



Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Centro Tecnológico (CTC)
Departamento de Engenharia Civil (ECV)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC)

DEIVIS LUIS MARINOSKI

**DESENVOLVIMENTO DE UM CALORÍMETRO PARA
DETERMINAÇÃO DO FATOR SOLAR DE VIDROS E JANELAS**

Florianópolis
Fevereiro de 2010

DEIVIS LUIS MARINOSKI

**DESENVOLVIMENTO DE UM CALORÍMETRO PARA
DETERMINAÇÃO DO FATOR SOLAR DE VIDROS E JANELAS**

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito parcial, exigido pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para a
obtenção do Título de DOUTOR em Engenharia Civil

Área de concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Roberto Lamberts, PhD

Florianópolis, 25 de fevereiro de 2010.

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da
Universidade Federal de Santa Catarina

M339d Marinoski, Deivis Luis
Desenvolvimento de um calorímetro para determinação do fator solar de vidros e janelas [tese] / Deivis Luis Marinoski ; orientador, Roberto Lamberts. – Florianópolis, SC, 2010. 298 p.: il., grafs., tabs., plantas.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia civil. 2. Fator solar. 3. Calorímetro. 4. Medição em campo. 5. Vidros e janelas. I. Lamberts, Roberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 624

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PPGEC

**DESENVOLVIMENTO DE UM CALORÍMETRO PARA
DETERMINAÇÃO DO FATOR SOLAR DE VIDROS E JANELAS**

DEIVIS LUIS MARINOSKI

Tese julgada adequada para a obtenção do Título de DOUTOR
em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof^ª. Dra. Janaíde Cavalcante Rocha - Coordenadora do PPGEC

Prof. Roberto Lamberts, PhD - Orientador e Moderador

Prof. Dr. Saulo Güths - Co-Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD - ARQ/UFSC

Prof. Dr. José A. Bellini da Cunha Neto - EMC/UFSC

Prof^ª. Dra. Lucila Chebel Labaki - FEC/UNICAMP

Prof. Dr. Nathan Mendes - EMC/PUC-PR

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Luiz e Lecir e à minha irmã Ana Kelly, pelo grande incentivo e apoio.

Ao Prof. Roberto Lamberts pela orientação e amizade.

Ao Prof. Saulo Guths pela co-orientação e grande disposição em ajudar.

A todos os colegas do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) pela ótima convivência e troca de conhecimento.

Aos colegas do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades termo-físicas (LMPT), em especial Alexandre e Damian.

Aos demais professores, colegas e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram com o desenvolvimento desta pesquisa e também com a minha formação.

Aos laboratórios LabEEE, LMPT, LabTermo, pela disponibilidade do espaço físico, empréstimo de equipamentos, fornecimento de dados e suporte técnico.

As empresas Cebrace e HunterDouglas pela doação de amostras.

Ao CNPq, CAPES, FEESC e FURNAS pelo financiamento do trabalho através do pagamento de bolsas de estudo e aquisição de material.

Sobretudo a Jeová Deus, o grandioso criador do universo – *Revelação (Apocalipse) 4:11*.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE QUADROS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIV
RESUMO.....	XVII
ABSTRACT	XVIII
1	INTRODUÇÃO 1
1.1	CONTEXTO DE ESTUDO: JANELAS E O CONSUMO DE ENERGIA 1
1.2	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA 4
1.3	OBJETIVOS..... 6
1.3.1	Objetivo geral..... 6
1.3.2	Objetivos específicos 6
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO..... 7
2	REVISÃO DE LITERATURA 9
2.1	FUNDAMENTOS DA MEDIÇÃO DE GANHO DE CALOR APLICADOS AOS CALORÍMETROS SOLARES 9
2.2	SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE GANHO DE CALOR SOLAR EM JANELAS 11
2.2.1	Simulador solar 11
2.2.2	UF-ASHRAE Solar calorimeter 17
2.2.3	MOWITT (Mobile Window Thermal Test Facility)..... 21
2.2.4	Queen's solar calorimeter 25
2.2.5	Fenestration Radiometer (Radiômetro de abertura) 28
2.3	ESTIMATIVA DO FATOR SOLAR ATRAVÉS DE PROPRIEDADES ÓPTICAS 31
2.4	NORMALIZAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO E CÁLCULO DO FATOR SOLAR..... 35
2.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO E DISCUSSÃO 37
3	PROJETO, CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DO CALORÍMETRO 39
3.1	PROJETO DO CALORÍMETRO 39
3.1.1	Dimensionamento dos absorvedores de calor 39
3.1.1.1	Cavidade principal (CP) 39
3.1.1.2	Cavidade secundária (CS) 41
3.1.2	Dimensionamento do sistema de resfriamento..... 42
3.1.2.1	Unidade condensadora..... 43
3.1.2.2	Reservatório 43
3.1.2.3	Modificações 44

3.1.3	Dimensionamento do trailer de abrigo.....	46
3.1.4	Distribuição elétrica e hidráulica	48
3.1.5	Sensores de monitoramento	49
3.1.6	Sistema de aquisição de dados e controle.....	51
3.2	FABRICAÇÃO DOS COMPONENTES E MONTAGEM DO CALORÍMETRO	54
3.2.1	Fabricação dos absorvedores de calor.....	54
3.2.1.1	Cavidade principal (CP).....	54
3.2.1.2	Cavidade secundária (CS)	56
3.2.2	Fabricação do sistema de resfriamento	56
3.2.3	Fabricação do trailer de abrigo	58
3.2.4	Desenvolvimento do sistema de aquisição e controle	59
3.2.5	Montagem do calorímetro.....	60
3.3	CALIBRAÇÃO E INSTALAÇÃO DOS SENSORES DE MONITORAMENTO	67
3.3.1	Piranômetros	68
3.3.2	Anemômetros	74
3.3.3	Fluxímetros	76
3.3.4	Termopares e termistor	80
3.3.5	Medidores de vazão	86
3.3.6	Medidor de coeficiente de convecção.....	88
3.3.7	Calorímetro solar	90
4	CALIBRAÇÃO DO CALORÍMETRO: PRIMEIRA FASE	93
4.1	VIDRO DE REFERÊNCIA.....	93
4.2	COEFICIENTES DE TROCA DE CALOR (H)	94
4.3	TESTE INICIAL COM O CALORÍMETRO	94
4.3.1	Medição com a cavidade principal (CP)	94
4.3.1.1	Condições gerais.....	94
4.3.1.2	Resultados	97
4.3.2	Medição com a cavidade secundária (CS).....	103
4.3.3	Considerações sobre o teste inicial.....	106
4.4	SEGUNDA SÉRIE DE TESTES	107
4.4.1	Medição com a cavidade principal (CP)	107
4.4.1.1	Condições gerais.....	107
4.4.1.2	Resultados	108
4.4.2	Medição com a cavidade secundária (CS).....	111
4.4.2.1	Condições gerais.....	111
4.4.2.2	Resultados	112
4.4.3	Considerações sobre a segunda série de testes	114
5	CALIBRAÇÃO DO CALORÍMETRO: SEGUNDA FASE	117
5.1	NOVO MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR SOLAR	117
5.1.1	Determinação do Fator Solar na cavidade principal (FS _{cp}).....	120
5.1.2	Determinação do Fator Solar na cavidade secundária (FS _{cs}).....	121

5.2	NOVA CONDIÇÃO DE CONTROLE DE TEMPERATURA NAS CAVIDADES.....	122
5.3	VARIAÇÃO NA TEMPERATURA DAS CAVIDADES	124
5.4	MODELO MATEMÁTICO	127
5.5	ANÁLISES PARAMÉTRICAS	133
5.5.1	Diferença de temperatura cavidade-vidro	133
5.5.2	Coeficientes de troca.....	138
5.5.3	Perdas de calor	146
5.6	NOVAS MEDIÇÕES COM O VIDRO DE REFERÊNCIA.....	149
5.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE A ETAPA DE CALIBRAÇÃO	166
6	TESTES COM DIFERENTES VIDROS E	
	PROTEÇÕES SOLARES	169
6.1	VIDROS	169
6.1.1	Amostras utilizadas.....	169
6.1.2	Resultados de FS	171
6.1.2.1	Vidro verde 6mm.....	172
6.1.2.2	Vidro prata 8mm	176
6.1.2.3	Vidro incolor 6mm	180
6.1.2.4	Considerações sobre os resultados de FS para os vidros	183
6.2	PROTEÇÕES SOLARES INTERNAS	188
6.2.1	Amostras utilizadas.....	188
6.2.2	Resultados de FS	190
6.2.2.1	Persiana horizontal (branca)	191
6.2.2.2	Persiana horizontal (preta).....	192
6.2.2.3	Cortina rolô 194	
6.2.2.4	Considerações sobre os resultados de FS para as proteções internas.....	197
6.3	PROTEÇÕES SOLARES EXTERNAS.....	198
6.3.1	Amostras utilizadas	198
6.3.2	Resultados de FS	200
6.3.2.1	Considerações sobre os resultados de FS para as proteções externas	206
6.4	ANÁLISE DAS INCERTEZAS	208
6.4.1	Incerteza no resultado da CP	209
6.4.2	Incerteza no resultado da CS	212
6.4.3	Resumo geral dos resultados das medições	214
7	COMPARAÇÕES COM O WINDOW6 E COM O MODELO	
	MATEMÁTICO	219
7.1	WINDOW6 E MODELO MATEMÁTICO.....	219
7.2	MODELAGEM	219
7.3	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	224
7.3.1	Vidros	224
7.3.2	Proteções solares internas	228
7.3.3	Proteções solares externas.....	228

7.4	RESUMO DAS COMPARAÇÕES ENTRE FS.....	230
8	CONCLUSÕES	235
8.1	SÍNTESE GERAL E OUTRAS CONSIDERAÇÕES.....	235
8.2	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	239
8.3	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	241
	REFERÊNCIAS.....	243
	ANEXOS	249

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-1. FLUXOGRAMA GERAL DO DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO	8
FIGURA 2-1. CORTE DO TRANSDUTOR DE FLUXO DE CALOR A GRADIENTE TANGENCIAL (GÜTHS ET AL., 1998)	10
FIGURA 2-2. APLICAÇÃO DOS TRANSDUTORES.....	10
FIGURA 2-3. PASSAGEM DO FLUIDO PELA SUPERFÍCIE DE ABSORÇÃO E VARIAÇÃO NA TEMPERATURA DE ENTRADA E SAÍDA	11
FIGURA 2-4. ESQUEMA INTERNO DO CALORÍMETRO (HARRISON E VAN WONDEREN, 1994)	12
FIGURA 2-5. ESQUEMA DO LOCAL DE TESTE (HARRISON E VAN WONDEREN, 1994) ...	13
FIGURA 2-6. VARIAÇÃO ANGULAR DA FONTE DE RADIAÇÃO (HARRISON E VAN WONDEREN, 1998)	16
FIGURA 2-7. UF - ASHRAE SOLAR CALORIMETER (SEECL, 2000)	17
FIGURA 2-8. ESQUEMA DO SISTEMA DE FUNCIONAMENTO DO CALORÍMETRO (TSENG E GOSWAMI, 2001)	18
FIGURA 2-9. SISTEMA MOWITT MOSTRANDO AS DUAS CÂMARAS OPERANDO DE FORMA INDEPENDENTE (LBNL, 2007).....	21
FIGURA 2-10. CORTE TRANSVERSAL DAS CÂMARAS DO MOWITT (LBNL, 2007)	22
FIGURA 2-11. INTERIOR DE UMA DAS CÂMARAS (LBNL, 2007)	22
FIGURA 2-12. SISTEMA DE CONTROLE DA TEMPERATURA DE UMA DAS CÂMARAS DO MOWITT (LBNL, 2007)	22
FIGURA 2-13. VISTA EXTERNA DO CALORÍMETRO (A) E CORTE ESQUEMÁTICO (B) (COLLINS E HARRISON, 2004).	25
FIGURA 2-14. FENESTRATION RADIOMETER (PEREIRA, 1992).....	29
FIGURA 2-15. RADIÔMETRO DE ABERTURA DESENVOLVIDO NA UFSC (MACEDO, 2002).....	29
FIGURA 2-16. CONFIGURAÇÃO GERAL DA MEDIÇÃO UTILIZANDO O RESFRIAMENTO POR CIRCULAÇÃO DE ÁGUA (MARINOSKI ET AL., 2007).....	30
FIGURA 2-17. ESQUEMA DOS ÂNGULOS DE ROTAÇÃO DO SCANNING RADIOMETER (PAPAMICHAEL ET AL., 1988 - ADAPTADO)	32
FIGURA 2-18. TESTE UTILIZANDO O SCANNING RADIOMETER (LBNL, 2007)	32
FIGURA 2-19. VISTA FRONTAL E LATERAL DA BLACK BOX (TSENG E GOSWAMI, 2001)	33
FIGURA 2-20. ESQUEMA DE POSICIONAMENTO DOS PIRANÔMETROS (VISTA FRONTAL E LATERAL) (TSENG E GOSWAMI, 2001)	33
FIGURA 3-1. DESENHO ESQUEMÁTICO DA CAVIDADE PRINCIPAL (COTAS EM MM)	41
FIGURA 3-2. DESENHO ESQUEMÁTICO DA CAVIDADE DE SECUNDÁRIA (COTAS EM MM).....	42
FIGURA 3-3. DESENHO ESQUEMÁTICO PARA MONTAGEM DO BANHO TÉRMICO.....	44
FIGURA 3-4. BANHO TERMOSTÁTICO PARA A CAVIDADE SECUNDÁRIA	45
FIGURA 3-5. ESQUEMA DA DISTRIBUIÇÃO INTERNA DOS COMPONENTES (VISTA EM PLANTA, SEM ESCALA)	47
FIGURA 3-6. ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE	52
FIGURA 3-7. COMPOSIÇÃO DA CAVIDADE COM SERPENTINAS APLICADAS NA FACE EXTERNA (PEÇAS LATERAIS)	55

FIGURA 3-8. VISTA DO LADO EXTERNO DA CAVIDADE E REFORÇO ESTRUCTURAL DO FUNDO.....	55
FIGURA 3-9. VISTA DO LADO INTERNO DA CAVIDADE	55
FIGURA 3-10. DETALHE DO ISOLAMENTO TÉRMICO EM LÃ DE VIDRO E CAIXA PROTETORA	55
FIGURA 3-11. VISTA POSTERIOR DA CAVIDADE SECUNDÁRIA JÁ MONTADA (DETALHE DA SERPENTINA)	56
FIGURA 3-12. VISTA FRONTAL DA CAVIDADE SECUNDÁRIA (DETALHE DO PLANO DE COLAGEM DOS FLUXÍMETROS)	56
FIGURA 3-13. SERPENTINA E RESISTÊNCIAS AQUECEDORAS NO INTERIOR DO RESERVATÓRIO	57
FIGURA 3-14. SISTEMA CONDENSADOR 1,5HP	57
FIGURA 3-15. VISTA GERAL DO BANHO TÉRMICO.....	57
FIGURA 3-16. ESTRUTURA DO TRAILER (PERFIS METÁLICOS)	58
FIGURA 3-17. MOLDURAS DE MADEIRA NAS ABERTURAS PARA AS CAVIDADES.....	58
FIGURA 3-18. VISTA EXTERNA DO TRAILER ACABADO	59
FIGURA 3-19. INTERFACE DE COMUNICAÇÃO.....	60
FIGURA 3-20. INTERFACE DE MONITORAMENTO	60
FIGURA 3-21. FLUXOGRAMA DA SEQUÊNCIA DE MONTAGEM DO CALORÍMETRO	62
FIGURA 3-22. SISTEMA CONDENSADOR INSTALADO NA PLATAFORMA DIANTEIRA DO TRAILER	63
FIGURA 3-23. RESERVATÓRIO INSTALADO NO INTERIOR DO TRAILER	63
FIGURA 3-24. VISTA EXTERNA DA CAVIDADE PRINCIPAL JÁ INSTALADA NO TRAILER	63
FIGURA 3-25. PINTURA DA CAVIDADE PRINCIPAL	63
FIGURA 3-26. DETALHE INTERNO DA CAVIDADE SECUNDÁRIA JÁ INSTALADA NO TRAILER	64
FIGURA 3-27. VISTA EXTERNA DA INSTALAÇÃO DA CAVIDADE SECUNDÁRIA (SEM O VIDRO)	64
FIGURA 3-28. QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA	65
FIGURA 3-29. PONTO DE LUZ NO TETO.....	65
FIGURA 3-30. LIGAÇÃO DA BOMBA E BARRILETE COM REGISTROS DE CONTROLE DE FLUXO DA CP	65
FIGURA 3-31. ISOLAMENTO DAS TUBULAÇÕES E DAS CAVIDADES	65
FIGURA 3-32. CAMINHO PERCORRIDO PELA ÁGUA (A); VISÃO EXTERNA DO MISTURADOR (B); DIVISÓRIA INTERNA (C); ISOLAMENTO DO MISTURADOR DEPOIS DE INSTALADO NO TRAILER (D)	66
FIGURA 3-33. LAYOUT DA INSTALAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE	67
FIGURA 3-34. CONFIGURAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DOS PIRANÔMETROS	69
FIGURA 3-35. DETERMINAÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR PARA CALIBRAÇÃO DOS PIRANÔMETROS (DIA 21/11/2007, CÉU CLARO)	71
FIGURA 3-36. DETERMINAÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR PARA CALIBRAÇÃO DOS PIRANÔMETROS (DIA 03/12/2007, CÉU PARCIALMENTE NUBLADO)	73
FIGURA 3-37. TÚNEL DE VENTO UTILIZADO PARA CALIBRAÇÃO DOS ANEMÔMETROS...75	
FIGURA 3-38. CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ANEMÔMETRO 1 (INTERNO)	75
FIGURA 3-39. CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ANEMÔMETRO 2 (EXTERNO)	75
FIGURA 3-40. NUMERAÇÃO DOS FLUXÍMETROS, VISTA EXTERNA FRONTAL	76

FIGURA 3-41. GEL NA FACE DO FLUXÍMETRO (A), RESISTÊNCIA APLICADA SOBRE O GEL (B), MANTA TÉRMICA ACIMA DA RESISTÊNCIA (C), ARRANJO COMPLETO (D).....	77
FIGURA 3-42. ESQUEMA DE CALIBRAÇÃO DOS FLUXÍMETROS	78
FIGURA 3-43. CURVA DE CALIBRAÇÃO DO FLUXÍMETRO 1	79
FIGURA 3-44. CONFIGURAÇÃO PARA CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES	81
FIGURA 3-45. CURVA DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES	82
FIGURA 3-46. TESTE COM DOIS TERMOPARES NO INTERIOR DO BANHO	83
FIGURA 3-47. VARIAÇÃO NAS TEMPERATURAS MEDIDAS PELOS TERMOPARES	84
FIGURA 3-48. INCERTEZA NA MEDIDA DO ΔT DA ÁGUA NA ENTRADA E SAÍDA DA CAVIDADE.....	84
FIGURA 3-49. CURVA DE CALIBRAÇÃO DO TERMISTOR	85
FIGURA 3-50. EXEMPLO DA FIXAÇÃO DOS TERMOPARES (A); EXEMPLO DE PROTEÇÃO DOS TERMOPARES QUANDO EXPOSTOS À RADIAÇÃO SOLAR (B); ENTRADA PARA MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO AR (C); JUNTA DE REFERÊNCIA DOS TERMOPARES (D)	86
FIGURA 3-51. MEDIDOR E HASTE ARTICULADA (A); CONJUNTO MONTADO NA POSIÇÃO DE USO (B).....	88
FIGURA 3-52. MEDIDOR DE COEFICIENTE DE CONVECÇÃO INSTALADO NO CALORÍMETRO	90
FIGURA 3-53. VISTA EXTERNA DO CALORÍMETRO EM FUNCIONAMENTO (A, B)	91
FIGURA 4-1. TMCP E TEMPERATURA DO AR EXTERNO (TAR EXT) DURANTE A MEDIÇÃO	98
FIGURA 4-2. VARIAÇÕES DE TEMPERATURA NAS FACES DA CAVIDADE PRINCIPAL (OBS.: A NOMENCLATURA DE POSICIONAMENTO DAS FACES SUPÕE O OBSERVADOR LOCALIZADO ATRÁS DA CAVIDADE)	98
FIGURA 4-3. DIFERENÇAS DE TEMPERATURA ENTRE O AR EXTERNO E TMCP E ENTRE A ÁGUA NA ENTRADA E SAÍDA DA CAVIDADE PRINCIPAL.....	99
FIGURA 4-4. VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO VIDRO DA CAVIDADE PRINCIPAL	100
FIGURA 4-5. VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR NO INTERIOR DA CAVIDADE PRINCIPAL	100
FIGURA 4-6. CALOR RETIRADO PELO FLUIDO NA CAVIDADE PRINCIPAL	101
FIGURA 4-7. FATOR SOLAR MEDIDO NO PRIMEIRO TESTE DE CALIBRAÇÃO (ÂNGULO DE INCIDÊNCIA $\sim 45^\circ$).....	103
FIGURA 4-8. RESULTADOS DO PRIMEIRO TESTE COM A CAVIDADE SECUNDÁRIA	105
FIGURA 4-9. TMCP E TEMPERATURA DO AR EXTERNO (SEGUNDO TESTE).....	108
FIGURA 4-10. VARIAÇÕES DE TEMPERATURA NAS FACES DA CP (SEGUNDO TESTE) ...	109
FIGURA 4-11. FATOR SOLAR MEDIDO NO SEGUNDO TESTE DE CALIBRAÇÃO (ÂNGULO DE INCIDÊNCIA $\sim 60^\circ$).....	110
FIGURA 4-12. DIFERENÇAS DE TEMPERATURA ENTRE O AR EXTERNO E TMCP E ENTRE A ÁGUA NA ENTRADA E SAÍDA DA CAVIDADE PRINCIPAL (SEGUNDO TESTE)	111
FIGURA 4-13. FATOR SOLAR MEDIDO NA CS (SEGUNDO TESTE)	113
FIGURA 4-14. VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NA CS (SEGUNDO TESTE)	113
FIGURA 4-15. FENÔMENO DA PASSAGEM DO FLUXO DE CALOR DEVIDO À DIFERENÇA DE TEMPERATURA DO AR	116
FIGURA 5-1. CONDIÇÕES PARA A COMPOSIÇÃO DOS TERMOS DA EQUAÇÃO GERAL DO FS.....	119

FIGURA 5-2. VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO BANHO NOS QUATRO TESTES LISTADOS NA TABELA 5-1	124
FIGURA 5-3. VARIAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA DA CP E DO VIDRO	125
FIGURA 5-4. VARIAÇÃO DO FS MEDIDO NA CP.....	125
FIGURA 5-5. VARIAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA DA CS E DO VIDRO	126
FIGURA 5-6. VARIAÇÃO DO FS MEDIDO NA CS.....	126
FIGURA 5-7. ESQUEMA DE REPRESENTAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NAS CAVIDADES (SEM ESCALA).....	130
FIGURA 6-1. DIMENSÕES DA LÂMINA (BRISE HORIZONTAL) – FONTE: HUNTERDOUGLAS.....	199
FIGURA 7-1. OPÇÕES DE CÁLCULO SELECIONADAS NO W6.....	220
FIGURA 7-2. EXEMPLO: CONSTRUÇÃO DAS PROTEÇÕES SOLARES NO W6.....	222
FIGURA 7-3. ESQUEMA DE REDUÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE AS LÂMINAS.	223
FIGURA 7-4. EXEMPLO DE MONTAGEM DOS SISTEMAS TRANSPARENTES	223

LISTA DE TABELAS

TABELA 3-1. DIMENSÕES PREVISTAS PARA A ABERTURA DA CAVIDADE PRINCIPAL (CP).....	40
TABELA 3-2. QUADRO DE CARGAS DO CALORÍMETRO	48
TABELA 3-3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA BOMBA DE RECALQUE	49
TABELA 3-4. SENSORES DE MONITORAMENTO	50
TABELA 3-5. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PIRANÔMETRO KIPP&ZONEN MODELO CM-21.....	50
TABELA 3-6. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS MEDIDORES DE VAZÃO.....	51
TABELA 3-7. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PIRANÔMETRO KIPP&ZONEN MODELO CM22.....	69
TABELA 3-8. CONSTANTES DE CALIBRAÇÃO DOS PIRANÔMETROS FABRICADOS NO LMPT (CÉU CLARO).....	70
TABELA 3-9. INCERTEZA NA CALIBRAÇÃO DOS PIRANÔMETROS PARA CÉU ABERTO	71
TABELA 3-10. CONSTANTES DE CALIBRAÇÃO DOS PIRANÔMETROS FABRICADOS NO LMPT (CÉU PARCIALMENTE NUBLADO).....	72
TABELA 3-11. INCERTEZA NA CALIBRAÇÃO DOS PIRANÔMETROS PARA CÉU PARCIALMENTE NUBLADO	73
TABELA 3-12. INCERTEZA NA CALIBRAÇÃO DOS ANEMÔMETROS	76
TABELA 3-13. CONSTANTES DE CALIBRAÇÃO DOS FLUXÍMETROS.....	80
TABELA 3-14. VARIAÇÃO ENTRE OS VALORES DE ΔT MEDIDO E ΔT DA CURVA AJUSTADA NA CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES	82
TABELA 3-15. VARIAÇÃO ENTRE OS VALORES DE TEMPERATURA MEDIDA E CALCULADA (CURVA AJUSTADA) NA CALIBRAÇÃO DO TERMISTOR	85
TABELA 3-16. DETERMINAÇÃO DA VAZÃO NA CAVIDADE PRINCIPAL	87
TABELA 4-1. PROPRIEDADES ÓPTICAS DO VIDRO INCOLOR 3MM (CARAM, 2002).....	94
TABELA 5-1. VARIAÇÃO NA TEMPERATURA MÉDIA DO BANHO TÉRMICO	123
TABELA 5-2. RESUMO DAS MEDIÇÕES COM O VIDRO INCOLOR 3MM	163
TABELA 5-3. AJUSTE DO FS PARA $\Delta T(T_c - T_{ve}) = -5^{\circ}\text{C}$	164
TABELA 5-4. AJUSTE DO FS PARA $\Delta T(T_c - T_{ve}) = -10^{\circ}\text{C}$	165
TABELA 6-1. PROPRIEDADES ÓPTICAS DO VIDRO (CARAM, 2002)	170
TABELA 6-2. RESUMO DAS MEDIÇÕES COM O VIDRO VERDE 6MM.....	175
TABELA 6-3. RESUMO DAS MEDIÇÕES COM O VIDRO PRATA 8MM	179
TABELA 6-4. RESUMO DAS MEDIÇÕES COM O VIDRO INCOLOR 6MM	182
TABELA 6-5. COMPARAÇÃO ENTRE FS MÉDIO MEDIDO NA CP E CS	183
TABELA 6-6. FAIXAS DE ΔT CAVIDADE-VIDRO EM FUNÇÃO DA ABSORÇÃO DO VIDRO	186
TABELA 6-7. COMPARAÇÃO ENTRE O FS MEDIDO E TEÓRICO (TESTES COM VIDROS) ..	187
TABELA 6-8. RESUMO DAS MEDIÇÕES COM AS PROTEÇÕES SOLARES INTERNAS	196
TABELA 6-9. COMPARAÇÃO ENTRE O FS MEDIDO E TEÓRICO (TESTES COM PROTEÇÕES INTERNAS)	198
TABELA 6-10. RESUMO DAS MEDIÇÕES COM AS PROTEÇÕES SOLARES EXTERNAS	205
TABELA 6-11. COMPARAÇÃO ENTRE O FS MEDIDO E TEÓRICO (TESTES COM PROTEÇÕES EXTERNAS)	207

TABELA 6-12. INFORMAÇÕES PARA ESTIMATIVA DA INCERTEZA NO FS MEDIDO NA CP.....	210
TABELA 6-13. INCERTEZA NO FS MEDIDO NA CP (VIDROS).....	211
TABELA 6-14. INCERTEZA NO FS MEDIDO NA CP (PROTEÇÕES SOLARES)	212
TABELA 6-15. INFORMAÇÕES PARA ESTIMATIVA DA INCERTEZA NO FS MEDIDO NA CS.....	213
TABELA 6-16. INCERTEZA NO FS MEDIDO NA CS (VIDROS).....	214
TABELA 6-17. RESUMO GERAL DAS MEDIÇÕES COM OS VIDROS (CP)	215
TABELA 6-18. RESUMO GERAL DAS MEDIÇÕES COM OS VIDROS (CS)	216
TABELA 6-19. RESUMO GERAL DAS MEDIÇÕES COM AS PROTEÇÕES SOLARES	217
TABELA 7-1. COMPARAÇÃO FS MEDIÇÃO X FS MODELO MATEMÁTICO (VIDROS NA CP)	225
TABELA 7-2. COMPARAÇÃO FS MEDIÇÃO X FS MODELO MATEMÁTICO (VIDROS NA CS)	226
TABELA 7-3. COMPARAÇÃO FS MEDIÇÃO X FS W6 (VIDROS NA CP)	227
TABELA 7-4. COMPARAÇÃO FS MEDIÇÃO X FS W6 (VIDROS NA CS)	227
TABELA 7-5. COMPARAÇÃO FS MEDIÇÃO X FS W6 (PROTEÇÕES INTERNAS)	229
TABELA 7-6. COMPARAÇÃO FS MEDIÇÃO X FS W6 (PROTEÇÕES EXTERNAS)	229

LISTA DE QUADROS

QUADRO 5-1. VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DO ΔT CAVIDADE-VIDRO (VIDRO INCOLOR 3MM)	134
QUADRO 5-2. VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DO ΔT CAVIDADE-VIDRO (VIDRO VERDE 6MM)	136
QUADRO 5-3. VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DO $H_{INT}/(H_{INT}+H_{EXT})$ (VIDRO INCOLOR 3MM)	139
QUADRO 5-4. VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DO $H_{INT}/(H_{INT}+H_{EXT})$ (VIDRO VERDE 6MM)	141
QUADRO 5-5. VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DO $H_{INT}/(H_{INT}+H_{EXT})$ PARA $\Delta T(T_C-T_{VE}) = -10^\circ C$	144
QUADRO 5-6. ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS PERDAS DE CALOR	147
QUADRO 5-7. MEDIÇÕES NA CP (VIDRO INCOLOR 3MM)	150
QUADRO 5-8. MEDIÇÕES NA CS (VIDRO INCOLOR 3MM)	156
QUADRO 6-1. RESULTADOS DE FS MEDIDO NA CP (VIDRO VERDE 6MM)	172
QUADRO 6-2. RESULTADOS DE FS MEDIDO NA CS (VIDRO VERDE 6MM)	173
QUADRO 6-3. RESULTADOS DE FS MEDIDO NA CP (VIDRO PRATA 8MM)	176
QUADRO 6-4. RESULTADOS DE FS MEDIDO NA CS (VIDRO PRATA 8MM)	177
QUADRO 6-5. RESULTADOS DE FS MEDIDO NA CP (VIDRO INCOLOR 6MM)	180
QUADRO 6-6. RESULTADOS DE FS MEDIDO NA CS (VIDRO INCOLOR 6MM)	181
QUADRO 6-7. DETALHES DAS AMOSTRAS DE PROTEÇÕES SOLARES INTERNAS	189
QUADRO 6-8. RESULTADOS DE FS MEDIDO NA CP (PERSIANA HORIZONTAL - BRANCA - 45°)	191
QUADRO 6-9. RESULTADOS DE FS MEDIDO NA CP (PERSIANA HORIZONTAL - PRETA - 45°)	192
QUADRO 6-10. RESULTADOS DE FS MEDIDO NA CP (ROLÔ - BRANCA)	194
QUADRO 6-11. POSICIONAMENTO DAS LÂMINAS E INSTALAÇÃO DO BRISE NO CALORÍMETRO	199
QUADRO 6-12. RESULTADOS DE FS MEDIDO NA CP (BRISE HORIZONTAL BRANCO - 45°) – BANHO “OFF”	202
QUADRO 6-13. RESULTADOS DE FS MEDIDO NA CP (BRISE HORIZONTAL BRANCO - 45°) – BANHO “ON”	203
QUADRO 7-1. RESUMO DAS COMPARAÇÕES ENTRE FS (VIDROS NA CP)	231
QUADRO 7-2. RESUMO DAS COMPARAÇÕES ENTRE FS (VIDROS NA CS)	232
QUADRO 7-3. RESUMO DAS COMPARAÇÕES ENTRE FS (PROTEÇÕES INTERNAS)	233
QUADRO 7-4. RESUMO DAS COMPARAÇÕES ENTRE FS (PROTEÇÕES EXTERNAS)	234

LISTA DE SÍMBOLOS

Abreviações

adap = adaptado(a);
Âng Inc = Ângulo de incidência ($^{\circ}$);
CS = Cavidade secundária;
CP = Cavidade principal;
DesvPad = Desvio Padrão;
Flux = fluxímetro;
FS = Fator Solar (adimensional);
FSmed = Fator Solar medido;
FS teórico = Fator Solar teórico;
Horiz = Horizontal
Rad = Radiação solar (W/m^2);
Tempo med = Tempo de medição (min);
var = Variação;
W6 = Window6;

Momenclatura

A_{difuso} = Absorção do vidro para a radiação solar difusa (adimensional);
A_{face} ou A_{face,n} = Área da face da cavidade do calorímetro (m^2);
A_J = Área de janela exposta à radiação (m^2);
A_{T,faces} = Área total das faces da cavidade (m^2);
C_{água} = Calor específico da água ($\text{J}/\text{l K}$);
CP_{FACE} = Temperatura da face da cavidade principal ($^{\circ}\text{C}$);
CS fundo = Temperatura média da cavidade secundária ($^{\circ}\text{C}$);
DT ou ΔT = Diferença de temperatura;
FS_{prise} = Fator Solar do Brise (adimensional);
FS_{cp} = Fator Solar medido na cavidade principal (adimensional);
FS_{cs} = Fator Solar na cavidade secundária;
FS_{med} = Fator solar medido (adimensional);
Flux_m = Resultado do ganho de calor de cada fluxímetro (W/m^2);
h = Coeficientes de troca de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
h_c = Coeficiente de troca por convecção ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);
h_{ext} = Coeficiente de troca de calor global externo ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);
h_{int} = Coeficiente de troca de calor global interno ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);
h_{horiz} = Coeficiente de troca de calor global na superfície horizontal ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);
h_r = Coeficiente de troca radiante ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);
h_{vert} = Coeficiente de troca de calor global na superfície vertical ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);
h_{trailer} = Coeficiente de troca de calor superficial total no trailer ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);
K_{flux} = Constante de calibração do fluxímetro (W/mV);
K_{pit} = Constante de calibração do piranômetro ($\text{W}/\text{m}^2/\text{mV}$);

Q_{cp} = Fluxo de calor na cavidade principal através da amostra (W);
Q_{cp_{faces}} = Calor perdido através das paredes da cavidade (W);
Q_{cp_{faces}} = Calor perdido através das paredes da cavidade (W);
Q_{cp_{bf}} = Calor perdido através das bordas de fixação (W);
Q_{cp_{fluid}} = Calor removido pelo fluido do sistema de resfriamento (W);
Q_{cp_{equi}} = Calor gerado pelos equipamentos internos (W);
Q_{u_{cp}} = Fluxo (ganho ou perda) de calor devido à diferença de temperatura do ar no lado interno e externo da amostra (W);
q_{conv} = Densidade de fluxo de calor transferida da superfície interna da cavidade devido ao efeito convectivo gerado pelo ar enclausurado (W/m²);
q_{flui} = Densidade de fluxo de calor removido pela passagem do fluido (água) pelas serpentinas (W/m²);
q_{med} = Densidade de fluxo de calor quantificada pelo calorímetro (W/m²);
q_{OL} = Densidade de fluxo de calor trocada em onda longa entre a superfície interna da cavidade e o vidro (W/m²);
q_{perdas} = Densidade de fluxo de calor perdido para o ar pelas faces externas da cavidade, e pelo contato das bordas com a estrutura do trailer (W/m²);
q_{rad_α} = Densidade de fluxo de calor absorvido pelo vidro devido à incidência de radiação solar (W/m²);
q_{rad_{tr}} = Densidade de fluxo de calor transmitida através do vidro devido à incidência de radiação solar (W/m²);
q_{ref} = Densidade de fluxo de calor (onda curta) refletido pela superfície interna da cavidade (W/m²);
m_{cp} = Taxa de fluxo de massa de água da cavidade principal (l/s);
N ou N_k = Parcela da fração absorvida que é reemitida para o interior do ambiente (adimensional);
P_{res} = Potência dissipada na resistência aquecedora (W);
Rad_j = Radiação solar incidente no plano de medição (W/m²).
R_{ar} = Resistência térmica na interface da superfície externa do isolante da cavidade e o ar externo (m²°K/W);
R_{car} = Resistência térmica da câmara de ar formada no interior da cavidade (m²°K/W).
R_{ext} = Resistência superficial externa (m²K/W);
R_{int} = Resistência superficial interna (m²K/W);
R_{is} ou R_{isolante} = Resistência térmica do isolante térmico da cavidade (m²°K/W);
R_t = Resistência térmica superficial entre o isolamento e o ar no interior do trailer (m²K/W);
R_{Tcp} = Resistência térmica total entre o ar no interior da cavidade principal e o ar externo (m²K/W);
R_{tr} = Resistência térmica superficial entre o isolamento e o interior do trailer (m²°K/W);
R_v = Resistência térmica do vidro (m²°K/W);
S_{flux} = Sinal de resposta do fluxímetro (mV);
SHGC(D) = Fator Solar do vidro para radiação difusa (adimensional);

S_{pir} = Sinal de resposta do piranômetro (mV);
 t = Coeficiente “t-Student”;
 T_{ar} = Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);
 T_{ARext} = Temperatura do ar externo ($^{\circ}\text{C}$);
 T_{ARtr} = Temperatura do ar no interior do trailer ($^{\circ}\text{C}$);
 T_{brise} = Parcela de radiação solar que passa através do brise de forma difusa (adimensional);
 T_{c} ou T_{CAVIDADE} = Temperatura média da cavidade ($^{\circ}\text{C}$ ou K);
 T_{car} = Temperatura na câmara de ar no interior da cavidade ($^{\circ}\text{C}$);
 T_{ce} = Temperatura média da cavidade ($^{\circ}\text{C}$);
 $T_{\text{C}_{\text{face}_n}}$ = Temperatura média de cada face da cavidade ($^{\circ}\text{C}$);
 T_{ci} = Temperatura superfície interna da cavidade
 T_{difuso} = Transmissão do vidro para a radiação solar difusa (adimensional);
 T_{flux} = Temperatura do fluxímetro ($^{\circ}\text{C}$);
 T_{isi} = Temperatura da superfície interna do isolamento ($^{\circ}\text{C}$);
 T_{ise} = Temperatura da superfície externa do isolamento ($^{\circ}\text{C}$);
 TMCP = Temperatura média da cavidade principal ($^{\circ}\text{C}$);
 TMCS = Temperatura média da cavidade secundária ($^{\circ}\text{C}$);
 T_{trailer} = Temperatura do trailer ($^{\circ}\text{C}$ ou K);
 T_{VE} = Temperatura na superfície externa do vidro ($^{\circ}\text{C}$ ou K);
 T_{vi} = Temperatura da superfície interna do vidro ($^{\circ}\text{C}$ ou K);
 T_{VIDRO} = Temperatura média do vidro ($^{\circ}\text{C}$);
 T_{viz} = Temperatura da vizinhança ($^{\circ}\text{C}$ ou K);
 U_{face} = transmitância térmica total da face ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);
 $u(\text{G})$ = Incerteza da grandeza G;
 Var ext = Velocidade do ar externo (m/s);
 ΔT_{cp} = Diferença de temperatura da água entre a entrada e saída da cavidade principal ($^{\circ}\text{C}$);
 $\Delta T_{\text{cp_ar}}$ = Diferença de temperatura entre o ar no interior da cavidade principal e o ar no meio exterior ($^{\circ}\text{C}$);
 ΔT_{face} = Diferença de temperatura a temperatura da face e o ar ($^{\circ}\text{C}$);

Letras gregas

α = Absortância a radiação solar do vidro (adimensional);
 Δ = Diferença;
 ϵ_{c} = Emissividade da superfície interna da cavidade (adimensional);
 ϵ_{v} = Emissividade da superfície interna do vidro (adimensional);
 θ = Ângulo de incidência ($^{\circ}$);
 σ = Constante de Stefan-Boltzmann igual a $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W}/\text{m}^2\text{K}^4\text{)}$;
 τ = Transmitância a radiação solar do vidro (adimensional);

MARINOSKI, Deivis Luis. **Desenvolvimento de um calorímetro para determinação do fator solar de vidros e janelas**. 2010. 298p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um calorímetro utilizado para determinar o Fator Solar de vidros e janelas completas, com ou sem elementos de proteção solar. O Fator Solar é um índice adotado internacionalmente como parâmetro de comparação entre estes elementos de fechamento. Este índice tem um valor adimensional que varia de 0 a 1, e representa a fração da energia solar que é transmitida diretamente, mais a parcela absorvida pela janela e posteriormente reemitida para o interior da edificação. O desenvolvimento do calorímetro inclui o seu projeto, construção, detalhamento da instrumentação e calibração, além de medições do Fator Solar para diferentes elementos. O calorímetro possui dois sistemas de medição de ganho térmico: um em função da diferença de temperatura do líquido de resfriamento da cavidade principal (usada para testes com elementos em escala real), e um outro sistema para a cavidade secundária, que quantifica o calor adquirido através de vidros por meio de transdutores de fluxo de calor. Durante a etapa de calibração, uma nova metodologia de controle para a medição utilizando o calorímetro foi proposta. A partir daí foram testados 4 tipos de vidros, cada um deles simultaneamente nas duas cavidades (vidro monolítico incolor 3mm, incolor 6mm, verde 6mm, e prata laminado 8mm). Também foram realizadas medições na cavidade principal com três tipos de proteções solares internas (persiana metálica branca 45°, persiana metálica preta 45°, rolô branco) e uma proteção externa (brise horizontal metálico branco 45°). Todos os testes foram realizados sob condições ambientais reais, com os elementos posicionados verticalmente e orientados para o norte. Os resultados do Fator Solar medido foram comparados com valores teóricos calculados através da norma ISO 9050 para o caso dos vidros. Já para as proteções solares, foram adotados como parâmetros de comparação valores obtidos com base no ASHRAE Fundamentals (2005). Os resultados obtidos em campo também foram comparados com os resultados de simulações realizadas com um modelo matemático e no Software Window6. A incerteza de medição (absoluta) foi em média de $\pm 0,04$ na cavidade secundária e de $\pm 0,12$ na cavidade principal. Em geral, os valores experimentais encontrados apresentaram boa concordância com os valores teóricos. Assim, o calorímetro pode ser utilizado para fins de pesquisa ou como alternativa para verificação de Fator Solar de novos produtos que não estejam cobertos pelos processos de cálculo apresentados nas normalizações existentes.

Palavras-chave: Fator Solar, Calorímetro; Medição em campo; Vidros e Janelas.

MARINOSKI, Deivis Luis. **Development of a calorimeter for determination of Solar Factor of glazing and windows**. 2010. 298p. Thesis (Doctorate) – Civil Engineering Department, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brazil.

ABSTRACT

This work presents the development of a calorimeter used to determine the Solar Factor of glazing and windows, including or not shading devices. Solar Factor is an index used around the world for comparing thermal performance of fenestrations. This index has a non-dimensional value between 0 and 1, and it represents the solar energy fraction that is directly transmitted added of the portion absorbed by the window and re-emitted towards the inside of the building. The development of the calorimeter includes project, construction, instrumentation particularities, calibration and Solar Factor measurements in different elements. The calorimeter has two systems of thermal gain measurement: the first one depends on the temperature difference of fluid used for refrigeration of main chamber test (employed to tests with elements in full scale); the second system is applied in a secondary chamber, where heat flux transducers are used to measure the solar gain through fenestration. During the calibration stage, a new method for calorimeter measurement control was applied and tested. After this, four types of glass were tested at the two chambers (monolithic 3mm clear glass, 6mm clear glass, 6mm green glass, and laminated 8mm silver neutral). Measurements were also performed using the main cavity with three types of internal shading devices (metal venetian blind with white horizontal slats at 45°, metal venetian blind with black horizontal slats at 45°, white roller blind) and one external (metal white horizontal slats at 45°). All the tests were conducted under real outdoor conditions. The surface of measurement was always maintained in vertical position and on the north orientation. For glass products, the results of Solar Factor measurements were compared with theoretical values determinate by ISO 9050. As for the shading devices, values based on ASHRAE Fundamentals (2005) were adopted as parameters for comparison. Also, the experimental values were compared with simulations developed using a mathematical model and the Window6 software. The uncertainty of measurement (absolute) was on average ± 0.04 for the secondary cavity and ± 0.12 in the main cavity. In general, the experimental values presented good agreement with the theoretical values. Thus, the calorimeter can be used for research purposes or as an alternative to determine Solar Factor of new products, which are not covered by the calculation procedures presented in the existing standardization.

Keywords: Factor Solar, Calorimeter; Outdoor measurement; Fenestrations.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO DE ESTUDO: JANELAS E O CONSUMO DE ENERGIA

Mergulhando no universo da engenharia e dos desafios da tecnologia atual, a preocupação com a eficiência energética tem se mostrado um dos focos de inquietação para a sociedade dos nossos tempos. O estudo do consumo de energia associado às edificações tem aberto um leque para uma grande variedade de análises e melhorias. Estas englobam desde o caráter macro, tais como aplicações em projeto, construção, ocupação e condicionantes externos, até chegar aos limites chamados “inferiores”, como as propriedades intrínsecas de cada elemento ou material utilizado.

De maneira geral, cada um dos elementos ou materiais utilizados nas edificações tem a sua importância para a formação de um ambiente que atenda as necessidades humanas, sejam elas relativas à segurança, estética, conforto ou consumo de energia. No entanto, existem alguns destes elementos que ocupam uma posição distinta do ponto de vista da relação entre suas funcionalidades e o ambiente construído. Dentro desta categoria, estão incluídas as janelas e aberturas da edificação.

As janelas e aberturas podem ocupar desde uma pequena fração da área da fachada ou até mesmo chegar a compor grandes paredes envidraçadas, constituindo a maior parte do envelope construtivo. Por isso, em muitos casos, elas são consideradas um elemento dominante na aparência da edificação. A variedade de formas, cores e materiais utilizados permitem modificações na aparência e na estética arquitetônica. Além dos fatores estéticos, as aberturas apresentam originalmente outras funções, tais como permitir a passagem da luz e a ventilação. Também é reconhecida a sua influência psicológica ao promover satisfação, saúde e produtividade para os ocupantes (Carmody et al., 2004).

No entanto, com a evolução da tecnologia, algumas dessas funções passaram a ser supridas através de sistemas artificiais, visando o conforto e a manutenção de condições ambientais estáveis de moradia e trabalho. Deste modo, atrelaram-se diretamente as janelas e aberturas ao uso e também aos custos com energia.

Exemplos quantitativos do impacto das aberturas sobre o consumo de energia podem ser observados através de diversas pesquisas, realizadas principalmente nos EUA. Frost et al. (1996) estimaram que no ano de 1994 existia neste país uma área de janelas de aproximadamente 1,77 bilhões de metros quadrados no setor residencial, que era responsável pelo consumo de 1,7.1015 BTU/ano (498 TWh/ano). Destes, 1,3.1015 BTU/ano (76,5%) eram usados para aquecimento e 0,4.1015 BTU/ano (23,5%) para resfriamento.

Nesta mesma época, acreditava-se que as janelas do setor residencial dos EUA geravam um custo adicional de energia de US\$ 9,3 bilhões/ano. Estudos do LBNL (Lawrence Berkeley Nacional Laboratory – University of California) supunham que se todas as janelas compradas entre os anos de 1996 e 2010 (15 anos) incorporassem camadas de baixa emissividade (low-E), gás de baixa condutividade e outras tecnologias, este mesmo gasto poderia ser reduzido em até 25%, ou seja, mais de US\$ 2 bilhões/ano em 2010 (Carmody et al., 1996).

A partir de avaliações mais recentes, Carmody et al. (2004) mencionam que os edifícios comerciais dos EUA são responsáveis por 16% do consumo de energia do país, o que corresponde a 15,4 quadrilhões (Peta¹) de BTUs/ano de um total de 92,6 (respectivamente, 4.513 TWh e 27.138 TWh). Desta parcela, as janelas são responsáveis por 1,1 PBTUs/ano (322 TWh) consumidos com resfriamento e aquecimento em edifícios comerciais, enquanto a iluminação artificial representa 3,83 PBTUs/ano (1.122 TWh). Assumindo que 25% da energia utilizada com iluminação artificial poderia ser substituída pela iluminação natural se as janelas fossem aplicadas adequadamente (cerca de 0,96 PBTUs/ano ou 280 TWh), estima-se que as janelas de edifícios comerciais somem aproximadamente 2 PBTUs/ano (602 TWh) do consumo anual, ou seja, mais do que 2% do consumo total anual do país². Com base nestes valores, verifica-se que as janelas representam

¹ Peta (P) representa o valor de 10¹⁵.

² Comparação com o consumo total anual de energia elétrica em alguns países do mundo (IEA, 2006):

Alemanha	579,9	TWh
Austrália	224,9	TWh
Brasil	359,6	TWh
China	2.054,6	TWh
França	478,1	TWh
Japão	1.031,3	TWh
Reino Unido	371,3	TWh

(Ano Base 2004)

mais de 12% de toda a energia utilizada nos edifícios comerciais dos EUA. Se o setor residencial for incluído nestes cálculos, as janelas seriam então responsáveis por um total de 5 PBTUs/ano (1.465 TWh), ou mais de 5% da energia consumida anualmente no país.

Restringindo o assunto apenas aos efeitos das trocas térmicas envolvidas, é notório que os ganhos e perdas de calor através das janelas representam parcelas importantes das cargas de resfriamento e aquecimento dos ambientes. Ainda nos EUA, estima-se que, em média, estas trocas correspondam a 31% da carga de resfriamento e 17% da carga de aquecimento em edifícios comerciais. Já no caso de construções residenciais, estes números seriam de 34% e 23%, respectivamente (Winkelmann, 2001).

Por sua vez, a radiação solar incidente nas janelas é um fator muito significativo sobre o consumo de energia gerado pelas cargas de resfriamento e aquecimento. Reilly e Hawthorne (1998) realizaram um estudo avaliando a influência da transmitância térmica e do ganho de calor solar através de janelas sobre o consumo de energia com condicionamento de ambientes residenciais em duas cidades dos EUA. Estima-se que, para o caso da cidade de Baltimore (aquecimento predominante), somente o ganho de calor solar através de janelas compõe aproximadamente 15% da energia utilizada para condicionamento. Já para a cidade de Miami (resfriamento predominante), o ganho de calor solar é responsável por 37% do consumo de energia com condicionamento.

Li e Lam (2000), por meio de estudos e simulações energéticas de edifícios comerciais na cidade de Hong Kong, também mostraram que o consumo de energia com ar condicionado está entre 50% e 60% do uso total de energia elétrica. Neste caso o ganho de calor solar, principalmente por aberturas, foi o maior responsável pela carga de resfriamento.

Tendo em vista estes números, países como EUA, Canadá, Reino Unido, Suécia, Austrália e outros, têm desenvolvido, nos últimos anos, iniciativas que visam minimizar os custos com o consumo de energia atribuído às aberturas. Os governos destes países têm investido em projetos de pesquisas com o objetivo de compreender melhor os processos físicos de transmissão de luz e calor através das janelas, buscando, inclusive, determinar as propriedades dos materiais que as compõem. As linhas de pesquisa têm se subdividido em estudos na área teórica, experimental, desenvolvimento de softwares e elaboração de normas. Estes conhecimentos têm dado suporte para algumas ações,

como a criação de sistemas de certificação, onde índices de desempenho energético dos produtos colocados no mercado são avaliados e proporcionam um indicativo para sua melhor aplicação em relação à eficiência energética.

1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Principalmente em regiões de clima quente, o ganho de calor solar é um dos maiores responsáveis pelo aumento da carga térmica no interior da edificação. Arasteh (1995) descreve um consenso sobre o assunto ao mencionar que o controle do ganho de calor solar é muito importante para o projeto de edificações eficientes devido aos seguintes fatores:

- Cada vez mais residências e edifícios estão sendo construídos com sistemas de condicionamento de ar;
- Ganhos solares em edifícios de climas quentes contribuem para o aumento da carga de resfriamento;
- O sistema elétrico atinge seu pico de demanda em períodos de verão, quando as cargas de resfriamento são mais significativas.

Desta maneira, observa-se que as construções brasileiras se enquadram claramente nesta situação, sofrendo uma grande influência do calor solar transmitido através das aberturas.

No Brasil, de uma maneira geral, a preocupação com o impacto no consumo de energia que as aberturas causam ainda é incipiente. As normas voltadas para o setor são, em sua maioria, relacionadas a aspectos construtivos das janelas. Praticamente inexistem normas nacionais relacionadas à eficiência energética de janelas.

No entanto, no ano de 2007, uma medida oficial foi aplicada neste sentido. O MME (Ministério de Minas e Energia), através da Eletrobrás/Procel, implementou uma regulamentação, inicialmente voluntária, para certificação de níveis de eficiência energética em prédios comerciais e públicos. Dentro desta regulamentação, o conhecimento das propriedades das janelas e seus componentes passa a ser essencial para a avaliação global da eficiência energética dos edifícios.

Uma destas propriedades é o Fator Solar (FS), conhecido internacionalmente como Solar Heat Gain Coefficient (SHGC). O Fator Solar é um dos mais importantes índices de desempenho energético de

janelas e aberturas. Este índice representa a fração de ganho térmico devido à radiação solar que a abertura transmite diretamente, somada à parcela que é absorvida e re-emitada pela própria abertura para o interior da edificação. Sua definição é expressa na equação [1.1], onde τ e α são propriedades ópticas (transmitância e absortância) de cada elemento, e N é a fração de fluxo de calor absorvido que chega ao interior da edificação (ASHRAE, 2005). Estas propriedades ópticas, por sua vez, são dependentes do ângulo de incidência (θ) e do comprimento de onda. O Fator Solar é dado como um número adimensional entre 0 e 1. Este valor pode ser especificado apenas para o vidro ou ser indicado para todo o conjunto da janela.

$$FS(\theta, \lambda) = \tau(\theta, \lambda) + N\alpha(\theta, \lambda) \quad [1.1]$$

Este tipo de informação, associada à simulação computacional e outros processos de análise, possibilita a elaboração de projetos de edificações melhores e mais eficientes.

Mas a criação de modelos matemáticos para determinar o ganho de calor solar e o Fator Solar para algumas situações é difícil, devido ao grande número de variáveis envolvidas, uma vez que cada tipo de janela e proteção solar tem características específicas que precisam ser consideradas.

Mesmo assim, muitos esforços têm sido realizados com o objetivo de caracterizar o fenômeno. Klems (1994a, 1994b, 2002), Collins (2002) e Collins e Harrison (2004a) desenvolveram métodos para estimar o ganho de calor solar através de aberturas com proteções solares. Atualmente, alguns destes modelos matemáticos de cálculo têm sido implementados através de programas computacionais, mas estes apresentam limitações, especialmente quando se deseja avaliar janelas com elementos de sombreamento. Deste modo, medições diretas são importantes para comparar e validar os resultados calculados (Klems et al. 1996; Collins, 2002; Collins e Harrison, 2004b).

Os calorímetros solares são dispositivos comumente utilizados nas pesquisas relacionadas com a avaliação de desempenho térmico de janelas. Através destes sistemas, é possível a realização de medições para determinar a quantidade de calor que cruza o plano da janela sob condições reais de utilização ou situações específicas de teste. Em alguns casos, os resultados das medições são utilizados para auxiliar o processo de certificação de janelas.

No Brasil, a Universidade Federal de Santa Catarina tem continuamente dedicado esforços para o desenvolvimento de dispositivos experimentais de medição de ganho de calor solar, visando a caracterização de sistemas de aberturas (Pereira, 1993; Pereira et al., 1999; Macedo e Pereira, 2003). Marinowski et al. (2005, 2007) deram continuidade a esta linha de pesquisa, apresentando o aperfeiçoamento de uma bancada de testes já existente. Este último estudo é utilizado como base para construção de um novo equipamento de medição calorimétrica através de aberturas, conforme proposto nos objetivos deste trabalho. O desenvolvimento do novo calorímetro faz parte de um projeto de pesquisa financiado pelo programa de P&D FURNAS/ANEEL.

A normalização internacional prevê o uso de calorímetros para situações em que os procedimentos matemáticos não descrevem de maneira satisfatória o fenômeno da passagem da radiação pela abertura (Ex: proteções solares, envidraçamentos inovadores, formas prismáticas ou curvas, películas holográficas, etc.). Assim, tendo em vista a significância das janelas para o conforto e eficiência energética das edificações brasileiras e o fato de não existir nenhum dispositivo nacional que viabilize testes de determinação do Fator Solar destes elementos em condições reais, destaca-se mais uma vez a necessidade do desenvolvimento deste trabalho.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Projetar e construir um calorímetro solar para teste de janelas em tamanho real, e desenvolver um método de determinação do Fator Solar aplicado ao equipamento.

1.3.2 Objetivos específicos

- Calibrar o calorímetro e os sensores utilizados;
 - Desenvolver um método de determinação do Fator Solar aplicado ao calorímetro.
 - Determinar o Fator Solar de alguns tipos de vidros e proteções solares comumente utilizados nas edificações brasileiras;
 - Verificar comparativamente os resultados de Fator Solar determinados com o calorímetro frente a valores obtidos através
-

de processos matemáticos e computacionais.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste primeiro capítulo, chamou-se a atenção para a importância das aberturas nas edificações, tendo como foco o consumo de energia. Também foram apresentadas as justificativas e a motivação da pesquisa, bem como os seus objetivos. Já o capítulo dois traz uma revisão da literatura nacional e internacional, abordando diferentes métodos e sistemas de medição do ganho de calor e procedimentos para determinação do Fator Solar de janelas.

No terceiro capítulo são descritas as considerações de projeto do calorímetro, fabricação e montagem dos diversos componentes utilizados, bem como a calibração e instalação de sensores de monitoramento das variáveis ambientais e outras grandezas.

No quarto e quinto capítulos são expostas, respectivamente, a primeira e a segunda fase de calibração do calorímetro. Estas duas fases incluem: os testes iniciais com o calorímetro, a metodologia de determinação do FS, alterações necessárias no sistema de controle, considerações sobre a física da transferência de calor através dos vidros, o desenvolvimento de um modelo matemático e resultados de FS para o vidro de referência utilizado nos testes de calibração.

O capítulo seis apresenta os resultados da determinação do FS realizada com o calorímetro para alguns tipos de vidros e proteções solares internas e externas. Também são estimadas as incertezas nos valores de FS obtidos nestas medições. Depois disso, no sétimo capítulo, os valores de FS encontrados experimentalmente são comparados com valores obtidos através de processos de cálculo matemático e computacional.

Por fim, as conclusões e considerações finais sobre a pesquisa são apresentadas no capítulo oito. A seguir, a Figura 1-1 mostra um fluxograma geral com as etapas executivas do estudo e a sua distribuição ao longo do texto deste documento.

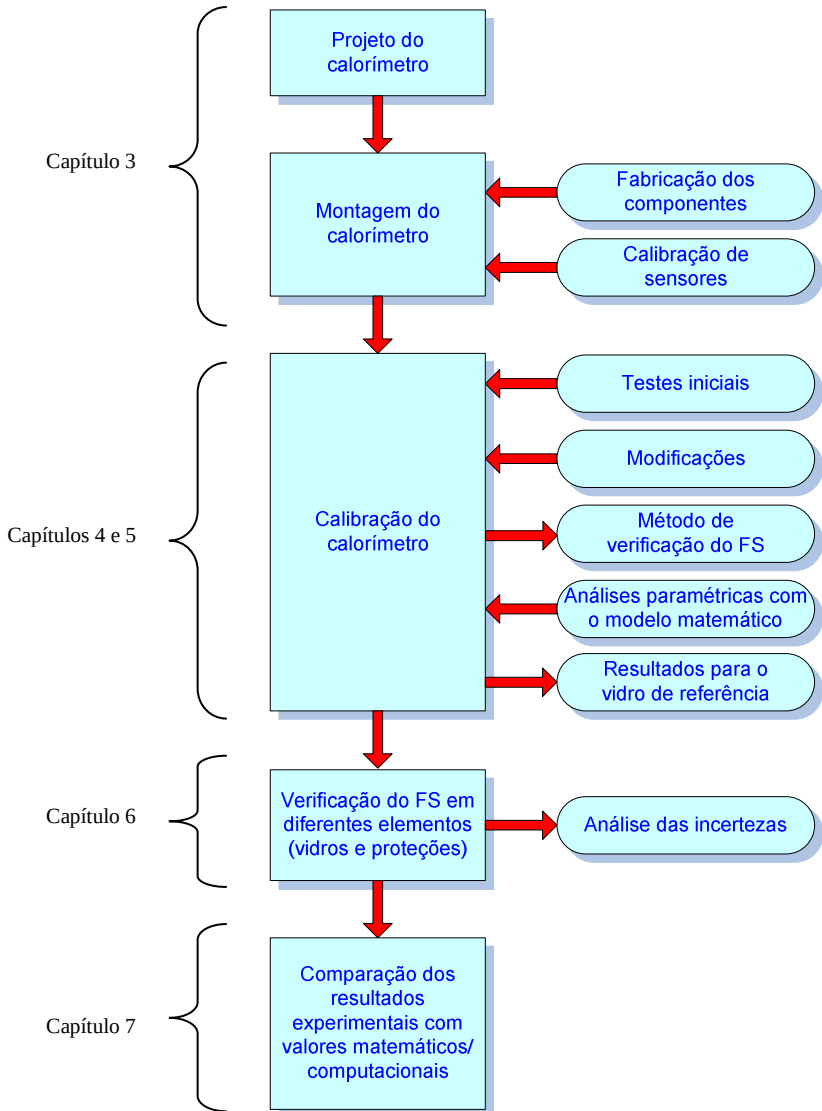


Figura 1-1. Fluxograma geral do desenvolvimento do estudo

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FUNDAMENTOS DA MEDIÇÃO DE GANHO DE CALOR APLICADOS AOS CALORÍMETROS SOLARES

Dois processos de medição são normalmente aplicados para determinar o ganho de calor solar através de uma janela: o método fluximétrico e o método calorimétrico por diferença de temperatura.

O método fluximétrico utiliza um sensor plano (fluxímetro), composto pelo agrupamento de dezenas de micro termopares que geram um sinal proporcional à diferença de temperatura devido ao fluxo de calor transmitido. O sensor é instalado no lado oposto à radiação solar incidente na amostra de teste (janela) e quantifica a fração da radiação solar que atravessa este elemento.

Um exemplo deste tipo de sensor é o transdutor "a gradiente tangencial" descrito por Güths (1994) e Güths et al. (1995). Esse transdutor é construído a partir de técnicas de fotogravura, possuindo uma termopilha a eletrodos depositados (cobre/constantan) disposta paralelamente à superfície de medição (Figura 2-1). Assimetrias físicas na forma de pinos metálicos provocam diferenças de temperatura sobre a termopilha gerando uma tensão proporcional ao fluxo de calor. A espessura desse sensor é de 300 μm , apresentando uma resistência térmica de aproximadamente $6 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$. A Figura 2-2 mostra a aplicação dos transdutores sobre uma base plana.

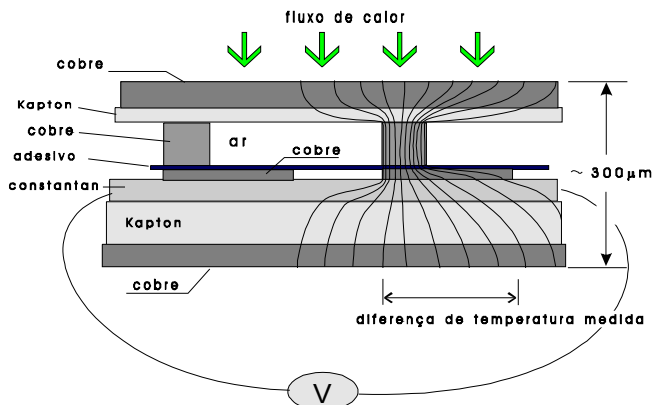


Figura 2-1. Corte do transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial (Güths et al., 1998)

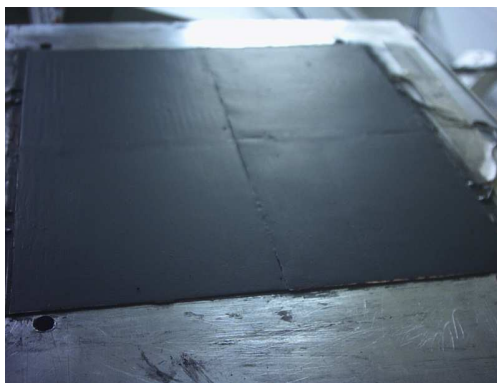


Figura 2-2. Aplicação dos transdutores

Já no processo calorimétrico, o ganho de calor é quantificado através da remoção do calor absorvido por uma superfície também posicionada no lado oposto à radiação solar incidente sobre a amostra de teste (janela). Esta remoção se dá por meio da passagem (contato) de um fluido, normalmente a água, pela superfície de absorção. Não havendo mudança de fase no fluido, o valor do calor específico da água (C_p) pode ser mantido constante, e o calor removido (q) é então quantificado com base na vazão mássica ($\dot{m}$) e na diferença entre a temperatura média (ΔT) do fluido na entrada e na saída da superfície de contato. Este

é o mesmo princípio básico associado aos trocadores de calor, que correlaciona estas variáveis na forma matemática $q = \dot{m} C_p \Delta T$ (Incropera e DeWitt, 2003). A Figura 2-3 apresenta um esquema do processo de remoção do calor por meio da passagem do fluido.

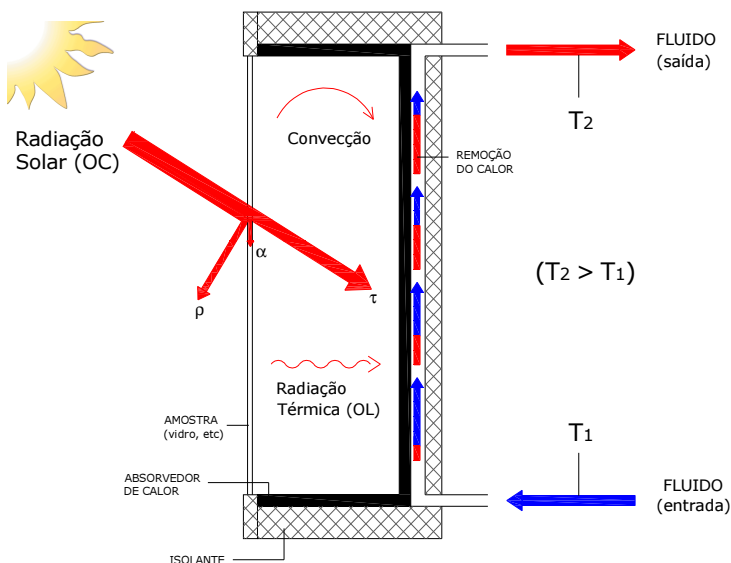


Figura 2-3. Passagem do fluido pela superfície de absorção e variação na temperatura de entrada e saída

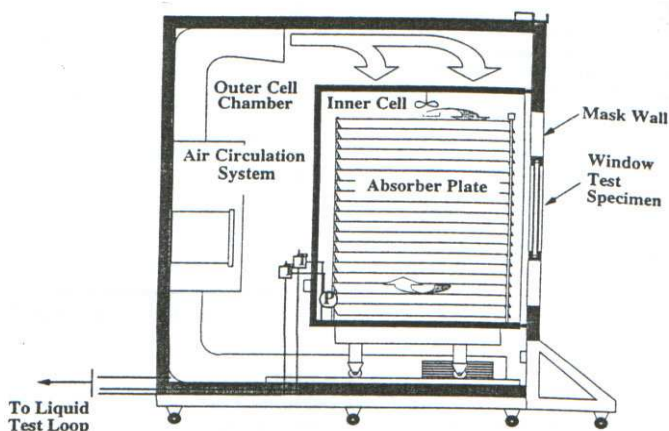
2.2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE GANHO DE CALOR SOLAR EM JANELAS

2.2.1 Simulador solar

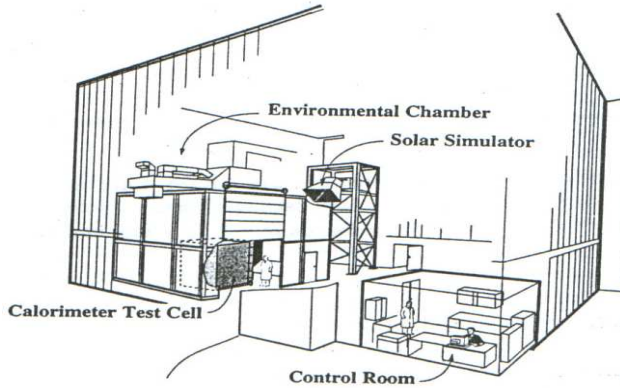
Entre os anos de 1988 e 1989, o governo canadense, através do NRC (Natural Resources Canada), patrocinou o desenvolvimento de um protótipo e também de um procedimento de medição para determinar o FS e a transmitância térmica através de janelas. Desde então, melhoramentos no equipamento foram feitos, e em 1992 os testes com diferentes modelos de aberturas passaram a ser efetivamente realizados.

Harrison e Van Wonderen (1994) apresentam um trabalho descrevendo a utilização de um simulador solar para determinar, em laboratório, o valor do FS em diferentes modelos de janelas. Posteriormente, os resultados foram comparados a valores obtidos com um programa computacional.

Para realizar as medições, primeiramente as amostras são montadas em um calorímetro para janelas. O calorímetro é posicionado em uma câmara com condições ambientais controladas. Do lado externo, a amostra (janela) é irradiada, em um ângulo fixo, por uma única fonte (lâmpada) que proporciona índices de radiação entre 150 e 1100 W/m². Esta lâmpada é combinada com um sistema de refletores que proporciona radiação uniforme sobre a área da amostra e uma distribuição espectral próxima a solar (Figura 2-4 e Figura 2-5).



**Figura 2-4. Esquema interno do calorímetro
(Harrison e Van Wonderen, 1994)**



**Figura 2-5. Esquema do local de teste
(Harrison e Van Wonderen, 1994)**

O desempenho da janela é diretamente medido com base no balanço interno de energia da célula – equação [2.1]. O fluxo de energia através da janela e da câmara (Q_{net}) é a soma da energia extraída da placa absorvedora (Q_{abs}), do calor que sai através das paredes da célula (Q_{cw}) e das paredes que suportam a janela (Q_{mw}), menos a potência dissipada internamente pelos equipamentos (P_{inputs}).

$$Q_{net} = Q_{abs} + Q_{cw} + Q_{mw} - P_{inputs} \quad [2.1]$$

O fator de desempenho térmico da janela (η), que corresponde à fração do fluxo de calor incidente que é admitida pela mesma, é definido na equação [2.2]:

$$\eta = \frac{Q_{net}}{A_f \cdot G} \quad [2.2]$$

Onde:

Q_{net} = Fluxo de energia através da janela (W);

A_f = Área da janela (m^2);

G = Irradiação solar (W/m^2).

Em estudos prévios sobre o método, Harrison e Dubrous (1990) apud Harrison e Van Wonderen (1994) desenvolveram uma análise de

regressão relacionando simultaneamente o FS e a transmitância térmica da janela (U_f). Neste estudo, o fator de desempenho é determinado em diferentes condições climáticas (com G variando de 200 a 1000 W/m² e diferença de temperatura (ΔT) fixa em 40°C). A regressão é do tipo linear, definindo o FS como a intersecção da linha de regressão com o eixo das ordenadas, e U_f igual à inclinação da reta, como mostra a equação [2.3]:

$$\eta = FS - U_f \cdot \frac{\Delta T}{G} \quad [2.3]$$

Para isolar FS, busca-se a condição em que o $\Delta T/G$ seja nulo e, conseqüentemente, η represente o próprio FS. Desta forma, para realização do experimento a opção encontrada foi manter a diferença de temperatura através da janela igual a zero.

Através de simulação computacional foi realizada uma verificação da influência das mudanças das condições ambientais de teste sobre o FS. Como ferramenta, foi utilizado o software VISION3 (Wright, 1992). Este programa tem como padrão as condições ambientais de teste estabelecidas em norma pela CSA (Canadian Standards Association). As condições da CSA estabeleciam:

- Temperatura interna de 21°C;
- Temperatura externa de -18°C;
- Coeficiente de convecção exterior de 30 W/m²K;
- Irradiação solar de 783 W/m²K;
- Distribuição do espectro solar conforme a ASTM AM1.5 (ASTM, 1987).

Estas condições foram alteradas, aplicando-se as novas condições de teste, que são as seguintes:

- Temperatura interna de 21°C;
 - Temperatura externa de 21°C;
 - Coeficiente de convecção exterior de 20 W/m²K;
 - Irradiação solar de 783 W/m²K;
 - Distribuição espectral da lâmpada.
-

Diferentes tipos de vidros foram analisados no programa VISION3, verificando-se que as variações dos resultados do FS, comparando a condição padrão (CSA) e a condição do método de teste eram pequenas.

Um total de nove amostras foram testadas, todas com vidros duplos e o mesmo modelo de esquadria, porém com diferentes tipos de vidros (claro, reflexivo, verde, e Low-e). Em média, a incerteza dos valores da medição foi de $\pm 4,9\%$. A variação entre os resultados medidos e calculados de FS foi considerada pequena, com uma diferença média igual a 0,03.

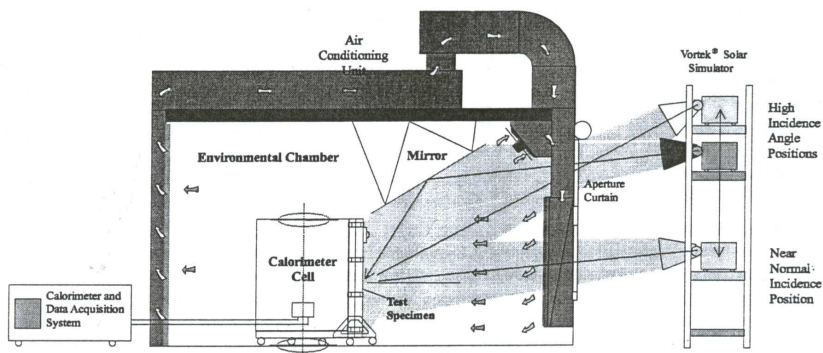
Levando-se em consideração a influência da distribuição espectral sobre os valores de FS para alguns tipos de vidro, foi desenvolvido um fator de ajuste para corrigir parte do erro causado pelo uso da lâmpada em lugar da radiação solar. O ajuste dos valores medidos segundo a distribuição espectral da ASTM reduziu significativamente a diferença entre os valores obtidos pelo método de teste e a simulação. De maneira geral, observou-se que os efeitos causados no FS, pelo uso da lâmpada para substituir a radiação solar, foram pequenos em janelas com vidros claros ou coloridos, mas foram significativos para janelas com vidro espectralmente seletivos.

Quatro anos mais tarde, Harrison e Van Wonderen (1998) apresentaram um novo trabalho, dando continuidade ao estudo anterior. Novamente o simulador solar é utilizado para medir valores de FS em diferentes modelos de aberturas comercialmente disponíveis (inclusive com proteções solares), comparando os resultados medidos com valores de simulação computacional.

A novidade foi um melhoramento do equipamento, permitindo a variação do ângulo de incidência da radiação. A variação angular da altura solar foi possibilitada através do movimento vertical da lâmpada (fonte de radiação), montada sobre um elevador. Com isso, as amostras foram diretamente irradiadas até um ângulo de 30° com a horizontal, e para ângulos maiores que este valor foi utilizado um sistema de espelhos refletores (Figura 2-6). Já a variação azimutal é conseguida pela rotação da célula calorimétrica sobre um eixo vertical no interior da câmara climatizada.

O estudo buscou verificar a dependência angular do FS para algumas amostras de vidro com e sem proteções solares tipo veneziana e cortina. Foi analisado também o potencial de programas computacionais para simular unidades envidraçadas complexas. Usando as propriedades ópticas dos materiais previamente medidas, os sistemas de aberturas

foram simulados utilizando o programa VISION4 (Wright, 1994). Os valores de FS calculados pelo programa foram comparados aos valores medidos através do método de teste proposto. Como o programa VISION4 não havia sido desenvolvido para utilizar dispositivos de controle solar, foi assumida uma simplificação, onde se considerou estas proteções como sendo vidros translúcidos ou opacos.



**Figura 2-6. Variação angular da fonte de radiação
(Harrison e Van Wonderen, 1998)**

Para as unidades compostas apenas por vidros ou com cortinas tipo “roller shade” com o perímetro selado, os valores medidos e calculados de FS apresentaram uma boa concordância. Isso mostrou, para efeito de simulação, que é possível supor determinados tipos de sistema de sombreamento como uma camada de vidro translúcido ou opaco. Porém, para venezianas com perímetro aberto, os resultados mostraram variação significativa (chegando a valores de FS 25% acima do encontrado do caso com perímetro selado). Este resultado foi atribuído ao efeito da convecção natural que aumenta a transferência da energia absorvida pelas palhetas para o interior do calorímetro, e também à reflexão da luz em função da orientação e da cor das palhetas. A aplicação do programa para estes casos de sistemas complexos foi restrita devido a limitações teóricas e limitações do modelo de cálculo de transferência de calor.

2.2.2 UF-ASHRAE Solar calorimeter

O UF-ASHRAE Solar calorimeter é um equipamento utilizado para medir o ganho de calor solar através de aberturas. O nome origina-se do fato de o equipamento ter sido doado pela ASHRAE para a Universidade da Flórida, em 1961, onde ele foi instalado e recalibrado, entrando em funcionamento em 1962. Antes disso, o calorímetro já operava desde sua construção, em 1945, no laboratório de pesquisas da ASHVE (American Society of Heating and Ventilating Engineers – como era conhecida a ASHRAE até 1954) em Cleveland, Ohio (McCluney, 1991; SEECL, 2000).

Tseng e Goswami (2001) realizaram um estudo utilizando o calorímetro solar para medir o FS de amostras de janelas fornecidas pela NFRC, onde o princípio de funcionamento do equipamento é descrito.

O calorímetro é constituído de um absorvedor cilíndrico cortado por um plano metálico com uma abertura para fixação da amostra. O dispositivo está montado sobre um sistema de eixos e rodas que permite a movimentação e rotação do equipamento (Figura 2-7).



Figura 2-7. UF - ASHRAE Solar calorimeter (SEECL, 2000)

O equipamento conta com um sistema de circulação de água para remover o calor transmitido para o interior da câmara isolada termicamente. Durante a medição, a temperatura e a massa do fluxo de água são ajustados para remover o calor absorvido e manter a

temperatura interna do calorímetro em um nível constante, preferencialmente igual à temperatura ambiente.

A tubulação de circulação de água é soldada a uma placa de cobre, que forma a superfície de absorção, e ambas são pintadas com tinta preta. As paredes da câmara também são de cobre escurecido. Já as laterais e a parte posterior são altamente isoladas por uma camada de 4 polegadas de espuma de isocianeto injetado. A face externa do isolamento é coberta por alumínio pintado de branco. A fim de determinar o calor residual perdido através do isolamento, é colocada uma placa de poliestireno rígido de condutividade conhecida e com sensores entre o metal de absorção e o isocianeto para verificar a diferença de temperatura (Figura 2-8).

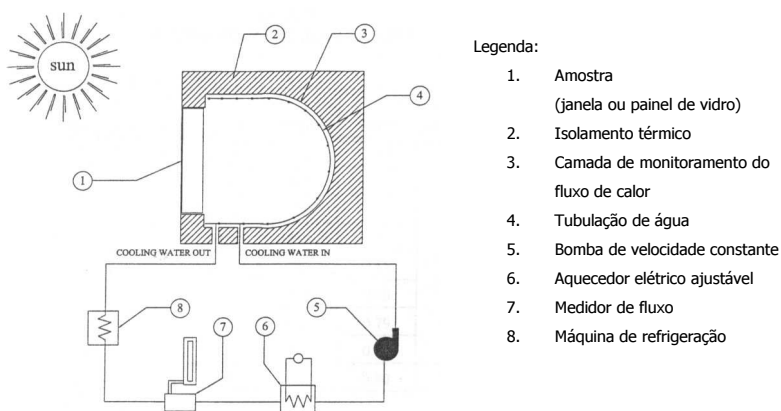


Figura 2-8. Esquema do sistema de funcionamento do calorímetro (Tseng e Goswami, 2001)

O ganho de calor solar (Q_{SHG}) através da abertura no calorímetro é dado pela equação [2.4], através do balanço térmico entre o calor removido pela circulação de água (Q_{out}), o fluxo de calor através do painel frontal (Q_{sp}), o fluxo de calor através da abertura ou janela (Q_w), e o fluxo de calor através da paredes da célula do calorímetro (Q_{walls}).

$$Q_{SHG} = Q_{out} + Q_{sp} + Q_w + Q_{walls} \quad [2.4]$$

Já o calor removido pelo sistema de circulação de água (Q_{out}) pode ser calculado através da equação [2.5]:

$$Q_{out} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad [2.5]$$

Onde:

$\dot{m}$ = Taxa de fluxo de massa de água no sistema (kg/s);

C_p = Calor específico da água (J/kgK);

ΔT = Diferença de temperatura entre a água que entra e sai do calorímetro (°C).

O fluxo de calor através do painel frontal (Q_{sp}) pode ser calculado pela equação [2.6]:

$$Q_{sp} = A_{sp} \cdot (T_{sp,in} - T_{sp,out}) / R_{sp} \quad [2.6]$$

Onde:

A_{sp} = Área do painel (m²);

$T_{sp,in}$ = Temperatura do lado interno do painel (°C);

$T_{sp,out}$ = Temperatura do lado externo do painel (°C);

R_{sp} = Resistência térmica do painel (m²K/W).

O fluxo de calor através de abertura (Q_w) em condições de regime permanente é dado pela equação [2.7]:

$$Q_w = U_{fen} \cdot A_w \cdot (T_{enc} - T_{amb}) \quad [2.7]$$

Onde:

U_{fen} = Coeficiente de transmitância térmica total da abertura (W/m²K);

A_w = Área da abertura (m²);

T_{enc} = Temperatura no interior da câmara (°C);

T_{amb} = Temperatura externa (°C).

Para condições de regime permanente, o fluxo de calor transmitido através das paredes laterais da célula do calorímetro (Q_{walls}) é dado pela equação [2.8]:

$$Q_{walls} = \left(\frac{k}{\delta} \right) \cdot \sum (A_x \cdot \Delta T_x) \quad [2.8]$$

Onde:

k = Condutividade térmica do material (W/mK);

δ = Espessura do isolamento (m);

A_x = Área de uma parede “x” da célula (m²);

ΔT = Diferença de temperatura entre o lado interno e externo de uma parede “x” da célula (°C).

O FS é então determinado como sendo a razão entre o ganho de calor solar (QSHG) e a radiação incidente (Q_{sr}). A radiação incidente é, por sua vez, calculada pela multiplicação da área da janela pela densidade de radiação solar que chega até ela no momento da medição.

Foram realizadas medições utilizando o calorímetro para inclinação da amostra (vidro incolor 6,4mm) igual a 45° e 90°, com ângulo de incidência de radiação entre 20° e 30° e intensidade mínima de radiação de 630W/m². Os testes nas duas inclinações (45° e 90°) foram divididos em três subgrupos baseados na diferença entre a temperatura interna e externa do calorímetro: pequena diferença de temperatura ($\Delta T < 1,7^\circ\text{C}$); média diferença de temperatura ($1,7^\circ\text{C} < \Delta T < 6,7^\circ\text{C}$); e grande diferença de temperatura ($\Delta T > 6,7^\circ\text{C}$).

Analisando a influência da inclinação da amostra, verificou-se que quando a diferença de temperatura era pequena, os valores medidos para 45° e 90° (em média 0,80 e 0,82 respectivamente) ficaram bastante próximos. Os resultados indicaram que a diferença entre os valores do SHGC nos dois casos é de aproximadamente 2,5%. Esta diferença corresponde a um valor próximo ao desvio padrão das medições, por isso os autores concluíram que o efeito da inclinação dentro deste intervalo não é significativo.

Os resultados das medições mostraram também que a diferença de temperatura entre o ar no interior e no exterior do calorímetro tem grande influência sobre o resultado do FS. Quando a diferença de temperatura é menor que 1,7°C, o valor do FS medido para 45° e 90° de inclinação é de 0,80 e 0,82, respectivamente. Para diferença de temperatura média ($1,7^\circ\text{C} < \Delta T < 6,7^\circ\text{C}$), os valores de FS encontrados

variam entre 0,78 e 0,68. Já quando a diferença de temperatura é alta ($\Delta T > 6,7^\circ\text{C}$), os valores de FS, tanto para a inclinação de 45° como 90° , decrescem significativamente, ficando em torno de 0,60.

2.2.3 MOWITT (Mobile Window Thermal Test Facility)

O MOWITT é um dispositivo construído na Universidade da Califórnia, pelos pesquisadores do Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), para verificar e estudar o desempenho de janelas, vidros e dispositivos de sombreamento sob condições reais de utilização (Klems e Warner, 1992; Klems e Kelley, 1996; Klems et al., 1996; LBNL, 2007)

O sistema caracteriza o fluxo líquido de energia em função do tempo, medidas de temperatura, incidência de radiação solar e das condições de vento às quais estão expostas as amostras de janela. O MOWITT é composto por um par de calorímetros instalados em um “container” sobre rodas, o que possibilita sua movimentação.

Trata-se de um equipamento baseado em transdutores de fluxo de calor que medem a energia transmitida através da abertura, operando em escala real. O sistema é composto de duas grandes câmaras, cobertas por fluxímetros, dispostas lado a lado, onde é fixada a abertura que será testada e uma abertura de referência (Figura 2-9, Figura 2-10 e Figura 2-11). A abertura de referência é composta apenas por um vidro claro com espessura de 3mm.



Figura 2-9. Sistema MOWITT mostrando as duas câmaras operando de forma independente (LBNL, 2007)

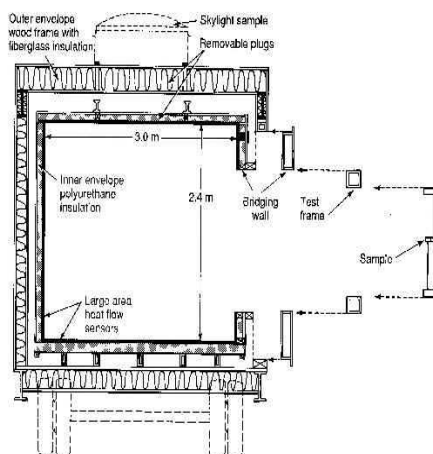


Figura 2-10. Corte transversal das câmaras do MOWITT (LBNL, 2007)

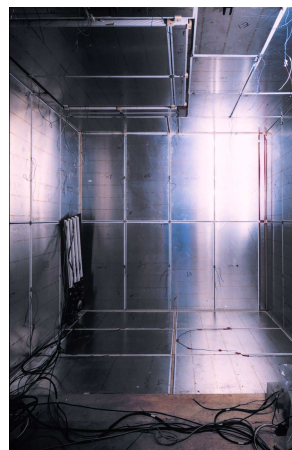


Figura 2-11. Interior de uma das câmaras (LBNL, 2007)

Cada cavidade tem sua superfície externa mantida à temperatura constante por um complexo sistema de circulação de ar ao redor das câmaras de teste, conforme mostrado na Figura 2-12.

Após o desenvolvimento de um método matemático para estimar o ganho de calor solar em janelas com proteções solares, o MOWITT foi utilizado para comparar os resultados calculados com medições diretas (Klems e Warner, 1992; Klems, 1993).

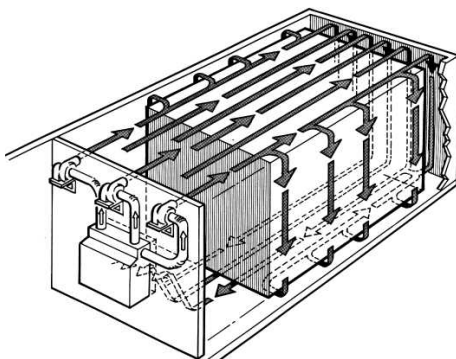


Figura 2-12. Sistema de controle da temperatura de uma das câmaras do MOWITT (LBNL, 2007)

Inicialmente, um scanner radiométrico foi usado para medir a transmissão e reflexão de radiação nos elementos que compõem o sistema de abertura. Então, um processo de cálculo matemático, que considera inter-reflexões, é aplicado para determinar as propriedades de transmissão e a absorção da radiação entre as camadas (vidros). Estas propriedades são depois combinadas com as medições das frações de fluxo de calor emitidas por elementos específicos, estimando assim o resultado do Fator Solar. A expressão utilizada para representar o Fator Solar (FS) da abertura é, então, dada pela equação [2.9]:

$$FS = \tau + N_i \alpha \quad [2.9]$$

Onde:

τ = Transmitância

α = Absortância

N_i = Fração da radiação solar absorvida por um elemento e transmitida para o interior do ambiente.

Reconhecendo que existe uma dependência do FS em relação ao ângulo de incidência (θ), ao ângulo azimutal (ϕ) e também ao número de camadas que compõem a abertura, foi realizada uma generalização da equação [2.9]. A equação [2.10] apresenta esta generalização para alguns tipos de aberturas, onde, T_{fH} representa a transmitância direcional do sistema e N_i e A_{fi} são, respectivamente, as frações de fluxo para o interior e a absortância em cada uma das “i” camadas.

$$FS(\theta, \phi) = T_{fH}(\theta, \phi) + \sum_{i=1}^M N_i A_{fi}(\theta, \phi) \quad [2.10]$$

Observou-se que T_{fH} e A_{fi} são valores puramente ópticos, dependendo de propriedades como o comprimento de onda e refletância, mas não da temperatura. Já N_i é um valor calorimétrico que pode depender da geometria do sistema, da temperatura das camadas, da temperatura dos arredores, da temperatura e movimentação do ar e da intensidade da radiação solar.

Em parte do mesmo estudo, foram realizados testes com o MOWITT para avaliar estas frações N_i . Isso foi realizado através da colocação de dois sistemas idênticos em câmaras separadas, sendo que sobre um determinado elemento de um deles (por exemplo, uma veneziana) é dissipada uma potência elétrica conhecida para simular um aumento na absorvância solar. Esta potência elétrica causa uma variação no fluxo de calor medido na primeira câmara, que é comparado ao fluxo de calor do sistema na segunda câmara (mais detalhes em Klems e Kelley, 1996). Para uma verificação teórica das frações N_i , é aplicada a equação [2.11], que relaciona o fluxo líquido de calor medido (W), transmitância térmica (U), área exposta (A), temperatura do ar externo (t_0), temperatura do ar interno (t_1), Fator Solar (FS), radiação solar incidente (I_s) e potência dissipada (P), todos em função do tempo (t).

$$W(t) = (UA)[T_0(t) - T_1(t)] + FS(t)AI_s(t) + N_iP(t) \quad [2.11]$$

Nas verificações diretas do Fator Solar, a equação [2.11] também é utilizada, excluindo-se o termo que considera as frações de fluxo ($N_iP(t)$).

Para o caso de uma janela de vidros duplos incolores com uma proteção solar interna branca translúcida, o valor do FS obtido pelo método matemático proposto foi de $0,33 \pm 0,04$, e o valor medido com o MOWITT foi de $0,36 \pm 0,04$ para um ângulo de incidência médio de aproximadamente 47° . Os dois resultados de FS (calculado e medido), além de apresentarem uma boa concordância entre si, também mostraram ter uma boa aproximação com o valor tabelado no ASHRAE Handbook (versão 1989) para o mesmo tipo de sistema, que era de 0,35 para um ângulo de incidência de 30° .

Mais tarde, Klems et al. (1996) apresentaram novas comparações de resultados de FS de janelas com proteção solar (neste caso um vidro duplo com uma veneziana interna a 45°) pelo método de cálculo desenvolvido anteriormente (Klems, 1993) e medições realizadas com o MOWITT.

Neste estudo, os valores encontrados nas medições mostraram significativa similaridade com os correspondentes valores obtidos através do método de cálculo. O intervalo dos ângulos de incidência dos valores de FS obtidos nas medições foi de 15° a 75° , sendo que os valores calculados reproduziram a tendência angular dos resultados dos testes com o MOWITT. Plotando os resultados do FS medido em função

do ângulo de incidência, a variação máxima observada em relação à curva ajustada pelo método de cálculo foi de 0,10.

Assim, os resultados dos testes realizados com o MOWITT auxiliaram na validação do método de cálculo proposto por Klems (1993). Este método, por sua vez, serviu de base para um equacionamento de cálculo do FS em aberturas com proteções solares, que foi utilizado na atualização da versão 2001 do Handbook of fundamentals da ASHRAE (Klems, 2002).

2.2.4 Queen's solar calorimeter

Collins e Harrison (2004a) descrevem o procedimento de medição utilizado para testes de amostras de janelas com proteções solares internas. O aparato de medição utilizado é um calorímetro solar (Figura 2-13) com um controle computacional que segue a movimentação do sol. O equipamento está localizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Queens, Kingston, em Ontário, Canadá.

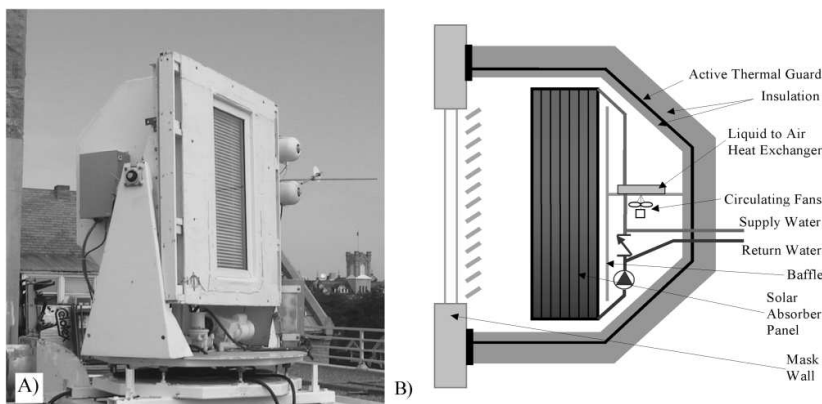


Figura 2-13. Vista externa do calorímetro (A) e corte esquemático (B) (Collins e Harrison, 2004).

Próximo ao calorímetro, uma estação climática mantém a instrumentação para medição de velocidade, direção do vento, temperatura e umidade. Dois piranômetros são fixados diretamente na face frontal do calorímetro (medição de radiação direta e difusa) e

termopares são utilizados para determinar de temperatura do ar e das superfícies.

A energia que penetra através da abertura do calorímetro (Q_{input}) é determinada através do balanço térmico entre os ganhos, perdas e geração interna de calor. Para uma área projetada da janela (A_f) e da transmitância térmica (U_f), a taxa instantânea de energia é calculada através da equação [2.12] como a diferença entre o fluxo de calor e as perdas devido à diferença de temperatura interna e externa:

$$Q_{input} = FS.I.A_f - U_f . \Delta T_{i,o} . A_f \quad [2.12]$$

Onde:

$\Delta T_{i,o}$ = Diferença de temperatura através da janela (°C);

I = Radiação incidente (W/m²);

Aplicando o mesmo conceito de fator de desempenho (η) proposto por Harrison e Van Wonderen (1994), é possível isolar o Fator Solar reescrevendo a expressão anterior na forma da equação [2.13]:

$$\eta = \frac{Q_{input}}{A_f . I} = FS - \frac{U_f . \Delta T}{I} \quad [2.13]$$

O fator de desempenho pode ser, então, graficamente representado plotando valores instantâneos em uma curva de η versus $\Delta T_{i,o}/I$, onde a intersecção da reta obtida por regressão linear com o eixo das ordenadas (onde $\Delta T_{i,o}/I = \text{zero}$) representa o valor do FS.

Já há alguns anos, este dispositivo vem sendo utilizado em pesquisas realizadas no Canadá sobre o desempenho de janelas. Inicialmente, Collins e Harrison (2001a) utilizaram o calorímetro em um estudo sobre a influência da geometria da cortina e da variação do ângulo de inclinação do calorímetro (com a vertical), sobre as frações de fluxo de calor emitidas por uma veneziana de alumínio devido à absorção da radiação solar. Neste estudo, o calorímetro foi colocado em um ambiente interno com condições ambientais controladas (temperatura e velocidade do ar) e resistências aquecedoras foram fixadas nas lâminas da veneziana para simular a absorção da radiação solar. Durante os testes, os ângulos de inclinação do calorímetro foram

modificados entre valores de 0° (vertical) e 75°, em intervalos regulares de 15°. Já o fechamento das lâminas da veneziana foi ajustado para ângulos de -45°, 0°, 45° e 70°.

Os resultados das medições demonstraram que existe pouca variação no valor das frações de fluxo devido à alteração do ângulo de fechamento das lâminas da veneziana. No entanto, quando o ângulo de fechamento da lâmina é elevado e o ângulo de inclinação do calorímetro também é elevado, as perdas para o exterior aumentam, reduzindo a fração de fluxo de calor para o interior. O espaço entre as venezianas e o vidro também mostrou ser significativo, sendo que a alteração deste espaço de 17mm para 20mm gerou um aumento de 15% no valor das frações de fluxo. Outro resultado importante deste mesmo estudo, é que a queda do valor das frações de fluxo para o interior é muito pequena (menos de 2%) para a variação angular do calorímetro entre 0° (vertical) e 60°. Já para ângulos acima de 60°, esta variação se torna mais significativa.

Neste mesmo ano, Collins e Harrison (2001b) publicaram outro trabalho utilizando o calorímetro em medições onde são determinados valores de FS e transmitância térmica de uma amostra de janela com vidro incolor 6,4mm e uma proteção solar interna. Foram verificadas as variações destes valores em função da alteração do ângulo de inclinação da amostra de 90° (vertical) para 45°. A amostra é um pano de vidro incolor com uma tela de alumínio pintada de preto instalada internamente como elemento de proteção solar.

O resultado final do FS obtido com a análise estatística dos valores, determinados em sete diferentes dias de medição foi, para o caso da amostra na vertical igual a $0,71 \pm 0,01$, e para a inclinação de 45° igual a $0,67 \pm 0,01$. Esta redução no valor do FS foi atribuída, primariamente, às mudanças nas frações de fluxo de calor emitidas pela proteção solar. A variação dos resultados é explicada devido ao aumento da presença do ar quente na interface entre o vidro e a proteção, o que eleva as perdas para o exterior. Os autores concluem mencionando que em casos de janelas comerciais, os efeitos observados no FS são menores devido à menor absorção do calor nos elementos de proteção solar. Assim, no pior caso, a redução em uma medida de FS realizada a 45° será de no máximo 5%.

Três anos mais tarde, Collins e Harrison (2004a) apresentaram resultados de medições em uma janela de vidros duplos incolor 3mm com uma veneziana horizontal interna. Foram determinados valores de ganho de calor solar e transmitância térmica, sendo as proteções solares

testadas em três diferentes ângulos de inclinação das lâminas (0°, 45°, -45°) e também em dois ângulos de incidência da radiação solar (30°, 45°). As venezianas foram divididas em dois tipos, uma com alta refletância (branca) e outras com alta absortividade (preta). Em todos os casos, as proteções solares proporcionaram uma redução no ganho de calor solar variando de 5% a 40%. Já o efeito sobre a transmitância térmica mostrou ser pouco significativo.

2.2.5 Fenestration Radiometer (Radiômetro de abertura)

Pereira e Sharples (1991), tendo por base o dispositivo proposto por Bauman et al. (1986), chamado de Integrating Window Pyranometer (IWP), desenvolveram um sistema experimental de medição da radiação solar transmitida através de aberturas em modelos com escala reduzida.

Este dispositivo (IWP) consiste basicamente em um medidor de fluxo de calor na forma de uma placa pintada de preto e posicionada atrás da janela. Um ventilador é instalado atrás desta placa, resfriando e forçando a passagem do calor através do sensor. Pereira e Sharples (1991) e Pereira (1992) realizaram algumas modificações no IWP, empregando um novo sensor. Este novo sensor é baseado na integração de múltiplas junções termoeletricas sobre uma fina folha condutora. Através da técnica de circuito impresso, usada no processo de eletrodeposição, foi possível produzir em torno de 1.400 termopares numa área de 0,01m². O novo sensor, associado a um ventilador mais potente, apresentou melhores resultados, medindo fluxos radiantes menores que 100 W/m² e reduzindo o tempo do sinal de resposta.

Por ser um dispositivo térmico, o novo sistema gera um sinal de saída proporcional à diferença de temperatura, sendo sensível à radiação em onda curta e onda longa. Além disso, o dispositivo mede a radiação solar transmitida diretamente e retransmitida (calor absorvido) pelos vidros, sendo a soma destes valores igual ao ganho de calor solar. Assim, este aparelho foi classificado como um radiômetro (Figura 2-14).

Neste estudo, inicialmente foi realizada uma calibração do radiômetro através de uma comparação com os resultados obtidos utilizando um solarímetro. Posteriormente, para realização da medição do ganho de calor solar, foram utilizados três diferentes tipos de sistemas em escala: 1°) vidros duplos, 3mm, sem proteção (referência); 2°) vidro duplo com prateleira de luz reflexiva externamente; 3°) vidro duplo com brises horizontais pintados de branco. As medições foram realizadas em condições reais de céu em dois dias diferentes. Uma

análise do resultado possibilitou perceber a tendência do decréscimo do Fator Solar com o aumento do ângulo de incidência. Os valores encontrados de coeficientes de sombreamento e Fator Solar foram também comparados a valores apresentados por outros autores e pela ASHRAE, mostrando-se bastante próximos a estes (variação menor que 10%).

Dez anos depois, Macedo (2002) e Macedo e Pereira (2003) apresentam uma descrição da construção e montagem de um novo equipamento baseado no sistema de medição do Fenetration Radiometer.

Um protótipo foi construído em uma caixa metálica com saídas de ar em todo o perímetro e duas aberturas frontais com dimensões de 20cm x 20cm (Figura 2-15). Sobre a primeira abertura é colocado o sistema de sombreamento ou outro elemento a ser analisado, e na segunda um material de referência (normalmente um vidro simples, 3mm).



Figura 2-14. Fenestration Radiometer (Pereira, 1992)



Figura 2-15. Radiômetro de abertura desenvolvido na UFSC (Macedo, 2002)

Foram então realizados testes com seis diferentes tipos de elementos de aproveitamento da iluminação natural. Estes elementos foram caracterizados termicamente através da determinação do Fator Solar em dias e horários específicos. Durante este estudo, foram encontradas variações significativas (entre 13% e 24%) nas constantes de calibração dos sensores (transdutores de fluxo de calor a gradiente tangencial), quando determinadas por métodos de calibração em laboratório e em campo.

Esta questão conduziu, mais tarde, a realização de outro estudo buscando melhorar a precisão dos resultados obtidos com o radiômetro. Marinowski (2005) e Marinowski et al. (2007) realizaram testes em campo e calibração dos sensores de fluxo de calor utilizados no radiômetro, aplicando um vidro incolor de 3mm. Os resultados dos testes iniciais demonstraram a existência de erros no valor do Fator Solar medido chegando a 19%, e também a ocorrência de elevação da temperatura da chapa de suporte dos sensores. Após um processo cuidadoso de calibração em laboratório, o erro médio encontrado no Fator Solar caiu para 5,4%. Neste momento, o radiômetro utilizava um sistema de dissipação de calor através de ventiladores que insuflam o ar diretamente na face posterior da chapa de suporte dos sensores. A elevação da diferença de temperatura entre a chapa e o ar impede a passagem do fluxo de calor através dos sensores, gerando erros na medição. Então foram realizados novos testes utilizando um sistema de resfriamento por circulação de água (Figura 2-16), montado sob a chapa de suporte dos sensores.

Através de um ajuste na temperatura de controle da água que circula no sistema, a diferença média de temperatura entre a chapa de suporte dos sensores e o ar caiu abaixo de 1°C , e o erro médio verificado no resultado do Fator Solar medido foi de apenas 0,94%. Desta forma, verificou-se que a elevação da temperatura da chapa de suportes dos sensores acima da temperatura do ar está diretamente associada a erros nos resultados do fluxo de calor ou do Fator Solar determinado com o radiômetro de abertura.



Figura 2-16. Configuração geral da medição utilizando o resfriamento por circulação de água (Marinowski et al., 2007)

2.3 ESTIMATIVA DO FATOR SOLAR ATRAVÉS DE PROPRIEDADES ÓPTICAS

Tendo por base o método da "Solar-Thermal Separation", desenvolvido por Klems et al. (1992, 1993, 1996, 2002), matematicamente o Fator Solar de uma janela pode ser estimado através de propriedades puramente ópticas somadas a frações térmicas. Assim, a determinação de propriedades ópticas de elementos vítreos e proteções solares é uma base para a caracterização da janela quanto ao ganho de calor solar.

Por isso, já na década de 80, pesquisadores da Universidade da Califórnia (EUA) iniciaram o desenvolvimento de um radiômetro na forma de um grande scanner. O equipamento, chamado de Scanning Radiometer ou Bidirectional Radiometric Scanner, foi utilizado para verificar a transmitância e refletância bidirecional em janelas e seus componentes.

O equipamento é composto basicamente por três elementos principais: uma fonte de luz fixa, uma amostra montada sobre um plano móvel e um detector móvel. Primeiramente, a fonte de luz é fixada em frente à amostra. A amostra é montada sobre um plano com um sistema de eixos que permite um movimento com dois graus de liberdade (giro). A amostra pode ser rotacionada sobre um eixo vertical e sobre um eixo horizontal para ajustar o ângulo de incidência. Desta maneira, é possível cobrir todo o hemisfério de incidência de radiação. O detector pode ser movimentado ao longo de um arco semicircular de 180°, que pode descrever um movimento completo de revolução ao redor da amostra (Figura 2-17).

Atualmente, o sistema de detecção utilizado é formado por três elementos: um espelho coletor, uma esfera integradora e um par de sensores. A radiação é coletada pelo espelho e focada na entrada da esfera integradora que possui um sensor radiométrico e outro fotométrico. Os sensores coletam dados de comprimento de onda e intensidade de radiação refletida e transmitida pela amostra (LBNL, 2003). A Figura 2-18 apresenta um teste sendo realizado através do Scanning Radiometer.

Os resultados encontrados com o Scanning Radiometer foram utilizados para o incremento de novos métodos de estimativa do ganho de calor solar e FS em aberturas complexas (tais como janelas com venezianas) e também como suporte no desenvolvimento do sistema de certificação de desempenho de janelas nos EUA.

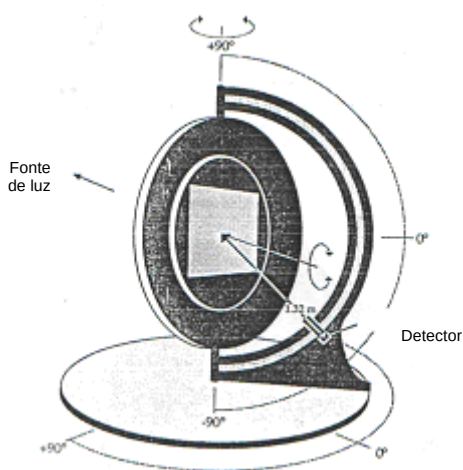


Figura 2-17.
Esquema dos
ângulos de
rotação do
Scanning
Radiometer
(Papamichael et al.,
1988 - adaptado)

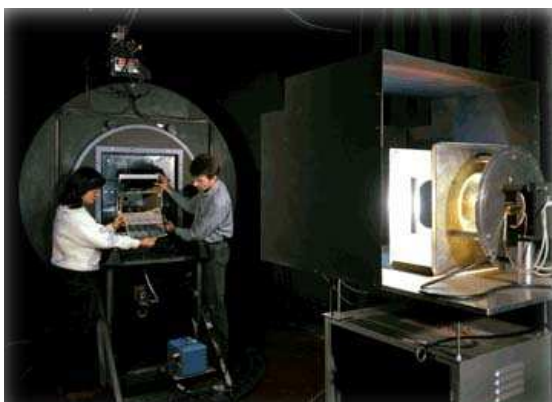


Figura 2-18.
Teste utilizando o
Scanning
Radiometer
(LBNL, 2007)

Em outro estudo, Tseng e Goswami (2001) realizaram medições das propriedades ópticas solares com um dispositivo chamado “Black Box”. O dispositivo consiste em uma caixa pintada de preto com uma abertura de 1 x 1 metro para colocação da amostra (Figura 2-19). A caixa está montada sobre um sistema de eixos que permite variar o ângulo de incidência da radiação solar. Piranômetros são utilizados para realizar a medição das propriedades, sendo posicionados em 3 pontos: um em frente à amostra (para verificar a radiação total incidente); um no interior da caixa, atrás da amostra (para determinar a radiação transmitida); e um do lado externo da caixa, voltado para a amostra (a

fim de determinar a parcela da radiação refletida) – Figura 2-20. Um valor aproximado do FS pôde então ser estimado pela soma do valor da transmitância mais a metade do valor da absortância à radiação solar da amostra testada.

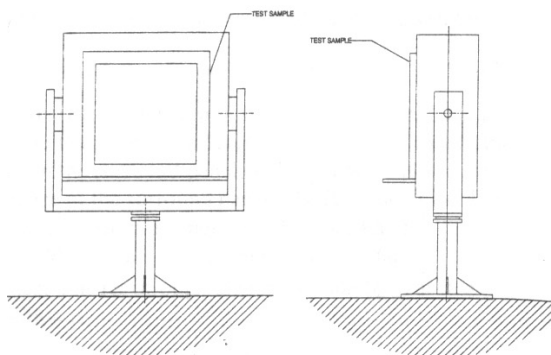


Figura 2-19. Vista frontal e lateral da Black Box (Tseng e Goswami, 2001)

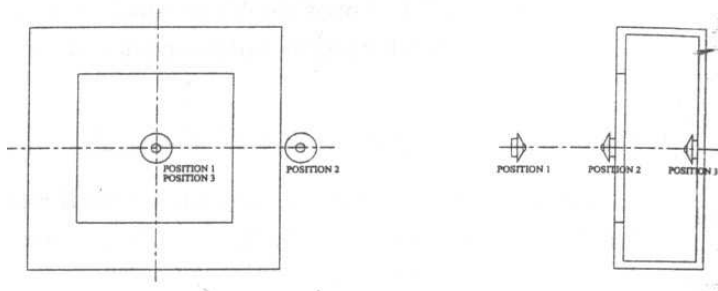


Figura 2-20. Esquema de posicionamento dos piranômetros (Vista frontal e lateral) (Tseng e Goswami, 2001)

Além de serem aplicadas em metodologias de cálculo complexas, as propriedades ópticas solares também são muito utilizadas em cálculos simplificados do Fator Solar. Sokolay (2002) apresenta e compara metodologias de cálculo de ganho de calor solar através de aberturas utilizadas em três países (Austrália, Reino Unido e EUA), além de expor gráficos com as propriedades ópticas e FS de alguns tipos de vidros. Neste trabalho, é discutida a questão da fração do calor

absorvido pelo vidro e que passa para o interior do ambiente, onde o valor de $1/3$, em termos práticos, é considerado um valor representativo para tal fração.

Fazendo um paralelo entre os métodos de estimativa do ganho de calor solar nos três países, o autor destaca que no Reino Unido é utilizado o procedimento da admitância, onde é calculado ganho de calor para um ponto no centro do ambiente. Neste método, o valor da fração de calor solar que penetra no ambiente é dependente da massa térmica do ambiente, sendo apresentados valores para edificações leves e pesadas. Nos EUA, atualmente tem sido usado o conceito do SHGC (Solar Heat Gain Coefficient). Aqui o valor da fração de fluxo de calor absorvida e reemitida para o interior da edificação depende das condições ambientais (função da transmitância térmica e convecção). Já na Austrália, o método adotado pela AIRAH (Australian Institute of Refrigeration, Air-conditioning and Heating) é o método da Carrier para dimensionamento de ar condicionado, onde são apresentadas séries de tabelas, sendo o ganho solar dado como a radiação solar multiplicada pelo FS, que por sua vez é igual a $\tau + 0,4\alpha$.

No entanto, Sokolay (2002) destaca que todos estes métodos são antigos e produzem apenas estimativas. Além disso, existem também valores de FS disponíveis para dispositivos de proteção solar externos, mas estes devem ser usados com cuidado. No caso de proteções solares mais complexas, não existe um valor adequado para representar o ganho de calor a partir das propriedades ópticas sem levar em conta a questão da geometria.

No Brasil, Santos (2002) realizou um estudo onde foram determinados valores de FS de diferentes tipos de elementos transparentes para ângulos variados de incidência da radiação solar. Os valores de FS foram calculados com base nas propriedades ópticas (transmitância (T), refletância (R) e absorptância (A)) obtidas a partir de testes espectrofotométricos. O intervalo espectral utilizado nas medições foi de 300 a 2000nm, sendo o FS para os diferentes ângulos de incidência calculados pela equação $FS = T + N_i \cdot A$, onde N_i é a parcela de energia absorvida que vai para o interior da edificação. Aqui, N_i é dada como a razão entre a transmitância térmica (U) e o coeficiente de convecção externo (h_e) adotado, mesma simplificação apresentada pela ASHRAE (2005) para o caso do vidro simples.

2.4 NORMALIZAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO E CÁLCULO DO FATOR SOLAR

Além dos métodos experimentais, atualmente existem procedimentos normalizados de medição e cálculo do ganho de calor solar e do Fator Solar. Alguns destes procedimentos de cálculo vêm sendo implementados em programas computacionais.

Nos EUA, a NFRC (National Fenestration Rating Council) apresenta um conjunto de normas voltadas para a determinação do FS e aplicação deste índice na certificação de janelas. Os documentos NFRC que tratam do ganho de calor solar através de aberturas são as normas NFRC 200 (2004) e a NFRC 201 (2004).

A NFRC 200 apresenta um procedimento referenciado na norma ISO 15099 (2003) para determinar o FS e a transmitância de luz visível através de aberturas, para um conjunto de condições ambientais ajustadas e apenas ângulo de incidência normal. O valor do FS total é composto pelo somatório dos FS dos diversos componentes da janela (no centro e nas bordas do vidro, nos divisores dos vidros e nas esquadrias) ponderado em função das suas áreas. A norma estabelece que programas computacionais autorizados pela NFRC podem ser utilizados para determinar o FS e a transmissão de luz, e também para calcular a transferência de calor através das esquadrias e de outros componentes da janela.

Alguns tipos de aberturas não cobertos pela NFRC 200 (janelas com sistema de sombreamento complexo; elementos com propriedades não especulares; aberturas utilizando vidros que não são paralelos, tais como vidros curvos, ondulados, entre outros) são avaliados através dos procedimentos da NFRC 201.

Na NFRC 201 é apresentado um método de teste com diversas instruções para a realização de medições de ganho de calor solar e para determinação do FS através do uso de calorímetros. São analisados aspectos que podem ser aplicados tanto a calorímetros expostos diretamente à radiação solar (em campo), e também a calorímetros utilizados em laboratório, submetidos à radiação artificial (por meio de lâmpadas especiais que simulam o espectro solar). A norma apresenta o conceito básico de funcionamento do calorímetro e a instrumentação que necessita ser instalada para medir o ganho de calor solar. São dadas recomendações para calibração dos instrumentos e a precisão necessária nos resultados de cada sensor. São abordados procedimentos e cuidados que devem ser observados durante a medição relacionados à instalação

da amostra e às condições gerais do teste. Também são descritos os cálculos matemáticos necessários para determinar o FS através do balanço térmico na célula calorimétrica.

As normas ISO 9050 (2003) e a ISO 15099 (2003) apresentam procedimentos de cálculos para o FS e outros índices de desempenho energético de vidros e janelas com pano envidraçado simples ou múltiplos, e também algumas tipologias de proteções solares internas (ex.: venezianas). Alguns destes modelos matemáticos normalizados, associados com novos algoritmos, têm sido aplicados a programas computacionais que permitem estimar o ganho de calor solar para determinados modelos de janelas e condições ambientais específicas (WIS, 2003; WINDOW5, 2002). A seguir, a equação [2.14] apresenta o cálculo para estimar o FS conforme procedimento da ISO 9050:

$$FS = \tau_e + q_i \quad [2.14]$$

Onde:

τ_e = Transmitância solar direta (adimensional);

q_i = Fração de calor absorvida pelo vidro e retransmitida para o interior (adimensional).

No caso do vidro simples, a fração de calor retransmitida para o interior (q_i) pode ser calculada através da equação [2.15] também proposta pela ISO 9050:

$$q_i = \alpha_e \frac{h_i}{h_e + h_i} \quad [2.15]$$

Onde:

α_e = Absortância solar da face externa do vidro (adimensional);

h_i = Coeficiente de transferência de calor no lado interno do vidro (W/m^2K);

h_e = Coeficiente de transferência de calor no lado externo do vidro (W/m^2K).

O “Handbook-Fundamentals” da ASHRAE (ASHARE, 2005) também apresenta formulações para cálculo e tabelas de valores do FS de janelas (inclusive contendo alguns tipos de proteções solares),

baseados nos estudos de desenvolvidos por Klems et al. (1992, 1993, 1996, 2002).

Já no Brasil não existe uma norma específica para determinar o FS de vidros e janelas. A NBR 15220-2 (2005) apenas apresenta uma forma simplificada de estimativa, aplicada a elementos transparentes ou translúcidos. Nesta norma, o FS é dado pela equação [2.16]:

$$FS = U\alpha R_{se} + \tau \quad [2.16]$$

Onde:

U = Transmitância térmica do componente (W/m^2K);

α = Absortância à radiação solar (adimensional em função da cor);

Rse = Resistência superficial externa (m^2K/W).

τ = Transmitância à radiação solar.

2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO E DISCUSSÃO

Este capítulo apresentou uma sequência de diferentes sistemas e métodos de medição direta do ganho de calor solar em janelas. Também foram descritos processos de cálculos do Fator Solar a partir das propriedades ópticas dos elementos que compõem a abertura além de serem mencionadas as principais normas relacionadas ao assunto.

Analisando os sistemas de medição apresentados, foi possível observar, de modo geral, que eles buscam determinar a parcela de ganho de calor devido à radiação solar separadamente, ou seja, sem influência do ganho devido à diferença de temperatura interna e externa. Quando não é possível eliminar a diferença de temperatura, busca-se, então, manter esta diferença constante, para que possa ser quantificada.

É possível dizer também, que os dispositivos de campo representam melhor a realidade de utilização das aberturas (especialmente os que mantêm o plano da janela próximo à posição vertical). No entanto, estes necessitam de um cuidadoso monitoramento das variáveis ambientais durante o período de teste, para que a influência destas variáveis (radiação, velocidade do ar, ângulo de incidência, etc.) possa ser considerada com maior significância nos resultados.

Em todos os estudos, se destaca o ângulo de incidência da radiação como uma das variáveis de maior influência sobre o Fator Solar, uma vez que a variação deste modifica a quantidade de energia que se propaga através do elemento vítreo ou da proteção solar.

Também a inclinação da janela instalada no calorímetro é um ponto de preocupação, pois altera as trocas convectivas e, conseqüentemente, as componentes da parcela absorvida, que são reemitidas para o interior e exterior do calorímetro. Uma conclusão interessante é que medições com venezianas devem ser feitas preferencialmente na vertical devido ao efeito da convecção entre o vidro e as lâminas. Este efeito se torna bastante significativo acima de 45° de inclinação do calorímetro. Observa-se, inclusive, que o processo de medição mais utilizado é o calorimétrico através de trocadores de calor com circulação de água em um circuito fechado.

Assim, os calorímetros, de modo geral, têm contribuído no desenvolvimento e no aperfeiçoamento de procedimentos de cálculo do Fator Solar e na validação de softwares. Atualmente, estes procedimentos de cálculo já estão em estágio avançado, com resultados validados para um grande número de situações, inclusive para alguns casos de janelas com proteções solares. Porém, a normalização internacional (NFRC 201, por exemplo) ainda prevê o uso de calorímetros para situações em que os procedimentos matemáticos não descrevam de maneira satisfatória o fenômeno da passagem da radiação pela abertura, tais como em aberturas com sistema de sombreamento entre vidros, elementos com propriedades não especulares e aberturas utilizando vidros que não são paralelos (curvos, ondulados, etc.).

3 PROJETO, CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DO CALORÍMETRO

3.1 PROJETO DO CALORÍMETRO

Devido à complexidade do projeto do dispositivo final, foram elaborados subprojetos para cada um dos componentes básicos do equipamento (absorvedores de calor, sistema de resfriamento, sistema de monitoramento e trailer de abrigo), os quais são apresentados a seguir.

3.1.1 Dimensionamento dos absorvedores de calor

Para a construção do calorímetro proposto, foi determinada a utilização de dois absorvedores de calor distintos. Estes componentes são utilizados para remover o calor que passa através dos elementos que serão testados durante as medições com o calorímetro.

O primeiro absorvedor foi denominado “cavidade principal”, uma vez que pode ser utilizado para medições até mesmo com janelas completas (compostas por vidros, esquadrias e proteções solares) em tamanho real. Já o segundo absorvedor foi denominado “cavidade secundária”, pois é utilizado para verificar o ganho de calor através de amostras menores e compostas por um elemento único e plano, como é o caso de uma chapa de vidro. Os dois absorvedores foram fabricados em cobre, visando conseguir maior rapidez nas trocas de calor em função da elevada condutividade térmica do material.

3.1.1.1 Cavidade principal (CP)

Inicialmente, através de um estudo que levou em consideração o efeito da convecção natural em câmaras enclausuradas (Marinoski et al., 2006a), foi determinada a dimensão para a profundidade da cavidade principal. O valor da profundidade adotada foi de 300mm. Esta profundidade foi adotada pelo fato de que neste espaço o fenômeno convectivo ocorre de maneira semelhante ao de um ambiente de maior profundidade. A camada limite térmica calculada apresentou pouca espessura mesmo quando a profundidade da cavidade era elevada (3cm quando $L=5m$). Isto demonstrou que a adoção de profundidades menores (neste caso 30cm) não interfere no desenvolvimento da camada limite, segundo as condições de contorno analisadas. Esta profundidade também permite que elementos de proteção solar internos sejam

instalados e testados. Além disso, a otimização da profundidade resulta em um calorímetro mais compacto e reduz os custos de fabricação.

Já a dimensão do vão de abertura da cavidade principal, onde será fixada a amostra de janela para teste, foi definida com base no estudo apresentado por Lucini (2001), para padronização do vão de esquadrias. Além disso, foi levada em consideração uma futura aplicação dos sensores de fluxo de calor (transdutores de fluxo de calor à gradiente tangencial), o que implica na adoção de medidas para a cavidade com valores múltiplos das dimensões do sensor (10x10; 20x20; 30x30cm). Desta forma, foram adotadas as dimensões de abertura da cavidade conforme mostra a Tabela 3-1.

Tabela 3-1. Dimensões previstas para a abertura da cavidade principal (CP)

Vão modular (mm)	
Largura =	1500
Altura =	1200

Nas paredes da cavidade, foi prevista uma tubulação hidráulica de cobre, que será conectada ao sistema de circulação de água responsável pelo resfriamento. O espaçamento entre tubos, necessário para manter a temperatura homogênea ao longo da superfície, foi definido com base em estudo preliminar (Marinoski et al., 2006b), sendo fixada uma distância de 50mm de centro a centro.

A cavidade foi projetada com paredes planas em chapa de cobre de espessura igual a 0,89mm, e tubos de cobre para circulação de água com diâmetro nominal de 9,3mm, soldados paralelamente à maior dimensão das chapas. Do lado externo, a cavidade foi isolada termicamente através de uma camada de aproximadamente 70mm de lã de vidro, aplicada sobre a estrutura de cobre.

Previu-se, também, que as bordas frontais da estrutura da cavidade fossem fixadas, através de parafusos, a um acabamento em madeira. O acabamento de madeira tem como objetivo proporcionar resistência mecânica na fixação e isolamento térmico ao contato.

A Figura 3-1 mostra um desenho esquemático da cavidade principal, e no ANEXO A pode ser observado o projeto executivo completo para a construção da cavidade e também o detalhe de fixação da mesma.

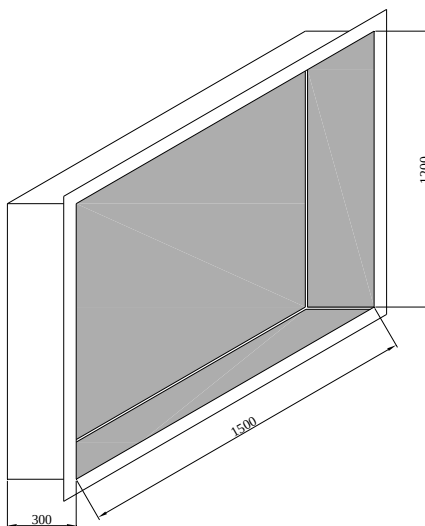


Figura 3-1. Desenho esquemático da cavidade principal (cotas em mm)

3.1.1.2 Cavidade secundária (CS)

O dimensionamento da cavidade secundária foi determinado em função de recomendações normativas e aspectos construtivos do calorímetro. A norma NFRC 201 (2004), no item 5.5.2.1B, recomenda que no caso de amostra de vidro seja adotada uma dimensão de área visível não inferior a 20" x 20" (aproximadamente 50cm x 50cm), com o objetivo de reduzir a incerteza no resultado do Fator Solar medido.

Seguindo esta norma, foi adotada, na fabricação desta cavidade, a dimensão mínima recomendada, de 50cm x 50cm. Para tal, foi utilizada uma chapa de cobre com espessura de 3mm, na qual foi fixada uma serpentina, também de cobre, na sua parte posterior, com diâmetro externo de 9,3mm. Com base nestas dimensões, foram produzidos transdutores que serão utilizados para quantificar o fluxo de calor pela cavidade.

As bordas (laterais) da cavidade são fixadas em ripas de madeira que têm a função de suporte para fixação da placa de cobre e também de isolamento térmico. As ripas juntas totalizam uma espessura de aproximadamente 18mm. Esta espessura foi adotada para reduzir os efeitos da troca de calor por convecção interna entre a superfície do

material que está sendo testado (no caso um vidro) e a superfície do fundo da cavidade, que absorve o calor.

Do lado externo, a cavidade também é isolada termicamente através de uma camada de, aproximadamente, 70mm de lã de vidro aplicada sobre a estrutura de cobre.

A Figura 3-2 mostra um desenho esquemático da cavidade secundária, já o ANEXO B apresenta o projeto executivo completo para a construção da mesma (OBS: Esta peça sofreu um reprojeito durante a montagem do calorímetro, por isso a palavra “nova” é encontrada em algumas notas do detalhamento do projeto executivo. O ANEXO B apresenta a versão final de projeto da cavidade secundária).

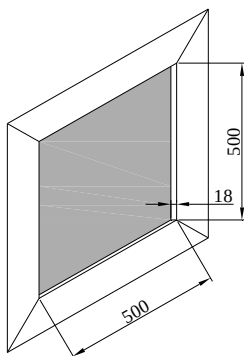


Figura 3-2. Desenho esquemático da cavidade de secundária (cotas em mm)

3.1.2 Dimensionamento do sistema de resfriamento

O sistema de resfriamento é necessário para remover o calor que é adquirido através dos absorvedores. Este sistema de resfriamento foi concebido no formato de um grande banho termostático, composto por uma unidade condensadora, reservatório de água e resistências aquecedoras. O controle de temperatura deste sistema é realizado por um software específico que também gerencia a aquisição de dados dos sensores de monitoramento. A seguir, é apresentado o dimensionamento dos componentes do sistema de resfriamento e o seu esquema de montagem.

3.1.2.1 Unidade condensadora

A partir da soma das áreas expostas da cavidade principal ($1,50\text{m} \times 1,20\text{m} = 1,80\text{m}^2$) e da cavidade secundária (inicialmente de $0,60\text{m} \times 0,60\text{m} = 0,36\text{m}^2$)³, foi determinada a área total exposta à radiação solar, que é de $2,16\text{m}^2$.

Para uma condição de céu claro nos meses de verão, pode-se adotar níveis de radiação solar médios próximos de 1000W/m^2 , em função da posição do sol.

Supondo uma condição de ângulo de incidência da radiação normal ao plano das amostras (pior caso) instaladas na face frontal das cavidades, é possível determinar a carga térmica instantânea. Multiplicando o valor da área total exposta das cavidades ($2,16\text{m}^2$) pela radiação incidente (1000W/m^2), chega-se à carga térmica instantânea estimada de 2160W .

Um valor típico de desempenho apresentado pela ASHRAE (2000) para o caso de compressores pequenos (herméticos com potência menor que 4kW) com gás R-22 (para temperatura de evaporação de $7,2^\circ\text{C}$ e temperatura de condensação de $54,4^\circ\text{C}$) é de $2,93\text{W/W}$ (térmico/elétrico).

Desta forma, desconsiderando as perdas no sistema é possível prever um compressor com uma potência mínima de 737W (ou aproximadamente $1,0\text{HP}$). A partir desta estimativa, foi adotada para a fabricação do banho térmico proposto uma unidade condensadora de potencial nominal de $1,5\text{HP}$ (1118W).

3.1.2.2 Reservatório

A fim de dimensionar o reservatório de água para o sistema de refrigeração, inicialmente foi determinado o volume de líquido necessário para preencher as tubulações em todo o trecho de circulação de água da cavidade principal e secundária. Foram quantificados para tal os comprimentos das tubulações utilizadas.

Somando os volumes observados para as duas cavidades, chega-se a um valor mínimo aproximado de apenas 20 litros. Porém, devido à necessidade de homogeneização da temperatura do líquido que entra e sai do reservatório em um circuito fechado, foi adotado um

³ Posteriormente, a dimensão da cavidade secundária foi reduzida para $50\text{cm} \times 50\text{cm}$, devido à necessidade de ajuste no tamanho dos sensores de fluxo de calor. No entanto, a unidade condensadora já havia sido dimensionada e fabricada com base na carga térmica determinada a partir da área inicial.

volume de reservatório com capacidade para até 150 litros. As dimensões internas definidas para a cuba foram de 40cm x 50cm x 80cm.

No interior do reservatório foi posicionada a serpentina de resfriamento ligada ao sistema condensador. Também três resistências aquecedoras de 1000W (cada) foram instaladas para realização do controle da temperatura da água.

A Figura 3-3 apresenta o esquema de montagem do banho térmico composto pelo sistema condensador e reservatório. O sistema condensador é instalado externamente ao trailer que abriga o conjunto completo do calorímetro (ver Item 3.1.3). Já a estrutura do reservatório é fixada internamente, de onde partem as conexões para circulação de água. Para o sistema condensador também foi prevista uma proteção metálica contra as intempéries, sendo as dimensões definidas durante a instalação.

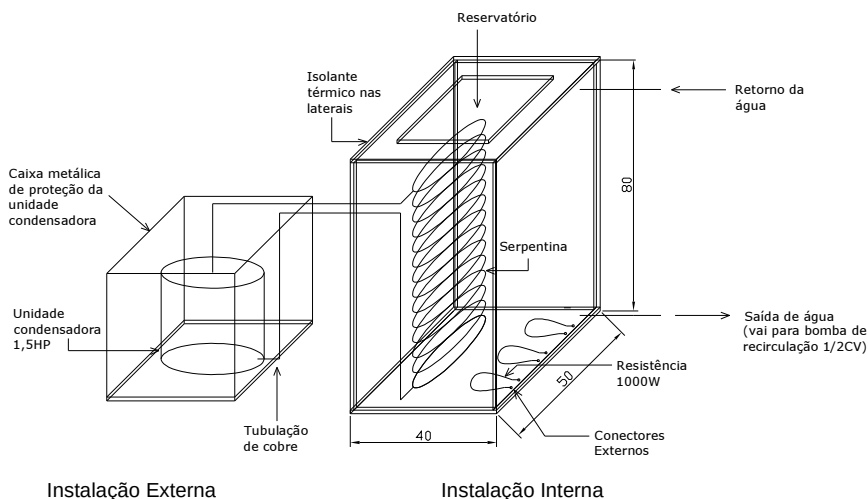


Figura 3-3. Desenho esquemático para montagem do banho térmico

3.1.2.3 Modificações

Como apresentado nos itens anteriores, a intenção inicial do projeto do sistema de resfriamento era que este atendesse às duas cavidades (CP e CS), simultaneamente. No entanto, testes posteriores demonstraram a necessidade da utilização de um sistema de

resfriamento exclusivo para cada uma das cavidades. Por isso, um banho térmico de menores proporções foi instalado para atender a cavidade secundária.

Este segundo banho é um sistema produzido em escala industrial e distribuído pela empresa MicroQuímica Ltda, modelo MQBMP - 01 (Figura 3-4). O equipamento permite a seleção digital da temperatura da água com uma resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$, num intervalo de trabalho entre -20°C e $+150^{\circ}\text{C}$. A água é armazenada em uma cuba com capacidade para 9 litros, e a circulação ocorre por meio de uma bomba com uma vazão de aproximadamente 6 litros/min, permitindo uma boa homogeneização da temperatura do líquido. A potência total do conjunto é de 1100W.



Figura 3-4. Banho termostático para a cavidade secundária

Ainda outra modificação importante foi realizada no banho que faz o resfriamento da cavidade principal. O seu projeto previa inicialmente três resistências aquecedoras de 1000W cada, usadas para fazer o ajuste da temperatura da água por meio de um controle de PID. Com a redução da carga térmica inicialmente prevista, devido à retirada da cavidade secundária do circuito de resfriamento e também pelo fato de que as amostras de teste (vidros, etc.) bloqueiam a passagem de grande parte da energia incidente, foi necessária a instalação de mais quatro resistências aquecedoras (2 x 1000W e 2 x 750W)⁴ para que o balanço térmico de controle pudesse ser atingido. Estas quatro novas resistências são mantidas ligadas ininterruptamente durante o funcionamento do banho, enquanto que a potência dissipada pelas outras três é controlada pelo sistema PID.

⁴ Nos testes com elementos onde o FS alcançou valores mais baixos (menores que 0,30), o acionamento de mais duas resistências de 750W foi necessário para manter a estabilidade no banho.

3.1.3 Dimensionamento do trailer de abrigo

Uma vez que a montagem do calorímetro envolve a utilização de diversos componentes, foi definido que estes seriam abrigados em um trailer. A opção pelo trailer foi baseada na facilidade de movimentação que este tipo de veículo permite e também pela proteção contra intempéries. Além disso, o custo de fabricação deste tipo de abrigo para o sistema é reduzido, visto que o trailer é produzido em escala comercial.

As dimensões principais adotadas para o trailer (altura x comprimento x largura) foram determinadas a partir da definição das características dos componentes internos (trocaadores de calor e sistema de resfriamento). Também foi levada em consideração a necessidade de condições para movimentações internas durante a instalação, monitoramento e manutenção dos sistemas.

Desta forma, optou-se pelo projeto e construção de um trailer com dimensões de 190cm x 350cm x 160cm e com capacidade de carga para aproximadamente 350kg. O ANEXO C mostra os desenhos das vistas principais (frontal, lateral e superior) do trailer projetado.

Foram previstas no projeto duas portas traseiras de acesso, também duas aberturas laterais (para os trocaadores de calor: CP e CS), e uma plataforma frontal. Sob o assoalho da parte traseira foram previstos dois macacos para apoio e nivelamento. Na dianteira, foi prevista uma roda auxiliar escamoteável para facilitar as movimentações. Toda a estrutura é sustentada por um eixo simples e suspensão com feixe de molas e amortecedores sobre rodas.

Para a fixação das amostras de janelas que serão testadas no calorímetro, foi projetada uma moldura de madeira no perímetro da abertura principal de medição. Esta moldura servirá como marco da janela, e tem dimensões de 150cm x 120cm. Internamente, a moldura também tem a função de dar suporte para a fixação da cavidade principal. Também foi projetada uma moldura em madeira para a fixação da cavidade secundária, com dimensões de 60cm x 60cm (alterada mais tarde para 50cm x 50cm). A utilização da madeira como material de fabricação da moldura foi admitida devido as suas características de bom isolamento térmico, baixo peso e boa resistência. O ANEXO C também mostra os detalhes para fabricação das duas molduras citadas.

A Figura 3-5 apresenta um esquema do arranjo interno dos diversos componentes (cavidades, banho térmico, ligações e sistema de

monitoramento) que compõem o sistema completo do calorímetro e ficam alojados na parte interna e também na plataforma externa do trailer.

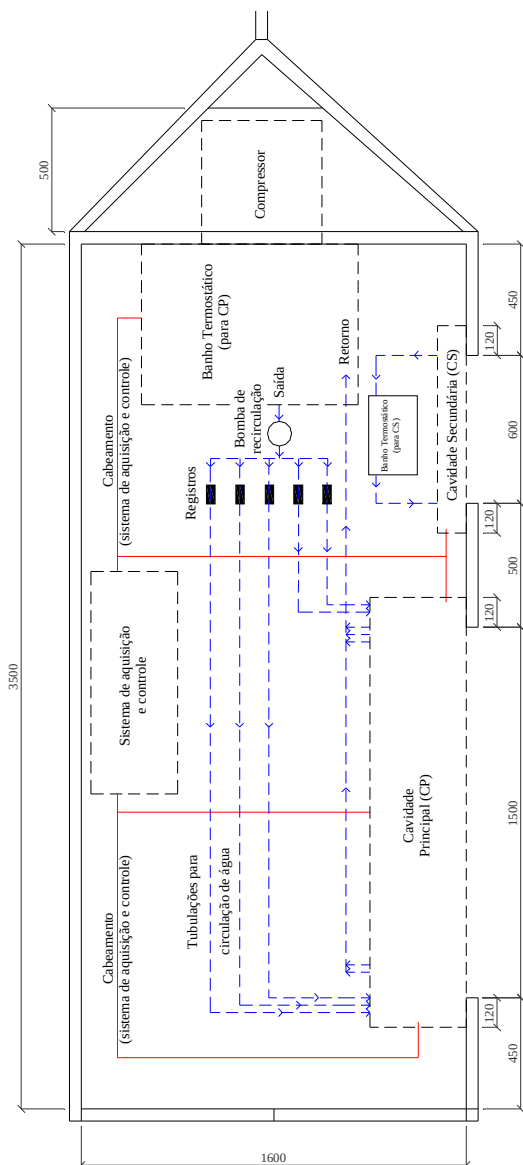


Figura 3-5. Esquema da distribuição interna dos componentes (vista em planta, sem escala)

3.1.4 Distribuição elétrica e hidráulica

Para alimentar os equipamentos que estão abrigados no trailer, foram previstas instalações elétricas no interior do calorímetro. A Tabela 3-2 mostra o quadro com as cargas previstas e as proteções (disjuntores) adotadas. Já o projeto executivo destas instalações é apresentado no ANEXO D.

Tabela 3-2. Quadro de cargas do calorímetro

Nº circ.	Nome	Pot. (W)	Tensão (V)	I (A)	Disjuntor (A)	Fio (mm²)
1	Banho Termostático (CP)	3000	220	13,6	20	2,5
2	Tomadas Gerais + Banho Termostático (CS)	2500	220	11,4	15	2,5
3	Resistências aquecedoras ⁵	3000	220	13,6	20	2,5
4	Bomba	600	220	2,7	10	2,5
5	Lâmpada + Tomadas Gerais	1000	220	4,5	10	2,5
Total		10100	Ramal de entrada = fiação 6mm²			

Já as ligações hidráulicas foram realizadas através da utilização de mangueiras flexíveis de PVC reforçado por fios de poliéster (para pressões médias), com diâmetro nominal de $\frac{3}{4}$ de polegada. A Tabela 3-3 apresenta as principais características técnicas da bomba utilizada para forçar a circulação da água na cavidade principal (obs.: as características da bomba utilizada no banho térmico da cavidade secundária já foram descritas no item 3.1.2.3). Nas entradas de cada uma das faces da cavidade principal são instalados registros de gaveta para regulação da vazão. Por fim, no retorno do líquido para os reservatórios foi instalado um medidor de vazão na saída de cada uma das cavidades. Os medidores de vazão permitem tanto a leitura direta, por meio de um mostrador analógico, como também a leitura de um sinal digital para determinação da vazão em um sistema de aquisição de dados⁶.

⁵ As novas resistências aquecedoras instaladas, conforme mencionado no item 3.1.2.3, foram temporariamente ligadas a um circuito de alimentação elétrica externo.

⁶ Infelizmente não foi possível implementar a leitura digital das vazões devido a dificuldades na interpretação do sinal e na compatibilidade com o sistema de aquisição de dados do calorímetro.

Tabela 3-3. Características técnicas da bomba de recalque

Potência nominal	Vazão máxima	Diâmetro
¾ CV	3,2m ³ /h	¾" (entrada e saída)

3.1.5 Sensores de monitoramento

Diversos sensores de monitoramento são utilizados para verificar as condições ambientais e o fluxo de calor na estrutura do calorímetro. A Tabela 3-4 apresenta uma lista com os tipos de sensores aplicados na configuração final do calorímetro, bem como as quantidades e pontos de instalação. A quantidade e o tipo de sensores foram definidos em função das necessidades de informações para o cálculo de ganho de calor e posteriores análises dos resultados.

Dois piranômetros são utilizados para determinação da radiação solar. Um deles é instalado no plano de medição (plano de instalação da amostra de vidro ou janela a ser testada), enquanto o outro é utilizado para determinação da radiação global horizontal no momento da medição (OBS.: apenas o valor da radiação solar no plano de medição é utilizado como variável no cálculo do Fator Solar das amostras).

Na determinação da radiação incidente no plano de medição é usado um piranômetro de precisão da marca Kipp&Zonen, modelo CM-21, cujas características técnicas são apresentadas na Tabela 3-5. Já para a determinação da radiação horizontal, é utilizado um piranômetro de menor custo (tipo termopilha), fabricado no LMPT/UFSC (Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas da Universidade Federal de Santa Catarina).

Para determinação direta do fluxo de calor, são empregados quatro transdutores de fluxo de calor (fluxímetros). Os quatro sensores têm dimensões de 25x25cm e são instalados na face frontal da cavidade secundária. Estes sensores foram desenvolvidos pelo LMPT em cooperação com uma universidade francesa (Université de Lille). O processo de fabricação dos fluxímetros utiliza a fotogravura e a confecção de termopares planares a eletrodos depositados. O princípio de funcionamento do sensor é baseado no desvio das linhas de fluxo de calor, gerando uma diferença de temperatura num plano tangencial ao plano de medição (Güths, 1994).

Tabela 3-4. Sensores de monitoramento

Tipo de sensor	Ponto de instalação	Quantidade
Piranômetros	Externo - plano horizontal	1
	Externo - plano de medição	1
Anemômetro	Externo - plano de medição	1
	No interior da cavidade principal	1
Fluxímetros	No interior da cavidade secundária	4
Termopares	Na superfície externa da cavidade principal	6
	Na superfície externa da cavidade secundária	1
	Ar no interior da cavidade principal	3
	Ar no interior da cavidade secundária	1
	Ar externo	1
	Na água de entrada e saída das cavidades	4
	No tanque de água do banho termostático da CP	1
	Nas bordas de fixação externas	6
	No vidro (2 x na CP e 1 x na CS)	3
	Na esquadria da janela	1
Termistor	Junção de referência dos termopares	1
Medidor de vazão	Saída da cavidade principal	1
	Saída da cavidade secundária	1
Medidor de coef. de convecção	Plano de medição externo	1
Total		39

Tabela 3-5. Características técnicas do piranômetro Kipp&Zonen modelo CM-21

Intervalo espectral de medição	305 -2800nm
Sensibilidade	7–17 ($\mu\text{V} / \text{W} / \text{m}^2$)
Tempo de resposta	5 s
Erro direcional (para 80° com 1000 W/m ²)	$\pm 10 \text{ W/m}^2$
Erro de linearidade (0 - 1000 W/m ²)	$\pm 0.2 \%$
Variação de estabilidade (variação/ano)	$\pm 0.5 \%$
Sensibilidade à mudança de temperatura (-20 para 50 °C)	1 %
Incerteza na medição (totais horários)	2 %

A velocidade do ar no interior da cavidade principal e no ambiente externo é verificada com o uso de dois anemômetros do tipo

fio quente e frio. Este sensor é produzido no LMPT sendo composto por duas junções dependentes feitas com termistores de $30K\Omega$. Um termistor envolto por um fio de constantan forma a junção quente. Este fio de constantan recebe uma tensão e esquentando o termistor que fornece um sinal elétrico. O outro termistor fornece um sinal proporcional à temperatura ambiente. O ar incidente no constantan altera o sinal recebido da junção quente, e assim é possível obter o valor da velocidade do ar pela correlação entre a diferença de temperatura entre as junções (Lopes et al., 2007a).

A temperatura em diversos pontos do calorímetro é verificada através do uso de termopares do tipo T (bitola 24 AWG flexível). Estes termopares apresentam resistência à corrosão e umidade, e seu limite de utilização varia na faixa de temperatura entre -184°C e 370°C , com limite de erro $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Para fornecer a temperatura de referência na junção dos termopares é utilizado um termistor do tipo NTC ($20K\Omega$ a 25°C), com precisão $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$ e faixa de temperatura de aplicação de -50°C até 300°C .

Os medidores de vazão são utilizados para verificar a vazão do líquido que circula através das serpentinas das duas cavidades. Os dois medidores utilizados são modelo Multijato $\frac{3}{4}$ ", e foram adquiridos junto à empresa Contécnica Ltda (Porto Alegre/RS). As características técnicas dos medidores de vazão são apresentadas na Tabela 3-6.

Tabela 3-6. Características técnicas dos medidores de vazão

Vazão mínima	Vazão máxima	Diâmetro
$0,030\text{m}^3/\text{h}$	$3,0\text{m}^3/\text{h}$	$\frac{3}{4}$ " (entrada e saída)

Ainda, para complementar o monitoramento do calorímetro, é utilizado, durante os testes, um medidor de coeficiente de convecção (h) construído com base na bancada experimental utilizada por Comunelo (2006). Este medidor tem como princípio de funcionamento isolar o valor de " h " através do conhecimento dos demais fatores (fluxo de calor, área de troca e diferenças de temperaturas) aplicados à equação fundamental da troca convectiva.

3.1.6 Sistema de aquisição de dados e controle

Para realizar a aquisição contínua dos dados durante o período de medição é utilizado um sistema de condicionamento e gravação do sinal gerado pelos diferentes sensores de monitoramento (ciclo completo de leitura a cada 27 segundos). Este sistema foi desenvolvido pela

equipe de eletrônica do LMPT/UFSC, sendo usado com sucesso também em outras aplicações de pesquisa, com a finalidade de aquisição de dados.

Basicamente o funcionamento do sistema de aquisição segue a seguinte lógica (Figura 3-6): inicialmente, os sinais em microvoltagem são lidos individualmente nas placas de aquisição; estas placas, por sua vez, estão ligadas a um multímetro digital que transmite o sinal por um cabo serial para um micro computador; já os sensores que respondem em baixa voltagem são lidos diretamente por um componente intermediário desenvolvido no LMPT (chamado TUR), o qual também controla as placas de aquisição; o TUR está ligado a uma placa mãe que se comunica com um software específico no microcomputador; o software, por sua vez, gerencia o armazenamento do sinal e realiza a conversão para as unidades típicas de cada variável.

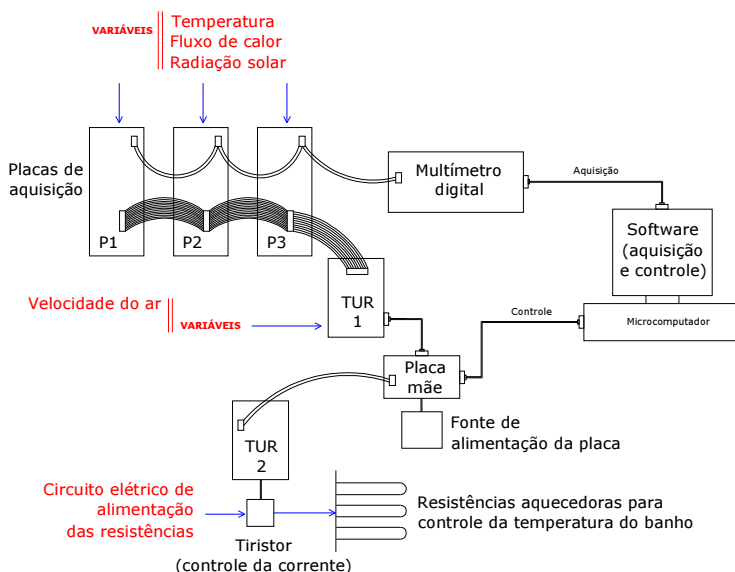


Figura 3-6. Esquema de funcionamento do sistema de aquisição e controle

Além da aquisição de dados, o software também realiza o controle da temperatura da água do reservatório do banho termostático, que é utilizada para resfriamento da cavidade principal. Para o controle da temperatura, a unidade condensadora do banho é mantida ligada

permanentemente (acionamento manual), sendo a temperatura de controle atingida através do acionamento das resistências aquecedoras, realizado pelo software.

O software com controle PID do banho termostático busca atingir a condição da equação [3.1], onde a temperatura média da cavidade ($T_{CAVIDADE}$) deve ser igual à temperatura média do vidro (T_{VIDRO}) que é a interface com o meio externo, mais uma diferença de temperatura (ΔT) definida para o teste. (OBS.: Mais detalhes sobre este critério de controle serão analisados nos próximos capítulos).

$$T_{CAVIDADE} = T_{VIDRO} + \Delta T \quad [3.1]$$

No caso da cavidade principal, a $T_{CAVIDADE}$ é renomeada como $TMCP$ (em °C), que é definida através da equação [3.2] a seguir:

$$TMCP = \frac{\sum_{n=1}^6 [(CP_{FACE_n}) \cdot (A_{face_n})]}{\sum_{n=1}^6 A_{face_n}} \quad [3.2]$$

Onde:

CP_{FACE} = Temperatura da face da cavidade principal em °C (respectivamente de 1 até 6)⁷.

A_{face} = Área da face da cavidade principal em m² (respectivamente de 1 até 6).

Já para a cavidade secundária, a $T_{CAVIDADE}$ é renomeada como $TMCS$, que corresponde à temperatura do fundo desta cavidade. No entanto, neste caso, a condição estabelecida na equação [3.1] é obtida através de controle manual realizado pelo operador que ajusta diretamente a temperatura do banho (reduz ou eleva a temperatura da água).

⁷ OBS.: Para efeito de monitoramento, o fundo da CP foi dividido em duas partes com áreas iguais, sendo a temperatura de cada parte monitorada isoladamente. Assim, são somadas seis faces para a CP (quatro laterais e duas de fundo).

3.2 FABRICAÇÃO DOS COMPONENTES E MONTAGEM DO CALORÍMETRO

A fabricação dos principais componentes e a montagem do calorímetro foram realizadas com base nos projetos executivos apresentados nos ANEXOS A, B, C e D.

A seguir, é exibido um resumo com imagens e detalhes da fabricação dos principais componentes utilizados no calorímetro. A fabricação da maioria das peças foi terceirizada (com exceção do sistema de aquisição e controle e dos sensores de fluxo de calor produzidos no LMPT/UFSC, e da cavidade secundária construída no LabTermo/UFSC), já o trabalho de montagem dos diferentes componentes foi realizado no LMPT (com exceção do banho termostático que foi montado pela própria empresa fornecedora).

3.2.1 Fabricação dos absorvedores de calor

3.2.1.1 Cavidade principal (CP)

A fabricação da cavidade principal foi realizada pela empresa Solares Aquecimento Solar Ltda (Florianópolis/SC). A estrutura da cavidade é formada por cinco peças: 4 laterais e o fundo. Estas peças foram montadas através da soldagem, corte e dobra de chapas de cobre, com espessura de 0,89mm. Nas faces externas da cavidade foi soldada uma serpentina de tubos de cobre que fazem parte do sistema de resfriamento que será utilizado. Esta configuração consiste em dois tubos de maior diâmetro nas extremidades (22mm) e tubos de menor diâmetro (9,3mm) espaçados regularmente a cada 50mm, ligados aos tubos das extremidades (Figura 3-7).

Todas as serpentinas foram testadas contra vazamento, através de ar comprimido, a uma pressão de 10 m.c.a ($1\text{Kg}/\text{cm}^2$). Sobre os tubos de cobre aplicados ao fundo da cavidade, foi necessário adicionar um tubo de maior diâmetro na diagonal. Este tubo tem apenas função estrutural, uma vez que se observou, durante a construção, uma excessiva deformação da peça que compõe o fundo da cavidade, em função do peso da estrutura. Embora este reforço estrutural não tenha sido previsto inicialmente, ele não causa nenhum prejuízo técnico para a utilização do sistema de resfriamento previsto. A Figura 3-8 e a Figura 3-9 mostram a vista do lado externo e interno da cavidade já montada.

Envolvendo toda a superfície externa da cavidade, sobre a serpentina de cobre, foi colocado um isolamento térmico formado por uma camada de lã de vidro de aproximadamente 70mm de espessura. O isolamento será preso ao corpo da cavidade após a colocação da mesma no calorímetro e da instalação do sistema de resfriamento. O conjunto cavidade e isolamento serão recobertos por uma caixa metálica de proteção com pintura eletrostática na cor branca (Figura 3-10). Esta caixa protetora será fixada diretamente na estrutura do calorímetro, não tendo nenhum contato térmico com a cavidade.



Figura 3-7. Composição da cavidade com serpentinas aplicadas na face externa (peças laterais)



Figura 3-8. Vista do lado externo da cavidade e reforço estrutural do fundo



Figura 3-9. Vista do lado interno da cavidade



Figura 3-10. Detalhe do isolamento térmico em lã de vidro e caixa protetora

3.2.1.2 Cavidade secundária (CS)

A fabricação da cavidade secundária foi realizada no LabTermo (Laboratório de Ciências Térmicas da UFSC). Para a fabricação da cavidade, foi utilizada uma chapa de cobre com espessura de 3mm e dimensões de 50cm x 50cm. Na parte posterior desta chapa, foi fixada uma serpentina de cobre com diâmetro externo de 3/8”.

Esta chapa de maior espessura foi empregada para tornar possível manter a planicidade necessária durante a colagem dos fluxímetros na face frontal. Devido à espessura da chapa, o processo de fixação da serpentina foi bastante difícil, sendo necessário um processo de soldagem utilizando uma liga de fósforo e cobre (foscoper).

Esta estrutura completa é formada pela chapa de cobre presa a uma esquadria de madeira, a ser posteriormente fixada no trailer. A Figura 3-11 e a Figura 3-12 apresentam a cavidade secundária montada conforme o projeto executivo.



Figura 3-11. Vista posterior da cavidade secundária já montada (detalhe da serpentina)



Figura 3-12. Vista frontal da cavidade secundária (detalhe do plano de colagem dos fluxímetros)

3.2.2 Fabricação do sistema de resfriamento

A fabricação do banho térmico aplicado à cavidade principal foi realizada pela empresa Matiola Refrigeração Ltda (São José – SC). O reservatório de água foi fabricado em inox 304 número 24, obedecendo às dimensões internas especificadas de 40cm x 50cm x 80cm, e sendo protegido com isolamento de 60mm de poliestireno expandido, externamente revestido por chapa epóxi pintada na cor branca. No

interior do reservatório, foi instalada uma serpentina de cobre e também as três resistências aquecedoras previstas inicialmente (Figura 3-13). A fiação de ligação das resistências ficou exposta na parte frontal do reservatório, para que posteriormente esta fiação fosse conectada à alimentação elétrica.

O sistema condensador utilizado para a refrigeração é da marca Danfoss, modelo HCM018, com potência nominal de 1,5HP, e alimentação 220V monofásica (Figura 3-14). O sistema tem dimensões de 50cm x 70cm x 44,2cm, e peso de aproximadamente 45kg. A Figura 3-15 mostra a vista geral do banho térmico construído.

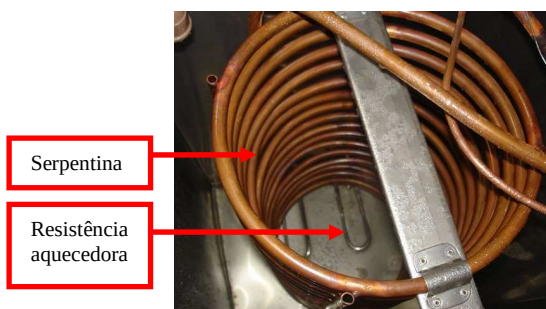


Figura 3-13. Serpentina e resistências aquecedoras no interior do reservatório



Figura 3-14. Sistema condensador 1,5HP



Figura 3-15. Vista geral do banho térmico

3.2.3 Fabricação do trailer de abrigo

A fabricação do trailer foi realizada pela empresa Pirâmide Reboques Indústria Metalúrgica Ltda (Joinville/SC). O chassi de sustentação foi fabricado em perfis de viga U de 100mm galvanizado (Figura 3-16). Já as molduras de madeira para fixação das cavidades e das amostras de janela foram fabricadas em madeira de lei (Figura 3-17).



Figura 3-16. Estrutura do trailer (perfis metálicos)



Figura 3-17. Molduras de madeira nas aberturas para as cavidades

Para o fechamento lateral, foram empregadas chapas galvanizadas com acabamento em pintura na cor branca, e para o assoalho da parte interna foram utilizadas tábuas de madeira de lei. Já no piso da plataforma externa, foram aplicadas chapas de aço galvanizado. A Figura 3-18 mostra o acabamento final do trailer.



Figura 3-18. Vista externa do trailer acabado

3.2.4 Desenvolvimento do sistema de aquisição e controle

Além da ligação dos componentes físicos de aquisição e controle (TURs, Placas, fontes, tiristor, multímetro, micro-computador e cabeamento), um software específico é necessário para gerenciar o funcionamento do sistema.

Uma versão beta deste software, em linguagem C++, foi desenvolvida no LMPT para atender as necessidades do sistema de aquisição e controle do calorímetro, segundo as definições do item 3.1.6 deste capítulo.

A Figura 3-19 apresenta a interface de comunicação entre o programa e os dispositivos de aquisição (multímetro e placas mãe). Já na Figura 3-20 é apresentada a interface de aquisição e controle. Esta interface está organizada em 5 abas (janelas) para monitoramento da cavidade principal, cavidade secundária, sistema de resfriamento, variáveis ambientais e resultados. O sistema de aquisição foi testado e apresentou um correto funcionamento na leitura do sinal gerado pelos sensores conectados aos diferentes canais.

Figura 3-19. Interface de comunicação

Figura 3-20. Interface de monitoramento

3.2.5 Montagem do calorímetro

A montagem do calorímetro ocorreu a partir da fabricação de cada um dos componentes descritos anteriormente. Alguns destes componentes foram produzidos simultaneamente para acelerar o processo de construção do calorímetro. O fluxograma abaixo (Figura

3-21) apresenta a sequência de fabricação e montagem aplicada e desenvolvida em seis etapas.

O primeiro componente a ser instalado no trailer de abrigo foi o sistema de resfriamento (banho térmico). Esta instalação foi realizada diretamente na empresa fornecedora, por se tratar de um trabalho especializado.

O sistema condensador foi fixado através de parafusos sobre a plataforma metálica na parte dianteira do trailer (Figura 3-22). O posicionamento externo do sistema foi previsto para facilitar a dissipação do calor retirado da água do reservatório e também para reduzir o nível de ruído na área interna do trailer. Sobre o sistema condensador foi montada uma cobertura em chapa metálica para proteção contra as intempéries, além de grades laterais para evitar o acesso de pessoas não autorizadas ou danos aos componentes.

O reservatório de água foi instalado do lado interno do trailer junto à parede de fechamento da parte dianteira (Figura 3-23). Já a fixação do reservatório foi realizada diretamente no piso de madeira do trailer por meio de parafusos. Após isso, a tubulação do gás refrigerante que passa pela serpentina no interior do reservatório foi conectada ao sistema condensador e revestida com isolante térmico.

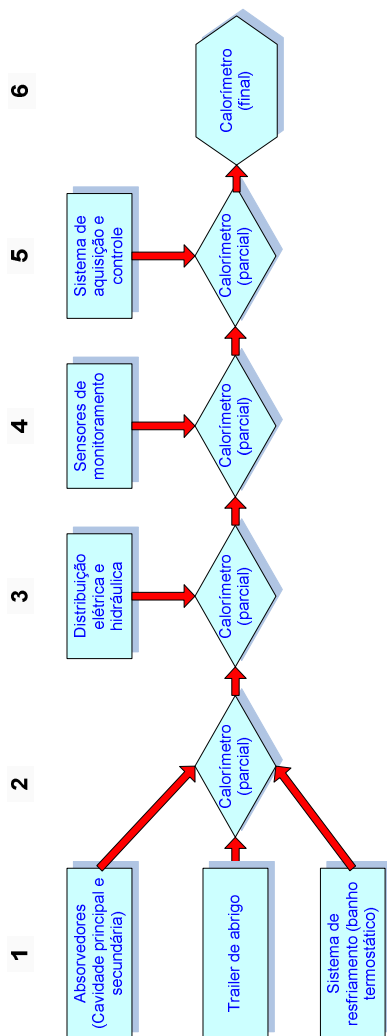


Figura 3-21. Fluxograma da sequência de montagem do calorímetro

O segundo componente a ser instalado no trailer de abrigo foi a cavidade principal. Antes da fixação da estrutura de cobre, as bordas da moldura de madeira (marco da janela) foram isoladas termicamente com a aplicação de uma camada de poliestireno expandido.



Figura 3-22. Sistema condensador instalado na plataforma dianteira do trailer



Figura 3-23. Reservatório instalado no interior do trailer

Depois disso, a cavidade foi fixada na moldura de madeira através de parafusos auto-atarraxantes. A Figura 3-24 mostra a vista externa da cavidade principal já instalada. Posteriormente, a superfície interna da cavidade foi pintada com uma tinta de propriedades conhecidas (absortividade e emissividade iguais a 0,95 e 0,86, respectivamente) – Figura 3-25.



Figura 3-24. Vista externa da cavidade principal já instalada no trailer



Figura 3-25. Pintura da cavidade principal

O terceiro componente instalado no trailer de abrigo foi a cavidade secundária. Antes da instalação, foram soldados os conectores de mangueira nas extremidades de entrada e saída da serpentina. Também foram colados na superfície externa 4 sensores de fluxo de calor, os quais foram previamente pintados com a mesma tinta já mencionada.

No lado externo, foi também aplicado um isolante térmico (poliestireno expandido com espessura de 15mm) no perímetro dos sensores, para o ajuste das dimensões da cavidade (50x50cm). A Figura 3-26 mostra a configuração interna da instalação (ainda sem o isolamento), enquanto a Figura 3-27 apresenta a visão externa da cavidade secundária ainda sem o vidro.



Figura 3-26. Detalhe interno da cavidade secundária já instalada no trailer



Figura 3-27. Vista externa da instalação da cavidade secundária (sem o vidro)

Após a colocação das cavidades e do banho térmico, iniciou-se o trabalho de montagem das instalações elétricas e hidráulicas.

O quadro de distribuição do sistema elétrico (Figura 3-28) foi instalado na lateral do trailer oposta às cavidades. Este foi fixado sobre uma chapa de madeira, onde posteriormente também foram instalados os componentes do sistema de aquisição de dados. A alimentação do quadro é realizada a partir de uma ligação externa subterrânea conectada à fiação (espera) deixada sob o piso.

A fiação do sistema elétrico foi fixada de maneira aparente, aproveitando o espaço formado pelos perfis metálicos que compõem a estrutura do trailer, sendo o acabamento realizado com calhas de PVC. O aterramento, por sua vez, foi ligado na própria estrutura do trailer, de maneira que eventuais descargas elétricas sejam conduzidas para o solo através dos apoios metálicos de sustentação do veículo (frontal e traseiro).

Conforme estava previsto no projeto executivo, um ponto de iluminação no teto (Figura 3-29) e uma tomada para ligação de um ventilador (usado como exaustor/insulflador) junto à porta de entrada foram instalados.

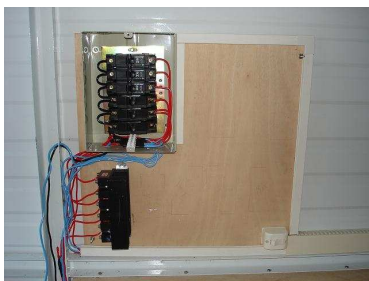


Figura 3-28. Quadro de distribuição elétrica



Figura 3-29. Ponto de luz no teto

O sistema hidráulico também foi montado, sendo realizadas as conexões entre a entrada e a saída das serpentinas, de cada uma das faces das cavidades aos respectivos registros e bombas. Tanto as tubulações como as cavidades também foram isoladas termicamente (Figura 3-30 e Figura 3-31).



Figura 3-30. Ligação da bomba e barrilete com registros de controle de fluxo da CP



Figura 3-31. Isolamento das tubulações e das cavidades

Considerando que na cavidade principal há uma saída para cada uma das 5 faces, e em cada saída a água se encontra em uma temperatura diferente, um misturador foi instalado para garantir uma boa homogeneização da água. Este dispositivo consiste em um tubo de PVC com duas paredes divisórias, forçando a passagem da água em um

circuito tipo “Chicane” (Figura 3-32). Então a medição da temperatura de água que passa pela CP é obtida após a passagem pelo misturador.

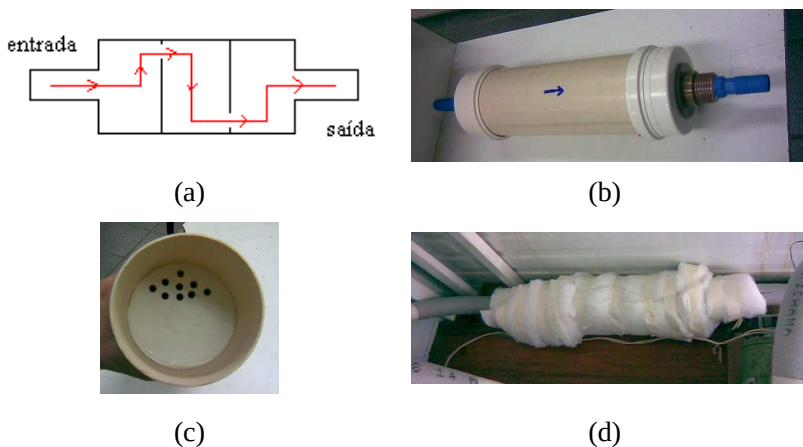


Figura 3-32. Caminho percorrido pela água (a); visão externa do misturador (b); divisória interna (c); isolamento do misturador depois de instalado no trailer (d).

Em relação ao sistema de aquisição e controle, para facilitar a operação e melhor acomodação de alguns dos equipamentos (multímetro e micro computador), foi construída uma bancada de madeira fixada na parede do trailer. Os demais componentes eletrônicos (TURs, placas, fontes, tiristor) foram fixados na mesma placa de madeira onde já havia sido instalado o quadro de distribuição elétrica. A Figura 3-33 mostra disposição dos componetes do sistema de aquisição instalados no trailer.



Figura 3-33. Layout da instalação dos componentes do sistema de aquisição e controle

3.3 CALIBRAÇÃO E INSTALAÇÃO DOS SENSORES DE MONITORAMENTO

Antes da instalação dos sensores alistados na Tabela 3-4, foi realizada a calibração destes dispositivos, conforme os procedimentos descritos nos itens a seguir.

Para verificar a incerteza nos resultados da calibração dos sensores, as diferenças entre os valores de referência (determinados com o instrumento de referência) e do sensor calibrado (calculados a partir das curvas ou coeficientes de calibração obtidos) são avaliadas estatisticamente. A incerteza da calibração (u) é calculada como sendo o desvio padrão (s) das variações encontradas. Neste caso, em que o número de pontos de medição é pequeno ($n < 200$), é necessário aplicar um coeficiente de correção (t), conhecido como coeficiente t-Student, para corrigir o desvio padrão (equação [3.3] e equação [3.4]). O coeficiente t-Student, para uma distribuição normal, é tabelado em

função da probabilidade de enquadramento desejada (ex.: 90%, 95% ou 99% de confiança) e do número de amostras (Gonçalves, 2002). Então:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - \gamma}} \quad [3.3]$$

Onde:

$\bar{x}$ = Valor de referência (determinado com o instrumento de referência);

x_i = Valor do sensor calibrado (calculado a partir das curvas ou coeficientes de calibração obtidos);

n = Número de observações;

γ = Número de restrições lineares.

E também:

$$u = \pm(t.s) \quad [3.4]$$

Sendo:

t = Coeficiente t-Student;

s = Desvio padrão.

3.3.1 Piranômetros

A calibração dos piranômetros é realizada a partir de uma análise comparativa entre os valores de radiação solar medidos simultaneamente pelos sensores utilizados no calorímetro e os valores de referência medidos por um piranômetro de alta precisão (kipp&Zonen CM22), utilizado na estação solarimétrica do LABSOLAR (Laboratório de Energia Solar da UFSC). Durante a calibração, todos os sensores são ajustados na mesma posição e sob as mesmas condições ambientais. As características técnicas do piranômetro de referência são apresentadas na Tabela 3-7.

No caso do sensor fabricado no LMPT, a calibração consiste na obtenção de uma constante. O cálculo da constante de calibração do instrumento segue a relação expressa na equação [3.5]:

$$K_{pir} = Rad/S_{pir} \quad [3.5]$$

Onde:

K_{pir} = Constante de calibração do piranômetro ($W/m^2/mV$);

Rad = Radiação solar (W/m^2);

S_{pir} = Sinal de resposta do piranômetro (mV).

Tabela 3-7. Características técnicas do piranômetro Kipp&Zonen modelo CM22

Intervalo espectral de medição	200 -3600nm
Sensibilidade	7–14 ($\mu V / W / m^2$)
Tempo de resposta	5 s
Erro direcional (para 80° com 1000 W/m^2)	< 5 W/m^2
Erro de linearidade (0 - 1000 W/m^2)	$\pm 0.2 \%$
Varição de estabilidade (variação/ano)	$\pm 0.5 \%$
Sensibilidade à mudança de temperatura (-20 para 50 °C)	0,5 %
Precisão	$\pm 1 \%$

Portanto, a constante final (K_{pir}) para piranômetro é obtida como sendo a média dos valores calculados em um conjunto de leituras simultâneas de radiação e tensão.

Todos os testes de calibração dos piranômetros foram realizados no plano horizontal, como mostra a Figura 3-34. Além do sensor kipp&zonen CM21, mais dois sensores fabricados no LMPT foram também calibrados. Na Tabela 3-8 são apresentados os valores das constantes de calibração dos piranômetros fabricados no LMPT e também os valores da radiação medida com os piranômetros kipp&Zonen CM21 e CM22, em cada tempo de leitura, de um dia de céu claro.



Figura 3-34. Configuração da calibração dos piranômetros

As constantes médias encontradas respectivamente para o piranômetro LMPT 1 e 2, tendo por base o valor da radiação medida com o sensor do LabSolar, foram 924,900 $W/m^2/mV$ e 1089,148 $W/m^2/mV$. No caso do CM21, a diferença média no valor da radiação em relação ao LABSOLAR (CM22) foi de 3,1%. Com isso, a constante

original do CM21 ($90,009 \text{ W/m}^2/\text{mV}$) foi corrigida para $92,799 \text{ W/m}^2/\text{mV}$.

Tabela 3-8. Constantes de calibração dos piranômetros fabricados no LMPT (céu claro)

Horário	Piran. LMPT 1 (mV)	Piran. LMPT 2 (mV)	LabSolar Kipp&Zon en CM22 (W/m^2)	K 1 ($\text{W/m}^2/\text{mV}$)	K 2 ($\text{W/m}^2/\text{mV}$)	Kipp&Zon en CM21 (W/m^2)
13:52:30	1,029	0,933	985	957,2	1055,7	958
13:55:00	1,037	0,885	980	945,0	1107,3	952
13:57:30	1,034	0,848	977	944,4	1151,5	951
14:00:00	1,025	0,840	973	949,3	1158,3	947
14:02:30	1,025	0,856	967	943,4	1129,7	939
14:05:00	1,017	0,876	960	944,0	1095,9	932
14:07:30	1,018	0,875	954	936,6	1089,7	924
14:10:00	1,022	0,877	952	931,5	1085,5	923
14:12:30	1,023	0,877	943	921,8	1075,3	914
14:15:00	1,033	0,882	934	904,2	1059,0	911
14:17:30	1,026	0,870	933	909,4	1072,4	904
14:20:00	1,020	0,871	924	905,9	1060,8	897
14:22:30	1,018	0,856	921	904,7	1075,9	888
14:25:00	1,021	0,863	916	897,2	1061,4	877
14:27:30	1,037	0,861	912	879,0	1058,7	878
Média	1,0257	0,8713	949	924,9	1089,1	920

A Figura 3-35 apresenta todos os resultados da medição em termos da radiação solar para a data em questão (21/11/2007). OBS.: Neste gráfico, os valores do piranômetro CM21 foram determinados a partir da constante original.

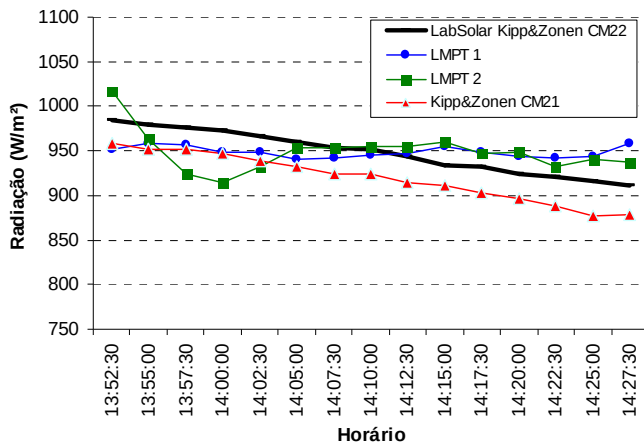


Figura 3-35. Determinação de radiação solar para calibração dos piranômetros (dia 21/11/2007, céu claro)

A Tabela 3-9 mostra os valores da análise estatística referente à incerteza da calibração dos piranômetros LMPT 1 e 2, para um dia de céu claro.

Tabela 3-9. Incerteza na calibração dos piranômetros para céu aberto

Piranômetros	LMPT 1	LMPT 2
Média de K (W/m²/mV)	924,90	1089,15
Desvio padrão (W/m²/mV)	23,36	33,69
t (15 amostras, 95% de confiança)	2, 145	2, 145
Incerteza absoluta (W/m²/mV)	50,11	72,26
Incerteza relativa	5%	7%

Na caso dos piranômetros LMPT 1 e 2, a calibração foi repetida em um dia de céu parcialmente nublado. A Tabela 3-10 apresenta os valores das constantes de calibração obtidas neste dia, sendo suas médias, respectivamente, 902,005 W/m²/mV e 1145,552 W/m²/mV. Já a Figura 3-36 apresenta todos os resultados da medição em termos da radiação solar para a data em questão (03/12/2007).

Os cálculos estatísticos foram feitos em três períodos diferentes, de acordo com os níveis de radiações observados na Figura 3-36. O primeiro período é composto pelos dados extraídos no horário entre 14h 15 min e 14h 30 min utilizando-se o valor “t-Student” igual a 2,447 para

as 7 amostras. Para o segundo período, foi utilizado “t” igual a 2,262 para 10 amostras, sendo essas referentes aos dados extraídos das 14h 32min 30s até às 14h 55min. O terceiro período, com 7 amostras e “t” igual a 2,447, refere-se aos dados extraídos no horário entre 14h 57min 30s e 15h 12min 30s.

Tabela 3-10. Constantes de calibração dos piranômetros fabricados no LMPT (céu parcialmente nublado)

Horário	Piranômetro LMPT 1 (mV)	Piranômetro LMPT 2 (mV)	LabSolar Kipp&Zonen CM22 (W/m²)	K 1 (W/m²/mV)	K 2 (W/m²/mV)
14:15:00	0,383	0,312	334	872,1	1070,5
14:17:30	0,353	0,275	303	857,2	1100,4
14:20:00	0,338	0,267	293	865,7	1095,9
14:22:30	0,348	0,275	310	892,0	1128,7
14:25:00	0,360	0,284	316	876,9	1111,6
14:27:30	0,376	0,289	328	873,4	1136,3
14:30:00	0,382	0,302	349	913,9	1156,0
14:32:30	0,443	0,350	425	958,7	1213,4
14:35:00	0,715	0,430	863	1207,0	2007,0
14:37:30	1,032	0,835	1024	992,2	1226,3
14:40:00	0,711	0,554	874	1229,3	1577,6
14:42:30	0,827	0,640	699	845,0	1091,9
14:45:00	0,574	0,481	478	832,9	994,0
14:47:30	0,653	0,515	557	852,8	1081,4
14:50:00	0,545	0,472	395	725,3	837,5
14:52:30	0,440	0,360	374	849,8	1038,6
14:55:00	0,491	0,392	626	1274,1	1595,9
14:57:30	0,354	0,297	286	806,8	961,6
15:00:00	0,350	0,287	291	830,3	1012,5
15:02:30	0,364	0,294	328	901,6	1116,3
15:05:00	0,447	0,355	372	832,2	1047,9
15:07:30	0,450	0,363	389	864,4	1071,6
15:10:00	0,476	0,378	347	728,2	916,9
15:12:30	0,356	0,302	273	766,3	903,3
Média	0,490	0,388	451	902,0	1145,6

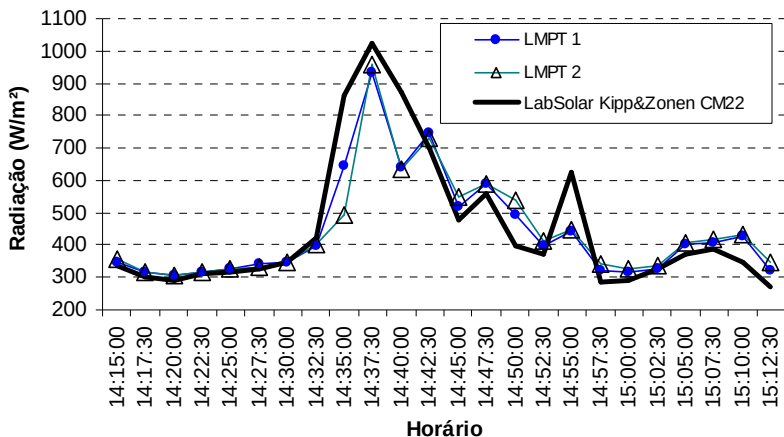


Figura 3-36. Determinação de radiação solar para calibração dos piranômetros (dia 03/12/2007, céu parcialmente nublado)

A Tabela 3-11 mostra os valores da análise estatística referente à incerteza da calibração dos piranômetros LMPT 1 e 2, para o dia de céu parcialmente nublado.

Tabela 3-11. Incerteza na calibração dos piranômetros para céu parcialmente nublado

	Primeiro período (7 amostras)		Segundo período (10 amostras)		Terceiro período (7 amostras)	
Piranômetros LMPT	1	2	1	2	1	2
Média de K (W/m²/mV)	878,73	1114,2	943,67	1253,63	818,55	1004,32
Desvio padrão (W/m²/mV)	18,79	28,54	193,94	372,5	58,28	80,32
t (95% de confiança)	2,447	2,447	2,262	2,262	2,447	2,447
Incerteza absoluta (W/m²/mV)	45,98	69,84	438,69	842,59	142,6	196,53
Incerteza relativa	5%	6%	46%	67%	17%	20%

Fazendo uma análise da Tabela 3-9 e da Tabela 3-11, pode-se observar uma grande diferença entre as incertezas e os desvios padrões

dos piranômetros nos dias de medição com diferentes condições de céu. Uma maior incerteza é apresentada em dia de céu parcialmente nublado, devido às variações da quantidade e densidade das nuvens no céu.

Pode-se observar que o piranômetro 1 apresentou uma incerteza em seus resultados menor (5%) nos dias de medição de céu claro (Tabela 3-9), quando comparado ao piranômetro 2 (7%). Já nos dias com o céu parcialmente nublado, a incerteza de ambos é bastante elevada, chegando a valores médios de 46% para o piranômetro 1 e 67% para o piranômetro 2. Porém, quando o céu apresenta uma condição estável (totalmente encoberto, como representado pelo primeiro período da Tabela 3-11), a incerteza de ambos retorna aos valores da condição de céu claro, com 5% e 6% de erro, respectivamente, para o piranômetro 1 e 2.

Através dessa análise, pode-se concluir que o piranômetro 1 é o mais indicado para ser usado no calorímetro. Porém, este será usado apenas para determinação da radiação horizontal, enquanto que para determinação da radiação incidente no plano da janela será utilizado o piranômetro Kipp&Zonen CM21.

A fixação destes dois sensores no calorímetro é realizada através de bases de madeira móveis que podem ser recolhidas ao fim da medição.

3.3.2 Anemômetros

Estes instrumentos foram calibrados em um túnel de vento que está instalado no LabTermo (Laboratório de Ciências Térmicas) da UFSC, como mostra a Figura 3-37.

A calibração consiste na colocação de um anemômetro previamente calibrado em uma abertura na saída de ar do túnel, medindo a velocidade do ar (m/s). Este anemômetro já calibrado (referência) faz a leitura da velocidade do ar lançado no túnel, que atinge também os anemômetros em calibração. Os anemômetros em calibração, por sua vez, fornecem uma diferença de potencial (mV) característica para cada velocidade do ar. Então, obtém-se uma curva de calibração através da plotagem dos valores de velocidade (anemômetro de referência) *versus* a diferença de potencial (anemômetros em calibração) lida em um multímetro digital.

Para a calibração dos anemômetros, foram determinados, no túnel de vento, 19 pontos de velocidade do ar em função da diferença de potencial. Para cada anemômetro foi então obtida uma curva de calibração, com a respectiva função polinomial (Figura 3-38 e Figura 3-39).



Figura 3-37. Túnel de vento utilizado para calibração dos anemômetros

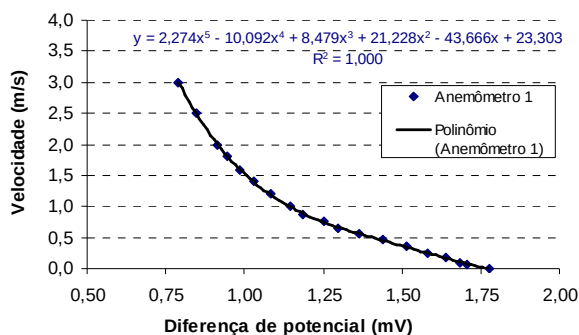


Figura 3-38. Curva de calibração do anemômetro 1 (interno)

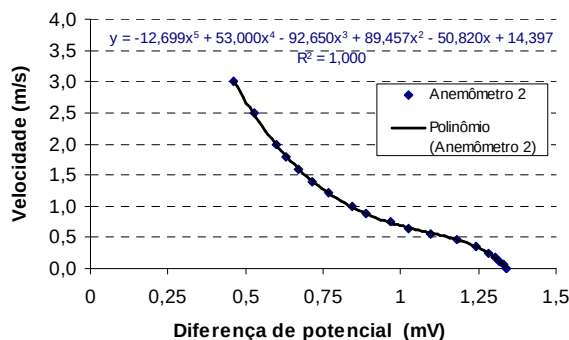


Figura 3-39. Curva de calibração do anemômetro 2 (externo)

A partir da calibração, calculou-se a variação entre as velocidades do ar medida *versus* a calculada através da curva ajustada. Com isso, foi realizada uma análise estatística referente à incerteza da calibração, onde a incerteza absoluta é o desvio padrão multiplicado pelo coeficiente “t-Student” para o conjunto das 19 amostras (Tabela 3-12).

Tabela 3-12. Incerteza na calibração dos anemômetros

Anemômetro	1	2
Desvio padrão (m/s)	0,0156	0,0163
t (19 amostras, 95% de confiança)	2,101	2,101
Incerteza absoluta (m/s)	0,033	0,034

Quanto à instalação, o anemômetro 1 foi colocado no interior da cavidade principal, preso a uma haste, a uma distância de aproximadamente 15 cm do centro da face superior da cavidade. Já o anemômetro 2 é móvel, podendo ser recolhido. Durante a medição do FS de uma amostra qualquer, o anemômetro 2 é colocado externamente, preso a uma haste (com 30 cm de comprimento) fixada perpendicularmente ao plano de medição.

3.3.3 Fluxímetros

Inicialmente, os fluxímetros utilizados na cavidade secundária foram calibrados em laboratório, conforme descrito por Lopes et al. (2007b). No entanto, algumas dificuldades na dissipação do fluxo de calor aplicado aos sensores durante esta calibração comprometeu as constantes de calibração, o que foi verificado nos testes após a instalação da cavidade. Por isso, uma nova calibração, agora *in loco*, foi necessária.

Para a calibração dos quatro fluxímetros (numerados como mostra a Figura 3-40), foi utilizada uma fonte geradora de corrente elétrica, um multímetro, uma resistência elétrica, e uma placa isolante.

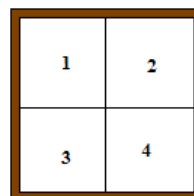


Figura 3-40. Numeração dos fluxímetros, vista externa frontal

A resistência utilizada ($9,24\Omega$) é plana e tem dimensões iguais as dos 4 fluxímetros ($25\text{cm} \times 25\text{cm}$). Esta é conectada a fonte geradora de corrente por dois fios condutores e sua face plana é colocada em contato com o fluxímetro a ser calibrado. Entre o fluxímetro e a resistência é utilizado um gel para eliminar bolhas de ar entre eles, o que melhora a transferência de calor. Também foi usada uma manta térmica entre o isolante e a resistência para melhorar o isolamento e uma alavanca para fixação do sistema (Figura 3-41).

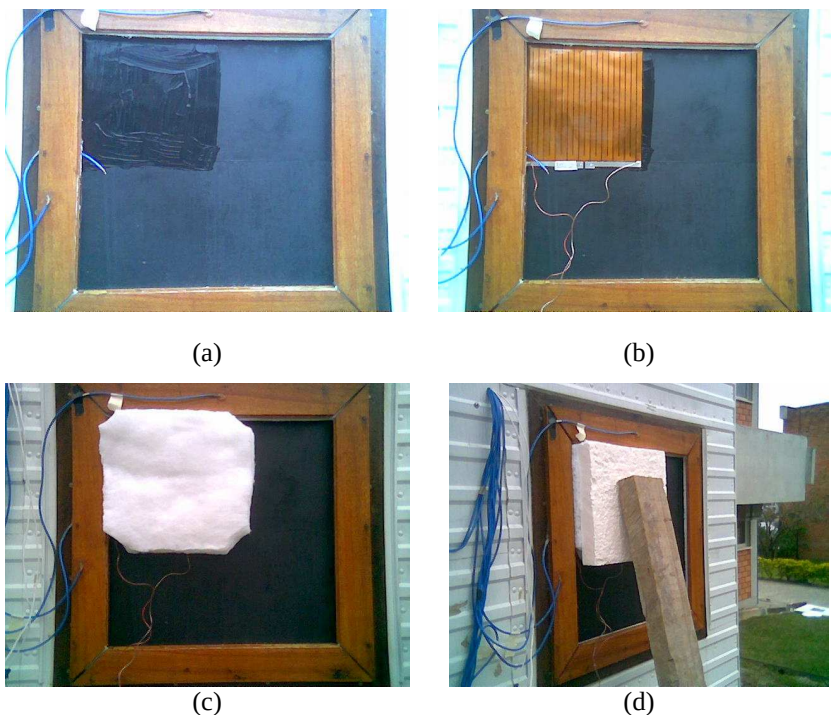


Figura 3-41. Gel na face do fluxímetro (a), resistência aplicada sobre o gel (b), manta térmica acima da resistência (c), arranjo completo (d)

Depois do arranjo de calibração estar pronto (Figura 3-42), então são ajustados, na fonte de tensão, diferentes valores de corrente elétrica, que geram valores de densidades de potência pré-determinados (ex: $1000\text{W}/\text{m}^2$, $2000\text{W}/\text{m}^2$...). Depois disso, são feitas as leituras das tensões correspondentes geradas nos fluxímetros, e, considerando que o

sistema seja ideal (toda a potência fornecida à resistência é transmitida ao fluxímetro), estas tensões são usadas para determinar as constantes de calibração.

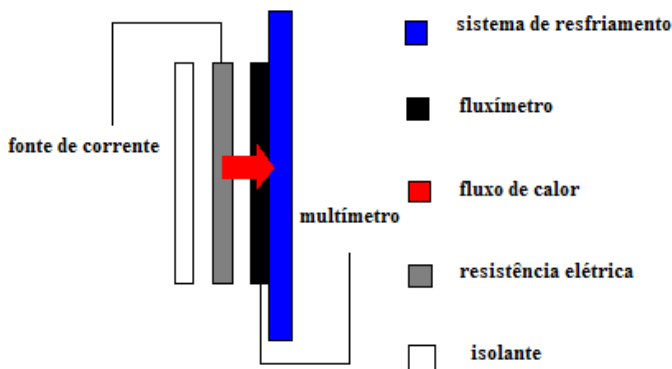


Figura 3-42. Esquema de calibração dos fluxímetros

O valor da constante de calibração é dado pela relação da equação [3.6] em cada potência dissipada, sendo que a constante final corresponde à média obtida da série de medições realizadas em cada fluxímetro.

$$K_{\text{flux}} = P_{\text{res}}/S_{\text{flux}}, \quad [3.6]$$

Onde:

K_{flux} = Constante de calibração do fluxímetro (W/mV);

P_{res} = Potência dissipada na resistência aquecedora (W);

S_{flux} = Sinal de resposta do fluxímetro (mV).

Primeiramente, foram aplicados seis valores de potência ao fluxímetro 1, para determinar o comportamento da curva de densidade de potência *versus* tensão. Esta curva apresentou um comportamento linear, como mostra a Figura 3-43.

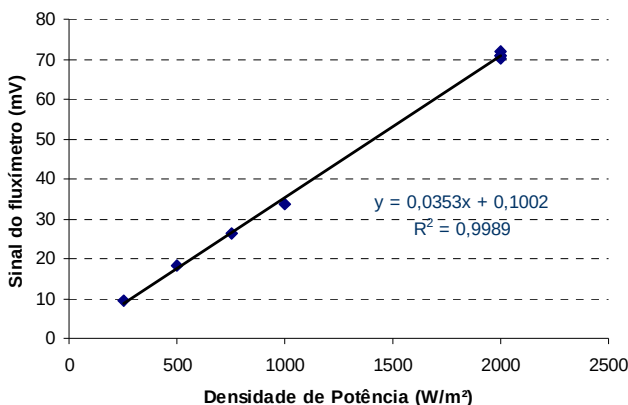


Figura 3-43. Curva de calibração do Fluxímetro 1

Então, em todos os fluxímetros apenas um patamar de densidade de potência (igual a 2000W/m²) foi utilizado para calcular as constantes, sendo a verificação repetida duas vezes em cada sensor. Este procedimento foi adotado pelo fato de que estudos anteriores (Guths et al., 1998) mostraram que, para potências elevadas, as fugas de calor pelas laterais dos sensores se tornam menos significativas em relação ao fluxo principal. Desta forma, os valores de constantes obtidos a partir de potências elevadas estão menos sujeitos aos erros devido às fugas de calor. A Tabela 3-13 apresenta as condições de medição e a constante de calibração final (média) para cada fluxímetro.

A incerteza de calibração foi estimada a partir do valor mais alto do desvio padrão observado nas quatro séries de calibração (1,4%) multiplicado pelo coeficiente “t-student” (para 95% de confiança, e n=4 séries de calibração), que é igual 3,182. Com isso, o valor de incerteza na calibração assumido para os 4 sensores foi de 4,5%.

Tabela 3-13. Constantes de calibração dos fluxímetros

ΔT base_ar ext ($^{\circ}\text{C}$)	Densidade de potência (W/m^2)	Sinal do Fluxímetro (mV)	Constante ($\text{W}/\text{m}^2/\text{mV}$)
<i>Fluxímetro 1</i>			
-0,33	2000	70,100	28,531
-0,31	2000	70,760	28,265
Média			28,398
Desvio padrão (absoluto)			0,188
Desvio padrão (relativo)			0,7%
<i>Fluxímetro 2</i>			
1,84	2000	89,001	22,472
1,99	2000	89,522	22,341
Média			22,406
Desvio padrão (absoluto)			0,092
Desvio padrão (relativo)			0,4%
<i>Fluxímetro 3</i>			
1,56	2000	154,500	22,778
1,49	2000	154,750	22,741
Média			22,759
Desvio padrão (absoluto)			0,026
Desvio padrão (relativo)			0,1%
<i>Fluxímetro 4</i>			
-0,61	2000	57,250	34,934
-0,95	2000	56,120	35,638
Média			35,286
Desvio padrão (absoluto)			0,497
Desvio padrão (relativo)			1,4%

3.3.4 Termopares e termistor

A calibração dos termopares foi realizada em uma amostra retirada do mesmo lote de cabos utilizados no monitoramento do calorímetro. O processo de calibração consiste basicamente em manter a junção de referência dos termopares em uma temperatura fixa, enquanto a junção de contato é submetida a diferentes temperaturas, sendo verificada simultaneamente a diferença de potencial gerada a partir das diferenças de temperatura observadas. A partir de uma curva de diferença de potencial *versus* diferença de temperatura é obtida uma

expressão (polinômio) de calibração para o sensor. Este processo é descrito detalhadamente a seguir.

Em uma garrafa térmica com gelo triturado, mergulha-se a junção de referência, que mantém a sua temperatura próxima de 0°C. A outra junção é colocada em um banho termostático digital (Microquímica, modelo MQBMP-01, resolução 0,1°C), onde é possível fazer ajustes de temperaturas. Embora o banho possua um controle digital de temperatura, também é utilizado um termômetro de mercúrio, para um controle mais preciso. As temperaturas ajustadas no banho são definidas com base na faixa de temperatura a que os sensores serão submetidos quando em uso. Ao mesmo tempo, a diferença de potencial entre as junções é medida com um multímetro digital (HP, modelo 34401A, resolução 0,1μV).

A Figura 3-44 mostra a configuração aplicada na calibração onde pode ser observada a junção de referência (garrafa térmica), o banho termostático, e o multímetro digital utilizado.

A curva característica de calibração, para uma amostra do lote de termopares utilizados, foi então plotada em um gráfico de dispersão. Esta curva ajustada é do tipo polinomial do terceiro grau, tendo a diferença de temperatura em função da diferença de potencial (Figura 3-45).



Figura 3-44. Configuração para calibração dos termopares

Pode-se também realizar uma análise da variação entre os valores de ΔT medidos e os valores de ΔT calculados através da curva ajustada. A Tabela 3-14 a seguir contém os dados e resultados obtidos deste cálculo.

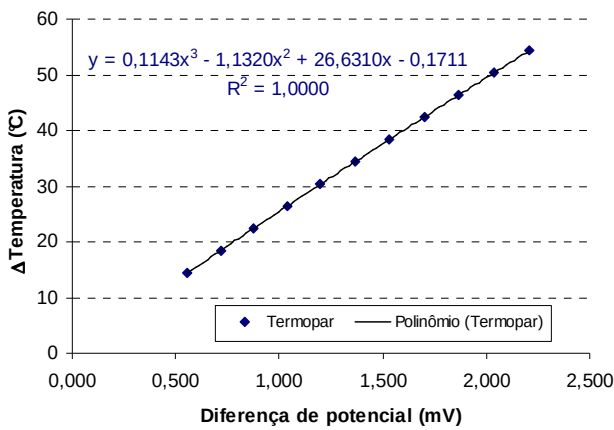


Figura 3-45. Curva de calibração dos termopares

Tabela 3-14. Variação entre os valores de ΔT medido e ΔT da curva ajustada na calibração dos termopares

Valores de ΔT medidos (°C)	Valores de ΔT através da curva ajustada (°C)	Variação (°C)
14,40	14,38	0,018
18,40	18,41	0,009
22,40	22,44	0,041
26,40	26,38	0,020
30,30	30,33	0,029
34,40	34,34	0,062
38,40	38,36	0,042
42,30	42,39	0,092
46,40	46,37	0,029
50,40	50,42	0,016
54,40	54,39	0,012

A partir da variação entre os valores de ΔT medido e ajustado é determinada a incerteza da calibração. Para este conjunto de medições composto por 11 pontos, com desvio padrão (0,053°C) multiplicado pelo coeficiente “t-Student” (que para um grau de confiança de 95% é

igual a 2,228), a incerteza no valor absoluto medido corresponde a $0,12^{\circ}\text{C}$.

Um das variáveis de maior influência no cálculo do ganho de calor da CP é a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do líquido que circula pelas serpentinas de resfriamento. Para verificar a estabilidade dos termopares utilizados nestes pontos de monitoramento, os dois sensores foram colocados juntos (a uma distância de aproximadamente 1cm entre eles) dentro de um banho termostático (Microquímica, modelo MQBMP). A Figura 3-46 mostra a variação da temperatura medida pelos termopares no interior do banho. Pode-se observar a excelente aproximação das curvas ao longo do tempo de teste, e também a resposta simultânea dos dois sensores a uma alteração proposital no “setpoint” do banho (tempo 10 min). Já a Figura 3-47 apresenta a variação entre as leituras dos dois termopares ao longo do teste. Na média esta variação foi nula, mas com um desvio padrão de $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$. Aplicando o coeficiente “t-Student” (para um mínimo de 40 leituras e grau de confiança de 95%, “t” corresponde a 2,023), a incerteza na medição do ΔT da água foi de $0,04^{\circ}\text{C}$.

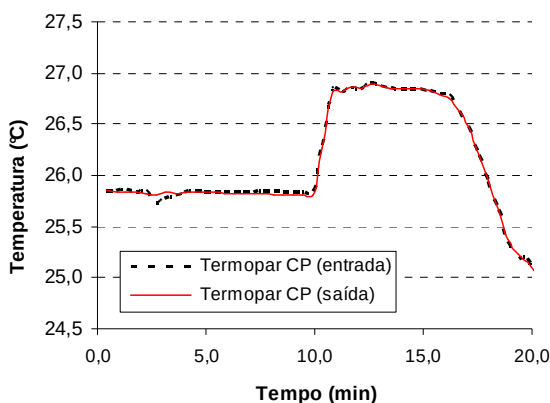


Figura 3-46. Teste com dois termopares no interior do banho

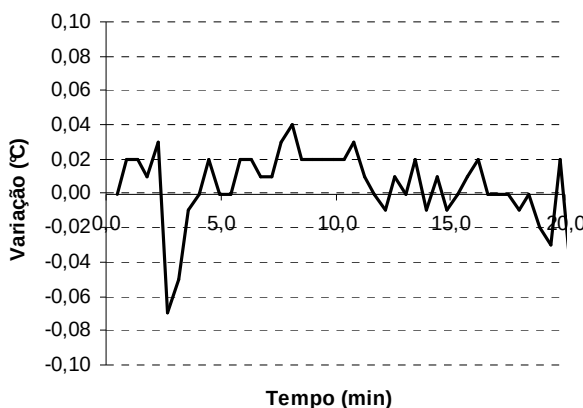


Figura 3-47. Variação nas temperaturas medidas pelos termopares

Ainda, a Figura 3-48 mostra a variação da incerteza relativa sobre o valor absoluto do ΔT da água, medido entre a entrada e saída da cavidade.

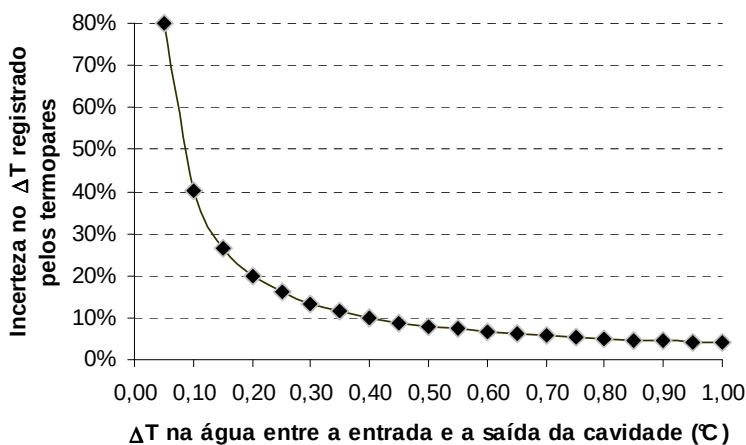


Figura 3-48. Incerteza na medida do ΔT da água na entrada e saída da cavidade

No caso do termistor, a calibração é realizada apenas com a utilização do banho termostático. Este tipo de sensor gera diretamente uma tensão proporcional à temperatura medida, não necessitando de junção de referência. Assim, a partir de algumas leituras de temperatura

e tensão é possível encontrar uma curva de calibração característica do termistor. A Figura 3-49 apresenta a curva ajustada para os pontos de leitura obtidos durante a calibração.

Novamente, a partir da variação entre os valores medidos e calculados através da curva ajustada (Tabela 3-15), pode ser obtida a incerteza na calibração do termistor. Repetindo o procedimento já aplicado para os termopares, mas agora utilizando um coeficiente “t-Student” para 7 pontos e 95% de confiança (2,477), temos uma incerteza na calibração igual a 0,52°C.

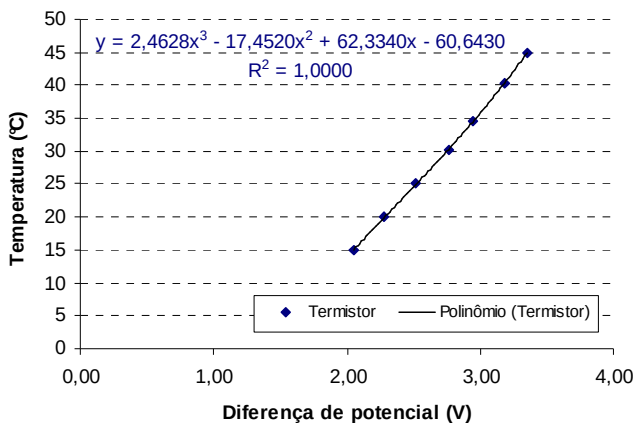


Figura 3-49. Curva de calibração do termistor

Tabela 3-15. Variação entre os valores de temperatura medida e calculada (curva ajustada) na calibração do termistor

Temperatura medida (°C)	Temperatura ajustada (°C)	Variação (°C)
15,00	15,02	0,017
20,00	19,95	0,054
25,00	25,02	0,024
30,00	30,24	0,236
35,00	34,59	0,408
40,00	40,29	0,295
45,00	44,91	0,089

O comprimento total de termopares utilizados foi de aproximadamente 60m e a instalação dos mesmos foi realizada nos pontos previstos no item 3.1.5, sendo as juntas de medição coladas às superfícies monitoradas (Figura 3-50a), e protegidas com papel aluminizado quando expostas à radiação solar (Figura 3-50b).

Para a medição da temperatura do ar externo foi utilizado um termopar posicionado na área de sucção de um ventilador protegido por um duto que impede a incidência de radiação solar (Figura 3-50c).

Já o termistor foi colocado entre as junções de referência dos termopares, agrupadas no interior de um perfil metálico (Figura 3-50d).

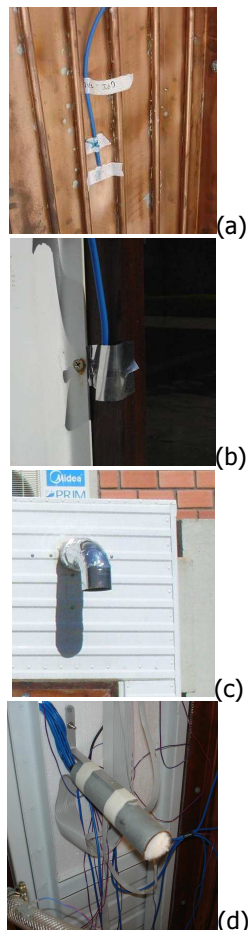


Figura 3-50. Exemplo da fixação dos termopares (a); exemplo de proteção dos termopares quando expostos à radiação solar (b); entrada para medição da temperatura do ar (c); junta de referência dos termopares (d)

3.3.5 Medidores de vazão

Embora tenham sido instalados medidores de vazão na saída das duas cavidades, apenas o valor da vazão do fluxo de água na cavidade principal é efetivamente utilizado no cálculo de ganho de calor, uma vez que o processo de quantificação é diferenciado entre as cavidades.

Assim, o valor da vazão aplicada à cavidade principal em função do bombeamento foi determinado por meio de uma análise de tempo e volume. A Tabela 3-16 apresenta os resultados de 44 leituras de

volume para diferentes intervalos de tempo (de 5 a 36 minutos) e seus respectivos valores de vazão encontrados. O valor médio da vazão na CP determinado a partir desta análise e adotado nos cálculos foi de 0,475 l/s.

Tabela 3-16. Determinação da vazão na cavidade principal

Intervalo de tempo (min)	Volume (m³)	Vazão (l/s)	Intervalo de tempo (min)	Volume (m³)	Vazão (l/s)
5	0.135	0.450	15	0.439	0.488
5	0.139	0.463	15	0.440	0.489
5	0.150	0.500	15	0.455	0.506
7	0.206	0.490	16	0.475	0.495
8	0.226	0.471	17	0.450	0.441
8	0.236	0.492	19	0.545	0.478
9	0.220	0.407	20	0.542	0.452
10	0.260	0.433	20	0.565	0.471
10	0.264	0.440	20	0.572	0.477
10	0.272	0.453	20	0.583	0.486
10	0.287	0.478	20	0.585	0.488
10	0.287	0.478	20	0.585	0.488
10	0.288	0.480	21	0.600	0.476
12	0.343	0.476	21	0.616	0.489
14	0.392	0.467	22	0.637	0.483
14	0.398	0.474	22	0.660	0.500
14	0.407	0.485	24	0.700	0.486
15	0.410	0.456	26	0.742	0.476
15	0.420	0.467	28	0.826	0.492
15	0.424	0.471	28	0.827	0.492
15	0.428	0.476	35	1.012	0.482
15	0.435	0.483	36	1.036	0.480
Vazão média (l/s)				0.475	
Desvio padrão (l/s)				0.019	
t (44 amostras, 95% de confiança)				2.019	
Incerteza absoluta (l/s)				0.039	
Incerteza relativa (%)				8.2%	

3.3.6 Medidor de coeficiente de convecção

Este instrumento é composto por uma resistência elétrica plana de 3,0cm x 3,5cm, revestida com alumínio na face exposta ao ar externo e isolada na outra face, onde há um termopar para obtenção da temperatura da base da resistência. O isolante é fixado em uma base de suporte de madeira com formato de “L”. Presa a esta base há uma haste articulada com uma chapa metálica na extremidade, para proteger a resistência da incidência da radiação solar direta (Figura 3-51). Assim, o coeficiente de convecção na superfície paralela à resistência é estimado isolando “h” na seguinte na equação [3.7]:

$$q'' = h(T_b - T_{ar}) \quad [3.7]$$

Onde:

q'' = Calor trocado entre a resistência e o ar (W/m^2);

h = Coeficiente de convecção medido (W/m^2K);

T_b = Temperatura da base da resistência ($^{\circ}C$);

T_{ar} = Temperaturas do ar externo ($^{\circ}C$).



(a)



(b)

Figura 3-51. Medidor e haste articulada (a); conjunto montado na posição de uso (b)

Como q'' é numericamente igual à potência elétrica dissipada na resistência (potência = V^2/RA), onde V é a tensão entregue à resistência (1,578Volts), R é a resistência elétrica ($24,7\Omega$), e A é a área da

superfície da resistência ($0,00105\text{m}^2$), logo q'' é invariável, e igual à 96W/m^2 .

Comunelo (2007) realizou uma comparação teórica *versus* experimental que apresentou uma boa correlação entre os valores de “h” obtidos com um dispositivo semelhante ao usado no calorímetro, porém para uma condição de escoamento laminar. Embora o teste de Comunelo (2007) tenha uma condição de escoamento diferente da superfície externa do calorímetro, os valores de “h” obtidos com o dispositivo também apresentaram uma boa aproximação quando comparados à correlação da equação [3.8] apresentada por Incropera e DeWitt (2003), para uma condição de escoamento turbulento em uma placa plana vertical. A Figura 3-52 apresenta a comparação entre estes valores, para um ΔT médio entre a base da resistência e o ar em torno de 10°C . Em média, a variação entre os resultados medidos e teóricos foi de 28% (embora tenha chegado a 96% para o ponto com velocidade abaixo de $1,0\text{m/s}$), sendo que as menores variações ocorreram na faixa de velocidade entre $2,0$ e $3,5\text{m/s}$.

$$\overline{Nu}_L \equiv \frac{\bar{h} \cdot L}{k} = 0,037 \text{Re}_L^{4/5} \text{Pr}^{1/3} \quad [3.8]$$

Sendo:

$\overline{Nu}_L$ = Número de Nusselt médio (adimensional);

$\bar{h}$ = Coeficiente médio de transferência de calor por convecção ($\text{W/m}^2\text{K}$);

L = Comprimento da superfície (m);

k = Condutividade térmica do fluido (W/mK);

Re = Número de Reynolds (adimensional);

Pr = Número de Prandtl (adimensional);

Condições de validade: $\text{Re} \leq 5 \cdot 10^5$; $\text{Pr} \geq 0,6$.

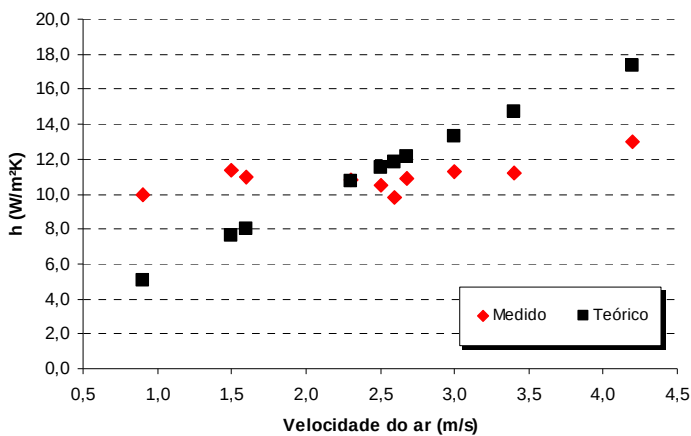


Figura 3-52. Medidor de coeficiente de convecção instalado no calorímetro

3.3.7 Calorímetro solar

A Figura 3-53 apresenta a visão externa da configuração final do calorímetro durante a determinação do Fator Solar em uma amostra de vidro incolor.



(a)



(b)

Figura 3-53. Vista externa do calorímetro em funcionamento (a, b)

4 CALIBRAÇÃO DO CALORÍMETRO: PRIMEIRA FASE

4.1 VIDRO DE REFERÊNCIA

Para a calibração do calorímetro, foi utilizado como elemento de teste o vidro incolor com espessura de 3mm. Este tipo de material tem um comportamento bem caracterizado em relação à passagem da radiação solar, sendo comumente utilizado como referência para comparação com outros tipos de vidros e elementos de proteção solar (ASHRAE, 2005; NFRC 201, 2004).

Para a instalação das chapas de vidro foram seguidas as instruções da NFRC 201 (2004), que recomenda, em caso de calibração de dispositivos de teste, a não colocação de esquadrias. Portanto, foram utilizados apenas elementos estruturais de madeira para posicionamento e fixação dos vidros.

O vidro utilizado para a calibração foi fornecido pela empresa Cebrace Cristal Plano S/A, sendo que as duas chapas utilizadas (uma para a cavidade principal e outra para cavidade secundária) foram retiradas do mesmo lote de material. As propriedades ópticas para este mesmo tipo de vidro, do mesmo fabricante, foram determinadas por Caram (2002), conforme apresentado na Tabela 4-1. Já os valores adotados da emissividade, igual 0,84 (nas duas faces), e da condutividade térmica, de 1,000 W/mK, foram obtidos na International Glazing Database (IGDB v11.4) para um produto similar (ID 102 – generic clear glass 3mm).

Tabela 4-1. Propriedades ópticas do vidro incolor 3mm (Caram, 2002)

Material	Ângulo	Propriedades ópticas totais (300 - 2000nm)		
		Absorção	Reflexão	Transmissão
Vidro incolor 3mm	0	5	10	85
	10	5	10	85
	20	5	10	85
	30	5	11	84
	40	5	12	83
	50	5	15	80
	60	6	19	75
	70	6	31	63
	80	6	55	39

4.2 COEFICIENTES DE TROCA DE CALOR (H)

O “ANEXO E” apresenta os detalhes das correlações e das condições supostas, além dos valores das propriedades e constantes utilizadas nos cálculos do “h” e das trocas de calor desenvolvidos nas análises a seguir.

4.3 TESTE INICIAL COM O CALORÍMETRO

4.3.1 Medição com a cavidade principal (CP)

4.3.1.1 Condições gerais

Após alguns ajustes preliminares, o primeiro teste de calibração foi realizado no dia 07/05/2008. O teste teve início às 10h00min da manhã, quando foram acionados os sistemas de resfriamento (banho térmico), bombeamento e aquisição de dados e controle. No entanto, a medição só passou a ser realizada efetivamente a partir das 11h50min, se estendendo até as 12h30min. Durante este período, compreendido entre o acionamento dos sistemas (10h) e o início da medição (11h50min), foram realizados os ajustes manuais das vazões nas faces, para a estabilização da temperatura da cavidade.

Em relação às condições ambientais observadas no período de teste, destaca-se que estas se mantiveram estáveis, com céu claro e baixa velocidade do vento. Em especial a radiação solar incidente no plano da

janela (Rad_j), que está diretamente associada ao resultado do FS, apresentou uma variação muito pequena (16W/m^2 ou 2% em relação à média, que foi de 749W/m^2). Ainda, durante o período de medição, foram registrados os valores de velocidade do ar externo e radiação global horizontal, cujos valores médios encontrados são, respectivamente, $0,9\text{m/s}$ e 574W/m^2 . Já a temperatura média do ar era de $27,5^\circ\text{C}$.

Nesta fase, o processo adotado para verificar o valor medido do FS foi o proposto pela NFRC 201 (2004), onde o fator solar instantâneo (neste caso FS_{cp}) é dado pela equação [4.1]:

$$FS_{cp} = \frac{(Q_{cp} + Q_{u_{cp}})}{A_j Rad_j} \quad [4.1]$$

Onde:

Q_{cp} = Fluxo de calor na cavidade principal através da amostra (W);

$Q_{u_{cp}}$ = Fluxo (ganho ou perda) de calor devido à diferença de temperatura do ar no lado interno e externo da amostra (W);

A_j = Área de janela exposta à radiação (m^2);

Rad_j = Radiação solar incidente no plano de medição da janela (W/m^2).

Aqui Q_{cp} é definido como a soma de quatro fluxos de calor: o calor perdido através das paredes da cavidade ($Q_{cp_{faces}}$); o calor perdido através das bordas de fixação ($Q_{cp_{bf}}$); o calor removido pelo fluido do sistema de resfriamento ($Q_{cp_{fluid}}$); e o calor gerado pelos equipamentos internos ($Q_{cp_{equi}}$).

Uma vez que não existe geração de calor interna na cavidade e também não há contato direto entre as bordas de fixação e a estrutura da cavidade, $Q_{cp_{bf}}$ e $Q_{cp_{equi}}$ são assumidos como igual a zero. Já o fluxo de calor através das faces da cavidade deve ser determinado através da equação [4.2]:

$$Q_{cp_{faces}} = \sum_{i=1}^n U_{face_i} A_{face_i} \Delta T_{face_i} \quad [4.2]$$

Onde:

U_{face} = transmitância térmica total da face ($\text{W/m}^2\text{K}$);

A_{face} = Área da face do calorímetro (m^2);

ΔT_{face} = Diferença de temperatura entre a face e o ar ($^\circ\text{C}$);

n = Número de faces (neste caso $n=6$).

Para determinar o calor extraído pelo sistema de resfriamento é aplicada a equação [4.3]:

$$Q_{cp_fluid} = m_{cp} \cdot C_{agua} \cdot \Delta T_{cp} \quad [4.3]$$

Onde:

m_{cp} = Taxa de fluxo de massa de água da cavidade principal (l/s);

C_{agua} = Calor específico da água (J/l K);

ΔT_{cp} = Diferença de temperatura da água entre a entrada e saída da cavidade principal (°C).

Ainda é necessário determinar Q_{ucp} , para tal foi aplicada a equação [4.4]:

$$Q_{u_{cp}} = \frac{A_j \Delta T_{cp_ar}}{R_{Tcp}} \quad [4.4]$$

Onde:

R_{Tcp} = Resistência térmica total entre o ar no interior da cavidade principal e o ar externo, dada pela soma de $R_{incp} + R_{vidro} + R_{ext}$ (m^2K/W);

A_j = Área de janela exposta à radiação (m^2);

ΔT_{cp_ar} = Diferença de temperatura entre o ar no interior da cavidade principal e o ar no meio exterior (°C).

Nesta fase, tendo por base o estudo realizado por Marinowski (2005), buscou-se um ajuste do sistema de resfriamento referenciado na temperatura do ar externo. De maneira geral, busca-se eliminar (ou minimizar) o efeito das trocas térmicas devido à diferença de temperatura entre a cavidade e o ar, por manter a cavidade aproximadamente na mesma temperatura do ar externo.

Assim, o software com controle PID do banho termostático buscou atingir a condição da equação [4.5], em que temperatura do ar externo (T_{AR_ext}) é igual à temperatura média das faces da cavidade principal ($TMCP$) mais uma diferença de temperatura ($\Delta T_{AR-TMCP}$).

Neste caso, para uma condição ideal se assume $\Delta T_{AR-TMCP}$ sendo igual a zero.

$$TMCP = T_{AR_ext} + \Delta T_{AR-TMCP} \quad [4.5]$$

4.3.1.2 Resultados

A partir da temperatura de cada uma das faces absorvedoras de calor, é determinada, através de uma ponderação de áreas, a temperatura média da cavidade principal (TMCP).

A TMCP é continuamente comparada ao valor da temperatura do ar externo (T_{AR_ext}), ajustando a temperatura do banho para que uma diferença de temperatura (ΔT) nula entre TMCP e o ar fosse atingida. A Figura 4-1 apresenta a temperatura do ar externo e a TMCP registrada durante o período de medição.

Embora o valor de TMCP tenha se mantido próximo ao valor da temperatura do ar (variação máxima de 2,59°C), cabe destacar que as diferenças de temperatura entre as faces, em alguns momentos da medição, foram acentuadas (chegando até 11°C), como mostra a Figura 4-2. Estas variações podem estar associadas a fatores tais como: a incidência ou não da radiação solar na face, a vazão de líquido ajustada para a face, perdas de carga na passagem do líquido pelas tubulações e a posição da face no conjunto da cavidade. Assim, para minimizar os efeitos destes fatores, ficou clara a necessidade de melhorar o ajuste das vazões nos testes posteriores.

Analisando agora em termos de ΔT , é possível através da Figura 4-3 observar as variações na diferença entre a temperatura do ar externo e a temperatura média da cavidade principal (DT ar ext_TMCP), e também as variações na diferença de temperatura da água entre a entrada e a saída da cavidade principal (DT entrada_saída_CP). Verifica-se que os valores de “DT ar ext_TMCP” se mantêm dentro do intervalo de 0°C e 1°C, tendo um valor médio de 0,55°C e desvio padrão de $\pm 0,18^\circ\text{C}$. Já no caso da “DT entrada_saída_CP”, este intervalo de amplitude vai aproximadamente de -1°C até 2,5°C, sendo a média igual a 1,01°C e o desvio padrão a $\pm 1,07^\circ\text{C}$. A variação negativa aqui indica que TMCP estava, em alguns momentos, acima da temperatura do ar (resultando em perdas de calor), enquanto a variação positiva indica que TMCP está abaixo da temperatura do ar (resultando em ganhos de calor).

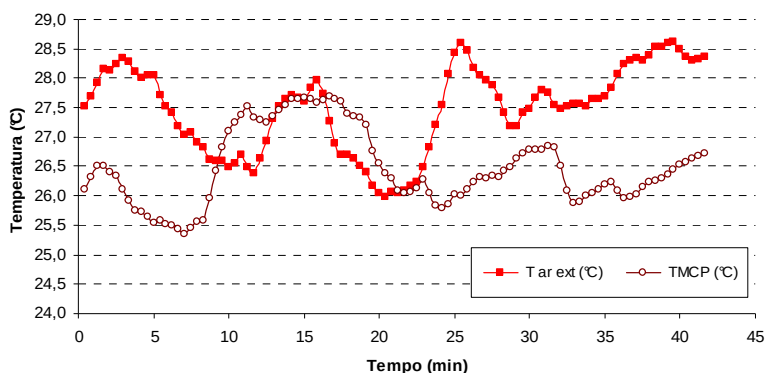


Figura 4-1. TMCP e temperatura do ar externo (Tar ext) durante a medição

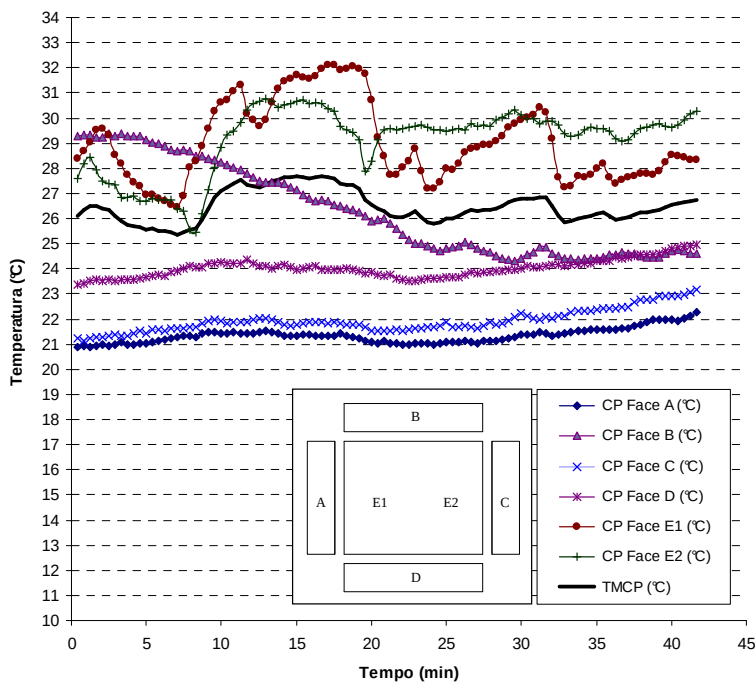


Figura 4-2. Variações de temperatura nas faces da cavidade principal (OBS.: a nomenclatura de posicionamento das faces supõe o observador localizado atrás da cavidade)

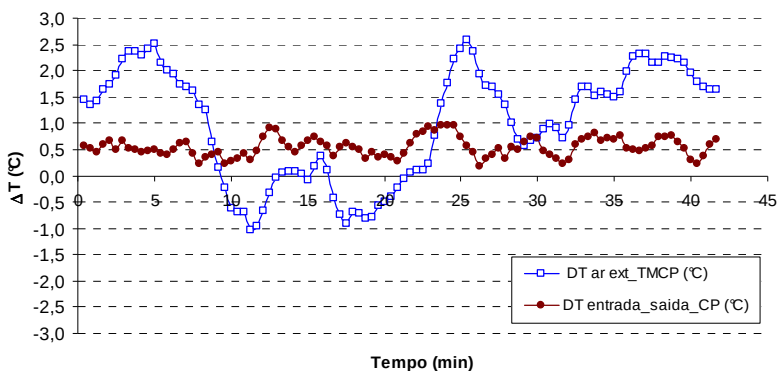


Figura 4-3. Diferenças de temperatura entre o ar externo e TMCP e entre a água na entrada e saída da cavidade principal

Também durante esta fase inicial de calibração, foi realizado o monitoramento da temperatura do vidro e da temperatura do ar no interior da cavidade. A Figura 4-4 mostra a variação da temperatura em dois pontos da superfície externa do vidro. Já a Figura 4-5 apresenta a variação da temperatura do ar no interior da cavidade em três posições verticais ao longo da altura da cavidade (espaçamento de 40cm entre as posições).

A velocidade do ar no interior da cavidade também foi monitorada conforme previsto na instrumentação, no entanto, problemas no funcionamento do sensor (anemômetro) geraram resultados incoerentes, por isso os dados obtidos foram desconsiderados e um valor fixo de 0,1m/s foi adotado para os cálculos envolvidos.

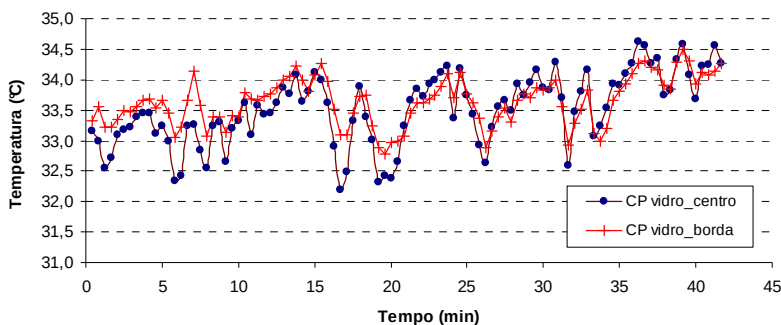


Figura 4-4. Variação da temperatura do vidro da cavidade principal

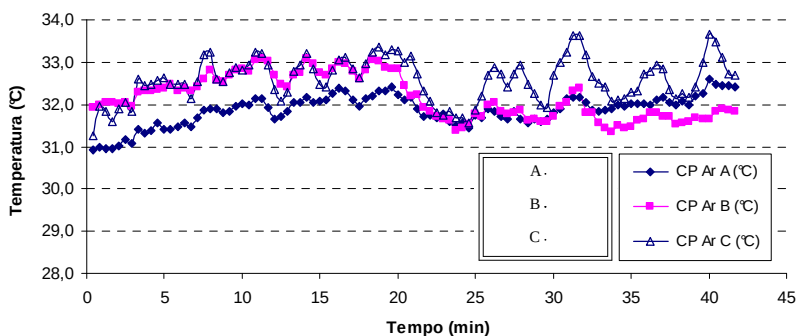


Figura 4-5. Variação da temperatura do ar no interior da cavidade principal

Então, aplicando a metodologia de cálculo proposta e tendo como dados de entrada os resultados do monitoramento, juntamente com valores das propriedades dos elementos envolvidos nos processos de transferência de calor, é possível determinar os valores das perdas de calor e do fator solar medido na cavidade principal.

No caso das estimativas das perdas de calor, foram aplicadas correlações empíricas para determinar os coeficientes de troca (ANEXO E). Para calcular estes coeficientes nas faces da cavidade principal com isolante, foi suposta a condição de convecção natural (com velocidade do ar fixa igual 0,05m/s). Na interior da cavidade, o valor de “h” foi obtido para a condição de confinamento em câmaras retangulares. Já para o coeficiente de troca na superfície externa do vidro instalado na

cavidade, foi suposta a condição de convecção forçada, adotando as velocidades medida ao longo do teste (OBS.: nesta fase de testes, o dispositivo de medição de “h”, apresentado no capítulo anterior, ainda não havia sido montado e instalado).

Assim, os valores médios de “h”, estimados para a superfície do vidro voltada para o meio interno e externo, foram os seguintes: $h_{\text{int}} = 5,9\text{W/m}^2\text{K}$ ($R = 0,17\text{m}^2\text{K/W}$) e $h_{\text{ext}} = 10,3\text{W/m}^2\text{K}$ ($R = 0,10\text{m}^2\text{K/W}$). Para a resistência térmica do vidro, o valor calculado foi de $0,003\text{m}^2\text{K/W}$. Já para as faces horizontais e verticais do fundo da cavidade os resultados foram: $h_{\text{horiz}} = 7,2\text{W/m}^2\text{K}$ ($R = 0,14\text{m}^2\text{K/W}$) e $h_{\text{vert}} = 7,7\text{W/m}^2\text{K}$ ($R = 0,13\text{m}^2\text{K/W}$).

Então, a perda média estimada devido à diferença de temperatura entre o ar interno e externo da cavidade ($\Delta T = 4,7^\circ\text{C}$) foi de $17,4\text{W/m}^2$. Já no caso das faces que compõem o fundo da cavidade, as perdas foram em média de $-3,9\text{W/m}^2$, ou seja, houve, na verdade, ganhos de calor, uma vez que na maior parte do tempo o ar estava com uma temperatura acima do valor da temperatura da cavidade.

Na Figura 4-6, é apresentada a variação no valor do calor retirado da cavidade principal através da passagem do fluido (Q_{cpfluid}). Aqui se tem um valor médio instantâneo para o calor retirado da cavidade durante o intervalo de medição de 1049W (ou 593W/m^2 se dividido pela área de abertura da cavidade). Observa-se que neste caso a extensão da faixa de amplitude de valores é bastante grande.

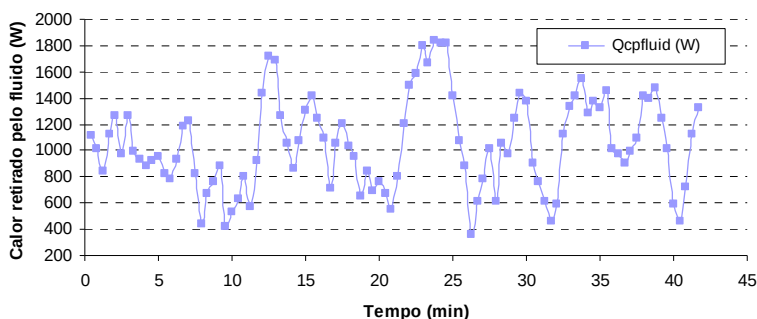


Figura 4-6. Calor retirado pelo fluido na cavidade principal

Por fim, esta amplitude de variação no calor retirado através do fluido é quase que integralmente repassado ao valor do FS medido, já

que as perdas (ou ganhos) pelas faces ($Q_{cp\text{faces}}$) e pelo ar (Q_{cp}) são comparativamente pequenos em relação à $Q_{cp\text{fluid}}$, e a radiação incidente (RAD janela) se mantém praticamente constante. A Figura 4-7 apresenta a variação do FS medido na cavidade principal (FS_{cp}) ao longo do teste, também o valor médio calculado para o período (FS_{cp_médio}), e ainda o valor teórico estimado através da ISO 9050. O valor teórico assume que as propriedades do vidro incolor 3mm, com um ângulo de incidência de 45°, são: $\tau=0,815$ e $\alpha=0,065$ (CARAM, 2002).

O valor teórico do FS determinado pela ISO 9050 com seus coeficientes de troca padronizados ($h_{\text{int}} = 8\text{W/m}^2\text{K}$ e $h_{\text{ext}} = 23\text{W/m}^2\text{K}$) foi igual a 0,83. Já quando os coeficientes de troca estimados para a condição de teste ($h_{\text{int}} = 5,9\text{W/m}^2\text{K}$ e $h_{\text{ext}} = 10,3\text{W/m}^2\text{K}$) são adaptados à ISO 9050, o valor teórico do FS passa para 0,84.

Analisando estes resultados, a diferença observada entre o valor médio do FS medido (0,79) e o valor teórico (0,84), dado pela ISO 9050 adaptada aos valores de “h” para a condição de teste, foi de apenas 6%. Embora esta variação esteja em um patamar aceitável, o desvio padrão foi ainda bastante elevado, chegando $\pm 0,26$ em termos absolutos (ou em termos percentuais, 33,3% do valor médio). OBS.: Na Figura 4-7, em alguns momentos o FS atinge valores acima de 1, o que não é coerente com o conceito do FS, embora fisicamente isso possa acontecer caso outros ganhos de calor além da radiação solar estejam atuando no sistema.

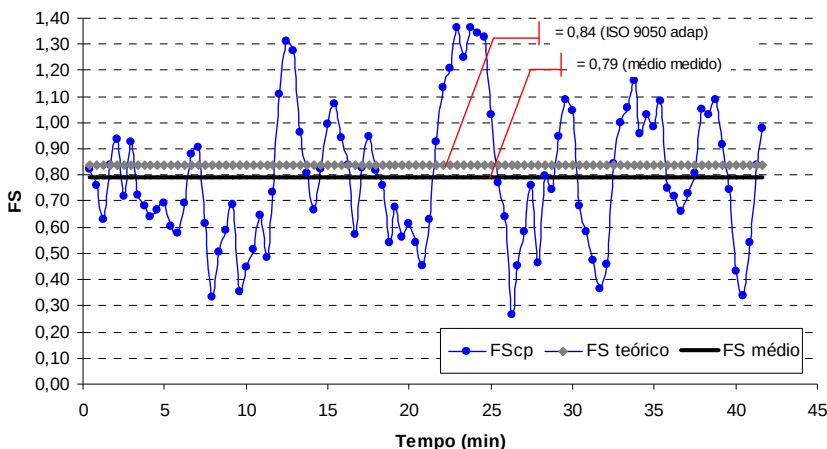


Figura 4-7. Fator solar medido no primeiro teste de calibração (ângulo de incidência $\sim 45^\circ$)⁸

4.3.2 Medição com a cavidade secundária (CS)

O primeiro teste com a cavidade secundária foi realizado simultaneamente ao teste com a cavidade principal, sendo assim submetida às mesmas condições ambientais já descritas no item anterior.

Para a obtenção do fator solar determinado através da cavidade secundária, o ganho de calor é quantificado através de transdutores de fluxo. Assim, o sistema de resfriamento aqui é apenas responsável por manter a placa de suporte dos fluxímetros em uma temperatura estável. A equação [4.6] apresenta o cálculo empregado para determinar o fator solar (neste caso FS_{CS}):

$$FS_{CS} = \frac{(Q_{cs} + Q_{u_{cs}})}{A_{cs} Rad_J} \quad [4.6]$$

Onde:

Q_{cs} = Fluxo de calor através do vidro na cavidade secundária (W);

⁸ OBS.: Os ângulos de incidência calculados para o horário de início e fim da medição foram $45,6^\circ$ e $46,5^\circ$, respectivamente. No Anexo F, é apresentado o processo adotado para esta verificação.

Qu_{cs} = Fluxo de calor devido à diferença de temperatura do ar no lado interno e externo do vidro (W);

A_{cs} = Área da abertura da cavidade secundária exposta à radiação (m^2);

Rad_j = Radiação solar incidente no plano de medição da janela (W/m^2).

O valor de Q_{cs} é resultado da soma do: fluxo de calor através das faces da cavidade ($Q_{cs_{faces}}$); mais o fluxo de calor através das bordas de fixação ($Q_{cs_{bf}}$); mais o calor quantificado pelos fluxímetros e removido pelo fluido do sistema de resfriamento ($Q_{cs_{flux}}$); e ainda o calor gerado pelos equipamentos internos ($Q_{cs_{equi}}$). Novamente, como não existe geração de calor interna na cavidade e as bordas de fixação são isoladas, $Q_{cs_{bf}}$ e $Q_{cs_{equi}}$ são assumidos como iguais a zero. $Q_{cs_{faces}}$ também pode ser assumido como sendo igual a zero, uma vez que o fluxo de calor é medido na passagem pelo fluxímetro e só depois chega à face que serve de base destes sensores, então estas perdas não alteram o resultado já medido. Assim, neste caso resta apenas um componente para o ganho, sendo definido pela equação [4.7]:

$$Q_{cs_{flux}} = \left(\sum_{i=1}^m Flux_i \right) \cdot A_{flux} \quad [4.7]$$

Onde:

Flux = Resultado do ganho de calor do fluxímetro (W/m^2);

A_{flux} = Área individual do fluxímetro em m^2 (igual $0,0625m^2$);

m = Número de fluxímetros da cavidade (neste caso $m=4$).

Ainda é necessário determinar Qu_{cs} , sendo então aplicada a equação [4.8]:

$$Qu_{cs} = \frac{A_{cs} \Delta T_{cs_ar}}{R_{Tcs}} \quad [4.8]$$

Onde:

R_{Tcs} = Resistência térmica total entre o ar no interior da cavidade secundária e o ar externo, dada pela soma de $R_{int} + R_{vidro} + R_{ext}$ (m^2K/W);

A_{cs} = Área da cavidade secundária exposta à radiação (m^2);

ΔT_{cs_ar} = Diferença de temperatura entre o ar no interior da cavidade secundária e o ar externo (°C).

No entanto, a análise dos resultados deste primeiro teste de calibração com a CS revelou problemas no funcionamento dos sensores de fluxo de calor (fluxímetros). A Figura 4-8 mostra o resultado dos fluxos medidos através de cada um dos 4 sensores (CS flux 1, 2, 3 e 4) em comparação com a radiação solar incidente (RAD janela). Observa-se que, com exceção do fluxímetro 3, todos ou outros sensores de fluxo apresentaram valores superiores ao valor da radiação incidente no plano de medição. Os resultados destes últimos são considerados incoerentes, uma vez que, para as condições de teste, possíveis ganhos de calor em relação ao ar não chegariam a proporcionar um acréscimo que elevasse os valores medidos com os fluxímetros acima do valor da radiação incidente.

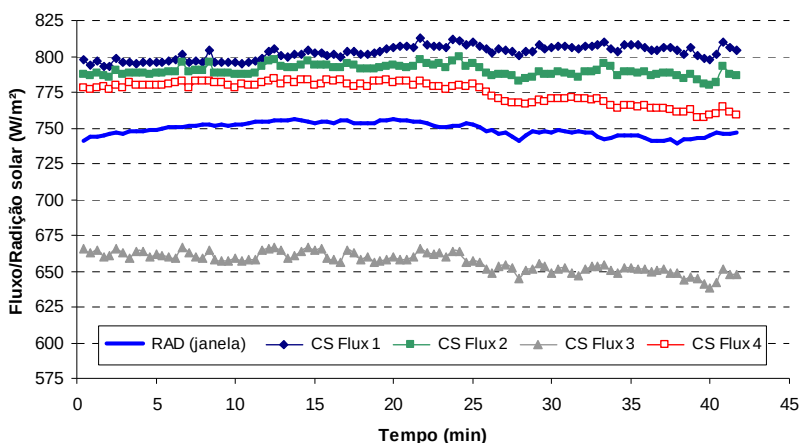


Figura 4-8. Resultados do primeiro teste com a cavidade secundária

Deste modo, acredita-se que o erro observado nos valores de fluxo esteja ligado à temperatura da chapa de cobre que serve de suporte dos fluxímetros. Marinowski (2005) realizou testes e calibrações com o mesmo tipo de sensor, porém com dimensões inferiores (10x10cm), verificando que a temperatura da chapa de suporte causa alterações nos resultados de fluxo. Ainda neste estudo, uma vez que as dimensões dos sensores eram menores, a dissipação de calor aplicado ao fluxímetro

durante o processo de calibração era realizada com mais facilidade. Já no caso dos sensores utilizados no calorímetro (25x25cm), devido à maior área e, conseqüentemente, maior quantidade de calor aplicado, provavelmente a dissipação do calor não tenha sido suficiente para forçar a passagem total do fluxo e evitar o sobreaquecimento da chapa de suporte (que corresponde ao fundo da cavidade secundária). Assim, as curvas de calibração foram obtidas para uma situação em que a chapa de suporte estava sobreaquecida. No entanto, quando os fluxímetros são utilizados no calorímetro, a chapa de suporte é resfriada, modificando a condição de passagem de fluxo em relação a qual havia sido obtida a curva de calibração. Em função deste problema, observou-se a necessidade de uma nova calibração destes sensores.

4.3.3 Considerações sobre o teste inicial

Após a realização deste primeiro teste, uma série de ajustes na instrumentação passou a ser realizada visando melhorar a precisão dos resultados medidos.

Em relação à cavidade principal, observou-se que, levando em conta as condições do teste (ângulo de incidência de 45°), embora o valor médio do FS medido para o vidro (0,79) tenha sido relativamente próximo ao valor teórico estimado (0,84), o desvio padrão dos resultados do FS medido foi elevado (em média $\pm 0,26$). Embora este desvio esteja em parte associado à incerteza nos instrumentos (termopares, medidores de vazão e piranômetro), neste momento, baseando-se em observações ao longo do teste, foi possível dizer que a principal causa desta grande oscilação estava ligada às variações acentuadas e irregulares do ΔT da água entre a entrada e a saída da cavidade.

Portanto, para melhorar a homogeneização da temperatura da água de resfriamento, que passa através das faces da cavidade principal, foi instalado um misturador antes do ponto de medição da temperatura de saída. Outra medida tomada foi a aplicação de isolante térmico tanto nas faces das cavidades como nas mangueiras de circulação de água. (OBS: O formato final desta modificação foi apresentado no item 3.2.5 do capítulo 3).

Ainda, o ajuste dos parâmetros PID do sistema de controle foi alterado para tornar as respostas do acionamento das resistências aquecedoras mais sensíveis às variações do ΔT entre o ar e temperatura média da cavidade principal (TMCP). Também o posicionamento do

termopar utilizado para a medição da temperatura do ar externo foi mudado para uma área de sucção de um ventilador que força a passagem do ar e é protegido por um duto que impede a incidência de radiação solar. Além disso, foram adicionadas mais resistências aquecedoras, ligadas continuamente no interior do reservatório do banho, para que a temperatura da água pudesse ser modificada, porém de modo mais suave durante os acionamentos (OBS: O formato final desta modificação foi apresentado no item 3.1.2 e 3.3.4 do capítulo 3).

Outra questão importante para reduzir as incertezas na medição na cavidade principal está associada ao controle da vazão nas faces. Como o ajuste é realizado manualmente através da abertura dos registros, é necessário que um operador verifique, durante o teste, as temperaturas das faces e efetue ajustes nas aberturas (ou fechamentos) dos registros. Por isso, na continuidade da etapa de calibração mais testes passaram a ser realizados para alcançar uma melhor distribuição destas vazões e minimizar as variações de temperatura entre as faces.

Em relação à cavidade secundária, este primeiro teste demonstrou a necessidade de uma nova calibração dos fluxímetros. Esta nova calibração foi então realizada com os fluxímetros já instalados no calorímetro, e com a utilização de um banho térmico exclusivo para a cavidade secundária. Assim, foram obtidas novas constantes de calibração para os quatro sensores. (OBS: O formato final desta modificação foi apresentado no item 3.1.2 e 3.3.5 do capítulo 3).

Depois deste teste, também foi instalado o medidor de coeficiente de convecção externo (OBS: O formato final desta modificação foi apresentado no item 3.3.6 do capítulo 3).

4.4 SEGUNDA SÉRIE DE TESTES

A partir da execução dos ajustes propostos no item anterior, e aplicando o mesmo equacionamento de determinação do fator solar já apresentado, uma segunda série de medições foi iniciada.

4.4.1 Medição com a cavidade principal (CP)

4.4.1.1 Condições gerais

No dia 27/03/09 um novo teste foi realizado. Após 40 minutos iniciais para estabilização dos sistemas, às 10h56min teve início a medição, que se estendeu por 87 minutos. As condições eram de céu

claro, velocidade do ar baixa (média de 1,2m/s), e temperatura do ar em torno de 30,6°C. A intensidade média da radiação solar no plano da janela (Radj) foi de 580W/m², com um ângulo de incidência que variou entre 60° e 61° ao longo do teste.

4.4.1.2 Resultados

Neste segundo teste, observa-se, inicialmente, que a temperatura do ar externo e a TMCP mantiveram-se mais próximas, como mostra a Figura 4-9. Também um novo ajuste das aberturas dos registros⁹ em cada uma das faces reduziu as variações entre as mesmas. A diferença que antes chegava a 11°C, agora é mantida durante quase todo o teste dentro de uma faixa de 3°C (entre 29° e 32°C) como mostra Figura 4-10.

Para determinar o FS medido, foi aplicada a mesma metodologia proposta no teste inicial, considerando os ganhos e perdas de calor no sistema ao longo do teste. Nestes cálculos, os valores médios de “h” para a superfície do vidro voltada para o meio interno e externo foram os seguintes: $h_{\text{int}} = 6,0\text{W/m}^2\text{K}$ ($R = 0,17\text{m}^2\text{K/W}$) e $h_{\text{ext}} = 15,7\text{W/m}^2\text{K}$ ($R = 0,07\text{m}^2\text{K/W}$). Já para as faces horizontais e verticais do fundo da cavidade, os resultados foram: $h_{\text{horiz}} = 7,6\text{W/m}^2\text{K}$ ($R = 0,13\text{m}^2\text{K/W}$) e $h_{\text{vert}} = 8,2\text{W/m}^2\text{K}$ ($R = 0,12\text{m}^2\text{K/W}$). A resistência térmica do vidro foi de 0,003m²K/W.

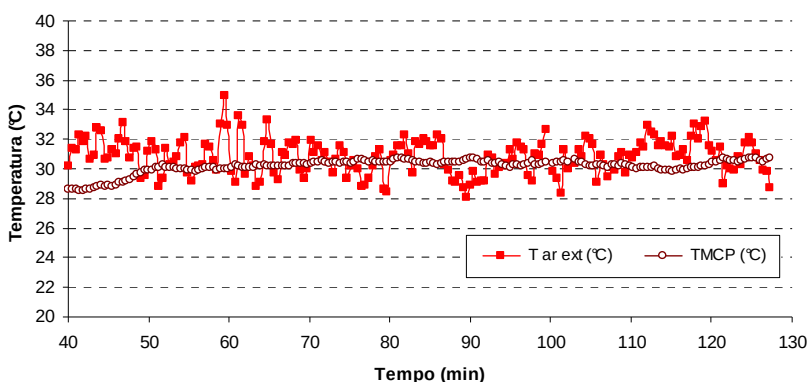


Figura 4-9. TMCP e temperatura do ar externo (segundo teste)

⁹ Condições de abertura dos registros são apresentadas no item 3 do ANEXO I.

para a ISO 9050 (com valores de “h” padronizados) quanto para a ISO 9050 adaptada (com valores de “h” estimados para a situação de teste).

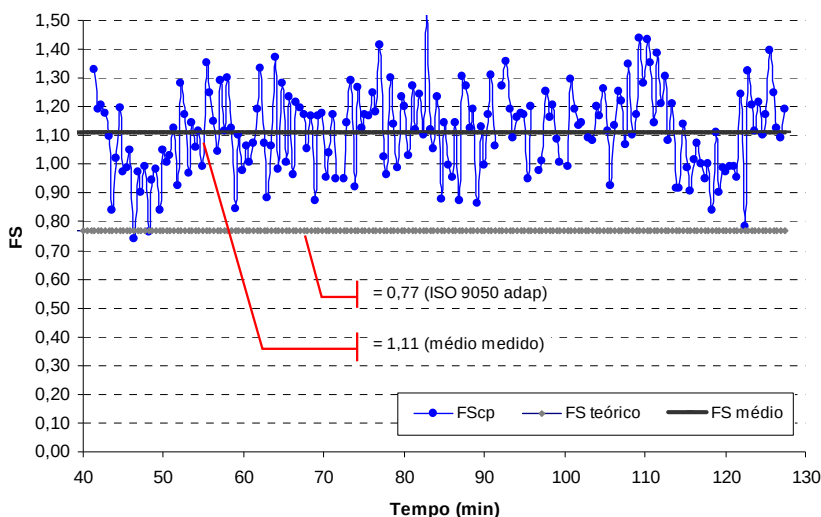


Figura 4-11. Fator solar medido no segundo teste de calibração (ângulo de incidência ~ 60°)

Ao buscar respostas para o resultado observado na medição do FS, a Figura 4-12 nos dá algumas indicações das suas causas, as quais estão inicialmente associadas ao sistema de medição. Observa-se que, embora na média, a diferença de temperatura entre o ar externo e TMCP (DT ar ext_TMCP) esteja mais próxima a zero (0,7°C), que é a condição ideal de controle, as variações entre ΔT positivos e negativos são bastante acentuadas e contínuas ao longo da medição. Este ΔT é o parâmetro usado para controle da temperatura do banho térmico que gerencia o acionamento e desligamento das resistências no interior do reservatório do banho.

Esta variação sobrecarrega o sistema PID que não consegue atingir uma estabilidade na temperatura de controle. Com isso, a água que sai do reservatório já entra na cavidade com certo grau de instabilidade que é incrementado pela variação da temperatura (de até 3°C) nas faces pelas quais a água passa. Embora o misturador na saída da cavidade consiga atenuar parte dessa oscilação, ela ainda é notada como mostra a curva “DT entrada_saída_CP” na Figura 4-12. Por fim,

esta oscilação é percebida no resultado do FS medido, que é diretamente dependente deste parâmetro.

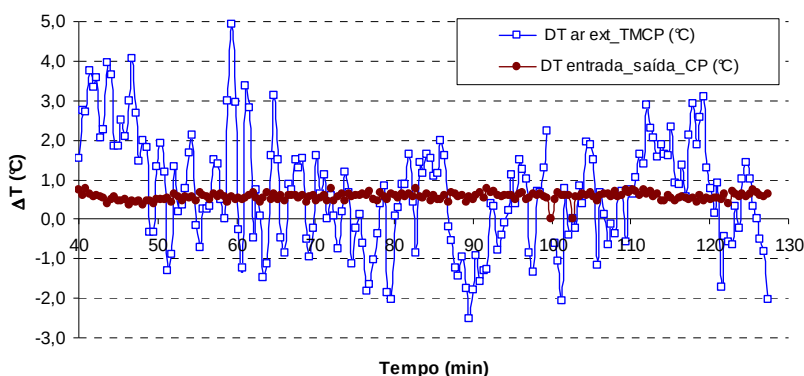


Figura 4-12. Diferenças de temperatura entre o ar externo e TMCP e entre a água na entrada e saída da cavidade principal (segundo teste)

No entanto, mesmo supondo que fossem reduzidas as oscilações repassadas para a temperatura de controle do banho, e que a diferença de temperatura entre as faces fosse completamente eliminada, chegando assim a um valor de ΔT da água bastante estável entre a entrada e saída, pode-se dizer que o valor final do FS medido tenderia para a média observada (1,11), revelando um valor que, como já mencionado, não é coerente com os padrões comparativos.

4.4.2 Medição com a cavidade secundária (CS)

4.4.2.1 Condições gerais

Simultaneamente ao segundo teste com a cavidade principal, foi realizado o segundo teste com cavidade secundária. Desta vez, foram aplicadas as novas constantes de calibração obtidas *in loco*. Também um banho termostático exclusivo foi utilizado para a CS. No entanto, este banho não tem um sistema de controle automatizado, sendo o controle realizado diretamente pelo operador que ajusta periodicamente (aproximadamente a cada 2 minutos) a temperatura do banho em função do ΔT entre a base dos fluxímetros (que é o fundo da CS) e o ar externo.

As condições ambientais externas são as mesmas observadas no teste com a CP e descritas no item 4.4.1.1, onde $h_{\text{ext}} = 15,7\text{W/m}^2\text{K}$ ($R = 0,07\text{m}^2\text{K/W}$). Já o valor do h_{int} , estimado por correlações matemáticas, é igual $5,1\text{W/m}^2\text{K}$ ($R = 0,20\text{m}^2\text{K/W}$).

4.4.2.2 Resultados

Também neste teste buscou-se a condição de controle da temperatura na cavidade em função da temperatura do ar externo. No entanto, mesmo antes de ser atingida uma diferença de temperatura pequena entre a CS (fundo) e o ar externo, observou-se que o valor do FS medido já estava bem acima do valor teórico esperado (0,76). O valor médio do FS nesta parte da medição foi de 0,91, como mostra a Figura 4-13, no trecho entre os minutos 40 e 80. Ao longo deste tempo, a diferença de temperatura entre a CS (fundo) e ar externo foi em média de $5,9^\circ\text{C}$, mas a tendência observada foi que na medida em que esse valor era reduzido o valor do FS aumentava. Então, uma nova tentativa de ajuste foi realizada. Ao invés de resfriar a CS para igualar a temperatura do ar externo, passou-se a aquecê-la.

Então, a partir da estabilização do banho térmico, foi possível verificar, nesta segunda parte do teste, que o valor do FS médio, medido de 0,83, ficou mais próximo do valor teórico 0,76 (diferença de 9,4%), como se observa na Figura 4-13 entre os minutos 90 e 120.

Na Figura 4-14 é apresentada a linha das temperaturas na CS para os mesmos tempos da Figura 4-13. Aqui fica mais claro como a alteração na temperatura da CS (fundo) se reflete sobre o FS medido. Apenas visualmente é possível notar que existe um melhor resultado do FS quando há uma aproximação da temperatura da CS (fundo) com a temperatura do vidro (CS Vidro) e do ar no interior da cavidade (CS Ar), e não com o ar externo.

As perdas médias estimadas devido ao ΔT entre o ar interno e externo foram, respectivamente, de $30,3\text{W/m}^2\text{K}$ e $55,0\text{W/m}^2\text{K}$, para a primeira e a segunda parte do teste.

É interessante ainda destacar que, exceto no tempo de ajuste de temperatura (minuto 80 até 90), o desvio padrão entre os resultados instantâneos do FS medido na CS foi, em termos absolutos, de apenas $\pm 0,01$.

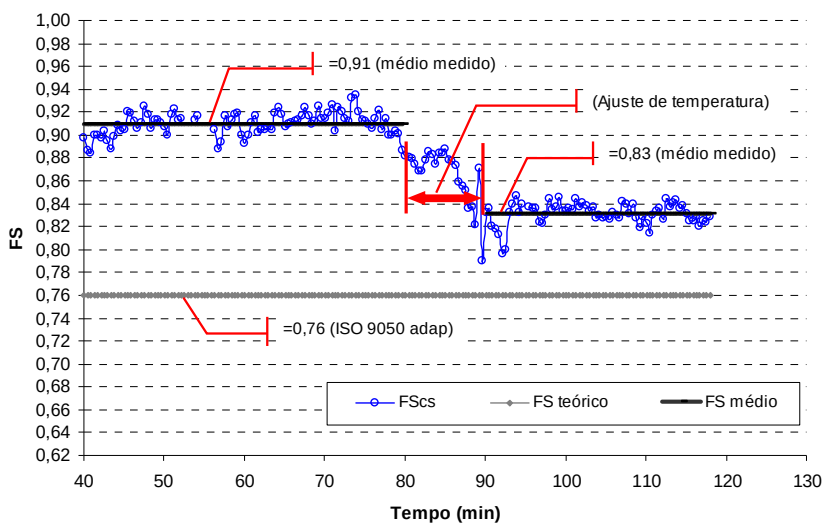


Figura 4-13. Fator Solar medido na CS (segundo teste)

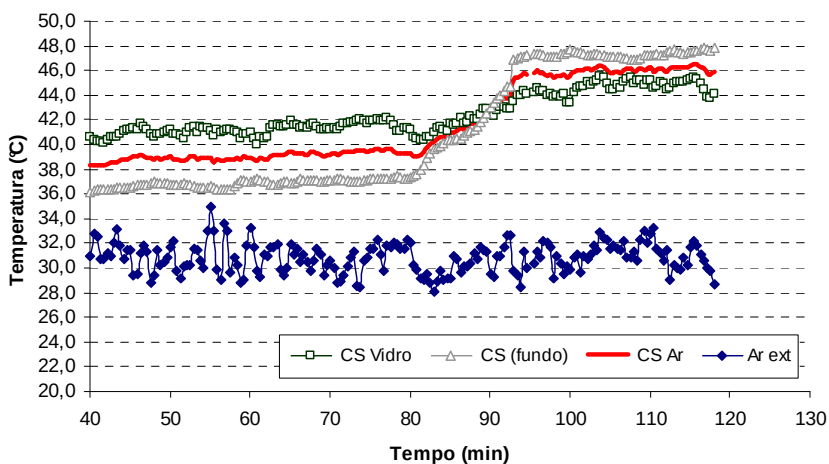


Figura 4-14. Variação de temperatur na CS (segundo teste)

4.4.3 Considerações sobre a segunda série de testes

Primeiro, em relação à cavidade principal (CP), cabe destacar que, neste segundo teste, embora a variação (desvio padrão) entre os resultados medidos tenha diminuído de amplitude em relação ao teste inicial (de $\pm 0,26$ para $\pm 0,15$), esta variação ainda é elevada em relação ao valor médio do FS medido. Como já mencionado no item 4.3.3, grande parte desta oscilação do valor do FS está ligada ao acionamento e desligamento freqüente das resistências que fazem o controle da temperatura da água no banho térmico. Mesmo com as mudanças realizadas no ponto de medição da temperatura do ar externo, as variações contínuas deste parâmetro não permitem que o sistema PID encontre um equilíbrio na injeção de potência através das resistências dentro do banho, havendo novamente a necessidade de alguma modificação na forma de controle.

Além disso, o resultado encontrado para o FS medido na CP neste segundo teste (1,11 em média) indica que, além das incertezas associadas à instrumentação, a própria metodologia de controle e de cálculo do fator solar adotadas talvez não estejam apropriadas para representar as condições de teste. O que apóia esta ideia é o que aconteceu na medição realizada na CS. Neste caso foi possível observar que na primeira parte do teste, onde buscou-se como forma de controle um ajuste para minimizar o ΔT entre a CS e o ar externo, o resultado do FS medido (0,91) estava longe do valor do FS teórico (0,76). Mas depois de um novo ajuste na temperatura da CS, os valores experimental e teórico se aproximaram, com o FS médio da CS passando para 0,83.

Este fato foi realmente intrigante, pois a metodologia de determinação do FS adotada tem por base o equacionamento proposto pela NFRC 201, além de ser coerente com outras pesquisas apresentadas no Capítulo 2, que também indicam a necessidade de controle na temperatura da cavidade em função da temperatura do ar externo, para minimizar perdas (ou ganhos) de calor para o ambiente externo. Além disso, a pesquisa realizada por Marinoski (2005), também demonstrou esta mesma condição, indicando matematicamente e experimentalmente que a eliminação do ΔT entre a base dos fluxímetros (fundo da cavidade) e o ar externo resultava em menor incerteza no resultado do FS medido.

Porém, analisando fisicamente o fenômeno da passagem do fluxo de calor devido à diferença de temperatura no interior e no exterior da cavidade de medição do calorímetro, observamos que três situações

são possíveis, conforme apresentado na Figura 4-15. A situação “a” e “b” mostram uma condição em que há uma direção única para a passagem do fluxo de calor devido à ΔT entre o ar interno e externo. Nestes casos é possível aplicar a formulação proposta $(T_{ARint} - T_{ARext})/R_T$ para determinar a densidade de fluxo de calor devido ao ΔT do ar, porém não se leva em conta o aquecimento do vidro. Quando se passa a considerar que esta interface de separação entre o meio interno e externo (vidro) ganha calor através da absorção de parte da radiação solar incidente, a formulação $(T_{ARint} - T_{ARext})/R_T$ poderia ser aplicada na pior hipótese como uma simplificação, apenas se T_{vi} se mantivesse em um valor intermediário entre T_{ARint} e T_{ARext} . No entanto, como o calor absorvido na cavidade é removido pelo sistema de resfriamento, o que muitas vezes acontece na prática é a situação “c”, onde o vidro aquecido pela radiação solar atinge uma temperatura superior ao T_{ARint} e T_{ARext} e não há troca de calor diretamente entre o T_{ARint} e T_{ARext} .

A partir destas observações, passou-se a buscar uma nova metodologia de determinação do FS medido através do calorímetro, de modo que a situação “c” pudesse ser melhor representada através do equacionamento para os ganhos (ou perdas) de calor. Esta nova metodologia e as alterações na forma de controle da temperatura nas cavidades serão discutidas no próximo capítulo, que apresenta a segunda fase de calibração do calorímetro.

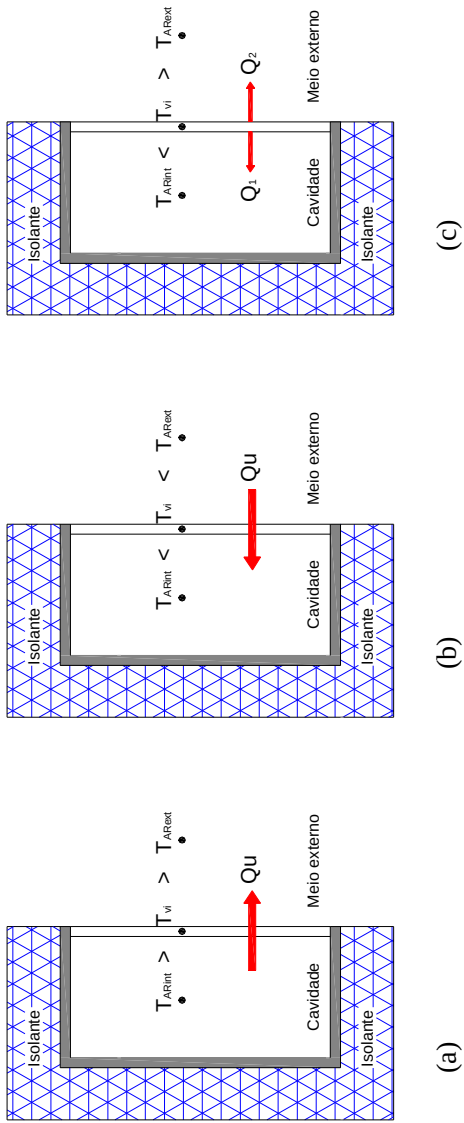


Figura 4-15. Fenômeno da passagem do fluxo de calor devido à diferença de temperatura do ar

5 CALIBRAÇÃO DO CALORÍMETRO: SEGUNDA FASE

5.1 NOVO MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR SOLAR

Para conseguir representar uma situação mais próxima à realidade do processo de transferência de calor que ocorre durante as medições, uma nova formulação para determinação do FS foi desenvolvida e aplicada ao calorímetro.

Assim, O valor do FS medido pelo calorímetro pode ser obtido através da aplicação da equação geral [5.1]:

$$FS_{med} = \frac{q_{med} + q_{conv} + q_{OL} + q_{perdas}}{Rad_j} \quad [5.1]$$

Onde:

FS_{med} = Fator solar medido (adimensional);

q_{med} = Densidade de fluxo de calor quantificada pelo calorímetro (W/m^2);

q_{conv} = Densidade de fluxo de calor transferida da superfície interna da cavidade devido ao efeito convectivo gerado pelo ar enclausurado (W/m^2);

q_{OL} = Densidade de fluxo de calor trocada em onda longa entre a superfície interna da cavidade e o vidro (W/m^2);

q_{perdas} = Densidade de fluxo de calor perdido para o ar pelas faces externas da cavidade e pelo contato das bordas com a estrutura do trailer (W/m^2);

Rad_j = Radiação solar incidente no plano de medição (W/m^2).

Aqui q_{med} dependerá do processo de medição aplicado em cada uma das cavidades (fluximétrico ou calorimétrico) para quantificar o calor removido pela radiação solar incidente na superfície de absorção. Já q_{conv} e q_{OL} são definidos, respectivamente, pela equação [5.2]:

$$q_{conv} = \frac{(T_c - T_{vi})}{(R_{car})} \quad [5.2]$$

Onde:

T_c = Temperatura média da cavidade (K);

T_{vi} = Temperatura da superfície interna do vidro (K);

R_{car} = Resistência térmica da câmara de ar formada no interior da cavidade (m^2K/W).

E pela equação [5.3]:

$$q_{OL} = \frac{\sigma((T_c)^4 - (T_{vi})^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_c}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right) - 1} \quad [5.3]$$

Onde:

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

T_c = Temperatura média da cavidade (K);

T_{vi} = Temperatura da superfície interna do vidro (K);

ε_c = Emissividade da superfície interna da cavidade (adimensional);

ε_v = Emissividade da superfície interna do vidro (adimensional);

Na composição de q_{perdas} as fugas de calor pelas bordas podem ser desconsideradas, uma vez que a área de contato é muito pequena e está isolada termicamente. Já a perdas pelas faces externas da cavidade são quantificadas através da equação [5.4]:

$$q_{perdas} = \frac{(T_c - T_{ar})}{(R_{isolante} + R_{ar})} \quad [5.4]$$

T_c = Temperatura média da cavidade ($^{\circ}C$);

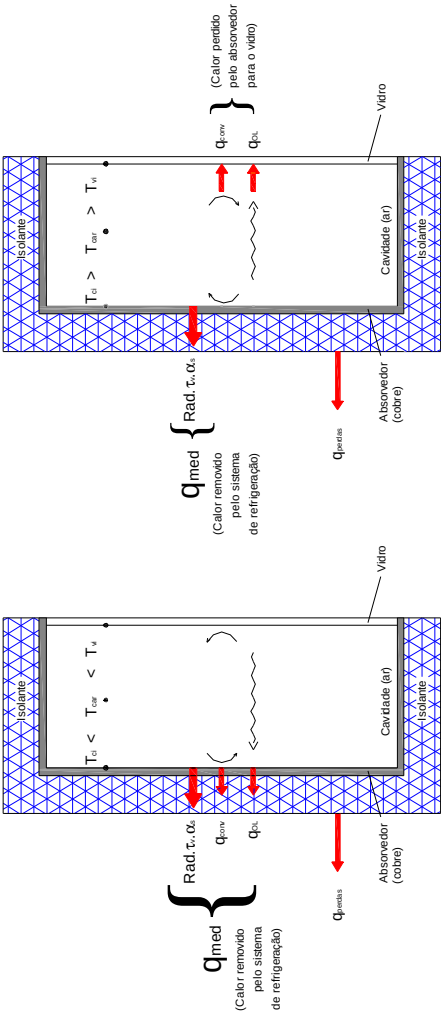
T_{ar} = Temperatura do ar externo ($^{\circ}C$);

$R_{isolante}$ = Resistência térmica do isolamento da cavidade (m^2K/W).

R_{ar} = Resistência térmica na interface da superfície externa do isolante da cavidade e o ar externo (m^2K/W).

É importante destacar que a direção dos fluxos dependerá das diferenças de temperatura encontradas no momento da medição, sendo isso uma condição para a composição dos termos da equação geral [5.1]. Então, quando $T_c < T_{car} < T_{vi}$, os fluxos q_{conv} e q_{OL} estão na mesma direção da remoção de calor da cavidade, e por isso embutidos no valor de q_{med} , sendo assim não devem ser considerados na equação [5.1]. Por

outro lado, quando $T_c > T_{car} > T_{vi}$, a direção de q_{conv} e q_{OL} é contrária a da remoção de calor da cavidade, ou seja, estes fluxos não estão sendo quantificados (há perda de calor na superfície de absorção), e por isso a equação [5.1] é aplicada na sua forma completa. A Figura 5-1 exemplifica, de forma gráfica, as duas condições.



Condição 2: $T_c > T_{car} > T_{vi}$; então q_{conv} e q_{OL} precisam ser adicionados à q_{med}

Condição 1: $T_c < T_{ar} < T_{vi}$; então q_{conv} e q_{OL} já estão quantificados no calor removido pelo sistema de

Figura 5-1. Condições para a composição dos termos da equação geral do FS.

Tendo em vista que dois diferentes processos de medição de ganho de calor são aplicados (calorimétrico e fluximétrico), a equação geral de cálculo do FS pode ser reescrita para a cavidade principal (CP) e para a cavidade secundária (CS).

5.1.1 Determinação do Fator Solar na cavidade principal (FS_{cp})

Neste caso, a equação [5.1] é reescrita na forma da equação [5.5]:

$$FS_{cp} = \frac{q_{fluido} + q_{conv} + q_{OL} + q_{cp_perdas}}{Rad_J} \quad [5.5]$$

sendo que q_{fluido} representa a densidade de fluxo extraída da cavidade principal através do sistema de resfriamento com circulação de água (em W/m²). Este valor é, por sua vez, obtido por meio da equação [5.6]:

$$q_{fluido} = \frac{m_{cp} \cdot C_{agua} \cdot \Delta T_{cp}}{A_j} \quad [5.6]$$

Onde:

m_{cp} = Taxa de fluxo de massa de água da cavidade principal (l/s);

C_{agua} = Calor específico da água (J/l K);

ΔT_{cp} = Diferença de temperatura da água entre a entrada e saída da cavidade principal (°C);

A_j = Área de abertura exposta à radiação (m²);

Já q_{conv} e q_{OL} são dados, respectivamente, pela equação [5.2] e equação [5.3], apresentadas anteriormente. Neste caso, o fluxo é quantificado unidirecionalmente, sendo a temperatura da cavidade (T_c) igual ao valor médio ponderado pela área de todas as faces que a compõem (chamada de TMCP), conforme a equação [3.2] do capítulo 3.

O fluxo de calor perdido através das faces que compõem a cavidade principal deve ser determinado através da equação [5.7]:

$$q_{cp_perdas} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(A_{face_i} \frac{(T_{c_face_i} - T_{ARtr})}{(R_{is} + R_t)} + \dots + A_{face_n} \frac{(T_{c_face_n} - T_{ARtr})}{(R_{is} + R_t)} \right)}{A_{T_faces}} \quad [5.7]$$

Onde:

A_{face_n} = Área de cada face da cavidade (m²);

A_{T_faces} = Área total das faces da cavidade (m²);

$T_{c_face_n}$ = Temperatura média de cada face da cavidade (°C);

T_{ARtr} = Temperatura do ar no interior do trailer (°C);

R_{is} = Resistência térmica do isolamento da cavidade (m²K/W).

R_t = Resistência térmica superficial entre o isolamento e o ar no interior do trailer (m²K/W);

n = Número de faces (neste caso $n=6$).

Através da implementação do equacionamento apresentado, é possível obter o valor do FS_{cp} para cada sequência de leitura de dados, ou seja, o valor instantâneo no momento de medição. Por fim, o valor final do FS da amostra testada na cavidade de principal (FS_{cp}) é obtido pela média aritmética simples dos resultados instantâneos dentro de um período mínimo de medição, após ser atingida a condição (aproximada) de regime permanente.

5.1.2 Determinação do Fator Solar na cavidade secundária (FS_{cs})

Para a obtenção do fator solar determinado através da cavidade secundária, o mesmo procedimento apresentado no item anterior é aplicado, sendo, porém, adotado o processo de quantificação fluximétrica para verificar o ganho através da abertura frontal da cavidade.

Nesta determinação, o calor removido pela água de resfriamento não é quantificado, sendo esta tarefa realizada pelos transdutores de fluxo (fluxímetros). Assim, o sistema de resfriamento aqui é apenas responsável por manter a placa de suporte dos fluxímetros em uma temperatura estável, a qual proporciona o correto funcionamento dos sensores. Também não é necessário quantificar as perdas das faces (q_{perdas}) da cavidade para o ar externo, tendo em vista que estas perdas acontecem após a passagem do fluxo de calor pelo transdutor.

A equação [5.8] apresenta o cálculo empregado para determinar o FS através da cavidade secundária (neste caso FS_{cs}):

$$FS_{cs} = \frac{q_{flux} + q_{conv} + q_{OL}}{Rad_j} \quad [5.8]$$

O único componente da equação [5.8] ainda não definido é q_{flux} , que representa a densidade de fluxo de calor medida (em W/m^2) que penetra na cavidade secundária. Este termo é obtido pela equação [5.9], a seguir:

$$q_{flux} = \frac{\sum_{i=1}^m (Flux_i)}{m} \quad [5.9]$$

Onde:

$Flux_m$ = Resultado do ganho de calor de cada fluxímetro (W/m^2);

m = Número de fluxímetros da cavidade (neste caso $m=4$).

5.2 NOVA CONDIÇÃO DE CONTROLE DE TEMPERATURA NAS CAVIDADES

Conforme visto na primeira fase de calibração, a oscilação em torno da média (desvio padrão) dos valores de FS medido na CP é alta. Como o FS medido é muito sensível à variação do ΔT entre a água que entra e sai da cavidade, o acionamento e desligamento das resistências do banho térmico em função de um parâmetro que flutua ao longo do teste causa uma maior variação na temperatura da água de entrada, aumentando a incerteza no resultado.

Por isso, nesta segunda fase de calibração uma nova forma de controle foi aplicada. Ao invés do banho térmico seguir a temperatura do ar externo como parâmetro do sistema PID para controlar a temperatura da cavidade, passou-se a utilizar um valor fixo para temperatura de controle, que é ajustado pelo operador do calorímetro no momento do teste.

Os resultados de testes comparativos com as duas formas de controle são apresentados na Tabela 5-1 e na Figura 5-2. É possível notar que os testes 1 e 2, realizados na primeira fase de calibração (descrita no capítulo anterior), têm uma variação em torno da temperatura média do banho bem superior ao valor observado quando o ajuste passa a ser um valor fixo. Desta forma, o ajuste fixo melhora a

estabilização da temperatura da água do banho, o que contribui para a redução da incerteza no valor final do FS medido.

Além disso, como demonstrado anteriormente, quando há elevação da temperatura do vidro (que separa o meio interno da cavidade e o meio externo) acima da temperatura do ar dos dois lados, então não há troca de calor entre o ar interno e o ar externo. Nesta situação, a temperatura do ar no interior da cavidade será dependente da temperatura da superfície interna da cavidade e da temperatura da superfície interna do vidro. Também, a troca de calor em onda longa no interior da cavidade será em função da diferença de temperatura da superfície da interna da cavidade e da superfície interna do vidro. Deste modo, um parâmetro mais coerente para o controle da temperatura do banho térmico e, conseqüentemente, da cavidade é a temperatura do vidro e não a do ar externo. Isso se dá porque é a partir da alteração do valor da temperatura do vidro que são modificados os ganhos por convecção através do ar interno e os ganhos em radiação de onda longa entre o vidro e a cavidade.

Assim, o valor fixado pelo operador para controle da temperatura da cavidade (CP ou CS) e do banho térmico passa a ser definido como o resultado da soma da temperatura média do vidro da respectiva cavidade mais um ΔT aplicado para o teste ($T_{\text{VIDRO}} + \Delta T$). O valor deste ΔT e os efeitos de sua variação serão discutidos ao longo dos itens a seguir.

Tabela 5-1. Variação na temperatura média do banho térmico

Teste	Variação na temperatura média do banho	Temperatura de controle	Incidência de radiação na CP
1 (07/05/08)	$\pm 0,42$	Ar externo (livre)	Sim
2 (27/03/09)	$\pm 0,33$	Ar externo (forçado)	Sim
3 (22/05/09)	$\pm 0,19$	Fixo (ajustado pelo operador)	Sim
4 (04/06/09)	$\pm 0,16$	Fixo (ajustado pelo operador)	Não (sombreada)

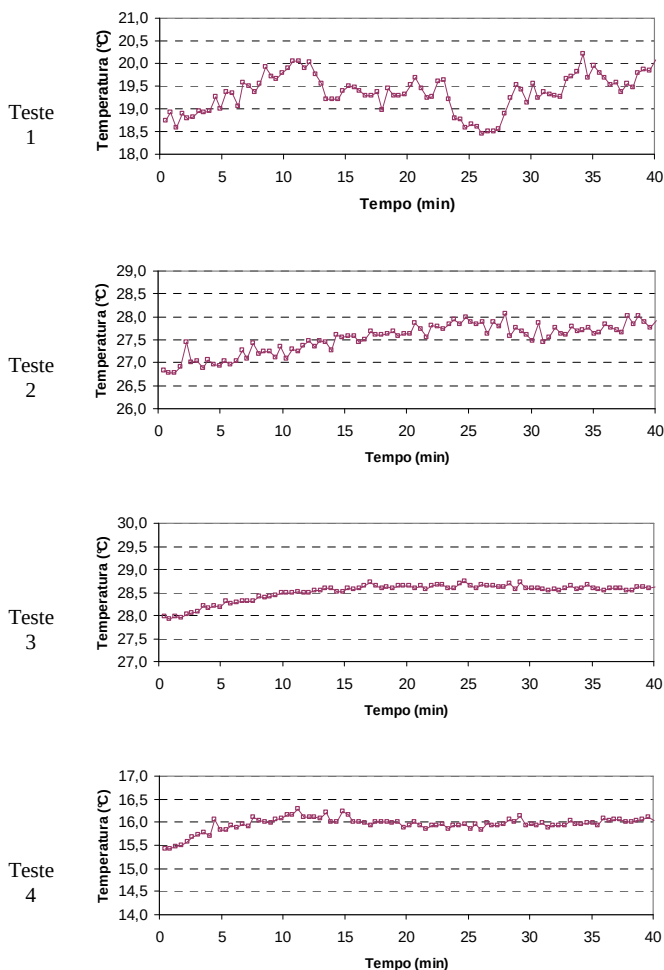


Figura 5-2. Variação da temperatura do banho nos quatro testes listados na Tabela 5-1

5.3 VARIAÇÃO NA TEMPERATURA DAS CAVIDADES

Para observar a influência da diferença de temperatura (ΔT) entre o vidro e a temperatura média da cavidade (TMCP ou CS(fundo)),

foram realizados alguns testes experimentais, alterando o ΔT através do aquecimento da cavidade.

Um teste com a CP utilizando o vidro incolor 3mm foi conduzido sob condições reais ($RAD_j = 705 \text{ W/m}^2$; ângulo de incidência $\sim 45^\circ$; $T_{A\text{Rext}} = 21,5^\circ\text{C}$; $h_{\text{int}} = 5,6 \text{ W/m}^2\text{K}$; $h_{\text{ext}} = 15,0 \text{ W/m}^2\text{K}$). A Figura 5-3 apresenta os valores da TMCP e da temperatura do vidro durante este teste. Apesar das grandes dispersões entre os valores de FS medido (FS_{cp}), é possível notar, na Figura 5-4, uma tendência de redução e estabilização do FS à medida que as curvas de temperatura da Figura 5-3 se aproximam.

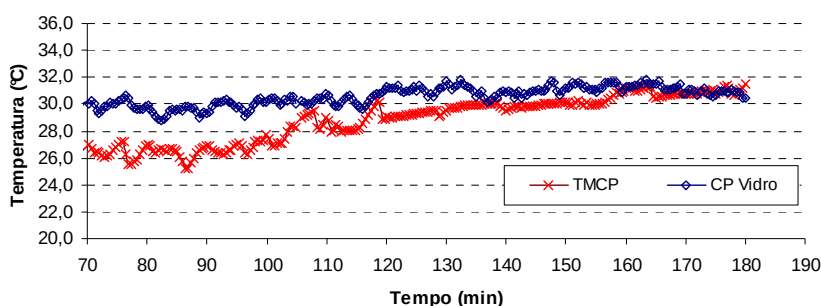


Figura 5-3. Variação da temperatura média da CP e do vidro

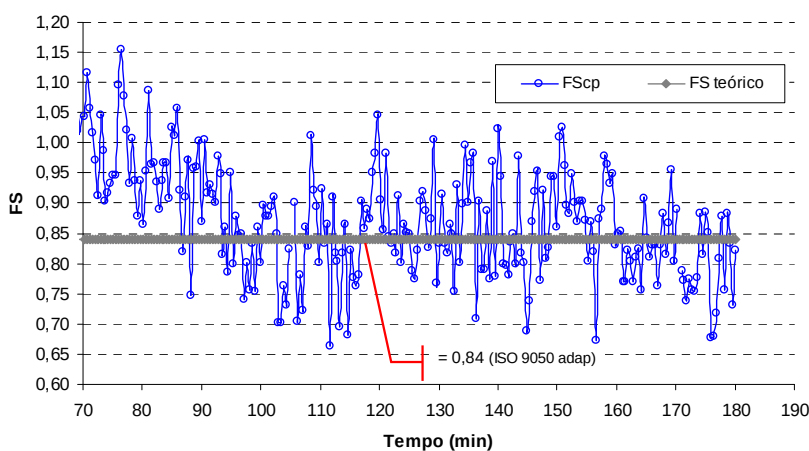


Figura 5-4. Variação do FS medido na CP

Outro teste sob condições reais de medição ($RAD_j = 630W/m^2$; ângulo de incidência $\sim 45^\circ$; $T_{ARex\ t} = 18,9^\circ C$; $h_{in\ t} = 5,2W/m^2K$; $h_{ext} = 17,3W/m^2K$), agora com a CS, também foi realizado com o vidro incolor 3mm. No início da medição, a temperatura média da cavidade (CS fundo) já estava próxima da temperatura do vidro, então à medida que a temperatura da CS foi elevada, o efeito sobre o FS medido (FScs) é novamente observado, como no caso anterior. A Figura 5-5 mostra a variação da temperatura do vidro e da CS. Já na Figura 5-6, observa-se que o FS cai devido à alteração aplicada, e estabilizando em outro patamar na parte final do teste.

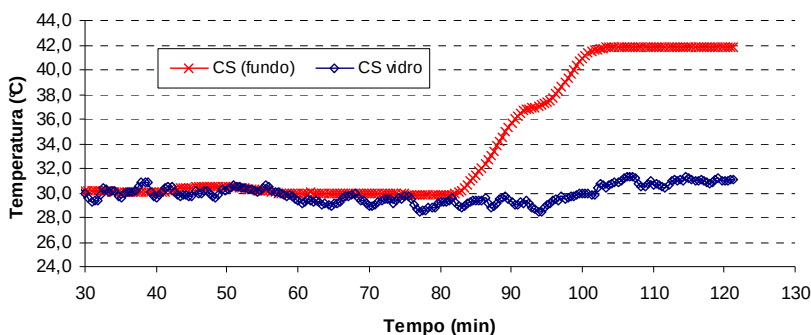


Figura 5-5. Variação da temperatura média da CS e do vidro

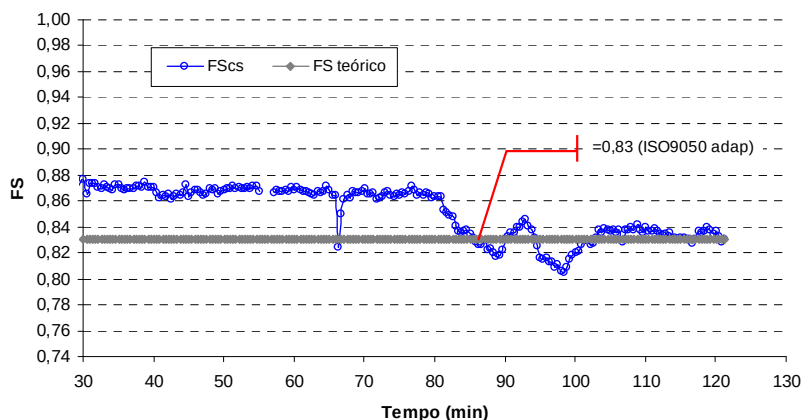


Figura 5-6. Variação do FS medido na CS

As variações observadas nas curvas da Figura 5-3 até a Figura 5-6 apenas ilustram que tanto na CP quanto na CS o FS medido é influenciado pela diferença de temperatura entre a cavidade e o vidro. No entanto, visto que os testes sob condições reais sofrem influência de uma série de outros fatores (ex: instrumentação), é difícil isolar o efeito de apenas uma variável. Teoricamente, o ΔT cavidade-vidro altera tanto o fluxo de calor convectivo quanto o radiante entre as duas superfícies, mas as medições realizadas não nos permitem quantificar diretamente o efeito dessa alteração sobre o FS medido. Por isso, torna-se necessária uma representação matemática do fenômeno físico envolvido na passagem do fluxo de calor pelas duas cavidades.

5.4 MODELO MATEMÁTICO

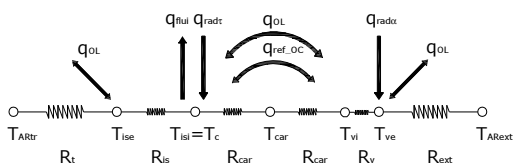
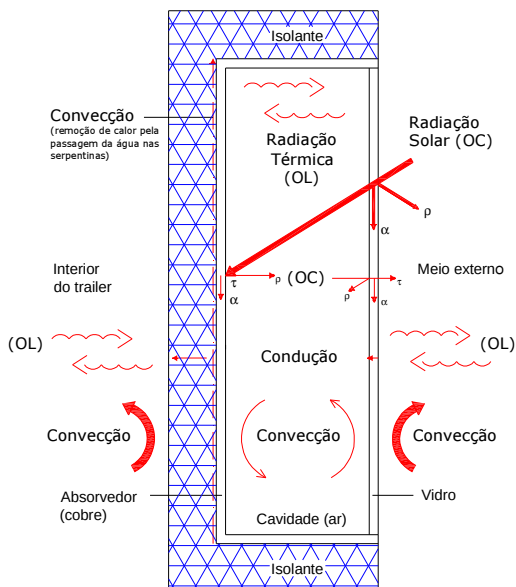
Para possibilitar análises e comparações com os resultados experimentais, o modelo matemático unidimensional desenvolvido por Marinowski (2005) foi adaptado para representar a passagem do fluxo de calor através de cada uma das cavidades, no caso de uma chapa de vidro monolítico. Os processos de transferência de calor abrangidos neste equacionamento são os seguintes:

- Convecção na superfície externa do vidro;
- Radiação (onda longa) entre a superfície do vidro e a vizinhança;
- Transmissão e absorção da radiação solar (onda curta) pelo vidro;
- Condução no vidro;
- Reflexão e absorção da radiação solar (onda curta) no interior da cavidade;
- Convecção no interior da cavidade;
- Troca líquida de radiação (onda longa) entre a superfície interna do vidro e a cavidade;
- Condução através do isolamento da cavidade (fugas);
- Convecção na superfície externa do isolamento da cavidade (fugas);
- Radiação (onda longa) entre a superfície do isolamento e a vizinhança (fugas);

A Figura 5-7 mostra uma representação em corte das duas cavidades (CP e CS) com os fluxos de calor que foram considerados no modelo matemático, para simular o processo de medição real. Também o equivalente elétrico desta representação é apresentado, sendo o

balanço de energia em função da passagem do fluxo de calor realizado para os “nós” nele definidos.

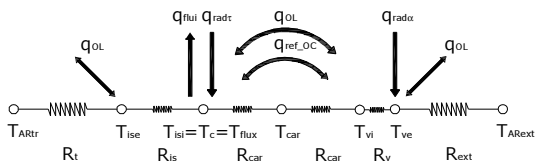
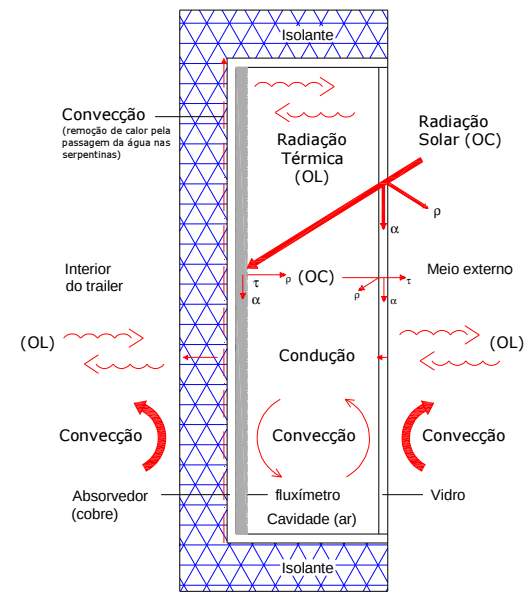
CP



Equivalente elétrico

Continua...

CS



Equivalente elétrico

Continua...

Legenda

q_{radto}	= Densidade de fluxo de calor absorvido pelo vidro devido à incidência de radiação solar (W/m^2);
q_{radtr}	= Densidade de fluxo de calor transmitida através do vidro devido à incidência de radiação solar (W/m^2);
q_{ol}	= Troca líquida de calor em ondas longas (W/m^2);
q_{ref}	= Densidade de fluxo de calor (onda curta) refletido pela superfície interna da cavidade (W/m^2);
q_{flui}	= Densidade de fluxo de calor removido pela passagem do fluido (água) pelas serpentinas (W/m^2);
R_{ext}	= Resistência térmica superficial entre o vidro e o ar externo ($\text{m}^2\text{K/W}$);
R_v	= Resistência térmica do vidro ($\text{m}^2\text{K/W}$);
R_{car}	= Resistência térmica na câmara de ar formada no interior da cavidade ($\text{m}^2\text{K/W}$);
R_{is}	= Resistência térmica do isolante térmico da cavidade ($\text{m}^2\text{K/W}$);
R_{tr}	= Resistência térmica superficial entre o isolamento e o interior do trailer ($\text{m}^2\text{K/W}$);
$T_{\text{ARe}}_{\text{ext}}$	= Temperatura do ar externo ($^{\circ}\text{C}$);
T_{ve}	= Temperatura na superfície externa do vidro ($^{\circ}\text{C}$);
T_{vi}	= Temperatura na superfície interna do vidro ($^{\circ}\text{C}$);
T_{car}	= Temperatura na câmara de ar no interior da cavidade ($^{\circ}\text{C}$);
T_{flux}	= Temperatura do fluxímetro ($^{\circ}\text{C}$);
T_c	= Temperatura da chapa de cobre que forma a cavidade ($^{\circ}\text{C}$);
T_{isi}	= Temperatura da superfície interna do isolamento ($^{\circ}\text{C}$);
T_{ise}	= Temperatura da superfície externa do isolamento ($^{\circ}\text{C}$);
T_{ARtr}	= Temperatura do ar no interior do trailer ($^{\circ}\text{C}$);

Figura 5-7. Esquema de representação da transferência de calor nas cavidades (sem escala)

O “ANEXO G” apresenta o equacionamento para o balanço de energia em função da passagem do fluxo de calor para os “nós” dos dois casos propostos.

A resolução dos sistemas de equações foi realizada no programa computacional EES (Engineering Equation Solver), versão 6.883-3D. Este programa possibilita a solução de sistemas de equações com grande rapidez, e também permite a realização de cálculos paramétricos entre as variáveis. O código de programação inserido no EES, para um exemplo de modelagem com o vidro incolor 3mm, também é apresentado no “ANEXO G” para cada uma das cavidades.

É importante destacar que o modelo apresenta algumas limitações. Primeiro, em relação às perdas de calor na forma de trocas

radiativas em onda longa entre o vidro e a vizinhança (entorno), adotou-se como temperatura da vizinhança (T_{viz}) o valor medido da temperatura do ar externo ($T_{A_{ext}}$). Já no caso da troca de calor entre o isolamento da cavidade e o interior do trailer, adotou-se para temperatura do trailer ($T_{trailer}$) o valor medido da temperatura do ar no interior do trailer ($T_{A_{int}}$).

Além disso, o modelo leva em conta apenas uma reflexão de ondas curtas na superfície interna da cavidade e posteriormente na superfície interna do vidro.

O valor da temperatura do ar na câmara é adotado como sendo igual à média entre a temperatura superficial interna do vidro e a temperatura da cavidade.

Outra simplificação realizada foi assumir que a temperatura das chapas de cobre que formam as cavidades é a mesma nas duas superfícies da chapa (interna e externa). Como estes elementos têm uma espessura muito pequena (0,89mm na CP e 3mm na CS) e a condutividade do material (cobre) é bastante elevada (380 W/mK), considera-se que praticamente não há resistência térmica, e toda a energia na forma de calor que chega de um lado da chapa é transmitida para o outro lado. O mesmo ocorre com o fluxímetro, que também tem uma resistência térmica muito baixa (0,0006 m²K/W). Por isso, o processo de transmissão de calor por condução ao longo da espessura destes elementos não foi equacionado.

Também, o processo convectivo de remoção de calor através da circulação de água em contato com as serpentinas não foi equacionado diretamente. Para quantificar este fluxo, assume-se que o calor removido pelo fluido é igual ao calor total absorvido pela cavidade menos as perdas pelo isolamento. De qualquer modo, para o cálculo do FS é utilizado o valor do fluxo absorvido pela cavidade sem perdas. Assim, em termos de processo de transferência de calor, os dois modelos se tornam equivalentes, sendo apenas modificada e acrescentada a nomenclatura das superfícies através das quais o fluxo de calor passa em cada cavidade.

Sobre o equacionamento utilizado no modelo matemático, ainda é importante dizer que diversas variáveis são aplicadas, sendo algumas delas resultados de medições em campo durante o teste. Já outras são estimadas ou assumidas a partir de cálculos ou dados teóricos. As variáveis de entrada foram classificadas da seguinte forma:

- Variáveis obtidas em medições: radiação solar; temperatura do ar externo; temperatura na superfície externa do vidro; temperatura da

cavidade; temperatura do ar no interior do trailer; coeficiente de convecção externa.

- Variáveis estimadas (calculadas): coeficiente de troca de calor na câmara de ar; resistência térmica da câmara de ar; resistência térmica do vidro; resistência térmica do isolamento; coeficiente de troca de calor no interior do trailer; resistência térmica no interior do trailer; resistência térmica superficial externa; temperatura da vizinhança, temperatura do trailer.
- Variáveis teóricas: propriedades dos materiais e constantes.

É importante destacar o procedimento utilizado para estimar o valor de algumas destas variáveis. No caso dos coeficientes de convecção no interior da câmara formada entre o vidro e cavidade (h_{car}), foram utilizadas correlações para confinamentos em câmaras retangulares, onde há diferença de temperatura entre as faces verticais internas. Estas correlações são apresentadas na forma das equações (E.11) e (E.12) do ANEXO E, para CP e CS, respectivamente. A este coeficiente de troca convectivo é adicionado o coeficiente de troca radiativo dado pela equação (E.13), resultando assim no coeficiente global de troca interno (h_{int}).

O coeficiente global de troca externo (h_{ext}) é calculado como sendo a soma do valor do “h” convectivo medido experimentalmente, mais a parcela radiativa obtida pela equação (E.15), também do ANEXO E.

No caso da estimativa das perdas de calor, para coeficiente de troca convectiva entre o ar no interior do trailer e a superfície externa do isolamento da cavidade, foi adotado o valor fixo de $3,1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Este valor foi estimado a partir da correlação proposta por Churchill e Chu (1975) *apud* Incropera e DeWitt (2003) para a condição de convecção natural em superfícies planas verticais, conforme apresentado na equação (E.9) do ANEXO E. Para esta estimativa, foi suposta uma diferença de temperatura de 10°C entre o ar no interior do trailer e a temperatura na superfície do isolamento, e também uma velocidade do fluido igual a $0,05\text{m/s}$. A este valor foi adicionado o coeficiente de troca radiativa igual $5,5\text{W/m}^2\text{K}$ (conforme definido no item 6 do ANEXO E), resultando em um coeficiente de troca de calor superficial total ($h_{trailer}$) igual a $8,6\text{W/m}^2\text{K}$.

5.5 ANÁLISES PARAMÉTRICAS

Utilizando o modelo matemático descrito acima, foram elaboradas análises para verificar a influência de algumas variáveis envolvidas no processo de transferência de calor sobre o resultado do fator solar. As análises foram realizadas para 4 casos:

- CP com vidro incolor 3mm
- CS com vidro incolor 3mm
- CP com vidro verde 6mm
- CS com vidro verde 6mm

Para todos os casos foram adotadas as propriedades ópticas dos vidros, segundo o ângulo de incidência no momento de teste.

5.5.1 Diferença de temperatura cavidade-vidro

Como apresentado no item 5.2, uma nova forma de controle foi aplicada às cavidades. Agora o sistema de controle busca manter a temperatura média da cavidade igual à temperatura do vidro mais uma diferença de temperatura entre o vidro e a cavidade ($T_{\text{VIDRO}} + \Delta T$), sendo este valor ajustado pelo operador. Para analisar o efeito deste ΔT , foram aplicadas ao modelo matemático as condições reais de medição e realizada a variação deste parâmetro.

O Quadro 5-1 e o Quadro 5-2 apresentam a alteração causada no valor do FS devido à variação da diferença (ΔT) entre temperatura média da cavidade (T_c) e a temperatura do vidro¹⁰ (T_{ve}). A linha em destaque (cinza na tabela, e em azul no gráfico) representa o resultado da simulação tendo como dados de entrada os valores de “ T_{ve} ” e “ T_c ” obtidos em campo, ou seja, na condição real de medição. Já a coluna chamada “var” mostra a variação do FS tendo como base o ponto de ΔT mais próximo a zero.

¹⁰ Valor medido na face externa do vidro

Quadro 5-1. Variação paramétrica do ΔT cavidade-vidro (vidro incolor 3mm)

CP com vidro incolor 3mm

Condições de teste:

Radj= 766 W/m²

hint=5,8 W/m²K

TAext = 21,5°C

hext=15,0 W/m²K

Propriedades do vidro:

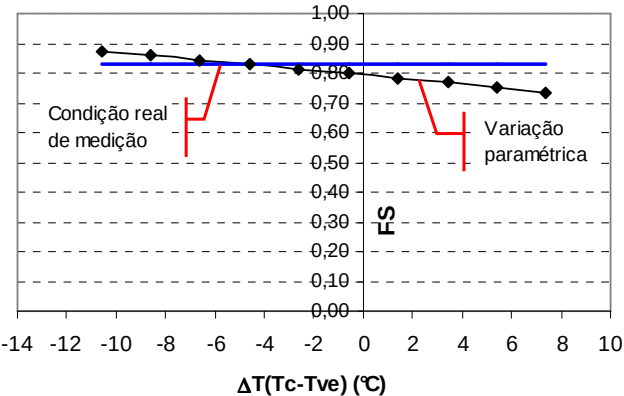
Ângulo incidência = 40°

$\alpha = 0,05$

$\tau = 0,83$

$\rho = 0,12$

Tc (°C)	Tve (°C)	ΔT (°C)	FS	var
20	30,6	-10,6	0,87	0,07
22	30,6	-8,6	0,86	0,06
24	30,6	-6,6	0,84	0,04
26	30,6	-4,6	0,83	0,03
28	30,6	-2,6	0,81	0,02
30	30,6	-0,6	0,80	0,00
32	30,6	1,4	0,78	-0,02
34	30,6	3,4	0,77	-0,03
36	30,6	5,4	0,75	-0,05
38	30,6	7,4	0,74	-0,06



Continua...

CS com vidro incolor 3mm

Condições de teste:

Radj= 743 W/m²

hint=5,5 W/m²K

TArext = 18,2°C

hext=16,2 W/m²K

Propriedades do vidro:

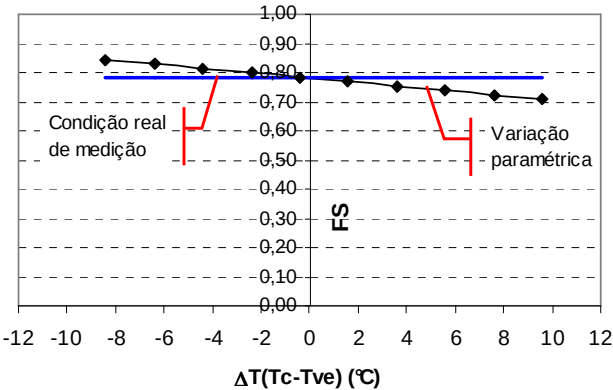
Ângulo incidência = 45°

$\alpha = 0,05$

$\tau = 0,81$

$\rho = 0,14$

Tc (°C)	Tve (°C)	T (°C)	FS	var
21	29,4	-8,4	0,84	0,06
23	29,4	-6,4	0,83	0,04
25	29,4	-4,4	0,81	0,03
27	29,4	-2,4	0,80	0,01
29	29,4	-0,4	0,78	0,00
31	29,4	1,6	0,77	-0,02
33	29,4	3,6	0,75	-0,03
35	29,4	5,6	0,74	-0,05
37	29,4	7,6	0,72	-0,06
39	29,4	9,6	0,71	-0,08

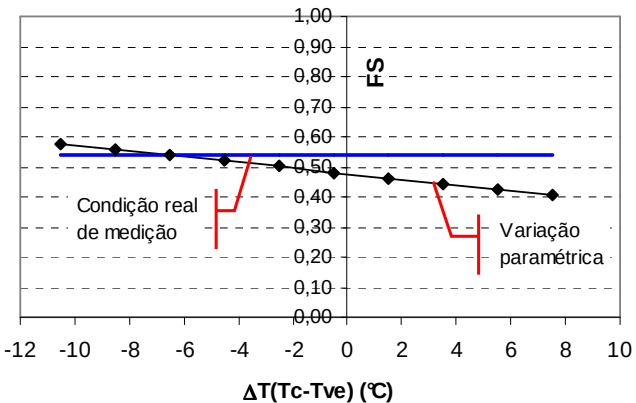


Quadro 5-2. Variação paramétrica do ΔT cavidade-vidro (vidro verde 6mm)

CP com vidro verde 6mm

<u>Condições de teste:</u>		<u>Propriedades do vidro:</u>	
Radj= 699 W/m²	hint=6,5 W/m²K	Ângulo incidência = 42°	$\tau = 0,50$
TArext = 25,8°C	hext=15,4 W/m²K	$\alpha = 0,40$	$\rho = 0,10$

Tc (°C)	Tve (°C)	ΔT (°C)	FS	var
34	44,5	-10,5	0,57	0,09
36	44,5	-8,5	0,56	0,07
38	44,5	-6,5	0,54	0,06
40	44,5	-4,5	0,52	0,04
42	44,5	-2,5	0,50	0,02
44	44,5	-0,5	0,48	0,00
46	44,5	1,5	0,46	-0,02
48	44,5	3,5	0,44	-0,04
50	44,5	5,5	0,42	-0,06
52	44,5	7,5	0,40	-0,08



Continua...

CS com vidro verde 6mm

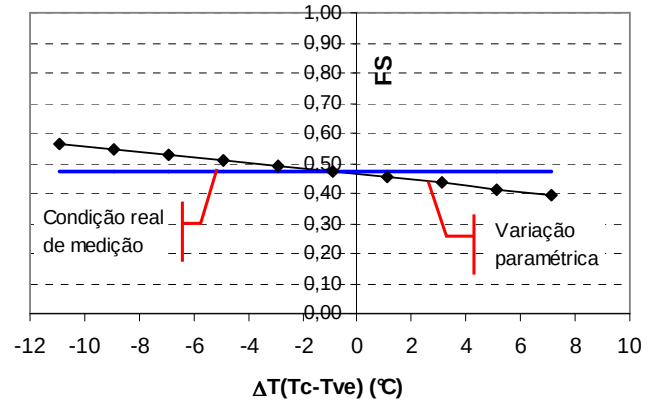
Condições de teste:

 $R_{adj} = 699 \text{ W/m}^2$
 $h_{int} = 6,0 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $T_{A_{ext}} = 25,8^\circ\text{C}$
 $h_{ext} = 15,4 \text{ W/m}^2\text{K}$

Propriedades do vidro:

 $\text{Ângulo incidência} = 42^\circ$
 $\alpha = 0,40$
 $\tau = 0,50$
 $\rho = 0,10$

$T_c (^\circ\text{C})$	$T_{ve} (^\circ\text{C})$	$\Delta T (^\circ\text{C})$	FS	var
37	47,9	-10,9	0,56	0,09
39	47,9	-8,9	0,55	0,07
41	47,9	-6,9	0,53	0,06
43	47,9	-4,9	0,51	0,04
45	47,9	-2,9	0,49	0,02
47	47,9	-0,9	0,47	0,00
49	47,9	1,1	0,45	-0,02
51	47,9	3,1	0,43	-0,04
53	47,9	5,1	0,41	-0,06
55	47,9	7,1	0,39	-0,08



Para a simulação com o vidro incolor 3mm (Quadro 5-1), observa-se, tanto na CP como na CS, que a variação (var) no FS é em média de 0,015 a cada alteração de 2°C. Já com o vidro verde (Quadro 5-2), esta variação (var) do FS passa para em média 0,02 a cada alteração de 2°C no ΔT cavidade-vidro.

Esta maior sensibilidade do vidro verde à alteração do ΔT já era esperada, uma vez que a absorção do material é maior e, conseqüentemente, o aquecimento das superfícies é mais elevado. Com isso, as trocas convectivas e radiativas para o interior são incrementadas.

5.5.2 Coeficientes de troca

A influência da relação ($h_{int}/(h_{int}+h_{ext})$) entre os coeficientes de troca de calor também foi analisada parametricamente, como mostra o Quadro 5-3 e o Quadro 5-2. Aqui a coluna “var” apresenta a variação absoluta sofrida pelo FS em relação à simulação com a condição real de coeficientes de troca (h) da medição (linha cinza em destaque). Em todos os casos foi fixada um ΔT cavidade-vidro igual a -5°C.

Quadro 5-3. Variação paramétrica do $h_{int}/(h_{int}+h_{ext})$ (vidro incolor 3mm)

CP com vidro incolor 3mm

Condições de teste:

Radj= 766 W/m²

TArext = 21,5 °C

h_{int} =5,8 W/m²K

h_{ext} =15,0 W/m²K

Propriedades do vidro:

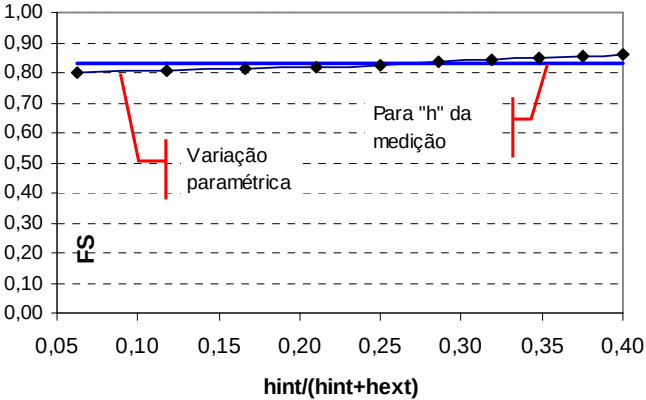
Ângulo incidência = 40°

α = 0,05

τ = 0,83

ρ = 0,12

h_{int} (W/m ² K)	h_{ext} (W/m ² K)	$\frac{h_{int}}{(h_{int}+h_{ext})}$	FS	var
1,0	15,0	0,06	0,80	-0,03
2,0	15,0	0,12	0,81	-0,02
3,0	15,0	0,17	0,81	-0,02
4,0	15,0	0,21	0,82	-0,01
5,0	15,0	0,25	0,83	0,00
6,0	15,0	0,29	0,83	0,00
7,0	15,0	0,32	0,84	0,01
8,0	15,0	0,35	0,85	0,02
9,0	15,0	0,38	0,85	0,02
10,0	15,0	0,40	0,86	0,03



Continua...

CS com vidro incolor 3mm

Condições de teste:

Radj= 743 W/m²

TArext = 18,2°C

hint=5,5 W/m²K

hext=16,2 W/m²K

Propriedades do vidro:

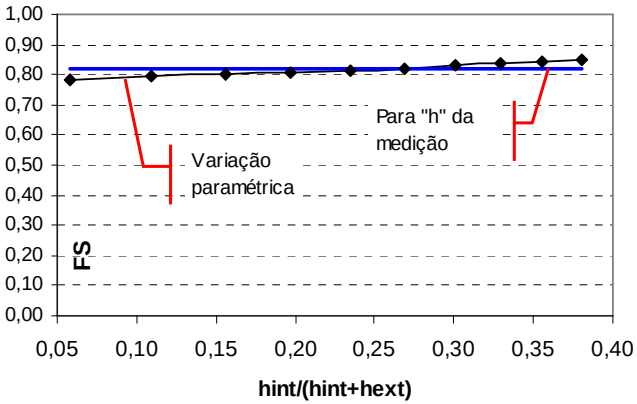
Ângulo incidência = 45°

α = 0,05

τ = 0,81

ρ = 0,14

h_{int} (W/m ² K)	h_{ext} (W/m ² K)	$\frac{h_{int}}{(h_{int}+h_{ext})}$	FS	var
1,0	16,3	0,06	0,79	-0,03
2,0	16,3	0,11	0,79	-0,03
3,0	16,3	0,16	0,80	-0,02
4,0	16,3	0,20	0,81	-0,01
5,0	16,3	0,23	0,81	-0,01
6,0	16,3	0,27	0,82	0,00
7,0	16,3	0,30	0,83	0,01
8,0	16,3	0,33	0,84	0,02
9,0	16,3	0,36	0,84	0,02
10,0	16,3	0,38	0,85	0,03

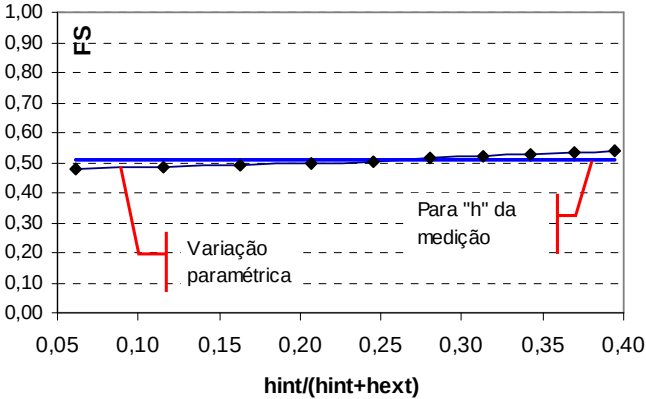


Quadro 5-4. Variação paramétrica do $h_{int}/(h_{int}+h_{ext})$ (vidro verde 6mm)

CP com vidro verde 6mm

Condições de teste:		Propriedades do vidro:	
Radj= 699 W/m²	hint=6,5 W/m²K	Ângulo incidência = 42°	τ = 0,50
TArext = 25,8°C	hext=15,4 W/m²K	α = 0,40	ρ = 0,10

h _{int} (W/m²K)	h _{ext} (W/m²K)	$\frac{h_{int}}{(h_{int}+h_{ext})}$	FS	var
1,0	15,4	0,06	0,48	-0,03
2,0	15,4	0,12	0,48	-0,03
3,0	15,4	0,16	0,49	-0,02
4,0	15,4	0,21	0,50	-0,01
5,0	15,4	0,25	0,51	0,00
6,0	15,4	0,28	0,51	0,00
7,0	15,4	0,31	0,52	0,01
8,0	15,4	0,34	0,53	0,02
9,0	15,4	0,37	0,53	0,02
10,0	15,4	0,39	0,54	0,03



Continua...

CS com vidro verde 6mm

Condições de teste:

Radj= 699 W/m²

TAext = 25,8°C

hint=6,0 W/m²K

hext=15,4 W/m²K

Propriedades do vidro:

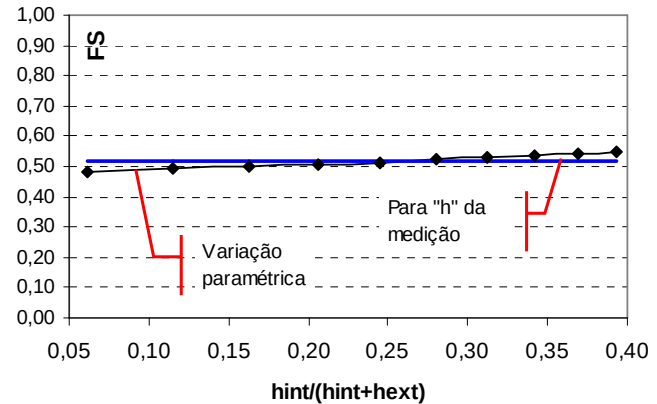
Ângulo incidência = 42°

$\alpha = 0,40$

$\tau = 0,50$

$\rho = 0,10$

h_{int} (W/m ² K)	h_{ext} (W/m ² K)	$\frac{h_{int}}{(h_{int}+h_{ext})}$	FS	var
1,0	15,4	0,06	0,48	-0,04
2,0	15,4	0,11	0,49	-0,03
3,0	15,4	0,16	0,50	-0,02
4,0	15,4	0,21	0,51	-0,01
5,0	15,4	0,25	0,51	-0,01
6,0	15,4	0,28	0,52	0,00
7,0	15,4	0,31	0,53	0,01
8,0	15,4	0,34	0,54	0,02
9,0	15,4	0,37	0,54	0,02
10,0	15,4	0,39	0,55	0,03



Observa-se que em ambas as cavidades e com os dois tipos de vidro analisados em termos absolutos o resultado de “var” é semelhante, uma vez que é mantida a relação $h_{int}/(h_{int}+h_{ext})$. Observa-se que em ambas as cavidades e com os dois tipos de vidro analisados, o resultado de “var”, em termos absolutos, é semelhante, uma vez que é mantida a relação $h_{int}/(h_{int}+h_{ext})$. No entanto, em termos relativos, quando “var” é comparado ao FS para a condição real de teste, o valor da relação mostra ter mais influência sobre o valor do vidro verde. Por exemplo, para a CP com vidro incolor 3mm, uma variação (var) de 0,03 em termos absolutos sobre o FS médio (0,83) significa, em termos relativos, 3,7%, já para o vidro verde 6mm, o percentual para a mesma variação (de 0,03), se comparada ao FS (de 0,52), representa 6,5%. É interessante destacar também, que a influência desta relação entre os coeficientes de troca está diretamente associada ao ΔT cavidade-vidro. Quando este ΔT é de aproximadamente -1°C , a variação causada sobre o FS, devido a alteração da relação de “h” dentro da faixa analisada ($h_{int}/(h_{int}+h_{ext})$ até 0,40), é de no máximo 0,01, tanto para o vidro verde como para o incolor. Já quando o ΔT é de -10°C , esta variação pode chegar a 0,07 (absoluto), como mostra o Quadro 5-5 (OBS: o efeito sobre o FS devido a esta alteração do ΔT é semelhante na CP e na CS, por isso apenas um caso será apresentado).

Quadro 5-5. Variação paramétrica do $h_{int}/(h_{int}+h_{ext})$ para $\Delta T(T_c-T_{ve}) = -10^\circ\text{C}$

CP com vidro incolor 3mm

Condições de teste:

$R_{adj} = 766 \text{ W/m}^2$

$h_{int} = 5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$

$T_{A_{ext}} = 21,5^\circ\text{C}$

$h_{ext} = 15,0 \text{ W/m}^2\text{K}$

Propriedades do vidro:

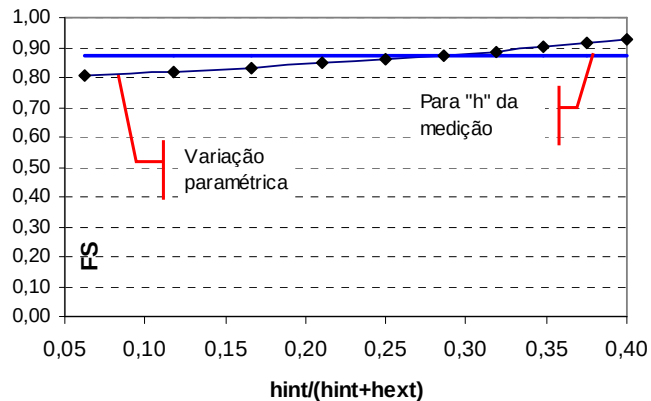
Ângulo incidência = 40°

$\alpha = 0,05$

$\tau = 0,83$

$\rho = 0,12$

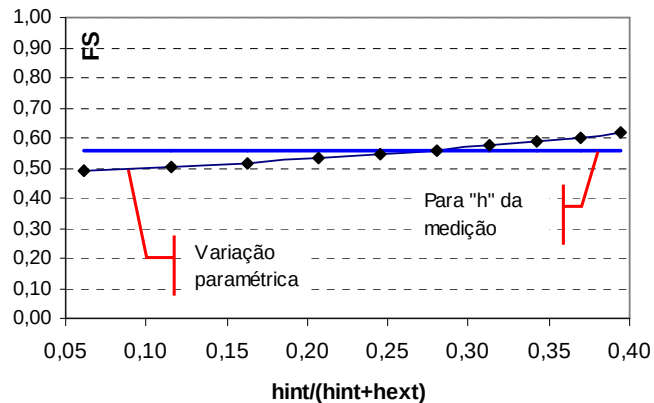
h_{int} (W/m ² K)	h_{ext} (W/m ² K)	$\frac{h_{int}}{(h_{int}+h_{ext})}$	FS	var
1,0	15,0	0,06	0,81	-0,06
2,0	15,0	0,12	0,82	-0,05
3,0	15,0	0,17	0,83	-0,04
4,0	15,0	0,21	0,85	-0,02
5,0	15,0	0,25	0,86	-0,01
6,0	15,0	0,29	0,87	0,00
7,0	15,0	0,32	0,89	0,02
8,0	15,0	0,35	0,90	0,03
9,0	15,0	0,38	0,91	0,04
10,0	15,0	0,40	0,93	0,06



Continua...

CP com vidro verde 6mm
Condições de teste:
 $R_{adj} = 699 \text{ W/m}^2$
 $h_{int} = 6,0 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $T_{A_{ext}} = 25,8^\circ\text{C}$
 $h_{ext} = 15,4 \text{ W/m}^2\text{K}$
Propriedades do vidro:
 $\text{Ângulo incidência} = 42^\circ$
 $\alpha = 0,40$
 $\tau = 0,50$
 $\rho = 0,10$

h_{int} (W/m ² K)	h_{ext} (W/m ² K)	$\frac{h_{int}}{(h_{int}+h_{ext})}$	FS	var
1,0	15,4	0,06	0,49	-0,07
2,0	15,4	0,12	0,50	-0,06
3,0	15,4	0,16	0,52	-0,04
4,0	15,4	0,21	0,53	-0,03
5,0	15,4	0,25	0,55	-0,01
6,0	15,4	0,28	0,56	0,00
7,0	15,4	0,31	0,57	0,01
8,0	15,4	0,34	0,59	0,03
9,0	15,4	0,37	0,60	0,04
10,0	15,4	0,39	0,62	0,06



5.5.3 Perdas de calor

Durante o teste real de campo, apenas na CP as perdas de calor pelo fundo da cavidade são consideradas na composição do ganho de calor para a estimativa do FS. Como já mencionado, no teste usando a CS, o fluxo de calor é medido pelos transdutores antes de chegar até a placa de resfriamento por circulação de água, não havendo assim interferências das perdas de calor da placa sobre o resultado do FS medido.

Nas análises paramétricas anteriores, as perdas não foram consideradas tanto na CP como na CS, uma vez que nos dois casos o modelo matemático permite isolar o fluxo de calor em um ponto (nó) antes da placa de resfriamento. Porém, adaptando o modelo matemático, é possível incluir as perdas do fundo da cavidade para o meio externo (ar dentro do trailer). Esta análise será realizada apenas para o caso da CP, onde as perdas de calor pelo fundo da cavidade são de interesse. Neste caso, será adotada como parâmetro variável a temperatura do ar no interior do trailer (T_{ARtr}). Como simplificação, é assumindo que a temperatura da estrutura do trailer é igual a T_{ARtr} .

O Quadro 5-6 mostra a variação do FS devido às perdas (ou ganhos) de calor através do fundo da cavidade em função da alteração da temperatura do ar no interior do trailer (assumida aqui como representando a temperatura de toda a vizinhança). Os resultados mostram que as perdas (ou ganhos) de calor pelo isolamento têm pouca influência sobre o valor final do FS no dos vidros analisados. Quando o ΔT chega a aproximadamente 8°C, o FS passa a sofrer alguma variação ($var = 0,01$), e somente em condições bem desfavoráveis ($\Delta T \sim 20^\circ C$) esta variação passa para 0,02.

Quadro 5-6. Análise paramétrica das perdas de calor

CP com vidro incolor 3mm

Condições de teste:

Radj= 766 W/m²

TArext = 21,5 °C

hint=5,8 W/m²K

hext=15,0 W/m²K

Propriedades do vidro:

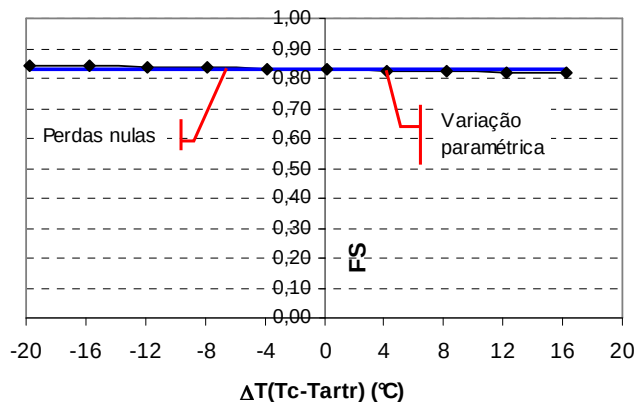
Ângulo incidência = 40°

$\alpha = 0,05$

$\tau = 0,83$

$\rho = 0,12$

T _{artr} (°C)	T _c (°C)	T (°C)	FS	var
10,0	26,2	16,2	0,82	-0,01
14,0	26,2	12,2	0,82	-0,01
18,0	26,2	8,2	0,82	-0,01
22,0	26,2	4,2	0,82	0,00
26,0	26,2	0,2	0,83	0,00
30,0	26,2	-3,8	0,83	0,00
34,0	26,2	-7,8	0,83	0,01
38,0	26,2	-11,8	0,84	0,01
42,0	26,2	-15,8	0,84	0,01
46,0	26,2	-19,8	0,84	0,02



Continua...

CP com vidro verde 6mm

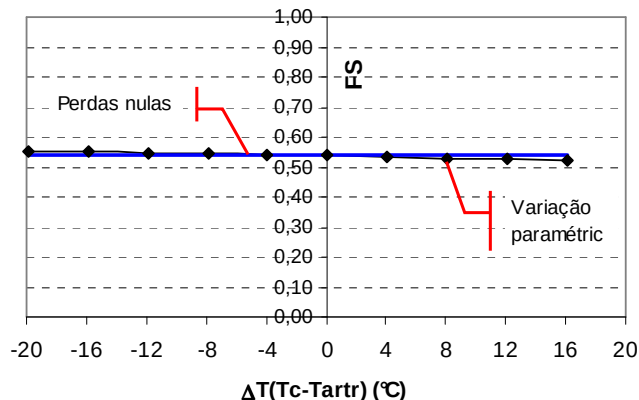
Condições de teste:

 $\text{Radj} = 699 \text{ W/m}^2$
 $\text{hint} = 6,0 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $\text{TArext} = 25,8^\circ\text{C}$
 $\text{hext} = 15,4 \text{ W/m}^2\text{K}$

Propriedades do vidro:

 $\hat{\text{Angulo incidência}} = 42^\circ$
 $\alpha = 0,40$
 $\tau = 0,50$
 $\rho = 0,10$

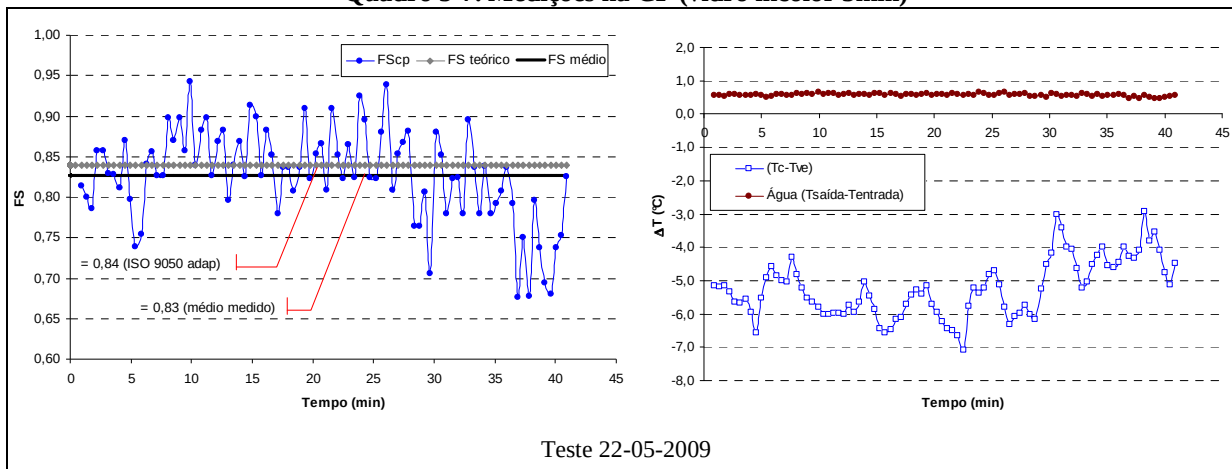
$T_{\text{artr}} (^\circ\text{C})$	$T_c (^\circ\text{C})$	$T (^\circ\text{C})$	FS	var
22,0	38,1	16,1	0,52	-0,01
26,0	38,1	12,1	0,53	-0,01
30,0	38,1	8,1	0,53	-0,01
34,0	38,1	4,1	0,53	0,00
38,0	38,1	0,1	0,54	0,00
42,0	38,1	-3,9	0,54	0,00
46,0	38,1	-7,9	0,54	0,01
50,0	38,1	-11,9	0,55	0,01
54,0	38,1	-15,9	0,55	0,01
58,0	38,1	-19,9	0,55	0,02



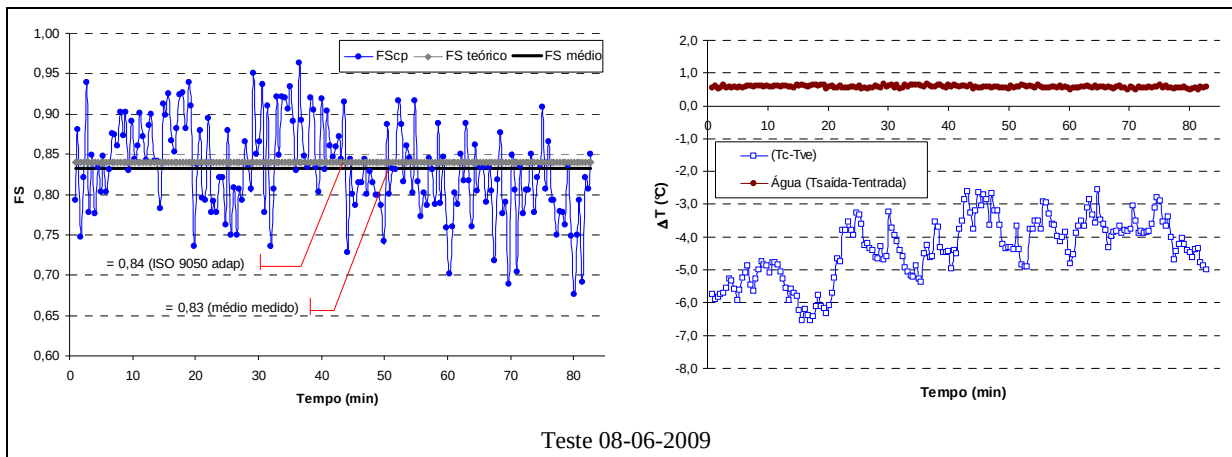
5.6 NOVAS MEDIÇÕES COM O VIDRO DE REFERÊNCIA

Aplicando a nova metodologia para verificar o FS e também utilizando a nova condição de controle para a temperatura das cavidades, foram realizadas novas medições com o vidro incolor 3mm. O Quadro 5-7 e o Quadro 5-8 apresentam os gráficos com o resultado do FS medido em cada uma das cavidades (CP e CS), e também as variações (ΔT) entre a temperatura média da cavidade¹¹ (T_c) e o vidro (T_{ve}). No caso da CP, é também apresentada a variação do ΔT da água entre a entrada e a saída da cavidade.

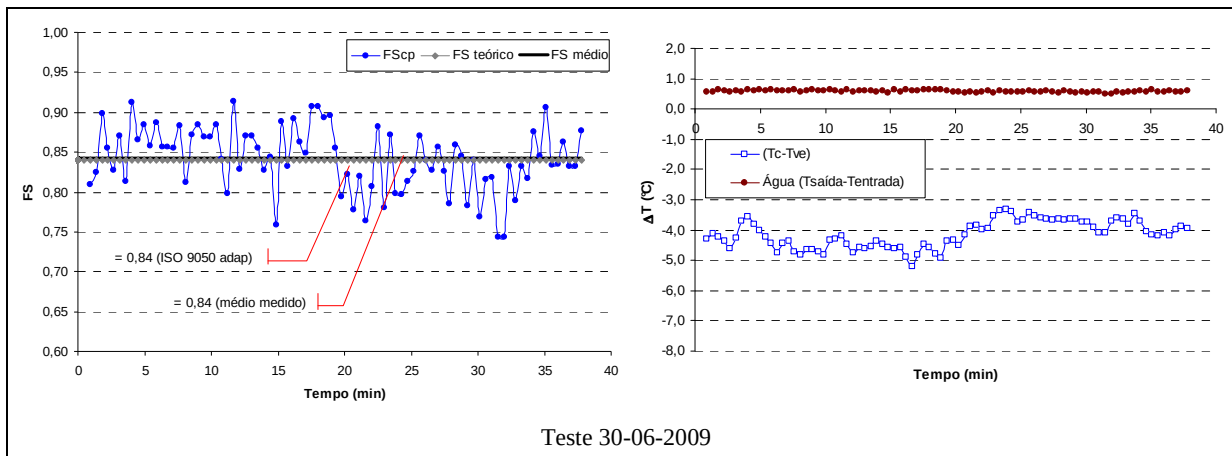
¹¹ OBS.: Aqui T_c representa os valores de “TMCP” para a cavidade principal, e de “CS (fundo)” para a cavidade secundária.

Quadro 5-7. Medições na CP (vidro incolor 3mm)

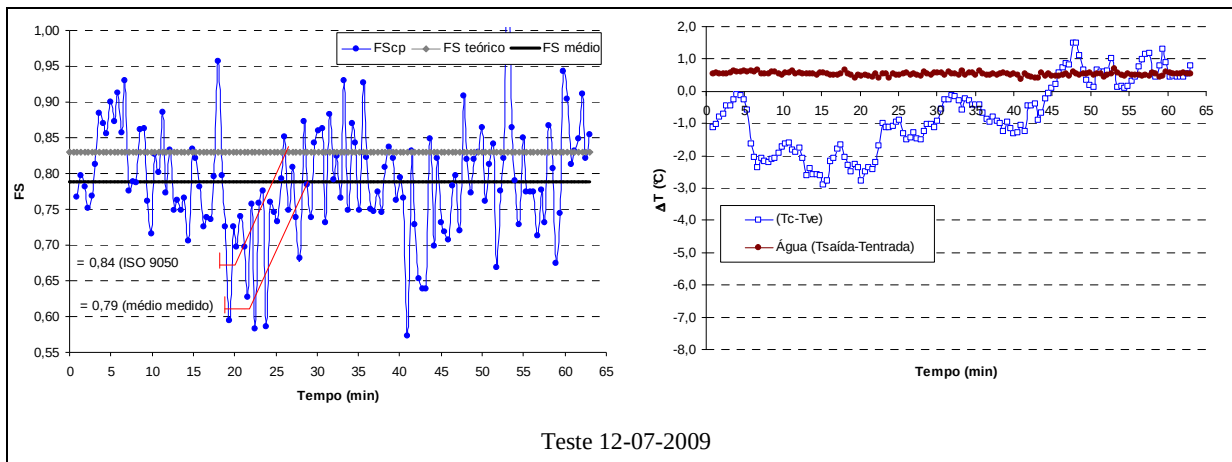
Continua...



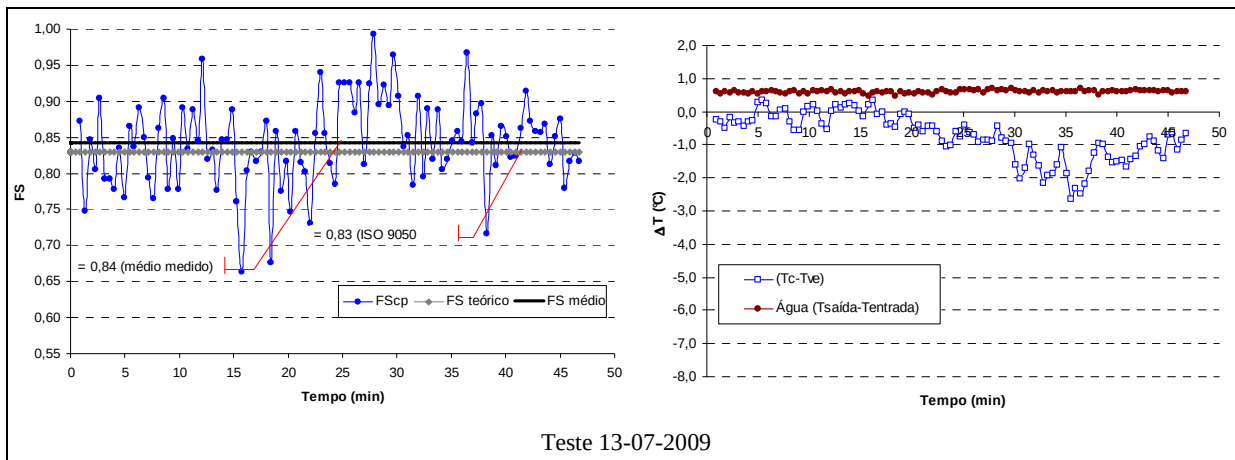
Continua...



Continua...



Continua...

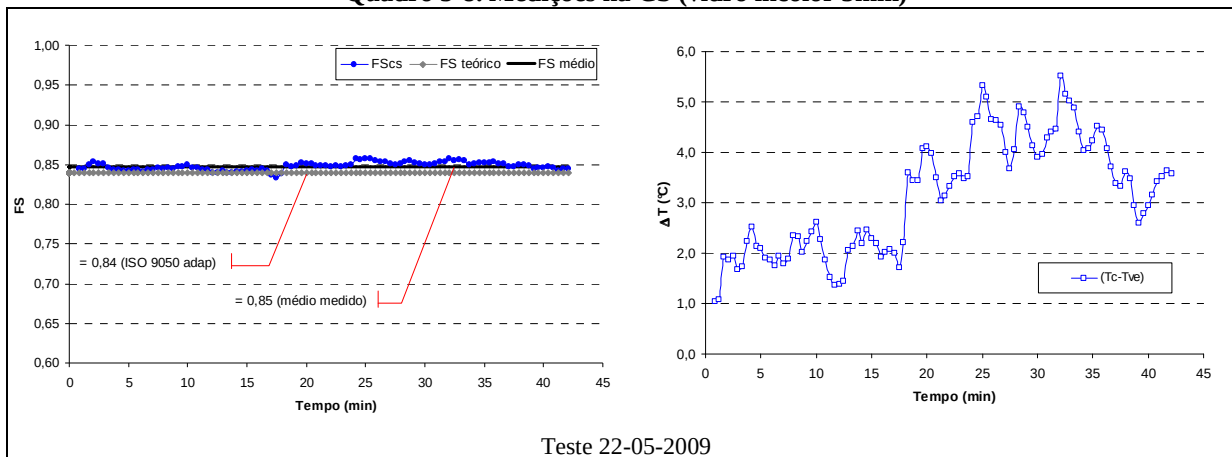


De modo geral, é possível observar em todos os testes (Quadro 5-7) que, embora ainda existam oscilações nos resultados medidos do FS, estas foram reduzidas em relação aos testes da primeira fase de calibração com a CP. Agora o desvio padrão observado variou em todas as medições entre $\pm 0,04$ e $\pm 0,08$ (absoluto). Também a nova maneira de controle da temperatura da cavidade, que tem por referência a temperatura do vidro, proporcionou uma maior aproximação dos valores do FS medido com os valores teóricos.

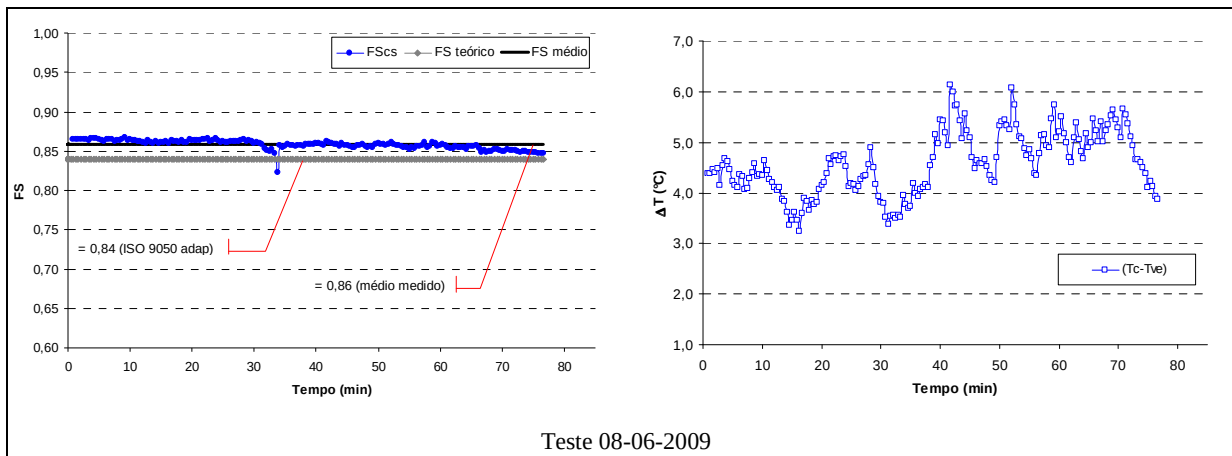
No entanto, ao observar as curvas de ΔT ($T_c - T_{ve}$), nota-se que elas apresentam diferenças entre cada uma das medições. Em parte estas diferenças foram geradas propositalmente. Uma vez que durante os testes não se sabia como estas diferenças alterariam os resultados, foram aplicados valores de ΔT diferentes ao iniciar cada medição (ex: $T_c - T_{ve} = -5^\circ\text{C}$, -4°C , -1°C , 0°C). Mas as variações nestas curvas também são consequências do ajuste da temperatura de controle do banho térmico, que é realizado manualmente ao longo do teste para que o ΔT seja mantido.

Embora a análise paramétrica realizada para $\Delta T(T_c - T_{ve})$ através do modelo matemático indique a influência direta deste parâmetro sobre o FS, os resultados experimentais apresentados para o vidro incolor 3mm não demonstram isso claramente. Provavelmente isso se deve ao fato de que a parcela ganha por onda longa gerada pelo ΔT é menor do que a incerteza de medição. Por isso, com base nos resultados observados é possível dizer que, para vidros com valores elevados de transmissão e baixa absorção da radiação solar, como o incolor, o resultado do FS medido na CP dependerá em muito da estabilidade do sistema de medição. Isso se comprova no Teste (30-06-09), onde coincidentemente ocorre o menor desvio padrão no ΔT da água de entrada e saída ($0,58 \pm 0,03^\circ\text{C}$), também o menor desvio no ΔT cavidade-vidro ($-4,1 \pm 0,45^\circ\text{C}$), o menor desvio no valor do FS medido ($0,84 \pm 0,04$) e a melhor aproximação com o valor teórico da ISO 9050 (0,84).

A seguir são apresentados os resultados das medições realizadas simultaneamente na CS para os mesmos dias de teste (Quadro 5-8):

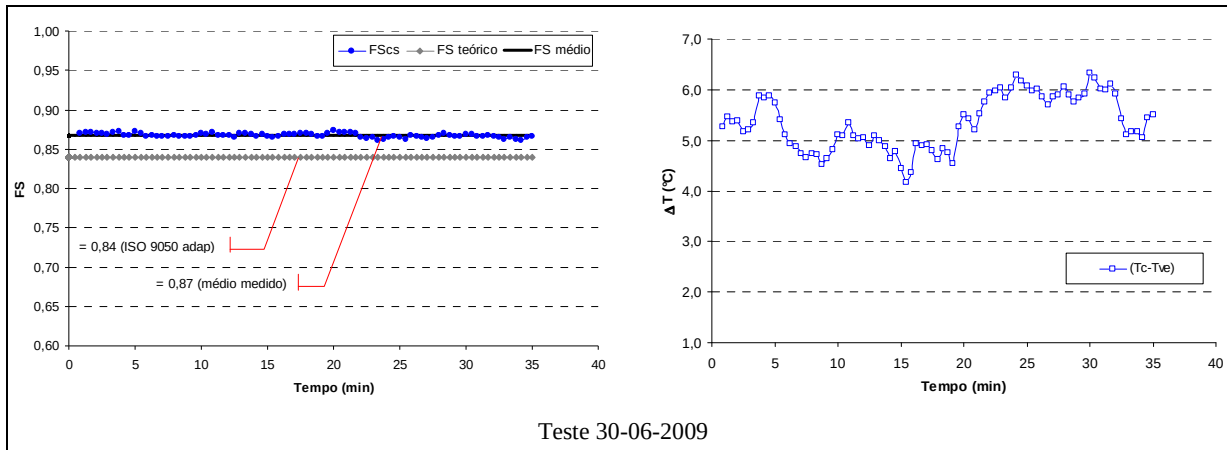
Quadro 5-8. Medições na CS (vidro incolor 3mm)

Continua...

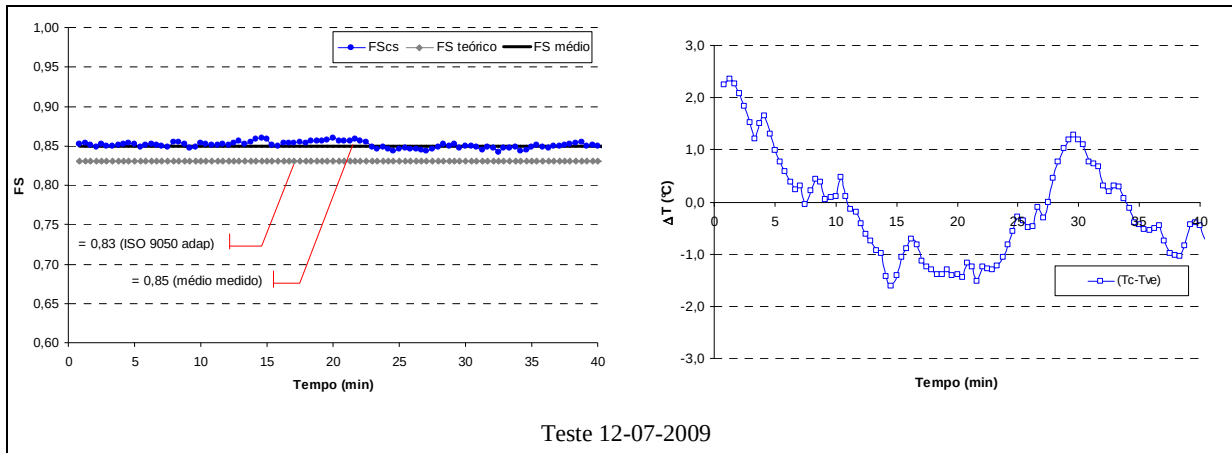


Teste 08-06-2009

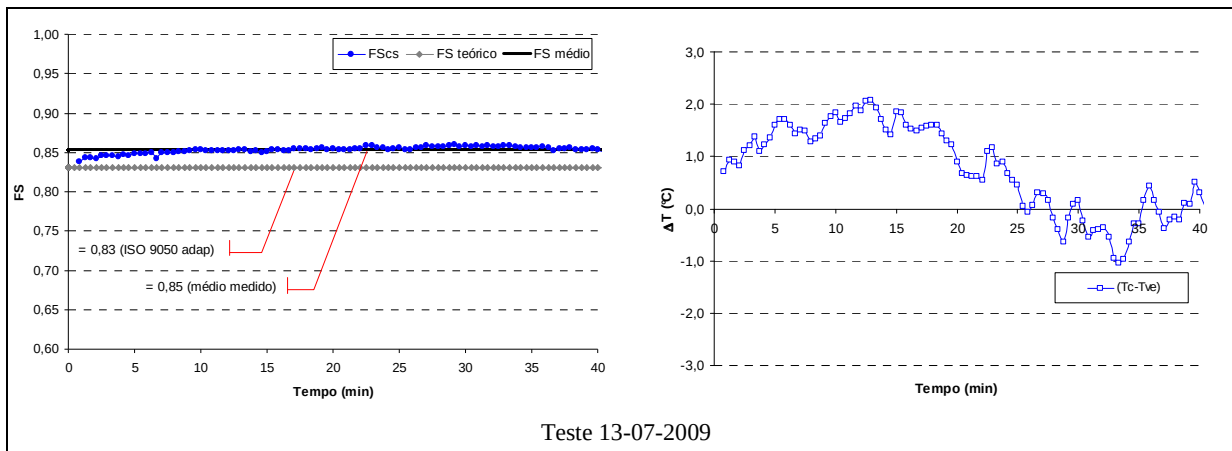
Continua...



Continua...



Continua...



Nos testes com a CS, os valores de $\Delta T(T_c-T_{ve})$ também diferem de um dia de medição para outro. Agora o ΔT é na maior parte do tempo positivo, ou seja, T_c está mais aquecida do que o vidro, havendo assim perdas de calor. No entanto, o método de determinação do FS, conforme proposto no item 5.1.2, compensa estas perdas por onda longa entre o vidro e a superfície do fluxímetro fixado na parte interna da cavidade. É por isso que o efeito de redução do FS, previsto através do modelo matemático, acaba não sendo diretamente percebido quando o ΔT é positivo.

Isso pode ser visto, por exemplo, no Teste (30-06-09) onde o ΔT é em média de $+5,4^\circ\text{C}$. Aqui se a compensação da perda em onda longa for excluída do valor do FS medido (0,87) este valor cai para 0,83. Desta forma, o resultado está de acordo com a análise paramétrica apresentada no Quadro 5-1, que previa uma redução entre 0,04 e 0,05 (absoluto) no valor do FS para um $\Delta T(T_c-T_{ve})$ de $+5^\circ\text{C}$ na CS.

É interessante analisar o Teste (12-07-09) e o Teste (13-07-09). Nestes dois casos, o $\Delta T(T_c-T_{ve})$ é em média próximo a zero. Assim, as perdas (ou ganho) devido à onda longa entre o vidro e os fluxímetros na cavidade é praticamente nula. Teoricamente neste caso o ganho ou perda convectivo também seria nulo, se assumirmos que T_c e T_{ve} são iguais e a temperatura do ar é uma média das duas temperaturas. Assim, teoricamente está sendo medida apenas a parcela da radiação solar transmitida pelo vidro. No entanto, observa-se nos dois testes que o FS medido é em média de 0,85, um pouco acima do valor de referência da ISO 9050 (0,83). Apesar desta diferença, pode-se dizer que as medições apresentam uma boa aproximação, uma vez que só a incerteza no resultado dos sensores é de 4,5% (ou neste caso $\pm 0,04$ em termos absolutos), e a fração retransmitida não chega a 0,02 (absoluto) para o vidro incolor 3mm com a aplicação da ISO 9050. Além disso, na prática se observou que dependendo das condições de estabilização da cavidade durante o período anterior ao início da medição, o ar enclausurado pode chegar a uma temperatura acima de T_c e T_{ve} , gerando, assim, um ganho convectivo adicional.

De modo geral, as medições na CS apresentam boa estabilidade e, conseqüentemente, baixo desvio padrão, que foi em média de $\pm 0,01$ (absoluto) considerando todos os testes.

A Tabela 5-2 apresenta um resumo com os valores médios do FS medido em cada cavidade e de outras variáveis estimadas ou

medidas ao longo dos testes. Informações complementares sobre as condições de medição podem ser encontradas no “ANEXO H”.

Para que todos os valores sejam comparados em um mesmo patamar de $\Delta T(T_c-T_{ve})$, é possível realizar um ajuste do FS medido com base no resultado da variação do FS x $\Delta T(T_c-T_{ve})$ encontrada nas análises paramétricas do item 5.5.1. Nesta análise se verificou que, para o vidro incolor 3mm, uma redução (ou aumento) do ΔT em 2°C causa uma alteração linear de aproximadamente 0,015 (absoluto) no FS (ou calculando com mais precisão podemos definir: 0,00075/0,1°C). A partir desta proporção, é possível, de maneira simplificada, ajustar o FS medido para que todos os testes tenham o mesmo $\Delta T(T_c-T_{ve})$.

A Tabela 5-3 e a Tabela 5-4 apresentam os valores do FS das medições ajustado a um ΔT de -5°C e -10°C, respectivamente. Como esperado, nos casos onde o $\Delta T(T_c-T_{ve})$ foi elevado (em termos absolutos) o FS cresceu, uma vez que esta condição força os ganhos convectivos e radiantes. Para a CP, o ΔT de -5°C mostrou ser a condição onde se obtém os resultados de FS ajustado mais próximos dos valores da ISO 9050. Já na CS isso não aconteceu, em qualquer uma das duas condições de ΔT o FS ajustado se afasta do valor de referência da ISO 9050.

Observa-se que, embora o modelo matemático indique que a variação do $\Delta T(T_c-T_{ve})$ causa variações lineares sobre o FS medido, tanto na CS quanto na CP, na prática isso não acontece da mesma forma. Os resultados indicam que o efeito do ΔT é diferente em cada cavidade. Como os valores de FS ajustados da

Tabela 5-3 e da Tabela 5-4 têm por base os valores de FS medidos, sendo apenas acrescentado (ou subtraído) um fator de correção proporcionalmente à “diferença de ΔT ”, fica claro que a CS é mais sensível ao ΔT negativo (que força os ganhos de calor) do que a CP.

Assim, embora o número de testes realizados até aqui não seja suficiente para conduzir de modo preciso ao melhor valor de $\Delta T(T_c-T_{ve})$, fica definido para as medições posteriores que são necessárias condições diferenciadas de $\Delta T(T_c-T_{ve})$ em cada cavidade.

Tabela 5-2. Resumo das medições com o vidro incolor 3mm

Cavidade Principal

Amostra	TESTE	FS médio ± DesvPad	FS teórico (ISO 9050 adap)	ΔT (Tc-Tve) (°C)	Tc (°C)	Tar int (°C)	Tve (°C)	Tar ext (°C)	h int (W/m²K)	h ext (W/m²K)	Var ext (m/s)	Rad média (W/m²)	Ang Inc (°)	Tempo med (min)
Vidro incolor 3mm	22/5/2009	0,83±0,06	0,84	-5,2	31,1	38,5	36,4	27,2	5,7	16,5	1,6	763	42° - 43°	40
	8/6/2009	0,83±0,05	0,84	-4,4	26,3	29,3	30,6	21,5	5,7	15,4	0,9	766	39° - 42°	80
	30/6/2009	0,84±0,04	0,84	-4,1	28,0	31,4	32,2	24,3	5,7	16,9	1,5	763	40° - 42°	36
	12/7/2009	0,79±0,08	0,83	-0,8	27,4	29,9	28,2	18,2	5,2	16,8	3,0	746	43° - 47°	60
	13/7/2009	0,84±0,06	0,83	-0,7	26,3	29,7	27,0	20,9	5,2	18,5	4,2	795	40° - 42°	45

Cavidade Secundária

Amostra	TESTE	FS médio ± DesvPad	FS teórico (ISO 9050 adap)	ΔT (Tc-Tve) (°C)	Tc (°C)	Tar int (°C)	Tve (°C)	Tar ext (°C)	h int (W/m²K)	h ext (W/m²K)	Var ext (m/s)	Rad média (W/m²)	Ang Inc (°)	Tempo med (min)
Vidro incolor 3mm	22/5/2009	0,85±0,01	0,84	3,1	42,7	43,6	39,5	27,2	5,3	16,5	1,6	763	42° - 43°	40
	8/6/2009	0,86±0,01	0,84	4,6	40,1	40,1	35,5	21,5	5,4	15,4	0,9	766	39° - 42°	80
	30/6/2009	0,87±0,00	0,84	5,4	40,8	41,1	35,4	24,3	5,5	16,9	1,5	763	40° - 42°	36
	12/7/2009	0,85±0,00	0,83	-0,2	29,3	33,5	29,4	18,2	4,8	16,8	3,0	743	43° - 47°	60
	13/7/2009	0,85±0,00	0,83	0,7	30,6	33,5	30,0	20,9	5,0	18,5	4,2	795	40° - 42°	45

Tabela 5-3. Ajuste do FS para $\Delta T(T_c - T_{ve}) = -5^\circ\text{C}$ **Cavidade Principal**

Teste	FS médio	$\Delta T (T_c - T_{ve})$ ($^\circ\text{C}$)	$\Delta T (T_c - T_{ve})$ ajustado ($^\circ\text{C}$)	Diferença de ΔT ($^\circ\text{C}$)	Diferença no FS	FS ajustado	FS teórico (ISO 9050 adap)
22/5/2009	0,83	-5,2	-5,0	0,2	-0,002	0,83	0,84
8/6/2009	0,83	-4,4	-5,0	-0,6	0,005	0,83	0,84
30/6/2009	0,84	-4,1	-5,0	-0,9	0,007	0,85	0,84
12/7/2009	0,79	-0,8	-5,0	-4,2	0,032	0,82	0,83
13/7/2009	0,84	-0,7	-5,0	-4,3	0,032	0,87	0,83

Cavidade Secundária

Teste	FS médio	$\Delta T (T_c - T_{ve})$ ($^\circ\text{C}$)	$\Delta T (T_c - T_{ve})$ ajustado ($^\circ\text{C}$)	Diferença de ΔT ($^\circ\text{C}$)	Diferença no FS	FS ajustado	FS teórico (ISO 9050 adap)
22/5/2009	0,85	3,1	-5,0	-8,1	0,061	0,91	0,84
8/6/2009	0,86	4,6	-5,0	-9,6	0,072	0,93	0,84
30/6/2009	0,87	5,4	-5,0	-10,4	0,078	0,95	0,84
12/7/2009	0,85	-0,2	-5,0	-4,8	0,036	0,89	0,83
13/7/2009	0,85	0,7	-5,0	-5,7	0,043	0,89	0,83

Tabela 5-4. Ajuste do FS para $\Delta T(T_c-T_{ve}) = -10^\circ\text{C}$

Cavidade Principal							
Teste	FS médio	$\Delta T (T_c-T_{ve})$ ($^\circ\text{C}$)	$\Delta T (T_c-T_{ve})$ ajustado ($^\circ\text{C}$)	Diferença de ΔT ($^\circ\text{C}$)	Diferença no FS	FS ajustado	FS teórico (ISO 9050 adap)
22/5/2009	0,83	-5,2	-10,0	-4,8	0,036	0,87	0,84
8/6/2009	0,83	-4,4	-10,0	-5,6	0,042	0,87	0,84
30/6/2009	0,84	-4,1	-10,0	-5,9	0,044	0,88	0,84
12/7/2009	0,79	-0,8	-10,0	-9,2	0,069	0,86	0,83
13/7/2009	0,84	-0,7	-10,0	-9,3	0,070	0,91	0,83
Cavidade Secundária							
Teste	FS médio	$\Delta T (T_c-T_{ve})$ ($^\circ\text{C}$)	$\Delta T (T_c-T_{ve})$ ajustado ($^\circ\text{C}$)	Diferença de ΔT ($^\circ\text{C}$)	Diferença no FS	FS ajustado	FS teórico (ISO 9050 adap)
22/5/2009	0,85	3,1	-10,0	-13,1	0,098	0,95	0,84
8/6/2009	0,86	4,6	-10,0	-14,6	0,110	0,97	0,84
30/6/2009	0,87	5,4	-10,0	-15,4	0,116	0,99	0,84
12/7/2009	0,85	-0,2	-10,0	-9,8	0,074	0,92	0,83
13/7/2009	0,85	0,7	-10,0	-10,7	0,080	0,93	0,83

5.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ETAPA DE CALIBRAÇÃO

Este capítulo apresentou a segunda fase do processo de calibração do calorímetro. Nesta etapa, um novo método de determinação do FS foi desenvolvido e aplicado nas medições. O método leva em consideração o aquecimento do elemento de teste (vidro) para o equacionamento do processo de transferência de calor associado à determinação do FS. Destacou-se que fisicamente, na maioria das situações de teste, não há trocas de calor diretamente entre o meio interno e externo, mas que essas trocas ocorrem distintamente entre o vidro e o meio interno, e o vidro e o meio externo, em função das condições ambientais existentes.

Em consequência disso, discutiu-se no item 5.2 que um parâmetro mais coerente para o controle da temperatura das cavidades é a temperatura do vidro e não a do ar externo (como foi aplicado na primeira fase de calibração). Isso se dá porque é a partir da alteração na temperatura do vidro que são modificados os ganhos por convecção e os ganhos em radiação de onda longa entre o vidro e a cavidade. Além disso, passou-se a adotar um valor ajustado pelo operador ao longo do teste para o controle da temperatura da cavidade (CP ou CS), melhorando assim a estabilidade do banho térmico. Este valor passou a ser definido como o resultado da soma da temperatura média do vidro da respectiva cavidade mais um ΔT aplicado para o teste ($T_{\text{VIDRO}} + \Delta T$).

O efeito das variações deste ΔT entre a cavidade e o vidro foi analisado experimentalmente e também com o auxílio de um modelo matemático aplicado a cada uma das cavidades. As análises paramétricas desenvolvidas com o modelo matemático no item 5.5.1 mostram que a variação positiva ou negativa do ΔT cavidade-vidro tem influência direta sobre o valor do FS. O grau dessa influência dependerá do valor do ΔT aplicado e também da absorção (que causa maior aquecimento) do vidro, como foi demonstrado na comparação entre o vidro incolor e o verde.

Embora a análise com o modelo matemático indique uma variação linear do FS em função da alteração ΔT cavidade-vidro, novas medições realizadas mostraram diferenças entre os resultados experimentais e os simulados com o modelo matemático.

No caso da CP, não foi possível perceber claramente o efeito da alteração do ΔT entre os testes, provavelmente porque a parcela de

ganho por onda longa gerada pelo ΔT é menor do que a incerteza (neste caso o desvio padrão) de medição, uma vez que o vidro tem baixa absorção (incolor 3mm). Por isso, com base nos resultados observados é possível dizer que, para vidros com valores altos de transmissão e baixa absorção da radiação solar, como o incolor, o resultado do FS medido na CP dependerá mais da estabilidade do sistema de medição do que do ΔT cavidade-vidro.

Na CS também o resultado da variação do ΔT cavidade-vidro dos testes experimentais não foi tão evidente sobre o valor do FS como na simulação com o modelo matemático. Isso se deve ao fato de que no próprio equacionamento do método de determinação proposto já existe uma compensação para as perdas de calor. Quando a temperatura da cavidade está acima da temperatura do vidro (que foi o caso das medições realizadas), as perdas por onda longa da cavidade para o vidro são consideradas e adicionadas ao ganho total usado no cálculo do FS. Além disso, o modelo matemático é uma simplificação do processo real de medição. Na CS, o fluxo de calor é determinado por sensores (fluxímetros), o que no modelo matemático é representado apenas como uma superfície de absorção sem resistência térmica. Isso por si só já pode levar a diferenças entre os valores matemáticos e experimentais, mas, além disso, as medidas dos próprios sensores têm incertezas, o que pode aumentar estas diferenças.

Ainda tratando da questão do ΔT cavidade-vidro, a aplicação do fator de correção para igualar o ΔT em todos os testes contribuiu para demonstrar que a CS é mais sensível à variação negativa do ΔT do que a CP. Assim, chegou-se à conclusão de que é necessária a aplicação de uma condição diferenciada de ΔT cavidade-vidro em cada cavidade. Como apenas um tipo de vidro foi testado nesta etapa, esta condição de ΔT ainda não pôde ser plenamente estabelecida para cada cavidade. Por isso, nos testes com outros tipos de vidros, conforme será apresentado no capítulo a seguir, a condição de ΔT cavidade-vidro ainda será ajustada com base nas observações dos próprios resultados experimentais.

Apesar disso, pode-se dizer que a melhoria da primeira para a segunda fase de calibração foi significativa, devido a ajustes e modificações na instrumentação, controle das cavidades e no próprio método de determinação do FS. Também é possível afirmar que os resultados experimentais encontrados nesta segunda fase de calibração foram satisfatórios tanto para a CP quanto para a CS, apresentando uma

boa aproximação com o padrão comparativo estabelecido com a ISO 9050, e permitindo assim dar continuidade aos testes com outros vidros e proteções solares.

Também ficou evidente nos resultados dos testes realizados, que a CS apresenta uma maior estabilidade de medição, sendo o seu desvio padrão sobre o FS médio do vidro incolor 3mm de no máximo $\pm 0,01$ (absoluto). Já na CP, o desvio padrão chegou a $\pm 0,08$ (absoluto).

6 TESTES COM DIFERENTES VIDROS E PROTEÇÕES SOLARES

6.1 VIDROS

6.1.1 Amostras utilizadas

Após a fase de calibração utilizando o vidro incolor 3mm, mais três tipos de vidros foram instalados no calorímetro para determinação do FS. Estes vidros foram:

- Vidro plano verde 6mm;
- Vidro refletivo prata neutro 8mm (laminado Cool-lite 4+4mm);
- Vidro plano incolor 6mm.

Todas as amostras de vidros foram produzidas pela empresa Cebrace Cristal Plano Ltda. O vidro verde e incolor 6mm é do tipo “float”, que é um vidro plano com espessura uniforme e massa homogênea. Já o vidro da linha Laminado Refletivo Cool-lite caracteriza-se por ser composto por duas chapas de vidro intercaladas com uma película plástica (PVB), uma com face metalizada à vácuo e outra do tipo float.

As propriedades ópticas destes três tipos de vidros foram determinadas em laboratório por Caram (2002) para ângulos de incidência entre 0° e 80°. A Tabela 6-1 apresenta estas propriedades juntamente com uma imagem ilustrativa da amostra destacando o efeito da sua transparência. Para estes vidros, foram adotados valores de emissividade (igual 0,84 nas duas faces) e condutividade térmica (igual a 1,000W/mK) obtidos a partir da International Glazing Database (IGDB v11.4) para produtos semelhantes.

Durante as medições, as chapas de vidro (1490mm x 1190mm na cavidade principal; 500mm x 500mm na cavidade secundária) foram instaladas no calorímetro na posição vertical e orientação norte. Em nenhuma das amostras foi utilizada esquadria, sendo a fixação e vedação dos elementos realizada diretamente ao longo do marco de madeira que delimita a abertura das cavidades.

Tabela 6-1. Propriedades ópticas do vidro (Caram, 2002)

Material	Ângulo	Propriedades ópticas totais (300 - 2000nm)			
		Absorção	Reflexão	Transmissão	
Vidro verde 6mm	0	39	7	54	
	10	39	7	54	
	20	40	7	53	
	30	40	8	52	
	40	40	10	50	
	50	43	11	46	
	60	42	15	43	
	70	39	26	35	
	80	30	50	20	
Material	Ângulo	Propriedades ópticas totais (300 - 2000nm)			
		Absorção	Reflexão	Transmissão	
Vidro prata 8mm	0	53	28	19	
	10	53	28	19	
	20	54	28	18	
	30	54	28	18	
	40	54	29	17	
	50	54	30	16	
	60	53	32	15	
	70	48	39	13	
	80	35	56	9	
Material	Ângulo	Propriedades ópticas totais (300 - 2000nm)			
		Absorção	Reflexão	Transmissão	
Vidro incolor 6mm	0	9	10	81	
	10	9	10	81	
	20	9	10	81	
	30	9	11	80	
	40	10	12	78	
	50	11	14	75	
	60	11	18	71	
	70	10	30	60	
	80	11	53	36	

6.1.2 Resultados de FS

Destaca-se inicialmente aqui, a dificuldade da realização de medições em campo, pois estas estão muitas vezes sujeitas às variações ambientais desfavoráveis aos testes, como por exemplo, no caso de medições do FS, a presença de pequenas porções de nebulosidade mesmo em dias de “céu claro”. A influência deste fator pode ser observada nos gráficos de FS que são apresentados a seguir, onde existem algumas descontinuidades na seqüência dos valores do fator solar medido. Além disso, quedas acidentais no funcionamento do sistema de aquisição e controle também prejudicaram algumas leituras.

Apesar disso, os testes com os três tipos de vidros puderam ser realizados em condições que permitiram um tempo mínimo de medição de 30min. O período de estabilização das cavidades que antecede o tempo efetivo de medição também variou de teste para teste, mas em nenhum caso foi inferior a 50 minutos.

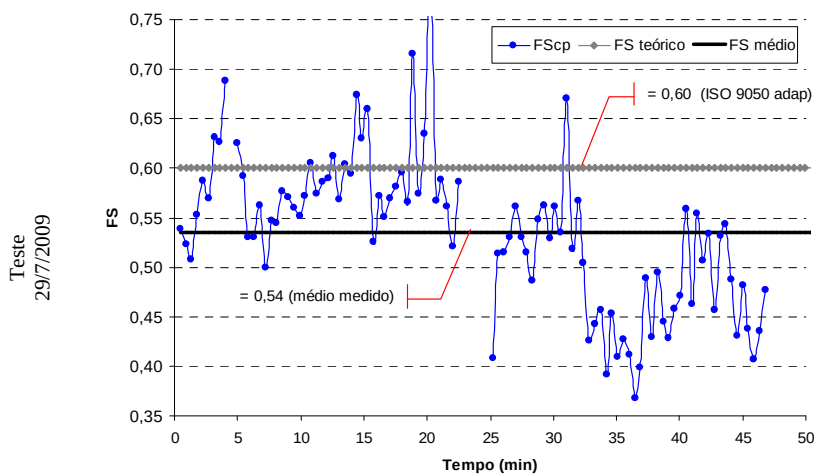
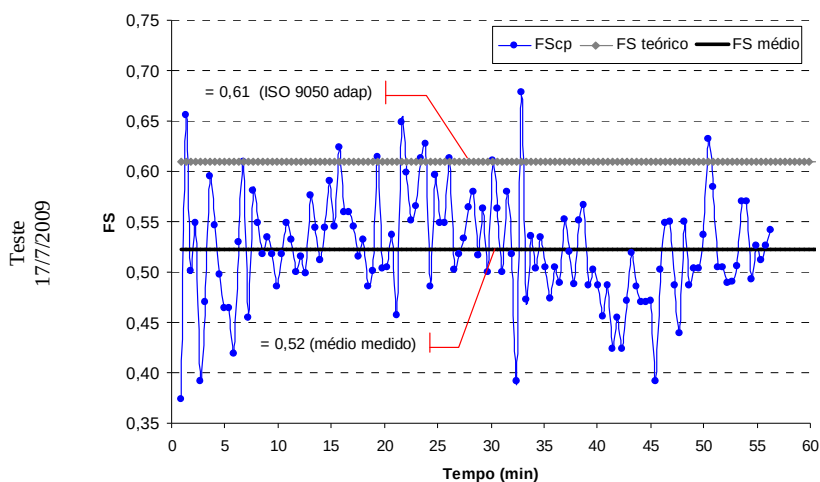
Todas as medições foram realizadas no intervalo de tempo entre às 11h da manhã e às 14h da tarde, durante diferentes dias dos meses de julho e agosto. A amplitude do ângulo de incidência da radiação solar atingida em todas as medições neste período ficou dentro do intervalo de 40° e 50°.

Foi aplicada a estes testes a mesma instrumentação e os mesmos procedimentos de controle empregados na fase final de calibração do calorímetro, descrita no capítulo anterior.

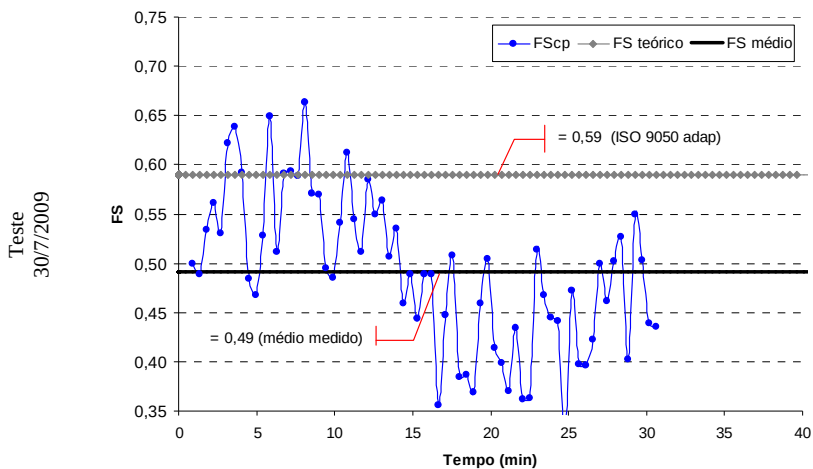
Em relação à condição de ΔT cavidade-vidro, esta foi mantida sempre com um valor negativo, ou seja, com a temperatura da cavidade obrigatoriamente abaixo da temperatura do vidro, conduzindo assim o fluxo de calor na direção do interior da cavidade. No entanto, como já mencionado na fase de calibração, o valor deste ΔT não foi fixado igualmente para todas as amostras, mas buscou-se, através de observações diretas dos valores medidos, encontrar uma condição de equilíbrio e estabilidade para resultados coerentes do FS.

Com isso, os gráficos do Quadro 6-1 ao Quadro 6-6 apresentam, a seguir, os resultados das medições realizadas com as amostras de vidro: verde 6mm; prata 8mm; e incolor 6mm, na CP e na CS, respectivamente. Ao final da série de medições de cada amostra é apresentado um resumo (Tabela 6-2 a Tabela 6-4) com os valores médios do FS medido e as condições gerais de cada teste.

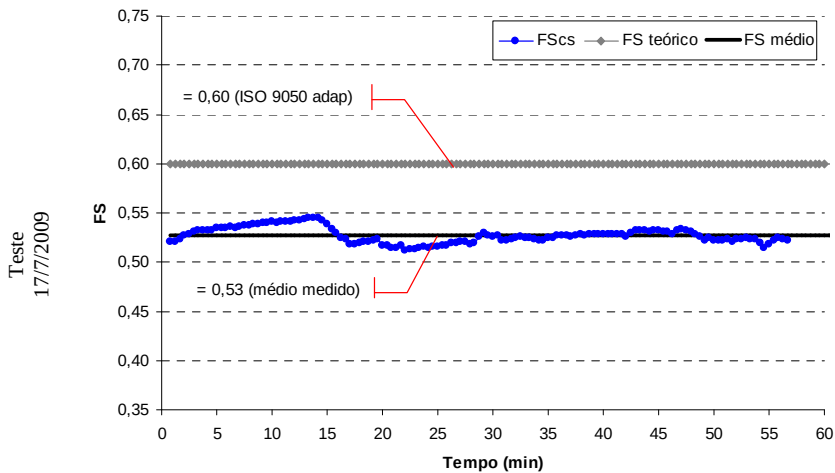
6.1.2.1 Vidro verde 6mm

Quadro 6-1. Resultados de FS medido na CP (vidro verde 6mm)

Continua...



Quadro 6-2. Resultados de FS medido na CS (vidro verde 6mm)



Continua...

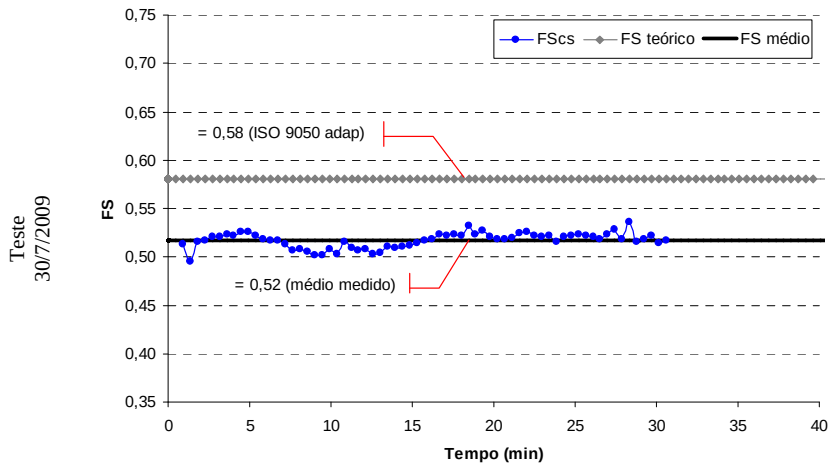
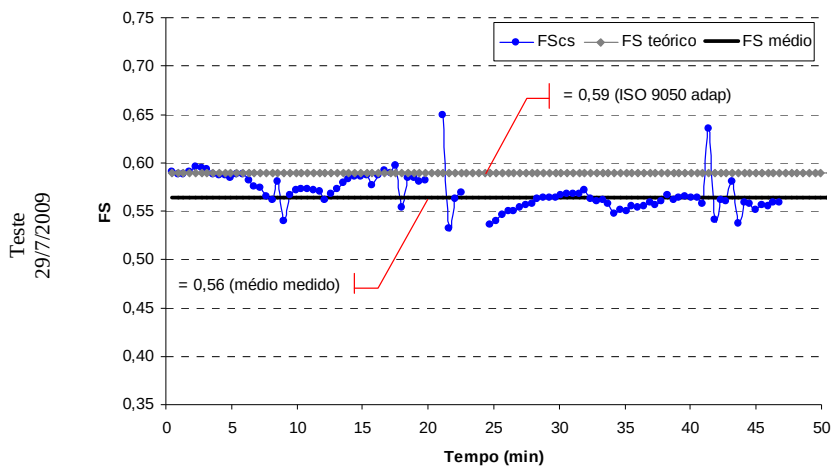


Tabela 6-2. Resumo das medições com o vidro verde 6mm

Cavidade Principal

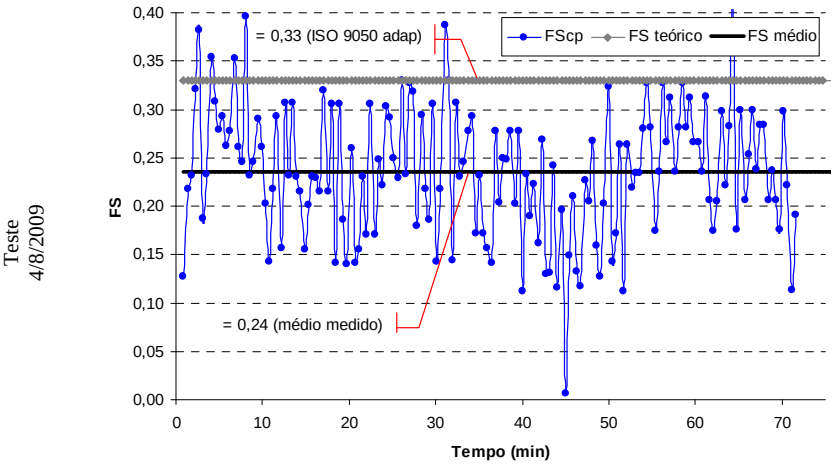
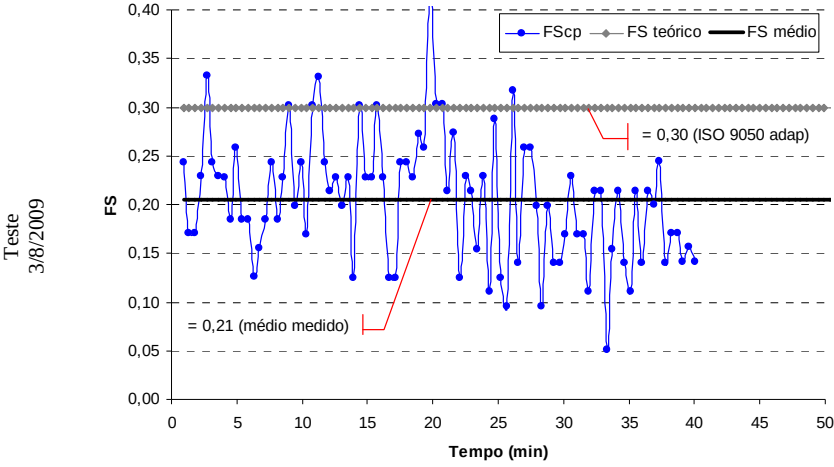
Amostra	TESTE	FS médio ± DesvPad	FS teórico (ISO 9050 adap)	ΔT (Tc-Tve) (°C)	Tc (°C)	Tar int (°C)	Tve (°C)	Tar ext (°C)	h int (W/m²K)	h ext (W/m²K)	Var ext (m/s)	Rad media (W/m²)	Ang Inc (°)	Tempo med (min)
Vidro verde 6mm	17/7/2009	0,52±0,05	0,61	-6,5	38,1	42,9	44,6	25,8	5,8	15,3	2,6	699	41° - 43°	56
	29/7/2009	0,54±0,06	0,60	-7,4	28,0	33,5	35,4	18,7	5,9	17,8	3,0	732	40° - 42°	46
	30/7/2009	0,49±0,06	0,59	-6,0	29,9	35,1	35,9	17,7	5,8	16,3	2,3	729	43° - 44°	30

Cavidade Secundária

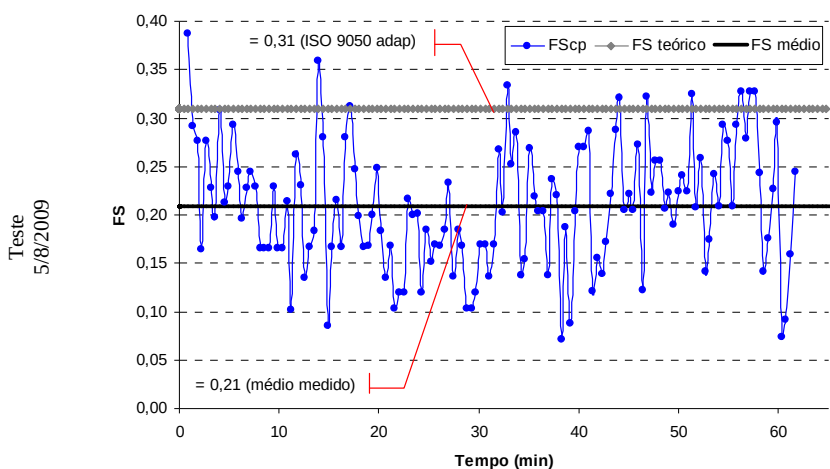
Amostra	TESTE	FS médio ± DesvPad	FS teórico (ISO 9050 adap)	ΔT (Tc-Tve) (°C)	Tc (°C)	Tar int (°C)	Tve (°C)	Tar ext (°C)	h int (W/m²K)	h ext (W/m²K)	Var ext (m/s)	Rad média (W/m²)	Ang Inc (°)	Tempo med (min)
Vidro verde 6mm	17/7/2009	0,53±0,01	0,60	-0,9	46,7	51,2	47,8	25,8	5,0	15,3	2,6	699	41° - 43°	56
	29/7/2009	0,56±0,02	0,59	-2,7	35,6	42,2	38,3	18,7	5,3	17,8	3,0	732	40° - 42°	46
	30/7/2009	0,52±0,01	0,58	-2,9	36,5	42,0	39,4	17,7	5,3	16,3	2,3	729	43° - 44°	30

6.1.2.2 Vidro prata 8mm

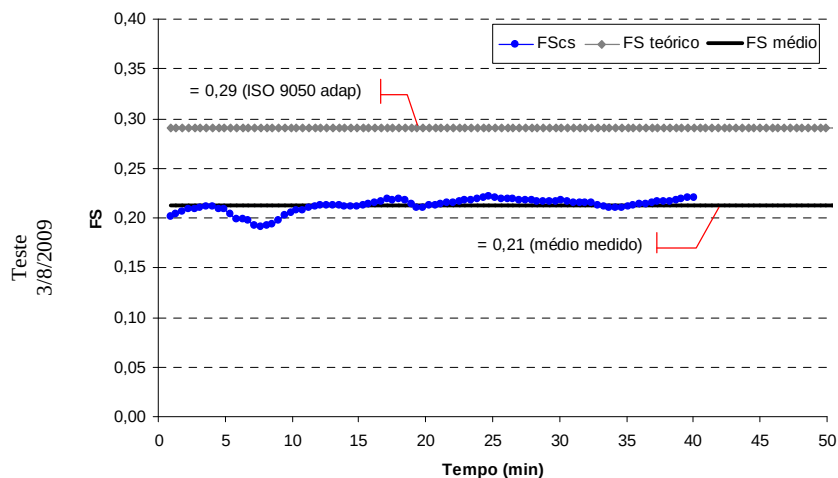
Quadro 6-3. Resultados de FS medido na CP (vidro prata 8mm)



Continua...



Quadro 6-4. Resultados de FS medido na CS (vidro prata 8mm)



Continua...

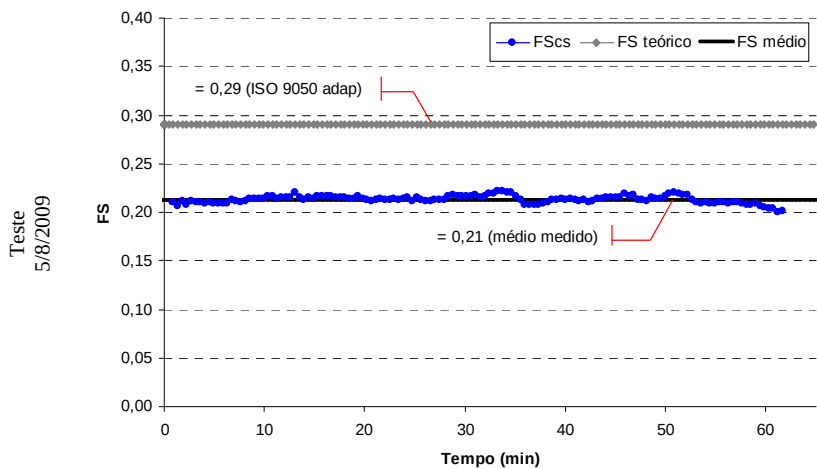
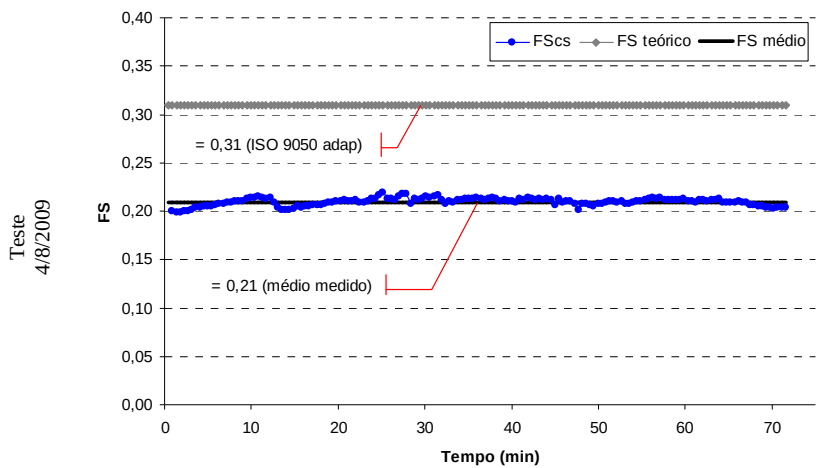


Tabela 6-3. Resumo das medições com o vidro prata 8mm

Cavidade Principal

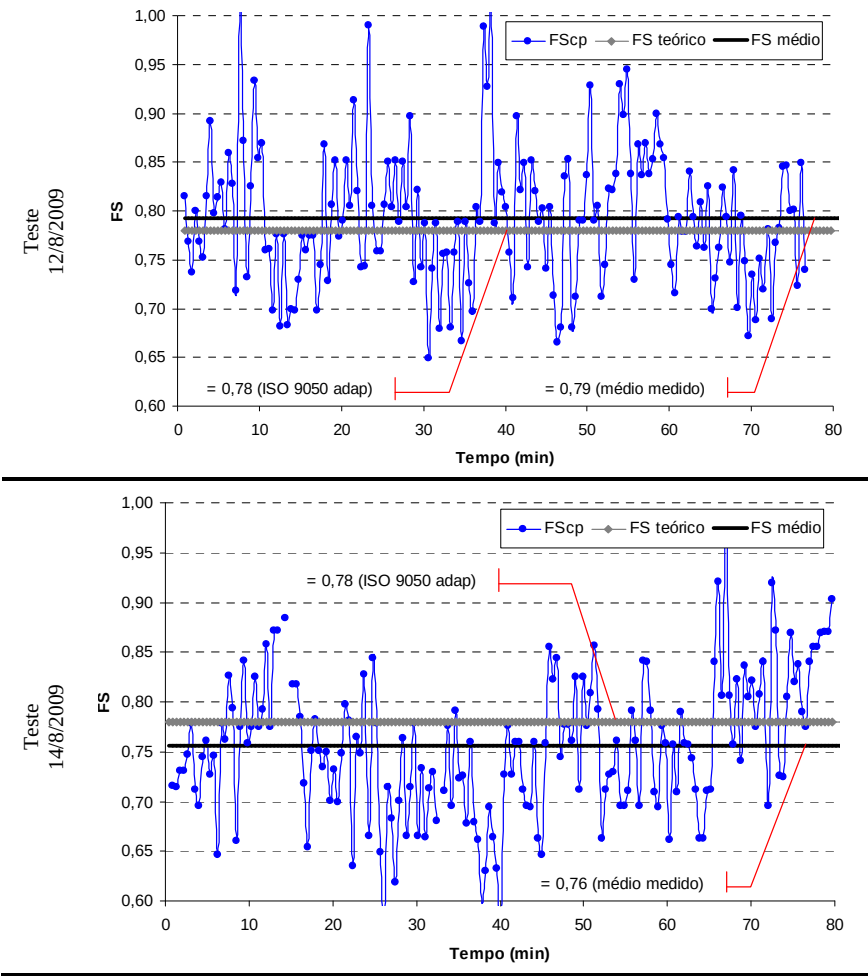
Amostra	TESTE	FS médio ± DesvPad	FS teórico (ISO 9050 adap)	ΔT (Tc-Tve) (°C)	Tc (°C)	Tar int (°C)	Tve (°C)	Tar ext (°C)	h int (W/m²K)	h ext (W/m²K)	Var ext (m/s)	Rad media (W/m²)	Ang Inc (°)	Tempo med (min)
Vidro prata 8mm	3/8/2009	0,21±0,06	0,30	-7,8	35,1	39,9	42,9	22,2	5,9	18,2	-	749	45° - 46°	38
	4/8/2009	0,24±0,07	0,33	-10,0	31,9	37,2	41,9	21,2	6,0	13,7	-	727	45° - 48°	71
	5/8/2009	0,21±0,06	0,31	-10,4	32,5	37,4	42,9	24,6	6,0	16,4	2,5	674	47° - 50°	61

Cavidade Secundária

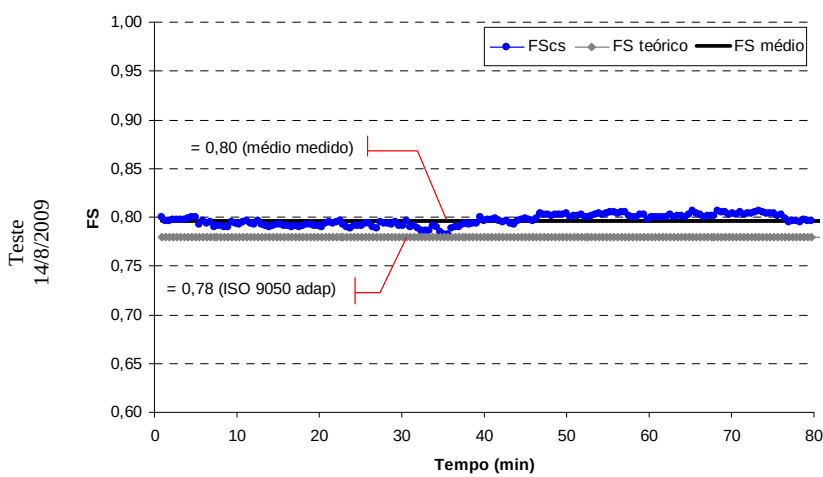
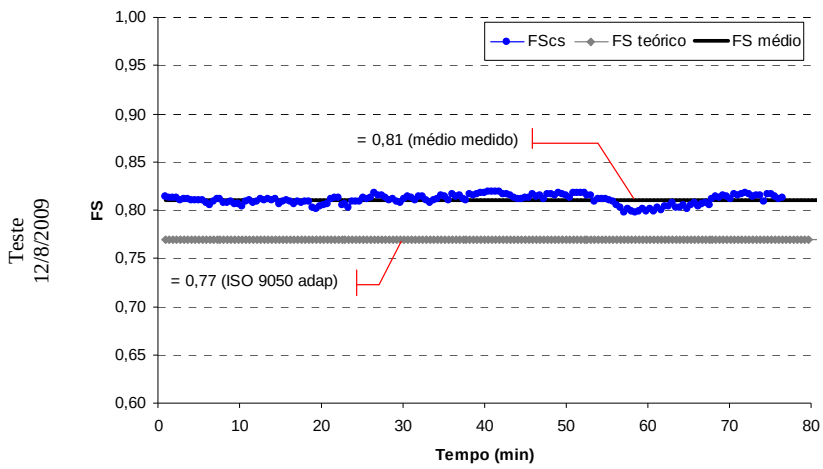
Amostra	TESTE	FS médio ± DesvPad	FS teórico (ISO 9050 adap)	ΔT (Tc-Tve) (°C)	Tc (°C)	Tar int (°C)	Tve (°C)	Tar ext (°C)	h int (W/m²K)	h ext (W/m²K)	Var ext (m/s)	Rad média (W/m²)	Ang Inc (°)	Tempo med (min)
Vidro prata 8mm	3/8/2009	0,21±0,01	0,29	-2,7	42,0	49,8	44,7	22,2	5,3	18,2	-	749	45° - 46°	38
	4/8/2009	0,21±0,00	0,31	-2,7	44,4	51,0	47,1	21,2	5,3	13,7	-	727	45° - 48°	71
	5/8/2009	0,21±0,00	0,29	-2,5	41,2	47,9	43,7	24,6	5,2	16,4	2,5	674	47° - 50°	61

6.1.2.3 Vidro incolor 6mm

Quadro 6-5. Resultados de FS medido na CP (vidro incolor 6mm)



Quadro 6-6. Resultados de FS medido na CS (vidro incolor 6mm)



6.1.2.4 Considerações sobre os resultados de FS para os vidros

Novamente, conforme observado na fase de calibração, os resultados de FS para os três diferentes vidros testados mostraram que a CS tem maior estabilidade de medição, com o desvio padrão chegando a no máximo $\pm 0,02$ (absoluto). A CP, por sua vez, manteve praticamente a mesma faixa de desvio padrão da fase de calibração, entre $\pm 0,05$ e $\pm 0,08$ (absoluto). Apesar dessa diferença na estabilidade dos valores instantâneos medidos em cada cavidade, os resultados do FS médio encontrado em cada uma delas para o mesmo teste foi sempre bastante próximo, tanto na fase de calibração (vidro 3mm) como agora, como mostra a Tabela 6-5.

Tabela 6-5. Comparação entre FS médio medido na CP e CS

Amostra	TESTE	FS médio na CP	FS médio na CS	Diferença FS médio (CP-CS)
Vidro incolor 3mm	22/5/2009	0,83	0,85	-0,02
	8/6/2009	0,83	0,86	-0,03
	30/6/2009	0,84	0,87	-0,03
	12/7/2009	0,79	0,85	-0,06
	13/7/2009	0,84	0,85	-0,01
Vidro verde 6mm	17/7/2009	0,52	0,53	-0,01
	29/7/2009	0,54	0,56	-0,02
	30/7/2009	0,49	0,52	-0,03
Vidro prata 8mm	3/8/2009	0,21	0,21	0,00
	4/8/2009	0,24	0,21	0,03
	5/8/2009	0,21	0,21	0,00
Vidro incolor 6mm	12/8/2009	0,79	0,81	-0,02
	14/8/2009	0,76	0,80	-0,04

Sobre a condição de ΔT cavidade-vidro, cabe ressaltar que, ao longo das medições, buscou-se experimentalmente ajustar valores de ΔT que proporcionassem resultados coerentes de FS nas duas cavidades. Este ajuste de ΔT era procurado durante o período de estabilização que antecedia o tempo efetivo de medição, sendo o mesmo mantido durante o teste. Por exemplo, se durante o período de estabilização o ΔT

estivesse muito elevado (negativamente), forçando assim os ganhos e resultando em valores de FS acima de 1,00 (o que é incoerente), o operador reajustava a condição de controle reduzindo o ΔT para obter resultados coerentes (dentro da faixa de 0 a 1). O contrário também era possível, caso a cavidade estivesse muito aquecida e o ΔT muito baixo ou elevado positivamente (perdendo calor), os valores de FS poderiam ser próximos à zero ou negativos, o que é incoerente, sendo também necessário o ajuste do ΔT .

Ainda em relação a esta condição de ΔT cavidade-vidro, dois pontos são importantes. O primeiro ponto a ser destacado é a diferença que existe entre os valores aplicados na CP e na CS, como já havia sido considerado na fase de calibração. Os valores absolutos e a faixa de ajuste do ΔT na CP são superiores aos da CS. Na CP os valores aplicados aos três vidros ficaram entre $-3,7^{\circ}\text{C}$ e $-10,4^{\circ}\text{C}$, já na CS esta variação foi de $-0,1^{\circ}\text{C}$ a $-2,9^{\circ}\text{C}$.

O segundo ponto, é que os ajustes de ΔT são diferenciados para cada vidro testado. Analisando os resultados da CP, pode-se observar que os vidros com parcela de absorção de radiação elevada e transmissão baixa, como o verde e prata, tiveram os valores mais elevados (em termos absolutos) de ΔT . Em média, a faixa de ΔT cavidade-vidro aplicada nos testes com estes vidros ficou entre $-6,0^{\circ}\text{C}$ e $-10,4^{\circ}\text{C}$. Já nos vidros com menor índice de absorção da radiação solar e transmissão alta, como o incolor, o ΔT aplicado foi reduzido, ficando em torno de $-3,4^{\circ}\text{C}$.

Na CS, o valor de ΔT para o vidro verde e prata ficou em média, entre $-2,5^{\circ}\text{C}$ e $-3,0^{\circ}\text{C}$, já para o vidro incolor, o ΔT foi inferior a -1°C . Embora exista uma coerência na relação tipo de vidro e maior ou menor ΔT entre a CP e a CS, em um dos testes (17/7/2009) com o vidro verde na CS o ΔT ficou abaixo de -1°C , sem alterar significativamente o resultado do FS.

De modo geral, pode-se dizer que este efeito de diferenciação do ΔT entre os tipos de vidros e as cavidades está provavelmente associado às propriedades dos vidros e às dimensões das cavidades. Em vidros com transmissão alta e absorção reduzida, a parcela da energia absorvida e emitida para o interior por radiação em onda longa e convecção é pequena se comparada à parcela transmitida diretamente, tendo menor influência sobre o valor final do FS. Por isso, mesmo um ΔT reduzido, que induza a direção do fluxo de calor para o interior

da cavidade, já é suficiente para estabilizar a medição numa faixa coerente de FS.

Já nos caso dos vidros com baixa transmissão e alta absorção de radiação solar, a parcela da energia absorvida e emitida para o interior por onda longa e convecção é bem mais significativa na composição do FS. No entanto, esta parcela é dependente do ΔT . Por isso, devido à forma, às maiores dimensões e ao processo de medição, a CP acaba não tendo sensibilidade suficiente para quantificar esta parcela e não atinge resultados coerentes de FS quando o ΔT é reduzido.

Na CS, o efeito do ΔT sobre o FS de vidros com diferentes propriedades ópticas pode estar sendo minimizado devido à proximidade dos sensores com o vidro, permitindo captar melhor tanto a radiação solar transmitida diretamente como a parcela absorvida e reemitida pelo vidro. Além disso, o processo de medição fluximétrico é mais estável e os sensores são mais sensíveis ao calor do que a CP, o que permite quantificar frações menores de energia sem grandes incertezas. Por isso, mesmo com ΔT pequeno, a CS consegue realizar medições em vidros com baixa transmissão e absorção elevada da radiação solar.

Sobre a CS, é interessante destacar também outro ponto. Os resultados experimentais mostram uma elevação da temperatura do ar no interior da cavidade, mantendo-se este valor em média sempre acima da temperatura do vidro quanto da temperatura da cavidade. Teoricamente, era esperado que a temperatura do ar se mantivesse entre estes dois últimos valores, como acontece na CP. A explicação para este fenômeno pode estar ligada a dois fatores. Primeiro, devido a um pré-aquecimento do ar antes do sistema de resfriamento entrar em funcionamento, enquanto as superfícies ainda estão superaquecidas. Segundo, que a superfície dos fluxímetros poderia estar atingindo uma temperatura mais elevada do que a estrutura da cavidade onde o sensor está fixado, aquecendo ainda mais o pequeno volume de ar enclausurado na câmara.

Com base nestas observações experimentais, é possível assim estimar faixas de aplicação de ΔT cavidade-vidro para a CP e CS em função do tipo de vidro, conforme mostra a Tabela 6-6.

Tabela 6-6. Faixas de ΔT cavidade-vidro em função da absorção do vidro

Absorção do vidro (α)	ΔT ($T_c - T_{ve}$)	
	CP	CS
($\alpha < 0,10$)	-2 até -5°C	0 até -1°C
($0,10 < \alpha < 0,40$)	-5 até -8°C	-1 até -2°C
($\alpha > 0,40$)	-8 até -12°C	-2 até -3°C

Outra análise importante sobre os resultados das medições é a comparação com os valores estimados pela ISO 9050. Para obter o valor de “FS teórico” através da ISO 9050, foram utilizados na equação de cálculo proposta pela norma, os coeficientes de troca médios segundo as condições do período de cada medição, tornando o FS supostamente mais realístico. Levando isso em conta, é interessante nesta comparação, que tanto na CP quanto na CS, os vidros com menor absorção (incolor 3mm e 6mm) apresentam uma maior aproximação entre os dois resultados de FS (medido e teórico), com uma diferença máxima de 5,2%. Já à medida que os vidros se tornam mais absorventes, esta diferença cresce, ficando entre 5,1% e 16,9% para o vidro verde, e entre 27,3% e 32,3% para o vidro prata. Essas diferenças podem ser observadas na Tabela 6-1 para todos os testes.

A explicação para este aumento na diferença entre os valores teóricos e experimentais pode ser relacionada com duas questões. Primeiro, à medida que quantitativamente a energia (calor) transmitida pelo vidro diminui, aumentam as incertezas no resultado do FS obtido na medição. Segundo, existe a possibilidade da razão entre coeficientes de troca ($h_{int}/(h_{int}+h_{ext})$) superestimar a parcela absorvida e reemitida pelo vidro para interior do calorímetro, por isso, nos vidros mais absorventes a diferença entre o FS medido e teórico é maior, visto que neste caso a parcela de ganho devido à absorção tem maior peso sobre FS.

E ainda uma terceira hipótese é que o calorímetro não esteja sendo sensível a toda a fração absorvida e reemitida pelo vidro para o interior conforme considerada pela ISO 9050, visto que os valores medidos para os vidros mais absorventes (verde e prata) são sempre inferiores aos valores estimados com a norma. Isto poderia ser corrigido, pois, como já discutido anteriormente, o aumento do ΔT cavidade-vidro pode causar o aumento desta fração e melhorar a aproximação com os valores teóricos. No entanto, esta questão ainda fica em aberto, visto que a ISO 9050 não estabelece condições de temperatura.

Tabela 6-7. Comparação entre o FS medido e teórico (testes com vidros)

Amostra	TESTE	FS médio na CP	FS teórico (ISO9050 adap)	Diferença (absoluta)	Diferença (%)	FS médio na CS	FS teórico (ISO9050 adap)	Diferença (absoluta)	Diferença (%)
Vidro incolor 3mm	22/5/2009	0,83	0,84	0,01	1,2%	0,85	0,84	-0,01	-1,2%
	8/6/2009	0,83	0,84	0,01	1,2%	0,86	0,84	-0,02	-2,4%
	30/6/2009	0,84	0,84	0,00	0,0%	0,87	0,84	-0,03	-3,6%
	12/7/2009	0,79	0,83	0,04	4,8%	0,85	0,83	-0,02	-2,4%
	13/7/2009	0,84	0,83	-0,01	-1,2%	0,85	0,83	-0,02	-2,4%
Vidro verde 6mm	17/7/2009	0,52	0,61	0,09	14,8%	0,53	0,60	0,07	11,7%
	29/7/2009	0,54	0,60	0,06	10,0%	0,56	0,59	0,03	5,1%
	30/7/2009	0,49	0,59	0,10	16,9%	0,52	0,58	0,06	10,3%
Vidro prata 8mm	3/8/2009	0,21	0,30	0,09	30,0%	0,21	0,29	0,08	27,6%
	4/8/2009	0,24	0,33	0,09	27,3%	0,21	0,31	0,10	32,3%
	5/8/2009	0,21	0,31	0,10	32,3%	0,21	0,29	0,08	27,6%
Vidro incolor 6mm	12/8/2009	0,79	0,78	-0,01	-1,3%	0,81	0,77	-0,04	-5,2%
	14/8/2009	0,76	0,78	0,02	2,6%	0,80	0,78	-0,02	-2,6%

6.2 PROTEÇÕES SOLARES INTERNAS

6.2.1 Amostras utilizadas

Também foram realizadas medições utilizando os seguintes tipos de proteções solares de uso interno:

- Persiana horizontal (cor branca);
- Persiana horizontal (cor preta);
- Cortina rolô (tecido na cor branca).

Todos estes produtos estão comercialmente disponíveis no mercado brasileiro e são distribuídos pela empresa HunterDouglas, que doou as amostras para esta pesquisa.

As persianas testadas são fabricadas em alumínio, com lâminas de fechamento de 16mm de largura e 0,650mm de espessura. O espaçamento entre as lâminas é de aproximadamente 12,7mm. Durante as medições, as lâminas foram posicionadas em um ângulo de fechamento de aproximadamente 45° em relação à horizontal (girando no sentido horário).

Já a cortina é denominada pelo fabricante como “Rolô Light Screen White LSN – 088”, cujo tecido é composto de 35% fibra de vidro e 65% PVC. O Quadro 6-7 apresenta uma imagem com detalhes de cada uma das amostras e também a configuração após a sua instalação no calorímetro.

Em todos os testes com as proteções solares, o vidro incolor 3mm (vidro de referência) foi utilizado sempre como elemento de fechamento transparente associado (Obs.: as propriedades ópticas deste vidro já foram apresentadas no capítulo 4).

Agora, apenas a cavidade principal (CP) foi empregada para a realização das verificações do FS. Novamente, em nenhuma das amostras foram utilizadas esquadrias, sendo a fixação dos elementos realizada diretamente no marco de madeira que delimita a abertura da cavidade principal.

Quadro 6-7. Detalhes das amostras de proteções solares internas



Detalhe – Persiana
(branca)



Instalação no calorímetro – Persiana (branca)



Detalhe – Persiana
(preta)



Instalação no calorímetro – Persiana (preta)



Detalhe – Rolô



Instalação no calorímetro – Rolô

6.2.2 Resultados de FS

Nesta nova série de testes, todas as medições foram realizadas no intervalo de tempo entre as 10h30min da manhã e as 14h da tarde, durante dias da segunda quinzena do mês de agosto e início de setembro de 2009. A amplitude do ângulo de incidência da radiação solar coberta nas medições neste período ficou entre 50° e 60°. Já o tempo mínimo de medição para os testes com as três proteções internas foi de 45min, sendo que o período mínimo de estabilização observado para a cavidade principal antes do tempo efetivo de medição foi de 40min.

Nestas medições também foi utilizada a mesma instrumentação e os mesmos procedimentos de controle empregados na fase final de calibração do calorímetro. No entanto, visto que a cavidade está sombreada e o fluxo de calor agora é inferior ao fluxo existente quando apenas o vidro é utilizado, então o ΔT cavidade-vidro foi mantido em torno de -10°C, para que o calorímetro estivesse em melhores condições de quantificar o ganho devido ao aquecimento do vidro e da proteção solar.

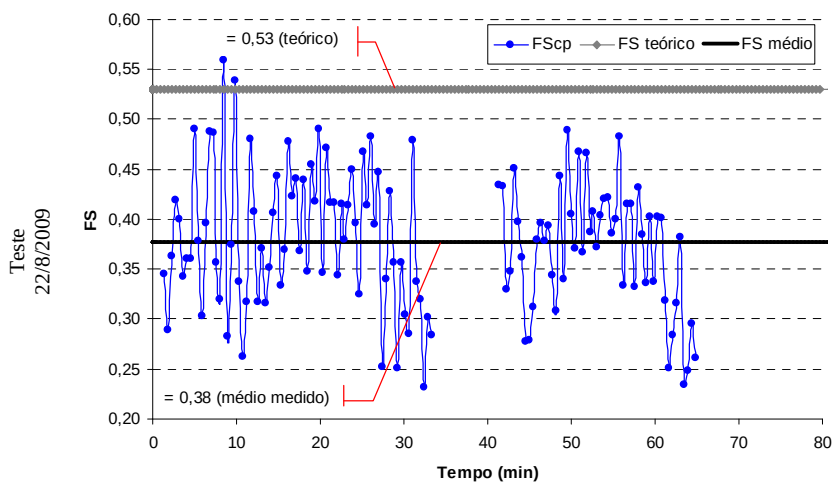
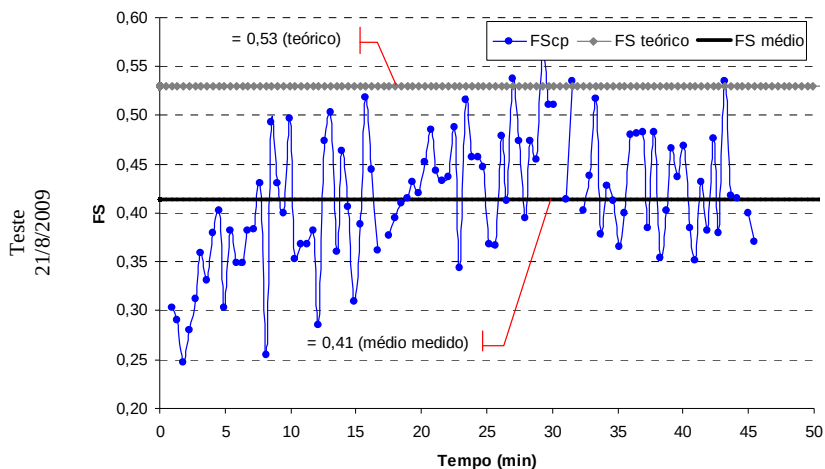
Como valor de referência para comparação com os resultados experimentais, o FS teórico foi estimado com base na ASHRAE (2005), onde no caso de proteções solares internas uma aproximação pode ser obtida de modo simplificado pela multiplicação do FS do vidro pelo IAC (Interior Solar Attenuation Coefficient) da proteção solar. Assim, o FS teórico para cada tipo de proteção foi obtido assumindo o FS do vidro incolor 3mm (para ângulo de incidência de 55°) igual a 0,78, e os seguintes valores de IAC (ASHRAE, 2005):

- 0,68 para persiana clara a 45° (Ref.: Table 19);
- 0,75 para persiana escura a 45° (Ref.: Table 19);
- 0,40 para cortina com tecido branco (Ref.: Table 19).

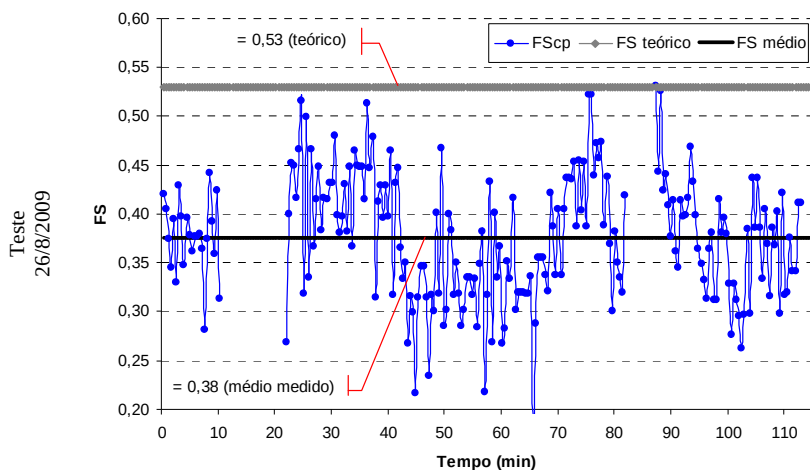
A seguir, os gráficos do Quadro 6-8 ao Quadro 6-10 apresentam os resultados das medições realizadas com as três amostras de proteções solares associadas ao vidro incolor 3mm. Ao final da série de medições, é apresentado um resumo (Tabela 6-8) com os valores médios do FS medido e as condições gerais de cada teste.

6.2.2.1 Persiana horizontal (branca)

Quadro 6-8. Resultados de FS medido na CP
(persiana horizontal - branca - 45°)

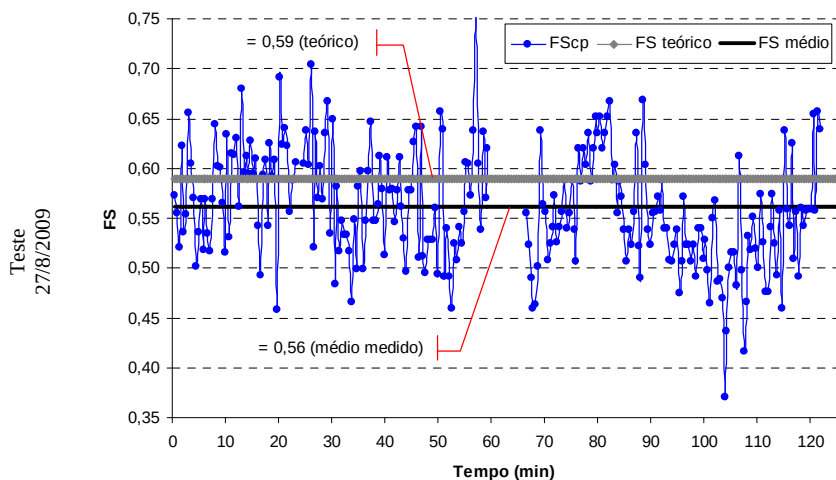


Continua...



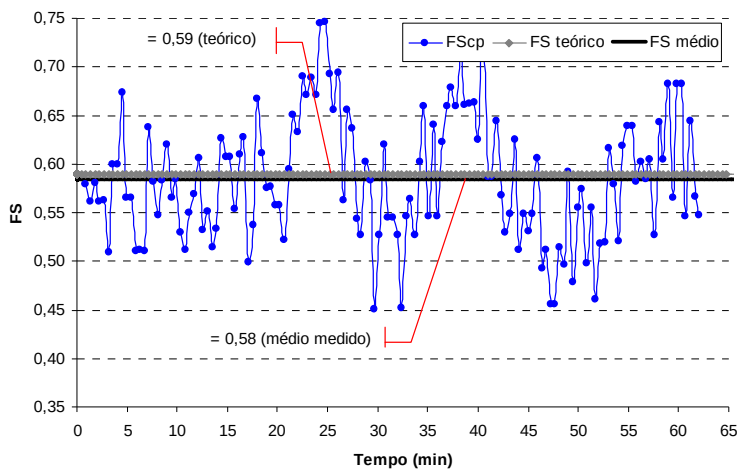
6.2.2.2 Persiana horizontal (preta)

**Quadro 6-9. Resultados de FS medido na CP
(persiana horizontal - preta - 45°)**

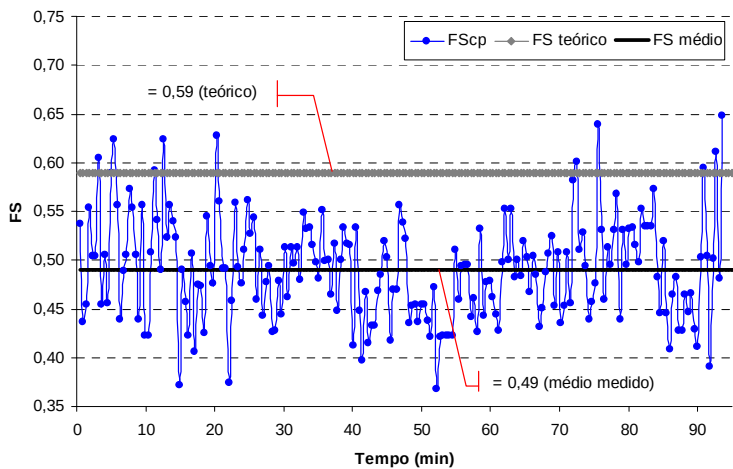


Continua...

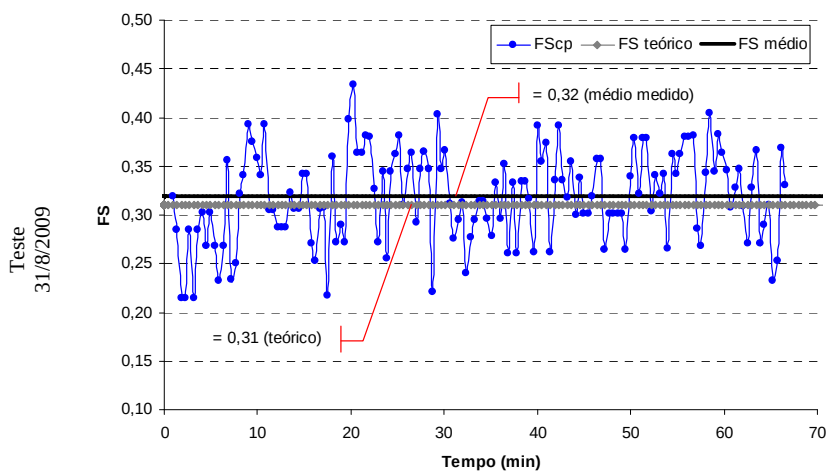
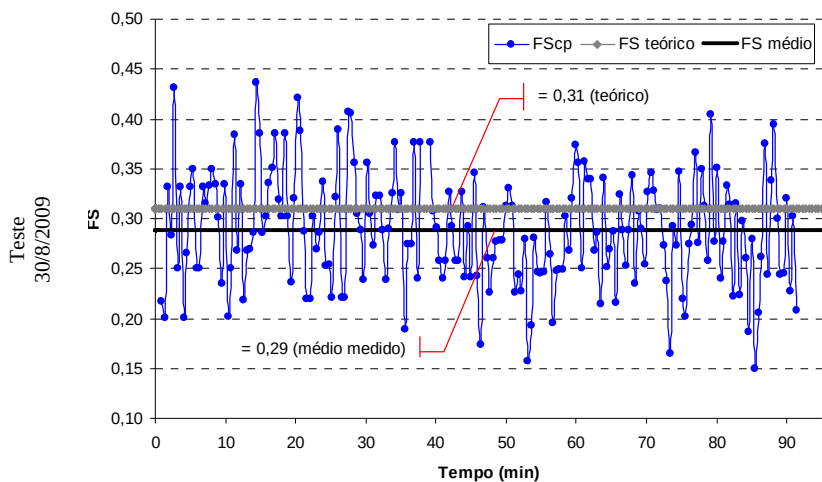
Teste
28/8/2009



Teste
29/8/2009



6.2.2.3 Cortina rolô

Quadro 6-10. Resultados de FS medido na CP (rolô - branca)

Continua...

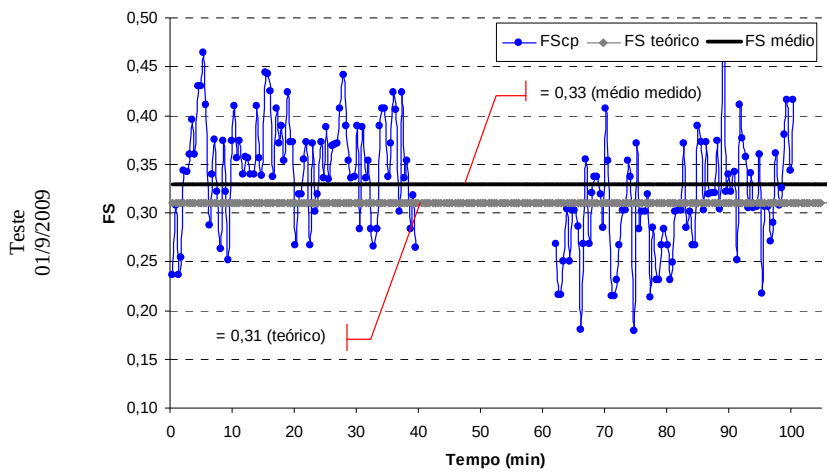


Tabela 6-8. Resumo das medições com as proteções solares internas

Cavidade Principal														
Amostra	TESTE	FS médio ± DesvPad	FS teórico	ΔT (Tc-Tve) (°C)	Tc (°C)	Tar int (°C)	Tve (°C)	Tar ext (°C)	h int (W/m²K)	h ext (W/m²K)	Var ext (m/s)	Rad media (W/m²)	Ang Inc (°)	Tempo med (min)
Persiana branca 45°	21/8/2009	0,41±0,07	0,53	-8,4	26,5	34,4	34,9	20,2	5,9	19,1	3,0	706	53° - 57°	45
	22/8/2009	0,38±0,07	0,53	-8,6	27,9	34,8	36,5	18,2	5,9	16,5	2,5	634	50° - 52°	65
	26/8/2009	0,38±0,06	0,53	-10,4	31,7	39,5	42,1	24,8	6,0	15,4	2,1	662	52° - 57°	113
Persiana preta 45°	27/8/2009	0,56±0,06	0,59	-10,0	32,6	49,4	42,6	26,0	6,0	16,9	2,5	673	52° - 55°	121
	28/8/2009	0,58±0,06	0,59	-10,8	33,9	49,4	44,7	26,7	6,0	14,8	2,0	589	54° - 58°	62
	29/8/2009	0,49±0,06	0,59	-11,1	35,6	52,0	46,7	28,9	6,0	16,2	3,6	635	54° - 58°	93
Rolô branco	30/8/2009	0,29±0,05	0,31	-10,0	32,3	36,2	42,3	27,4	6,0	17,7	3,7	636	55° - 60°	90
	31/8/2009	0,32±0,05	0,31	-8,6	31,9	35,4	40,5	26,9	5,9	18,0	4,1	604	56° - 60°	63
	1/9/2009	0,33±0,05	0,31	-12,5	36,4	40,0	48,9	30,1	6,1	14,8	3,4	630	54° - 57°	100

6.2.2.4 Considerações sobre os resultados de FS para as proteções internas

Destacando novamente a variação do desvio padrão dos resultados do FS médio medido, observa-se que também para os testes com proteções internas, a CP manteve praticamente a mesma faixa de variação apresentada nos testes anteriores, que desta vez ficou entre $\pm 0,05$ e $\pm 0,07$ (absoluto).

Já os valores do ΔT cavidade-vidro foram mantidos em média dentro da faixa de -8°C e -12°C . De modo geral, nestas medições os valores de coeficiente global de troca (h) interno e externo, bem como a radiação incidente, também foram bastante semelhantes em todos os testes. Esta boa aproximação entre as condições de medição proporciona uma melhor base para comparação entre os parâmetros medidos.

Comparando o FS obtido para as duas persianas, em termos de sombreamento fica evidente o melhor desempenho da amostra de cor branca sobre a de cor preta. Calculando uma média a partir do FS medido nos três testes (persiana branca = 0,39 e preta = 0,54), a persiana de cor preta tem um acréscimo de aproximadamente 0,15 (absoluto) em relação ao FS da persiana branca, ou seja, um ganho de calor 39% maior do que um produto com formato idêntico, porém com coloração diferente.

Fazendo a mesma comparação entre o rolô (com FS médio dos três testes = 0,31) e as duas persianas, teríamos a persiana preta com aproximadamente 0,23 (absoluto) acima do resultado do FS do rolô, ou um ganho de calor 73% maior. Já o FS da persiana branca está aproximadamente 0,08 (absoluto) acima do FS do rolô, o que significa um aumento de 24% no ganho de calor.

Outra análise importante é a comparação com os valores estimados pela ASHRAE. A Tabela 6-9 mostra as diferenças percentuais e absolutas entre o FS medido e teórico. Observa-se que as melhores aproximações ocorreram para a persiana preta e o rolô branco, chegando na maioria dos testes a diferenças inferiores a 5%. Já em todos os testes com a persiana branca estas diferenças foram mais significativas, ficando entre 22% e 29%.

A título de informação, cabe destacar ainda que das três amostras testadas apenas a cortina rolô apresentava informações técnicas sobre seu desempenho frente à radiação solar. O fabricante apresentou, no catálogo do produto, o valor do coeficiente de sombreamento (0,59)

para a amostra em questão. A partir deste número, é possível deduzir (multiplicando-o por 0,87) o valor do FS, que neste caso seria igual a 0,51.

**Tabela 6-9. Comparação entre o FS medido e teórico
(testes com proteções internas)**

Amostra	TESTE	FS médio na CP	FS teórico (ASHRAE)	Diferença (absoluta)	Diferença (%)
Persiana branca 45°	21/8/2009	0,41	0,53	0,12	22,7%
	22/8/2009	0,38	0,53	0,15	28,4%
	26/8/2009	0,38	0,53	0,15	28,4%
Persiana preta 45°	27/8/2009	0,56	0,59	0,02	4,3%
	28/8/2009	0,58	0,59	0,01	0,9%
	29/8/2009	0,49	0,59	0,10	16,2%
Rolô branco	30/8/2009	0,29	0,31	0,02	7,1%
	31/8/2009	0,32	0,31	-0,01	-2,6%
	1/9/2009	0,33	0,31	-0,02	-5,8%

Além dos valores de FS, um resultado que chama a atenção são os valores de temperatura do ar atingidos no interior da cavidade. Nos testes com a persiana branca, esta temperatura variou entre 34°C e 40°C, já nos testes com a persiana preta (que tem um formato idêntico) este valor ficou em média entre 49°C e 52°C, ocorrendo um acréscimo de pelo menos 9°C basicamente devido à diferença de cor. Já no caso da cortina rolô, a temperatura do ar ficou entre 35°C e 40°C, praticamente os mesmos valores encontrados com a persiana branca.

6.3 PROTEÇÕES SOLARES EXTERNAS

6.3.1 Amostras utilizadas

Apenas um tipo de proteção solar externa foi submetido ao teste de determinação do FS utilizando o calorímetro. O modelo escolhido foi um brise horizontal com lâminas na cor branca, também fabricado pela empresa HunterDouglas e denominado comercialmente como *Metalbrise*.

As dimensões transversais da lâmina que compõem o brise podem ser observadas na Figura 6-1, sendo o espaçamento entre elas (de centro a centro) igual a 56mm.

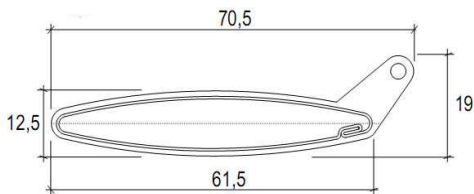


Figura 6-1. Dimensões da lâmina (brise horizontal) – Fonte: HunterDouglas

O brise foi instalado sobre a cavidade principal de medição, sendo mantido o vidro incolor 3mm como elemento transparente. As lâminas foram posicionadas em um ângulo de fechamento de aproximadamente 45° em relação à horizontal (sentido horário), gerando um sombreamento total na área envidraçada. O Quadro 6-11 apresenta imagens com o posicionamento e instalação do brise no calorímetro.

Quadro 6-11. Posicionamento das lâminas e instalação do brise no calorímetro



Detalhe – Brise horizontal a 45°



Instalação no calorímetro – Brise horizontal

6.3.2 Resultados de FS

Todas as medições realizadas com o brise ocorrem no intervalo entre as 10h30min da manhã e as 14h da tarde, durante dois dias da segunda quinzena do mês de outubro e um dia da primeira semana de novembro. Em Florianópolis, nesta época do ano, a altura solar já é elevada, por isso a amplitude do ângulo de incidência da radiação solar coberta nas medições ficou entre 70° e 80°. Em consequência disso, os níveis de radiação sobre o plano de medição foram baixos, mantendo-se aproximadamente entre 300W/m² e 400W/m². O tempo mínimo de medição para os testes foi de 30 minutos, sendo o período inicial mínimo observado para a estabilização da cavidade principal também de 30min. Já o ΔT cavidade-vidro aplicado durante os testes variou na faixa entre -1°C e -8°C.

Nestas condições de medição, e ainda tendo em vista que o vidro está totalmente sombreado (recebendo apenas porções de radiação solar difusa mais a radiação refletida pelo brise), o ganho de calor esperado é bastante reduzido. Nas medições utilizando a CP, este ganho de calor reduzido gera uma dificuldade de medição, visto que o resultado do FS será dependente da variação da temperatura da água que circula na cavidade. Quando esta variação na temperatura da água é muito pequena, as incertezas do processo de medição passam a ser bastante significativas em relação ao resultado do FS. Como já discutido nos capítulos anteriores, algumas destas incertezas estão vinculadas ao funcionamento do banho térmico, em função das perturbações que o controle da temperatura da água ocasiona. Por isso, os testes com o brise foram classificados em duas condições de medição: uma com o banho térmico desligado (“off”) e outra com o banho ligado (“on”). Na condição de banho “off”, a água continua circulando pelo sistema, mas sem controle de temperatura.

Como valor de referência para comparação com os resultados experimentais, o FS teórico foi estimado com base nas considerações da ASHRAE (2005). No caso dos brises, uma simplificação para estimar o FS pode ser obtida na forma da equação [6.1]:

$$FS_{brise} = T_{brise} \cdot SHGC(D) \quad [6.1]$$

Aqui, T_{brise} representa a parcela de radiação solar que passa através do brise de forma difusa, e $SHGC(D)$ é o FS do vidro para radiação difusa. O $SHGC(D)$ é calculado pela equação [6.2]:

$$SHGC(D) = T_{difuso} + Nk.A_{difuso} \quad [6.2]$$

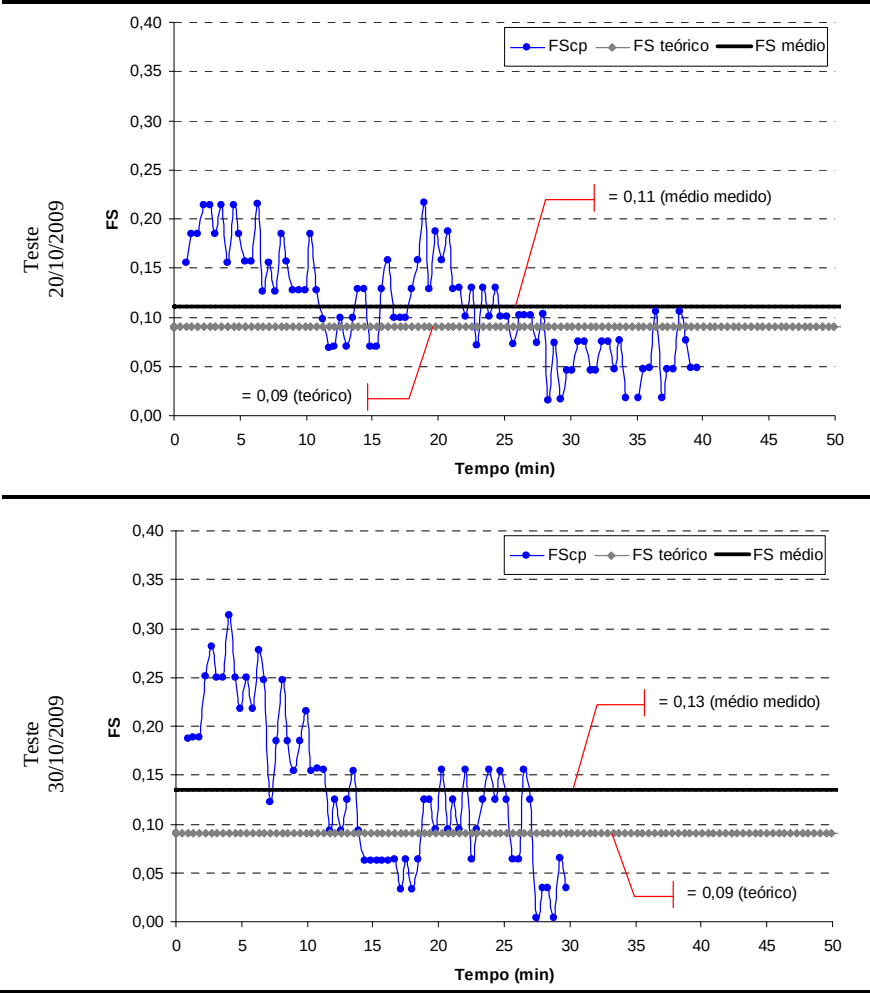
Onde, T_{difuso} e A_{difuso} , são respectivamente a transmissão e absorção do vidro para a radiação solar difusa. E Nk é a parcela da fração absorvida que é reemitida para o interior do ambiente. Então, para estimar o FS_{brise} neste caso, aos seguintes valores foram adotados (ASHRAE, 2005):

- $T_{difuso} = 0,75$ (Ref.: Table 13, ID 1a - 3mm CLR)
 $A_{difuso} = 0,10$ (Ref.: Table 13, ID 1a - 3mm CLR)
- $Nk = 0,46$ (Ref.: Table 17, single glazing with exterior venetian blind 45°)
- $T_{brise} = 0,11$ (Ref.: Table 18, group 2, >40°)

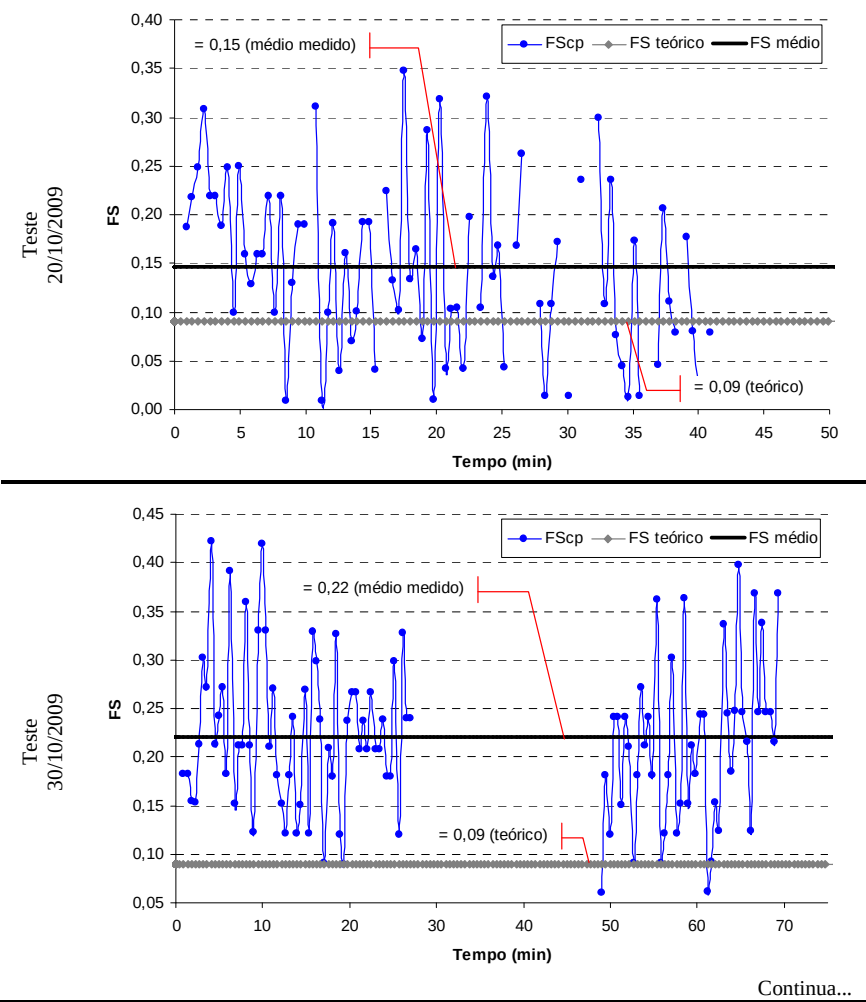
Por fim, o valor calculado do FS teórico utilizado como padrão de comparação nos testes com o brise é igual a 0,09 (absoluto).

A seguir, os gráficos do Quadro 6-12 e do Quadro 6-13 apresentam os resultados das medições realizadas com a proteção solar externa. Ao final da série de medições, é apresentado um resumo (Tabela 6-10) com os valores médios do FS medido e as condições gerais de cada teste.

**Quadro 6-12. Resultados de FS medido na CP
(brise horizontal branco - 45°) – banho “off”**



Quadro 6-13. Resultados de FS medido na CP (brise horizontal branco - 45°) – banho “on”



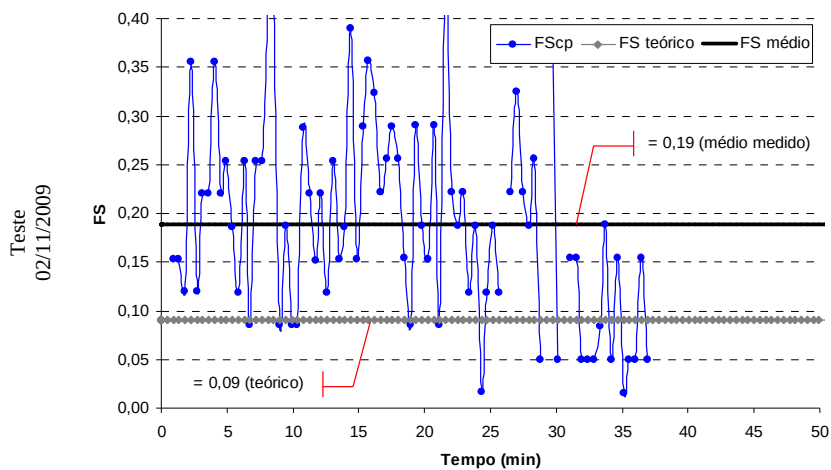


Tabela 6-10. Resumo das medições com as proteções solares externas

Cavidade Principal

Amostra	TESTE	FS médio ± DesvPad	FS teórico	ΔT (Tc-Tve) (°C)	Tc (°C)	Tar int (°C)	Tve (°C)	Tar ext (°C)	h int (W/m²K)	h ext (W/m²K)	Var ext (m/s)	Rad media (W/m²)	Ang Inc (°)	Tempo med (min)
Brise horizontal branco 45°	20/10/2009 (banho off)	0,11±0,05	0,09	-7,0	18,7	22,2	25,7	26,4	5,8	19,7	3,8	380	73° - 74°	38
	30/10/2009 (banho off)	0,13±0,08	0,09	-4,4	24,2	27,2	28,6	29,0	5,7	20,2	4,2	356	77° - 78°	30
	20/10/2009 (banho on)	0,15±0,09	0,09	-7,1	18,0	21,7	25,1	25,4	5,9	18,2	3,9	358	75° - 76°	40
	30/10/2009 (banho on)	0,22±0,08	0,09	-4,4	25,0	27,8	29,4	30,0	5,7	20,0	4,1	369	77° - 78°	69
	2/11/2009 (banho on)	0,19±0,06	0,09	-1,8	30,4	32,1	32,2	31,1	5,4	18,6	3,9	324	78° - 79°	37

6.3.2.1 Considerações sobre os resultados de FS para as proteções externas

Sobre a variação do desvio padrão dos resultados do FS médio medido, observa-se nos testes com a proteção externa que desta vez foi alcançado um limite superior maior do que o observado nas medições anteriores (que era de $\pm 0,08$), ficando esta variação agora na faixa de $\pm 0,05$ a $\pm 0,09$ (absoluto).

Já em relação aos resultados dos testes com banho “off” e banho “on”, em primeiro lugar é possível visualmente notar como o funcionamento do banho acaba gerando uma maior amplitude e frequência de oscilações nos resultados do FS medido. Verifica-se que os resultados do FS com banho “off” são mais baixos do que o banho “on”, embora as condições de medição sejam em média muito semelhantes, o que caracteriza um distúrbio nos resultados causado pelo controle da temperatura da água.

Em relação aos valores do ΔT cavidade-vidro aplicados para as medições com banho “on”, não é possível notar de maneira clara a influência que a variação de ΔT exerceu sobre o resultado do FS.

Cabe lembrar que com o uso do brise, a radiação solar difusa não causa um aquecimento significativo do vidro e também a absorção do vidro incolor 3mm é pequena. Além disso, a condição que ocorreu nos testes anteriores, onde a temperatura do vidro se mantinha acima da temperatura do ar externo e da temperatura da cavidade formando uma interface de separação entre os dois, não ocorre agora. Pode-se verificar em todas as medições com o brise, que a temperatura média do vidro se manteve sempre ligeiramente abaixo da temperatura do ar (ou caso fossem levadas em conta as incertezas, estaria praticamente na mesma temperatura do ar). Com isso, teríamos uma condição em que o aumento do ΔT cavidade-vidro geraria ganhos do ar externo (mais aquecido), e não apenas da fração da radiação solar absorvida pelo vidro e reemitida em onda longa e convecção para o interior do ambiente.

Esta condição remete novamente para discussão sobre a busca de um ΔT nulo entre o ar no interior da cavidade e o ar no meio externo, para conseguir isolar o FS. De qualquer modo, a oscilação (ou desvio padrão) em relação ao FS médio medido é proporcionalmente tão elevada, que mesmo quando esta condição de ΔT nulo é aproximada (como no teste 02-11-09), não é possível observar uma correlação com o

ΔT aplicado nos outros dois testes (banho “on”) que justifique os resultados maiores ou menores de FS.

Já nos testes com o banho “off”, a influência da variação do ΔT cavidade-vidro é mais perceptível, tanto que nos dois gráficos apresentados (Quadro 6-12) se observa a tendência clara de redução do FS à medida que o tempo passa, visto que, como não há resfriamento da água, a cavidade aquece gradualmente reduzindo o ΔT .

Ainda como comparação em termos quantitativos, a Tabela 6-9 mostra as diferenças percentuais e absolutas entre o FS medido e o FS teórico estimado.

**Tabela 6-11. Comparação entre o FS medido e teórico
(testes com proteções externas)**

Amostra	TESTE	FS médio na CP	FS teórico	Diferença (absoluta)	Diferença (%)
Brise Horiz branco 45°	20/10/2009 (banho off)	0,11	0,09	-0,02	-22,2%
	30/10/2009 (banho off)	0,13	0,09	-0,04	-44,4%
	20/10/2009 (banho on)	0,15	0,09	-0,06	-66,7%
	30/10/2009 (banho on)	0,22	0,09	-0,13	-144,4%
	2/11/2009 (banho on)	0,19	0,09	-0,10	-111,1%

Em tudo, fica evidente a dificuldade de medição na CP em situações com ganho de calor reduzido. Como o resultado do ganho de calor (e conseqüentemente do FS) é dependente da temperatura da água, à medida que a variação da temperatura da água passante pela cavidade diminui, a incerteza nos resultados aumenta percentualmente (OBS.: a questão das incertezas será analisada no item 6.4). Testes em condições de maior incidência de radiação poderiam contribuir para reduzir as incertezas nas medições, visto que o ganho de calor seria maior. Além disso, o próprio banho térmico precisaria ser melhorado.

Outra limitação importante é a estimativa dos coeficientes de troca externos, que precisaria ser ajustada levando em conta a presença das proteções solares. De modo geral, um estudo mais aprofundado, tanto teórico como experimental, além de adaptações do método de

determinação do FS proposto no capítulo 5, precisariam ser realizadas para definir a forma de medição mais apropriada aos testes com proteções solares externas.

6.4 ANÁLISE DAS INCERTEZAS

No caso do Fator Solar (FS), sendo este calculado a partir de outros valores, ou seja, obtido por uma medição indireta, as incertezas individuais de cada componente do resultado final têm seus efeitos combinados. Em termos simples, o FS pode ser definido como sendo a razão entre o ganho de calor solar que penetra através de uma abertura (determinado com o processo fluximétrico ou calorimétrico), pela radiação solar incidente sobre esta mesma abertura (determinada por um sensor de radiação solar).

Neste caso, se tratam de grandezas de entrada estatisticamente independentes entre si, ou seja, as quais não guardam nenhuma forma de sincronismo. Então, são pequenas as chances de que as variações aleatórias, associadas a cada grandeza de entrada, conduzam a uma combinação em que todos os valores extremos sejam atingidos ao mesmo tempo. Assim, pode-se utilizar uma forma mais apropriada para combinar estes efeitos.

Segundo Gonçalves (2002), existe uma expressão genérica que possibilita uma estimativa da incerteza combinada para o caso geral, onde, seja uma determinada grandeza “G” calculada em função de diversas outras grandezas de entrada (ex.: $G = f(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots)$). A incerteza combinada de G pode então ser estimada pela equação [6.3]:

$$u^2(G) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} u(x_1) \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} u(x_2) \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3} u(x_3) \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_4} u(x_4) \right)^2 + \dots \quad [6.3]$$

Sendo:

$u(G)$ = Incerteza da grandeza G;

$u(x_1), u(x_2), u(x_3), u(x_4)$ = Incertezas associadas às grandezas de entrada $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots$, respectivamente.

Com a equação [6.3] podem ser deduzidos casos particulares de combinação de incertezas. Uma expressão geral para a estimativa da incerteza combinada associada às somas e/ou subtrações de duas ou mais grandezas de entrada estatisticamente independentes é dada na equação [6.4]:

$$u^2(x1 \pm x2 \pm x3 \pm \dots) = u^2(x1) + u^2(x2) + u^2(x3) + \dots \quad [6.4]$$

Já para a situação onde “G” é a grandeza de interesse, calculada por multiplicações e/ou divisões de várias grandezas de entrada (ex.: $G = (x1)^{\pm 1} \cdot (x2)^{\pm 1} \cdot (x3)^{\pm 1} \dots$), a incerteza relativa combinada pode ser estimada pela equação [6.5]:

$$\left(\frac{u(G)}{G}\right)^2 = \left(\frac{u(x1)}{x1}\right)^2 + \left(\frac{u(x2)}{x2}\right)^2 + \left(\frac{u(x3)}{x3}\right)^2 + \dots \quad [6.5]$$

Na composição do FS utilizando o calorímetro, estão envolvidas grandezas que são dados teóricos (ex: calor específico da água), para os quais é difícil estimar um grau de incerteza. Isso restringe esta análise às grandezas obtidas com os sensores de monitoramento utilizados. Assim, a partir das incertezas individuais dos sensores, aplicadas à equação [6.4] e [6.5] durante cada etapa de cálculo, é então possível estimar a incerteza combinada no valor final do FS.

No entanto, durante o processo de medição como um todo, podem surgir incertezas de caráter aleatório não associado a nenhum dos sensores de monitoramento (ex: perturbações devido ao movimento da água no sistema, bolhas de ar, acionamento e desligamento de equipamentos, etc.), sendo difícil estimá-las. No entanto, estas incertezas se refletem no aumento ou redução do desvio padrão observado em torno da média do FS para um período de medição. Neste caso, o desvio padrão engloba todas as incertezas.

Assim, como metodologia para definição da incerteza do FS medido, será adotado o maior valor absoluto entre o desvio padrão do resultado do teste corrigido pelo coeficiente “t-student” (para 95% de confiança e $n > 40$, “t” ~ 2) e o valor obtido a partir da incerteza combinada dos sensores de monitoramento.

6.4.1 Incerteza no resultado da CP

A Tabela 6-12 apresenta as informações necessárias na estimativa da incerteza do FS a partir das incertezas dos sensores de monitoramento, aplicadas à equação [6.5]. Neste caso, a análise fica

restrita à parcela do ganho de calor efetivamente quantificada na CP $((m.C.\Delta T)/A_j)$ e à energia total incidente sobre a área de abertura (rad), medida com o piranômetro.

Tabela 6-12. Informações para estimativa da incerteza no FS medido na CP

Informações sobre os sensores			
Sensor	Valor absoluto de referência	Incerteza ¹² (%)	Incerteza (absoluta)
Piranômetro – rad (W/m²)	700	1,0%	7
Vazão: leitura – m (l/s)	0,475	8,2%	0,03895
Termopares: água entrada-saída – ΔT (°C)			
Faixa 1 (entre 0,6 - 0,4°C)	0,5	8,0%	0,040
Faixa 2 (entre 0,4 - 0,2°C)	0,3	13,0%	0,039
Faixa 3 (entre 0,2 - 0,0°C)	0,1	40,0%	0,040
Informações sobre o FS			
Simplificação: FS = (m*C*(ΔT)/Aj)/rad	Valor absoluto de referência do FS	Amostra	
Faixa de ΔT dos termopares:			
Faixa 1 (entre 0,6 - 0,4°C)	0,83	(vidro incolor 3mm)	
Faixa 2 (entre 0,4 - 0,2°C)	0,52	(vidro verde 6mm)	
Faixa 3 (entre 0,2 - 0,0°C)	0,22	(vidro prata 8mm)	
Faixa 1 (entre 0,6 - 0,4°C)	0,78	(vidro incolor 6mm)	
Faixa 2 (entre 0,4 - 0,2°C)	0,39	(persiana branca 45°)	
Faixa 2 (entre 0,4 - 0,2°C)	0,54	(persiana preta 45°)	
Faixa 3 (entre 0,2 - 0,0°C)	0,31	(rolô branco)	
Faixa 3 (entre 0,2 - 0,0°C)	0,16	(brise horiz branco 45°)	

Assim, as incertezas relativas calculadas para o FS medido na CP em cada faixa de ΔT da água, foram as seguintes:

- Faixa 1 (entre 0,6 - 0,4°C) = 11,5%
- Faixa 2 (entre 0,4 - 0,2°C) = 15,4%

¹² Valores determinados conforme as calibrações apresentadas no Capítulo.

- Faixa 3 (entre 0,2 - 0,0°C) = 40,8%

A Tabela 6-13 e a Tabela 6-14 apresentam a definição da incerteza absoluta no resultado do FS de cada medição com os vidros e com as proteções solares, realizada na CP. A coluna “sensores” indica a incerteza absoluta obtida pela multiplicação da incerteza relativa (nas respectivas faixas apresentadas acima) pelo FS médio medido. Já a coluna “Desvpad*t” indica a incerteza absoluta obtida pela multiplicação do desvio padrão de cada medição pelo coeficiente “t-student” ($t = 2$). O número hachurado em cada coluna é a incerteza final definida para o FS médio obtido nas medições.

Tabela 6-13. Incerteza no FS medido na CP (vidros)

Amostra	Teste	Incerteza (absoluta)		FS médio ± incerteza
		Sensores	Desvpad*t	
Vidro incolor 3mm	22/5/2009	0,10	0,12	0,83±0,12
	8/6/2009	0,10	0,10	0,83±0,10
	30/6/2009	0,10	0,08	0,84±0,10
	12/7/2009	0,09	0,16	0,79±0,16
	13/7/2009	0,10	0,12	0,84±0,12
Vidro verde 6mm	17/7/2009	0,08	0,10	0,52±0,10
	29/7/2009	0,08	0,12	0,54±0,12
	30/7/2009	0,08	0,12	0,49±0,12
Vidro prata 8mm	3/8/2009	0,09	0,12	0,21±0,12
	4/8/2009	0,10	0,14	0,24±0,14
	5/8/2009	0,09	0,12	0,21±0,12
Vidro incolor 6mm	12/8/2009	0,09	0,14	0,79±0,14
	14/8/2009	0,09	0,16	0,76±0,16

Tabela 6-14. Incerteza no FS medido na CP (proteções solares)

Amostra	Teste	Incerteza (absoluta)		FS médio ± incerteza
		Sensores	Desvpad*t	
Persiana branca 45°	21/8/2009	0,06	0,14	0,41±0,14
	22/8/2009	0,06	0,14	0,38±0,14
	26/8/2009	0,06	0,12	0,38±0,12
Persiana preta 45°	27/8/2009	0,09	0,12	0,56±0,12
	28/8/2009	0,09	0,12	0,58±0,12
	29/8/2009	0,08	0,12	0,49±0,12
Rolô branco	30/8/2009	0,12	0,10	0,29±0,12
	31/8/2009	0,13	0,10	0,32±0,13
	1/9/2009	0,13	0,10	0,33±0,13
Brise Horiz branco 45°	20/10/2009 (banho off)	0,04	0,10	0,11±0,10
	30/10/2009 (banho off)	0,05	0,16	0,13±0,16
	20/10/2009 (banho on)	0,06	0,18	0,15±0,18
	30/10/2009 (banho on)	0,09	0,16	0,22±0,16
	2/11/2009 (banho on)	0,08	0,12	0,19±0,12

6.4.2 Incerteza no resultado da CS

Na CS, a análise fica restrita à parcela do ganho de calor efetivamente quantificada através dos fluxímetros $((\text{flux1} + \dots + \text{flux4})/4)$, e à energia total incidente sobre a área de abertura (rad), medida com o piranômetro. Neste caso, a Tabela 6-15 apresenta as informações necessárias para a estimativa da incerteza do FS a partir das incertezas dos sensores, aplicadas à equação [6.5].

Tabela 6-15. Informações para estimativa da incerteza no FS medido na CS

Informações sobre os sensores			
Sensor	Valor absoluto de referência	Incerteza¹³ (%)	Incerteza (absoluta)
Piranômetro – rad (W/m²)	700	1,0%	7
Fluxímetros– flux (W/m²)			
Faixa 1 (entre 700 - 500W/m²)	600	4,5%	27
Faixa 2 (entre 500 - 300W/m²)	400	4,5%	18
Faixa 3 (entre 300 - 100W/m²)	200	4,5%	9
Informações sobre o FS			
Simplificação: FS = flux/rad	Valor absoluto de referência do FS	Amostra	
Calor que atinge os fluxímetros:			
Faixa 1 (entre 700 - 500W/m²)	0,86	(vidro incolor 3mm)	
Faixa 2 (entre 500 - 300W/m²)	0,54	(vidro verde 6mm)	
Faixa 3 (entre 300 - 100W/m²)	0,21	(vidro prata 8mm)	
Faixa 1 (entre 700 - 500W/m²)	0,80	(vidro incolor 6mm)	

Como a incerteza dos fluxímetros é proporcionalmente a mesma em todas as faixas de radiação que atingem os sensores, em qualquer situação a incerteza relativa calculada para o FS medido na CS será igual a 4,5%.

A Tabela 6-16 apresenta a definição da incerteza absoluta no resultado do FS de cada medição com os vidros, agora realizada na CS.

Novamente a coluna “sensores” indica a incerteza absoluta obtida pela multiplicação da incerteza relativa (4,5%) pelo FS médio medido na CS. Já a coluna “Desvpad*t” indica a incerteza absoluta obtida pela multiplicação do desvio padrão de cada medição pelo coeficiente “t-student” (t = 2). O número hachurado em cada coluna é a incerteza final definida para o FS médio obtido nas medições.

¹³ Valores determinados conforme as calibrações apresentadas no Capítulo 3

Tabela 6-16. Incerteza no FS medido na CS (vidros)

Amostra	Teste	Incerteza (absoluta)		FS médio $\pm$ incerteza
		Sensores	Desvpad*t	
Vidro incolor 3mm	22/5/2009	0,04	0,02	0,85 $\pm$ 0,04
	8/6/2009	0,04	0,02	0,86 $\pm$ 0,04
	30/6/2009	0,04	0,00	0,87 $\pm$ 0,04
	12/7/2009	0,04	0,00	0,85 $\pm$ 0,04
	13/7/2009	0,04	0,00	0,85 $\pm$ 0,04
Vidro verde 6mm	17/7/2009	0,02	0,02	0,53 $\pm$ 0,02
	29/7/2009	0,02	0,04	0,56 $\pm$ 0,04
	30/7/2009	0,02	0,02	0,52 $\pm$ 0,02
Vidro prata 8mm	3/8/2009	0,01	0,02	0,21 $\pm$ 0,02
	4/8/2009	0,01	0,00	0,21 $\pm$ 0,01
	5/8/2009	0,01	0,00	0,21 $\pm$ 0,01
Vidro incolor 6mm	12/8/2009	0,04	0,02	0,81 $\pm$ 0,04
	14/8/2009	0,04	0,02	0,80 $\pm$ 0,04

6.4.3 Resumo geral dos resultados das medições

A seguir, a Tabela 6-17 até a Tabela 6-19 apresentam um resumo de todas as medições realizadas em cada uma das cavidades do calorímetro (CP e CS). Juntos com os resultados do FS medido e da sua incerteza, também são apresentadas informações sobre as condições de cada teste.

Tabela 6-19. Resumo geral das medições com as proteções solares

Cavidade Principal														
Amostra	TESTE	FS médio ± incerteza	FS teórico	ΔT (Tc-Tve) (°C)	Tc (°C)	Tar int (°C)	Tve (°C)	Tar ext (°C)	h int (W/m²K)	h ext (W/m²K)	Var ext (m/s)	Rad media (W/m²)	Ang Inc (°)	Tempo med (min)
Persiana branca 45°	21/8/2009	0,41±0,14	0,53	-8,4	26,5	34,4	34,9	20,2	5,9	19,1	3,0	706	53° - 57°	45
	22/8/2009	0,38±0,14	0,53	-8,6	27,9	34,8	36,5	18,2	5,9	16,5	2,5	634	50° - 52°	65
	26/8/2009	0,38±0,12	0,53	-10,4	31,7	39,5	42,1	24,8	6,0	15,4	2,1	662	52° - 57°	113
Persiana preta 45°	27/8/2009	0,56±0,12	0,59	-10,0	32,6	49,4	42,6	26,0	6,0	16,9	2,5	673	52° - 55°	121
	28/8/2009	0,58±0,12	0,59	-10,8	33,9	49,4	44,7	26,7	6,0	14,8	2,0	589	54° - 58°	62
	29/8/2009	0,49±0,12	0,59	-11,1	35,6	52,0	46,7	28,9	6,0	16,2	3,6	635	54° - 58°	93
Rolô branco	30/8/2009	0,29±0,12	0,31	-10,0	32,3	36,2	42,3	27,4	6,0	17,7	3,7	636	55° - 60°	90
	31/8/2009	0,32±0,13	0,31	-8,6	31,9	35,4	40,5	26,9	5,9	18,0	4,1	604	56° - 60°	63
	1/9/2009	0,33±0,13	0,31	-12,5	36,4	40,0	48,9	30,1	6,1	14,8	3,4	630	54° - 57°	100

Continua...

Cavidade Principal

Amostra	TESTE	FS médio ± incerteza	FS teórico	ΔT (Tc-Tve) (°C)	Tc (°C)	Tar int (°C)	Tve (°C)	Tar ext (°C)	h int (W/m²K)	h ext (W/m²K)	Var ext (m/s)	Rad media (W/m²)	Ang Inc (°)	Tempo med (min)
Brise horizontal branco 45°	20/10/2009 (banho off)	0,11±0,10	0,09	-7,0	18,7	22,2	25,7	26,4	5,8	19,7	3,8	380	73° - 74°	38
	30/10/2009 (banho off)	0,13±0,16	0,09	-4,4	24,2	27,2	28,6	29,0	5,7	20,2	4,2	356	77° - 78°	30
	20/10/2009 (banho on)	0,15±0,18	0,09	-7,1	18,0	21,7	25,1	25,4	5,9	18,2	3,9	358	75° - 76°	40
	30/10/2009 (banho on)	0,22±0,16	0,09	-4,4	25,0	27,8	29,4	30,0	5,7	20,0	4,1	369	77° - 78°	69
	2/11/2009 (banho on)	0,19±0,12	0,09	-1,8	30,4	32,1	32,2	31,1	5,4	18,6	3,9	324	78° - 79°	37

7 COMPARAÇÕES COM O WINDOW6 E COM O MODELO MATEMÁTICO

7.1 WINDOW6 E MODELO MATEMÁTICO

Além da comparação com valores teóricos (ISO, ASHRAE), conforme apresentado nos capítulos anteriores, os resultados do FS medido também foram comparados com resultados de simulações realizadas por algoritmos de cálculo.

Para realizar estas simulações, foi utilizado o programa computacional WINDOW6 (versão Research 6.2.33), desenvolvido nos EUA pelo Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)¹⁴, e também o modelo matemático desenvolvido por Marinowski (2005) e adaptado para este estudo, segundo apresentado no capítulo 5. Nos dois casos, os elementos de testes (vidros e proteções) foram modelados sendo inseridas suas propriedades ópticas e térmicas e as condições ambientais observadas para cada medição.

O modelo matemático é aplicável apenas para simular o resultado do FS de elementos vítreos (pano único) submetidos às configurações de medição do calorímetro. Já o WINDOW6 (W6) pode realizar simulações com vidros (múltiplas camadas) associados a elementos complexos, como proteções solares, prevendo valores do FS, transmitância térmica, transmissão de luz visível, dentre outros índices.

7.2 MODELAGEM

Para aplicação dos quatro tipos de vidros testados experimentalmente (incolor 3mm, verde 6mm, prata 8mm e incolor 6mm) no modelo matemático, foram seguidos os mesmos procedimentos de inserção de variáveis já apresentados no capítulo 5 e no ANEXO G. Todos os vidros foram simulados segundo as condições reais de testes (médias) encontradas na CP e na CS.

Já a modelagem no W6 pode ser dividida em três etapas. Conforme apresentado por Marinowski e Lamberts (2007) e Marinowski et al. (2008), estas etapas consistem na definição das condições de

¹⁴ Mais informações sobre o WINDOW6 podem ser obtidas através do site dos desenvolvedores do programa: <http://windows.lbl.gov/software/software.html>

contorno, nas características dos componentes e na composição dos elementos (sistemas envidraçados ou janelas completas).

As condições de contorno incluem as configurações do software em relação a diversos parâmetros, incluindo modelos de cálculo. Na maior parte destas configurações foram mantidos os valores “defaults” do próprio programa. Cabe destacar que nas configurações “Thermal calculation options” para todos os campos foram selecionados os procedimentos segundo a ISO 15099 (Figura 7-1a). Também é importante mencionar que na janela “Venetian blind calculation methods” foi mantido o valor “Directional diffuse” (Figura 7-1b) recomendado no manual de utilização do programa. “Directional diffuse” indica que a luz incidente produz radiação difusa que é transmitida e refletida. Este método leva em conta as contribuições individuais de todas as partes (segmentos) superficiais dos elementos de proteção que são visíveis em uma determinada direção de saída (LBNL, 2006).

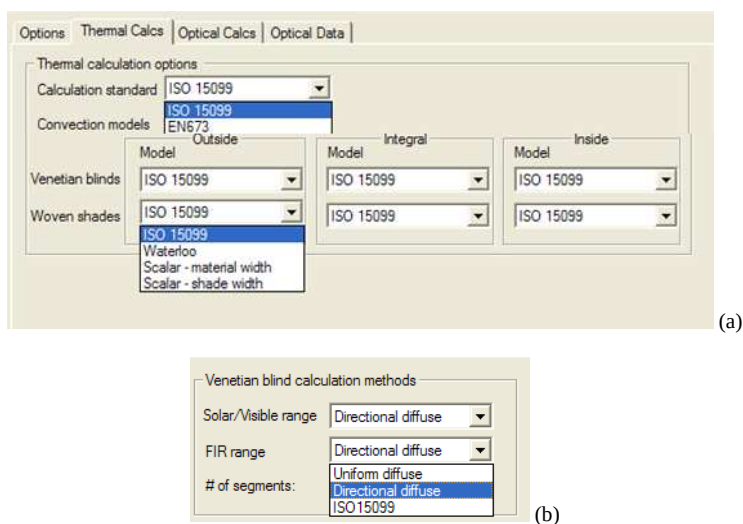


Figura 7-1. Opções de cálculo selecionadas no W6

Para estabelecer condições ambientais semelhantes (médias), as quais as amostras foram submetidas durante as medições de campo, foi selecionada na janela “Environmental Conditions Library” a opção “Fixed Combined Coefficient”. Esta opção permite a entrada do coeficiente global de transferência de calor interno e externo. Além

disso, também são necessários como dados de entrada a temperatura do ar interno e externo e a radiação incidente.

Todos os tipos de vidros e proteções solares testadas em campo foram modelados no W6. Esta modelagem consiste na inserção das suas características dimensionais, além de algumas propriedades ópticas e térmicas.

Para os vidros foram utilizadas as propriedades ópticas determinadas por Caram (2002) em diferentes ângulos de incidência, conforme já apresentado no capítulo 4 e 6. Como o W6 realiza a simulação segundo um ângulo de incidência normal da radiação, as propriedades ópticas de transmissão e reflexão (visível e total) foram introduzidas no programa diretamente com os valores para um ângulo de incidência próximo ao observado em campo. A emissividade e a condutividade térmica adotada em todos os casos foi de 0,84 e 1,0W/mK, respectivamente.

Para as persianas e o brise foi adotado o valor de condutividade térmica igual a 160W/mK (material metálico) e emissividade igual a 0,90. Nos elementos (lâminas) com acabamento na cor branca a reflexão (visível e total) assumida foi igual a 0,70, e para os elementos com acabamento na cor preta foi assumida 0,10. Já a transmissão é inexistente nos dois casos (material opaco).

Ao tecido (fios) da cortina rolô foram atribuídos os seguintes valores: reflexão (visível e total) igual a 0,50; emissividade igual a 0,90; e condutividade térmica igual a 0,30W/mK.

A construção do brise e das persianas foi realizada no módulo “Shading layer library”, tipo “Venetian blind, horizontal”, que permite definir as dimensões, inclinação e curvatura das lâminas (Figura 7-2).

Já a construção da cortina rolô foi realizada na tipologia “Woven shade”, onde é possível detalhar o diâmetro, a distância entre fios e a espessura do tecido (os valores introduzidos para estes três parâmetros foram, respectivamente, 1,0mm, 1,1mm e 1,0mm).

Para os brises, onde a janela está totalmente sombreada, é necessário também a modelagem de um vidro com as propriedades de transmissão e reflexão para a radiação difusa. Este elemento foi criado na biblioteca do W6, tendo como dados de entrada os valores de transmissão e reflexão da radiação difusa fornecidos pela ASHRAE (2005) para um vidro incolor 3mm (ref.: ID 1a, 3mm, CLR). Neste caso, as duas propriedades ópticas assumidas foram, respectivamente, 0,75 e 0,14.

The screenshot shows the 'Shading Layer Library' window. At the top, there are fields for 'ID #:' (23), 'Name:' (persiana branca 45), 'Product Name:', 'Manufacturer:' (hunterdouglas), 'Type:' (Venetian blind, horizontal), and 'Material:' (31105 lâmina - persiana branca). Below these is 'Effective hole area fraction:' (0.050). A section titled 'Venetian Blind' contains settings for 'Slat width:' (16.0 mm), 'Spacing:' (12.7 mm), 'Tilt:' (45 degrees), 'Tilt angle:' (45 degrees), 'Blind thickness:' (11.3 mm), and 'Rise:' (1.000 mm). To the right of these settings is a diagram showing a sun icon and several horizontal slats. A 'Help' button is located at the bottom left of the Venetian Blind section.

Figura 7-2. Exemplo: construção das proteções solares no W6

Ainda é necessário destacar mais um recurso utilizado para a modelagem das proteções solares. Em todos os testes de campo, o ângulo de incidência dos raios solares e a inclinação das lâminas (a 45°) não permitia a passagem de nenhuma fração de radiação direta. No entanto, o W6 não proporciona ajuste do ângulo de incidência da radiação, sendo este fixado como normal ao plano da janela. Com isso, aplicando o espaçamento real das lâminas aos modelos computacionais, eram geradas áreas com passagem direta de radiação (entre as lâminas). Assim, para melhorar a aproximação entre a situação real e o modelo aplicado no W6, buscou-se uma condição onde as lâminas bloqueassem totalmente a radiação direta, embora o ângulo de incidência não seja o mesmo de campo. Esta condição foi obtida através da redução do espaçamento entre lâminas, permitindo um bloqueio total da radiação direta apenas em função da inclinação da lâmina (45°). O esquema da Figura 7-3 indica como é determinado o valor mínimo (d) a ser deduzido do espaçamento entre as lâminas para a obtenção do sombreamento completo.

Por fim, a última etapa da modelagem consiste na montagem dos sistemas transparentes (Figura 7-4) compostos pelas diversas

camadas (vidros, espaços de ar¹⁵, proteções solares internas ou externas) e a seleção da condição ambiental previamente definida.

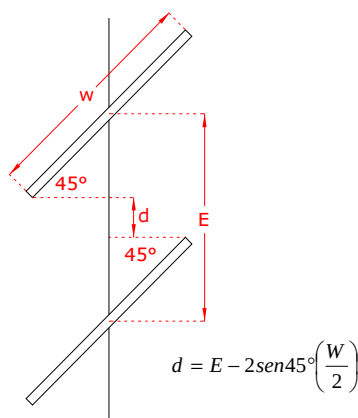


Figura 7-3. Esquema de redução do espaçamento entre as lâminas.

Glazing System Library

ID #: 25 Name: inc3mm + pers45 branca

Layers: 2 Tilt: 90 ° IG Height: 1200 mm

Environmental Conditions: CP 26-08-09 IG Width: 1500 mm

Comment:

Overall thickness: 39.314 mm Mode: ?

	ID	Name	Mode	Thick	Flip	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2
▼ Glass 1 ►►	30012	incolor 3mm ang55°		3.0	☐	0.775	0.170	0.170	0.780	0.170	0.170
Gap 1 ►►	1	Air		25.0	☐						
▼ Shade 2 ►►	29	persiana branca 45 adaptada		11.3	☐						

Center of Glass Results | Temperature Data | Optical Data | Angular Data | Color Properties | Radiance

Ufactor	SC	SHGC	Ref. Ht. Gain	Tvis	Keff
W/m2-K			W/m2		W/m-K
4.048	0.441	0.384	310	0.114	0.3305

Figura 7-4. Exemplo de montagem dos sistemas transparentes

¹⁵ O espaço de ar ajustado na CP entre o vidro e as proteções internas foi de aproximadamente 25mm, e entre o vidro e o brise foi de 50mm.

7.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A seguir são apresentados os resultados de FS obtidos nas simulações realizadas com o W6 e o modelo matemático (somente vidros) comparados com os resultados das 27 medições realizadas em campo com o calorímetro.

7.3.1 Vidros

Na Tabela 7-1 e na Tabela 7-2 é possível observar os resultados do FS simulado no modelo matemático e comparado ao valor medido pelo calorímetro, respectivamente para a CP e CS. No caso da CP, existe uma excelente aproximação entre os resultados medidos e os resultados do modelo matemático, tanto para o vidro incolor (3mm e 6mm) como para o verde. Para estas amostras, em todos os testes a variação entre os dois resultados se manteve sempre abaixo dos 6%. Apenas em dois testes com o vidro prata 8mm a variação relativa foi mais elevada, chegando até no máximo 20,5%. No entanto, cabe destacar que em termos absolutos esta variação de 20,5% corresponde a apenas 0,04, que pode ser considerada uma diferença também pequena.

Com base nestes resultados, é possível dizer que o modelo matemático representa bem a condição de medição existente na CP, especialmente para vidros com maior transmissão da radiação solar direta. À medida que os valores de reflexão e absorção do vidro aumentam, o modelo fica mais vulnerável a incertezas, uma vez que o equacionamento para quantificar estas parcelas tem maiores simplificações. Além disso, quando a transmissão de energia é baixa, os resultados na CP têm incertezas maiores, ampliando ainda mais a variação entre o valor do FS medido e o simulado com o modelo matemático.

Para a CS, as variações entre o FS medido e simulado pelo modelo matemático se mantêm na faixa entre aproximadamente 6% e 17%. Agora, as variações são, na maioria das vezes, mais elevadas do que no caso da CP. No entanto, observa-se novamente que é nos testes com o vidro prata que ocorrem as maiores diferenças entre o FS medido e simulado.

Ainda comparando os resultados das cavidades, é interessante observar que a variação do modelo em relação ao FS medido na CP é negativa (resultado do modelo é inferior) no caso dos vidros incolor 3mm e 6mm, e positiva (resultado do modelo é superior) nos vidros

verde e prata. Isso destaca a maior dificuldade da CP em quantificar o FS em vidros com menor transmissão de radiação. Já na CS, a variação observada em todos os testes é sempre negativa (o resultado do modelo é inferior ao da CS), neste caso talvez o modelo não represente bem a condição real, deixando de quantificar parte do ganho de calor.

**Tabela 7-1. Comparação FS medição x FS modelo matemático
(vidros na CP)**

Cavidade principal						
Amostra	Teste	FS (medição)	FS (modelo matemático)	Variação	Âng Inc (medição)	Âng Inc (simulação)
Vidro incolor 3mm	22/05/2009	0,83	0,83	-0,2%	42° - 43°	40°
	08/06/2009	0,83	0,83	-0,4%	39° - 42°	40°
	30/06/2009	0,84	0,83	-1,5%	40° - 42°	40°
	12/07/2009	0,79	0,79	-0,5%	43° - 47°	45°
	13/07/2009	0,84	0,80	-5,0%	40° - 42°	40°
Vidro verde 6mm	17/07/2009	0,52	0,53	1,3%	41° - 43°	40°
	29/07/2009	0,54	0,54	-0,7%	40° - 42°	40°
	30/07/2009	0,49	0,51	3,5%	43° - 44°	45°
Vidro prata 8mm	03/08/2009	0,21	0,23	7,6%	45° - 46°	45°
	04/08/2009	0,24	0,25	2,1%	45° - 48°	45°
	05/08/2009	0,21	0,25	20,5%	47° - 50°	50°
Vidro incolor 6mm	12/08/2009	0,79	0,75	-5,6%	47° - 50°	50°
	14/08/2009	0,76	0,75	-1,7%	48° - 49°	50°

**Tabela 7-2. Comparação FS medição x FS modelo matemático
(vidros na CS)**

Cavidade secundária						
Amostra	Teste	FS (medição)	FS (modelo matemático)	Variação	Âng Inc (medição)	Âng Inc (simulação)
Vidro incolor 3mm	22/05/2009	0,85	0,76	-10,4%	42° - 43°	40°
	08/06/2009	0,86	0,76	-11,5%	39° - 42°	40°
	30/06/2009	0,87	0,75	-13,4%	40° - 42°	40°
	12/07/2009	0,85	0,78	-8,0%	43° - 47°	45°
	13/07/2009	0,85	0,79	-6,9%	40° - 42°	40°
Vidro verde 6mm	17/07/2009	0,53	0,48	-9,6%	41° - 43°	40°
	29/07/2009	0,56	0,50	-10,9%	40° - 42°	40°
	30/07/2009	0,52	0,48	-7,3%	43° - 44°	45°
Vidro prata 8mm	03/08/2009	0,21	0,18	-13,8%	45° - 46°	45°
	04/08/2009	0,21	0,18	-13,8%	45° - 48°	45°
	05/08/2009	0,21	0,18	-16,7%	47° - 50°	50°
Vidro incolor 6mm	12/08/2009	0,81	0,72	-11,1%	47° - 50°	50°
	14/08/2009	0,80	0,73	-9,3%	48° - 49°	50°

A seguir, a Tabela 7-3 e a Tabela 7-4 mostram, respectivamente, a comparação entre o FS medido na CP e na CS com os resultados obtidos nas simulações do W6.

Tabela 7-3. Comparação FS medição x FS W6 (vidros na CP)

Cavidade principal						
Amostra	Teste	FS (medição)	FS (W6)	Variação	Âng Inc (medição)	Âng Inc (simulação)
Vidro incolor 3mm	22/05/2009	0,83	0,84	1,6%	42° - 43°	40°
	08/06/2009	0,83	0,84	1,7%	39° - 42°	40°
	30/06/2009	0,84	0,84	0,4%	40° - 42°	40°
	12/07/2009	0,79	0,83	4,8%	43° - 47°	45°
	13/07/2009	0,84	0,84	0,2%	40° - 42°	40°
Vidro verde 6mm	17/07/2009	0,52	0,62	19,4%	41° - 43°	40°
	29/07/2009	0,54	0,60	11,5%	40° - 42°	40°
	30/07/2009	0,49	0,59	20,6%	43° - 44°	45°
Vidro prata 8mm	03/08/2009	0,21	0,30	44,8%	45° - 46°	45°
	04/08/2009	0,24	0,33	37,1%	45° - 48°	45°
	05/08/2009	0,21	0,31	47,1%	47° - 50°	50°
Vidro incolor 6mm	12/08/2009	0,79	0,78	-1,4%	47° - 50°	50°
	14/08/2009	0,76	0,78	2,9%	48° - 49°	50°

Tabela 7-4. Comparação FS medição x FS W6 (vidros na CS)

Cavidade secundária						
Amostra	Teste	FS (medição)	FS (W6)	Variação	Âng Inc (medição)	Âng Inc (simulação)
Vidro incolor 3mm	22/05/2009	0,85	0,84	-0,8%	42° - 43°	40°
	08/06/2009	0,86	0,84	-2,0%	39° - 42°	40°
	30/06/2009	0,87	0,84	-3,1%	40° - 42°	40°
	12/07/2009	0,85	0,83	-2,6%	43° - 47°	45°
	13/07/2009	0,85	0,84	-0,8%	40° - 42°	40°
Vidro verde 6mm	17/07/2009	0,53	0,62	17,2%	41° - 43°	40°
	29/07/2009	0,56	0,60	7,7%	40° - 42°	40°
	30/07/2009	0,52	0,59	14,2%	43° - 44°	45°
Vidro prata 8mm	03/08/2009	0,21	0,31	47,6%	45° - 46°	45°
	04/08/2009	0,21	0,34	61,0%	45° - 48°	45°
	05/08/2009	0,21	0,32	50,5%	47° - 50°	50°
Vidro incolor 6mm	12/08/2009	0,81	0,78	-3,8%	47° - 50°	50°
	14/08/2009	0,80	0,78	-2,3%	48° - 49°	50°

Observa-se agora, tanto na CP quanto na CS, uma boa aproximação entre os resultados medidos e simulados para o vidro incolor 3mm e 6mm. Para estas duas amostras, em nenhum teste a variação entre o FS medido e simulado no W6 ultrapassa 5%. Já no vidro verde, a variação cresce nas duas cavidades, chegando até a um valor máximo de aproximadamente 20%, enquanto que no caso do vidro prata a variação é ainda mais alta, oscilando entre 37% e 47% na CP, e entre 47% e 61% na CS. Novamente, estas maiores variações entre os resultados dos vidros com menor transmissão direta de radiação (e maior absorção), podem estar associadas à maior incerteza que ocorre nas cavidades para quantificar fluxos de energia reduzidos, ou ainda, à possibilidade dos coeficientes de troca internos utilizados na simulação estarem superestimados em relação à realidade, o que elevaria a fração de ganho de calor ($h_{\text{int}}/(h_{\text{int}}+h_{\text{ext}})$) dos vidros mais absorventes.

7.3.2 Proteções solares internas

A Tabela 7-5 mostra os resultados da comparação entre os valores de FS das proteções solares internas medidos na CP e os resultados da simulação no W6. Em todos os testes se observa uma ótima aproximação entre os valores medidos e simulados, tanto que a variação máxima observada é inferior a 9%. Visto que agora o fluxo de calor é reduzido, os efeitos da incerteza nos valores medidos podem ser percebidos pelo fato de os resultados da variação em relação ao W6 ora serem positivos ora negativos, para a mesma amostra.

7.3.3 Proteções solares externas

A Tabela 7-6 apresenta a comparação dos valores de FS medidos e simulados no W6 para os cinco testes realizados com o brise horizontal. Nos testes com a condição “banho off”, observa-se uma boa aproximação entre os resultados medidos e simulados, sendo a variação máxima inferior a 10%. Já para a condição “banho on” a variação cresce, ficando entre 20% e 47%.

Em todos os casos, como já apresentado no capítulo anterior, cabe lembrar que a incerteza nos valores medidos é bastante elevada. Além disso, a configuração da amostra e a condição de ângulo de incidência aplicada na simulação é bem diferente da medição. Mesmo assim, os resultados medidos apresentam uma ordem de grandeza

razoavelmente próxima aos valores de FS comumente esperados para este tipo de proteção solar.

Tabela 7-5. Comparação FS medição x FS W6 (proteções internas)

Cavidade principal						
Amostra	Teste	FS (medição)	FS (W6)	Variação	Âng Inc (medição)	Âng Inc* (simulação)
Persiana branca 45°	21/08/2009	0,41	0,38	-7,3%	53° - 57°	55°
	22/08/2009	0,38	0,39	2,6%	50° - 52°	50°
	26/08/2009	0,38	0,38	1,1%	52° - 57°	55°
Persiana preta 45°	27/08/2009	0,56	0,52	-7,1%	52° - 55°	55°
	28/08/2009	0,58	0,53	-8,6%	54° - 58°	55°
	29/08/2009	0,49	0,52	6,1%	54° - 58°	55°
Rolô branco	30/08/2009	0,29	0,30	3,4%	55° - 60°	60°
	31/08/2009	0,32	0,30	-6,3%	56° - 60°	60°
	01/09/2009	0,33	0,31	-6,1%	54° - 57°	55°

* Para as propriedades do vidro

Tabela 7-6. Comparação FS medição x FS W6 (proteções externas)

Cavidade principal						
Amostra	Teste	FS (medição)	FS (W6)	Variação	Âng Inc (medição)	Âng Inc (simulação)
Brise Horiz branco 45°	20/10/2009 (banho off)	0,11	0,12	9,1%	73° - 74°	normal (0°)
	30/10/2009 (banho off)	0,13	0,12	-7,7%	77° - 78°	normal (0°)
	20/10/2009 (banho on)	0,15	0,12	-20,0%	75° - 76°	normal (0°)
	30/10/2009 (banho on)	0,22	0,12	-45,5%	77° - 78°	normal (0°)
	2/11/2009 (banho on)	0,19	0,12	-36,8%	78° - 79°	normal (0°)

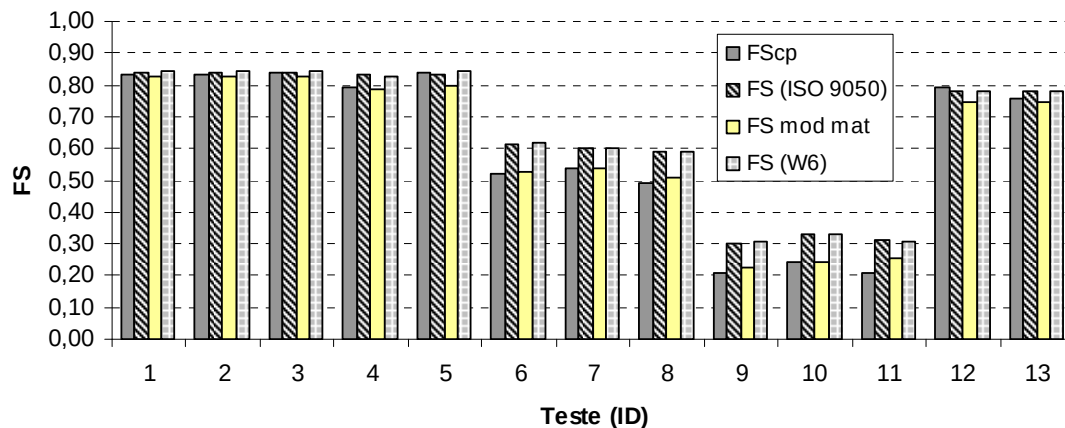
7.4 RESUMO DAS COMPARAÇÕES ENTRE FS

Do Quadro 7-1 até Quadro 7-4 o, é possível observar, por meio dos gráficos de barras, um resumo geral com os diferentes valores estimados de FS colocados lado a lado.

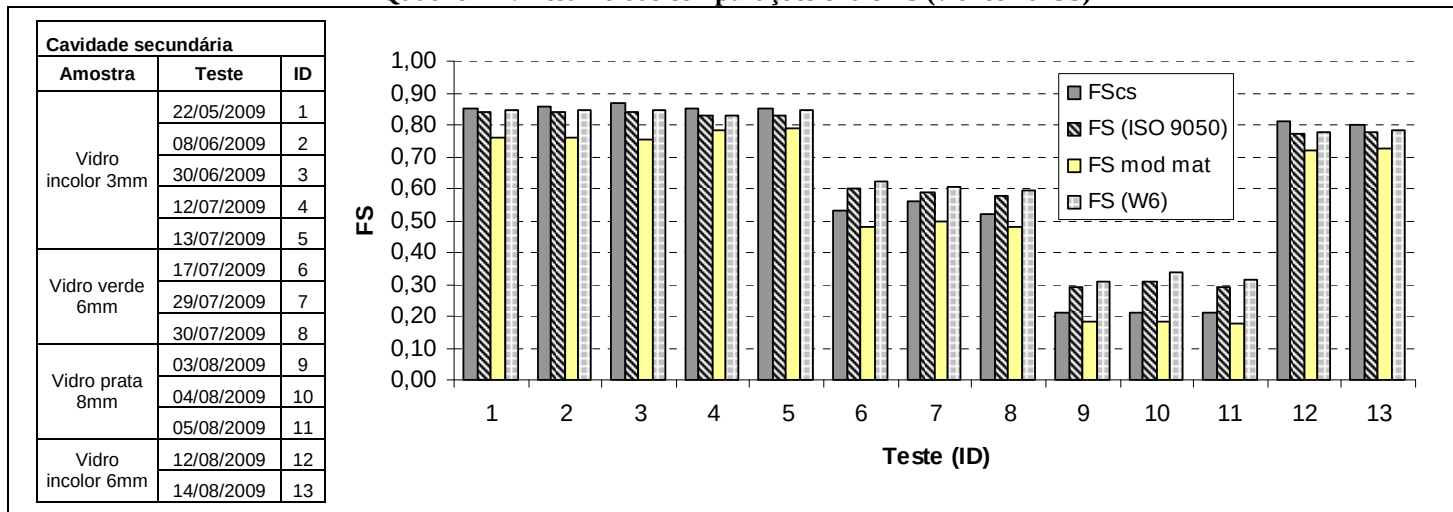
Para os vidros (na CP e na CS), são comparados os resultados do FS verificados nas medições x teórico (ISO 9050) x modelo matemático x W6. Já para as proteções solares, é apresentada a comparação do FS verificado nas medições x teórico (com base na ASHRAE (2005)) x W6.

Quadro 7-1. Resumo das comparações entre FS (vidros na CP)

Cavidade principal		
Amostra	Teste	ID
Vidro incolor 3mm	22/05/2009	1
	08/06/2009	2
	30/06/2009	3
	12/07/2009	4
	13/07/2009	5
Vidro verde 6mm	17/07/2009	6
	29/07/2009	7
	30/07/2009	8
Vidro prata 8mm	03/08/2009	9
	04/08/2009	10
	05/08/2009	11
Vidro incolor 6mm	12/08/2009	12
	14/08/2009	13

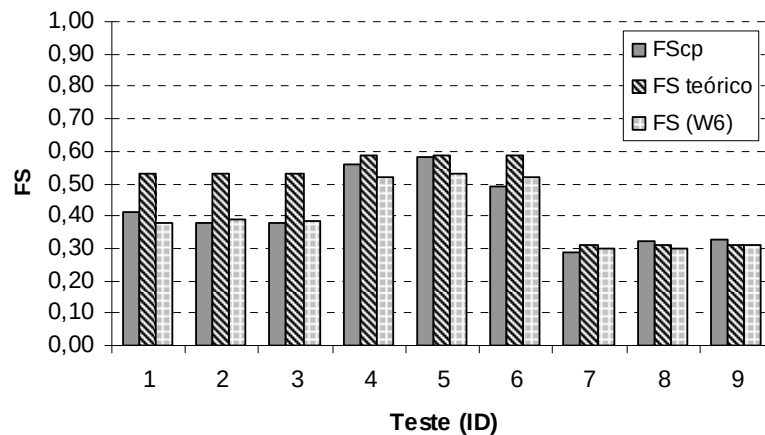


Quadro 7-2. Resumo das comparações entre FS (vidros na CS)

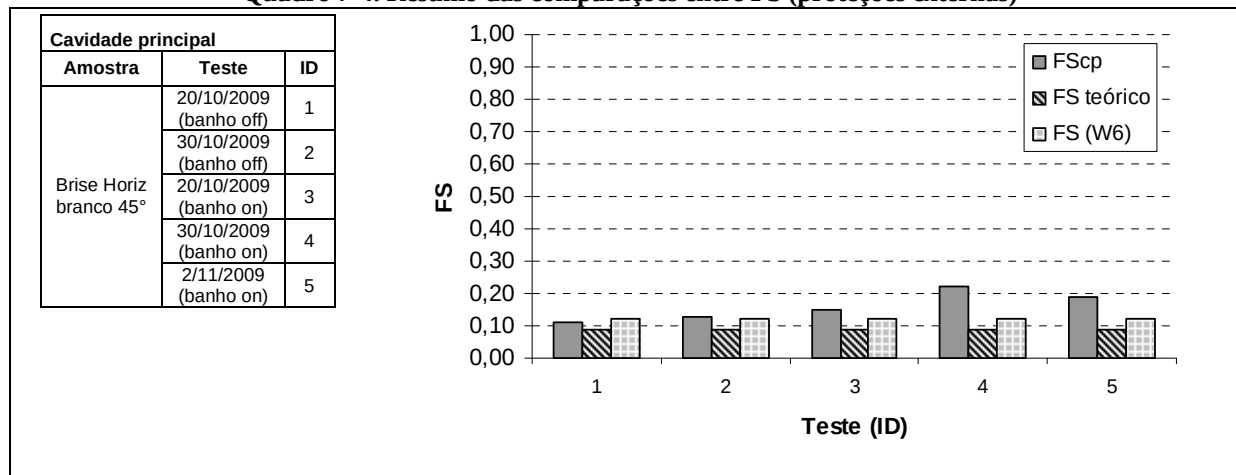


Quadro 7-3. Resumo das comparações entre FS (proteções internas)

Cavidade principal		
Amostra	Teste	ID
Persiana branca 45°	21/08/2009	1
	22/08/2009	2
	26/08/2009	3
Persiana preta 45°	27/08/2009	4
	28/08/2009	5
	29/08/2009	6
Rolô branco	30/08/2009	7
	31/08/2009	8
	01/09/2009	9



Quadro 7-4. Resumo das comparações entre FS (proteções externas)



8 CONCLUSÕES

8.1 SÍNTESE GERAL E OUTRAS CONSIDERAÇÕES

Este trabalho apresentou o projeto e a construção de um calorímetro solar para a determinação do FS de vidros e janelas (com ou sem proteções solares) sob condições reais de utilização. O dispositivo emprega dois sistemas diferentes para quantificar o fluxo de calor que penetra através do elemento de fechamento testado. O primeiro sistema determina o ganho térmico em função da diferença de temperatura do líquido de resfriamento da cavidade principal (usada para testes de elementos com dimensões em escala real – 150x120cm) e o outro sistema, aplicado à cavidade secundária (com dimensões reduzidas – 50x50cm), quantifica o calor adquirido através de vidros por meio de transdutores de fluxo.

Após a etapa de construção do calorímetro, a fase de calibração do dispositivo demandou um longo período de testes usando o vidro de referência incolor 3mm, com duração de mais de um ano de atividades. No teste inicial, o resultado do FS medido na cavidade principal (CP) apresentou uma incerteza (desvio padrão) bastante elevada, chegando a $\pm 0,26$ em torno da média. A cavidade secundária (CS) também apresentou problemas de funcionamento neste primeiro teste. Assim, logo de início já houve a necessidade de uma série de ajustes. Na CP a homogeneização da temperatura da água de resfriamento e o isolamento térmico foram melhorados, e também alguns parâmetros do sistema de controle foram alterados. Em relação à CS, houve a necessidade de uma nova calibração dos transdutores de fluxo e da utilização de um banho térmico exclusivo para resfriamento.

Depois destes ajustes, em uma segunda série de testes, o desvio padrão dos resultados medidos na CP foi reduzido em relação ao teste inicial (de $\pm 0,26$ passou para $\pm 0,15$). Apesar da aparente melhora, esta variação ainda era bastante elevada. Além disso, o resultado do FS médio observado não era coerente, pois resultava em valores acima de 1 (absoluto). Nesta etapa, o controle da temperatura da cavidade era realizado em função da temperatura do ar externo, e buscava-se uma condição de ΔT nula entre estes dois parâmetros. Com isso, concluiu-se que, além da incerteza gerada pela instrumentação, também as metodologias de controle e de cálculo do FS adotadas não estavam apropriadas para representar as condições de teste.

O resultado da CS apoiou esta idéia quando experimentalmente se verificou que por meio da alteração da condição de ΔT era possível melhorar a aproximação do valor do FS medido com o valor esperado (teórico). Depois disso, uma análise teórica dos processos físicos de transferência de calor envolvidos indicou que a situação mais comum nas medições em campo realizadas com vidros é aquela onde o vidro aquecido pela radiação solar atinge uma temperatura superior a T_{ARint} e a T_{AR} , e não há troca de calor diretamente entre o ar interno e o ar externo.

A partir daí, uma nova metodologia de determinação do FS e também uma nova condição de controle de temperatura das cavidades foram desenvolvidas para a CP e para a CS. Esta nova condição foi estabelecida como dependente da temperatura média do vidro. Desta forma, o ΔT observado passou a ser a diferença entre a temperatura da cavidade e do vidro.

O efeito das variações deste ΔT entre a cavidade e o vidro foi analisado experimentalmente e também com o auxílio de um modelo matemático aplicado a CP e a CS. As análises paramétricas desenvolvidas com o modelo matemático mostraram que a variação positiva ou negativa do ΔT cavidade-vidro tem influência direta sobre o valor do FS. O grau dessa influência dependerá do valor do ΔT aplicado e também da absorção do vidro, como foi demonstrado na comparação entre o vidro incolor e o vidro verde.

Assim, depois de realizadas novas medições com o vidro incolor 3mm, a melhoria da primeira para a segunda fase de calibração foi significativa, sendo os resultados experimentais encontrados na segunda fase de calibração considerados satisfatórios tanto para a CP quanto para a CS. Estes valores de FS medidos apresentaram uma boa aproximação com o padrão comparativo estabelecido com a ISO 9050, o que permitiu dar continuidade aos testes com outros vidros e proteções solares. Também já ficou evidente nos resultados destas medições, que a CS apresentava uma maior estabilidade e menor incerteza nos valores de FS determinados em cada teste.

Depois da etapa de calibração utilizando o vidro de referência, testes com outros tipos de vidros (verde 6mm, prata 8mm e incolor 6mm), e também com proteções solares internas (persianas horizontais e cortina rolô) e externas (brise horizontal) foram realizados.

Sobre os vidros, dois pontos relacionados com a condição de ΔT cavidade-vidro chamaram a atenção. O primeiro é a existência de uma diferença entre os valores de ΔT aplicados na CP e na CS, onde os

valores absolutos e a faixa de ajuste do ΔT na CP são superiores aos da CS. Na CP os valores aplicados aos três vidros ficaram entre $-3,7^{\circ}\text{C}$ e $-10,4^{\circ}\text{C}$, já na CS esta variação foi de $-0,1^{\circ}\text{C}$ a $-2,9^{\circ}\text{C}$. O segundo ponto é que os ajustes de ΔT são diferenciados para cada vidro testado. Com base nestas observações experimentais, foi possível estimar faixas de aplicação de ΔT cavidade-vidro para a CP e CS em função do tipo de vidro. Para as proteções solares, uma condição de ΔT cavidade-vidro também precisou ser definida.

De modo geral, os resultados de FS dos vidros de maior transmissão (incolor) se aproximaram mais dos valores teóricos usados como referência (ISO 9050), com uma variação abaixo de 6%. Já nos vidros com maior absorção, verde e prata, esta diferença em relação ao resultado teórico chegou próxima a 17% e 33%, respectivamente. Para as proteções internas, as melhores aproximações com os valores teóricos (ASHRAE) ocorreram para a persiana preta e o rolô branco, ficando, na maioria dos testes, com diferenças inferiores a 5%. Já em todos os testes com a persiana branca, estas diferenças foram mais significativas, permanecendo entre 22% e 29%. Nos testes com o brise externo, embora os valores medidos se apresentem na mesma ordem de grandeza dos valores de referência, as variações foram mais acentuadas (entre 20% e 145%) em função da época desfavorável de medição e das limitações da CP para medidas com ganho de calor reduzido. Além das diferenças em relação aos valores teóricos, nesta etapa também foram analisadas as incertezas do FS medido. Na maioria dos casos, a incerteza absoluta estimada na CP foi de $\pm 0,12$, e na CS igual a $\pm 0,04$.

Por fim, os testes foram simulados no programa Window6 (W6) e no modelo matemático (apenas vidros). Na comparação com o modelo matemático, os valores de FS medidos na CP apresentaram uma ótima aproximação para todos os vidros, com diferenças praticamente sempre abaixo de 6%. Já na CS estas diferenças ficaram entre 6% e 17%. Em relação ao W6, no caso dos vidros, as diferenças encontradas seguiram a mesma tendência observada na comparação experimental x teórico (ISO 9050), sendo de até no máximo 5% para os vidros incolores, até 20% para o verde, e até 61% para o prata. Para as proteções internas, houve uma ótima aproximação com o W6, com variações inferiores a 9% em todos os testes. No brise, a diferença máxima entre o valor medido e o simulado foi de 45%.

A seguir são apresentadas outras conclusões e considerações importantes derivadas do desenvolvimento do trabalho:

Tanto o projeto como a fabricação e montagem dos diferentes componentes do calorímetro foram processos complexos que exigiram a aplicação de conhecimentos derivados de diversos ramos da engenharia, além de consideráveis recursos financeiros.

Sobre a etapa de construção do calorímetro, destaca-se também a necessidade de uma calibração cuidadosa dos instrumentos (sensores) utilizados no monitoramento das diversas variáveis associadas à determinação do FS e ao funcionamento do calorímetro. Esta etapa é sempre de grande importância visto que os resultados do FS são diretamente dependentes das medidas destas variáveis, e, conseqüentemente, a incerteza associada ao FS também depende da precisão nas leituras dos sensores.

A análise do fenômeno físico da passagem do fluxo de calor através do vidro mostrou que, dependendo da condição de medição, não é possível quantificar ganhos (ou perdas) de calor entre o ar interno e externo do calorímetro sem levar em consideração a temperatura do vidro simples.

A modelagem matemática aplicada à representação do processo de medição nas duas cavidades do calorímetro exigiu diversas simplificações de cálculo e estimativas de variáveis. Especialmente as estimativas dos coeficientes globais de troca de calor (h_{int} e h_{ext}) são um ponto delicado, uma vez que estas exigem muitas suposições teóricas.

Em termos médios, os valores de FS medidos, tanto na CP quanto na CS, apresentaram boa aproximação com os resultados teóricos de referência e também entre si.

Na CP, a incerteza é significativamente mais alta do que na CS, de três a quatro vezes maior. Isso se deve basicamente ao processo de medição utilizado na CP, que depende da diferença de temperatura da água que circula entre a entrada e saída da cavidade. Quando o ganho é baixo, a incerteza do sensor (termopar), associada a perturbações ao longo do caminho percorrido, torna-se proporcionalmente elevada em relação ao valor da diferença de temperatura medida. Como o cálculo do FS é dependente desta diferença de temperatura, esta incerteza é transmitida para o resultado final do FS.

O processo de medição com o uso de fluxímetros se mostrou mais estável e com menores incertezas. Embora já se tivesse idéia do potencial destes dispositivos, o seu uso em uma cavidade de maiores dimensões não foi viável por dificuldades técnicas e financeiras na produção dos sensores.

Além das incertezas de medição, os valores de h_{int} e h_{ext} adotados são determinantes na aproximação dos resultados do FS medido e teórico, especialmente para os vidros (ou proteções) com alto índice de absorção da radiação solar.

8.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

No sistema de medição:

- Uma das principais limitações do sistema de medição do calorímetro está ligada ao ângulo de incidência da radiação. Embora durante a fase de concepção do calorímetro houvesse a intenção de conseguir realizar pequenas inclinações com a estrutura do trailer, permitindo assim algum ajuste no ângulo de incidência, essa possibilidade se mostrou inviável após a instalação da instrumentação. A inclinação da estrutura provavelmente provocaria danos aos sistemas de controle, monitoramento e de resfriamento (banhos), além de dificultar a atividade do operador internamente. Assim, os testes ficam restritos a um posicionamento vertical das amostras. Com isso, os ângulos de incidência e conseqüentemente os níveis de radiação dependerão da posição solar, em função da latitude local e da época de medição ao longo do ano.
- Sobre o sistema de resfriamento da cavidade principal (CP), diferentemente do que se pensava na fase de projeto, o banho de maiores dimensões e volume apresenta mais dificuldade para homogeneização e controle da temperatura da água. Além disso, existe a dificuldade de equalizar as temperaturas nas faces que compõem a CP. Para isso, o processo de ajuste de vazões precisa ser realizado manualmente de maneira diferenciada para cada face. Com vazões diferenciadas e aquecimento irregular das fases, surgem problemas hidrodinâmicos que geram oscilações e dificuldades de escoamento, o que prejudica a obtenção de uma temperatura uniforme na cavidade.
- Outra limitação da CP é a dificuldade dos sensores utilizados (termopares) para medir a diferença de temperatura na água de entrada e saída em testes com elementos que proporcionem ganhos de calor reduzido (ex: brises), o que implica em grandes elevações das incertezas nos resultados do FS.

- Os sistemas de aquisição de dados e controle também apresentam deficiências. A leitura da vazão ainda precisa ser realizada diretamente pelo operador. Também a temperatura média do vidro (que serve como base no controle do banho térmico da CP) e o ΔT aplicado, precisam ser determinados pelo operador e inseridos no software de controle. O banho térmico da CS não está interligado ao controle, tendo que ser ajustado em paralelo e de modo contínuo pelo operador. Além disso, o equacionamento para a determinação instantânea do FS a partir dos dados medidos não está completamente implementado no software.
- Ainda o sistema de alimentação elétrica precisaria ser reforçado para atender novas cargas de equipamentos não previstos na fase de projeto. O número de canais do sistema de aquisição também necessita ser ampliado para possibilitar medidas de outras variáveis, como a temperatura das proteções solares.

No método de medição:

- No método de determinação do FS proposto para o calorímetro, o controle da temperatura da cavidade em função da temperatura do vidro não levou em conta o uso das esquadrias na janela a ser testada. Para o caso de uma avaliação da janela completa, a temperatura teria de ser ponderada em função da área de vidro e da área de esquadria, para que fosse possível estabelecer uma condição apropriada de ΔT entre a temperatura média da cavidade e da janela.
- Não foram estudados os efeitos da presença de proteções solares internas e externas sobre os coeficientes globais de troca de calor internos e externos. Em todos os testes foram adotadas as mesmas correlações (e condições) de estimativa destes coeficientes usadas para os vidros sem outros elementos associados.
- A incerteza absoluta encontrada nos resultados de FS obtidos na CP é superior à incerteza normalmente observada nos resultados apresentados por outros calorímetros (ex: $\pm 0,04$ para o MOWITT).
- Apesar das limitações existentes, o resultado coerente das medidas de FS realizadas com o calorímetro frente aos valores teóricos de referência demonstrou que o equipamento tem condições técnicas de ser usado (podendo até mesmo ser aperfeiçoado) para aplicações em pesquisas ou como suporte em futuros processos de certificação de janelas desenvolvidos no Brasil.

8.3 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Novos testes com proteções solares externas (sob níveis de radiação mais elevados) e com outros tipos de elementos (vidros simples, duplos, triplos, proteções internas, elementos de sombreamento entre vidros, etc.), incluindo variações dos ângulos de incidência da radiação solar e dos ângulos de fechamentos das lâminas.
 - Testes utilizando janelas completas (com esquadrias);
 - Testes com proteções solares externas adaptadas à cavidade secundária;
 - Aprofundar o estudo sobre os coeficientes de troca de calor, incluindo estimativas destes valores para o caso de aplicação de elementos de proteção solar;
 - Comparar os resultados de FS medidos no calorímetro com valores encontrados através de outros métodos e dispositivos.
 - Desenvolvimento de uma norma brasileira para determinação e estimativa do FS em vidros, proteções solares e janelas completas.
-

REFERÊNCIAS

ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. HVAC Systems and Equipment 2000. Chapter 43 – Heat Exchangers. Atlanta, GA, USA, 2000.

ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Fundamentals Handbook 2005. Chapter 31 – Fenestration. Atlanta, GA, USA, 2005.

CARAM, R.M. Estudo e Caracterização de Fachadas Transparentes para Uso na Arquitetura: Ênfase na Eficiência Energética. São Carlos, 2002. Texto de Livre-Docência, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ASTM. Standard E 891-87, Terrestrial solar spectral irradiance tables at air mass 1.5. Philadelphia: American Society of Testing Materials, 1987.

Arasteh, D. Advances in window technology: 1973 – 1993. Report LBL - number 36891. Building Technologies Program, Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, February, 1995.

Bauman, F. S.; Place, J. W.; Thornton, J.; and Howard, T. C. An Integrating Window Pyranometer for Beam Daylighting Measurements in Scale-Model Buildings. ASHRAE Transactions, v. 92 (part 1A), p. 486-493, 1986.

Caram, R. M. Estudo e Caracterização de Fachadas Transparentes para Uso na Arquitetura: Ênfase na Eficiência Energética. Texto de Livre-Docência. UFSCar, agosto de 2002.

Carmody, J.; Selkowitz, S.; Heshong, L. Residential Windows: a guide to new technologies and energy performance. 1ª Edição, NY, USA, 1996.

Carmody, J.; Selkowitz, S.; Lee, E.; Dariush, A.; Willmert, T. Window Systems for High-Performance Buildings. 1ª Edição, NY, USA, 2004.

Catton, I. Natural Convection in Enclosures. Proc 6th Int. Heat Transfer Conf. Toronto, Canadá, 1978, Vol 6 pp. 13-31 *apud* Incropera, F. P. e DeWitt, D. P. Fundamentos da transferência de calor e massa. 5º edição, editora LTC. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

Churchill, S.W., and Chu H.H.S. Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate. Int J. Heat Mass Transfer, 18, 1323, 1975. *apud* Incropera, F. P. e DeWitt, D. P. Fundamentos da transferência de calor e massa. 5º edição, editora LTC. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

Collins, M. R. Analysis of solar heat gain and thermal transmission for windows with louvered shade Systems. PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Queen's University at Kingston, CA, 2002, 233 pp. Available to download: <<http://www.collectionscanada.ca/obj/s4/f2/dsk3/ftp05/NQ65668.pdf>>

Collins, M.R. and Harrison, S.J. Estimating the solar heat and thermal gain from a window with and interior venetian blind. 2004a, ASHRAE Transactions 110(1): 486-500.

Collins, M.R. and Harrison, S.J. Calorimetric analysis of the solar and thermal performance of windows with interior louvered blinds. 2004b, ASHRAE Transactions 110(1): 474-85.

Collins, M.R. and S.J. Harrison. The effects of calorimeter tilt on the inward-flowing fraction of absorbed solar radiation in a venetian blind. 2001a. ASHRAE Transactions 107(1): 677-83.

Collins, M.R., and S.J. Harrison. Test of Measured Solar Heat Gain Variation in a Fenestration and Shade Combination in a Fenestration and Shade Combination with Respect to Test Specimen Tilt. 2001b. ASHRAE Transactions 107(1): 677-99.

Comunelo, R. R. Convecção Natural em Placa Plana Vertical: Influência de Superfícies Vizinhas no Coeficiente de Troca. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). EMC - UFSC, 2006.

Frost, K.; Eto, J.; Arasteh, D.; Yazdanian, M. The national energy requirements of residential windows in the U.S.: today and tomorrow. Proceedings on Energy Efficiency in Buildings, August 1996.

Gonçalves, A. A. Jr. Metrologia. Apostila da disciplina Fundamentos de Metrologia e Estatística. Laboratório de Metrologia e Automação - LabMetro. Departamento de Engenharia Mecânica. UFSC. Florianópolis, 2002.

Güths, S. Anémomètre a effet Peltier et fluxmètre thermique - conception et réalisation – application à l'étude de la convection naturelle". Tese de Doutorado, Université d'Artois (França), 1994.

Güths, S., Philippi, P.C., Gaviot, E. e Thery, P. Um Transdutor de Fluxo de Calor a Gradiente Tangencial. Anais do XI Congresso Brasileiro em Engenharia Mecânica (COBEM), CDROM, Belo Horizonte, 1995.

Güths, S., Domingos, R. H., Oliveira R. P. de. Análise de erro no processo de calibração de transdutores de fluxo de calor. VII ENCIT, Rio de Janeiro, 1998.

Harrison, J. S. e Dubrous, F. M. Determination of window thermal characteristics using a solar simulator based test method. ASHRAE Transactions 96(1), 1990 *apud* Harrison, J. S. e Van Wonderen, S. J. A test method for the determination of

window solar heat gain coefficient. ASHRAE Transactions 100(1), p. 1057-1064, 1994.

Harrison, J. S. e Van Wonderen, S. J. A test method for the determination of window solar heat gain coefficient. ASHRAE Transactions 100(1), p. 1057-1064, 1994.

Harrison, J. S. e van Wonderen, S. J. Evaluation of Solar Heat Gain Coefficient for Solar-Control Glazings and Shading Devices. ASHRAE Transactions 104(1), p. 1051-1062, 1998.

Incropera, F. P. e DeWitt, D. P. Fundamentos da transferência de calor e massa. 5ª edição, editora LTC. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

IEA. International Energy Agency. Key World Energy Statistics. 2006.

ISO 9050. Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors. International Organization for Standardization, 2003.

ISO 15099. Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations, International Organization for Standardization, 2003.

LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) WINDOW 6 / THERM 6 Research Version User Manual. LBNL-941, March 2006.

LBNL. Facilities. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2007. Disponível em: <<http://windows.lbl.gov/facilities/default.htm/>>. Acesso em: Novembro de 2007.

LBNL. Software Tools. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2008. Disponível em: <<http://windows.lbl.gov/software/default.htm/>>. Acesso em: fevereiro de 2008.

Li, D. H. W. and Lam, J. C. Solar heat gain factors and the implications to building designs in subtropical regions. Energy and Buildings v. 32, p. 47-55, 2000.

Lopes, G. Marinoski, D.L. Güths, S.; Lamberts, R. Montagem do sistema hidráulico e fabricação de sensores. Projeto: Desenvolvimento de métodos de avaliação de transferência de calor em janelas – P&D Furnas/Aneel. Relatório interno LabEEE/LMPT nº018, 2007a.

Lopes, G. Marinoski, D.L. Güths, S.; Lamberts, R. Calibração de sensores (fluxímetros, termopares, piranômetros e anemômetros). Projeto: Desenvolvimento de métodos de avaliação de transferência de calor em janelas – P&D Furnas/Aneel. Relatório interno LabEEE/LMPT nº018, 2007b.

Lucini, H. C. Manual técnico de modulação de vãos de esquadrias. 1ª edição. Editora PINI. São Paulo, 2001.

Klems, J. H. e Warner, J. L. New Method for predicting the solar heat gain of complex fenestration systems. LBL 32198, 1992.

Klems, J. H. New Method for predicting the solar heat gain of complex fenestration systems. II. Detailed description of the matrix layer calculation. LBL 324716, 1993.

Klems, J. H. e Kelley, G. O. Calorimetric measurements of inward-flowing fraction for complex glazing and shading systems. ASHRAE Winter Meeting, Atlanta, GA, February 17-21, 1996.

Klems, J. H., Warner, J. L. e Kelley, G. O. A comparison between calculated and measured SHGC for complex fenestration systems. ASHRAE Winter Meeting, Atlanta, GA, February 17-21, 1996.

Klems, J. H. Solar heat gain through fenestration systems containing shading: summer of procedures for estimating performance from minimal data. AC-02-2-2. ASHRAE Transactions, 2002, p.512-524.

Macedo, C. C. Análise do desempenho térmico e luminoso de sistema de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol. Dissertação de mestrado, UFSC, 2002.

Macedo, C. C. e Pereira, F. O. R. Radiômetro de abertura: dispositivo para a caracterização térmica de sistemas de iluminação natural. Anais do VII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e III Conferência Latino-Americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações (ENCAC-COTEDI). Curitiba-PR, 2003.

MacGregor, R. K. and Emery, A. P. Free Convection Through Vertical Plane Layers: Moderate and High Prandtl Number Fluids. J. Heat Transfer 91, 391, (1969) *apud* Incropera, F. P. e DeWitt, D. P. Fundamentos da transferência de calor e massa. 5ª edição, editora LTC. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

McCluney, R. The Death of the Shading Coefficient? ASHRAE Journal, March/91, p. 36-45, 1991.

Marinoski, D. L. Aperfeiçoamento de um sistema de medição de ganho de calor solar através de aberturas. Dissertação de mestrado, UFSC, 2005.

Marinoski, D. L.; Guths, S.; Pereira, F. O. R.; Lamberts, R. Improvement of a measurement system for solar heat gain through fenestrations. Energy and Buildings, v. 39 (2007) pag. 478-487.

Marinoski, D. L.; Guths, S.; Lamberts, R. Estudo da variação da convecção natural em cavidades. Projeto: Desenvolvimento de métodos de avaliação de transferência

de calor em janelas – P&D Furnas/Aneel. Relatório de atividades. N° 005. LabEEE-LMPT. Circulação interna. 2006a.

Marinoski, D. L.; Guths, S.; Lamberts, R. Definição do espaçamento dos tubos (serpentina) nas paredes da cavidade. Projeto: Desenvolvimento de métodos de avaliação de transferência de calor em janelas – P&D Furnas/Aneel. Relatório de atividades. N° 006. LabEEE-LMPT. Circulação interna. 2006b.

Marinoski, D. L. ; Lamberts, R. . Aplicação dos programas WINDOW e WIS para modelagem de janelas com proteções solares. Anais do ENCAC 07, Ouro Preto-MG, 2007.

Marinoski, D. L. ; Milbratz, J. H.; Lamberts, R. .Verificação de propriedades térmicas e ópticas de janelas através de simulação computacional. Anais do ENTAC 2008, Fortaleza-CE, 2008.

NBR15220-2. 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. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

NFRC 200. Procedure for Determining Fenestration Product Solar Heat Gain Coefficient and Visible Transmittance at Normal Incidence, National Fenestration Rating Council, 2004.

NFRC 201. Procedure for Interim Standard Test Method for Measuring the Solar Heat Gain Coefficient of Fenestration Systems Using Calorimetry Hot Box Methods, National Fenestration Rating Council, 2004.

Papamichael, K.; Klems, J.; Selkowitz, S. Determination and application of bidirectional solar-optical properties of fenestration systems. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Report LBL– 25124, March 1988.

Pereira, F. O. R. e Sharples, S. The development of a device for measuring the solar heat gain and shading coefficients of windows in scale models. Energy and Buildings v.17, p. 271-281, 1991.

Pereira, F. O. R. Luminous and thermal performance of windows shading and sunlighting reflecting devices. PhD Thesis, School of Architectural Studies, University of Sheffield, UK, 1992.

Pereira, F. O. R. Desenvolvimento de um aparato experimental para medição do ganho de calor solar de sistemas de aberturas complexas em modelos reduzidos. In: ENTAC'93, SAO PAULO, SP, 1993.

Pereira, F. O. R.; Pedrini, A.; Güths, S.; Medeiros, J. M. Relatório de trabalho sobre a execução do Radiômetro de Aberturas - Equipamento para medir o ganho de calor

solar de aberturas em edificações. Relatório de Projeto integrado CNPq. Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

Reilly, S. and Hawthorne, W. The impact of windows on residential energy use. ASHRAE Transactions, TO-98-10-1, p. 791-798, 1998.

SEECL - Solar Energy and Energy Conversion Laboratory. Solar Optical Properties of Fenestration Systems. Mechanical and Aerospace Engineering Department, University of Florida, 2000. Disponível em: <<http://seecl.mae.ufl.edu/solar/sop.html>>. Acesso em: Fevereiro de 2003.

Santos, J. C. P. Avaliação do Desempenho Térmico e Visual de Elementos Transparentes Frente à Radiação Solar. Tese (Doutorado). Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

Selkowitz, S. Window performance and building energy use: some technical options for increasing energy efficiency. Report LBL - number 20213 or Chapter 14 from Energy Sources: Conservation and renewable, AIP Conference Proceedings N° 135, Washington, D. C., April 27-28, 1985.

Szokolay, S. V. Solar heat gain through Fenestration, A Review of Current Practice. 2002. Architectural Science Review, volume 45, pp 211-217.

Tseng, C.C. and Goswami, D. Y. Effect of Tilt Angle and Temperature Difference on Solar Heat Gain Coefficient Measurement of Fenestration System. ASHRAE Transactions, AT-01-10-2, p 684-690, 2001.

WIS. Advanced Window Information System. Version 3.0. 2003. Disponível em: <<http://www.windat.org>>. Acesso em: Julho de 2006.

WINDOW5. Window 5.2 versão 5.2.17. LBNL, University of California, 2002. Disponível em: <<http://windows.lbl.gov/software/window/window>>. Acesso em: Julho de 2006.

Winkelmann, F. C. Modeling Windows in EnergyPlus. Simulation Research Group, EETD, Lawrence Berkeley National Laboratory, Maio 2001. Proc. Building Simulation 2001, IBPSA, Rio de Janeiro, September 2001.

Wright, J. W. VISION3 glazing system thermal analysis. Advanced Glazing System Laboratory. University of Waterloo, Waterloo, ON, 1992.

Wright, J. VISION4 glazing system thermal analysis. Advanced Glazing System Laboratory. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 1994.

ANEXOS

ANEXO A – Projeto executivo da cavidade principal

ANEXO B – Projeto executivo da cavidade secundária

ANEXO C – Projeto executivo do trailer de abrigo

ANEXO D – Projeto executivo do sistema elétrico do calorímetro

ANEXO E – Correlações para estimativa de coeficientes de troca de calor (h)

ANEXO F – Procedimento para verificação do ângulo de incidência

ANEXO G – Modelo matemático

ANEXO H – Outras informações sobre as medições realizadas

ANEXO I – Recomendações para execução de medições utilizando o calorímetro

ANEXO A – Projeto executivo da cavidade principal
(Obs.: dimensões em mm).

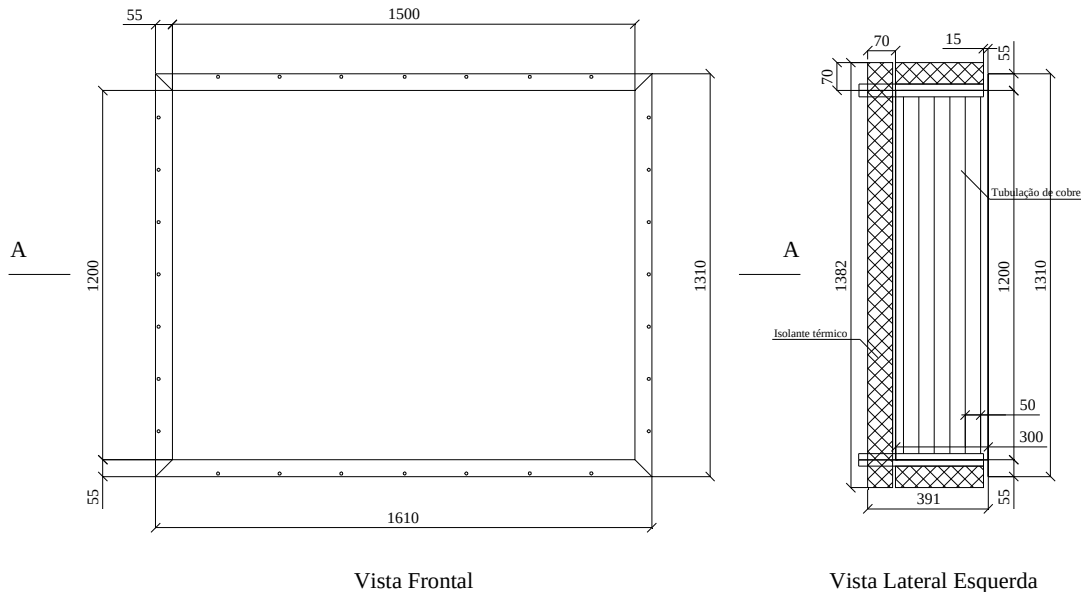
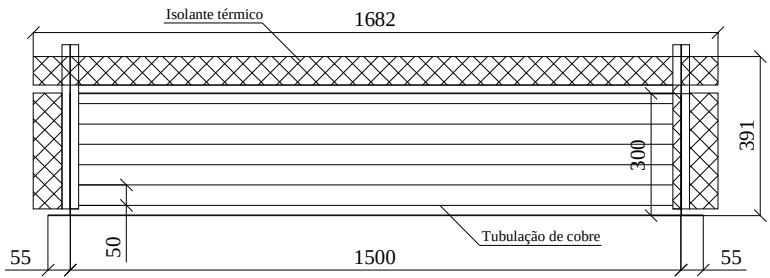
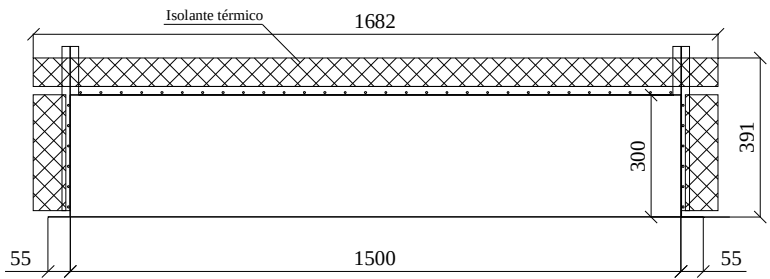


Figura A.1 - Vista Frontal e lateral esquerda da cavidade (sem escala)



Vista Superior



Corte A-A

Figura A.2 - Vista superior e corte A-A (sem escala)

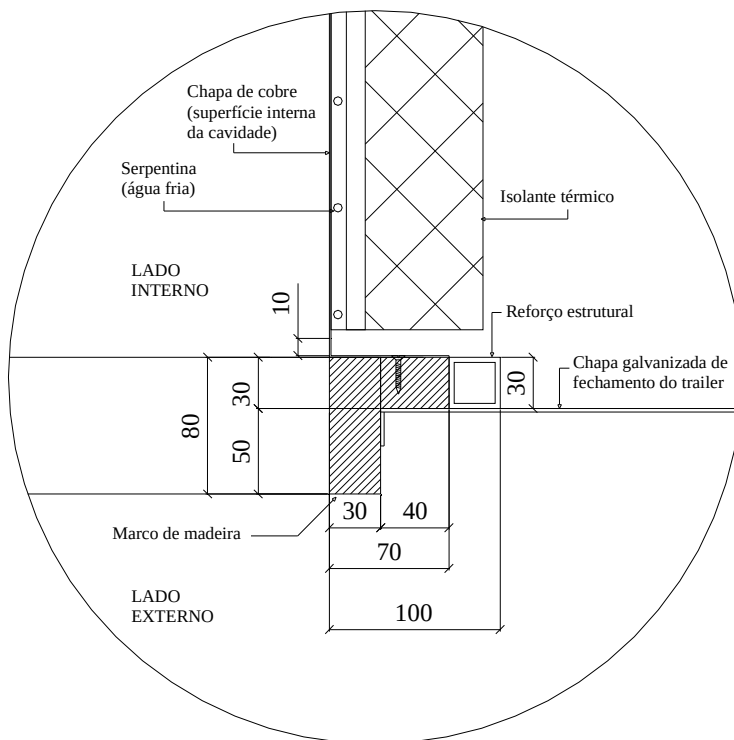


Figura A.3 - Detalhe de fixação da cavidade principal (sem escala)

ANEXO B – Projeto executivo da cavidade secundária
(Obs.: dimensões em mm).

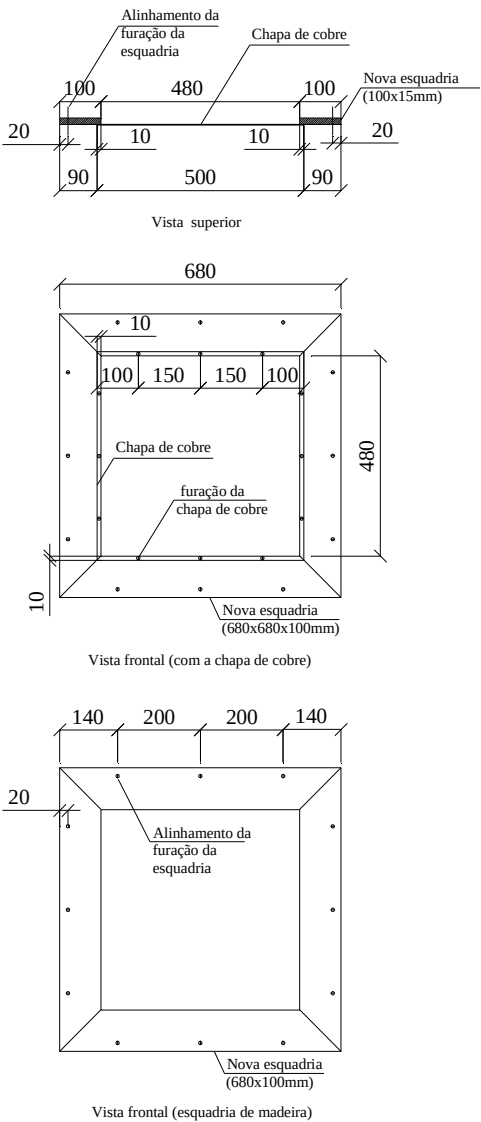


Figura B.1 - Projeto executivo da nova cavidade secundária (sem escala)

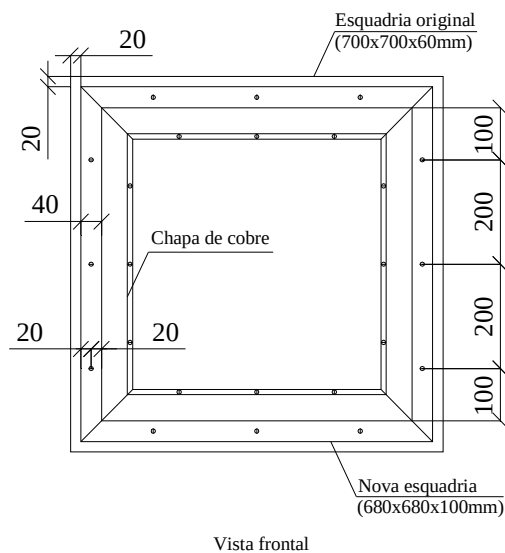


Figura B.2 - Projeto executivo da instalação da nova cavidade secundária (sem escala)

ANEXO C – Projeto executivo do trailer de abrigo
(Obs.: dimensões em mm).

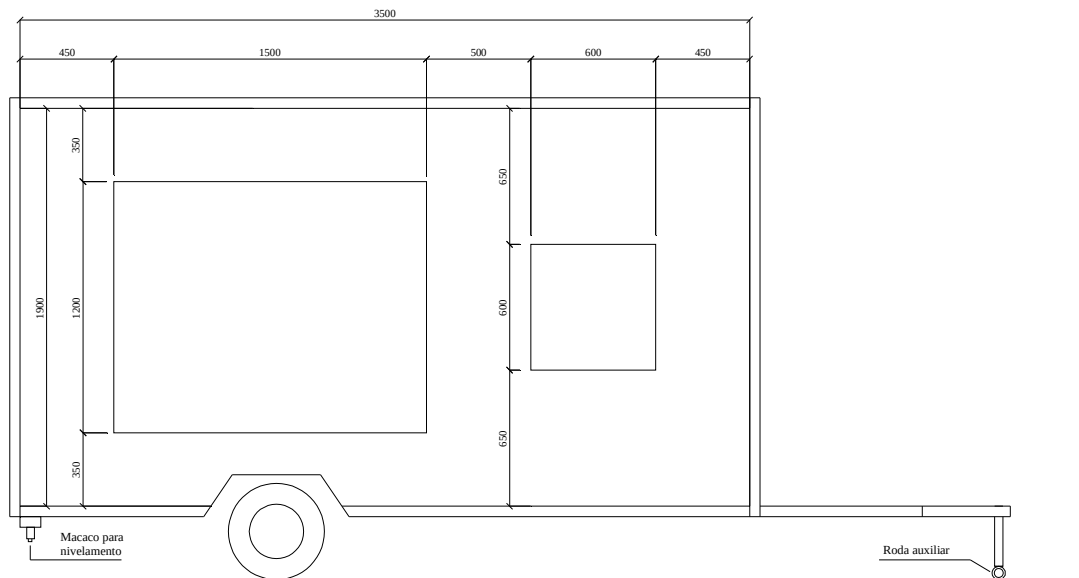


Figura C.1 - Vista frontal (sem escala)

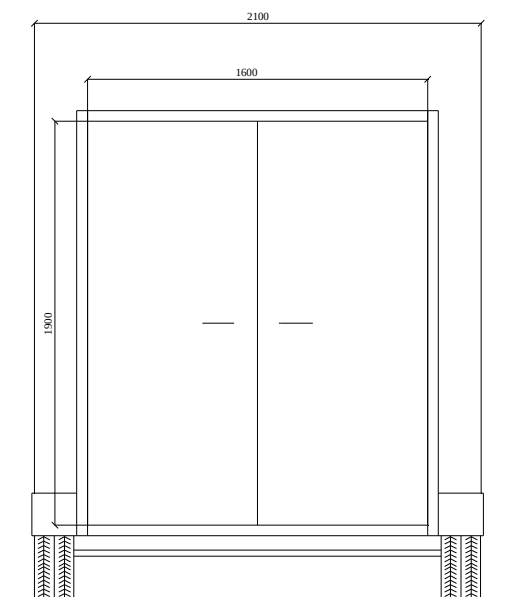


Figura C.2 - Vista lateral esquerda (sem escala)

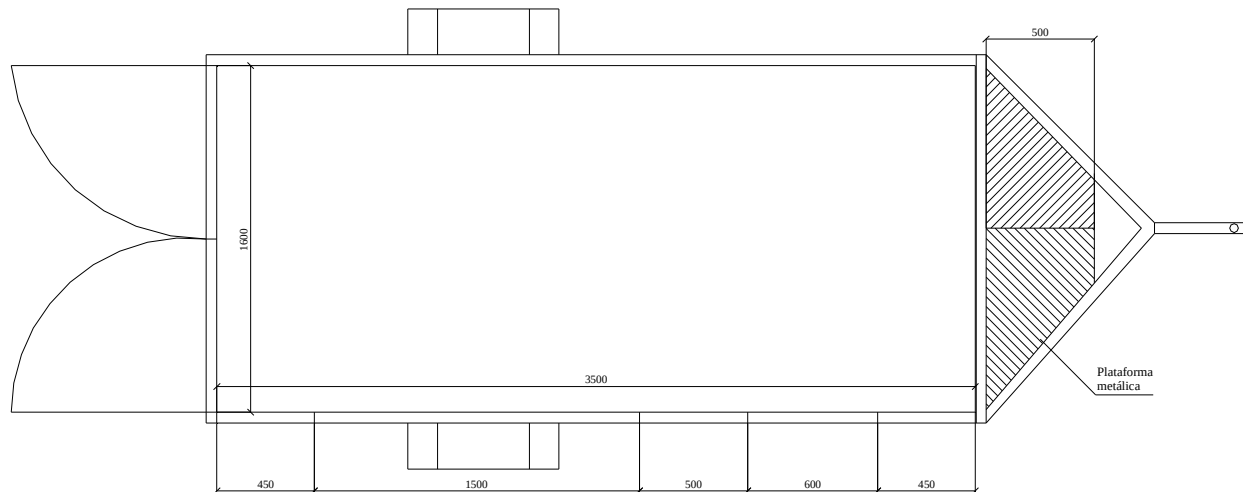


Figura C.3 - Vista superior (sem escala)

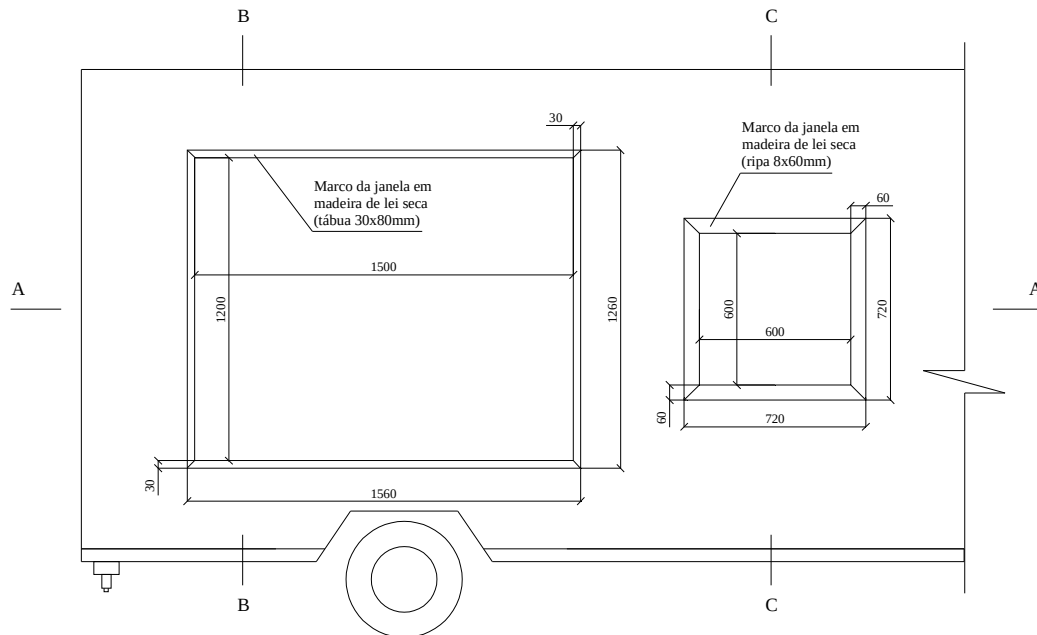
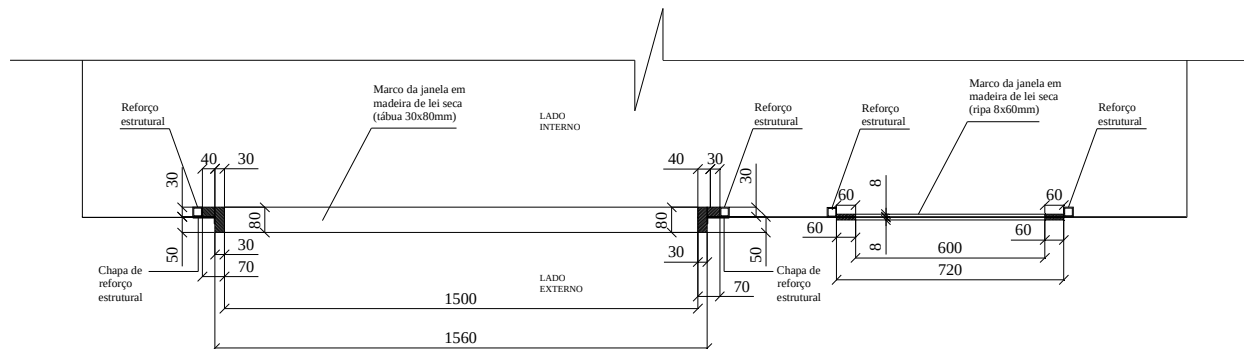
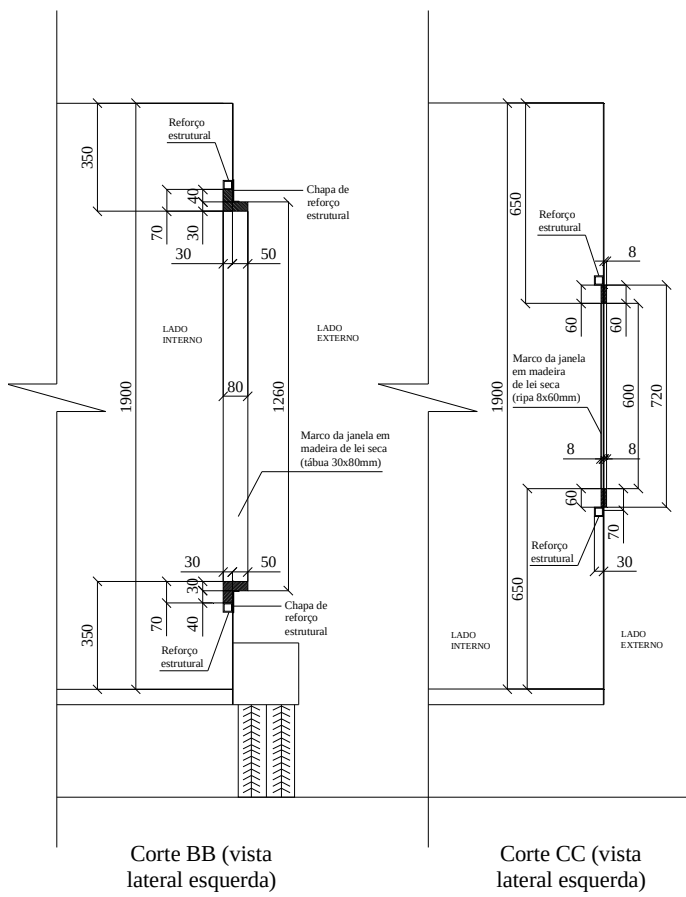


Figura C.4 - Detalhe para instalação das molduras de madeira (sem escala)



**Figura C.5 - Detalhe para instalação das molduras de madeira:
Corte AA - vista em planta (sem escala)**



**Figura C.6 - Detalhe para instalação das molduras de madeira:
Corte BB e CC - vista lateral esquerda (sem escala)**

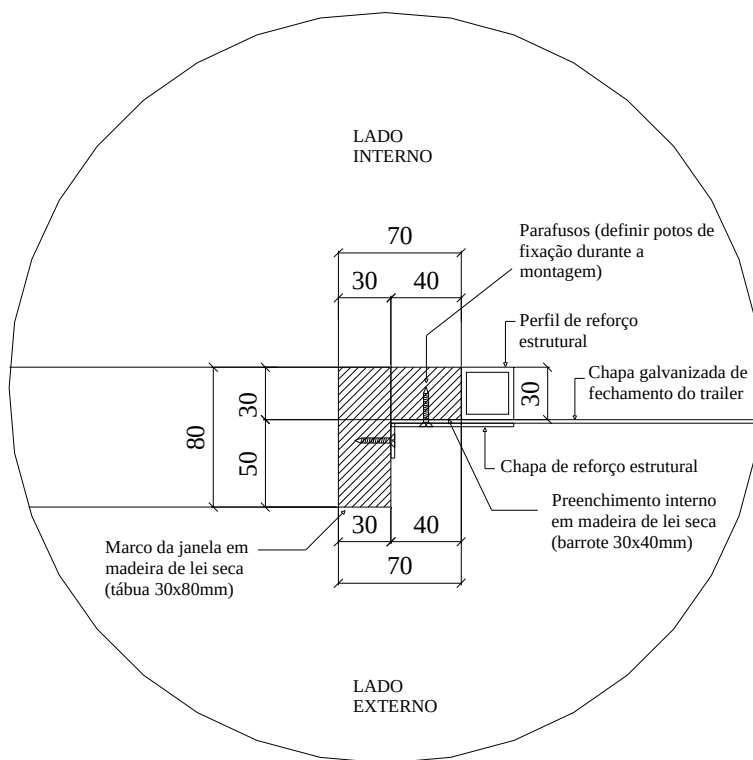


Figura C.7 - Detalhe de fixação da moldura de madeira: marco da abertura da cavidade principal (sem escala)

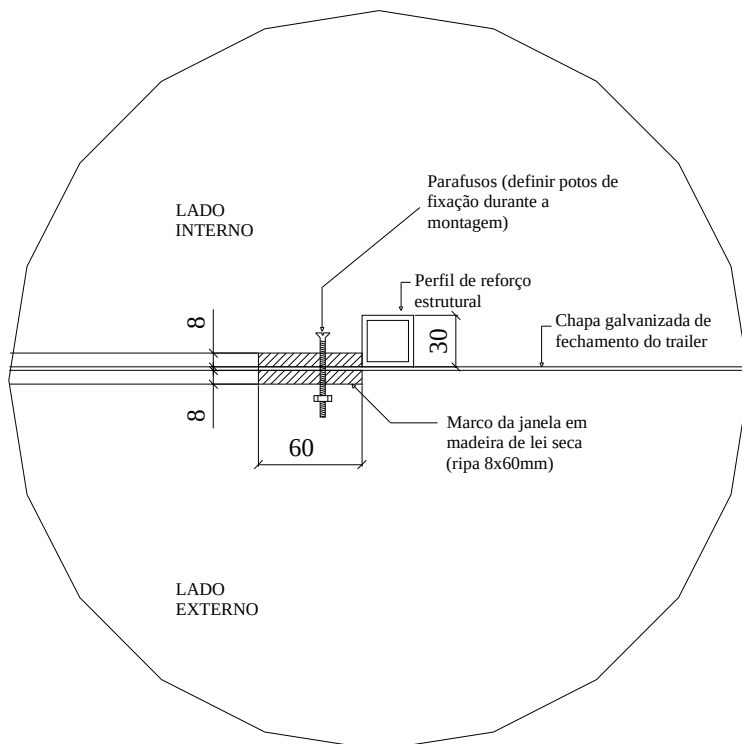


Figura C.8 - Detalhe de fixação da moldura de madeira: marco da abertura da cavidade secundária (sem escala)

ANEXO D – Projeto executivo do sistema elétrico do calorímetro

(Obs.: dimensões em mm).

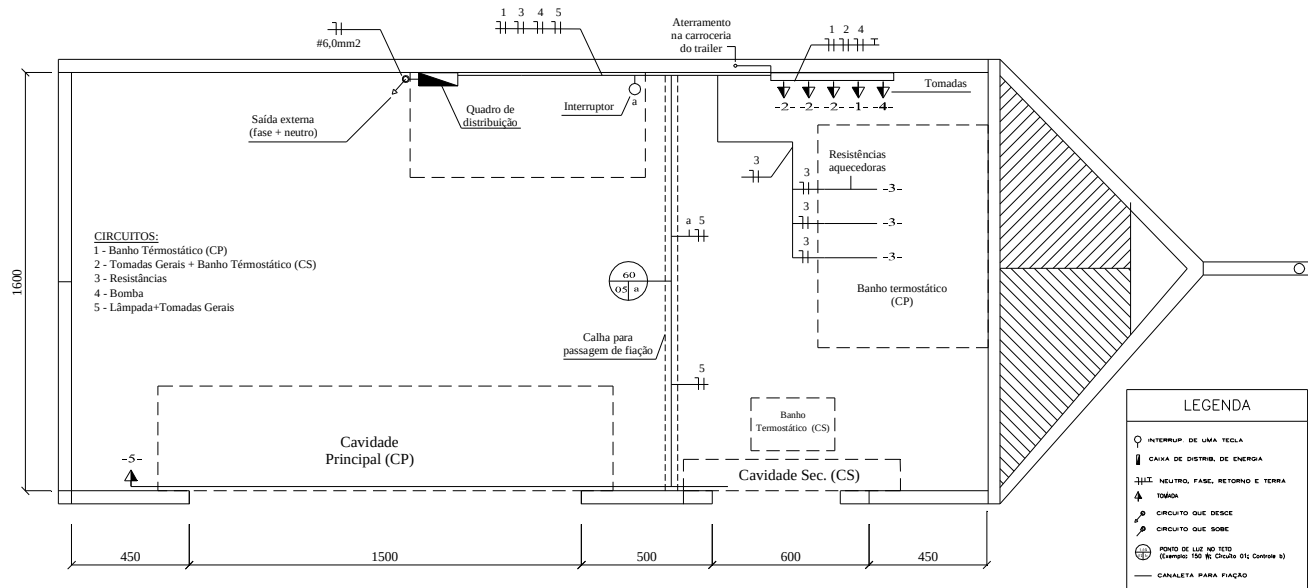


Figura D.1 - Projeto elétrico do calorímetro (vista em planta, sem escala)

ANEXO E – Correlações para estimativa de coeficientes de troca de calor (h)

1. CONVECÇÃO NATURAL EM SUPERFÍCIES PLANAS

No caso de trocas de calor através do processo conectivo entre um fluido (ar) e uma superfície plana (ex: faces das cavidades), podem ser considerados exclusivamente os efeitos do escoamento natural caso a condição $(Gr_L/Re_L^2) \gg 1$ seja satisfeita (Incropera e DeWitt, 2003), onde Gr_L é denominado “Número de Grashof” (adimensional) e Re_L é o “Número de Reynolds” (adimensional). Por sua vez, Grashof e Reynolds são definidos através das equações a seguir:

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \quad (E.1)$$

$$Re_L = \frac{\rho \cdot V_\infty \cdot L}{\mu} \quad (E.2)$$

Onde:

g = Aceleração da gravitacional (m/s^2);

β = Coeficiente de expansão térmica volumétrica (K^{-1});

T_s = Temperatura da superfície da placa ($^{\circ}C$ ou K);

T_∞ = Temperatura do fluido ($^{\circ}C$ ou K);

L = Comprimento da placa (m);

ν = Viscosidade cinética (m^2/s);

ρ = Densidade do fluido (kg/m^3);

V_∞ = Velocidade do fluido (m/s);

μ = Viscosidade ($kg/s.m$).

Ainda, temos β (para o caso de gases ideais) e ν como sendo:

$$\beta = \frac{1}{T_\infty} \quad (E.3)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (E.4)$$

Assumindo as superfícies das cavidades do calorímetro como placas planas, pode então ser adotada como verificações teóricas de coeficientes médios de convecção ($\bar{h}$), a correlação empírica apresentada por Incropera e DeWitt (2003) na forma:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} = C.Ra_L^n \quad (E.5)$$

Onde:

$\overline{Nu}_L$ = Número de Nusselt médio (adimensional);

$\bar{h}$ = Coeficiente de convecção médio (W/m²K);

k = Condutividade térmica (W/mK);

C = coeficiente em função do tipo de escoamento;

n = expoente em função do tipo de escoamento.

Assim, as expressões empíricas para a condição de escoamento laminar ($n=1/4$) e turbulento ($n=1/3$), nos respectivos limites de Ra_L , para uma placa em posição horizontal com fluxo ascendente ($T_s > T_\infty$), são dadas a seguir:

$$\overline{Nu} = 0,54.Ra_L^{1/4} \quad (E.6)$$

Condição geral: $10^4 < Ra_L < 10^7$

$$\overline{Nu} = 0,15.Ra_L^{1/3} \quad (E.7)$$

Condição geral: $10^7 < Ra_L < 10^{11}$

E para uma placa horizontal com escoamento descendente ($T_s < T_\infty$), temos:

$$\overline{Nu} = 0,27.Ra_L^{1/4} \quad (E.8)$$

Condição geral: $10^5 < Ra_L < 10^{10}$

Por sua vez, o número de Rayleigh (Ra_L) é definido como:

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (E.9)$$

Onde ainda :

α = difusividade térmica (m²/s);

Pr = número de Prandtl (adimensional).

Já para o caso de uma placa vertical, uma correlação que pode ser aplicada sobre toda a faixa de Ra_L tem sido recomenda por Churchill e Chu (1975) apud Incropera e DeWitt (2003), e é dada na forma da equação a seguir:

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387.Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0,492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (E.9)$$

2. CONVECÇÃO FORÇADA EM SUPERFÍCIES PLANAS

Para uma verificação teórica dos valores de “h” na superfície externa do vidro, foi adotada uma condição de camada limite turbulenta sobre toda a superfície. Tal condição é atingida pela existência de uma perturbação da camada limite no bordo de ataque, o que realmente ocorre na prática, uma vez que o vidro é fixado em uma borda de madeira sobressalente em todo o seu perímetro. Para esta situação, uma correlação apropriada para Nusselt médio é dada por Incropera e DeWitt (2003) através da equação (E.10):

$$\overline{Nu}_L = 0,037.Re_L^{4/5} . Pr^{1/3} \quad (E.10)$$

3. CONVECÇÃO NATURAL EM CÂMARAS NÃO VENTILADAS

No caso dos coeficientes de convecção no interior da câmara formada entre o vidro e cavidade (h_{car}), foram utilizadas correlações apropriadas para confinamentos em câmaras retangulares onde há diferença de temperatura entre as faces verticais internas. Estas correlações são dadas por Catton (1978) *apud* Incropera e DeWitt (2003) e MacGregor e Emery (1969) *apud* Incropera e DeWitt (2003) em função da relação H/L (altura/largura), Prandtl (Pr) e Rayleigh (Ra).

$$\overline{Nu}_L \equiv \frac{\overline{h}_L.L}{k} = 0,22 \left(\frac{Pr}{0,2 + Pr} Ra_L \right)^{0,28} \left(\frac{H}{L} \right)^{-\frac{1}{4}} \quad (E.11)$$

Condição geral: ($2 < H/L < 10$; $1 < Pr < 100000$; $10^3 < Ra < 10^{10}$)

$$\overline{Nu}_L \equiv \frac{\overline{h}_L \cdot L}{k} = 0,046 Ra_L^{1/3} \quad (\text{E.12})$$

Condição geral: ($1 < H/L < 40$; $1 < Pr < 20$; $10^6 < Ra < 10^9$)

A Tabela E.1 apresenta um exemplo com a comparação entre os valores de h_{car} estimados usando as correlações apresentadas para cada uma das cavidades do calorímetro.

Tabela E.1. Exemplo de valores de h_{car} estimados por diferentes correlações

“h_{car}” para a Cavidade Principal (CP)		
Condições: Espessura da câmara = 300mm ΔT entre as superfícies aquecidas = 10°C		
Referência	h_{car} (W/m²K)	R (m²K/ W)
Churchill e Chu (1975) apud Incropera e DeWitt (2003) – Convecção natural em uma placa plana vertical	3,0	0,33
Catton (1978) apud Incropera e DeWitt (2003) – Convecção em uma cavidade vertical retangular	1,49	0,67
“h_{car}” para a Cavidade Secundária (CS)		
Condições: Espessura da câmara = 18mm ΔT entre as superfícies aquecidas = 10°C		
Referência	h_{car} (W/m²K)	R (m²K/ W)
Condução pura	1,5	0,67
Churchill e Chu (1975) apud Incropera e DeWitt (2003) – Convecção natural em uma placa plana vertical	3,3	0,30
MacGregor and Emery (1969) apud Incropera e DeWitt (2003) – Convecção em uma cavidade vertical retangular	1,17	0,85

4. TROCA DE CALOR RADIANTE

A troca radiante também está presente na transmissão de calor entre o vidro (1) e a superfície interna da cavidade (2), e entre o vidro e a vizinhança no meio externo.

No caso da câmara formada entre o vidro e a cavidade, o coeficiente de troca radiante (h_r) pode ser obtido pela equação apresentada pela ASHRAE (2005):

$$h_r = 0,227 \varepsilon_{eff} [(T_m + 273)/100]^3 \quad (E.13)$$

Onde:

ε_{eff} = Emissividade efetiva (adimensional);

T_m = Temperatura média do ar na câmara (°C),

sendo a emissividade efetiva determinada através da relação:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2}\right) - 1} \quad (E.14)$$

Já h_r entre a superfície externa do vidro e a vizinhança é dado pela expressão apresentada por Incropera e DeWitt (2003):

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{viz}) (T_s^2 + T_{viz}^2) \quad (E.15)$$

T_{viz} é a temperatura da vizinhança que define a temperatura em que estão todas as superfícies vizinhas e o ar ao redor da placa (vidro).

5. COEFICIENTE GLOBAL DE TROCA (h_t)

Tendo em vista as trocas de calor por convecção e radiação, que ocorrem entre uma determinada superfície aquecida e o meio externo, o coeficiente global de troca (h_t) pode ser escrito conforme a equação (E.16), onde h_c é o coeficiente de troca por convecção e h_r é o coeficiente de troca radiante.

$$h_t = h_c + h_r \quad (E.16)$$

Assumindo que $T_{viz} = T_{\infty}$, então o fluxo total pode ser obtido por:

$$q_t'' = h_t (T_s - T_{\infty}) \quad (E.17)$$

6. CONSIDERAÇÕES SOBRE “h” APLICADO NAS ANÁLISES DO FATOR SOLAR

No caso das cavidades CP e CS, a emissividade efetiva (ϵ_{eff}) entre o vidro ($\epsilon=0,84$) e a parede da cavidade ($\epsilon=0,86$) é igual a 0,74. Adotando então uma temperatura média (t_m) de 27° para o ar no interior da câmara formada e aplicando a equação (E.13), então o valor do coeficiente de troca radiante (h_r) é igual a 4,5 W/m²K. Comparativamente, observa-se que a ISO 9050 utiliza para determinar coeficiente de troca de calor interno (h_{int}) a relação da equação (E.18), onde ϵ_i é a emissividade da superfície interna do vidro. Neste caso, h_r é dado pelo segundo termo da soma e depende somente da emissividade do vidro. Para um valor de emissividade do vidro de 0,84, então h_r é igual a 4,4 W/m²K.

$$h_{int} = \left(3,6 + \frac{4,4\epsilon_i}{0,837} \right) \quad (E.18)$$

Externamente, o valor de h_r pode ser estimado pela aplicação da equação (E.15), no entanto este dependerá simultaneamente da temperatura da superfície (vidro) e da vizinhança, não variando linearmente com o ΔT entre as mesmas. A Tabela E.2 apresenta valores de h_r para diferentes temperaturas que podem ser atingidas pelos vidros e pela vizinhança. Assim, um valor médio para h_r nesta faixa de condições de temperatura é 5,5 W/m²K.

Tabela E.2. Valores de h_r para trocas com o meio externo (vizinhança)

Ts (°C)	25	30	40	50	35	40	50	60	Média
T_{viz}=T_∞ (°C)	20	20	20	20	30	30	30	30	
ΔT (°C)	5	10	20	30	5	10	20	30	
hr (W/m²K)	4,9	5,0	5,3	5,6	5,4	5,6	5,8	6,1	

Assim, para aplicação nas estimativas do Fator Solar segundo as condições de medição dos testes realizados neste trabalho, são adotados como

coeficientes de troca de calor global interno (h_{int}) e externo (h_{ext}) os resultados das seguintes expressões:

$$h_{\text{int}} = h_c + 4,5 \quad (\text{E.19})$$

$$h_{\text{ext}} = h_c + 5,5 \quad (\text{E.20})$$

Nestas equações (E.19 e E.20), h_c é o coeficiente de troca por convecção, estimado segundo uma correlação apropriada para a situação ou por valores obtidos experimentalmente. Já o segundo termo da soma nos dois casos é o coeficiente de troca radiante (h_r), sendo este mantido fixo para todas as condições de teste. Por fim, o valor da resistência superficial interna (R_{int}) e externa (R_{ext}) é dado pelas expressões:

$$R_{\text{int}} = \frac{1}{h_{\text{int}}} \quad (\text{E.21})$$

$$R_{\text{ext}} = \frac{1}{h_{\text{ext}}} \quad (\text{E.22})$$

Referências:

ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Fundamentals Handbook 2005. Chapter 31 – Fenestration. Atlanta, GA, USA, 2005.

Catton, I. Natural Convection in Enclosures. Proc 6th Int. Heat Transfer Conf. Toronto, Canadá, 1978, Vol 6 pp. 13-31 *apud* Incropera, F. P. e DeWitt, D. P. Fundamentos da transferência de calor e massa. 5º edição, Editora LTC. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

Churchill, S.W., and Chu H.H.S. Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate. Int J. Heat Mass Transfer, 18, 1323, 1975. *apud* Incropera, F. P. e DeWitt, D. P. Fundamentos da transferência de calor e massa. 5º edição, editora LTC. Rio de janeiro, RJ, 2003

Incropera, F. P. e DeWitt, D. P. Fundamentos da transferência de calor e massa. 5º edição, editora LTC. Rio de janeiro, RJ, 2003.

ISO 9050. Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors. International Organization for Standardization, 2003.

MacGregor, R. K. and Emery, A. P. Free Convection Through Vertical Plane Layers: Moderate and High Prandtl Number Fluids. J. Heat Transfer 91, 391, (1969) *apud* Incropera, F. P. e DeWitt, D. P. Fundamentos da transferência de calor e massa. 5ª edição, editora LTC. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

Dados e constantes adicionais utilizadas para o cálculo das trocas de calor nas cavidades

Ar (300K ou 27°C ao nível do mar)	
ρ = densidade do fluido (kg/m ³)	1,1614
μ = viscosidade (kg/s.m)	1,85E-05
λ = condutividade térmica (W/mK)	0,0263
ν = viscosidade cinética (m ² /s)	1,59E-05
α = difusividade térmica (m ² /s)	2,25E-05
Pr = número de Prandtl (adimensional)	0,707

Dimensões das faces da cavidade principal		
	Verticais	Horizontais
L = comprimento das placas (m)	1,2	1,5
P = Profundidade das placas (m)	0,3	0,3
Dimensões das faces da cavidade secundária		
	Verticais	Horizontais
L = comprimento das placas (m)	0,5	-
P = Profundidade das placas (m)	0,5	-

Vidro	
k = condutividade térmica (W/mK)	1,0
L = comprimento da placa (m) na CP	1,5
P = Profundidade da placa (m) na CP	1,2
L = comprimento da placa (m) na CS	0,5
P = Profundidade da placa (m) na CS	0,5

g = aceleração da gravitacional (m/s ²)	9,81
Calor específico da água a 20°C (J/lK)	4187

ANEXO F – Procedimento para verificação do ângulo de incidência

A orientação do plano de medição do calorímetro foi obtida com uma bússola, onde se observou um valor azimutal de aproximadamente 22° em relação ao norte magnético. Para corrigir este valor em relação ao norte geográfico, inicialmente foi obtido o valor da declinação magnética para a data da medição.



Figura F.1 - Local de medição onde está posicionado o calorímetro (Google Earth, 2009)

O valor da declinação magnética pode ser verificado “online” através da homepage do Observatório Nacional (ON, 2009). Assim, o valor final do azimute para a orientação do plano de medição é igual a aproximadamente 4°. A Figura F.1 mostra uma imagem do local de medição.

Já a posição relativa do sol (azimute solar e altura solar) para o horário de medição foi determinada com o auxílio do software SOL. V.3.2 (UFRJ, 2004). Por fim, o ângulo de incidência (θ) da radiação com uma superfície vertical é obtido através da equação abaixo:

$$\theta = \cos^{-1} . (\cos \gamma . \cos \Delta \phi) \quad (F.1)$$

Onde: γ = Altura solar (graus);
 $\Delta \phi$ = Diferença azimutal entre o sol e a superfície.

Dados necessários para verificação

Data	Alterada ao longo dos testes
Data decimal	Alterada ao longo dos testes
Horário de início do teste	Alterada ao longo dos testes
Horário de fim do teste	Alterada ao longo dos testes
Local	Florianópolis
Latitude	-27°40'
Longitude	-48°33'
Latitude decimal	-27,667
Longitude decimal	-48,550
Declinação magnética	Alterada ao longo dos testes
Declinação magnética decimal	Alterada ao longo dos testes
Azimute do plano de medição	3,85°

Referências:

UFRJ. Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Softwares Desenvolvidos. SOL V.3.2 CR/2004. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/dau/softs.htm>
Acesso: maio/2008.

ON. Observatório Nacional. Declinação Magnética. 2009. Disponível em:
<http://obsn3.on.br/~jlk/magdec/index.html> Acesso: out/2009.

ANEXO G – Modelo matemático

A Tabela G.1 apresenta simbologia adotada para o modelo matemático e para a construção do código computacional empregado na resolução do sistema de equações.

Tabela G.1. Simbologia adotada no modelo matemático

$\hat{\text{ângulo_rad}}$	= Ângulo de incidência da radiação solar ($^{\circ}$);
$h_{\text{ar_ext}}$	= Coeficiente de convecção com o ar externo ($\text{W/m}^2\text{K}$);
h_{car}	= Coeficiente de convecção na câmara de ar no interior da cavidade ($\text{W/m}^2\text{K}$);
h_{trailer}	= Coeficiente de convecção com o ar na face da cavidade isolada e voltada para dentro do trailer ($\text{W/m}^2\text{K}$);
$h_{\text{r_ext}}$	= Coeficiente de troca radiante externo ($\text{W/m}^2\text{K}$);
$h_{\text{r_car}}$	= Coeficiente de troca radiante na câmara de ar ($\text{W/m}^2\text{K}$);
h_{ext}	= Coeficiente global de troca externo ($\text{W/m}^2\text{K}$);
h_{int}	= Coeficiente global de troca interno na câmara de ar ($\text{W/m}^2\text{K}$);
q_{rad}	= Radiação solar incidente no plano de medição (W/m^2);
q_1	= Densidade de fluxo de calor devido à convecção na superfície externa do vidro (W/m^2);
q_{1a}	= Densidade de fluxo de calor devido à radiação solar absorvida na superfície externa do vidro (W/m^2);
q_{1b}	= Densidade de fluxo de calor perdido por radiação em onda longa do vidro para a vizinhança (W/m^2);
q_2	= Densidade de fluxo de calor total na superfície externa do vidro (W/m^2);
q_3	= Densidade de fluxo de calor por condução no vidro (W/m^2);
q_4	= Densidade de fluxo de calor total na superfície interna do vidro (W/m^2);

q_5	= Densidade de fluxo de calor devido à convecção na superfície interna do vidro (W/m^2);
q_{5a}	= Densidade de fluxo de calor devido à troca líquida de radiação em onda longa na superfície interna do vidro (W/m^2);
q_{5b}	= Na CP: Densidade de fluxo de calor devido à radiação solar refletida pela superfície interna da cavidade e absorvida na superfície interna do vidro (W/m^2); Na CS: Densidade de fluxo de calor devido à radiação solar refletida pela superfície interna do fluxímetro e absorvida na superfície interna do vidro - (W/m^2)
q_6	= Na CP: Densidade de fluxo de calor por convecção na superfície interna da cavidade (W/m^2); Na CS: Densidade de fluxo de calor por convecção na superfície interna do fluxímetro (W/m^2);
q_{6a}	= Na CP: Densidade de fluxo de calor por troca líquida de radiação em onda longa na superfície interna cavidade (W/m^2); Na CS: Densidade de fluxo de calor por troca líquida de radiação em onda longa na superfície interna do fluxímetro (W/m^2);
q_{6b}	= Na CP: Densidade de fluxo de calor devido à radiação solar transmitida pelo vidro e absorvida pela cavidade (W/m^2); Na CS: Densidade de fluxo de calor devido à radiação solar transmitida pelo vidro e absorvida pelo fluxímetro (W/m^2);
q_{6c}	= Na CP: Densidade de fluxo de calor devido à radiação solar refletida pela cavidade e novamente refletida na superfície interna do vidro (W/m^2); Na CS: Densidade de fluxo de calor devido à radiação solar refletida pelo fluxímetro e novamente refletida na superfície interna do vidro (W/m^2);
q_7	= Na CP: Densidade de fluxo de calor total na superfície interna da cavidade (W/m^2); Na CS: Densidade de fluxo de calor total na superfície interna do fluxímetro (W/m^2);
q_8	= Densidade de fluxo de calor na chapa de cobre que forma a cavidade (W/m^2);
q_9	= Densidade de fluxo de calor perdido através do isolamento: fugas (W/m^2);
q_{10}	= Densidade de fluxo de calor total na superfície externa do

isolamento (W/m^2);	
q_{flui}	= Densidade de fluxo de calor retirada pelo sistema de refrigeração por circulação de água (W/m^2);
R_{car}	= Resistência térmica da câmara de ar ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$);
$R_{\text{ar_ext}}$	= Resistência térmica superficial entre o vidro e o ar externo - ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$);
R_{is}	= Resistência térmica do isolamento ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$);
R_{v}	= Resistência térmica do vidro ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$);
R_{tr}	= Resistência térmica total entre o isolamento e o interior do trailer ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$);
T_{ARext}	= Temperatura do ar externo ($^{\circ}\text{C}$);
T_{ARtr}	= Temperatura do ar no interior do trailer ($^{\circ}\text{C}$);
T_{c}	= Temperatura da chapa de cobre que forma a cavidade ($^{\circ}\text{C}$);
T_{car}	= Temperatura na câmara de ar no interior da cavidade ($^{\circ}\text{C}$);
T_{isi}	= Temperatura na superfície interna do isolamento ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ise}	= Temperatura da superfície externa do isolamento ($^{\circ}\text{C}$);
T_{flux}	= Temperatura do fluxímetro ($^{\circ}\text{C}$);
T_{trailer}	= Temperatura do trailer ($^{\circ}\text{C}$);
T_{ve}	= Temperatura na superfície externa do vidro ($^{\circ}\text{C}$);
T_{vi}	= Temperatura na superfície interna do vidro ($^{\circ}\text{C}$);
T_{viz}	= Temperatura da vizinhança ($^{\circ}\text{C}$);
k_{v}	= Condutividade térmica do vidro (W/mK);
k_{c}	= Condutividade térmica da chapa de cobre (W/mK);
k_{isolante}	= Condutividade térmica do isolante: lã de vidro (W/mK);
$\alpha_{\text{oc_v}}$	= Absortância à radiação solar na superfície externa do vidro (adimensional);

$\alpha_{oc_v_nor}$	= Absortância à radiação solar do vidro para ângulo de incidência normal na superfície interna do vidro (adimensional);
α_{ol_v}	= Absortância à radiação de onda longa do vidro (adimensional);
α_{oc_cp}	= Absortância à radiação solar da chapa de cobre pintado (adimensional);
α_{oc_flux}	= Absortância à radiação solar do fluxímetro pintado (adimensional);
τ_{oc_v}	= Transmitância à radiação solar do vidro na superfície externa (adimensional);
τ_{ol_v}	= Transmitância à radiação de onda longa do vidro (adimensional);
ρ_{oc_v}	= Refletância à radiação solar na superfície externa do vidro (adimensional);
$\rho_{oc_v_nor}$	= Refletância à radiação solar do vidro para ângulo de incidência normal (adimensional);
ρ_{ol_v}	= Refletância à radiação de onda longa do vidro (adimensional);
ρ_{oc_cp}	= Refletância à radiação solar da chapa de cobre pintado (adimensional);
ρ_{oc_flux}	= Refletância à radiação solar do fluxímetro pintado (adimensional);
ϵ_{ol_v}	= Emissividade do vidro (adimensional);
ϵ_{ol_cp}	= Emissividade da chapa de cobre pintado (adimensional);
ϵ_{ol_flux}	= Emissividade do fluxímetro pintado (adimensional);
ϵ_{ol_is}	= Emissividade do isolamento (adimensional);
σ	= Constante de Stefan-Boltzmann (W/m^2K^4);

A seguir é apresentado o equacionamento do balanço de energia em função da passagem do fluxo de calor para os “nós” do equivalente elétrico (Figura G.1) proposto para o modelo matemático da **cavidade principal**:

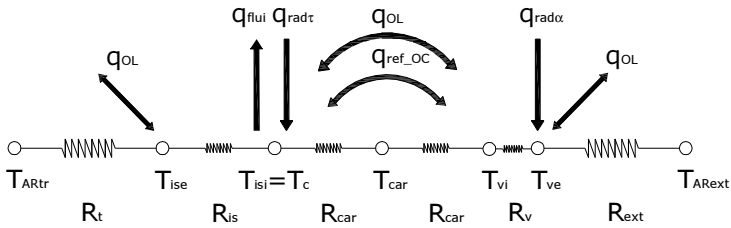


Figura G.1. Equivalente eléctrico para a CP

• **Nó T_{ve}**

$$q_1 = \frac{(T_{ARext} - T_{ve})}{R_{ar_ext}} \quad (G.1)$$

$$q_{1a} = q_{rad} \cdot \alpha_{oc_v} \quad (G.2)$$

$$q_{1b} = \varepsilon \sigma ((T_{viz} + 273)^4 - (T_{ve} + 273)^4) \quad (G.3)$$

$$q_2 = q_1 + q_{1a} + q_{1b} \quad (G.4)$$

$$q_2 = q_3 \quad (G.5)$$

$$q_3 = \frac{T_{ve} - T_{vi}}{R_v} \quad (G.6)$$

- **Nó T_{vi}**

$$q_3 = q_4 \quad (\text{G.7})$$

$$q_4 = q_5 + q_{5a} + q_{5b} \quad (\text{G.8})$$

$$q_5 = \frac{T_{vi} - T_{car}}{\frac{R_{car}}{2}} \quad (\text{G.9})$$

$$q_{5a} = \frac{((\sigma \cdot ((T_c + 273)^4 - (T_{vi} + 273)^4))}{\left(\left(\frac{1}{\varepsilon_{ol_cp}} \right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{ol_v}} \right) - 1 \right)} \quad (\text{G.10})$$

$$q_{5b} = q_{rad} \cdot \tau_{oc_v} \cdot \rho_{oc_cp} \cdot \alpha_{oc_v_nor} \quad (\text{G.11})$$

- **Nó T_{car}**

$$T_{car} = \frac{(T_{vi} + T_c)}{2} \quad (\text{G.12})$$

- **Nó T_c**

$$q_6 = \frac{T_{car} - T_c}{\frac{R_{car}}{2}} \quad (\text{G.13})$$

$$q_{6a} = - \frac{((\sigma \cdot ((T_{vi} + 273)^4 - (T_c + 273)^4))}{\left(\left(\frac{1}{\varepsilon_{_ol_cp}} \right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{_ol_v}} \right) - 1 \right)} \quad (G.14)$$

$$q_{6b} = q_{rad} \cdot \tau_{_oc_v} \cdot \alpha_{_oc_cp} \quad (G.15)$$

$$q_{6c} = q_{rad} \cdot \tau_{_oc_v} \cdot \rho_{_oc_cp} \cdot \rho_{_oc_v_nor} \quad (G.16)$$

$$q_7 = q_6 + q_{6a} + q_{6b} + q_{6c} \quad (G.17)$$

$$q_7 = q_8 \quad (G.18)$$

$$q_{flui} = q_8 - q_9 \quad (G.19)$$

$$\bullet \quad \mathbf{Nó \, T_{isi} = T_c}$$

$$T_{isi} = T_c \quad (G.20)$$

$$q_9 = \frac{T_{isi} - T_{ise}}{R_{is}} \quad (G.21)$$

$$\bullet \quad \mathbf{Nó \, T_{ise}}$$

$$q_9 = q_{10} \quad (G.22)$$

$$T_{ARtr} = T_{trailer} \quad (G.23)$$

$$q_{10} = \frac{T_{ise} - T_{trailer}}{R_t} \quad (G.24)$$

Por fim o Fator Solar calculado segundo a modelagem da **cavidade principal** é dado pela expressão:

$$FS = \frac{q_8}{q_{rad}} \quad (G.25)$$

A Figura G.2 apresenta o equivalente elétrico para a **cavidade secundária**. Neste caso, o equacionamento inicialmente é similar ao primeiro (cavidade principal) até a interface da superfície interna do vidro e o ar no interior da cavidade. A partir daí passa a ser aplicada a seguinte formulação:

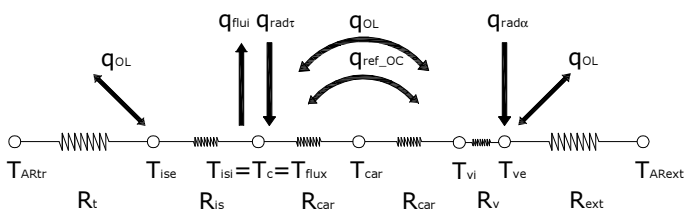


Figura G.2. Equivalente elétrico para a CS

- **Nó T_{vi}**

$$q_3 = q_4 \quad (\text{G.26})$$

$$q_4 = q_5 + q_{5a} + q_{5b} \quad (\text{G.27})$$

$$q_5 = \frac{T_{vi} - T_{car}}{\frac{R_{car}}{2}} \quad (\text{G.28})$$

$$q_{5a} = \frac{((\sigma \cdot ((T_{flux} + 273)^4 - (T_{vi} + 273)^4))}{\left(\left(\frac{1}{\varepsilon_{ol_flux}} \right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{ol_v}} \right) - 1 \right)} \quad (\text{G.29})$$

$$q_{5b} = q_{rad} \cdot \tau_{oc_v} \cdot \rho_{oc_flux} \cdot \alpha_{oc_v_nor} \quad (\text{G.30})$$

$$\bullet \quad \mathbf{N\acute{o} \ T_{car}}$$

$$T_{car} = \frac{(T_{vi} + T_{flux})}{2} \quad (\text{G.31})$$

$$\bullet \quad \mathbf{N\acute{o} \ T_c = T_{flux}}$$

$$T_c = T_{flux} \quad (\text{G.32})$$

$$q_6 = \frac{T_{car} - T_{flux}}{\frac{R_{car}}{2}} \quad (G.33)$$

$$q_{6a} = - \frac{((\sigma \cdot ((T_{vi} + 273)^4 - (T_{flux} + 273)^4))}{\left(\left(\frac{1}{\mathcal{E}_{-ol_flux}} \right) + \left(\frac{1}{\mathcal{E}_{-ol_v}} \right) - 1 \right)} \quad (G.34)$$

$$q_{6b} = q_{rad} \cdot \tau_{-oc_v} \cdot \alpha_{-oc_flux} \quad (G.35)$$

$$q_{6c} = q_{rad} \cdot \tau_{-oc_v} \cdot \rho_{-oc_flux} \cdot \rho_{-oc_v_nor} \quad (G.36)$$

$$q_7 = q_6 + q_{6a} + q_{6b} + q_{6c} \quad (G.37)$$

$$q_7 = q_8 \quad (G.38)$$

$$q_{flui} = q_8 - q_9 \quad (G.39)$$

$$\bullet \quad \mathbf{N\acute{o} \ T_{isi} = T_c}$$

$$T_{isi} = T_c \quad (G.40)$$

$$q_9 = \frac{T_{isi} - T_{ise}}{R_{is}} \quad (G.41)$$

• **Nó T_{ise}**

$$q_9 = q_{10} \tag{G.42}$$

$$T_{ARtr} = T_{trailer} \tag{G.43}$$

$$q_{10} = \frac{T_{ise} - T_{trailer}}{R_t} \tag{G.44}$$

Então, o Fator solar calculado segundo a modelagem da **cavidade secundária** é dado pela expressão:

$$FS = \frac{q_8}{q_{rad}} \tag{G.45}$$

Linhas de Programação do EES para cada modelo

"MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA CAVIDADE PRINCIPAL DO CALORÍMETRO - CASO vidro incolor 3mm"	
"LISTA DE VARIÁVEIS DE ENTRADA"	
"Variáveis medidas - Dados reais "	
qrad= 750	"Radiação solar incidente no
plano de medição - (W/m2)"	
TArext = 22	"Temperatura do ar externo -
(°C)"	
lv = 0,003	"Espessura do vidro - (m)"
lc = 0,00089	"Espessura da chapa de
cobre que forma a cavidade - (m)"	
lcar = 0,3	"Espessura da câmara de ar
formada no interior da cavidade - (m)"	

$l_{\text{isolante}} = 0,07$	"Espessura da lâ de vidro
que isola a cavidade - (m)"	
$T_{\text{ve}} = 28$	"Temperatura na superfície
externa do vidro - ($^{\circ}\text{C}$)"	
$T_{\text{c}} = 26$	"Temperatura da chapa de
cobre que forma a cavidade - ($^{\circ}\text{C}$)"	
$T_{\text{Artr}} = 30$	"Temperatura do ar no
interior do trailer ($^{\circ}\text{C}$)"	
$h_{\text{ar_ext}} = 15,5$	"Coeficiente de convecção
com o ar externo - ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)"	
"Variáveis estimadas "	
$h_{\text{car}} = 5,5$	"Coeficiente de convecção
na câmara de ar no interior do cavidade - ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)"	
$R_{\text{car}} = (1/h_{\text{car}})$	"Resistência térmica da
câmara de ar - ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)"	
$R_{\text{v}} = (l_{\text{v}}/k_{\text{v}})$	"Resistência térmica do
vidro - ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)"	
$R_{\text{is}} = (l_{\text{isolante}}/k_{\text{isolante}})$	"Resistência térmica do
isolamento: lâ de vidro - ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)"	
$h_{\text{trailer}} = (3,1+5,5)$	"Coeficiente de convecção
da face da cavidade voltada para dentro do	
$R_{\text{t}} = (1/h_{\text{trailer}})$	trailer - ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)"
superficial entre o isolamento e o ar no interior do	"Resistência térmica
	trailer ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)"
$R_{\text{ar_ext}} = (1/h_{\text{ar_ext}})$	"Resistência térmica
superficial entre o vidro e o ar externo - ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)"	
$T_{\text{viz}} = T_{\text{Arext}}$	"Temperatura da vizinhança
- ($^{\circ}\text{C}$)"	
$T_{\text{trailer}} = T_{\text{Artr}}$	"Temperatura do trailer -
($^{\circ}\text{C}$)"	
$h_{\text{r_ext}} = \epsilon_{\text{ol_v}} \cdot \sigma \cdot ((T_{\text{viz}}+273) + (T_{\text{ve}}+273)) \cdot ((T_{\text{viz}}+273)^2 + (T_{\text{ve}}+273)^2)$	"Coeficiente de troca
radiante externo - ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)"	
$\text{eff} = (1 / ((1/\epsilon_{\text{ol_cp}}) + (1/\epsilon_{\text{ol_v}}) - 1))$	"Emissividade efetiva
(adimensional)"	
$h_{\text{r_car}} = 0,227 \cdot \text{eff} \cdot (((T_{\text{vi}}+T_{\text{c}})/2)+273)/100)^3$	"Coeficiente de troca
radiante na câmara de ar - ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)"	
$h_{\text{ext}} = (h_{\text{ar_ext}} + h_{\text{r_ext}})$	"Coeficiente global de
troca externo - ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)"	
$h_{\text{int}} = (h_{\text{car}} + h_{\text{r_car}})$	"Coeficiente global de troca
interno: na câmara de ar - ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)"	
"Variáveis teóricas - propriedades dos materiais e constantes"	
$k_{\text{v}} = 1,0$	"Condutividade térmica do Vidro - (W/mK)"
$k_{\text{c}} = 380$	"Condutividade térmica do chapa de cobre - (W/mK)"
$k_{\text{isolante}} = 0,045$	"Condutividade térmica do isolante: lâ de vidro -
(W/mK)"	
$\text{angulo_rad} = 40$	"Ângulo de incidência da radiação solar - ($^{\circ}$)"

$\alpha_{oc_v} = 0,10$ "Absortância à radiação solar do vidro na superfície externa, para o ângulo de incidência da radiação solar - []"
 $\alpha_{oc_v_nor} = 0,09$ "Absortância à radiação solar do vidro para ângulo de incidência normal da face interna - []"
 $\tau_{oc_v} = 0,82$ "Transmitância à radiação solar do vidro na superfície externa, para o ângulo de incidência da radiação solar - []"
 $\rho_{oc_v} = 0,08$ "Refletância à radiação solar do vidro na superfície externa, para o ângulo de incidência da radiação solar - []"
 $\rho_{oc_v_nor} = 0,08$ "Refletância à radiação solar do vidro em ângulo de incidência normal na superfície interna - []"
 $\epsilon_{sil_{ol_v}} = 0,9$ "Emissividade do vidro - []"
 $\epsilon_{sil_{ol_cp}} = 0,86$ "Emissividade da chapa de cobre pintado: superfície interna da cavidade - []"
 $\epsilon_{sil_{ol_is}} = 0,95$ "Emissividade do isolamento - []"
 $\alpha_{oc_cp} = 0,95$ "Absortância à radiação solar da chapa de cobre pintado: superfície interna da cavidade - []"
 $\rho_{oc_cp} = (1 - \alpha_{oc_cp})$ "Refletância à radiação solar da chapa de cobre pintado: superfície interna da cavidade - []"
 $\sigma = 5,67E-8$ "Constante de Stefan-Boltzmann - (W/m²k⁴)"

"RESULTADOS - Incógnitas"

T_{vi} = temperatura na superfície interna do vidro - (°C)"
 T_{car} = temperatura na câmara de ar no interior da cavidade - (°C)"
 T_{isi} = temperatura na superfície interna do isolamento, em contato com cavidade de cobre - (°C)"
 T_{ise} = temperatura na superfície externa do isolamento, em contato com o ar interno do trailer - (°C)"

q_1 = densidade de fluxo de calor por convecção na superfície externa do vidro - (W/m²)"
 q_{1a} = densidade de fluxo de calor devido à radiação solar absorvida pelo vidro na superfície externa - (W/m²)"
 q_{1b} = densidade de fluxo de calor perdido por radiação em onda longa do vidro para a vizinhança"
 q_2 = densidade de fluxo de calor total na superfície externa do vidro - (W/m²)"
 q_3 = densidade de fluxo de calor por condução no vidro - (W/m²)"
 q_4 = densidade de fluxo de calor total na superfície interna do vidro - (W/m²)"
 q_5 = densidade de fluxo de calor por convecção na superfície interna do vidro - (W/m²)"
 q_{5a} = densidade de fluxo de calor devido à troca líquida de radiação em onda longa na superfície interna do vidro - (W/m²)"
 q_{5b} = densidade de fluxo de calor devido à radiação solar refletida pela superfície interna da cavidade e absorvida na superfície interna do vidro - (W/m²)"
 q_6 = densidade de fluxo de calor por convecção na superfície interna da cavidade - (W/m²)"
 q_{6a} = densidade de fluxo de calor por troca líquida de radiação em onda longa na superfície interna da cavidade - (W/m²)"
 q_{6b} = densidade de fluxo de calor devido à radiação solar transmitida pelo vidro e absorvida pela cavidade - (W/m²)"
 q_{6c} = densidade de fluxo de calor devido à radiação solar refletida pela cavidade e novamente refletida na superfície interna do vidro - (W/m²)"
 q_7 = densidade de fluxo de calor total na superfície interna da cavidade - (W/m²)"
 q_8 = densidade de fluxo de calor na chapa de cobre que forma a cavidade - (W/m²)"
 q_{flui} = densidade de fluxo de calor retirada pelo sistema de refrigeração: circulação de água - (W/m²)"

"q9= densidade de fluxo de calor perdido através do isolamento: fugas - (W/m2)"

"q10 = densidade de fluxo de calor total na superfície externa do isolamento - (W/m2)"

"q10a = densidade de fluxo de calor perdido para o ar no interior do trailer - (W/m2)"

"q10b = densidade de fluxo de calor perdido por radiação em onda longa do isolamento para o trailer"

"FS = fator solar []"

"CÁLCULO"

"Balanço de calor no vidro"

$$q1 = (T_{Arext} - T_{ve}) / R_{ar_ext}$$

$$q1a = (q_{rad} * \alpha_{oc_v})$$

$$q1b = \epsilon_{ol_v} * \sigma * ((T_{viz} + 273)^4 - (T_{ve} + 273)^4)$$

$$q2 = q1 + q1a + q1b$$

$$q3 = q2$$

$$q3 = (T_{ve} - T_{vi}) / R_v$$

$$q3 = q4$$

$$q4 = q5 + q5a + q5b$$

$$q5 = (T_{vi} - T_{car}) / (R_{car} / 2)$$

$$q5a = ((\sigma * ((T_c + 273)^4 - (T_{vi} + 273)^4)) / ((1/\epsilon_{ol_cp}) + (1/\epsilon_{ol_v}) - 1))$$

$$q5b = q_{rad} * \tau_{oc_v} * \rho_{oc_cp} * \alpha_{oc_v_nor}$$

"Balanço na câmara de ar"

$$T_{car} = ((T_{vi} + T_c) / 2)$$

"Balanço na chapa de cobre"

$$q6 = (T_{car} - T_c) / (R_{car} / 2)$$

$$q6a = ((\sigma * ((T_{vi} + 273)^4 - (T_c + 273)^4)) / ((1/\epsilon_{ol_cp}) + (1/\epsilon_{ol_v}) - 1))$$

$$q6b = q_{rad} * \tau_{oc_v} * \alpha_{oc_cp}$$

$$q6c = q_{rad} * \tau_{oc_v} * \rho_{oc_cp} * \rho_{oc_v_nor}$$

$$q7 = q6 + q6a + q6b + q6c$$

$$q7 = q8$$

$$q_{flui} = q8 - q9$$

"Balanço no isolante"

$$T_{i9} = T_c$$

$$q_9 = (T_{i9} - T_{i10})/R_{i9}$$

$$q_9 = q_{10}$$

$$q_{10} = (T_{i10} - T_{t10})/R_{t10}$$

"Fator solar calculado"

$$F_S = q_8/q_{rad}$$

"MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA CAVIDADE SECUNDÁRIA DO CALORÍMETRO - CASO vidro incolor 3mm"

"LISTA DE VARIÁVEIS DE ENTRADA"

"Variáveis medidas - Dados reais"

$$q_{rad} = 750$$

plano de medição - (W/m²)"

$$T_{A_{ext}} = 22$$

(°C)"

$$l_v = 0,003$$

$$l_c = 0,003$$

cobre que forma a cavidade - (m)"

$$l_{car} = 0,018$$

formada no interior da cavidade - (m)"

$$l_{isolante} = 0,07$$

que isola a cavidade - (m)"

$$T_{ve} = 28$$

externa do vidro - (°C)"

$$T_c = 26$$

cobre que forma a cavidade - (°C)"

$$T_{Ar_{tr}} = 30$$

interior do trailer (°C)"

$$h_{ar_ext} = 15,5$$

com o ar externo - (W/m²K)"

$$R_{flux} = 0,0006$$

fluxímetro - (m²K/W)"

"Variáveis estimadas"

$$h_{car} = 5,5$$

na câmara de ar no interior da cavidade - (W/m²K)"

$$R_{car} = (1/h_{car})$$

câmara de ar - (m²K/W)"

$$R_v = (l_v/k_v)$$

vidro - (m²K/W)"

"Radiação solar incidente no

"Temperatura do ar externo -

"Espessura do vidro - (m)"

"Espessura da chapa de

"Espessura da câmara de ar

"Espessura da lâ de vidro

"Temperatura na superfície

"Temperatura da chapa de

"Temperatura do ar no

"Coeficiente de convecção

"Resistência térmica do

"Coeficiente de convecção

"Resistência térmica da

"Resistência térmica do

Ris = (l_isolante/k_isolante)	"Resistência térmica do
isolamento: lâ de vidro - (m2K/W)"	
h_trailer = (3,1+5,5)	"Coeficiente de convecção
da face da cavidade voltada para dentro do	
Rt = (1/h_trailer)	trailer - (W/m2K)"
superficial entre o isolamento e o ar no interior do	"Resistência térmica
Rar_ext = (1/har_ext)	trailer (m2K/W)"
superficial entre o vidro e o ar externo - (m2K/W)"	"Resistência térmica
Tviz = TArext	"Temperatura da
vizinhança - (°C)"	
Ttrailer = TArtr	"Temperatura do trailer -
(°C)"	
hr_ext = epsilon_ol_v *sigma *((Tviz+273) +(Tve+273))*((Tviz+273)^2 +(Tve+273)^2)	"Coeficiente de troca
radiante externo - (W/m2K)"	
eff=((1/((1/epsilon_ol_flux) + (1/epsilon_ol_v) - 1)))	"Emissividade efetiva
(adimensional)"	
hr_car = 0,227*eff*(((Tvi+Tc)/2)+273)/100)^3	"Coeficiente de troca
radiante na câmara de ar - (W/m2K)"	
hext = (har_ext + hr_ext)	"Coeficiente global de
troca externo - (W/m2K)"	
hint = hcar +hr_car	"Coeficiente global de
troca interno: na câmara de ar - (W/m2K)"	
"Variáveis teóricas - propriedades dos materiais e constantes"	
kv = 1,0	"Condutividade térmica do Vidro - (W/mK)"
kc = 380	"Condutividade térmica da chapa de cobre -
(W/mK)"	
k_isolante =0,045	"Condutividade térmica do isolante: lâ de vidro -
(W/mK)"	
angulo_rad = 40	"Ângulo de incidência da radiação solar - (°)"
alpha_oc_v = 0,10	"Absortância à radiação solar do vidro na superfície externa, para o
ângulo de incidência da radiação solar - []"	
alpha_oc_v_nor = 0,09	"Absortância à radiação solar do vidro para ângulo de incidência
normal face interna - []"	
tau_oc_v = 0,82	Transmitância à radiação solar do vidro na superfície externa, para
o ângulo de incidência da radiação solar - []"	
rho_oc_v = 0,08	"Refletância à radiação solar do vidro na superfície externa, para o
ângulo de incidência da radiação solar - []"	
rho_oc_v_nor = 0,08	"Refletância à radiação solar do vidro em ângulo de incidência
normal na superfície interna - []"	
epsilon_ol_v = 0,9	"Emissividade do vidro - []"
epsilon_ol_flux = 0,86	"Emissividade do fluxímetro pintado: superfície
interna da cavidade - []"	
epsilon_ol_is = 0,95	"Emissividade do isolamento - []"
alpha_oc_flux = 0,95	"Absortância à radiação solar do fluxímetro
pintado - []"	
rho_oc_flux = (1- alpha_oc_flux)	"Refletância à radiação solar do fluxímetro
pintado: superfície interna da cavidade - []"	
sigma = 5,67E-8	"Constante de Stefan-Boltzmann - (W/m2k4)"

"RESULTADOS - Incógnitas"

"Tvi = temperatura na superfície interna do vidro - (°C)"

"Tcar = temperatura na câmara de ar no interior da cavidade - (°C)"

"Tisi = temperatura na superfície interna do isolamento, em contato com cavidade de cobre - (°C)"

"Tise = temperatura na superfície externa do isolamento, em contato com o ar interno do trailer - (°C)"

"Tflux= temperatura na superfície do fluxímetro - (°C)"

"q1 = densidade de fluxo de calor por convecção na superfície externa do vidro - (W/m2)"

"q1a = densidade de fluxo de calor devido à radiação solar absorvida pelo vidro na superfície externa - (W/m2)"

"q1b = densidade de fluxo de calor perdido por radiação em onda longa do vidro para a vizinhança"

"q2 = densidade de fluxo de calor total na superfície externa do vidro - (W/m2)"

"q3 = densidade de fluxo de calor por condução no vidro - (W/m2)"

"q4 = densidade de fluxo de calor total na superfície interna do vidro - (W/m2)"

"q5 = densidade de fluxo de calor por convecção na superfície interna do vidro - (W/m2)"

"q5a = densidade de fluxo de calor devido à troca líquida de radiação em onda longa na superfície interna do vidro - (W/m2)"

"q5b = densidade de fluxo de calor devido à radiação solar refletida pela superfície interna do fluxímetro e absorvida na superfície interna do vidro - (W/m2)"

"q6 = densidade de fluxo de calor por convecção na superfície interna do fluxímetro - (W/m2)"

"q6a = densidade de fluxo de calor por troca líquida de radiação em onda longa na superfície interna do fluxímetro - (W/m2)"

"q6b = densidade de fluxo de calor devido à radiação solar transmitida pelo vidro e absorvida pelo fluxímetro - (W/m2)"

"q6c = densidade de fluxo de calor devido à radiação solar refletida pelo fluxímetro e novamente refletida na superfície interna do vidro - (W/m2)"

"q7 = densidade de fluxo de calor total na superfície interna do fluxímetro - (W/m2)"

"q7a = densidade de fluxo de calor por condução através do fluxímetro - (W/m2)"

"q8 = densidade de fluxo de calor na chapa de cobre que forma a cavidade - (W/m2)"

"qlui = densidade de fluxo de calor retirada pelo sistema de refrigeração: circulação de água - (W/m2)"

"q9 = densidade de fluxo de calor perdido através do isolamento: fugas - (W/m2)"

"q10 = densidade de fluxo de calor total na superfície externa do isolamento - (W/m2)"

"q10a = densidade de fluxo de calor perdido para o ar no interior do trailer - (W/m2)"

"q10b = densidade de fluxo de calor perdido por radiação em onda longa do isolamento para o trailer"

"FS = fator solar []"

"CÁLCULO"

"Balanço de calor no vidro"

$$q1 = (T_{arext} - T_{ve}) / R_{ar_ext}$$

$$q1a = (q_{rad} * \alpha_{oc_v})$$

$$q1b = \epsilon_{ol_v} * \sigma * ((T_{viz} + 273)^4 - (T_{ve} + 273)^4)$$

$$q2 = q1 + q1a + q1b$$

$$q3 = q2$$

$$q3 = (Tve - Tvi)/Rv$$

$$q3 = q4$$

$$q4 = q5 + q5a + q5b$$

$$q5 = (Tvi - Tcar)/(Rcar/2)$$

$$q5a = ((\sigma * ((Tflux+273)^4 - (Tvi+273)^4))/((1/\epsilon_{ol_flux}) + (1/\epsilon_{ol_v}) - 1))$$

$$q5b = \text{grad} * \tau_{oc_v} * \rho_{oc_flux} * \alpha_{oc_v_nor}$$

"Balanço na câmara de ar"

$$Tcar = ((Tvi + Tflux)/2)$$

"Balanço no fluxímetro-chapa"

$$q6 = (Tcar - Tflux)/(Rcar/2)$$

$$q6a = ((\sigma * ((Tvi+273)^4 - (Tflux+273)^4))/((1/\epsilon_{ol_flux}) + (1/\epsilon_{ol_v}) - 1))$$

$$q6b = \text{grad} * \tau_{oc_v} * \alpha_{oc_flux}$$

$$q6c = \text{grad} * \tau_{oc_v} * \rho_{oc_flux} * \rho_{oc_v_nor}$$

$$q7 = q6 + q6a + q6b + q6c$$

$$Tflux = Tc$$

$$q7 = q8$$

$$q_{flui} = q8 - q9$$

"Balanço no isolante"

$$T_{si} = Tc$$

$$q9 = (T_{si} - T_{ise})/R_{is}$$

$$q9 = q10$$

$$q10 = (T_{ise} - T_{trailer})/R_t$$

"Fator solar calculado"

$$FS = (q8)/\text{grad}$$

ANEXO H – Outras informações sobre as medições realizadas

O CD que acompanha este documento apresenta os resultados das seguintes variáveis monitoradas ao longo de cada medição:

Variáveis ambientais

- Radiação solar no plano da janela;
- Temperatura do ar externo;
- Temperatura do ar no interior do trailer;
- Velocidade do ar externo.

Informações da CP

- Temperatura do banho;
- Temperatura da água na entrada CP;
- Temperatura da água na saída CP;
- Temperatura média da CP;
- Temperatura do ar na CP;
- Temperatura externa do vidro na CP;
- ΔT cavidade-vidro;
- ΔT água de entrada-saída da CP.

Informações da CS

- Temperatura média da CS;
 - Temperatura do ar na CS;
 - Temperatura externa do vidro na CS;
 - Fluxo de calor medido nos fluxímetros da CS.
-

Disponível para download em:
<http://www.labeee.ufsc.br/publicacoes/teses.php>

ANEXO I – Recomendações para execução de medições utilizando o calorímetro

A seguir é apresentada a sequência de execução juntamente com recomendações importantes para a realização de verificações do FS em vidros e janelas, utilizando o calorímetro.

1. Preparação e instalação da amostra

Necessariamente a amostra (vidros, proteções solares, janelas completas, etc.) deverá ser ajustada às dimensões de abertura da cavidade utilizada no teste:

- Cavidade principal (CP): 150cm (horizontal) x 120cm (vertical);
- Cavidade secundária (CS): 50cm x 50cm.

Antes da instalação, tanto a amostra como a superfície interna da cavidade deverão ser completamente limpas. A instalação deve ser cuidadosa para evitar danos à estrutura do calorímetro e do corpo da amostra.

As bordas de contato entre a amostra e a cavidade deverão ser vedadas com material isolante (ex: silicone) e presas de modo apropriado para evitar quedas.

2. Condições ambientais

Para obtenção de resultados de FS com menores incertezas, os testes deverão ser realizados sob condições ambientais estáveis. Para isso, são sugeridos a seguir alguns limites preferenciais que poderão ser observados:

- Condição de céu: claro (sem nuvens);
- Posição do plano de medição: vertical;
- Níveis de radiação incidente no plano de medição: acima de 600W/m^2 ;
- Velocidade do ar externo: abaixo de 3m/s ;
- Ângulos de incidência da radiação no plano de medição: menor que 60° .

OBS.: Para atender as condições de níveis de radiação e ângulo de incidência é necessária a análise da época do ano apropriada, em função da posição do sol para a latitude local.

3. Operação do calorímetro

A seguinte seqüência básica de acionamento manual dos componentes deve ser obedecida para dar início ao teste:

- Ligar o microcomputador e o multímetro conectados ao sistema de aquisição e controle (placas);
- Executar o software de gerenciamento e inserir o valor da temperatura de controle da cavidade;
- Ligar o banho termostático (nas duas cavidades);
- Ligar a bomba de circulação de água.

Como ajuste inicial da vazão do líquido que circula nas faces da CP, poderá ser adotado o ajuste ótimo encontrado para a abertura dos registros durante os testes de calibração do calorímetro, conforme mostra a Tabela I.1.

Tabela I.1. Ajuste inicial das vazões na CP

Abertura dos registros da CP	
Registro	Voltas
A	$\frac{1}{4}$
B	$\frac{1}{4}$
C	$\frac{1}{4}$
D	$\frac{1}{2}$
E	2

Do lado externo do calorímetro, no mesmo plano de medição da janela, deverão ser posicionados os sensores de monitoramento da velocidade do ar (anemômetro), da radiação solar (piranômetro) e o medidor de coeficiente de convecção.

Os sensores de temperatura (termopares) aplicados na amostra poderão ser instalados previamente ao momento de teste. No caso de testes com vidros na CP, dois termopares são usados, um colocado na superfície externa no centro do vidro e outro próximo à borda (aproximadamente 10cm). Na CS, apenas um termopar é aplicado no centro do vidro. Para fixar as juntas de medição dos termopares nas amostras de vidro, deverão ser usadas fitas adesivas transparentes, para evitar a criação de pontos que possam bloquear a passagem da radiação solar.

Recomenda-se proteger todas as juntas de medição dos termopares aplicados sobre elementos expostos à radiação solar. Esta proteção pode ser feita através do uso de pequenas barreiras radiantes, modeladas em papel aluminizado e acopladas na forma de um arco sobre a junta.

A amostra só deve ser exposta à radiação solar após o acionamento do sistema de resfriamento, para evitar superaquecimento da estrutura e do ar no interior das cavidades. No caso de amostras de vidro, janelas, ou elementos de proteção solar interna (ex: cortinas e persianas), a tampa externa de cada cavidade pode ser mantida fechada para impedir a incidência da radiação durante os preparativos iniciais do teste. Durante o período em que a tampa estiver fechada (sem incidência de radiação na amostra), o controle da temperatura da cavidade pode ser ajustado com o valor igual à temperatura média do vidro.

Após a abertura da tampa, o controle da temperatura da cavidade deve ser ajustado com o valor dado pela soma ($T_{\text{VIDRO}} + \Delta T$). Aqui T_{VIDRO} é a temperatura média do vidro, obtida aritmeticamente entre o valor da temperatura externa da borda e do centro do vidro, para o caso da CP. Com base nas observações experimentais, as faixas estimadas de ΔT cavidade-vidro em função do tipo de vidro são dadas pela Tabela I.2, para a CP e a CS. Caso este processo seja realizado manualmente, o valor de controle deve ser corrigido (reajustado) no máximo a cada 5 minutos ao longo de todo o teste.

Sob condições ambientais estáveis, um tempo mínimo deverá ser respeitado após o início da exposição da amostra à radiação solar. Este tempo não deverá ser inferior a 30 minutos, para as duas cavidades.

Tabela I.2. Faixas de ΔT cavidade-vidro em função da absorção do vidro

Absorção do vidro	$\Delta T (T_c - T_{ve})$	
	CP	CS
$(\alpha < 10)$	-2 até -5°C	0 até -1°C
$(10 < \alpha < 40)$	-5 até -8°C	-1 até -2°C
$(\alpha > 40)$	-8 até -12°C	-2 até -3°C

Durante o período de estabilização e ao longo de todo o teste, o operador deverá estar atento à temperatura individual das faces, no caso das medições realizadas na CP. A homogeneização da temperatura da CP (TMCP) é

fundamental para bons resultados na medição. Por isso, depois da regulagem inicial (valores propostos na Tabela I.1), reajustes podem ser necessários para melhorar a equalização das temperaturas entre as faces da CP.

4. Análise dos dados

Um tempo mínimo de medição deve ser respeitado após o período de estabilização, para que seja adquirido um número consistente de dados para compor um FS médio. Sugere-se que este tempo seja superior a 30 minutos.

É importante esclarecer que o tempo total de medição pode se estender por períodos maiores, sendo utilizado na análise de dados intervalos menores retirados deste período total, onde houverem melhores condições de estabilização no teste.

Para uma maior confiabilidade, recomenda-se que cada amostra seja testada no mínimo três vezes, preferencialmente sob condições ambientais semelhantes, mas sempre em dias diferentes.

O tratamento dos dados poderá ser realizado em planilhas eletrônicas (tipo Excel), sendo implementado o equacionamento do método de determinação do FS proposto neste trabalho (Capítulo 5). Como resultado final, deve ser obtido um valor de FS médio no período de teste analisado. Esta média é calculada aritmeticamente a partir dos valores instantâneos registrados ao longo do tempo de medição. Além do desvio padrão em torno da média, outros processos estatísticos poderão ser aplicados para verificar as incertezas existentes no resultado do FS medido.

Como sugestão para a apresentação dos resultados obtidos, propõe-se que estes sejam exibidos na forma de um relatório técnico de medição. O FS poderá ser dado em resultados instantâneos ao longo do tempo (forma gráfica), constando também o valor médio encontrado, segundo determinado ângulo de incidência da radiação solar. Valores de FS (teóricos ou experimentais) de elementos já caracterizados poderão ser usados como valores de referência. Tabelas contendo as seguintes informações médias dos testes também podem ser inseridas:

- Amostra (nome, referência comercial, etc.);
- Data do teste;
- FS médio $\pm$ incerteza;

- FS teórico de referência (caso houver);
- ΔT cavidade-vidro ($^{\circ}\text{C}$);
- Temperatura da cavidade ($^{\circ}\text{C}$);
- Temperatura do ar no interior da cavidade ($^{\circ}\text{C}$);
- Temperatura do vidro ($^{\circ}\text{C}$);
- Temperatura do ar externo ($^{\circ}\text{C}$);
- Coeficiente global de troca de calor interno ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);
- Coeficiente global de troca de calor externo ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);
- Velocidade do ar externo (m/s);
- Radiação solar no plano de medição (W/m^2);
- Intervalo de ângulos de incidência ($^{\circ}$);
- Tempo de medição (min).

Outras informações fornecidas pelos fabricantes sobre as propriedades ópticas e térmicas das amostras testadas também poderão ser incluídas no relatório técnico.