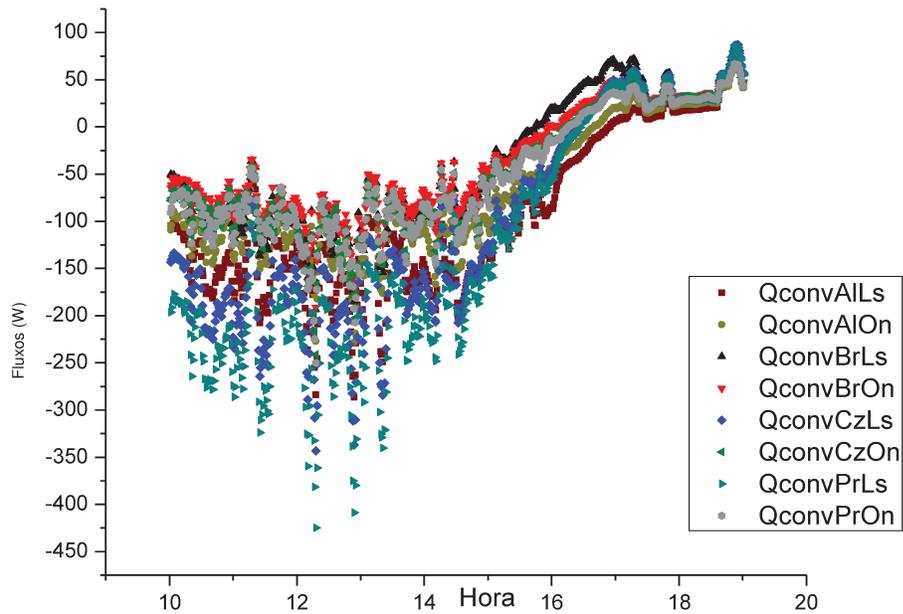


Figura 5-75: Fluxos por convecção.

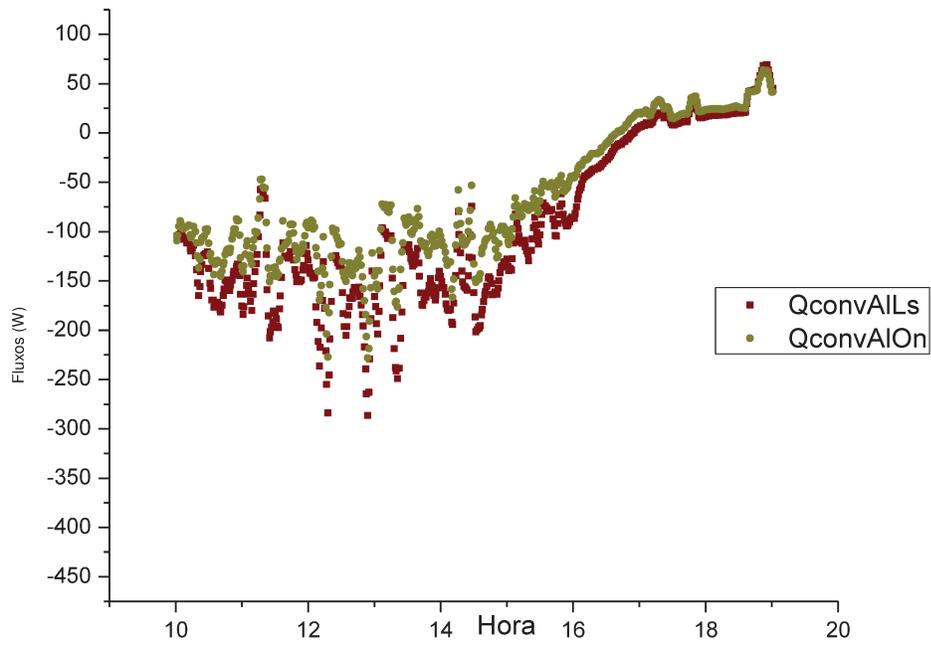


Figura 5-76: Fluxos por convecção das amostras “Alumínio”.

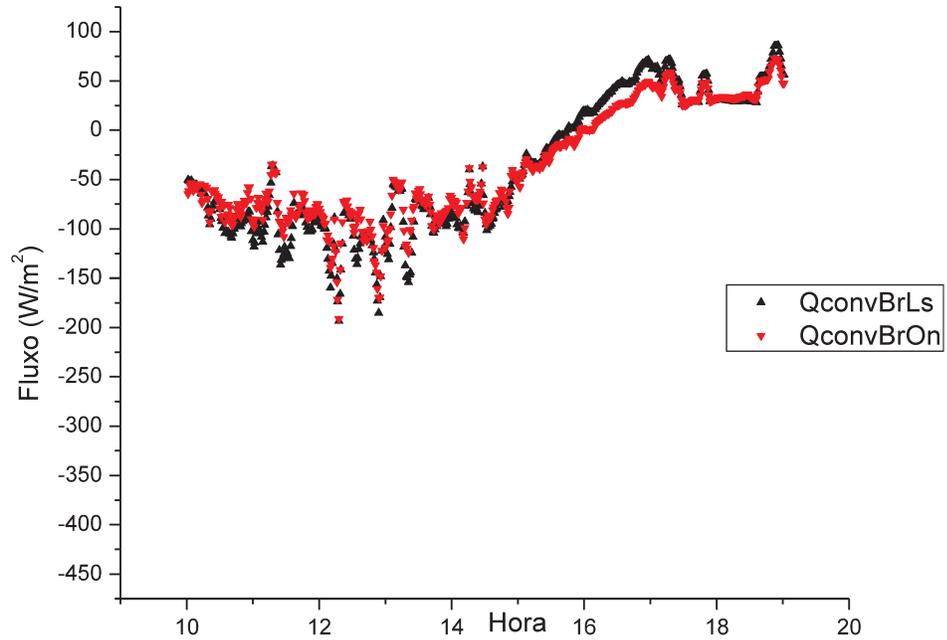


Figura 5-77: Fluxos por convecção das amostras “Branca”.

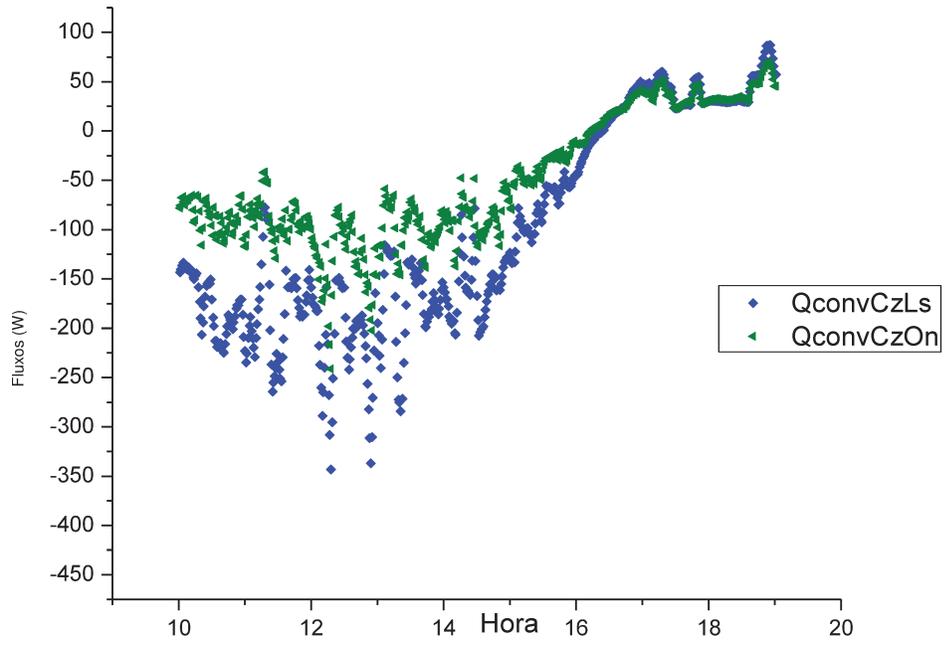


Figura 5-78: Fluxos por convecção das amostras "Cinza".

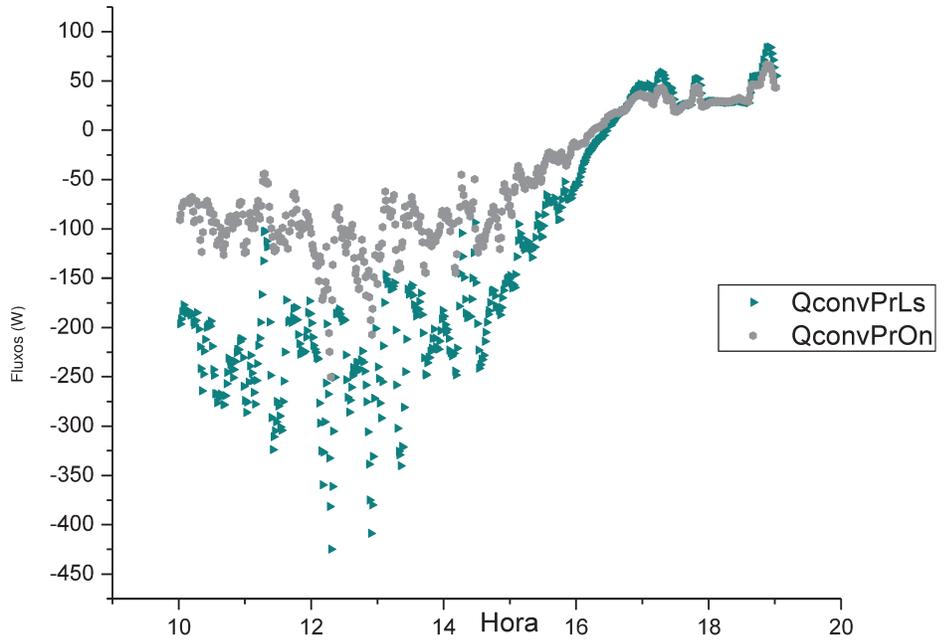


Figura 5-79: Fluxos por convecção das amostras "Preta".

Comparando as relações entre os fluxos e o erro e entre os mesmos fluxos e o horário, como por exemplo das amostras cinza nas figuras 5-73 e 5-78, observa-se a ocorrência de 2 grupos de dados, um primeiro, relacionado a fluxos positivos, e que corresponde aos horários em que não há ocorrência de sol. Neste conjunto é praticamente nula a diferença entre os fluxos nas amostras lisas e onduladas. O segundo grupo, relacionado a fluxos negativos, corresponde ao conjunto de dados em que existe o fluxo solar, neste caso a dispersão é muito maior. Para os dois conjuntos existe uma tendência indicada pelas linhas tracejadas inclinadas na Figura 5-80, onde uma redução no fluxo se relaciona a uma redução na soma.

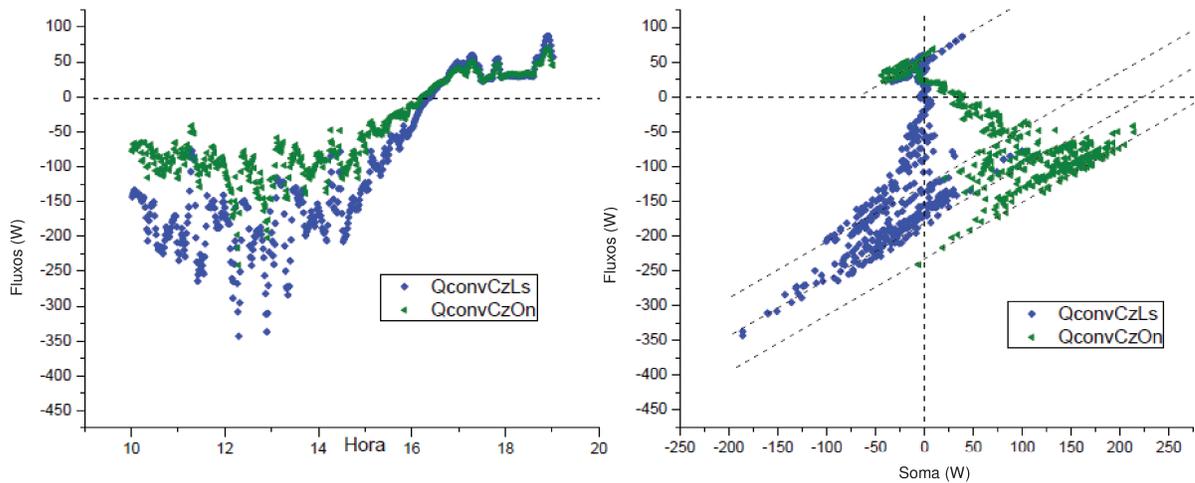


Figura 5-80: Fluxos por convecção das amostras “Cinza”.

Isolando valores para os quais a irradiância seja superior a 400 W/m^2 obtém-se a Figura 5-81.

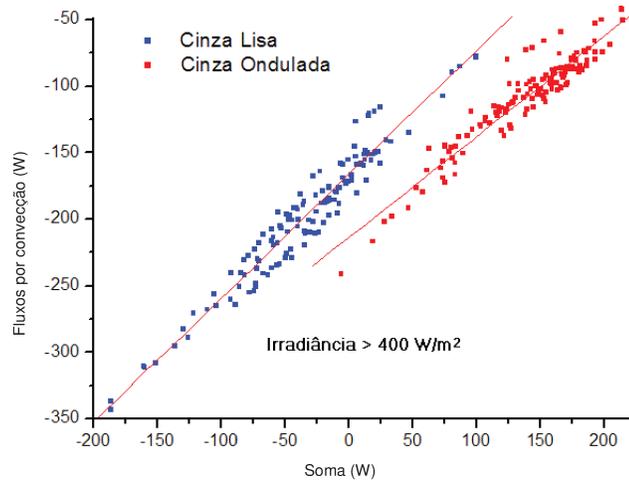


Figura 5-81: Fluxos por convecção das amostras “Cinza” para irradiância > 400 W/m².

A fim de avaliar o modelo de cálculo para os coeficientes de convecção, calculou-se este coeficiente pela divisão do fluxo de convecção (Q_{conv} em W/m^2) pela diferença de temperaturas entre a superfície e o ar ($T_{BS}-T_{sup}$ em K). O resultado obtido é apresentado na Figura 5-82.

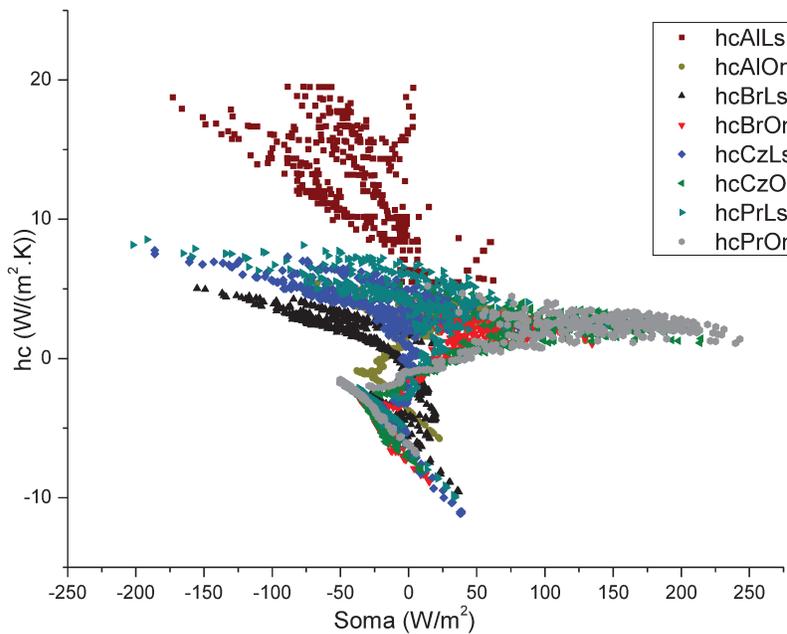


Figura 5-82: Coeficientes de convecção e soma dos fluxos.

A Figura 5-83 apresenta estes resultados para as amostras cinza

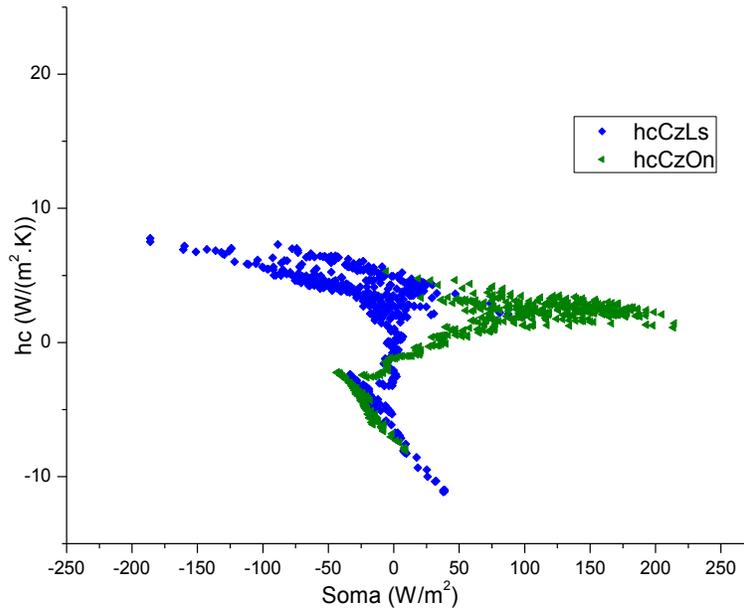


Figura 5-83: Coeficientes de convecção e soma dos fluxos para amostras “Cinza”.

Dividindo o intervalo medido em grupos classificados pela irradiância (I) e plotando os grupos em que a irradiância seja maior que 400 W/m² e o grupo em que seja igual a 0, para as amostras cinza, obtém-se a Figura 5-84.

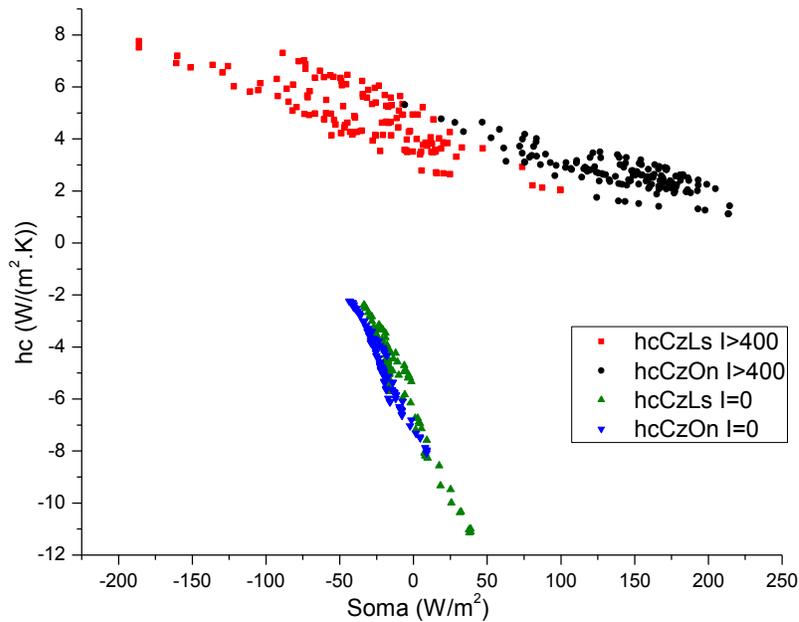


Figura 5-84: Coeficientes de convecção e soma dos fluxos para amostras “Cinza”.

Este resultado (Figura 5-84), confirma a hipótese apresentada no início do capítulo de que existe correlação do erro do modelo com o cálculo da convecção. Uma forma de correção para este método de cálculo é exemplificada no APÊNDICE H, para o caso dos fluxos noturnos das amostras pintadas.

5.4.1.5 FLUXOS NOTURNOS

Para observar as correlações entre as variáveis do estudo sem a interferência do fluxo solar, destacou-se os experimentos sob condições noturnas. Para este caso, duas limitações foram observadas. Enquanto para os momentos de pôr do sol a radiação tem uma pequena incidência, dificultando o registro dos dados do experimento, por outro lado, com o passar das horas, a temperatura das amostras alcança valores abaixo da temperatura de ponto de orvalho, causando condensação e inviabilizando a coleta de dados. Desta forma, são poucos os momentos registrados que podem ser considerados para o caso noturno. Considerou-se válidos para este caso os registros entre as 18:00 e as 19:00, apresentados na Figura 5-85.

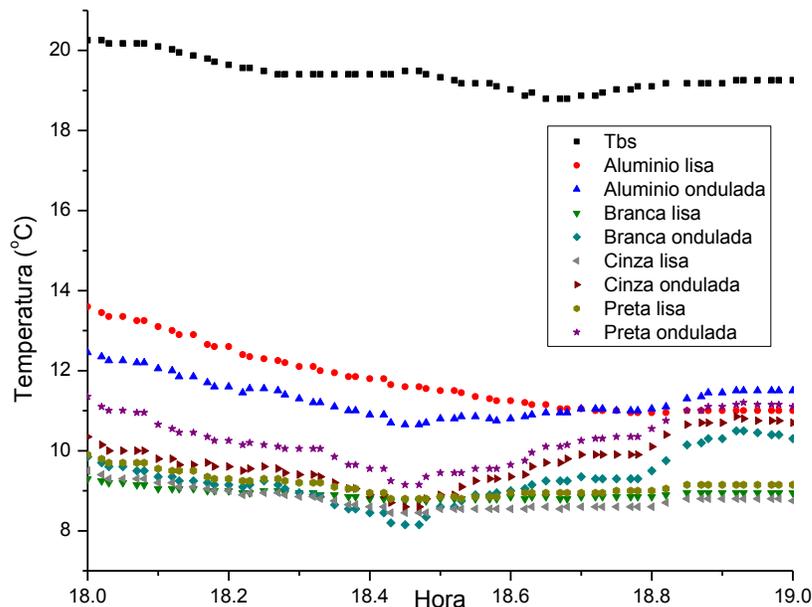


Figura 5-85: Evolução de temperaturas para período noturno.

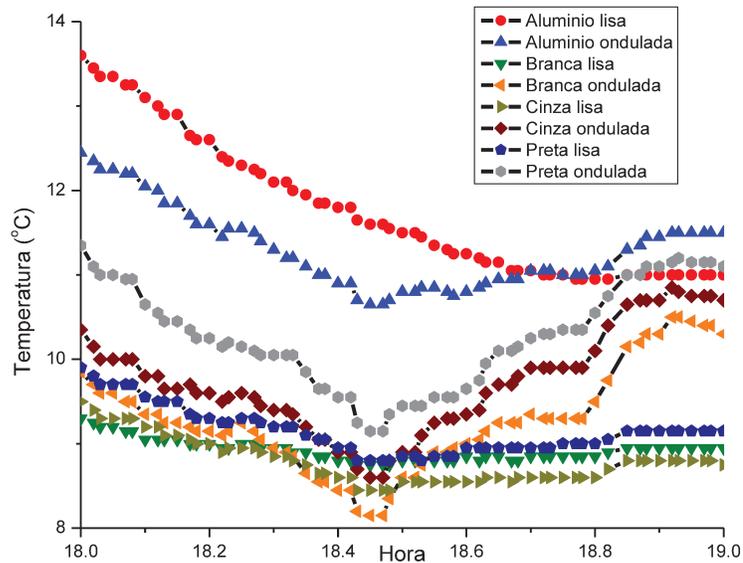


Figura 5-86: Evolução de temperaturas superficiais noturnas das amostras “Alumínio”.

Novamente as temperaturas das amostras onduladas têm um comportamento diferenciado dos observáveis para as amostras lisas.

Calculando os fluxos de calor noturnos obteve-se os resultados apresentados na Figura 5-87.

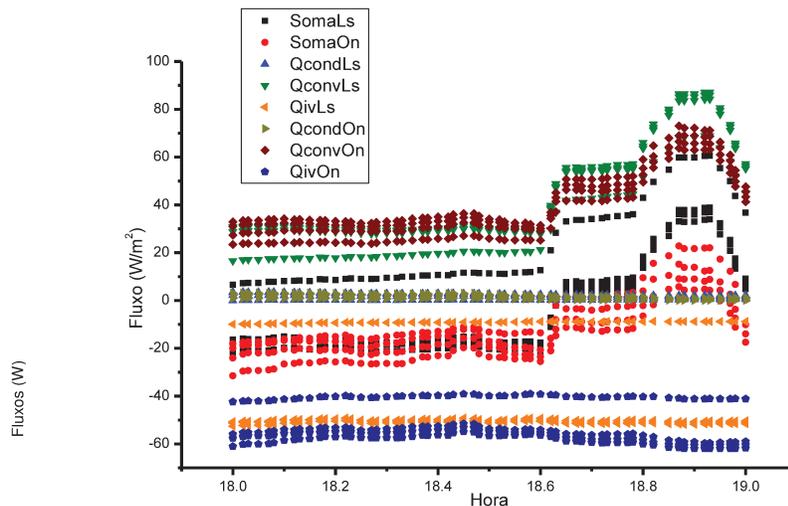


Figura 5-87: Evolução dos fluxos de calor para período noturno.

Até às 18.6h (18:36), a velocidade do ar permaneceu em 0 m/s e os fluxos por convecção se devem apenas ao efeito da convecção natural, motivo pelo qual

permaneceram praticamente constantes. Destacou-se os exemplos das amostras de superfícies cinza e em alumínio, apresentados na Figura 5-88 e Figura 5-89 respectivamente.

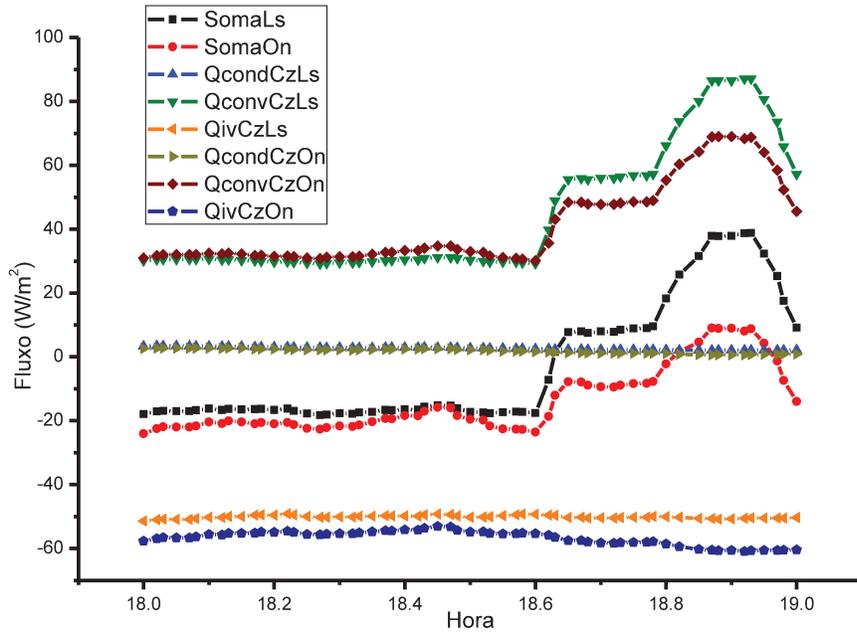


Figura 5-88: Evolução dos fluxos de calor para período noturno das amostras “Cinza”.

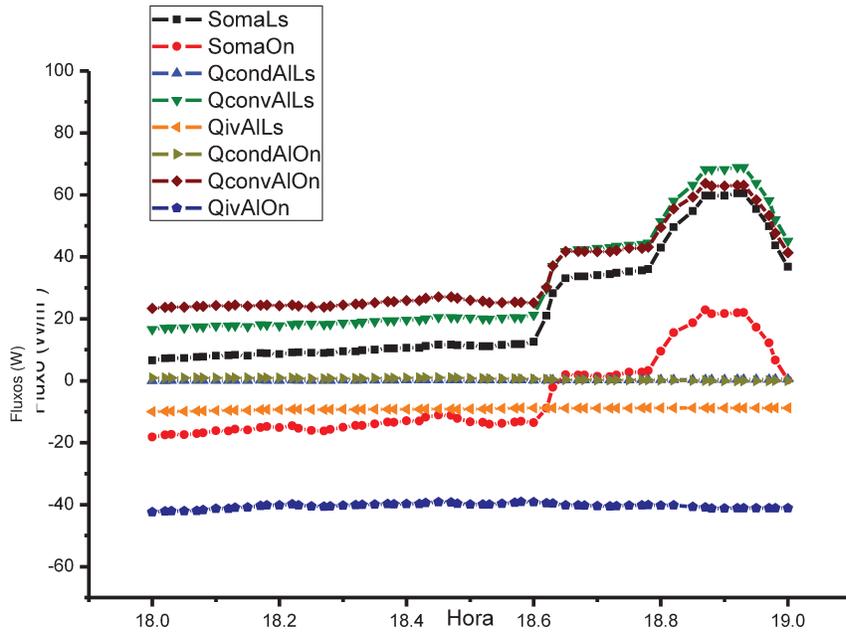


Figura 5-89: Evolução dos fluxos de calor para período noturno das amostras “Alumínio”.

Plotando os fluxos de calor para o período noturno contra a soma dos fluxos obtém-se a Figura 5-90, onde observa-se a correlação entre a convecção e o erro do modelo.

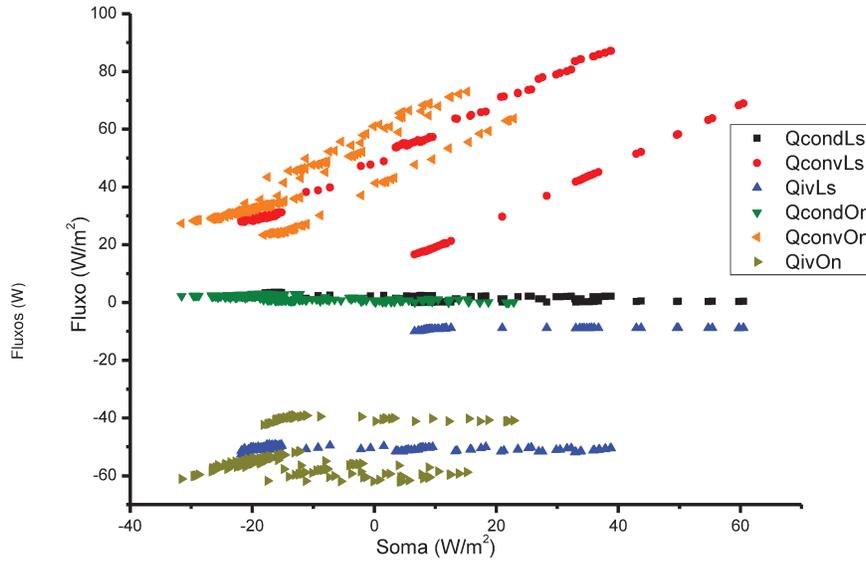


Figura 5-90: Fluxos de calor noturnos e soma dos fluxos.

Destacando os fluxos calculados para as amostras “Alumínio” e “Cinza”, obtém-se a Figura 5-91 e Figura 5-92, respectivamente.

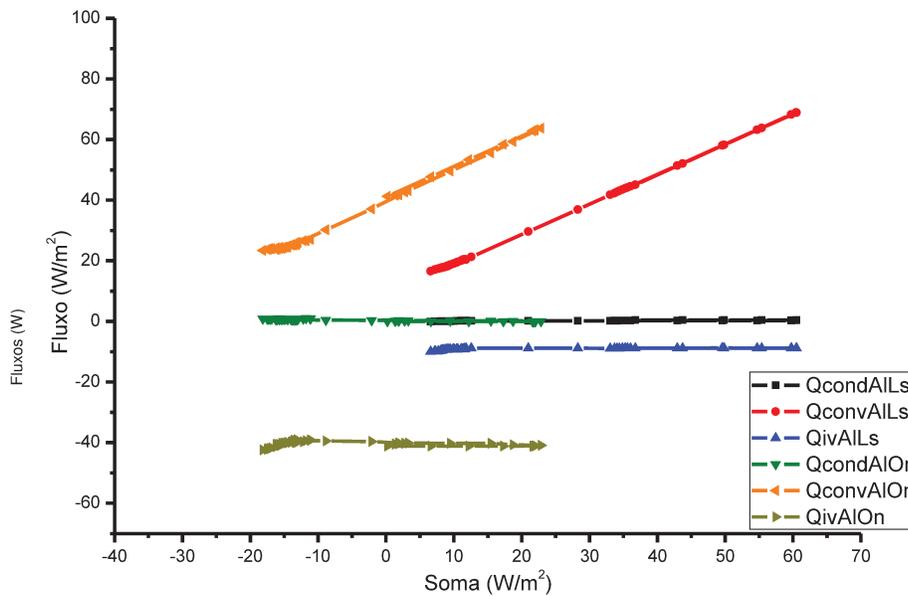


Figura 5-91: Fluxos de calor noturnos dos fluxos amostras “Alumínio”.

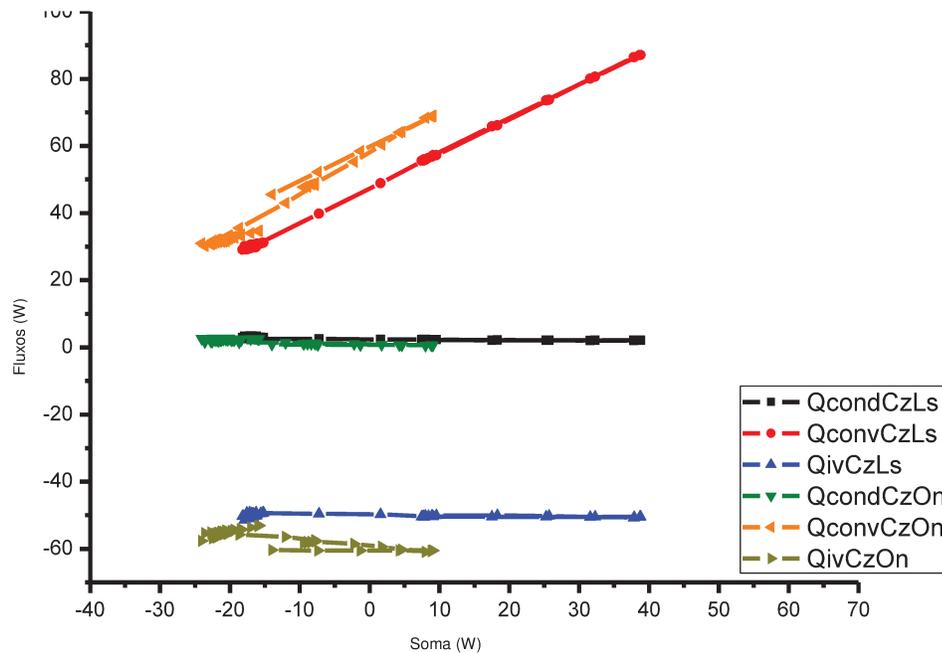


Figura 5-92: Fluxos de calor noturnos e soma dos fluxos amostras “Cinza”.

Uma análise mais detalhada dos resultados apresentados neste item revela algumas incoerências. A diferença entre as temperaturas das amostras coloridas, tanto no caso do grupo de onduladas, quanto no grupo das lisas, apresentadas na figura 5-86, demonstra uma imprecisão uma vez que teoricamente não deveria existir no caso noturno (na ausência da radiação de ondas curtas) diferença entre estas amostras em ambos os casos.

Nas figuras 5-91 e 5-92 observa-se que, apesar da correlação da convecção com o erro ser inegável, como a diferença entre as temperaturas do ar e das amostras mudam ao longo do tempo, o fluxo por convecção também teria que mudar. Desta forma, para que exista equilíbrio, os demais fluxos não poderiam permanecer constantes, diferentemente do que indicam as figuras mencionadas.

Estas incoerências podem ter sido causadas por efeito da acumulação de energia nas peças, a chamada inércia térmica, o que mascararia parte dos fluxos de calor. Outra causa possível, seria uma distribuição desigual do vento nas amostras. Ou ainda, a descontinuidade entre as peças das amostras. Além disso, mesmo após a calibração ainda é possível que exista erro nos sensores. Independentemente de quais

as causas destas incoerências, apesar dos fortes indícios de que o modelo proposto não tenha sido fonte de erro, sugerindo portanto que este método pudesse ser utilizado, um novo teste experimental seria indicado. Este segundo procedimento realizado é descrito no item 6.

6 SEGUNDA ETAPA DA PESQUISA

Conforme apresentado no item 5 e em seus subitens, o modelo experimental 1 possibilitou a observação de como as ondulações alteram os diferentes fluxos de calor. Entretanto, apesar de fornecer fortes indícios de que os erros associados à sua execução e análise sejam vinculados aos fluxos de convecção, e não aos fluxos radiativos (o foco central deste trabalho), o referido modelo não permite efetivamente afirmar se são ou não válidas, as equações propostas neste estudo para o cálculo dos efeitos da forma das superfícies em suas respectivas propriedades radiativas (capítulo 4).

Uma vez que se observou a influência das irregularidades superficiais na radiação térmica na presença dos diversos fluxos de calor, conforme feito no capítulo anterior, é possível isolar este fluxo de interesse e quantificar em particular os efeitos que forma tem nos fluxos por radiação.

O método utilizado no experimento 2 consistiu em monitorar em ambiente com temperatura controlada e atmosfera rarefeita, as temperaturas superficiais de 4 amostras, construídas com mesma massa e mesmos materiais, mas com diferentes fatores de forma. Foram comparadas as velocidades de mudança das temperaturas das amostras, submetidas a súbitas mudanças de temperatura do meio em que se encontravam.

A Figura 6-1 apresenta um corte esquemático do experimento. Em uma câmara de vácuo e por meio de uma bomba de vácuo, criou-se uma atmosfera rarefeita, a fim de minimizar os possíveis fluxos de calor por convecção. Além disso, as amostras tiveram seus fundos e laterais recobertos por isolante, minimizando outros fluxos de calor e permitindo registrar os efeitos provocados apenas pelas trocas térmicas por radiação em ondas longas entre as amostras e a câmara. Na tentativa de reduzir imprecisões relativas à inércia térmica, buscou-se minimizar as massas das amostras.

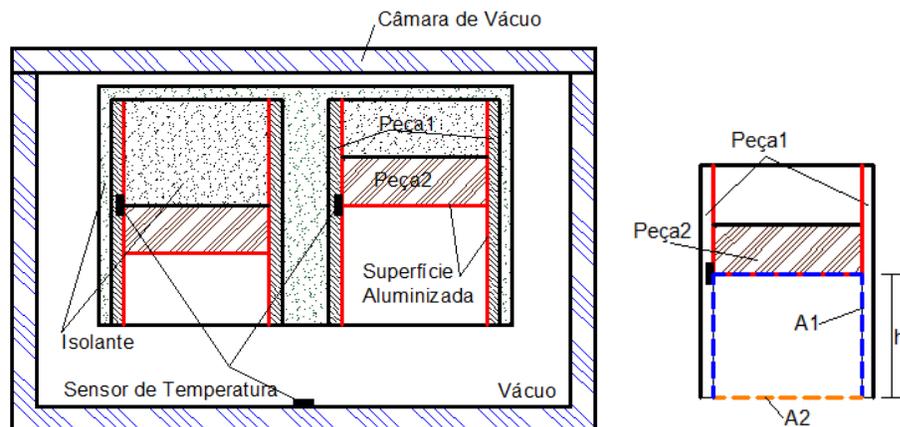


Figura 6-1: Corte esquemático do experimento e detalhe de amostra.

Cada amostra foi composta por 2 peças (Figura 6-1), uma primeira feita de papel-alumínio, com 17 x 6 cm, colada a uma folha de papel (apenas para facilitar a montagem, Figura 6-2). Este conjunto foi encurvado, de modo a formar um cilindro de 2" de diâmetro (Figura 6-3). A seção transversal desta peça define uma área denominada A_2 (Figura 6-1).

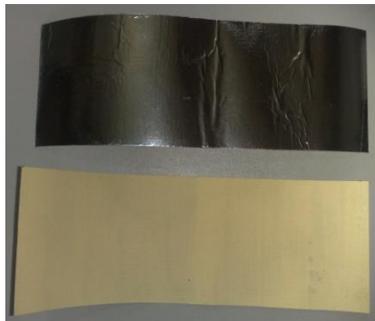


Figura 6-2: Montagem das amostras - Material para peça1.

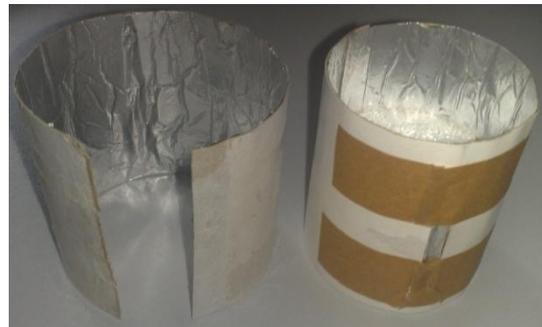


Figura 6-3: Montagem das amostras - Peça 1

A segunda peça das amostras foi feita dobrando e colando um disco de papel-alumínio de 6 cm de diâmetro, sobre um anel de PVC de 2" com 1,5 cm de altura (Figura 6-4) e preenchendo este conjunto com material isolante (Figura 6-5). Além da fixação, a lateral dobrada teve a função de manter o contato térmico entre as peças. O anel de PVC deu rigidez ao conjunto, além de ajudar a manter a perpendicularidade entre as peças.



Figura 6-4: Montagem das amostras - Material para Peça 2



Figura 6-5: Montagem das amostras - Peça 2

A segunda peça foi fixada no interior da primeira, em diferentes alturas (Figura 6-6), conforme a Tabela 6-1. A área de superfície aluminizada exposta à troca de calor, denominada A_1 , ficou portanto diferenciada para cada amostra. Esta área A_1 é a soma da superfície exposta da peça 2 e da parcela exposta da superfície interna da peça 1 (Figura 6-1).

Considerando como cavidade fechada o espaço entre as áreas A_1 e A_2 , é possível calcular o fator de forma entre as superfícies pela equação 3-16

$$FF_{12} = \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \quad (\text{Eq.3-16})$$

Desta forma, o deslocamento da peça 2 em relação à peça 1 (h na Figura 6-1) fez com que cada amostra tivesse um diferente fator de forma, mantendo idênticas entretanto as suas demais características (massa, emissividade, área do corte transversal, etc.).



Figura 6-6: Amostras com diferentes Fatores de Forma.

Tabela 6-1: Dimensões das Amostras.

FF	Raio (cm)	Área da Boca (cm ²)	Área interna (cm ²)	h (cm)
0.25	2.54	20.268	81.0732	3.810
0.5	2.54	20.268	40.5366	1.270
0.75	2.54	20.268	27.0244	0.423
1	2.54	20.268	20.2683	0.000

Na lateral de cada amostra (Figura 6-6), recortes foram feitos no papel, para possibilitar a fixação de sensores de temperatura diretamente sobre o papel-alumínio (Figura 6-7). No experimento utilizou-se sensores modelo DS18B20 One-wire thermometer, fabricados pela MAXIM, com resolução de 0.0625°C (MAXIM, 2011).



Figura 6-7: Fixação dos sensores



Figura 6-8: Preenchimento com isolante

SEGUNDA ETAPA DA PESQUISA

A região do cilindro abaixo da peça 2 foi preenchida com isolante (Figura 6-8). As amostras foram encaixadas duas a duas em blocos de isolantes (Figuras 6-9 e 6-10), para minimizar fluxos por condução.



Figura 6-9: Montagem das amostras

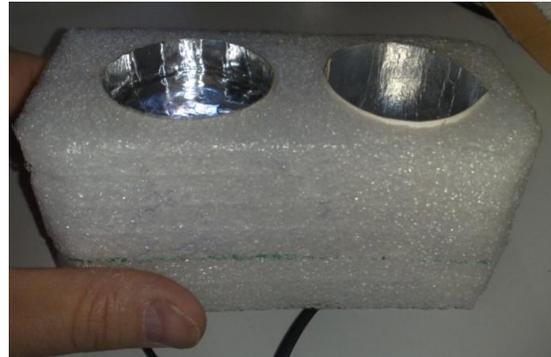


Figura 6-10: Montagem das amostras no bloco isolante



Figura 6-11: Vista superior da câmara de vácuo



Figura 6-12: Conjunto das amostras

Como câmara de vácuo, foi adaptada uma panela de pressão que, por ser hermética, opaca, fabricada em alumínio (alta condutividade), com dimensões adequadas e superfícies polidas (baixa emissividade), proporcionou as condições necessárias ao experimento. Em seu interior, um aro foi fixado para servir de apoio, um limitador para manter a posição das amostras (Figura 6-11). Utilizando fita aluminizada,

fixou-se um sensor de temperatura no centro do fundo da câmara e um segundo sensor à meia altura de sua lateral.

O conjunto de amostras (Figura 6-12) foi instalado no interior da câmara, com as superfícies aluminizadas voltadas para baixo (Figura 6-13). O orifício onde havia uma válvula de segurança foi utilizado como passagem do cabo dos sensores. O vaso foi fechado e lacrado com silicone (Figura 6-14).



Figura 6-13: Câmara de vácuo com as amostras

Uma válvula de segurança na tampa do vaso de pressão foi removida a fim de permitir a passagem do cabo dos sensores. O vaso foi fechado e lacrado com silicone (Figura 6-14).



Figura 6-14: Câmara de vácuo fechada

Para facilitar a realização do experimento uma válvula e um indicador de vácuo foram adaptados à conexão com a bomba de vácuo (Figura 6-15).

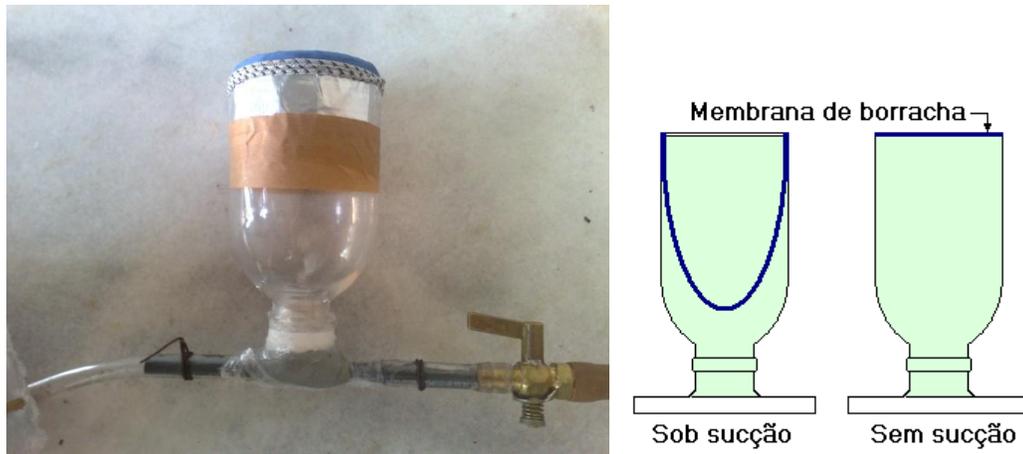


Figura 6-15: Indicador de vácuo e válvula

O procedimento experimental consiste em alterar subitamente a temperatura da câmara de vácuo que contém as amostras sob atmosfera rarefeita, registrando as alterações sofridas nas temperaturas de cada uma delas ao longo do tempo. Este efeito é alcançado submergindo o vaso de pressão em um banho de água com gelo ou água aquecida.

6.1 MODELO TEÓRICO 2

O balanço de energia para um sistema fechado, como o proposto para o procedimento experimental 2 (capítulo 6), pode ser calculado da seguinte forma:

$$\dot{E}_{entrada} + \dot{E}_{saída} = m.c.\Delta T \quad (\text{Eq. 6-1})$$

Onde:

m = Massa da amostra (Kg)

c = Calor específico da amostra (J/(Kg·K))

ΔT = Variação da temperatura da amostra no intervalo de tempo (K)

Considerando os possíveis fluxos de calor, o balanço de energia pode ser calculado pela equação 6-2.

$$Q_{solar} + Q_{Conv} + Q_{IV} + Q_{Cond} = m.c.\Delta T \quad (\text{Eq. 6-2})$$

Para um intervalo de tempo entre os instantes $t-1$ e t , supondo fluxos constantes no intervalo, o balanço de energia fica então:

$$Q_{solar(t-1,t)} + Q_{Conv(t-1,t)} + Q_{IV(t-1,t)} + Q_{Cond(t-1,t)} = m.c.(T_{(t)} - T_{(t-1)}) \quad (\text{Eq. 6-3})$$

Onde:

$T_{(t)}$ é a temperatura da amostra (em °C) no instante t

Conhecendo-se os fluxos de calor, é possível então, estimar a temperatura $T_{estim(t)}$ resultante.

$$T_{estim(t)} = T_{(t-1)} + \frac{Q_{solar(t-1,t)} + Q_{Conv(t-1,t)} + Q_{IV(t-1,t)} + Q_{Cond(t-1,t)}}{m.c} \quad (\text{Eq. 6-4})$$

Considerando que no interior do vaso de pressão sob vácuo, com as amostras envoltas em isolante térmico é possível desprezar os fluxos Solar, Convectivo e Conduutivo. Neste caso, apenas o fluxo por radiação em ondas longas, estaria presente e seria possível estimar a variação da energia em cada amostra em um intervalo de tempo através da equação 6-5:

$$Q_{IV} = m.c.\Delta T \quad (\text{Eq. 6-5})$$

Onde:

Q_{IV} = Fluxo de calor no intervalo de tempo (J)

m = Massa da amostra (Kg)

c = Calor específico da amostra (J/(Kg·K))

ΔT = Variação da temperatura da amostra no intervalo de tempo (K)

Neste caso a equação 6-4 se reduziria a:

$$T_{estim(t)} = T_{(t-1)} + \frac{Q_{IV(t-1,t)}}{m.c} \quad (\text{Eq. 6-6})$$

Considerando que em um período entre dois registros o fluxo de calor atuante seja uma média entre os fluxos instantâneos calculados para estes registros, é possível então, estimar a temperatura $T_{estim(t)}$ resultante.

$$Q_{IV} = \left(\frac{q_{IV(t-1)} + q_{IV(t)}}{2} \right) (t - (t-1)) \quad (\text{Eq. 6-7})$$

Onde:

$$q_{IV(t)} = \sigma \cdot \epsilon_e \cdot A_2 \cdot (T_{CV(t)}^4 - T_{(t)}^4) \quad (\text{Eq. 6-8})$$

q_{IV} = Taxa de transferência de calor por radiação em ondas longas, adaptado da equação D-40 (W/m^2)

Ao comparar a temperatura calculada ($T_{estim(t)}$) a um valor medido ($T_{(t)}$) é possível aferir o modelo de cálculo. Define-se então uma variável $Erro_{(t)}$ ($^{\circ}C$) como a diferença entre os valores teórico (calculado) e medido da temperatura da amostra no momento t (Eq 6-9).

$$Erro_{(t)} = T_{estim(t)} - T_{(t)} \quad (\text{Eq. 6-9})$$

6.2 RESULTADOS DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 2 E SUA DISCUSSÃO

A Figura 6-16 mostra o conjunto das temperaturas registradas em experimento realizado em 16/12/2010.

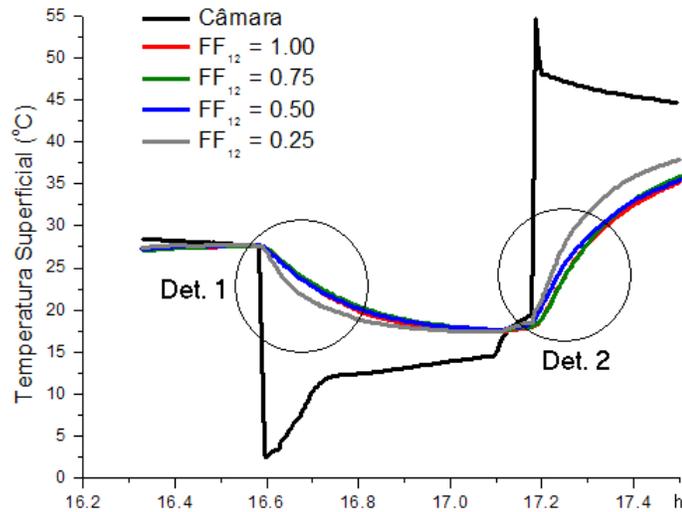


Figura 6-16: Temperaturas registradas, destacando os momentos de resfriamento (Det. 1) e de aquecimento (Det. 2)

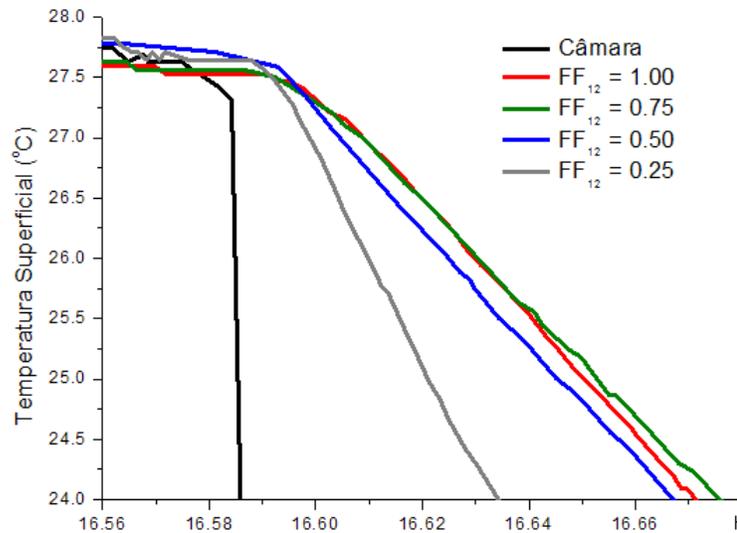


Figura 6-17: Det. 1: Temperaturas registradas, destacando os momentos de resfriamento

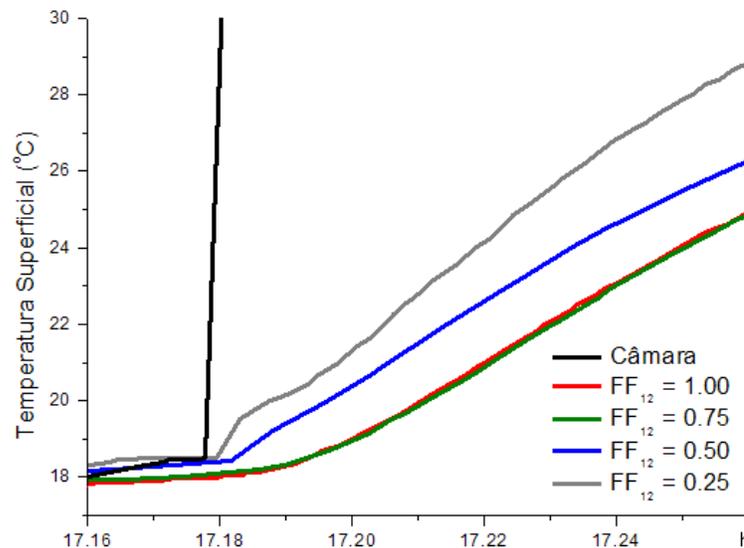


Figura 6-18: Det. 2: Temperaturas registradas, destacando os momentos de aquecimento

As Figuras Figura 6-17 e Figura 6-18 destacam detalhes do conjunto de dados, correspondentes aos momentos em que a temperatura da câmara é abruptamente alterada. Observa-se nestes detalhes que a amostra com fator de forma de 0.25 é a que segue mais de perto a alteração da temperatura da câmara, seguida pela amostra com fator de forma de 0.5 e pelas amostras com fator de forma 0.75 e 1, entre as quais praticamente não há diferença de temperaturas. Considerando que as amostras são idênticas quanto à sua composição e condições, a explicação para este comportamento é o maior fluxo de calor por radiação entre a câmara e a amostra que tem o menor fator de forma (maior área exposta), enquanto o fluxo é menor para as amostras cujos fatores de forma são mais altos. No período de resfriamento, as temperaturas das amostras são mais altas que a da superfície da câmara e, portanto, o comportamento diferenciado entre as amostras indica diferenças entre suas emitâncias efetiva. Durante o aquecimento, este processo se inverte, passando a prevalecer as diferenças entre as absorptâncias efetivas. Estes fatos permitem deduzir que os fatores de forma influenciam tanto as emitâncias quanto as absorptâncias efetivas, o que já seria de se esperar, uma vez que aqueles efeitos resultam de acréscimos que as irregularidades superficiais provocam nas áreas de absorção e emissão de calor.

6.2.1 ESTIMATIVA DO ERRO

Considerando o modelo descrito no item 6.1, a estimativa do erro pode ser feita através das equações 6-9 a 6-8.

$$Erro_{(t)} = T_{estim(t)} - T_{(t)} \quad (\text{Eq 6-9})$$

$$T_{estim(t)} = T_{(t-1)} + \frac{Q_{IV(t-1,t)}}{m.c} \quad (\text{Eq.6-6})$$

$$Q_{IV} = \left(\frac{q_{IV(t-1)} + q_{IV(t)}}{2} \right) (t - (t-1)) \quad (\text{Eq. 6-7})$$

$$q_{IV(t)} = \sigma \cdot \epsilon_e \cdot A_2 \cdot (T_{CV(t)}^4 - T_{(t)}^4) \quad (\text{Eq. 6-8})$$

A capacidade térmica ($m.c$) das amostras foi calculada a partir de dados tabelados de calor específico dos materiais (INCROPERA e DEWITT, 1996), conforme apresentado na Tabela 6-2.

Tabela 6-2: Capacidade Térmica das Amostras.

Material	Massa (Kg)	Calor Específico (J/Kg.K)	Capacidade Térmica (J/K)
PVC	0.0065	2000	13.000
Papel	0.003	1340	4.020
Alumínio	0.000364	900	0.328
Isolante	0.0065	1675	10.888
Total	0.016364	-	28.2351

O Erro calculado conforme a equação 6-9 ao longo do experimento é apresentado na Figura 6-19. Parte dos erros pode ser atribuída a diferentes intervalos entre registros (Figura 6-20). Outras possíveis causas de erro são a baixa massa e consequente baixa capacidade térmica das amostras também dificulta a estimativa, além da adoção de valores tabelados para propriedades dos materiais. O correto

posicionamento das peças das amostras (comprimento h na Figura 6-1), também pode ter sido fonte de imprecisão.

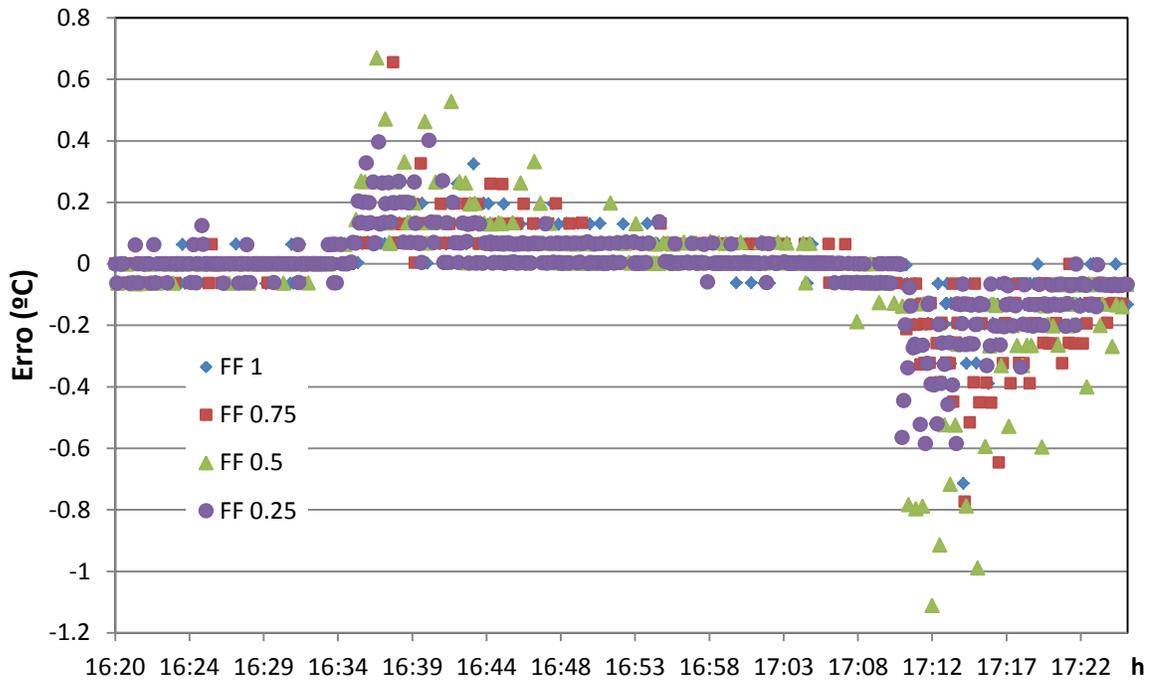


Figura 6-19: Erro calculado

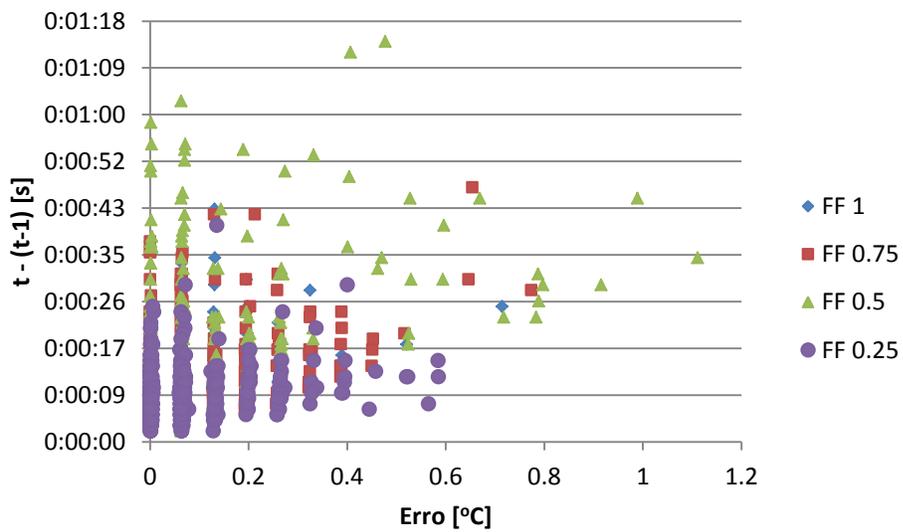


Figura 6-20: Relação entre o erro e o intervalo entre registros

Calculando o desvio padrão (SD) do conjunto de valores calculados do Erro, obtém-se como resultado um valor de 0.133°C. Como a resolução dos sensores é de 0.0625°C (MAXIM, 2011) ou seja, aproximadamente metade do desvio encontrado, considera-se que o experimento tenha sido válido, permitindo uma análise dos fluxos. O baixo desvio padrão no Erro indica uma boa estimativa dos fluxos e portanto coerência das equações propostas.

6.2.2 FLUXOS – COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ESTIMATIVA

A equação 3-25 (INCROPERA & DEWITT, 1996) é aplicável aos fluxos de calor por radiação em uma cavidade constituída por duas superfícies cinzas e difusas. Aplicando-se esta equação às temperaturas registradas no experimento 2 (Figura 6-16), calcula-se os fluxos instantâneos entre cada amostra e a superfície da câmara, correspondentes a cada registro.

$$q_{12} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} + \frac{1}{A_1 \cdot FF_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot A_2}} \quad (\text{Eq. 3-25})$$

Onde:

σ = Constante de Stefan-Boltzman = $5.67 \cdot 10^{-8}$ (W/m².K⁴)

T = Temperatura (K)

ε = Emissividade

A = Área (m²)

FF₁₂ = Fator de Forma da superfície 1 em relação à 2

₁ = Índice da superfície da amostra

₂ = Índice da superfície da câmara de vácuo

Considerando valores tabelados (INCROPERA e DEWITT, 1996) para a emissividade do papel alumínio em 0.05, emissividade da superfície do vaso de pressão em 0.3 e a área da superfície do vaso de pressão 0.1508 (m²) os resultados obtidos para os fluxos instantâneos são apresentados na Figura 6-21. Na Figura 6-22, novamente foi destacado o momento em que a temperatura da câmara de vácuo é abruptamente elevada. Os mesmos resultados podem ser obtidos considerando a superfície de fechamento da amostra como um corpo negro à temperatura da câmara de vácuo.

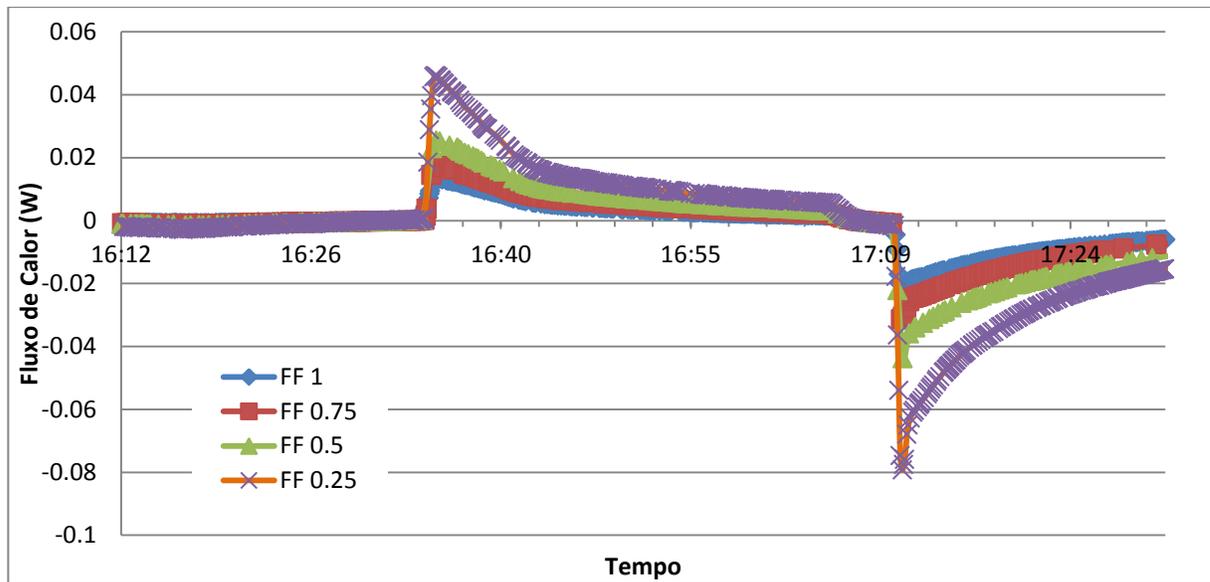


Figura 6-21: Fluxos de calor calculados pela equação 3-25

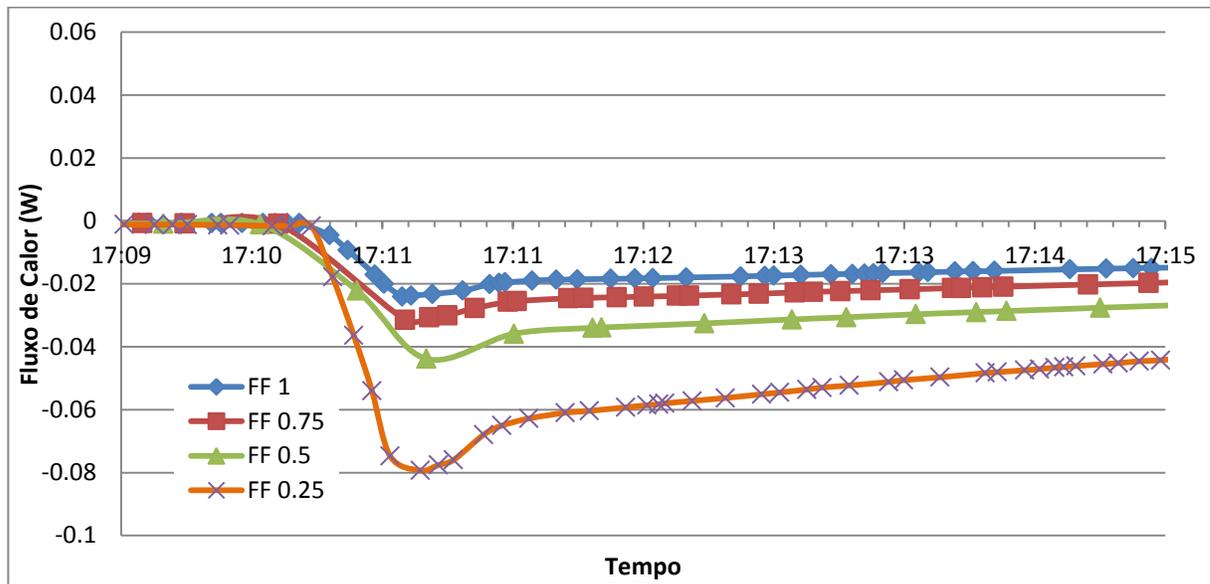


Figura 6-22: Fluxos de calor no momento de súbito aquecimento

As emitâncias efetivas calculadas pela equação 4-35 para os casos das amostras ensaiadas são apresentadas na Tabela 6-3.

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1 \cdot A_1}{A_2 - \varepsilon_1 \cdot A_2 + \varepsilon_1 \cdot A_1} \quad (\text{Eq. 4-35})$$

Tabela 6-3: Emitâncias efetivas das Amostras.

	FF=1	FF=0.75	FF=0.5	FF=0.25
A ₁	0.001963	0.002628	0.003958	0.007948
A ₂	0.001963	0.001963	0.001963	0.001963
ε ₁	0.05	0.05	0.05	0.05
ε _e	0.05	0.065819	0.095927	0.175633

Calculando os fluxos instantâneos pela equação 6-8, considerando as emissividades equivalentes da Tabela 3, obtém-se fluxos de calor praticamente idênticos aos obtidos pelo primeiro método (Eq. 3-25) conforme indica a Figura 6-23.

$$q_{12} = \sigma \cdot \varepsilon_e \cdot A_2 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{Eq. 6-8})$$

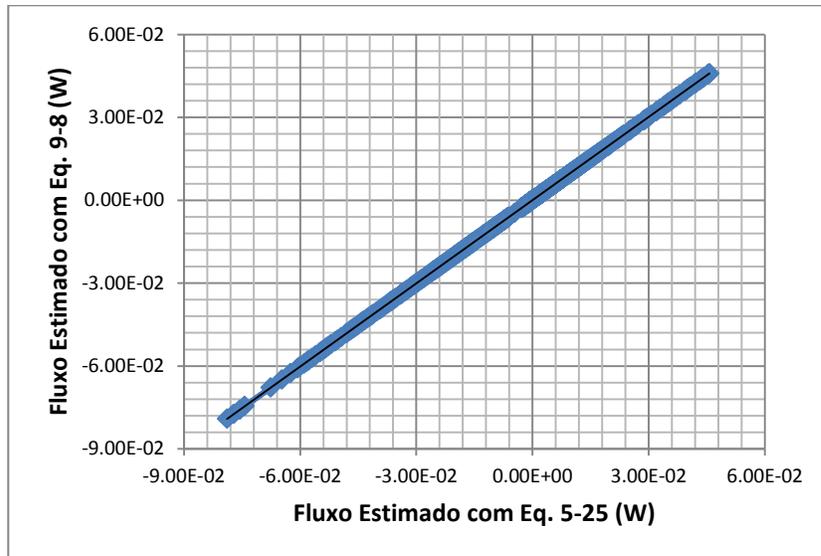


Figura 6-23: Comparação de resultados de modelos de cálculo

A correlação praticamente perfeita dos dois modelos de cálculo poderia ser questionada. Entretanto, conforme apresentado no APÊNDICE A, é possível obter a equação 3-25 a partir da equação 6-8 e, portanto, os resultados realmente deveriam ser coincidentes. Sparrow e Ces (1978), apresentam para cavidades cilíndricas circulares as relações entre emissividade e emitância efetiva apresentadas na figura 6-24.

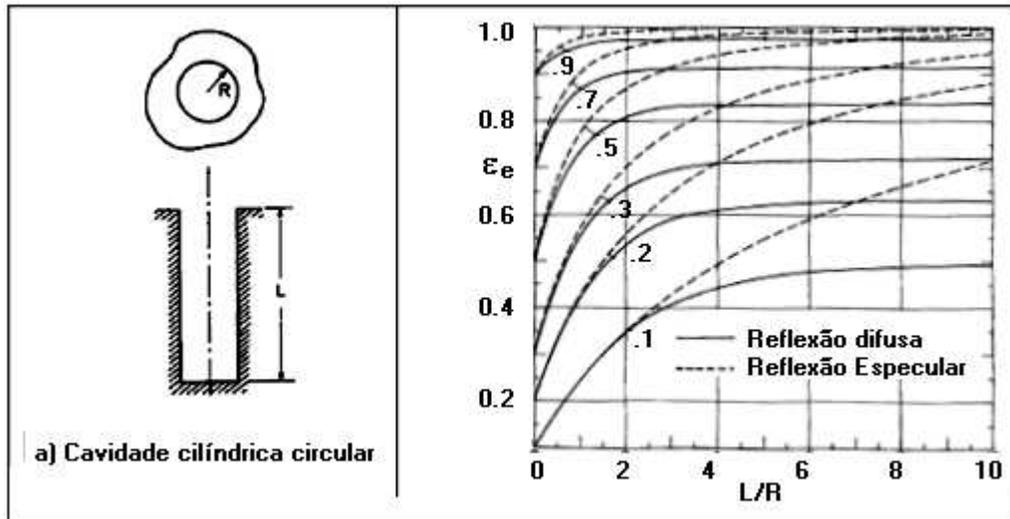


Figura 6-24: Cavidade cilíndrica circular (SPARROW e CESS, 1978)

Como a curva de emissividade mais baixa se refere a valores de 0.1, realizou-se regressões polinomiais das curvas apresentadas na Figura 6-24 e extrapolou-se curvas para emissividades mais baixas, as equações destas curvas são apresentadas no APÊNDICE G. Os valores calculados de ε_e considerando a emissividade do alumínio 0.05 são apresentadas na Tabela 6-4. Rigorosamente, o valor encontrado para a ε_e com $FF_{12}=1$ deveria ser a própria emissividade do material adotado (0.05), entretanto a própria leitura do gráfico já envolve uma imprecisão:

Tabela 6-4: Emitâncias efetivas das Amostras por regressões da Figura 6-24.

FF_{12}	L/R	ε_e
0.25	1.500	0.197
0.5	0.500	0.099
0.75	0.167	0.068
1	0.000	0.055

A comparação entre os resultados das emissividades efetivas obtidas pelos 2 métodos (Tabelas 6-3 e 6-4) pode ser vista na Figura 6-25.

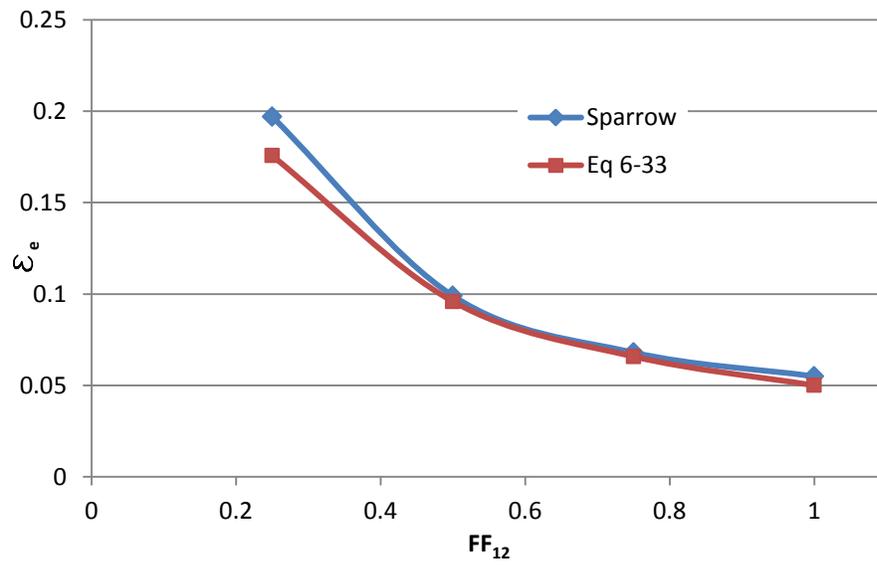


Figura 6-25: Emissividades efetivas calculadas por 2 modelos

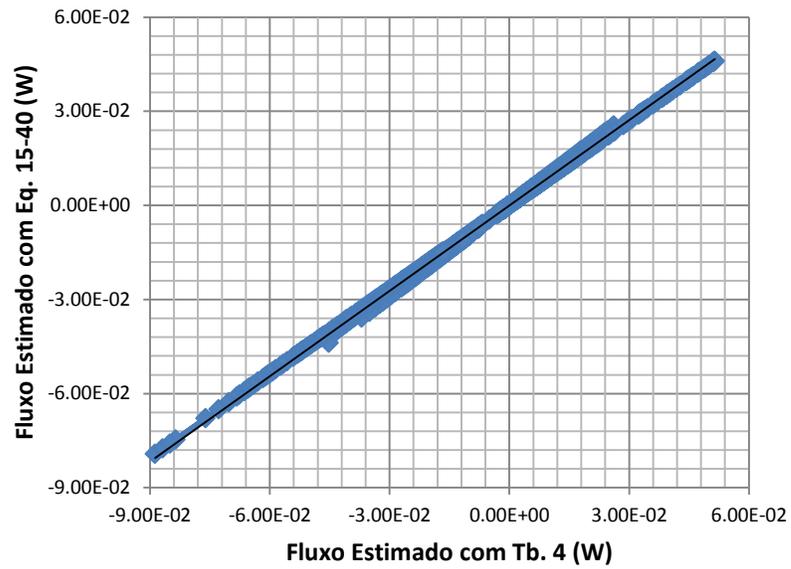


Figura 6-26: Comparação de resultados de 2 modelos de cálculo de fluxo de calor

Como observável na Figura 6-26, os fluxos estimados através de regressões de leituras da Figura 6-24, também estão coerentes com o modelo de cálculo da equação 1, apresentando entretanto ligeira divergência.

6.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para exemplificar a importância dos aspectos abordados neste trabalho, simulações foram elaboradas no programa EnergyPlus (DOE, 2010), para uma edificação de geometria simples, submetida ao clima da cidade de Brasília (DF). Simulou-se simultaneamente 2 ambientes idênticos, exceto quanto às propriedades radiativas da cobertura (absortância e emitância). Em uma zona denominada Z1, adotou-se que as absortâncias são iguais às absortividades e as emitâncias iguais às emissividades, caso de superfície perfeitamente lisa e plana. Para uma segunda zona (Z2), considerou-se as correções propostas pelas equações 4-35 e 4-39 e cobertura composta por telhas conforme a Figura 6-27, de onde é possível obter o fator de forma (FF_{12}) pela equação 3-16.

$$FF_{12} = \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \quad (\text{Eq. 3-16})$$

Para ambas as zonas, adotou-se paredes de 10 cm de alvenaria cerâmica e piso de 5 cm de concreto.

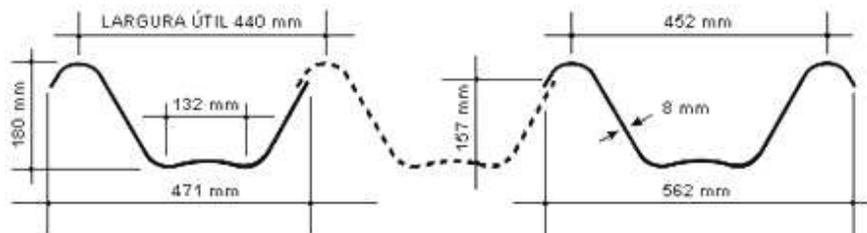


Figura 6-27: Geometria da telha adotada nos exemplos

6.3.1 PRIMEIRO EXEMPLO

Em um primeiro caso, considerou-se o edifício como um paralelepípedo de 6 x 9 x 2.8 (m), sem janelas, portas ou aberturas envidraçadas (Figura 6-28). Conforme apresentado na norma ABNT-NBR 15575 (2008), definiu-se um fluxo de ar de 1 renovação por hora e desconsiderou-se cargas térmicas internas. Considerando a

emissividade da telha de 0.9, através da equação 4-35 obtém-se uma emitância efetiva de 0.933. Da mesma forma, considerando uma absorvidade de 0.6, pela equação 4-39 obtém-se uma absortância efetiva de 0.698. A princípio desconsiderou-se o fluxo com o solo (adotou-se a superfície inferior do piso como adiabática), simulando os casos de dia típico de verão e inverno. A tabela 2 apresenta as propriedades dos elementos construtivos adotadas nas simulações.

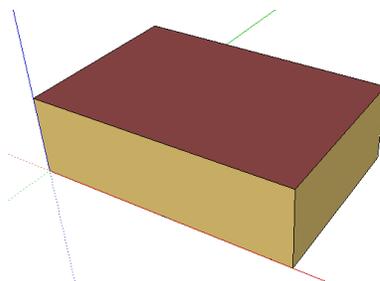


Figura 6-28: Geometria do ambiente simulado nos casos dos exemplos 1 a 3.

Tabela 6-5: Características dos componentes utilizados nas simulações computacionais.

Exemplo	Componente	Espessura (m)	Condutividade térmica (W/m.K)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Emitância	Absortância
	Paredes	0.1	0.75	1500	960	0.9	0.4
	Piso	0.05	1.7	2300	960	0.9	0.4
1 Fibrocimento	Telha 1	0.006	1.7	2300	960	0.9	0.6
	Telha 2	0.006	1.7	2300	960	0.933	0.698
2 Fibrocimento	Telha 3	0.006	1.7	2300	960	0.9	0.3
	Telha 4	0.006	1.7	2300	960	0.933	0.397
3 Metálica	Telha 5	0.001	52	7780	460	0.3	0.3
	Telha 6	0.001	52	7780	460	0.397	0.397

As temperaturas do ar internas às zonas simuladas Z1 (perfeitamente lisa e plana) e Z2 (admitindo as correções das equações 4-35 e 4-39) e as temperaturas do ar externo (TBS) são apresentadas na Figura 6-29, onde observa-se uma diferença máxima de 1.46 °C.

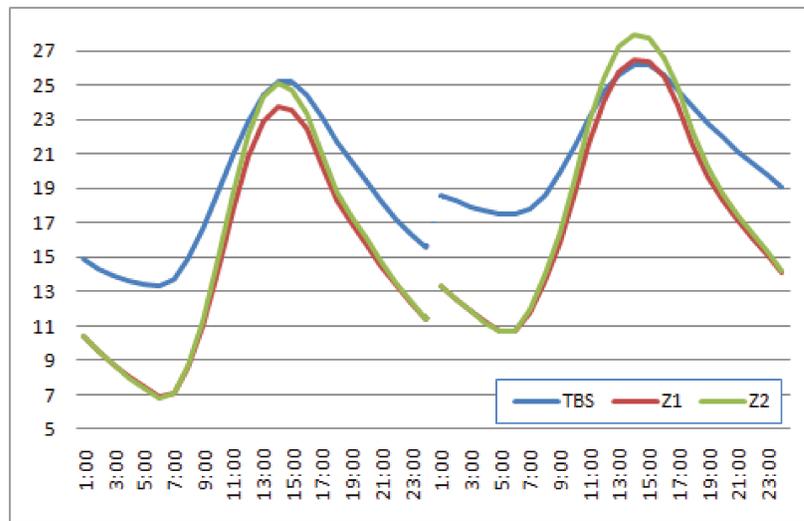


Figura 6-29: Temperaturas obtidas na simulação do caso 1.

6.3.2 SEGUNDO EXEMPLO

Considerando uma cobertura pintada em cor clara, com absorvidade de 0.3, pela equação 4-39 obtém-se uma absortância efetiva de 0.397 e, mantendo-se as demais características do exemplo 1, obtém-se uma diferença máxima de temperaturas de 1.62°C, como apresentado na Figura 6-30.

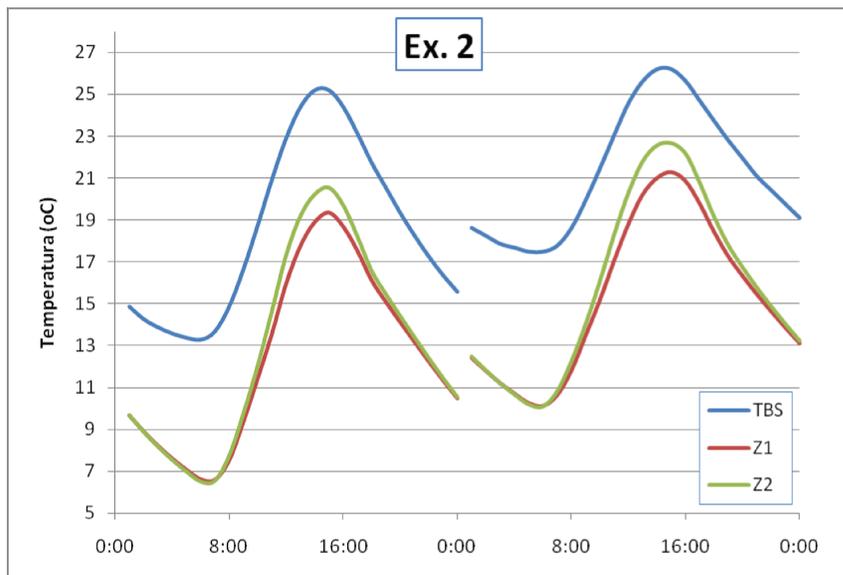


Figura 6-30: Temperaturas obtidas na simulação do caso 2.

6.3.3 TERCEIRO EXEMPLO

Considerando uma cobertura metálica clara, de mesma geometria que a anterior, com absorvidade e emissividade de 0.3, obtém-se absorvância e emitância efetivas de 0.397. Considerando zona Z1 coberta com a telha 5 e a zona Z2 coberta com a telha 6 descritas na Tabela 6-5 e mantendo as demais características do exemplo 1, as diferenças entre as temperaturas simuladas também são significativas no caso noturno, conforme apresentado na Figura 6-31. As diferenças de temperaturas ($T_{Z2}-T_{Z1}$) ficam entre 1.07 e -0.78 °C.

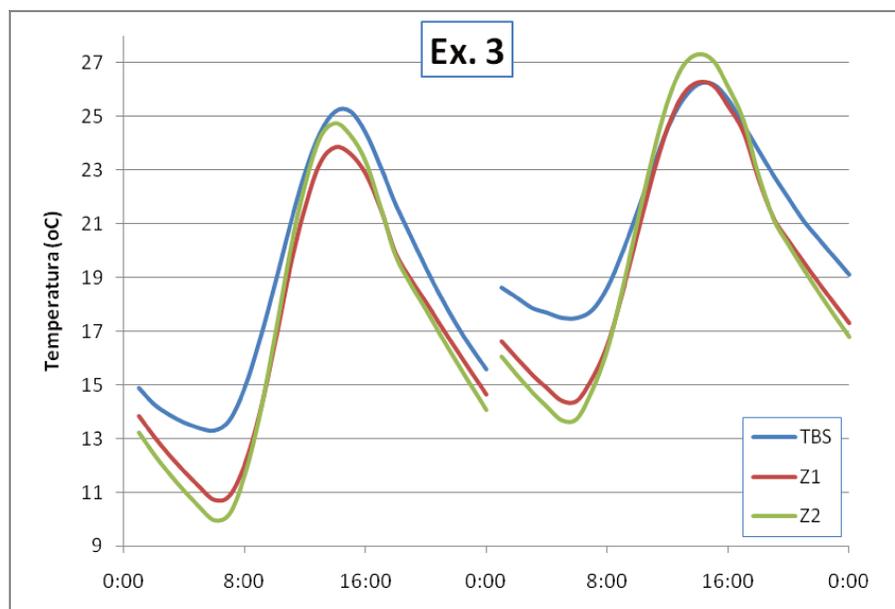


Figura 6-31: Temperaturas obtidas na simulação do caso 3.

6.3.4 QUARTO EXEMPLO

Neste caso, considerou-se o edifício como um paralelepípedo de 6 x 9 x 2.8 (m), com 4 m² de janelas sombreadas voltadas para o norte, conforme a Figura 6-32. Manteve-se 1 renovação por hora e considerou-se cargas internas de pessoas e equipamentos conforme apresenta a Tabela 6-6. Adotou-se as telhas do exemplo 2, com absorvidade de 0.3 e emissividade 0.9 e desconsiderou-se o fluxo com o solo. Simulou-se o arquivo climático EPW de Brasília (DOE, 2010) para o ano todo, obtendo-

se uma diferença máxima de temperaturas ($T_{Z2}-T_{Z1}$) de 2.83°C. Figura 6-33 ilustra os resultados obtidos.

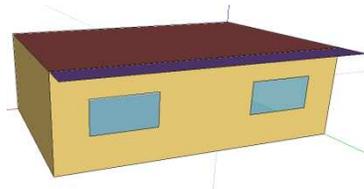


Figura 6-32: Geometria do ambiente simulado no exemplo 4.

Tabela 6-6: Cargas térmicas consideradas.

Número de equipamentos na sala																								
hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lâmpadas (100 W)						1	1										1	2	2	2	1	1	1	1
TV (50 W)															1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Geladeira (90 W)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fogão (60 W)						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
Número de pessoas em atividade sedentária (x100 W)																								
hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Sala											1	2	1		1	2	3	4	4	4	4	4	2	2
Cozinha						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
Dormitório 1	2	2	2	2	2	1	1																1	1
Dormitório 2	2	2	2	2	2	1	1																1	1

O comportamento das temperaturas das telhas é exemplificado na Figura 6-34, onde nota-se que a diferença entre os resultados é ainda maior. Neste caso a diferença ($T_{telha Z2} - T_{telha Z1}$) chega a 5.6 °C.

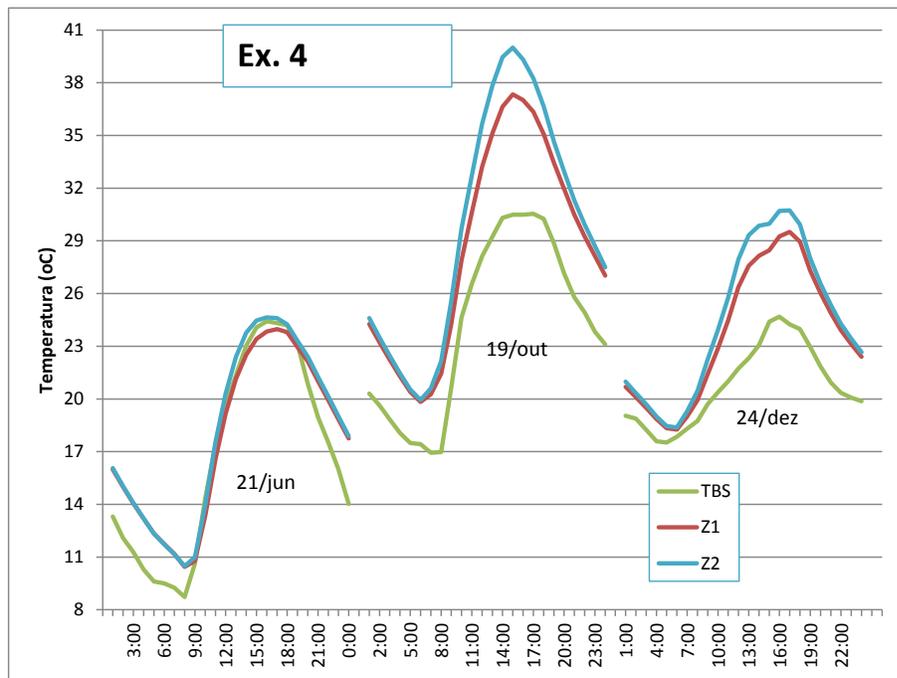


Figura 6-33: Temperaturas obtidas na simulação do caso 4.

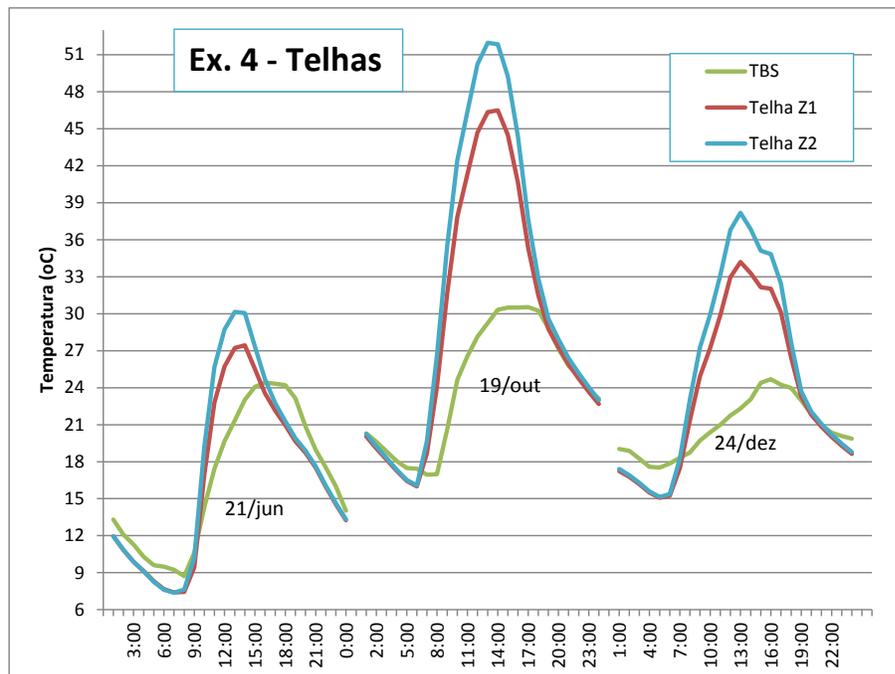


Figura 6-34: Temperaturas das telhas obtidas na simulação do caso 4.

6.3.5 QUINTO EXEMPLO

Para as condições do exemplo 4, simulou-se o uso de condicionadores de ar ideais em ambas as zonas, a fim de avaliar seus impactos no consumo de energia. Adotou-se limite de 24°C para a temperatura interna máxima e comparou-se a soma dos consumos necessários para manter as temperaturas internas abaixo deste valor durante todo o ano. As temperaturas internas obtidas e respectivas cargas de refrigeração são ilustradas na Figura 6-35. Para a zona Z1, a soma da carga anual ficou em 43496 MJ, enquanto para a zona Z2 este valor ficou em 56401 MJ, apresentando assim um acréscimo de 30% em relação à verificada em Z1.

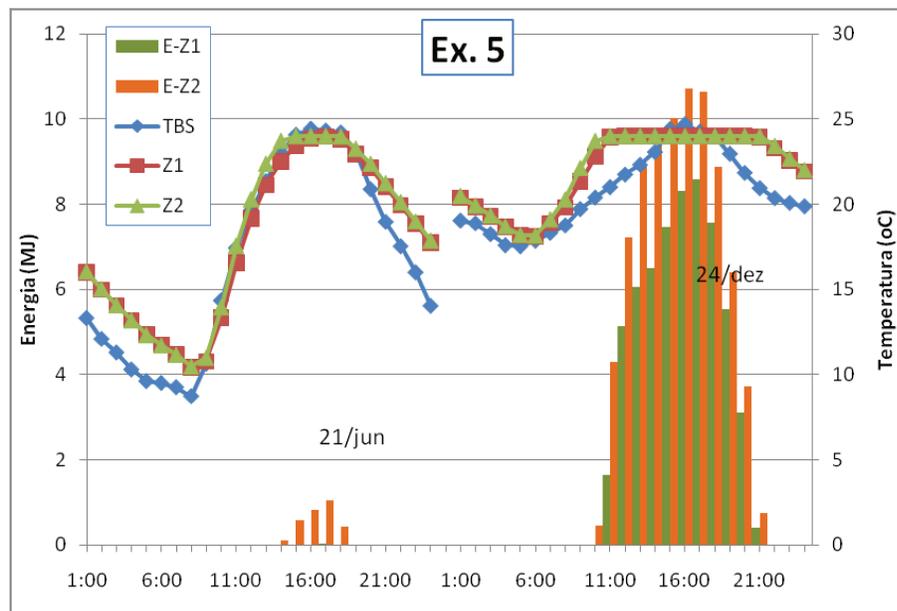


Figura 6-35: Resultados obtidos na simulação do caso 5.

7 O SOFTWARE

Conforme o fluxograma da Figura 1-1, um dos produtos desta tese é um software, que permite estimar as propriedades radiantes efetivas de superfícies. Neste software foram incorporados os recursos indicados na Figura 7-1.

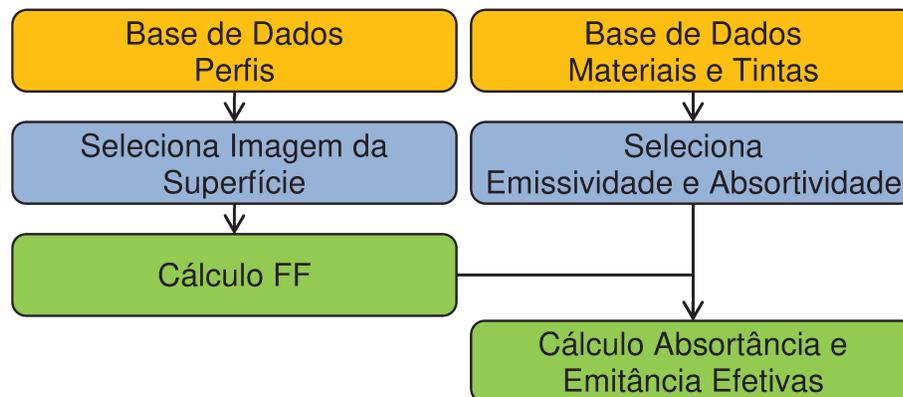


Figura 7-1: Fluxograma do software.

Basicamente, o programa conta com duas bases de dados e uma rotina de cálculo. O usuário seleciona o perfil de interesse e as propriedades do material e obtém como resultados as absortâncias e emitâncias efetivas desta combinação. A seguir são descritos os comandos do programa e seu funcionamento.

O menu “Arquivo”, permite selecionar um arquivo no formato BMP, a partir do qual o software fará a leitura do perfil representativo da superfície de interesse (Figuras 7-2 e 7-3).

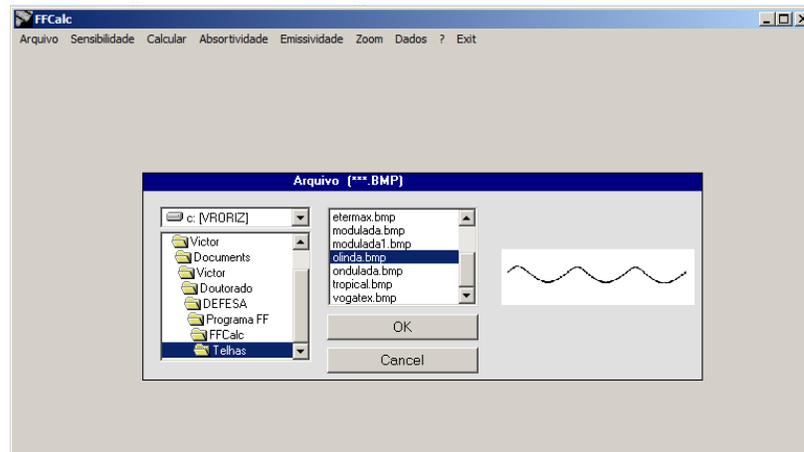


Figura 7-2: Seleção de perfil.

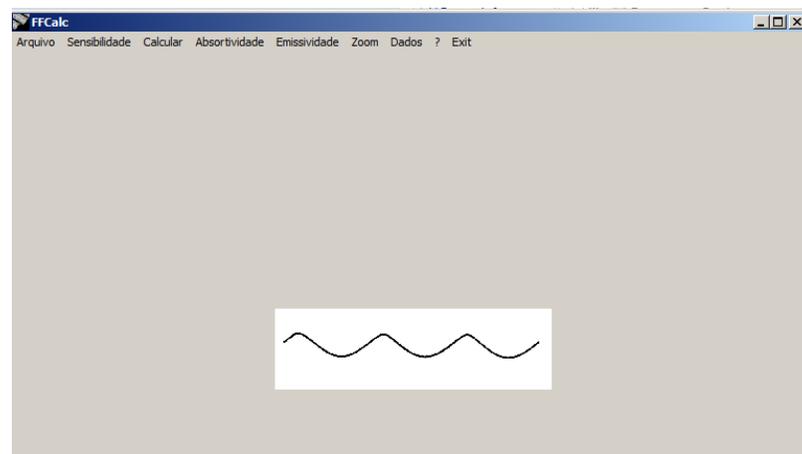


Figura 7-3: Perfil selecionado.

Ao acionar o comando “Calcular”, a linha divisória entre dois tons na figura é considerada como perfil da superfície de interesse (Figura 7-4). O resultado do fator de forma (FF_{12}), a absortividade e emissividade consideradas e os resultados das absortividade e emissividade efetivas calculadas são apresentados em uma tabela no canto esquerdo superior.

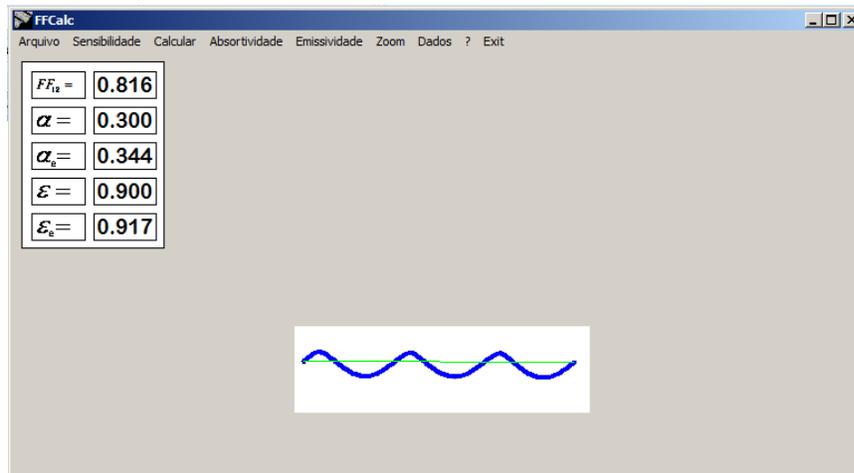


Figura 7-4: Definição de perfil.

O cálculo é feito usando as equações 4-35 e 4-39. A partir do perfil obtido, o software define 2 linhas. A primeira, representada em azul na Figura 7-4, representa a área A_1 na equação 3-16, ou seja, o próprio perfil de interesse. A reta (em verde) entre os pontos de início e fim da curva representa a área A_2 nesta mesma equação. A razão entre A_2 e A_1 é considerada como o fator de forma (eq. 3-16).

$$FF_{12} = \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \quad (\text{Eq. 3-16})$$

Ao selecionar o comando “Absortividade” uma janela permite alterar o valor da absortividade considerada. Da mesma, forma o comando “Emissividade” permite a definição da emissividade (Figura 7-5).

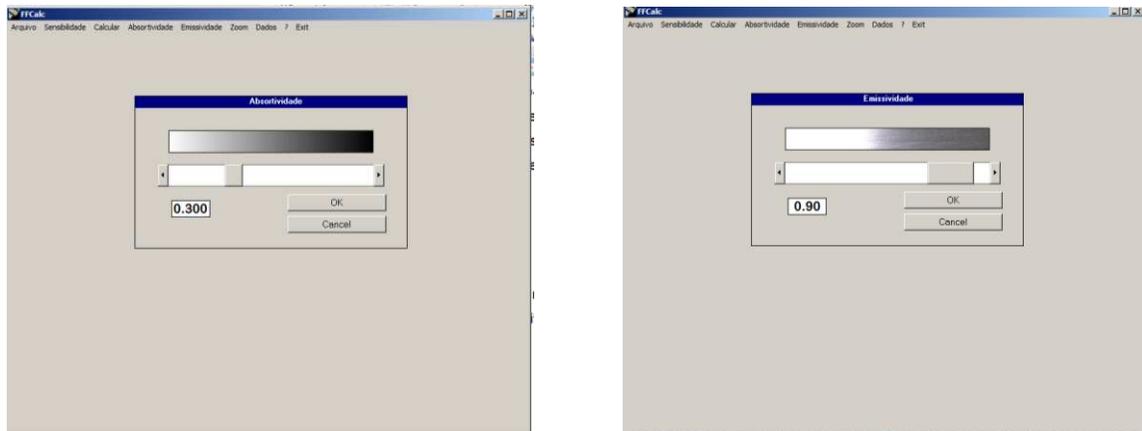


Figura 7-5: Definição da Absortividade e Emissividade

O menu “Sensibilidade” permite ajustar a detecção da superfície de interesse. O comando “Tonalidade” altera o tom da cor limite, a partir da qual o software considera o perfil desejado. Todas as cores são transformadas em tons de cinza para este cálculo, sendo portanto sujeitos a imprecisões. Este controle facilita o uso de imagens convertidas de outros formatos e de baixa resolução, onde existe uma nuvem de pixels pouco nítida. As figuras 7-6 e 7-7, exemplificam sua aplicação.

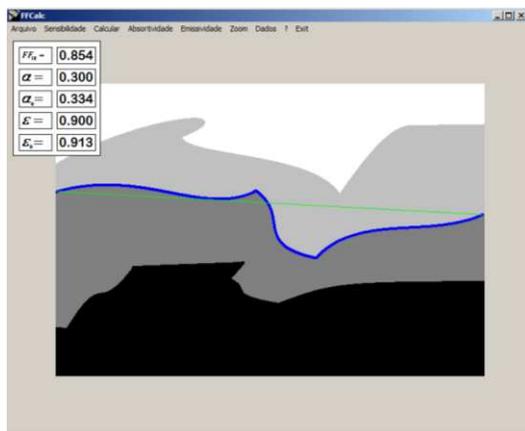


Figura 7-6: Sensibilidade: Tonalidade Média.

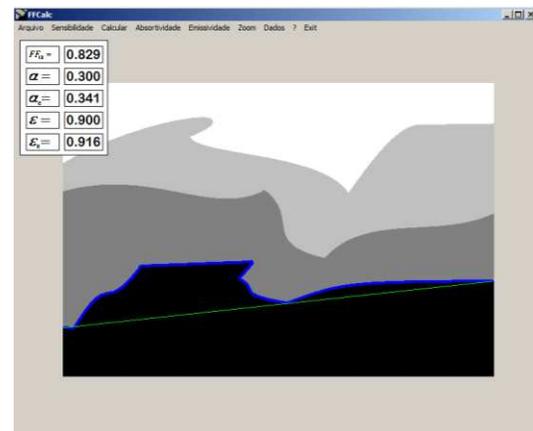


Figura 7-7: Sensibilidade: Tonalidade Baixa.

O comando “Segmentos” altera o comprimento dos segmentos de reta considerados para o perfil desejado. Como a resolução das imagens é um fator

determinante na precisão do processo de análise das figuras, este comando permite que o usuário altere o número de pontos considerados na curva de interface. As figuras 7-8 e 7-9, exemplificam sua aplicação.

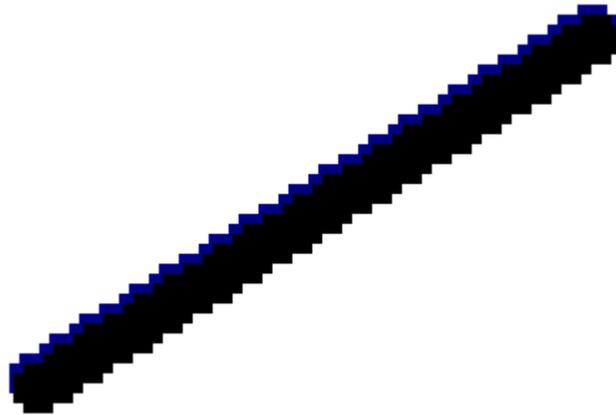


Figura 7-8: Sensibilidade: Segmentos Pequenos.

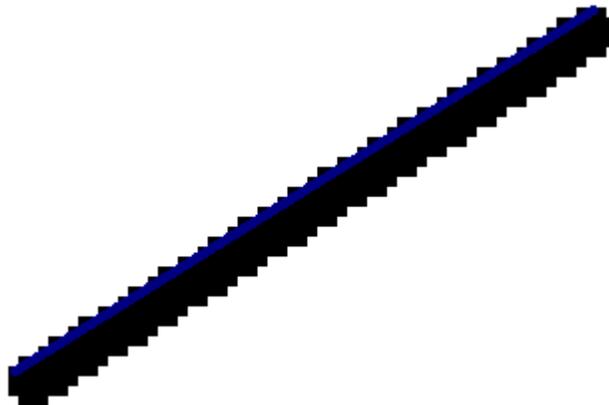


Figura 7-9: Sensibilidade: Segmentos Grandes.

O comando “Zoom” redimensiona a figura de interesse. A imagem selecionada é redimensionada ocupando toda a tela do software. Este recurso não altera a imagem original e não interfere nos cálculos (Figura 7-10).

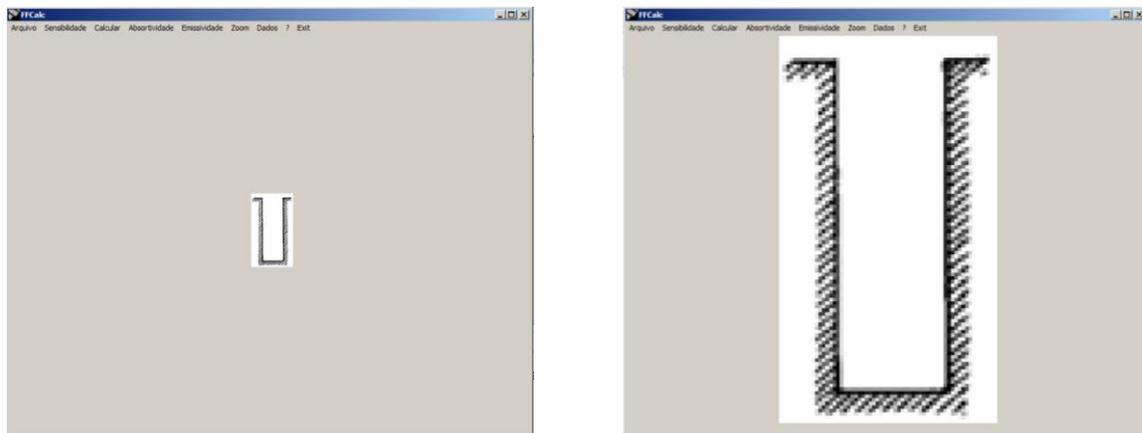


Figura 7-10: Zoom

O menu “Dados” apresenta um conjunto de valores de absorvidades corrigidas para o espectro solar (α_s) e emissividades. Estas informações foram coletadas em fontes bibliográficas apresentadas no menu “?”, com o comando “Referências”. No mesmo menu “?”, são também apresentados os comandos “Conceitos”, que esclarece as equações o método de cálculo e conceitua as variáveis, além do comando “Sobre”, que apresenta informações relativas ao próprio software.

Tintas	α_s	ϵ	F
Amarelo Antigo - Metalatex Acrilica Fosca.....	0.51	---	2
Amarelo Terra - Metalatex Acrilica Fosca.....	0.64	---	2
Areia - Metalatex Acrilica Fosca.....	0.46	---	2
Azul - Metalatex Acrilica Fosca.....	0.73	---	2
Azul Imperial - Metalatex Acrilica Fosca.....	0.67	---	2
Branco - Metalatex Acrilica Fosca.....	0.16	---	2
Branco Gelo - Metalatex Acrilica Fosca.....	0.37	---	2
Camurça - Metalatex Acrilica Fosca.....	0.57	---	2
Concreto - Metalatex Acrilica Fosca.....	0.75	---	2
Alecrim- Suvinil Acrilica Fosca.....	0.64	---	2
Alumínio brilhante.....	0.40	0.50	4
Amarelo Antigo- Metalatex Acrilica Semi-brilho.....	0.50	---	2
Amarelo Canário- Novacor Látex PVA Fosca.....	0.29	---	2
Amarelo Canário- Suvinil Látex PVA Fosca.....	0.25	---	2
Amarelo Terra- Metalatex Acrilica Semi-brilho.....	0.69	---	2
Amarelo Terra- Novacor Látex PVA Fosca.....	0.61	---	2
Areia- Novacor Látex PVA Fosca.....	0.39	---	2
Areia- Suvinil Látex PVA Fosca.....	0.36	---	2
Azul angra- Novacor Látex PVA Fosca.....	0.32	---	2
Azul balli- Suvinil Acrilica Fosca.....	0.49	---	2
Azul- Metalatex Acrilica Semi-brilho.....	0.80	---	2
Azul Profundo- Suvinil Látex PVA Fosca.....	0.76	---	2
Bianco Sereno- Novacor Látex PVA Fosca.....	0.27	---	2
Black Velvet - SM.....	0.97	0.91	4

α_s - Absortância Solar
 ϵ - Emissividade

F [Fonte]:
1. ASHRAE, 2005
2. Dornelles, 2008
3. Incropera e Dewitt, 1996
4. Redrok, 2011

Figura 7-11: Base de dados.

7.1 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para exemplificar as possibilidades de aplicação deste programa, considerou-se alguns perfis de telhas, encontrados em catálogos de fabricantes (OBRAWEB, 2011), conforme mostram as Figuras 7-12 a 7-18.

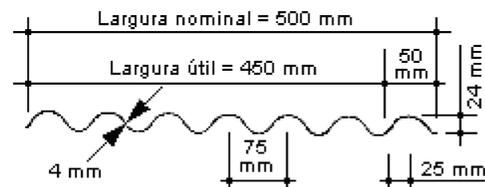


Figura 7-12: Dimensões telha Vogatex.

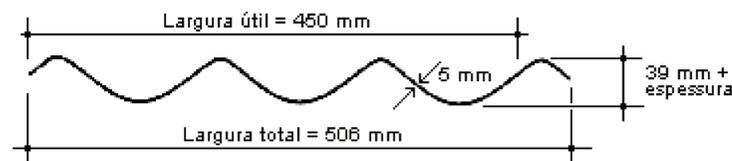


Figura 7-13: Dimensões telha Olinda

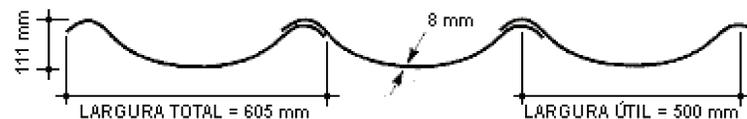


Figura 7-14: Dimensões telha Modulada.

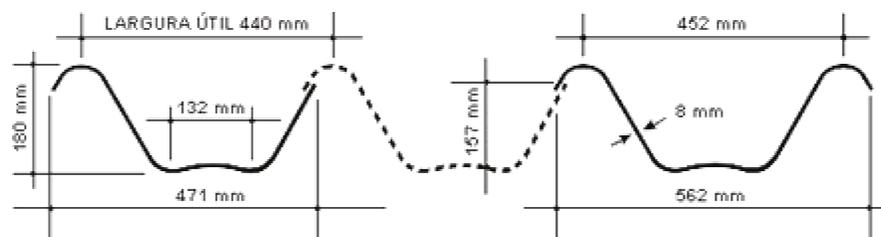


Figura 7-15: Dimensões telha Canaleta 44.

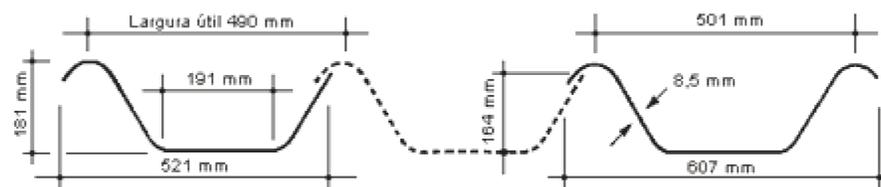


Figura 7-16: Dimensões telha Canaleta 49.

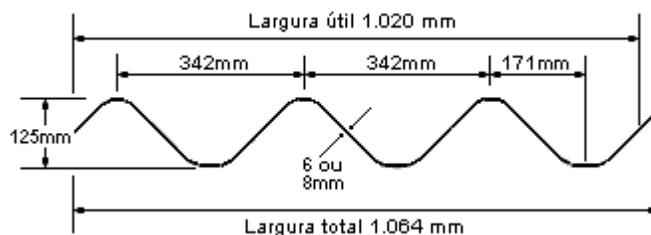


Figura 7-17: Dimensões telha Etermax.

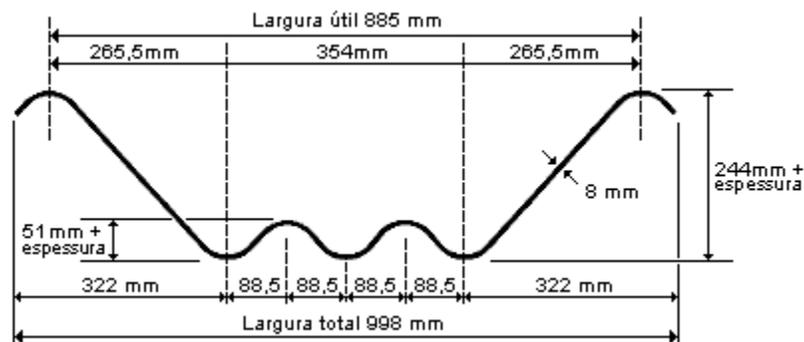


Figura 7-18: Dimensões telha Etercalha

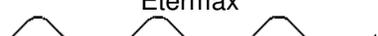
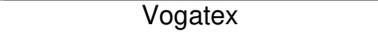
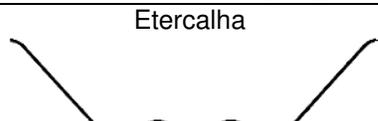
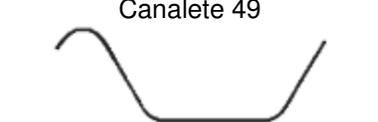
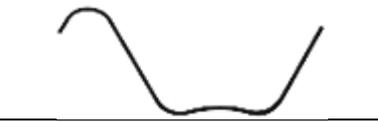
Considerou-se para a aplicação desta rotina computacional as absorções de algumas tintas (Tabela 7-1). Estes dados foram corrigidos conforme descreve o item 3.2.2, a partir de dados obtidos em espectrofotômetro (DORNELLES, 2008).

Tabela 7-1: Absorções medidas em espectrofotômetro e ajustadas ao espectro solar padrão (%).

Nome Comercial	Cor	Tipo	Absorção Espectrofotômetro	Absorção Solar
Branco		Novacor Látex PVA Fosca	18.7	11.1
Branco Gelo		Metalatex Acrílica Fosca	46.4	37.2
Flamingo		Novacor Látex PVA Fosca	49.0	46.8
Azul Imperial		Metalatex Acrílica Fosca	74.2	66.9
Verde Musgo		Suvinil Látex PVA Fosca	78.7	79.8
Preto		Suvinil Látex PVA Fosca	98.0	97.4

Os resultados obtidos pela aplicação do software foram resumidos na Tabela 7-2 e Figura 7-19.

Tabela 7-2: Absortâncias solares efetivas (%).

Perfil	FF_{12}	Absortâncias solares ajustadas (%)					
		Branco	Branco Gelo	Flamingo	Azul Imperial	Verde Musgo	Preto
Liso	1	11.1	37.2	46.8	66.9	79.8	97.4
Modulada 	0.854	12.8	41.0	50.7	70.3	82.2	97.8
Olinda 	0.815	13.3	42.1	51.9	71.3	82.9	97.9
Etermax 	0.773	13.9	43.4	53.2	72.3	83.6	98.0
Vogatex 	0.77	14.0	43.5	53.3	72.4	83.7	98.0
Etercalha 	0.738	14.5	44.5	54.4	73.3	84.3	98.1
Canalete 49 	0.712	14.9	45.4	55.3	73.9	84.7	98.1
Canalete 44 	0.663	15.8	47.2	57.0	75.3	85.6	98.3

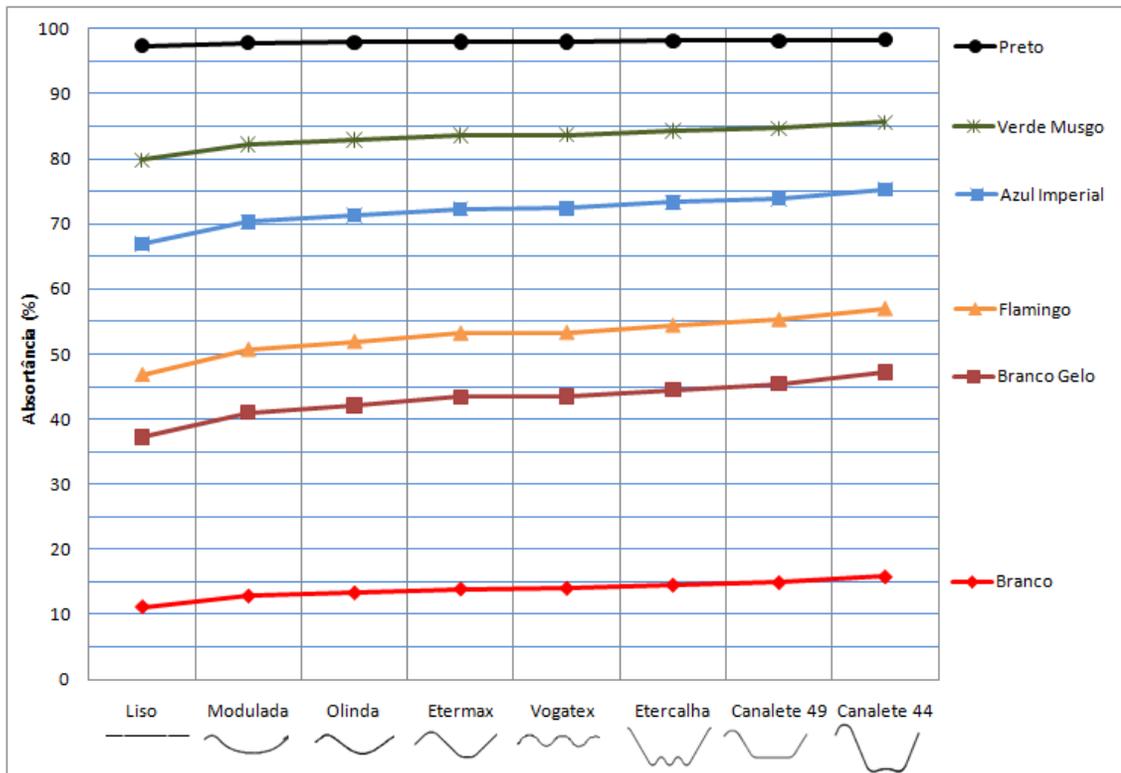


Figura 7-19: Absortâncias efetivas

Outro exemplo de uso do programa pode ser feito comparando os resultados das absortâncias solares de superfícies como as apresentadas nas figuras 7-20 a 7-23, obtidas de amostras de lixas (DORNELLES, 2008), considerando uma pintura feita com tinta Marfin Látex Fosca.



Figura 7-20: Lixa 1.



Figura 7-21: Lixa 2.



Figura 7-22: Lixa 3.



Figura 7-23: Lixa 4.

Os resultados obtidos foram resumidos na Tabela 7-3.

Tabela 7-3: Absortâncias solares efetivas (%).

Perfil	FF_{12}	Absortâncias solares Ajustadas (%)	DORNELLES, 2008
Liso	1	43.0	43.0
Lixa 1	0.874	46.3	52.1
Lixa 2	0.827	47.7	51.7
Lixa 3	0.802	48.5	53.7
Lixa 4	0.723	51.1	55.3

8 CONCLUSÕES

Apesar da aparente simplicidade dos temas abordados nesta pesquisa, ao longo do estudo, observou-se que existe grande confusão nos termos e conceitos relacionados a ela, inclusive entre os especialistas. Em diversos estudos, simplificações de geometrias são feitas, sem aplicar as devidas correções nas propriedades dos materiais, e sem se considerar os efeitos relacionados.

Nesta pesquisa, observou-se que as inter-reflexões da radiação térmica, em ondas curtas ou longas, exercem influência significativa nos fluxos por radiação. Conseqüentemente, influenciam as temperaturas superficiais e no interior das edificações. Demonstrou-se, por exemplo, que a forma das telhas exerce influência nas temperaturas de um edifício, especialmente para o caso de coberturas mais claras. Teoricamente em telhas pintadas com tinta Branco Gelo, a absorvância solar pode variar entre 37.2% e 47.2%, dependendo da geometria da telha. Lixas pintadas na cor Marfim podem apresentar absorvâncias de 51.1%, enquanto em uma superfície lisa a mesma tinta estabelece absorvância de 43%. Portanto, considerar a geometria, pode representar uma diferença de até 10% na absorção de radiação solar, tendo alta relevância no desempenho termo-energético das construções.

Os procedimentos experimentais realizados possibilitaram a quantificação dos fenômenos físicos de interesse da pesquisa e comprovaram a validade das equações 4-35 e 4-39, que descrevem estes fenômenos.

O primeiro experimento proposto possibilitou a observação dos diversos fluxos de calor simultaneamente e, com isso, uma observação realista do fenômeno físico, com as reais interdependências dos processos de troca de calor. Todavia, por este sistema ser extremamente complexo, grande número de variáveis deve ser observado, implicando necessariamente em uma soma dos erros da modelagem física adotada em cada processo, além das imprecisões inerentes aos diversos instrumentos de medição.

O segundo procedimento experimental foi feito com maior controle e precisão. Por envolver menor número de variáveis, a análise dos resultados foi menos complexa, demonstrando de forma mais evidente o fenômeno estudado.

De maneira geral, cada um dos experimentos têm limitações e vantagens, sendo complementares em relação aos recursos necessários para o estudo das questões abordadas nesta pesquisa.

Para as superfícies normalmente encontradas em edificações, o modelo simplificado aqui proposto apresentou forte correlação com o modelo clássico desenvolvido por Sparrow e Jonsson (1963), tendo a vantagem de não ser restrito a apenas algumas formas. A ausência desta limitação viabiliza diversas aplicações para o modelo, particularmente em simulações computacionais.

Considerando os efeitos das ondulações descritos pela equação 4-35 e que os materiais de construção civil, de modo geral, têm alta emissividade, pode-se esperar que, mesmo que a ondulação eleve a emissividade de uma superfície, a influência deste efeito seja pequena. Para emissividades altas, os erros relacionados à sua aplicação são pouco significativos, enquanto para superfícies de baixa emissividade, se, por um lado, a correção proposta ainda não seja a ideal, por outro, é muito superior à alternativa corrente de não se corrigir a emitância e considerá-la igual à emissividade.

Para a radiação em ondas curtas, as ondulações têm uma maior influência, uma vez que para este intervalo de frequências as absorvidades variam muito entre as diferentes superfícies da construção civil. Como grande parte da radiação solar encontra-se nesta faixa de frequências, é significativo o impacto causado nos fluxos por radiação. Em regiões tropicais, onde a irradiância solar nas superfícies horizontais pode atingir 1300 W/m^2 , o impacto das ondulações é muito expressivo.

Os resultados sugerem que, para o caso típico de superfícies de edificações, de emissividade alta e absorvidade média ou baixa, a ondulação tem um impacto mais acentuado sobre a absorvância que sobre a emitância e, portanto, contribui no sentido de elevar as temperaturas superficiais. Por outro lado, em relação às trocas

convectivas, as ondulações atuam como aletas, aumentando a área de troca e conseqüentemente os fluxos convectivos, sendo que, dependendo do caso, este efeito pode ser superior ao provocado pelo incremento da absorvância.

Em simulações do comportamento térmico de edifícios, a aplicação do modelo de cálculo aqui proposto demonstrou que não deveriam ser desprezadas as influências da rugosidade e da ondulação. Para o caso específico das coberturas, onde os fluxos radiativos são mais intensos, as simulações revelaram diferenças acima de 2.5°C nas temperaturas internas do ar, considerando ou não as correções propostas para as propriedades efetivas das superfícies. Na temperatura superficial das telhas, esta diferença chega a 5.6°C. No caso do uso de condicionadores de ar, a diferença encontrada entre as estimativas de consumo de energia chegou a 30%.

Finalmente, esta pesquisa confirmou que a imprecisão nos dados de entrada pode comprometer os resultados de sofisticados modelos de cálculo ou de programas computacionais de simulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 15220-2. **Desempenho térmico de edificações - Parte 2:** Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. [S.l.]: [s.n.], 2005.

AKBARI, H. et al. Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. **Energy and Buildings**, v. 25, p. p. 117-126, 1997.

AKBARI, H.; LEVINSON, R.; BERDAHL, P. ASTM Standards for measuring solar reflectance and infrared emittance of construction materials and comparing their steady-state surface temperatures. **American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE) summer study on energy efficiency in buildings.**, Pacific Grove, Ca, p. 25-31, Aug 1996.

AKBARI, H.; LEVINSON, R.; STERN, S. Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. < **http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-734E/>**, 2008. Acesso em: 2009 jun. 12.

ASHRAE. **74-1988:** Method of measuring solar-optical properties of materials. Atlanta: AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. 1988.

ASHRAE. **Terminology of Heating, Ventilating, Air Conditioning, and Refrigeration.** Atlanta: [s.n.], 1991.

ASHRAE. **Fundamentals handbook.** Atlanta: [s.n.], 2001. : AMERICAN SOCIETY OF HEATING, VENTILATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS.

ASHRAE- PSYCHROMETRICS. PSYCHROMETRICS. In: _____ **ASHRAE Fundamentals Handbook.** Atlanta: [s.n.], 2001.

ASTM. **ASTM E 903-96:** Standard test method for solar absorptance, reflectance, and transmittance of materials using integrating spheres. [S.l.]: [s.n.], 1996.

ASTM. **ASTM E 1918-97**: Standard test method for measuring solar reflectance of horizontal and low-sloped surfaces in the field. [S.l.]: [s.n.]. 1997.

ASTM. **ASTM C 1549-02**: Standard test method for determination of solar reflectance near ambient temperature using a portable solar reflectometer. [S.l.]: [s.n.]. 2002.

ASTM. **ASTM G173-03e1**, “**Standard tables for reference solar spectral irradiance**: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface”, ASTM International. [S.l.]: [s.n.]. 2003.

ASTM C 1371-04. Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers, 2004.

ASTM E 408. Standard Test Methods for Total Normal Emittance of Surfaces Using Inspection-Meter Techniques, 2008.

BÁRBARO, E. W. et al. **OBSERVATIONAL STUDY OF DOWNWARD ATMOSPHERIC LONGWAVE RADIATION AT THE SURFACE IN THE CITY OF SÃO PAULO**. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. Florianopolis: [s.n.]. 2006.

BARBIRATO, G. M. et al. **Refletância de cores em superfícies construtivas**. Anais do VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído ENTAC. Salvador: [s.n.]. 2000.

BEJAN, A. **Convection Heat Transfer**. 2a. ed. [S.l.]: Mac GranHill, 1990.

BERDAHL, P.; BRETZ, S. E. Preliminary Survey of the solar reflectance of cool roofing materials. **Energy and buildings**, v. 25, 1997.

BRETZ, S.; AKBARI, H.; ROSENFELD, A. PRACTICAL ISSUES FOR USING SOLAR-REFLECTIVE MATERIALS TO MITIGATE URBAN HEAT ISLANDS. **Atmospheric Environment** , Berkeley, CA, U.S.A., v. Vol. 32, No. 1, p. pp. 95 101, 1995.

BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere.. **Q. J. R. Meteorol. Soc.** **58**, 1932. 389–420.

BUENO, A. D. **Transferência de Calor e Umidade em Telhas Cerâmicas: Simulação e Experimentação.** Florianópolis: [s.n.], 1994.

BUENO, A. D. **Transferência de Calor e Umidade em Telhas: Simulação e Análise Experimental.** [S.l.]: [s.n.], v. Mestrado em Engenharia Civil , 1994.

CAMPBELL, 2010. Disponível em:
<<http://www.campbellsci.ca/Catalogue/CG1.html>>.

CAOLA, M. J. Radiation from a nonisothermal spherical cavity: an exact solution. **APPLIED OPTICS**, v. V. 40, No. 19, 1 July 2001.

CARAM, R. M. **Caracterização ótica de materiais transparentes e sua relação com o conforto ambiental em edificações.** [S.l.]: [s.n.], 1998.

CASTRO, A. P. A. S. Análise da refletância de cores de tintas através da técnica espectrofotométrica, Campinas, 2002.

CASTRO, A. P. A. S. et al. Medidas de Refletância de Cores de Tintas Através de Análise Espectral., Porto Alegre, RG, 3, 2003. 69-76.

CHEIKH, H. B.; BOUCHAIR, A. Passive cooling by evapo-reflective roof for hot dry climates. **Renewable Energy**, 29, 2004. 1877-1886.

CHIASSON, A. D. et al. **A model for simulating the performance of a shallow pond as a supplemental heat rejecter with closed-loop ground-source heat pump systems.** [S.l.]: [s.n.]. 2000. p. 107-121.

CIBS. **Guide 3. Thermal Properties Of Building Structures.** [S.l.]: The Chartered Intitution of Building Services, 1980.

CIBS, G. 3. **Thermal Properties Of Building Structures. The Chartered Institution of Building Services. 1980. Apud BUENO.** [S.l.]: [s.n.], 1994.

CLARK, G. **Passive/hybrid comfort by nocturnal radiation.** Proceedings of International Passive & Hybrid Cooling Conference. Miami Beach: [s.n.]. 1981. p. 682-714.

CRAVEIRO, M. A. C. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA AVALIAÇÃO DOS FATORES DE INFLUÊNCIA SOBRE ANÁLISES TERMOGRÁFICAS EM SUBESTAÇÕES DESABRIGADAS.** Itajubá: [s.n.], 2008.

D&S. Emissometer Model AE1 RD1, 2010. Disponível em: <<http://www.devicesandservices.com/prod03.htm>>.

DERYCKET, I. et al. Evaluation of the apparent emissivity of the internal surface of a parallelepipedic isothermic cavity. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v.24, n.11, 1991.

DOE. **DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. Building Energy Software Tools Directory.** [S.l.]: [s.n.], 2010. Disponível em: Acesso em: 24 abr. 2010.

DOE. U.S. Department of energy, 2010. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>>.

DORNELLES, K. A. **ABSORTÂNCIA SOLAR DE SUPERFÍCIES OPACAS: MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO E BASE DE DADOS PARA TINTAS LÁTEX ACRÍLICA E PVA.** Campinas: [s.n.], 2008.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, V.; RORIZ, M. **Determination of the solar absorptance of opaque surfaces.** Proceedings of the 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture. Cingapura: [s.n.]. 2007.

ELETOBRÁS, 2007. Disponível em: <http://www.eletobras.gov.br/procel/site/areadeatuacao/residencias_apresentacao.asp>. Acesso em: 23 jul. 07.

ESCOBEDO, J. et al. **CICLO DIURNO-NOTURNO DA RADIAÇÃO DE ONDA LONGA ATMOSFÉRICA (LW) HORÁRIA EM BOTUCATU/SP/BRASIL**. XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. [S.l.]: [s.n.]. 2009.

GOMES, E. N. et al. **EVOLUÇÃO ANUAL DA RADIAÇÃO DE ONDA LONGA ATMOSFÉRICA (LW) MEDIA MENSAL, HORÁRIA E DIÁRIA, EM BOTUCATU/SP/BRASIL**. [S.l.]: [s.n.]. 2009.

GOMES, R. J. **Condicionamentos climáticos da envolvente dos edifícios para habitação**. LISBOA: [s.n.], v. II, 1962.

GONZÁLES, E. M. **Enfriamiento radiactivo en edificaciones. Notas del Curso de actualización Sistemas de enfriamiento aplicados a la vivienda. U. de Guadalajara y CYTED**. Guadalajara: [s.n.], 2002.

GRANJA, A. D. Transmissão de calor em regime periódico: efeito da inércia térmica em fechamentos opacos. **Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas**, Campinas, 2002.

GREENBERGER; HENTSCHEL; WEINERT. **Compendium of Quantum Physics: Concepts, Experiments, History and Philosophy**. [S.l.]: [s.n.], 2009.

GUSTAVSEN; BERDAHL. Spectral Emissivity of Anodized Aluminum and the Thermal Transmittance of Aluminum Window Frames, 2003. Disponível em: <http://web.byv.kth.se/bphys/pdf/art_0103.pdf>.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. F. O. H. A. M. T. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 4. ed. ed. New York: John Wiley and Sons, 1996.

INMET. **Monitoramento das Estações Automáticas**, 2010. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>>.

JIS A 1423. Simplified test method for emissivity by infrared radio meter, 1983. JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION.

KIPP; ZONEN, 2010. Disponível em: <<http://www.kippzonen.com/>>.

KONOPACKI, S. et al. Demonstration of energy savings of cool roofs., Berkeley, 1998.

KONOPACKI, S.; AKBARI, H. Measured energy savings and demand reduction from a reflective roof membrane on a large retail store in Austin. **Report LBNL-47149**, Berkeley, 2001.

KUMAR, N. S.; REDDY, K. S. Investigation of Convection and Radiation Heat Losses From Modified Cavity Receiver of Solar Parabolic Dish Using Asymptotic Computational Fluid Dynamics, Madras, 2010.

LABAKI, L.; TEIXEIRA, C.; TAVARES, S. **Desempenho térmico de técnicas passivas em coberturas**. VIII Encontro Nacional e IV Encontro Latino-americano sobre Conforto no Ambiente Construído. Maceió: ANTAC. 2005. p. 2327-2328.

LAMBERTS, R. **Influência do desempenho térmico de coberturas com ático no Conforto Térmico de casas populares**. Anais do Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Gramado, 1990. [S.l.]: ANTAC. 1991. p. 41-4.

LAVIGNE, P. **Architecture climatique: une contribution au développement durable**. Tome 1: Bases physiques – Edisud – Aix-en-Provence. [S.l.]: [s.n.], 1994.

LEITHOLD, L. **O Cálculo com Geometria Analítica**. [S.l.]: Harbra, v. 2, 1986.

LEVINSON, R. M. **NEAR-GROUND COOLING EFFICACIES OF TREES AND HIGH-ALBEDO SURFACES**. Berkeley: [s.n.], 1997. Ph.D. Thesis.

LIDE. **Handbook of Chemistry and Physics**. [S.l.]: CRC Press, 1993.

LIENHARD; LIENHARD. **A Heat Transfer Textbook**. [S.l.]: (M.I.T. e Universidade de Houston), 2002.

LMPT. **Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina**, 2010. Disponível em: <<http://www.lmpt.ufsc.br/>>.

MACIEL, A. A.; LAMBERTS, R. **Avaliação de estratégias passivas em edificações de escritórios em Brasília**. VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2003, Curitiba. ENCAC & COTEDI. [S.l.]: [s.n.]. 2003. p. p. 201-208.

MACIEL, A.; LAMBERTS, R. **Avaliação de estratégias passivas em edificações de escritórios em Brasília**. VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Curitiba. ENCAC & COTEDI. [S.l.]: [s.n.]. 2003. p. p. 201-208.

MARCHETTI; BOUDENNE; CANDAU. Analysis of the radiative behavior of road materials: Principles and measurements of infrared emissivity. **Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, 2008. 45-55.

MAXIM. **Datasheet**. [S.l.]: [s.n.], 2011. Disponível em:< <http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/2812>>. Acesso em: 12 mar. 2011.

MICHELS, C.; LAMBERTS, R.; GUTHS, S. Theoretical/experimental comparison of heat flux reduction in roofs achieved through the use of reflective thermal insulators. **Energy and Buildings** **40**, 2008. 438-444.

MODEST, M. F. **RADIATIVE HEAT TRANSFER**. San Diego: Academic Press, 1993.

MOREIRA, M. F. D. S. ANÁLISE TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR COMPOSTO DE CAVIDADES V PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA. **Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 2009.

MSPC. Alumínio: Propriedades. <http://www.mspc.eng.br/quim1/quim1_013.shtml#prop>, 2010.

MUNNER, T. **Solar radiation and Daylight Models for the Energy Efficient Desig of Building**. Oxford: Architectural Press, 1997.

NAUTILUS. Alumínio: Propriedades. <<http://nautilus.fis.uc.pt/st2.5/scenes-p/elem/e01395.html>>, 2010.

NIEMELÄ; RÄISÄNEN; SAVIJÄRVI. Comparison of surface radiative flux parameterization part i: longwave radiation. **Atmospheric Research** 58, 2001. 1-18.

NREL. National Renewable Energy Laboratory: U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2010. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/rredc/smarts/about.html>>. Acesso em: 15 mar. 2009.

OBRAWEB, 2011. Acesso em: 1 jun. 2011. <http://www.obraweb.com.br/materiais-basicos/cobertura-e-caixas-dagua/telhas-de-fibrocimento-varios-modelos>.

OITICICA, M. L. G. R. et al. **Refletância de cores em superfícies construtivas**. Anais do ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Salvador: [s.n.]. 2000.

OLIVEIRA, C. X. D. **Estimativas da Emissividade e Temperatura da superfície terrestre: uma análise comparativa**. [S.l.]: [s.n.], 2003.

ORDENES; LAMBERTS; GÜTHS. TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA ENVOLVENTE DA EDIFICAÇÃO, Florianópolis, Março 2005.

PACUBI, O. et al. **Mecânica dos fluidos: algumas considerações sobre a viscosidade**. Anais do XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física (SNEF). Rio de Janeiro: CEFET-RJ. 2005. Disponível em:.

PALMER, J. M. The Measurement of Transmission, Absorption, Emission and Reflection. In: BASS, M. **Handbook of Optics**. 2a. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994.

PARKER. Theoretical evaluation of the NightCool Nocturnal Radiation Cooling Concept. **http:** //www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/FSEC-CR-1502-05.pdf, Abril 2005.

PARKER et al. Measured Cooling Energy Saving From Reflective Roofing Systems in Florida: Field and Laboratory Research Results. **http:** //www.fsec.ucf.edu/en/publications/html/fsec-pf-293-95/index.htm, 1997.

PARKER, D.; SHERWIN, J. Comparative Summer Attic Thermal Performance of Six Roof Constructions. **http:** //www.fsec.ucf.edu/en/publications/html/FSEC-PF-337-98/, 1998.

PARKER, D.; SHERWIN, J.; SONNE, J. Measured performance of a reflective roofing system in a Florida commercial building. **ASHRAE Technical Data Bulletin**, v. v.14, n.2, 1998.

PERALTA, G. **Desempenho térmico de telhas:** análise de monitoramento e normatização específica. São Carlos: [s.n.], 2006.

PERIN, A. L. **Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade.** [S.l.]: [s.n.], 2009.

REYNOLDS, D. J.; MORRISON, G. L.; BEHNIA, M. Combined Radiation and Natural Convection in A Trapezoidal Cavity Absorber. **http:** //solar1.mech.unsw.edu.au/glm/papers/7AHMTC_reynolds.pdf, 2010.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima:** acondicionamento térmico natural. Porto Alegre: Luzzatto, 1986.

RORIZ. **LEPIC.** [S.l.]: [s.n.], 2010. Software.

RORIZ. **PSICROM 1.0.** [S.l.]: [s.n.].

RORIZ, M. PSICROM 1.0.. **São Carlos:** Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil (software, 2003.

RORIZ, M. **Conforto Térmico E Lumínico no Ambiente Construído Módulo 1: Térmica.** São Carlos: [s.n.], 2006. Apostila da Disciplina.

RORIZ, M. **Relatório Fapesp.** São Carlos. 2009.

RORIZ, M.; DORNELLES, K. A. **Identificação da absortância solar de superfícies opacas a partir de imagens digitalizadas.** ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUIDO, 8., ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUIDO, 4. Maceió: [s.n.]. 2005.

RORIZ, V. F. **REFRIGERAÇÃO EVAPORATIVA POR ASPERSÃO EM TELHAS DE FIBROCIMENTO: ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL.** SÃO CARLOS: [s.n.], 2007.

RORIZ, V. F. **Refrigeração Evaporativa por Aspersão em Telhas de Fibrocimento:** Estudo Teórico e Experimental. São Carlos: [s.n.], 2007.

RORIZ, V. F. **Refrigeração Evaporativa por Aspersão em Telhas de Fibrocimento:** Estudo Teórico e Experimental. São Carlos: [s.n.], 2007.

RORIZ, V. F.; DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. **Fatores determinantes da absortância solar de superfícies opacas.** ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE,9, ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE,5. Ouro Preto: [s.n.]. 2007.

SANTANA, E. G. A radiação do corpo negro. <<http://www.fisica.ufs.br/CorpoDocente/egsantana/cuantica/negro/radiacion/radiacion.htm>>, 2010.

SANTOS, L. **Termografia em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas**. Itajubá: [s.n.], 2006.

SEKER, D. Z.; TAVIL, A. Ü. Evaluation of exterior building surface roughness degrees by photogrammetric methods. **Building and Environment**, 31, 1996. 393-398.

SHORE'S, 2007. Disponível em: <<http://www.esva.net/~lights/turb03.jpg>>. Acesso em: 23 jul. 07.

SIEGEL, R.; HOWELL, J. **Thermal Radiation Heat Transfer**. [S.l.]: [s.n.], 2002.

SIMIONI ET AL. **Desempenho térmico de coberturas**: uma análise utilizando diferenças finitas. Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído, 7, conferência latino-americana sobre conforto e desempenho energético de edificações. Curitiba: [s.n.]. 2003. p. 3.

SMARTS. **http://www.nrel.gov/rredc/smarts/download.html**, 2010.

SOUZA, R. **Gestão da qualidade: tópicos avançados**, São Paulo, 2003.

SPARROW, E. M.; CESS, R. D. **Radiation Heat Transfer**. London: Hemisphere Publishing Corp, 1978.

SPARROW, E. M.; JONSSON, V. K. Radiant Emission Characteristics of Diffuse Conical Cavities. **Journal of the optical society of america**, 53, 1963. 816-821.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS A, M.; AKBARI, H. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. **Energy and Buildings, Vol 39, Issue 11**, p. 1167, 2007.

TEIXEIRA, C. F. B. E. A. **Desempenho térmico de técnicas passivas em coberturas – resfriamento evaporativo e radiante**. Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído, ENCAC 8, conferência latino-americana sobre conforto e desempenho energético de edificações. Maceió, Al: ELACAC. 2005. p. 2327-2328.

TOULOUKIAN; DEWITT. Thermal radiative properties, vol. 7, metallic elements and alloys, 1970.

UDO, S. O. On the relationship between downward infrared sky radiation and clearness index. **Global Journal of Pure and Applied Science**, 1999. 427-430.

UFRGS. **Espectro Solar**. [S.l.]: [s.n.], 2010. Software.

VIRIAL. **http:** //www.virial.com/steep320.html, 2010.

WUNDERGROUND. **http:**
//www.wunderground.com/history/airport/SBRP/2010/4/22/DailyHistory.html?req_city=N
A&req_state=NA&req_statename=NA, 2010.

APÊNDICE A: AVALIAÇÃO DA EMITÂNCIA

Por definição, a emitância de uma superfície é a razão entre a radiação emitida por ela (E) e a emitida por um corpo negro (E_{CN}) à mesma temperatura:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_{CN}} \quad (\text{Eq. 3-5})$$

Na Figura A-1 a superfície 2 é um plano imaginário que fecha a cavidade e intercepta toda a radiação emitida pela superfície 1.

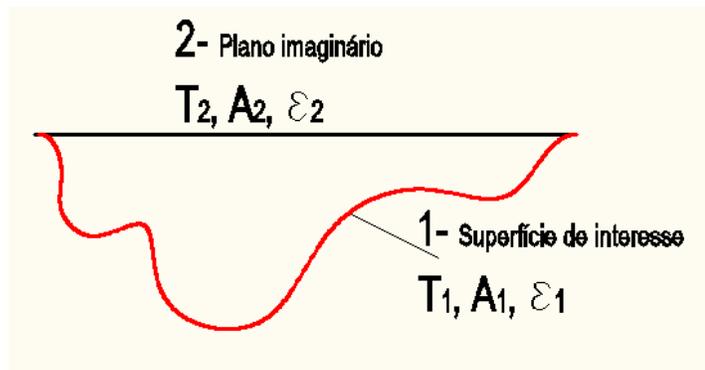


Figura A-1: Cavidade

A emitância efetiva da cavidade 1 pode ser definida como a razão entre a radiação emitida por ela e que passa pela superfície 2 (q_{12}) e a radiação emitida por um corpo negro (E_{CN}), à mesma temperatura:

$$\varepsilon_e = \frac{q_{12}}{E_{CN}} \quad (\text{Eq. A-1})$$

E, portanto:

$$\varepsilon_e = \frac{q_{12}}{A_2 \cdot \sigma \cdot T_1^4} \quad (\text{Eq. A-2})$$

Conforme o capítulo 3.4, o fluxo de calor entre a superfície 1 e o plano 2 da cavidade representado pela Figura A-1 pode ser calculado pela equação 3-25.

$$q_{12} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} + \frac{1}{A_1 \cdot FF_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot A_2}} \quad (\text{Eq. 3-25})$$

De 3-25 e A-2 vem:

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} \right) + \frac{1}{A_1 \cdot FF_{12}} + \left(\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot A_2} \right)} \cdot A_2 \cdot \sigma \cdot T_1^4 \quad (\text{Eq. A-3})$$

Como o plano imaginário 2 não emite energia, é possível considerá-lo como um corpo negro a 0 K. Assim $\varepsilon_2 = 1$ e $T_2 = 0$ K.

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma \cdot T_1^4}{\left(\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} \right) + \frac{1}{A_1 \cdot FF_{12}} + (0)} \cdot A_2 \cdot \sigma \cdot T_1^4 \quad (\text{Eq. A-4})$$

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma \cdot T_1^4}{\left(\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} \right) + \frac{1}{A_1 \cdot FF_{12}}} \cdot \frac{1}{A_2 \cdot \sigma \cdot T_1^4} \quad (\text{Eq. A-5})$$

$$\varepsilon_e = \frac{1}{\left(\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} \right) + \frac{1}{A_1 \cdot FF_{12}}} \cdot \frac{1}{A_2} \quad (\text{Eq. A-6})$$

Das propriedades do Fator de Forma

$$A_1 \cdot FF_{12} = A_2 \cdot FF_{21} \quad (\text{Eq. 3-12})$$

$$E, \text{ como } FF_{21} = 1 \quad (\text{Eq. 3-14})$$

$$A_1 \cdot FF_{12} = A_2 \quad (\text{Eq. 3-17})$$

Assim:

$$\varepsilon_e = \frac{1}{\left(\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1}\right) + \frac{1}{A_2}} \cdot \frac{1}{A_2} \quad (\text{Eq. A-7})$$

$$\varepsilon_e = \frac{1}{\left(\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1}\right) \cdot A_2 + 1} \quad (\text{Eq. A-8})$$

$$\varepsilon_e = \frac{1}{\left(\frac{A_2 - \varepsilon_1 \cdot A_2}{\varepsilon_1 \cdot A_1}\right) + 1} \quad (\text{Eq. A-9})$$

$$\varepsilon_e = \frac{1}{\left(\frac{A_2 - \varepsilon_1 \cdot A_2 + \varepsilon_1 \cdot A_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1}\right)} \quad (\text{Eq. A-10})$$

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1 \cdot A_1}{A_2 - \varepsilon_1 \cdot A_2 + \varepsilon_1 \cdot A_1} \quad (\text{Eq. A-11})$$

A partir desta equação (4-35), é possível substituir a superfície 1 pelo plano 2 nos cálculos dos fluxos de radiação com o entorno. Os exemplos a seguir indicam a coerência.

Ex 1: Superfície perfeitamente plana ($A_2 = A_1 \therefore \varepsilon_e = \varepsilon_1$)

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1 \cdot A_1}{A_1 - \varepsilon_1 \cdot A_1 + \varepsilon_1 \cdot A_1} \rightarrow \varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1 \cdot A_1}{A_1} = \varepsilon_1 \quad (\text{c.q.d.})$$

Ex 2: Superfície A_2 muito pequena ($A_2 \rightarrow 0 \therefore \varepsilon_e = 1$)

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1 \cdot A_1}{A_2 - \varepsilon_1 \cdot A_2 + \varepsilon_1 \cdot A_1} \rightarrow \varepsilon_e \approx \frac{\varepsilon_1 \cdot A_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} = 1 \quad (\text{c.q.d.})$$

APÊNDICE B: EMITÂNCIA DA CAVIDADE ESFÉRICA

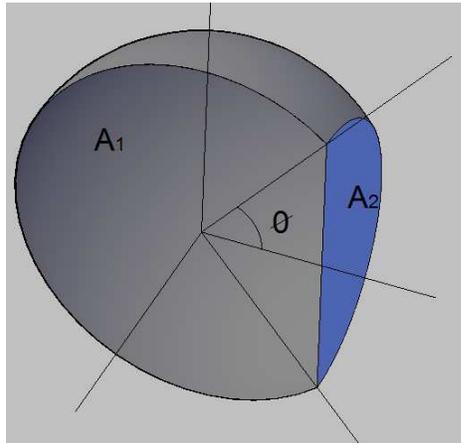
Da equação 4-32

$$\varepsilon_E = \frac{\varepsilon_1}{1 - (1 - \varepsilon_1) + FF_{12} \cdot (1 - \varepsilon_1)} \quad (\text{Eq. 4-32})$$

$$\varepsilon_E = \frac{\varepsilon_1}{1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - FF_{12})} \quad (\text{Eq. B-1})$$

$$\varepsilon_E = \frac{\varepsilon_1}{1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot FF_{11}} \quad (\text{Eq. B-2})$$

Para a esfera



$$A_1 = 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot (1 + \cos \phi) \quad (\text{Eq. B-3})$$

$$A_2 = \pi \cdot R^2 \cdot \sin^2 \phi \quad (\text{Eq. B-4})$$

$$F_{12} = \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \quad \text{e} \quad F_{11} = 1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)$$

$$F_{12} = \left(\frac{\pi.R^2.\text{sen}^2\phi}{2.\pi.R^2.(1+\cos\phi)} \right) \quad (\text{Eq. B-5})$$

$$F_{12} = \left(\frac{\text{sen}^2\phi}{2.(1+\cos\phi)} \right) \quad (\text{Eq. B-6})$$

$$F_{12} = \left(\frac{(1-\cos^2\phi)}{2.(1+\cos\phi)} \right) \quad (\text{Eq. B-7})$$

$$F_{12} = \left(\frac{(1-\cos\phi)(1+\cos\phi)}{2.(1+\cos\phi)} \right) \quad (\text{Eq. B-8})$$

$$F_{12} = \left(\frac{(1-\cos\phi)}{2} \right) \quad (\text{Eq. B-9})$$

$$F_{11} = 1 - \left(\frac{(1-\cos\phi)}{2} \right) \quad (\text{Eq. B-10})$$

$$F_{11} = \left(\frac{2 - (1-\cos\phi)}{2} \right) \quad (\text{Eq. B-11})$$

$$F_{11} = \left(\frac{2 - 1 + \cos\phi}{2} \right) \quad (\text{Eq. B-12})$$

$$F_{11} = \left(\frac{1 + \cos\phi}{2} \right) \quad (\text{Eq. B-13})$$

$$\varepsilon_E = \frac{\varepsilon_1}{1 - (1 - \varepsilon_1) \left(\frac{1 + \cos \phi}{2} \right)}$$

equação 3-26 (c.q.d.)

APÊNDICE B: EMITÂNCIA DA CAVIDADE ESFÉRICA

APÊNDICE C: DEDUÇÃO DA ABSORTÂNCIA EFETIVA

Conforme apresentado no item 3.5 a parcela de energia absorvida em uma superfície é função não só de sua absorvidade, mas também de sua forma, pois os raios refletidos em um ponto podem incidir sobre outro ponto desta mesma superfície.

Entretanto, os modelos de cálculo descritos naquele capítulo (3.5) são integrações de geometrias específicas, sendo portanto limitados a formas pré-determinadas. Descreve-se neste capítulo um método alternativo para a estimativa deste efeito.

Para uma superfície opaca e fosca, como a grande maioria dos materiais da construção civil, assume-se que a reflexão seja difusa, ou seja, que ocorra com a mesma intensidade em todas as direções. Neste caso, a absorptância corrigida (α) pode ser estimada pelo procedimento apresentado a seguir. Roriz (2007) apresentou a Tabela C-1 e as equações C-1 e C-3. Esta tabela indica as equações das parcelas incidente, absorvida e refletida, desde a primeira incidência até a enésima inter-reflexão.

Tabela C-1: Correção da absorptância por efeito da forma (RORIZ, 2007)

	Irradiância	Parcela Absorvida	Parcela Refletida
Direta	I_s	$\alpha_0 \cdot I_s$	$I_s \cdot \rho_0$
1ª Inter-Ref.	$FF_{11} \cdot I_s \cdot \rho_0$	$\alpha_0 \cdot FF_{11} \cdot I_s \cdot \rho_0$	$FF_{11} \cdot I_s \cdot \rho_0^2$
2ª Inter-Ref.	$FF_{11}^2 \cdot I_s \cdot \rho_0^2$	$\alpha_0 \cdot FF_{11}^2 \cdot I_s \cdot \rho_0^2$	$FF_{11}^2 \cdot I_s \cdot \rho_0^3$
3ª Inter-Ref.	$FF_{11}^3 \cdot I_s \cdot \rho_0^3$	$\alpha_0 \cdot FF_{11}^3 \cdot I_s \cdot \rho_0^3$	$FF_{11}^3 \cdot I_s \cdot \rho_0^4$
nª Inter-Ref.	$FF_{11}^n \cdot I_s \cdot \rho_0^n$	$\alpha_0 \cdot FF_{11}^n \cdot I_s \cdot \rho_0^n$	$FF_{11}^n \cdot I_s \cdot \rho_0^{n+1}$

O total da energia absorvida pela superfície (E_a) será o produto da irradiância pela absorptância corrigida, produto este que corresponde à soma das parcelas absorvidas em cada incidência.

$$E_a = \alpha \cdot I_s = (\alpha_0 \cdot I_s) + (\alpha_0 \cdot FF_{11} \cdot I_s \cdot \rho_0) + (\alpha_0 \cdot FF_{11}^2 \cdot I_s \cdot \rho_0^2) + (\alpha_0 \cdot FF_{11}^3 \cdot I_s \cdot \rho_0^3) + \dots + (\alpha_0 \cdot FF_{11}^n \cdot I_s \cdot \rho_0^n) \quad (\text{Eq. C-1})$$

APÊNDICE C: DEDUÇÃO DA ABSORTÂNCIA EFETIVA

$$E_a = \alpha \cdot I_s = \sum_{i=0}^n \alpha_0 \cdot FF^i \cdot \rho_0^i \cdot I_s \quad (\text{Eq. C-2})$$

Portanto:

$$\alpha = \sum_{i=0}^n \alpha_0 \cdot FF^i \cdot \rho_0^i \quad (\text{Eq. C-3})$$

Onde:

α_0 = Absortividade

α = Absortância da superfície (incluindo o efeito da forma)

ρ_0 = Refletividade do material

FF_{11} = Fator de forma da superfície em relação a ela própria

I_s = Irradiância na superfície

E_a = Energia absorvida

n = Número de inter-reflexões analisado

É possível dar continuidade a este raciocínio, através de uma série geométrica, ou seja, a soma dos infinitos termos de uma progressão geométrica:

$$\sum_{n=0}^{\infty} r^n = 1 + r + r^2 + r^3 + \dots \quad (\text{Eq. C-4})$$

Esta série é convergente se e somente se $|r| < 1$ e, neste caso, a soma vale (LEITHOLD, 1986):

$$\sum_{n=0}^{\infty} a.r^n = a \cdot \frac{1}{1-r} \quad (\text{Eq. C-5})$$

Onde "a" é o termo inicial da série.

Assim, a equação C-3, pode ser representada por uma série em que o incremento (r) é dado por:

$$r = (FF_{11} \cdot \rho_0) \quad (\text{Eq. C-6})$$

Como FF_{11} e ρ_0 são ambos > 0 e < 1 , seu produto invariavelmente será > 0 e < 1 e, portanto, a condição de convergência é satisfeita e a série tende para o valor dado pela equação C-7.

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 - (FF_{11} \cdot \rho_0)} \quad (\text{Eq. C-7})$$

Considerando a equação 3-7, vem:

$$\alpha_0 + \rho_0 = 1 \quad (\text{Eq. 3-7})$$

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 - FF_{11} + FF_{11} \cdot \alpha_0} \quad (\text{Eq. C-8})$$

Os exemplos a seguir indicam a coerência desta equação:

Ex 1: Superfície perfeitamente plana ($\alpha = \alpha_0$)

$$FF_{11} = 0 \text{ e } FF_{12} = 1$$

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 - FF_{11} + FF_{11} \cdot \alpha_0} \rightarrow \alpha = \alpha_0 \text{ (c.q.d.)}$$

Ex 2: Superfície interna de um sólido fechado ($\alpha = 1$)

$$FF_{11} = 1 \text{ e } FF_{12} = 0$$

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 - FF_{11} + FF_{11} \cdot \alpha_0} \rightarrow \alpha = \frac{\alpha_0}{1 - 1 + 1 \cdot \alpha_0} \rightarrow \alpha = 1 \quad (\text{c.q.d.})$$

Ex 3: Superfície de alta absorvência ($\alpha_0 \rightarrow 1 \therefore \alpha \rightarrow 1$)

$$\alpha = \frac{1}{1 - FF_{11} + FF_{11} \cdot 1} = 1 \quad (\text{c.q.d.})$$

Ex 4: Superfície de alta refletância ($\alpha_0 \rightarrow 0 \therefore \alpha \rightarrow 0$)

$$\alpha = \frac{0}{1 - FF_{11} + FF_{11} \cdot 0} = 0 \quad (\text{c.q.d.})$$

APÊNDICE D: FLUXOS DE CALOR

D.1 FLUXO DE CALOR POR CONDUÇÃO

Para o cálculo do fluxo de calor por condução (q_{cond} , em W), considerando-o unidimensional, Incropera e Dewitt (1996) utilizam a equação D-1:

$$q_{cond} = \frac{A.k.(T_{si} - T_{se})}{L} \quad (\text{Eq. D-1})$$

Onde:

A = Área da superfície (m^2)

k = Condutividade térmica do material (W/m.K)

Tse = Temperatura superficial externa ($^{\circ}C$)

Tsi = Temperatura superficial interna ($^{\circ}C$)

L = Espessura da amostra (m)

O Número de Biot

Segundo Incropera e Dewitt (1996), uma referência para o método de cálculo da condução em um sólido sob efeito de convecção é o número de Biot (Bi), a razão entre a resistência térmica interna do sólido e a resistência térmica da camada limite (Figura D-1). Definido por Eq. D-2:

$$Bi = \frac{hc.L_c}{k} \quad (\text{Eq. D-2})$$

Onde:

hc = Coeficiente de convecção (W/($m^2.K$))

L_c = Comprimento característico (m)

k = Condutividade térmica do material (W/m.K)

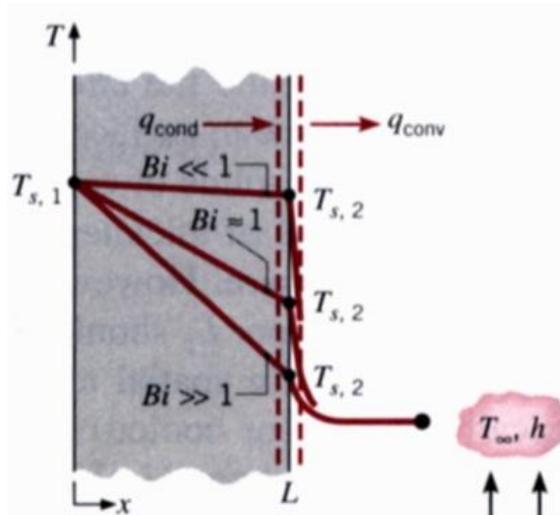


Figura D-1: O número de Biot

Para valores de Bi menores que 0,1 é razoável assumir que a temperatura ao longo do sólido seja uniforme (INCROPERA e DEWITT, 1996), simplificando os cálculos. Como no caso dos procedimentos propostos nos itens 5.1 e 6.1.

D.2 FLUXO DE CALOR POR CONVECÇÃO

O fluxo de calor por convecção (q_{conv} , em W), entre a superfície superior de uma amostra e o ar ambiente, pode ser estimado através da equação D-3 (CHIASSON et al., 2000).

$$q_{conv} = hc.A.(T_{bs} - T_{sup}) \quad (\text{Eq. D-3})$$

Onde:

$$hc = \frac{Nu.k}{L} \quad (\text{Eq. D-4})$$

h_c = Coeficiente de convecção ($W/(m^2 K)$)

Nu = Número de Nusselt (adimensional)

k = Condutividade do ar ($W/m.K$)

L = Comprimento característico (m, equações D-17 e D-36)

Considera-se que exista uma película de ar em contato com a superfície, com a qual esta efetivamente troca calor e cuja temperatura é a média entre as temperaturas da superfície e do ar (Eq. D-5). As propriedades do ar necessárias aos cálculos deste fluxo, são estimadas a partir desta temperatura.

$$T_p = \frac{T_{bs} + T_{sup}}{2} \quad (\text{Eq. D-5})$$

O CIBSE (The Chartered Institution of Building Services) apresenta valores simplificados para os coeficientes de convecção externa e interna para edificações (equações D-6 e D-7, respectivamente (CIBS, 1980) apud (BUENO, 1994)).

$h_c = 16.7 [W/m^2 K]$ para convecção externa. (Eq. D-6)

$h_c = 9.1 [W/m^2 K]$ para convecção interna. (Eq. D-7)

Estes valores entretanto, podem não ser adequados ao caso brasileiro, uma vez que as temperaturas ambientes e as velocidades do vento no continente europeu são bastante diferentes das observadas no Brasil.

O número de Nusselt:

O Número de Nusselt (Nu) é um parâmetro adimensional do gradiente de temperatura na superfície (INCROPERA e DEWITT, 1996) e representa a relação entre o fluxo de calor que ocorre por condução e por convecção. Assim, quando $Nu = 1$, o fluxo é puramente condutivo, ao passo que, para altos valores de Nu , o fluxo por convecção cresce, (BEJAN, 1990).

O número de Nusselt (Nu) está relacionado a outros parâmetros adimensionais, tais como o número de Reynolds (Re), o número de Prandtl (Pr) e o número de Rayleigh (Ra), sendo este último o produto do número de Prandtl (Pr) pelo número de Grashof (Gr).

Considerando-se uma placa horizontal aquecida, para convecção livre na superfície superior, Incropera e Dewitt (1996) recomendam as equações D-8 e D-9:

$$Nu = 0,54Ra^{1/4} \quad (10^4 < Ra < 10^7 \text{ – fluxo laminar}) \quad (\text{Eq. D-8})$$

$$Nu = 0,15Ra^{1/3} \quad (10^7 > Ra > 10^{11} \text{ – fluxo turbulento}) \quad (\text{Eq. D-9})$$

Caso a superfície esteja a uma temperatura inferior à do ambiente ($T_{sup} < T_{BS}$) então, para convecção livre, adota-se a equação D-10 (INCROPERA e DEWITT, 1996):

$$Nu = 0,27Ra^{1/4} \quad (10^5 < Ra < 10^{10}) \quad (\text{Eq. D-10})$$

Para convecção forçada sobre uma placa plana, valem as equações D-11 e D-12 (INCROPERA e DEWITT, 1996):

$$Nu = 0,664.Re^{1/2}.Pr^{1/3} \quad (Pr \geq 0,6: \text{Fluxo laminar}) \quad (\text{Eq. D-11})$$

$$Nu = (0,037.Re^{4/5}-A).Pr^{1/3} \quad (Re \leq 10^8, 0,6 \leq Pr \leq 60 : \text{Turbulento}) \quad (\text{Eq. D-12})$$

Onde:

$$A = 0,037.Re_{x,c}^{4/5} - 0,664.Re_{x,c}^{1/2}$$

Para o Reynolds crítico ($Re_{x,c}$) de 5.10^5 , A é igual a 871

Para fluxo completamente turbulento $A = 0$ e adota-se a equação D-13:

$$Nu = (0,037.Re^{4/5}).Pr^{1/3} \quad (Re \leq 10^8, 0,6 \leq P \leq 60: \text{Turbulento}) \quad (\text{Eq. D-13})$$

Para placas verticais e convecção natural considera-se as equações D-14, para fluxo turbulento, e D-15 para fluxo laminar (INCROPERA e DEWITT, 1996).

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387.Ra^{1/6}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/16}\right]^{3/27}} \right\}^2 \quad (\text{Eq. D-14})$$

$$Nu = 0,68 + \frac{0,67.Ra^{1/4}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (\text{Ra} < 10^9: \text{Fluxo laminar}) \quad (\text{Eq. D-15})$$

O número de Reynolds:

O número de Reynolds (Re), razão entre as forças de inércia e de viscosidade, aplica-se à convecção forçada e indica se o fluxo acontece em regime laminar ou turbulento. Para pequenos valores de Re, as forças de viscosidade são relativamente maiores que as de inércia e minimizam as perturbações do fluxo, estabelecendo regime laminar. Com o aumento de Re, as perturbações do fluxo crescem, tornando-o turbulento. O número de Reynolds é calculado pela equação D-16 (INCROPERA e DEWITT, 1996).

$$Re = \frac{VV.L}{\nu} \quad (\text{Eq. D-16})$$

Onde VV é a velocidade do ar (m/s), ν é a viscosidade cinemática (m²/s) e L é o comprimento característico (m) que, para convecção forçada ($L = L_F$) é adotado como a raiz da área da superfície (Eq. D-17), equivalendo ao comprimento percorrido pelo vento, admitido como paralelo a uma aresta.

$$L_F = \sqrt{A} \quad (\text{Eq. D-17})$$

Para uma placa plana, o regime é considerado turbulento quando $Re > 5.10^5$ e laminar em caso contrário.

A Viscosidade Cinemática (ν , em m²/s) é a razão entre a viscosidade dinâmica (μ , em Pa.s) e a densidade do fluido (ρ , em kg/m³) (ASHRAE, 2001).

$$\nu = \mu/\rho \quad (\text{Eq. D-18})$$

A Viscosidade Dinâmica (μ), ou simplesmente viscosidade, é uma medida da resistência de um fluido contra sua deformação. Descreve a resistência do fluido ao escoamento (PACUBI et al., 2005).

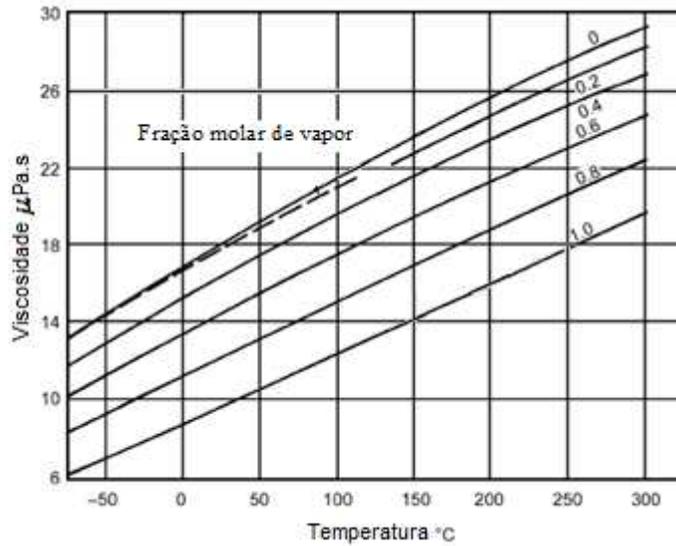


Figura D-2: Viscosidade do ar úmido em função da temperatura e da fração molar de vapor (ASHRAE, 2001)

A viscosidade dinâmica (μ) pode ser calculada pela regressão a seguir (Eq. D-19), obtida a partir da Figura D-2 (RORIZ, 2007)

$$d_1 = 1 + e^{\left(\frac{X_w - 0.84393}{0.28934}\right)}$$

$$A = 3.7829 + \frac{13.9471}{d_1}$$

$$d_2 = 1 + e^{\left(\frac{X_w - 0.63305}{0.15642}\right)}$$

$$B = 0.035525 + \frac{0.011023}{d_2}$$

$$\mu = \frac{A + B \cdot T_p}{10^6} \quad (\text{Pa.s}) \quad (\text{Eq. D-19})$$

Onde:

T_p = Temperatura da película ($^{\circ}\text{C}$)

X_w = Fração molar de vapor, calculada pela equação D-20 (ASHRAE, 2001).

$$X_w = \frac{P_w}{P} \quad (\text{Eq. D-20})$$

Sendo:

P = Pressão atmosférica (Pa)

P_w = Pressão do vapor de água no ar úmido (Pa)

$$P_w = \phi \cdot P_{ws} \quad (\text{Eq. D-21})$$

Onde ϕ é a umidade relativa e P_{ws} é a pressão de vapor saturante (em Pa), calculada com a temperatura da película ($T = T_p$), em K, pela equação D-23, válida para o intervalo entre 0 e 200°C (ASHRAE, 2001).

$$\ln(P_{ws}) = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10} \cdot T + C_{11} \cdot T^2 + C_{12} \cdot T^3 + C_{13} \cdot \ln(T) \quad (\text{Eq. D-22})$$

Ou:

$$P_{ws} = e^{\frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10} \cdot T + C_{11} \cdot T^2 + C_{12} \cdot T^3 + C_{13} \cdot \ln(T)} \quad (\text{Eq. D-23})$$

Onde:

$$\begin{aligned} C_8 &= -5.8002206E+03 \\ C_9 &= 1.3914993E+00 \\ C_{10} &= -4.8640239E-02 \\ C_{11} &= 4.1764768E-05 \\ C_{12} &= -1.4452093E-08 \\ C_{13} &= 6.5459673E+00 \end{aligned}$$

A pressão parcial de vapor na película também pode ser calculada em função da taxa de umidade (ω) e da pressão atmosférica (P), aplicando-se a equação D-24 (RORIZ, 2007).

$$P_w = \frac{\left(\frac{\omega}{0.62198}\right).P}{\left(1 + \left(\frac{\omega}{0.62198}\right)\right)} \quad (\text{Eq. D-24})$$

A densidade do ar úmido na película (ρ) é o inverso do volume específico (v).

$$\rho = 1/v \quad (\text{Eq. D-25})$$

O volume específico pode ser calculado pela equação D-26 (ASHRAE, 2001).

$$v = 0,2871(T_p + 273,15).(1 + 1,6078.\omega) / P \quad (\text{Eq. D-26})$$

Onde:

ρ = densidade do ar úmido (kg/m³)

v = Volume específico (m³/kg)

T_p = Temperatura da película (°C)

P = Pressão atmosférica (kPa)

ω = Taxa de umidade do ar da película (kg vapor d'água/kg ar)

A taxa de umidade do ar na película é considerada igual à do ar ambiente, desde que não ultrapasse a taxa de saturação para a temperatura da película, condição limite desta variável. A taxa de saturação (W_s , em Kg de vapor por kg de ar seco), é calculada pela equação D-27 (ASHRAE, 2001).

$$W_s = 0,62198 \cdot \frac{f \cdot P_{ws}}{P - P_{ws}} \quad (\text{Eq. D-27})$$

Onde f é um fator de correção relacionado ao efeito de gases dissolvidos no ar, ao efeito da pressão nas propriedades do ar e ao efeito das forças intermoleculares nas

propriedades de ar úmido, sendo calculado pela seguinte equação de regressão, obtida através de dados publicados pela ASHRAE (RORIZ, 2007).

$$f = y_0 + A_1 \cdot e^{\frac{-TBS}{T_1}} \quad (\text{Eq. D-28})$$

Sendo:

$$y_0 = 1.03912 - 0.03995 \cdot e^{\frac{-P}{797.403}}$$

$$A_1 = 2.746 \cdot 10^6 \cdot e^{\frac{P}{126.233}}$$

$$T_1 = 29.589 + 0.02719 \cdot e^{\frac{P}{136.19}}$$

A taxa de umidade do ar na temperatura ambiente (em kg de vapor por kg de ar seco) pode ser calculada através da equação D-29 (RORIZ, 2007).

$$\omega = \omega_s \cdot \frac{\phi \cdot (1 - Z)}{(1 - \phi \cdot Z)} \quad (\text{Eq. D-29})$$

Onde:

$$Z = \left(f \cdot \frac{P_{ws}}{P} \right)$$

O número de Prandtl:

O número de Prandtl (Pr) é definido pela razão entre a viscosidade cinemática (ν) e a difusividade térmica (α), correspondendo à relação entre a camada limite de

velocidades e a camada limite térmica. Se Pr é muito pequeno, a velocidade de propagação do calor é maior que a velocidade do fluido.

Para o cálculo do número de Prandtl, utiliza-se as equações D-30 ou D-31 (INCROPERA e DEWITT, 1996).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{Eq. D-30})$$

Ou

$$Pr = \frac{C_{pm} \cdot \mu}{K} \quad (\text{Eq. D-31})$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica, k é a Condutividade do ar úmido e C_{pm} é o Calor Específico do ar úmido na película (em J/kg.K), calculado pela equação D-32 (ASHRAE, 2001).

$$C_{pm} = (1 + W_p) \cdot C_p \quad (\text{Eq. D-32})$$

Onde, W_p é a taxa de umidade do ar na película (em kg_v/kg_{as}), considerada igual à do ar ambiente (W_{TBS}), desde que esta não ultrapasse a taxa de saturação para a temperatura da película (W_{sp}). No caso de W_{TBS} ser maior que W_{sp} , haverá condensação sobre a superfície e $W_p = W_{sp}$.

c_p é o calor específico do ar seco (em J/kg.K), calculado pela seguinte equação de regressão, obtida por Roriz (2007) a partir de dados publicados por Incropera e Dewitt (1996).

$$c_p = 1000 \cdot (1,00373 + 5,3791E-6 \cdot T_p + 7,3012E-7 \cdot T_p^2 - 1,3447E-9 \cdot T_p^3 + 1,2303E-12 \cdot T_p^4) \quad (\text{Eq. D-33})$$

A Condutividade do ar úmido na película (k) é calculada pela equação D-34 obtida por regressão a partir da Figura D-3 (RORIZ, 2007).

$$k_{aP} = A + B.T_p \quad (\text{Eq. D-34})$$

Onde:

$$A = 0,013302 + \frac{0,011397}{1 + e^{\frac{X_w - 0,77201}{0,18919}}}$$

$$B = 7,73E - 5 + (6,833E - 6.X_w) - (1,25E - 5.X_w^2) + (4,167E - 6.X_w^3)$$

k_{aP} = Condutividade do ar úmido na película (W/(m.K))

T_p = Temperatura da película (superfície molhada da telha) (° C)

X_w = Fração molar de vapor. (equação D-20)

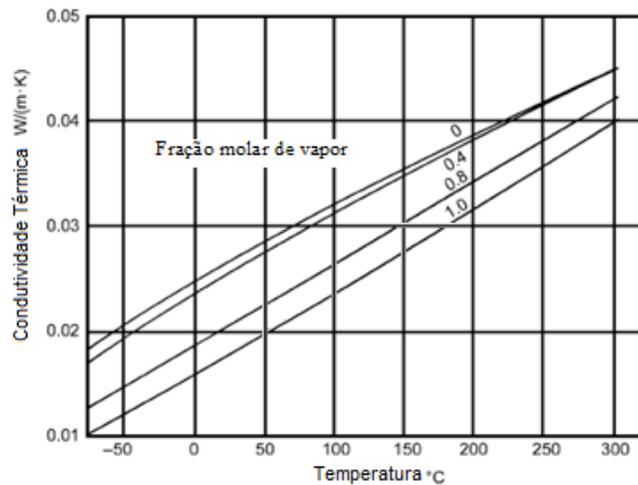


Figura D-3: Condutividade do Ar Úmido em Função da Temperatura e da Fração Molar de Água (adaptado de, (ASHRAE- PSYCHROMETRICS, 2001).

O número de Grashof:

O número de Grashof (Gr) é a razão entre as forças de empuxo e as de viscosidade. Tem o mesmo papel na convecção natural que o número de Reynolds

(Re) na convecção forçada. É calculado pela equação D-35 (INCROPERA e DEWITT, 1996).

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot (T_p - T_{bs})}{\nu^2} \quad (\text{Eq. D-35})$$

Onde a aceleração da gravidade (g) é adotada como $9,807 \text{ (m/s}^2\text{)}$, o comprimento característico ($L = L_N$) é admitido, para o caso de convecção natural, como a razão entre a área (A) e o perímetro (Per) da amostra (INCROPERA e DEWITT, 1996).

$$L_N = \frac{A}{Per} \quad (\text{Eq. D-36})$$

O coeficiente de expansão volumétrica (β) é calculado considerando o ar como gás perfeito, através da equação D-37 (INCROPERA e DEWITT, 1996).

$$\beta = \frac{1}{(T_p + 273,15)} \quad (\text{Eq. D-37})$$

O número de Rayleigh:

O número de Rayleigh (Ra) é definido como o produto do número de Grashof (Gr) pelo número de Prandtl (Pr). Indica a condição de transição de um fluxo laminar para turbulento (Figura D-4). Para placas verticais, como na Figura D-5, a transição acontece no valor crítico de Ra de aproximadamente 10^9 .



Figura D-4: Regimes laminar e turbulento (SHORE'S, 2007).

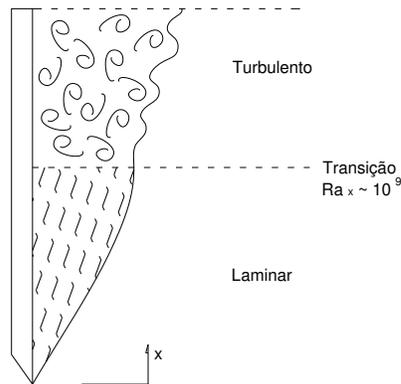


Figura D-5: Número de Rayleigh e Transição Laminar-Turbulento

(adaptado de INCROPERA e DEWITT, 1996).

Portanto, considerando o fluxo de calor na película (INCROPERA e DEWITT, 1996).

$$Ra = Gr.Pr = \frac{g.\beta.(T_p - T_{bs}).L^3}{\nu.\alpha} \quad (\text{Eq. D-38})$$

O coeficiente de convecção (h_c) é calculado para ambos os casos, tanto convecção forçada quanto livre e o número de Nusselt calculado para o maior deles (CHIASSON, SPITLER, *et al.*, 2000).

D.3 FLUXO DE CALOR SOLAR

O ganho de calor por radiação solar pela superfície pode ser estimado pela equação D-39 (CHIASSON et al., 2000).

$$q_{solar} = I \cdot \alpha \cdot A \quad (\text{Eq. D-39})$$

Onde :

q_{solar} = Fluxo de calor proveniente diretamente do sol (W)

I = Irradiância solar global sobre superfície (W/m^2)

α = Absortância da superfície

A = Área da superfície (m^2)

Sendo a radiação solar a principal fonte de calor de uma cobertura, seu estudo detalhado torna-se indispensável para o entendimento físico e modelagem matemática dos fluxos térmicos que interferem neste sistema.

D.4 FLUXO DE CALOR POR RADIAÇÃO EM INFRAVERMELHO

O infravermelho próximo, invisível ao olho humano, corresponde a mais da metade do espectro solar e interfere nas condições internas dos ambientes através do ganho de calor, sendo, portanto, de extrema importância sua consideração (CARAM, 1998).

Diferentes hipóteses podem ser admitidas para o cálculo do fluxo líquido de calor por radiação em ondas longas (q_{IV}).

Considerando que a superfície de interesse troque calor com uma superfície celeste teórica, suposta uniforme, cinza e difusa, é possível adotar o modelo de cavidade apresentado no item 3.4.

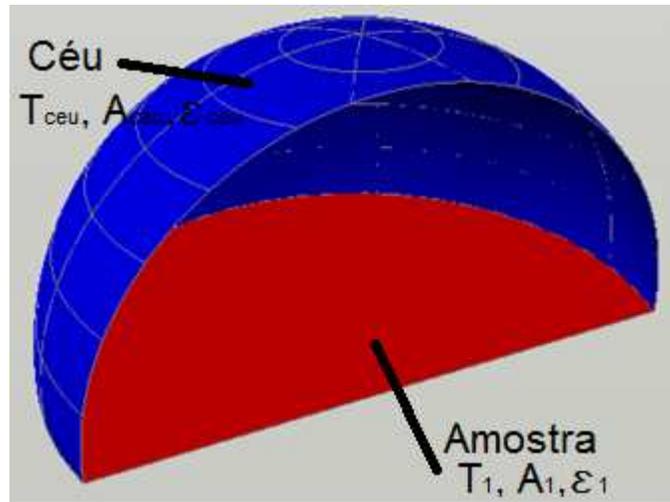


Figura D-6: Corte da superfície celeste à temperatura T_{ceu} e superfície da amostra

Considerando uma amostra plana (Figura D-6) ou um pequeno objeto convexo e o céu como uma grande cavidade, $FF_{1ceu} = 1$ e a equação 3-25 se reduz à equação D-40 (INCROPERA e DEWITT, 1996).

$$q_{IV} = \sigma \cdot A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot (T_{ceu}^4 - T_1^4) \quad (\text{Eq. D-40})$$

Caso a superfície seja côncava, conforme discutido anteriormente (capítulo 3.1.4), o fator de forma será $FF_{11} > 0$. Neste caso, um modelo admissível é o representado pela figura D-7 (similar à Figura 3-22). Uma vez que os fluxos entre a superfície de interesse (1) e o céu (3) têm necessariamente de atravessar a superfície imaginária (2), os fluxos entre 1 e 3 podem ser estimados pela equação 3-25.

$$q_{IV} = \frac{\sigma \cdot (T_{ceu}^4 - T_1^4)}{\frac{(1 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1 \cdot A_1} + \frac{1}{A_1 \cdot FF_{12}} - \frac{(1 - \varepsilon_{ceu})}{\varepsilon_{ceu} \cdot A_2}} \quad (\text{Eq. 3-25})$$

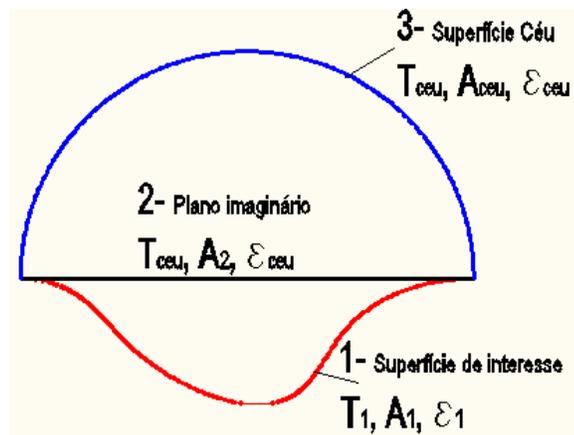


Figura D-7: Corte da superfície celeste à temperatura T_{ceu} e superfície da amostra

Em um estudo comparativo feito na Finlândia sobre métodos de avaliação do fluxo em ondas longas (NIEMELÄ, RÄISÄNEN e SAVIJÄRVI, 2001), o modelo determinado como mais preciso foi o RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) do “European Centre for Medium-Range Weather Forecast”. Este modelo divide o espectro em ondas longas em 16 intervalos e analisa separadamente os diversos gases presentes na atmosfera.

O estudo conclui que a maior parte do fluxo em ondas longas que atinge a superfície terrestre se origina a poucas centenas de metros da superfície (na atmosfera) e por isso, a temperatura próxima à superfície é de primeira importância na determinação do fluxo descendente. Conclui também que a variação mais importante causada pelos gases da atmosfera neste fluxo de calor, é sem dúvida, a causada pelo vapor de água.

BÁRBARO et al (2006) compararam 10 métodos empíricos de estimativa do ciclo diurno da emissão de onda longa da atmosfera para a cidade de São Paulo e identificaram que a expressão de Brunt (1932) apud (NIEMELÄ, RÄISÄNEN e SAVIJÄRVI, 2001)) teve o melhor desempenho (Eq. D-41).

$$q_{IV_{ceu}} = (0,52 + 0,065 \cdot \sqrt{P_w}) \sigma TBS^4 \quad (\text{Eq. D-41})$$

Onde:

P_w = Pressão de vapor no ar ambiente (hPa)

TBS= Temperatura do ar ambiente (K)

A pressão de vapor (P_w), pode ser calculada pela Eq. D-42 e corrigida para unidade em hPa.

$$P_w = \emptyset \cdot P_{ws} \cdot 0,01 \quad (\text{Eq. D-42})$$

Onde \emptyset é a umidade relativa (em número decimal) e P_{ws} é a pressão de vapor saturante (em Pa), calculada com a temperatura ambiente (TBS, em K) pela equação D-23.

O fluxo líquido por radiação de onda longa (q_{IV}), é dado pela equação D-43, onde a parcela oriunda do céu ($q_{IV_{ceu}}$) pode ser estimada pela equação de Brunt e a oriunda da amostra pela equação de Stefan-Boltzmann (Eq. 3-4).

$$q_{IV} = q_{IV_{ceu}} - \sigma \cdot \varepsilon_{sup} \cdot T_{sup}^4 \quad (\text{Eq. D-43})$$

Outro trabalho significativo para o estudo foi realizado por GOMES et al (2009) que analisaram a radiação de onda longa atmosférica medida em Botucatu - SP, no período de 2000 a 2006. A medida da irradiância em onda longa foi realizada através de um pirgeômetro, modelo CG1 da Kipp & Zonen (Figura D-8) na altura de 2 metros, a partir da superfície do solo gramado. Este aparelho registra radiação na faixa de comprimento de onda de 5 a 50 μm , sendo o instrumento padrão recomendado pela World Climate Research Program Baseline Surface Radiation Network ((UDO, 1999) apud (GOMES et al., 2009), para registro desta variável.



Figura D-8: Pirgeômetro modelo CG1: Kipp & Zonen (CAMPBELL, 2010)

A análise da radiação de onda longa atmosférica medida na Estação de Radiometria Solar de Botucatu - SP, no período de 2000 a 2006, mostrou correlação entre a temperatura do ar e as médias mensais, horárias e diárias de radiação. A radiação de onda longa atmosférica foi mais elevada no mês em que a temperatura do ar foi mais alta (janeiro) e menos elevada no mês de menor temperatura (julho). A evolução da radiação é periódica, em função da variação astronômica e geográfica da radiação global, como mostra a Figura D-9.

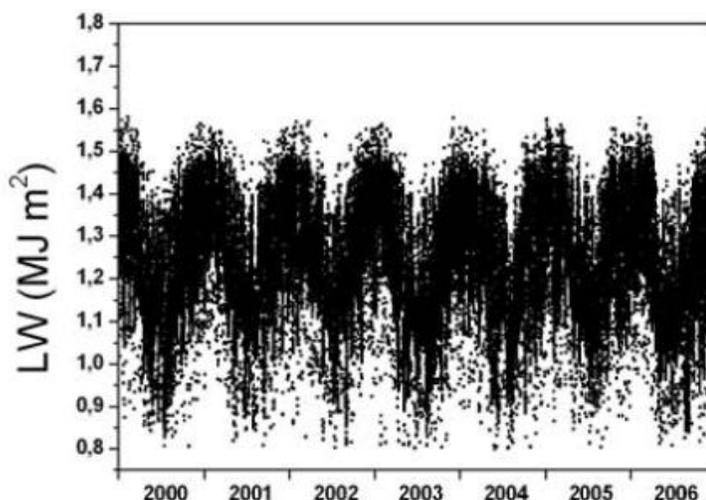


Figura D-9: Evolução da radiação de onda longa atmosférica horária do período de 2000 a 2006 em Botucatu (GOMES et al., 2009)

O valor médio anual da radiação, variou entre $1,227 \text{ MJ/m}^2$ (2003) a $1,247 \text{ MJ/m}^2$ (2001 e 2002) tendo valores mínimos de $0,8 \text{ MJ/m}^2$ e máximos de $1,6 \text{ MJ/m}^2$ (Tabela D-1).

Tabela D-1: Radiação atmosférica em onda longa em Botucatu-SP (MJ/m^2)

(adaptado de GOMES et al., 2009)

Ano	Média	Mín.	Max.
2000	1.240	0.806	1.580
2001	1.247	0.808	1.555
2002	1.247	0.802	1.569
2003	1.227	0.802	1.578
2004	1.230	0.801	1.554
2005	1.243	0.804	1.576
2006	1.230	0.808	1.578
Média	1.238	0.804	1.570
Média (W/m ²)	343.89	223.33	436.11

Também a partir de dados coletados pela Estação de Radiometria Solar de Botucatu – SP, Escobedo et al. (2009), descrevem o ciclo de emissão da radiação de onda longa atmosférica (LW).

“O ciclo iniciou as 00:05h com a radiação LW decrescendo continuamente do valor 1,228 MJ/m² até as 6:30h, onde atingiu o valor mínimo de 1,210MJ/m² no nascer do sol e na condição de menor temperatura do dia, finalizando a primeira parte do ciclo noturno. Na fase diurna, a radiação LW cresceu gradativamente das 06:30h até as 15:30h, onde passou por um valor máximo igual a 1,293 MJ/m² na temperatura mais elevada do dia, e em seguida decresceu continuamente até as 24:00h, terminando o ciclo diurno as 18:00h com LW igual a 1,27 MJ/m², e em seguida decresceu continuamente até as 24:00h, terminando o ciclo diurno as 18:00h com LW igual a 1,27 MJ/m². O final do ciclo noturno foi concluído às 24:00h, com LW igual a 1,23 MJ/m².”

Escobedo et al (2009), fornecem uma relação linear entre os valores horários de LW e temperatura (Tbs) com coeficiente de correlação $r = 0,925$, conforme a Figura D-10 e equação D-44.

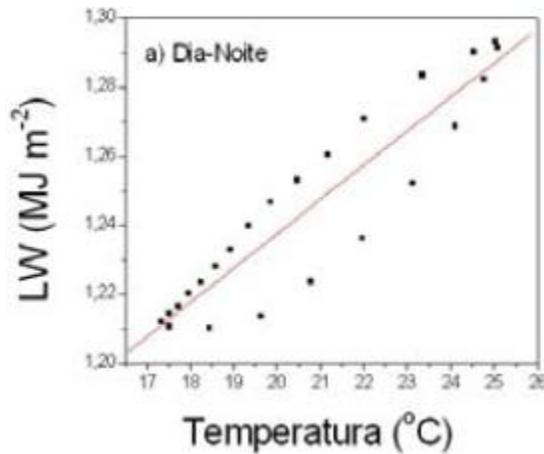


Figura D-10: Emissão atmosférica de radiação em ondas longas (LW) em função da temperatura ambiente (ESCOBEDO, GOMES, *et al.*, 2009)

$$LW = 1,39 + 0,001.Tbs \quad \left(\frac{MJ}{m^2} \right) \quad (\text{Eq. D-44})$$

A curva experimental entre LW e Ta na Figura D-10 sugere duas relações nas quais LW e Ta estão melhores correlacionadas, como mostram as Figura D-11 e Figura D-12. Uma correlação para o período em que a temperatura é crescente e a umidade decrescente (equação D-45) e, a outra, para o período em que a temperatura é decrescente (equação D-46) (ESCOBEDO, GOMES, *et al.*, 2009).

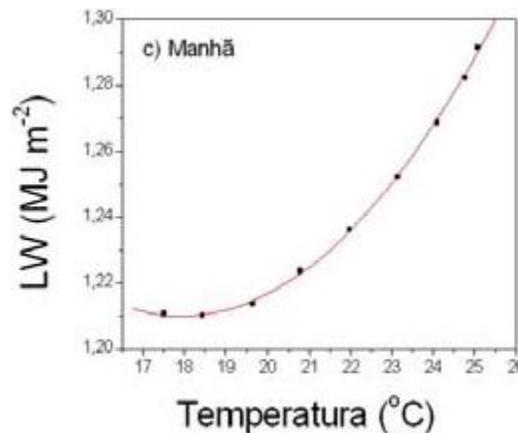


Figura D-11: Emissão atmosférica de radiação em ondas longas (LW) para período de temperatura crescente (ESCOBEDO, GOMES, *et al.*, 2009)

$$LW = 1,73 - 0,058.Tbs + 0,0016.Tbs^2 \quad (06:00 < h < 15:00) \left(\frac{MJ}{m^2} \right) \quad (\text{Eq. D-45})$$

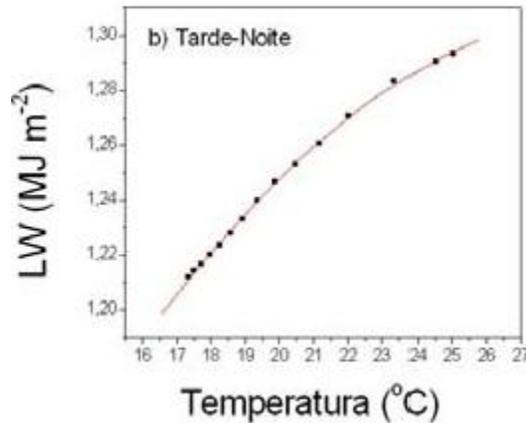


Figura D-12: Emissão atmosférica de radiação em ondas longas (LW) para período de temperatura decrescente (ESCOBEDO, GOMES, *et al.*, 2009).

$$LW = 0,761 + 0,036.Tbs - 6,05.Tbs^2 \quad (06:00 < h \text{ ou } h > 15:00) \left(\frac{MJ}{m^2} \right) \quad (\text{Eq. D-46})$$

As equações D-45 e D-46, publicadas por Escobedo, *et al.* (2009), aparentemente contém erros, uma vez que não reproduzem as curvas mencionadas (Figura D-11 e Figura D-12). Utilizando um software específico “LEPIC” (RORIZ, 2010), estabeleceu-se leituras digital dos gráficos, possibilitando a obtenção de um novo conjunto de equações (Eq. D-47 e D-48), conforme as Figura D-13 e Figura D-14. A fim de facilitar a comparação, os gráficos originais são apresentados ao lado dos gerados a partir das novas equações.

APÊNDICE D: FLUXOS DE CALOR

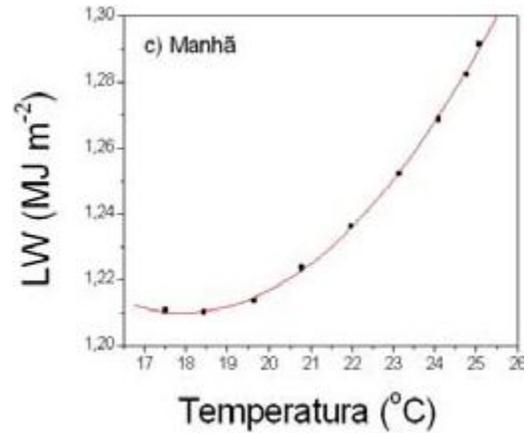
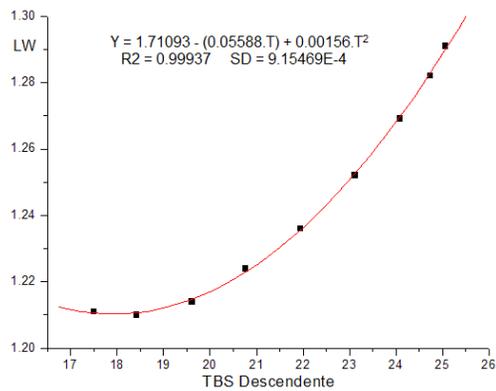


Figura D-13: Regressão de valores da Figura D-11, para período de temperatura crescente

Para o período de temperaturas crescentes vale a equação D-47

$$LW = 1,71093 - 0,05588.Tbs + 0,00156.Tbs^2 \quad \left(\frac{MJ}{m^2} \right)$$

$$\text{Ou: } LW = 475,258 - 15,52.Tbs + 0,433.Tbs^2 \quad \left(\frac{W.h}{m^2} \right) \quad (\text{Eq. D-47})$$

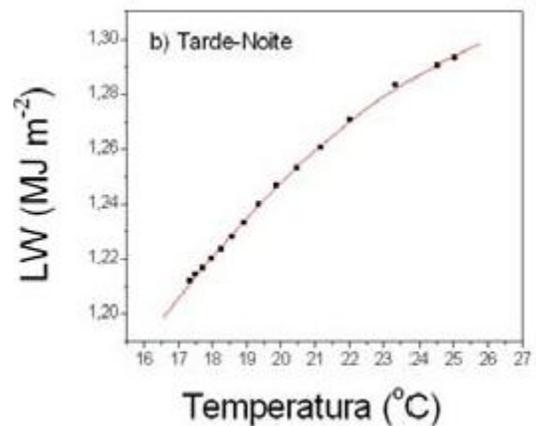
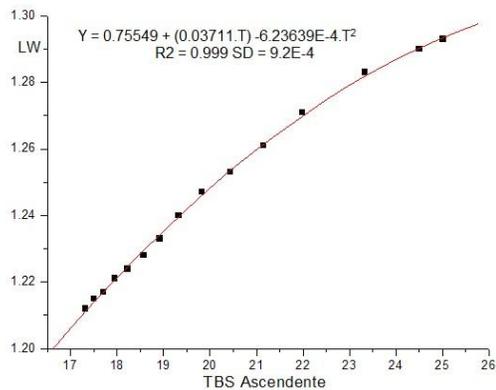


Figura D-14: Regressão de valores da Figura D-12 para período de temperatura decrescente

Para o período de temperaturas decrescentes vale a equação D-48.

$$LW = 0,75549 + 0,03711.Tbs - 6.23639E - 4.Tbs^2 \left(\frac{MJ}{m^2} \right)$$

Ou:

$$LW = 209,86 + 10,31.Tbs - 0.17.Tbs^2 \left(\frac{W.h}{m^2} \right) \text{ (Eq. D-48)}$$

Como referência, o CIBSE (“The Chartered Institution of Building Services”, Apud (BUENO, 1994)) recomenda um valor de 100 (W/m²) para a perda de radiação de onda longa da telha para o céu.

Em uma noite clara de uma região de deserto, uma superfície típica a 27°C, voltada para o céu esfriará a uma taxa de cerca de 75 W/m². Em um clima úmido, a taxa cai para cerca de 60 W/m². Com 50% de cobertura de nuvens em um clima úmido, a taxa de resfriamento cai para cerca de 40 W/m², e apenas cerca de 7 W/m² sob céu completamente nublado (PARKER, 2005).

D.5 TEMPERATURA E EMISSIVIDADE DO CÉU

Para os primeiros modelos citados no item anterior, são necessários os cálculos de temperatura e emissividade do céu. Diferentes correlações entre a temperatura do céu e as variáveis climáticas foram desenvolvidas por diversos grupos de estudo (Figura D-15). Dentre estas, grande parte é aplicável exclusivamente a condições de céu limpo, outras, se aplicam apenas a climas temperados.

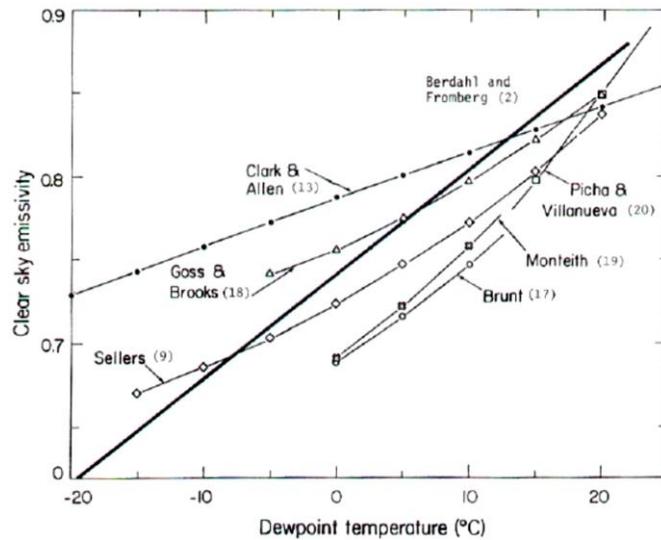


Figura D-15: Correlações entre a emissividade do céu e o ponto de orvalho ((CLARK, 1981) apud (GONZÁLES, 2002)

Tendo em vista os dados disponíveis e as condições de clima local, no presente trabalho a temperatura efetiva do céu (T_{ceu}) é estimada pelas equações D-49 e D-50 (LEVINSON, 1997).

$$T_{ceu} = TBS.Eceu^{1/4} \quad (\text{Eq. D-49})$$

$$Eceu = 1,56.dv^{1/7} \quad (\text{Eq. D-50})$$

Onde:

$Eceu$ = Emissividade efetiva do céu

dv = Densidade de vapor no ar úmido (kg/m^3)

$$dv = \frac{\omega}{v} \quad (\text{Eq. D-51})$$

Onde v é a viscosidade cinemática (em m^2/s , equação D-18)

APÊNDICE E: TESTE DO ESPECTRO SOLAR PADRÃO

Uma incerteza do modelo utilizado no procedimento experimental 1 está relacionada ao espectro solar a ser adotado no ajuste das propriedades ópticas das superfícies (3.2.2). Considerando dados obtidos registrados no aeroporto Leite Lopes, em Ribeirão Preto (a cerca de 100 km do local onde foi realizado o experimento), para o dia 22 de Abril de 2010, (WUNDERGROUND, 2010) conforme indica a Tabela E-1, a visibilidade média do período foi de 10 Km.

Tabela E-1: Condições climáticas para dia 22/04/05 no Aeroporto Leite Lopes.

Temperatura média	27 °C
Temperatura máxima	35 °C
Temperatura mínima	19 °C
Average Humidity	70 %
Precipitação	0.0 cm
Pressão ao nível do mar	1013.54 hPa
Velocidade do vento	6 km/h
Máxima velocidade do vento	20 km/h
Visibilidade	10.0 km

Utilizando o software ESPECTRO (Figura E-1) considerando dados da localidade e parâmetros “default” para Ozônio e Aerossóis e um valor médio de 15 horas para o horário dos experimentos, obtém-se a uma estimativa espectral da irradiância indicada na Figura E-2.

APÊNDICE E: TESTE DO ESPECTRO SOLAR PADRÃO

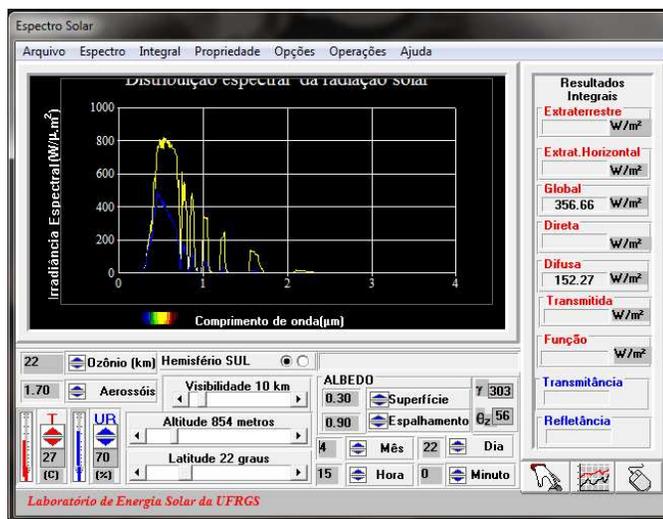


Figura E-1: Software Espectro Solar (UFRGS, 2010).

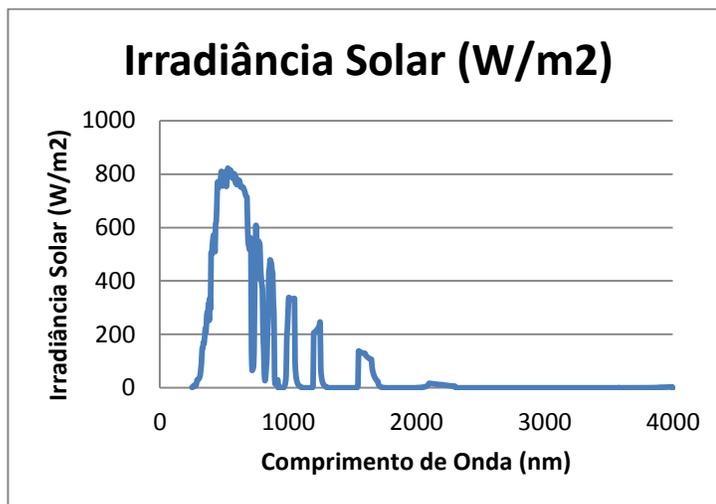


Figura E-2: Irradiância solar estimada pelo software Espectro.

Corrigindo a absorvância solar das tintas (Tabela 5-2) utilizadas no experimento a partir da irradiância espectral obtida do software ESPECTRO, obtêm-se as curvas apresentadas na Figura E-3. Os resultados obtidos nesta correção poder ser comparados aos obtidos com o espectro solar apresentado pela ASTM, através da Tabela E-2.

APÊNDICE E: TESTE DO ESPECTRO SOLAR PADRÃO

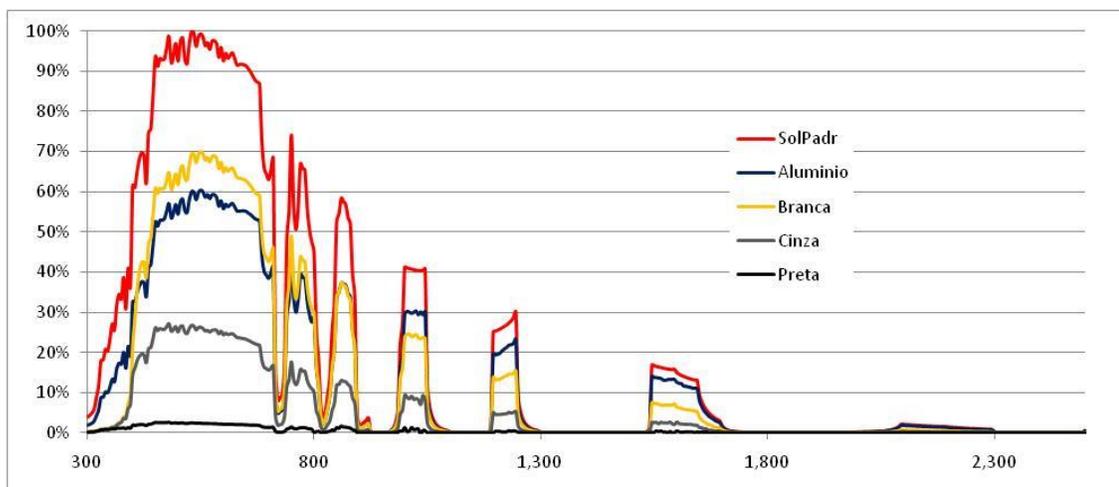


Figura E-3: Refletividades solar das amostras.

Tabela E-2: Refletividades das Amostras.

%	Alumínio	Branca	Cinza	Preta
Refletividade Espectrofotômetro 2º Teste	76.03	44.65	17.65	1.66
Absortividade Espectrofotômetro 2º Teste	23.97	55.35	82.35	98.34
Absortividade Solar ASTM	34.21	40.80	77.47	97.81
Absortividade Solar UFRGS	37.99	38.60	76.09	97.62

A fim de observar as diferenças na adoção de um ou outro modelo, observou-se o comportamento do fluxo solar calculado para as condições registradas no dia 22/04/2010. Os dados atmosféricos referentes ao período de medição são resumidos na Tabela E-3.

Tabela E-3: Resumo dos dados atmosféricos.

22/04/2010	UR (%)	Tbs (°C)	Press (Pa)	VV (m/s)	Irrad (W/m ²)
Max	87.73	22.57	914.80	8.20	573.59
Min	52.98	15.71	912.20	0.00	0.00
Med	67.73	19.73	913.61	2.77	242.86

APÊNDICE E: TESTE DO ESPECTRO SOLAR PADRÃO

As Temperaturas superficiais coletadas são resumidas na Tabela E-4 e plotadas na Figura E-4.

Tabela E-4: Temperaturas superficiais.

	Alum. Lisa	Alum. Ond.	Branca Lisa	Branca Ond.	Cinza Lisa	Cinza Ond.	Preta Lisa	Preta Ond.
Max	41.45	38.98	39.66	38.87	46.98	41.95	51.61	43.45
Min	19.36	19.40	16.40	17.73	16.71	17.32	16.56	17.37
Med	32.65	31.15	30.21	30.24	33.55	31.56	35.66	32.02

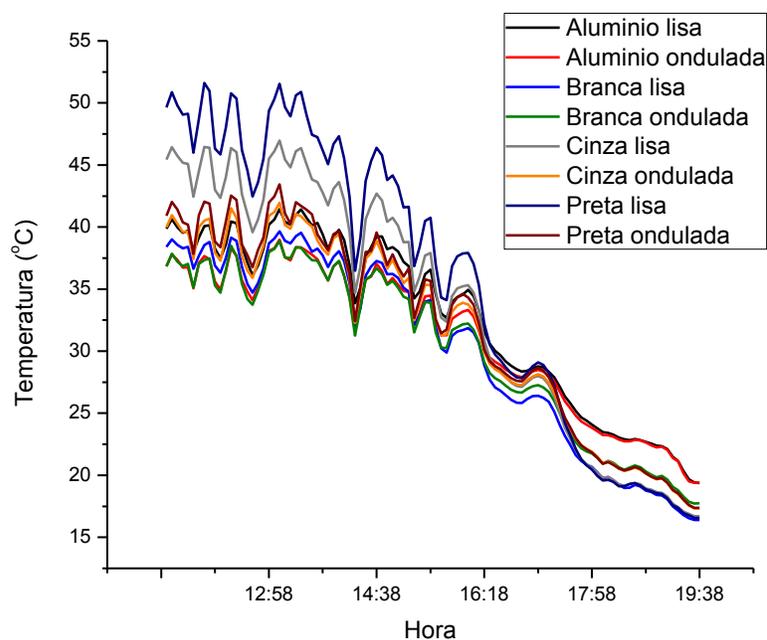


Figura E-4: Temperaturas superficiais registradas em 22/04/2010

Para a absorvidade solar calculada com a irradiância apresentada pela ASTM, obtém-se as relações apresentadas na Figura E-5.

APÊNDICE E: TESTE DO ESPECTRO SOLAR PADRÃO

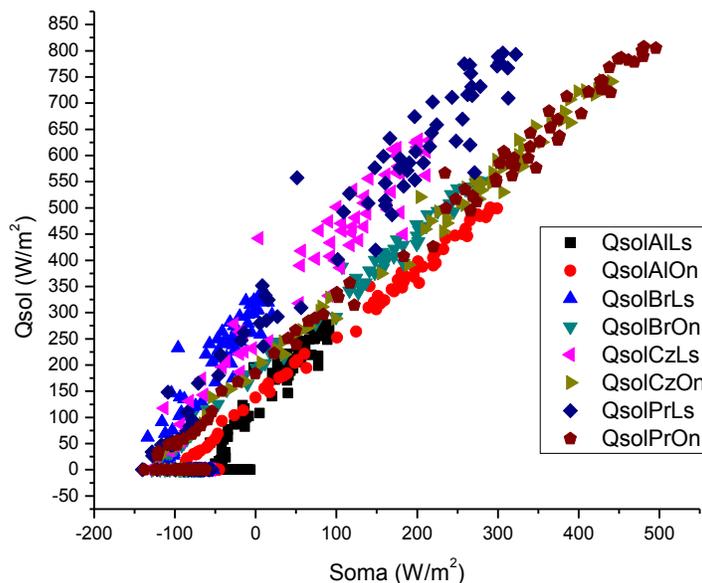


Figura E-5: Fluxo solar e soma dos fluxos.

Considerando a absorptividade solar calculada com base no resultado do software ESPECTRO, obtém-se as relações apresentadas na Figura E-6.

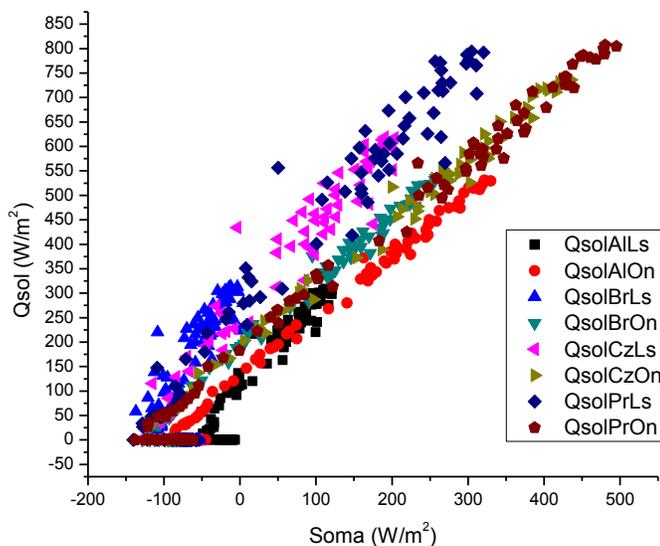


Figura E-6: Fluxo solar e soma dos fluxos.

Conforme demonstrado na Figura E-5 e Figura E-6, a pequena variação nas absorptividades solares não apresenta grande efeito no fluxo de calor calculado. Comparando os resultados calculados obtidos com a primeira medição em

APÊNDICE E: TESTE DO ESPECTRO SOLAR PADRÃO

espectrofotômetro e espectro solar descrito pela ASTM, a segunda medição em espectrofotômetro e espectro da ASTM e a segunda medição em espectrofotômetro e espectro solar obtido do software ESPECTRO, em resumo observa-se os dados apresentados na Tabela E-5.

Tabela E-5: Soma dos Fluxos de Calor para diferentes métodos de ajuste das absortividades solares.

(W/m ²)	1° Teste + ASTM	2° Teste+ ASTM	2° Teste+ UFRGS
Max	493.84	493.84	495.29
Min	-140.23	-140.23	-140.23
Med	55.84	52.63	50.15

APÊNDICE F: CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS E PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS

Ao longo deste estudo, para as propriedades que não foram efetivamente medidas, optou-se pelo uso de valores tabelados. Este foi o caso, por exemplo, da condutividade térmica das amostras de alumínio, considerada 237 W/m.K (NAUTILUS, 2010) , da condutividade térmica das placas de isolante, considerada 0,04 W/m.K (RORIZ, 2006) e do calor específico do alumínio, 904 J/(kg.K), (MSPC, 2010) .

Para os dispositivos de medição adotados, foram necessárias uma série de calibrações descritas a seguir:

Utilizou-se para a calibração do piranômetro dados obtidos na estação climatológica A711 da base de dados SONABRA do INMET (INMET, 2010). Esta estação está localizada a pequena distância do local dos experimentos, dentro das dependências da Universidade Federal de São Carlos, entretanto são disponíveis apenas dados horários para esta base, enquanto no modelo proposto no capítulo 5, trabalhou-se com registros a cada 5 minutos. O resultado da calibração dos dados obtidos no dia 22/04/2010 é apresentado na Figura F-1 e na equação F-1 onde Rad_1 corresponde à leitura do piranômetro e $Irrad$ a irradiância corrigida, válida para o plano horizontal.

APÊNDICE F: CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS E PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS

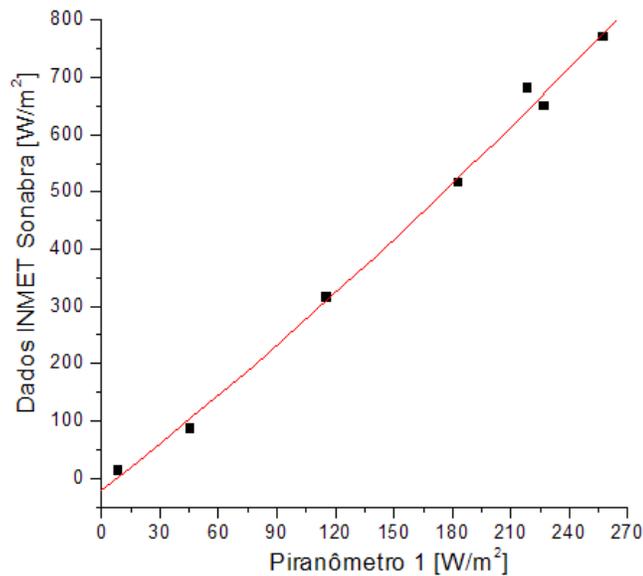


Figura F-1: Calibração do Piranômetro.

$$Irrad = -21.1887 + 2.67481.Rad_1 + .00166.Rad_1^2 \quad (\text{Eq. F-1})$$

Para os termistores, preferiu-se aplicar uma calibração feita conforme os seguintes passos:

Fixação dos sensores ao longo do perímetro externo de uma forma metálica circular, mantendo a altura em que os sensores foram fixados

Aquecimento do conjunto através de água quente

Registro das temperaturas enquanto conjunto se resfria naturalmente

Resfriamento do conjunto através com mistura de água e gelo

Registro das temperaturas enquanto conjunto se aquece naturalmente

Cálculo da temperatura média para cada instante

Comparação de valores de temperaturas obtidas para cada sensor com valor médio dos registros

Os resultados obtidos nesta calibração são mostrados na Figura F-2

APÊNDICE F: CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS E PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS

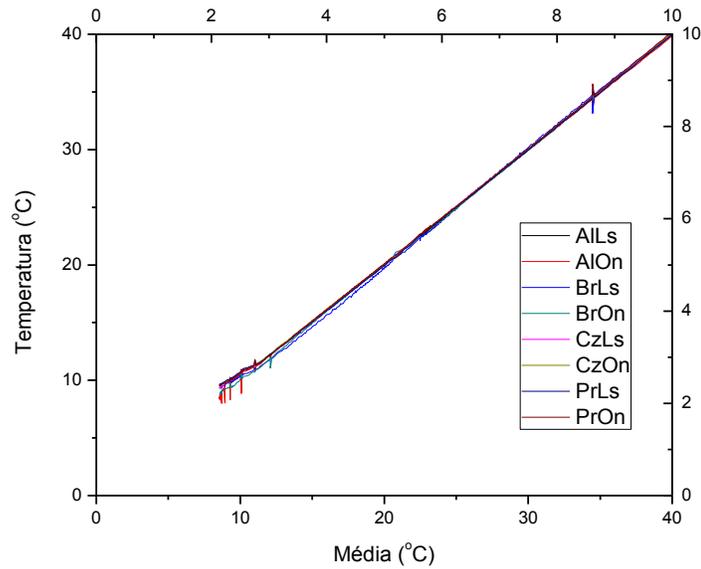


Figura F-2: Calibração dos termistores

Uma pesagem das peças utilizadas no experimento descrito no capítulo 5 (Figura F-3) indicou que cada uma delas tinha em média 29,46 g.



Figura F-3: Pesagem das peças

APÊNDICE F: CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS E PROPRIEDADES
FÍSICAS DOS MATERIAIS

APÊNDICE G: Regressões relativas à figura 6-24

$$\varepsilon_e = B_0 + B_1.X + B_2.X^2 + B_3.X^3 \quad (\text{Eq. G-1})$$

$$X = L/R \quad (\text{Eq. G-2})$$

Tabela G-1: Equações das curvas da figura 6-24.

ε	B0	B1	B2	B3	R ²	DP
0.1	0.10809	0.15645	-0.01998	6.89E-04	0.99994	7.37E-04
0.2	0.21749	0.27176	-0.07211	0.00739	0.99988	0.00138
0.3	0.31845	0.33781	-0.11527	0.01508	0.99993	0.00114
0.5	0.51755	0.33852	-0.14603	0.02437	0.99976	0.00175
0.7	0.71172	0.2622	-0.12933	0.02297	0.9996	0.00152
0.9	0.90168	0.09392	-0.04308	0.00665	0.9988	9.63E-04

$$\varepsilon_e = B_0 + B_1.\varepsilon + B_2.\varepsilon^2 + B_3.\varepsilon^3 \quad (\text{Eq. G-3})$$

Tabela G-2: Extrapolação das equações das curvas da figura 6-24.

L/R	B0	B1	B2	B3	R ²	DP
0.0	-0.00231	1.14423	-0.27581	0.13292	0.99998	0.00214
0.2	0.00237	1.43552	-0.65391	0.21445	0.99996	0.00287
0.4	2.61E-04	1.80807	-1.34402	0.5419	0.99994	0.00345
0.6	0.01188	2.01939	-1.71058	0.6868	0.9998	0.00642
0.8	0.02384	2.19456	-2.05531	0.84931	0.99965	0.00822
1.0	0.03815	2.34507	-2.38368	1.01881	0.99951	0.00951
1.2	0.05097	2.47432	-2.69127	1.1911	0.99951	0.00928
1.4	0.06646	2.53523	-2.85766	1.28351	0.99945	0.0096
1.6	0.08406	2.58264	-3.00112	1.36205	0.99948	0.00903

Tabela G-3: Resultados da equação G-3

L/R	ε					
	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.1
0.0	0.020465	3.18E-02	4.30E-02	0.054229	0.06538	0.108517
0.2	0.030821	0.044853	0.058758	0.072538	0.086193	0.138328
0.4	0.035889	5.33E-02	7.05E-02	0.087372	0.104024	0.166719
0.6	0.051589	0.070941	9.00E-02	0.108659	0.127034	0.19511
0.8	0.066916	0.08785	1.08E-01	0.128536	0.148298	0.220662
1.0	0.084106	0.106384	1.28E-01	0.149572	0.170493	0.246215
1.2	0.099389	0.12281	0.145713	0.168107	0.189998	0.268927
1.4	0.116032	0.13998	0.163379	0.186238	0.208563	0.288801
1.6	0.134523	0.158875	0.182651	0.205859	0.228509	0.310095

APÊNDICE G: Regressões relativas à figura 6-24

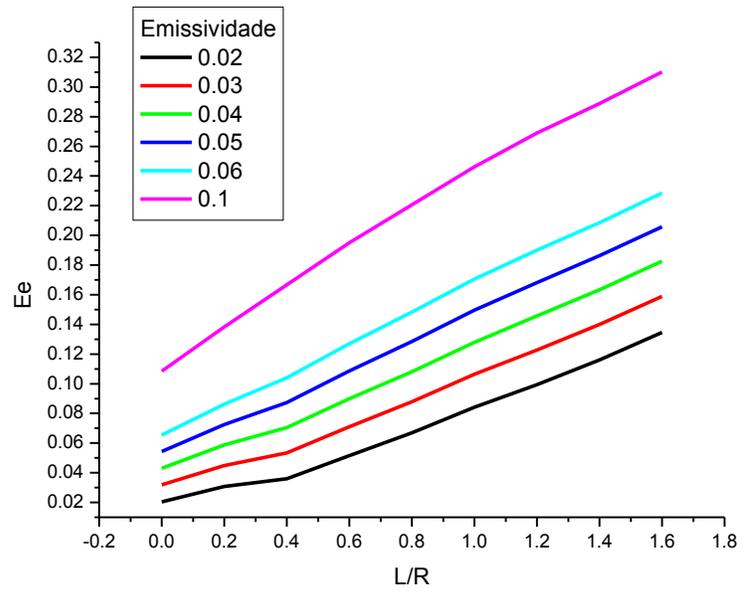


Figura G-1: Extrapolação das curvas da figura 6-24

APÊNDICE H: AJUSTE ESTATÍSTICO

Através de um ajuste estatístico, seria possível minimizar as imperfeições do modelo teórico. A fim de exemplificar o método para tal ajuste, neste capítulo, aplica-se o mesmo sobre dados obtidos durante o experimento descrito no item 5. O exemplo apresentado a seguir se refere aos fluxos calculados para o período noturno e para as amostras pintadas. Conforme comentado no item 5.4.1.5, na ausência da radiação solar, o fluxo por convecção é o que apresenta mais alta correlação com a soma dos fluxos. Conforme mostra a Figura H-1 o comportamento das amostras lisas e onduladas é bastante semelhante, permitindo que sejam tratadas como um único conjunto.

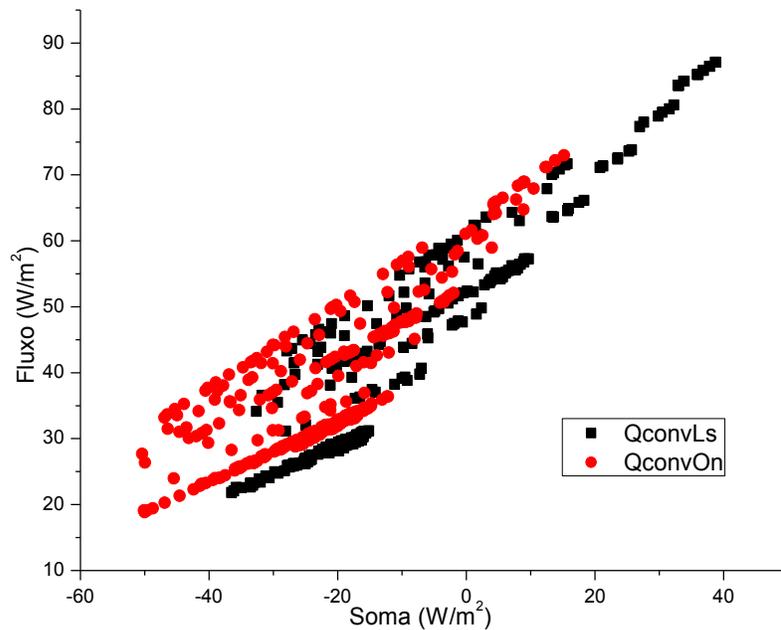


Figura H-1: Fluxos por convecção e soma dos fluxos para amostras pintadas (período noturno).

Supondo que todo o erro do modelo fosse causado pelo fluxo convectivo, através de uma análise de regressão, seria possível identificar o ajuste que este fluxo deveria sofrer para anular o erro. A Figura H-2 apresenta para o mesmo conjunto de pontos da Figura H-1, a regressão linear da Soma tendo como variável independente o fluxo convectivo (Eq.H-1).

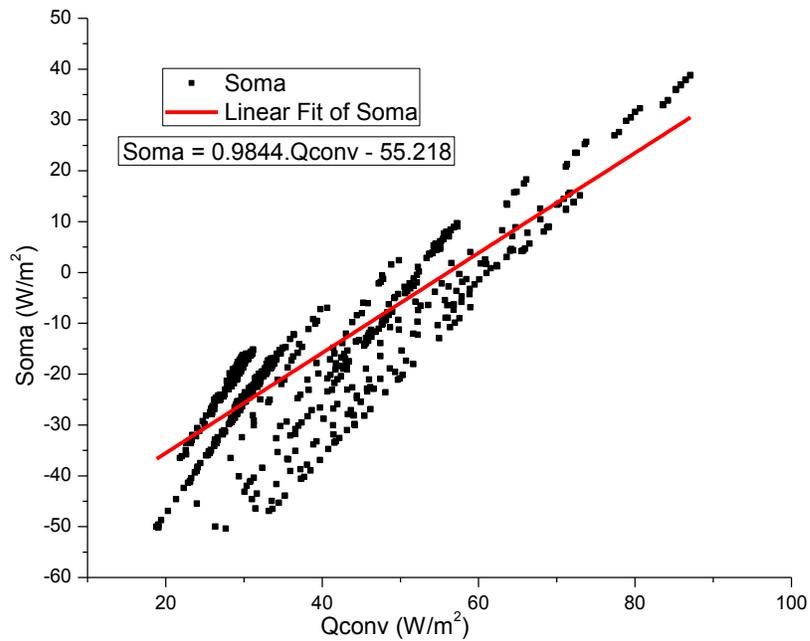


Figura H-2: Regressão linear da Soma em relação à Qconv.

$$Soma = 0.9844.Q_{conv} - 55.218 \quad (\text{Eq. H-1})$$

Pela conservação da energia o fluxo por convecção deveria anular todos os outros, conforme a equação H-2, onde Q_{conv}' corresponde ao fluxo ajustado.

$$Q_{conv}' = -1.(Q_{cond} + Q_{IV} + Q_{Solar}) \quad (\text{Eq. H-2})$$

Portanto:

$$Q_{conv}' = -1.(Soma - Q_{conv}) \quad (\text{Eq. H-3})$$

$$Q_{conv}' = Q_{conv} - Soma \quad (\text{Eq. H-4})$$

De H-4 e H-1 vem:

$$Q_{conv}' = Q_{conv} - (0.9844.Q_{conv} - 55.218) \quad (\text{Eq. H-5})$$

$$Q_{conv}' = 55.218 + 0.0156 \cdot Q_{conv} \quad (\text{Eq. H-6})$$

$$Soma' = Q_{conv}' + Q_{cond} + Q_{IV} \quad (\text{Eq. H-7})$$

Na Figura H-3 pode se comparar o fluxo original com o corrigido e as respectivas somas.

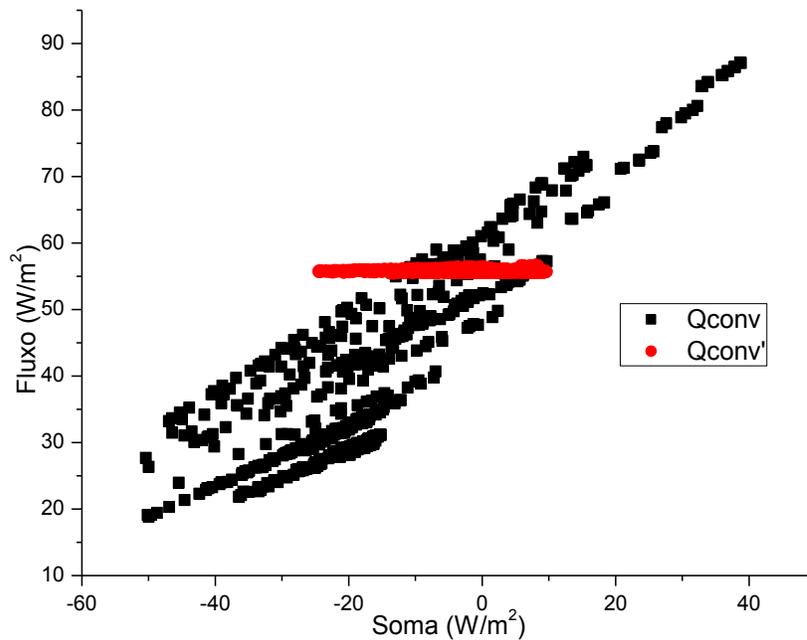


Figura H-3: Fluxos por convecção e fluxo por convecção ajustado versus soma dos fluxos para amostras pintadas (período noturno)

A Figura H-4 apresenta a relação deste fluxo corrigido, da condução e do infravermelho com a soma dos fluxos. Nela, observa-se que o erro ainda presente está relacionado ao fluxo em infravermelho.

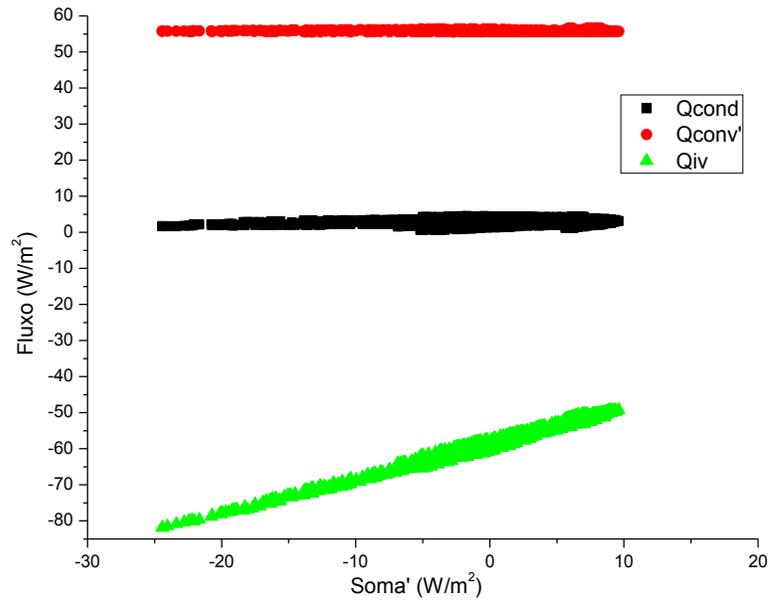


Figura H-4: Fluxos por convecção ajustado para amostras pintadas e soma dos fluxos (período noturno)

Repetindo o procedimento anterior é possível ajustar o fluxo em infravermelho pela regressão apresentada na Figura H-5 e pela equação H-8.

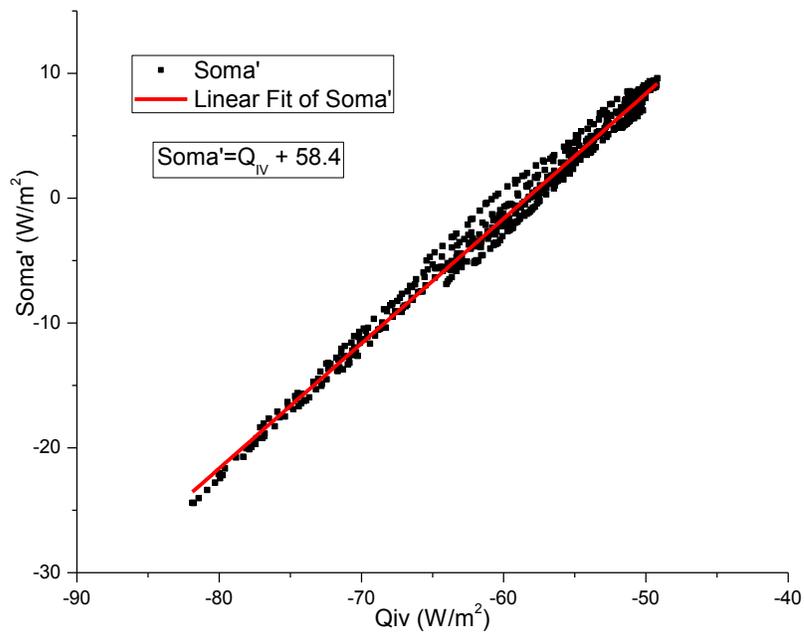


Figura H-5: Regressão linear da Soma em relação à Q_{IV} .

$$Soma' = Q_{IV} + 58.4 \quad (\text{Eq. H-8})$$

Assim:

$$Q_{IV}' = Q_{IV} - Soma' \quad (\text{Eq. H-9})$$

$$Q_{IV}' = Q_{IV} - (Q_{IV} + 58.4) \quad (\text{Eq. H-10})$$

$$Q_{IV}' = -58.4 \quad (\text{Eq. H-11})$$

$$Soma'' = Q_{conv}' + Q_{cond} + Q_{IV}' \quad (\text{Eq. H-12})$$

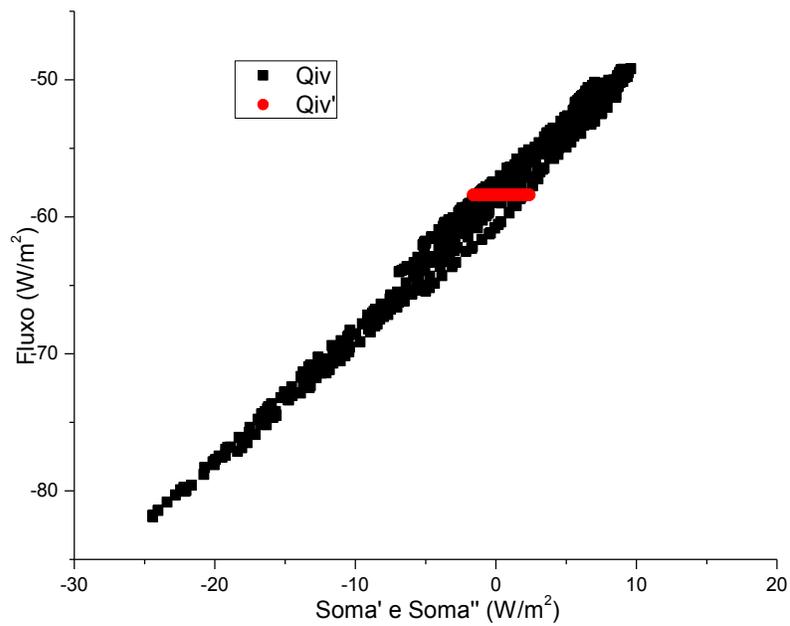


Figura H-6: Fluxos por infravermelho e fluxo por infravermelho ajustado versus soma dos fluxos para amostras pintadas (período noturno).

Para o período noturno, os fluxos para as amostras Cinza, antes e depois do ajuste são apresentados nas figuras H-7 e H-8.

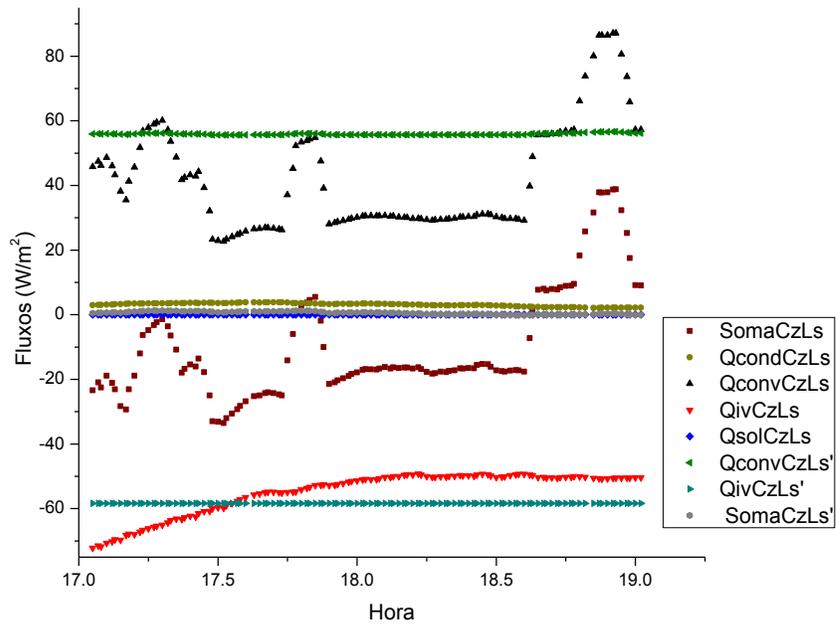


Figura H-7: Fluxos e fluxos ajustados para amostras cinza lisa (período noturno)

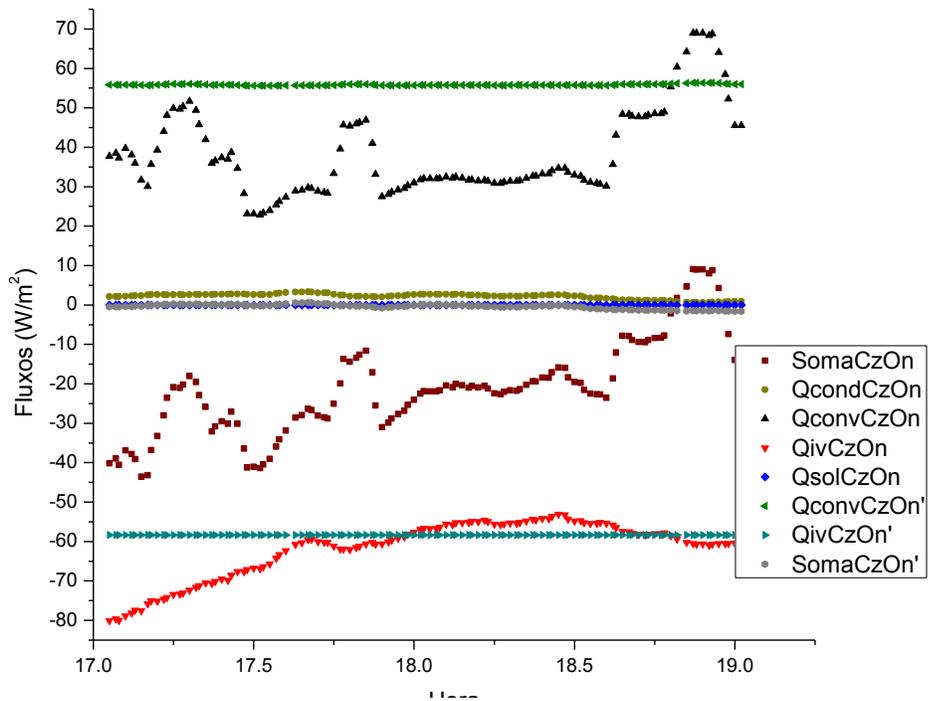


Figura H-8: Fluxos e fluxos ajustados para amostras cinza ondulada (período noturno)

O ajuste apresentado neste capítulo é bastante grosseiro, pois desconsidera importantes variáveis do processo de trocas térmicas. Serve apenas para ilustração do método e demonstração de sua viabilidade.