

Cobertura modulada utilizando perfis metálicos tubulares

HILDA COTEGIPE PELLICO

Departamento de Arquitetura e Urbanismo do Unicentro Izabela Hendrix da Igreja Metodista – UNIHENDRIX, Belo Horizonte, MG, Brasil. e-mail: hildacotegipe@terra.com.br

ERNANI CARLOS DE ARAÚJO

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração Construção Metálica, Escola de Minas – UFOP, Ouro Preto/MG. e-mail: ecar@em.ufop.br

HENOR ARTUR DE SOUZA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração Construção Metálica, Escola de Minas – UFOP, Ouro Preto/MG. e-mail: henor@ufop.br

Introdução

Com a grande evolução tecnológica na área da representação, tornou-se possível vislumbrar formas complexas e este fato começou a influenciar inicialmente o desenho dos objetos, mobiliários, veículos, etc. A partir da utilização de programas de desenho para se obter uma representação detalhada das formas, tornou-se possível idealizar objetos nunca antes equacionados. Aliado a isto, a pesquisa de novos materiais e elementos aplicáveis à construção levou ao aprimoramento das tipologias construtivas, algumas, trazendo, possibilidades surpreendentes para concepções inovadoras.

As coberturas expressam de maneira detalhada toda a história das construções desenvolvidas pelo ser humano. Por se tratarem de construções que abrangem desde os sistemas artesanais, empíricos e multiplicando-se em realizações contemporâneas industrializadas ou não, as coberturas estão presentes em experiências com os mais diversos sistemas construtivos, incluindo construções em concreto armado, pré-moldadas, estrutura metálica, madeira, palha, pele, lona, etc. Elas são conformadas segundo linhas de declive, levando à concepção das mais variadas formas, com o objetivo de proporcionar o perfeito esco-

Do ponto de vista do comportamento estrutural, as coberturas oferecem um vasto ambiente onde se pode equacionar uma maior diversidade possível de sistemas construtivos quer sejam eles mistos ou utilizando um só tipo de material. Em geral as coberturas têm um comportamento mais autônomo, facilitando o equacionamento de suas cargas, o que torna possível uma avaliação mais ampla quanto ao aspecto do comportamento versus forma. O conhecimento da geometria de uma forma pode levar à compreensão de seus atributos físicos e de seu equacionamento matemático. Este conhecimento auxilia a dimensioná-la e a ordenar suas partes, quando transformadas em uma construção. A medida e o número são o que determina a ordenação nas obras e nas maneiras de realizá-las. Neste trabalho estuda-se uma conformação tridimensional para cobertura, em perfis metálicos tubulares, organizada em modelos modulados. Por meio da discriminação de um modelo teórico, analisam-se aspectos do seu desempenho estrutural e quanto à ambientação que pode proporcionar, comparando-se com um modelo convencional de cobertura.

amento das águas. Por estarem ligadas conceitualmente ao comportamento das superfícies apresentam movimentações diversificadas.

No desenvolvimento do projeto proposto de cobertura é usado o conceito de modulação e são analisados os aspectos de homogeneidade, densidade e dualidade. Para uma maior racionalização dos elementos de projeto são observadas as vantagens da utilização de sistemas geométricos regulares (PELLICO et al, 2006 a).

Modelo Proposto

A concepção do projeto é a de um elemento tridimensional modular que funciona como uma estrutura independente, mas podendo ser interligado a outros e funcionando ao fim como um conjunto solidário. O modelo representa uma cobertura com proporções horizontais, para uma área de aproximadamente 2.500 m² (PELLICO et al, 2006 b).

A intenção desta proposta é a de uma construção que possa expandir em passos mínimos de 100 m². Sua forma

está baseada em um fragmento estrutural do poliedro arquimediano denominado rombicuboctaedro que é constituído por faces retangulares e triangulares (SÂ, 1982). Cada módulo proposto tem como projeção um polígono octogonal articulado a outros quatro e entre eles aparecendo um quadrado de área equivalente a aproximadamente 16 % da área de projeção do módulo estrutural, **Figura 1**. Em alguns casos, principalmente na região central da construção, estes quadrados serão cobertos por um material translúcido (policarbonato alveolar).

Como função do espaço proposto definiu-se que seja a de um restaurante universitário com atendimento previsto para 2000 pessoas em três turnos diferentes. Nos espaços do projeto foi utilizada uma setorização para organizar fisicamente. Os setores de produção, acesso de funcionários, circulação vertical, administração e banheiros estão reunidos em um bloco único e posicionados junto ao acesso de serviços propostos. Neste bloco, os ambien-

tes foram concebidos com um pé direito de 4 m, permitindo assim a utilização de sua cobertura, onde foram previstas áreas ajardinadas com bancos para repouso e descanso após as refeições. Na cobertura foi previsto ainda um setor administrativo e um espaço destinado aos alunos, para atividades acadêmicas. No salão de refeições o pé direito está entre 7 e 8 m, dependendo de cada proposta, com soluções de lay-out que possibilitam a colocação de até 200 mesas e atendimento de 700 pessoas, simultaneamente. Espaços de transição (varandas, recuo nos planos de fechamento) foram propostos com a intenção de proteger as esquadrias e evitar insolação excessiva na época do verão. Três entradas, uma para cada via circundante, foram criadas visando facilitar o acesso de pessoas provenientes das construções vizinhas.

O módulo proposto comporta-se como um guarda chuva ascendente com apoio central em pilares onde ocorre o recolhimento das águas pluviais. Este recolhimento tem ainda como objetivo, o armazenamento e conseqüente reaproveitamento destas águas visando utilizá-las na irrigação das áreas ajardinadas próximas ao restaurante. Especialmente, a justaposição de elementos modulados proporcionou a configuração de linhas poligonais semelhantes a arcos parabólicos criando uma sensação de um ambiente arbóreo.

Para o sistema de fechamento, foram previstos: forro em gesso cartonado no teto, painéis pré-moldados de concreto nas áreas de apoio e, estrutura metálica secundária para apoio das lajes de terraço, **Figura 2**.

Sistema Modular Proposto

O módulo-pilar é autoportante podendo ser usado em construções de menor porte, tais como espaços de serviços, com finalidades comerciais, residenciais, etc. Cada unidade pode abrigar uma construção de até 200 m² quando se utiliza dois pavimentos, **Figura 3**.

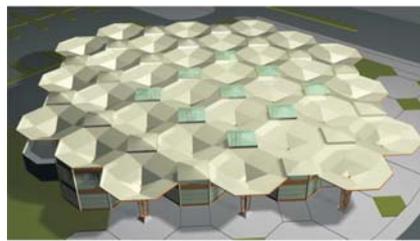


Figura 1 - Vista da cobertura.
Fonte: PELLICO et al., 2006 b.

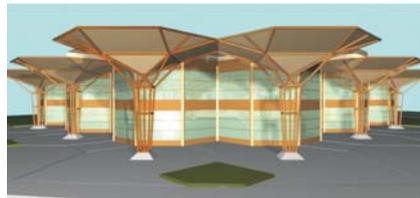
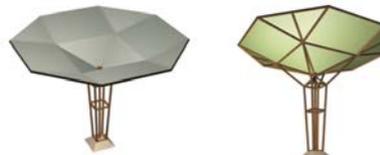


Figura 2 - Perspectiva.
Fonte: PELLICO et al., 2006 b.

Os quadrados da malha utilizada são definidos pela articulação de quatro módulos e pode ser utilizado como espaço de iluminação ou ventilação no caso de uma construção de maiores dimensões. Ainda nesse caso, foi proposta uma base de concreto em cada ponto de apoio dos pilares permitindo o nivelamento de suas bases e conseqüentemente, das suas arestas superiores. Em conjuntos modulares de mai-



Vista Superior Vista Inferior
Figura 3 - Pilar. Fonte: PELLICO et al., 2006 b.

ores proporções, o sistema pode ser utilizado em supermercados, escolas, instituições, etc. Seus pontos de apoio estão ordenados segundo um reticulado ortogonal, facilitando a organização dos espaços em geral.

A cobertura resultou da junção de 24 módulos com 93,25 m² cada um, totalizando uma cobertura de 2.240 m² e constituindo a parte fechada do restaurante. Espaços de transição foram ainda propostos criando-se varandas com a finalidade de mostrar a estrutura e proteger o sistema de fechamento, ampliando em 560,0 m², a área de projeção da retícula modular.

O sistema de captação das águas pluviais é subterrâneo e as águas são

coletadas em um reservatório também no subsolo, visando sua reutilização na irrigação dos jardins circundantes ou jardineiras da edificação. Na base de cada pilar deve ser previsto, portanto uma caixa de inspeção dessa rede coletora.

Sistema Estrutural Proposto

O conceito deste elemento modular é o de uma cobertura com apenas um apoio por módulo. Sua forma poliédrica permite a utilização de barras retas, porém quando os módulos são justapostos, sua conformação se aproxima ao perfil de um arco, constituindo um espaço cujo teto se configura em abóbadas, **Figura 4**.



Figura 4 - Perspectiva interna. Fonte: PELLICO et al., 2006 b.

A forma modular proposta é poliédrica e constituída por retângulos e triângulos, estando os retângulos ladeados por triângulos o que favorece o enrijecimento do conjunto. As arestas se posicionam em diagonais conformando pórticos de formato aproximadamente parabólico. Quando os módulos são agrupados, transformam-se em um conjunto solidário de maior estabilidade e rigidez. Para o caso de um módulo solitário, pode-se usar o plano de esquadrias para que estes dois objetivos sejam conseguidos.

Análise e Dimensionamento

Os tipos de carregamento utilizados para o desenvolvimento desse projeto foram sobrecarga (Sc), carga permanente (CP) e ações devido ao esforço do vento (CV). Os carregamentos "Sc" e "CP" foram obtidos, respectivamente, através da NBR 6120:1980 e de catálogos de fabricantes, enquanto o carregamento "CV" foi obtido através da NBR 6123:1988. Foi considerado Sc = 0,50 kN/

m², para sobrecarga de cobertura. Em relação ao carregamento "CP", foram considerados os seguintes itens: estrutura tubular principal e secundária; telha metálica tipo sanduíche: 0,12 kN/m² e telha tipo translúcida: 0,017 kN/m².

Os carregamentos atuantes devem ser combinados devido ao fato dos mesmos poderem atuar simultaneamente. Com isso, são definidos dois tipos de combinações de ações de carregamento de acordo com a NBR 8800:1986: combinações de ações para os estados limites últimos e combinações de ações para os estados limites de utilização.

Para a realização da análise estrutural 3D, foi utilizado o software ANSYS Versão 6.0 (ANSYS, 2001). Nesse software as análises são realizadas através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Este software permite a visualização da estrutura em 3D original e deformada, os esquemas de carregamento e os diagramas de esforços normal, cortante e momento fletor. As cargas podem ser pontuais, uniformes, trapezoidais e de temperatura. Qualquer tipo de vinculação: flexível, rígida ou semi-rígida, pode ser considerada.

No projeto foi realizada análise linear da edificação. O elemento utilizado na análise foi um elemento de barra uniaxial tridimensional de dois nós com seis graus de liberdade por nó (três translações e três rotações em relação aos eixos "x", "y" e "z"), o elemento BEAM 44. Os tipos de cargas utilizadas foram cargas pontuais e uniformemente distribuídas e as ligações entre barras foram consideradas rígidas.

Neste projeto foram adotados perfis tubulares para todas as barras componentes da edificação. A análise estrutural 3D foi realizada com o objetivo de verificar o comportamento da estrutura em três dimensões, obtendo-se uma análise mais próxima da realidade. Primeiramente, toda a estrutura foi modelada em três dimensões no software ANSYS Versão 6.0 (ANSYS, 2001), **Figuras 5 e 6**.

Em seguida, os carregamentos "CP",

"Sc", "CV-90°" (carga de vento a 90°) e "CV-0°" (carga de vento a 0°) foram aplicados. Após a aplicação dos tipos de carregamento, foram realizadas todas as combinações de ações para o Estado Limite Último, determinando-se os esforços solicitantes de cálculo para cada barra. Esses esforços foram determinados verificando-se a pior situação de esforço atuante em cada barra, ou seja, a combinação de ação que mais solicitou cada barra. Na **Tabela 1** são apresentados os esforços solicitantes máximos em cada barra, onde a localização destas barras é mostrada na Figura 5.

Com a obtenção dos esforços solicitantes de cálculo em cada barra, foi realizado o dimensionamento destas barras de acordo com a NBR 8800:1986, considerando aço VMB 300 (fy = 300 Mpa). Na **Tabela 2** identificam-se os perfis determinados para as barras a partir das análises e do dimensionamento.

Realizado todo o dimensionamento da estrutura da edificação, foram realizadas as combinações de ações para os Estados Limites de Utilização, de acordo com a NBR 8800:1986. O deslocamento vertical máximo admissível para as vigas de cobertura da edificação é de L/180 (Tabela 26 - Anexo C - NBR 8800:1986), onde "L" é o vão livre teórico da viga em estudo. Assim, tem-se um deslocamento vertical máximo

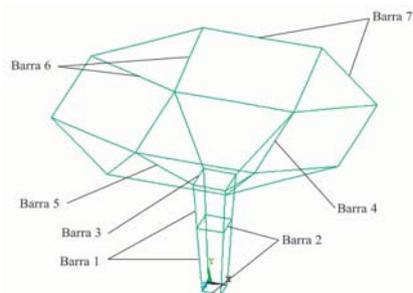


Figura 5 - Configuração do módulo de origem da estrutura do projeto.

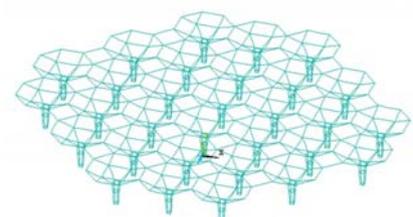


Figura 6 - Modelagem da estrutura 3D do projeto.

admissível de 22,22 mm, pois as vigas têm vão de 4,00 m. Portanto, como o maior deslocamento vertical da edificação foi de 3,15 mm, a edificação satisfaz a esse estado limite de utilização.

Após esta verificação, determinaram-se os deslocamentos horizontais da estrutura. O deslocamento horizontal máximo admissível para a edificação é de H/300, onde "H" é a altura da edificação (Tabela 26 - Anexo C - NBR 8800:1986). Assim, tem-se um deslocamento horizontal máximo admissível de 23,33 mm, pois a H = 7,00 m. Portanto, como o maior deslocamento horizontal da edificação foi de 13,88 mm, a edificação satisfaz às verificações desse estado limite de utilização.

Após a verificação dos Estados Limites de Utilização, tem-se na **Tabela 3** o quantitativo de material utilizado no projeto referente às barras constituintes da estrutura, considerando análise estrutural em 3D.

O projeto proposto resultou em sete tipologias de barras, com 626 nós no total, que caracterizam a sua densidade. Quanto ao peso o projeto totalizou 30,36 kgf/m².

Considerações Finais

O projeto de cobertura proposto neste trabalho teve como parâmetros alguns conceitos que foram estabelecidos inicialmente tais como: estabelecer um sistema de cobertura que permitisse expansão progressiva, ou seja, crescimento e possibilidade de ampliação, e outro em que fosse determinada inicialmente a área a ser utilizada constituindo um espaço único previamente definido.

Paralelamente, buscou-se observar a viabilidade de sistemas modulares menos utilizados e as possíveis dificuldades decorrentes desta variação de procedimento. A análise e o dimensionamento feito mostraram que o peso por m² final do modelo proposto mostra, entretanto, que uma nova proposta de sistemas modulares é igualmente viável e mais leve quando comparada com um modelo convencional que usa

Tabela 1 - Esforços solicitantes em cada barra do projeto

Elementos	Esforços Solicitantes de Cálculo				
	Momento fletor (kNm)		Esforço cortante (kN)		Momento fletor (kNm)
	Mdx	Mdy	Vdx	Vdy	Nd
Barra 1	27,53	27,40	-	41,50	59,11
Barra 2	26,28	7,27	79,00	-	-28,91
Barra 3	10,11	7,05	-	17,80	30,70
Barra 4	4,00	3,80	6,60	-	11,20
Barra 5	10,16	7,60	5,30	-	84,31
Barra 6	4,51	4,51	2,90	-	60,10
Barra 7	2,61	1,10	4,70	-	-70,52

Tabela 2 - Perfis utilizados para as barras na análise de dimensionamento da estrutura em 3D do projeto

Elementos	Perfis
Barra 1	TB $\phi 141,3 \times 19,1$
Barra 2	TB $\phi 141,3 \times 9,5$
Barra 3	TB $\phi 141,3 \times 9,5$
Barra 4	TB $\phi 141,3 \times 9,5$
Barra 5	TB $\phi 141,3 \times 5,6$
Barra 6	TB $\phi 141,3 \times 5,6$
Barra 7	TB $\phi 141,3 \times 5,6$

Tabela 3 - Quantitativo de material utilizado no projeto

Elementos	Perfis	L (m)	p (kg/m)	Quant.	Peso (kg)
Barra 1	TB $\phi 141,3 \times 19,1$	4,30	57,40	120	29.618,40
Barra 2	TB $\phi 141,3 \times 9,5$	0,89	31,00	240	6.621,60
Barra 3	TB $\phi 141,3 \times 9,5$	1,09	31,00	120	4.054,80
Barra 4	TB $\phi 141,3 \times 9,5$	4,00	31,00	120	14.880,00
Barra 5	TB $\phi 141,3 \times 5,6$	2,80	18,60	120	6.249,60
Barra 6	TB $\phi 141,3 \times 5,6$	2,94	18,60	240	13.124,16
Barra 7	TB $\phi 141,3 \times 5,6$	4,00	18,60	196	14.582,40
Peso Total (kg)					89.130,96
Área Total (m ²)					2.936,15
Taxa Final (kgf/m ²)					30,36

um sistema de treliças utilizando uma malha com eixos ortogonais de espaçamento constante e alinhamentos diagonais conformando pirâmides, **Figura 7**. Outra malha quadrangular constitui o banzo superior. A cobertura é composta de 20 x 20 módulos de 2,60 m por 2,60 m, totalizando uma área de 2.700 m² e 52 m de lado.

Comparando os resultados obtidos na análise e dimensionamento, verificou-se que embora o número de barras fosse igual, o número de nós no projeto proposto foi menor em relação ao projeto

convencional, porém de tipologias mais diversificadas. O número total de nós no projeto proposto resultou em 626 nós no total, contra os 866 nós no projeto convencional, que caracterizam sua maior densidade. Quanto ao peso o projeto proposto totalizou 30,36 kgf/m² enquanto o projeto convencional totalizou 42,79 kgf/m², demonstrando que sendo mais denso é, portanto, o mais pesado.

Pode-se concluir que a viabilidade de um modelo não está condicionada apenas ao peso final obtido, mas devem-se tecer considerações quanto aos aspectos

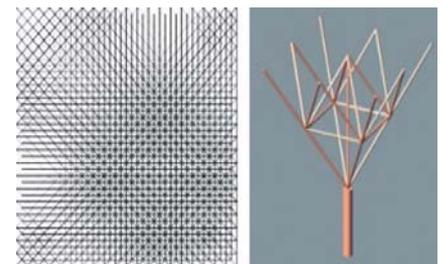


Figura 7 - Malha modular e perspectiva do pilar do projeto convencional. Fonte: PELLICO, 2004.

da produção e montagem. Em todos os casos, é importante realçar a participação do engenheiro e do arquiteto na avaliação dos diversos parâmetros inerentes às decisões a serem tomadas no andamento e concepção de uma proposta. Quanto à ambientação, utilizar modelos dotados de maior originalidade pode enriquecer o espaço atribuindo-lhe maior autenticidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Vallourec & Mannesmann Tubes do Brasil. ■

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS. User's Manual for Revision 6. Houston, PA, Swanson Analysis Systems Inc., 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cargas para Cálculo de Estruturas de Edificações: NBR 6120. Rio de Janeiro, 1980.
- _____. Forças Devido ao Vento em Edificações: NBR 6123. Rio de Janeiro, 1988.
- _____. Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios: NBR 8800. Rio de Janeiro, 1986.
- PELLICO, Hilda Cotegipe. Estudo de sistemas modulares espaciais para coberturas usando perfis tubulares. Ouro Preto, 2004, 191p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.
- PELLICO, Hilda Cotegipe; ARAÚJO, E. C.; SOUZA, H. A. Os conceitos de homogeneidade, densidade e dualidade e a construção metálica modulada. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 3., 2006 a, Ouro Preto. Anais ... Ouro Preto: III CICOM, 2006.
- PELLICO, Hilda Cotegipe; ARAÚJO, E. C.; SOUZA, H. A. Projeto de cobertura modulada utilizando perfis metálicos tubulares. In: JORNADAS SULAMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 32., 2006 b, Campinas. Anais... Campinas: XXXII Jornadas, 2006.
- SÁ, Ricardo. Edros. São Paulo, Pro Editores, 1982, 121p.
- VALLOUREC & MANNESMANN TUBES. Tubos estruturais de seção circular (MSH): dimensões, propriedades geométricas e materiais. Informações técnicas [S.1.], 2000.