



JOSÉ GABRIEL VIEIRA NETO

INFLUÊNCIA DA FORMA DE ESTUFAS AGRÍCOLAS
NA PERFORMANCE ESTRUTURAL E NO CONFORTO
TÉRMICO

CAMPINAS

2015



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

JOSÉ GABRIEL VIEIRA NETO

**INFLUÊNCIA DA FORMA DE ESTUFAS AGRÍCOLAS NA
PERFORMANCE ESTRUTURAL E NO CONFORTO TÉRMICO**

Orientador: Prof. Dr. Julio Soriano

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola na Área de Concentração de Construções Rurais e Ambiente.

CAMPINAS

2015

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

V673i Vieira Neto, José Gabriel, 1990-
 Influência da forma de estufas agrícolas na performance estrutural e no
 conforto térmico / José Gabriel Vieira Neto. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

 Orientador: Julio Soriano.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
 Engenharia Agrícola.

 1. Estufas - Uso - Agricultura. 2. Modelagem. I. Soriano, Julio, 1967-. II.
 Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III.
 Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Influence of greenhouse's shape in the structural performance and thermal comfort

Palavras-chave em inglês:

Greenhouses - Use - Agriculture

Modeling

Área de concentração: Construções Rurais e Ambiente

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Julio Soriano [Orientador]

João Alberto Venegas Requena

Paulo Ademar Martins Leal

Data de defesa: 27-01-2015

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **José Gabriel Vieira Neto**, aprovada pela Comissão Julgadora em 27 de janeiro de 2015, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI



Prof. Dr. Julio Soriano – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena – Membro Titular
FEC/Unicamp



Prof. Dr. Paulo Ademir Martins Leal – Membro Titular
Feagri/Unicamp

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp

RESUMO

Os aspectos da segurança estrutural e do conforto do ambiente em estufas agrícolas estão diretamente relacionados ao dimensionamento da estrutura e sua funcionalidade. As características inerentes de cada projeto devem atender a diversidade de formas desse tipo de construção rural, as quais irão proporcionar diferentes esforços nos elementos estruturais, bem como diferentes volumes do ambiente interno. Neste estudo, foram avaliadas as implicações da forma na distribuição de tensões em elementos estruturais e nas condições do conforto ambiental de estufas agrícolas em arco e de duas águas. As variáveis que definiram as formas avaliadas foram embasadas nos parâmetros da norma brasileira ABNT NBR 16032 (2012). As formas analisadas foram estabelecidas considerando-se as relações entre altura e vão, a inclinação do telhado de duas águas, a altura máxima do arco e os coeficientes de pressão internos e externos. Os vãos das estruturas foram fixados em 6,4 e 8,0 metros (grupos A e B) e dezesseis casos de estufas foram simulados pelo Método dos Elementos Finitos (Ansys®), com as zonas de colunas e telhados discretizadas com elementos do tipo Beam44. As tensões máximas nos elementos obtidas para cada ação (permanentes, sobrecarga e vento) foram consideradas nas combinações últimas normais. As variações na relação altura e vão da estrutura, na maioria das combinações, produziram os maiores esforços nos elementos de colunas dos modelos em duas águas. As tensões nas zonas da cobertura sofreram reduções com aumento da inclinação dos planos dos telhados. Nas estufas em arco o aumento da altura total e do vão produziu incrementos de tensões nas zonas de coberturas e colunas. Diante dos valores máximos das médias de tensões, os modelos em arco, comparativamente aos modelos em duas águas, proporcionaram menores esforços nas zonas das colunas, telhados e tirantes, para maioria das combinações, mostrando-se como a forma mais eficiente para a maioria dos modelos simulados. Das variações de formas verificou-se para o conforto térmico que os modelos com relações de maiores volumes internos, quando comparados aos modelos de menores volumes, podem proporcionar um gradiente de até 4°C para menos no verão e, 1°C para mais no inverno, situações estas desejadas em países tropicais. Desta forma, o trabalho permitiu concluir que as variações na forma das estufas agrícolas produzem fortes impactos no desempenho estrutural e, também, produz alterações nas condições climáticas do ambiente protegido.

Palavras-chave: balanço de energia e massa, modelagem computacional, telhado de duas águas, telhado em arco, tensões máximas.

ABSTRACT

Aspects of structural safety and environmental comfort in greenhouses are directly related to the structural design and its functionality. The inherent characteristics of each project needs satisfy the diversity of shape of this type of rural construction, providing different efforts in structural elements, as well as different volumes of the internal environment. In this study, were evaluated the implications of the shape on stresses distribution in the structural elements and in the environmental comfort conditions in the arch roof and pitched roof greenhouses. For each shape evaluated, the variables were defined according to the parameters of Brazilian Code ABNT - NBR 16032 (2012). The forms analyzed were established considering the relation between height-span, the roof slope and the maximum height of the arch, including the internal and external pressure coefficients. The spans of the structures were imposed at 6.4 and 8.0 meters (groups A and B) and sixteen cases of greenhouses were simulated by Finite Element Method (Ansys©), with the zones of columns and roofs discretized with Beam44 elements. The maximum stresses in the elements obtained for each load (dead load, live load and wind load) were combined in the Ultimate Limit State. The variations in the height-span relation of the structures, in most combinations, produced the higher efforts on the columns elements of the pitched roof shape. By increasing slope of the plans of the roofs, the stresses in the roof zones have been reduced. By increasing of the total height and of the span in the arch greenhouses, the stresses on the zones of roof and columns were increased. With the maximum mean of stresses obtained, comparatively to pitched roof models and for most of combinations, the efforts resulted lower in the zones of columns and roofs of the arch shape models, being more efficient for the majority of simulated models. As for the energy balance and mass to check the thermal comfort models relations largest internal volumes when compared to smaller volumes models showed advantageous results by offering a gradient of up to 4°C in summer and 1°C in winter, which are desired situations in tropical countries. This way, the study revealed that variations in the shape of the greenhouses produces strong impacts on the structural performance and also produces modifications in the climatic conditions of the protected environment.

Keywords: arch roof, computational modeling, energy and mass balance, maximum stress, pitched roof.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo geral	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
2 REVISAO DA LITERATURA	4
2.1 GENERALIDADES DE ESTUFAS AGRÍCOLAS	4
2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS.....	5
2.3 AÇÕES E ESFORÇOS NA ESTRUTURA.....	8
2.4 PROJETOS E MODELOS ESTRUTURAIS DE ESTUFAS EM DIFERENTES PAÍSES	9
2.5 FORMAS ESTRUTURAIS SEGUNDO A ABNT - NBR 16032 (2012)	12
2.6 MODELO TEÓRICO DO ANSYS©.....	15
2.7 VERIFICAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA E DE MASSA POR MODELAGEM MATEMÁTICA	17
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1 DEFINIÇÕES	19
3.1.1 Forma estrutural de duas águas.....	19
3.1.2 Forma estrutural em arco.....	21
3.1.3 Coeficientes de pressão	24
3.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	28
3.2.1 Tensões máximas	31
3.3 MODELOS PARA VERIFICAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA E DE MASSA.....	32
3.3.1 Dados climáticos	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1 ESTUFAS DE DUAS ÁGUAS	42
4.1.1 Análise das tensões máximas de cálculo	42
4.1.2 Análise do conforto ambiental.....	52
4.2 ESTUFAS EM ARCO.....	54
4.2.1 Análise das tensões máximas de cálculo	54
4.2.2 Análise do conforto ambiental.....	61
4.3 FORMA ESTRUTURAL DE ESTUFA DE DUAS ÁGUAS <i>VERSUS</i> ESTUFA EM ARCO	63

5 CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS.....	68
APÊNDICE	72

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo que me proporcionou até aqui.

À minha mãe Maria Claudete, meu pai José Waldir, minha noiva Danielle e todos familiares, pelo apoio em todos os momentos.

Ao orientador Prof. Dr. Julio Soriano, pela confiança e pelo conhecimento adquirido nesses dois anos.

Ao Prof. Dr. Paulo A. M. Leal, pelo apoio incondicional ao longo do mestrado.

Aos colegas que estiveram sempre ao meu lado, os antigos e os novos feitos em Campinas.

À empresa Flórida Estufas, em especial ao Eng. Agrícola Sérgio Job e ao Sr. Alberto Wagemaker.

À Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP, pela participação no programa de pós-graduação.

À CAPES, pelo auxílio financeiro concedido por meio de bolsa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de estufa túnel baixo.....	5
Figura 2. Modelo de estufa em arco.....	6
Figura 3. Modelo de estufa águas planas.	7
Figura 4. Modelo estrutural de estufas. (a) Em arco. (b) Em duas águas.....	9
Figura 5. Configuração das zonas de obstrução para a forma de estufas de duas águas e da direção do vento a) perpendicular à cumeeira e b) paralela à cumeeira.	12
Figura 6. Estufas da forma estrutural de duas águas.	13
Figura 7. Configuração das zonas de obstrução para a forma de estufas em arco e da direção do vento a) perpendicular à cumeeira e b) paralela à cumeeira.	14
Figura 8. Estufa da forma estrutural em arco.	15
Figura 9. Normalização dos resultados de tensão conforme o Ansys.	16
Figura 10. Modelos simulados de estufas de duas águas. (a) $h/s=0,3$ e $\alpha=20^\circ$; (b) $h/s=0,3$ e $\alpha=26^\circ$; (c) $h/s=0,6$ e $\alpha=20^\circ$; (d) $h/s=0,6$ e $\alpha=26^\circ$	20
Figura 11. Analogia da forma em arco com a forma de duas águas.	21
Figura 12. Estufa em arco com pórtico frontal enrijecido com diagonais.....	22
Figura 13. Modelos simulados de estufas em arco. (a) $h/s=0,3$ e $\alpha_{eq}=20^\circ$; (b) $h/s=0,3$ e $\alpha_{eq}=26^\circ$; (c) $h/s=0,6$ e $\alpha_{eq}=20^\circ$; (d) $h/s=0,6$ e $\alpha_{eq}=26^\circ$	23
Figura 14. Coeficientes de pressão externa para zona A do modelo duas águas.	24
Figura 15. Coeficientes de pressões externos (C_{pe}) e internos (C_{pi}) incidindo nas zonas de paredes e tetos. a) Forma de duas águas e b) forma em arco.	26
Figura 16. Geração da malha dos elementos para estufas de duas águas.....	29
Figura 17. Geração da malha dos elementos para estufas em arco.	29
Figura 18. Forma de aplicação das ações das terças e ativação da aceleração da gravidade (a) para forma de duas águas e (b) para forma em arco.....	30
Figura 19. Tensões máximas (MPa) para o modelo 1 B de duas águas na situação de vento com $C_{pi} = +0,2$	37
Figura 20. Tensões máximas (MPa) para o modelo 2 A de duas águas na situação de vento com $C_{pi} = -0,4$	38
Figura 21. Tensões máximas para o modelo 3 A de duas águas sob ação da sobrecarga.	38
Figura 22. Tensões máximas (MPa) para o modelo 4 B de duas águas sob ação das cargas permanentes.....	39
Figura 23. Tensões máximas (MPa) para o modelo 1 A em arco na situação de vento com $C_{pi} = +0,2$	39
Figura 24. Tensões máximas (MPa) para o modelo 2 B em arco sob ação das cargas permanentes.	40
Figura 25. Tensões máximas (MPa) para o modelo 3 B em arco sob ação da sobrecarga.....	40

Figura 26. Tensões máximas (MPa) para o modelo 4 B em arco na situação de $C_{pi} = -0,4$	41
Figura 27. Razão entre tensões máximas para 1ª combinação da forma de duas águas.....	42
Figura 28. Razão percentual de tensões máximas para 2ª combinação da forma de duas águas.	43
Figura 29. Razão percentual de tensões máximas para 3ª combinação da forma de duas águas.	44
Figura 30. Razão percentual de tensões máximas para 4ª combinação da forma de duas águas.	44
Figura 31. Razão percentual de tensões máximas para 5ª combinação da forma de duas águas.	45
Figura 32. Razão percentual de tensões máximas para 6ª combinação da forma de duas águas.	46
Figura 33. Razão percentual de tensões máximas para 7ª combinação da forma de duas águas.	46
Figura 34. Razão percentual de tensões máximas para 8ª combinação da forma de duas águas.	47
Figura 35. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 1ª Combinação da forma de duas águas.....	49
Figura 36. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 2ª Combinação da forma de duas águas.....	50
Figura 37. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 3ª Combinação da forma de duas águas.....	50
Figura 38. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 4ª Combinação da forma de duas águas.....	50
Figura 39. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 5ª Combinação da forma de duas águas.....	51
Figura 40. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 6ª Combinação da forma de duas águas.....	51
Figura 41. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 7ª Combinação da forma de duas águas.....	51
Figura 42. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 8ª Combinação da forma de duas águas.....	52
Figura 43. Temperaturas internas do balanço de energia das estufas de duas águas.	53
Figura 44. Umidade interna do balanço de massa para estufas duas águas.....	54
Figura 45. Razão percentual de tensões máximas para 1ª combinação da forma em arco.....	55
Figura 46. Razão percentual de tensões máximas para 2ª combinação da forma em arco.....	55
Figura 47. Razão percentual de tensões máximas para 3ª combinação da forma em arco.....	56
Figura 48. Razão percentual de tensões máximas para 4ª combinação da forma em arco.....	57
Figura 49. Razão percentual de tensões máximas para 5ª combinação da forma em arco.....	57
Figura 50. Razão percentual de tensões máximas para 6ª combinação da forma em arco.....	58
Figura 51. Razão percentual de tensões máximas para 7ª combinação da forma em arco.....	59
Figura 52. Razão percentual de tensões máximas para 8ª combinação da forma em arco.....	59
Figura 53. Temperaturas internas do balanço de energia das estufas em arco.	62
Figura 54. Umidade interna do balanço de massa para estufas em arco.	63

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1. Coeficientes de pressão externos para telhado duas águas e vento perpendicular à cumeeira, conforme ABNT - NBR 16032 (2012).....	24
Tabela 2. Coeficientes de pressão externos para zonas de parede do modelo em arco, conforme ABNT - NBR 16032 (2012).....	25
Tabela 3. Coeficientes de pressão externos para zona de telhado do modelo em arco, conforme ABNT - NBR 16032 (2012).....	25
Quadro 1. Combinações das tensões nos estados limites últimos.	31
Tabela 4. Dados climáticos do município de Campinas para um período de 20 anos.	36
Tabela 5. Médias dos dados climáticos de Campinas.	36
Tabela 6. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas – 1ª Combinação.	43
Tabela 7. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas – 2ª Combinação.	43
Tabela 8. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas – 3ª Combinação.	44
Tabela 9. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas – 4ª Combinação.	45
Tabela 10. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas – 5ª Combinação.	45
Tabela 11. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas – 6ª Combinação.	46
Tabela 12. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas – 7ª Combinação.	47
Tabela 13. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas – 8ª Combinação.	47
Tabela 14. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco – 1ª Combinação.	55
Tabela 15. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco – 2ª Combinação.	56
Tabela 16. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco – 3ª Combinação.	56
Tabela 17. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco – 4ª Combinação.	57
Tabela 18. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco – 5ª Combinação.	58
Tabela 19. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco – 6ª Combinação.	58
Tabela 20. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco – 7ª Combinação.	59
Tabela 21. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco – 8ª Combinação.	60
Quadro 2. Síntese do comparativo entre as formas estruturais de estufas agrícolas em duas águas e em arco.	64
Tabela 22. Diferenças máximas de tensões entre as formas para cada modelo.	65

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

CG – Centro de gravidade da peça;

Cp – Coeficiente de pressão e de forma do vento;

Cpe – Coeficiente de pressão e de forma externa;

Cpi – Coeficiente de pressão e de forma interna;

f_{yd} – Resistência de cálculo do aço;

f_{yk} – Resistência característica do aço;

h – Altura da estufa até o nível da calha (pé direito);

hr – Altura da calha à cumeeira de cobertura em arco;

MEF – Método dos Elementos Finitos;

s – Dimensão de um vão da estufa;

SBYB – Tensão de flexão no elemento de viga em $-Y$;

SBYT – Tensão de flexão no elemento de viga em $+Y$;

SBZB – Tensão de flexão no elemento de viga em $-Z$;

SBZT – Tensão de flexão no elemento da viga em $+Z$;

SDIR – Tensão axial direta;

TBS – Temperatura de bulbo seco;

TKZB1 – Espessura do centro de gravidade à face inferior da peça;

TKZT1 – Espessura do centro de gravidade à face superior da peça;

UR – Umidade relativa;

V_0 – Velocidade básica do vento;

V_k – Velocidade característica do vento;

α – Ângulo de inclinação da cobertura de estufas de duas águas;

γ_s – Coeficiente de ponderação do aço.

θ – Ângulo de referência ao longo da cobertura em arco.

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia da construção para fins agrícolas, especificamente para a produção vegetal, tem grandes desafios no sentido de promover a concepção de ambientes protegidos capazes de proporcionar maiores eficiências produtivas em menores áreas. De acordo com Shamshiri e Ismail (2013), estes sistemas de construções tem a finalidade de melhorar a qualidade e a previsibilidade das culturas, implicando no controle de fatores tais como, umidade, temperatura, radiação solar, nível de dióxido de carbono interno, bem como a proteção da cultura às ações de chuvas, ventos intensos e pragas (van Straten *et al.*, 2010; Emekli *et al.*, 2010; Ali-Nezhad e Eskandari, 2012). Com isto, o crescimento ideal de uma determinada cultura será afetado pelo projeto arquitetônico da estufa, tornando necessário um estudo do sistema estrutural acerca de instruções normativas (Iribarne *et al.*, 2007; Ali-Nezhad e Eskandari, 2012).

O crescimento desta técnica de construção agrícola trouxe a preocupação com a segurança contra danos estruturais, o que requer a normalização dos procedimentos para o dimensionamento da estrutura. A preocupação com segurança desses sistemas construtivos já ocorre em alguns países onde a técnica de cultivo protegido vem sendo utilizada em maior escala, como é destacado por von Zabeltitz (2011), Montero (2012) e von Elsner *et al.* (2000b). Por sua vez, os autores Vázquez *et al.* (2011) relatam a ausência de pesquisas que avaliem a relação existente entre as dimensões das estufas e sua capacidade estrutural.

A fim de normatizar os procedimentos para projetos de estufas agrícolas no Brasil, foi publicada recentemente a norma para estruturas de estufas e viveiros agrícolas (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 16032, 2012). Esta norma está fundamentada no texto da norma europeia do Comitê Europeu de Normalização – CEN, EN 13031-1 (2001), com ênfase nas particularidades das condições geográficas e climáticas do Brasil.

Devido as características de construções leves das estufas agrícolas, von Elsner *et al.* (2000a) descrevem que as tensões devidas as pressões do vento, em situações de velocidades extremas, podem causar danos a estufa. De acordo com Buyuktas *et al.* (2011), sem os cálculos estáticos e sem as considerações dos fatores ambientais, as construções de estufas agrícolas podem sofrer a destruição em más condições atmosféricas. O efeito do

vento torna-se cada vez mais importante no projeto estrutural das estufas agrícolas, dada a necessidade de construções maiores, que proporcionem um clima interno mais favorável para a cultura.

Blessmann (2001) cita que a maioria dos acidentes decorrentes do vento acontecem em construções leves, principalmente nas de grandes vãos livres e alturas. O autor descreve que um único acidente nestas construções isoladamente não representa muito no conjunto da economia nacional, porém, se somados, os prejuízos causados por esses acidentes representariam um valor apreciável. As estufas agrícolas são construções leves, cujos materiais de coberturas mais comuns são os filmes plásticos ou o vidro e que tendem a ocupar grandes áreas, para as quais os fabricantes e produtores tem relatado que as causas mais comuns para acidentes se devam a ação do vento.

Neste estudo foram analisados os modelos usuais de estufas da forma de duas águas e da forma em arco pela distribuição das tensões máximas e pelos balanços de energia e de massa, com a hipótese de que a distribuição dos esforços nos elementos estruturais e o conforto ambiental são influenciados pela forma deste tipo de construção rural.

1.1 JUSTIFICATIVA

A normalização brasileira para construção de estufas e viveiros agrícolas é recente (ABNT NBR 16032, 2012) e, no momento, grande parte dessas construções ainda são realizadas de forma empírica e sistemática, sem que haja uma avaliação de iteratividade entre forma e estrutura. Atualmente, há uma carência de material técnico e científico que atenda essa modalidade de construção rural, haja visto o escasso material bibliográfico no que se refere a performance estrutural para a realidade brasileira, bem como no âmbito internacional.

Por meio desta pesquisa buscou-se apresentar elementos que contribuam para a elaboração dos projetos de estufas agrícolas, tendo como base a forma, a funcionalidade do ambiente e a segurança estrutural. Os resultados expressam de que maneira a forma estrutural influencia na distribuição de esforços e também nas características de conforto térmico.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi de analisar as implicações da forma das estufas agrícolas na distribuição de tensões nos elementos estruturais e nas condições do conforto ambiental.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar as tensões máximas nos elementos de colunas e telhados para a forma das estufas de duas águas, obtidas por modelagem computacional, dadas as variáveis relação entre altura e vão (h/s) e inclinação do telhado;

- Avaliar, por modelagem computacional, as tensões máximas nos elementos de colunas e de telhado para a forma das estufas em arco, dadas as variáveis relação altura e vão (h/s) e curvatura do arco;

- Quantificar e avaliar as implicações na área e no volume das estufas com alterações nas inclinações dos telhados e nas relações h/s , correlacionando-os aos balanços de massa e de energia, para ambas as formas (duas águas e em arco);

- Avaliar se as formas em duas águas e em arco apresentam diferenças relevantes nas distribuições das tensões de seus elementos estruturais e no conforto ambiental.

2 REVISAO DA LITERATURA

2.1 GENERALIDADES DE ESTUFAS AGRÍCOLAS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, pela Norma Brasileira de Regulamentação - NBR 16032 (2012), define estufa agrícola como um ambiente artificial construído para a proteção e/ou para o controle climático a propiciar o desenvolvimento de produtos agrícolas, cujas dimensões possibilitem o trabalho de pessoas em seu interior, e que suas características otimizem a transmissão de radiação solar nas condições ideais.

As estufas são exemplos de ambiente para cultivo protegido dos mais utilizados na agricultura. De acordo com Ali-Nezhad e Eskandari (2012), essas construções são destinadas a proporcionar condições ideais para o crescimento e produção das culturas durante todo o ano, com colheitas fora de época, facilitando o combate de pragas e doenças. Para isso, é essencial o correto uso das instalações, do manejo e controle das condições ambientais internas para gerir a produção e melhorar a eficiência, proporcionando a melhor qualidade da produção com incrementos da ordem de 2 a 3 vezes quando comparado com cultivo em campo (PURQUERIO e TIVELLI, 2005).

Como principais desvantagens do uso de estufas no Brasil destacam-se os elevados custos de investimento inicial, principalmente das estruturas metálicas (OLIVEIRA, 1995 e MARY *et al.*, 2007), assim como, a substituição periódica do filme plástico de vedação, devido ao alto índice pluviométrico, à fortes ventos e altas temperaturas. Outro fator a considerar é o efeito de condensação do vapor, com consequente queda de gotas de água nas culturas, que deve ser considerado no projeto do ambiente protegido, destacando-se como desvantagem caso ocorra este fenômeno. A ventilação pode ser inadequada para a troca de ar do ambiente em estruturas de múltiplos vãos (Multispan), pois a movimentação do ar no ambiente é responsável por grande parte do controle das condições climáticas (von ELSNER *et al.*, 2000b).

Silva *et al.* (2011) descrevem que as estufas devem ser construídas no sentido dos ventos predominantes para que os mesmos não atinjam as paredes laterais afetando o plástico, exceto em condições em que já foram projetadas para essa situação, podendo-se, dessa forma, aproveitar a ventilação natural. Estas recomendações são aplicadas

especificadamente para o uso da ventilação natural no conforto térmico, pois o vento aplicado no cálculo estrutural deve ser considerado ora atuando na direção longitudinal ora na direção perpendicular à construção, não importando a orientação da estrutura em relação ao vento predominante considerado para efeito de conforto.

2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Além das estufas agrícolas há diversos modelos e tecnologia de ambientes protegidos, como por exemplo os ambientes telados (casas de sombra), os túneis altos e baixos e a cobertura do solo (Mulching).

Os principais tipos de estufas construídas e suas principais características são descritos por von Elsner *et al.* (2000b) e Ali-Nezhad e Eskandari (2012), conforme seguem:

- Túneis baixos ou Quonset (Round-arched tunnel): é uma estrutura simples que sua altura lateral é baixa, restringindo o espaço interno (Figura 1). A estrutura pode ser feita de madeira curvada, bambu ou de aço. O filme plástico é esticado sobre os arcos e enterrado no solo ao longo das laterais. As principais vantagens é a facilidade na construção e o baixo custo de implantação. As desvantagens estão na baixa durabilidade (pela retirada da estrutura para preparo de solo), baixa capacidade de reter calor, baixo controle da ventilação e o difícil manejo da cultura.



Figura 1. Modelo de estufa túnel baixo.
Fonte: Adaptado de Ali-Nezhad e Eskandari (2012).

- Modelo em arco (Gothic): estruturas construídas geralmente em aço, madeira ou alumínio, cobertos com plástico, com altura maior que permite mais espaço e facilita

algumas operações, quando comparado ao modelo de túnel baixo. Devido à forma, conforme a Figura 2, o modelo gótico é utilizado com vão único ou múltiplos, e pode apresentar a vantagem no aspecto da condensação da água, pois as gotas d'água escoam pelo arco até as paredes sem que as mesmas caiam sobre as plantas (em situações que se considera no projeto). Também como vantagem, o maior volume do ambiente proporciona melhores condições de conforto, além de melhor trabalhabilidade em seu interior. Como principal desvantagem pode-se destacar o custo de implantação, considerando que estas estruturas possuem elementos mais complexos, como por exemplo calhas e aberturas zenitais, que podem encarecer o projeto.

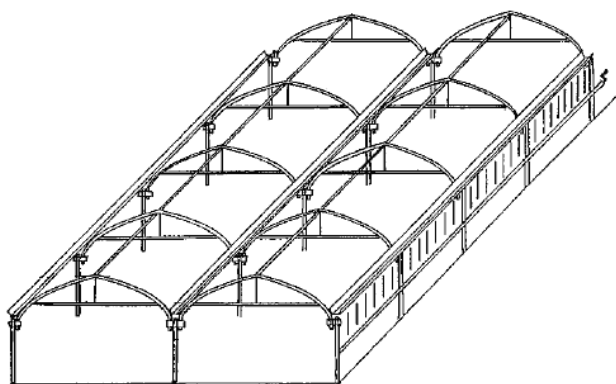


Figura 2. Modelo de estufa em arco.
Fonte: Adaptado de von Elsner *et al.* (2000b).

- Estruturas rígidas ou cobertura em duas águas (Rigid frame ou Pitched roof): modelo largamente utilizado no mundo, e muitas vezes são estruturas simples ou até mesmo complexas (Figura 3). As estruturas geralmente são produzidas em madeira, aço ou alumínio. São utilizadas nas formas de vãos únicos ou múltiplos. Geralmente, este modelo é empregado em países que utilizam cobertura em vidro, mas também é utilizado com cobertura plástica. As vantagens e desvantagens se assemelham ao modelo em arco, exceto na condição de condensação da água no seu interior, que devido a sua forma, geralmente não ocorre o escoamento pelo telhado e parede, fazendo com que as gotas caiam sobre as culturas.

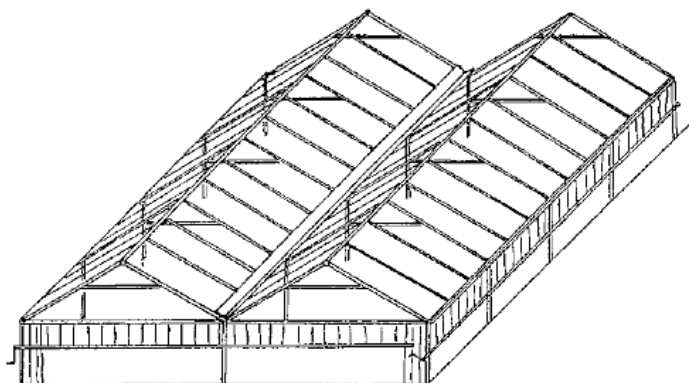


Figura 3. Modelo de estufa águas planas.
Fonte: Adaptado de von Elsner *et al.* (2000b).

Para países da região mediterrânea, Baille (1999) recomenda o uso de estufas do modelo em arco, pois apresentam melhor taxa de transferência de massa e energia, assim como favorecem o escoamento da água condensada. Porém, grande parte destas estruturas já utilizadas possuem baixa altura e menores volumes, fato este que dificulta a ventilação e oferece uma maior inércia às mudanças de temperatura e umidade. Segundo o autor, o aumento da altura das estufas favorece na transmissão dos fatores ambientais e, consequentemente, facilita o controle da temperatura e da umidade relativa, visando o conforto térmico das culturas.

De acordo com as normas ABNT – NBR 16032 (2012) e EN 13031-1 (2002), as estufas são classificadas em duas Classes – A e B. Estas classes são subdivididas de acordo com o período de vida útil, sendo de 10 e 15 anos para a classe A (A10 e A15), e de 5, 10 e 15 anos para a Classe B (B5, B10 e B15). Para a classe A, as normas determinam que as estufas devem ser verificadas conforme os Estados Limites Últimos, e também nos Estados Limites de Serviço. Já as estufas da classe B devem ser verificadas apenas nos Estados Limites Últimos.

As normas no que se refere a abordagem dos coeficientes para as considerações da ação do vento apresentam um número limitado de modelos e formas. Projetos específicos devem ser dimensionados tendo por base esforços obtidos em túnel de vento ou, de forma alternativa, modelados com ferramenta computacional adequada.

2.3 AÇÕES E ESFORÇOS NA ESTRUTURA

No caso do Brasil as interferências externas às estufas ficam basicamente condicionadas à ação de ventos e das chuvas. De acordo com Soriano e Bliska Júnior (2008) muitas vezes são negligenciados os efeitos decorrentes da ação do vento sobre os elementos construtivos de estufas, e, que a ocorrência desse fenômeno pode implicar em situações de exigência próxima ou acima dos limites de resistência dos elementos estruturais e de vedação. Blessmann (2001) descreve que as pressões originadas de ventos com velocidades da ordem de 70 km.h^{-1} causam danos às construções civis. Esse valor é próximo ao determinado por Streek *et al.* (1998), cuja pesquisa indicou que velocidades de vento superiores a 72 km.h^{-1} são capazes de causar danos físicos nas estufas.

As ações devidas ao vento no Brasil devem ser consideradas em conformidade com ABNT - NBR 6123 (1988), que foi a base da elaboração das ações do vento em estufas pela ABNT – NBR 16032 (2012), com adaptações para este tipo de construção, de acordo com a norma europeia EN 13031-1 (2001). Ambas as normas definem um período mínimo de referência para ações e probabilidade de exceder estas, sendo que cada classe possui seu tempo mínimo de referência de acordo com seu próprio período de vida útil.

Para serem consideradas as forças do vento nas estruturas, obtém-se da norma a velocidade básica do vento, os correspondentes fatores topográficos de rugosidade e dimensões da edificação, o fator de uso e os coeficientes de pressão. As pressões de obstrução geradas para as zonas de cobertura e paredes são utilizadas para o carregamento dos elementos do sistema estrutural da construção.

A análise dos componentes da estrutura deve seguir as especificações de cada norma regulamentadora, pois existem diferentes especificações, como por exemplo, as combinações de ações que formarão os possíveis carregamentos e as resistências de cálculo do material (aço, madeira, concreto) a ser empregado na construção. Os elementos que compõem a estrutura principal das estufas podem ter como exemplos a Figura 4 (a) e (b), nas quais são apresentadas duas formas estruturais, em arco e duas águas respectivamente.

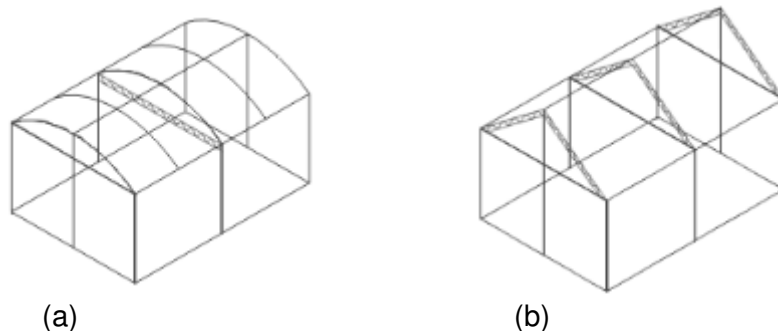


Figura 4. Modelo estrutural de estufas. (a) Em arco. (b) Em duas águas.

As normas ABNT - NBR 16032 (2012) e EN 13031-1 (2002) para estufas agrícolas e a ABNT – NBR 8681 (2003) para ações e segurança nas estruturas, indicam a utilização do método de Estados Limites de uma estrutura (estados a partir dos quais a estrutura apresenta desempenho inadequado às finalidades da construção), sendo eles: estados limites de serviço e estados limites últimos.

Segundo a ABNT – NBR 8681 (2003), os Estados limites últimos determinam a paralisação no todo ou em parte da estrutura caso tenha uma simples ocorrência deste. Já, os estados limites de serviço, dependendo da sua ocorrência, repetição ou duração, causam efeitos estruturais que não respeitem as condições especificadas para uso normal da construção, ou que são indícios de comprometimento da durabilidade da estrutura.

Conforme a ABNT – NBR 16032 (2012) as estufas da Classe A não permitem o deslocamento da estrutura como resultado da ação das cargas, e, no projeto destas, são considerados os Estados Limites de Serviço e os Estados Limites Últimos. Já nas estufas Classe B, a cobertura permite deslocamento da estrutura como resultado das ações das cargas. Estas estufas são projetadas considerando somente os Estados Limites Últimos.

2.4 PROJETOS E MODELOS ESTRUTURAIS DE ESTUFAS EM DIFERENTES PAÍSES

Existem alguns fatores que limitam o crescimento das culturas no ambiente protegido, sendo os fatores do conforto térmico importantes para a fotossíntese, como a incidência de radiação, temperatura e umidade do ar. Estes fatores podem ser controlados na estufa, assim como podem ser alterados para um nível adequado para o desenvolvimento

dos vegetais. Além dos fatores ambientais, o crescimento ideal das culturas é afetado pelo projeto arquitetônico da estufa, sendo necessário um estudo para cada sistema estrutural aplicado a determinada cultura (ALI- NEZHAD e ESKANDARI, 2012).

No geral, há grandes tendências à aplicação de modelos de estufas maiores e mais altas, como se pode observar pelos estudos realizados por von Elsner *et al.* (2000b). A princípio, na França os modelos de estufas mais utilizados para produção vegetal são cobertos de vidro (mais de 95%) com cobertura em duas águas. As estruturas para cobertura em vidro são geralmente de grande porte, e no caso francês, as dimensões destas estufas são de 9,6 a 12,6 metros de largura. Já, as estufas cobertas por filme plástico, em geral na forma de arco, possuíam antes de 1990 a largura de 6,4 metros e, recentemente, houve um aumento do vão medindo de 8 a 10 metros. A padronização de estufas na França tem sido estimulada pelas companhias de seguro, com intuito de fornecer serviços para os produtores de acordo com a normatização destas estruturas. A execução do projeto e o financiamento só são liberados para estruturas seguradas.

Segundo von Elsner *et al.* (2000b), na Alemanha, mais de 80% da cobertura das estufas são de vidro e a grande maioria dos modelos é de duas águas. O uso da cobertura de filme plástico é comum para produção sem aquecimento de alguns vegetais, de flores de verão e mudas de árvores florestais. Assim como na França, a Alemanha padronizou e normatizou a fabricação de estruturas de estufas agrícolas, com dimensões de 3,065 metros de módulo, com vãos comerciais de 6, 9, 12 ou 15 metros, e altura de 3 ou 8 metros. A abertura de ventilação da cumeeira com largura de 1,74 metros e 15° de abertura com relação ao plano horizontal. Após revisão, a norma adotou como vão padrão o valor de 12,8 metros.

A Holanda é o país europeu com maior tradição no uso de estufas para produção em larga escala de hortaliças e flores, segundo von Elsner *et al.* (2000b). O alto nível tecnológico empregado garante as condições ideais para a produção das plantas, visando à máxima eficiência da produção. Por volta de 93% das estufas possuem sistema de aquecimento, em razão do inverno intenso. Destas estruturas, cerca de 97 a 98% são cobertas por vidro simples. A normatização das dimensões na Holanda é baseada em duas categorias, as de pequeno e as de grande porte. A estrutura de grande porte apresenta a largura em múltiplos de 0,8 m, podendo ser de 6,4; 8,0; 9,6 ou 12,8 metros. Já as estufas de

pequeno porte possuem larguras de 3,2 ou 4,0 metros. As menores estruturas estão atualmente sendo empregadas em maior quantidade, por apresentarem menores custos de implantação.

No sudeste da Espanha, de acordo com Vázquez *et al.* (2011), a área média de um conjunto de estufas é de 1,28 ha (12800 m²), podendo variar de 500 m² a 32500 m². As dimensões mais comuns e padronizadas encontradas na região são de 8,0 m de vão - podendo variar de 6 a 9 m (IRIBARNE *et al.*, 2009), 4,5 m de pé direito, 6,0 m de altura total, com distância de 5,0 m entre pórticos, sendo empregado pórtico auxiliar a cada 2,5 m. Segundo Iribarne *et al.* (2007), ao longo da orla costeira da província de Almería, também sudeste da Espanha, encontra-se a maior concentração de estufas do mundo, com total de 27000 ha. A maior parte das produções em estufas fica por parte das culturas hortícolas, sendo estas estruturas, em geral, construídas com materiais de baixo custo e de acordo com a tradição local.

Mesmo com a padronização das dimensões das estufas espanholas, possuem diferenças entre fabricantes, pois em geral, o cálculo estrutural é limitado a uma dimensão fixada, e, quando ocorre a variação dimensional, o fabricante resolve o problema apenas adicionando ou excluindo pórticos. De acordo com Vázquez *et al.* (2011), não existem pesquisas que estudem a relação existente entre as dimensões das estufas e sua capacidade estrutural.

Segundo Castellano (2007), com intuito de reduzir custos de produção, os fabricantes de estufas agrícolas no Brasil oferecem poucas opções de vãos, dentre os quais 6,40; 8,00; 9,60; ou 12,80 metros, assim como alturas de pé direito de 3,0; 3,5 e 4,0 metros, e, a distância entre colunas (denominada de módulo) variando de 1,5 a 4,5 metros. Para estas estruturas, geralmente em aço galvanizado, são aplicados perfis tubulares circulares ou oblongos (para telhados em arco), retangulares ou em “C” (para colunas e telhados de duas águas), com espessuras da parede variando de 1,5 a 3,0 mm.

No Brasil dentre as empresas associadas à ABEAGRI – Associação Brasileira dos Fabricantes de Estufas e seus Equipamentos, as dimensões comerciais das estufas por elas produzidas, para o modelo em arco (Poly House) são de 6,40; 7,00 e 8,00 metros de vão, com módulos de 3,66; 4,00 e 4,50 metros, e, alturas de pé direito de 3,00 a 5,00 metros. Já,

para o modelo de águas planas (Poly Venlo), as dimensões são de 6,40 ou 8,00 metros de vão, 3,66 ou 4,00 metros de módulo, e, 3,00 a 5,00 metros de pé direito.

2.5 FORMAS ESTRUTURAIS SEGUNDO A ABNT - NBR 16032 (2012)

A padronização das formas de construções presente nas normas de ações de vento se deve a limitação dos ensaios realizados em túnel de vento de alguns modelos específicos, com os quais foram baseados os coeficientes das normas ABNT - NBR 16032 (2012) e ABNT - NBR 6123 (1983). Em ambas as normas há relações que devem ser consideradas para obtenção dos coeficientes de pressão, tanto no modelo em arco quanto no modelo de duas águas.

Em estufas de duas águas, as relações que definem a aplicação dos coeficientes externos de pressão estabelecidos na ABNT - NBR 16032 (2012), são determinadas pela razão de altura do piso até a calha (h), pelo vão da estufa (s). Para as relações h/s variando de 0,3 a 0,6, aplicando-se a qualquer inclinação do telhado (α) que varie de 20° a 26° .

Para cada zona considerada K, A, B e L na direção do vento perpendicular à cumeeira e zona N para a direção paralela à cumeeira (Figura 5 a e b, respectivamente) é atribuído um coeficiente de pressão externo, dada a direção do vento indicado como 1.

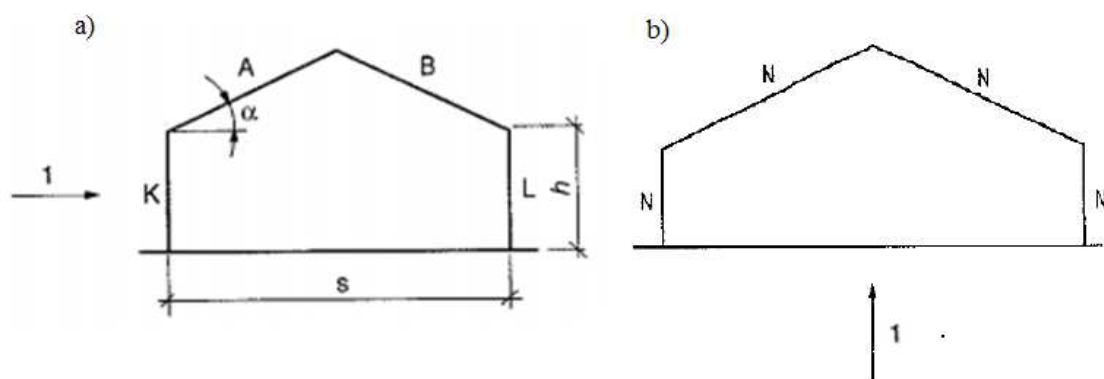


Figura 5. Configuração das zonas de obstrução para a forma de estufas de duas águas e da direção do vento a) perpendicular à cumeeira e b) paralela à cumeeira.

Fonte: ABNT – NBR 16032 (2012).

Observa-se que para a direção paralela a cumeeira (Figura 5b), há constância na distribuição dos coeficientes aerodinâmicos, tanto para colunas quanto para o telhado. Ou seja, as maiores variações nas distribuições das tensões oriundas da ação do vento (situação desejada para esta pesquisa) ocorrem quando da incidência na direção perpendicular à cumeeira da estufa.

Como exemplo de aplicação da forma estrutural de duas águas, tem-se o conjunto de estufas instalado na Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP, ilustrado na Figura 6.



Figura 6. Estufas da forma estrutural de duas águas.

Fonte: Autor.

Para o modelo de estufa em arco, a ABNT - NBR 16032 (2012) define a relação para determinação dos coeficientes de pressão a mesma que o modelo duas águas – h/s . Para a direção do vento perpendicular à cumeeira (indicado como 1), as zonas são definidas em A, K e L, sendo K e L as zonas de coluna e A toda a extensão do arco. Na direção do

vento paralela à cumeeira, indicado por 2, assim como na forma de duas águas, há uma constância nos coeficientes de pressão, definidos pela norma por N. Para fixação dos coeficientes ao longo da zona A e N no telhado, considera-se a variação do ângulo θ , conforme ilustrado na Figura 7. A altura do arco – h_r é definida para determinação dos coeficientes na zona A, a partir da relação de $h_r/s \geq 0,2$. A mesma também apresenta valores para outras relações menores que 0,2.

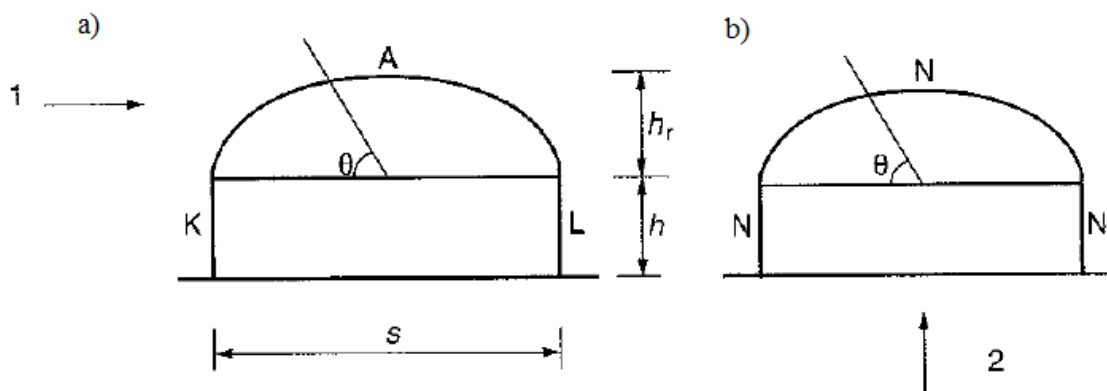


Figura 7. Configuração das zonas de obstrução para a forma de estufas em arco e da direção do vento a) perpendicular à cumeeira e b) paralela à cumeeira.

Fonte: ABNT – NBR 16032 (2012).

Para ambas as formas de estufas, a ABNT - NBR 16032 (2012) organiza e apresenta os coeficientes aerodinâmicos e de pressões internas em tabelas conforme as características da estrutura. Em casos especiais de projetos devem-se considerar a obtenção dos coeficientes aerodinâmicos separadamente por métodos alternativos, como por exemplo a análise computacional.

Como exemplo de aplicação da forma estrutural em arco, a Figura 8 ilustra um modelo instalado na Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP, na qual se pode observar o sistema estrutural.



Figura 8. Estufa da forma estrutural em arco.
Fonte: Autor.

2.6 MODELO TEÓRICO DO ANSYS©

A análise estrutural é provavelmente uma das aplicações mais comum do Método dos Elementos Finitos – MEF, sendo amplamente explorada para concepções dos projetos das construções civis, e o software Ansys© proporciona diversas possibilidades de análises estruturais utilizando o MEF.

Por meio da modelagem com o Ansys, se faz possível a obtenção de diversos resultados (deslocamentos, deformações, forças, tensões, etc.) e no caso para a presente pesquisa o programa foi utilizado para determinação das tensões máximas, que são resultantes das tensões axial direta e de flexão. Na Figura 9 são representadas as nomenclaturas das tensões calculadas, sendo a tensão axial direta (SDIR); a tensão de flexão no elemento da viga em +Z (SBZT); a tensão de flexão no elemento de viga em -Z (SBZB); tensão de flexão no elemento de viga em +Y (SBYT); tensão de flexão no elemento de viga em -Y (SBYB).

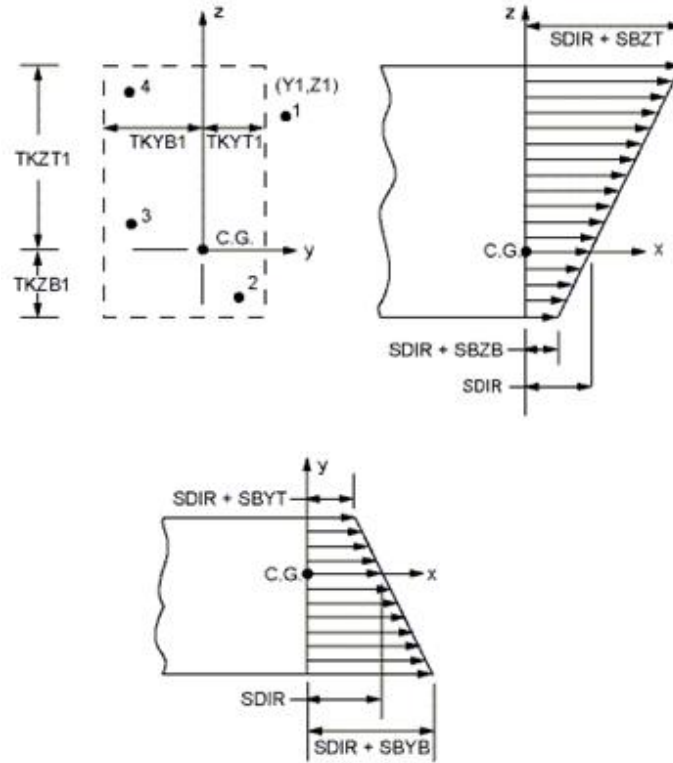


Figura 9. Normalização dos resultados de tensão conforme o Ansys.
Fonte: Biblioteca de referência teórica do Ansys 10.0.

Matematicamente, pode-se descrever cada tensão representada na Figura 9, conforme as Equações 1, 2 e 3.

$$\sigma_i^{dir} = \frac{F_{x,i}}{A} \quad [1]$$

$$\sigma_{z,i}^{bnd} = \frac{M_{y,i} \cdot t_z}{2 \cdot I_y} \quad [2]$$

$$\sigma_{y,i}^{bnd} = \frac{M_{z,i} \cdot t_y}{2 \cdot I_z} \quad [3]$$

Em que:

σ_i^{dir} – tensão axial direta (SDIR);

$\sigma_{z,i}^{bnd}$ – tensão de flexão (SBZ);

$\sigma_{y,i}^{bnd}$ – tensão de flexão (SBY);

$F_{x,i}$ – Força axial;

$M_{y,i}$ e $M_{z,i}$ – Momentos nos elementos em y e z, respectivamente.

t_z e t_y – espessura da viga nos elementos nas direções z e y, respectivamente;

A – Área da seção considerada;

I_y e I_z – Momentos de inércia das seções, na direção y e z, respectivamente.

Para uma dada seção da barra, pela Figura 9 é possível notar que a tensão máxima é calculada por: (tensão direta + tensão de flexão) e a tensão mínima por: (tensão direta – tensão de flexão). Assim, as tensões máximas e mínimas tracionam as bordas da barra quando resultarem positivas. Caso resultem negativas, as correspondentes bordas serão comprimidas.

2.7 VERIFICAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA E DE MASSA POR MODELAGEM MATEMÁTICA

Conforme Frisina e Escobedo (1999) as estufas provocam grandes alterações nos elementos meteorológicos internos, que são responsáveis para manutenção e o desenvolvimento das culturas. O cálculo que envolve o balanço de energia e de massa visa obter implicitamente os valores estimados de temperatura e umidade relativa interna das estufas. Estes fatores devem ser avaliados conforme a variação no modelo e dimensões e nas condições ambientais das estufas.

Nos modelos propostos por Hellickson e Walker (1983) e Ashrae (1978) para o balanço de energia e, por Albright (1990) para o balanço de massa, além dos valores de temperatura e umidade, correlacionam-se também com a equação, a radiação fotossinteticamente ativa e a ação da ventilação natural e/ou forçada no ambiente.

Bojacá *et al.* (2009) ao compararem uma rede de sensores com modelos matemáticos em estufas com cultivo de rosas na Colômbia, verificaram que os gradientes de temperaturas nos resultados ocorreram devido a presença do cultivo das flores. Sapounas *et al.* (2008) também realizaram a comparação entre métodos, com a cultura do tomate e concluíram que o gradiente de temperatura fora ocasionado pela movimentação do ar que retira energia dos vegetais. Em ambos os casos, os métodos matemáticos foram satisfatórios

quanto à obtenção dos dados, mostrando-se como ferramentas úteis para práticas de gestão e melhoria da produtividade. Entretanto, a presença de uma cultura no interior da estufa ocasiona em variações de temperatura no espaço do volume de controle, sendo necessário o cálculo específico do balanço de energia e massa para cada espécie de planta.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DEFINIÇÕES

Neste trabalho foram avaliadas as duas principais formas comerciais de estufas de único vão, em arco e duas águas (comercialmente conhecidas por Poly House e Poly Venlo, respectivamente). A análise do comportamento estrutural consistiu na avaliação das tensões máximas nos pórticos, sob efeitos de ações permanentes e variáveis. Para ambos os modelos, fixou-se a direção do vento incidente perpendicularmente à cumeeira, com dados dos gráficos das isopletras do estado de São Paulo para região de Campinas. Analisaram-se os pórticos principais das estufas, com elementos de colunas, telhado e travamento (tirante). As condições de contorno das simulações e as propriedades dos materiais empregados estão descritas no item 3.2 da modelagem computacional.

Para avaliação dos modelos existentes na ABNT - NBR 16032 (2012), as relações das formas foram organizadas para que se pudessem empregar os valores extremos de coeficientes de pressão do vento.

3.1.1 Forma estrutural de duas águas

Para os modelos da forma estrutural de duas águas utilizaram-se as inclinações do telhado dentro dos limites da norma de 20° a 26°, e as relações de h/s extremas de 0,3 e 0,6. Pôde-se então realizar a simulação em oito modelos de estufas de duas águas, conforme as Figuras 10a-10d que ilustram a divisão dos modelos e as dimensões empregadas. Os valores dos vãos de 6,4 m e 8 m foram adotados com base em modelos comercializados por fabricantes da ABEAGRI.

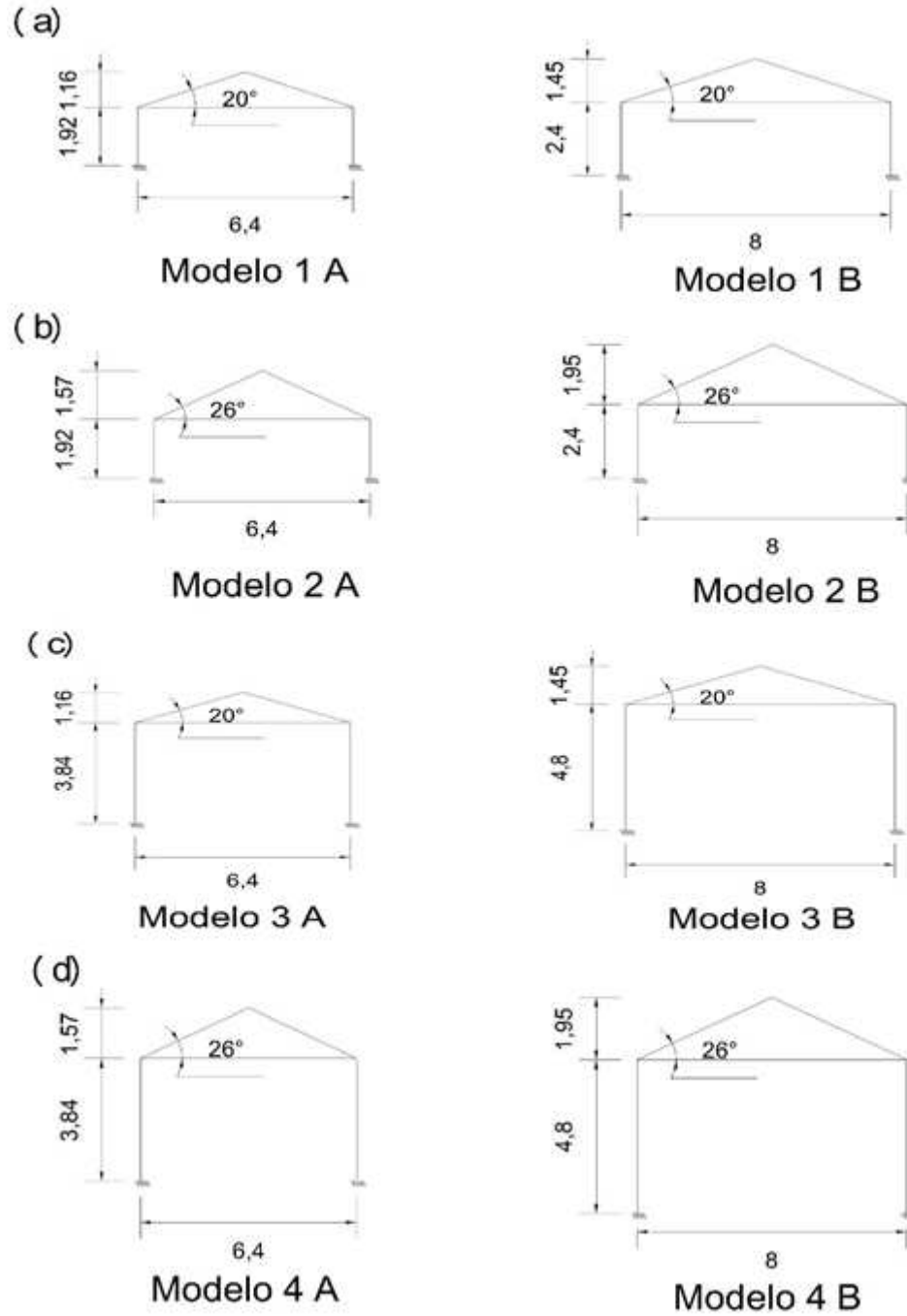


Figura 10. Modelos simulados de estufas de duas águas. (a) $h/s=0,3$ e $\alpha=20^\circ$; (b) $h/s=0,3$ e $\alpha=26^\circ$; (c) $h/s=0,6$ e $\alpha=20^\circ$; (d) $h/s=0,6$ e $\alpha=26^\circ$.

Medidas em metros.

3.1.2 Forma estrutural em arco

Para os modelos da forma estrutural em arco, adotaram-se as mesmas relações h/s utilizadas na forma de duas águas, pois os valores extremos apresentados pela norma brasileira para a forma em arco variam de $0,4 \geq h/s \geq 0,6$, fato esse que abrange as relações utilizadas na forma de duas águas. Quanto à altura do arco, a ABNT - NBR 16032 (2012) não apresenta valores de referência, mas as tabelas são organizadas para relação de $hr/s \geq 0,2$, na qual hr representa a altura do arco (Figura 11). Para a relação de $hr/s < 0,2$ a norma brasileira também apresenta valores de coeficientes de pressão externos diferentes.

Buscando-se comparar as formas, para a fixação da altura das estufas em arco, utilizou-se a projeção da cumeeira da forma de duas águas (Figura 11), dessa forma, o arco foi obtido pelos mesmos três pontos da projeção da forma de duas águas (calha-cumeeira-calha). Para geração das linhas de projeção, tal que hr tenha a mesma altura da cumeeira de duas águas, assume-se um ângulo α_{eq} , igual ao próprio ângulo α definido para o modelo em duas águas. Observa-se que aplicando a inclinação de 20° da forma em duas águas, comparativamente para obter a altura máxima do arco, é possível obter os coeficientes referentes a relação $hr/s < 0,2$. Já, para o ângulo de inclinação de 26° é possível realizar os cálculos conforme a relação de $hr/s > 0,2$. Com isso, as alturas totais ($h+hr$) das estufas em arco foram igualadas as alturas totais (base à cumeeira) dos modelos em duas águas.

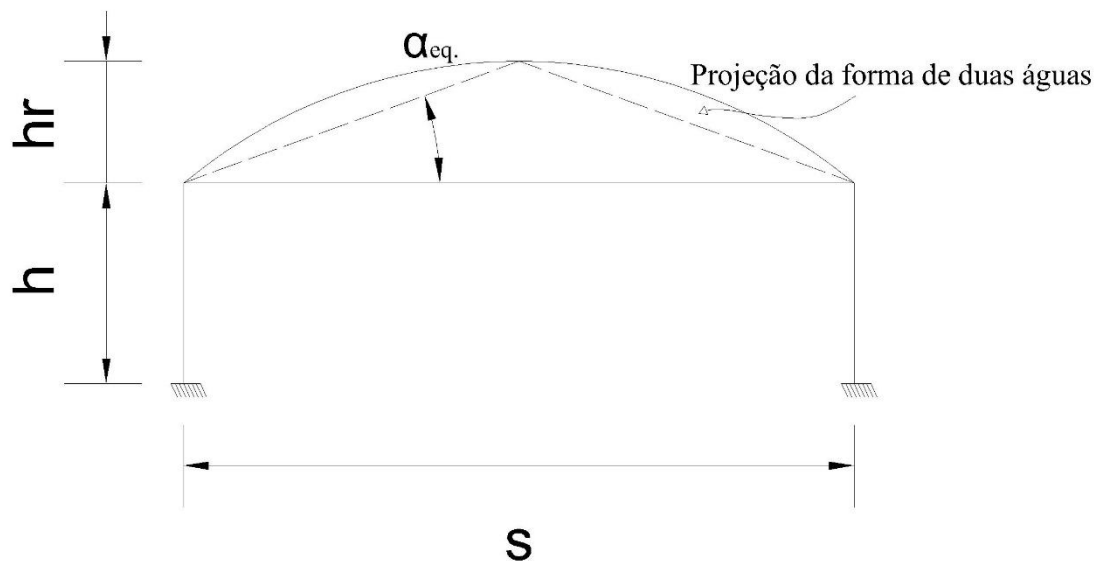


Figura 11. Analogia da forma em arco com a forma de duas águas.

Esta analogia apresentada entre as projeções das duas formas estruturais em estudo, pode ser visualizada em um modelo real, presente no Instituto de Genética – UNICAMP, conforme a Figura 12.



Figura 12. Estufa em arco com pórtico frontal enrijecido com diagonais.
Fonte: Autor.

Nota-se na Figura 12 o incremento de área frontal, consequentemente no volume total, proporcionados com a mudança da forma estrutural de duas águas para a forma em arco.

A razão entre a altura do arco e o vão da estufa é caracterizada também pela ABNT - NBR 6123 (1983) por valores de $1/5$ ou $1/10$, sendo o primeiro mais próximo do valor considerado pela norma de estufas. Assim como na forma duas águas, foram simuladas oito estufas da forma em arco com diferentes configurações, conforme as Figuras 13a-13d.

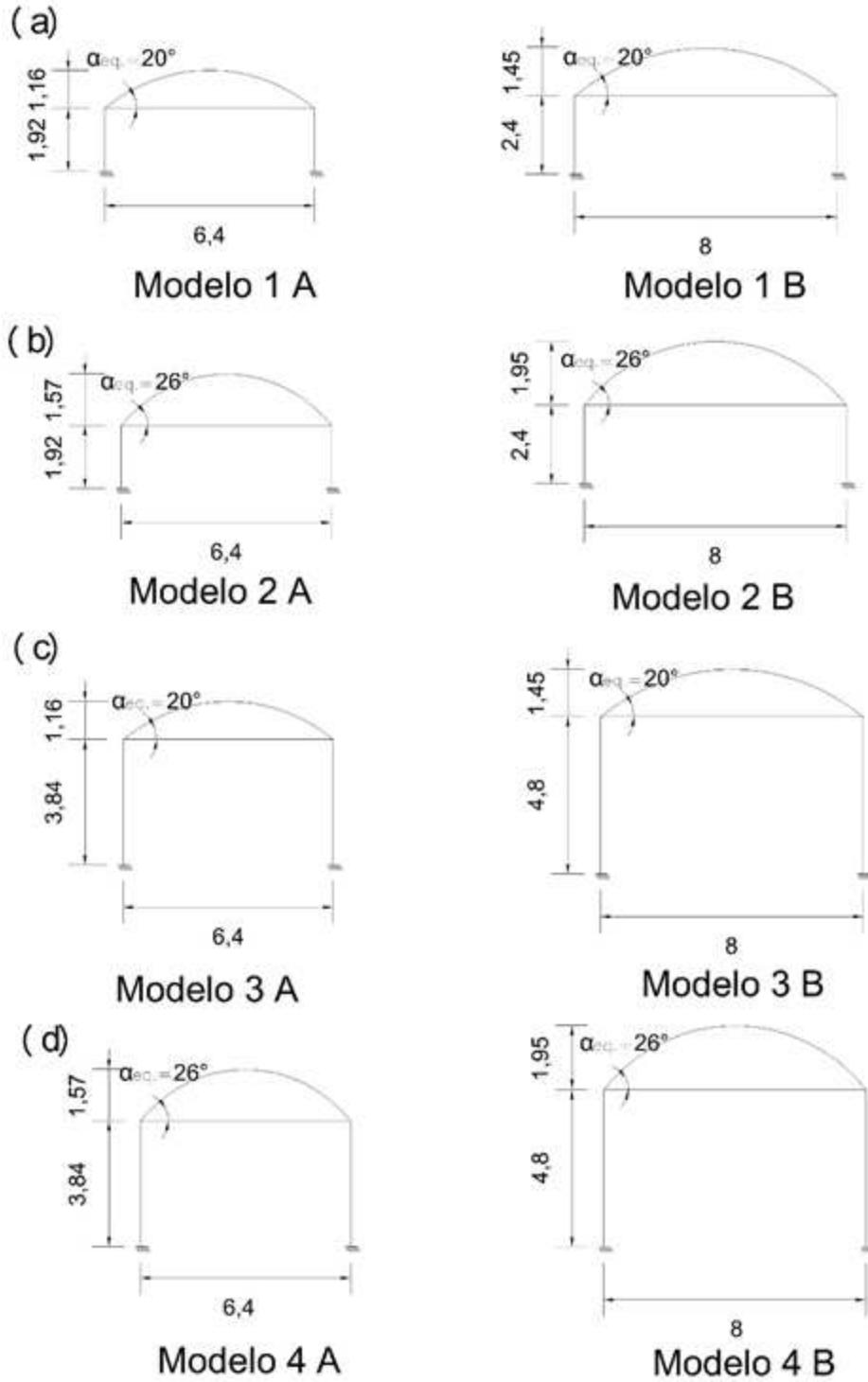


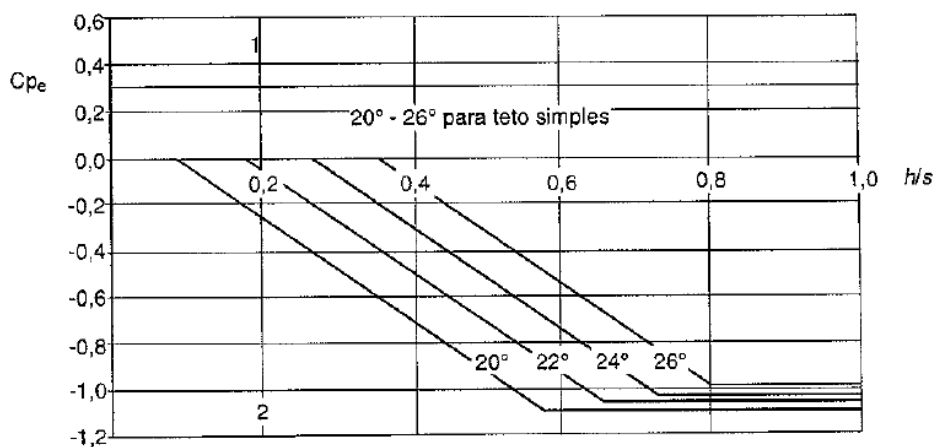
Figura 13. Modelos simulados de estufas em arco. (a) $h/s=0,3$ e $\alpha_{eq}=20^\circ$; (b) $h/s=0,3$ e $\alpha_{eq}=26^\circ$; (c) $h/s=0,6$ e $\alpha_{eq}=20^\circ$; (d) $h/s=0,6$ e $\alpha_{eq}=26^\circ$.
Medidas em metros.

3.1.3 Coeficientes de pressão

Os coeficientes de pressão externos (C_{pe}) utilizados para cada relação que definem um modelo estão descritos na Tabela 1 e complementados pela Figura 14, para a forma em duas águas.

Tabela 1. Coeficientes de pressão externos para telhado duas águas e vento perpendicular à cumeeira, conforme ABNT - NBR 16032 (2012).

h/s	A	B	K	L
0,3	Figura 14	-0,5	0,6	-0,3
0,6	Figura 14	-0,8	0,6	-0,6



— $c_{pe} = + 0,2$ no caso de estufa constituída por um só vão.

— $c_{pe} = + 0,3$ no caso de estufa constituída por dois ou mais vãos.

Figura 14. Coeficientes de pressão externa para zona A do modelo duas águas.

Fonte: ABNT – NBR 16032 (2012).

Conforme visto na Figura 5b e 7b, para a direção do vento paralela à cumeeira há prevalência do coeficiente de pressão externo N em todas as zonas. De acordo com a ABNT – NBR 16032 (2012), este coeficiente N tem o valor de sucção -0,2. Por não ocorrer variação dos coeficientes, nesta pesquisa não se considerou esta direção do vento. Porém, para projetos desta natureza, ambas as direções do vento devem ser consideradas, conforme definido pela norma.

Para o modelo em arco, as relações de h/s e inclinação do telhado que definem os coeficientes são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Coeficientes de pressão externos para zonas de parede do modelo em arco, conforme ABNT - NBR 16032 (2012).

h/s	K	L
$\leq 0,4$	0,6	-0,3
$\geq 0,6$	0,6	-0,6

Tabela 3. Coeficientes de pressão externos para zona de telhado do modelo em arco, conforme ABNT - NBR 16032 (2012).

θ (°)	A ¹	A ²
0 a 55	0,3	0,3
55 a 115	-1	-1,2
115 a 180	-0,4	-0,4

¹ Para $hr/s \geq 0,2$. ² Para $hr/s < 0,2$.

Assim como na forma de duas águas, para a forma em arco não foram determinados os esforços para a direção do vento paralela à cumeeira.

Para cada um dos modelos de estufas, aplicaram-se os coeficientes de pressão internos (C_{pi}) estabelecidos pela ABNT - NBR 16032 (2012), e no caso dos modelos estudados os C_{pi} 's são de +0,2 e de -0,4. Nas considerações da ação do vento nas estruturas das construções civis, de acordo com a ABNT - NBR 6123 (1983), na determinação dos coeficientes de pressão internos devem ser avaliadas as aberturas dominantes, o que são particularidades de cada projeto. Na Figura 15 são ilustrados os coeficientes externos e internos numa construção de telhados de duas águas (a) e em arco (b).

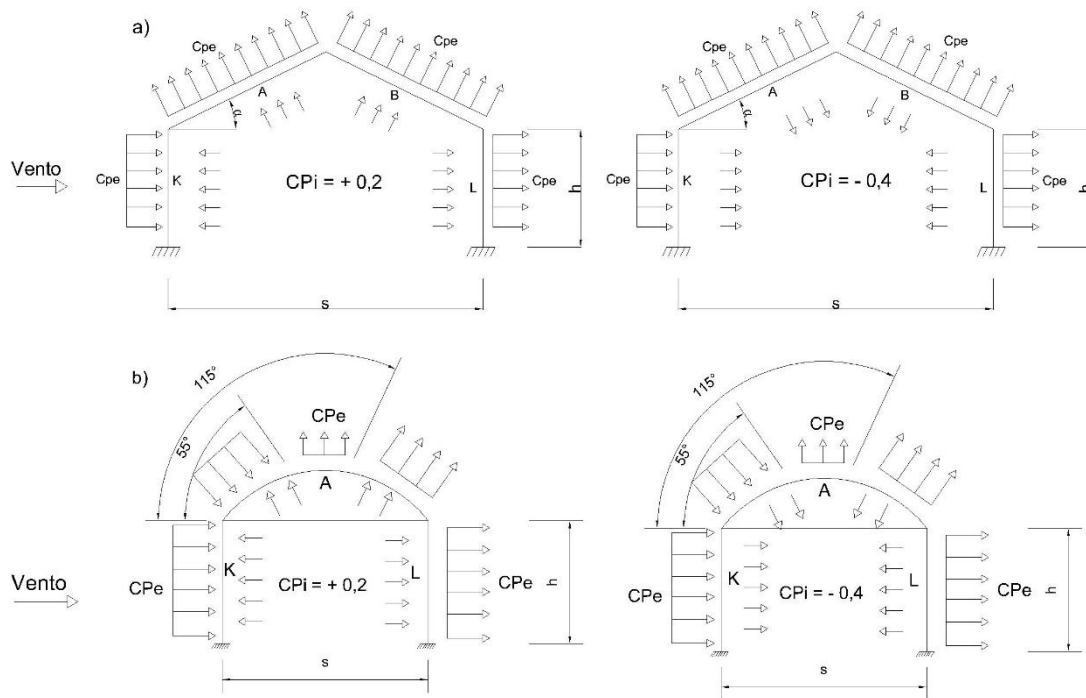


Figura 15. Coeficientes de pressões externos (C_{pe}) e internos (C_{pi}) incidindo nas zonas de paredes e tetos. a) Forma de duas águas e b) forma em arco.

O coeficiente resultante de pressão (C_p) em cada zona de parede e telhado foi obtido pela diferença entre os coeficientes de pressão externos e internos ($C_p = C_{pe} - C_{pi}$). Com o coeficiente C_p , foi possível obter a ação do vento em cada zona correspondente do pórtico, conforme a Equação 4.

$$P = C_p \cdot q \cdot L \quad [4]$$

Em que:

P – pressão máxima em cada zona [N/m];

q – pressão de obstrução (em condições normais de temperatura e pressão, $q=0,613.V_k$) [N/m²];

L – distância entre os pórticos [m].

A velocidade característica (V_k) representa a combinação da velocidade básica do vento (V_0) com fatores que consideram a topografia, rugosidade, dimensões da edificação, grau de segurança e vida útil. A velocidade básica do vento é obtida por meio de tratamento

estatístico, que considera a vida útil de 50 anos nas edificações, a uma altura de dez metros acima do terreno em campo aberto e plano, com uma probabilidade de ser excedido de 63%, podendo ser organizadas em um gráfico com curvas que representem a velocidade do vento, conhecidas por isopletras. A Equação 5 representa a forma de obtenção da velocidade característica do vento.

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad [5]$$

Em que:

S_1 – Fator topográfico que considera as variações de relevo do terreno no entorno da edificação. Considerado neste estudo terreno plano: $S_1 = 1,0$;

S_2 – Fator que considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno, e, das dimensões da edificação. Está organizado em tabelas na ABNT - NBR 6123 (1983), além de poder ser calculado pela Equação 6. Considerado neste estudo categoria III e classe A (para a máxima dimensão de 18 m – 5 módulos de 3,6 m), resultando em $S_2 = 1,01$;

$$S_2 = b \cdot Fr \left[\frac{z}{10} \right]^p \quad [6]$$

Sendo: b – parâmetro meteorológico; Fr – fator de rajada, correspondente à categoria II e classe A; z – altura acima do nível geral do terreno; p – função da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo.

S_3 – Fator que considera o grau de segurança requerido e a vida útil da estrutura. De acordo com a norma, este fator pode ser calculado com a Equação 7. Utilizando os parâmetros estabelecidos pela ABNT - NBR 16032 (2012) para as classes A e B de estufas, obtiveram-se os valores S_3 de 0,82 e 0,76, respectivamente. Porém, a norma de ação do vento estabelece o valor mínimo de $S_3 = 0,83$ (considerado no estudo).

$$S_3 = 0,54 \left[-\ln \frac{(1-P_m)}{m} \right]^{-0,157} \quad [7]$$

Em que:

Pm – nível de probabilidade;

m – período de recorrência.

Para a região de Campinas – SP, o gráfico de isopletras fornece uma velocidade básica de 45 m/s, representando uma das maiores no país. Este valor geralmente é reduzido quando combinado com os fatores S_1 , S_2 e S_3 , mas também pode ser ampliado, dependendo das características da construção. Nesta pesquisa, com os fatores apresentados anteriormente, aplicou-se para o cálculo da pressão de obstrução a velocidade característica foi de $37,72 \text{ m s}^{-1}$.

3.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Para se obter as distribuições das tensões máximas nos pórticos dos modelos em duas águas e em arco foi utilizado o software Ansys© (versão ed. 10.0). Inicialmente, foram gerados os modelos geométricos (keypoints e lines), assumindo-se a total restrição de movimentos das bases das colunas, caracterizando assim o engastamento da base da coluna. Considerou-se também a ligação do ponto comum telhado – coluna – travamento como nó rígido. Foi gerada a malha com o uso do elemento tridimensional BEAM44, sendo os modelos de duas águas com 3 elementos para cada linha de coluna e 4 elementos para cada linha do telhado (Figura 16).

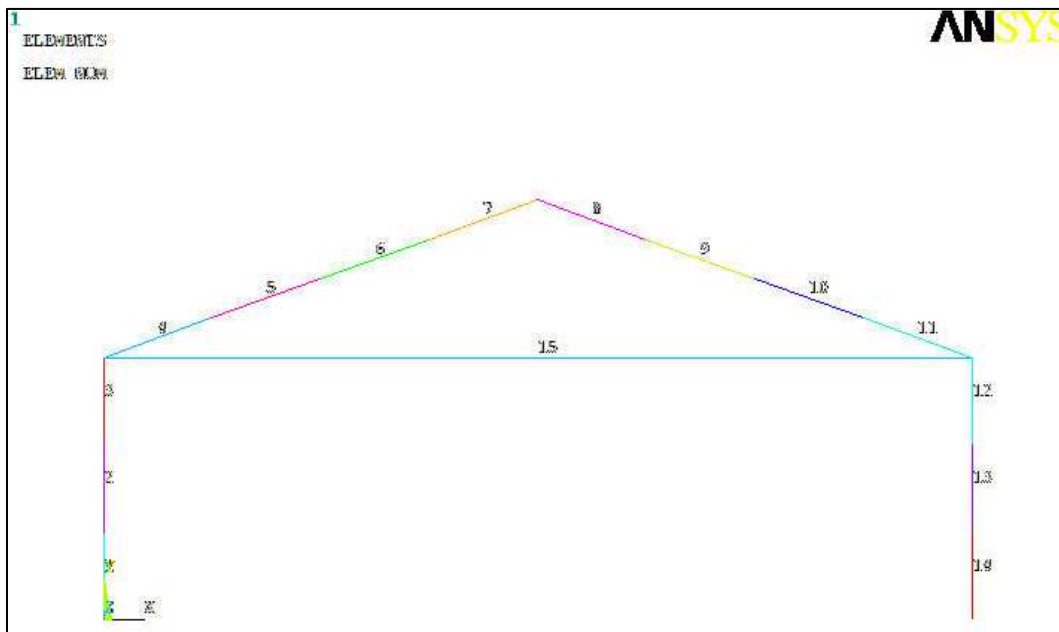


Figura 16. Geração da malha dos elementos para estufas de duas águas.

Para o modelo em arco a malha foi formada com 3 elementos para cada linha de coluna e 36 elementos para a linha do telhado, conforme representação na Figura 17. Este número de elementos no arco corresponde a faixas de 5° , nos quais foram definidos os trechos para a aplicação das ações em: 1º trecho = $0 - 55^\circ$; 2º trecho = $55^\circ - 115^\circ$; 3º trecho = $115^\circ - 180^\circ$.

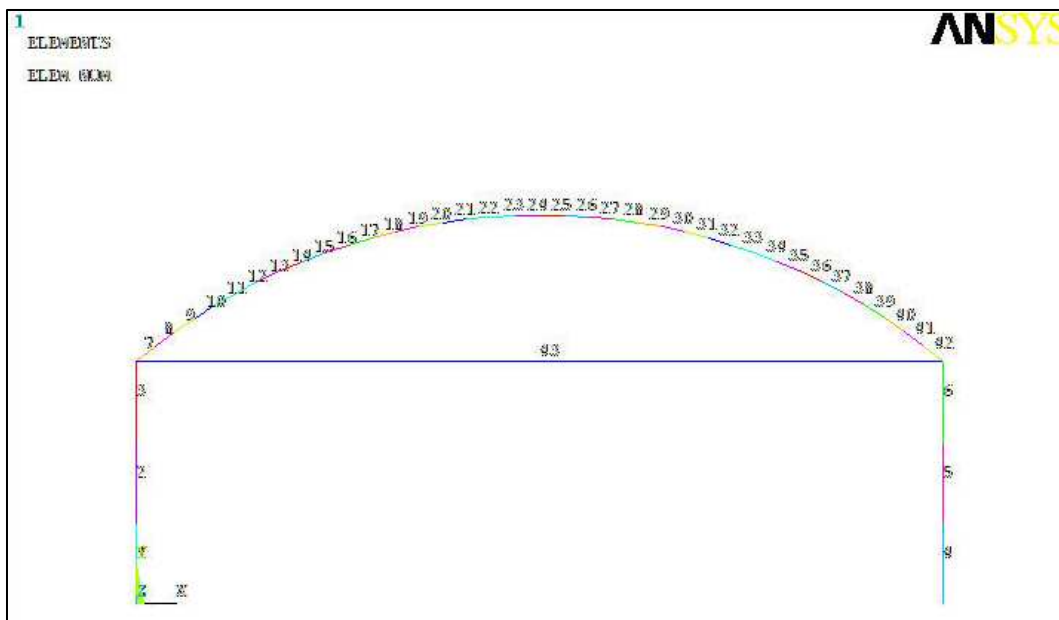


Figura 17. Geração da malha dos elementos para estufas em arco.

Para caracterização dos elementos finitos, simulando três tipos de perfis tubulares ao longo da estrutura, foram empregadas as constantes reais para cada zona conforme os seguintes perfis: coluna 80 mm x 80 mm x 2 mm, telhado 50 mm x 30 mm x 2 mm, e para o travamento do pórtico 30 mm x 30 mm x 1,5 mm. Para todos os modelos simulados foram aplicados estes perfis, que possuem características próximas aos comerciais, porém, são todos tubulares e não de chapas dobradas. Desta forma, os perfis analisados possuem maior rigidez que aqueles usualmente empregados em alguns casos de estufas comerciais.

Como propriedades do material, foram empregados o módulo de elasticidade com 210000 MPa, coeficiente de Poisson igual a 0,3 e densidade do material de $7,86 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Para efeitos de carregamento de cada estrutura consideraram-se de forma automática as ações de peso próprio da estrutura (elementos do pórtico), tendo sido ativada para tanto a componente gravitacional, com valor de $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Foram consideradas 5 terças em todos os modelos, como cargas pontuais de 50 N aplicadas na cobertura, conforme as Figuras 18 a-b (em duas águas e arco, respectivamente).

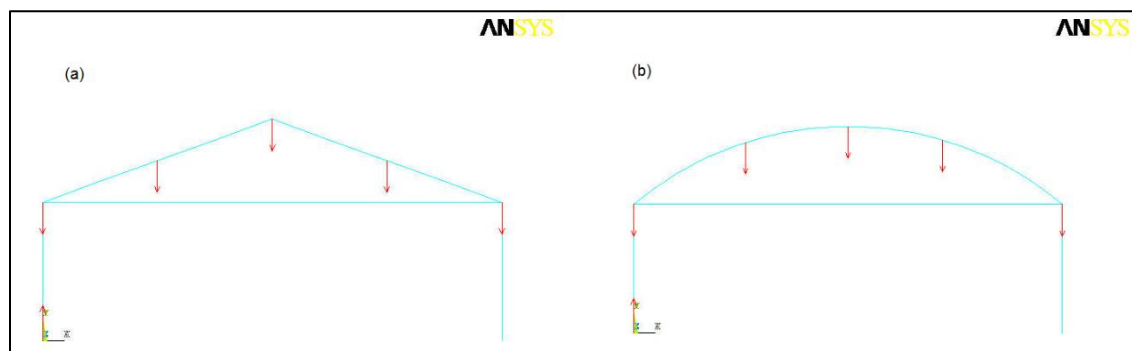


Figura 18. Forma de aplicação das ações das terças e ativação da aceleração da gravidade (a) para forma de duas águas e (b) para forma em arco.

Como sobrecarga no telhado considerou-se $0,25 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ em projeção (que foi devidamente decomposta nas direções x e y), de forma que os componentes foram aplicados paralelos e perpendiculares ao eixo dos elementos de cobertura dos pórticos.

A ação do vento foi considerada pela aplicação das pressões de obstrução atuando perpendicular ao plano das colunas e do telhado. Para tanto, buscou-se a faixa de influência

de cada pórtico, sendo aplicado o carregamento de forma linear perpendicular ao eixo do elemento.

Para se obter os valores das tensões máximas nos nós de cada elemento, foram considerados os carregamentos permanentes, sobrecarga e pressões de obstrução pelo vento.

3.2.1 Tensões máximas

Para cada bloco de ações (permanentes e variáveis), aplicadas separadamente nos pórticos, foram coletados os resultados de tensão máxima em cada elemento. Os valores de tensão máxima foram combinados nos Estados Limites Últimos, gerando as combinações últimas normais. Foram consideradas para este trabalho oito combinações de ações, descritas no Quadro 1.

1ª Combinação	$\sigma_{sd} = \sigma_p \cdot \gamma_g + \sigma_s \cdot \gamma_q$
2ª Combinação	$\sigma_{sd} = \sigma_p \cdot \gamma_g + \sigma_{v(0,2)} \cdot \gamma_q$
3ª Combinação	$\sigma_{sd} = \sigma_p \cdot \gamma_g + \sigma_{v(0,4)} \cdot \gamma_q$
4ª Combinação	$\sigma_{sd} = \sigma_p \cdot \gamma_g + \sigma_s \cdot \gamma_q + \sigma_{v(0,2)} \cdot \gamma_q \cdot \psi_0$
5ª Combinação	$\sigma_{sd} = \sigma_p \cdot \gamma_g + \sigma_s \cdot \gamma_q + \sigma_{v(0,4)} \cdot \gamma_q \cdot \psi_0$
6ª Combinação	$\sigma_{sd} = \sigma_p \cdot \gamma_g + \sigma_{v(0,2)} \cdot \gamma_q + \sigma_s \cdot \gamma_q \cdot \psi_0$
7ª Combinação	$\sigma_{sd} = \sigma_p \cdot \gamma_g + \sigma_{v(0,4)} \cdot \gamma_q + \sigma_s \cdot \gamma_q \cdot \psi_0$
8ª Combinação (referência)	$\sigma_{sd} = \sigma_p \cdot \gamma_g$

Quadro 1. Combinações das tensões nos estados limites últimos.

Em que:

σ_{sd} – Tensão máxima solicitante de cálculo;

σ_p – Tensão máxima característica devido às ações permanentes;

σ_s – Tensão máxima característica devido à ação da sobrecarga no telhado;

$\sigma_{v(0,2)}$ – Tensão máxima característica devido à ação do vento externo em conjunto com a pressão interna de +0,2.

$\sigma_{v(0,4)}$ – Tensão máxima característica devido à ação do vento externo em conjunto com a pressão interna de -0,4.

γ_g, γ_q – Coeficientes de ponderação das ações permanentes e variáveis. $\gamma_g=1,40$. Para o vento $\gamma_q=1,40$. Para a sobrecarga $\gamma_q=1,50$.

ψ_0 – Fator de combinação. Para o vento $\psi_0=0,6$. Para a sobrecarga $\psi_0=0,8$.

3.3 MODELOS PARA VERIFICAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA E DE MASSA

O cálculo que envolve o balanço de energia e de massa visa obter implicitamente os valores estimados de temperatura e umidade relativa interna das estufas, respectivamente.

No cálculo do balanço de energia, devido às considerações que deverão ser feitas para as condições da estrutura, foi utilizado o método de balanço proposto por Hellickson e Walker (1983) e ASHRAE (1978). De forma geral, o balanço de energia é definido como a diferença entre o ganho e perda de calor sensível para um determinado meio, em condições estáveis, sendo que a equação de balanço proposta pelos autores citados é apresentada na Equação 8.

$$Q_{rad} + Q_{equ} + Q_{aqu} + Q_{resp} = Q_{cnd} + Q_{pis} + Q_{ven} + Q_{inf} + Q_{rtc} + Q_{fot} + Q_{sl} \quad [8]$$

Em que:

Q_{rad} = calor sensível proveniente do sol - radiação (W);

Q_{equ} = calor de fontes da energia térmica proveniente de motores, equipamentos, luminárias, pessoas etc. (W);

Q_{aqu} = calor sensível do sistema de aquecimento (W);

Q_{resp} = calor sensível de respiração do produto (W);

Q_{cnd} = calor sensível de condução da estrutura (W);

Q_{pis} = calor sensível transferido do (ao) solo ou do (ao) piso pelo perímetro (W);

Q_{ven} = calor sensível do ar de ventilação (natural ou mecânica) (W);

Q_{inf} = calor sensível de infiltração involuntária pelas frestas (W) – considerado 0;

Q_{rtc} = calor de reirradiação térmica para o céu (W);

Q_{fot} = calor sensível usado para a fotossíntese (W);

Q_{sl} = calor sensível convertido em calor latente dentro do espaço interno (W).

Cada termo que compõe a Equação 8 será definido de acordo com as Equações 9 a 18.

$$Q_{rad} = \zeta . I . A_p \quad [9]$$

Em que:

ζ = transmitância do material de cobertura (PEBD = 0,92);

I = intensidade da radiação solar local ($W.m^{-2}$);

A_p = Área de piso da casa de vegetação (m^2).

$$Q_{fot} = Q_{rad} . 3\% \quad [10]$$

$$Q_{resp} = Q_{fot} . 10\% \quad [11]$$

$$Q_{ven} = Q_{sv} + Q_{sl} \quad [12]$$

$$Q_{sv} = V . \rho_{ar} . C_p . \Delta T \quad [13]$$

$$V = V_v . E_a . A_{abert} \quad [14]$$

$$Q_{sl} = E . F_c . Q_{rad} \quad [15]$$

Em que:

V = Fluxo mássico ($kg.m^{-2} s^{-1}$);

C_p = Calor específico do ar ($1006 J.kg^{-1} K^{-1}$);

ΔT = Diferença entre a temperatura interna T_i e a temperatura externa T_e (K);

ρ_{ar} = Densidade do ar ($kg m^{-3}$);

$V_v =$

E_a = Eficiência das aberturas (0,35);

A_{abert} = Área de abertura (m^2);

E = Razão da evapotranspiração e radiação solar;

F_c = Fator de cultivo.

$$Q_{cnd} = U . A_{cob} . \Delta T \quad [16]$$

Em que:

U = coeficiente global de transferência do material de cobertura ($6,8 \text{ W.m}^{-2} \text{ K}^{-1}$);

A_{cob} = Área de contorno por plástico da estufa (m^2).

$$Q_{pis} = F \cdot \text{Per} \cdot \Delta T \quad [17]$$

Em que:

F = Fator perimetral;

Per = Perímetro da estufa coberta (m);

$$Q_{rtc} = \varepsilon_{sup} \cdot \gamma_T \cdot \sigma \cdot A_p \cdot (T_i^4 - \varepsilon_{ar} \cdot T_e^4) \quad [18]$$

Em que:

ε_{sup} = Emissividade da superfície interna (0,85);

γ_T = Transmitância térmica do material de cobertura (0,80);

σ = Constante de Stephan Boltzmann ($5,678 \times 10^{-6} \text{ W.m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

T_i = Temperatura interna (K);

T_e = Temperatura externa (K);

ε_{ar} = Emissividade aparente da atmosfera (tabelado de Hellickson e Walker (1983) que depende da temperatura do ponto de orvalho do céu = 0,837);

A_p = Área do piso (m^2).

O balanço de massa calculado tem por base o modelo proposto por Albright (1990). Em virtude das condições de contorno adotadas, o balanço de massa para os modelos de estufas abertas apresentaria os valores de umidade interna bem próximos ou semelhantes, pois as áreas de aberturas seriam as mesmas. Se as aberturas fossem proporcionais as dimensões, provavelmente este fenômeno não ocorreria. A ausência de uma cultura também não validaria o método, pois nesta situação, deve-se considerar a evapotranspiração. Para tanto, definiu-se a avaliação da umidade interna apenas na condição de estufas fechadas, conforme a Equação 19.

$$Uri = \frac{100}{A_{pm} + A_{cont}} \cdot (A_{pm} + \frac{A_{cont} \cdot P_{se}}{P_{si}}) \quad [19]$$

Em que:

Uri = Umidade relativa interna (%);

A_{pm} = Área do piso molhado (m²);

A_{cont} = Área do contorno da casa de vegetação (m²);

P_{se} = Pressão de saturação do vapor associado com condições climáticas externas (kPa);

P_{si} = Pressão de saturação do vapor associado com a temperatura do ambiente interno e umidade relativa externa (kPa).

A cada forma e modelo estrutural proposto foram aplicadas as equações do modelo matemático, de forma a verificar os respectivos níveis de conforto, bem como sua adequação à região de Campinas - SP. Para cada situação de cálculo: verão aberta ou fechada, e, inverno aberta ou fechada – foram calculados todos os parâmetros vistos das Equações 8 a 19, exceto em condições em que seja desprezível ou desconsiderada, ou que não ocorra a possibilidade da existência do parâmetro, como nos casos seguintes:

- Estrutura aberta no verão (EAV): $Q_{equ} = Q_{aqu} = Q_{cnd} = 0$
- Estrutura fechada no verão (EFV): $Q_{equ} = Q_{aqu} = Q_{ven} = 0$
- Estrutura aberta no inverno (EAI): $Q_{rad} = Q_{equ} = Q_{aqu} = Q_{cnd} = Q_{fot} = Q_{sl} = 0$
- Estrutura fechada no inverno (EFI): $Q_{rad} = Q_{equ} = Q_{aqu} = Q_{fot} = Q_{ven} = Q_{sl} = 0$

3.3.1 Dados climáticos

Os dados climáticos para a cidade de Campinas – SP foram obtidos através do posto meteorológico do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (Cepagri).

Os dados selecionados para análises possuem periodicidade de 20 anos, sendo datados de Junho de 1988 a Outubro de 2008. Como a modelagem das estufas leva em consideração os períodos de verão e inverno, foram selecionados os meses de dezembro a março e de maio a agosto para representar estas estações respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4. Dados climáticos do município de Campinas para um período de 20 anos.

Mês	TBS Máx. média (°C)	TBS Máx. média (K)	TBS Min. média (°C)	TBS Min. média (K)	UR às 9h (%)	UR às 15h (%)	Insolação (h.dia ⁻¹)	Radiação Solar ¹ (W.m ²)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Direção do vento (°)
Dez	29,6	302,8	19,1	292,3	75	47	6,2	739,6	4,75	213
Jan	29,7	302,9	19,8	293	78	57	6,2	723,4	4,17	227
Fev	30,0	303,2	19,9	293,1	78	54	6,7	745,3	3,79	211
Mar	29,9	303,1	19,6	292,8	73	50	6,3	733,3	4,63	212
Mai	25,5	298,7	14,5	287,7	75	46	6,6	607,2	3,88	193
Jun	24,8	298	12,9	286,1	75	43	6,3	595,9	3,24	224
Jul	24,8	298	12,3	285,4	73	41	6,0	590,7	3,17	204
Ago	27,2	300,4	13,8	287,0	67	36	6,5	675,6	3,70	209

¹ média às 15 h para os meses de verão e às 9 h para os meses de inverno.

Fonte: CEPAGRI, 2013.

Em que:

TBS. Máx. média: Temperatura de bulbo seco média das máximas;

TBS. Min. média: Temperatura de bulbo seco média das mínimas;

UR: Umidade relativa.

A Tabela 5 apresenta os valores médios dos três meses mais críticos de cada estação. No caso do verão, selecionaram-se os três meses com maior média de temperatura de bulbo seco, e, no caso do inverno, selecionaram-se os três meses com menor média de temperatura de bulbo seco.

Tabela 5. Médias dos dados climáticos de Campinas.

Média de 3 meses	TBS Máx. média (°C)	TBS Máx. média (K)	TBS Min. média (°C)	TBS Min. média (K)	UR ¹ (%)	Insolação (h.dia ⁻¹)	Radiação Solar ¹ W.m ²	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Direção do vento (°)
D, J, F	29,77	302,97	19,6	292,8	55,00	6,37	736,10	4,24	217,00
J, F, M	29,87	303,07	19,77	292,97	53,67	6,40	734,00	4,20	216,67
M, J, J	25,03	298,23	13,23	286,40	74,33	6,30	597,93	3,44	207,00
J, J, A	24,8	298	13,00	286,17	71,67	6,27	620,73	3,37	212,33

¹ média às 15 h para os meses de verão e às 9 h para os meses de inverno.

Fonte: CEPAGRI, 2013.

O período trimestral selecionado está grafado na Tabela 5. A partir destes valores foram calculados os demais fatores para os balanços de massa e energia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada uma das ações aplicadas às estruturas foram obtidas as tensões máximas características nos elementos, as quais podem ser vistas no Apêndice (Tabelas A1 a A18). Essas tensões foram utilizadas na geração das tensões de cálculo, segundo as combinações apresentadas na seção 3.2.1 (Quadro 1).

Nas Figuras 19 a 26 são representados os diagramas das tensões máximas obtidas com o programa ANSYS, para alguns dos modelos utilizados nesta pesquisa. Nos modelos da forma de duas águas os maiores valores das tensões resultaram nas zonas de telhado (Figuras 19, 20 e 21). Já, na forma em arco há modelo que resultou em tensões maiores na zona de telhado (Figura 23) e, também, modelo que as tensões máximas resultaram na zona de coluna (Figura 26). Em ambas as formas, para as ações permanentes as tensões máximas resultaram nos elementos de travamento (tirante), com valores de tração elevados em relação aos valores obtidos nos demais elementos (Figuras 22 e 24).

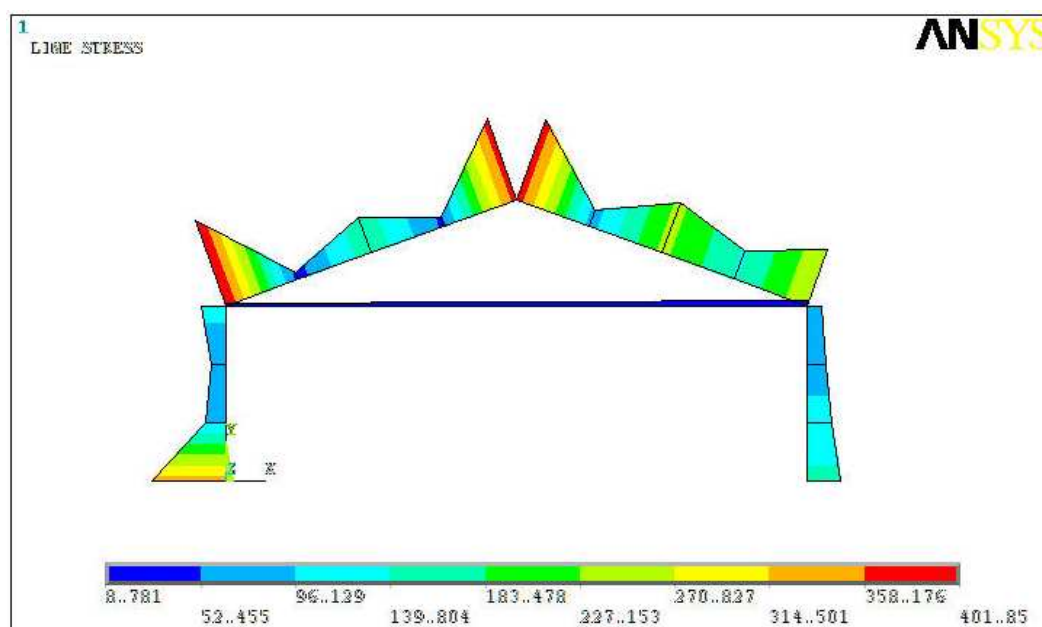


Figura 19. Tensões máximas (MPa) para o modelo 1 B de duas águas na situação de vento com $C_{pi} = +0,2$.

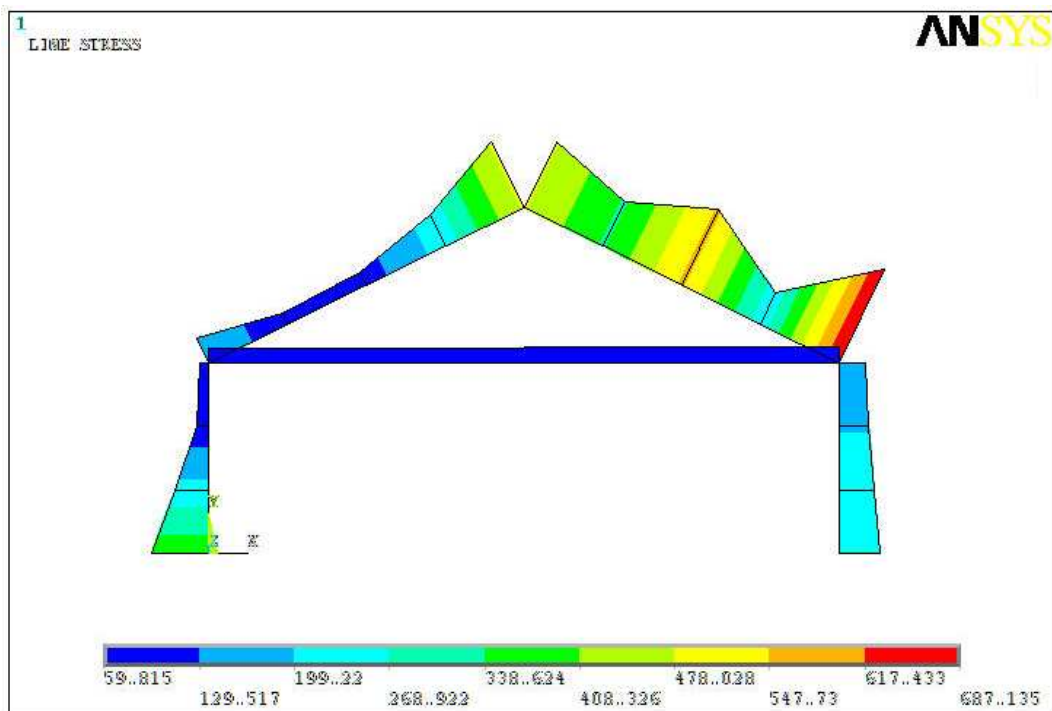


Figura 20. Tensões máximas (MPa) para o modelo 2 A de duas águas na situação de vento com $C_{pi} = -0,4$.

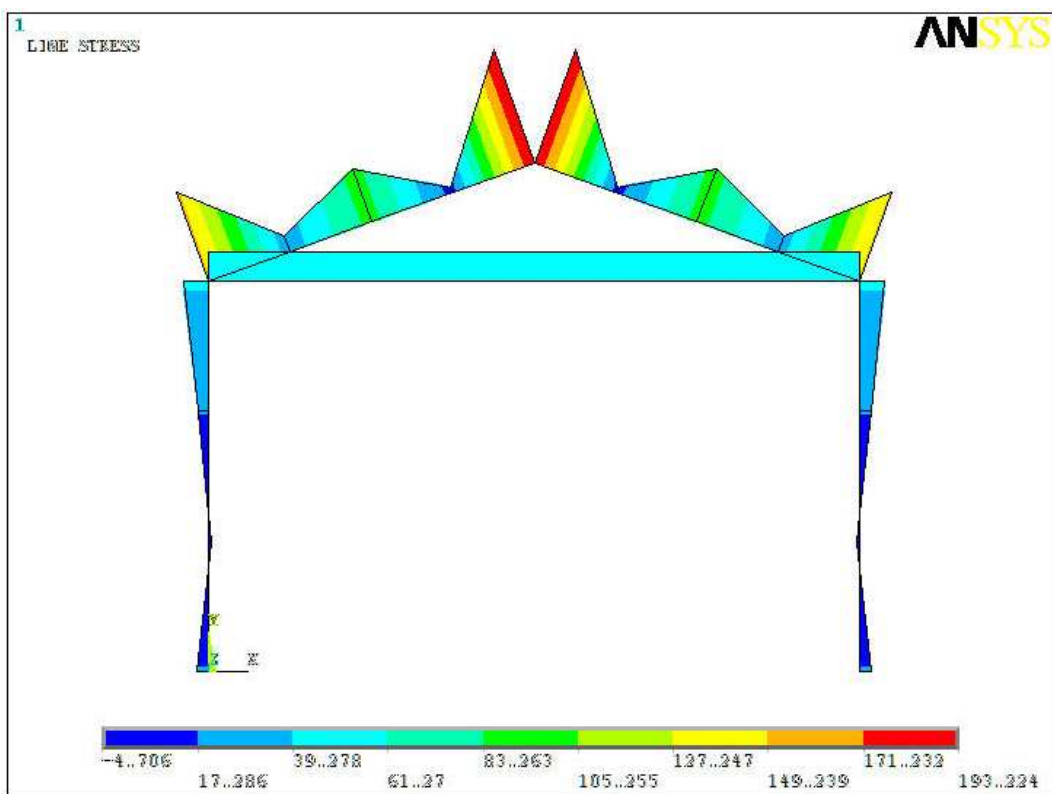


Figura 21. Tensões máximas (MPa) para o modelo 3 A de duas águas sob ação da sobrecarga.

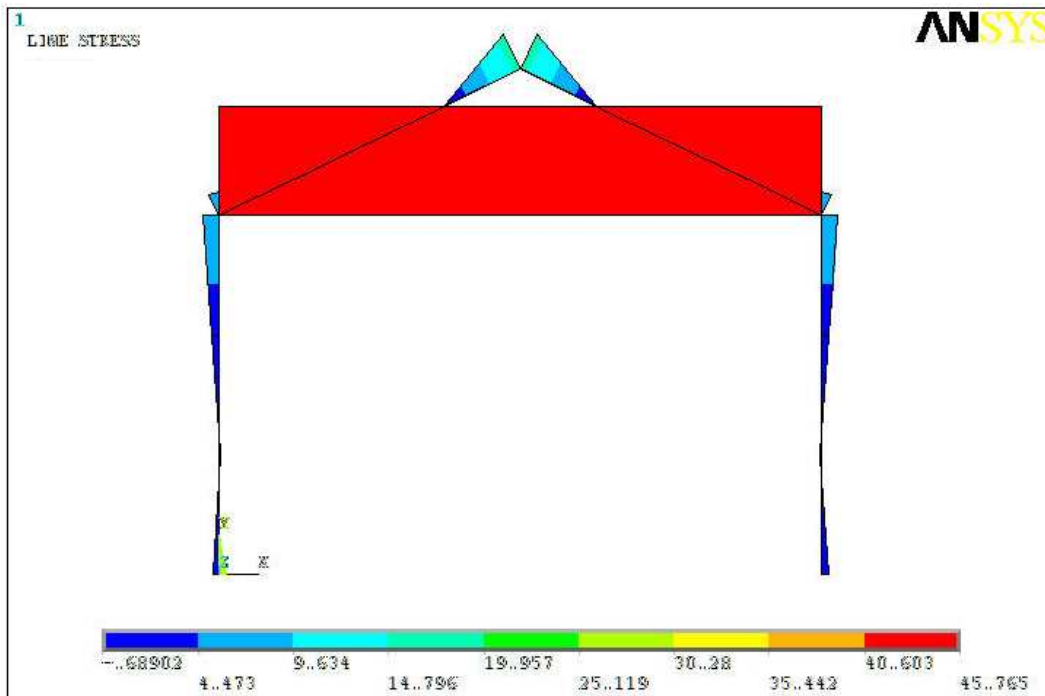


Figura 22. Tensões máximas (MPa) para o modelo 4 B de duas águas sob ação das cargas permanentes.

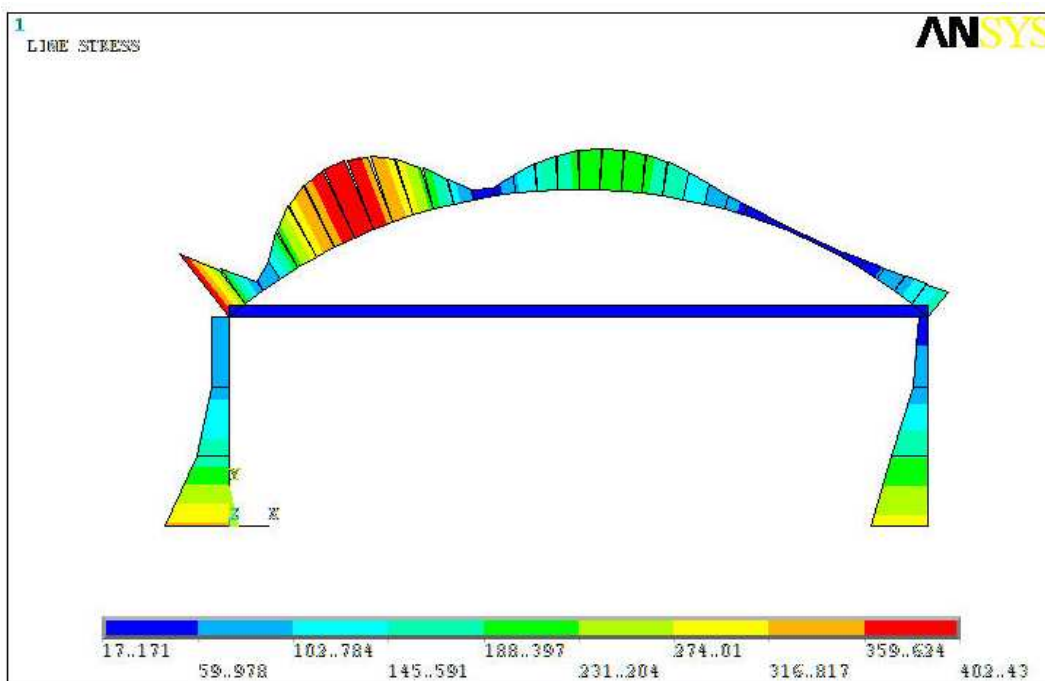


Figura 23. Tensões máximas (MPa) para o modelo 1 A em arco na situação de vento com $C_{pi} = +0,2$.

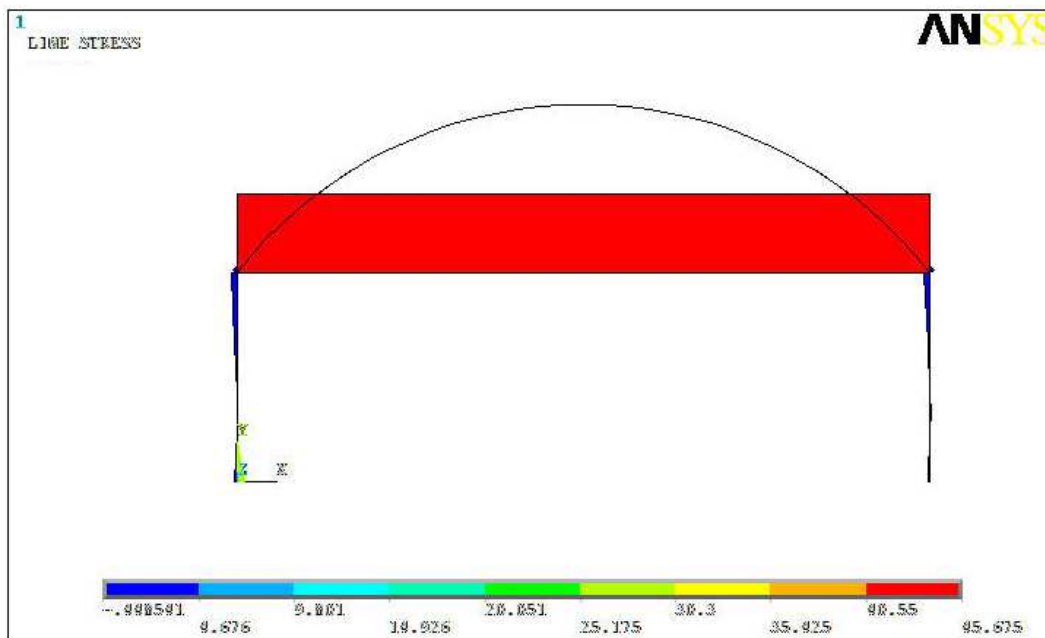


Figura 24. Tensões máximas (MPa) para o modelo 2 B em arco sob ação das cargas permanentes.

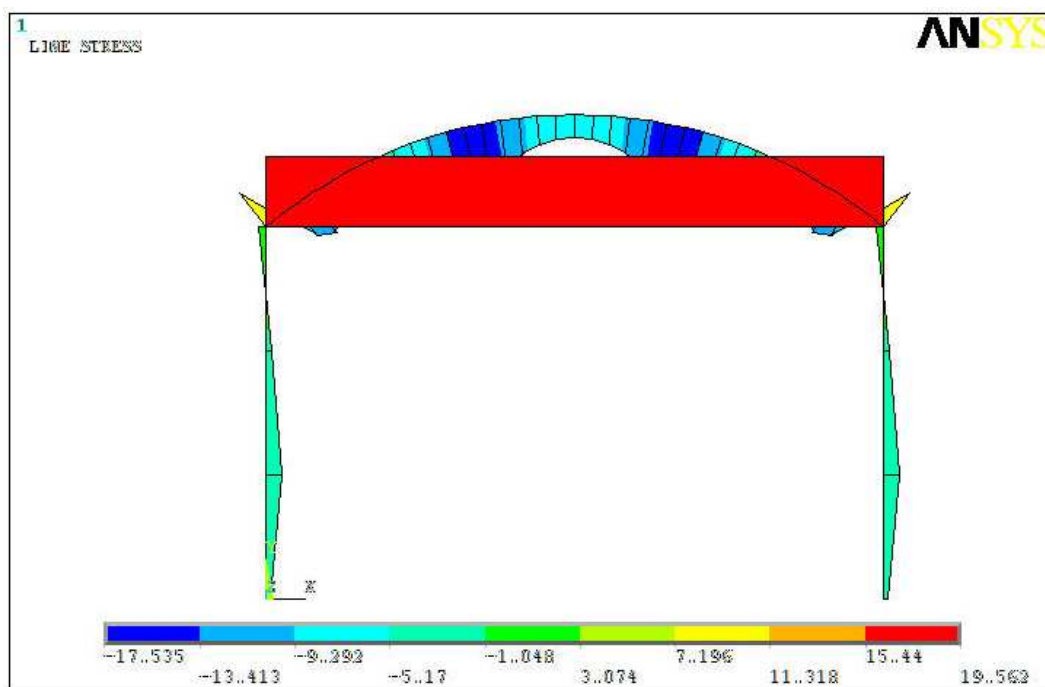


Figura 25. Tensões máximas (MPa) para o modelo 3 B em arco sob ação da sobrecarga.

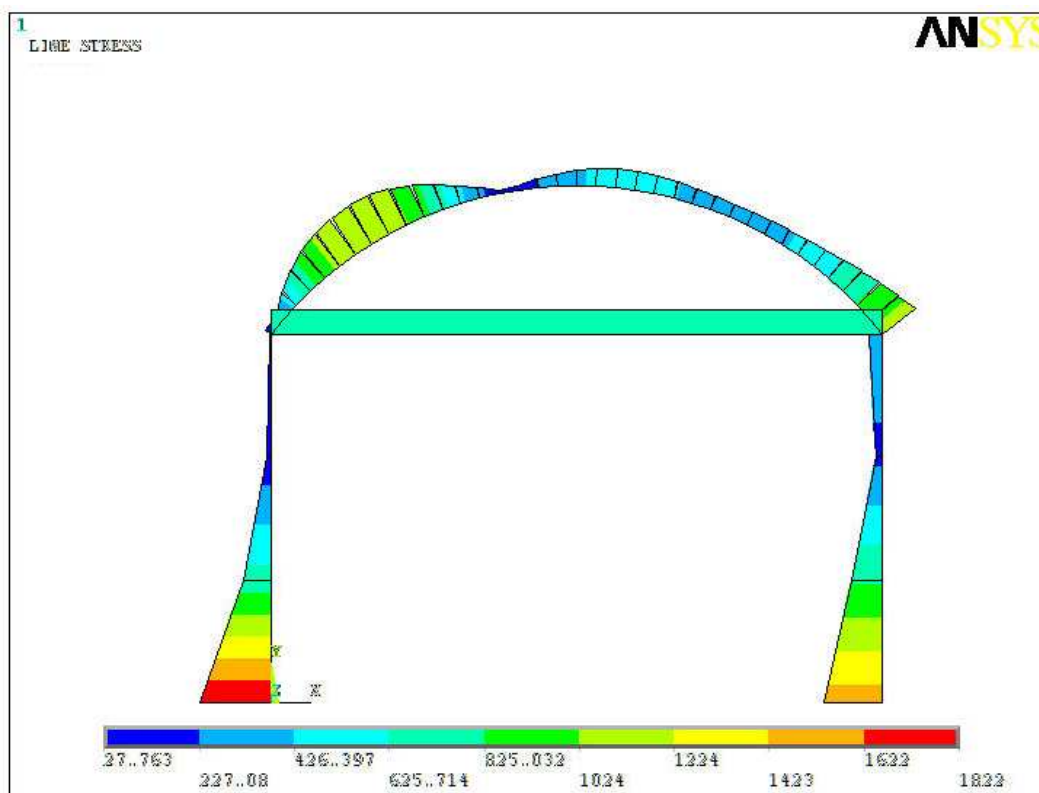


Figura 26. Tensões máximas (MPa) para o modelo 4 B em arco na situação de $C_{pi} = -0,4$.

Esclarece-se que na presente pesquisa não se buscou tratar das particularidades de cada projeto, mas avaliar os efeitos decorrentes da forma da estrutura, pelos quais se possam ter indicativos das formas com melhores desempenhos estruturais, no que se refere às menores solicitações de tensões e, cujas formas sejam mais apropriadas para o conforto ambiental. Conforme a norma ABNT - NBR 16032 (2012) nos projetos das estufas classe B devem ser feitas as verificações pelos Estados Limites Últimos, conforme realizadas neste estudo.

Como parte da verificação da segurança da estrutura considera-se que as tensões solicitantes não devem superar os valores da resistência de escoamento de cálculo (f_{yk}/γ_a). Em ambas as formas de estufas agrícolas, para a grande maioria das combinações, os valores registrados de tensões máximas foram superiores ao valor limite de tensão do aço ASTM A36 de 227,3 MPa, obtida pela razão entre a tensão de escoamento característica ($f_{yk} = 250$ MPa) pelo coeficiente de ponderação γ_a . Ressalta-se novamente que os valores máximos analisados são nodais obtidos para o elemento mais solicitado de cada zona do pórtico.

Pode-se afirmar que os perfis aplicados não atenderam em sua plenitude a tensão limite de cálculo para o material utilizado. Para que isto ocorra torna-se necessário o emprego de perfis mais robustos e/ou gerar modificações no sistema estrutural que possibilitem reduzir os esforços solicitantes nos elementos estruturais.

Resultados concernentes aos obtidos nesta pesquisa foram apresentados por Vázquez *et al.* (2011) e Carreño *et al.* (2011) que ao analisarem estufas modelos em arco obtiveram valores de tensões superiores a 300% da tensão limite do material aplicado.

4.1 ESTUFAS DE DUAS ÁGUAS

4.1.1 Análise das tensões máximas de cálculo

As Figuras 27 a 34 ilustram as razões em porcentagem das tensões máximas de cálculo de cada modelo em função dos modelos 1 A e 1 B de cada forma estrutural nas zonas das paredes e telhados dos pórticos de duas águas. Ressalta-se que os valores analisados são de pontos críticos em cada elemento, ou seja, cada valor refere-se ao nó que apresentou o maior valor de tensão máxima da correspondente zona, conforme organizados para cada combinação (Tabelas 6 a 13).

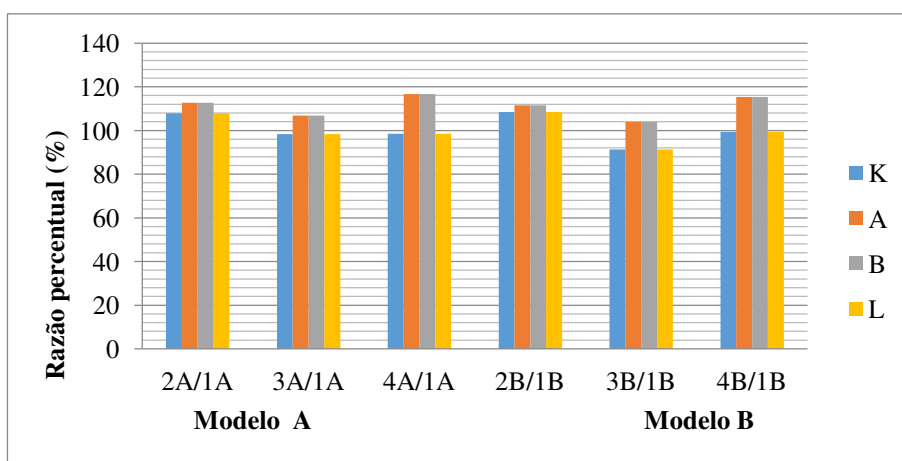


Figura 27. Razão entre tensões máximas para 1ª combinação da forma de duas águas.

Tabela 6. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas (MPa) – 1ª Combinação.

ZONA	Modelo							
	1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	68,24	107,41	73,56	116,47	67,09	98,06	67,17	106,64
A	285,10	453,61	321,11	505,76	304,74	471,31	332,34	523,23
B	285,10	453,61	321,11	505,76	304,74	471,31	332,34	523,23
L	68,24	107,40	73,56	116,47	67,09	98,06	67,17	106,64

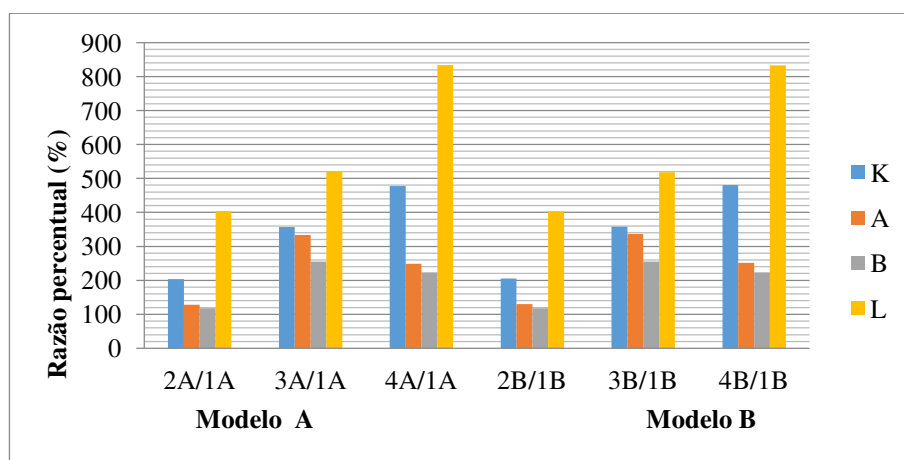


Figura 28. Razão percentual de tensões máximas para 2ª combinação da forma de duas águas.

Tabela 7. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas (MPa) – 2ª Combinação.

ZONA	Modelo							
	1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	304,40	471,51	620,45	967,57	1086,25	1687,62	1453,85	2265,31
A	377,62	577,82	483,72	751,68	1259,54	1941,62	939,00	1452,41
B	358,73	556,50	421,00	656,45	915,44	1423,05	801,43	1241,58
L	136,83	213,58	552,99	860,43	710,94	1106,70	1141,26	1778,81

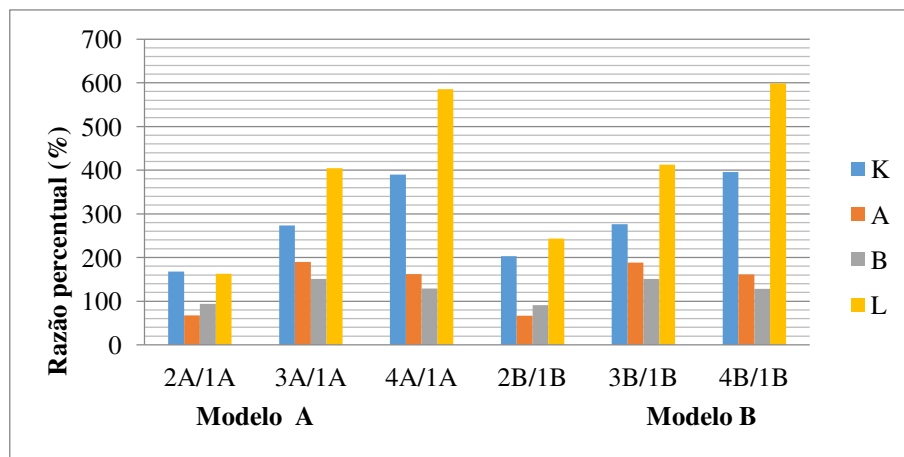


Figura 29. Razão percentual de tensões máximas para 3ª combinação da forma de duas águas.

Tabela 8. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas (MPa) – 3ª Combinação.

ZONA	Modelo							
	1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	321,27	491,16	538,17	995,16	878,49	1357,92	1251,31	1944,01
A	1034,03	1604,53	698,24	1073,78	1960,30	3020,46	1676,77	2591,73
B	1033,85	1604,25	973,24	1455,43	1560,93	2425,31	1331,23	2061,38
L	234,03	356,42	380,31	866,66	945,75	1470,34	1370,82	2133,99

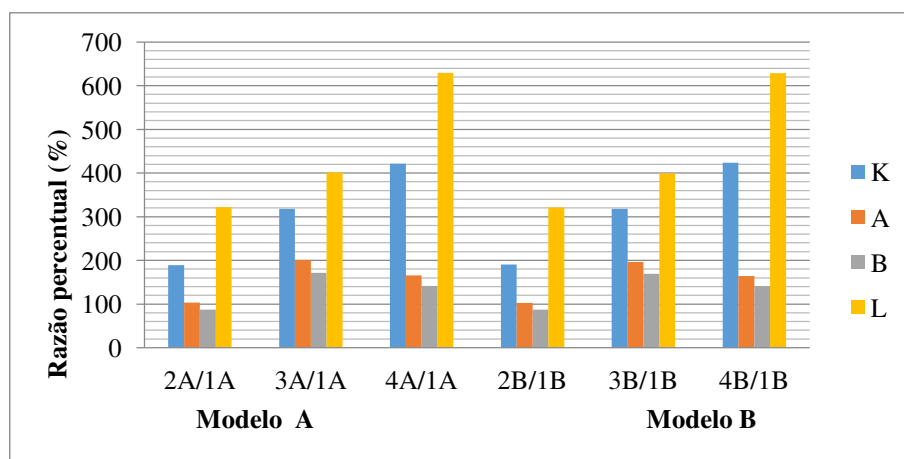


Figura 30. Razão percentual de tensões máximas para 4ª combinação da forma de duas águas.

Tabela 9. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas (MPa) – 4ª Combinação.

ZONA	Modelo							
	1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	213,83	331,79	404,96	632,66	679,94	1054,98	900,56	1405,40
A	492,06	775,47	507,68	795,44	987,14	1524,77	816,21	1271,13
B	491,96	775,34	429,20	674,28	845,06	1312,06	697,48	1090,05
L	113,28	177,03	364,48	568,37	454,75	706,43	713,01	1113,50

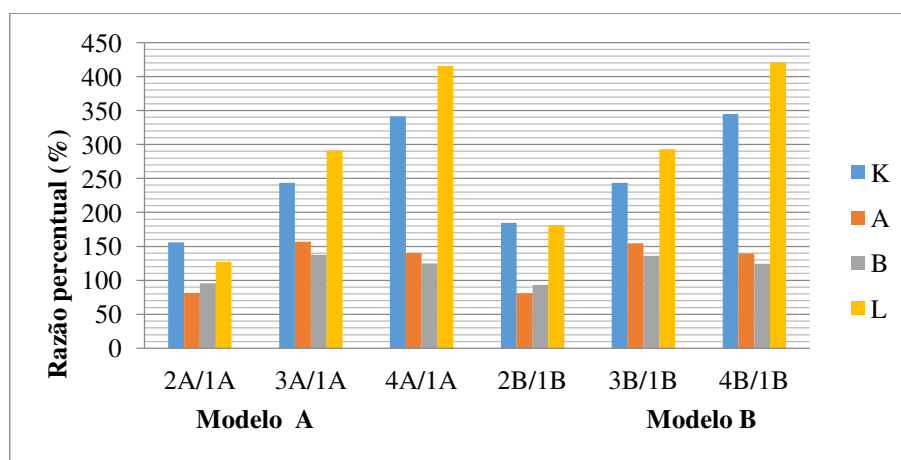


Figura 31. Razão percentual de tensões máximas para 5ª combinação da forma de duas águas.

Tabela 10. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas (MPa) – 5ª Combinação.

ZONA	Modelo							
	1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	228,18	351,91	355,59	649,21	555,29	857,16	779,04	1212,62
A	897,14	1404,16	731,22	1137,28	1407,60	2172,07	1258,88	1954,73
B	897,03	1403,99	859,18	1307,44	1232,35	1913,42	1121,67	1746,44
L	204,76	315,35	260,87	572,11	595,64	924,61	850,74	1326,60

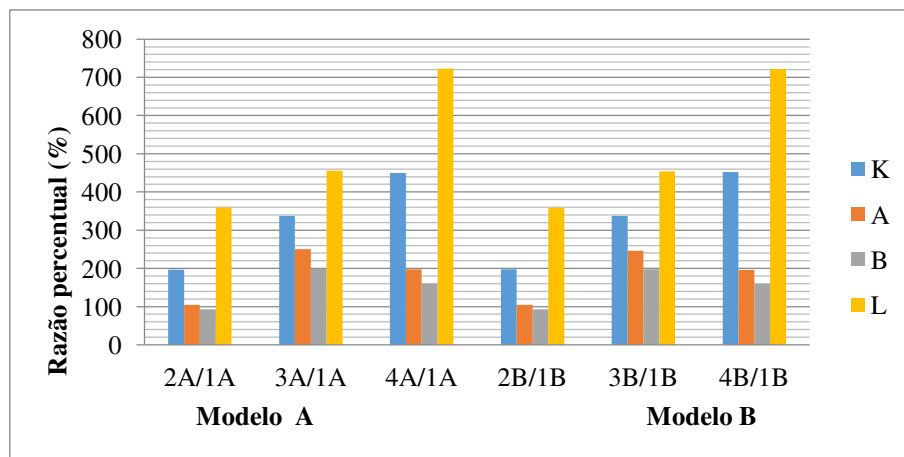


Figura 32. Razão percentual de tensões máximas para 6ª combinação da forma de duas águas.

Tabela 11. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas (MPa) – 6ª Combinação.

ZONA	Modelo							
	1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	328,43	509,19	645,69	1007,84	1108,06	1720,36	1475,71	2301,08
A	575,82	903,37	603,98	944,34	1441,89	2225,57	1138,30	1768,02
B	575,65	903,16	536,35	841,62	1147,31	1782,66	920,93	1433,17
L	160,86	251,27	578,23	900,70	732,75	1139,44	1163,12	1814,58

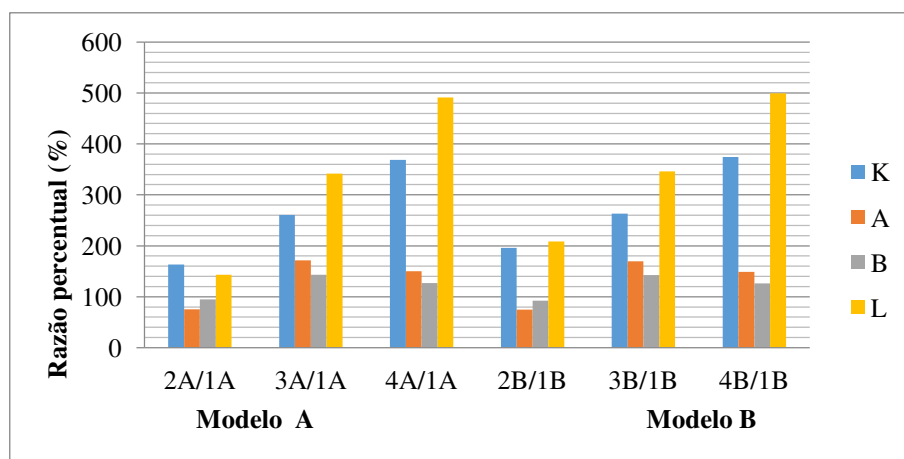


Figura 33. Razão percentual de tensões máximas para 7ª combinação da forma de duas águas.

Tabela 12. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas (MPa) – 7ª Combinação.

ZONA	Modelo							
	1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	345,30	528,85	563,41	1035,44	900,30	1390,66	1273,17	1979,78
A	1250,96	1951,19	943,35	1461,39	2142,65	3304,41	1876,07	2907,34
B	1250,77	1950,91	1189,83	1797,67	1792,79	2784,92	1584,56	2461,80
L	283,42	434,47	405,55	906,93	967,56	1503,08	1392,67	2169,76

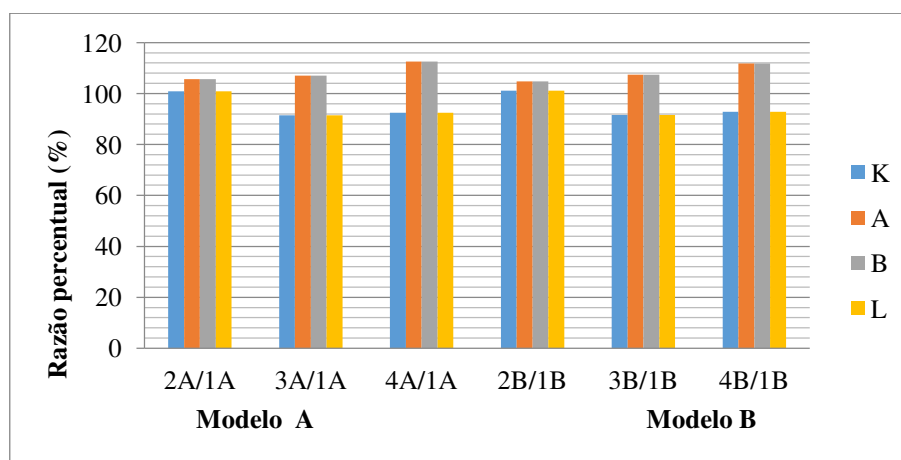


Figura 34. Razão percentual de tensões máximas para 8ª combinação da forma de duas águas.

Tabela 13. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural de duas águas (MPa) – 8ª Combinação.

ZONA	Modelo							
	1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	6,50	9,84	6,55	9,94	5,94	9,00	6,01	9,13
A	13,92	20,29	14,71	21,24	14,91	21,79	15,68	22,70
B	13,92	20,29	14,71	21,24	14,91	21,79	15,68	22,70
L	6,50	9,84	6,55	9,94	5,94	9,00	6,01	9,13

Nas relações que apresentaram a razão percentual abaixo de 100% caracterizou-se para a referida zona o alívio de tensões, correspondendo dessa forma a valores de tensões menores de um modelo para com o modelo de referência, ou seja, o modelo 1 A ou 1 B. Destaca-se que na maioria das combinações isto ocorreu nas zonas de telhado, exceto nas combinações 1 e 8.

Dentro da mesma relação h/s , destaca-se para a forma estrutural em duas águas a ocorrência, para a maioria das combinações, de um alívio nas zonas de telhado quando se eleva a inclinação do telhado de 20° para 26° . Já, nas zonas correspondentes às colunas, para todas as combinações, houve aumento nas tensões máximas.

As zonas de telhado são os locais que para a forma duas águas apresentaram maiores valores na maioria das combinações das tensões inclusive na combinação de referência (8ª Combinação – Tabela 13).

Na primeira combinação, para os elementos de coluna resultaram valores tensões inferiores ao de tensão limite do aço. No entanto, para esta mesma combinação, nas zonas de telhados os resultados de tensão máxima foram cerca de 75% superiores à tensão limite de escoamento.

Para as demais combinações, exceto a oitava (Tabela 13), os resultados de tensão máxima nas colunas foram, em média, de 306% superiores à tensão limite do material utilizado, para a face de barlavento e 250% superiores para a face sotavento.

Ao se alterar a inclinação do telhado de 20° para 26° , na relação $h/s=0,3$, ou seja, do modelo 1 para o modelo 2, o ganho em área e o volume proporcional para o comprimento de 18 metros (idêntico para todos os modelos) foi de 7,5%, e com esta mudança houve o aumento em média de 46% das tensões máximas na zona K e, de 57% na zona L. Nas zonas de telhado, ocorreu o alívio de tensões em média de 13% para a zona A e de 5% para a zona B.

Para a relação $h/s=0,6$ ao se elevar a inclinação do telhado de 20° para 26° (modelo 3 para o modelo 4) ocorreu o incremento de 4,3% em média na área e no volume. Esta mudança pode ser não significativa no caso de estufas de um vão, mas em situações de estufas comerciais de múltiplos vãos, esta variação se torna mais significativa. Nesta mudança ocorreu o acréscimo de em média 27% das tensões máximas na zona K e 34% na zona L, enquanto que no telhado há redução das tensões em 20% na zona A e de 17% em média na zona B.

A alteração da relação h/s de 0,3 para 0,6, mantendo-se a inclinação do telhado (do modelo 1 para o modelo 3 ou do modelo 2 para o modelo 4), há um aumento superior a 40% na área e no volume da estufa. Este ganho torna-se favorável ao ambiente, mesmo em

estufas de único vão. Nesta situação, obteve-se um incremento de em média 60% das tensões máximas na zona K, 66% na zona L, 49% na zona A e de 37% na zona B.

Nos modelos 1A e 1B, para a forma de duas águas, observou-se pelos resultados das Tabelas A1 e A2 que houve prevalência de compressão no elemento de travamento (tirante) quando em situação de vento de sucção interna. Dessa forma, por não estar submetido à tração, fica descaracterizada a presença deste elemento.

Para tanto, também se realizaram as simulações para os modelos 1A e 1B sem a presença do elemento de travamento, cujas razões das tensões obtidas para essas situações (sem e com travamento – sem/com) são apresentadas nas Figuras 35 a 42. Os resultados dessas simulações podem ser visualizados nas Tabelas A9 e A10.

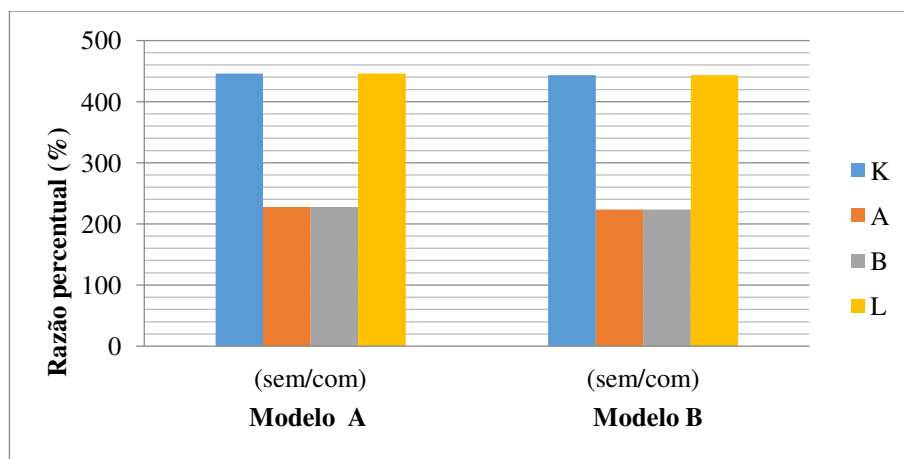


Figura 35. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 1ª Combinação da forma de duas águas.

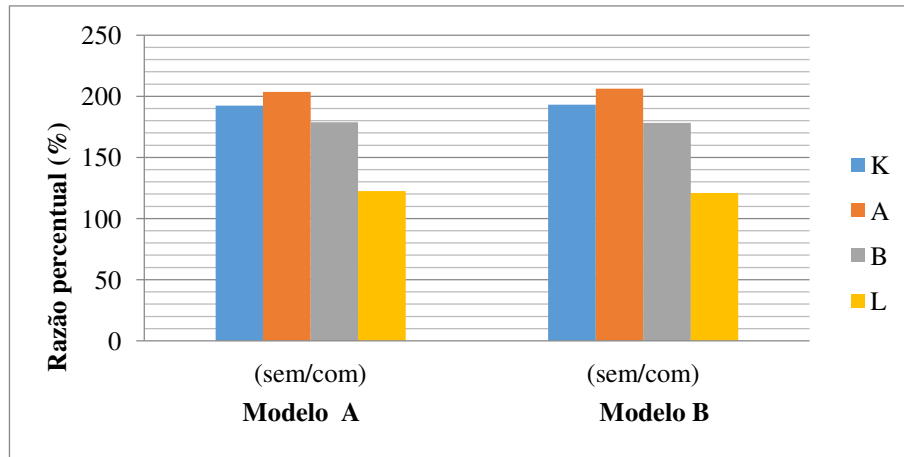


Figura 36. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 2ª Combinação da forma de duas águas.

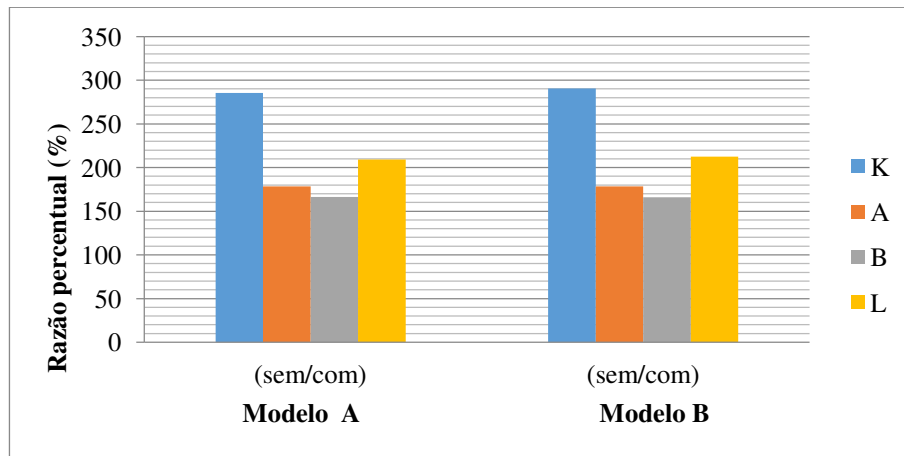


Figura 37. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 3ª Combinação da forma de duas águas.

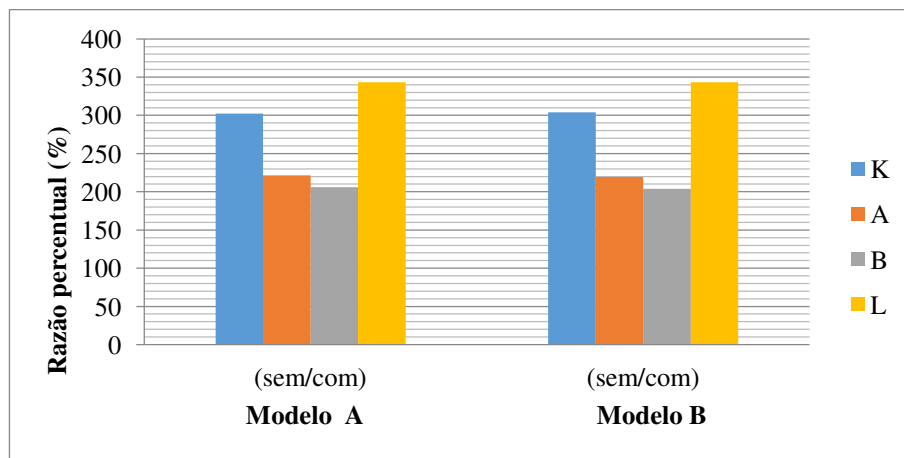


Figura 38. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 4ª Combinação da forma de duas águas.

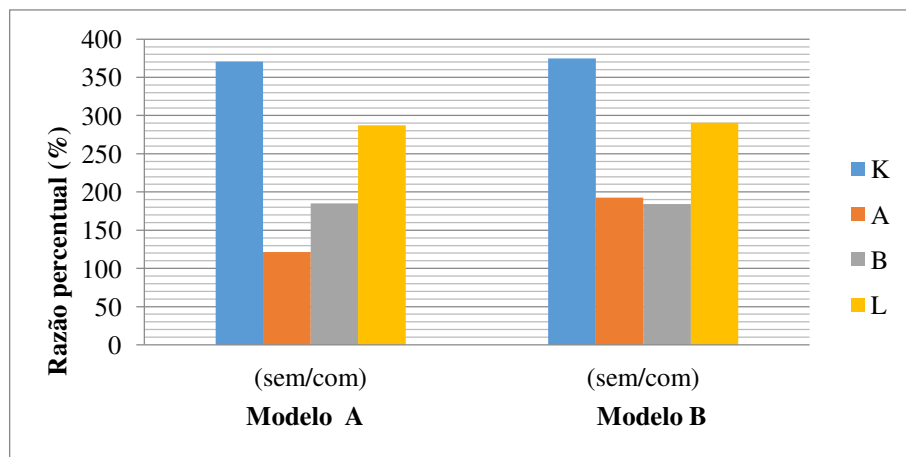


Figura 39. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 5ª Combinação da forma de duas águas.

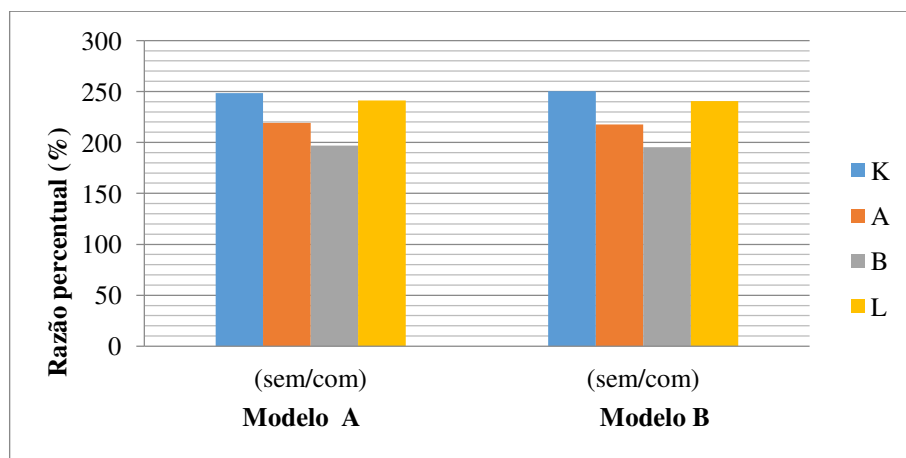


Figura 40. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 6ª Combinação da forma de duas águas.

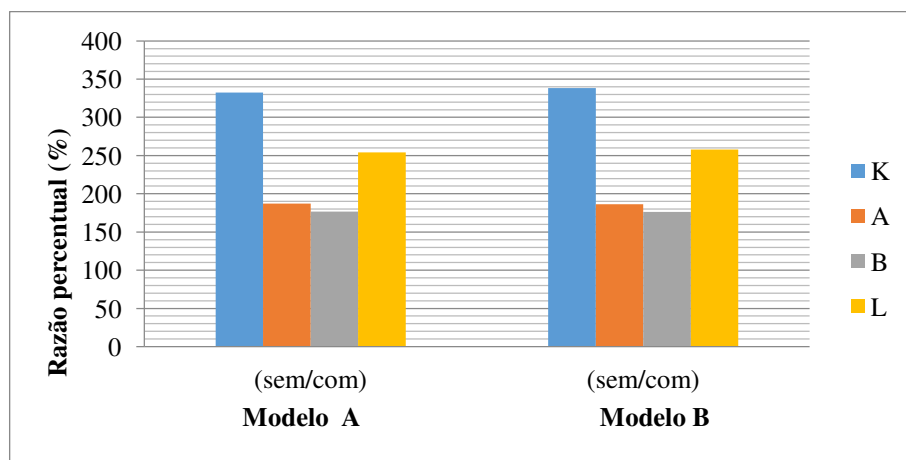


Figura 41. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 7ª Combinação da forma de duas águas.

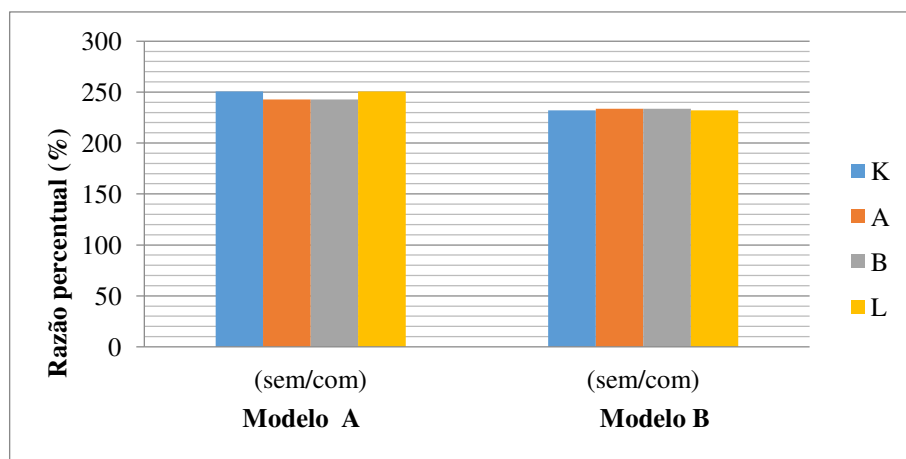


Figura 42. Razão percentual das tensões máximas dos modelos 1A e 1B entre simulação sem e com o elemento de travamento para 8ª Combinação da forma de duas águas.

Analisando as Figuras 35 a 42 que comparam os modelos 1A e 1B de estufas com e sem travamento, observa-se que em todas as combinações nas zonas de parede e de telhado as tensões máximas foram superiores nos modelos sem travamento.

Comparando-se a razão percentual de superioridade das tensões do modelo sem travamento para com o modelo que contém o travamento, em ambos os modelos resultaram diferenças a cerca de 300% para a zona K, 205% para a zona A, 195% para a zona B e 268% para a zona L. Sendo assim, os valores representam tensões muito maiores para os modelos sem o travamento, necessitando-se de elementos estruturais mais rígidos, como, por exemplo, perfis com seções transversais maiores, que garantam a segurança estrutural destes modelos.

4.1.2 Análise do conforto ambiental

Do balanço de energia, os benefícios de conforto ambiental decorrentes do ganho de volume, dado o aumento da altura da estufa, são evidenciados na Figura 43. Têm-se os valores de temperatura interna entre os modelos bem próximos uns aos outros, principalmente os que pertencem a mesma relação h/s , e também por se tratarem das mesmas condições de contorno e de modelos que contenham um módulo. Os valores para o balanço de energia e de massa podem ser visualizados no Apêndice (Tabelas A19, A20 e A21).

O ponto de destaque é a diminuição da temperatura, na ordem de 3°C no geral (com modelos contendo a diferença de até 4°C), quando se alteram os modelos de $h/s=0,3$ para $h/s=0,6$, na condição da estrutura no verão fechada (EVF). Para a condição de inverno fechada (EIF), as estufas com volumes maiores se mostraram mais capazes de reter o calor em condições mais frias a cerca de 1°C.

Como as condições de contorno para os modelos foram semelhantes, e não proporcionais, no balanço de energia para as condições abertas no verão (EVA) e no inverno (EIA), os valores de temperaturas internas foram próximos uns aos outros, se assemelhando na maior parte das simulações. Estas temperaturas obtidas foram de 29,9°C para o verão e 12,8°C para o inverno.

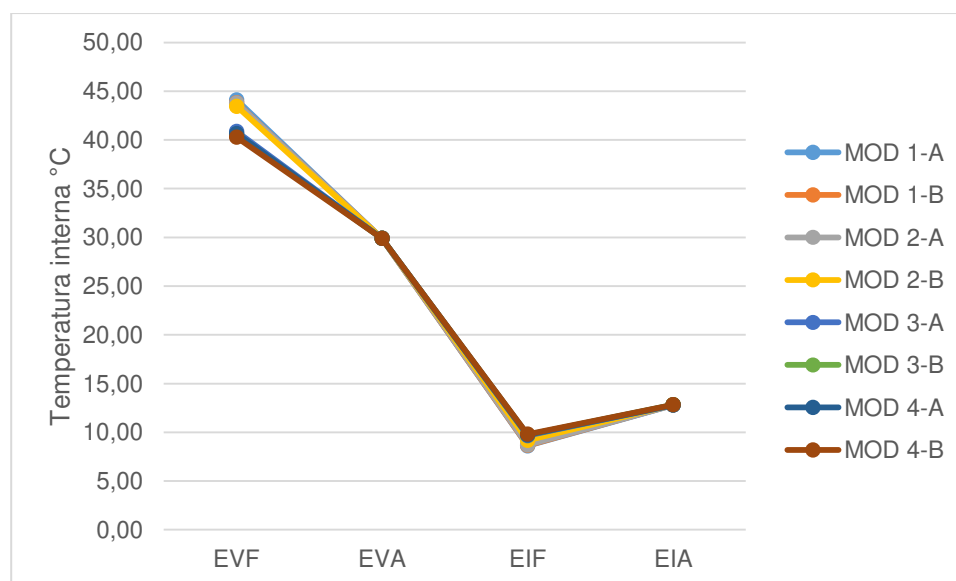


Figura 43. Temperaturas internas do balanço de energia das estufas de duas águas.

O balanço de massa, assim como o balanço de energia, resultou em valores com diferenciais significativos para os modelos analisados quando há a mudança entre a relação h/s (do modelo 1 para o modelo 3 e do modelo 2 para o modelo 4), chegando a cerca de 3% de ganho na umidade interna, tanto para a condição de verão fechada quanto para condição de inverno fechada, conforme a Figura 44.

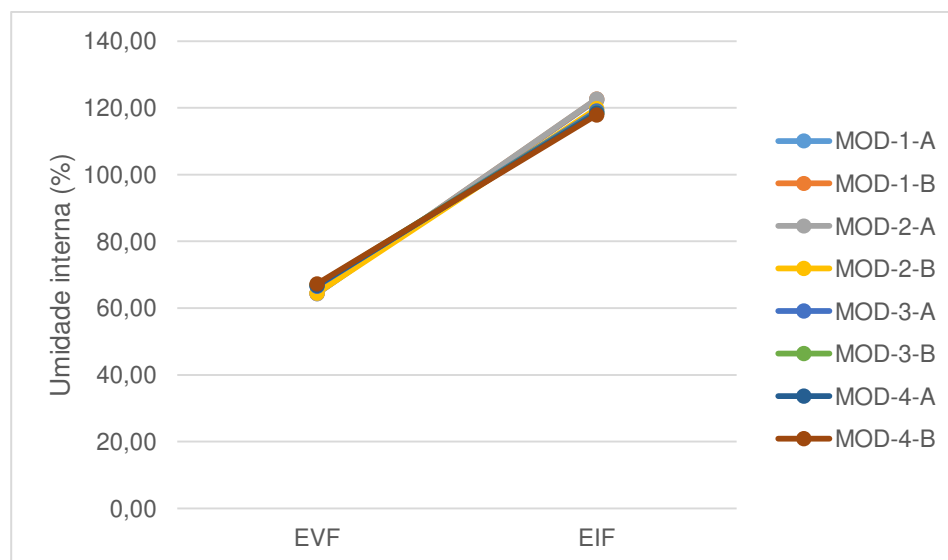


Figura 44. Umidade interna do balanço de massa para estufas duas águas.

Na hipótese de determinação da umidade interna nas condições de estrutura aberta, devido às condições de contorno, os valores resultariam os mesmos ou semelhantes, principalmente pelo método utilizado ter como referência o fluxo mássico devido à evapotranspiração das culturas. Portanto, este caso não foi verificado.

Os valores de umidade relativa interna acima de 100% condizem a circunstância de supersaturação, nas quais representam que a pressão de saturação externa é maior do que a interna, gerando assim uma situação não desejada para o cultivo, pois este é um dos fenômenos responsáveis pela condensação de vapor d'água no interior das estufas.

4.2 ESTUFAS EM ARCO

4.2.1 Análise das tensões máximas de cálculo

Para o caso das estufas com formas em arco, a razão percentual das tensões máximas para cada modelo em relação aos modelos 1 A e 1 B para as diferentes formas estruturais e combinações das tensões de cálculo, pode ser vista nas Figuras 45 – 52. Os valores nodais de tensão máxima foram organizados nas Tabelas 14 a 21.

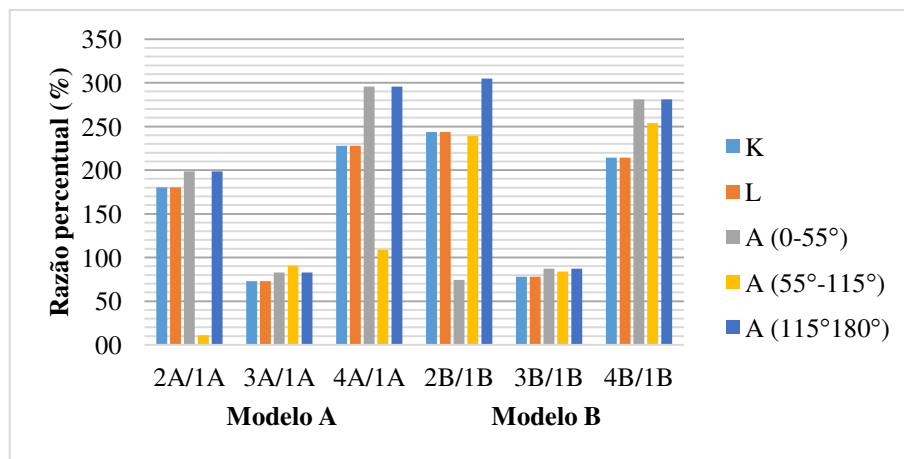


Figura 45. Razão percentual de tensões máximas para 1ª combinação da forma em arco.

Tabela 14. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco (MPa) – 1ª Combinação.

ZONA	Ângulo	Modelo							
		1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	-	5,23	9,04	9,44	22,03	3,81	7,04	11,93	19,37
L	-	5,23	9,04	9,44	22,03	3,81	7,04	11,93	19,37
A	0-55°	15,74	26,16	31,267	19,41	13,01	22,76	46,55	73,48
	55° - 115°	-13,30	-11,09	-1,44	26,53	-12,05	-9,30	14,46	28,16
	115° - 180°	15,74	26,16	31,26	79,74	13,01	22,76	46,55	73,48

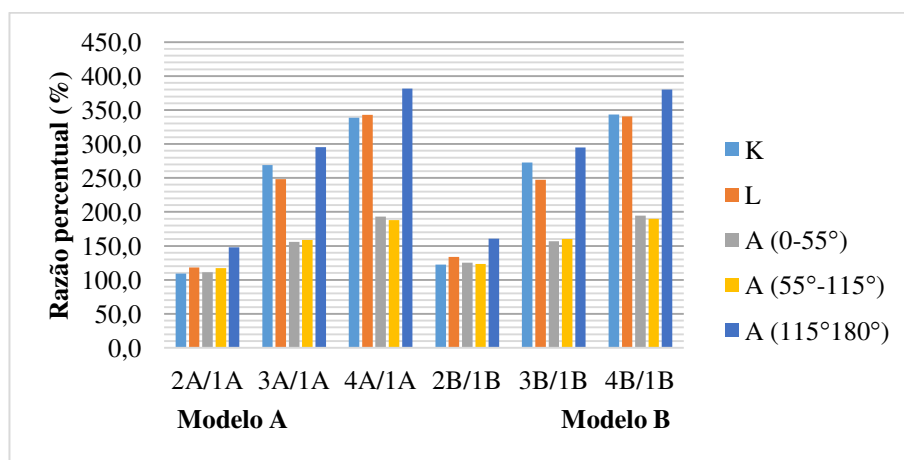


Figura 46. Razão percentual de tensões máximas para 2ª combinação da forma em arco.

Tabela 15. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco (MPa) – 2ª Combinação.

ZONA	Ângulo	Modelo							
		1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	-	402,79	618,08	440,53	755,84	1082,67	1685,15	1365,09	2122,25
L	-	486,31	762,91	576,06	1018,96	1207,34	1884,93	1668,44	2599,37
	0-55°	578,04	885,83	642,98	1110,84	902,20	1390,49	1117,51	1724,38
A	55° - 115°	342,78	521,27	402,67	643,40	544,15	835,58	644,13	989,44
	115° - 180°	228,90	356,63	338,17	572,24	675,68	1050,79	873,23	1355,64

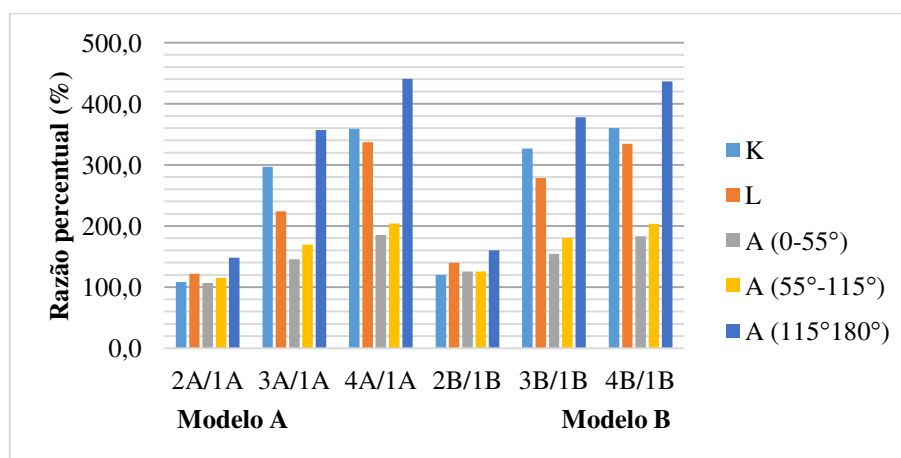


Figura 47. Razão percentual de tensões máximas para 3ª combinação da forma em arco.

Tabela 16. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco (MPa) – 3ª Combinação.

ZONA	Ângulo	Modelo							
		1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	-	455,64	708,83	493,38	849,93	1351,91	2315,85	1636,80	2551,49
L	-	406,41	638,35	496,17	891,05	911,06	1777,83	1369,75	2136,25
	0-55°	565,08	886,62	604,07	1111,54	821,90	1368,96	1045,69	1622,60
A	55° - 115°	303,09	470,42	348,98	591,24	513,60	849,23	618,16	958,56
	115° - 180°	226,56	357,42	335,83	572,94	808,79	1350,62	998,53	1559,91

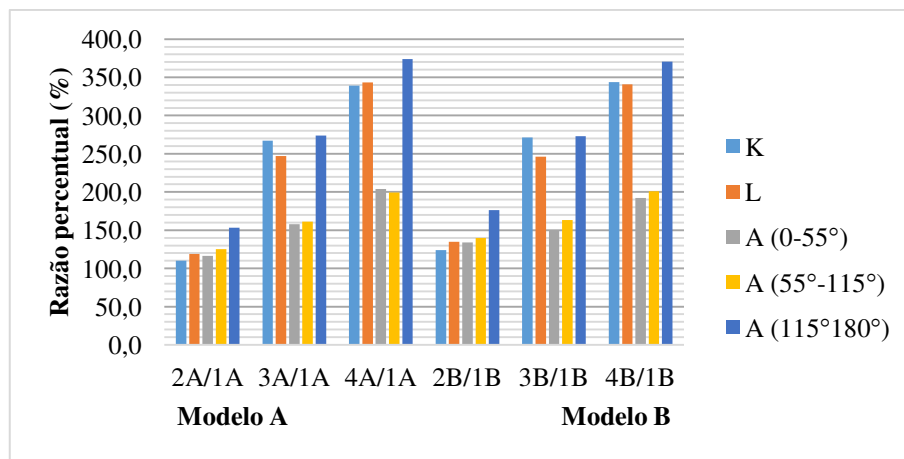


Figura 48. Razão percentual de tensões máximas para 4ª combinação da forma em arco.

Tabela 17. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco (MPa) – 4ª Combinação.

ZONA	Ângulo	Modelo							
		1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	-	242,57	372,38	267,28	461,31	648,16	1010,00	822,57	1279,67
L	-	292,69	459,28	348,60	619,18	722,96	1129,87	1004,58	1565,94
A	0-55°	338,14	555,89	394,10	743,80	533,59	828,66	689,51	1067,24
	55° - 115°	191,87	294,11	240,13	411,25	309,54	480,69	382,19	590,70
	115° - 180°	152,07	238,37	233,16	420,64	416,62	650,24	568,30	883,31

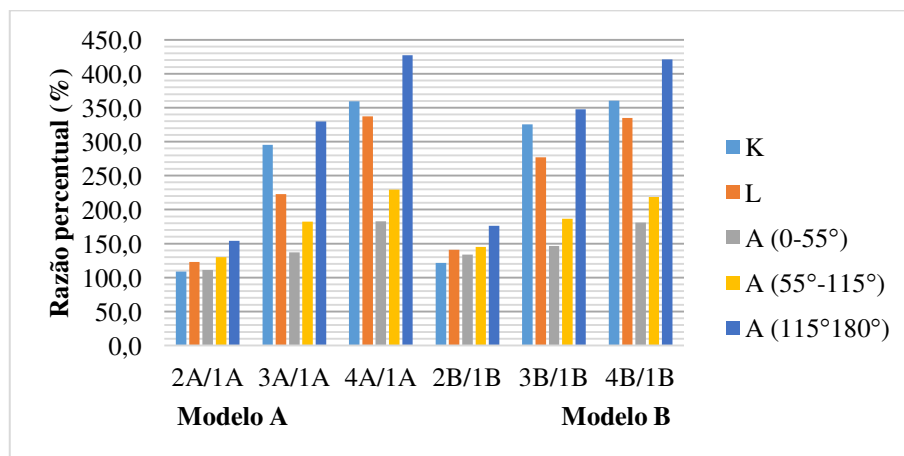


Figura 49. Razão percentual de tensões máximas para 5ª combinação da forma em arco.

Tabela 18. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco (MPa) – 5ª Combinação.

ZONA	Ângulo	Modelo							
		1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	-	274,28	426,83	298,99	517,77	809,700	1388,42	985,59	1537,22
L	-	244,75	384,54	300,66	542,44	545,19	1065,61	825,36	1288,07
	0-55°	353,78	556,37	392,70	744,22	485,38	815,74	646,42	1006,25
A	55° - 115°	159,66	261,91	207,92	379,95	291,21	488,88	366,61	572,17
	115° - 180°	150,67	238,85	231,75	421,06	496,49	830,13	643,48	1005,88

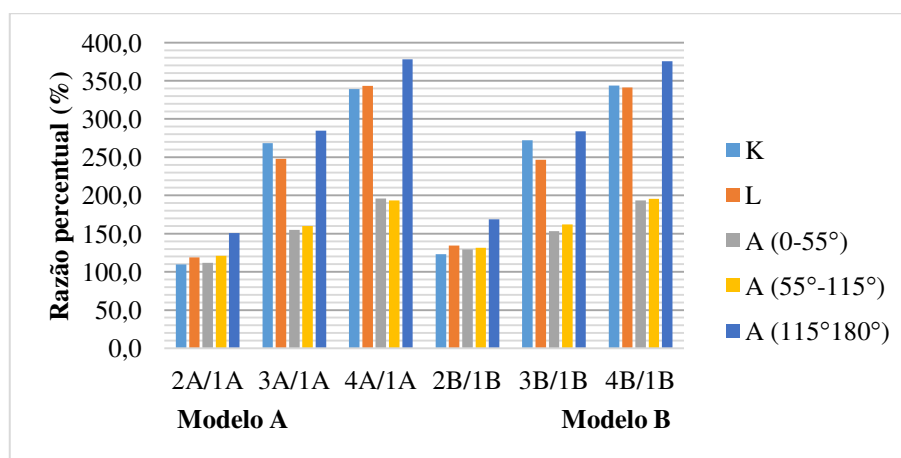


Figura 50. Razão percentual de tensões máximas para 6ª combinação da forma em arco.

Tabela 19. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco (MPa) – 6ª Combinação.

ZONA	Ângulo	Modelo							
		1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	-	403,15	618,68	442,54	761,52	1081,29	1683,84	1367,70	2126,91
L	-	486,67	763,51	578,07	1024,64	1205,96	1883,62	1671,05	2604,03
	0-55°	578,67	904,40	646,63	1171,38	896,14	1386,08	1132,82	1750,60
A	55° - 115°	331,39	505,13	401,65	663,60	530,70	819,15	640,74	987,09
	115° - 180°	240,15	375,20	361,84	632,77	683,69	1065,01	907,55	1409,69

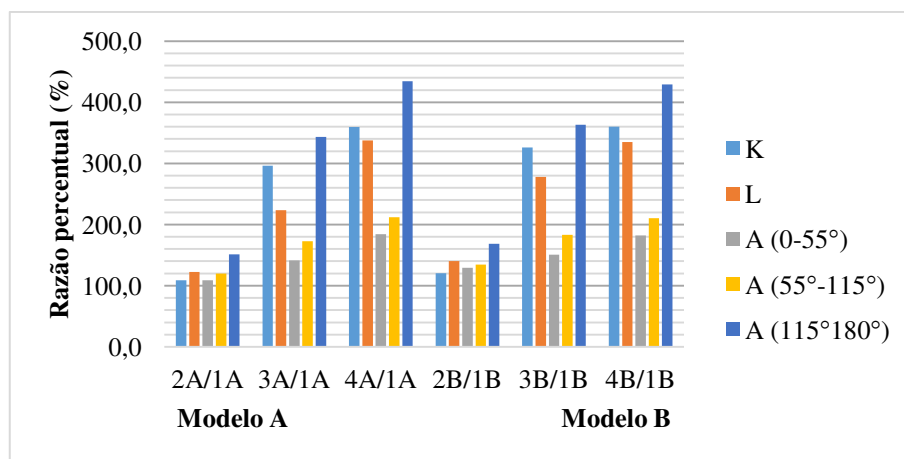


Figura 51. Razão percentual de tensões máximas para 7ª combinação da forma em arco.

Tabela 20. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco (MPa) – 7ª Combinação.

ZONA	Ângulo	Modelo							
		1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	-	456,00	709,43	495,39	855,62	1350,52	2314,54	1639,41	2556,15
L	-	406,77	638,96	498,18	896,73	909,67	1776,52	1372,36	2140,91
A	0-55°	576,33	905,20	627,74	1172,08	815,80	1364,55	1061,00	1648,96
	55° - 115°	289,85	454,28	347,96	611,45	500,15	832,80	614,77	956,21
	115° - 180°	237,81	376,00	359,50	633,47	816,81	1364,83	1032,85	1613,97

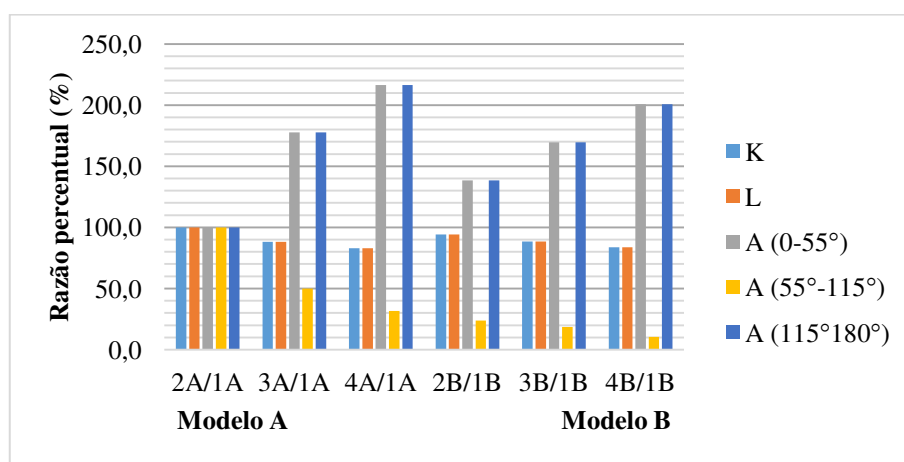


Figura 52. Razão percentual de tensões máximas para 8ª combinação da forma em arco.

Tabela 21. Tensões máximas pontuais para a forma estrutural em arco (MPa) – 8ª Combinação.

ZONA	Ângulo	Modelo							
		1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
K	-	2,97	4,76	2,97	4,49	2,62	4,21	2,46	3,99
L	-	2,97	4,76	2,97	4,49	2,62	4,21	2,46	3,99
	0-55°	1,68	2,94	1,68	4,07	2,99	4,99	3,65	5,91
A	55° - 115°	-0,38	-0,40	-0,38	-0,09	-0,19	-0,07	-0,12	-0,04
	115° - 180°	1,68	2,94	1,68	4,07	2,99	4,99	3,65	5,91

Analogamente a forma de duas águas, nas estruturas em arco resultaram significativos aumentos de tensão de alguns modelos comparados com os modelos de referência 1 A e 1 B. Para a maioria das combinações houve incremento das tensões nas zonas de coluna e telhado.

Na maioria das combinações (exceto na 1ª e na 8ª Combinação) as razões percentuais de tensão foram maiores que 100%. Ou seja, do modelo comparado ao modelo de referência houve incremento de tensão. Nesta mesma análise, pode-se observar que os aumentos na razão percentual de tensão nos casos de comparação entre os modelos 2A/1A e 2B/1B resultaram na ordem de 10% a 20% nas zonas de telhado e de 20% a 50% nas colunas, para a maioria das combinações.

As grandes diferenças nas razões percentuais dos demais modelos se devem principalmente pelo aumento das dimensões das estufas, sendo os valores mais altos decorrentes da comparação entre os modelos 4A/1A e 4B/1B, tanto na forma em arco quanto na forma de duas águas.

As estruturas em arco apresentaram em todas as combinações um aumento das tensões nas zonas de telhado quando foram alteradas h_r (altura do telhado) e mantida a relação h/s . Nas zonas de colunas, quando se alterou altura do telhado, em todas as combinações houve aumento nos valores da tensão máxima, exceto na combinação de referência (8ª combinação), que resultou em alívio nas colunas para a relação de $h/s=0,6$.

Diante da maioria das combinações (Tabelas 15 a 20), os valores de tensão máxima nas zonas de colunas resultaram em média 350% superiores ao valor de tensão limite do aço. Nas zonas de telhado os valores das tensões resultaram em média de 295% superiores para o segmento de 0 – 55°, de 126% para o segmento de 55° - 115°, e de 187% para o segmento de 115° - 180°.

Para as combinações 1 e 8 (Tabelas 14 a 21) os valores de tensão máxima foram todos menores ao valor da tensão limite, sendo que para a região compreendida entre 55° - 115° houve a prevalência de tensões negativas, ou seja, conforme a teoria do Ansys, nesta região ocorre compressão ou flexo-compressão dos elementos.

Ao alterar a altura do arco definida por hr , equivalente a mudança de 20° para 26° , mantendo h/s em 0,3 (do modelo 1 para o modelo 2), o ganho de área e de volume é da ordem de 10%. Nesta situação há um aumento das tensões máximas em cada zona, em média, de 13% na zona K, 22% na zona L, 16% no primeiro trecho do arco ($0-55^\circ$), de 21% no segundo trecho do arco ($55^\circ-115^\circ$) e de 37% no terceiro trecho ($115^\circ-180^\circ$).

Para a relação $h/s=0,6$, ao variar a altura hr (do modelo 3 para o modelo 4) o ganho em área e volume é da ordem de 6%. Neste caso, há um aumento nas tensões máximas, em média, de 17% na zona K, 27% na zona L, 21% no primeiro trecho do arco, 16% no segundo e 21% no terceiro trecho do arco.

Com a variação na relação h/s de 0,3 para 0,6 e mantida a inclinação do telhado, o ganho é em média 40% de área e volume. Assim como na forma de estufas de duas águas, a forma em arco produziu maior significância de aumento de área e de volume quando há alteração na relação h/s . Neste caso, essa mudança ocasiona o aumento de 66% das tensões máximas na zona K, 61% na zona L, 35% no primeiro trecho do arco, 39% no segundo e 64% no terceiro trecho.

4.2.2 Análise do conforto ambiental

O balanço de energia para determinação das temperaturas internas se comportou de maneira semelhante à forma estrutural em duas águas. Para a condição de verão fechada, o maior gradiente de temperatura é ocasionado na mudança da relação de h/s , sendo este na ordem de 3°C a menos em média para os modelos mais altos.

Na condição de inverno fechada as estruturas maiores apresentaram maior capacidade de retenção de calor, objetivo desejado em situações de frio. Este gradiente de temperatura apresentado foi de 1°C em média.

Os resultados das temperaturas internas para as condições de verão e inverno fechadas estão ilustrados na Figura 53.

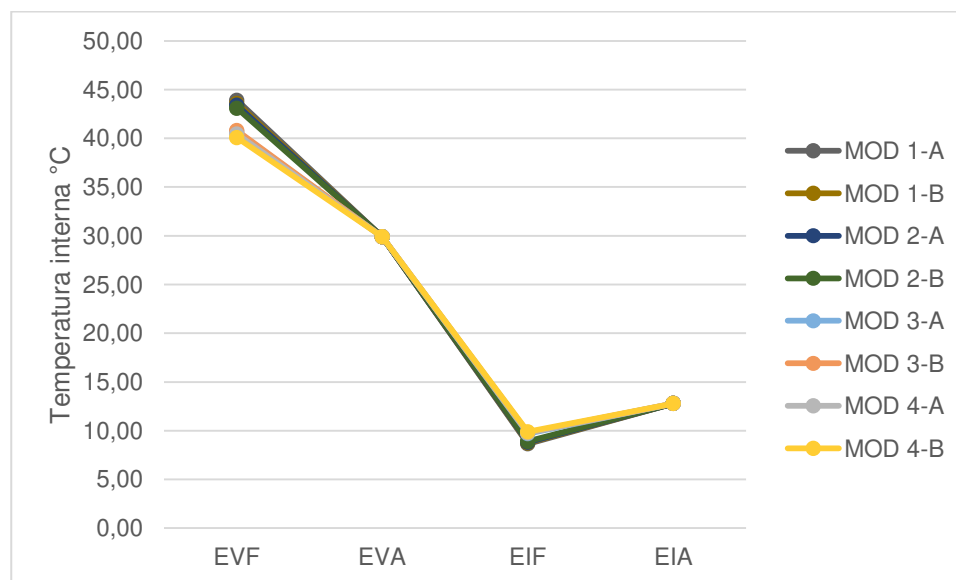


Figura 53. Temperaturas internas do balanço de energia das estufas em arco.

Como descrito no item 4.1.2, os resultados do balanço de massa foram semelhantes uns aos outros em mesmas condições, destacando que há variação em média de 3% na umidade interna (para mais no verão e para menos no inverno) quando se aumenta a relação h/s de 0,3 para 0,6. Os resultados para o balanço de massa para as estufas em arco estão ilustrados na Figura 54.

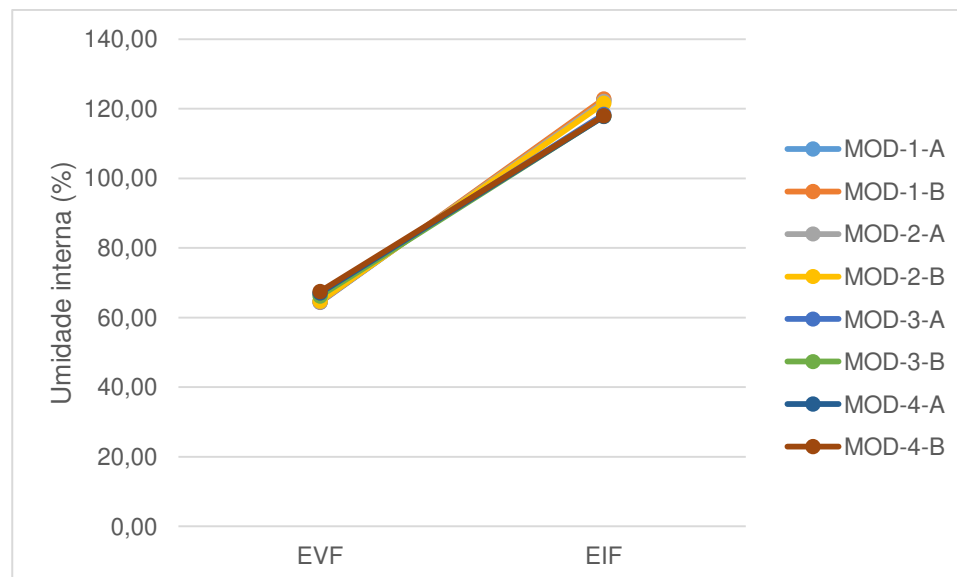


Figura 54. Umidade interna do balanço de massa para estufas em arco.

De acordo com Costa *et al.* (2004), ao comparar os resultados de uma rede de sensores para obtenção da temperatura e umidade interna da estufa com os modelos matemáticos propostos por Hellickson e Walker (1983), ASHRAE (1978) e Albright (1990), concluíram que os modelos são adequados para estimativa dos dados, pois os valores médios calculados não diferenciaram significativamente dos valores obtidos com sensores.

4.3 FORMA ESTRUTURAL DE ESTUFA DE DUAS ÁGUAS *VERSUS* ESTUFA EM ARCO

No Quadro 2 encontram-se os resultados organizados com intuito de sintetizar os principais efeitos na estrutura e no conforto, decorrentes das variações de parâmetros de forma de estufas agrícolas em conformidade com a norma ABNT – NBR 16032 (2012).

Condição variável	Síntese dos resultados devidos às alterações em cada forma de estufa			
	Duas águas		Arco	
	Colunas	Telhado	Colunas	Telhado
Alteração da inclinação do telhado de 20° para 26° na relação h/s=0,3	Aumento de 51,5% das tensões máximas, em média	Diminuição de 9% das tensões máximas, em média	Aumento de 17,5% das tensões máximas, em média	Aumento de 24,7% das tensões máximas, em média
	Incremento de 7,5% no volume interno / Variação no balanço de energia com diferença inferior a 1°C, e variação insignificante no balanço de massa		Incremento de 10% no volume interno / Variação no balanço de energia com diferença inferior a 1°C, e variação insignificante no balanço de massa	
Alteração da inclinação do telhado de 20° para 26° na relação h/s=0,6	Aumento de 30,5% das tensões máximas, em média	Diminuição de 18,5% das tensões máximas, em média	Aumento de 22% das tensões máximas, em média	Aumento de 19,4% das tensões máximas, em média
	Incremento de 4,3% no volume interno / Variação insignificante no balanço de energia e de massa		Incremento de 6% no volume interno / Variação insignificante no balanço de energia e de massa	
Alteração da relação h/s=0,3 para h/s=0,6 dentro da mesma inclinação do telhado	Aumento de 63% das tensões máximas, em média	Aumento de 43% das tensões máximas, em média	Aumento de 63,5% das tensões máximas, em média	Aumento de 46% das tensões máximas, em média
	Incremento de 40% no volume interno / Redução significativa de temperatura interna no verão de 3°C a 4°C entre os modelos, e retenção de calor no inverno de até 1°C / Incremento de cerca de 3% na umidade interna no verão e redução de cerca de 3% no inverno		Incremento de 40% no volume interno / Redução significativa de temperatura interna no verão de até 4,4°C entre os modelos, e retenção de calor no inverno de até 1,1°C / Incremento de cerca de 3% na umidade interna no verão e redução de cerca de 3% no inverno	

Quadro 2. Síntese do comparativo entre as formas estruturais de estufas agrícolas em duas águas e em arco.

Diante da síntese apresentada no Quadro 2, pode-se afirmar que para as condições de conforto térmico há grandes semelhanças entre a forma estrutural de estufas de duas águas e em arco, principalmente por se tratarem, no caso deste estudo, de modelos com mesmas características e vão único. Porém, o volume interno dos modelos advindos da forma em arco é maior em todas as situações, devido à projeção do arco em relação ao telhado de duas águas (Figuras 11 e 12), e isto, numa escala de produção comercial pode ser representativo para a ambiência.

Para compreensão da representatividade das tensões de cada forma estrutural em cada zona estudada, organizou-se a Tabela 22 demonstrando as diferenças entre as formas estruturais de duas águas e em arco. A Tabela 22 foi gerada a partir dos valores máximos das médias das tensões para cada zona, tendo por base a Tabela A22 do Apêndice.

Na maioria dos casos houve a prevalência da máxima tensão na forma em duas águas, exceto para os valores grafados, nos quais ocorreu a inversão, ou seja, os valores de tensão máxima para a forma em arco foram maiores do que os valores para a forma de duas águas. Apenas nos modelos 1 e 3 (que possuem menor ângulo de inclinação do telhado) houve a inversão das tensões na zona do tirante, na qual a forma estrutural em arco apresentou valores superiores àqueles obtidos para a forma de duas águas. Nos modelos 2 e 4 as diferenças entre as tensões nos tirantes passaram a ter o mesmo comportamento da maioria dos dados, ou seja, as tensões para a forma de duas águas foram superiores àquelas calculadas para a forma em arco.

Tabela 22. Diferenças máximas de tensões entre as formas para cada modelo.

Zona	MOD 1-A		MOD 1-B	
	Combinação	Máx. diferença*	Combinação	Máx. diferença*
Coluna	1	104%	1	101%
Telhado	1	111%	1	107%
Tirante	3	90%	3	81%
	MOD 2-A		MOD 2-B	
	Combinação	Máx. diferença*	Combinação	Máx. diferença*
Coluna	1	93%	1	85%
Telhado	1	102%	1	92%
Tirante	2	69%	6	44%
	MOD 3-A		MOD 3-B	
	Combinação	Máx. diferença*	Combinação	Máx. diferença*
Coluna	1	109%	1	105%
Telhado	1	110%	1	106%
Tirante	3	69%	3	69%
	MOD 4-A		MOD 4-B	
	Combinação	Máx. diferença*	Combinação	Máx. diferença*
Coluna	1	88%	1	86%
Telhado	1	93%	1	91,9%
Tirante	1	39%	1	32,8%

*Os números grafados indicam a ocorrência da máxima diferença de tensões na forma em arco. Os demais valores indicam a ocorrência na forma em duas águas.

Em todos os casos a máxima diferença de tensões obtidas entre ambas as formas estruturais, nas zonas de telhados e colunas, foram representados pela forma de duas águas cujos valores foram superiores a 85% (menor valor registrado entre as máximas diferenças) dos valores das tensões da forma em arco.

De acordo com a Tabela A22, pode-se observar que há maiores variações entre as médias das tensões para cada combinação quando comparada com a Tabela 22, ou seja,

tem-se maior número de situações em que a máxima diferença ocorre para a forma em arco, cerca de 40%. Dessa forma, por volta de 60% das máximas diferenças de tensões ocorrem para a forma de duas águas.

Nota-se para o modelo 2A e 2B que 100% dos valores das tensões máximas foram superiores para a forma de duas águas (Tabela A22). Portanto, para o modelo 2, o emprego da forma em arco é mais indicado em qualquer situação.

Para os demais modelos, há maiores variações quanto a diferença entre as médias das tensões, exceto na 1ª combinação, em que 100% dos maiores valores de tensões ocorreram para a forma de duas águas. Também, para a grande maioria dos modelos e das combinações, nas zonas de telhados os maiores valores das médias das tensões ocorreram para a forma de duas águas.

Nas zonas de colunas e tirantes, a forma de duas águas apresentou valores médios de tensões inferiores aos da forma em arco, porém, na maioria dos modelos e das combinações, estes são pouco relevantes diante das diferenças que ocorrem nas zonas de telhado, nas quais as tensões médias da forma em duas águas superaram as médias das tensões da forma em arco, como se pode observar na Tabela A22.

5 CONCLUSÕES

A presente análise concernente à influência da forma na distribuição dos esforços e no conforto térmico de estufas agrícolas permitiu concluir que:

- Para os modelos da forma de duas águas, as variações na relação altura/vão implicaram em maiores esforços nas colunas das estufas mais altas. Quanto à cobertura, para a maior inclinação ($\alpha=26^\circ$), houve redução nos esforços para quaisquer relações de altura/vão.

- Para os modelos da forma em arco, as variações na relação altura/vão também implicaram em maiores esforços nas colunas das estufas mais altas. Porém, tais esforços resultaram menores quando comparados àqueles obtidos para as estufas em forma de duas águas. O aumento da altura do arco (hr), para todas as relações de altura/vão, produziu incremento das tensões máximas na zona de telhado.

- Quanto à ambiência, houve semelhança entre os modelos analisados, o que se deve em partes às condições adotadas. Contudo, a forma em arco apresentou as melhores condições ambientais para alguns modelos, com temperatura inferior em até $0,4^{\circ}\text{C}$ no verão e superior em até $0,1^{\circ}\text{C}$ no inverno. Estas situações são desejadas em países com características climáticas tropicais.

- Os resultados confrontados para as formas de duas águas e em arco, mostram que a forma estrutural em arco é mais eficiente. Nas zonas de telhado, apesar das reduções das tensões nas formas de duas águas com o aumento da inclinação, a forma em arco apresentou, na maioria das situações, valores inferiores de tensões máximas.

- No que se refere ao ambiente, devido ao aumento de volume interno proporcionado, a forma em arco se mostrou mais adequada para as condições brasileiras.

- Finalmente, com resultados obtidos evidenciou-se que a forma das estufas agrícolas influenciou fortemente na distribuição dos esforços na estrutura e, também, ocasionou diferenças nas condições de conforto ambiental.

Como continuidade desta linha de pesquisa, sugere-se que sejam realizados novos estudos referentes à otimização de sistemas estruturais para estufas agrícolas. Sugerem-se estudos de modelos para representação do comportamento do filme plástico e a sua interação com os elementos estruturais das estufas e, também, dos coeficientes aerodinâmicos para estufas de múltiplos vãos nas situações não abrangidas por normalizações.

REFERÊNCIAS

ALBRIGHT, L.D. **Environment control for animals and plants**. St. Joseph: ASAE, 1990. 453 p.

ALI-NEZHAD, F. M.; ESKANDARI, H. Effect of Architectural Design of Greenhouse on Solar Radiation Interception and Crops Growth Conditions. **International Journal of Agriculture an Crop Sciences**. Vol. 4 (3), p. 122 – 127, 2012.

ANSYS. ver. ed. 10.0, Southpointe. ANSYS, Inc.

ASHRAE. Environment control for animals and plants. In: **ASHRAE Handbook of Applications**. USA: ASHRAE, 1978. Chapter 22, p. 22.1 - 22.20, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16032**: Estrutura de estufa e viveiro agrícola – Requisitos de projeto, construção, manutenção e restauração. Rio de Janeiro, 2012. 61p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988. 66 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 18 p.

BAILLE, A. Overview of greenhouse climate control in the Mediterranean regions. CIHEAM - International Centre for Advanced Mediterranean Agronomic Studies. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. **Cahiers Options Méditerranéennes**. Paris, v. 31, p. 59-76, 1999.

BLESSMANN, J. **Acidentes causados pelo vento**. 4 ed. Porto Alegre: Universidade/UFRGS, 2001. 141 p.

BOJACÁ, C. R.; GIL, R.; GÓMEZ, S.; COOMAN, A.; SCHREVEENS, E. Analysis of greenhouse air temperature distribution using geostatistical methods. **American Society of Agricultural and Biological – ASABE**, v. 52(3), p. 957-968, 2009.

BUYUKTAS, K.; YILMAZ, S.; ERTEKIN, C. The comparison of costs by computer aided and interactive greenhouse design application. **African Journal of Agricultural Research**. v. 6(14), p. 3355-3362, 2011.

CARREÑO, A.; VÁZQUEZ, J.; PÉREZ, J. CALLEJÓN, A. J.; SÁNCHEZ, E. Análisis estructural 3D de los invernaderos multitúnel del sudeste de España. Parte 2: elementos horizontales. In: CONGRESSO DE AGROINGENIERÍA. 6, 2011, Évora. **Anais...** Évora: Universidade de Évora, 2011. 10 p.

CASTELLANO, S. Loads interaction domains methodology for the design of steel greenhouse structures. **Journal of Agricultural Engineer**. Vol. 38, n. 1, 2007.

CEPAGRI – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. Dados meteorológicos. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/>>. Acesso em: 04/04/2013.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO (CEN). **EN 13031-1**: Greenhouses: Design and construction. Part 1: Commercial production greenhouses. 2001.

COSTA, E.; LEAL, P. A. M.; CARMO JÚNIOR, R. R. Modelo de simulação da temperatura e umidade relativa do ar no interior de estufa plástica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n.1, p. 57-67, 2004,

FRISINA, V. A.; ESCOBEDO, J. F. Balanço de radiação e energia da cultura de alface em estufa de polietileno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 34, n. 10, p. 1775-1786, 1999.

HELLICKSON, M.A.; WALKER, J.N. **Ventilation of agricultural structures**. St. Joseph: ASAE, 1983. 372 p.

IRIBARNE, L.; AYALA, R.; TORRES, J. A. A DPS-based system modeling method for 3D-structures simulation in manufacturing processes. **Simulation Modeling Practice and Theory**. v. 17, p. 935-954, 2009.

IRIBARNE, L.; TORRES, J. A.; PEÑA, A. **Using computer modeling techniques to design tunnel greenhouse structures**. Computers in industry. 58, p. 403-415, 2007.

MARY, W.; KENMOCHI, C. S.; COMETTI, N. N.; LEAL, P. M. Avaliação de estrutura de bambu como elemento construtivo para casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola. Jaboticabal**, v. 27, n.1, p. 100-109, 2007.

MONTERO, J. I. Desarrollo de estructuras para invernaderos. **Cuadernos de Estudios Agroalimentarios**. 2012, p. 45 – 70.

OLIVEIRA, M. R. V. O emprego de casas de vegetação no Brasil: vantagens e desvantagens. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 30, n. 8, p. 1049-1060, 1995.

PURQUERIO, L. F. V.; TIVELLI, S. W. Manejo do Ambiente em Cultivo Protegido. In: SEMINÁRIO REGIONAL DE AGRICULTURA SUSTENTÁVEL, 2005, Mogi das Cruzes. **Anais...** Campinas: CATI, 2005. p. 109-121.

SAPOUNAS, A. A.; MARTZOPOULOU, C. N.; SPIRIDIS, A. Prediction the spatial air temperature distribution of an experimental greenhouse using geostatistical methods. **Acta Horticulturae**. International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys2007. 801, p. 495-500, 2008.

SHAMSHIRI, R.; ISMAIL, W. I. W. A review of greenhouse climate control and automation systems in tropical regions. **Journal of Agricultural Science and Applications**. v. 2, p. 175-183, 2013.

SILVA, J. C. B. V.; LIMA, N.; OLIVEIRA, V. M. Estufa ecológica: uso do bambu em bioconstruções. **Centro Paranaense de Referência em Agroecologia – CPRA**. Curitiba, 2011. 32 p.

SORIANO, J.; BLISKA JÚNIOR, A; E o vento levou... A incidência do fator meteorológico vento na construção de estruturas de cultivo protegido. **Revista Plasticultura**. Campinas, Ano 1, n. 3, p. 28-29, 2008.

STREEK, N. A.; BURIOL, G. A.; SPOHR, R. B.; SANDRI, M. A.; DIEHL, L. M. Danos físicos em estufas plásticas causados pelo vento em Santa Maria, RS. **Revista Ciência Rural**, v. 28, n. 1, p. 137-139, Santa Maria, 1998.

VAN STRATEN, G.; VAN WILLIGENBURG, G; VAN HENTEN, E.; VAN OOTEGHEM, R. **Optimal Control of Greenhouse Cultivation**. CRC Press, 2010. 318 p.

VÁZQUEZ, J.; CARREÑO, A.; PÉREZ, J. CALLEJÓN, A. J.; SÁNCHEZ, E. Análisis estructural 3D de los invernaderos multitúnel del sudeste de España. Parte 1: elementos verticales. In: CONGRESSO DE AGROINGENIERÍA. 6, 2011, Évora. **Anais...** Évora: Universidade de Évora, 2011. 10 p.

VON ELSNER, B.; BRIASSOULIS, D.; WAAIJENBERG, D.; MISTRIOTIS, A.; VON ZABELTITZ, C.; GRATRAUD, J.; RUSSO, G.; SUAY-CORTES, R. Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries, Part I: Design Requirements. **Journal of Agricultural Engineering Research**. (2000a) 75, p. 1 – 16.

VON ELSNER, B.; BRIASSOULIS, D.; WAAIJENBERG, D.; MISTRIOTIS, A.; VON ZABELTITZ, C.; GRATRAUD, J.; RUSSO, G.; SUAY-CORTES, R. Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries, Part II: Typical Designs. **Journal of Agricultural Engineering Research**. (2000b) 75, p. 111 – 126.

VON ZABELTITZ, C. **Integrated greenhouse systems for mild climates**. Climate conditions, design, construction, maintenance, climate control. Berlin, 2011. 363 p.

APÊNDICE

Tabela A1. Tensões máximas no modelo 1 A de duas águas (MPa).

Modelo 1 (A)		Carga permanente		Sobrecarga		Vento +0,2		Vento -0,4	
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ
K	1	2,0556	-0,44181	20,023	-3,478	215,38	58,307	227,43	81,634
	2	-0,44181	2,0494	-3,478	17,658	58,307	43,644	81,634	77,116
	3	2,0494	4,6454	17,658	41,16	43,644	70,712	77,116	190,41
A	4	7,7127	0,66633	163,49	15,935	262,02	23,446	721,41	120,53
	5	0,66633	7,0483	15,935	84,562	23,446	111,26	120,53	370,47
	6	7,1044	-0,27785	84,562	10,657	111,26	31,251	370,47	116,91
	7	-0,27785	9,9479	10,657	180,77	31,251	246,41	116,91	728,65
B	8	9,9479	-0,27785	180,77	10,657	246,29	52,805	728,52	138,46
	9	-0,27785	7,1044	10,657	84,562	52,805	154,5	138,46	413,7
	10	7,0483	0,66633	84,562	15,935	154,5	88,355	413,7	185,44
	11	0,66633	7,7127	15,935	163,49	88,355	175,19	185,44	634,58
L	12	4,6454	2,0494	41,16	17,658	42,818	52,314	162,52	85,786
	13	2,0494	-0,44181	17,658	-3,478	52,314	69,936	85,786	65,932
	14	-0,44181	2,0556	-3,478	20,023	69,936	95,683	65,932	102,96
Travamento	15	29,901	29,901	22,814	22,814	1,2785	9,1205	-29,315	-13,706

Tabela A2. Tensões máximas no modelo 1 B de duas águas (MPa).

Modelo 1 (B)		Carga permanente		Sobrecarga		Vento +0,2		Vento -0,4	
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ
K	1	3,1733	-0,52381	31,405	-4,6293	333,62	88,906	347,66	121,52
	2	-0,52381	3,2082	-4,6293	29,013	88,906	66,595	121,52	115,73
	3	3,2082	7,0287	29,013	65,046	66,595	108,18	115,73	291,08
A	4	10,883	1,4811	257,59	30,994	401,85	33,551	1106,3	178,34
	5	1,4811	9,8663	30,994	136,62	33,551	169,34	178,34	565,37
	6	9,9223	-0,12974	136,62	19,546	169,34	42,895	565,37	165,68
	7	-0,12974	14,497	19,546	288,88	42,895	383,16	165,68	1131,6
B	8	14,497	-0,12974	288,88	19,546	383,01	76,616	1131,4	199,4
	9	-0,12974	9,9223	19,546	136,62	76,616	236,94	199,4	632,96
	10	9,8663	1,4811	136,62	30,994	236,94	135,02	632,96	279,81
	11	1,4811	10,883	30,994	257,59	135,02	266,2	279,81	970,61
L	12	7,0287	3,2082	65,046	29,013	64,658	80,206	247,56	129,34
	13	3,2082	-0,52381	29,013	-4,6293	80,206	108,45	129,34	99,986
	14	-0,52381	3,1733	-4,6293	31,405	108,45	149,39	99,986	159,5
Travamento	15	46,26	46,26	29,497	29,497	8,7808	21,168	-30,997	-6,324

Tabela A3. Tensões máximas no modelo 2 A de duas águas (MPa).

Modelo 2 (A)		Carga permanente		Sobrecarga		Vento +0,2		Vento -0,4	
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ
K	1	2,0338	-0,47362	21,033	-4,2739	441,15	246,46	382,38	222,93
	2	-0,47362	2,0787	-4,2739	19,362	246,46	116,77	222,93	79,728
	3	2,0787	4,6849	19,362	44,669	116,77	52,08	79,728	59,815
A	4	8,0451	0,90586	180,49	21,578	268,67	158,32	189,22	79,923
	5	0,90586	7,3444	21,578	96,13	158,32	338,1	79,923	93,327
	6	7,4168	-9,82E-02	96,13	14,38	338,1	272,49	93,327	229,43
	7	-9,82E-02	10,513	14,38	204,26	272,49	40,335	229,43	488,23
B	8	10,513	-9,82E-02	204,26	14,38	34,837	256,09	482,83	330,9
	9	-9,82E-02	7,4168	14,38	96,13	256,09	293,3	330,9	555,89
	10	7,3444	0,90586	96,13	21,578	293,3	146,46	555,89	228,75
	11	0,90586	8,0451	21,578	180,49	146,46	175,25	228,75	687,13
L	12	4,6849	2,0787	44,669	19,362	34,376	145,78	170,95	195,71
	13	2,0787	-0,47362	19,362	-4,2739	145,78	265,31	195,71	228,6
	14	-0,47362	2,0338	-4,2739	21,033	265,31	392,96	228,6	269,62
Travamento	15	29,559	29,559	18,358	18,358	133,6	134,67	94,081	106,16

Tabela A4. Tensões máximas no modelo 2 B de duas águas (MPa).

Modelo 2 (B)		Carga permanente		Sobrecarga		Vento +0,2		Vento -0,4	
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ
K	1	3,1745	-0,55369	33,56	-5,3413	687,95	384,49	707,66	416
	2	-0,55369	3,2545	-5,3413	32,112	384,49	182,6	416	149,74
	3	3,2545	7,1061	32,112	71,014	182,6	82,267	149,74	107,04
A	4	11,394	1,7288	285,2	39,761	418,68	246,31	337,27	154,04
	5	1,7288	10,235	39,761	154,31	246,31	526,61	154,04	162,06
	6	10,307	9,53E-02	154,31	25,245	526,61	424,43	162,06	361,31
	7	9,53E-02	15,178	25,245	323,01	424,43	62,425	361,31	751,81
B	8	15,178	9,53E-02	323,01	25,245	55,604	400,53	744,99	520,94
	9	9,53E-02	10,307	25,245	154,31	400,53	458,59	520,94	880,43
	10	10,235	1,7288	154,31	39,761	458,59	229,78	880,43	379,34
	11	1,7288	11,394	39,761	285,2	229,78	274,44	379,34	1028,2
L	12	7,1061	3,2545	71,014	32,112	53,058	226,48	250,61	283,5
	13	3,2545	-0,55369	32,112	-5,3413	226,48	412,61	283,5	405,25
	14	-0,55369	3,1745	-5,3413	33,56	412,61	611,42	405,25	615,87
Travamento	15	45,849	45,849	21,769	21,769	208,98	210,68	187,33	203,34

Tabela A5. Tensões máximas no modelo 3 A de duas águas (MPa).

Modelo 3 (A)		Carga permanente		Sobrecarga		Vento +0,2		Vento -0,4	
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ
K	1	1,6559	-0,57528	18,178	-4,7064	774,24	183,36	625,84	242,18
	2	-0,57528	1,8175	-4,7064	17,682	183,36	175,6	242,18	123,91
	3	1,8175	4,2461	17,682	40,764	175,6	246,46	123,91	377,57
A	4	6,2149	1,5713	151,96	26,032	893,46	75,474	1394	69,838
	5	1,5713	7,4051	26,032	90,668	75,474	314,19	69,838	562,05
	6	7,4612	-0,47333	90,668	8,846	314,19	125,19	562,05	215,11
	7	-0,47333	10,651	8,846	193,22	125,19	642,47	215,11	1103,5
B	8	10,651	-0,47333	193,22	8,846	643,24	73,713	1104,3	163,63
	9	-0,47333	7,4612	8,846	90,668	73,713	378,28	163,63	626,14
	10	7,4051	1,5713	90,668	26,032	378,28	347,19	626,14	417,33
	11	1,5713	6,2149	26,032	151,96	347,19	96,281	417,33	596,86
L	12	4,2461	1,8175	40,764	17,682	11,44	44,556	139,88	46,661
	13	1,8175	-0,57528	17,682	-4,7064	44,556	210,35	46,661	170,87
	14	-0,57528	1,6559	-4,7064	18,178	210,35	506,16	170,87	673,88
Travamento	15	29,935	29,935	47,373	47,373	72,448	108,89	54,215	84,803

Tabela A6. Tensões máximas no modelo 3 B de duas águas (MPa).

Modelo 3 (B)		Carga permanente		Sobrecarga		Vento +0,2		Vento -0,4	
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ
K	1	2,6466	-0,67611	27,282	-5,4899	1202,8	280,96	967,3	369,61
	2	-0,67611	2,8625	-5,4899	26,601	280,96	269,77	369,61	185,79
	3	2,8625	6,4319	26,601	59,373	269,77	379,12	185,79	580,35
A	4	8,6716	2,8347	236,63	44,185	1378,2	101,7	2148,8	94,304
	5	2,8347	10,403	44,185	142,06	101,7	480,46	94,304	859,2
	6	10,459	-0,41463	142,06	16,865	480,46	181,04	859,2	310,81
	7	-0,41463	15,565	16,865	299,68	181,04	999,95	310,81	1715,8
B	8	15,565	-0,41463	299,68	16,865	1000,9	99,366	1716,8	229,14
	9	-0,41463	10,459	16,865	142,06	99,366	578,79	229,14	957,53
	10	10,403	2,8347	142,06	44,185	578,79	532,89	957,53	635,29
	11	2,8347	8,6716	44,185	236,63	532,89	133,88	635,29	904,49
L	12	6,4319	2,8625	59,373	26,601	15,794	65,8	210,69	67,6
	13	2,8625	-0,67611	26,601	-5,4899	65,8	325,26	67,6	260,77
	14	-0,67611	2,6466	-5,4899	27,282	325,26	787,86	260,77	1047,6
Travamento	15	46,183	46,183	35,52	35,52	130,74	187,68	109,18	156,99

Tabela A7. Tensões máximas no modelo 4 A de duas águas (MPa).

Modelo 4 (A)		Carga permanente		Sobrecarga		Vento +0,2		Vento -0,4	
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ
K	1	1,6668	-0,58796	18,216	-4,8544	1036,8	367,98	892,13	426,53
	2	-0,58796	1,8416	-4,8544	17,706	367,98	56,058	426,53	25,922
	3	1,8416	4,2938	17,706	40,776	56,058	204,84	25,922	344,25
A	4	6,598	1,7866	166,08	30,343	664,12	304,01	1191,1	273,34
	5	1,7866	7,6914	30,343	99,584	304,01	146,35	273,34	158,93
	6	7,7639	-0,28486	99,584	12,523	146,35	191,15	158,93	149,5
	7	-0,28486	11,2	12,523	211,11	191,15	438,39	149,5	943,38
B	8	11,2	-0,28486	211,11	12,523	434,69	265,54	939,68	351,88
	9	-0,28486	7,7639	12,523	99,584	265,54	564,69	351,88	829,58
	10	7,6914	1,7866	99,584	30,343	564,69	495,75	829,58	571,1
	11	1,7866	6,598	30,343	166,08	495,75	58,712	571,1	501,24
L	12	4,2938	1,8416	40,776	17,706	52,793	115,77	101,32	68,364
	13	1,8416	-0,58796	17,706	-4,8544	115,77	399,64	68,364	360,42
	14	-0,58796	1,6668	-4,8544	18,216	399,64	813,52	360,42	977,49
Travamento	15	29,548	29,548	23,088	23,088	300,62	328,47	296,13	320,18

Tabela A8. Tensões máximas no modelo 4 B de duas águas (MPa).

Modelo 4 (B)		Carga permanente		Sobrecarga		Vento +0,2		Vento -0,4	
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ
K	1	2,6798	-0,68902	29,809	-5,8399	1615,4	571,41	1385,9	659,8
	2	-0,68902	2,9071	-5,8399	29,358	571,41	85,327	659,8	35,301
	3	2,9071	6,5227	29,358	65,007	85,327	316,74	35,301	530,84
A	4	9,2397	3,0461	263,01	53,326	1028,2	467,7	1842	412,77
	5	3,0461	10,755	53,326	159,66	467,7	222,71	412,77	234,07
	6	10,827	-0,18306	159,66	22,379	222,71	293,27	234,07	222,21
	7	-0,18306	16,215	22,379	333,69	293,27	679,37	222,21	1460,8
B	8	16,215	-0,18306	333,69	22,379	674,78	408,26	1456,2	535,49
	9	-0,18306	10,827	22,379	159,66	408,26	876,02	535,49	1282,1
	10	10,755	3,0461	159,66	53,326	876,02	770,05	1282,1	881,16
	11	3,0461	9,2397	53,326	263,01	770,05	90,357	881,16	764,91
L	12	6,5227	2,9071	65,007	29,358	81,025	177,75	151,45	100,33
	13	2,9071	-0,68902	29,358	-5,8399	177,75	621,28	100,33	557,04
	14	-0,68902	2,6798	-5,8399	29,809	621,28	1267,9	557,04	1521,6
Travamento	15	45,765	45,765	28,314	28,314	476,38	519,8	471,02	508,39

Tabela A9. Tensões máximas no modelo 1A de duas águas sem elemento de travamento. (MPa).

Modelo 1 (A)		Carga permanente		Sobrecarga		Vento +0,2		Vento -0,4	
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ
K	1	11,642	5,53	192,09	90,43	406,72	163,66	643,66	309,7
	2	5,53	-0,17293	90,43	1,9098	163,66	24,245	309,7	37,171
	3	-0,17293	6,0375	1,9098	103,57	24,245	137,3	37,171	338,62
A	4	24,147	6,5515	410,49	89,592	525,16	146,47	1294,7	272,61
	5	6,5515	5,9219	89,592	70,061	146,47	83,594	272,61	311,23
	6	5,9779	5,9316	70,061	107,57	83,594	126,62	311,23	326,31
	7	5,9316	1,9631	107,57	2,5543	126,62	17,402	326,31	227,39
B	8	1,9631	5,9316	2,5543	107,57	17,272	149,29	227,26	348,98
	9	5,9316	5,9779	107,57	70,061	149,29	129,07	348,98	356,71
	10	5,9219	6,5515	70,061	89,592	129,07	77,934	356,71	204,07
	11	6,5515	24,147	89,592	410,49	77,934	433,82	204,07	1203,3
L	12	6,0375	-0,17293	103,57	1,9098	113,69	37,204	315,02	50,131
	13	-0,17293	5,53	1,9098	90,43	37,204	40,635	50,131	186,68
	14	5,53	11,642	90,43	192,09	40,635	100,87	186,68	337,82

Tabela A10. Tensões máximas no modelo 1B de duas águas sem elemento de travamento, (MPa).

Modelo 1 (B)		Carga permanente		Sobrecarga		Vento +0,2		Vento -0,4	
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ	TMAXI	TMAXJ
K	1	16,317	7,7969	302,11	143,13	634,54	254,6	1002,7	480,47
	2	7,7969	-0,12094	143,13	4,2055	254,6	36,076	480,47	52,818
	3	-0,12094	8,5221	4,2055	163,19	36,076	212,88	52,818	524,25
A	4	33,872	9,119	644,45	143,03	817,14	225,72	2011,6	415,38
	5	9,119	8,1694	143,03	112,28	225,72	127,5	415,38	475,8
	6	8,2255	8,4627	112,28	170,39	127,5	194,44	475,8	498,62
	7	8,4627	2,5652	170,39	5,7885	194,44	24,878	498,62	346,91
B	8	2,5652	8,4627	5,7885	170,39	24,715	229,91	346,75	534,09
	9	8,4627	8,2255	170,39	112,28	229,91	198,6	534,09	546,91
	10	8,1694	9,119	112,28	143,03	198,6	118,66	546,91	308,31
	11	9,119	33,872	143,03	644,45	118,66	674,45	308,31	1868,9
L	12	8,5221	-0,12094	163,19	4,2055	176,05	56,379	487,42	73,121
	13	-0,12094	7,7969	4,2055	143,13	56,379	62,44	73,121	288,31
	14	7,7969	16,317	143,13	302,11	62,44	156,72	288,31	524,87

Tabela A11. Tensões máximas para cada ação considerada no modelo 1 A em arco (MPa).

Modelo 1 (A)		Carga permanente				Sobrecarga				Vento +0,2				Vento -0,4			
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ
K	1	0,81	-0,36	-1,66	-0,40	0,30	-2,88	-8,04	-4,86	286,90	189,25	-271,38	-173,73	324,65	164,99	-328,46	-168,79
	2	-0,36	0,86	-0,40	-1,52	-2,88	-1,68	-4,86	-6,07	189,25	124,10	-173,73	-108,59	164,99	86,58	-168,79	-90,39
	3	0,86	2,13	-1,52	-2,68	-1,68	1,51	-6,07	-9,25	124,10	91,46	-108,59	-75,94	86,58	89,42	-90,39	-93,23
L	4	0,81	-0,36	-1,66	-0,40	0,30	-2,88	-8,04	-4,86	346,56	181,19	-322,73	-157,36	289,49	186,13	-284,98	-181,62
	5	-0,36	0,86	-0,40	-1,52	-2,88	-1,68	-4,86	-6,07	181,19	56,45	-157,36	-32,61	186,13	74,65	-181,62	-70,14
	6	0,86	2,13	-1,52	-2,68	-1,68	1,51	-6,07	-9,25	56,45	51,50	-32,61	-27,67	74,65	49,47	-70,14	-44,96
A (0 - 55°)	7	1,20	0,77	-2,12	-1,67	9,37	0,82	-32,63	-24,58	404,10	220,42	-321,7	-138,03	402,43	214,91	-381,26	-193,74
	8	0,77	0,42	-1,67	-1,31	0,84	-6,09	-24,56	-18,14	220,88	63,18	-137,57	20,13	215,38	54,02	-193,27	-31,92
	9	0,42	0,15	-1,31	-1,01	-6,07	-11,51	-18,12	-13,19	63,57	152,00	20,51	-67,92	54,42	103,42	-31,52	-80,52
	10	0,14	-0,07	-1,01	-0,78	-11,50	-9,61	-13,18	-15,58	152,31	257,38	-67,60	-172,67	103,75	212,08	-80,20	-188,53
	11	-0,07	-0,24	-0,78	-0,60	-9,60	-7,25	-15,57	-18,43	257,63	336,13	-172,42	-250,92	212,33	293,89	-188,27	-269,83
	12	-0,24	-0,35	-0,61	-0,47	-7,25	-5,98	-18,42	-20,19	336,30	388,12	-250,75	-302,56	294,07	348,74	-269,65	-324,31
	13	-0,35	-0,38	-0,47	-0,43	-5,98	-5,66	-20,19	-21,02	388,22	413,27	-302,46	-327,51	348,85	376,53	-324,20	-351,89
	14	-0,38	-0,32	-0,43	-0,48	-5,66	-6,15	-21,02	-21,04	413,30	411,55	-327,48	-325,73	376,57	377,24	-351,85	-352,52
	15	-0,32	-0,29	-0,48	-0,50	-6,15	-7,30	-21,04	-20,39	411,51	382,96	-325,77	-297,22	377,21	350,86	-352,56	-326,21
	16	-0,29	-0,28	-0,50	-0,51	-7,30	-8,97	-20,40	-19,23	382,85	327,54	-297,33	-242,02	350,75	297,42	-326,32	-272,99
	17	-0,28	-0,28	-0,51	-0,50	-8,98	-11,03	-19,24	-17,70	327,35	245,37	-242,21	-160,22	297,24	217,02	-273,17	-192,94
A (55° - 115°)	18	-0,28	-0,29	-0,50	-0,48	-11,03	-13,31	-17,70	-15,93	245,12	155,28	-160,48	-70,64	216,77	128,46	-193,19	-104,88
	19	-0,29	-0,30	-0,48	-0,46	-13,32	-14,08	-15,94	-15,69	155,06	76,20	-70,87	7,99	128,23	50,67	-105,10	-27,54
	20	-0,30	-0,32	-0,46	-0,44	-14,08	-12,28	-15,69	-18,00	76,00	75,56	7,79	8,23	50,48	38,98	-27,73	-16,23
	21	-0,32	-0,34	-0,44	-0,42	-12,28	-10,68	-18,01	-20,12	75,39	131,97	8,07	-48,50	38,81	94,56	-16,39	-72,14
	22	-0,34	-0,35	-0,42	-0,40	-10,69	-9,43	-20,12	-21,89	131,83	177,12	-48,64	-93,93	94,42	139,12	-72,27	-116,97
	23	-0,35	-0,36	-0,40	-0,39	-9,43	-8,67	-21,89	-23,16	177,01	210,96	-94,04	-127,98	139,02	172,61	-117,08	-150,67
	24	-0,36	-0,36	-0,39	-0,39	-8,67	-8,54	-23,16	-23,81	210,88	233,43	-128,06	-150,60	172,53	194,96	-150,74	-173,17
	25	-0,36	-0,36	-0,39	-0,39	-8,54	-8,67	-23,81	-23,16	233,38	244,50	-150,65	-161,77	194,91	206,15	-173,21	-184,45
	26	-0,36	-0,35	-0,39	-0,40	-8,67	-9,43	-23,16	-21,89	244,49	244,15	-161,78	-161,45	206,13	206,15	-184,46	-184,49
	27	-0,35	-0,34	-0,40	-0,42	-9,43	-10,69	-21,89	-20,12	244,17	232,39	-161,43	-149,65	206,17	194,98	-184,47	-173,28
	28	-0,34	-0,32	-0,42	-0,44	-10,68	-12,28	-20,12	-18,01	232,44	209,23	-149,60	-126,39	195,03	172,64	-173,24	-150,85
A (115°-180°)	29	-0,32	-0,30	-0,44	-0,46	-12,28	-14,08	-18,00	-15,69	209,30	174,70	-126,32	-91,71	172,72	139,17	-150,78	-117,24
	30	-0,30	-0,29	-0,46	-0,48	-14,08	-13,32	-15,69	-15,94	174,81	137,49	-91,60	-54,28	139,28	103,25	-117,13	-81,11
	31	-0,29	-0,28	-0,48	-0,50	-13,31	-11,03	-15,93	-17,70	137,58	106,23	-54,19	-22,84	103,34	73,52	-81,02	-51,19
	32	-0,28	-0,28	-0,50	-0,51	-11,03	-8,98	-17,70	-19,24	106,30	80,97	-22,77	2,57	73,59	50,01	-51,12	-27,54
	33	-0,28	-0,29	-0,51	-0,50	-8,97	-7,30	-19,23	-20,40	81,03	61,76	2,62	21,90	50,07	32,77	-27,49	-10,19
	34	-0,29	-0,32	-0,50	-0,48	-7,30	-6,15	-20,39	-21,04	61,80	48,61	21,95	35,14	32,81	21,82	-10,15	0,84
	35	-0,32	-0,38	-0,48	-0,43	-6,15	-5,66	-21,04	-21,02	48,63	42,25	35,17	41,55	21,84	17,17	0,86	5,52
	36	-0,38	-0,35	-0,43	-0,47	-5,66	-5,98	-21,02	-20,19	42,26	43,24	41,56	40,58	17,18	18,84	5,53	3,86
	37	-0,35	-0,24	-0,47	-0,61	-5,98	-7,25	-20,19	-18,42	43,23	45,72	40,58	38,09	18,83	26,82	3,85	-4,14
	38	-0,24	-0,07	-0,60	-0,78	-7,25	-9,60	-18,43	-15,57	45,70	56,95	38,07	26,82	26,79	41,09	-4,17	-18,48
	39	-0,07	0,14	-0,78	-1,01	-9,61	-11,50	-15,58	-13,18	56,91	74,25	26,78	9,44	41,05	61,65	-18,52	-39,13
	40	0,15	0,42	-1,01	-1,31	-11,51	-6,07	-13,19	-18,12	74,19	97,60	9,39	-14,02	61,59	88,45	-39,19	-66,05
	41	0,42	0,77	-1,31	-1,67	-6,09	0,84	-18,14	-24,56	97,53	126,96	-14,09	-43,53	88,37	121,46	-66,13	-99,22
	42	0,77	1,20	-1,67	-2,12	0,82	9,37	-24,58	-32,63	126,88	162,30	-43,61	-79,04	121,36	160,63	-99,32	-138,58
Travamento	43	29,44	29,44	-28,46	-28,46	14,84	14,84	14,57	14,57	27,98	18,99	-166,02	-157,03	58,77	53,85	-131,16	-126,24

Tabela A12. Tensões máximas para cada ação considerada no modelo 1 B em arco (MPa).

Modelo 1 (B)		Carga permanente				Sobrecarga				Vento +0,2				Vento -0,4			
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ
K	1	1,39	-0,43	-2,41	-0,47	0,50	-3,84	-10,18	-5,84	440,10	290,47	-420,70	-271,08	504,92	256,91	-509,67	-261,67
	2	-0,43	1,47	-0,47	-2,25	-3,84	-1,50	-5,84	-8,18	290,47	191,63	-271,08	-172,24	256,91	135,87	-261,67	-140,63
	3	1,47	3,41	-2,25	-4,06	-1,50	2,85	-8,18	-12,53	191,63	143,58	-172,24	-124,18	135,87	141,78	-140,63	-146,54
L	4	1,39	-0,43	-2,41	-0,47	0,50	-3,84	-10,18	-5,84	543,55	282,20	-513,76	-252,41	454,58	291,61	-448,94	-285,97
	5	-0,43	1,47	-0,47	-2,25	-3,84	-1,50	-5,84	-8,18	282,20	84,34	-252,41	-54,55	291,61	115,95	-285,97	-110,31
	6	1,47	3,41	-2,25	-4,06	-1,50	2,85	-8,18	-12,53	84,34	79,84	-54,55	-50,05	115,95	78,05	-110,31	-72,41
A (0 - 55°)	7	2,11	1,42	-3,25	-2,54	15,48	2,62	-44,60	-32,37	630,63	341,82	-527,39	-238,58	631,20	337,35	-604,62	-310,77
	8	1,42	0,86	-2,55	-1,96	2,64	-7,71	-32,35	-22,64	342,39	94,27	-238,01	10,12	337,94	85,02	-310,19	-57,27
	9	0,86	0,41	-1,96	-1,49	-7,69	-15,22	-22,62	-15,72	94,75	217,68	10,61	-112,32	85,52	154,84	-56,77	-126,10
	10	0,41	0,05	-1,49	-1,12	-15,21	-9,91	-15,71	-21,64	218,08	383,79	-111,92	-277,63	155,25	325,24	-125,69	-295,68
	11	0,05	-0,21	-1,12	-0,84	-9,90	-6,49	-21,63	-25,68	384,10	508,20	-277,32	-401,42	325,56	453,67	-295,36	-423,47
	12	-0,21	-0,41	-0,84	-0,63	-6,48	-4,74	-25,67	-28,04	508,42	590,73	-401,20	-483,50	453,90	539,94	-423,24	-509,28
	13	-0,41	-0,48	-0,63	-0,54	-4,74	-4,45	-28,04	-28,96	590,86	631,24	-483,37	-523,75	540,08	583,92	-509,14	-552,99
	14	-0,48	-0,38	-0,54	-0,63	-4,45	-5,40	-28,96	-28,64	631,28	629,69	-523,71	-522,12	583,97	585,55	-552,94	-554,52
	15	-0,38	-0,32	-0,63	-0,67	-5,41	-7,37	-28,65	-27,32	629,64	586,07	-522,17	-478,59	585,51	544,83	-554,56	-513,88
	16	-0,32	-0,29	-0,67	-0,69	-7,37	-10,12	-27,32	-25,21	585,93	500,45	-478,73	-393,25	544,70	461,81	-514,01	-431,12
	17	-0,29	-0,29	-0,69	-0,68	-10,13	-13,44	-25,21	-22,54	500,22	372,95	-393,48	-266,21	461,59	336,62	-431,34	-306,38
	18	-0,29	-0,30	-0,68	-0,66	-13,45	-17,10	-22,54	-19,52	372,63	232,98	-266,52	-126,88	336,31	198,66	-306,69	-169,04
	19	-0,30	-0,32	-0,66	-0,63	-17,11	-16,40	-19,53	-20,87	232,70	110,10	-127,16	-4,55	198,38	77,47	-169,32	-48,41
	20	-0,32	-0,35	-0,63	-0,60	-16,41	-13,40	-20,88	-24,53	109,85	100,59	-4,79	4,47	77,23	55,34	-48,65	-26,76
	21	-0,35	-0,37	-0,60	-0,57	-13,40	-10,73	-24,54	-27,84	100,38	188,38	4,26	-83,74	55,14	142,05	-26,97	-113,88
	22	-0,37	-0,39	-0,57	-0,55	-10,74	-8,63	-27,85	-30,59	188,21	258,70	-83,91	-154,40	141,88	211,60	-114,05	-183,76
	23	-0,39	-0,40	-0,55	-0,53	-8,63	-7,32	-30,60	-32,55	258,57	311,44	-154,53	-207,40	211,47	263,87	-183,89	-236,29
A (55° - 115°)	24	-0,40	-0,41	-0,53	-0,53	-7,32	-7,02	-32,55	-33,48	311,35	346,52	-207,49	-242,67	263,77	298,79	-236,39	-271,40
	25	-0,41	-0,40	-0,53	-0,53	-7,02	-7,32	-33,48	-32,55	346,46	363,88	-242,72	-260,14	298,74	316,31	-271,46	-289,04
	26	-0,40	-0,39	-0,53	-0,55	-7,32	-8,63	-32,55	-30,60	363,86	363,51	-260,16	-259,81	316,29	316,41	-289,06	-289,17
	27	-0,39	-0,37	-0,55	-0,57	-8,63	-10,74	-30,59	-27,85	363,53	345,40	-259,79	-241,66	316,42	299,07	-289,15	-271,80
	28	-0,37	-0,35	-0,57	-0,60	-10,73	-13,40	-27,84	-24,54	345,46	309,58	-241,60	-205,72	299,13	264,34	-271,74	-236,95
	29	-0,35	-0,32	-0,60	-0,63	-13,40	-16,41	-24,53	-20,88	309,68	256,11	-205,63	-152,06	264,43	212,25	-236,86	-184,68
	30	-0,32	-0,30	-0,63	-0,66	-16,40	-17,11	-20,87	-19,53	256,24	198,54	-151,92	-94,22	212,38	156,37	-184,55	-128,54
	31	-0,30	-0,29	-0,66	-0,68	-17,10	-13,45	-19,52	-22,54	198,65	150,38	-94,11	-45,84	156,48	110,22	-128,43	-82,17
	32	-0,29	-0,29	-0,68	-0,69	-13,44	-10,13	-22,54	-25,21	150,48	111,72	-45,75	-6,99	110,31	73,85	-82,08	-45,62
	33	-0,29	-0,32	-0,69	-0,67	-10,12	-7,37	-25,21	-27,32	111,79	82,61	-6,92	22,27	73,92	47,33	-45,56	-18,96
	34	-0,32	-0,38	-0,67	-0,63	-7,37	-5,41	-27,32	-28,65	82,66	63,08	22,32	41,90	47,37	30,69	-18,92	-2,23
	35	-0,38	-0,48	-0,63	-0,54	-5,40	-4,45	-28,64	-28,96	63,11	53,18	41,93	51,87	30,71	23,95	-2,20	4,56
	36	-0,48	-0,41	-0,54	-0,63	-4,45	-4,74	-28,96	-28,04	53,19	52,91	51,88	52,16	23,96	27,13	4,56	1,38
	37	-0,41	-0,21	-0,63	-0,84	-4,74	-6,48	-28,04	-25,67	52,90	62,27	52,15	42,78	27,12	40,23	1,36	-11,75
	38	-0,21	0,05	-0,84	-1,12	-6,49	-9,90	-25,68	-21,63	62,24	81,26	42,75	23,73	40,19	63,22	-11,79	-34,82
	39	0,05	0,41	-1,12	-1,49	-9,91	-15,21	-21,64	-15,71	81,21	109,83	23,68	-4,95	63,16	96,07	-34,88	-67,79
A (115°-180°)	40	0,41	0,86	-1,49	-1,96	-15,22	-7,69	-15,72	-22,62	109,76	147,96	-5,02	-43,22	95,99	138,72	-67,87	-110,60
	41	0,86	1,42	-1,96	-2,55	-7,71	2,64	-22,64	-32,35	147,87	195,59	-43,32	-91,03	138,62	191,13	-110,71	-163,21
	42	1,42	2,11	-2,54	-3,25	2,62	15,48	-32,37	-44,60	195,47	252,63	-91,14	-148,30	191,00	253,20	-163,33	-225,53
	43	45,85	45,85	-44,62	-44,62	18,78	18,78	18,25	18,25	64,37	50,92	-238,18	-224,72	102,68	95,32	-193,78	-186,41
Travamento																	

Tabela A13. Tensões máximas para cada ação considerada no modelo 2 A em arco (MPa).

Modelo 2 (A)		Carga permanente				Sobrecarga				Vento +0,2				Vento -0,4			
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ
K	1	0,81	-0,36	-1,66	-0,40	1,67	-1,97	-6,62	-2,98	313,86	209,28	-295,81	-191,24	351,61	185,02	-352,89	-186,30
	2	-0,36	0,86	-0,40	-1,52	-1,97	0,67	-2,98	-5,62	209,28	137,21	-191,24	-119,17	185,02	99,69	-186,30	-100,97
	3	0,86	2,13	-1,52	-2,68	0,67	4,31	-5,62	-9,26	137,21	97,64	-119,17	-79,60	99,69	95,61	-100,97	-96,89
L	4	0,81	-0,36	-1,66	-0,40	1,67	-1,97	-6,62	-2,98	410,67	193,54	-384,75	-167,62	353,60	198,48	-347,00	-191,88
	5	-0,36	0,86	-0,40	-1,52	-1,97	0,67	-2,98	-5,62	193,54	41,41	-167,62	-15,48	198,48	59,61	-191,88	-53,01
	6	0,86	2,13	-1,52	-2,68	0,67	4,31	-5,62	-9,26	41,41	71,65	-15,48	-45,73	59,61	69,61	-53,01	-63,02
A (0 - 55°)	7	1,20	0,77	-2,12	-1,67	19,72	7,57	-33,36	-21,98	431,95	229,60	-338,08	-135,72	430,28	224,08	-397,63	-191,43
	8	0,77	0,42	-1,67	-1,31	7,60	-2,15	-21,95	-12,96	230,10	56,94	-135,22	37,94	224,59	47,78	-190,92	-14,10
	9	0,42	0,15	-1,31	-1,01	-2,13	-6,16	-12,94	-9,67	57,36	182,07	38,37	-86,35	48,21	133,50	-13,67	-98,95
	10	0,14	-0,07	-1,01	-0,78	-6,14	-1,36	-9,66	-15,20	182,42	296,46	-86,00	-200,04	133,85	251,15	-98,60	-215,90
	11	-0,07	-0,24	-0,78	-0,60	-1,35	1,63	-15,19	-18,93	296,72	380,92	-199,77	-283,97	251,42	338,68	-215,62	-302,88
	12	-0,24	-0,35	-0,61	-0,47	1,64	3,03	-18,92	-21,07	381,11	435,34	-283,79	-338,02	338,87	395,96	-302,69	-359,77
	13	-0,35	-0,38	-0,47	-0,43	3,03	3,04	-21,07	-21,84	435,45	459,64	-337,92	-362,11	396,07	422,90	-359,66	-386,49
	14	-0,38	-0,32	-0,43	-0,48	3,04	1,88	-21,84	-21,44	459,66	453,77	-362,08	-356,19	422,93	419,46	-386,46	-382,99
	15	-0,32	-0,29	-0,48	-0,50	1,88	-0,24	-21,45	-20,09	453,71	417,75	-356,25	-320,28	419,41	385,65	-383,04	-349,27
	16	-0,29	-0,28	-0,50	-0,51	-0,25	-3,10	-20,10	-18,00	417,61	351,62	-320,42	-254,43	385,52	321,51	-349,40	-285,40
	17	-0,28	-0,28	-0,51	-0,50	-3,11	-6,49	-18,01	-15,39	351,41	255,50	-254,65	-158,74	321,30	227,15	-285,61	-191,46
	18	-0,28	-0,29	-0,50	-0,48	-6,50	-10,19	-15,40	-12,47	255,20	151,09	-159,04	-54,93	226,85	124,27	-191,75	-89,16
	19	-0,29	-0,30	-0,48	-0,46	-10,20	-9,46	-12,48	-13,98	150,83	60,25	-55,19	35,40	124,01	34,72	-89,42	-0,13
	20	-0,30	-0,32	-0,46	-0,44	-9,47	-6,57	-13,99	-17,64	60,02	112,10	35,17	-16,91	34,50	75,52	-0,35	-41,37
	21	-0,32	-0,34	-0,44	-0,42	-6,58	-4,03	-17,65	-20,96	111,91	175,07	-17,09	-80,25	75,33	137,66	-41,55	-103,88
	22	-0,34	-0,35	-0,42	-0,40	-4,04	-2,05	-20,97	-23,72	174,91	224,20	-80,40	-129,68	137,51	186,20	-104,03	-152,72
	23	-0,35	-0,36	-0,40	-0,39	-2,06	-0,84	-23,73	-25,70	224,09	259,43	-129,79	-165,14	186,09	221,07	-152,83	-187,82
A (55° - 115°)	24	-0,36	-0,36	-0,39	-0,39	-0,85	-0,63	-25,70	-26,69	259,35	280,70	-165,21	-186,56	221,00	242,23	-187,89	-209,12
	25	-0,36	-0,36	-0,39	-0,39	-0,63	-0,85	-26,69	-25,70	280,66	287,98	-186,60	-193,92	242,19	249,63	-209,16	-216,60
	26	-0,36	-0,35	-0,39	-0,40	-0,84	-2,06	-25,70	-23,73	287,98	281,27	-193,92	-187,20	249,63	243,27	-216,60	-210,24
	27	-0,35	-0,34	-0,40	-0,42	-2,05	-4,04	-23,72	-20,97	281,30	260,56	-187,17	-166,42	243,30	223,15	-210,21	-190,05
	28	-0,34	-0,32	-0,42	-0,44	-4,03	-6,58	-20,96	-17,65	260,63	225,89	-166,35	-131,61	223,22	189,31	-189,98	-156,07
	29	-0,32	-0,30	-0,44	-0,46	-6,57	-9,47	-17,64	-13,99	226,00	177,32	-131,50	-82,81	189,42	141,80	-155,96	-108,34
	30	-0,30	-0,29	-0,46	-0,48	-9,46	-10,20	-13,98	-12,48	177,47	126,42	-82,66	-31,61	141,94	92,18	-108,19	-58,43
	31	-0,29	-0,28	-0,48	-0,50	-10,19	-6,50	-12,47	-15,40	126,54	84,70	-31,49	10,35	92,31	51,99	-58,31	-18,00
	32	-0,28	-0,28	-0,50	-0,51	-6,49	-3,11	-15,39	-18,01	84,80	52,25	10,45	43,01	52,09	21,28	-17,91	12,90
	33	-0,28	-0,29	-0,51	-0,50	-3,10	-0,25	-18,00	-20,10	52,32	66,31	43,08	29,09	21,35	34,22	12,97	0,10
	34	-0,29	-0,32	-0,50	-0,48	-0,24	1,88	-20,09	-21,45	66,36	80,23	29,14	15,27	34,27	45,93	0,15	-11,52
	35	-0,32	-0,38	-0,48	-0,43	1,88	3,04	-21,44	-21,84	80,26	84,75	15,29	10,81	45,95	48,02	-11,50	-13,57
	36	-0,38	-0,35	-0,43	-0,47	3,04	3,03	-21,84	-21,07	84,75	79,85	10,80	15,71	48,01	40,47	-13,58	-6,04
	37	-0,35	-0,24	-0,47	-0,61	3,03	1,64	-21,07	-18,92	79,82	65,54	15,68	29,96	40,44	23,31	-6,07	11,06
	38	-0,24	-0,07	-0,60	-0,78	1,63	-1,35	-18,93	-15,19	65,49	53,55	29,91	41,85	23,25	37,70	11,00	-3,45
	39	-0,07	0,14	-0,78	-1,01	-1,36	-6,14	-15,20	-9,66	53,48	86,44	41,77	8,80	37,62	73,85	-3,54	-39,76
A (115°-180°)	40	0,15	0,42	-1,01	-1,31	-6,16	-2,13	-9,67	-12,94	86,34	128,58	8,70	-33,54	73,74	119,44	-39,87	-85,58
	41	0,42	0,77	-1,31	-1,67	-2,15	7,60	-12,96	-21,95	128,46	179,91	-33,67	-85,12	119,30	174,41	-85,71	-140,82
	42	0,77	1,20	-1,67	-2,12	7,57	19,72	-21,98	-33,36	179,76	240,35	-85,27	-145,86	174,25	238,68	-140,98	-205,41
	43	29,44	29,44	-28,46	-28,46	8,07	8,07	7,48	7,48	27,31	15,70	-182,14	-170,53	58,09	50,56	-147,28	-139,74
Travamento																	

Tabela A14. Tensões máximas para cada ação considerada no modelo 2 B em arco (MPa).

Modelo 2 (B)		Carga permanente				Sobrecarga				Vento +0,2				Vento -0,4			
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ
K	1	1,27	-0,45	-2,31	-0,47	4,73	-2,48	-9,96	-2,74	538,62	369,69	-514,65	-345,72	605,83	337,11	-606,01	-337,29
	2	-0,45	1,37	-0,47	-2,17	-2,48	4,48	-2,74	-9,70	369,69	251,53	-345,72	-227,56	337,11	195,34	-337,29	-195,53
	3	1,37	3,21	-2,17	-3,88	4,48	11,69	-9,70	-16,92	251,53	184,16	-227,56	-160,19	195,34	180,54	-195,53	-180,72
L	4	1,27	-0,45	-2,31	-0,47	4,73	-2,48	-9,96	-2,74	726,56	352,08	-693,72	-319,24	635,20	360,50	-626,51	-351,82
	5	-0,45	1,37	-0,47	-2,17	-2,48	4,48	-2,74	-9,70	352,08	79,17	-319,24	-46,33	360,50	111,20	-351,82	-102,52
	6	1,37	3,21	-2,17	-3,88	4,48	11,69	-9,70	-16,92	79,17	125,01	-46,33	-92,17	111,20	121,39	-102,52	-112,70
A (0 - 55°)	7	2,91	1,83	-3,92	-2,81	50,44	23,61	-61,58	-35,76	790,55	424,95	-695,75	-330,14	791,05	421,60	-758,83	-389,38
	8	1,83	0,97	-2,81	-1,92	23,67	2,28	-35,70	-15,32	425,85	111,47	-329,25	-14,87	422,51	104,45	-388,47	-70,41
	9	0,97	0,31	-1,92	-1,23	2,33	0,10	-15,27	-14,05	112,23	248,24	-14,11	-150,12	105,22	196,21	-69,64	-160,64
	10	0,30	-0,19	-1,23	-0,72	0,13	10,94	-14,01	-25,83	248,86	458,52	-149,50	-359,16	196,85	409,83	-160,01	-373,00
	11	-0,19	-0,35	-0,72	-0,53	10,96	17,66	-25,80	-33,51	459,00	615,43	-358,68	-515,11	410,32	569,89	-372,50	-532,07
	12	-0,35	-0,11	-0,53	-0,75	17,67	20,73	-33,49	-37,56	615,77	718,59	-514,77	-617,58	570,24	675,98	-531,72	-637,47
	13	-0,11	0,02	-0,75	-0,86	20,74	20,63	-37,56	-38,46	718,78	767,71	-617,38	-666,30	676,19	727,85	-637,26	-688,92
	14	0,02	0,07	-0,86	-0,89	20,63	17,85	-38,47	-36,70	767,77	762,69	-666,25	-661,17	727,91	725,35	-688,85	-686,29
	15	0,07	0,06	-0,89	-0,86	17,85	12,89	-36,71	-32,76	762,61	703,53	-661,25	-602,18	725,27	668,49	-686,37	-629,59
	16	0,06	0,00	-0,86	-0,78	12,87	6,23	-32,77	-27,14	703,30	590,38	-602,40	-489,48	668,27	557,42	-629,81	-518,96
	17	0,00	-0,09	-0,78	-0,68	6,21	-1,61	-27,16	-20,35	590,02	423,54	-489,85	-323,37	557,06	392,42	-519,32	-354,68
	18	-0,09	-0,20	-0,68	-0,55	-1,63	-10,12	-20,37	-12,88	423,03	241,36	-323,88	-142,21	391,91	211,85	-355,19	-175,12
	19	-0,20	-0,31	-0,55	-0,43	-10,15	-5,25	-12,90	-18,81	240,91	82,44	-142,66	15,81	211,40	54,30	-175,56	-18,46
	20	-0,31	-0,31	-0,43	-0,42	-5,27	2,04	-18,83	-27,16	82,05	150,29	15,43	-52,81	53,91	114,90	-18,84	-79,83
	21	-0,31	-0,21	-0,42	-0,52	2,02	8,49	-27,18	-34,65	149,96	260,87	-53,13	-164,04	114,58	224,61	-80,15	-190,18
	22	-0,21	-0,13	-0,52	-0,59	8,48	13,59	-34,67	-40,80	260,61	347,29	-164,30	-250,98	224,36	310,41	-190,44	-276,49
	23	-0,13	-0,09	-0,59	-0,63	13,58	16,84	-40,81	-45,08	347,10	409,32	-251,18	-313,40	310,21	372,06	-276,69	-338,54
A (55° - 115°)	24	-0,09	-0,07	-0,63	-0,65	16,84	17,75	-45,09	-47,01	409,19	446,81	-313,53	-351,15	371,93	409,43	-338,67	-376,16
	25	-0,07	-0,09	-0,65	-0,63	17,75	16,84	-47,01	-45,09	446,74	459,66	-351,22	-364,13	409,36	422,40	-376,23	-389,27
	26	-0,09	-0,13	-0,63	-0,59	16,84	13,58	-45,08	-40,81	459,65	447,83	-364,13	-352,31	422,40	410,95	-389,27	-377,82
	27	-0,13	-0,21	-0,59	-0,52	13,59	8,48	-40,80	-34,67	447,89	411,36	-352,24	-315,71	411,01	375,10	-377,76	-341,85
	28	-0,21	-0,31	-0,52	-0,42	8,49	2,02	-34,65	-27,18	411,49	350,34	-315,58	-254,43	375,23	314,95	-341,72	-281,45
	29	-0,31	-0,31	-0,42	-0,43	2,04	-5,27	-27,16	-18,83	350,53	264,92	-254,24	-168,63	315,14	230,65	-281,26	-196,77
	30	-0,31	-0,20	-0,43	-0,55	-5,25	-10,15	-18,81	-12,90	265,18	175,56	-168,37	-78,75	230,91	142,65	-196,52	-108,26
	31	-0,20	-0,09	-0,55	-0,68	-10,12	-1,63	-12,88	-20,37	175,78	102,61	-78,54	-5,38	142,86	71,31	-108,05	-36,49
	32	-0,09	0,00	-0,68	-0,78	-1,61	6,21	-20,35	-27,16	102,78	51,32	-5,20	46,26	71,47	18,36	-36,32	16,79
	33	0,00	0,06	-0,78	-0,86	6,23	12,87	-27,14	-32,77	51,45	91,19	46,38	6,64	18,48	56,15	16,91	-20,76
	34	0,06	0,07	-0,86	-0,89	12,89	17,85	-32,76	-36,71	91,27	114,13	6,73	-16,13	56,23	76,79	-20,69	-41,25
	35	0,07	0,02	-0,89	-0,86	17,85	20,63	-36,70	-38,47	114,17	120,08	-16,09	-22,01	76,82	80,22	-41,22	-44,62
	36	0,02	-0,11	-0,86	-0,75	20,63	20,74	-38,46	-37,56	120,07	109,03	-22,02	-10,98	80,21	66,44	-44,63	-30,86
	37	-0,11	-0,35	-0,75	-0,53	20,73	17,67	-37,56	-33,49	108,98	81,01	-11,03	16,94	66,38	35,47	-30,92	-0,01
	38	-0,35	-0,19	-0,53	-0,72	17,66	10,96	-33,51	-25,80	80,92	61,68	16,85	36,09	35,37	47,85	-0,12	-12,59
	39	-0,19	0,30	-0,72	-1,23	10,94	0,13	-25,83	-14,01	61,54	123,11	35,95	-25,63	47,70	112,60	-12,74	-77,64
A (115°-180°)	40	0,31	0,97	-1,23	-1,92	0,10	2,33	-14,05	-15,27	122,92	201,08	-25,81	-103,97	112,40	194,07	-77,83	-159,50
	41	0,97	1,83	-1,92	-2,81	2,28	23,67	-15,32	-35,70	200,86	295,41	-104,20	-198,75	193,84	292,07	-159,74	-257,97
	42	1,83	2,91	-2,81	-3,92	23,61	50,44	-35,76	-61,58	295,14	405,83	-199,02	-309,71	291,79	406,33	-258,25	-372,80
Travamento	43	45,68	45,68	-44,81	-44,81	3,95	3,95	2,38	2,38	115,51	96,00	-265,72	-246,21	136,03	122,49	-239,23	-225,69

Tabela A15. Tensões máximas para cada ação considerada no modelo 3 A em arco (MPa).

Modelo 3 (A)		Carga permanente				Sobrecarga				Vento +0,2				Vento -0,4			
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ
K	1	0,51	-0,47	-1,66	-0,48	-1,16	-3,62	-6,59	-4,13	772,83	375,61	-755,51	-358,30	965,14	316,67	-967,15	-318,68
	2	-0,47	0,69	-0,48	-1,45	-3,62	-1,67	-4,13	-6,08	375,61	108,40	-358,30	-91,09	316,67	4,77	-318,68	-6,78
	3	0,69	1,87	-1,45	-2,43	-1,67	0,79	-6,08	-8,54	108,40	46,12	-91,09	-28,80	4,77	3,20	-6,78	-5,21
L	4	0,51	-0,47	-1,66	-0,48	-1,16	-3,62	-6,59	-4,13	861,88	367,41	-839,84	-345,37	650,25	407,02	-647,53	-404,31
	5	-0,47	0,69	-0,48	-1,45	-3,62	-1,67	-4,13	-6,08	367,41	35,45	-345,37	-13,41	407,02	131,30	-404,31	-128,59
	6	0,69	1,87	-1,45	-2,43	-1,67	0,79	-6,08	-8,54	35,45	156,04	-13,41	-134,00	131,30	179,63	-128,59	-176,92
A (0 - 55°)	7	2,14	1,59	-3,08	-2,51	6,68	-1,53	-29,99	-22,29	57,00	220,46	26,55	-136,91	121,63	82,61	-97,14	-58,12
	8	1,59	1,12	-2,51	-2,02	-1,51	-8,11	-22,27	-16,18	220,87	358,04	-136,51	-273,68	83,05	235,71	-57,68	-210,34
	9	1,12	0,73	-2,03	-1,62	-8,09	-11,55	-16,16	-13,22	358,37	469,04	-273,34	-384,02	236,08	361,43	-209,97	-335,31
	10	0,73	0,41	-1,62	-1,28	-11,54	-8,26	-13,21	-16,99	469,30	553,32	-383,76	-467,77	361,73	459,58	-335,01	-432,86
	11	0,41	0,15	-1,29	-1,01	-8,25	-6,18	-16,99	-19,57	553,51	610,73	-467,58	-524,81	459,80	530,00	-432,63	-502,83
	12	0,15	-0,06	-1,01	-0,79	-6,17	-5,17	-19,56	-21,08	610,85	641,21	-524,69	-555,05	530,15	572,59	-502,68	-545,12
	13	-0,06	-0,23	-0,79	-0,61	-5,16	-5,09	-21,07	-21,66	641,25	644,69	-555,00	-558,44	572,67	587,30	-545,05	-559,68
	14	-0,23	-0,35	-0,61	-0,48	-5,09	-5,79	-21,66	-21,46	644,66	621,18	-558,47	-534,98	587,30	574,09	-559,67	-546,46
	15	-0,35	-0,37	-0,48	-0,45	-5,79	-7,14	-21,47	-20,62	621,08	570,71	-535,08	-484,71	574,02	532,99	-546,54	-505,51
	16	-0,37	-0,29	-0,45	-0,52	-7,15	-9,00	-20,63	-19,29	570,54	493,36	-484,88	-407,70	532,84	464,05	-505,65	-436,87
	17	-0,29	-0,24	-0,52	-0,56	-9,00	-11,21	-19,29	-17,59	493,12	389,24	-407,94	-304,07	463,83	367,39	-437,09	-340,65
	18	-0,24	-0,20	-0,56	-0,59	-11,21	-13,63	-17,60	-15,69	388,92	277,20	-304,38	-192,66	367,10	261,84	-340,94	-235,69
	19	-0,20	-0,17	-0,59	-0,61	-13,64	-13,72	-15,69	-16,12	276,92	176,21	-192,94	-92,24	261,57	166,36	-235,96	-140,74
	20	-0,17	-0,16	-0,61	-0,63	-13,72	-11,82	-16,13	-18,53	175,96	86,42	-92,49	-2,96	166,12	81,09	-140,98	-55,95
A (55° - 115°)	21	-0,16	-0,15	-0,63	-0,63	-11,83	-10,15	-18,54	-20,72	86,20	75,05	-3,18	7,96	80,87	18,56	-56,17	6,15
	22	-0,15	-0,14	-0,63	-0,63	-10,16	-8,85	-20,73	-22,54	74,86	141,67	7,77	-59,04	18,37	82,67	5,96	-58,34
	23	-0,14	-0,14	-0,63	-0,64	-8,85	-8,05	-22,55	-23,85	141,51	196,80	-59,21	-114,50	82,52	136,30	-58,50	-112,28
	24	-0,14	-0,14	-0,64	-0,64	-8,05	-7,91	-23,86	-24,51	196,67	240,36	-114,63	-158,32	136,17	179,36	-112,41	-155,60
	25	-0,14	-0,14	-0,64	-0,64	-7,91	-8,05	-24,51	-23,86	240,26	272,28	-158,42	-190,45	179,26	211,79	-155,70	-188,23
	26	-0,14	-0,14	-0,64	-0,63	-8,05	-8,85	-23,85	-22,55	272,21	292,52	-190,52	-210,83	211,71	233,53	-188,30	-210,12
	27	-0,14	-0,15	-0,63	-0,63	-8,85	-10,16	-22,54	-20,73	292,48	301,05	-210,87	-219,43	233,49	244,56	-210,17	-221,24
	28	-0,15	-0,16	-0,63	-0,63	-10,15	-11,83	-20,72	-18,54	301,04	297,85	-219,44	-216,24	244,55	244,86	-221,26	-221,57
	29	-0,16	-0,17	-0,63	-0,61	-11,82	-13,72	-18,53	-16,13	297,87	282,92	-216,22	-201,27	244,87	234,43	-221,56	-211,11
	30	-0,17	-0,20	-0,61	-0,59	-13,72	-13,64	-16,12	-15,69	282,98	264,93	-201,22	-183,17	234,47	221,91	-211,07	-198,51
A (115°-180°)	31	-0,20	-0,24	-0,59	-0,56	-13,63	-11,21	-15,69	-17,60	264,97	252,48	-183,13	-170,63	221,94	215,91	-198,49	-192,46
	32	-0,24	-0,29	-0,56	-0,52	-11,21	-9,00	-17,59	-19,29	252,50	245,58	-170,61	-163,69	215,92	216,44	-192,45	-192,97
	33	-0,29	-0,37	-0,52	-0,45	-9,00	-7,15	-19,29	-20,63	245,59	244,26	-163,68	-162,34	216,43	223,48	-192,98	-200,04
	34	-0,37	-0,35	-0,45	-0,48	-7,14	-5,79	-20,62	-21,47	244,25	248,50	-162,34	-166,59	223,46	237,05	-200,07	-213,66
	35	-0,35	-0,23	-0,48	-0,61	-5,79	-5,09	-21,46	-21,66	248,48	258,31	-166,61	-176,44	237,00	257,10	-213,70	-233,80
	36	-0,23	-0,68	-0,61	-0,79	-5,09	-5,16	-21,66	-21,07	258,27	273,67	-176,47	-191,86	257,04	283,62	-233,86	-260,44
	37	-0,06	0,15	-0,79	-1,01	-5,17	-6,17	-21,08	-19,56	273,62	294,55	-191,91	-212,84	283,54	316,56	-260,52	-293,54
	38	0,15	0,41	-1,01	-1,29	-6,18	-8,25	-19,57	-16,99	294,49	320,93	-212,91	-239,35	316,46	355,88	-293,64	-333,05
	39	0,41	0,73	-1,28	-1,62	-8,26	-11,54	-16,99	-13,21	320,85	352,77	-239,43	-271,34	355,76	401,51	-333,17	-378,91
	40	0,73	1,12	-1,62	-2,03	-11,55	-8,09	-13,22	-16,16	352,67	390,01	-271,43	-308,77	401,38	453,39	-379,04	-431,05
	41	1,12	1,59	-2,02	-2,51	-8,11	-1,51	-16,18	-22,27	389,90	432,61	-308,88	-351,58	453,24	511,44	-431,20	-489,40
	42	1,59	2,14	-2,51	-3,08	-1,53	6,68	-22,29	-29,99	432,49	480,49	-351,70	-399,71	511,27	575,57	-489,56	-553,86
Travamento	43	29,45	29,45	-28,23	-28,23	15,49	15,49	14,61	14,61	277,75	262,09	-408,59	-392,93	286,81	296,92	-373,76	-383,87

Tabela A16. Tensões máximas para cada ação considerada no modelo 3 B em arco (MPa).

Modelo 3 (B)		Carga permanente				Sobrecarga				Vento +0,2				Vento -0,4			
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ
K	1	0,98	-0,57	-2,38	-0,58	-1,09	-4,58	-8,59	-5,10	1202,70	583,50	-1181,00	-561,86	1653,20	579,70	-1655,40	-581,84
	2	-0,57	1,21	-0,58	-2,12	-4,58	-1,61	-5,10	-8,07	583,50	167,44	-561,86	-145,80	579,70	14,02	-581,84	-16,16
	3	1,21	3,01	-2,12	-3,67	-1,61	1,88	-8,07	-11,56	167,44	67,12	-145,80	-45,48	14,02	41,70	-16,16	-43,84
L	4	0,98	-0,57	-2,38	-0,58	-1,09	-4,58	-8,59	-5,10	1345,40	571,31	-1317,80	-543,76	1268,90	695,21	-1265,80	-692,20
	5	-0,57	1,21	-0,58	-2,12	-4,58	-1,61	-5,10	-8,07	571,31	51,16	-543,76	-23,61	695,21	172,35	-692,20	-169,33
	6	1,21	3,01	-2,12	-3,67	-1,61	1,88	-8,07	-11,56	51,16	242,62	-23,61	-215,07	172,35	302,76	-169,33	-299,74
A (0 - 55°)	7	3,57	2,69	-4,74	-3,84	11,85	-0,55	-41,03	-29,28	67,40	324,19	37,23	-219,55	70,54	233,48	-39,99	-202,93
	8	2,69	1,94	-3,84	-3,08	-0,53	-10,42	-29,25	-19,99	324,70	540,34	-219,05	-434,69	234,02	465,20	-202,39	-433,56
	9	1,94	1,32	-3,08	-2,44	-10,41	-12,99	-19,97	-18,02	540,75	714,92	-434,27	-608,44	465,65	654,18	-433,11	-621,64
	10	1,32	0,81	-2,44	-1,90	-12,98	-8,08	-18,01	-23,54	715,25	847,69	-608,11	-740,56	654,53	800,14	-621,29	-766,89
	11	0,80	0,38	-1,90	-1,47	-8,07	-5,03	-23,53	-27,20	847,93	938,45	-740,32	-830,83	800,40	902,86	-766,62	-869,08
	12	0,38	0,05	-1,47	-1,11	-5,03	-3,63	-27,20	-29,22	938,60	987,05	-830,68	-879,14	903,03	962,20	-868,91	-928,07
	13	0,05	-0,22	-1,11	-0,83	-3,63	-3,67	-29,22	-29,82	987,11	993,43	-879,08	-885,40	962,28	978,05	-927,99	-943,77
	14	-0,22	-0,43	-0,83	-0,61	-3,67	-4,92	-29,82	-29,21	993,40	957,58	-885,43	-849,61	978,04	950,41	-943,78	-916,15
	15	-0,43	-0,44	-0,61	-0,58	-4,92	-7,15	-29,21	-27,61	957,46	879,54	-849,73	-771,82	950,30	879,30	-916,25	-845,25
	16	-0,44	-0,32	-0,58	-0,70	-7,16	-10,15	-27,62	-25,26	879,33	759,45	-772,03	-652,14	879,11	764,84	-845,45	-731,19
	17	-0,32	-0,22	-0,70	-0,78	-10,15	-13,68	-25,27	-22,38	759,14	597,46	-652,44	-490,76	764,55	607,20	-731,48	-574,13
	18	-0,22	-0,16	-0,78	-0,83	-13,69	-17,53	-22,38	-19,18	597,07	423,05	-491,16	-317,13	606,82	435,83	-574,51	-403,52
	19	-0,16	-0,12	-0,83	-0,87	-17,54	-15,90	-19,19	-21,46	422,70	265,81	-317,49	-160,60	435,48	280,31	-403,87	-248,70
	20	-0,12	-0,09	-0,87	-0,89	-15,91	-12,76	-21,46	-25,24	265,49	125,97	-160,92	-21,40	279,99	140,89	-249,02	-109,91
	21	-0,09	-0,07	-0,89	-0,91	-12,77	-10,00	-25,25	-28,66	125,69	100,26	-21,68	3,75	140,60	17,76	-110,19	12,65
	22	-0,07	-0,06	-0,91	-0,91	-10,00	-7,82	-28,67	-31,48	100,02	204,20	3,51	-100,67	17,52	118,80	12,41	-88,88
A (55° - 115°)	23	-0,06	-0,05	-0,91	-0,91	-7,83	-6,47	-31,48	-33,48	204,00	290,27	-100,88	-187,15	118,59	208,38	-89,09	-178,87
	24	-0,06	-0,05	-0,91	-0,92	-6,47	-6,15	-33,48	-34,43	290,10	358,33	-187,31	-255,54	208,20	281,25	-179,05	-252,09
	25	-0,05	-0,06	-0,92	-0,91	-6,15	-6,47	-34,43	-33,48	358,20	408,28	-255,67	-305,75	281,11	337,30	-252,23	-308,42
	26	-0,05	-0,06	-0,91	-0,91	-6,47	-7,83	-33,48	-31,48	408,20	440,06	-305,84	-337,70	337,20	376,45	-308,52	-347,78
	27	-0,06	-0,07	-0,91	-0,91	-7,82	-10,00	-31,48	-28,67	440,01	453,61	-337,75	-351,34	376,39	398,65	-347,85	-370,11
	28	-0,07	-0,09	-0,91	-0,89	-10,00	-12,77	-28,66	-25,25	453,60	448,91	-351,35	-346,66	398,62	403,86	-370,14	-375,37
	29	-0,09	-0,12	-0,89	-0,87	-12,76	-15,91	-25,24	-21,46	448,94	425,96	-346,63	-323,66	403,86	392,06	-375,37	-363,57
	30	-0,12	-0,16	-0,87	-0,83	-15,90	-17,54	-21,46	-19,19	426,03	398,30	-323,59	-295,86	392,11	376,78	-363,52	-348,19
A (115°-180°)	31	-0,16	-0,22	-0,83	-0,78	-17,53	-13,69	-19,18	-22,38	398,35	379,38	-295,81	-276,83	376,80	371,44	-348,17	-342,81
	32	-0,22	-0,32	-0,78	-0,70	-13,68	-10,15	-22,38	-25,27	379,41	369,22	-276,80	-266,62	371,44	376,06	-342,81	-347,43
	33	-0,32	-0,44	-0,70	-0,58	-10,15	-7,16	-25,26	-27,62	369,24	367,86	-266,61	-265,23	376,04	390,63	-347,45	-362,04
	34	-0,44	-0,43	-0,58	-0,61	-7,15	-4,92	-27,61	-29,21	367,85	375,28	-265,24	-272,67	390,59	415,13	-362,08	-386,63
	35	-0,43	-0,22	-0,61	-0,83	-4,92	-3,67	-29,21	-29,82	375,26	391,49	-272,69	-288,92	415,07	449,53	-386,69	-421,15
	36	-0,22	0,05	-0,83	-1,11	-3,67	-3,63	-29,82	-29,22	391,44	416,44	-288,97	-313,96	449,44	493,76	-421,23	-465,55
	37	0,05	0,38	-1,11	-1,47	-3,63	-5,03	-29,22	-27,20	416,38	450,11	-314,03	-347,76	493,66	547,78	-465,66	-519,78
	38	0,38	0,80	-1,47	-1,90	-5,03	-8,07	-27,20	-23,53	450,03	492,45	-347,84	-390,26	547,65	611,49	-519,91	-583,74
	39	0,81	1,32	-1,90	-2,44	-8,08	-12,98	-23,54	-18,01	492,35	543,39	-390,36	-441,40	611,34	684,80	-583,89	-657,35
	40	1,32	1,94	-2,44	-3,08	-12,99	-10,41	-18,02	-19,97	543,27	602,85	-441,52	-501,10	684,63	767,60	-657,51	-740,48
	41	1,94	2,69	-3,08	-3,84	-10,42	-0,53	-19,99	-29,25	602,72	670,76	-501,24	-569,28	767,41	859,77	-740,67	-833,02
	42	2,69	3,57	-3,84	-4,74	-0,55	11,85	-29,28	-41,03	670,60	747,00	-569,44	-645,83	859,56	961,16	-833,23	-934,84
Travamento	43	45,83	45,83	-44,30	-44,30	19,56	19,56	18,22	18,22	454,18	429,66	-618,33	-593,81	532,20	541,24	-632,92	-641,96

Tabela A17. Tensões máximas para cada ação considerada no modelo 4 A em arco (MPa).

Modelo 4 (A)		Carga permanente				Sobrecarga				Vento +0,2				Vento -0,4			
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ
K	1	0,45	-0,48	-1,61	-0,49	2,17	-2,04	-6,33	-2,12	974,62	507,43	-953,19	-485,99	1168,70	448,73	-1166,60	-446,62
	2	-0,48	0,64	-0,49	-1,41	-2,04	2,10	-2,12	-6,26	507,43	170,24	-485,99	-148,80	448,73	53,81	-446,62	-51,70
	3	0,64	1,76	-1,41	-2,33	2,10	6,31	-6,26	-10,47	170,24	58,38	-148,80	-36,94	53,81	18,21	-51,70	-16,10
L	4	0,45	-0,48	-1,61	-0,49	2,17	-2,04	-6,33	-2,12	1191,30	474,12	-1167,30	-450,07	977,95	513,50	-973,22	-508,77
	5	-0,48	0,64	-0,49	-1,41	-2,04	2,10	-2,12	-6,26	474,12	16,95	-450,07	7,10	513,50	114,06	-508,77	-109,33
	6	0,64	1,76	-1,41	-2,33	2,10	6,31	-6,26	-10,47	16,95	204,27	7,10	-180,21	114,06	225,11	-109,33	-220,38
A (0 - 55°)	7	2,61	1,81	-3,42	-2,60	28,61	11,59	-37,47	-21,26	49,60	258,77	27,75	-181,43	117,25	135,03	-88,51	-206,30
	8	1,81	1,15	-2,60	-1,92	11,64	-1,88	-21,21	-8,50	259,41	435,02	-180,79	-356,41	135,72	325,09	-105,61	-294,99
	9	1,15	0,63	-1,93	-1,38	-1,85	1,03	-8,46	-12,15	435,55	577,15	-355,88	-497,49	325,66	480,37	-294,42	-449,13
	10	0,63	0,23	-1,39	-0,96	1,05	7,62	-12,12	-19,49	577,56	684,79	-497,07	-604,30	480,83	600,49	-448,68	-568,34
	11	0,23	-0,07	-0,96	-0,64	7,64	11,57	-19,47	-24,21	685,09	757,67	-604,01	-676,58	600,82	685,12	-568,00	-652,30
	12	-0,08	-0,29	-0,64	-0,41	11,58	13,18	-24,20	-26,61	757,85	795,59	-676,40	-714,14	685,34	734,06	-652,08	-700,80
	13	-0,29	-0,25	-0,41	-0,44	13,18	12,76	-26,61	-27,00	795,66	798,47	-714,08	-716,89	734,16	747,17	-700,70	-713,71
	14	-0,25	-0,15	-0,44	-0,52	12,76	10,63	-27,00	-25,69	798,42	766,29	-716,93	-684,80	747,16	724,43	-713,73	-691,00
	15	-0,15	-0,09	-0,52	-0,56	10,63	7,11	-25,69	-22,99	766,12	699,13	-684,97	-617,98	724,30	665,90	-691,13	-632,73
	16	-0,09	-0,08	-0,56	-0,56	7,10	2,53	-23,00	-19,24	698,85	597,18	-618,26	-516,58	665,64	571,71	-632,98	-539,05
	17	-0,08	-0,09	-0,56	-0,54	2,51	-2,81	-19,25	-14,74	596,79	460,69	-516,97	-380,87	571,34	442,12	-539,42	-410,20
	18	-0,09	-0,12	-0,54	-0,50	-2,82	-8,55	-14,76	-9,84	460,18	314,36	-381,38	-235,56	441,63	301,82	-410,68	-270,86
	19	-0,12	-0,15	-0,50	-0,46	-8,57	-4,86	-9,86	-14,38	313,91	183,11	-236,02	-105,22	301,38	175,68	-271,30	-145,61
	20	-0,15	-0,19	-0,46	-0,41	-4,87	-0,12	-14,40	-19,97	182,70	67,26	-105,63	9,81	175,29	64,04	-146,00	-34,75
	21	-0,19	-0,23	-0,41	-0,37	-0,13	4,06	-19,98	-24,98	66,91	109,25	9,46	-32,89	63,70	61,43	-35,09	-32,82
	22	-0,23	-0,26	-0,36	-0,33	4,04	7,33	-24,99	-29,09	108,94	192,83	-33,19	-117,07	61,13	142,67	-33,12	-114,66
	23	-0,26	-0,28	-0,33	-0,31	7,32	9,39	-29,10	-31,98	192,57	260,33	-117,32	-185,08	142,43	208,78	-114,90	-181,25
	24	-0,28	-0,29	-0,31	-0,30	9,38	9,91	-31,98	-33,32	260,14	311,60	-185,28	-236,74	208,59	259,58	-181,45	-232,44
A (55° - 115°)	25	-0,29	-0,28	-0,30	-0,31	9,91	9,38	-33,32	-31,98	311,46	346,49	-236,89	-271,92	259,44	294,94	-232,58	-268,09
	26	-0,28	-0,26	-0,31	-0,33	9,39	7,32	-31,98	-29,10	346,40	364,92	-272,01	-290,52	294,85	314,77	-268,18	-288,10
	27	-0,26	-0,23	-0,33	-0,36	7,33	4,04	-29,09	-24,99	364,88	366,83	-290,56	-292,50	314,73	319,02	-288,14	-292,43
	28	-0,23	-0,19	-0,37	-0,41	4,06	-0,13	-24,98	-19,98	366,85	352,23	-292,48	-277,86	319,04	307,68	-292,42	-281,07
	29	-0,19	-0,15	-0,41	-0,46	-0,12	-4,87	-19,97	-14,40	352,31	321,15	-277,78	-246,63	307,75	280,78	-281,00	-254,04
	30	-0,15	-0,12	-0,46	-0,50	-4,86	-8,57	-14,38	-9,86	321,28	286,66	-246,50	-211,88	280,90	251,38	-253,92	-224,41
	31	-0,12	-0,09	-0,50	-0,54	-8,55	-2,82	-9,84	-14,76	286,76	261,76	-211,78	-186,78	251,46	232,45	-224,33	-205,32
	32	-0,09	-0,08	-0,54	-0,56	-2,81	2,51	-14,74	-19,25	261,82	246,50	-186,71	-171,39	232,50	224,06	-205,28	-196,84
	33	-0,08	-0,09	-0,56	-0,56	2,53	7,10	-19,24	-23,00	246,54	240,94	-171,36	-165,76	224,07	226,22	-196,83	-198,97
	34	-0,09	-0,15	-0,56	-0,52	7,11	10,63	-22,99	-25,69	240,95	245,09	-165,76	-169,90	226,19	238,92	-199,00	-211,73
	35	-0,15	-0,25	-0,52	-0,44	10,63	12,76	-25,69	-27,00	245,06	258,92	-169,93	-183,80	238,86	262,13	-211,79	-235,06
	36	-0,25	-0,29	-0,44	-0,41	12,76	13,18	-27,00	-26,61	258,86	282,42	-183,86	-207,42	262,04	295,80	-235,15	-268,92
	37	-0,29	-0,08	-0,41	-0,64	13,18	11,58	-26,61	-24,20	282,33	315,51	-207,51	-240,70	295,67	339,84	-269,04	-313,21
	38	-0,07	0,23	-0,64	-0,96	11,57	7,64	-24,21	-19,47	315,39	358,12	-240,82	-283,56	339,67	394,12	-313,37	-367,82
	39	0,23	0,63	-0,96	-1,39	7,62	1,05	-19,49	-12,12	357,96	410,13	-283,71	-335,88	393,93	458,53	-368,02	-432,62
	40	0,63	1,15	-1,38	-1,93	1,03	-1,85	-12,15	-8,46	409,94	471,41	-336,07	-397,54	458,30	532,88	-432,85	-507,43
A (115°-180°)	41	1,15	1,81	-1,92	-2,60	-1,88	11,64	-8,50	-21,21	471,19	541,81	-397,76	-468,37	532,61	616,98	-507,69	-592,06
	42	1,81	2,61	-2,60	-3,42	11,59	28,61	-21,26	-37,47	541,56	621,13	-468,62	-548,19	616,69	710,63	-592,36	-686,30
Travamento	43	29,30	29,30	-28,41	-28,41	3,79	3,79	1,93	1,93	406,70	378,75	-510,89	-482,94	401,73	400,02	-489,62	-487,91

Tabela A18. Tensões máximas para cada ação considerada no modelo 4 B em arco (MPa).

Modelo 4 (B)		Carga permanente				Sobrecarga				Vento +0,2				Vento -0,4			
ZONA	ELEM	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ	TMAXI	TMAXJ	TMINI	TMINJ
K	1	0,90	-0,58	-2,31	-0,59	3,88	-2,57	-9,11	-2,65	1515,00	786,74	-1488,20	-759,98	1821,60	698,19	-1819,00	-695,59
	2	-0,58	1,13	-0,59	-2,05	-2,57	3,80	-2,65	-9,02	786,74	261,61	-759,98	-234,86	698,19	82,60	-695,59	-80,00
	3	1,13	2,85	-2,05	-3,53	3,80	10,25	-9,02	-15,48	261,61	87,14	-234,86	-60,39	82,60	27,76	-80,00	-25,16
L	4	0,90	-0,58	-2,31	-0,59	3,88	-2,57	-9,11	-2,65	1855,80	735,47	-1825,70	-705,42	1525,00	799,86	-1519,10	-793,96
	5	-0,58	1,13	-0,59	-2,05	-2,57	3,80	-2,65	-9,02	735,47	21,42	-705,42	8,63	799,86	176,28	-793,96	-170,38
	6	1,13	2,85	-2,05	-3,53	3,80	10,25	-9,02	-15,48	21,42	316,42	8,63	-286,36	176,28	351,64	-170,38	-345,74
A (0 - 55°)	7	4,23	2,98	-5,25	-3,96	45,04	18,89	-56,24	-31,10	63,76	389,96	33,37	-292,83	179,29	205,29	-143,16	-169,17
	8	2,97	1,95	-3,97	-2,92	18,95	-1,78	-31,04	-11,32	390,75	664,66	-292,04	-565,96	206,14	501,35	-168,32	-463,53
	9	1,95	1,14	-2,92	-2,08	-1,74	3,48	-11,27	-17,49	665,32	886,24	-565,30	-786,22	502,06	743,27	-462,82	-704,03
	10	1,13	0,50	-2,08	-1,42	3,51	13,72	-17,46	-28,68	886,75	1054,10	-785,71	-953,08	743,83	930,43	-703,47	-890,07
	11	0,50	0,02	-1,42	-0,92	13,75	19,88	-28,66	-35,81	1054,50	1167,90	-952,71	-1066,10	930,85	1062,40	-889,65	-1021,20
	12	0,02	-0,33	-0,92	-0,55	19,90	22,43	-35,79	-39,34	1168,10	1227,20	-1065,90	-1125,00	1062,60	1138,70	-1020,90	-1097,00
	13	-0,33	-0,30	-0,55	-0,56	22,44	21,85	-39,34	-39,76	1227,30	1232,00	-1124,90	-1129,60	1138,90	1159,40	-1096,90	-1117,40
	14	-0,30	-0,13	-0,56	-0,70	21,85	18,62	-39,76	-37,55	1231,90	1182,20	-1129,70	-1079,90	1159,30	1124,20	-1117,40	-1082,20
	15	-0,13	-0,05	-0,70	-0,77	18,61	13,25	-37,56	-33,20	1182,00	1078,00	-1080,20	-976,13	1124,00	1033,20	-1082,40	-991,62
	16	-0,05	-0,02	-0,77	-0,79	13,23	6,23	-33,22	-27,22	1077,70	919,59	-976,47	-818,41	1032,90	886,84	-991,93	-845,84
	17	-0,02	-0,03	-0,79	-0,76	6,21	-1,94	-27,24	-20,10	919,11	707,41	-818,90	-607,20	886,39	685,32	-846,29	-645,23
	18	-0,03	-0,07	-0,76	-0,71	-1,96	-10,74	-20,12	-12,35	706,78	479,92	-607,83	-380,97	684,72	467,14	-645,83	-428,25
	19	-0,07	-0,12	-0,71	-0,64	-10,77	-4,48	-12,37	-19,67	479,35	275,85	-381,53	-178,03	466,59	270,98	-428,79	-233,18
	20	-0,12	-0,18	-0,64	-0,57	-4,50	3,02	-19,69	-28,22	275,35	95,72	-178,54	1,09	270,49	97,34	-233,66	-60,51
	21	-0,18	-0,24	-0,57	-0,51	3,00	9,62	-28,24	-35,87	95,28	155,95	0,65	-60,02	96,92	89,31	-60,94	-53,33
	22	-0,24	-0,28	-0,51	-0,46	9,60	14,83	-35,89	-42,13	155,57	286,15	-60,40	-190,97	88,94	215,90	-53,69	-180,65
	23	-0,28	-0,31	-0,46	-0,43	14,82	18,15	-42,14	-46,48	285,84	391,36	-191,29	-296,81	215,59	318,94	-180,95	-284,29
A (55° - 115°)	24	-0,31	-0,32	-0,43	-0,42	18,14	19,08	-46,49	-48,43	391,12	471,31	-297,05	-377,25	318,70	398,17	-284,54	-364,01
	25	-0,32	-0,31	-0,42	-0,43	19,08	18,14	-48,43	-46,49	471,14	525,81	-377,43	-432,10	397,99	453,39	-364,18	-419,58
	26	-0,31	-0,28	-0,43	-0,46	18,15	14,82	-46,48	-42,14	525,70	554,70	-432,21	-461,21	453,27	484,46	-419,70	-450,88
	27	-0,28	-0,24	-0,46	-0,51	14,83	9,60	-42,13	-35,89	554,66	557,93	-461,26	-464,52	484,41	491,29	-450,93	-457,82
	28	-0,24	-0,18	-0,51	-0,57	9,62	3,00	-35,87	-28,24	557,95	535,47	-464,50	-442,02	491,31	473,88	-457,80	-440,38
	29	-0,18	-0,12	-0,57	-0,64	3,02	-4,50	-28,22	-19,69	535,57	487,39	-441,92	-393,75	473,96	432,27	-440,30	-398,61
	30	-0,12	-0,07	-0,64	-0,71	-4,48	-10,77	-19,67	-12,37	487,55	434,05	-393,59	-340,09	432,41	386,79	-398,47	-352,85
	31	-0,07	-0,03	-0,71	-0,76	-10,74	-1,96	-12,35	-20,12	434,17	395,70	-339,97	-301,50	386,89	357,69	-352,75	-323,55
	32	-0,03	-0,02	-0,76	-0,79	-1,94	6,21	-20,10	-27,24	395,78	372,45	-301,41	-278,08	357,75	345,05	-323,50	-310,80
	33	-0,02	-0,05	-0,79	-0,77	6,23	13,23	-27,22	-33,22	372,49	364,35	-278,04	-269,90	345,06	348,89	-310,79	-314,62
	34	-0,05	-0,13	-0,77	-0,70	13,25	18,61	-33,20	-37,56	364,35	371,42	-269,90	-276,97	348,86	369,21	-314,65	-335,00
	35	-0,13	-0,30	-0,70	-0,56	18,62	21,85	-37,55	-39,76	371,38	393,65	-277,01	-299,27	369,13	405,95	-335,07	-371,89
	36	-0,30	-0,33	-0,56	-0,55	21,85	22,44	-39,76	-39,34	393,57	430,98	-299,35	-336,76	405,83	459,02	-372,01	-425,20
	37	-0,33	0,02	-0,55	-0,92	22,43	19,90	-39,34	-35,79	430,86	483,31	-336,88	-389,33	458,86	528,29	-425,36	-494,79
	38	0,02	0,50	-0,92	-1,42	19,88	13,75	-35,81	-28,66	483,16	550,52	-389,49	-456,85	528,09	613,58	-494,99	-580,49
	39	0,50	1,13	-1,42	-2,08	13,72	3,51	-28,68	-17,46	550,32	632,43	-457,05	-539,15	613,33	714,67	-580,73	-682,07
A (115°-180°)	40	1,14	1,95	-2,08	-2,92	3,48	-1,74	-17,49	-11,27	632,19	728,83	-539,39	-636,02	714,38	831,31	-682,36	-799,28
	41	1,95	2,97	-2,92	-3,97	-1,78	18,95	-11,32	-31,04	728,55	839,48	-636,30	-747,22	830,98	963,20	-799,61	-931,83
	42	2,98	4,23	-3,96	-5,25	18,89	45,04	-31,10	-56,24	839,17	964,09	-747,53	-872,46	962,83	1110,00	-932,20	-1079,40
	43	45,65	45,65	-44,52	-44,52	5,14	5,14	2,28	2,28	648,87	605,41	-780,27	-736,80	638,96	636,47	-749,21	-746,71
Travamento	43	45,65	45,65	-44,52	-44,52	5,14	5,14	2,28	2,28	648,87	605,41	-780,27	-736,80	638,96	636,47	-749,21	-746,71

Tabela A19. Umidades relativas internas obtidas pelo balanço de massa para a forma de duas águas (%).

Duas águas	EVF	EIF	EVF	EIF	EVF	EIF	EVF	EIF	EVF	EIF	EVF	EIF	EVF	EIF	EVF	EIF
Dados	MOD 1A	MOD 1A	MOD 1B	MOD 1B	MOD 2A	MOD 2A	MOD 2B	MOD 2B	MOD 3A	MOD 3A	MOD 3B	MOD 3B	MOD 4A	MOD 4A	MOD 4B	MOD 4B
Acont	223,65	223,65	289,57	289,57	232,06	232,06	300,6	300,6	317,35	317,35	414,55	414,55	325,76	325,76	425,4	425,4
Apm	115,2	115,2	144	144	115,2	115,2	144	144	115,2	115,2	144	144	115,2	115,2	144	144
Pwse	4,21	1,5	4,21	1,5	4,21	1,5	4,21	1,5	4,21	1,5	4,21	1,5	4,21	1,5	4,21	1,5
Pwsi	9,15	1,12	9,01	1,12	9	1,12	8,85	1,16	7,73	1,19	7,58	1,2	7,64	1,2	7,49	1,21
Uri	64,37	122,39	64,42	122,66	64,43	122,67	64,55	119,82	66,59	119,11	67,00	118,55	66,83	118,47	67,28	117,91

EVF – Estrutura no verão fechada; EVA – Estrutura no verão aberta; EIF – Estrutura no inverno fechada; EIA – Estrutura no inverno aberta.

Tabela A20. Umidades relativas internas obtidas pelo balanço de massa para a forma em arco (%).

Arco	EVF	EIF	EVF	EIF	EVF	EIF	EVF	EIF	EVF	EIF	EVF	EIF	EVF	EIF	EVF	EIF
Dados	MOD 1A	MOD 1A	MOD 1B	MOD 1B	MOD 2A	MOD 2A	MOD 2B	MOD 2B	MOD 3A	MOD 3A	MOD 3B	MOD 3B	MOD 4A	MOD 4A	MOD 4B	MOD 4B
Acont	228,74	228,74	296,76	296,76	240,35	240,35	312,05	312,05	322,44	322,44	421,56	421,56	334,05	334,05	436,85	436,85
Apm	115,2	115,2	144	144	115,2	115,2	144	144	115,2	115,2	144	144	115,2	115,2	144	144
pwse	4,21	1,5	4,21	1,5	4,21	1,5	4,21	1,5	4,21	1,5	4,21	1,5	4,21	1,5	4,21	1,5
pwsi	9,06	1,12	8,9	1,12	8,83	1,13	8,68	1,14	7,66	1,2	7,7	1,21	7,55	1,21	7,41	1,21
Uri	64,40	122,56	64,52	122,84	64,63	122,13	64,76	121,61	66,82	118,42	66,22	117,86	67,11	117,82	67,52	118,03

EVF – Estrutura no verão fechada; EVA – Estrutura no verão aberta; EIF – Estrutura no inverno fechada; EIA – Estrutura no inverno aberta.

Tabela A21. Temperaturas internas obtidas pelo balanço de energia.

Forma	Modelo	Temperatura interna °C			
		EVF	EVA	EIF	EIA
Duas águas	MOD 1A	44,10	29,90	8,60	12,80
	MOD 1B	43,81	29,90	8,66	12,83
	MOD 2A	43,78	29,90	8,70	12,80
	MOD 2B	43,44	29,90	9,17	12,83
	MOD 3A	40,87	29,90	9,65	12,80
	MOD 3B	40,50	29,90	9,74	12,83
	MOD 4A	40,65	29,90	9,72	12,80
	MOD 4B	40,28	29,90	9,81	12,83
Arco	MOD 1A	43,90	29,90	8,66	12,80
	MOD 1B	43,57	29,90	8,74	12,80
	MOD 2A	43,40	29,90	8,82	12,80
	MOD 2B	43,08	29,90	8,90	12,80
	MOD 3A	40,70	29,90	9,70	12,80
	MOD 3B	40,80	29,90	9,80	12,80
	MOD 4A	40,44	29,90	9,80	12,80
	MOD 4B	40,07	29,90	9,88	12,80

EVF – Estrutura no verão fechada; EVA – Estrutura no verão aberta; EIF – Estrutura no inverno fechada; EIA – Estrutura no inverno aberta.

Tabela A22. Médias das tensões máximas para cada modelo e combinação.

Modelos	Zona	1ª comb. (MPa)			2ª comb. (MPa)			3ª comb. (MPa)			4ª comb. (MPa)			5ª comb. (MPa)			6ª comb. (MPa)			7ª comb. (MPa)			Máx. dif.%
		Arco	2aguas	dif. %	Arco	2aguas	dif. %	Arco	2aguas	dif. %	Arco	2aguas	dif. %	Arco	2aguas	dif. %	Arco	2aguas	dif. %	Arco	2aguas	dif. %	
MOD 1A	Coluna	-0,91	24,70	104%	220,07	104,16	53%	208,32	154,48	26%	130,58	85,81	34%	123,53	116,00	6%	218,60	122,07	44%	206,86	172,39	17%	104%
	Telhado	-12,41	111,93	111%	255,27	167,85	34%	214,60	487,32	56%	140,86	209,22	33%	116,46	400,90	71%	245,49	252,84	3%	204,82	572,30	64%	111%
	Tirante	63,47	76,08	17%	74,09	49,14	34%	120,05	11,75	90%	83,20	80,45	3%	110,77	58,01	48%	91,90	76,52	17%	137,85	39,12	72%	90%
MOD 1B	Coluna	-0,23	39,94	101%	340,44	160,45	53%	325,94	234,51	28%	203,08	134,03	34%	194,37	178,46	8%	338,98	189,50	44%	324,47	263,55	19%	101%
	Telhado	-12,70	181,03	107%	380,85	255,39	33%	330,73	741,89	55%	215,85	329,23	34%	185,78	621,13	70%	370,75	393,50	6%	320,62	880,01	64%	107%
	Tirante	92,36	109,01	15%	144,89	85,73	41%	202,78	38,64	81%	140,78	121,59	14%	175,52	93,33	47%	167,43	121,12	28%	225,32	74,04	67%	81%
MOD 2A	Coluna	1,77	26,29	93%	240,87	290,39	17%	229,12	274,93	17%	145,73	199,13	27%	138,69	189,86	27%	241,54	309,57	22%	229,80	294,11	22%	93%
	Telhado	-2,35	127,79	102%	289,16	307,87	6%	246,14	433,45	43%	171,26	308,84	45%	145,45	384,19	62%	287,43	405,21	29%	244,41	530,79	54%	102%
	Tirante	53,33	68,92	23%	71,31	229,17	69%	117,27	181,55	35%	71,39	181,59	61%	98,96	153,02	35%	81,00	251,20	68%	126,96	203,58	38%	69%
MOD 2B	Coluna	6,58	43,19	85%	430,72	452,48	5%	415,79	492,51	16%	264,13	312,48	15%	255,17	336,50	24%	434,81	484,11	10%	419,87	524,13	20%	85%
	Telhado	16,13	205,17	92%	459,96	479,95	4%	416,09	689,50	40%	291,98	487,81	40%	265,66	613,54	57%	472,70	636,98	26%	428,83	846,53	49%	92%
	Tirante	69,87	96,84	28%	212,00	357,95	41%	244,91	337,66	27%	158,70	273,10	42%	178,45	260,92	32%	216,74	384,07	44%	249,65	363,78	31%	44%
MOD 3A	Coluna	-2,07	23,18	109%	421,90	324,66	23%	411,06	350,14	15%	250,67	216,80	14%	244,17	232,09	5%	419,71	341,64	19%	408,88	367,12	10%	109%
	Telhado	-11,97	117,74	110%	469,14	435,00	-8%	424,28	732,79	42%	269,40	375,17	28%	242,48	553,85	56%	459,42	524,44	12%	414,55	822,23	50%	110%
	Tirante	64,47	112,97	43%	419,12	168,85	60%	449,84	139,22	69%	291,20	189,13	35%	309,64	171,36	45%	437,71	225,69	48%	468,43	196,07	58%	69%
MOD 3B	Coluna	-1,66	35,36	105%	655,11	501,21	23%	723,30	536,71	26%	390,66	334,20	14%	431,57	355,50	18%	652,79	526,98	19%	720,98	562,49	22%	105%
	Telhado	-11,80	185,46	106%	714,09	661,61	-8%	717,99	1116,35	36%	416,34	577,19	28%	418,68	850,03	51%	704,23	802,99	12%	708,13	1257,73	44%	106%
	Tirante	93,51	117,94	21%	682,85	287,55	58%	815,57	250,98	69%	464,72	251,67	46%	544,35	229,73	58%	706,33	330,17	53%	839,05	293,60	65%	69%
MOD 4A	Coluna	2,74	23,15	88%	556,63	467,11	16%	543,11	477,70	12%	336,36	302,23	10%	328,25	308,59	6%	558,35	484,05	13%	544,83	494,64	9%	88%
	Telhado	8,53	130,49	93%	555,34	490,30	12%	518,56	727,70	29%	341,61	420,86	19%	319,54	563,30	43%	561,99	589,61	5%	525,21	827,01	36%	93%
	Tirante	46,70	76,00	39%	590,84	481,73	18%	602,25	472,78	21%	376,59	340,22	10%	383,44	334,85	13%	595,38	509,44	14%	606,79	500,49	18%	39%
MOD 4B	Coluna	5,28	38,65	86%	862,70	725,65	16%	845,78	737,57	13%	522,22	472,13	10%	512,07	479,28	6%	866,02	754,02	13%	849,10	765,94	10%	86%
	Telhado	16,93	209,38	92%	849,70	757,25	11%	802,79	1116,94	28%	526,45	658,18	20%	498,30	874,00	43%	862,84	917,36	6%	815,93	1277,06	36%	92%
	Tirante	71,62	106,54	33%	941,90	761,40	19%	956,71	749,66	22%	598,42	524,94	12%	607,30	517,89	15%	948,08	795,37	16%	962,88	783,63	19%	33%

Os destaques em cinza escuro representam as ocorrências em que as tensões da forma de duas águas foram superiores às da forma em arco. Já os destaques em cinza claro representam as ocorrências em que as médias das tensões da forma em arco foram superiores às da forma de duas águas.