



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO PARAMÉTRICO DE COBERTURAS DE GALPÕES
TRELIÇADAS EM AÇO**

FILIFE TRIGUEIRO PEREIRA

POMBAL – PB

2021

FILIFE TRIGUEIRO PEREIRA

ESTUDO PARAMÉTRICO DE COBERTURAS DE GALPÕES
TRELIÇADAS EM AÇO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador(a): Prof.(a) Eric Mateus
Fernandes Bezerra

POMBAL – PB

2021

P429e Pereira, Felipe Trigueiro.
Estudo paramétrico de coberturas de galpões treliçadas em aço / Felipe Trigueiro Pereira. - Pombal, 2021.
47f. : il. Color

Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2021.

"Orientação: Prof. Me Eric Mateus Fernandes Bezerra".
Referências.

1. Treliças. 2. AutoMETAL. 3. Cobertura Metálica. 4. Software VisualVentos. I. Bezerra, Mateus Fernandes. II. Título.

CDU 693.972(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

FILIPE TRIGUEIRO PEREIRA

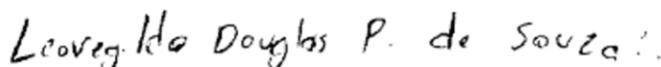
**ESTUDO PARAMÉTRICO DE COBERTURAS DE GALPÕES TRELIÇADAS EM
AÇO**

Trabalho de Conclusão de Curso do discente FILIPE TRIGUEIRO PEREIRA **APROVADO** em dezoito de outubro de 2021 pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande.

Registre-se e publique-se.



Prof. Me. Eric Mateus Fernandes Bezerra
(Orientador – UFCG)



Prof^a. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza
(Membro Interno – UFCG)



Prof. Me. Francisco Rosendo Sobrinho
(Membro Externo – Centro Universitário Christus)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado de forma que eu pudesse desenvolver qualidades que me permitem evoluir cada vez mais como ser humano. Pela fé e esperança que me fazem ter objetivos significativos na vida e por manter a minha mente focada nesses, superar com sucesso todos os obstáculos que surgem.

Agradeço à toda minha família, que mesmo de tão longe torcem, incentivam e me dão sustentação em qualquer escolha que eu faça. Em especial, agradeço à minha mãe, Fabiana Carreiro Trigueiro Pereira, pela sua garra, dedicação, abnegação, amor, carinho, atenção, companheirismo e paciência para que juntas vivêssemos momentos inesquecíveis.

Ao meu pai Firmino José Pereira Neto, apesar de ter tido um AVC, que o deixou incapacitado, estaria extremamente feliz, pelos seus ensinamentos e seu cuidado para comigo, os seus elogios, por me fazer acreditar que uma pessoa é capaz de fazer qualquer coisa.

Aos meus tios, Leomar Trigueiro, Demostenes Trigueiro pela sua dedicação em me transformar em uma pessoa honesta, leal e de caráter, fazendo sempre o possível pra me ver bem. À todos da minha família que, mesmo após os acontecimentos na mesma, me ajudaram de todas as formas possíveis. Pelos seus exemplos de força, garra, perseverança, zelo e profissionalismo que sempre me lembram de jamais permitir que alguém duvide da capacidade e do meu valor como pessoa.

Agradeço aos meus amigos, aos antigos e aos mais recentes por todos os momentos pelos quais passamos juntos, sejam eles de boas risadas ou lágrimas. Por me fazerem um ser humano melhor, e entenderem quando eu tive de abrir mão de estar em sua companhia para cumprir com os meus deveres.

Aos meus amigos que fiz durante a vivência acadêmica, por sua paciência, pela companhia e pelo companheirismo para ultrapassarmos todos os obstáculos que a UFCG-Campus Pombal nos proporcionou.

Ao meu orientador Prof. Me. Eric Mateus Fernandes Bezerra por se mostrar sempre acessível em repassar seus conhecimentos e ensinamentos, por se mostrar um profissional ímpar capaz de exercer sua profissão com tanta dedicação estando

sempre dispostos a fazerem além daquilo que é requerido, por contribuir de forma significativa para o meu crescimento profissional.

Agradeço a Banca Examinadora pela disponibilidade em contribuir com a melhoria deste projeto e com a minha formação acadêmica.

“Seja útil a quem te ama”

(Hélião 2011)

RESUMO

O presente trabalho refere-se ao de um galpão metálico com variação de parâmetros tais como tipo da treliça, materiais e perfis empregados. Foi adotado como modelo base um galpão de duas quedas com cobertura treliçada com banzos superiores inclinados e banzo inferior reto, fechado nas laterais e aberto na frente e fundo. Para tanto, foi utilizado o *software* VisualVentos na determinação da ação do vento e o *software* AutoMETAL no dimensionamento dos elementos da treliça. As treliças foram avaliadas para os casos em que eram completamente constituídas por perfis tipo U simples e para os casos em que o perfil U era usado nos banzos, enquanto nas diagonais e montantes eram adotadas cantoneiras duplas opostas. Com relação ao material, foram avaliados o aço A36 e o aço SAE 1010. Em todos os casos, a treliça Warren obteve o menor consumo de aço do que as treliças do tipo Pratt e Howe, sendo esta última a que apresentou o pior resultado. Foi verificado ainda um desempenho melhor em termos de peso das treliças Warren formadas integralmente por perfis formados a frio em aço A36 do tipo U.

Palavras-chave: AutoMETAL. Treliças. Cobertura metálica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais tipos de produtos siderúrgicos laminados de utilização estrutural	17
Figura 2 – Componentes de um galpão	19
Figura 3 – Tipos de Treliça em estudo	21
Figura 4 - Carga de cisalhamento atuando no parafuso por contato	24
Figura 5 - Carga de cisalhamento atuando no parafuso por atrito	24
Figura 6 – Interface do VisualVentos	26
Figura 7 – Cargas atuantes na cobertura	27
Figura 8 – Sobre o AutoMETAL	29
Figura 9 – Interface do AutoMETAL para definição da geometria da treliça	30
Figura 10 - Cargas e coeficientes de forma do vento	31
Figura 11 – Cargas atuantes devido ao vento	31
Figura 12 – Definição do perfil U para as barras das treliças	32
Figura 13 – Lista de perfis dimensionados	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas de aços-carbono.....	14
Tabela 2 – Parâmetros fixos no estudo	25
Tabela 3 – Fatores de ponderação das ações utilizados no estudo	28
Tabela 4 – Fatores de ponderação das ações utilizados no estudo	29
Tabela 5 – Combinações dos coeficientes internos com externos para o vento a 0°	34
Tabela 6 – Combinações dos coeficientes internos com externos para o vento a 90°	34
Tabela 7 - Lista de perfis dimensionados	35
Tabela 8 - Consumo de aço as treliças do tipo Pratt, Howe e Warren com diagonais e montantes em perfis do tipo U.....	35
Tabela 9 - Consumo de aço as treliças do tipo Pratt, Howe e Warren com diagonais e montantes em perfis do tipo dupla cantoneira	35
Tabela 10 - Consumo de aço para os diferentes tipos de aço e perfil	36
Tabela 11 – Perfis utilizados e material.....	38

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1.	Propriedades do aço	15
2.2.	Tipos de perfis	16
2.3.	Coberturas treliçadas	18
2.3.1.	<i>Composição do galpão.....</i>	<i>19</i>
2.3.2.	<i>Tipos de treliças.....</i>	<i>20</i>
2.4.	Ligações	22
3.	METODOLOGIA.....	25
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
5.	CONCLUSÕES	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
	APÊNDICE A.....	42

1. INTRODUÇÃO

Segundo (OLIVEIRA; FALCÓN, 2013), as decisões tomadas durante a concepção de projetos estruturais devem ser feitas de modo racional, buscando minimizar o consumo de material, maximizar sua confiabilidade e/ou facilitar a sua produção, que possui reflexo nos custos. Entretanto, o elevado número de variáveis envolvidas na representação do comportamento dos sistemas estruturais torna esse processo pouco intuitivo. A definição da combinação que conduz à extração da melhor solução fica condicionada à experiência e sensibilidade do projetista. Com intuito de minimizar essa dependência e auxiliar na tomada de decisão, técnicas de projeto são desenvolvidas a fim de, dentre as inúmeras soluções possíveis, escolher aquela considerada ótima.

Em um estudo paramétrico, que se baseia no estudo do comportamento de um sistema a partir da variação de parâmetros, são analisados diversos comportamentos e alternativas para uma mesma estrutura e essas respostas podem culminar em ábacos, tabelas ou fórmulas para auxiliar no pré-dimensionamento, a fim de reduzir o tempo e os custos na fase de projeto.

No Brasil, a utilização de perfis de aço na confecção de galpões, coberturas, mezaninos, casas populares e edifícios de pequeno porte tem se intensificado. O uso desses perfis se deve, dentre outros motivos, por apresentarem elevada relação inércia/peso, que conferem maior flexibilidade ao projeto de arquitetura, menores prazos de execução e maior racionalização dos materiais e da mão-de-obra. As coberturas treliçadas, no entanto, são negligenciadas em projetos de arquitetura, gerando, em alguns casos, soluções ineficientes, provenientes de uma escolha inadequada de sua geometria, vão ou inclinação.

De forma a dar maior suporte à fase de concepção e orçamentação inicial de projetos de cobertura metálicas, este trabalho apresenta um estudo paramétrico dos sistemas treliçados comumente adotados em pequenas edificações, apresentando aqueles que geram menor peso próprio. A análise irá considerar como critérios iniciais o vão livre a vencer (10, 15, 20 e 25 m), o tipo de perfil adotado (U e dupla cantoneira), o aço (A36 ou SAE 1010) e o tipo de treliça (Warren, Pratt e Howe). Este estudo tem potencial subsidiar projetistas na estimativa do perfil e do sistema de cobertura que conduz à melhor solução de várias situações corriqueiras.

Na obtenção dos resultados, serão utilizados os softwares VisualVentos, que é uma ferramenta destinada ao cálculo da ação do vento de galpões com planta retangular e cobertura com duas quedas, e o AutoMETAL, que é destinado ao dimensionamento de elementos de treliças de coberturas metálicas. Ambas são ferramentas disponíveis gratuitamente por seus desenvolvedores.

Para atingir o objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

1. Definir um modelo base de galpão de planta retangular e cobertura em duas quedas para variação dos parâmetros;
2. Obter a ação do vento que será aplicada aos modelos;
3. Conceber os modelos de treliças de diferentes tipos (Warren, Pratt e Howe) e com diferentes vãos.
4. Dimensionar os elementos de cada modelo considerando diferentes tipos de perfis (U e dupla cantoneira) e materiais (aço ASTM A36 e SAE 1010);
5. Realizar uma análise comparativa do comportamento estrutural dos modelos gerados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Chiaverini (1996), o aço é constituído por uma liga de ferro e carbono, acrescidos por elementos como: silício, manganês, fósforo e enxofre, sendo resíduos do processo de fabricação e outros elementos de liga metálica que tem como objetivo aperfeiçoar suas propriedades físicas e mecânicas.

De acordo com sua composição químicas, o aço pode ser classificado em dois tipos, sendo aços-carbono, que são aços formados de teores habituais de elementos residuais, e aços-liga, sendo aços semelhantes aos aços-carbono, no entanto são acrescidos de elementos de liga metálicas ou apresentam teores de elementos residuais significativamente elevados.

Os aços-carbono são os tipos de aços mais comumente utilizados, já que a adição do aço na liga proporciona um aumento de resistência em comparação ao ferro puro. Nas estruturas usuais do aço, grande parte dos aços carbonos estruturais possuem em sua composição 98% de ferro e de 0,2 a 1% de carbono e aproximadamente 1% de manganês.

Os aços com o aumento do teor de carbono aumentam sua resistência e dureza, no entanto diminui sua ductilidade e soldabilidade, por isso são adicionadas quantidades baixas de outros elementos de liga com o intuito de melhorar as propriedades do aço, assim tendo o máximo de propriedades de uma liga com baixo teor carbono.

Os principais tipos de aço-carbono usados em estruturas, conforme a ABNT, ASTM e das normas europeias EN, são os apresentados na Tabela 1, abaixo.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas de aços-carbono.

Especificação	Teor de Carbono (%)	Limite de Escoamento f_y (Mpa)	Resistência a Ruptura f_u (Mpa)
ABNT MR 250	Baixo	250	400
ASTM A7	-	242	370 – 500
ASTM A36	0,25 – 0,29	250 (36 ksi)	400 - 500
ASTM A307 (parafuso)	Baixo	-	415
ASTM A325 (parafuso)	Médio	635 (mín.)	825 (mín.)
EN S 235	Baixo	235	360

Fonte: O Autor (2021)

Os aços de baixa liga, são os aços carbono acrescidos de componentes como o cobre, silício, manganês, dentre outros, que em quantidades baixas trazem um aumento de resistência do aço, por meio da modificação da sua estrutura. Em decorrência desse acréscimo, é possível obter uma resistência elevada utilizando-se um teor de carbono com 0,20%, o que permite uma boa soldabilidade. Os mais utilizados no Brasil são os de alta e média resistências mecânicas, soldáveis e com características de elevada resistência atmosférica (obtida pela adição de 0,25% a 0,40% de cobre).

2.1. Propriedades do aço

As propriedades mecânicas são características importantes, no que diz respeito a sua aplicação na engenharia. Suas propriedades mecânicas irão determinar o comportamento dos aços quando submetidos a esforços mecânicos e correspondem a capacidade em transmitir e resistir as tensões, evitando excesso de deformação ou uma possível ruptura.

Conforme Pfeil (2009), considera-se ductibilidade, a capacidade do material de sofrer deformações através de esforços, sem romper. Os aços quando sujeitos a tensões elevadas, sofrem deformações a fim de redistribuir as tensões, para assim resistir aos esforços. Quando mais dúctil for o aço, mais a área do mesmo será alongada ou reduzida antes da ruptura.

Assim sendo, a ductilidade tem importância já que grandes deformações associadas a pega metálica estar associado o processo de ruptura, fornecendo assim avisos da atuação de cargas elevadas.

Outra propriedade importante para o estudo dos aços é a corrosão. Segundo Dias (2015), corrosão é definida como o conjunto de alterações, sejam elas físicas ou químicas, que ocorrem com uma substância por meio de ações de agentes externos da natureza. Sendo um procedimento em que algumas substâncias no ambiente reagem com o aço, ocasionando a perda da seção da área de aço, podendo nos piores casos levar a estrutura a ruína.

Para se evitar que o aço corra mais do que o esperado, algumas alternativas podem ser adotadas no projeto. Deve-se evitar pontos de sujeira e umidade, além de evitar pontos onde não seja possível realizar a pintura ou manutenção da peça

metálica. Além disso, é de suma importância evitar o contato entre diferentes tipos de metais, como o aço e o alumínio por exemplo, já que a estrutura molecular dos materiais pode beneficiar a transferência de elétrons, contribuindo para o aumento da oxidação dos materiais.

2.2. Tipos de perfis

A seção transversal de um perfil possui forte influência no seu comportamento estrutural, além da distribuição do material influenciar na quantidade, forma e espaço ocupado pelo perfil. Além disso, diminuir o espaço ocupado pelos elementos estruturais pode trazer vantagens estéticas, mas também práticas. Como, por exemplo, ampliando o espaço útil das edificações ou reduzir o consumo de material, reduzindo assim o custo da obra.

Os perfis estruturais podem ser fabricados das mais diversas formas e com diferentes aplicabilidades. No entanto, para utilização na construção são utilizados: perfis de chapas dobradas ou formados a frio, perfis laminados ou formados a quente, perfis soldados e perfis compostos.

O dobramento de chapas no local é denominado de perfil formado a frio, em decorrência da praticidade e economia exigida pelo mercado atual estão se tornando cada vez mais viáveis para uso na construção civil. Já que a flexibilidade das chapas finas de aço permite a fabricação de grande variedade de seções transversais.

Assim com toda a estrutura feita de aço, a construção com perfis de chapa dobrada possui um tempo de execução reduzido. Pois são compostos por chapas finas, com isso possuem leveza, facilidade de fabricação, de manuseio e de transporte, diminuindo assim custos com montagem e menor gasto com transporte, além de não ser preciso de maquinários pesados para içamento.

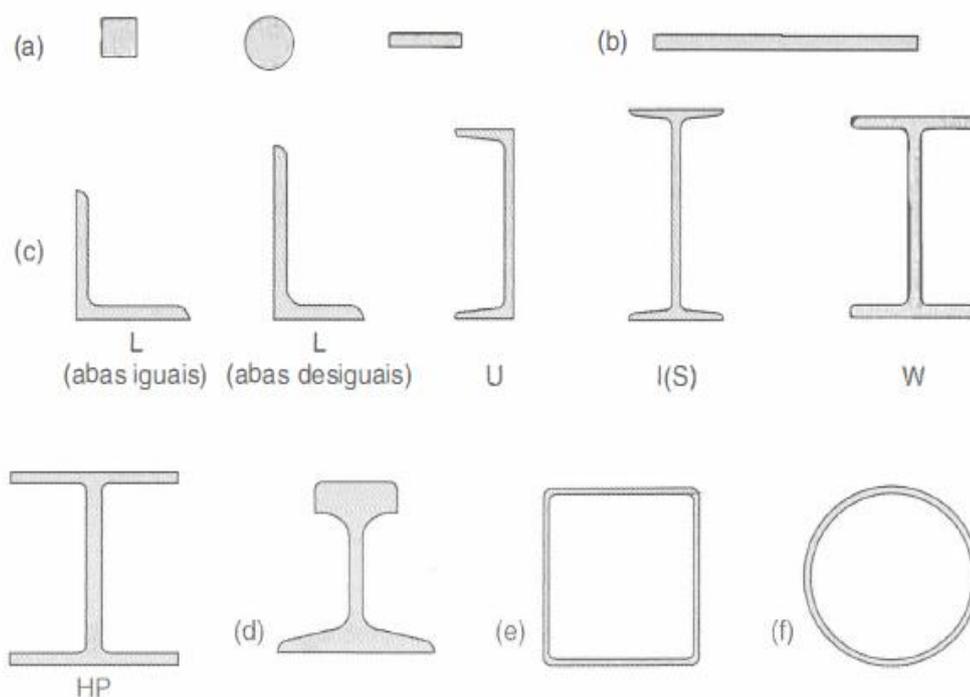
No entanto, é necessário ter certo cuidado com o seu comportamento estrutural, pois possui algumas peculiaridades em relação às outras estruturas. Por serem formadas por perfis com seções abertas e de pequena espessura, as barras possuem rigidez à torção baixa, com isso, podem provocar problemas de instabilidade, deformações excessivas ou atingir os limites da resistência do aço proeminente dos esforços de torção. E com isso, podendo provocar problemas estruturais graves caso a estrutura não seja projetada de forma correta.

Além do problema em relação a torção, outro que se destaca é a distorção da seção transversal, que se resume em um modo de instabilidade estrutural em que a seção transversal perde sua forma inicial quando sujeita a tensões de compressão. Na figura abaixo é mostrado uma ilustração simples dos efeitos gerados pelas forças horizontais onde gera uma distorção na seção principal.

Também outro fenômeno que se deve ter cuidado é o empenamento, ou seja, uma força de tração que ao ser aplicada no centro geométrico da seção transversal de um tirante constituído de um perfil Z pode provocar tensões de compressão nas extremidades do perfil.

Os perfis laminados são obtidos a partir da laminação a quente de tarugos, suas dimensões são limitadas e padronizadas. Os laminadores produzem perfis de grande eficiência estrutural, em forma de H, I, C, L, os quais são denominados correntemente perfis laminados, conforme é mostrado na figura 1.

Figura 1 - Principais tipos de produtos siderúrgicos laminados de utilização estrutural



Fonte: PFEIL (2009).

Os perfis tipo H, I e C são produzidos em grupos, sendo os elementos de cada grupo de altura constante e largura das abas variável. A variação da largura é obtida

com o aumento do espaçamento entre os rolos laminadores, de forma que a espessura da alma tem variação igual à da largura das abas.

Os perfis soldados são compostos pela junção de chapas ou de perfis laminados simples, sendo a ligação, em geral, soldada. As limitações impostas pelas máquinas de laminação deixam de existir se adotarmos os processos de solda para a confecção dos perfis.

Na maioria das vezes este tipo de perfil é utilizado em casos extraordinários, quando não é possível encontrar perfis laminados disponíveis no mercado. Com a evolução dos processos as soldas automatizadas, os processos de associação de chapas e de perfis conseguem ser competitivos em escala industrial e se obtém uma boa qualidade de execução.

A ABNT NBR 5884:2013 determinou três tipos de perfis soldados, sendo eles os Perfis CS (coluna soldada), CVS (colunas e vigas soldadas) e VS (viga soldada).

2.3. Coberturas treliçadas

Entende-se por cobertura todo sistema que possui função de cobrir alguma coisa, pode ser constituída de diferentes formatos, o que origina diversos modelos de coberturas. Em alguns casos possuem denominação originada pelo número de planos em que a água escoar, comumente conhecidos como águas do telhado.

Assim sendo, a cobertura é definida pelos números de águas no telhado, contendo declividades iguais e diferentes, na maioria dos casos depende do tipo das telhas, cada superfície é unida com a outra por meio de uma linha (viga) central conhecida como cumeeira ou afastadas contendo uma elevação, modelo conhecido como tipo americano (LOGSDON, 2002).

No que diz respeito as telhas, as mais utilizadas para coberturas metálicas são as de chapa de aço zincado, de fibrocimento, de policarbonato, plásticas e as alumínio, sendo que os critérios de escolha dependerão dos requisitos mínimos exigidos para a segurança, iluminação, ao vão a ser vencido e ao projeto arquitetônico.

O peso próprio das telhas está diretamente relacionado à espessura em milímetros e o tipo de material que constitui, os fabricantes costumam fornecer os números de apoios, sendo estes, no entanto determinar a distância das terças, isto faz com que a telha tenha um determinado valor de carga admissível.

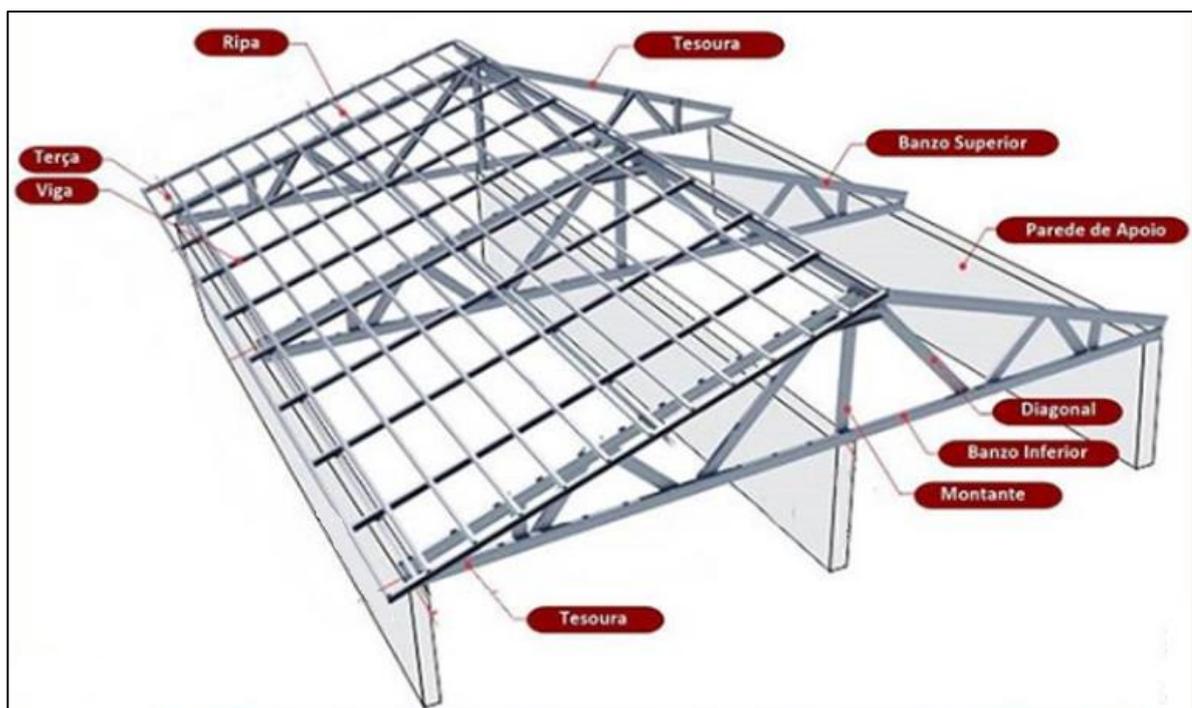
As treliças são sistemas formados por barras articuladas em suas extremidades, onde as cargas são aplicadas diretamente sobre os nós. Devido a essas condições no interior das treliças são geradas apenas forças normais, de compressão e de tração, por essa razão as barras da treliça geralmente são de aço ou de madeira, já que reagem bem a esforços de compressão e tração.

Sendo comumente utilizadas na construção civil de diversas formas, são em sua maioria utilizadas em coberturas, visto que o sistema treliçado é mais econômico em gastos de materiais e em situações que requerem sua utilização em vãos extensos do que as vigas de alma cheia. Devido a isso, são utilizadas em estruturas de grande porte, como shopping, estádios, pontes e em galpões.

2.3.1. Composição do galpão

Os componentes de um galpão estão descritos na figura abaixo.

Figura 2 – Componentes de um galpão



Fonte: O Autor (2021)

Banzo superior: é a barra localizada na parte superior da estrutura treliçada, pode ser subdividido em barras menores devido as conexões entre um ponto e outro, este membro pode ser retilíneo ou curvo e a sua inclinação depende do projeto.

Banzo inferior: semelhante ao banzo superior, porém fica localizado na parte de baixo da treliça, pode possuir 0° de inclinação, como na treliça triangular.

Montante: possui uma inclinação de 90° com relação ao eixo x, sendo conectada no banzo superior, inferior e na diagonal, em alguns casos é onde as terças depositam suas cargas.

Diagonal: é uma barra inclinada, então não possui uma inclinação de 90° com relação ao eixo x e nem uma de 0° , conectada no banzo superior, inferior e no montante, exemplo a barra BG na Figura 3.

Terça: tem como função servir de apoio às telhas da cobertura e de elemento estabilizante das peças que se apoiam. Apoiam de forma transversal nas tesouras e reduzem o comprimento de flambagem da mesma.

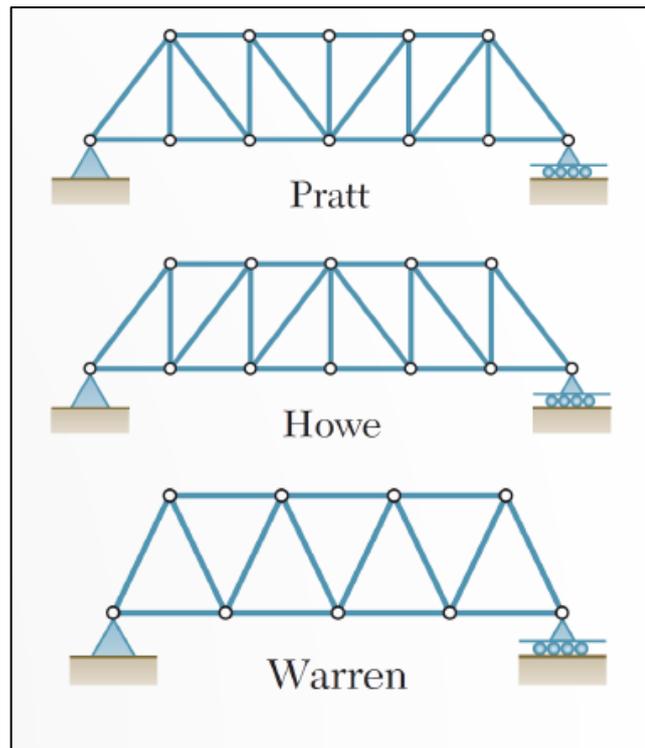
2.3.2. Tipos de treliças

As treliças utilizadas em estruturas metálicas são formadas por segmentos de hastes, unidos em pontos, conhecidos como nós, formando uma configuração geométrica estável, de base triangular, que pode ser isostática ou hiperestática, (Pfeil 2009). As treliças são adequadas para estruturas metálicas, já que os perfis são produzidos em segmentos de comprimento limitado. A principal característica delas é que as suas barras trabalham frequentemente a tração ou a compressão.

A estrutura da treliça e a distribuição dos elementos, define o tipo de sistema estrutural do pórtico principal do galpão. A disposição deve ser condicionada a fim de adquirir uma solução que atenda a segurança e que seja economicamente viável. Existe uma gama de variedades de tipos de treliças usadas em galpões, Pfeil (2009).

As treliças planas que exercem função de vigas de piso têm dois banzos paralelos e podem apresentar diversas geometrias. As configurações geométricas mais conhecidas são Pratt, Howe, Warren. Logo abaixo, a figura 3 mostra como são esses tipos de treliças.

Figura 3 – Tipos de Treliça em estudo



Fonte: O Autor (2021)

Segundo Sechalo (2012), uma treliça tipo Pratt é aquela onde as diagonais são solicitadas a tração para cargas gravitacionais. Sendo recomendada quando ocorre a predominância de carregamentos gravitacionais. Essas treliças são usadas para galpões abertos.

A treliça Howe é antagônico da treliça Pratt, pois os elementos diagonais estão dispostos na direção contrária do centro, suportando força de compressão. Assim sendo, faz com que os perfis metálicos necessitem serem um pouco maiores, tornando a edificação mais cara quando construída.

As treliças do tipo Warren ou banzo paralelo são aquelas em que as diagonais se encontram solicitadas de forma alternada a tração e compressão. Existem dois tipos de treliças em cruz, Sechalo (2012):

- Se as diagonais foram calculadas para resistir a compressão, a treliça em cruz é a sobreposição de duas treliças tipo Warren.
- Se for desprezada a resistência à compressão das diagonais o comportamento será o mesmo que uma treliça tipo Pratt.

2.4. Ligações

Segundo Alexandre (2011), os dispositivos de ligações são todos os detalhes construtivos que tem como finalidade promover a união de elementos da estrutura entre si, além de unir com componentes externos a construção. Assim sendo, as ligações têm como função realizar a transmissão de cargas de uma determinada parte de uma estrutura para outra de forma a garantir a segurança da construção, sem ultrapassar os limites de deformações admissíveis.

Embora na prática a ligação entre os elementos dessa estrutura seja rígida, normalmente realizada por meio de placas auxiliares nos quais se solda ou parafusos barras neles concorrentes (chapa de nó ou Gusset), é consistente idealizar essas conexões por meio de rótulas sem atrito.

As ligações que são feitas na montagem final de campo das estruturas, e nas fábricas podem ser com a utilização de parafusos, trazendo maior rapidez na execução das ligações no campo, reduzindo o consumo de energia, a utilização de mão de obra não muito qualificada e uma melhor resposta às tensões de fadiga.

Os parafusos possuem uma extremidade com a cabeça quadrada ou sextavada, e a outra com uma rosca e porca, sendo instalados por torção entre a porca e a rosca, gerando atrito entre as peças que se deseja conectar e trabalham comumente sobre tensões de cisalhamento e/ou tração (PFEIL, PFEIL 2010).

Já os parafusos de alta resistência, são empregados quando se necessita de transmitir altas cargas entre as peças, e são fabricados de aço carbono com um tratamento térmico, o tipo mais comum é o de aço ASTM A36, os esforços entre as barras são transmitidos pelo atrito causado pela pressão exercida entre as partes ligadas. Estes parafusos são apertados de tal maneira que a tensão de tração produz um extremo atrito entre as peças ligadas, estão sempre trabalhando na sua resistência última, para um melhor aproveitamento do sistema (DIAS, 2015).

As ligações soldadas unem duas partes da estrutura sem provocar alterações em suas características químicas e mecânicas do aço. A solda é um tipo de união de materiais obtida por meio da fusão das partes adjacentes. Em síntese, a fusão do aço acontece através do calor produzido por um arco voltaico, sendo o arco voltado gerado entre o eletrodo metálico e o aço a soldar, PFEIL (2009).

No entanto, quando duas peças são soldadas é de suma importância que a união resultante não ocasione um ponto crítico do conjunto, por isso que o material tem que ser isolado da atmosfera para evitar o surgimento de impurezas nas peças, ocasionando assim, problemas na estrutura. Além disso, tem que ser tomadas as devidas precauções na fabricação das estruturas soldadas no que diz respeito a solda logo após o seu resfriamento, já que pode provocar deformações no perfil, PFEIL (2009).

As ligações parafusadas segundo o CBCA, são as mais utilizadas em larga escala nas montagens finais de campo. Os parafusos, no geral, substituíram os rebites em meados do século 20, já que esse tipo de ligações possui inúmeras vantagens em relação as outras.

As principais vantagens das ligações parafusadas são:

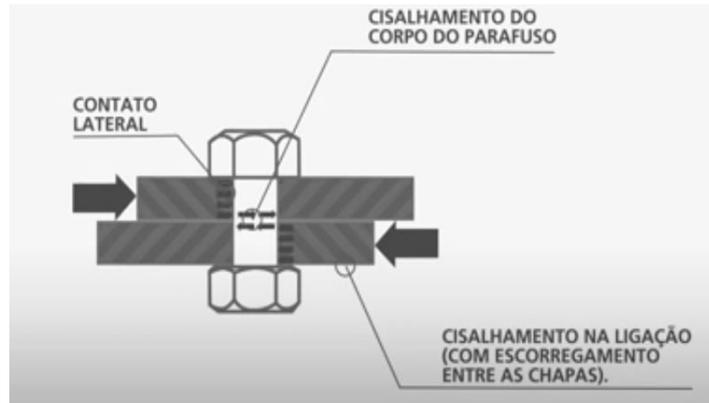
- a) Maior rapidez na montagem das ligações de campo;
- b) Uma redução significativa na energia, gerando uma maior economia na obra;
- c) Redução na mão de obra, já que diferente da soldagem não precisa de mão de obra especializada;
- d) Apresenta uma melhor resposta as tensões de fadiga;

As ligações parafusadas podem ser divididas em dois tipos: ligação por contato (bearing-type) ou ligação por atrito (friction-type).

Na ligação por contato a carga de cisalhamento é sustentada pelo corpo do parafuso que se encosta sobre os lados dos furos das chapas. Por isso, que é de suma importância avaliar o tipo de furo que será utilizado. A ligação por contato é indicada para carregamentos predominantemente estáticos, onde os eventuais deslizamentos entre as partes ligadas não afetam a vida útil dos parafusos e nem da própria ligação, e nem o comportamento global da estrutura da edificação.

Na figura abaixo é possível analisar o comportamento das tensões na ligação por atrito.

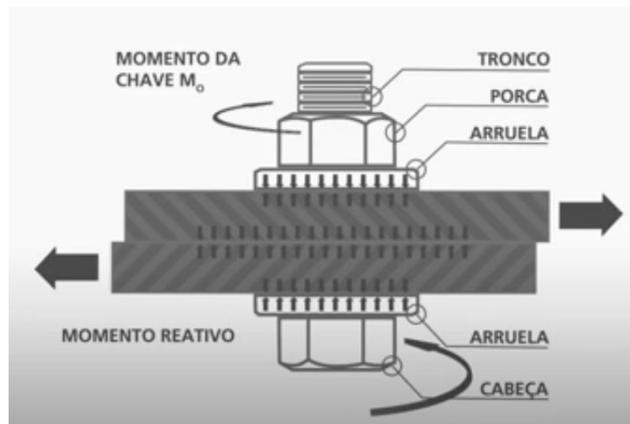
Figura 4 - Carga de cisalhamento atuando no parafuso por contato



Fonte: Ligações em Estruturas de Aço – Volume 1, Alexandre Luiz Vasconcellos (rev.)

Em contrapartida, nas ligações por atrito, a carga que tende a cisalhar o parafuso é sustentada por meio do atrito das superfícies em contato, que gera força de compressão que impede o deslizamento das chapas. Essa força é determinada pelo aperto dado nos parafusos por meio de chaves apropriadas. A figura a seguir mostra o comportamento do parafuso em decorrência da aplicação de tensões cisalhantes.

Figura 5 - Carga de cisalhamento atuando no parafuso por atrito



Fonte: Ligações em Estruturas de Aço – Volume 1, Alexandre Luiz Vasconcellos (rev.)

Diferente da ligação por contato, a ligação por atrito é indicada para carregamentos dinâmicos e em casos que qualquer deslizamento entre as partes ligadas possa de certa forma afetar o comportamento previsto para a estrutura.

3. METODOLOGIA

Para viabilizar o estudo, alguns parâmetros que influenciam no projeto da cobertura foram considerados fixos. A análise paramétrica, em suma, irá se limitar à variação do tipo da treliça (Pratt, Howe e Warren) e o comprimento do vão (10, 15, 20, e 25 m). Para cada modelo, será identificado o perfil que gera o menor peso para treliça. Para tanto, serão avaliados nos banzos os perfis do tipo “U”, enquanto nas diagonais e montantes serão avaliados perfis do tipo “U” e do tipo dupla cantoneira oposta. As dimensões dos perfis são estabelecidas conforme as séries comerciais de perfis estruturais definidos pela NBR 15980 (ABNT, 2011) para os perfis formados a frio e de NBR 88000 (ABNT, 2008).

Sendo assim, para cada vão mencionado, serão avaliados os três tipos de treliça de cobertura com dois tipos de perfis diferentes nas diagonais e montantes, o que gera um total de 24 modelos. Os demais parâmetros de projeto, que foram fixados em todas as amostras de modo a padronizar os resultados, tem seus valores apresentados na Tabela 2. Todos os galpões analisados terão duas quedas e banzo inferior reto, comprimento de 27 m, pé direito de 6 m, abertura na frente e fundo e com as laterais fechadas.

Tabela 2 – Parâmetros fixos no estudo

Parâmetro	Valor fixado
Altura da Coluna	6 metros
Distância entre Pórticos	3 metros
Inter-terças	Entre 1.6 e 2 metros
Inclinação	10%
Altura Inicial	0.6 metros
Velocidade do Vento	30 m/s

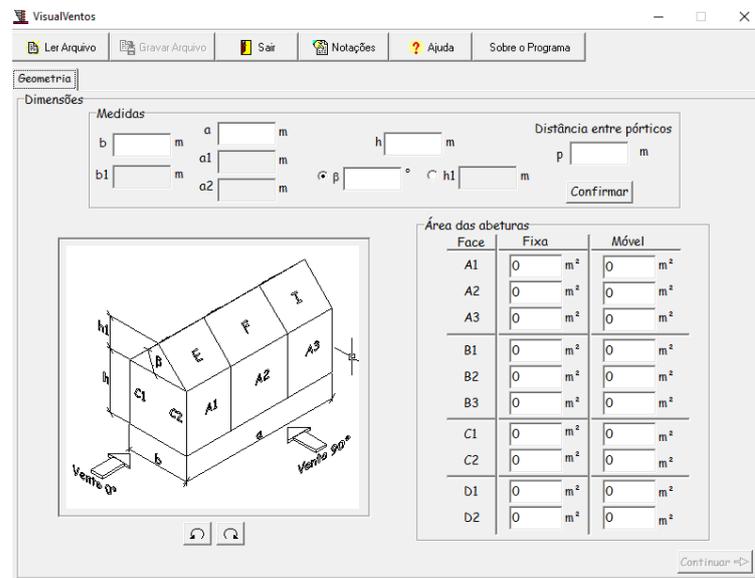
Fonte: O Autor (2021)

Já com relação ao material, foram analisados o aço ASTM A36, que é um aço estrutural cuja tensão de ruptura axial (f_u) é igual a 250 MPa e tensão de escoamento (f_y) é igual a 400 MPa, e o aço SAE 1010, que é um aço comercial que possui $f_u = 330$ MPa e $f_y = 180$ MPa.

O comprimento de flambagem das barras são delimitados no banzo superior pelos contraventamentos promovidos pela instalação das terças e no banzo inferior pela instalação de mãos francesas.

O cálculo das forças devido ao vento incidentes nos modelos, realizado para uma velocidade básica V_0 igual à 30 m/s, foi feito com auxílio do *software VisualVento*, que segue a metodologia indicada na NBR 6123 (ABNT, 1988) para edificações de planta retangular e cobertura com duas águas. O programa em questão é gratuito e foi desenvolvido na Universidade de Passo Fundo com intuito de auxiliar no ensino do comportamento de estruturas de aço e madeira. A Figura 6 mostra a interface do programa.

Figura 6 – Interface do VisualVentos



Fonte: O Autor (2021)

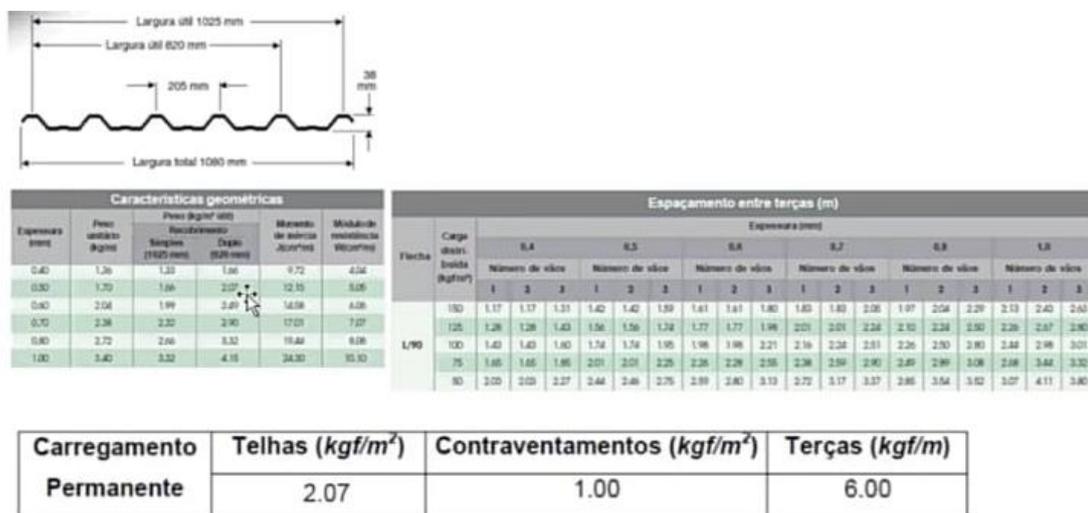
No cálculo da pressão dinâmica externa e interna, que dependem das dimensões das aberturas – que para o estudo foi adotado abertura na frente e fundo e laterais fechadas – foram adotados os seguintes parâmetros:

- Fator topográfico (S_1) para terreno plano ou fracamente acidentado – 1,0;
- Fator S_2 , que leva em conta a rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno determinado de acordo com a Tabela 2 da NBR 6123 para edificações de até 10 metros de altura, com classificação do efeito da rugosidade do terreno de Categoria II e Classe C para a consideração do efeito das dimensões do terreno – 1,06.

- Fator estatístico (S_3) para comércio e indústria – 1,0;
- Coeficientes de pressão interna (C_{pi}) para faces impermeáveis de uma edificação com duas faces opostas igualmente permeáveis – +0,2 (para vento perpendicular a uma face permeável) e -0,3 (para vento perpendicular a uma face impermeável).

Além da ação do vento, foi considerado na cobertura uma sobrecarga de utilização de 25 kgf/m², que é o valor recomendado pela NBR 8800 (ABNT, 2008), e o peso próprio das telhas. Nos modelos foram adotadas telhas de aço galvanizadas trapezoidais com peso de 2,07 kgf/m² e, a partir do catálogo do fabricante destas, foi definido o número de apoios que, por conseguinte, indica a quantidade necessária de terças. Foi considerado também um peso de 6 kgf/m para as terças. A Figura 7 traz um resumo dessas ações.

Figura 7 – Cargas atuantes na cobertura



Fonte: O Autor (2021)

As ações incidentes na estrutura devem ser majoradas por um coeficiente de segurança na verificação do Estado Limite Último (ELS). Porém, quando a estrutura está submetida a ações variáveis de naturezas distintas, deve-se utilizar coeficientes de ponderação para levar em consideração a baixa probabilidade de ocorrência simultânea destas. Sendo assim, no ELU, a ação de cálculo (F_d) será dada pela soma das ações permanentes (F_{gk}) multiplicadas pelo coeficiente majorador da ação γ_g , com a soma das ações variáveis multiplicadas pelo coeficiente majorador γ_q . Porém, devem ser criadas combinações que considere uma ação variável como principal e as demais

como secundárias; aquelas que forem tomadas como secundárias devem ser reduzidas pelo fator de combinação ψ_{0i} . A Equação (1) resume a combinação. Para combinações normais de ações, que é o caso abordado nesse trabalho, os coeficientes γ_g e γ_q são iguais ($\gamma_g = \gamma_q = \gamma$).

$$F_d = \sum_{j=1}^m \gamma_{g,j} F_{gk,j} + \gamma_{q,1} F_{qk,1} + \sum_{i=2}^n \gamma_{q,i} \psi_{0i} F_{qk,i} \quad (1)$$

A Tabela 3 apresenta os valores previstos na NBR 8800 (ABNT, 2008) dos fatores γ e ψ_0 para as ações consideradas nesse trabalho. Os valores em parênteses são para os casos em que as ações permanentes agem no sentido desfavorável.

Tabela 3 – Fatores de ponderação das ações utilizados no estudo

Ação	γ	ψ_0
Peso próprio	1,25 (1,00)	1,00
Ação permanente	1,30 (1,00)	1,00
Sobrecarga	1,50	0,80
Vento	1,40	0,60

Fonte: O Autor (2021)

Para o cálculo dos coeficientes de vento deve-se levar em consideração as dimensões da estrutura e as aberturas fixas e móveis. Neste estudo, foi utilizado as três combinações mais críticas para os coeficientes internos e externos da edificação, conforme a NBR 6123 (ABNT, 2008). Para os carregamentos de vento, o programa trabalha sempre com cargas na direção perpendicular ao telhado, ou seja, cargas nas direções horizontais e verticais.

Na tabela de coeficientes de vento do VisualVentos, deve-se indicar as combinações dos coeficientes de forma para ventos, para cada trecho de terças, bem como o valor da pressão de obstrução (em kg/m²). A orientação segue a norma NBR 6123 (ABNT, 2008), desde que a orientação das terças seja da esquerda para a direita (nó inicial às esquerda e nó final à direita).

Com isso, se um coeficiente de forma for negativo, significa que o vento promove uma sucção na cobertura, ou seja, uma carga de baixo para cima. O valor de ΔC deve ser informado a cada trecho, na coluna correspondente a cada vento (1, 2, 3, ..., n). Caso, em determinado carregamento de vento, a célula para um coeficiente

for deixada em branco, o programa irá assumir o valor indicado na célula imediatamente superior.

A partir desses dados, foi possível montar as combinações de ações com os coeficientes de ponderação indicados na Tabela 4.

Tabela 4 – Fatores de ponderação das ações utilizados no estudo

Combinação	Permanente	Sobrecarga	Vento 1	Vento 2	Vento 3
1	1,40	1,40	–	–	0,84
2	1,40	0,98	–	–	1,40
3	0,90	–	1,40	–	–
4	0,90	–	–	1,40	–

Fonte: O Autor (2021)

Para o cálculo dos esforços desenvolvidos nos elementos das coberturas e verificação da capacidade resistente dos perfis escolhidos foi utilizado o *software AutoMetal*, que é uma ferramenta computacional gratuita desenvolvida pela UNICAMP (Figura 8). Embora tenha sido desenvolvido com intuito de auxiliar no ensino das disciplinas de projeto de estruturas metálicas, o programa atende às normas brasileiras e, por essa razão, também pode ser utilizado em projetos profissionais.

Figura 8 – Sobre o AutoMETAL

Sobre o AutoMETAL

	Equipe de Desenvolvimento Nilto Calixto Silva Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena Eng. Civil - CREA 94878/D - SP. Prof. Dr. Aloisio Ernesto Assan	Colaboradores Amauri Gavazzi Arthur Henrique Tordin Stenico Fabiano Daleffe Aires Gustavo Pinheiro Renato H. F. Branco
	 UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Civil Departamento de Estruturas	Fone : (19) 3788 2320 Fax : (19) 3788 2411 Caixa Posta: 6021 - CEP 13083-970 Campinas / SP - Brasil e-mail: autmetal@fec.unicamp.br
	Setembro/2003	

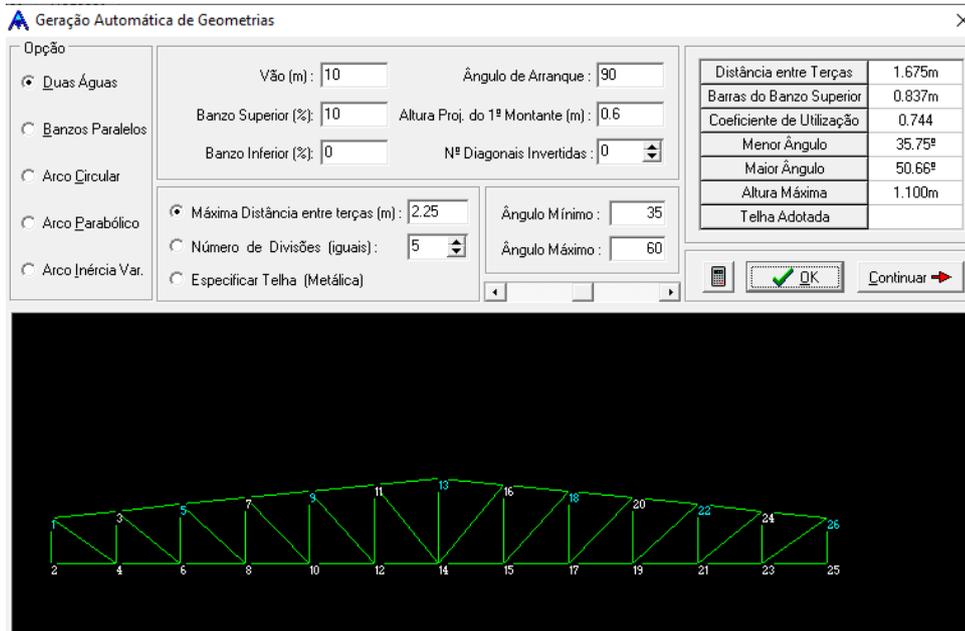
Embora exaustivos testes tenham sido realizados para avaliar e garantir o bom desempenho do programa, os autores e distribuidores não se responsabilizam pelos resultados obtidos. Ou seja, a responsabilidade de analisar e testar os resultados cabe exclusivamente ao usuário.

Fonte: AutoMETAL (2021)

Com intuito de dar mais celeridade ao processo de lançamento da estrutura, o AutoMETAL realiza, a partir dos dados de entrada apresentados na Figura 9, a geração automática da geometria da cobertura formada por treliças usuais, tais como as de duas águas com diagonais em "N", duas águas de banzos paralelos com

diagonais em "V", arcos circulares, arcos parabólicos e arcos de Inércia variável. O usuário pode, no entanto, efetuar o lançamento mediante indicação das coordenadas dos nós da treliça e das barras que conectam esses nós ou, ainda, importar (ou exportar) as geometrias concebidas no AutoCAD com extensão DXF.

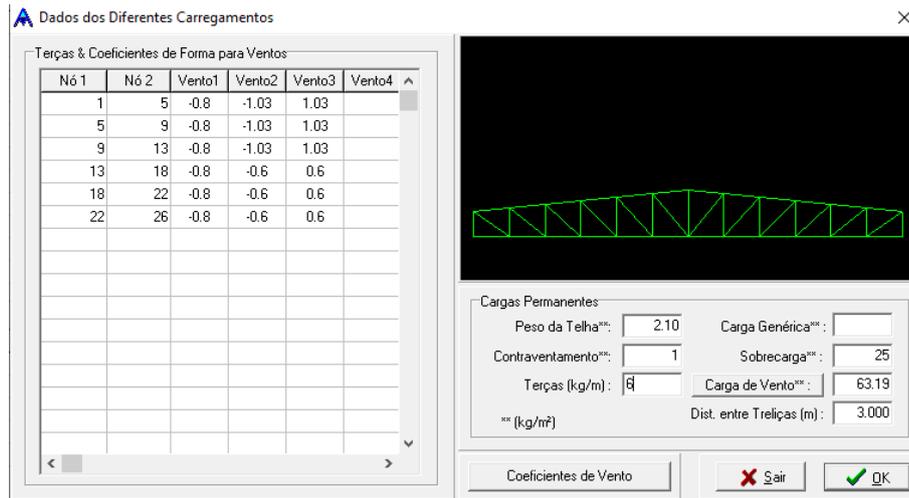
Figura 9 – Interface do AutoMETAL para definição da geometria da treliça



Fonte: AutoMETAL (2021)

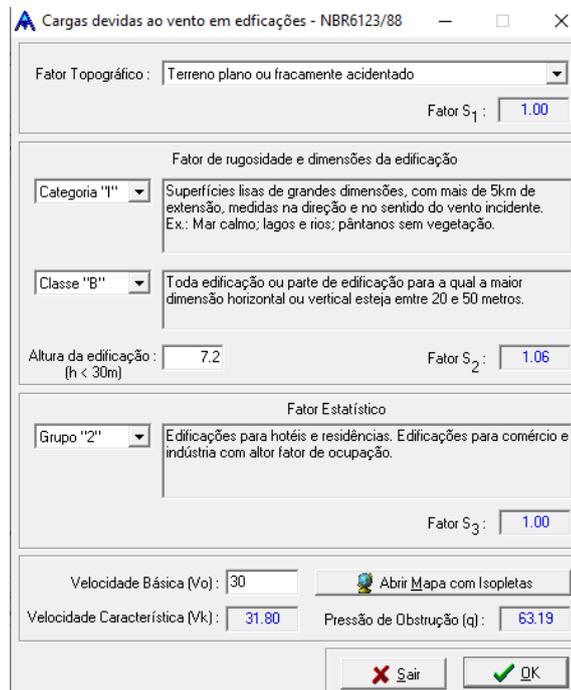
O próprio programa executa automaticamente o lançamento das cargas permanentes, sobrecargas e de vento na treliça de cobertura. Para tanto, é necessário indicar em quais nós as terças estão posicionadas (Figura 10) e quais os Coeficientes de Forma para Ventos para os trechos da cobertura (Figura 11). De posse desses dados, é possível, ainda, gerar as combinações dos carregamentos. Na figura abaixo, mostra que para o peso da telha foi utilizado 2.10 kgf/m², e não 2.07, pois para facilitar os cálculos e uma melhor interpretação dos resultados houve a necessidade de arredondar.

Figura 10 - Cargas e coeficientes de forma do vento



Fonte: O Autor (2021)

Figura 11 – Cargas atuantes devido ao vento



Fonte: O Autor (2021)

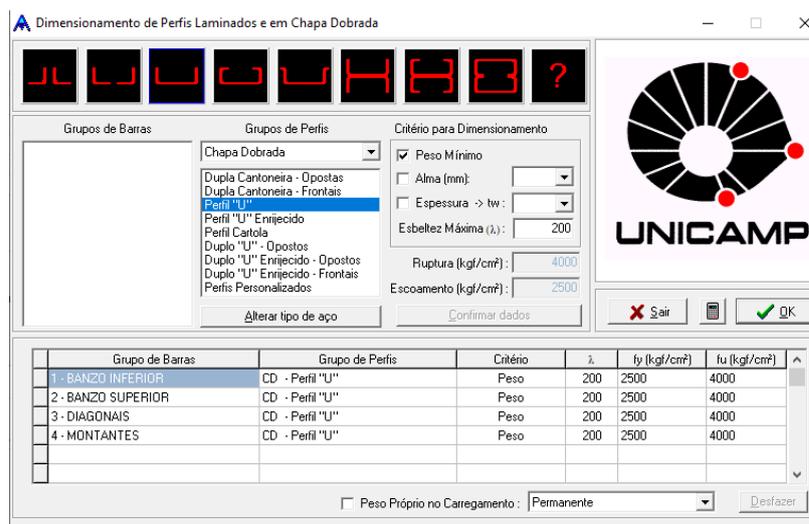
A partir do lançamento do carregamento, o AutoMETAL pode realizar o cálculo dos esforços desenvolvidos na treliça. No modelo implementado no *software*, que é baseado no Método dos Elementos Finitos, a treliça é considerada ideal e, por essa razão, os seus elementos não possuem rigidez à flexão, o que leva ao desenvolvimento apenas de forças axiais internas de tração e compressão. Os pilares,

no entanto, possuem rigidez à flexão, sendo possível, inclusive, efetuar o lançamento de cargas excêntricas.

É válido ressaltar que, embora possam ser inseridos no modelo de análise estrutural e seja usado como parâmetro de cálculo do problema, os pilares do pórtico não são dimensionados pelo *software*. Sendo assim, o dimensionamento e verificação dos perfis é feito apenas para as barras que constituem as treliças. Nesse trabalho, foram incluídos pilares genéricos de concreto com seção retangular de 20 cm x 30 cm e f_{ck} de 25 MPa como apoio para a treliça de cobertura.

Na etapa de dimensionamento dos perfis, é necessário definir o grupo de perfis, que, para o estudo em questão, será o de perfis “U”. O programa, porém, dispõe de outras bibliotecas contendo os perfis comerciais mais empregados na prática que, inclusive, podem ser implementadas mediante a criação de perfis com as características desejadas pelo usuário. Em seguida, estabelece-se o critério de dimensionamento que irá nortear a escolha do perfil. Nesse trabalho, o critério de seleção será com base no peso mínimo. A Figura 13 apresenta a interface do programa em que esses dados são inseridos.

Figura 12 – Definição do perfil U para as barras das treliças



Fonte: O Autor (2021)

O programa dimensiona a barra mais solicitada de cada grupo (banzo superior, banzo inferior, montantes e diagonais) e atribui às demais o mesmo perfil. Definidos os novos perfis de cada grupo, o AutoMETAL recalcula os esforços, quando necessário, redimensiona a estrutura em busca da melhor solução.

Após o dimensionamento, o AutoMETAL fornece uma listagem dos perfis dimensionados (Figura 13), incluindo o peso de aço para cada barra das treliças, o que permite a identificação do modelo mais adequado em termos de consumo de material.

Figura 13 – Lista de perfis dimensionados

Grupo	L (m)	λ	Perfil	Peso (kg/m)	Total (kg)	%
BANZO INFERIOR	25.00	86	U_CD - 100 x 40 x 3.42 x 4.53	4.53	113.27	21%
BANZO SUPERIOR	25.12	75	U_CD - 150 x 50 x 3.80 x 7.08	7.08	178.01	33%
DIAGONAIS	38.10	167	U_CD - 100 x 40 x 2.66 x 3.58	3.58	136.25	25%
MONTANTES	30.00	152	U_CD - 100 x 40 x 2.66 x 3.58	3.58	107.27	20%

Peso Total 534.80kg

Sair Relação de Materiais

Fonte: O Autor (2021)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Tabelas 5 e 6 apresentam, respectivamente, os coeficientes de pressão internos e externos para o vento a 0° e a 90° em função do vão da cobertura. Estes resultados foram pelo *software* VisualVentos com base nos dados descritos na seção anterior.

Tabela 5 – Combinações dos coeficientes internos com externos para o vento a 0°

Vão	Lado	Cpi 0.2	Cpi 0.3
10 m	Esquerdo	-0.80	-0.80
	Direito	-0.80	-0.80
15 m	Esquerdo	-0.80	-0.80
	Direito	-0.80	-0.80
20 m	Esquerdo	-0.80	-0.80
	Direito	-0.80	-0.80
25 m	Esquerdo	-0.80	-0.80
	Direito	-0.80	-0.80

Fonte: O Autor (2021)

Tabela 6 – Combinações dos coeficientes internos com externos para o vento a 90°

Vão	Lado	Cpi 0.2	Cpi 0.3
10 m	Esquerdo	-1.03	-1.03
	Direito	-0.60	-0.60
15 m	Esquerdo	-1.15	-1.15
	Direito	-0.40	-0.40
20 m	Esquerdo	-1.01	-1.01
	Direito	-0.4	-0.4
25 m	Esquerdo	-0.93	-0.93
	Direito	-0.4	-0.4

Fonte: O Autor (2021)

Conforme pode ser visto na Figura 7, o AutoMETAL fornece uma lista com os dados dos perfis adotados para atenderem às solicitações, massa de cada perfil,

quantidade de barras, tipo de perfil com dimensões mínimas, seu comprimento e permite inserir o preço unitário para determinar o custo com material na cobertura.

Tabela 7 - Lista de perfis dimensionados



AutoMETAL
Automação de Projetos de Trelças Metálicas Planas

Quant. (m)	Descrição	Peso Un. (kg/m)	Peso Total (kg)	Preço Un. (R\$/kg)	T o t a l (R\$)
<u>Perfis em Chapa Dobrada</u>					
35	Perfil "U" - 90.0 x 25.0 x 2.50 - ASTM A36	2.59	90.65	3.15	285.55
11	Perfil "U" - 100.0 x 25.0 x 3.00 - ASTM A36	3.30	36.30	3.15	114.34
			126.95		399.89
			126.95		399.89

Fonte: O Autor (2021)

Na Tabela 8 é apresentada uma relação dos pesos obtidos para cada tipo de cobertura em função do vão considerando todas as barras em perfis do tipo U, enquanto a Tabela 9 apresenta os mesmos resultados, porém, para as coberturas concebidas com diagonais e montantes em perfis do tipo dupla cantoneira.

Tabela 8 - Consumo de aço as trelças do tipo Pratt, Howe e Warren com diagonais e montantes em perfis do tipo U

Vão (m)	Peso (kg)		
	Treliça Pratt	Treliça Howe	Treliça Warren
10	126.25	129.14	107.24
15	257.13	260.71	214.05
20	292.35	399.53	276.28
25	549.14	572.70	522.18

Fonte: O Autor (2021)

Tabela 9 - Consumo de aço as trelças do tipo Pratt, Howe e Warren com diagonais e montantes em perfis do tipo dupla cantoneira

Vão (m)	Peso (kg)		
	Treliça Pratt	Treliça Howe	Treliça Warren
10	122.79	131.07	102.36
15	224.92	266.42	218.44
20	226.83	429.99	282.23
25	552.05	623.38	547.32

Fonte: O Autor (2021)

Dentre os modelos avaliados, com exceção da treliça com vão de 20 m com diagonais e montantes em dupla cantoneira, as treliças do tipo Warren foram as mais leves, seguidas pelas treliças Pratt e, por fim, as treliças tipo Howe. Nos vãos de 10, 15, 20 e 25 m, as treliças do tipo Warren (mais leves) apresentaram, em relação às treliças do tipo Howe (mais pesadas), uma redução no peso de, respectivamente, 16.96%, 17.90%, 30.85% e 8.82% nos casos em que todas as barras da treliça estavam com perfil do tipo U. Já no caso em que as diagonais e montantes estavam com perfil do tipo dupla cantoneira, as treliças do tipo Warren apresentaram, em relação às treliças do tipo Howe, uma redução no peso de, respectivamente, 21.91%, 18%, 34.36% e 12.20%.

Comparando os resultados das treliças do tipo Warren (melhor desempenho) de diagonais e montantes em perfis do tipo “U” (Tabela 8) com as treliças de diagonais e montantes em perfis do tipo dupla cantoneira (Tabela 9), nota-se que, com exceção do modelo com vão de 10 m, a utilização de perfis do U em toda a treliça trouxe os melhores resultados. E mesmo para o vão de 10 m, em que seu desempenho foi inferior, a diferença no peso foi somente de 4,55%.

A definição do tipo de perfil, de acordo com a fabricação, que será empregado na cobertura tem o poder de variar consideravelmente o peso das treliças. Para verificar essa influência, foram avaliados nesse estudo três tipos de perfis que são comumente empregados em projetos de coberturas: perfis formados a frio em aço A36 (PFF A36), perfis formados a frio em aço SAE 1010 (PFF SAE 1010) e perfis laminados em aço A36 (Lam A36). Essa variação foi feita apenas para as treliças do tipo Warren com todas as barras em perfis do tipo U, que, conforme já fora comentado, foram as que apresentaram melhor desempenho. Constatou-se, conforme pode ser visto na Tabela 10, que a utilização de perfis formados a frio, fabricados em aço A36, geram os melhores resultados, em termos de peso, em todos os casos.

Tabela 10 - Consumo de aço para os diferentes tipos de aço e perfil

Vão (m)	Peso (kg)		
	PFF A36	PFF SAE 1010	Lam A36
10	107.24	113.35	259.16
15	214.05	231.79	409.23
20	276.28	342.35	546.05
25	522.18	609.76	953.63

Fonte: O Autor (2021)

Nos vãos de 10, 15, 20 e 25 m, os perfis laminados apresentaram, em relação aos PFF em aço A36, um aumento no peso de 58.62%, 47.69%, 49.40% e 45.24%, respectivamente. Estruturas fabricadas com perfis laminados começam a se tornar vantajosos apenas para vãos e cargas maiores (por exemplo, maior velocidade do vento). Ressalta-se, ainda, que os PFF em aço SAE 1010, que é um aço empregado comercialmente considerado de baixa qualidade estrutural, fato que diminui seu custo de aquisição, apresentaram, em relação ao PFF em aço A36, um aumento no peso de, respectivamente, 5.3%, 7.6%, 19.30% e 14.36%, que pode ser considerado um acréscimo reduzido.

A ampla variedade de dimensões de perfis formados a frio aumenta a chance de escolher um perfil que forneça resistência muito próxima da solicitação. Como os perfis laminados possuem uma quantidade muito menor de opções, em muitos casos, o material está sendo subutilizado, o que gera acréscimos desnecessários ao peso próprio da estrutura que podem justificar os resultados da Tabela 10.

Ressalta-se, contudo, que apesar de ser possível obter soluções mais leves com perfis laminados do que com os perfis formados a frio, não significa que sua utilização seja mais vantajosa. Isso porque, comumente, os perfis laminados possuem um custo por quilograma superior aos perfis formados a frio para o mesmo tipo de aço. Portanto, não se pode avaliar apenas o peso próprio na escolha do melhor material, já que o tipo de aço e perfil influenciam significativamente no preço, fato que pode gerar vantagens econômicas mesmo ao utilizar materiais mais pesados. Isso, é claro, precisa ser avaliado em conjunto com os demais elementos estruturais do galpão, uma vez que um acréscimo no peso amplia as cargas – e, portanto, o consumo de material – nos pilares e nas fundações.

Frisa-se, ainda, que além de serem mais leves para cargas e vãos médios, os perfis formados a frio, em relação aos laminados, são mais fáceis de construir, possuem menor custo de estoque (com 3 ou 4 bitolas é possível produzir perfis que atendam a maioria dos casos do dia a dia) e demandam menor custo energético na produção.

Com intuito de dar maior suporte à fase de concepção e orçamentação inicial de projetos de cobertura metálicas, são apresentados na Tabela 11 os perfis que conduziram ao menor peso de cada modelo analisado.

Tabela 11 – Perfis utilizados e material

Vão (m)	Treliça	Perfil “U”				
		Banzo superior	Banzo inferior	Diagonais	Montantes	Aço
10	Pratt	100.0 x 50.0 x 2.66	90.0 x 25.0 x 2.50	90.0 x 25.0 x 2.50	90.0 x 25.0 x 2.50	A36
	Howe	90.0 x 25.0 x 2.50	A36			
	Warren	90.0 x 25.0 x 2.50	100.0 x 50.0 x 2.66	100.0 x 50.0 x 2.66	100.0 x 50.0 x 2.66	A36
15	Pratt	150.0 x 50.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	90.0 x 25.0 x 2.50	A36
	Howe	150.0 x 50.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	90.0 x 25.0 x 2.50	A36
	Warren	150.0 x 50.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	90.0 x 25.0 x 2.50	A36
20	Pratt	90.0 x 25.0 x 2.50	90.0 x 25.0 x 2.50	100.0 x 40.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	A36
	Howe	200.0 x 50.0 x 3.04	150.0 x 50.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	A36
	Warren	90.0 x 25.0 x 2.50	150.0 x 50.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	A36
25	Pratt	150.0 x 50.0 x 4.18	200.0 x 50.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	A36
	Howe	150.0 x 50.0 x 3.04	150.0 x 50.0 x 3.80	100.0 x 50.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	A36
	Warren	150.0 x 50.0 x 3.80	200.0 x 50.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	100.0 x 40.0 x 2.66	A36

Fonte: O Autor (2021)

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho realizou uma análise comparativa do consumo de aço entre a treliça plana Pratt, Warren e Howe a partir da variação de parâmetros de projetos tais como vão, tipo de perfil e tipo de aço. Foram concebidos modelos com vãos de 10, 15, 20 e 25 m, em aço A36 e SAE 1010, seja ele laminado ou em perfil formado a frio (PFF). Também foi avaliado o tipo de perfil utilizado nas diagonais e montantes (tipo U e cantoneiras duplas), tendo sido mantido o perfil tipo U nos banzos de todos os modelos.

Nesse estudo, a treliça do tipo Warren apresentou melhor desempenho, em termos de consumo de material, em todos os casos analisados. À medida que o vão foi aumentando, a treliça do tipo Warren aumentou sua diferença em relação às demais.

Comparando os resultados das treliças do tipo Warren, que teve o melhor desempenho, feitas com diagonais e montantes em perfis do tipo “U”, com os resultados das treliças do tipo Warren feitas com diagonais e montantes em perfis do tipo dupla cantoneira, foi possível notar que, com exceção do modelo com vão de 10 m, a utilização de perfis do U em toda a treliça trouxe os melhores resultados. Até para o vão de 10 m, que foi o caso em que seu desempenho foi inferior, a diferença no peso foi somente de 4,55%.

Nos vãos de 10, 15, 20 e 25 m, os perfis laminados apresentaram, em relação aos PFF em aço A36, um aumento no peso de 58.62%, 47.69%, 49.40% e 45.24%, respectivamente. Já os PFF em aço SAE 1010, apresentaram, em relação ao PFF em aço A36, um aumento no peso de, respectivamente, 5.3%, 7.6%, 19.30% e 14.36%, que pode ser considerado um acréscimo reduzido, sobretudo se for ponderado o fato dele ser um aço mais economicamente mais barato por ser considerado de baixa qualidade estrutural.

Para trabalhos futuros, sugere-se investigar a variação de outros parâmetros, tais como vão, velocidade do vento, inclinação da cobertura, tipos de perfis e tipos de aço, e incluir uma análise financeira dos resultados. Além disso, sugere-se avaliar outros sistemas treliçados, tais como coberturas em arco e/ou treliças com banzos inclinados paralelos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**: NBR 14762. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento**: NBR 14762. Rio de Janeiro, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Perfis estruturais de aço formados a frio — Padronização**: NBR 6355. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**: NBR 8800. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Projeto e execução de estruturas de aço em edifícios (métodos dos estados limites)**: NBR 8800. Rio de Janeiro, 1986.

BELLEI, Ildony Hélio. *Edifícios industriais em aço: Projeto e cálculo*. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 1998. 489p.

GIL, Antonio Carlos. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2008. 200p.

LOGSDON, N. B. – *Estruturas de madeira para coberturas, sob a ótica da NBR 7190/1997*. 2002. 62p. Monografia. Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, MT. 2002. Disponível em:

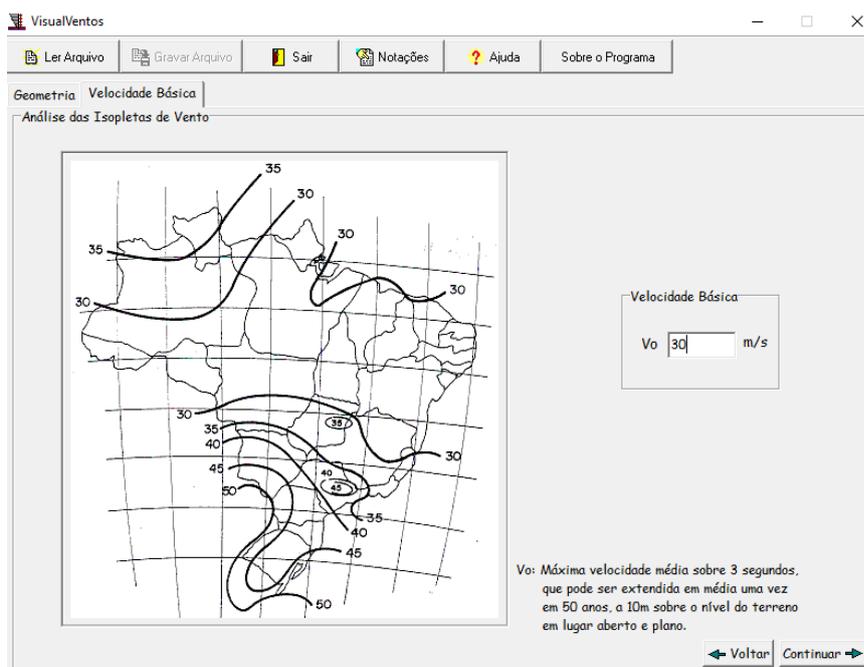
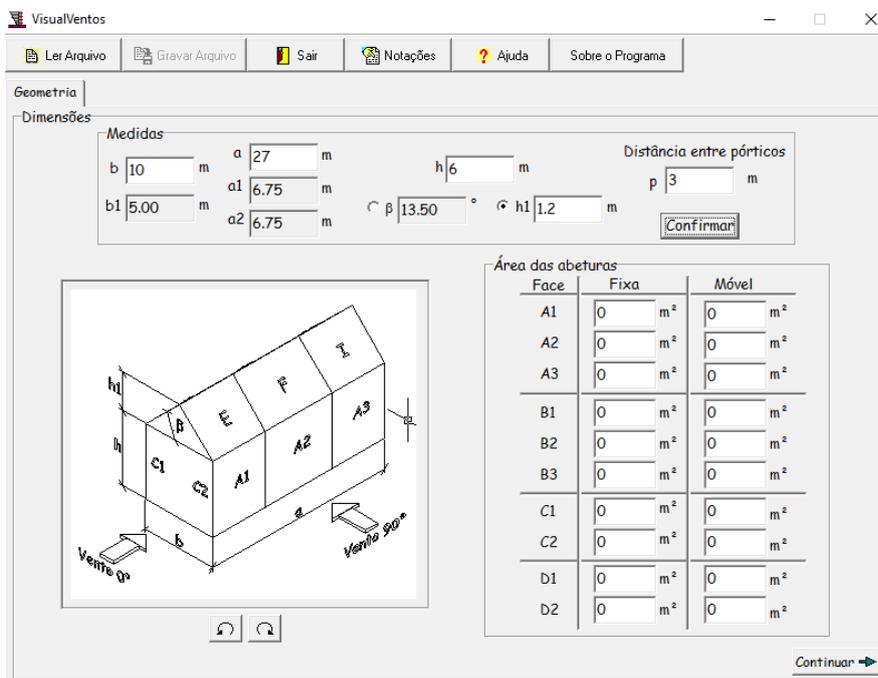
<<http://usuarios.upf.br/~zacarias/Telhados.pdf>>. Acesso em: 21 de novembro de 2018.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. Bases para projeto estrutural na arquitetura. 5ª ed. São Paulo: Ziguarte, 2007. 286 p.

PFEIL, W. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. SILVA, V. P. e. **Dimensionamento de estruturas de aço**: Apostila para a disciplina de estruturas metálicas e de madeira. São Paulo: Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

APÊNDICE A

Dimensionamento da ação do vento utilizando o software VisualVentos.



VisualVentos

Ler Arquivo Gravar Arquivo Sair Notações Ajuda Sobre o Programa

Geometria Velocidade Básica Fator S1

Fator Topográfico

TALUDE

MORRO

Pode ser admitido um fluxo de ar bidimensional soprando no sentido indicado na figura.

Fator S1

Terreno plano ou fracamente acidentado

Talude e Morros

Vales profundos, protegidos de vento de qual quer direção

Taludes e Morros

ϕ °

z m

d m

Calcular

S1

Voltar Continuar

VisualVentos

Ler Arquivo Gravar Arquivo Sair Notações Ajuda Sobre o Programa

Geometria Velocidade Básica Fator S1 Fator S2

Fator de Rugosidade

Categoria	Descrição do ambiente
<input checked="" type="radio"/> I	Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente.
<input type="radio"/> II	Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1m. Exemplos: zonas costeiras planas; pântanos com vegetação rala; campos de aviação; pradarias e charnecas; fazendas sem sebes ou muros.
<input type="radio"/> III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3m. Exemplos: granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos, fazendas com sebes e/ou muros, subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas.
<input type="radio"/> IV	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m. Exemplos: zonas de parques e bosques com muitas árvores; cidades pequenas e seus arredores; subúrbios densamente construídos de grandes cidades; áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.
<input type="radio"/> V	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25m. Exemplos: florestas com árvores altas de copas isoladas; centros de grandes cidade; complexo industriais bem desenvolvidos.

Classe de edificação

Classe	Descrição
<input type="radio"/> A	Maior dimensão menor ou igual a 20m
<input checked="" type="radio"/> B	Maior dimensão entre 20 e 50m
<input type="radio"/> C	Maior dimensão maior ou igual 50m

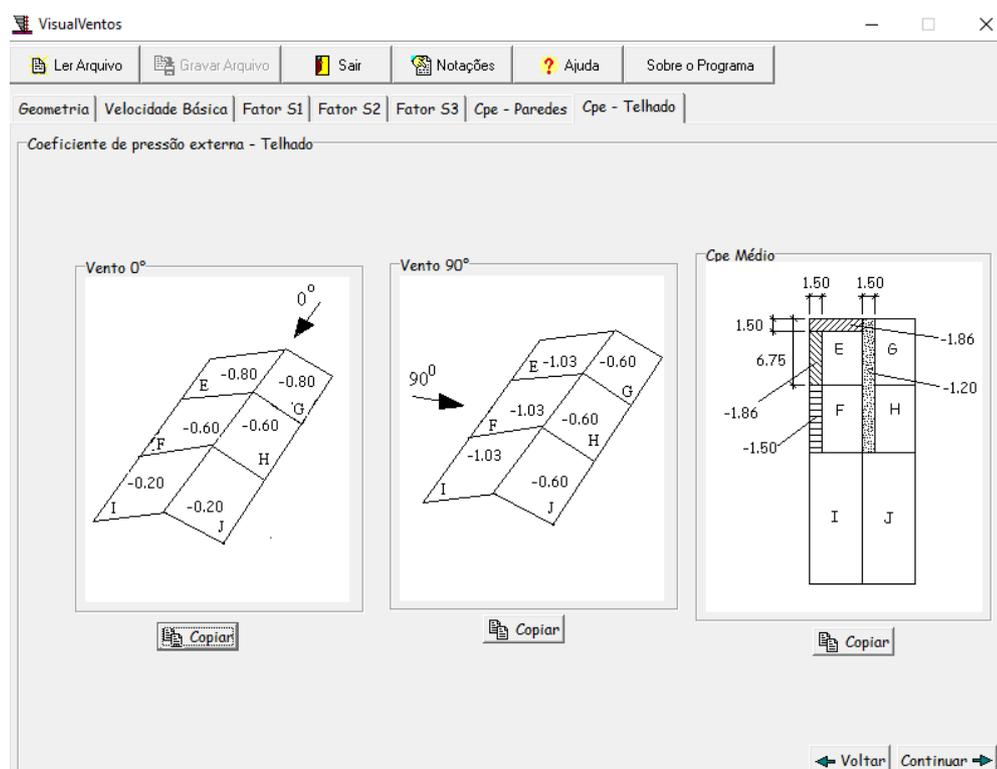
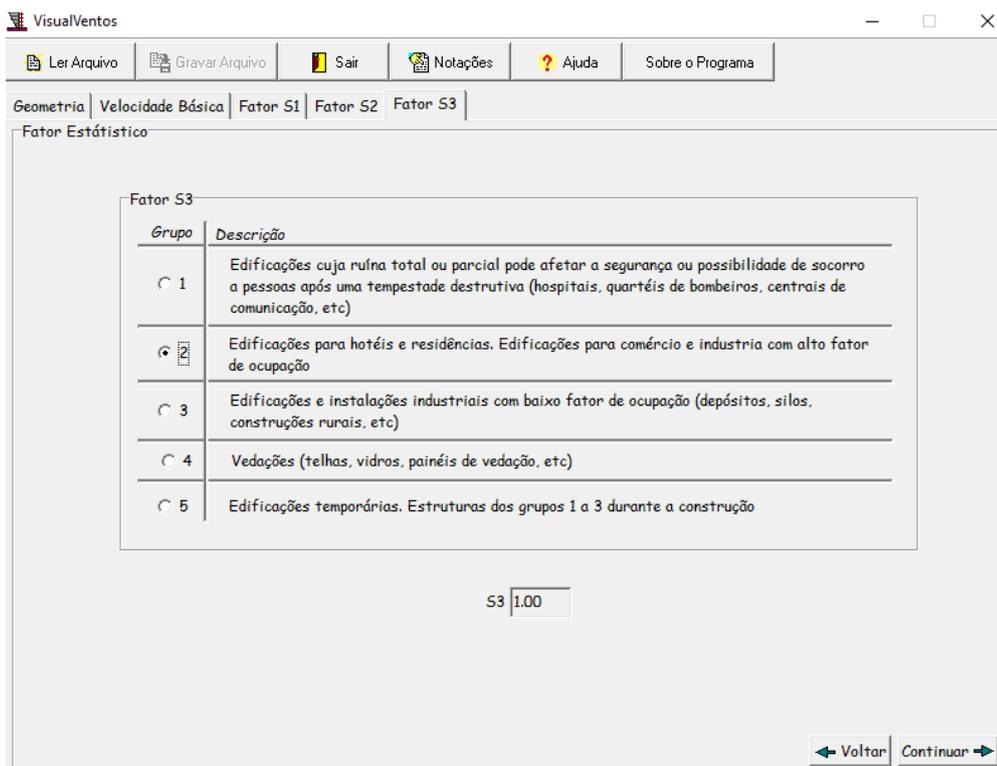
Maior dimensão m

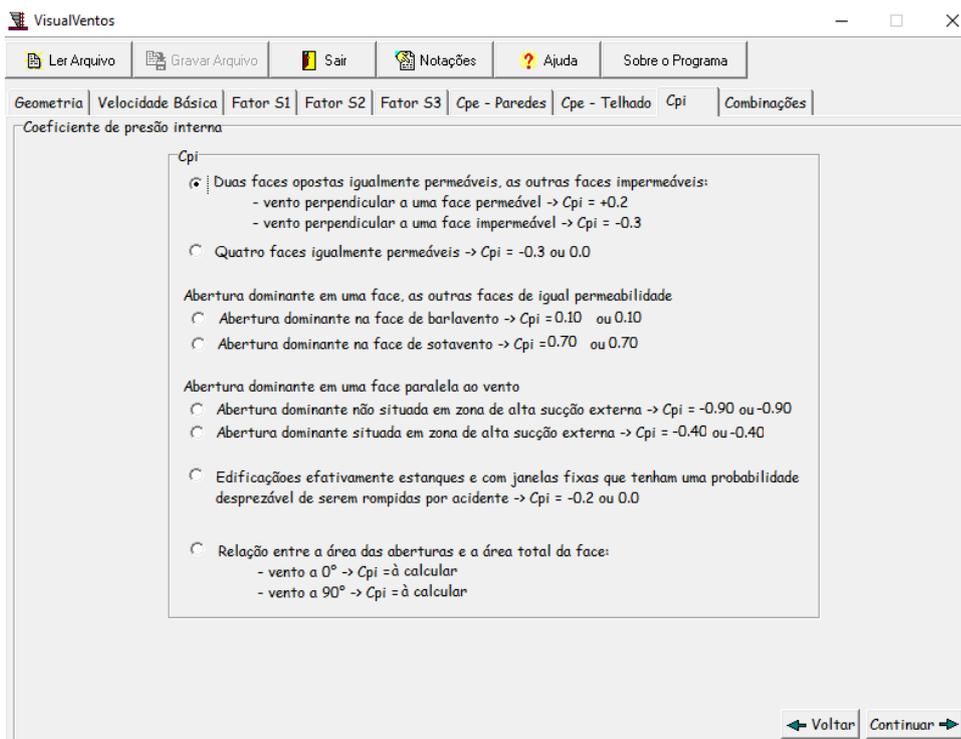
Fator S2

S2

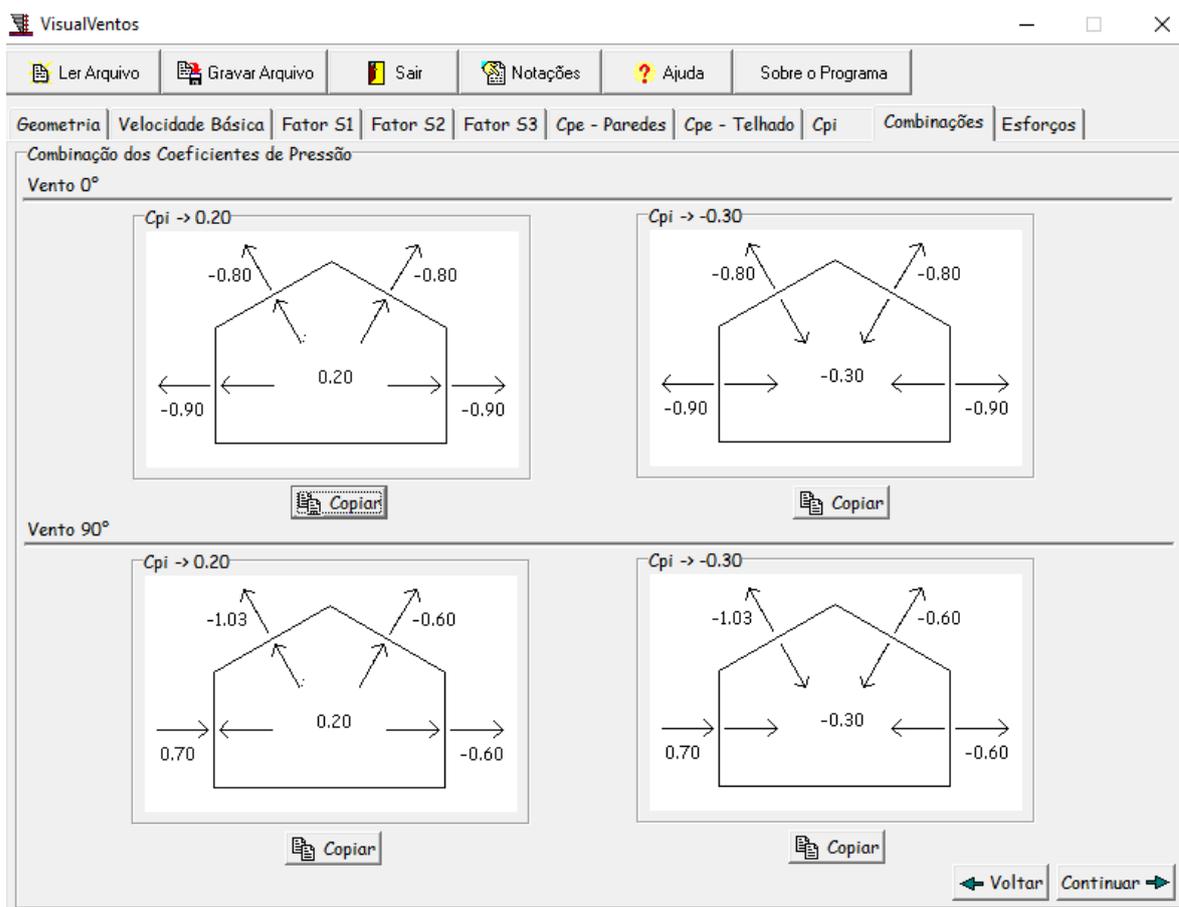
Calcular

Voltar Continuar

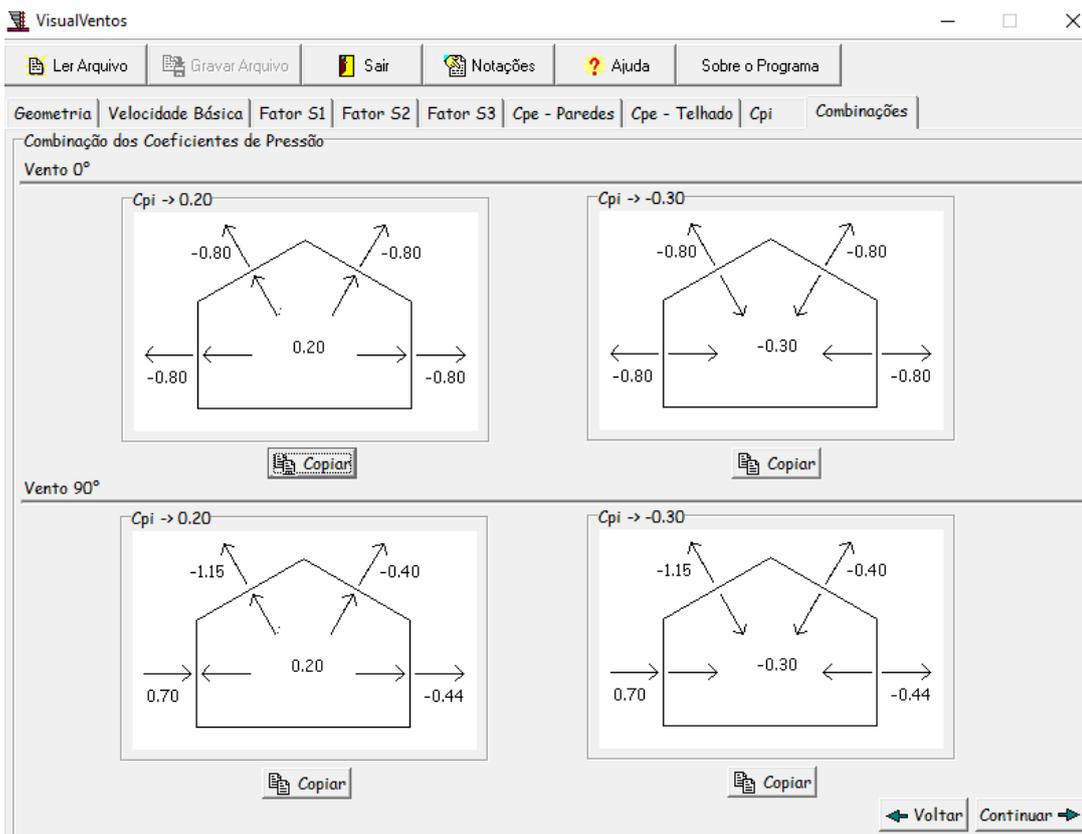




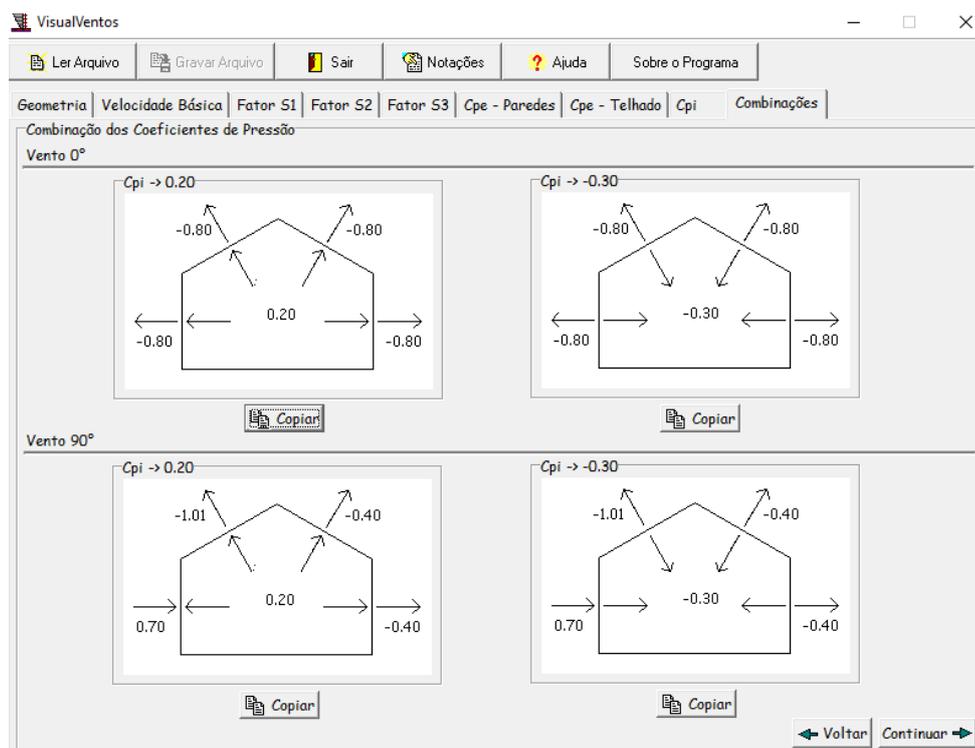
Vão 10 metros



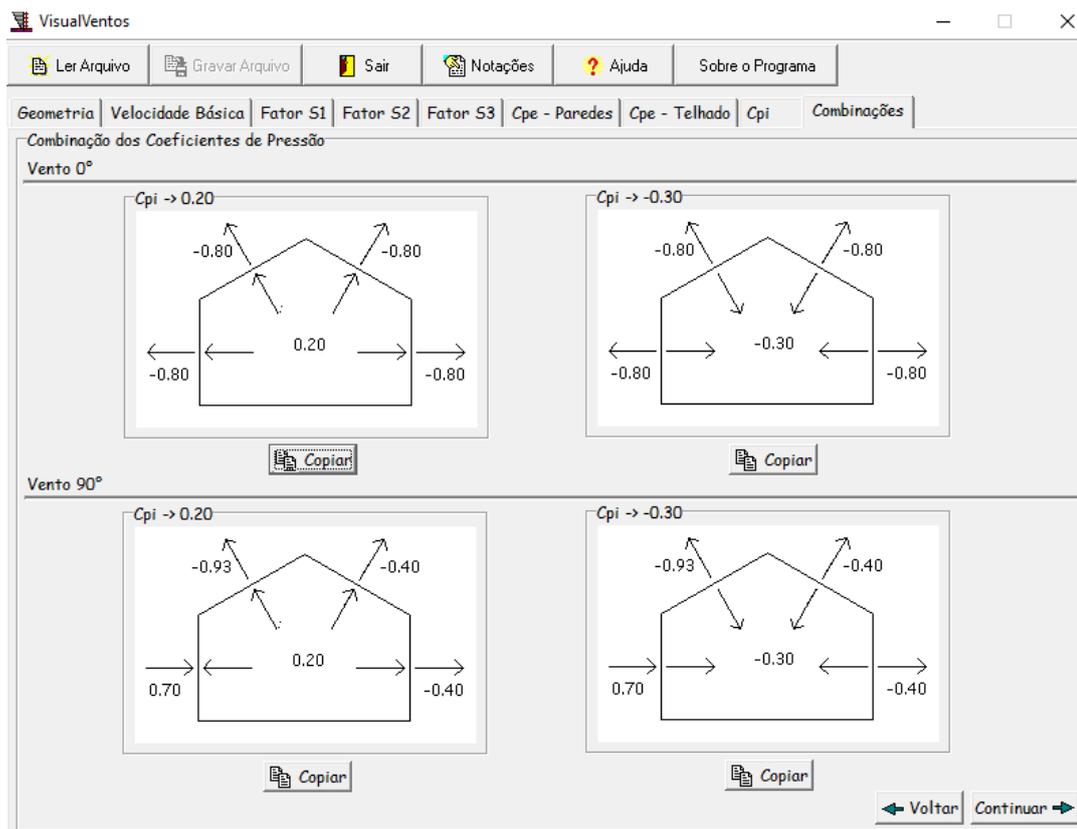
Vão 15 metros



Vão 20 metros



Vão 25 metros



Vão 30 metros

