

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**SISTEMA DE COBERTURA COM PÓRTICOS DE
ESTABILIZAÇÃO BIDIRECIONAIS EM PERFIS METÁLICOS
DE SEÇÃO CIRCULAR COM COSTURA PARA CONSTRUÇÃO
RESIDENCIAL INDUSTRIALIZADA**

Ouro Preto, setembro de 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**SISTEMA DE COBERTURA COM PÓRTICOS DE
ESTABILIZAÇÃO BIDIRECIONAIS EM PERFIS METÁLICOS
DE SEÇÃO CIRCULAR COM COSTURA PARA CONSTRUÇÃO
RESIDENCIAL INDUSTRIALIZADA**

AUTORA: CRISTINA EVANGELISTA SILVA

ORIENTADORES: Prof. Dr. Henor Artur de Souza
Prof. Dr. Ernani Carlos de Araújo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Civil, área de concentração: Construção Metálica.

Ouro Preto, setembro de 2011.

Ao meu melhor amigo, Jardel (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

“Eu conheço o preço do sucesso: dedicação, trabalho duro e uma incessante devoção às coisas que você quer ver acontecer.” (Frank Lloyd Wright)

Agradecimento primordial não poderia deixar de ser a Deus, que me permitiu chegar até aqui, me dando força e sabedoria para lidar com as barreiras, cansaço, desânimo e desespero. Se não fosse pela ajuda Dele, provavelmente não teria alcançado mais essa vitória.

Ao Jardel Oliveira Magela, que me incentivou a fazer esse mestrado, pelo incentivo constante durante o tempo todo de amizade que tivemos, por sempre acreditar na minha capacidade, por ter sido esse amigo tão especial e insubstituível na minha vida.

Aos meus orientadores, Henor Artur de Souza e Ernani Carlos de Araújo, pela competência, compreensão nos momentos difíceis, atenção e incentivo durante as reuniões.

À Fundação Gorceix, FAPEMIG, PROPEC e UFOP pelo apoio institucional e concessão de bolsa.

À todos os professores que tive durante a minha formação, pelo ensino e competência.

À todos os meus colegas de mestrado, em especial à Ivonice, pela amizade, agradável e divertida companhia nos momentos incansáveis de estudo e de descontração.

À Roberta Machado e Letícia que gentilmente tiraram minhas dúvidas com o programa ANSYS.

Às empresas que colaboraram fornecendo informações fundamentais: BIG FARM (Antônio Carlos), BRASILIT, FLASAN (Alexandre Santiago), GERDAU AÇOMINAS, PROTUBO, USIMINAS e TUBONAL (Marconi Coxir).

À todos que contribuíram de alguma forma com o desenvolvimento desse trabalho, em especial: engenheiro Neymar Camões (Mestrado/UFOP) e os estudantes Ana Paula Diniz Santos e Gustavo Junio (UIT).

À minha família e à todos os meus amigos, pela amizade e compreensão da minha ausência nos últimos tempos. Em especial à Adriana, que me deu muita força nessa reta final, agradeço a amizade verdadeira, confiança, carinho, paciência, motivação, compreensão e ajuda.

“Não é o ângulo reto que me atrai, nem a linha reta, dura, inflexível, criada pelo homem. O que me atrai é a curva livre e sensual, a curva que encontro nas montanhas do meu país. No curso sinuoso dos seus rios, nas ondas do mar, no corpo da mulher preferida. De curvas é feito todo o universo, o universo curvo de Einstein.”

Oscar Niemeyer

RESUMO

Com o desenvolvimento tecnológico ocorrido em todas as áreas do conhecimento, nas últimas décadas, a indústria da construção civil obteve um grande impulso. Neste cenário, o arquiteto tem à sua disposição uma gama enorme de possibilidades no contexto arquitetônico, juntamente com o alto grau de complexidade atribuído às atividades inerentes ao seu trabalho, em todas as etapas do processo. A arquitetura passou a ser uma ciência extremamente precisa e baseada em aplicações coordenadas dos mais variados campos do conhecimento. A precisão nos projetos e na execução das obras tornou-se característica fundamental para se obter sucesso na utilização da construção industrializada, bem como a racionalização nos processos de planejamento com o emprego da coordenação modular no projeto arquitetônico. Este trabalho apresenta-se uma visão geral da construção industrializada, com ênfase nos perfis tubulares de seção circular, propondo-se um modelo arquitetônico e estrutural com o uso de pórticos de estabilização bidirecionais com perfis metálicos de seção circular com costura e materiais industrializados como solução para construção residencial e a verificação de sua viabilidade de utilização. Esse sistema é mais eficiente que os convencionais, uma vez que o sistema de cobertura dos pórticos resulta numa só estrutura que une paredes e cobertura. Os pórticos de estabilização bidirecionais são os principais elementos estruturais da construção e consistem em pórticos espaciais que proporcionam estabilidade em duas direções perpendiculares quando submetidos a ações horizontais, apresentando maior resistência a ações como: fortes ventos e até mesmo a abalos sísmicos. A análise estrutural é realizada com o Método dos Elementos Finitos, utilizando o *software ANSYS*. Por meio de estudo numérico foi possível verificar o comportamento da estrutura de acordo com o carregamento aplicado e a sua viabilidade de utilização, obtendo-se assim uma análise mais próxima da realidade. Analisou-se também a viabilidade do sistema estrutural proposto estudando ligações e fechamentos adequados quanto ao conforto térmico, acústico e estanqueidade, além de compará-lo com outros modelos estruturados em aço encontrados no mercado.

Palavras-chave: pórticos bidirecionais em aço; elementos finitos; Ansys; arquitetura.

ABSTRACT

The technological development that occurred in all areas of knowledge in the recent decades, caused a great boost in the construction industry. In this scenario, the architect has at its disposal a huge range of possibilities in architectural context, jointly with the high degree of complexity attributed to activities related to their work, at all stages of the process. The Architecture has become an extremely accurate science, based on applications and coordinates of various knowledge fields. The accuracy in the projects and in the works has become essential features for success in the use of industrialized construction, as well as the rationalization in the planning processes through the use of modular coordination in architectural design. This work presents an overview of industrialized construction with emphasis on the tubular circular section profiles by proposing an architectural and structural model using of doubledirection stabilization with metallic profiles of circular section with sewing and industrial materials as a solution to residential construction and for its verifying for the use viability in residential construction. This system is more efficient than the conventional ones, once that it has got a coverage of frameworks that results in a structure that joins walls and coverage and frameworks stabilization. The doubledirection stabilization are the main structural elements of the construction and consist of spatial portals that provide stability in two perpendicular directions when submitted to horizontal actions, showing more resistance to actions such as strong winds and even earthquakes. The structural analysis is achieved with the Finite Elements' Method, using the software program *ANSYS*. Through this numeric research it was possible to verify the structure behavior according to the load applied and the viability of use, bringing that way, a more realistic and accurate analysis. Also, the viability of the structural system proposed was analyzed, studying links and appropriate locks on the thermal comfort and acoustic seal, as well as comparing them with other steel-structured models already in the market. After the evaluation of the results it was concluded that the proposed model has got advantages towards the conventional construction. reduction of structure links.

Keywords: steel frameworks doubledirections; finite element; Ansys; architecture.

ÍNDICE

RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XVIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIX
CAPÍTULO I	
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Desenvolvimento da construção metálica	2
1.2 Principais vantagens da construção metálica	6
1.3 Objetivos	7
1.3.1 Objetivo geral	7
1.3.2 Objetivos específicos	7
1.4 Justificativa	8
1.5 Metodologia adotada	10
1.6 Estrutura do trabalho	11
CAPÍTULO II	
2. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS EM ARCOS E PÓRTICOS	13
2.1 O arco na arquitetura	13
2.1.1 Tipos de arcos usados na construção metálica	16
2.2 O pórtico na arquitetura	18
2.2.1 Tipos de pórticos usados na construção metálica	18
2.2.1.1 Pórtico bi-apoiado	19
2.2.1.2 Pórtico bi-articulado	19
2.2.1.3 Pórtico engastado e livre	19
2.2.1.4 Pórtico tri-articulado	20
2.2.1.5 Pórtico simples de alma cheia	20
2.2.1.6 Pórtico com tirantes	21
2.2.1.7 Pórtico com escora central	21
2.2.1.8 Pórtico com cobertura em poligonal	21
2.2.1.9 Pórtico com cobertura em arco	22

2.2.1.10 Pórtico simples com viga castelada ou celular	22
2.2.1.11 Pórtico espacial	23
2.2.2 Contraventamento de pórticos	23
CAPÍTULO III	
3. PERFIS TUBULARES	26
3.1 A Produção de perfis tubulares	27
3.2 Vantagens dos perfis tubulares	28
3.3 Perfis de chapa dobrada	30
3.4 Perfis tubulares com costura	32
3.5 Perfis tubulares sem costura	33
3.6 Curvamento de perfis tubulares	34
CAPÍTULO IV	
4. ESTUDO DE CASO	36
4.1 Edificações residenciais em estrutura metálica	36
4.1.1 Casa Fácil – Gerdau	37
4.1.2 Usiteto – Usiminas	40
4.1.3 Quick House – Big Farm Ltda	41
4.2 Modelos estudados	47
4.2.1 Modelo 1	48
4.2.2 Modelo 2	49
4.2.3 Modelo 3	50
4.2.4 Modelo 4	51
4.2.5 Análise arquitetônica dos modelos	52
4.3 Modelo arquitetônico e estrutural proposto	55
4.3.1 Especificação dos principais elementos estruturais e arquitetônicos	69
4.3.1.1 Elementos estruturais	69
4.3.1.2 Cobertura metálica com telhas termoacústicas	72
4.3.1.3 Fechamentos verticais industrializados.....	80
4.3.1.4 Forro de painéis de OSB.....	86
CAPÍTULO V	
5. ANÁLISE NUMÉRICA DO SISTEMA ESTRUTURAL	90
5.1 Análise numérica do sistema estrutural	90

5.1.1 Propriedades geométricas do perfil tubular de seção circular	92
5.1.2 Carregamentos e vinculações	92
5.1.2.1 Carregamentos verticais	92
5.1.2.2 Carregamento horizontal devido ao efeito do vento	93
CAPÍTULO VI	
6. RESULTADOS E ANÁLISES	95
6.1 Resultados e análises do sistema estrutural	95
6.1.1 Deslocamentos	96
6.1.2 Força Axial	97
6.1.3 Momento Fletor y	98
6.1.4 Momento Fletor z	99
6.1.5 Momento de Torção	100
6.1.6 Tensão de Torção	101
6.1.7 Força de Cisalhamento z	102
6.1.8 Força de Cisalhamento y	103
6.1.9 Deformação	104
6.2 Comparação com outros modelos	105
6.2.1 Modelos	105
6.2.2 Construção convencional	106
6.2.3 Análise comparativa	111
CAPÍTULO VII	
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
7.1 Conclusão	118
7.2 Sugestões para pesquisas futuras	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
ANEXOS	126
ANEXO A: Especificação das normas técnicas e características de perfis	127
ANEXO B: Curvamento de perfis	128
ANEXO C: Consumo de aço da construção convencional	130
ANEXO D: Memorial de cálculo da otimização da seção dos pórticos de estabilização bidirecionais	142

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1 – Iron Bridge, em Coalbrookdale, Inglaterra	2
Figura 1.2 – Palácio de Cristal, Londres	3
Figura 1.3 – Torre Eiffel, Paris	3
Figura 1.4 – Villa Savoye, Le Corbusier	4
Figuras 1.5 e 1.6 – Conjunto Habitacional Nemausus, 1987.....	6
Figura 1.7 – Pórticos de estabilização bidirecionais	9

CAPÍTULO II

Figura 2.1 – Arco com forças aplicadas e em tracejado sua deformação	13
Figura 2.2 – Ponte-aqueduto Pont du Gard, França	14
Figura 2.3 – Arco na Porta de Ishtar, Museu de Pérgamo, Berlim	15
Figura 2.4 – Arcos metálicos usados como contenção	15
Figura 2.5 – Arcos usados como elemento de sustentação da Ponte JK, Brasília	15
Figura 2.6 – Perspectiva em 3D da maior ponte do mundo, Dubai	16
Figura 2.7 – Tipos de arcos com geratriz circular	16
Figura 2.8 – Arco com geratriz parabólica	17
Figura 2.9 – Monumento em arco parabólico, cidade de Tacna, Peru	17
Figura 2.10 – Pórtico com forças aplicadas gerando sua deformação	18
Figura 2.11 – Pórtico bi-apoiado	19
Figura 2.12 – Pórtico bi-articulado	19
Figura 2.13 – Pórtico engastado e livre	20
Figura 2.14 – Pórtico tri-articulado	20
Figura 2.15 – Pórtico simples de alma cheia	20
Figura 2.16 – Pórtico com tirantes	21
Figura 2.17 – Pórtico com escora	21
Figura 2.18 – Pórtico com cobertura poligonal	22
Figura 2.19 – Pórtico com cobertura em arco	22
Figura 2.20 – Pórtico simples com viga castelada ou celular	22
Figura 2.21 – Pórtico espacial	23
Figura 2.22 – Sistema de pórticos com dois pavimentos contraventados	23

Figura 2.23 – Centro Administrativo do Estado de Minas Gerais	24
Figura 2.24 – Centro Administrativo do Estado de Minas Gerais	25
Figura 2.25 – Pórtico-cobertura da Praça do Patriarca	25
CAPÍTULO III	
Figura 3.1 – Ponte Conway, Menai, na Inglaterra	26
Figura 3.2 – Ponte Firth of Forth de John Fowler e Benjamin Baker	26
Figura 3.3 – Tipos de seção transversal para perfis tubulares	27
Figura 3.4 – Ponte Sundial at Turtle Bay, Califórnia, obra de Santiago Calatrava	29
Figura 3.5 – Passarela <i>high tech</i> em Curitiba	29
Figura 3.6 – Domo do Milênio, situado em Greenwich, Londres, Inglaterra	29
Figura 3.7 – Centro Pompidou, Paris, de Richard Rogers e Renzo Piano	29
Figura 3.8 – Aeroporto Internacional de Kansai, Japão	29
Figura 3.9 – Estádio de Futebol em Oita, Japão	30
Figura 3.10 – Seções transversais de perfis de chapa dobrada	31
Figura 3.11 – Perfis obtidos pelo dobramento de chapas a frio	31
Figura 3.12 – Desenho esquemático do processo de soldagem por indução de alta frequência	32
Figura 3.13 – Equipamento utilizado no processo de soldagem por indução de alta frequência	32
Figura 3.14 – Processo de laminagem. (a) por perfuração. (b) por cilindragem	33
Figura 3.15 – Perfil tubular passando pelo processo de curvamento por indução	34
Figura 3.16 – Desenho esquemático de perfil tubular passando pelo processo de curvamento por indução	34
Figura 3.17 – Perfil tubular após o processo de curvamento	35
Figura 3.18 – Utilização de perfis curvos na cobertura de uma edificação	35
CAPÍTULO IV	
Figura 4.1 – Esqueleto metálico de casa, EUA	37
Figura 4.2 – Casa pronta de estrutura metálica, EUA	37
Figura 4.3 – Planta de casa com 24 m ²	38
Figura 4.4 – Planta de casa com 36 m ²	38
Figura 4.5 – Planta de casa com 48 m ²	38

Figura 4.6 – Planta de casa com 48 m ²	38
Figura 4.7 – Desenho esquemático da fundação <i>radier</i>	39
Figura 4.8 – Início da montagem da estrutura, pilares parafusados na fundação <i>radier</i>	39
Figura 4.9 – Estrutura principal e vigas de cobertura	39
Figura 4.10 – Estrutura metálica montada e contraventada	39
Figura 4.11 – Modelo 1, Usiteto	40
Figura 4.12 – Modelo 2, Usiteto	40
Figura 4.13 – Modelo 3, Usiteto	40
Figura 4.14 – Estrutura metálica montada	41
Figura 4.15 – Casa finalizada	41
Figura 4.16 – Painéis autoportantes de aço galvanizado	42
Figura 4.17 – Montagem dos painéis autoportantes	42
Figura 4.18 – Revestimento dos painéis autoportantes	43
Figura 4.19 – Encaixe dos painéis de aço	44
Figura 4.20 – Painéis de aço revestido com OSB	44
Figura 4.21 – Adicionando o acabamento em vinil	44
Figura 4.22 – Casa Pronta	44
Figura 4.23 – Quick House – Modelo 43 m ²	45
Figura 4.24 – Quick House – Modelo 63 m ²	46
Figura 4.25 – Pórticos de estabilização bidirecionais	47
Figura 4.26 – Modelo de estudo 1	48
Figura 4.27 – Modelo de estudo 2	49
Figura 4.28 – Modelo de estudo 3	50
Figura 4.29 – Modelo de estudo 4	51
Figura 4.30 – Modelo 4	52
Figura 4.31 – Modelo 3	52
Figura 4.32 – Maquete do modelo 3	53
Figura 4.33 – Maquete do modelo 4	53
Figura 4.34 – Maquete do modelo proposto	54
Figura 4.35 – Vista frontal da maquete sem a cobertura	54
Figura 4.36 – Vista posterior da maquete	54
Figura 4.37 – Vista frontal da maquete	54

Figura 4.38 – Vista da maquete	54
Figura 4.39 – Vista lateral direita da maquete	54
Figura 4.40 – Vista lateral esquerda da maquete com cobertura	55
Figura 4.41 – Vista posterior da maquete com cobertura	55
Figura 4.42 – Perspectiva dos pórticos de estabilização bidirecionais	56
Figura 4.43 – Planta do sistema estrutural com pórticos de estabilização bidirecionais	56
Figura 4.44 – Perspectiva da fachada frontal	58
Figura 4.45 – Perspectiva da fachada posterior com lateral direita	58
Figura 4.46 – Perspectiva da fachada frontal com lateral direita	58
Figura 4.47 – Perspectiva da fachada frontal com lateral esquerda	59
Figura 4.48 – Planta com layout	59
Figura 4.49 – Planta de cobertura	60
Figura 4.50 – Fachada frontal	60
Figura 4.51 – Fachada posterior	61
Figura 4.52 – Fachada lateral direita	61
Figura 4.53 – Fachada lateral esquerda	61
Figura 4.54 – Corte AA	62
Figura 4.55 – Corte BB	62
Figura 4.56 – Corte CC	62
Figura 4.57 – Corte DD	63
Figura 4.58 – Perspectiva 3D da sala de estar	63
Figura 4.59 – Perspectiva 3D da cozinha	64
Figura 4.60 – Perspectiva 3D do banheiro	64
Figura 4.61 – Perspectiva 3D do quarto 1 (filhos)	65
Figura 4.62 – Perspectiva 3D do quarto 2 (casal)	65
Figura 4.63 – Perspectiva 3D do quarto 2 (casal)	66
Figura 4.64 e 4.65 – Perspectiva 3D da garagem/varanda	66
Figura 4.66 e 4.67 – Perspectiva 3D da área de serviço	67
Figura 4.68 – Ampliação da casa	68
Figura 4.69 – Iluminação artificial	69
Figura 4.70 – Desenho esquemático da chapa dobrada para ligação dos tubos	70
Figura 4.71 – Desenho esquemático da ligação de topo tipo “conexão cruzada”	70

Figura 4.72 – Desenho esquemático da ligação de base	70
Figura 4.73 – Desenho esquemático dos tubos metálicos montados	70
Figura 4.74 – Desenho esquemático do tubo metálico com costura	71
Figura 4.75 – Desenho esquemático do tubo metálico com raio de curvatura	71
Figuras 4.76 – Sistema de cobertura metálica <i>Roll-on</i>	73
Figura 4.77 – Telha em formato trapezoidal	74
Figura 4.78 – Telha em formato ondulado	74
Figura 4.79 – Telha dupla trapezoidal	75
Figura 4.80 – Telha-forro trapezoidal	75
Figura 4.81 – Telha dupla ondulada	76
Figura 4.82 – Telha-forro ondulada	76
Figura 4.83 – Sistema de encaixe da telha-forro	76
Figura 4.84 – Telha Calandrada	77
Figura 4.85 – Telha com isolamento em lã de rocha	77
Figura 4.86 – Detalhe da telha com isolamento em lã mineral	78
Figura 4.87 – Telha com isolamento em poliuretano	78
Figura 4.88 – Detalhe da telha com isolamento em poliuretano	79
Figura 4.89 – Esqueleto metálico estrutural do sistema <i>Light Steel Framing</i>	80
Figura 4.90 – Detalhe de perfil guia	81
Figura 4.91 – Detalhe de perfil montante	81
Figura 4.92 – Detalhe de perfil junta visível	81
Figura 4.93 – Assentamento de lã de vidro entre as placas	82
Figura 4.94 – Planta, destacando as paredes construídas no sistema LSF	84
Figura 4.95 – Detalhe do sistema <i>Light Steel Framing</i>	85
Figuras 4.96 – Forro e piso em OSB	86
Figuras 4.97 – Parede em OSB	86
Figura 4.98 – Planta de forro	88
Figura 4.99 – Estrutura da caixa d'água e forro de OSB	89
CAPÍTULO V	
Figura 5.1 – Planta de um módulo de pórtico bidirecional	91
Figura 5.2 – Elevação do pórtico bidirecional	91

CAPÍTULO VI

Figura 6.1 – Estrutura com carregamentos e vinculações aplicados, plano Y.....	95
Figura 6.2 – Estrutura deformada devido aos carregamentos aplicados, plano X	96
Figura 6.3 – Estrutura deformada devido aos carregamentos aplicados, plano Z	96
Figura 6.4 – Diagrama de Força Axial obtida ao longo da estrutura, plano X	97
Figura 6.5 – Diagrama de Força Axial obtida ao longo da estrutura, plano Y	97
Figura 6.6 – Diagrama de Momento Fletor Y obtido ao longo da estrutura, plano X	98
Figura 6.7 – Diagrama de Momento Fletor Y obtido ao longo da estrutura, plano Z	98
Figura 6.8 – Diagrama de Momento Fletor Z obtido ao longo da estrutura, plano X	99
Figura 6.9 – Diagrama de Momento Fletor Z obtido ao longo da estrutura, plano Y	99
Figura 6.10 – Diagrama de Momento de Torção obtido ao longo da estrutura, plano Z ..	100
Figura 6.11 – Diagrama de Momento de Torção obtido ao longo da estrutura, plano X ..	100
Figura 6.12 – Diagrama de Tensão de Torção ao longo da estrutura, plano X	101
Figura 6.13 – Diagrama de Tensão de Torção ao longo da estrutura, plano Z	101
Figura 6.14 – Diagrama de Força de Cisalhamento Z obtida ao longo da estrutura, plano X	102
Figura 6.15 – Força de Cisalhamento Z obtida ao longo da estrutura, plano Z	102
Figura 6.16 – Diagrama de Força de Cisalhamento Y obtida ao longo da estrutura, plano X	99
Figura 6.17 – Diagrama de Força de Cisalhamento Y obtida ao longo da estrutura, plano Z	103
Figura 6.18 – Diagrama de Deformação obtida ao longo da estrutura, plano X	104
Figura 6.19 – Diagrama de Deformação obtida ao longo da estrutura, plano Z	104
Figura 6.20 – Modelo Usiteto e esqueleto metálico	105
Figura 6.21 – Modelo Quick House e painéis autoportantes	105
Figura 6.22 – Planta baixa	106
Figura 6.23 – Projeto estrutural em concreto armado	107
Figura 6.24 – Fachada frontal	107
Figura 6.25 – Fachada posterior	108
Figura 6.26 – Fachada lateral direita	108
Figura 6.27 – Corte AA	108
Figura 6.28 – Corte BB	108

Figura 6.29 – Corte CC	109
Figura 6.30 – Consumo de aço x custo	111
Figura 6.31 – Consumo de aço x custo	112
Figura 6.32 – Ganhos em área	112

CAPÍTULO VII

Figura 7.1 – Indicação do corte a ser feito nos tubos para curvamento	117
---	-----

ANEXOS

Figura C.1 – Projeto estrutural	131
Figura C.2 – Detalhe da armadura longitudinal inferior da estrutura da laje	132
Figura C.3 – Detalhe da armadura longitudinal superior da estrutura da laje	133
Figura C.4 – Detalhe da armadura transversal inferior da estrutura da laje	134
Figura C.5 – Detalhe da armadura transversal superior da estrutura da laje	135
Figura C.6 – Detalhe da viga 1	136
Figura C.7 – Detalhe da viga 5	136
Figura C.8 – Detalhe da viga 2	138
Figura C.9 – Detalhe da viga 3	138
Figura C.10 – Detalhe da viga 7	139
Figura C.11 – Detalhe da viga 8	140
Figura C.12 – Detalhe dos pilares 1 e 8	141
Figura C.13 – Detalhe dos pilares 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13 e 14	141
Figura D.1 – Seção transversal	146
Figura D.2 – Seção transversal	150
Figura D.3 – Elevação do pórtico	155
Figura D.4 – Seção transversal do perfil	158

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO III

Tabela 3.1 – Dimensões de perfis tubulares sem costura	33
--	----

CAPÍTULO IV

Tabela 4.1 – Dados gerais da edificação	57
---	----

Tabela 4.2 – Espessura de poliuretano para o tipo de telha L25	79
--	----

Tabela 4.3 – Espessura de poliuretano para tipo o de telha L40	79
--	----

Tabela 4.4 – Levantamento do custo do sistema LSF no modelo proposto	85
--	----

CAPÍTULO V

Tabela 5.1 – Propriedades geométricas do perfil tubular	92
---	----

Tabela 5.2 – Dados para cálculo estrutural	93
--	----

CAPÍTULO VI

Tabela 6.1 – Consumo de aço da laje	109
---	-----

Tabela 6.2 – Consumo de aço das vigas	110
---	-----

CAPÍTULO VII

Tabela 7.1 – Previsão de custo dos principais elementos estruturais e de fechamento	117
--	-----

ANEXO A

Tabela A.1 – Perfis de seção circular	127
---	-----

ANEXO B

Tabela B.1 – Capacidade do equipamento	128
--	-----

Tabela B.2 – Ângulo máximo de curvamento	128
--	-----

Tabela B.3 – Ângulo máximo de curvamento	129
--	-----

ANEXO C

Tabela C.1 – Consumo de aço da laje – Armadura longitudinal inferior	132
--	-----

Tabela C.2 – Consumo de aço da laje – Armadura longitudinal superior	133
--	-----

Tabela C.3 – Consumo de aço da laje – Armadura transversal inferior	134
---	-----

Tabela C.4 – Consumo de aço da laje – Armadura transversal superior	135
---	-----

Tabela C.5 – Consumo de aço das vigas 1 e 5	137
---	-----

Tabela C.6 – Consumo de aço das vigas 2 e 3	138
---	-----

Tabela C.7 – Consumo de aço da viga 7	139
---	-----

Tabela C.8 – Consumo de aço da viga 8	140
---	-----

Tabela C.9 – Consumo de aço dos pilares	141
---	-----

LISTA DE SÍMBOLOS

OSB = *Oriented Strand Board*
LSF = *Light Steel Framing*
MEF = Método dos Elementos Finitos
CP = Carga Permanente
SC = Sobrecarga
CV = Carga de viento
E = Módulo de Elasticidade
 ν = Coeficiente de Poisson

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Com os grandes avanços tecnológicos nas últimas décadas, o aço vem tornando-se uma das matérias-primas mais valorizadas e atendendo às inúmeras necessidades da construção civil, como a necessidade de vencer grandes vãos com redução do número de pilares, racionalização do tempo, resistência e rapidez das estruturas. A construção metálica tem evoluído e se tornado uma opção de construção cada vez mais forte, pois seu sistema construtivo é rápido, com possibilidade de montagem e desmontagem da estrutura, permitindo a sua reutilização. As obras apresentam soluções com redução de carga na fundação, menor desperdício e economias, tratando-se de um sistema estrutural com precisão e tecnologia limpa, com redução de entulhos no canteiro de obra.

Na Europa, parte da Ásia e América do Norte, onde se encontram países que possuem um alto nível tecnológico e industrial, a construção metálica integrada aos elementos pré-fabricados são frequentemente utilizados na construção civil. No Brasil, a cultura construtiva ainda se caracteriza pela construção tradicional. A falta de domínio e conhecimento da tecnologia por parte dos profissionais é um dos principais obstáculos para a evolução desses sistemas construtivos no país. Porém, atualmente o uso de perfis tubulares tem aumentado, mas a tecnologia brasileira para construção de edificações com esse tipo de perfis ainda é recente e as normas existentes referentes ao dimensionamento de estruturas metálicas ainda são bastante superficiais, principalmente quando se trata de suas ligações (SALES, 2001; BASTOS, 2004).

A construção metálica possibilita uma maior liberdade no projeto arquitetônico, onde os arquitetos podem usar toda a sua criatividade de forma ilimitada, o que poderá resultar em projetos versáteis, esteticamente interessantes e ousados. No entanto, é preciso que essas idéias construtivas sejam projetadas e executadas de forma cautelosa, dando uma atenção especial às ligações das estruturas, já que estas contribuem significativamente na resistência, funcionalidade e estética da estrutura, podendo até inviabilizar o projeto. Os projetos arquitetônicos e estruturais devem ser desenvolvidos de forma integrada,

onde arquitetos e engenheiros, ao invés de trabalharem de forma isolada, devem trabalhar juntos como uma equipe (GERKEN, 2003).

1.1 Desenvolvimento da construção metálica

Durante um longo tempo, há vinte séculos a.C. no Oriente, o ferro foi considerado o material mais nobre e caro, sendo utilizado na fabricação de ferramentas, armas, armaduras e ornamentos. A partir da Primeira Revolução Industrial, o ferro se tornou um material mais acessível em termos financeiros na arquitetura e engenharia, passando a substituir o uso da pedra e da madeira. Em 1761, foram fabricados os primeiros trilhos de ferro fundido para as estradas de ferro e em 1779 a construção da ponte Iron Bridge (FIG. 1.1), em Coalbrookdale, na Inglaterra, foi o marco da utilização de grandes peças em ferro fundido como elementos estruturais (GERKEN, 2003).



FIGURA 1.1 – Iron Bridge, em Coalbrookdale, Inglaterra
Fonte: GYMPEL, 1996.

A arquitetura do século XIX foi progredindo e surgiram idéias inovadoras que expandiram o uso do ferro, marcando esse período como o período da engenharia, com grandes e notáveis obras arquitetônicas. Os edifícios pré-fabricados em ferro podiam ser levados de um lugar para outro sem o menor problema por serem desmontáveis e a combinação ferro e vidro, permitiu que as edificações pudessem ser transparentes pela primeira vez na história da arquitetura.

Como exemplos de edificações dessa época, cita-se o Palácio de Cristal de 1851 (FIG. 1.2), em Londres, projetado por Joseph Paxton para a primeira Exposição Internacional e a Torre Eiffel (FIG. 1.3), projetada por Gustave Eiffel para a Exposição Internacional de Paris de 1889 (SILVA, 1988; PEVSNER, 2002).



FIGURA 1.2 - Palácio de Cristal, Londres
Fonte: VIDRADO..., 2010.



FIGURA 1.3 – Torre Eiffel, Paris
Fonte: TOUR EIFFEL..., 2010.

Em 1855, Henry Bessemer inventou um convertedor que possibilitou a produção de aço em larga escala, iniciando a era do aço, que se tornou um material importantíssimo para o uso em estruturas. Seja sozinho ou acompanhado por outros materiais, o surgimento do aço marcou o fim do uso do ferro com propósitos estruturais, devido as suas principais características, como: a sua alta resistência, quando comparada com outros materiais; e a ductilidade, que é a capacidade de sofrer grandes deformações antes da sua ruptura (MINISTÉRIO, 1989).

A revolução industrial causou grandes transformações no mundo. A sociedade foi afetada profundamente pelo êxodo rural e pelo crescimento da vida urbana, e começaram a formar as cidades industriais com uma urbanização desenfreada e sem planejamentos. Cresciam as fábricas cada vez mais poderosas e ao mesmo tempo a população mundial. Novas concepções de arquitetura surgiram e a idéia da produção em série da mesma era um precioso fetiche da doutrina modernista, que na realidade, nunca atingiu um estágio realmente significativo. A idéia de que a casa além de ser fabricada em série, deveria ser uma “*máquina de morar*” (famosa frase de Le Corbusier), sugere que o processo criativo deveria ser diferente daquele preconizado pela concepção

acadêmica, ficando mais próximo da engenharia mecânica ou do chamado *industrial design* do que da composição pictórica; mas os arquitetos não levaram muito a sério esta história de máquina de morar (CARVALHO; RHEINGANTZ, 2003).

Quando Le Corbusier disse que a casa é uma máquina de morar, quis dizer também que assim como a máquina, a casa e as outras construções deveriam buscar a perfeição da geometria. Em seus planejamentos urbanos, a geometria também direciona as ruas retas e a distribuição das áreas. O comércio, café, entre outros, são transferidos para o terraço das construções, aliviando as ruas, dando espaço para a circulação e procurando diminuir a quantidade de ruas e os cruzamentos para, conseqüentemente, diminuir o engarrafamento. A redução da quantidade de ruas resulta-se em amplos espaços verdes, dando a idéia de um grande parque. Além disso, há a necessidade de percorrer menores distâncias no dia-a-dia e para solucionar esse desejo é feita a verticalização, que também deve aumentar a densidade populacional da cidade (CORBUSIER, 2002).

Como exemplo de máquina de morar, pode-se citar a *Villa Savoye*, *Maison Savoye* ou simplesmente residência Savoye, que é uma casa projetada na França por Le Corbusier seguindo tal idéia de forma plena (FIG. 1.4). A Villa Savoye, projetada em 1928, é considerada um dos maiores ícones da arquitetura moderna no século XX. A casa foi pensada como uma residência de veraneio para uma família nos arredores da cidade francesa de Poissy. A casa expõe em si mesma os cinco pontos da nova arquitetura propostos por Le Corbusier: planta livre da estrutura; construção sobre pilotis; terraço-jardim; fachada livre e janela em fita (BAKER, 1998).



FIGURA 1.4 - Villa Savoye, Le Corbusier

Com o aumento populacional junto com a falta de terrenos, seus altos preços e também a intensa procura de locais para escritórios e comércio, influenciaram o desenvolvimento da construção metálica de edifícios de múltiplos andares, inicialmente com finalidades comerciais e posteriormente residenciais ou de uso misto, tendo seu início na cidade de Chicago, EUA. Porém, o primeiro edifício de múltiplos andares realmente projetado como deve ser um edifício com estrutura metálica, foi a fábrica de chocolates de Noisiel-sur-Marne, construída nas proximidades de Paris, em 1872. Na década de 1890, New York comandava o ranking da construção de edificações de múltiplos andares em aço. Entre os anos de 1910 a 1930, a Escola Bauhaus (escola de design, artes plásticas e arquitetura) liderada por Walter Gropius e Mies Van der Rohe, expandiram seus conceitos inovadores de forma e espaço pelo mundo, influenciando grandemente num estilo estrutural para a construção de arranha-céus (BELLEI, 2008).

Seguindo essa tendência mundial, o Brasil embora atrasado, começou a fazer uso de estruturas metálicas. Os materiais eram originalmente importados da Europa e depois passaram a vir dos EUA. Na década de 20, houve o desenvolvimento na indústria siderúrgica e de pequenas fundições e, assim foi despertando o grande mercado da construção civil industrializada no país. Em 1970, foi construído o primeiro edifício de estrutura metálica do Brasil, construído com materiais produzidos totalmente no país, o edifício Garagem América, em São Paulo, com 16 andares, sendo um exemplo de pioneirismo e superação tecnológica (BELLEI, 2008).

Em 1970, as construções em estruturas metálicas fazem parte de um conceito *high tech* de produção, consistindo em racionalidade, rapidez, economia e expressão cultural. A arquitetura dessa época desenvolveu-se baseada nas possibilidades de utilização de novos materiais e do suporte das altas tecnologias. Arquitetos produzem projetos inovadores e ousados com as novas possibilidades da construção metálica, destacando-se: Renzo Piano da Itália, Norman Foster e Richard Rogers da Inglaterra, Jean Nouvel da França e Santiago Calatrava da Espanha.

Como exemplo de edificação residencial de múltiplos andares com materiais industrializados, pode-se citar o Conjunto Habitacional Nemausus, em Nîmes, França, projetado pelo arquiteto francês Jean Nouvel (FIG. 1.5 e 1.6). Um dos objetivos desse

projeto era de construir com baixo custo. Foram utilizadas peças metálicas e revestimentos industrializados, visando a redução dos custos de construção e obtendo o máximo de aproveitamento da luz natural.



FIGURAS 1.5 e 1.6 – Conjunto Habitacional Nemausus, 1987
Fonte: NOUVEL...,2010.

1.2 Principais vantagens da construção metálica

A construção metálica apresenta muitas vantagens diante da construção convencional, como:

- a) rapidez na execução da estrutura: podendo ter uma redução de até aproximadamente 40% nos custos, compatibilizado com outros sistemas construtivos industrializados;
- b) compatibilidade com outros materiais: desde os materiais convencionais aos pré-fabricados;
- c) possibilidade de montagem e desmontagem mais rápidas: facilitando futuras reformas, adaptações e mudanças nos edifícios;
- d) organização total no canteiro de obra: com menos entulho e mais segurança para os trabalhadores na obra, além de tornar possível a execução de ampliações e reformas sem perturbar os usuários;
- e) além do menor peso aliviando as cargas nas fundações, pode-se reduzir em até 30% o custo das mesmas;
- f) precisão construtiva: enquanto a construção convencional trabalha com centímetro, a construção metálica tem a precisão do milímetro;

- g) garantia de qualidade: por ser um produto industrializado, é produzido com mão-de-obra qualificada;
- h) racionalização de materiais e mão-de-obra: garantindo a diminuição do desperdício de materiais;
- i) maior liberdade no projeto arquitetônico: possibilitando projetos mais ousados e com utilização de vãos livres maiores e obtendo maior área útil;
- j) reciclabilidade: o aço é 100 % reciclável e as estruturas podem ser desmontadas e reaproveitadas;
- k) menor impacto ambiental: em termos de uso de energia, consumo de matérias-primas e geração de detritos, além de reduzir o consumo de madeira e diminuir a poluição sonora geradas por serras e outros equipamentos (TECHNICA, 2010).

É de suma importância ressaltar que a construção metálica apresenta maiores economias diante a edificação pronta e não somente uma etapa ou segmento desta, não podendo comparar os custos de suas etapas com a construção convencional, como por exemplo, comparar custos entre o esqueleto metálico e o de concreto armado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é estudar possibilidades construtivas com o uso de estruturas metálicas (enfoque dado aos perfis metálicos de seção circular com costura) e sistema de fechamentos pré-fabricados (paredes e cobertura metálica) para construção residencial, apresentando suas características e vantagens.

1.3.2 Objetivos específicos

Propor um modelo arquitetônico e estrutural com sistema de cobertura para os pórticos de estabilização bidirecionais (em perfis metálicos de seção circular com costura), que são os principais elementos estruturais da construção residencial industrializada proposta neste trabalho. Analisar o modelo proposto por meio de análise computacional

e propor formas e ligações variáveis que poderão estruturar construções residenciais de várias categorias sociais, sendo unifamiliar ou multifamiliar.

1.4 Justificativa

O planejamento e padronização de procedimentos associados ao desenvolvimento tecnológico dos produtos, dão origem ao que se pode definir como construção industrializada. A construção industrializada propicia rapidez de execução e possibilidade de redução de custos. A construção é mais rápida e causa menor impacto no canteiro do que a construção tradicional, numericamente, podendo levar a uma economia de até 25 % (TECHNICA, 2010).

A construção metálica atende a todos os requisitos e necessidades de projeto, já a construção convencional em concreto armado, deixa a desejar quando se trata de leveza e precisão de medidas, além de não permitirem o uso de equipamentos para o transporte e a rápida montagem dos elementos construtivos, já que seus elementos são construídos *in loco*.

Devido ao avanço tecnológico de fabricações e conformações dos perfis estruturais, a arquitetura e engenharia têm agora no mercado nacional, maiores possibilidades de uso de insumos para as construções habitacionais. Os projetos arquitetônicos e estruturais devem ser trabalhados de forma integrada. O que falta são profissionais, engenheiros e arquitetos com conhecimento em relação às possibilidades da construção em estrutura metálica, e também, projetos bem planejados e organizados para a racionalização e utilização de produtos industrializados.

No sentido de aprimorar os processos construtivos, maiores informações e utilização destes produtos oferecidos no mercado para a construção residencial, este trabalho propõe a utilização de perfis metálicos de seção circular com costura para pórticos de estabilização bidirecionais e verificação da sua viabilidade de utilização na construção residencial. As principais razões que motivaram esse trabalho foram a busca pelo aprimoramento de sistemas construtivos em aço que possam atender a demanda do mercado de habitação de baixa à média renda, com um sistema estrutural adequado

tanto à eficiência estrutural quanto a um custo compatível, capaz de atender várias categorias sociais, com maior velocidade de execução da obra e redução de desperdícios de materiais.

Os pórticos de estabilização bidirecionais consistem em pórticos espaciais, que proporcionam a estabilidade de uma construção em duas direções perpendiculares quando submetidos a ações (fluxos de cargas) horizontais (vento), FIG. 1.7.



FIGURA 1.7 – Pórticos de estabilização bidirecionais

A proposta baseia-se em um processo construtivo fácil e de rápida execução, onde qualquer pessoa poderá montar essa estrutura. Uma opção construtiva que poderá estruturar uma edificação residencial de nível popular (unifamiliar) até uma edificação de múltiplos andares (multifamiliar). A construção além de ser extremamente versátil e durável, gera um menor volume de resíduos no canteiro de obras, podendo causar um menor impacto sobre o meio ambiente comparado com o sistema construtivo convencional.

Partindo-se deste enfoque, tira-se partido de elementos estruturais tubulares circulares em aço (perfis que apresentam maiores vantagens diante dos demais) para o desenvolvimento de projetos de coberturas e de edifícios com aplicações múltiplas. Propõe-se um sistema estrutural que seja mais eficiente que os convencionais, uma vez que o sistema de cobertura dos pórticos resulta numa única estrutura que une paredes e cobertura, apresentando maior resistência a ações como fortes ventos e até mesmo a abalos sísmicos, sendo um sistema ideal para regiões que sofrem frequentes catástrofes naturais, evitando mortes e maiores tragédias, e também agilizando as obras em caso da reconstrução dessas regiões.

1.5 Metodologia adotada

Para o desenvolvimento do modelo arquitetônico e estrutural da construção residencial proposta neste trabalho, foram realizados estudos preliminares e maquetes físicas até obter-se uma modulação simplificada com eficiência estrutural, não comprometendo os sistemas de fechamento e cobertura, e uma organização espacial bem resolvida oferecendo possibilidades de ampliação.

O projeto arquitetônico e estrutural foram elaborados com o *software* AutoCad, onde foram feitos desenhos técnicos em duas dimensões, projetados com equilíbrio organizacional entre os aspectos estruturais, funcionais e formais, sempre pensando na ergonomia e conforto dos usuários da construção residencial. Por meio de desenhos técnicos em 2D, posteriormente, foi possível obter-se a criação do modelo estrutural em três tridimensões feitos no *software* ANSYS para a análise estrutural e também no *software* SketchUp, onde se fez a modelagem em 3D que gerou perspectivas internas e externas da construção com o seu mobiliário para o entendimento do projeto arquitetônico. Foram feitas pesquisas sobre formas adequadas e viáveis para as ligações de vários elementos estruturais e também sobre os elementos de fechamento da construção.

Realizou-se uma análise estrutural pelo método dos Elementos Finitos, usando-se o *software* ANSYS e com os resultados gerados foi possível fazer a otimização das seções transversais dos pórticos de estabilizações e verificar a viabilização desse sistema estrutural em questão, como solução para os vários tipos de construções residenciais nas diversas categorias sociais.

Realizou-se também uma análise comparativa com outros modelos residenciais estruturados em aço disponíveis por empresas nacionais. Para esta análise, foi verificado o consumo de aço do modelo proposto se o mesmo fosse construído por meio do sistema convencional de construção, ou seja, em concreto armado. Obteve-se o consumo de aço dessa construção convencional por meio do programa de cálculo *Cypecad*, que também foi comparado com o modelo proposto.

1.6 Estrutura do trabalho

Esse estudo está distribuído em 6 capítulos e 4 anexos, e estrutura-se conforme o descrito a seguir:

No capítulo I aborda-se como introdução o desenvolvimento da construção metálica, citando circunstâncias históricas determinantes para o seu desenvolvimento ao longo dos anos no mundo e no Brasil, apresentando suas principais vantagens em comparação com a construção convencional. Apresenta-se os objetivos e a justificativa do trabalho, e também a metodologia adotada.

No capítulo II apresenta-se de forma sucinta os elementos construtivos em arcos e pórticos, suas características e diversas formas de aplicação na arquitetura, elementos importantes para o desenvolvimento do sistema estrutural proposto.

No capítulo III enfoca-se os perfis tubulares, reunindo informações sobre sua produção e vantagens. Também são abordados os perfis de chapa dobrada, perfis tubulares com e sem costura, e como é realizado o curvamento de perfis tubulares.

No capítulo IV tem-se como tema o estudo de caso. Nesse capítulo, apresenta-se algumas construções residenciais populares em estrutura metálica propostas por empresas e os modelos iniciais feitos até a conclusão do modelo arquitetônico e estrutural definitivo. Está descrito o memorial descritivo do modelo proposto em conjunto com as especificações dos principais elementos estruturais e arquitetônicos.

No capítulo V apresenta-se a análise numérica do desempenho estrutural da construção residencial proposta nesse estudo.

No capítulo VI apresenta-se os resultados da análise numérica e uma análise comparativa de consumo de aço, preço e área construída dos modelos citados no estudo de caso com o modelo proposto.

No capítulo VII apresenta-se as considerações finais, discutindo aspectos gerais e conclusões obtidas a partir da análise estrutural feita pelo método dos Elementos Finitos

no qual foi utilizado o *software ANSYS*. Também são levantados alguns aspectos que poderão ser tratados futuramente como continuação deste trabalho.

Em Anexos, estão algumas informações obtidas por meio de especificação das normas sobre os tubos com costura e curvamento de perfis tubulares, análise computacional do consumo de aço da construção convencional feita pelo *software Cypecad* e memorial de cálculo da otimização da seção dos pórticos de estabilização bidirecionais feitos após os resultados obtidos da análise estrutural.

CAPÍTULO II

2. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS EM ARCOS E PÓRTICOS

O termo **arco**, do latim *arcus*, se define em termos técnicos como um elemento construtivo e de sustentação que de forma mais ou menos curva, cobre o vão ou espaço existente entre dois pontos fixos (FIG. 2.1). Os arcos são sistemas estruturais que vencem grandes vãos e sofrem compressões simples, gerando esforços horizontais (empuxos) nos apoios, que serão tanto maiores quanto menores forem às flechas do arco. Estes elementos têm uma relação mínima entre vão e flecha para que se comportem como tais. Caso esta não se cumpra, o arco se comporta como uma viga de eixo curvo (CALADO; PAIS DA SILVA, 2005).

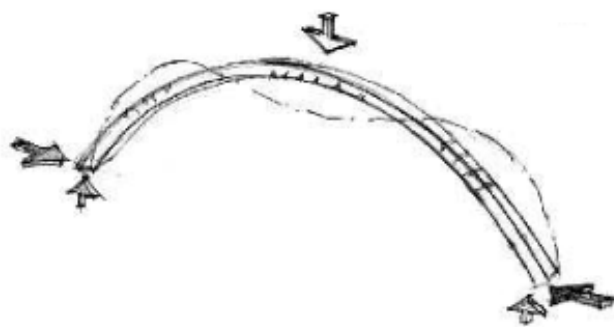


FIGURA 2.1 – Arco em perspectiva com forças aplicadas e em tracejado sua deformação
Fonte: MARINGONI, 2004.

2.1 O arco na arquitetura

As civilizações da antiguidade foram as primeiras a utilizarem o arco, embora o Antigo Egito, a Babilônia, a Grécia Antiga e a Assíria o tenham restrito a construções no subsolo, nomeadamente em estruturas de drenagem e abóbadas. Mas foram os romanos, os maiores responsáveis pelo seu uso em grande escala, possibilitando a criação de construções arquitetônicas de maiores vãos, com abóbadas e cúpulas possuindo dimensões monumentais, como por exemplo, o Coliseu de Roma, um dos mais importantes monumentos da cidade. Também um dos exemplos mais famosos de suas

construções é a ponte-aqueduto Pont du Gard, construída pelos romanos sobre o rio Gard. Foi construída com a utilização de argamassa e pedra, possuindo 49 m de altura e 275 m em sua mais longa extensão (FIG. 2.2).



FIGURA 2.2 - Ponte-aqueduto Pont du Gard, França
Fonte: LE PONT DU GARD..., 2011.

Em algumas cidades européias, os arcos possuíam uma outra forma derivada dos arcos semi-circulares (romanos), a forma de ponta ou ogiva, sendo denominados de arcos góticos. A partir da Idade Média, devido a sua grande capacidade para suportar grandes vãos, os arcos começaram a aparecer em obras mais ousadas, permitindo a construção de edifícios altos com grandes aberturas nas paredes. Mas nem todas as culturas aproveitaram e exploraram a capacidade estrutural desse elemento construtivo, os gregos, por exemplo, ainda que possuindo grandes conhecimentos matemáticos e de engenharia, parecem ter ignorado este elemento. Também nos templos do ocidente, encontram-se muito mais vigas do que arcos.

Inicialmente os arcos eram construídos em pedra ou tijolo. Os materiais de construção na antiguidade eram limitados a esses tipos de materiais. A madeira por possuir baixa resistência e pouca durabilidade não era um dos melhores materiais, no entanto, as pedras apesar de serem difíceis de serem removidas e trabalhadas devido ao seu peso, apresentavam grande resistência à compressão e grande durabilidade.

Com o passar dos tempos, a técnica do arco foi aperfeiçoada e expandida, e o arco foi sendo construído de diversos materiais e tendo diversas aplicações, sendo utilizado

principalmente em portas, janelas, pontes, aquedutos, como elementos de composição tri-dimensional de abóbadas e até em paredes de retenção ou barragens.

Atualmente os materiais mais utilizados na construção de arcos são o aço e o concreto armado, por oferecerem maiores possibilidades de se atingir maiores vãos e serem materiais resistentes aos esforços de compressão, flexão e cisalhamento, já a pedra apesar de ser muito resistente ao esforço de compressão, não resiste ao esforço de flexão. Na utilização do aço como material para a construção do arco, deve-se dar uma atenção especial as ligações da estrutura, podendo ser soldadas, parafusadas ou rebitadas. Já na utilização do concreto, o arco deve ser construído de maneira única, pois a concretagem deve ser executada ao mesmo tempo para todo o comprimento do arco. Nas FIG. 2.3 a 2.6 são mostrados alguns exemplos de estruturas com o uso de arcos.



FIGURA 2.3 – Arco na Porta de Ishtar, Museu de Pérgamo, Berlim
Fonte: MOSAICO..., 2010.



FIGURA 2.4 – Arcos metálicos usados como contenção
Fonte: DSI FOSMINAS, 2010.



FIGURA 2.5 – Arcos usados como elemento de sustentação da Ponte JK, Brasília
Fonte: CHAN, 2009.



FIGURA 2.6 – Perspectiva em 3D da maior ponte do mundo, Dubai
Fonte: FRANK, 2008.

2.1.1 Tipos de arcos usados na construção metálica

Existem basicamente dois tipos de arcos que são frequentemente utilizados pelos arquitetos e engenheiros, são eles os arcos com geratriz circular e parabólica. Os arcos com geratriz circular podem ser: bi-articulados, tri-articulados ou engastados. A distância da linha horizontal ao ponto mais alto do arco, denomina-se de *flecha*. O empuxo horizontal nos apoios destes arcos, normalmente é combatido por tirantes, embora não seja descartável o uso de contrafortes nas extremidades de apoio (FIG. 2.7).

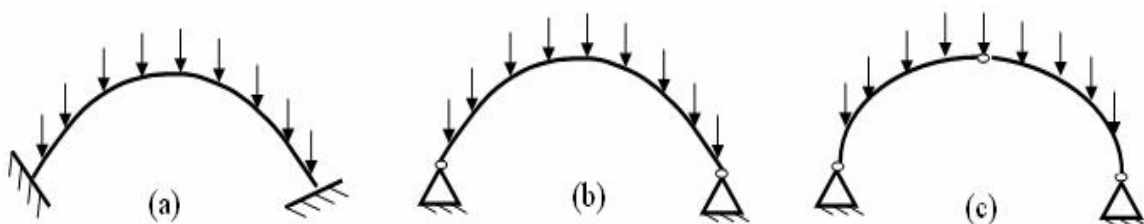


FIGURA 2.7 – Tipos de arcos com geratriz circular: (a) bi-engastado, (b) bi-articulado, (c) tri-articulado

Os arcos cuja geratriz é parabólica são comumente escolhidos por arquitetos e engenheiros por causa do ganho de espaço útil vertical, ou seja, grandes flechas que resultam grandes pés-direitos (FIG. 2.8 e 2.9). Estruturalmente, são mais eficientes quanto aos esforços de compressão se possuem baixo empuxo nos apoios de extremidade, pois quanto mais alto é o arco, menor a sua reação horizontal nas extremidades. Portanto, pode-se obter uma altura tal onde as reações horizontais sejam nulas contribuindo assim, para o dimensionamento do arco como um todo.

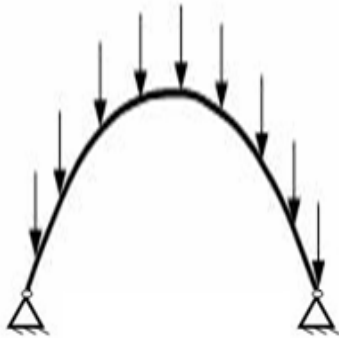


FIGURA 2.8 – Arco com geratriz parabólica



FIGURA 2.9 – Monumento em arco parabólico, cidade de Tacna, Peru
Fonte: SARRIA, 2008.

Deve-se levar em consideração no projeto de uma estrutura usando o arco como elemento construtivo, vários fatores como: altura do arco, as condições de apoio nas extremidades, carregamentos atuantes, reações resultantes e esforços decorrentes dos carregamentos, escolha do material mais adequado, relação entre forma e função, dentre outros. Além disso, deve-se considerar também que quando esse elemento está sujeito aos vários carregamentos, cada pedaço do arco está sujeito, principalmente, ao esforço de compressão devendo ser, conseqüentemente, projetado com materiais que resistam bem a este tipo de esforço.

2.2 O pórtico na arquitetura

O termo **pórtico** em latim *porticus*. Na arquitetura a idéia de pórticos surgiu na Grécia, influenciando diversas culturas, incluindo a maioria das culturas ocidentais. Pórticos são estruturas formadas por uma associação de barras não concorrentes, ou seja, pilares e vigas que compõem um quadro plano com ações neste mesmo plano (FIG. 2.10). Sua rigidez e estabilidade se concentram nos nós. Os tipos de vínculos dos nós de um pórtico alteram seu comportamento e a transmissão de esforços para os apoios. Atualmente os materiais mais utilizados na construção de pórticos são o aço, o concreto e a madeira, devido as maiores possibilidades que esses materiais oferecem (ENGEL, 1981).

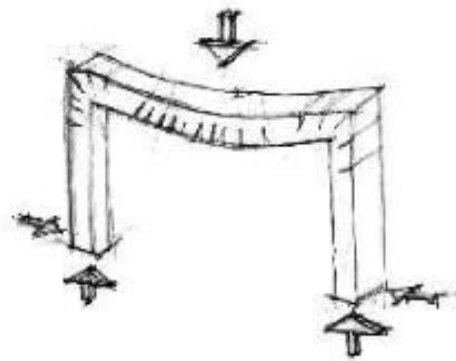


FIGURA 2.10 – Pórtico com forças aplicadas gerando sua deformação
Fonte: MARINGONI, 2004.

Existem vários tipos de pórticos que são classificados quanto à geometria e à estaticidade. Quanto à geometria tem-se pórtico plano (bi-dimensional) e pórtico espacial (tri-dimensional). Os pórticos tridimensionais são estruturas comumente encontradas na prática. Quanto à estaticidade tem-se pórtico hipostático, pórtico isostático, pórtico hiperestático.

2.2.1 Tipos de pórticos usados na construção metálica

A seguir são apresentadas tipologias e características de pórticos encontrados na construção civil com estruturas metálicas.

2.2.1.1 Pórtico bi-apoiado

O pórtico bi-apoiado é um pórtico sustentado por dois apoios, sendo um deles um apoio fixo e o outro um apoio móvel (FIG. 2.11).

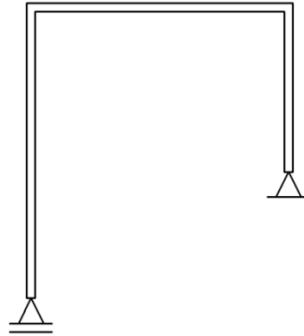


FIGURA 2.11 – Pórtico bi-apoiado

2.2.1.2 Pórtico bi-articulado

O pórtico bi-articulado é sustentado por dois apoios, ambos articulados fixos, mas apresenta também uma articulação em uma de suas barras onde o momento é nulo (FIG. 2.12).

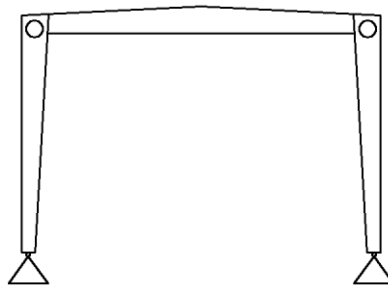


FIGURA 2.12 – Pórtico bi-articulado

2.2.1.3 Pórtico engastado e livre

O pórtico engastado e livre é um pórtico sustentado por um único apoio engastado (FIG. 2.13).

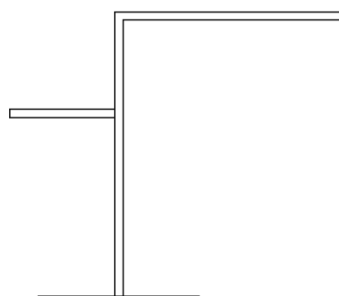


FIGURA 2.13 – Pórtico engastado e livre

2.2.1.4 Pórtico tri-articulado

O pórtico tri-articulado é um tipo de pórtico sustentado por dois apoios. Esse pórtico apresenta também uma articulação em uma de suas barras onde o momento é nulo (ponto C), FIG. 2.14.

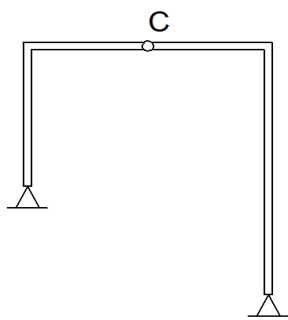


FIGURA 2.14 – Pórtico tri-articulado

2.2.1.5 Pórtico simples de alma cheia

O pórtico simples de alma cheia é uma estrutura simples e simétrica com cobertura inclinada que tem vão livre. É comum a utilização de mísulas nas ligações das vigas com as colunas e na cumeeira (FIG. 2.15).

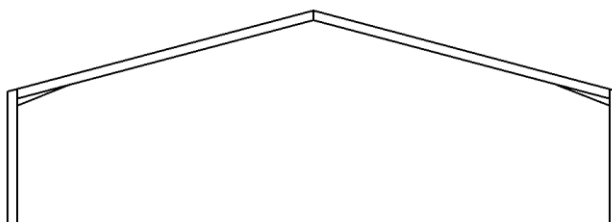


FIGURA 2.15 – Pórtico simples de alma cheia
Fonte: GERDAU AÇOMINAS, 2005.

2.2.1.6 Pórtico com tirantes

Nesse tipo de pórtico, usam-se tirantes para reduzir os deslocamentos horizontais e os momentos nas colunas. São indicados para pórticos com cobertura cuja inclinação seja maior que 15° (FIG. 2.16).

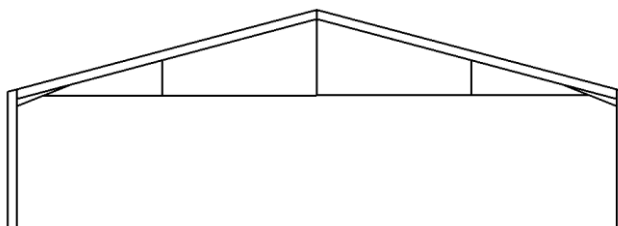


FIGURA 2.16 – Pórtico com tirantes
Fonte: GERDAU AÇOMINAS, 2005.

2.2.1.7 Pórtico com escora central

O pórtico com escora central é usado para pórticos com vãos maiores que 30 m e sem a necessidade de vão livre. A escora central pode reduzir o número de vigas e gerar uma estrutura mais econômica (FIG. 2.17).

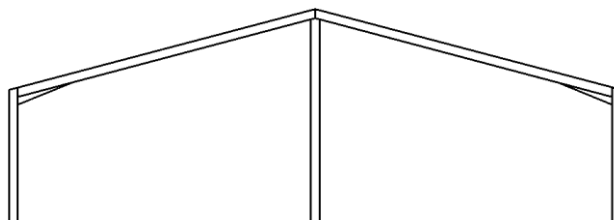


FIGURA 2.17 – Pórtico com escora
Fonte: GERDAU AÇOMINAS, 2005.

2.2.1.8 Pórtico com cobertura em poligonal

Esse tipo de pórtico pode ser usado para grandes vãos onde a altura total da edificação deve ser reduzida. O uso de tirantes horizontais na estrutura pode deixar a solução mais econômica (FIG. 2.18).

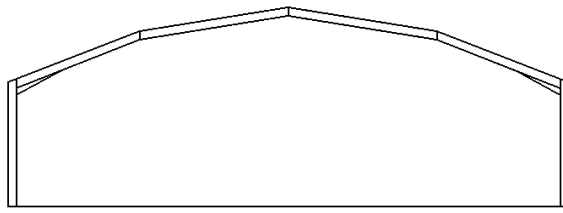


FIGURA 2.18 – Pórtico com cobertura poligonal
Fonte: GERDAU AÇOMINAS, 2005.

2.2.1.9 Pórtico com cobertura em arco

Os pórticos com cobertura em arco são utilizados principalmente em função de necessidades arquitetônicas, como a obtenção de um pé-direito mais elevado (FIG. 2.19).

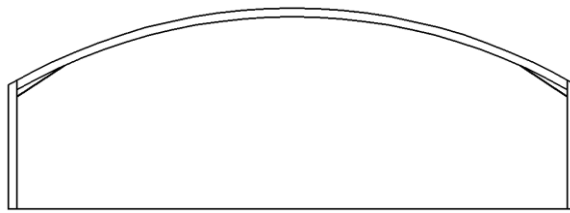


FIGURA 2.19 – Pórtico com cobertura em arco
Fonte: GERDAU AÇOMINAS, 2005.

2.2.1.10 Pórtico simples com viga castelada ou celular

O pórtico simples com viga castelada ou celular (viga vazada) é a mesma estrutura do pórtico simples, mas com o uso de perfis laminados formando vigas casteladas ou celulares para sustentação. Os perfis podem aumentar a altura em aproximadamente 50 %, conseguindo vencer vãos maiores de até 60 m (FIG. 2.20).

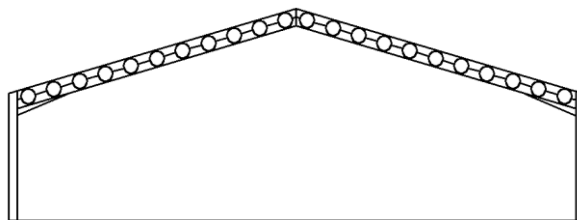


FIGURA 2.20 – Pórtico simples com viga castelada ou celular
Fonte: GERDAU AÇOMINAS, 2005.

2.2.1.11 Pórtico espacial

O pórtico espacial é uma estrutura tridimensional formada por vigas e pilares (FIG.2.21).

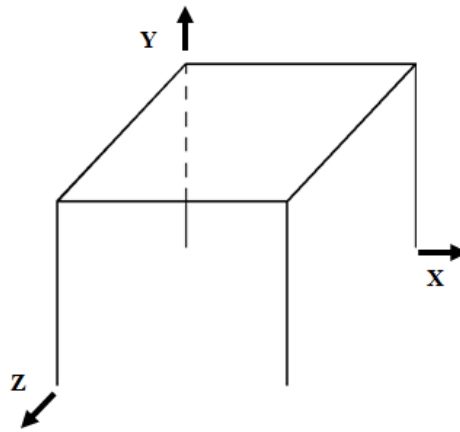


FIGURA 2.21 – Pórtico espacial

2.2.2 Contraventamento de pórticos

Os pórticos podem sofrer esforços de compressão (podendo até mesmo estar sujeitos ao efeito de flambagem), esforços de tração, esforços de flexão e esforços de cisalhamento. A distribuição destes esforços dentro de um pórtico variam conforme a posição das barras e dos carregamentos, e deve ser feita a verificação de sua estabilidade para cada barra, dos seguintes esforços: Força Normal (N), Força Cortante (V) e Momento Fletor (M). Para que um pórtico seja estável, todas as barras devem ser estáveis em relação a estes três esforços. Em alguns casos, para se obter a estabilidade de um pórtico é necessário fazer o seu contraventamento, que consiste na inserção de barras diagonais na estrutura para enrijecê-lo e resistir a cargas laterais de vento, impedindo grandes deslocamentos horizontais (FIG. 2.22).

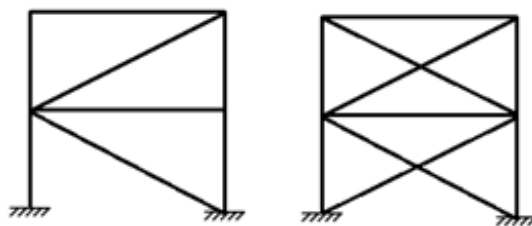


FIGURA 2.22 – Sistema de pórticos com dois pavimentos contraventados

O contraventamento é muito importante em estruturas metálicas, onde as peças estruturais são mais esbeltas do que as estruturas de concreto armado. O contraventamento aumenta a rigidez do pórtico não somente para resistir a cargas horizontais, mas também para resistir as cargas verticais que também podem provocar deslocamentos horizontais. É importante entender que mesmo com contraventamento, sempre vão aparecer deslocamentos horizontais em um pórtico, pois as barras inclinadas também se deformam axialmente. No entanto, como a deformação axial de uma barra usual de uma estrutura é muito menor do que as deformações transversais por flexão, os deslocamentos horizontais são muito menores quando se projeta uma estrutura com barras de contraventamento.

Como um exemplo de pórticos na arquitetura nacional, pode-se citar o grande pórtico de concreto armado de Oscar Niemeyer, usado na construção do Centro Administrativo do Estado de Minas Gerais. O grande pórtico sustenta por meio de 30 cabos de aço, um edifício de concreto com quatro pavimentos, considerado o maior prédio de concreto protendido suspenso do mundo, com vão livre de 147 m de comprimento e 26 m de largura (FIG. 2.23 e 2.24).

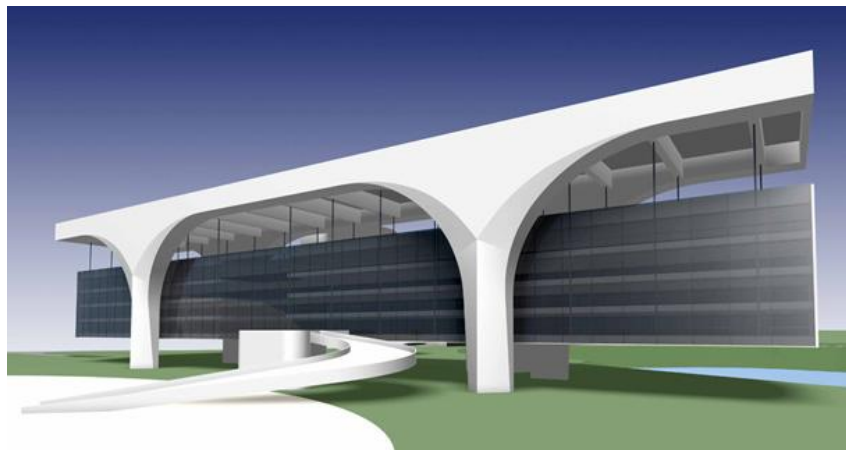


FIGURA 2.23 – Centro Administrativo do Estado de Minas Gerais
Fonte: ROCHA, 2009.

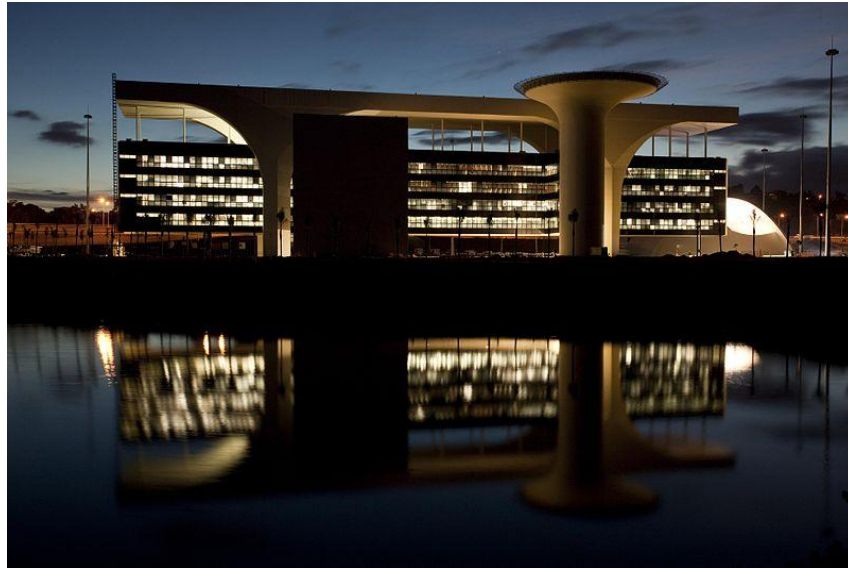


FIGURA 2.24 – Centro Administrativo do Estado de Minas Gerais
Fonte: CIDADE ADMINISTRATIVA..., 2011.

Um outro exemplo, agora em estrutura metálica, é o polêmico e ousado pórtico metálico do arquiteto Paulo Mendes da Rocha, usado num projeto de revitalização da praça do Patriarca, no centro de São Paulo, onde sua obra modifica a paisagem (FIG. 2.25).

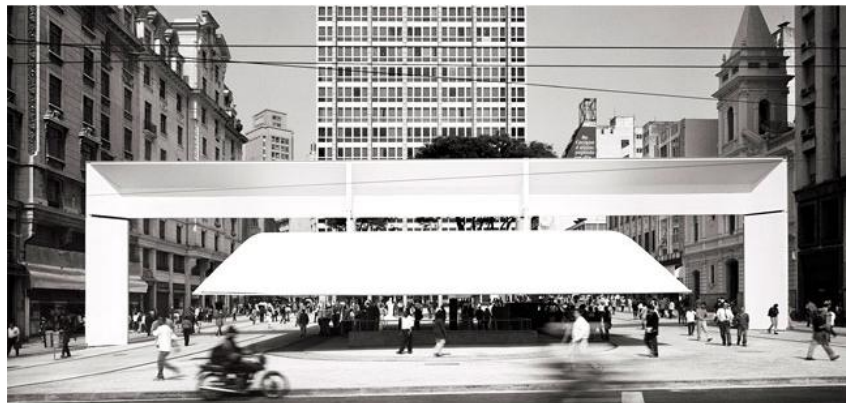


FIGURA 2.25 – Pórtico-cobertura da Praça do Patriarca
Fonte: KON, 2006.

CAPÍTULO III

3. PERFIS TUBULARES

A necessidade de vencer grandes vãos na construção de pontes e estações ferroviárias, fez com que a engenharia desenvolvesse estudos, pesquisas referentes aos cálculos estruturais e aos processos construtivos, onde tais experiências levaram ao desenvolvimento das estruturas tubulares, inicialmente de seção tubular retangular e posteriormente de seção circular. Em 1840 foram usados pela primeira vez, perfis tubulares estruturais na construção de pontes, tendo como primeiro exemplo a Ponte Conway, construída em 1849 sobre o estreito de Menai, na Inglaterra (FIG. 3.1). Mas foi a construção da ponte Firth of Forth (FIG. 3.2), entre 1883 e 1889, perto da cidade de Edinburgh, que marcou o início da utilização de perfis tubulares circulares, inovando o seu emprego com funções estruturais, atendendo demandas relacionadas à transposição de grandes vãos e fazendo com que trens de carga pudessem chegar às mais longínquas distâncias (GERKEN, 2003).

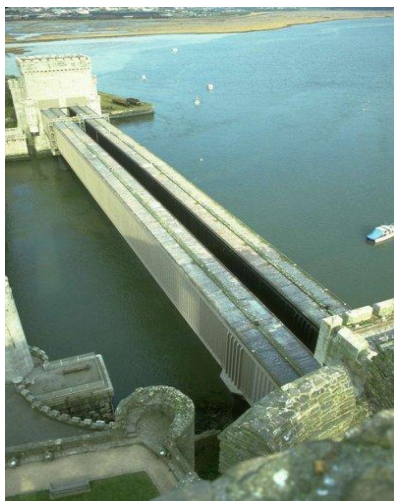


FIGURA 3.1 – Ponte Conway,
Menai, na Inglaterra
Fonte: STRUCTURAE.....2010.

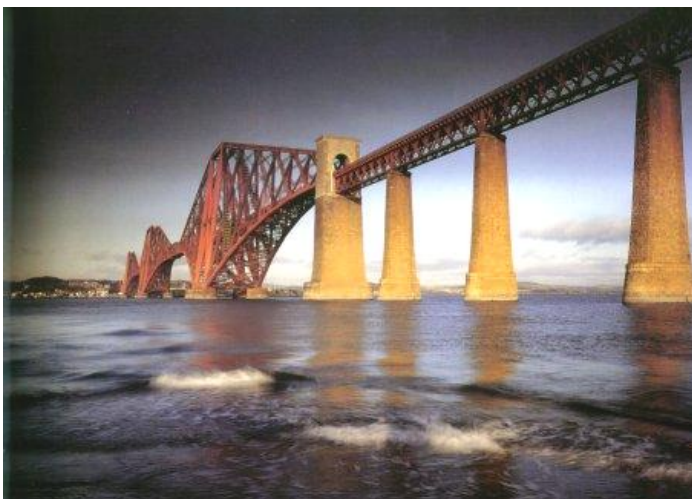


FIGURA 3.2 – Ponte Firth of Forth, de
John Fowler e Benjamin Baker
Fonte: BROWN, 1996.

3.1 A Produção de perfis tubulares

Na Europa, Ásia e América do Norte, países de alto nível de desenvolvimento tecnológico e industrial, os perfis tubulares são utilizados com bastante frequência, sendo mais usados os de seções circulares por suas diversas vantagens. Apesar das diversas vantagens construtivas, ainda são pouco utilizados para fins estruturais no Brasil, devido às limitações tanto dos equipamentos disponíveis para fabricação quanto dos conhecimentos técnicos por parte dos fabricantes, às deficiências de informação dos profissionais acerca dos produtos e da tecnologia de utilização e também a ausência de normas nacionais específicas para perfis tubulares.

Porém, atualmente no Brasil, o uso desse tipo de perfil tem aumentado, mas a tecnologia brasileira para execução de edificações utilizando perfis tubulares ainda é recente e as normas brasileiras existentes referentes ao dimensionamento de estruturas metálicas ainda são muito superficiais. As informações relativas a esses perfis são escassas, principalmente quando se trata de ligações de estruturas tubulares, que precisam ser projetadas e executadas de forma cautelosa, já que estas ligações contribuem significativamente na resistência, funcionalidade e estética da estrutura, ou seja, se não forem bem planejados, podem comprometer e inviabilizar o projeto.

Os tipos de seções transversais mais encontradas para estes perfis são: circular, quadrada, retangular, triangular, oval e semi-oval (FIG. 3.3). Os perfis tubulares de aço de seção circular existentes são de dois tipos: com costura e sem costura. A norma brasileira que trata de perfis tubulares em aço para estruturas é a norma NBR 8261 (ABNT, 1983).

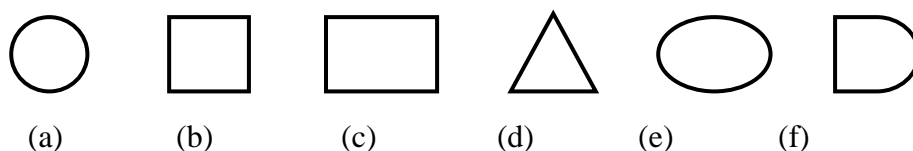


FIGURA 3.3 – Tipos de seção transversal para perfis tubulares: (a) circular, (b) quadrada, (c) retangular, (d) triangular, (e) oval, (f) semi-oval

3.2 Vantagens dos perfis tubulares

A seguir, estão apresentadas as vantagens do uso dos perfis tubulares na construção civil:

- a) alta eficiência estrutural: apresentam grande resistência a cargas axiais, flexão, torção e efeitos combinados. Se tratando de torção, os perfis tubulares são mais resistentes, devido à sua característica geométrica e sua simetria em relação ao centro longitudinal;
- b) proporcionam um aspecto visual atrativo por meio de sua forma geométrica, dando um aspecto de arrojo, leveza e modernidade;
- c) apresentam soluções leves e econômicas, face à sua elevada resistência e baixo peso próprio;
- d) proporcionam maiores vãos livres com significativa redução do número de pilares;
- e) rapidez no processo construtivo com facilidade de utilização de materiais complementares pré-fabricados tendo em vista a precisão e a alta qualidade;
- f) possibilidade de uso de estruturas mistas, já que os tubos podem ser preenchidos com concreto, no caso de colunas aumenta a resistência mecânica e ao fogo;
- g) possuem menor área de superfície se comparadas com as seções abertas, gerando menores custos de pintura e proteção contra fogo, o que facilita os serviços de manutenção e minimiza os seus custos;
- h) os perfis tubulares ainda podem ser utilizados para serviços como: passagem de tubulações elétricas e hidráulicas em seu interior.

Nas FIG. 3.4 a 3.9 são apresentados alguns exemplos arquitetônicos do uso dos perfis tubulares, incluindo pontes, passarelas, pavilhões para feiras, aeroportos e construções esportivas.



FIGURA 3.4 – Ponte Sundial at Turtle Bay, Califórnia, obra de Santiago Calatrava
Fonte: CALATRAVA..., 2009.



FIGURA 3.5 - Passarela *high tech* em Curitiba
Fonte: GELINSKI, 2003.



FIGURA 3.6 – Domo do Milênio, situado em Greenwich, Londres, Inglaterra
Fonte: REVISTA PROJETO DESIGN, 2001.



FIGURA 3.7 – Centro Pompidou, Paris, de Richard Rogers e Renzo Piano
Fonte: PIANO, 2010.



FIGURA 3.8 – Aeroporto Internacional de Kansai, Japão
Fonte: PIANO, 2010.



FIGURA 3.9 – Estádio de Futebol em Oita, Japão
Fonte: METALICA..., 2009.

3.3 Perfis de chapa dobrada

Os perfis de chapa dobrada são perfis obtidos pelo dobramento de chapas a frio. São dois os processos de produção dos perfis formados a frio, sendo: o processo contínuo e o descontínuo.

O processo contínuo (com uso de perfiladeiras) é o processo adequado à produção em série utilizado por fabricantes especializados em perfis formados a frio. Esse processo é realizado a partir do deslocamento longitudinal de uma chapa de aço sobre os roletes de uma linha de perfilação. Os roletes vão conferindo gradativamente à chapa a forma definitiva do perfil e quando este deixa a linha de perfilação, é cortado no comprimento indicado no projeto.

O processo descontínuo é adequado para uma pequena produção de perfis e geralmente é utilizado pelos fabricantes de estruturas metálicas, realizado por meio de uma prensa dobradeira. A matriz da dobradeira é prensada contra a chapa de aço, obrigando-a a formar uma dobra. Essa ação é feita sobre a mesma chapa por várias vezes até obter a seção do perfil desejado de acordo com a geometria especificada no projeto. O comprimento do perfil limita-se à largura da prensa.

Quando os perfis são produzidos de chapas finas, com a espessura entre 1,5 mm a 5 mm, os perfis recebem a denominação de perfis leves, exigindo cuidados especiais na sua aplicação. Os perfis de chapa dobrada podem ser projetados para cada aplicação

específica, com dimensões adequadas às necessidades de projeto. Existem também os perfis muito leves, que são usados na construção em *Light Steel Framing*, possuindo a espessura de 0,8 a 1,5 mm. Os perfis mais pesados podem ser fabricados com chapas que podem chegar à espessura de até 25 mm, exigindo raios de curvaturas mínimos na dobra para evitar fissuração ou alteração nas características do aço.

Os perfis leves são os mais usuais na construção civil, sendo eficientes em obras de pequeno e médio porte ou como elementos estruturais secundários, principalmente na construção de coberturas, por serem mais econômicos, possuem leveza, facilidade de fabricação, manuseio e transporte.

Os perfis de chapa dobrada a frio são atendidos segundo as normas NBR 14762 (ABNT, 2010) e NBR 6355 (ABNT, 2003). Os perfis mais comuns em estruturas possuem as seções transversais similares aos perfis laminados e soldados. Nas figuras 3.10 e 3.11 estão apresentados alguns exemplos de seções transversais mais utilizadas.

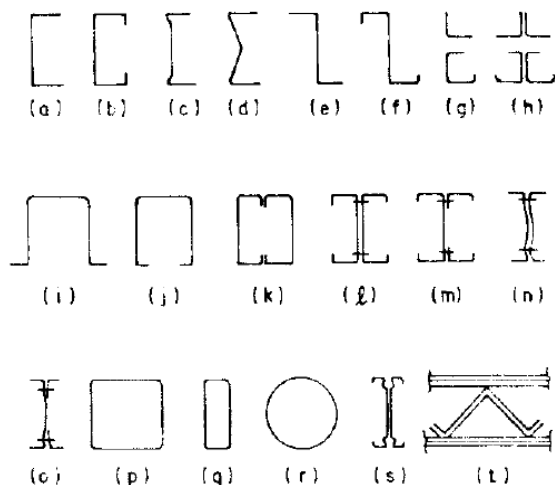


FIGURA 3.10 – Seções transversais de perfis de chapa dobrada
Fonte: JAVARONI, 1993.

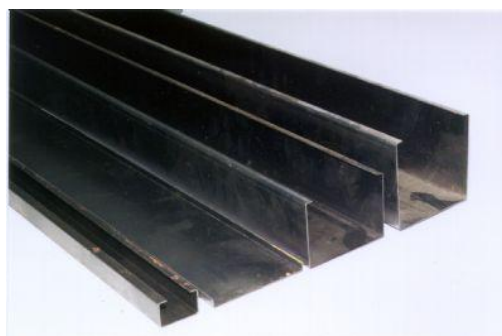


FIGURA 3.11 - Perfis obtidos pelo dobramento de chapas a frio
Fonte: EMORI, 2011.

3.4 Perfis tubulares com costura

Os perfis tubulares com costura têm como matérias-primas as bobinas de aço laminadas a quente, que são fornecidas diretamente pelas usinas siderúrgicas para produção de tubos de aço. Estes tubos são produzidos a partir de tiras de aço por meio de um processo contínuo de soldagem por indução de alta frequência (FIG 3.12 e 3.13). Em seguida, são bitolados no diâmetro desejado e cortados em comprimentos padronizados. O acabamento dos tubos são de acordo com os requisitos em função da sua aplicação, norma técnica ou exigências dos clientes, como por exemplo: remoção de rebarba interna, revestimento de proteção, tratamento térmico, comprimentos até 15 m e outros (TUBONAL, 2006). No Anexo A, se encontra a especificação das normas técnicas com as características dos perfis com costura encontrados no mercado.

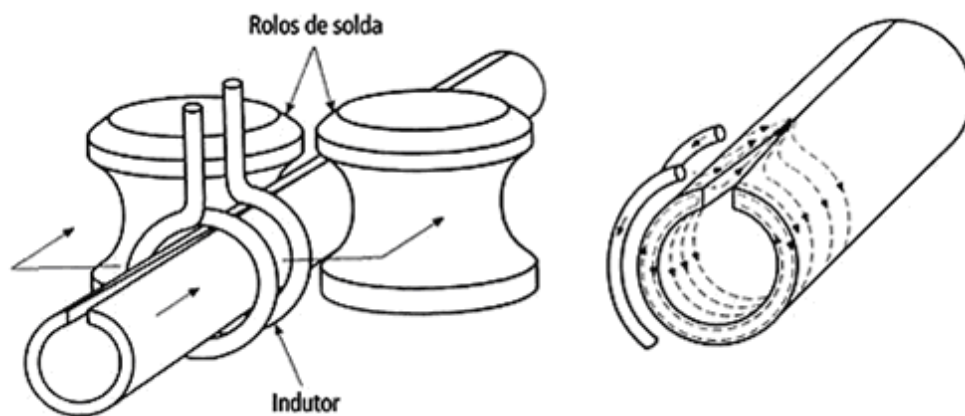


FIGURA 3.12 – Desenho esquemático do processo de soldagem por indução de alta frequência
Fonte: STEFANI, 2007.



FIGURA 3.13 – Equipamento utilizado no processo de soldagem por indução de alta frequência
Fonte: NUIC, 2003.

3.5 Perfis tubulares sem costura

Os tubos sem costura são produzidos por processo de laminação a quente, a partir de bloco maciço de seção redonda de aço que é laminado e perfurado por mandril, obtendo-se dessa maneira suas dimensões finais (FIG 3.14). Após esse processo, os tubos são resfriados em leito de resfriamento até temperatura ambiente e por possuírem uniforme distribuição de massa em torno de seu centro. Os tubos mantêm temperatura praticamente constante ao longo de todo o seu comprimento e em qualquer ponto de sua seção transversal. Por isso possuem baixo nível de tensões residuais, o que os distingue de tubos de aço com costura, que são produzidos a partir de chapas de aço calandrada e costurados (soldados) no encontro das mesmas (DUTTA et al., 1998). Na tabela 3.1 estão apresentadas de forma sucinta, as dimensões de fabricação dos perfis sem costura encontradas no mercado.

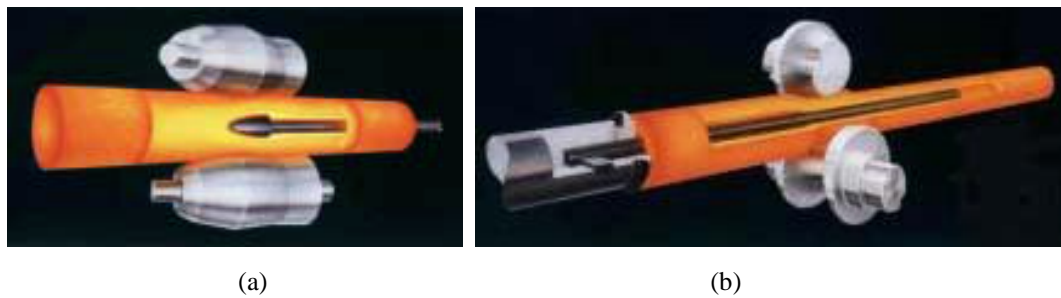


FIGURA 3.14 – Processo de laminação. (a) por perfuração. (b) por cilindragem
Fonte: NUIC, 2003.

Tabela 3.1 - Dimensões de perfis tubulares sem costura

Características	
Diâmetro externo (Tubos laminados)	26,9 a 355,6 mm
Diâmetro externo (Tubos trefilados)	5 a 235 mm
Espessura de parede	2,3 a 38 mm
Comprimento	até 15 m

Fonte: VALLOUREC & MANNESMANN TUBES, 2004.

3.6 Curvamento de perfis tubulares

O processo de curvamento dos perfis tubulares pode ser feito por meio do processo de conformação a frio, via calandragem dos perfis ou pelo processo de indução de corrente elétrica (FIG 3.15). Os perfis com pequenas espessuras passam pelo processo de curvamento a frio e os perfis com espessuras maiores passam pelo processo de curvamento por indução (FIG 3.16). Nessa última técnica citada, com o controle da potência elétrica de alta frequência, obtêm-se as condições ideais de curvamento, podendo-se aplicar em tubos longos para obtenção de curvas consecutivas, planas ou tridimensionais. A técnica por indução proporciona grande flexibilidade de fabricação de raio, ângulo e geometria das peças. Devido a facilidade de fabricação de curvas, este processo permite a redução de pontos de solda nos perfis. Independente do processo de curvamento e da espessura da parede, os perfis podem ser soldados (PROTUBO, 2009).

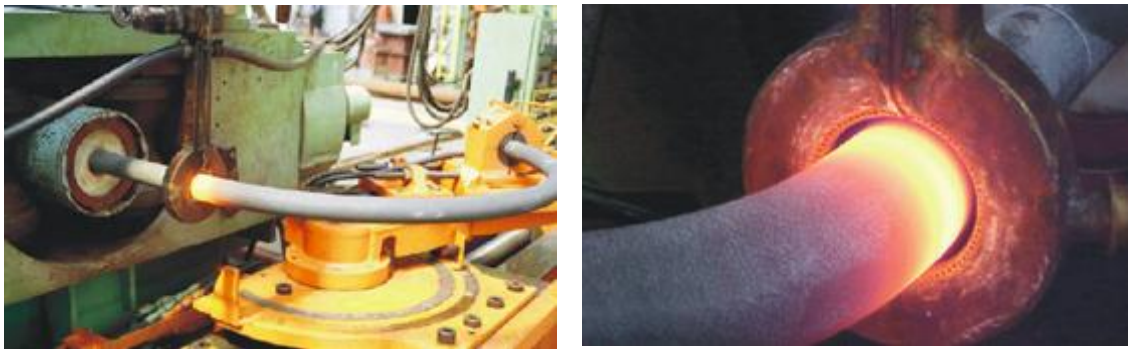


Figura 3.15 – Perfil tubular passando pelo processo de curvamento por indução
Fonte: PROTUBO, 2009.

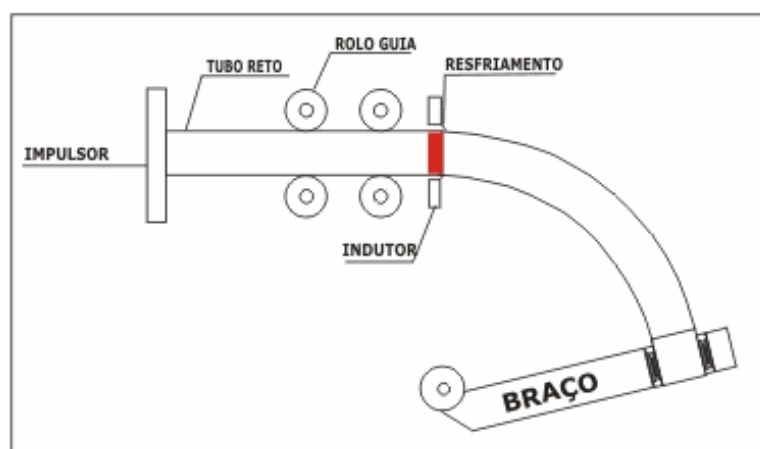


FIGURA 3.16 – Desenho esquemático do processo de curvamento por indução
Fonte: CURVAMENTO..., 2009.

Nas FIG. 3.17 e 3.18 estão apresentados perfis tubulares após o processo de curvamento e a utilização de perfis curvos na cobertura de uma edificação. No Anexo B, encontra-se informações sobre o curvamento de perfis, como a capacidade do equipamento citando raios e diâmetros máximos e mínimos, e o ângulo máximo de curvamento.



FIGURA 3.17 – Perfis tubulares após o processo de curvamento
Fonte: PROTUBO, 2009.



FIGURA 3.18 – Utilização de perfis curvos na cobertura de uma edificação
Fonte: PROTUBO, 2009.

CAPÍTULO IV

4. ESTUDO DE CASO

A indústria da construção civil está cada vez mais preocupada com o meio ambiente e desenvolvimento sustentável, pesquisando e procurando soluções para se obter uma redução de impactos negativos no meio ambiente, já que as edificações são grandes contribuintes do aumento de degradações ambientais ocorridas nos últimos tempos. No mercado nacional e internacional, encontram-se modelos de construção residencial estruturada em aço com a utilização de fechamentos industrializados, que são uma das alternativas sustentáveis por aliar velocidade, qualidade e racionalização do tempo e de materiais.

Como estudo de caso, apresenta-se neste capítulo os modelos de edificações residenciais em estrutura metálica, como os modelos das empresas Gerdau Açominas (siderúrgica – MG), Usiminas (siderúrgica – MG) e Big Farm Ltda (metalúrgica – RS). Modelos de nível popular que surgiram na busca pela solução ideal que apresente baixo custo e alta produtividade.

4.1 Edificações residenciais em estrutura metálica

No exterior, devido ao grande crescimento populacional e também as catástrofes naturais onde construções e até mesmo cidades inteiras precisam ser inteiramente repostas, é muito comum o uso de sistema construtivo em estrutura metálica, com casas de aço com materiais pré-fabricados, projetadas com características estruturais para suportar ventos fortes e terremotos. O sistema construtivo em estrutura metálica mais usual é o *Light Steel Framing*, principalmente na América do Norte, Europa e Ásia, onde as casas modulares de aço tem substituído de forma relevante as casas de madeira e concreto armado, por possuírem inúmeras vantagens que resultam numa construção mais durável, econômica e com técnicas ambientalmente corretas, onde diversas empresas tem explorado esse setor oferecendo inúmeros modelos de casas (FIG. 4.1 e 4.2).



FIGURA 4.1 – Esqueleto metálico de casa, EUA
Fonte: KODIAK..., 2011.



FIGURA 4.2 – Casa pronta de estrutura metálica, EUA
Fonte: KODIAK..., 2011.

O Brasil assim como outros países da América do Sul possui um *déficit* habitacional preocupante onde existe um número alto de famílias com baixa renda que vivem em condições de moradia inadequadas. São problemas que necessitam urgentemente de soluções rápidas e eficientes, que na maioria das vezes não são solucionados pelo preço elevado da matéria-prima necessária para o sistema construtivo convencional. Na busca de um novo sistema construtivo que ofereça baixo custo, alta produtividade, rapidez de execução e montagem, e possibilidade de remoção da obra para outro local praticamente sem perdas, grandes empresas nacionais entraram nesse mercado oferecendo modelos de casas construídas com estrutura metálica e materiais pré-fabricados para população de baixa renda. Os projetos oferecidos variam de casas térreas a edifícios de até cinco pavimentos, onde toda a estrutura e fechamento da edificação são montados rapidamente.

4.1.1 Casa Fácil – Gerdau

A Casa Fácil consiste em um kit elaborado pela empresa Gerdau Açominas com perfis leves e barras de aço resistente à corrosão atmosférica para montagem da estrutura de casa de 24, 36 ou 48 m². Esse sistema oferece 10 opções de plantas ampliáveis e algumas das possibilidades de plantas estão representadas nas FIG. 4.3 a 4.6.



FIGURA 4.3 – Planta de casa com 24 m²
Fonte: GERDAU AÇOMINAS, 2001.



FIGURA 4.4 – Planta de casa com 36 m²
Fonte: GERDAU AÇOMINAS, 2001.



FIGURA 4.5 – Planta de casa com 48 m²
Fonte: GERDAU AÇOMINAS, 2001.



FIGURA 4.6 – Planta de casa com 48 m²
Fonte: GERDAU AÇOMINAS, 2001.

O kit também acompanha um manual de instrução para montagem, dispensando a mão-de-obra especializada. A construção da casa inicia-se após a terraplenagem, locação da obra e disposição do gabarito no terreno. Em seguida, é feita a fundação tipo *radier*, que é uma fundação rasa que funciona como uma laje contínua de concreto armado, onde serão parafusados os pilares (FIG. 4.7).



FIGURA 4.7 – Desenho esquemático da fundação *radier*
 Fonte: GERDAU AÇOMINAS, 2001.

Com a estrutura principal montada inicia-se a colocação das vigas de cobertura e das telhas, que podem ser cerâmicas. A cobertura e materiais de fechamento ficam a escolha do proprietário (FIG. 4.8 a 4.10).

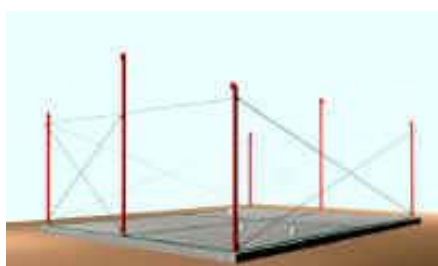


FIGURA 4.8 – Início da montagem da estrutura, pilares parafusados na fundação *radier*
 Fonte: GERDAU AÇOMINAS, 2001.



FIGURA 4.9 – Estrutura principal e vigas de cobertura
 Fonte: GERDAU AÇOMINAS, 2001.

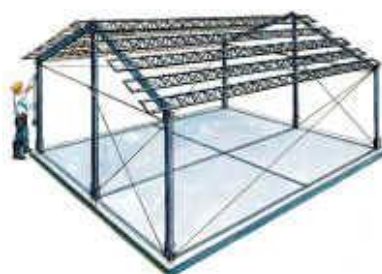


FIGURA 4.10 – Estrutura metálica montada e contraventada
 Fonte: GERDAU AÇOMINAS, 2001.

As instalações hidráulicas, elétricas e sanitárias são feitas após a execução dos acabamentos e de maneira convencional, embutidas nas paredes de alvenaria. O tempo de execução corresponde em até 21 dias, sendo uma economia de tempo de 35 % em comparação com os 32 dias gastos no sistema convencional. Atualmente, o kit da Casa Fácil Gerdau não está sendo produzido, encontra-se no mercado apenas o Galpão Fácil Gerdau (FARIA, 2011).

4.1.2 Usiteto – Usiminas

O Usiteto é um sistema habitacional que surgiu de uma parceria entre a Usiminas e a Companhia de Habitação de Minas Gerais (Cohab-MG), iniciada em 1997, que oferece modelos de casas populares com 36, 42 e 45 m², de um ou dois quartos com possibilidades de ampliação (FIG. 4.11 a 4.13). O sistema também oferece edifícios com quatro ou cinco pavimentos, com três a quatro unidades de dois ou três dormitórios por andar.



FIGURA 4.11 – Modelo 1,
Usiteto
Fonte: USIMINAS, 1997.



FIGURA 4.12 – Modelo 2,
Usiteto
Fonte: USIMINAS, 1997.



FIGURA 4.13 – Modelo 3,
Usiteto
Fonte: USIMINAS, 1997

O sistema construtivo da casa popular Usiteto, segue o mesmo procedimento citado no sistema Casa Fácil Gerdau, que consiste em fundação *radier* ou vigas baldrame, estrutura principal e engradamento metálico para cobertura, que acompanha manual de montagem, podendo ser executado pelo próprio proprietário (FIG. 4.14). As paredes, o

telhado e os acabamentos são de acordo com a escolha do proprietário, podendo ser utilizados painéis pré-fabricados, alvenarias de blocos ou tijolos e a cobertura pode ser em telhas cerâmicas (FIG 4.15).



FIGURA 4.14 – Estrutura metálica montada
Fonte: USIMINAS, 1997.



FIGURA 4.15 – Casa finalizada
Fonte: USIMINAS, 1997.

A casa de 36 m² possui o consumo de aço de 540 kg, sendo em chapas dobradas a frio com 2 mm de espessura. O preço da casa pronta levantada no mercado corresponde ao de valor R\$8.500,00 aproximadamente e do apartamento acabado é de R\$12.000,00. A estrutura metálica da casa com a estrutura da cobertura junto, correspondem ao peso aproximado de 18 kg/m² e é montada em apenas 4 h (USIMINAS, 2001).

4.1.3 Quick House – Big Farm Ltda

Quick House consiste no sistema construtivo elaborado e patenteado pela metalúrgica Big Farm Ltda, que pode ser adaptado para várias tipologias arquitetônicas (residencial, comercial ou institucional). O sistema construtivo consiste na construção de todas as paredes da edificação com painéis autoportantes de aço galvanizado encaixados e parafusados uns aos outros, com capacidade de suportar estruturas de coberturas e até mesmo um pavimento superior, sem necessidade de estruturas especiais adicionais (FIG. 4.16).

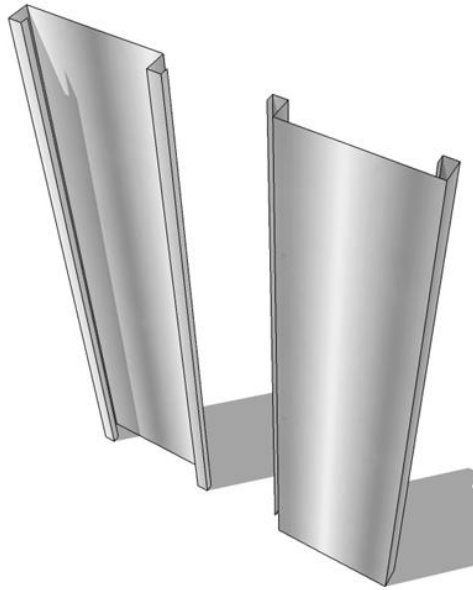


FIGURA 4.16 - Painéis autoportantes de aço galvanizado
Fonte: BIG FARM..., 2008.

Os prédios residenciais terão uma estrutura executada pela siderúrgica Usiminas e o fechamento no sistema Quick House executado pela metalúrgica Big Farm Ltda. A chapa é dobrada de modo a formar painéis autoportantes, cuja altura varia de acordo com o pé-direito do projeto ou com a utilização em peitoris ou vergas. Na parte superior e inferior dos painéis são utilizados um perfil "U" como fechamento, dando rigidez a estrutura, conforme mostra a FIG. 4.17.

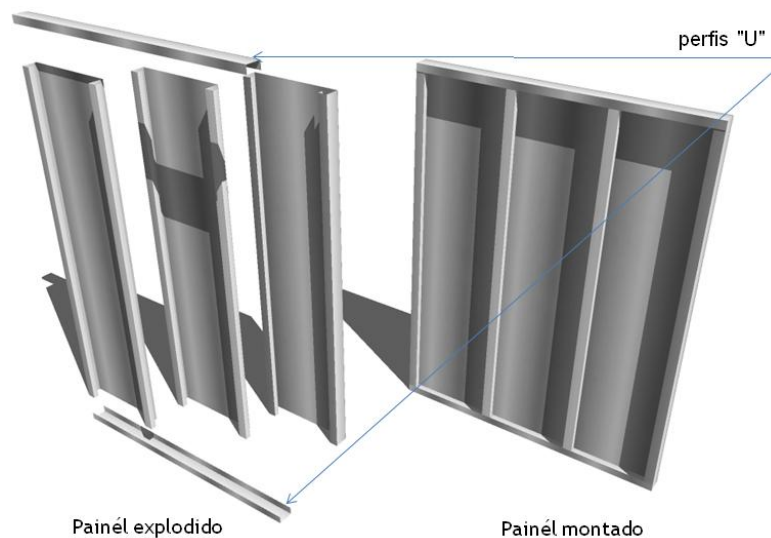


FIGURA 4.17 – Montagem dos painéis autoportantes
Fonte: BIG FARM..., 2008.

Os painéis possuem a largura de 61 cm, porém, existem painéis com medidas especiais para o assentamento de portas e janelas. Os painéis são revestidos externamente com chapas de OSB ou placas cimentícias e internamente com gesso acartonado (FIG. 4.18).

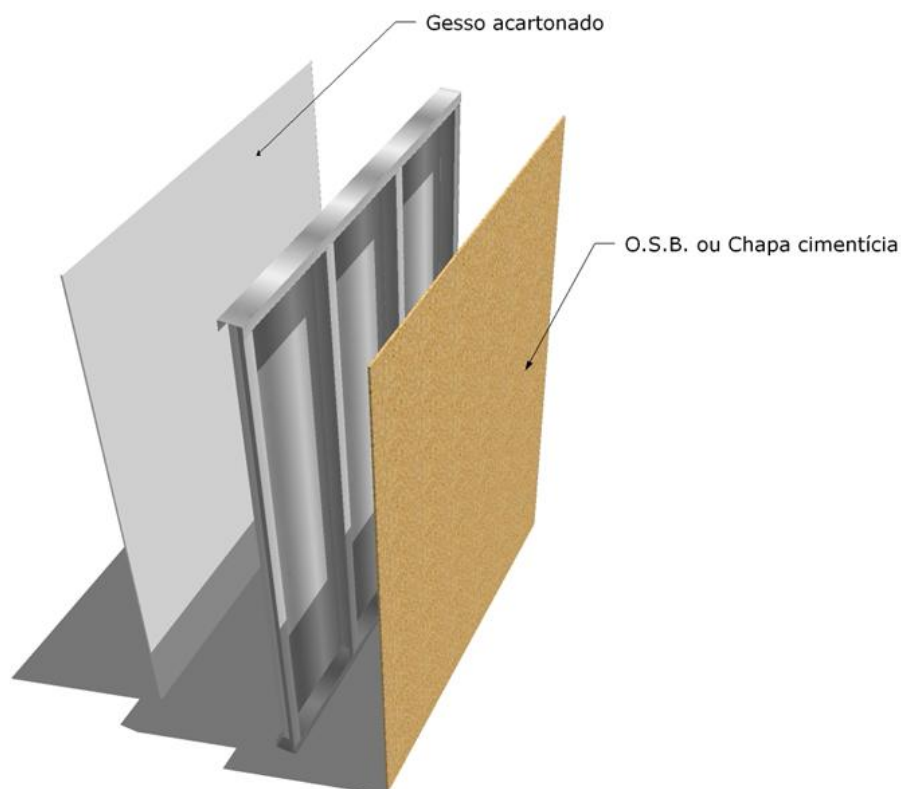


FIGURA 4.18 – Revestimento dos painéis autoportantes
Fonte: BIG FARM..., 2008.

Assim como os modelos da Gerdau e da Usiminas, após a preparação do terreno é executada a laje de fundação do tipo *radier* e quando a mesma estiver pronta, é feita a fixação e a montagem dos painéis. A estrutura de cobertura é executada com perfis metálicos e cobertas com telhas tipo *shingles*, telhas produzidas tendo como base uma manta asfáltica. O forro é executado com gesso acartonado e isolado com lã de vidro. A partir da conclusão da cobertura é feito os demais serviços como: instalações elétricas, sanitárias e hidráulicas. Nas FIG. 4.19 a 4.22 estão representadas as etapas construtivas a partir da conclusão da fundação.



FIGURA 4.19 – Encaixe dos painéis de aço
Fonte: BIG FARM..., 2008.



FIGURA 4.20 – Painéis de aço revestido com OSB
Fonte: BIG FARM..., 2008.

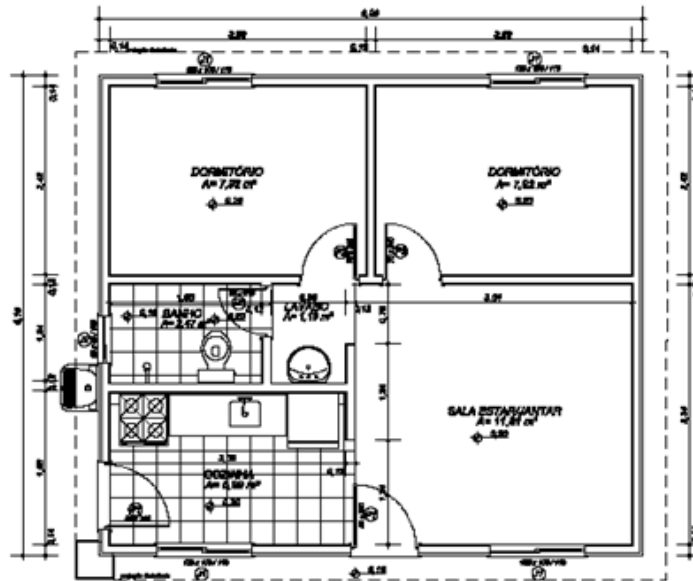


FIGURA 4.21 – Adicionando o acabamento em vinil
Fonte: BIG FARM..., 2008.

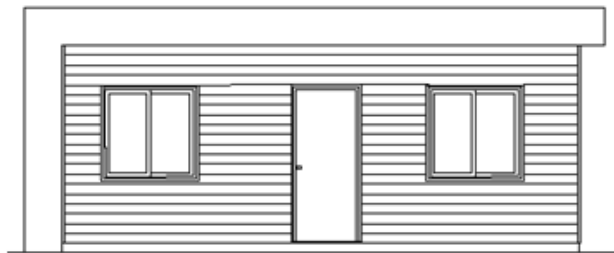


FIGURA 4.22 – Casa Pronta
Fonte: BIG FARM..., 2008.

A empresa disponibiliza modelos para casas populares de 43 m² (FIG. 4.23) e 63 m² (FIG. 4.24). O consumo de aço é de 1.680 Kg para uma casa de 42 m² e um custo de R\$ 5.040,00. O preço da casa pronta levantada no mercado é de R\$22.000,00, com o tempo de execução de 3 dias (LOPES, 2011).



(a) Planta baixa

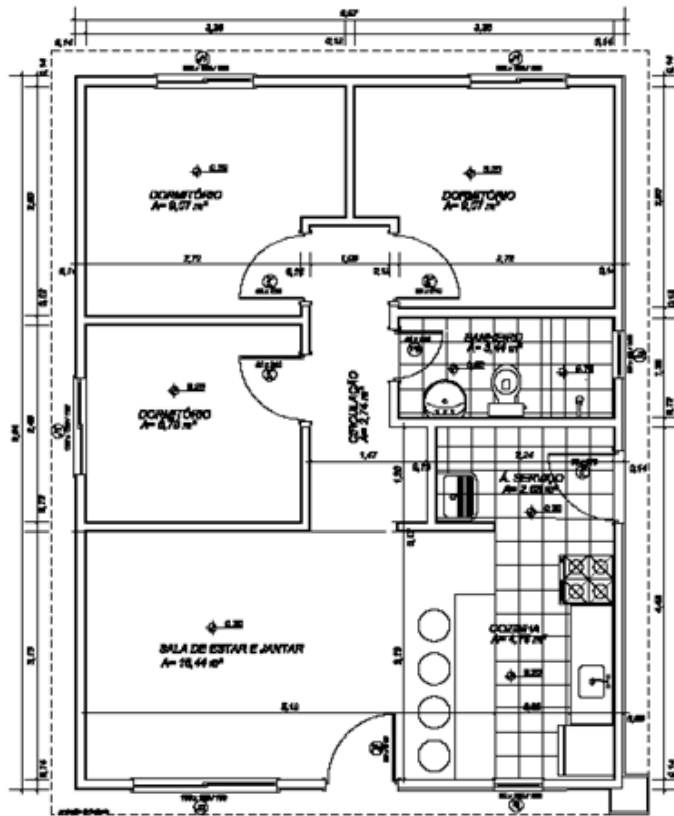


(b) Fachada principal

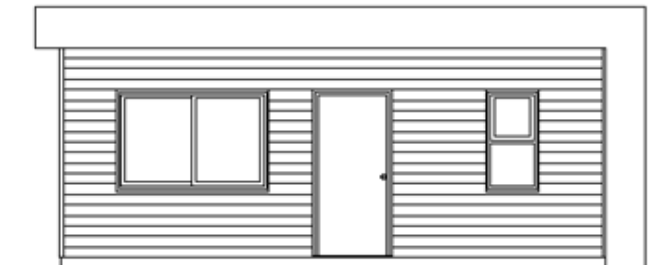


(c) Perspectiva

FIGURA 4.23 – Quick House – Modelo 43 m²
 Fonte: BIG FARM..., 2008.



(a) Planta baixa



(b) Fachada principal



(c) Perspectiva

FIGURA 4.24 – Quick House – Modelo 63 m²
 Fonte: BIG FARM, 2008.

4.2 Modelos estudados

Para o desenvolvimento do modelo arquitetônico e estrutural do sistema proposto, foram realizados estudos preliminares e maquetes físicas até obter-se uma modulação simplificada, onde os pórticos de estabilização bidirecionais formassem módulos estruturais que além de apresentarem facilidade e rapidez de execução, maior rigidez, eficiência estrutural e redução de ligações da estrutura, apresentassem também interfaces bem resolvidas entre sistema de cobertura e pórticos, não comprometendo o fechamento da estrutura. A etapa de anteprojeto analisando e representando as idéias e concepção do elemento construtivo foi fundamental para chegar-se ao modelo definitivo proposto neste trabalho. Foram elaborados quatro modelos iniciais até resultar o modelo definitivo, onde no decorrer dos estudos houve alterações na modulação estrutural e no projeto arquitetônico, a fim de garantir um conjunto arquitetônico e estrutural bem definido e corretamente dimensionado.

Os modelos iniciais foram desenvolvidos para habitação popular de baixa renda, com área construída de 67,5 m² (modelos 1 e 4) e 69 m² (modelos 2 e 3). Os modelos 2 e 3 possuem uma área maior devido aos ajustes de modulação, mas as plantas de todos os modelos possuem a mesma organização espacial dos ambientes, composta de: sala de estar, jantar, cozinha, área de serviço, banheiro e dois quartos. Os modelos foram estruturados por meio de pórticos de estabilização bidirecionais, que são os principais elementos estruturais da construção e consistem em pórticos espaciais que proporcionam o equilíbrio de uma construção em duas direções perpendiculares quando submetidos a ações (fluxos de cargas) horizontais (vento, por exemplo), FIG. 4.25. Os pórticos de estabilizações usados nos modelos são compostos de arcos com geratriz circular que sustentam a cobertura metálica arqueada da edificação. Estes arcos se inter cruzam no espaço formando um único sistema de pórtico espacial.

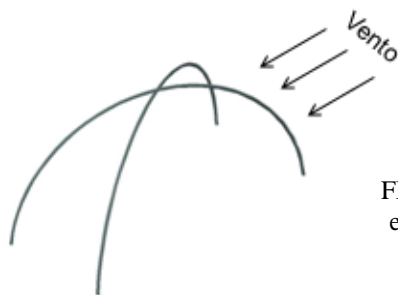
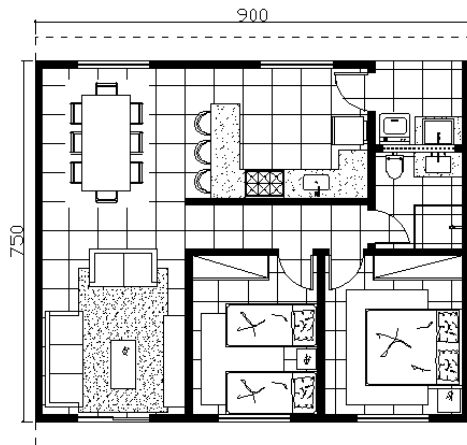


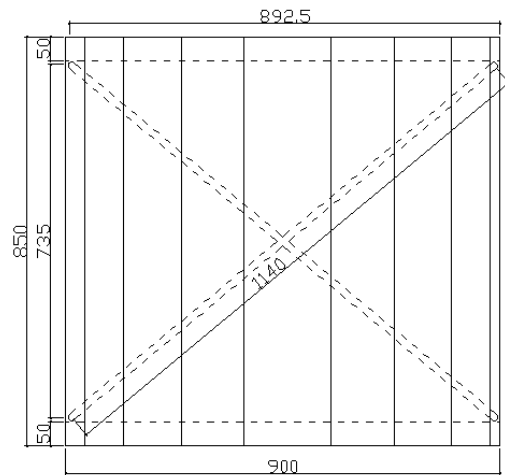
FIGURA 4.25 – Pórticos de estabilização bidirecionais

4.2.1 Modelo 1

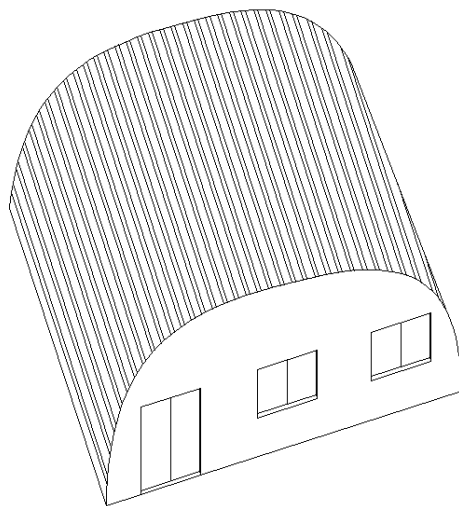
O modelo 1 é composto de apenas um módulo estrutural, onde a estrutura é fixada no vértice da construção cruzando-se no topo, com espaçamento de 8,925 m entre os eixos longitudinais e de 7,35 m entre os eixos transversais. Possui uma área coberta de 76,50 m², com beirais na parte frontal e posterior da construção (FIG. 4.26).



(a) Planta baixa



(b) Planta de cobertura

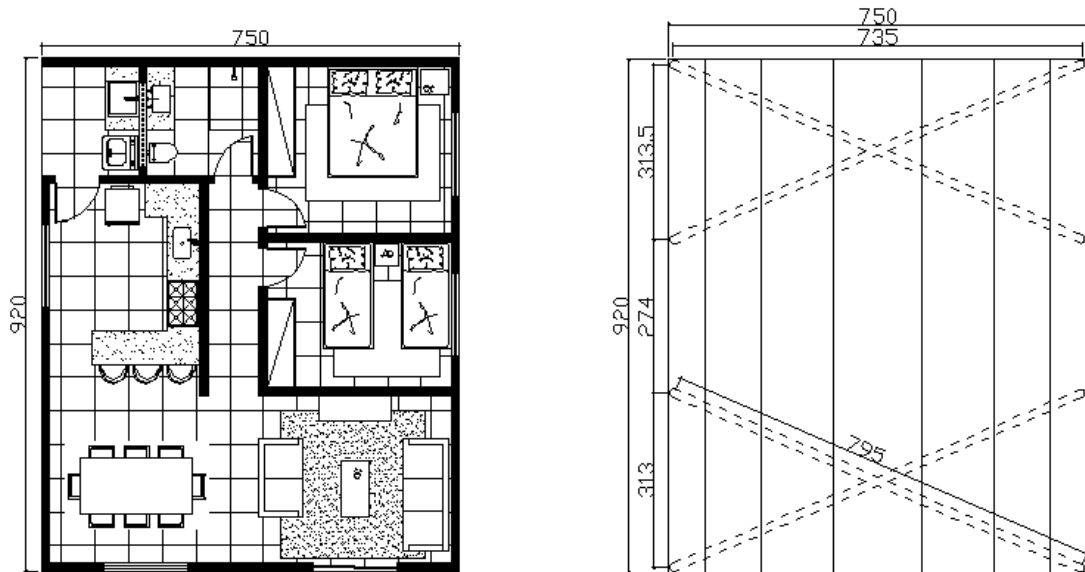


(c) Perspectiva

FIGURA 4.26 – Modelo de estudo 1

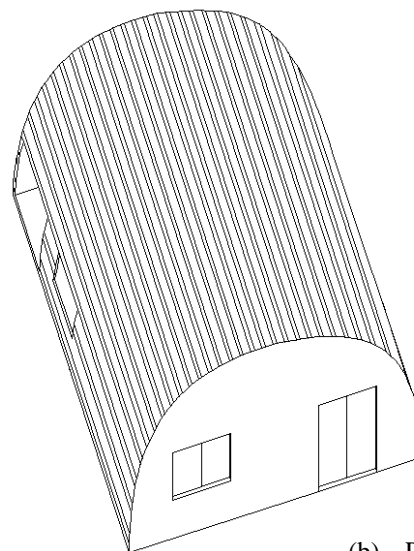
4.2.2 Modelo 2

O modelo 2 é composto por dois módulos estruturais com espaçamento de 7,35 m entre os eixos longitudinais. Nos eixos transversais os espaçamentos entre os eixos são de 3,135 m, 2,74 m e 3,135 m. Possui uma área coberta igual a 69 m² e não possui beirais (FIG. 4.27).



(a) Planta baixa

(b) Planta de cobertura

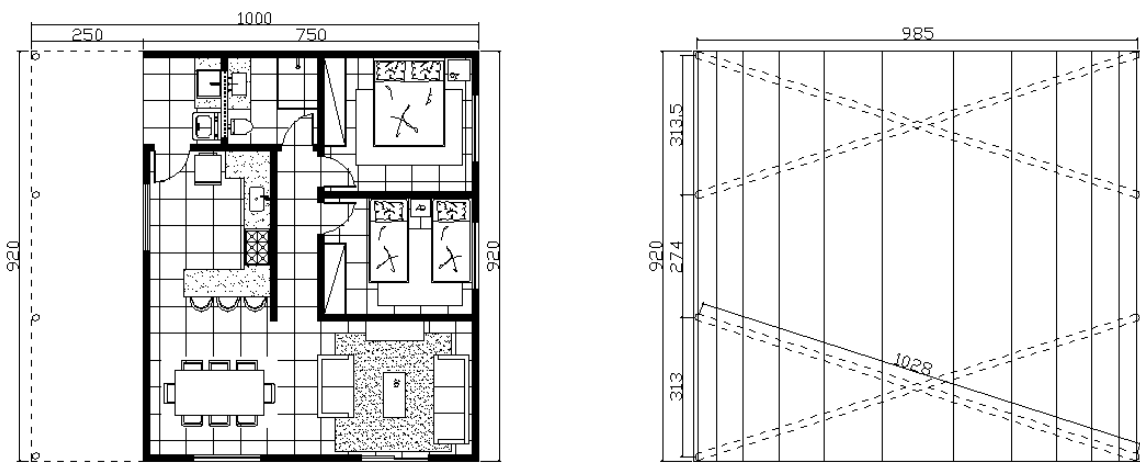


(b) Perspectiva

FIGURA 4.27 – Modelo de estudo 2

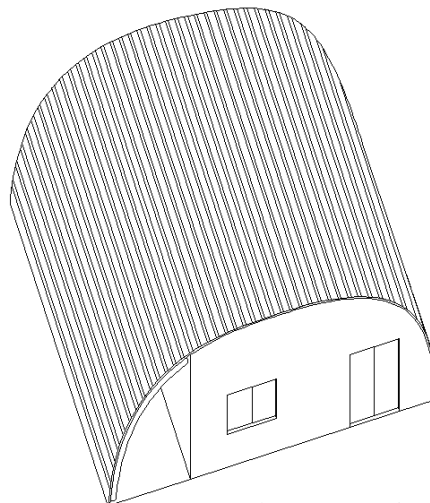
4.2.3 Modelo 3

O modelo 3 também é composto por dois módulos estruturais, assim como o modelo 2, porém com um espaçamento maior entre os eixos longitudinais com 9,85 m, prevendo área para garagem onde a cobertura pode ser toda fechada ou possuir espaços abertos não atingindo o piso. Nos eixos transversais os espaçamentos entre os eixos são de 3,135 m, 2,74 m e 3,135 m, mesmo espaçamento do modelo 2. Possui uma área coberta igual a 92 m² (FIG. 4.28).



(a) Planta baixa

(b) Planta de cobertura



(b) Perspectiva

FIGURA 4.28 – Modelo de estudo 3

4.2.4 Modelo 4

O modelo 4 foi elaborado da mesma forma que o modelo 1, com apenas um módulo desenvolvendo-se de piso a piso e cruzando-se no meio, porém, a partir de somente um dos vértices do lado direito da construção, formando uma cobertura trapezoidal. Possui espaçamento de 11,54 m entre os eixos longitudinais. Nos eixos transversais os espaçamentos entre os eixos são 7,31 m no lado direito e 10,27 m no lado esquerdo. Este modelo também prevê uma área para garagem onde a cobertura pode ser toda fechada ou possuir espaços abertos, não atingindo o piso, além de possuir beirais na parte frontal e posterior da construção. Possui uma área coberta igual a 109,27 m² (FIG. 4.29).

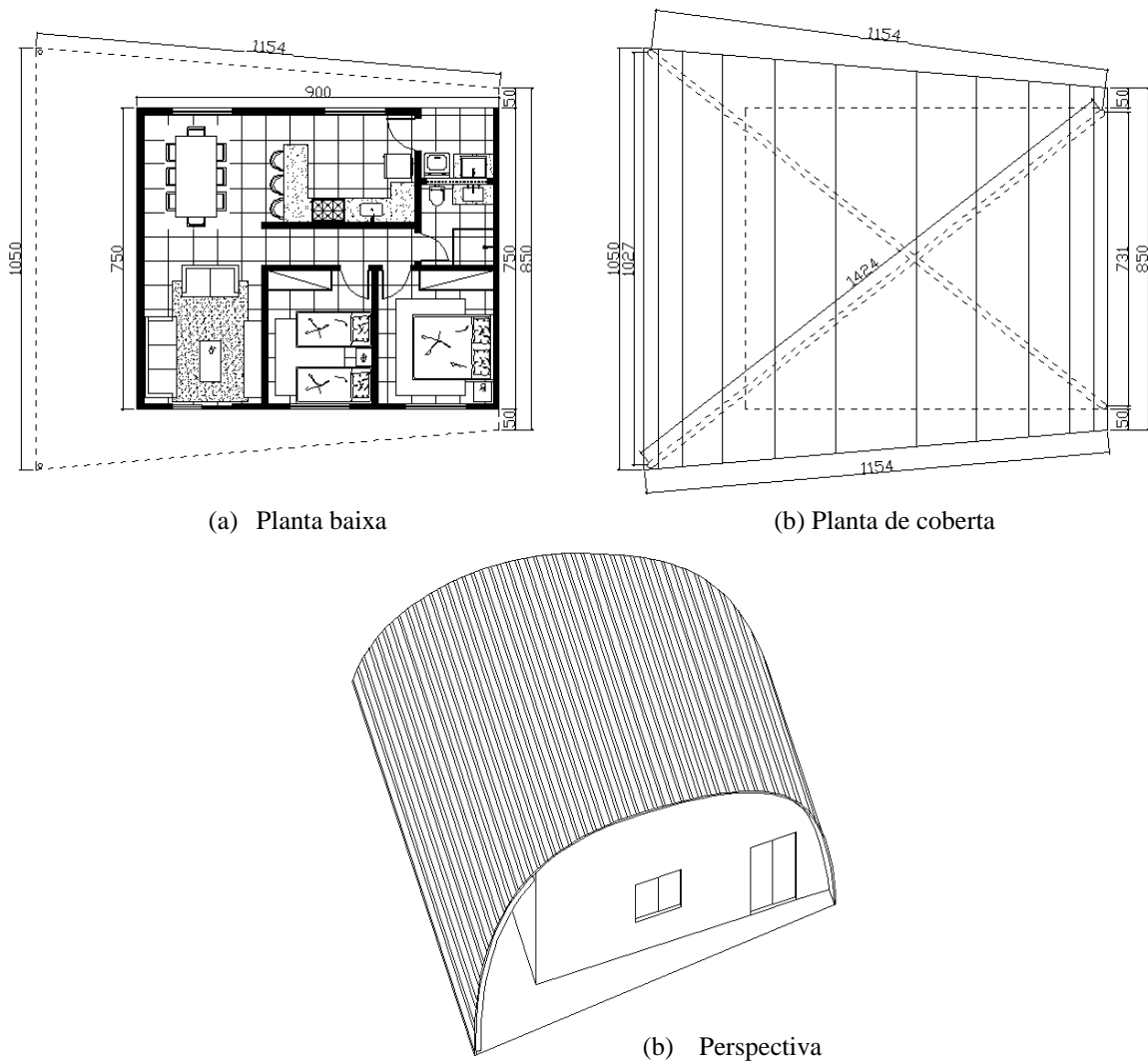


FIGURA 4.29 – Modelo de estudo 4

4.2.5 Análise arquitetônica dos modelos

Verificou-se após a análise arquitetônica que os modelos apresentados anteriormente, como os modelos 1 e 2 apresentam pequenos problemas relacionados à ventilação interna pelo fato da construção ser completamente fechada por cobertura metálica e também por não oferecer possibilidade de expansão. Já nos modelos 3 e 4 existem possibilidade de expansão devido à área externa coberta que prevê a área de garagem, mas o projeto arquitetônico necessitaria de modificações e de melhor organização espacial dos ambientes. Por questões econômicas, o modelo 4 (FIG. 4.30) sofreu uma alteração na cobertura, que inicialmente possuía o formato trapezoidal, e passou a ter o formato de área coberta retangular com a mesma área que o modelo 3 (FIG. 4.31).

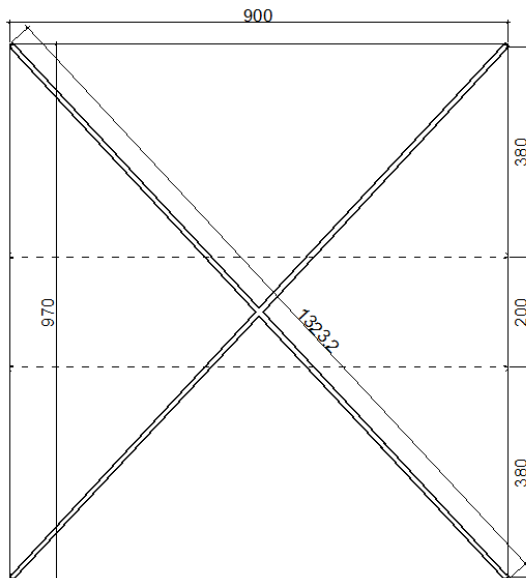


FIGURA 4.30 – Modelo 4

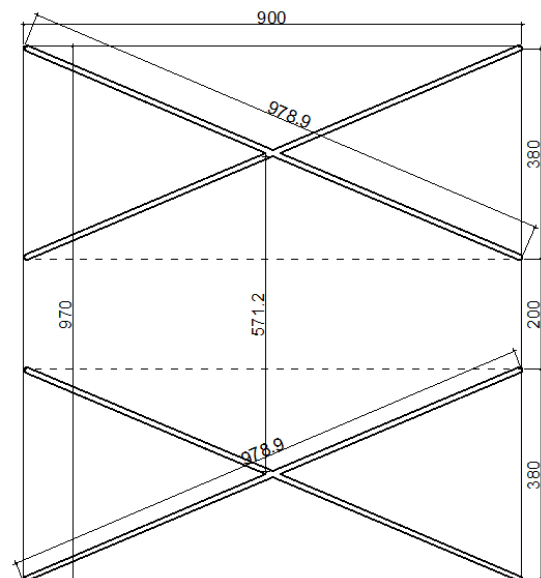
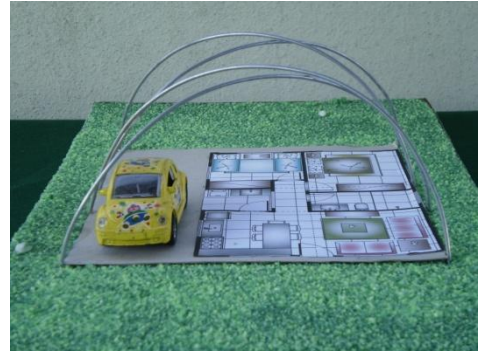


FIGURA 4.31 – Modelo 3

Os modelos juntamente com sua composição volumétrica e organização espacial foram analisados e comparados por maquetes físicas que foram fundamentais para decidir qual modelo seria mais eficiente para integrar o sistema de cobertura metálica. Foram feitas maquetes na escala 1:50 dos pórticos de estabilizações onde foi aplicado a cobertura arqueada sobre eles, também na mesma escala, para análise arquitetônica (FIG. 4.32 e 4.33).



(a) Vista superior



(b) Vista frontal

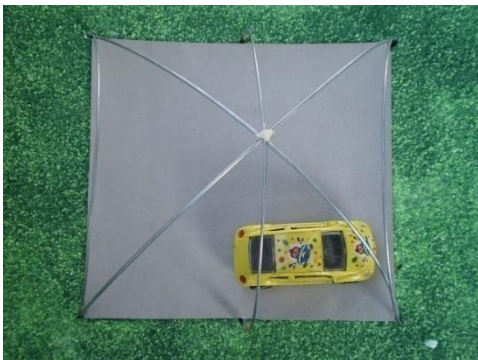


(c) Vista lateral esquerda



(d) Vista lateral

FIGURA 4.32 – Maquete do modelo 3



(a) Vista superior



(b) Vista frontal



(c) Vista lateral esquerda



(d) Vista lateral

FIGURA 4.33 – Maquete do modelo 4

A partir dessa análise foi possível identificar problemas de interfaces entre os pórticos e a cobertura no modelo 4, cujo problema não foi encontrado no modelo 3. Por fim, tendo o modelo 3 como base, foram feitas algumas modificações em busca da racionalização construtiva, resultando-se no projeto arquitetônico e estrutural proposto nesse trabalho, que também foi analisado volumetricamente por meio de maquete física, numa escala maior (1:25), representada nas FIG. 4.34 a 4.41.



FIGURA 4.34 – Maquete do modelo proposto



FIGURA 4.35 – Vista frontal da maquete sem a cobertura



FIGURA 4.36 – Vista posterior da maquete



FIGURA 4.37 – Vista frontal da maquete



FIGURA 4.38 – Vista da maquete



FIGURA 4.39 – Vista lateral direita da maquete



FIGURA 4.40 – Vista lateral esquerda da maquete com cobertura



FIGURA 4.41 – Vista posterior da maquete com cobertura

4.3 Modelo arquitetônico e estrutural proposto

A construção proposta além de ser extremamente versátil e resistente, gera um menor volume de resíduos no canteiro de obras, podendo causar um menor impacto sobre o meio ambiente e estando dentro dos conceitos de sustentabilidade, que atualmente se tornou obrigatório na arquitetura, uma vez que o aço é um material 100% reciclável.

Apresenta-se um modelo arquitetônico e estrutural com a utilização de pórticos de estabilização bidirecionais como solução para construção residencial. Esse sistema é mais eficiente que os convencionais, uma vez que o sistema de cobertura dos pórticos resulta numa só estrutura que une paredes e cobertura, apresentando maior resistência a ações horizontais como ventos fortes e até mesmo a abalos sísmicos.

O modelo proposto baseia-se em um processo construtivo fácil e de rápida execução, utilizando-se perfis metálicos de seção circular com costura para montagem dos pórticos de estabilizações, que são os principais elementos estruturais da construção, proporcionando sua estabilidade (FIG. 4.42). A construção foi projetada com uma modulação simples composta por dois módulos de pórticos bidirecionais com vãos de 9 m entre os eixos longitudinais e nos eixos transversais os espaçamentos entre os eixos são de 3,80 m, 2,00 m e 3,80 m (FIG. 4.43).

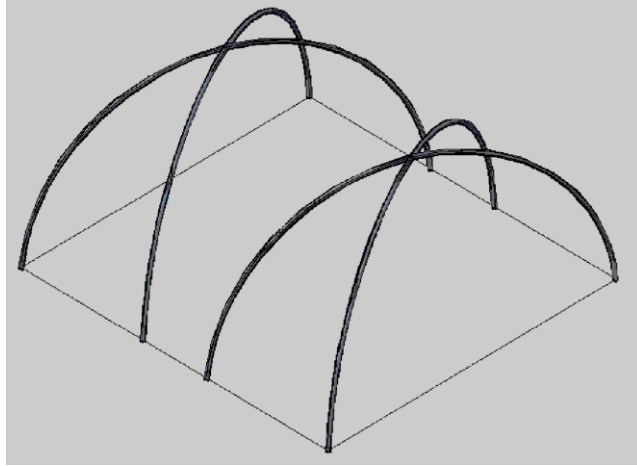


FIGURA 4.42 – Perspectiva dos pórticos de estabilização bidirecionais

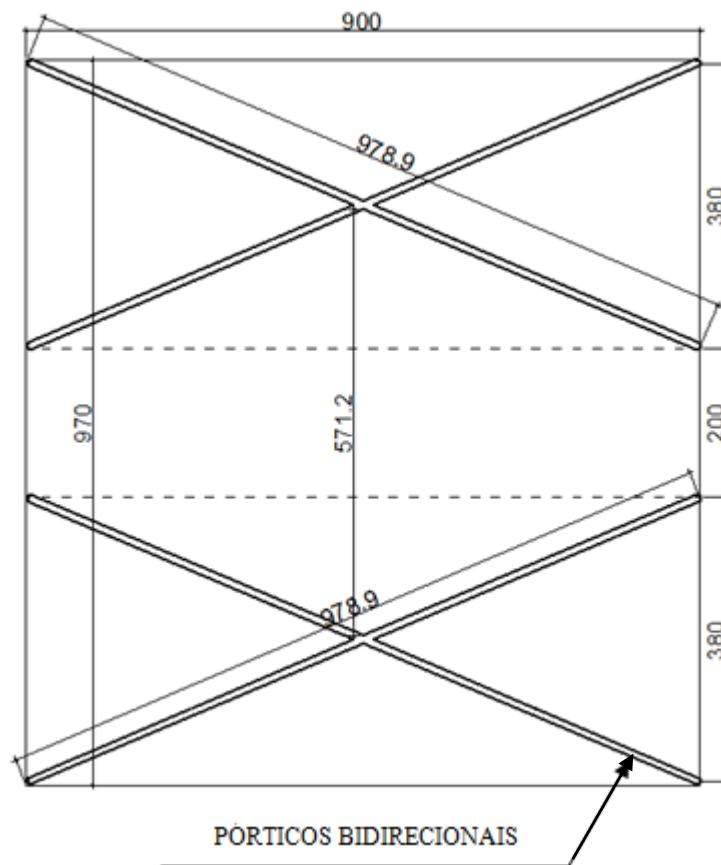


FIGURA 4.43 – Planta do sistema estrutural com pórticos de estabilização bidirecionais

A residência possui uma volumetria simples com a composição marcada pela utilização da cobertura arqueada com dupla função de parede e cobertura. Cobertura sustentada por uma estrutura com equilíbrio em duas direções perpendiculares. Possui uma área construída de 87,3 m², sendo 48,923 m² de área útil e 28,13 m² destinados a garagem e varanda. Obtém-se ganhos em área comparando com outros modelos de casas populares encontrados no mercado. Os dados gerais da residência encontram-se reunidos na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados gerais da edificação

Tipologia	Área total construída	Observação
Residencial (popular)	87,3 m ²	Possui 1 pavimento
Ambientes	Área	Observação
Quarto 1 (filhos)	8,833 m ²	
Quarto 2 (casal)	10,587 m ²	
Circulação (área íntima)	2,34 m ²	
Banho	4,26 m ²	
Área de serviço	3,705 m ²	
Sala e cozinha integradas	19,198 m ²	9,599 m ² cada ambiente
Área útil total = 48,923 m²		
Garagem/Varanda	28,13 m ²	16,965 m ² destinados a garagem e 11,165 m ² a varanda. Áreas que podem ser usadas para uma futura ampliação da casa, como por exemplo, a construção de mais um quarto.

Para um melhor entendimento do projeto estrutural, arquitetônico e organização espacial dos ambientes, nas FIG. 4.44 a 4.57 está apresentado um esquema das plantas, fachadas, cortes e perspectivas em 3D da construção.

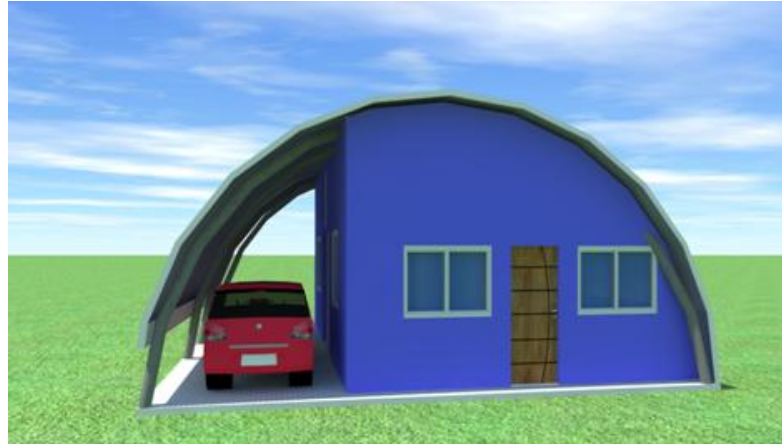


FIGURA 4.44 – Perspectiva da fachada frontal



FIGURA 4.45 – Perspectiva da fachada posterior com lateral direita



FIGURA 4.46 – Perspectiva da fachada frontal com lateral direita



FIGURA 4.47 – Perspectiva da fachada frontal com lateral esquerda

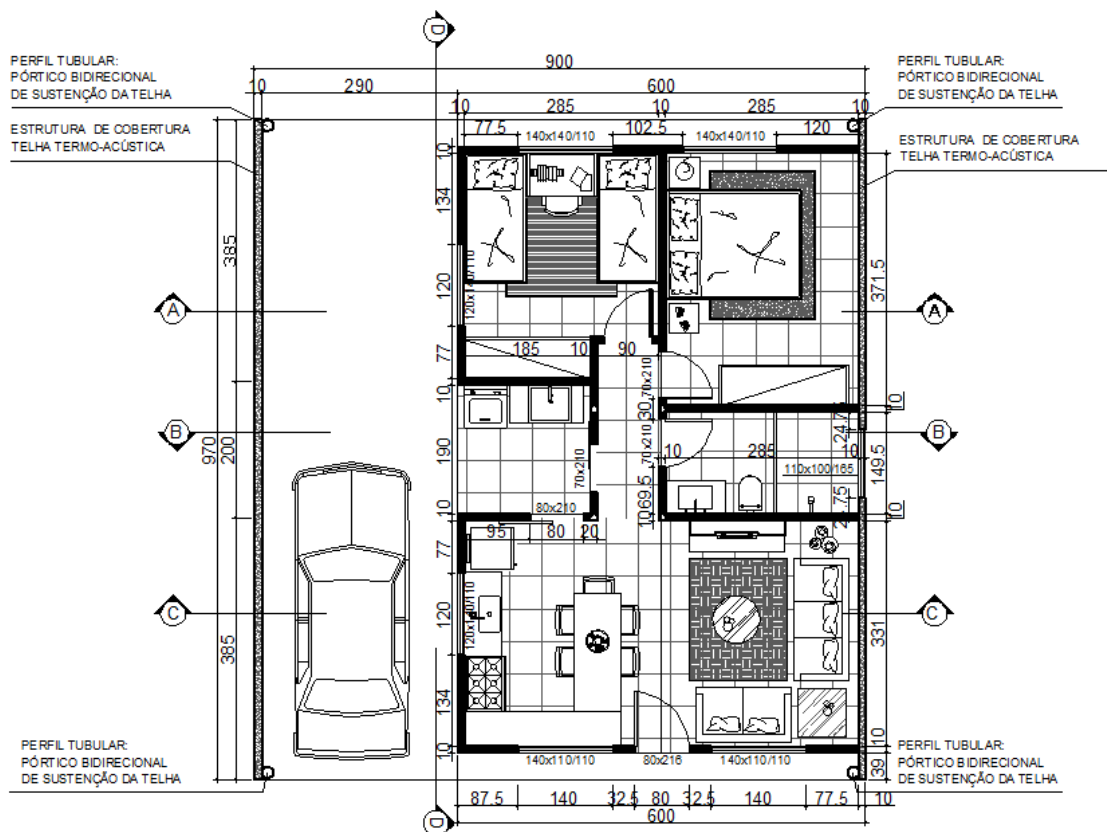


FIGURA 4.48 – Planta com layout

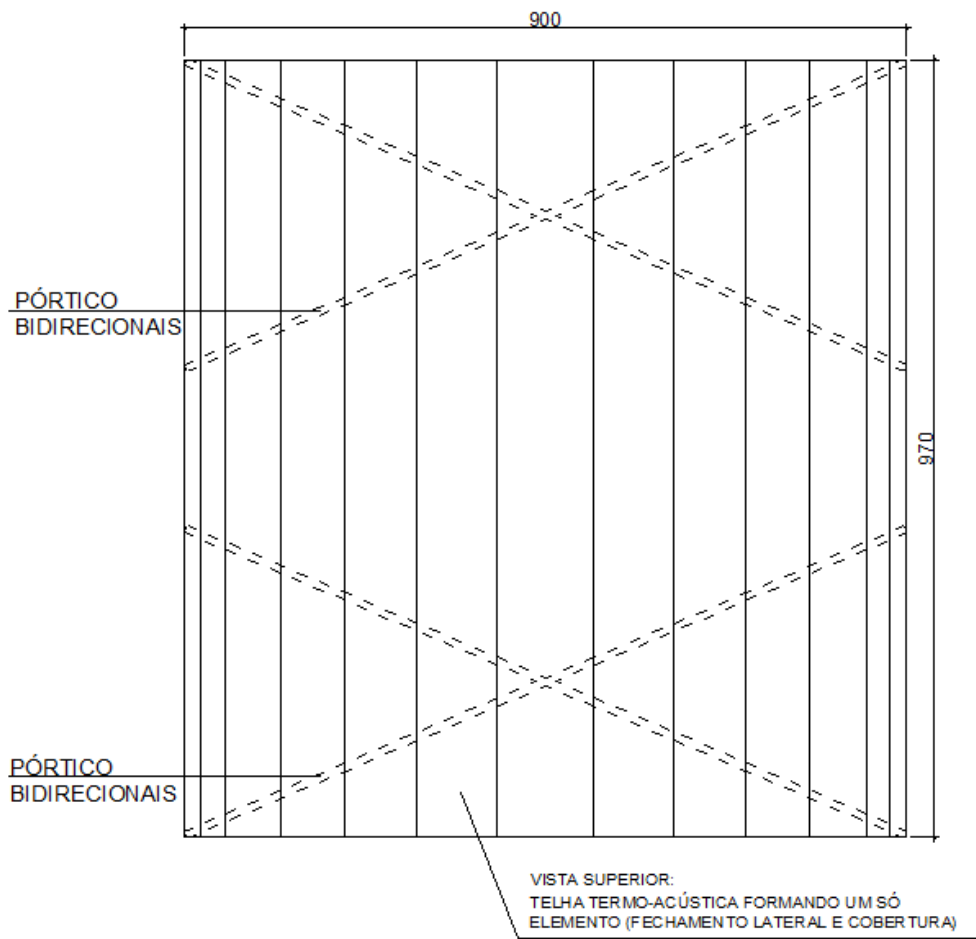


FIGURA 4.49 - Planta de cobertura

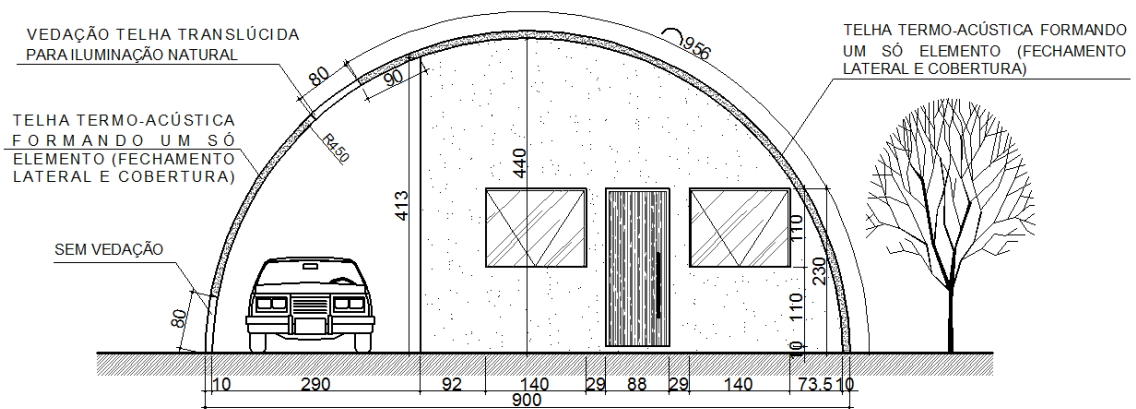


FIGURA 4.50 – Fachada frontal

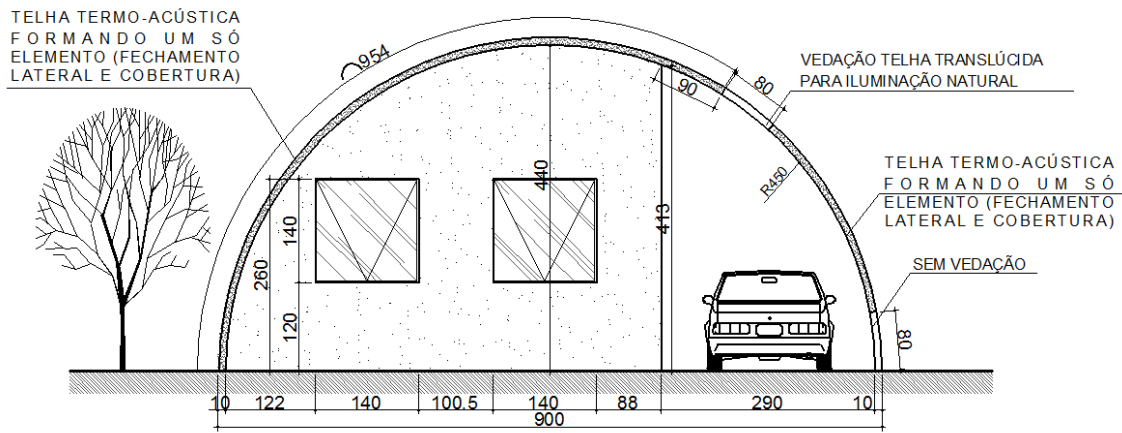


FIGURA 4.51 – Fachada posterior

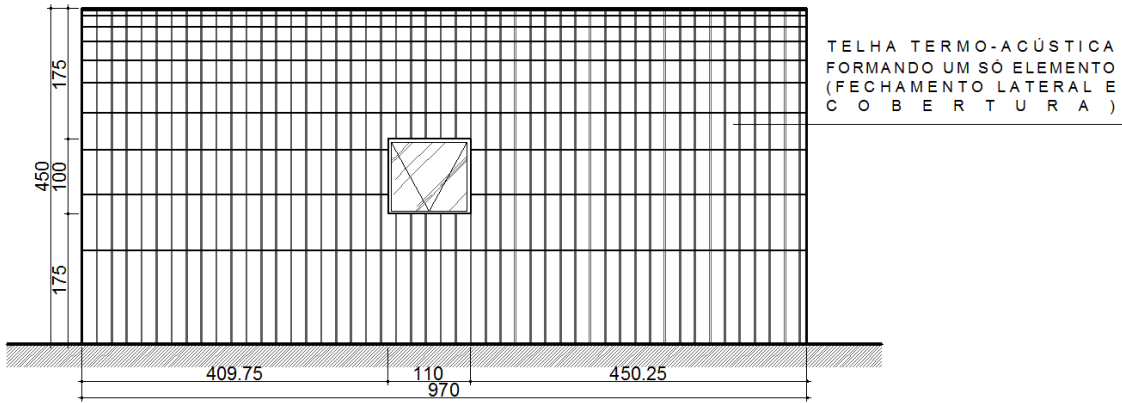


FIGURA 4.52 - Fachada lateral direita

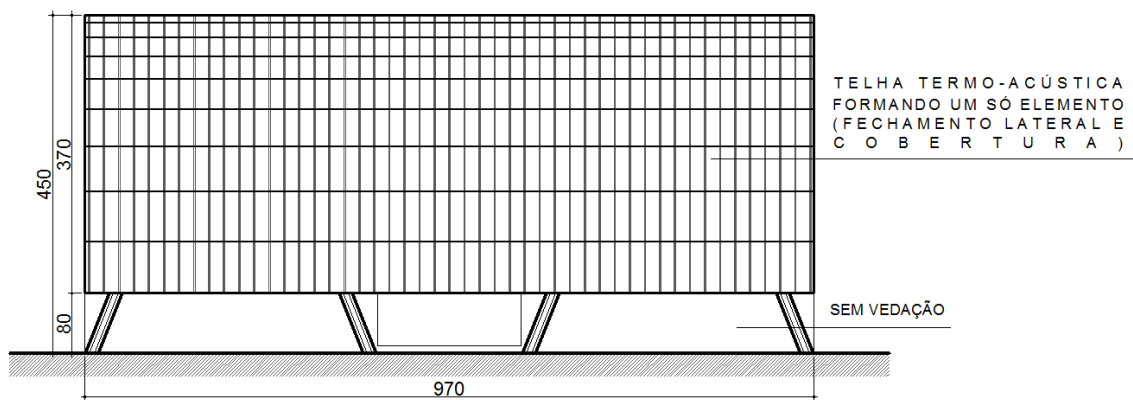


FIGURA 4.53 – Fachada lateral esquerda

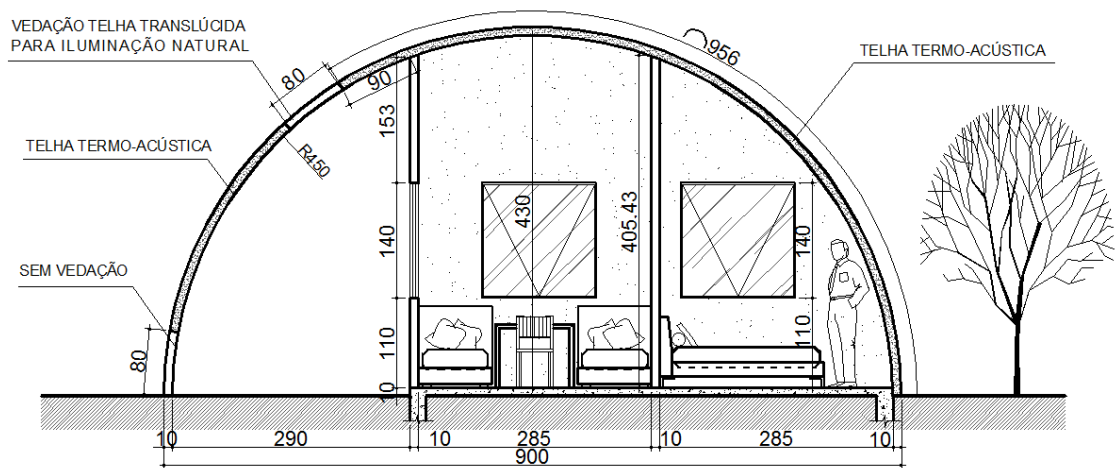


FIGURA 4.54 – Corte AA

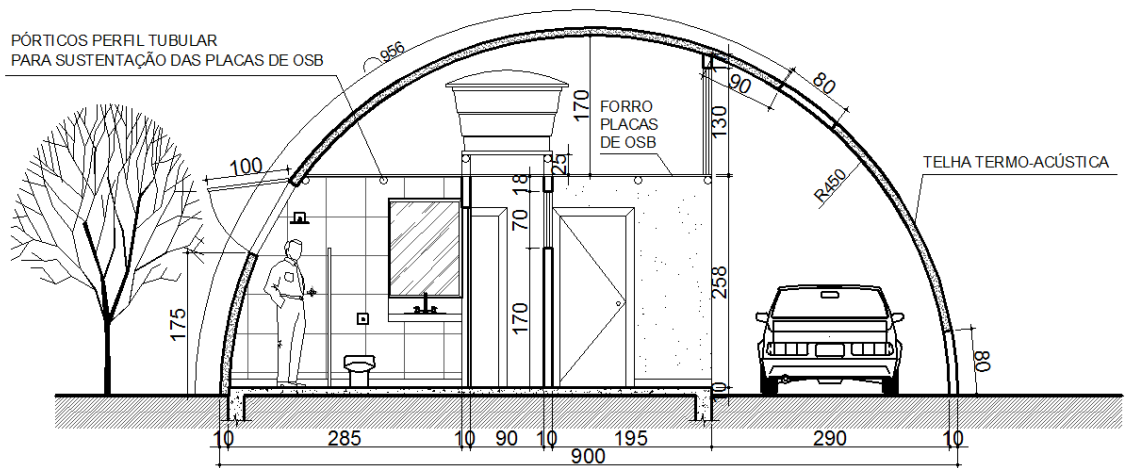


FIGURA 4.55 – Corte BB

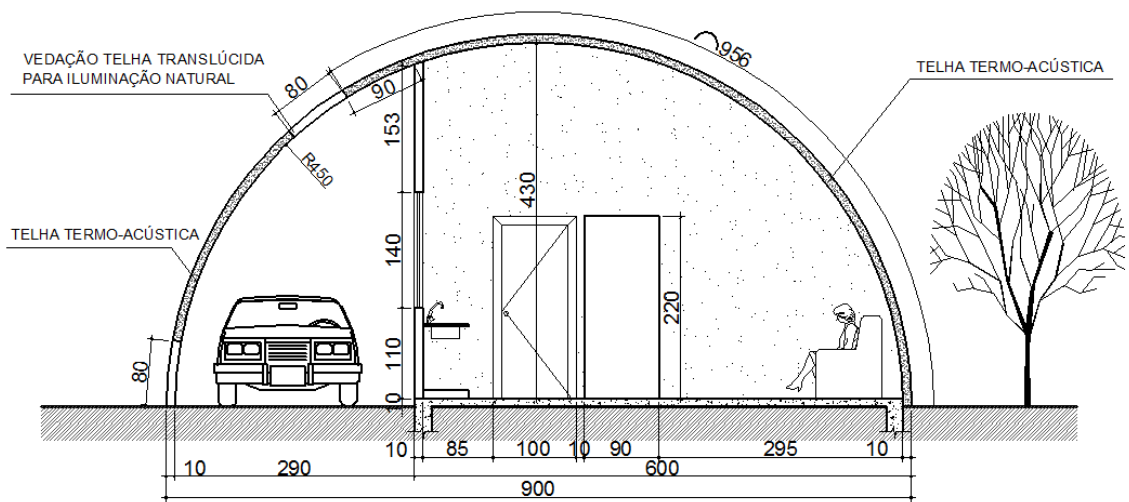


FIGURA 4.56 – Corte CC

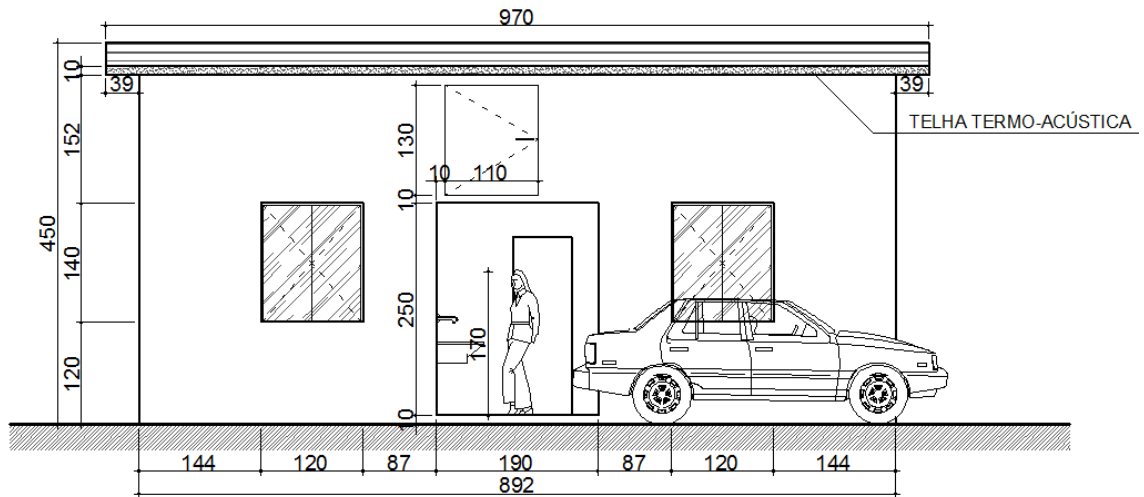


FIGURA 4.57 – Corte DD

A área útil de 48,923 m², a garagem/varanda de 28,13 m² estão apresentadas nas perspectivas, que mostram cada ambiente com suas respectivas características, representadas nas FIG. 4.58 a 4.67.

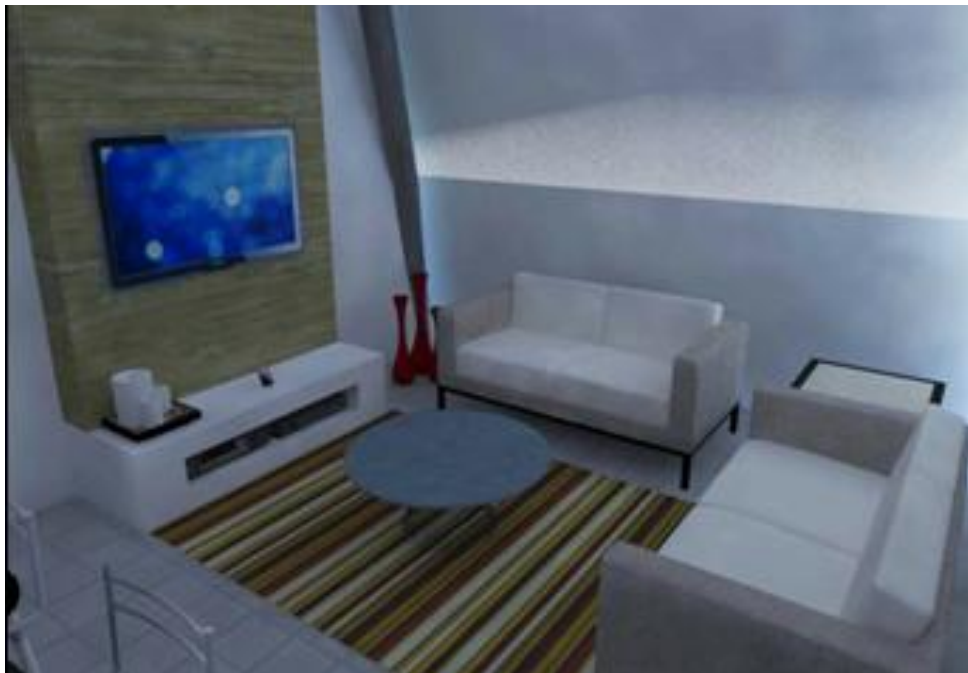


FIGURA 4.58 – Perspectiva 3D da sala de estar



FIGURA 4.59 – Perspectiva 3D da cozinha



FIGURA 4.60 – Perspectiva 3D do banheiro



FIGURA 4.61 – Perspectiva 3D do quarto 1 (filhos)

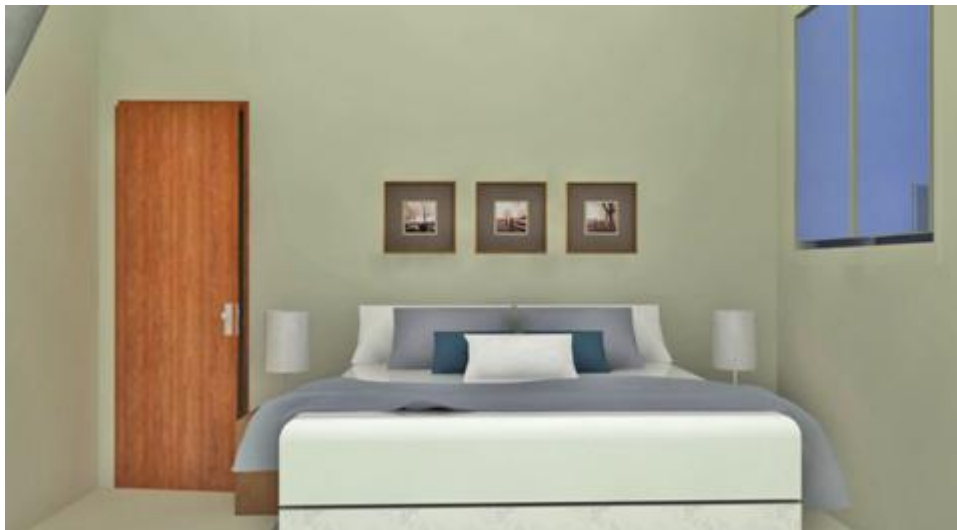


FIGURA 4.62 – Perspectiva 3D do quarto 2 (casal)



FIGURA 4.63 – Perspectiva em 3D do quarto 2 (casal)



FIGURA 4.64 – Perspectiva 3D da garagem/varanda



FIGURA 4.65 – Perspectiva 3D da garagem/varanda



FIGURA 4.66 – Perspectiva em 3D da área de serviço



FIGURA 4.67 – Perspectiva em 3D da área de serviço

Como mencionado anteriormente, o modelo apresentado oferece possibilidades de ampliação da casa, podendo se expandir e criar um outro ambiente na área externa coberta, restando ainda o espaço para garagem e não interferindo na volumetria da construção (FIG. 4.68).

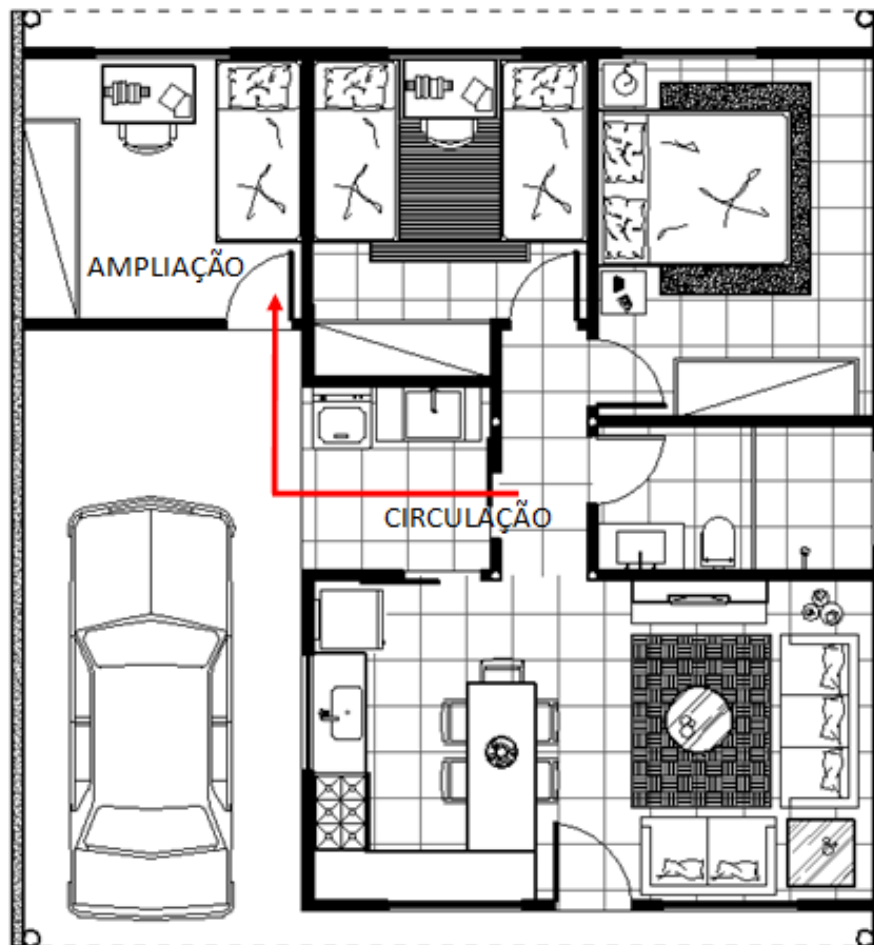


FIGURA 4.68 – Ampliação da casa

A iluminação artificial na sala de estar, cozinha e quartos é feita por meio de luminárias pendentes suspensas e saem dos tubos metálicos, ou seja, as instalações elétricas passam estrategicamente por dentro dos tubos que formam os pórticos bidirecionais, não deixando-as expostas, uma vez que nesses ambientes a cobertura é aparente, sem a presença de forro (FIG. 4.69).



FIGURA 4.69 – Iluminação artificial

4. 3.1 Especificação dos principais elementos estruturais e arquitetônicos

4.3.1.1 Elementos estruturais

Os pórticos de estabilização bidirecionais são os principais elementos estruturais da construção e são compostos por arcos com geratriz circular construídos em perfis tubulares, cujo perfil adotado é o tubo de aço com costura de seção circular. Inicialmente, pensou-se em usar dois elementos de arcos inteiros se cruzando no topo, formando assim os pórticos estabilização bidirecionais. Após os estudos preliminares, pensando no transporte e na facilidade de montagem e desmontagem dos pórticos de estabilização, a estrutura foi dividida em 4 arcos. Os 4 arcos são elementos que se cruzam no vértice da estrutura e são interligados entre si por uma ligação de topo. São fixados na laje de fundação por uma ligação de base dando maior estabilidade e rigidez a estrutura.

O detalhamento de ligações de estruturas metálicas é um dos fatores que contribuem para que esse sistema construtivo ainda não tenha superado a construção convencional, devido a sua complexidade, pois devem ser projetadas e executadas de forma cautelosa, já que as ligações contribuem significativamente na resistência, funcionalidade e estética da estrutura, podendo até inviabilizar o projeto. Ressalta-se que as ligações apresentadas neste trabalho não foram submetidas ao detalhamento, foram apenas pensadas de forma que não interferissem nas questões estéticas e estruturais do projeto.

Durante o processo de desenvolvimento do projeto estrutural, foi pensado em chapas dobradas soldadas nos tubos e parafusadas umas a outras com função de ligação de topo dos 4 tubos que compõem o pórtico (FIG. 4.70). Porém, por apresentar problemas de interface entre os tubos e a cobertura metálica que será sustentada por eles, esse tipo de ligação foi inviável. Optou-se por uma ligação do tipo “conexão cruzada” (FIG. 4.71), onde os tubos serão encaixados na conexão e não haverá barreiras que atrapalham o contato direto dos tubos com a telha metálica. Esta é a melhor opção para as ligações de encontro dos arcos.

Já na ligação de base, o tubo metálico (pórticos de estabilizações) será soldado na placa de base e esta será parafusada e fixada na fundação tipo *radier* por dois parafusados dando maior estabilidade e rigidez a estrutura, funcionando como vínculo rotulado.

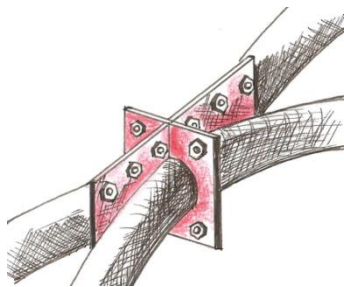


FIGURA 4.70 – Desenho esquemático da chapa dobrada para ligação dos tubos

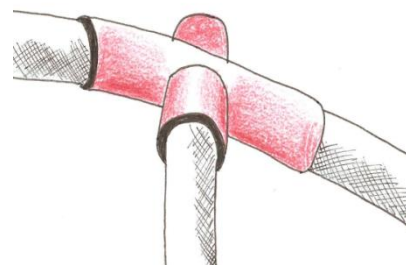


FIGURA 4.71 – Desenho esquemático da ligação de topo tipo “conexão cruzada”

As ligações de base e o esquema de montagem dos tubos metálicos que formam os pórticos de estabilização da construção estão apresentados por desenhos esquemáticos nas FIG. 4.72 e 4.73.

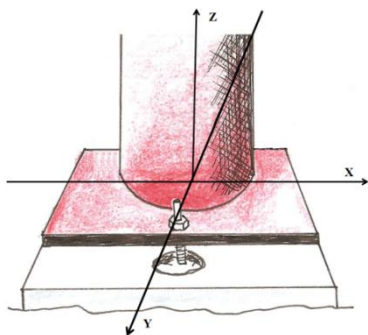


FIGURA 4.72 – Desenho esquemático da ligação de base

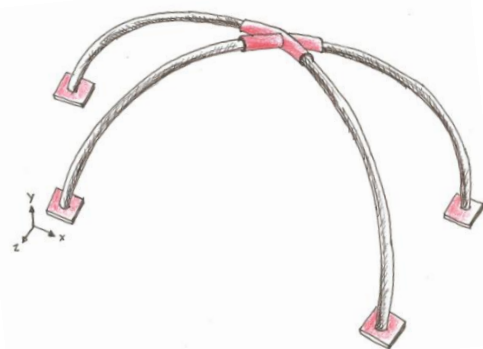


FIGURA 4.73 – Desenho esquemático dos tubos metálicos montados

Para compor o conjunto estrutural do modelo arquitetônico proposto, serão necessários dois módulos de pórticos de estabilização bidirecionais e para a construção de cada módulo (pórticos de estabilização) serão necessários 4 tubos metálicos de 730,35 cm de perímetro (FIG. 4.74). Estes tubos, após a sua produção passarão pelo processo de curvamento, que pode ser feito por meio do processo de conformação a frio, pela calandragem dos perfis ou pelo processo de indução de corrente elétrica. Os perfis com pequenas espessuras como dos pórticos de estabilização bidirecionais, passam pelo processo de curvamento a frio e os perfis com espessuras maiores passam pelo processo de curvamento por indução (PROTUBO, 2009). Na FIG. 4.75 está representado um desenho esquemático do tubo metálico com o seu raio de curvatura de 491,2 cm especificado para o processo de curvamento.

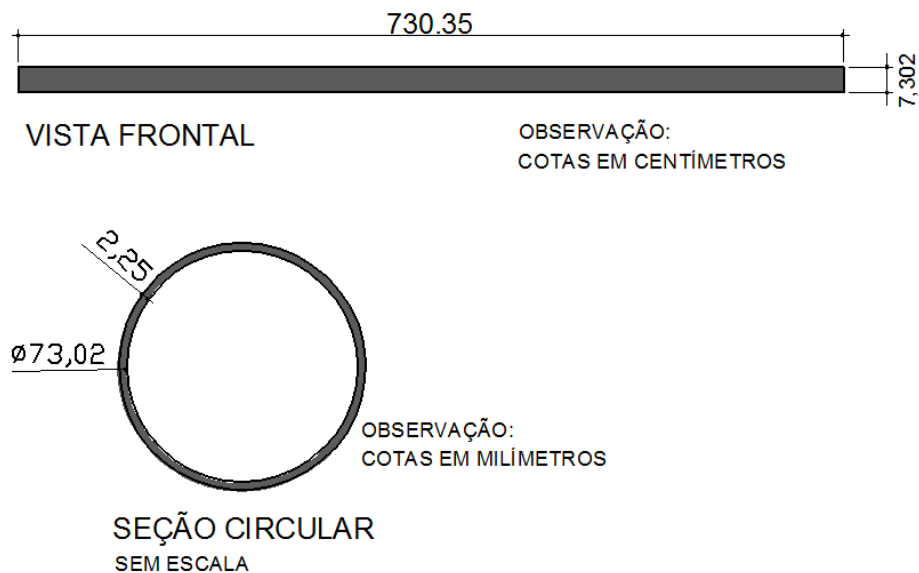


FIGURA 4.74 – Desenho esquemático do tubo metálico com costura

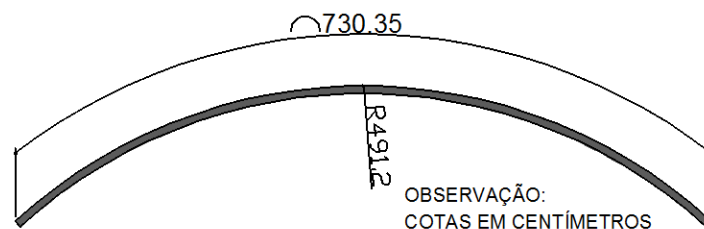


FIGURA 4.75 – Desenho esquemático do tubo metálico com raio de curvatura

Estes módulos de pórticos de estabilização sustentarão uma cobertura metálica do tipo termo-acústica (telha sanduíche), que terá a função de cobertura e fechamento vertical (parede) nas laterais da construção, formando um só elemento, e tendo a opção da área da garagem ser totalmente fechada pela telha ou possuir espaços abertos, não atingindo o piso, garantindo ventilação e iluminação natural. Como fechamento desse ambiente, pode-se usar telhas diferenciadas, alternando a telha termo-acústica com telha translúcida também para se obter o maior aproveitamento da iluminação natural.

4.3.1.2 Cobertura metálica com telhas termo-acústicas

As coberturas metálicas com suas diversas características, dentre elas, a leveza aliviando as cargas sobre a estrutura, a capacidade de vencer grandes vãos e agilidade de execução, contribuíram para que estas se destacassem cada vez mais com uma diversidade disponível no mercado nacional.

Com as novas tecnologias, as coberturas metálicas têm ganhado força e tendo como os sistemas mais usuais o emprego de cobertura contínuos como os zipados, que permitem projetos de grandes extensões de cobertura; as coberturas térmicas por causa da crescente preocupação com o conforto térmico dos ocupantes; e por fim, as coberturas refletivas à radiação solar, que são coberturas com chapas metálicas pintadas com revestimentos de alto índice de refletância à radiação.

As telhas metálicas apresentam maior transmissão de calor em relação aos demais tipos de telhas existentes, devido ao maior coeficiente de condutividade térmica. No entanto, normalmente exigem soluções de isolamento térmico para reduzir a condutividade térmica, o que aumenta sua resistência térmica à condução de calor (CICHINELLI, 2009; DIAS, 2011).

Foram analisadas as seguintes opções de telhas metálicas indicadas para coberturas: telhas trapezoidais ou onduladas, telhas zipadas, chapa metálica não perfilada e telhas termo-acústicas.

A princípio, as telhas trapezoidais ou onduladas e telhas zipadas pareciam uma boa opção por serem indicadas para coberturas arqueadas com maior inclinação. Porém,

essas telhas não apresentam isolamento termo-acústico e foram descartadas por não oferecerem conforto térmico e acústico na edificação, já que a cobertura também tem função de parede.

A cobertura em chapa metálica não perfilada, mais conhecida como sistema de cobertura metálica *Roll-On* (FIG. 4.76), é constituída de treliças paralelamente dispostas de forma modular, onde bobinas contínuas de aço sem emendas são desenroladas e arrematadas uma a outra. As bobinas adquirem uma forma côncava, permitindo o escoamento da água da chuva em grande volume e por grandes extensões de telhado. Esse tipo de telha parecia também ser ideal para o modelo proposto, já que o sistema também permite o uso de isolante termo-acústico na face inferior, mas tornou-se inviável por não haver a possibilidade de uso como coberturas arqueadas, sendo indicadas apenas para coberturas com baixo caimento.



FIGURAS 4.76 – Sistema de cobertura metálica *Roll-on*
Fonte: MARKO, 2010.

Optou-se pela cobertura com telhas termo-acústicas por serem as mais indicadas para o modelo estrutural e arquitetônico proposto, além de oferecerem um bom isolamento térmico e acústico. Estas telhas são indicadas para coberturas arqueadas, porém, para estas somente sob consulta e devem ser evitadas em coberturas com pouca inclinação, pois, assim como as telhas trapezoidais ou onduladas e as telhas zipadas, são indicadas para coberturas com maior inclinação, na qual o volume de água coletado pelo canal da telha não coloque em risco a estanqueidade do sistema.

O sistema de cobertura com telhas termo-acústicas são compostas por duas chapas metálicas que são recheadas com um isolante térmico que pode ser em material rígido ou flexível. As telhas são produzidas em aço galvanizado e podem ter o formato trapezoidal ou ondulado, conforme mostradas nas FIG. 4.77 e 4.78.

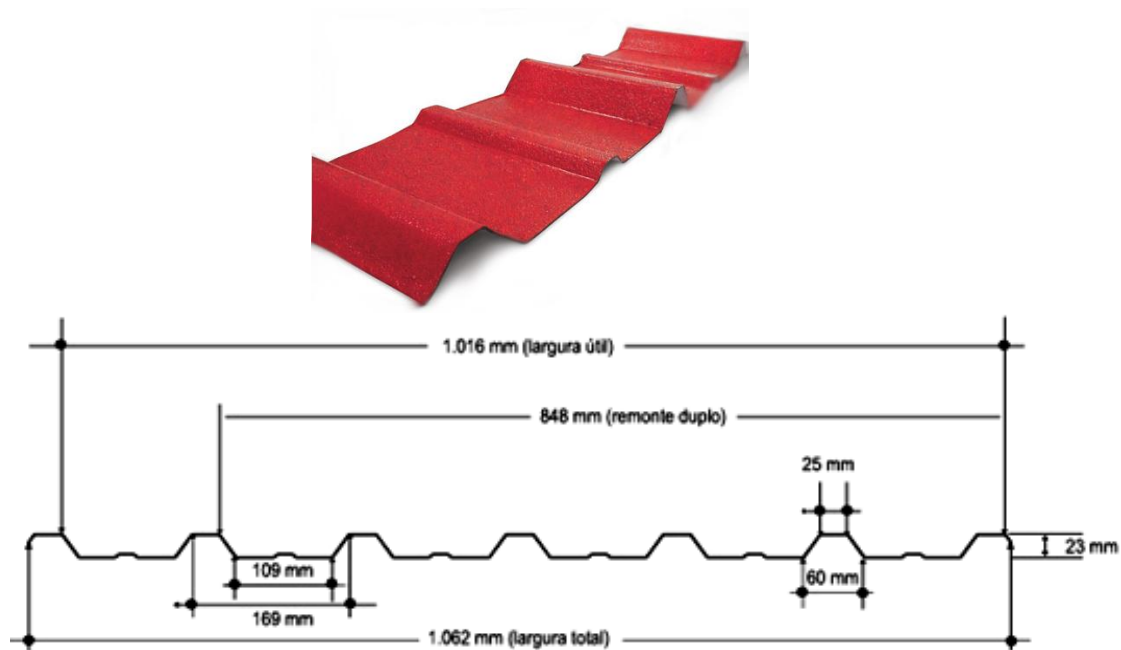


FIGURA 4.77 – Telha em formato trapezoidal
Fonte: ANANDA, 2010.

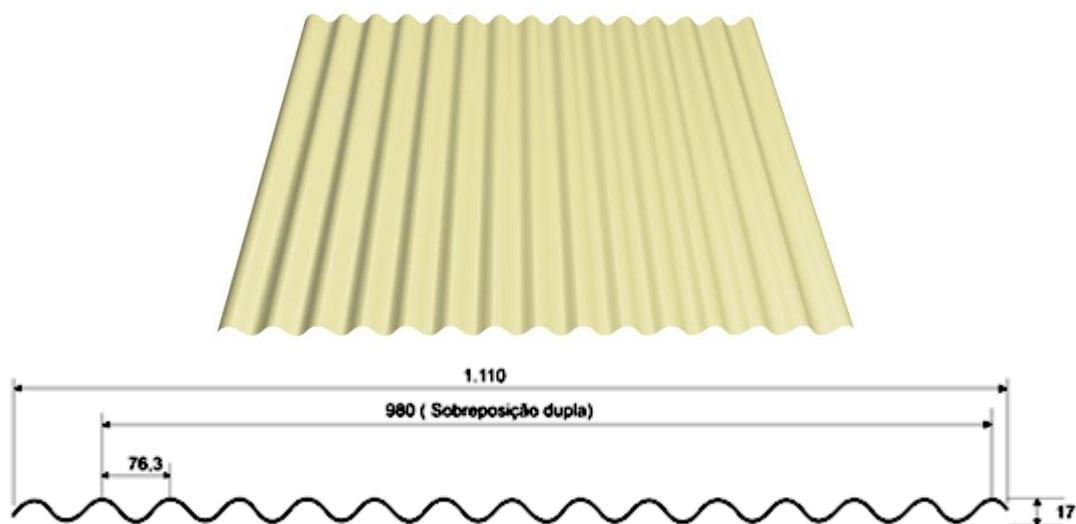


FIGURA 4.78 – Telha em formato ondulado
Fonte: ANANDA, 2010.

As telhas sanduíches além de serem duplas, onde as telhas superiores e inferiores possuem a mesma forma (FIG. 4.79 e 4.81), podem ser também do tipo telha-forro. A telha-forro é composta na parte superior por telha trapezoidal ou ondulada e, na parte inferior, composta por uma chapa de aço trabalhada com detalhes em frisos, proporcionando a aparência de forro. Este tipo de telha representa uma boa opção para o modelo proposto já que a cobertura será aparente em grande parte da construção (FIG. 4.80 e 4.82). Na FIG. 4.83 é apresentada a telha-forro e seu sistema de encaixe.

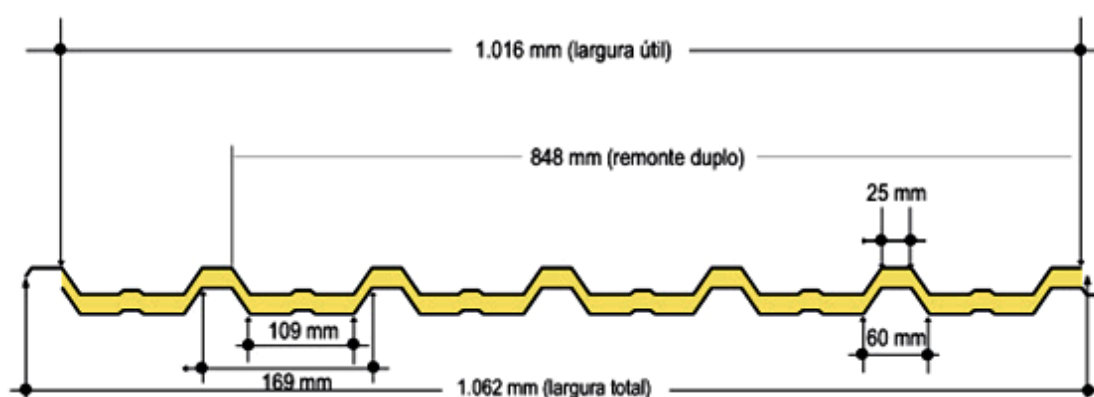


FIGURA 4.79 – Telha dupla trapezoidal
Fonte: ANANDA, 2010.

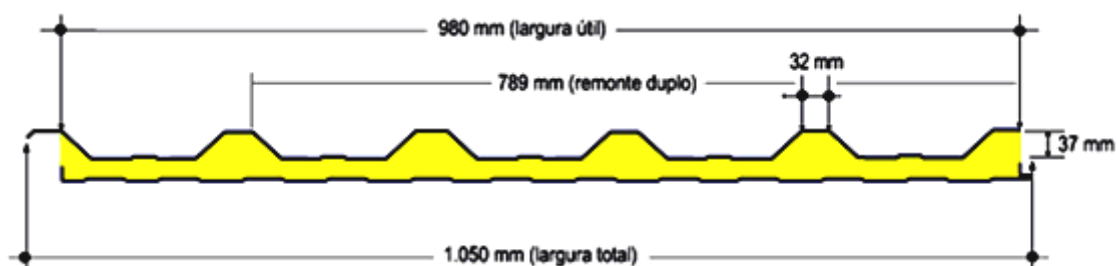


FIGURA 4.80 – Telha-forro trapezoidal
Fonte: ANANDA, 2010.

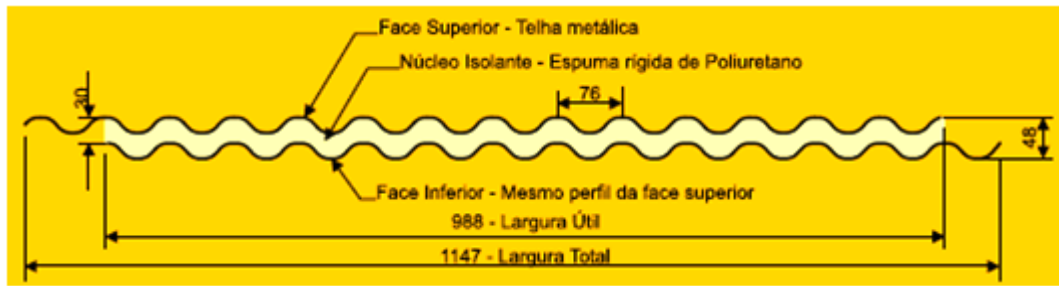


FIGURA 4.81 – Telha dupla ondulada
 Fonte: TOLDOS ALVORADA, 2011.



FIGURA 4.82 – Telha-forro ondulada
 Fonte: TOLDOS ALVORADA, 2011.

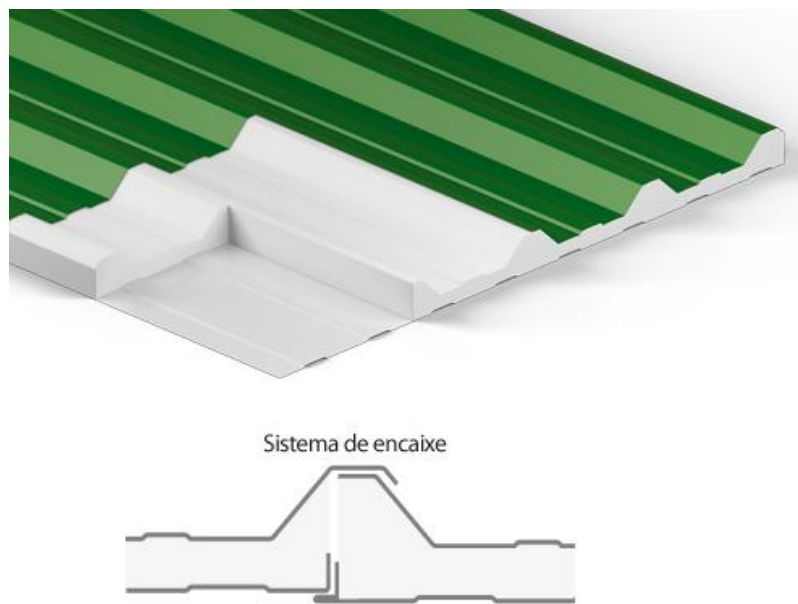


Figura 4.83 – Sistema de encaixe da telha-forro
 Fonte: ANANDA, 2010.

No caso de coberturas arqueadas, as telhas recebem as curvaturas específicas na calandra e depois são fixadas na estrutura do telhado (FIG. 4.84). São resistentes a corrosão, já que essas possuem uma capa protetora que revestem os dois lados garantindo sua maior durabilidade. Quanto ao conforto térmico, a folha de alumínio recebe uma laca protetora que reflete até 75 % dos raios solares.

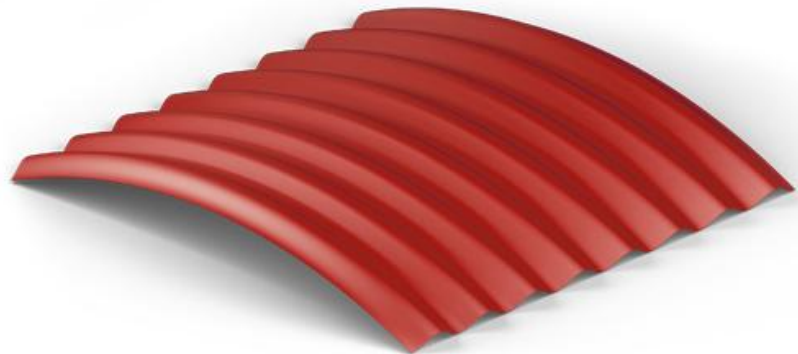


FIGURA 4.84 – Telha Calandrada
Fonte: ANANDA, 2010.

Nas coberturas com telha sanduíche e isolamento flexível, o recheio é feito com isolamento térmico em material flexível, como as lãs de vidro ou de rocha, que proporcionam grande isolamento e absorção. O material de isolamento é colocado na obra sobre uma telha metálica inferior já previamente fixada à estrutura do telhado e depois a telha superior é montada sobre ele (FIG. 4.85 e 4.86).

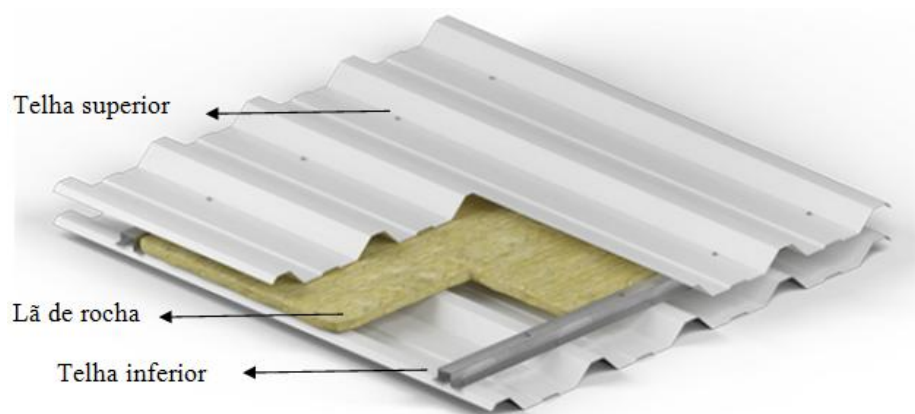


FIGURA 4.85 – Telha com isolamento em lã de rocha
Fonte: ANANDA, 2010.

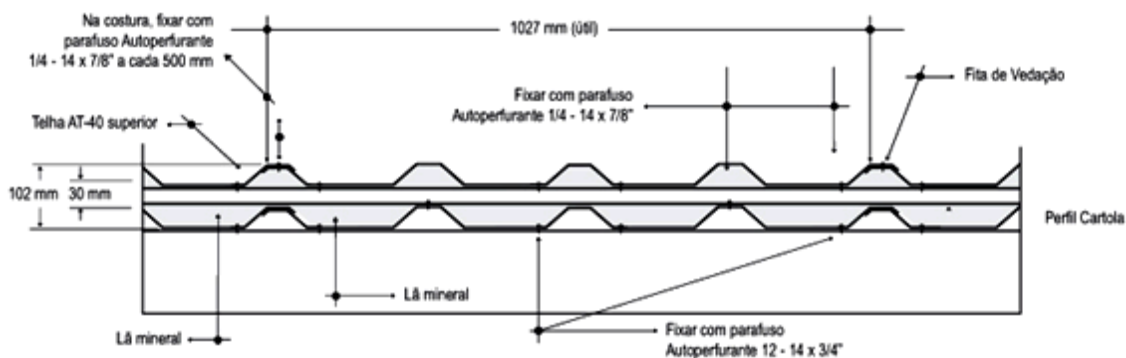


FIGURA 4.86 – Detalhe da telha com isolamento em lâ mineral
 Fonte: ANANDA, 2010.

No caso do modelo proposto, como a telha tem dupla função (cobertura e parede), especifica-se a cobertura com telhas sanduíche e isolamento térmico rígido, onde a resistência da telha metálica, aliada à do poliuretano, aumenta consideravelmente a resistência mecânica da estrutura. As coberturas com telhas sanduíche e isolamento térmico rígido são recheadas com material rígido (como o poliuretano, poli-isocianurato ou poliestireno), que reduz a transmissão de calor no verão e a perda de calor interno no inverno.

O isolamento escolhido para o modelo proposto é o poliuretano, que quando utilizado no preenchimento de duas telhas metálicas, com seu alto poder de aderência na cura, oferece uma ligação estrutural entre as duas telhas metálicas criando um elemento estrutural muito resistente com baixo peso. Além de possuir um excelente desempenho termo-acústico, tem como característica ser retardante na ação de chamas e não absorve água (FIG. 4.87 e 4.88).

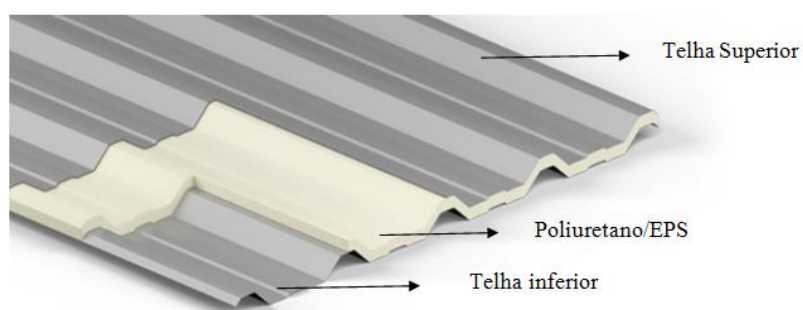


FIGURA 4.87 – Telha com isolamento em poliuretano
 Fonte: ANANDA, 2010.

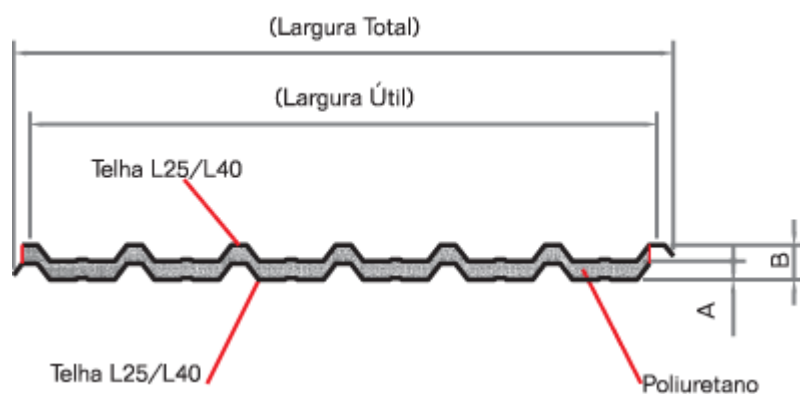


FIGURA 4.88 – Detalhe da telha com isolamento em poliuretano
Fonte: EUCATEX, 2010.

Nas tabelas 4.2 e 4.3 estão alguns exemplos de telhas sanduíches encontradas no mercado, mostrando suas respectivas espessuras de poliuretano, conforme representado na FIG. 4.88.

Tabela 4.2 – Espessura de poliuretano para o tipo de telha L25

L25	A	B
PU 30 mm	30 mm	56 mm
PU 50 mm	50 mm	76 mm

Fonte: EUCATEX, 2010.

Tabela 4.3 – Espessura de poliuretano para tipo o de telha L40

L40	A	B
PU 30 mm	30 mm	67 mm
PU 50 mm	50 mm	87 mm

Fonte: EUCATEX, 2010.

No mercado, as telhas termo-acústicas possuem largura, comprimento e espessura de acordo com sua empresa fabricante, onde largura varia de 800 mm até um pouco mais de 1000 mm e o comprimento de 2 a 12 m. A espessura da chapa estão disponíveis em aço galvanizado de 0,27 a 0,65 mm, podendo ser *in natura*, pré ou pós-pintadas. O peso por metro quadrado varia entre 42 N/m² a 56 N/m², com distância máxima entre apoios variando de 1,60 m a 2,00 m. O preço da cobertura em telha sanduíche pronta levantada no mercado é de R\$ 30,00 m² (BRASILIT, 2010).

4.3.1.3 Fechamentos verticais industrializados

O sistema de fechamento vertical externo (fachadas), será feito com o sistema *Light Steel Frame* (LSF), onde o concreto armado é substituído por perfis de aço galvanizado formados a frio, que forma um esqueleto metálico estrutural (FIG. 4.89), composto por perfis leves de aço com espessura de 0,95 a 1,25 mm. Esse esqueleto estrutural é revestido por placas e materiais isolantes termo-acústico. A responsabilidade estrutural do fechamento em LSF, neste caso, é de apenas resistir às cargas verticais decorrentes de seu peso próprio, materiais de acabamento e esquadrias (SANTIAGO, 2008).



FIGURA 4.89 – Esqueleto metálico estrutural do sistema *Light Steel Framing*
Fonte: FLASAN, 2011.

Nas FIG. 4.90 a 4.92, estão apresentados alguns tipos de perfis utilizados no sistema construtivo LSF.

- Espessura 0,80 e 0,95 mm
- Largura 90 mm
- Comprimento 3.000 mm

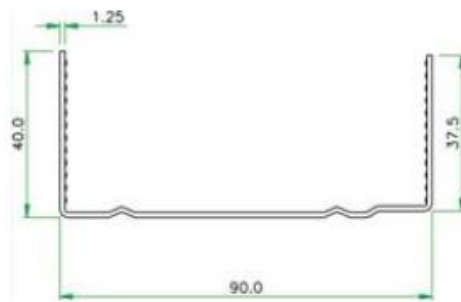


FIGURA 4.90 – Detalhe de perfil guia
Fonte: FLASAN, 2011.

- Espessura 0,80 e 0,90 mm
- Largura 90 mm
- Comprimento 3.000 mm

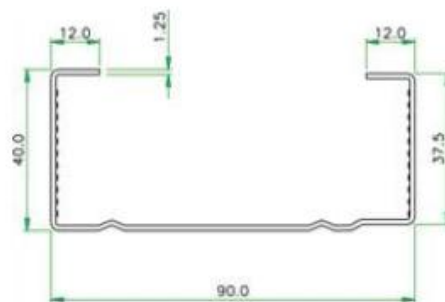


FIGURA 4.91 – Detalhe de perfil montante
Fonte: FLASAN, 2011.

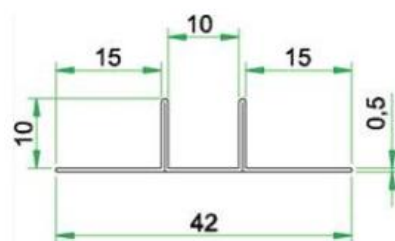


FIGURA 4.92 – Detalhe de perfil junta visível
Fonte: FLASAN, 2011.

O sistema de fechamento vertical externo de fachadas pode ser feito com placas cimentícias ou de *Oriented Strand Board* (OSB), que são parafusadas diretamente nos perfis da estrutura, podendo receber pintura ou revestimento, já que seu acabamento final resulta numa superfície lisa, semelhante ao da construção convencional.

O fechamento vertical interno, dividindo ambientes, será feito em *drywall* (placas de gesso acartonado), também parafusadas sobre uma estrutura composta de perfis metálicos. Para melhorar o conforto térmico e acústico das paredes da edificação, o espaço entre as placas externas e internas são preenchidos por miolo de lã de vidro ou rocha (FIG. 4.93).



FIGURA 4.93 – Assentamento de lã de vidro entre as placas
Fonte: FLASAN, 2011.

No Brasil, a utilização desse tipo de sistema construtivo ainda é pouco usual, tendo como principal utilização em edificações unifamiliares de pequeno porte. O sistema de fechamento vertical industrializado apresenta vantagens como:

- rapidez e facilidade de execução, resultando em maior organização e limpeza do canteiro de obras, com menos desperdício dos materiais;
- apresenta o peso próprio baixo das paredes leves, aliviando o peso nas fundações;
- pode ser utilizado e adaptado sem restrições em qualquer projeto, independente do partido arquitetônico;
- as instalações hidráulicas, elétricas, ar condicionado, gás, entre outras, são assentadas internamente às paredes, tendo fácil acesso em caso de manutenção;
- apresenta maior desenvolvimento termo-acústico comparado ao sistema convencional, devido ao uso de materiais isolantes como lã de vidro e elementos impermeabilizantes que permitem a troca de ar constante, mantendo adequados índices de temperatura e umidade (FLASAN, 2011).

Em caso de incêndio, a propagação das chamas nos revestimentos é baixa, uma vez que os materiais são incombustíveis. Dependendo do número de chapas de gesso empregadas em cada face da parede, o período de proteção contra fogo pode durar de 30 a 60 min. O sistema LSF é um sistema que trabalha em conjunto com subsistemas leves e é capaz de suportar ventos superiores à 250 km/h (SANTIAGO, 2008).

Na FIG. 4.94, estão destacadas as paredes do projeto proposto que serão construídas no sistema LSF, conforme a legenda apresentada.

Tabela 4.4 – Levantamento do custo do sistema LSF no modelo proposto

Especificação	Preço
Parede externa LSF (estrutura + cimentício + gesso + lã de vidro / material e mão de obra)	R\$ 250,00/m ²
Parede interna <i>Drywall</i> (estrutura + gesso nas duas faces + lã de vidro / material e mão de obra)	R\$ 100,00/m ²

Fonte: FLASAN, 2011.

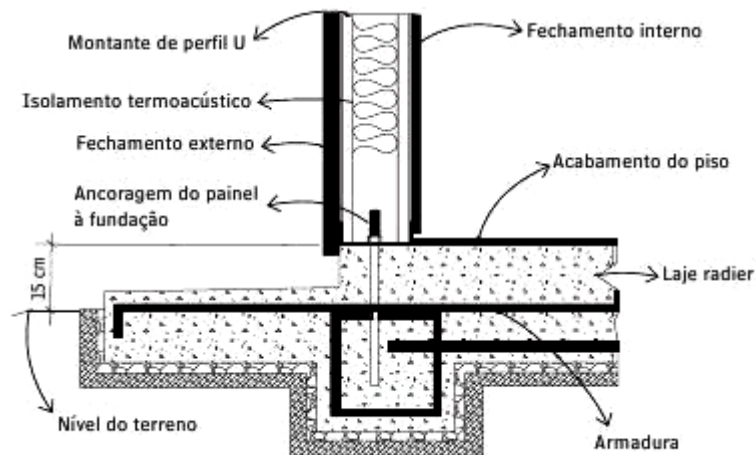


FIG. 4.95 – Detalhe do sistema *Light Steel Framing*
Fonte: FLASAN, 2011.

O consumo de aço em LSF de uma construção fica em torno de 25 kg/m² (250 N/m²), incluindo paredes, cobertura e lajes. No caso do modelo residencial proposto, onde o sistema é usado apenas em área de paredes, o consumo é de aproximadamente 5,0 kg/m² (50 N/m²) a 6,5 kg/m² (65 N/m²) de parede de *steel framing* e de aproximadamente 2,0 kg/m² (20 N/m²) para *drywall*.

4.3.1.4 Forro de painéis de OSB

Como forro dos ambientes serão usados painéis de *Oriented Strand Board* (OSB), que são painéis estruturais feito com sobras de madeira, com propriedades mecânicas resistentes à flexão, tração, compressão e cisalhamento, não tendo sua resistência afetada pela umidade em função de sua exposição ao ambiente. Os painéis de OSB são utilizados em várias aplicações estruturais, como: paredes, forros, telhados, pisos, componentes de vigas estruturais, mobiliário, tapumes e divisórias, fôrmas descartáveis para concreto, *decks* e plataformas, etc. Nas FIG. 4.96 e 4.97 observa-se alguns exemplos da aplicação de OSB na construção civil.



FIGURA 4.96 – Forro e piso em OSB
Fonte: BANEMA, 2011.



FIGURA 4.97 – Parede em OSB
Fonte: BANEMA, 2011.

O painel de OSB é produzido a partir de madeira colada com resina a prova d'água e de fervura contendo uma pequena quantidade de parafina, onde a camada interna pode estar disposta aleatoriamente ou perpendicular as camadas externas. A formação dos painéis a partir de camadas cruzadas proporcionam boas propriedades de resistência ao arrancamento de pregos e parafusos.

Os painéis de OSB além de serem extremamente econômicos, possuem um baixo custo devido a sua produção feita a partir de toras de espécies de rápido crescimento e baixo valor comercial, podendo substituir os compensados estruturais em virtude de fatores, como: redução da disponibilidade de toras de boa qualidade para laminação; pode ser produzido a partir de toras de qualidade inferior e de espécies de baixo valor comercial; e a largura dos painéis é determinada pela tecnologia de produção e não em função do comprimento das toras, como no caso de compensados.

São produzidos a partir das matérias-primas: madeira de Pinus ou Eucalipto, provenientes de florestas plantadas e de manejo sustentável; de resina MDI (difênil metano di-isocianato); e resina fenólica (liga de resina sintética- melamina fenol uréia formol). Nas camadas externas apresentam resinas fenólicas e nas internas, resina MDI, que garantem alta adesão interna das tiras e uma resistência adequada para aplicações em ambientes externos como construções. As resinas fenólicas são produtos da policondensação de fenóis e aldeídos (principalmente o formaldeído). Essas resinas em si não apresentam risco à saúde ou ao meio ambiente (MACHADO, 2010).

São compatíveis com qualquer tipo de estrutura e quando utilizados para fechamentos externos, devem estar protegidos das intempéries, necessitando de um acabamento impermeável na face externa. Podem receber acabamento em pintura com a utilização de qualquer tipo de tinta de boa qualidade recomendado para madeira maciça em geral e de acordo com o uso (interior ou exterior). Porém, para melhores resultados, a superfície deve ser, antecipadamente, lixada ou aplainada e receber uma tinta de base ou seladora. Os painéis, quando são lixados ou aplainados, possuem uma aparência marmorizada e menos texturizada, dispensando acabamentos e sendo uma boa opção para diversas aplicações em projetos de arquitetura, *design* e decoração.

Quanto às exigências de resistência ao fogo, testes demonstraram que os painéis de OSB podem ser utilizados como paredes externas, no entanto, algumas normas de segurança podem exigir o uso de materiais isolantes não combustíveis no espaço interno das paredes. Para proporcionar um melhor conforto termo-acústico nos ambientes também é recomendado o uso de materiais isolantes entre as paredes de OSB, formando um sistema de multicamada (tipo sanduíche).

Normalmente os painéis de OSB são produzidos em chapas de 1,22 x 2,44 m para usos estruturais, mas também podem ser produzidos em grandes dimensões de até 3,60 x 7,20 m. Sua espessura varia de 6 a 19 mm, podendo também ser produzido com a espessura de até 38 mm. Seu peso é baseado na densidade de 0,65 g/cm³, contudo esta pode variar de acordo com o fabricante e as condições climáticas da região onde serão utilizados.

No modelo proposto, a cobertura metálica em telha sanduíche será aparente na maioria dos ambientes da construção, pois essa será do tipo telha-forro. Haverá forro de OSB apenas na área de serviço, circulação e banho, devido ao posicionamento da caixa d'água, representada na FIG. 4.98. Os painéis terão função de forro e piso de acesso à área da caixa d'água, sendo produzidos em perfis macho e fêmea, que serão encaixados uns aos outros e parafusados nos pórticos de tubos metálicos que os sustentarão. A estrutura dos pórticos também será construída com tubos metálicos com costura, conforme mostrado na FIG. 4.99.

Atualmente, o preço de mercado dos painéis em OSB para forro é em média de R\$ 36,50 a peça de 2,44 x 1,22 m com espessura de 15 mm e a placa com espessura de 18 mm custa R\$ 43 a peça de 2,44 x 1,22 m. Os painéis de OSB quando utilizados no sistema construtivo, possuem 10 anos de garantia anti-cupim e 20 anos de garantia estrutural (LP BRASIL, 2011).

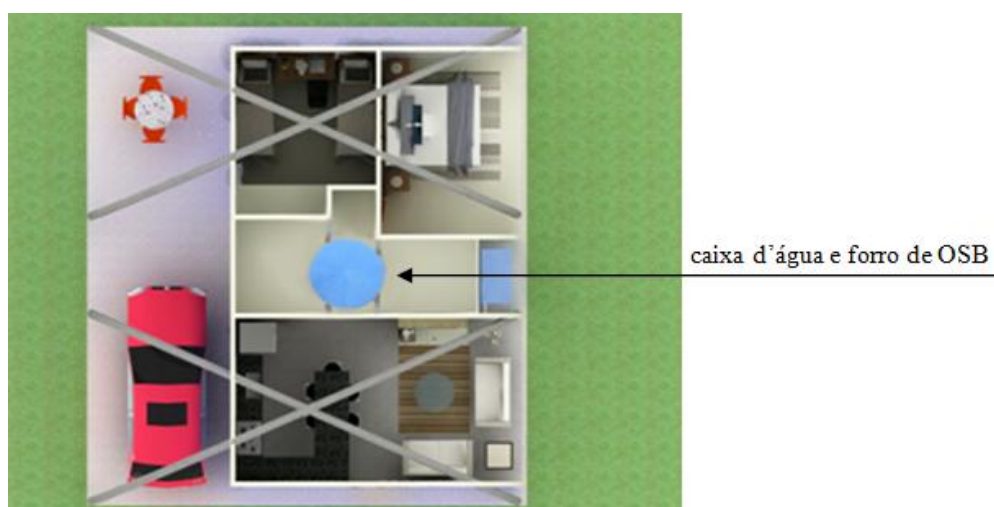


FIGURA 4.98 – Estrutura da caixa d'água e forro de OSB

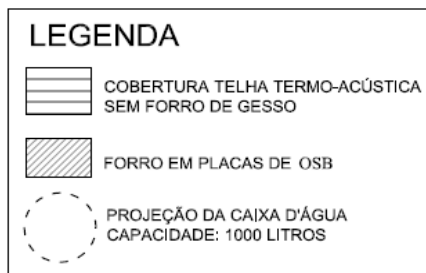
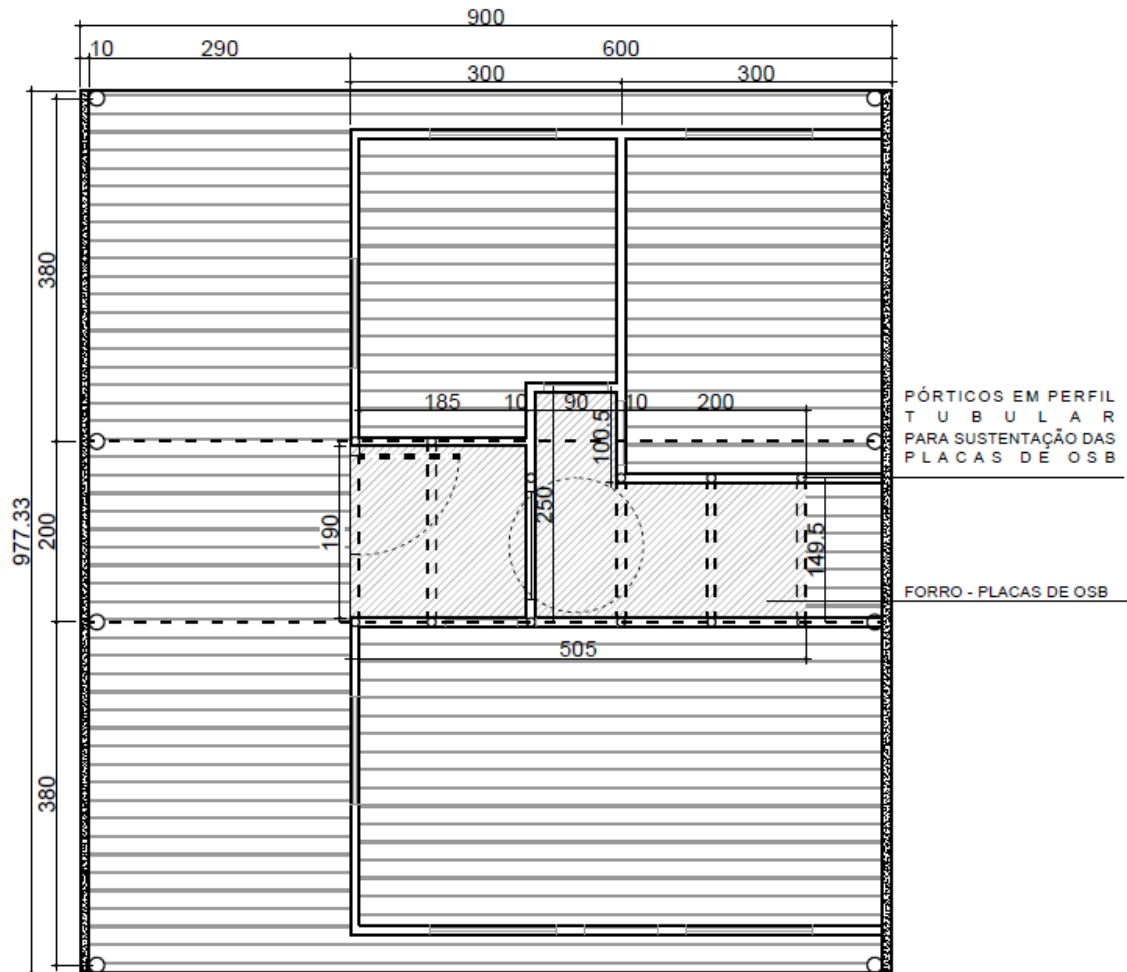


FIGURA 4.99 – Planta de forro

CAPÍTULO V

5. ANÁLISE DO SISTEMA ESTRUTURAL

A análise do sistema estrutural foi realizada por meio de estudo numérico pelo *software* ANSYS, onde foi possível verificar o comportamento da estrutura de acordo com os carregamentos aplicados e a sua viabilidade de utilização, obtendo-se assim uma análise mais próxima da realidade.

5.1 Análise numérica do sistema estrutural

A análise dos pórticos de estabilização bidirecionais foi realizada por meio de uma análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Utilizou-se o *software* na versão 12.0 (ANSYS, 2009), que permitiu a visualização do esquema de carregamentos aplicados na estrutura, sua forma em 3D original, deformada e os diagramas para análise estrutural. Realizou-se uma análise linear da estrutura e o elemento utilizado foi o elemento BEAM 188. Este elemento basea-se na teoria de Timoshenko, que é uma teoria de primeira ordem de deformação de corte: a tensão de cisalhamento transversal é constante ao longo da seção transversal, ou seja, seções transversais permanecem planas e sem distorções após a deformação. Esse elemento de viga de dois nós em 3-D possui seis ou sete graus de liberdade em cada nó (três translações e três rotações sobre os eixos X, Y e Z. O sétimo grau de liberdade (magnitude deformação) é opcional.

A estrutura foi modelada em 3D diretamente no *software* pelo sistema de coordenadas formando os 4 arcos que se encontram no topo da estrutura. Após a definição de todas as propriedades geométricas da seção transversal e do material foi criada a malha de Elementos Finitos, dividindo os arcos que compõem a estrutura, em pequenas partes de 10 cm obtendo o total de 297 elementos e 298 nós em toda a estrutura. Em seguida, foram aplicados as vinculações e os carregamentos CP (carga permanente), SC (sobrecarga) e CV (Carga de vento), adotando a unidade N/m^2 . O sistema estrutural da construção residencial é composta por dois módulos de pórtico bidirecional. Como essas estruturas possuem a mesma geometria, dimensionamento e curvatura e existe uma modulação arquitetônica no projeto de estrutura metálica, foi analisado apenas um

módulo, ou seja, um pórtico bidirecional. As dimensões do pórtico analisado estão representadas nas FIG. 5.1 e 5.2, cujas cotas se encontram em centímetro.

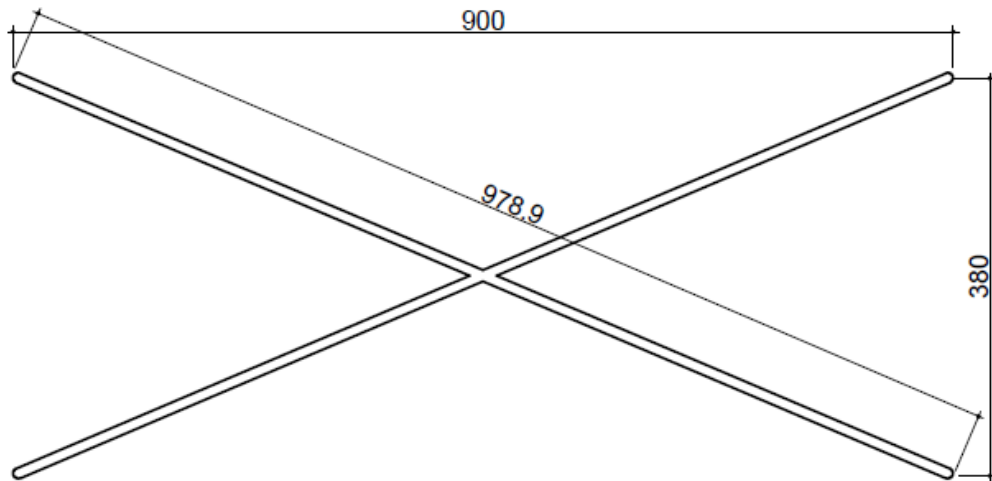


FIGURA 5.1 – Planta de um módulo de pórtico bidirecional

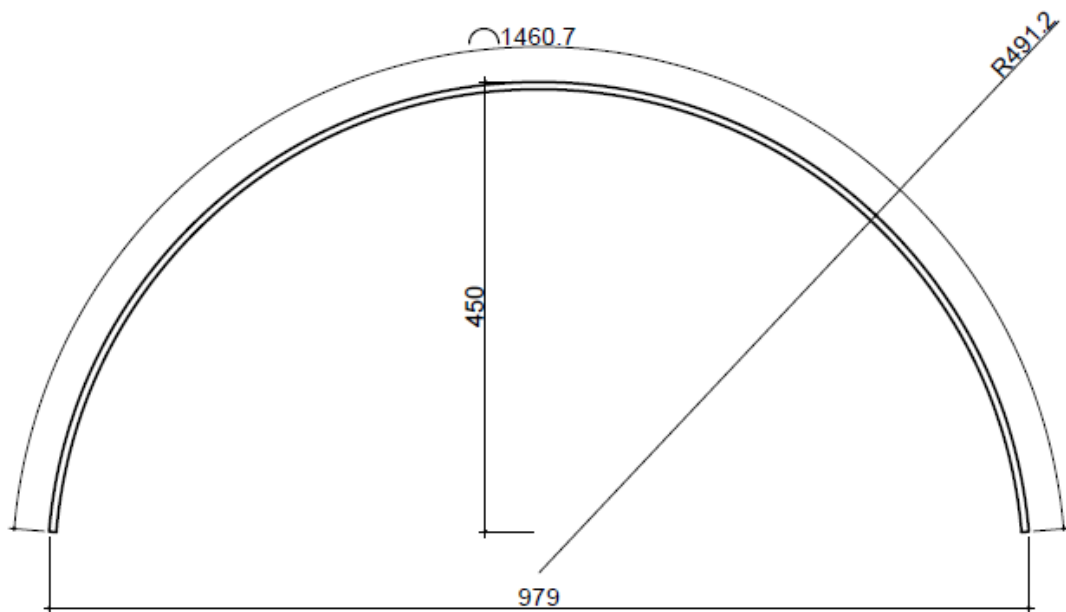


FIGURA 5.2 – Elevação do pórtico bidirecional

5.1.1 Propriedades geométricas do perfil tubular de seção circular

As dimensões da seção transversal do perfil tubular usada, como informações das propriedades geométricas do pórtico de estabilização, foram obtidas por meio de uma tabela de tubos estruturais de uma empresa fabricante de tubos de aço, tendo as características mostradas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Propriedades geométricas do perfil tubular

Ø Externo	Ø Interno	Espessura	Peso linear médio
113,80 mm (0,11380 m)	110,80 mm (0,11080 m)	3,00 mm (0,003 m)	8,38 kg/m (83,8 N/m)

Fonte: TUBONAL, 2009.

5.1.2 Carregamentos e vinculações

No objeto de análise modelado no *software ANSYS*, podem ser introduzidas cargas que podem ser pontuais, uniformes, trapezoidais, de temperatura e qualquer tipo de vinculação (flexível, rígida ou semi-rígida) pode ser considerada.

No pórtico de estabilização proposto foram aplicadas cargas uniformemente distribuídas, a ligação de topo dos 4 arcos que formam o pórtico foi considerada rígida e as ligações de base rotulada.

5.1.2.1 Carregamentos verticais

Como carregamentos verticais de gravidade foram considerados apenas os carregamentos CP (carga permanente) e SC (sobrecarga), obtidos respectivamente por meio de catálogo de empresas e conforme a norma NBR 6120 (ABNT, 1980). Estão descritos na tabela 5.2 os carregamentos utilizados para a análise estrutural do pórtico de estabilização.

Tabela 5.2 – Dados para cálculo estrutural

Carregamento	Tipo de carga	Dados de cálculo	Origem
1	CP (peso próprio da telha termo-acústica)	4,5 kg/m ² (45 N/m ²)	Catálogo de empresa fabricante
2	SC (sobrecarga)	0,5 kN/m ² (500 N/m ²)	NBR 6120 (ABNT, 1980)
Total carga uniformemente distribuída = 545 N/m²			
Módulo de Elasticidade (E) = 200.000 N/m ² NBR 8800 (ABNT, 2008)		Coeficiente de Poisson (ν) = 0,3	

Os dois tipos de carregamentos atuantes foram combinados, resultando uma carga total de 545 N/m², que foi aplicada uniformemente na estrutura. No Anexo A, encontram-se as características do perfil e seu peso próprio fornecidos pelo fabricante.

Não foram considerados as combinações de ações em fase de análise estrutural, pois conforme mostrado no Anexo D, estas considerações foram feitas durante as etapas de dimensionamento para otimização das seções.

5.1.2.2 Carregamento horizontal devido ao efeito do vento

Os dados de cálculo da CV (Carga de vento) foram obtidos por meio da norma NBR 6123 (ABNT, 1988), utilizando os seguintes fatores e expressões:

$$V_k = V_o \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (5.1)$$

Onde S_1 é o fator topográfico (1,0 → (a) terreno plano), S_2 é o fator de rugosidade do (terreno = 0,88 → categoria III, classe A, tabela 2) e S_3 é o fator estatístico (1,0 → grupo 2).

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (5.2)$$

Sendo q a pressão dinâmica do vento (N/m^2) e V_k a velocidade característica do vento (m/s).

$$F = (C_{pe} - C_{pi}) \cdot q \cdot A \quad (5.3)$$

Onde F é a força do vento (N); A é área (m^2); C_{pi} é o Coeficiente de pressão interna (adimensional) e C_{pe} é o Coeficiente de pressão externa NBR 6123:1988 (adimensional).

A velocidade básica do vento adotada foi baseada em pesquisas que registraram a maior velocidade do vento já registrada no Brasil, sendo na cidade Urubici, no estado de Santa Catarina, onde o vento atingiu a velocidade de 178,9 km/h (49,7 m/s), e atingindo o patamar de um furacão categoria 2, na escala Saffir-Simpson (METSUL, 2008). Adotou-se a velocidade básica do vento de 50,0 m/s aplicado perpendicularmente a fachada lateral direita da edificação, gerando uma CV com o valor de 1.151,16 N/m^2 .

CAPÍTULO VI

6. RESULTADOS E ANÁLISES

Por meio de estudo numérico foi possível verificar o comportamento da estrutura de acordo com o carregamento aplicado e a sua viabilidade de utilização, obtendo-se assim uma análise mais próxima da realidade. Os resultados da análise numérica feita no *software ANSYS*, estão representadas em diagramas com linhas lançadas na estrutura, onde cada cor (gradação na escala de cores) corresponde a um valor com variações entre o valor mínimo e máximo. Nos valores máximos e mínimos foram indicados os elementos (obtidos pelo Método dos Elementos Finitos) onde se obtém esses respectivos valores.

6.1 Resultados e análises do sistema estrutural

Na FIG. 6.1 estão apresentados os diagramas com seus valores obtidos de acordo com os carregamentos e vinculações aplicados na estrutura.

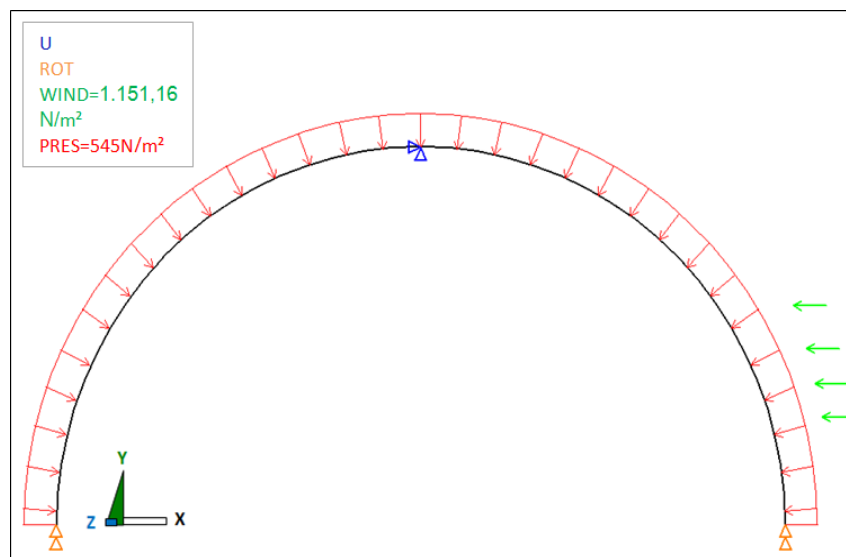


FIGURA 6.1 – Estrutura com carregamentos e vinculações aplicados, plano Y

6.1.1 Deslocamentos

Por meio do *software ANSYS* foi possível a visualização da estrutura em 3D original e deformada, onde as linhas tracejadas representam a curvatura na sua forma original, a linha contínua e cheia representa a forma deformada do pórtico com seus deslocamentos, como mostrado nas FIG. 6.2 e 6.3. O deslocamento horizontal obtido na direção X foi de 0,328007 cm, valor que está dentro do limite definido pela norma NBR 8800 (ABNT, 2008).

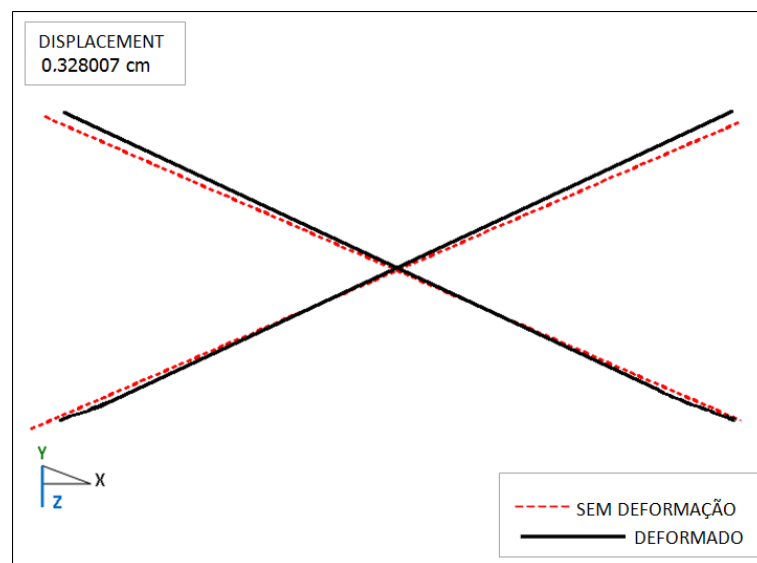


FIGURA 6.2 – Estrutura deformada devido aos carregamentos aplicados, plano X

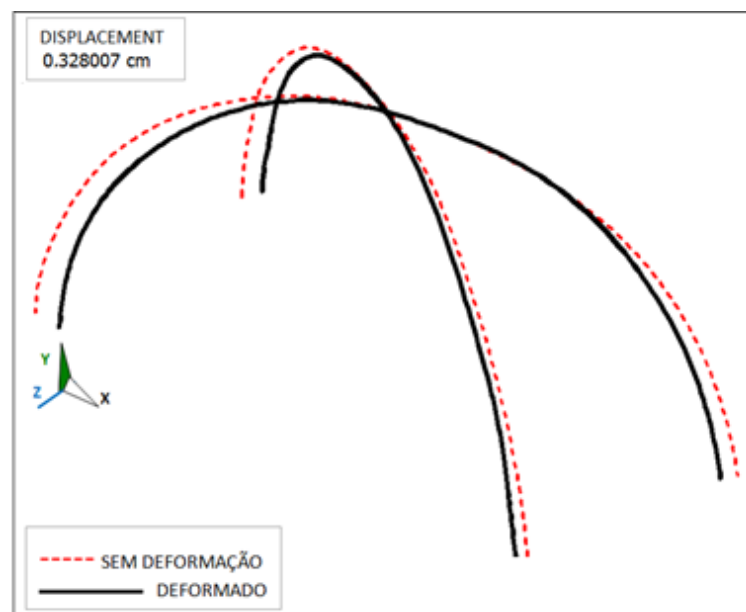


FIGURA 6.3 – Estrutura deformada devido aos carregamentos aplicados, plano Z

6.1.2 Força Axial

A força axial consiste no esforço atuante em determinada estrutura podendo ser uma força de tração ou compressão. Estão apresentados nas FIG. 6.4 e 6.5 os diagramas para força axial com variações ao longo da estrutura, mostrando as forças que a estrutura sofre em determinados pontos. Os esforços máximos normais de compressão e tração encontrados foram de -2392 kN no elemento 222, elemento localizado próximo a vinculação rígida (ligação de topo do pórtico de estabilização) e $0,154 \times 10^{-6}$ kN no elemento 149, elemento localizado próximo ao apoio rotulado (ligação de base do pórtico de estabilização). Ambos valores estão representados na escala policromática.

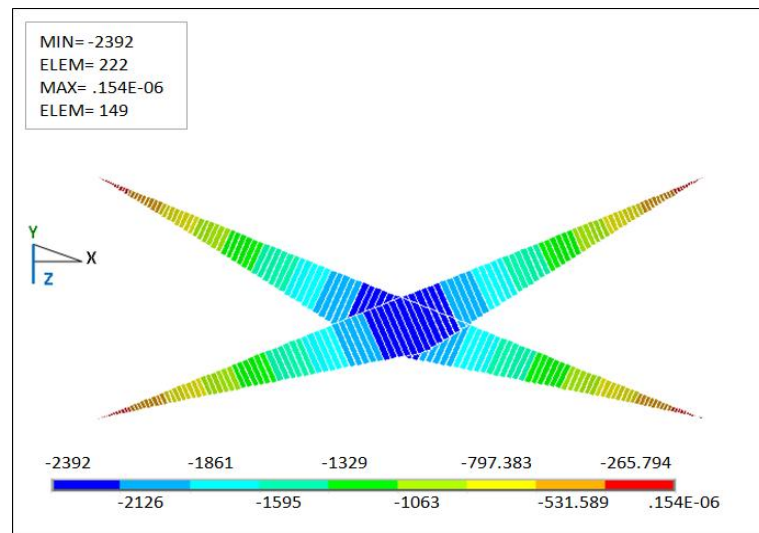


FIGURA 6.4 – Diagrama de Força Axial obtida ao longo da estrutura, plano X

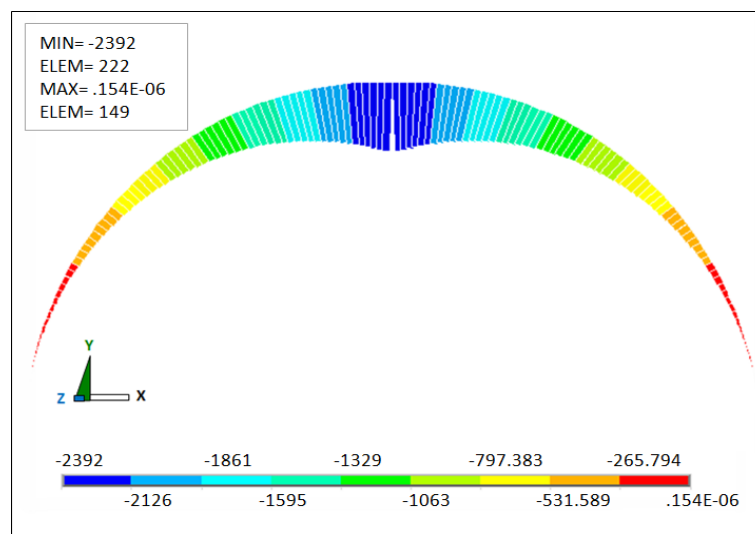


FIGURA 6.5 – Diagrama de Força Axial obtida ao longo da estrutura, plano Y

6.1.3 Momento Fletor y

O momento fletor consiste no esforço que tende a deformar uma estrutura por flexão, girando-a em torno de um eixo normal ao eixo da seção transversal. Estão apresentadas nas FIG. 6.6 e 6.7 os diagramas de momento fletor com plano de atuação na direção de Y. Os valores em módulos máximos resultarem em -2667 N.m no elemento 222 e o 2667 N.m no elemento 74. Ambos valores e elementos estão localizados próximos a vinculação rígida (ligação de topo do pórtico bidirecional) e estão representados na escala policromática.

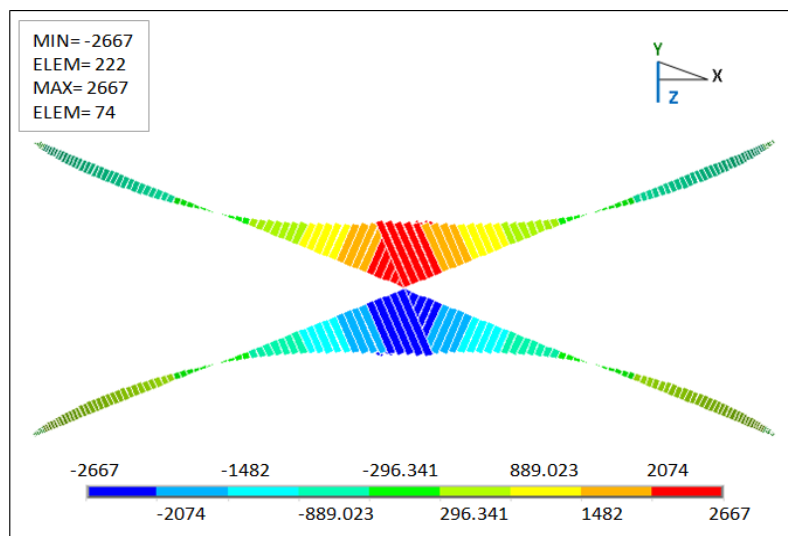


FIGURA 6.6 – Diagrama de Momento Fletor Y obtido ao longo da estrutura, plano X

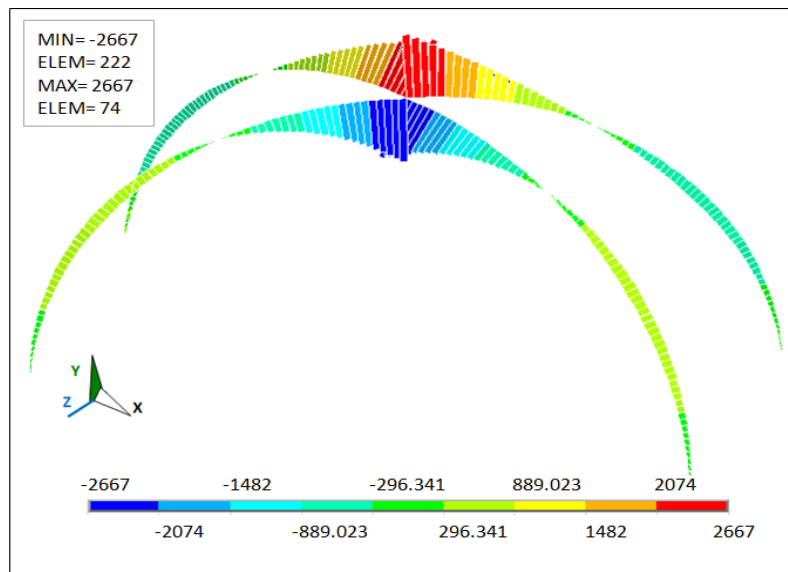


FIGURA 6.7 – Diagrama de Momento Fletor Y obtido ao longo da estrutura, plano Z

6.1.4 Momento Fletor z

Nas FIG. 6.8 e 6.9 estão apresentados os diagramas de momento fletor com plano de atuação na direção de Z. Os valores em módulos obtidos foram de -7361 N.m no elemento 222 representado na escala policromática, cujo elemento se localiza nas proximidades da vinculação rígida (ligação de topo do pórtico de estabilização) e 4240 N.m, no elemento 150 também representado na escala policromática e encontra-se nas proximidades do apoio rotulado do pórtico de estabilização.

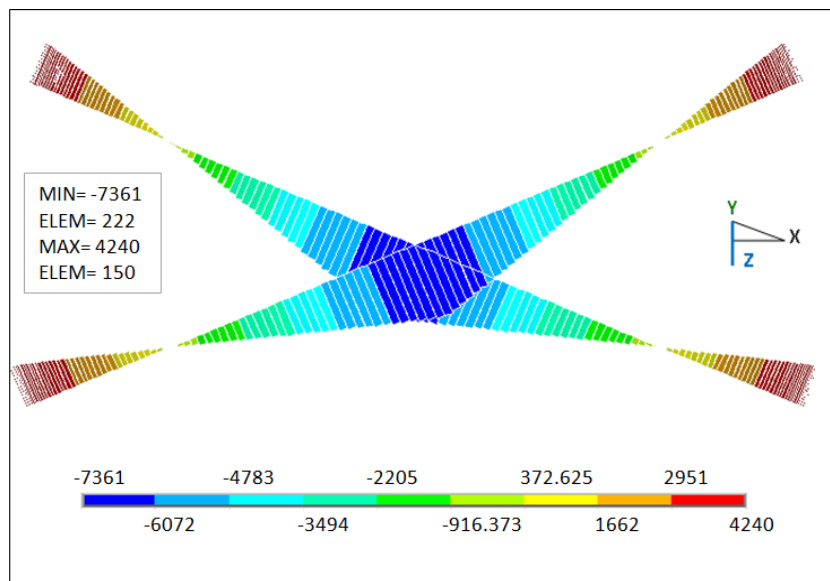


FIGURA 6.8 – Diagrama de Momento Fletor Z obtido ao longo da estrutura, plano X

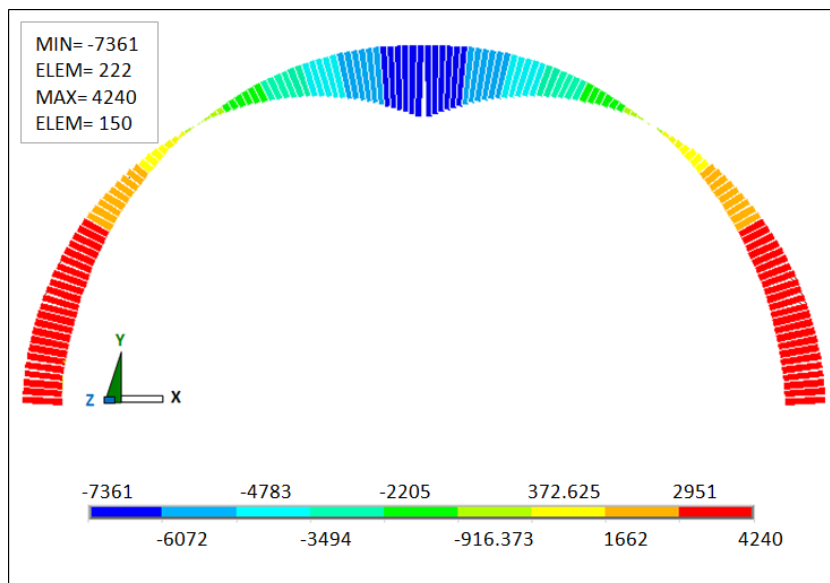


FIGURA 6.9 – Diagrama de Momento Fletor Z obtido ao longo da estrutura, plano Y

6.1.5 Momento de Torção

O momento de torção é o momento que tende a torcer uma estrutura em torno do seu eixo longitudinal perpendicular à seção transversal. Nas FIG. 6.10 e 6.11 estão apresentados os diagramas de momento torçor, cujo os maiores valores encontrados foram de -987.518 N.m no elemento 1 e 987.518 N.m, no elemento 149. Ambos elementos estão localizados próximo aos apoios rotulados do pórtico de estabilização e seus respectivos valores se encontram na escala policromática.

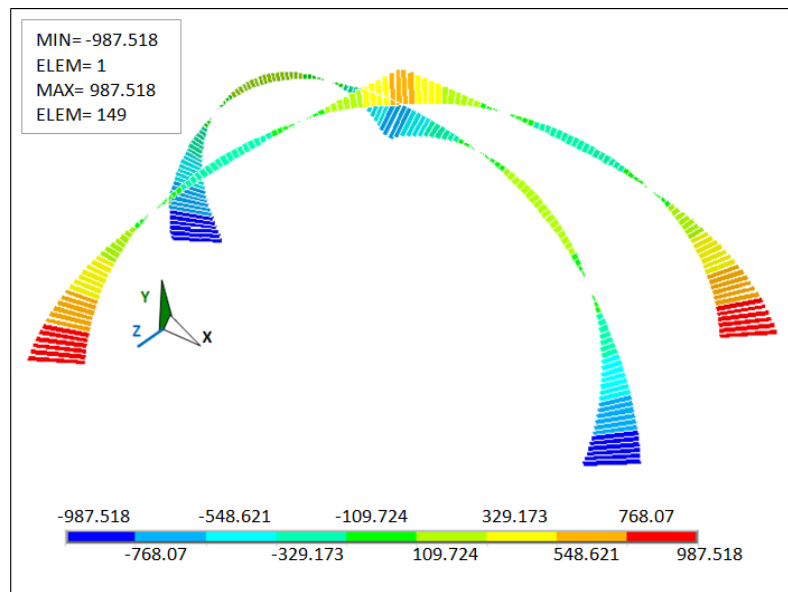


FIGURA 6.10 – Diagrama de Momento de Torção obtido ao longo da estrutura, plano Z

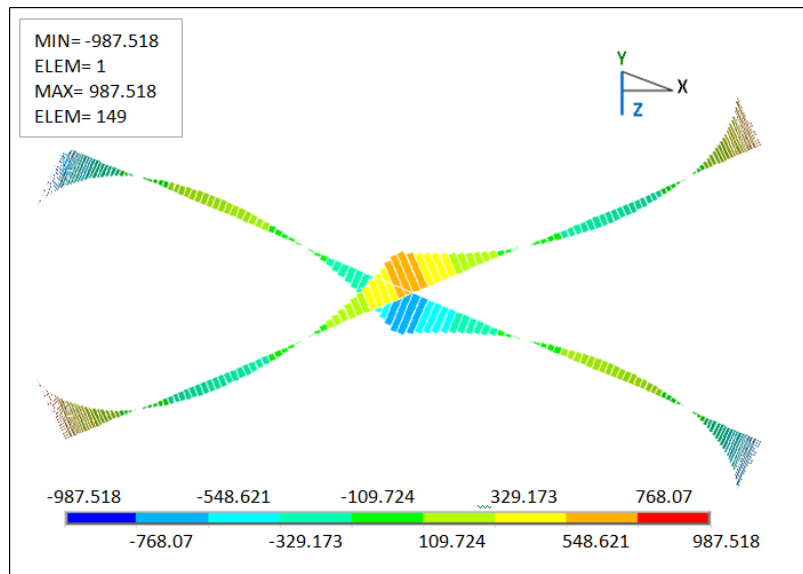


FIGURA 6.11 – Diagrama de Momento de Torção obtido ao longo da estrutura, plano X

6.1.6 Tensão de Torção

A tensão de torção é a tensão desenvolvida na estrutura quando submetida a um torque ou momento de torção. Estão apresentados nas FIG. 6.12 e 6.13 os diagramas de Tensão de Torção, onde valores máximos obtidos foram de -7521 N.m no elemento 1 e 7521 N.m, no elemento 149. Ambos elementos estão localizados próximo aos apoios rotulados do pórtico de estabilização e seus respectivos valores se encontram na escala policromática.

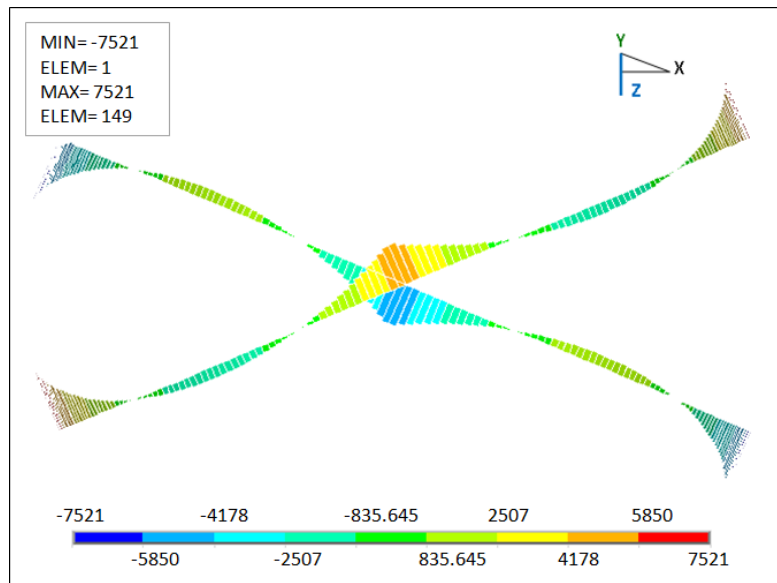


FIGURA 6.12 – Diagrama de Tensão de Torção ao longo da estrutura, plano X

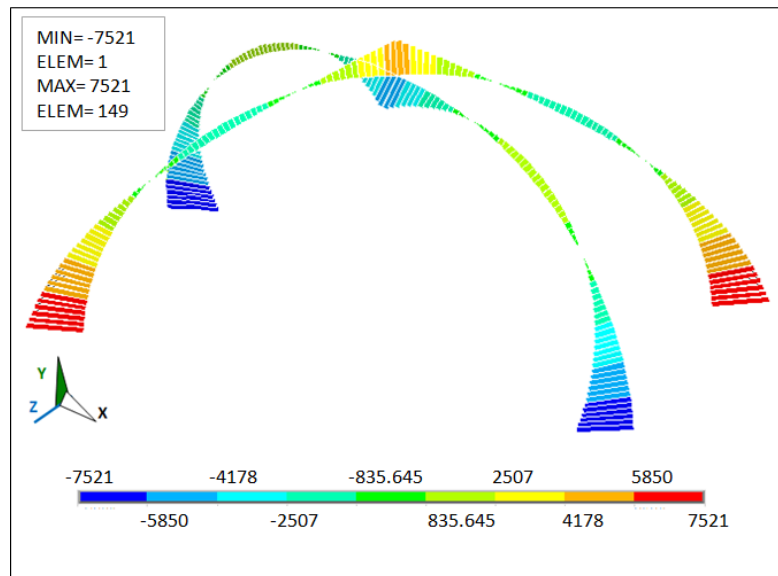


FIGURA 6.13 – Diagrama de Tensão de Torção ao longo da estrutura, plano Z

6.1.7 Força de Cisalhamento z

Uma estrutura quando submetida a um carregamento, além de causar um momento fletor e deformação, causa também uma força cisalhante interna que é uma força cortante que tende a romper a estrutura separando-a em duas ou mais partes. Nas FIG. 6.14 e 6.15 estão apresentados os diagramas força de cisalhamento com plano de atuação na direção de Z. Os valores máximos obtidos foram de -1007 N no elemento 222 e 1007 N no elemento 74. Ambos elementos estão localizados próximo a vinculação rígida (ligação de topo do pórtico de estabilização) e seus respectivos valores se encontram na escala policromática.

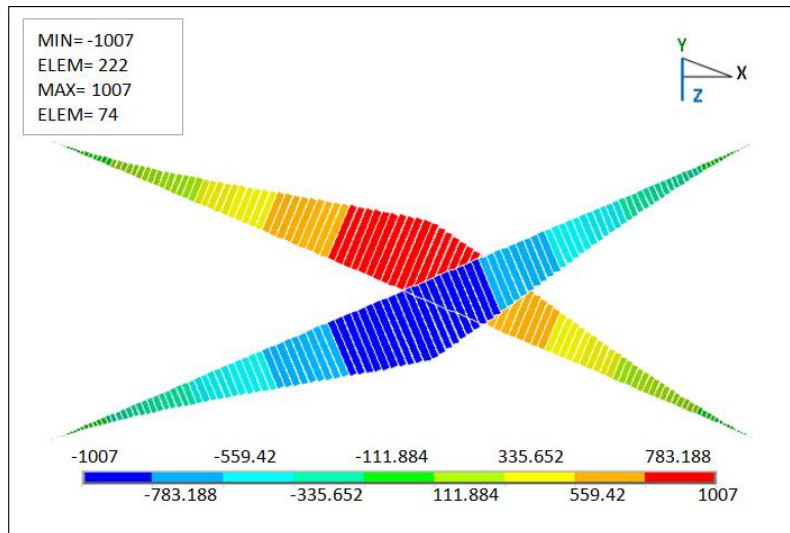


FIGURA 6.14 – Diagrama de Força de Cisalhamento Z obtida ao longo da estrutura, plano X

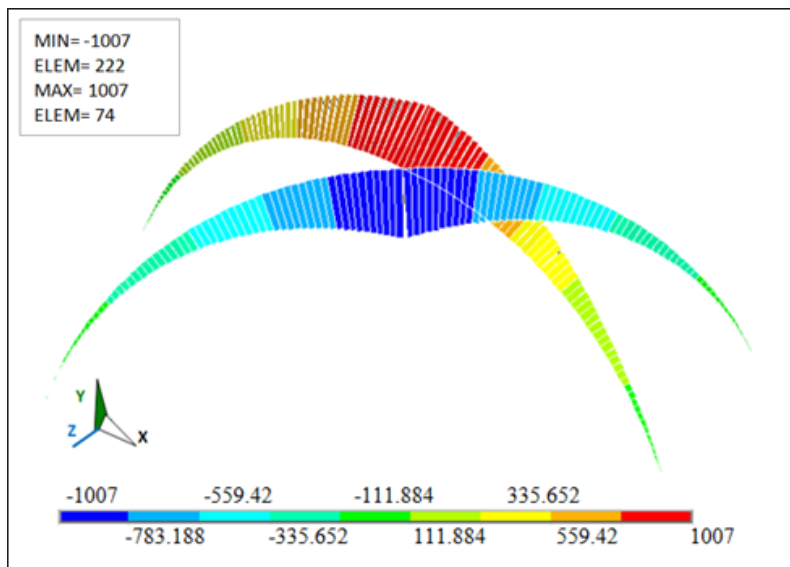


FIGURA 6.15 – Força de Cisalhamento Z obtida ao longo da estrutura, plano Z

6.1.8 Força de Cisalhamento y

Estão apresentados nas FIG. 6.16 e 6.17 os diagramas de força de cisalhamento com plano de atuação na direção de Y. Os valores máximos obtidos foram de -2501 N no elemento 227 e 2501 N no elemento 218. Ambos valores se encontram na escala policromática.

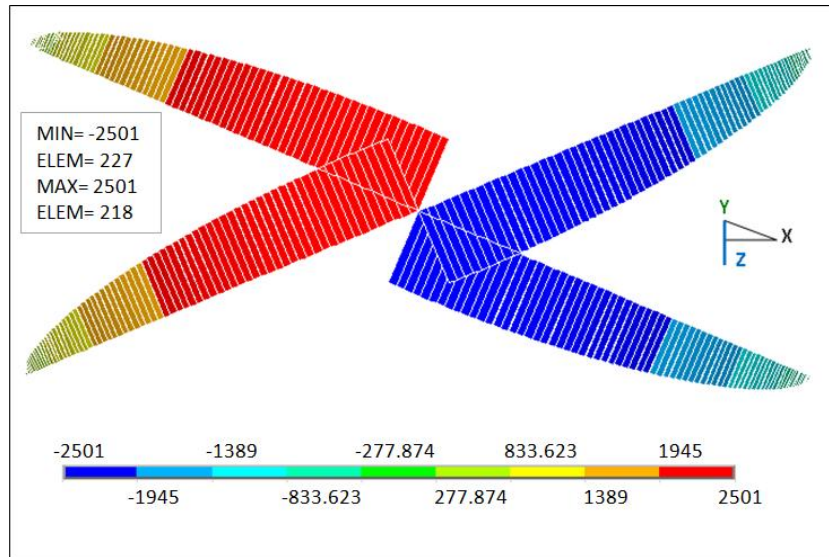


FIGURA 6.16 – Diagrama de Força de Cisalhamento Y obtida ao longo da estrutura, plano X

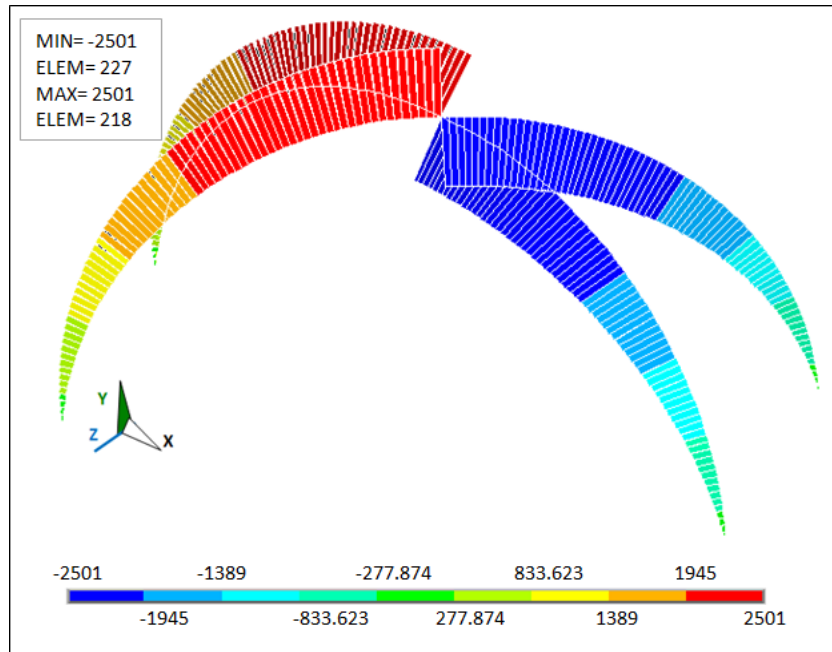


FIGURA 6.17 – Diagrama de Força de Cisalhamento Y obtida ao longo da estrutura, plano Z

6.1.9 Deformação

A deformação é a alteração geométrica originada pelas forças aplicadas na estrutura, ou seja, a modificação da sua forma original após os esforços atuantes. Nas FIG. 6.18 e 6.19 estão apresentados os diagramas de deformação, decorrente dos carregamentos aplicados. Os valores máximos e mínimos dos deslocamentos em função da deformação obtidos foram de $0,225 \times 10^{-4}$ cm no elemento 75, localizado próximo a vinculação rígida (ligação de topo do pórtico bidirecional) e $0,208 \times 10^{-16}$ cm no elemento 148, localizado próximo ao apoio rotulado do pórtico de estabilização. Ambos valores se encontram na escala policromática.

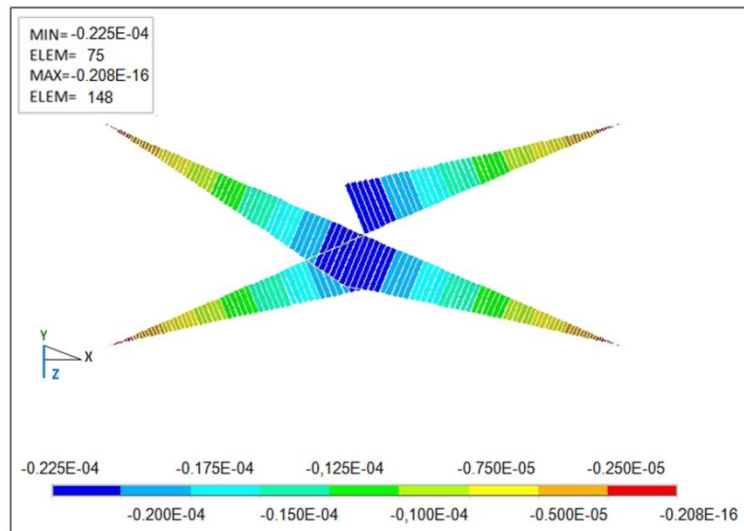


FIGURA 6.18 – Diagrama de Deformação obtida ao longo da estrutura, plano X

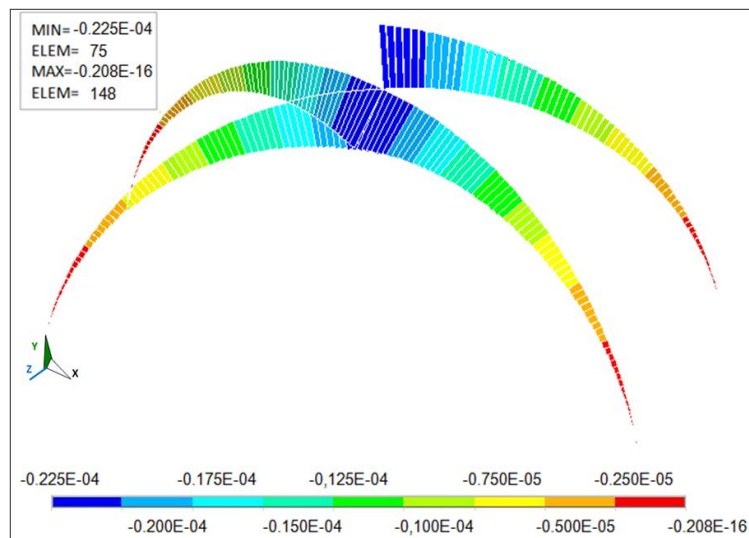


FIGURA 6.19 – Diagrama de Deformação obtida ao longo da estrutura, plano Z

6.2 Comparação com outros modelos

Com os resultados obtidos do estudo numérico via *software ANSYS*, conclui-se que o perfil de análise suportou os carregamentos aplicados, obtendo uma deformação e deslocamento muito pequenos. Portanto, pôde-se otimizar a seção do perfil utilizado na análise computacional, resultando numa estrutura ainda mais leve e com menor consumo de aço. A estrutura proposta passou a ter um consumo de aço de 39.795 N/m², que foi comparado com outros modelos para também verificar as economias relativas entre modelos construtivos diferentes disponíveis no mercado brasileiro.

6.2.1 Modelos

Os modelos usados nesse estudo comparativo foram os modelos: Usiteto da siderúrgica Usiminas composto por engradamento e pilares metálicos (FIG. 6.20); Quick House da metalúrgica Big Farm Ltda (FIG. 6.21) composto por painéis autoportantes de aço; e modelo de construção convencional. Os dois primeiros modelos foram citados no estudo de caso. O modelo Casa Fácil Gerdau da siderúrgica Gerdau Açominas não entrou nessa análise por não estar mais disponível no mercado.



FIGURA 6.20 – Modelo Usiteto e esqueleto metálico
Fonte: USIMINAS, 1997.

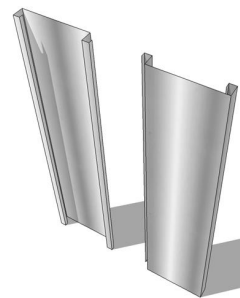


FIGURA 6.21 – Modelo Quick House e painéis autoportantes
BIG FARM..., 2008.

6.2.1.1 Construção convencional

A construção convencional usada nesta análise comparativa foi o modelo proposto construído por meio do sistema de construção convencional, ou seja, em concreto armado, que é ainda o método mais utilizado na construção brasileira. A planta baixa foi mantida conforme o projeto original, sendo modificada apenas as fachadas e demais detalhes para análise estrutural via o *software Cypecad*, que gerou seu consumo de aço. Os desenhos técnicos da construção convencional e seu projeto estrutural estão apresentados nas FIG 6.22 a 6.29.

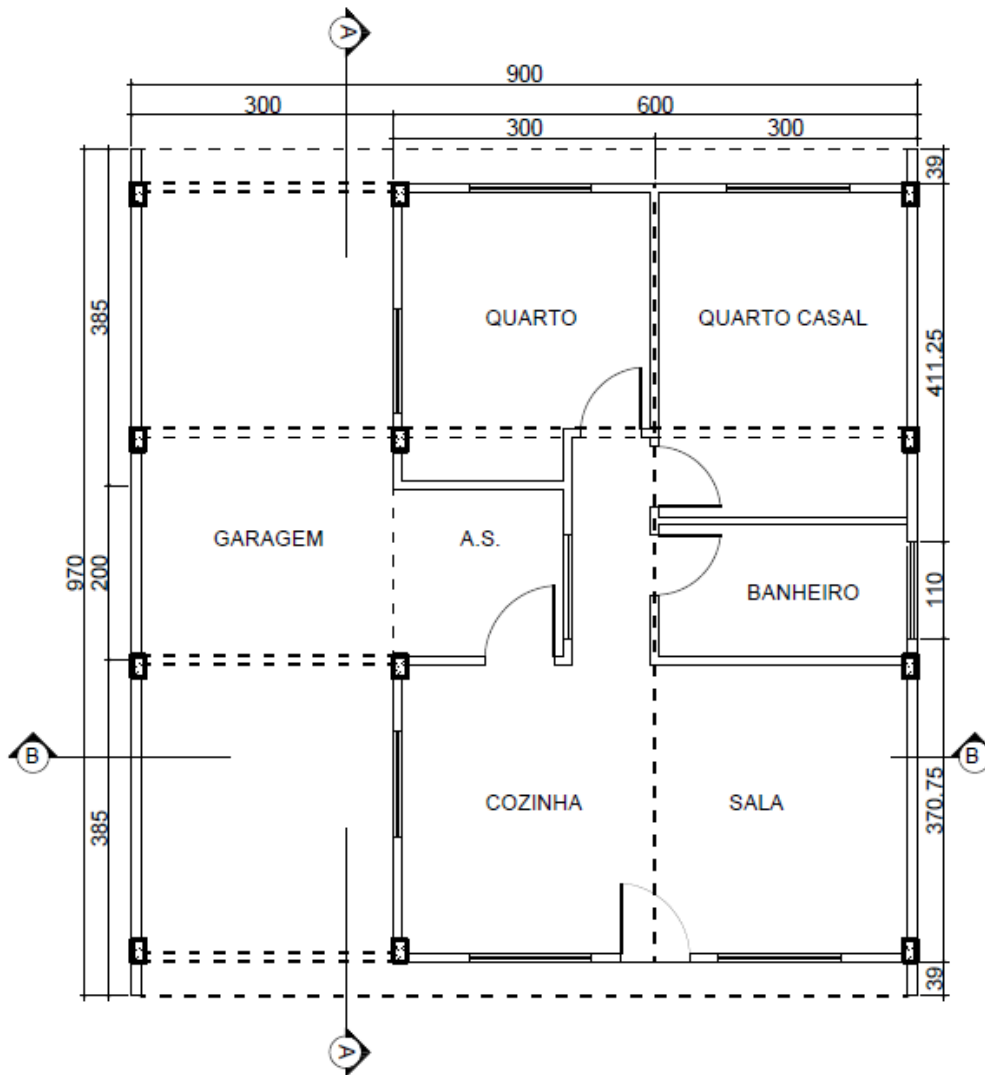


FIGURA 6.22 – Planta baixa

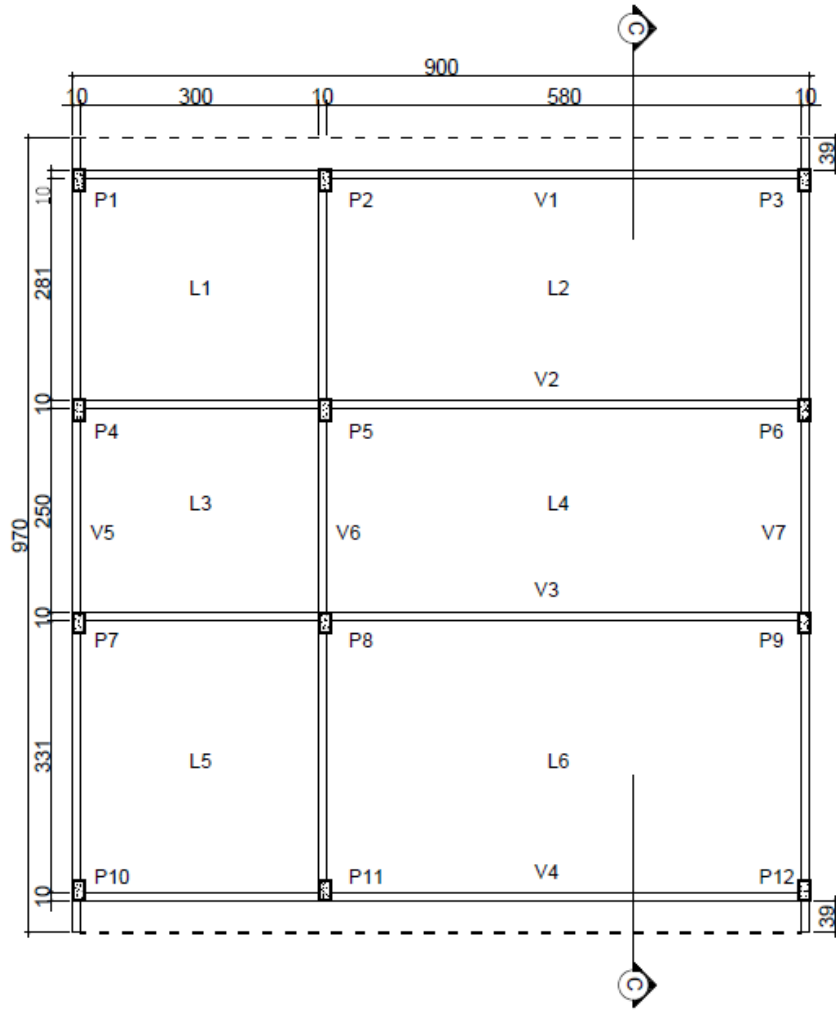


FIGURA 6.23 - Projeto estrutural em concreto armado

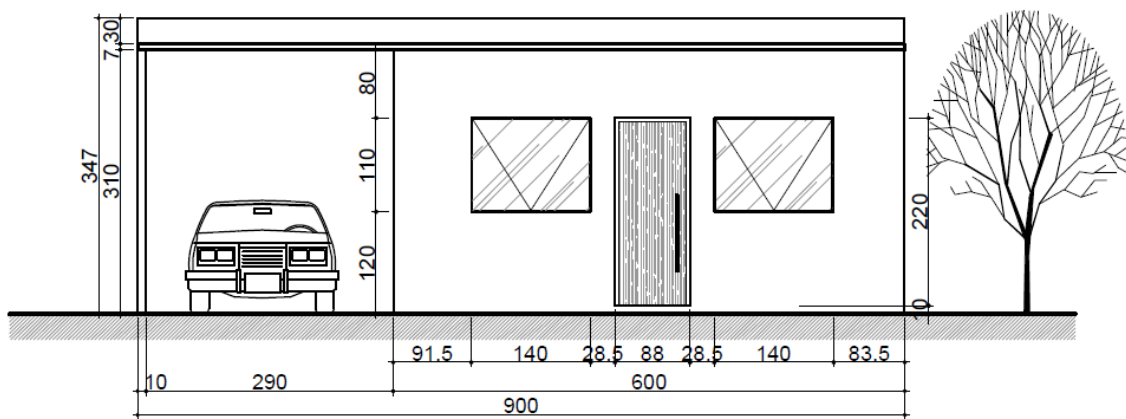


FIGURA 6.24 – Fachada frontal

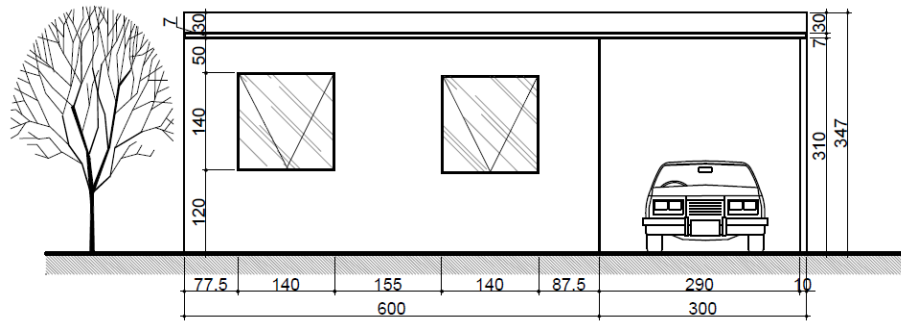


FIGURA 6.25 – Fachada posterior

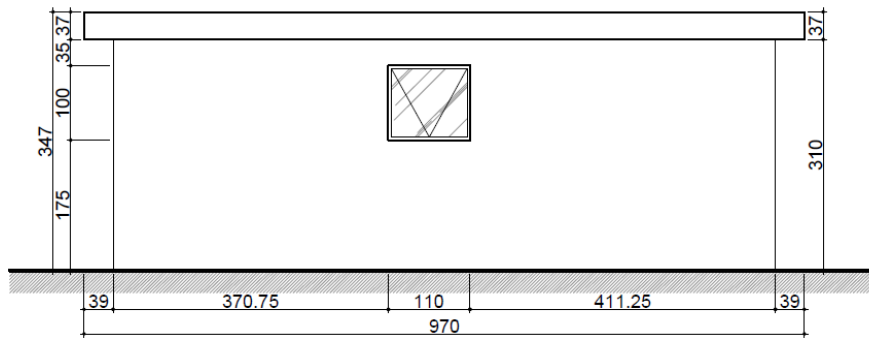


FIGURA 6.26 – Fachada lateral direita

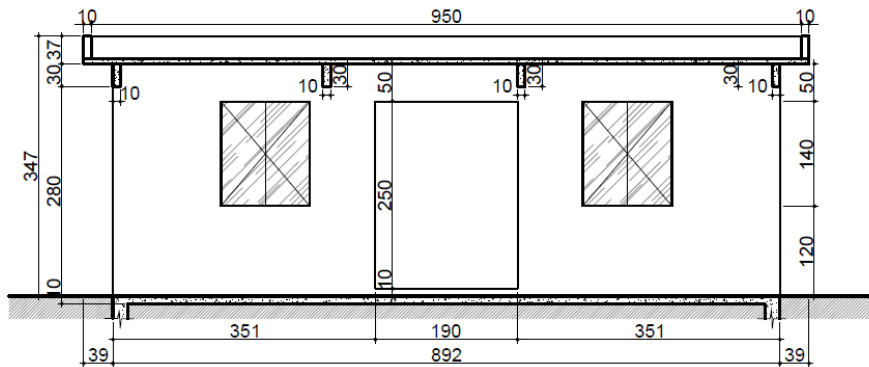


FIGURA 6.27 – Corte AA

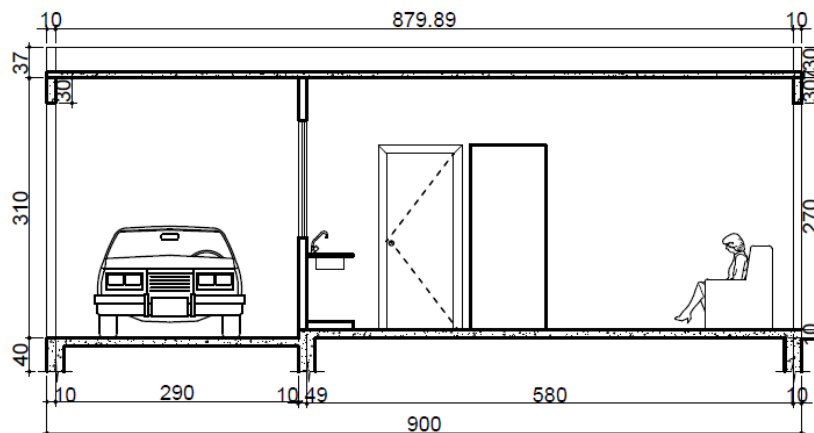


FIGURA 6.28 – Corte BB

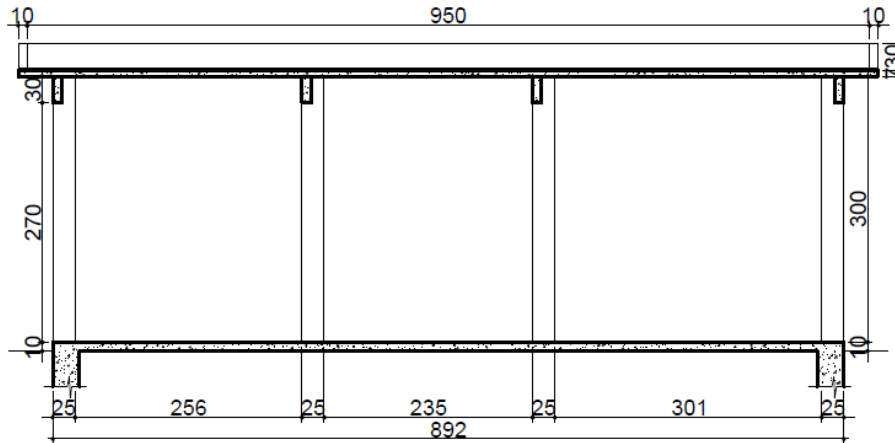


FIGURA 6.29 – Corte CC

Os resultados obtidos da análise estrutural feita por meio do *software Cypecad*, estão apresentados nas tabelas 6.1 e 6.2.

Tabela 6.1 – Consumo de aço da laje

Descrição	Quantidade
Armadura longitudinal inferior	97 kg
Armadura longitudinal superior	60 kg
Armadura transversal inferior	68.1 kg
Armadura transversal superior	68.1 kg
Consumo total	316,1 kg

Tabela 6.2 – Consumo de aço das vigas

Descrição	Quantidade
Viga 1	28,8 kg
Viga 2	22,4 kg
Viga 3	22,7 kg
Viga 4	28,8 kg
Viga 5	22,8 kg
Viga 6	27,1 kg
Viga 7	27,1 kg
Viga 8	23,1 kg
Consumo total	202,8 kg

O consumo de aço gasto nos pilares corresponde a 140,56 kg. O aço CA 50 de diâmetro de 10 mm possui o peso de 0,616 kg/m e o aço CA 60 de diâmetro de 5 mm possui o peso de 0,157 kg/m, obtendo-se assim:

$$CA\ 50 = 4 \text{ (quantidade)} \times 2,88 \text{ m (comprimento)} \times 0,616 \text{ (peso)} = 7,10 \text{ kg} \quad (5.4)$$

$$CA\ 60 = 26 \text{ (quantidade)} \times 0,72 \text{ m (comprimento)} \times 0,157 \text{ (peso)} = 2,94 \text{ kg}$$

$$\text{Total aço x número de pilares} = 10,04 \text{ kg} \times 14 = 140,56 \text{ kg}$$

O consumo total de aço para construção convencional de 87,3 m² corresponde a 659,46 kg, ou seja, 7,554 kg/m².

A análise estrutural e relatório de cálculos com maiores informações obtidos pelo *software Cypecad* encontram-se no Anexo C.

6.2.1.2 Análise comparativa

O modelo proposto possui uma área construída de 87,3 m² e consumo de aço para os pórticos bidirecionais, os principais elementos estruturais da construção, foi de 3,9795 kg/m², que corresponde a 39,795 N/m². O mesmo modelo construído no sistema convencional possuindo a mesma área de 87,3 m² possui o consumo de aço de 7,554 kg/m², que corresponde a 75,54 N/m².

No sistema estrutural metálico do modelo Usiteto de 36 m² foram gastos 18 kg/m² de aço, que correspondem a 180 N/m². Já o sistema com painéis autoportantes do modelo Quick House de 43 m², possui um consumo de 39 kg/m², correspondente a 390 N/m².

No estudo comparativo foi usado o aço da série USI-SAC da siderúrgica Usiminas, resistente à corrosão atmosférica e usado na produção de perfis estruturais para a construção civil, cujo valor apurado foi de R\$ 2,60/kg (AIRES, 2011).

Nas FIG. 6.30 e 6.31 apresenta-se uma análise comparativa entre os modelos, indicando que o modelo proposto é economicamente eficiente com relação ao consumo e custo de aço na produção do seu sistema estrutural (pórticos de estabilização bidirecionais).

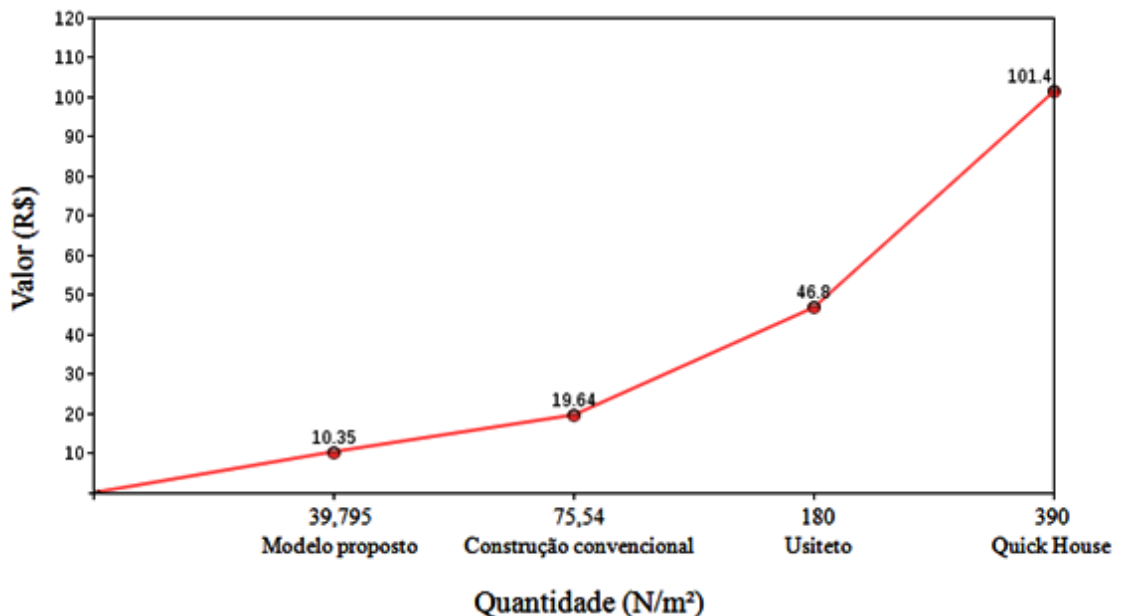


FIGURA 6.30 – Consumo de aço x Custo

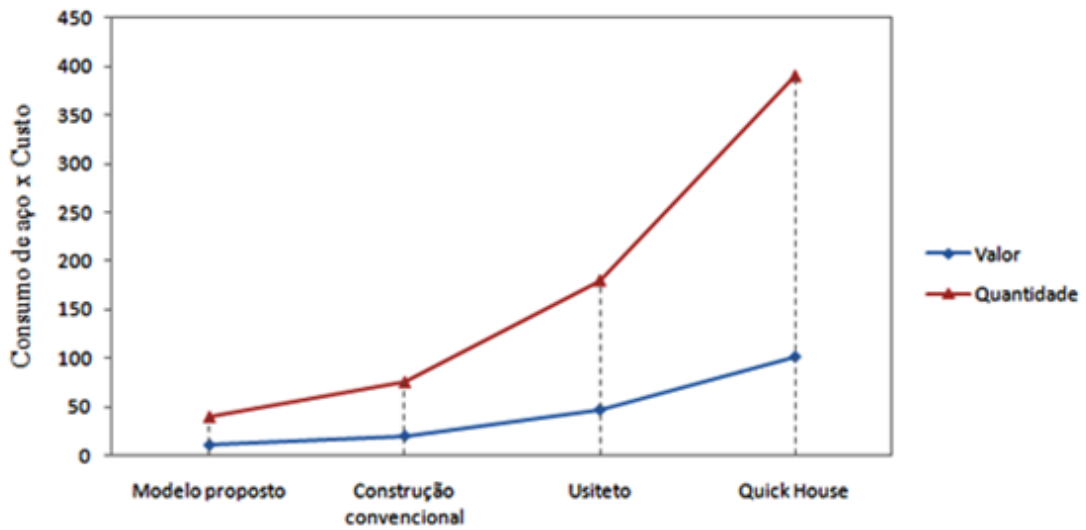


FIGURA 6.31 – Consumo de aço x Custo

Na FIG. 6.32 mostra-se uma análise comparativa entre os modelos com relação a área construída, indicando que o modelo proposto além de apresentar eficiência econômica, possui ganhos em área comparado com os outros modelos.

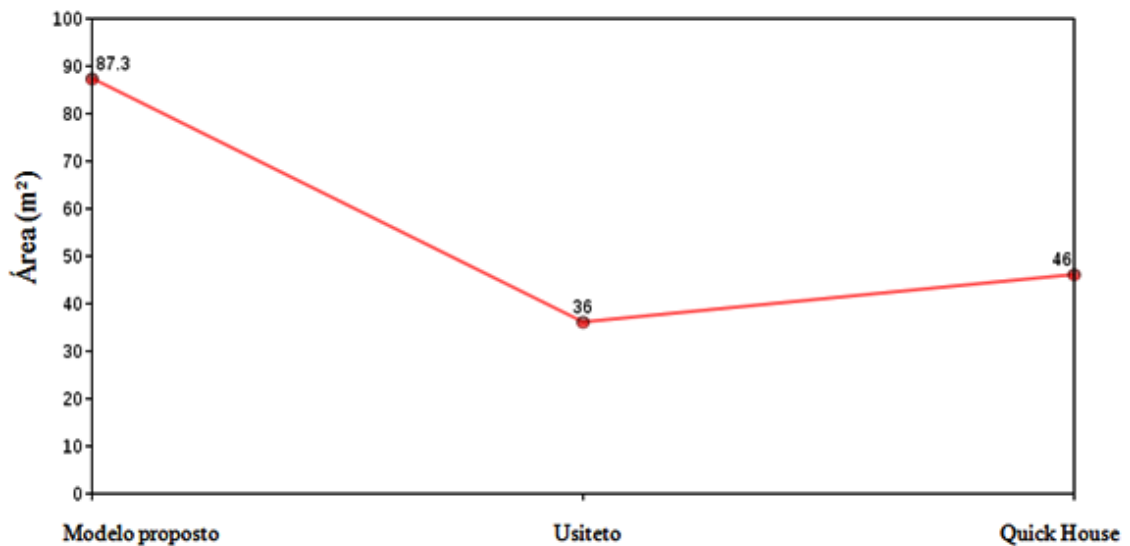


FIGURA 6.32 – Ganhos em área

CAPÍTULO VII

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As questões ambientais e os conceitos de sustentabilidade se tornaram obrigatórios na arquitetura, já que a construção civil é identificada como uma grande causadora de impactos sobre o meio ambiente nos países desenvolvidos ou não.

Nos últimos anos, as empresas fabricantes da área de construção civil têm investido em tecnologia oferecendo aos profissionais uma gama de materiais pré-fabricados e industrializados para a construção. A construção industrializada comparada com a construção convencional causa menor impacto no meio ambiente em termos de uso de energia, consumo de matérias-primas e geração de detritos, além de reduzir o consumo de madeira e diminuir a poluição sonora geradas por serras e outros equipamentos usados na obra.

Os profissionais, arquitetos e engenheiros, precisam se integrar as essas novas possibilidades construtivas, aderir e promover o uso do sistema industrializado em seus projetos, para que ao longo do tempo a construção estruturada em aço supere a construção convencional no Brasil, dando lugar as construções mais sustentáveis, algo que já vem acontecendo aos poucos em outros países.

Baseando-se nisso, o modelo residencial proposto nesse trabalho foi projetado e especificado com materiais industrializados, como: cobertura metálica; sistema construtivo em *Light Steel Framing* composto por perfis leves de aço galvanizado e com fechamento de painéis cimentícios e gesso acartonado, possuindo lâ de vidro entre esses painéis; e forros de painéis de OSB, produzidos a partir de espécies de baixo valor comercial, provenientes de florestas plantadas e de manejo sustentável.

Com o projeto arquitetônico pronto, bem definido e os materiais especificados, o modelo passou pela análise estrutural pelo *software ANSYS* e com os resultados obtidos na análise computacional, pôde-se também otimizar sua seção, resultando numa estrutura ainda mais leve e com menor consumo de aço, já que as dimensões usadas na

análise foram adquiridas por meio de uma tabela de tubos estruturais de uma empresa fabricante. O tubo usado na análise possui a seguinte seção: 113,80 mm de diâmetro externo e 3,00 mm de espessura. A nova seção circular otimizada dos pórticos de estabilização bidirecionais apresentam dimensões menores com 73,02 mm de diâmetro externo, 2,25 mm de espessura e peso total de 39,795 N/m².

Em seguida, o modelo estrutural e arquitetônico proposto passou por uma análise comparativa com a construção convencional e outros modelos estruturados em aço. O modelo proposto apresenta características importantes que resultaram em várias vantagens em relação à construção convencional em concreto armado, como:

- a) rapidez e facilidade na execução da obra: enquanto o sistema convencional gasta aproximadamente 32 dias ou mais, o modelo proposto ficaria pronto em até 7 dias;
- b) possibilidade de desmontagem em caso de futuras reformas, adaptações ou mudanças: a estrutura pode ser desmontada e totalmente reutilizada em outro local;
- c) canteiro de obra limpo e com menos entulho;
- d) racionalização de materiais diminuindo o desperdício;
- e) sistema estrutural mais eficiente que o convencional, uma vez que o sistema de cobertura dos pórticos resulta numa única estrutura que une paredes e cobertura, apresentando maior resistência estrutural e equilíbrio às ações como: fortes ventos e até mesmo a abalos sísmicos;
- f) economia e menor consumo de aço da estrutura, já que o modelo convencional usado na análise possui o consumo de aço de 75,54 N/m², o que gera um custo de R\$ 19,65 para a quantidade de aço que será gasto na produção da estrutura. O modelo proposto possui o consumo de aço de 39,795 N/m² e um custo de R\$ 10,35 devido a quantidade de aço gasto para produção dos perfis dos pórticos bidirecionais;
- g) apresenta uma solução de construção com menor impacto ao meio ambiente.

Comparando com os outros modelos estruturados em aço, como o modelo Usiteto da siderúrgica Usiminas (MG) e o modelo Quick House da metalúrgica Big Farm (RS), apresentou as seguintes vantagens:

- a) economia e menor consumo de aço da estrutura, já que o modelo proposto possui o consumo de aço de 39,795 N/m² e um custo de aço equivalente a R\$ 10,35 que corresponde a quantidade de aço gasto para produção dos perfis dos pórticos bidirecionais. O consumo do modelo Usiteto corresponde a 180 N/m² e gera um custo de aço de R\$ 46,80 e o modelo Quick House possui 390 N/m² e um custo de R\$ 101,40 para o consumo de aço na produção do sistema estrutural;
- b) ganhos em área apresentando maior área construída com menor consumo de aço, possuindo uma área construída de 87,3 m², sendo que o modelo Usiteto analisado possui 36,0 m² e o modelo Quick House analisado corresponde a 43,0 m²;
- c) apresenta melhor organização espacial dos ambientes, dando mais conforto e privacidade aos usuários, com área íntima mais reservada da área social;
- d) possui área de serviço bem planejada e coberta, o oposto dos demais modelos que apresentam o tanque disposto em uma das fachadas sem a preocupação de oferecer aos moradores uma área de serviço coberta. No caso dos outros modelos, o proprietário teria mais um gasto com a cobertura desse ambiente e também com a cobertura de garagem;
- e) possui uma área externa coberta destinada a garagem e varanda. Espaço de lazer que pode abrigar dois veículos e também é destinado para o uso de uma futura ampliação da casa, como por exemplo, a construção de mais um quarto e sem perder a área destinada a garagem. Tal ampliação não modificaria a volumetria da construção, dando a impressão de um “puxadinho”, como é popularmente chamado no Brasil;
- f) apresenta maior eficiência econômica e estrutural com o uso de pórticos bidirecionais, que garante o equilíbrio da construção em duas direções perpendiculares quando submetidos a ações horizontais (ventos fortes, terremotos, etc.).

O projeto para ser executado precisaria ainda do detalhamento das interfaces e ligações especificadas, mas como foi ressaltado anteriormente, as ligações e interfaces foram apenas pensadas de forma que não interferissem nas questões estéticas e estruturais do projeto.

Algumas empresas que avaliaram o projeto, afirmaram ser viável a sua execução. A empresa Tubonal (Belo Horizonte – MG) recomendou que o ideal seria adequar o tubo de seção circular com diâmetro de 73,02 mm para um diâmetro padrão, no caso o diâmetro de 76,20 mm. Esta empresa trabalha somente com grandes distribuidores por meio de mão de obra, ou seja, o cliente envia o aço e a empresa transforma em tubos, onde a quantidade mínima é de 30 toneladas por bitola. Segundo a empresa, existem as seguintes maneiras de adquirir esse tubo específico no mercado, são elas:

- a) comprar o tubo pronto em um distribuidor (pequenas quantidades e pode ser comprado em peças), onde o preço aproximado é de R\$3,00 a R\$ 3,50/kg;
- b) comprar o tubo de um fabricante (quantidade mínima em torno de 1 tonelada), o preço aproximado é de R\$2,60 a R\$3,00/kg;
- c) caso não seja possível adequar o tubo padrão de 76,20 mm no projeto, deve-se recorrer aos tubos trefilados, que são tubos com diâmetros específicos feitos sob encomenda. O cliente compra o aço (R\$2,60/kg) e o preço da mão de obra para a produção do perfil é de aproximadamente R\$0,35/kg.

Quanto ao curvamento dos tubos, foi analisado pela empresa Protubo (Rio de Janeiro – RJ). A nova seção circular otimizada dos pórticos de estabilização bidirecionais apresenta espessura de 2,25 mm por questões de economia, ou seja, menor consumo de aço da estrutura. O processo de curvamento é feito a partir de tubos com espessura mínima de 3 mm, mas segundo esta empresa, é possível fazer o seu curvamento. Portanto, os 8 tubos que compõem o sistema estrutural proposto, cujo perímetro é de 7,303 m, precisaria ser cortado ao meio, o que resultaria num total de 16 tubos com perímetro de 3,652 m, conforme apresentado na FIG. 7.1.

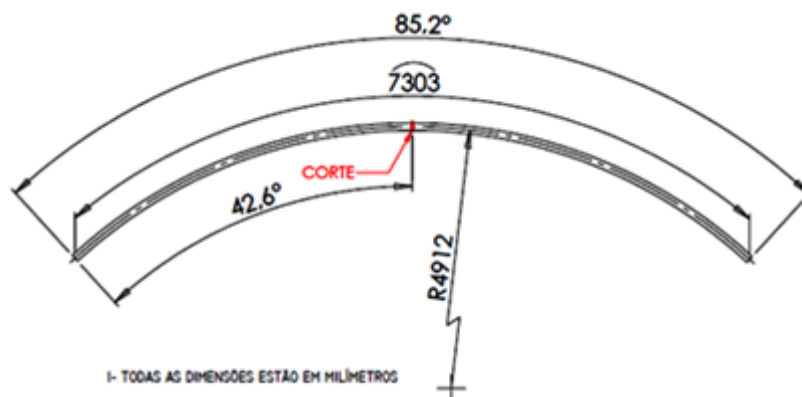


FIGURA 7.1 – Indicação do corte a ser feito nos tubos para curvamento
Fonte: PROTUBO, 2011.

Encontra-se na tabela 7.1, uma previsão de custo para a construção dos principais elementos estruturais e de fechamento do modelo proposto fornecido pelas empresas. Não estão inclusos neste orçamento despesas com o acabamento da obra (pisos, revestimentos, pintura, etc.).

Tabela 7.1 – Previsão de custo dos principais elementos estruturais e de fechamento

Descrição	Quantidade	Valor unitário	Valor total	Fonte
Aço da série USI-SAC para produção dos perfis	347,41 kg (3,9795 kg/m ²)	R\$ 2,60/kg	R\$ 903,27	USIMINAS (2011)
Produção dos perfis	8 tubos	R\$0,35/kg	R\$ 121,59	TUBONAL (2011)
Curvamento dos perfis	16 tubos	R\$ 31,50	R\$540,00	PROTUBO (2011)
Cobertura metálica (termo-acústica)	120,67 m ²	R\$ 30,00/m ²	R\$ 3.620,10	BRASILIT (2011)
Telha translúcida	8 telhas (1,10 x 1,22 m)	R\$ 28,78	R\$ 230,24	TELHA NORTE (2011)
Forro de painéis de OSB	4 painéis (2,44 x 1,22 m)	R\$ 43,00	R\$ 172,00	LP Brasil (2011)
Fechamentos verticais industrializados	61,08 m ² (paredes ext.) 52,29 m ² (paredes int.)	R\$ 250,00/m ² (paredes ext.) R\$ 100,00/m ² (paredes int.)	R\$ 20.499,00	FLASAN (2011)
Valor total estimado = R\$ 26.086,20				

O valor estimado para o modelo proposto sem acabamento corresponde a R\$ 26.086,20. Se o mesmo fosse construído de forma convencional, como as demais casas populares encontradas no mercado brasileiro, seria avaliado em torno de R\$ 70.000,00 por meio de financiamento do banco Caixa Econômica Federal (CEF, 2011). Estima-se que o custo do modelo proposto finalizado não supere o valor da construção convencional, não ultrapassando 70% correspondente ao seu valor. Ressalta-se que este valor foi estimado para o modelo proposto produzido de forma isolada. No entanto, os valores fornecidos pelas empresas podem ser reduzidos de acordo com a alta produtividade, isto é, o modelo com produção em série, como são produzidos os modelos Usiteto e Quick House, casas populares produzidas em larga escala, o que reduz seus custos. O modelo proposto poderia ter um custo ainda mais acessível que os demais modelos estruturados em aço encontrados no mercado.

7.1 Conclusão

Com base nas análises e comparação do modelo proposto, com os demais modelos, pode-se concluir que o modelo apresenta viabilidade quanto à produção, facilidade e rapidez de execução, menor impacto causado ao meio ambiente, modelação arquitetônica e modulação estrutural simplificadas, maior rigidez, redução de ligações da estrutura, eficiência estrutural, e também quanto ao peso e consumo de aço final obtido.

O modelo proposto oferece um sistema ideal para regiões que sofrem frequentes catástrofes naturais que afetam gravemente a segurança e condições de vida da população, além de afetar também toda a estrutura sócio-econômica de um país. Pode-se ainda pensar como uma proposta de projeto, que seria uma boa solução em caso de reconstrução dessas regiões, como por exemplo, regiões como Haiti e Chile, que foram devastadas por terremotos no início de 2010 ou na reconstrução de cidades como Teresópolis, Nova Friburgo e Petrópolis, cidades da região serrana do estado do Rio de Janeiro, onde chuvas fortes de verão causaram destruição e mortes no início de 2011.

Quanto aos custos, a construção industrializada comparada com a construção convencional numa análise inicial pode parecer ter um custo muito mais elevado, o que

muitas vezes impede a sua execução e é substituída por métodos convencionais, mas diante das inúmeras vantagens oferece ainda, significativamente, maior vida útil do sistema e em função da importância da preocupação com o tempo de construção, desperdício de materiais e impactos ambientais, os materiais industrializados tendem, futuramente, possuir um custo mais acessível no mercado.

7.2 Sugestões para pesquisas futuras

Sugere-se para a continuação desse trabalho:

- análise estrutural mais detalhada quanto ao lançamento das ações horizontais (principalmente o vento) e vibrações. Posteriormente, fazer um refinamento no dimensionamento para uma melhor otimização do projeto estrutural;
- análise dos tipos de arcos circulares em que se minimiza os momentos fletores e maximiza os esforços normais para uma altura pré-definida do arco (flecha);
- um estudo de análise e detalhamento das ligações especificadas, estudo de lanternis (dimensionamento e posicionamento) e um orçamento detalhado da construção;
- avaliação do desempenho térmico do modelo proposto por meio de simulação computacional via *software EnergyPlus*;
- construção de um protótipo para avaliação do desempenho global (estrutural, termo-acústico, estanqueidade).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRES, Kleiton Gomes. **Aços estruturais da série USI-SAC**. 2011. Entrevista concedida a Cristina Evangelista Silva pelo atendente de vendas, Usiminas, Minas Gerais, 28 ago. 2011.

ANANDA Telhas metálicas. Disponível em: <<http://www.anandametais.com.br/bra/produtos/coberturas/default.asp>>. Acesso em: 12 jan. 2010.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cargas Para o Cálculo de Estruturas de Edificações: NBR 6120**. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Forças Devidas Ao Vento Em Edificações: NBR 6123**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização: NBR 6355:2003**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Perfil tubular, de aço carbono, formado a frio, com e sem costura, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais: NBR 8261**. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. NBR 8800**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. NBR 6118**. Rio de Janeiro, 2003.

BAKER, Geoffrey H. **Le Corbusier: uma análise da forma**. Editora Martins. São Paulo, 1998.

BANEMA. Madeiras e derivados. Disponível em: < http://www.banema.pt/artigos,paineis,aglomerado_particulas_cru,osb>. Acesso em: 01 jun. 2011.

BASTOS, M.A.R. **Avaliação de sistemas construtivos semi e/ou industrializados de edifícios de andares múltiplos através da perspectiva de seus usuários.** 2004. 458f. Dissertação (Mestrado em Construções Metálicas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

BELLEI, I. et al. **Edifícios de Múltiplos Andares em Aço.** 2ª ed. São Paulo: Pini, 2008.

BIG FARM Metalúrgica Ltda. Catálogo com informações técnicas do sistema Quick House. 2011a.

BIG FARM Metalúrgica Ltda. Disponível em: <<http://www.quickhouse.com.br>>. Acesso em: 14 jun. 2011b.

BROWN, D. J., **Bridges**, Mitchell Beazley, London, 1996.

BRASILIT. Informações técnicas. 2011.

CALADO, Margarida, PAIS DA SILVA, Jorge Henrique. **Dicionário de Termos da Arte e Arquitetura.** Editorial Presença, Lisboa, 2005.

CALATRAVA, Santiago. Bibliografia e obras arquitetônicas. **Ponte Sundial at Turtle Bay.** Disponível em: <<http://www.calatrava.com/>>. Acesso em: 11 dez. 2009.

CARVALHO, Ramon Silva & RHEINGANTZ, Paulo Afonso. Contribuições da Pós-Graduação para o ensino de projeto de arquitetura. In: Anais do I Seminário Ensino e Pesquisa em Projeto de Arquitetura (**Projetar 2003**). Natal. 2003.

CEF. Caixa Econômica Federal. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/>>. Acesso em: 10 out. 2011.

CICHINELLI, Gisele C. Sistemas estão intrinsecamente ligados aos vãos que deverão ser vencidos, definidos ainda na fase de projeto como "modulação". **Revista Técnica.** Edição 145. Abril 2009.

CIDADE ADMINISTRATIVA de Minas Gerais. Disponível em: <www.cidadeadministrativa.mg.gov.br>. Acesso em: 17 jan. 2011.

CHAN, Alexandre. Ponte JK em Brasília: Ponte do Mosteiro. **Portal Metálica.** Disponível em: <<http://www.metalicashopping.com.br/ponte-jk-brasilia-ponte-do-mosteiro-terceira-ponte-do-lago-sul>>. Acesso em: 31 jan. 2010.

CURVAMENTO de Tubos por Indução. Disponível em: <<http://www.metalicashopping.com.br/curvamento-de-tubos-por-inducao>>. Acesso em: 02 jan. 2010.

CORBUSIER, Le. **Por uma arquitetura.** Editora Perspectiva S.A. 6ª edição. São Paulo, 2002.

DIAS, Alexandra da Silva. **Avaliação do desempenho térmico de coberturas metálicas utilizadas em edificações estruturadas em aço**. 2011. Dissertação (Mestrado em Construções Metálicas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

DIS FOSMINAS. Catálogos com informações técnicas. 2010.

DUTTA, D., WARDENIER, J., YEOMANS, N., SAKAE, K., BUCAK, Ö., PACKER, J.A.. **Design guide for fabrication, assembly and erection of hollow section structures**. 171f. Germany: CIDECT, 1998.

EMORI. Comércio de Ferro e Aço. Disponível em: <<http://www.emori.com.br/>>. Acesso em: 08 jun. 2011.

ENGEL, Heino. **Sistemas de Estruturas**. São Paulo: Hemus Editora Limitada, 1981.

EUCATEX. Indústria e Comércio S.A. **Catálogo de telhas metálicas**. 2010.

FARIA, José Oswaldo Contijo. **Casa Fácil Gerdau Açominas**. 2011. Entrevista concedida a Cristina Evangelista Silva pelo engenheiro civil e chefe do setor de vendas, Gerdau Açominas, Minas Gerais, 28 ago. 2011.

FLASAN. Soluções para construção a seco. Disponível em: <<http://www.flasan.com.br/>>. Acesso em: 02 mai. 2011.

FRANK, Rafael. **Maior ponte do mundo foi projetada para dar visibilidade à Opera House**. Pini Web. Disponível em: <<http://www.piniweb.com.br/construcao/urbanismo/maior-ponte-do-mundo-foi-projetada-para-dar-visibilidade-a-96511-1.asp>>. Acesso em: 31 jan. 2010.

GELINSKI, Gilmara. Passarela com esteiras rolantes, Curitiba-PR, Adolfo Sakaguti. **Revista Finestra**. Edição 33. Julho de 2003.

GERDAU AÇOMINAS. Catálogos com informações técnicas. 2005a.

GERDAU AÇOMINAS. Catálogos com informações técnicas. 2011b.

GERKEN, F. de S. **Perfis tubulares: aspectos arquitetônicos e estruturais**. 2003. 388f. Dissertação (Mestrado em Construções Metálicas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

GYMPEL, Jan. **A História da arquitetura da antiguidade aos nossos dias**. Colônia, Konemann, 1996.

JAVARONI, Carlos Eduardo. **Perfis de aço conformados a frio por dobramento de chapa fina – fundamentos teóricos para o dimensionamento de barras**. 1993. 239f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

KODIAK Steel Homes. Disponível em: <<http://www.kodiaksteelhomes.com>>. Acesso em: 02 fev. 2011.

KON, Nelson. **Revista do Memorial da América Latina**. N° 24. Ano 2006.

LE PONT DU GARD. **Ponte-aqueduto Pont du Gard, França**. Disponível em : <<http://www.lepontdugard.com/>>. Acesso em: 02 jan. 2010.

LP BRASIL. Informações técnicas. 2011.

LOPES, Antônio Carlos Simões. **Casas Quick House**. 2011. Entrevista concedida a Cristina Evangelista Silva pelo proprietário e inventor do sistema construtivo Quick House, Big Farm Ltda, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 28 ago. 2011.

MACHADO, Roberta Carvalho. **Aspectos da sustentabilidade ambiental nos edifícios estruturados em aço**. 2010. 248f. Dissertação (Mestrado em Construções Metálicas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

MARINGONI, Heloísa **Martins. Princípios de Arquitetura em Aço. Coletânea do Uso do Aço**. Perfis Gerdau Açominas. Volume 4. 2ª Edição. Brasil. 2004.

MARKO Sistemas Metálicos. **Catálogo de sistema de cobertura metálica**. 2010.

METÁLICA. **Copa do Mundo 2002: Estádio de Futebol em Oita no Japão**. Disponível em: <<http://www.metallica.com.br/copa-do-mundo-2002-estadio-de-futebol-em-oita-japao>>. Acesso em: 02 jan. 2010.

METSUL, Meteorologia. 2008. Disponível em: <<http://www.metsul.com>>. Acesso em: 14 ago. 2010.

MINISTÉRIO do Desenvolvimento da Indústria. **Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas**. v.I. 2.ed. Brasília: Comércio – Secretaria Especial de Desenvolvimento Industrial, 1989.

MOSAICO na rede. Disponível em: <<http://www.mosaiconarede.com.br>>. Acesso em: 03 jan. 2010.

NOUVEL, Jean. Bibliografia e obras arquitetônicas. **Conjunto Habitacional Nemausus**. Disponível em: <<http://www.jeannouvel.com>>. Acesso em: 02 jan 2010.

NUIC, Laila. **Proposta de sistema estrutural modular em perfis metálicos tubulares para galpões**. 2003. 243p. Dissertação (Mestrado em Estruturas Metálicas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

TECHNICA, Consultoria e Projetos Industriais Ltda. Informações técnicas. 2010.

TELHA NORTE. Informações técnicas. 2011.

TOLDOS ALVORADA. Catálogos com informações técnicas. 2011.

TOUR EIFFEL. Disponível em: < <http://www.tour-eiffel.fr/>>. Acesso em: 02 jan. 2010.

TUBONAL. Catálogos com informações técnicas. 2006a.

TUBONAL. Catálogos com informações técnicas. 2009b.

PIANO, Renzo. Bibliografia e obras arquitetônicas. **Centro Pompidou em Paris e Aeroporto Internacional de Kansai no Japão**. Disponível em: <www.rpbw.com>. Acessado em: 02 jan. 2010.

PEVSNER, Nikolaus. **Os pioneiros do desenho moderno: de William Morris a Walter Gropius**. 3.ed. São Paulo: Martins Fontes. 2002a.

PEVSNER, Nikolaus. **Panorama da arquitetura ocidental**. 2.ed. São Paulo: Martins Fontes. 2002b.

PROTUBO. Catálogos com informações técnicas. 2009a.

PROTUBO. Informações técnicas. 2011b.

REVISTA PROJETO DESIGN. Edição 257. Julho 2001.

ROCHA, Ana Paula . **Vão livre de 150 m no Centro Administrativo do Estado de Minas Gerais torna-se um desafio para engenheiros**. Pini Web. 2009. Disponível em: <<http://www.piniweb.com.br/construcao/tecnologia-materiais/vao-livre-de-150-m-do-centro-administrativo-do-estado-140008-1.asp>>. Acesso em: 26 jan. 2010.

SALES, U.C. **Mapeamento dos Problemas Gerados na Associação entre Sistemas de Vedação e Estrutura Metálica e Caracterização Acústica e Vibratória de Painéis de Vedação**. 2001. 249f. Dissertação (Mestrado em Construções Metálicas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

SANTIAGO, Alexandre Kokke. **Sistema Light Steel Framing como fechamento externo vertical industrializado**. In: Congresso Latino-Americano da Construção Metálica, SP, Brasil. 2008.

SANTIAGO, Alexandre Kokke. **Sistema Light Steel Framing**. 2011. Entrevista concedida a Cristina Evangelista Silva pelo arquiteto do Departamento Técnico, Flasan, Belo Horizonte, Minas Gerais. 07 jun. 2011.

SARRIA, Grace. **Arco parabólico, en el corazón de la ciudad de Tacna**. Peru Travel Guia. Disponível em: < <http://peru.travelguia.net/arco-parabolico-en-el-corazon-de-la-ciudad-de-tacna.html>> Acesso em: 31 jan. 2010.

STEFANI, Carlos A. **Processo de fabricação de tubos com costura especiais**. Siderurgia Brasil. Edição 57. 2007.

SILVA, Geraldo Gomes da. **Arquitetura do ferro no Brasil**. 2ed. São Paulo: Nobel, 1988.

STRUCTURAE. **Ponte Conway, Menai na Inglaterra**. Disponível em: <<http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=1881>>. Acesso em: 31 jan. 2010.

USIMINAS. Catálogos com informações técnicas. 1997a.

USIMINAS. Informações técnicas. 2001b.

VALLOUREC & MANNESMANN TUBES. Catálogo de produtos. 2004.

VIDRADO. **Palácio de Cristal, Londres**. Disponível em: <<http://noticias.vidrado.com/historia/antigo-palacio-de-cristal-em-londres/>>. Acesso em: 31 jan. 2010.

ANEXOS

ANEXO A

Especificação das normas técnicas e características de perfis

Informações obtidas por meio da empresa S.A. Tubonal, para a análise estrutural dos pórticos bidirecionais de estabilização. Em destaque na tabela A.1, as características do perfil de análise.

Tabela A.1 – Perfis de seção circular

NORMAS			NBR – 8261					ASTM A-500									
DIMENSÕES			VIDE TABELA ABAIXO diâmetros: 198 "20 mm @ 198 168 mm / espessuras: 2 mm @ 7 mm														
Espessuras (mm)			2,00	2,25	2,65	3,00	3,35	3,75	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60	5,90	6,30	7,00
D	21,21	0.835	0,97	1,08	1,24												
I	25,40	1.000	1,18	1,31	1,52	1,69											
Â	26,67	1.050	1,24	1,39	1,60	1,79	1,97										
M	31,75	1.250	1,50	1,67	1,94	2,17	2,40										
E	33,40	1.315		1,77	2,05	2,30	2,54	2,80	3,12								
T	38,10	1.500		2,03	2,37	2,65	2,93	3,25	3,63								
R	42,16	1.660		2,26	2,64	2,96	3,28	3,63	4,06	4,27	4,48						
O	48,13	1.895		2,60	3,04	3,41	3,78	4,19	4,70	4,95	5,19	5,43					
	50,80	2.000		2,75	3,22	3,61	4,01	4,45	4,99	5,25	5,51	5,77					
	60,30	2.375		3,27	3,83	4,30	4,78	5,31	5,96	6,29	6,60	6,92	7,30	7,67			
E	63,50	2.500		3,47	4,06	4,57	5,08	5,65	6,35	6,69	7,03	7,37	7,77	8,17	8,56		
X	73,02	2.875		4,01	4,70	5,29	5,88	6,55	7,37	7,77	8,17	8,57	9,04	9,51	9,98	10,59	
T	76,20	3.000		4,19	4,91	5,53	6,15	6,85	7,71	8,13	8,55	8,97	9,58	9,96	10,45	11,10	
E	88,90	3.500		4,91	5,76	6,49	7,22	8,05	9,07	9,57	10,07	10,57	11,17	11,76	12,34	13,11	14,45
R	101,60	4.000		5,63	6,61	7,45	8,29	9,25	10,43	11,01	11,59	12,17	12,86	13,55	14,23	15,13	16,69
N	113,80	4.480			7,42	8,38	9,32	10,40	11,73	12,39	13,05	13,71	14,49	15,27	16,04	17,07	18,84
O	165,10	6.496					13,65	15,25	17,23	18,21	19,19	20,17	21,34	22,51	23,67	25,21	27,89
	168,30	6.625					13,93	15,55	17,57	18,57	19,58	20,58	21,77	22,96	24,15	25,72	28,45
S	Mm	polegada	PESO LINEAR MÉDIO (Kg/m)														

Obs.: Para os itens sombreados em amarelo na tabela, somente rebarba alta.

ANEXO B

Curvamento de perfis

Informações obtidas por meio da empresa Protubo – Soluções de Engenharia de Tubulações. Nas tabelas B.1, B.2 e B.3 apresenta-se a capacidade do equipamento e o ângulo máximo de curvamento, respectivamente.

Tabela B.1 – Capacidade do equipamento

ESPECIFICAÇÃO	MÍNIMA	MÁXIMA
DIÂMETRO	3/4"	38"
ESPESSURA	3,0 mm	70,0 mm
RAIO	-	Até 16,000 mm
ÂNGULO	-	Até 220°

Tabela B.2 – Ângulo máximo de curvamento

Equipamentos HR 6G e HR 28G

Braço Normal (diâmetro de 1" a 20" e espessura até 50 mm)

Raio (mm)	230	250	300	310	370	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1100-1200
Ângulo (graus)	100	105	110	120	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	200

Braço Up-Grade (22" a 28")

Raio Curvamento (mm)	Ângulo Máximo (°)	Raio Curvamento (mm)	Ângulo Máximo (°)
1200-1800	180°	2500	135°
1900	175°	2600	130°
2000	165°	2700	125°
2100	155°	2800	120°
2200	150°	2900	115°
2300	145°	3000	110°
2400	140°		

Braço Pequeno (Baby Arm)

Diâmetro de 3/4" a 4" e espessura até 17 mm

Ângulo Máximo: 180°

Raio Máximo: 1.200 mm

Raios maiores que 3,000 mm

verificar o ângulo máximo pela fórmula:

$$R \times \theta \leq 395,466$$

R em mm
 θ em graus

Tabela B.3 – Ângulo máximo de curvamento

Equipamento HR 38G

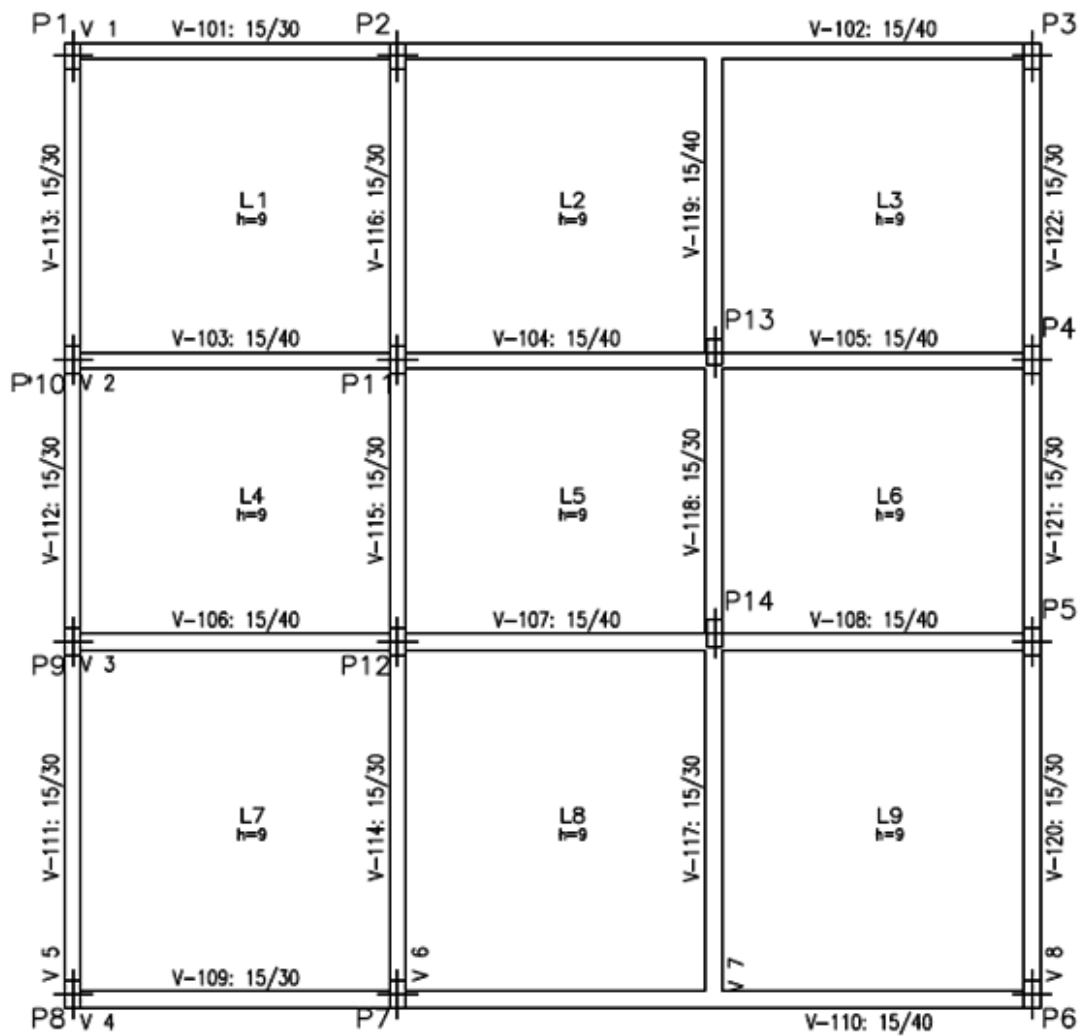
Raio Curvamento (mm)	Ângulo Máximo
470-650	95°
651-750	100°
751-850	110°
851-950	120°
951-1000	125°

Raio Curvamento (mm)	Ângulo Máximo
1001-1050	130°
1051-1150	145°
1151-1250	160°
1251-4600	180°
4601-5000	180°

ANEXO C

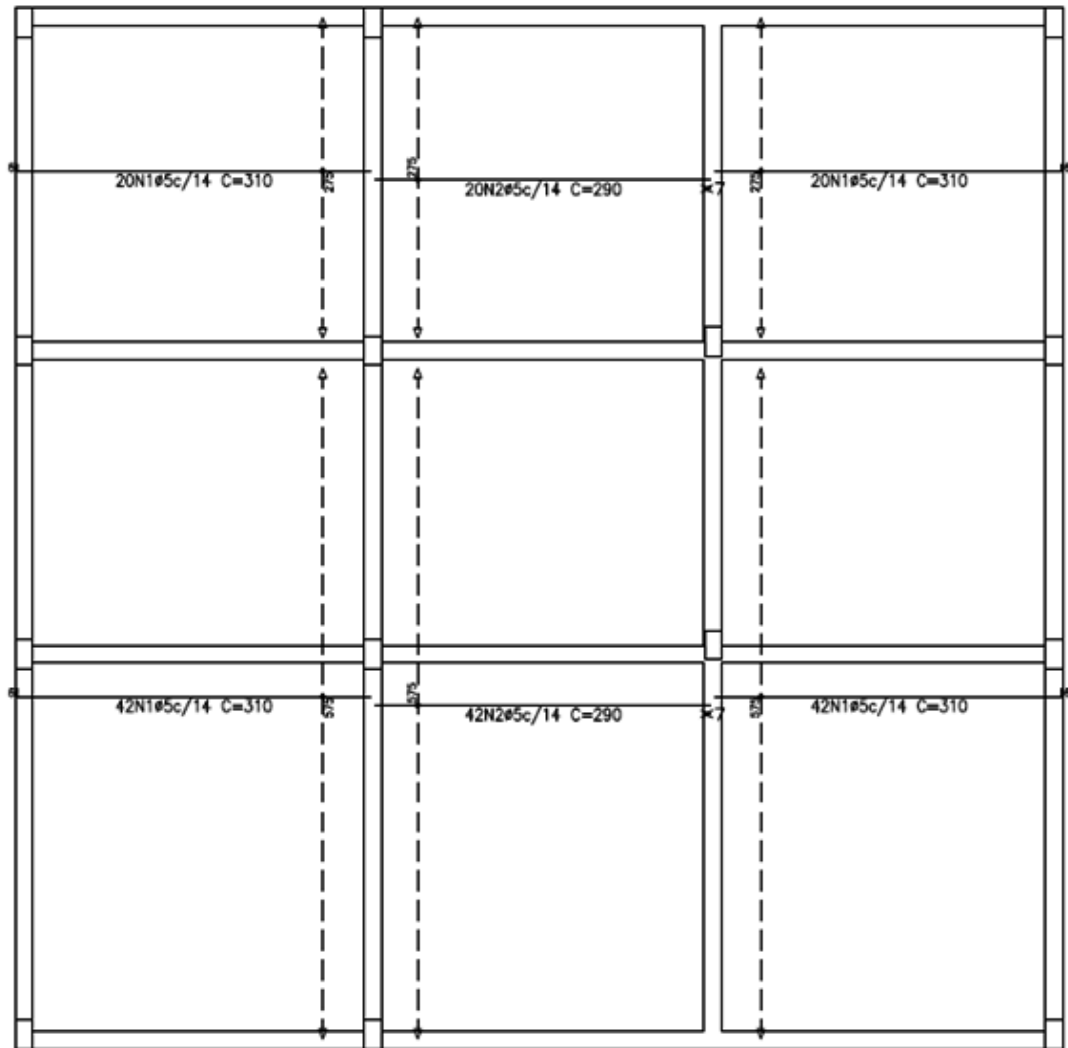
Consumo de aço da construção convencional

Nesse anexo encontra-se maiores informações da análise estrutural realizada no *software Cypecad*, onde se obteve os índices de consumo de aço da construção convencional para análise comparativa com o modelo proposto. Apresenta-se nas FIG. C.1 a C.5 o detalhamento da estrutura da laje, nas FIG. C.6 a C.11 o detalhamento da estrutura das vigas e nas FIG. C.12 e C.13 o detalhamento dos pilares. Nas Tabelas C.1 a C.9 apresenta-se o consumo de aço da estrutura da laje, vigas e pilares.



Piso 1
 Formas
 Concreto: C20, em geral
 Escala: 1:50

FIGURA C.1 – Projeto estrutural

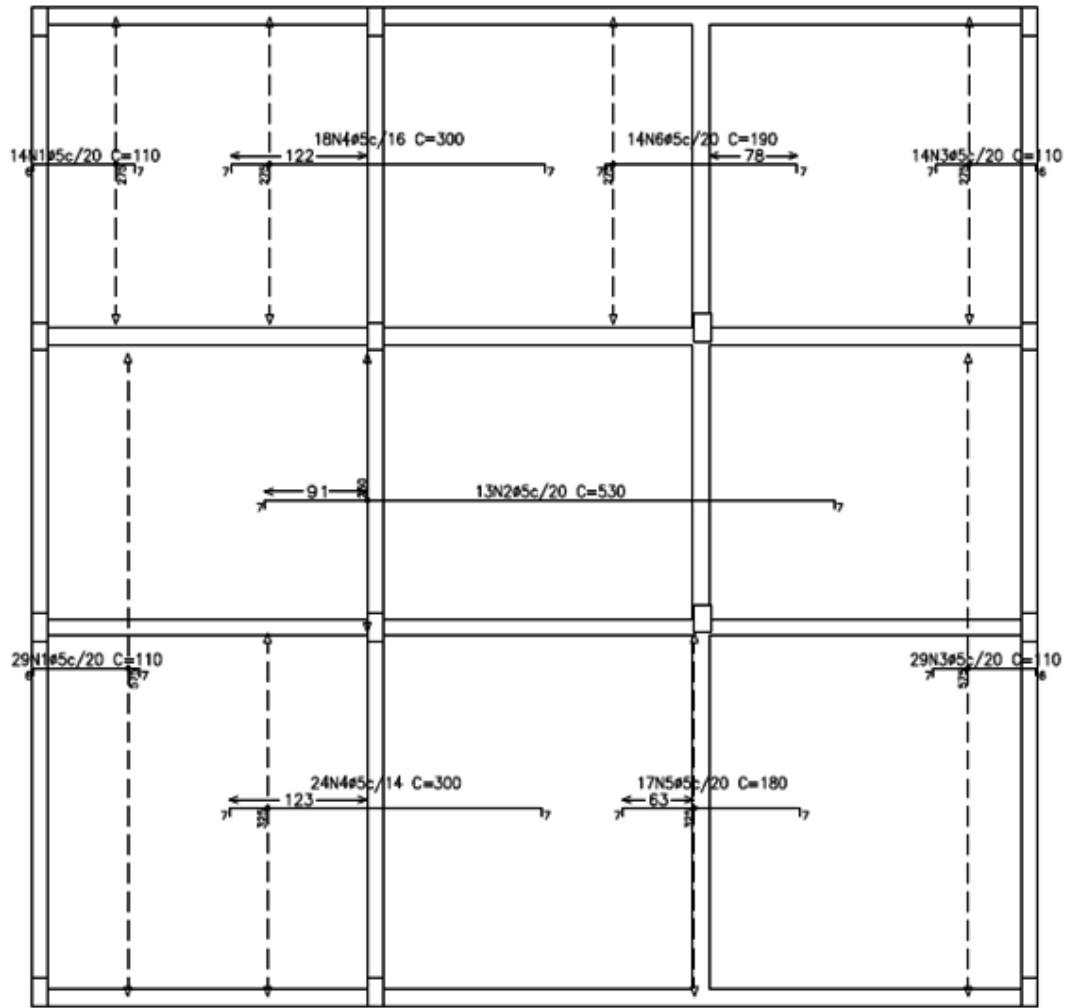


Piso 1
 Armadura longitudinal inferior
 Concreto: C20, em geral
 CA-50-A e CA-60-B

FIGURA C.2 – Detalhe da armadura longitudinal inferior da estrutura da laje

Tabela C.1 – Consumo de aço da laje – Armadura longitudinal inferior

Elemento	Pos.	Diam.	Q.	Dob. (cm)	Reta (cm)	Dob. (cm)	Comp. (cm)	Total (cm)	CA-50-A (kg)	CA-60-B (kg)
Armadura longitudinal inferior	1	ø5	124	6	304		310	38440		60.4
	2	ø5	62		290		290	17980		28.2
Total+10%:										97.5
ø5:									0.0	97.5
Total:									0.0	97.5

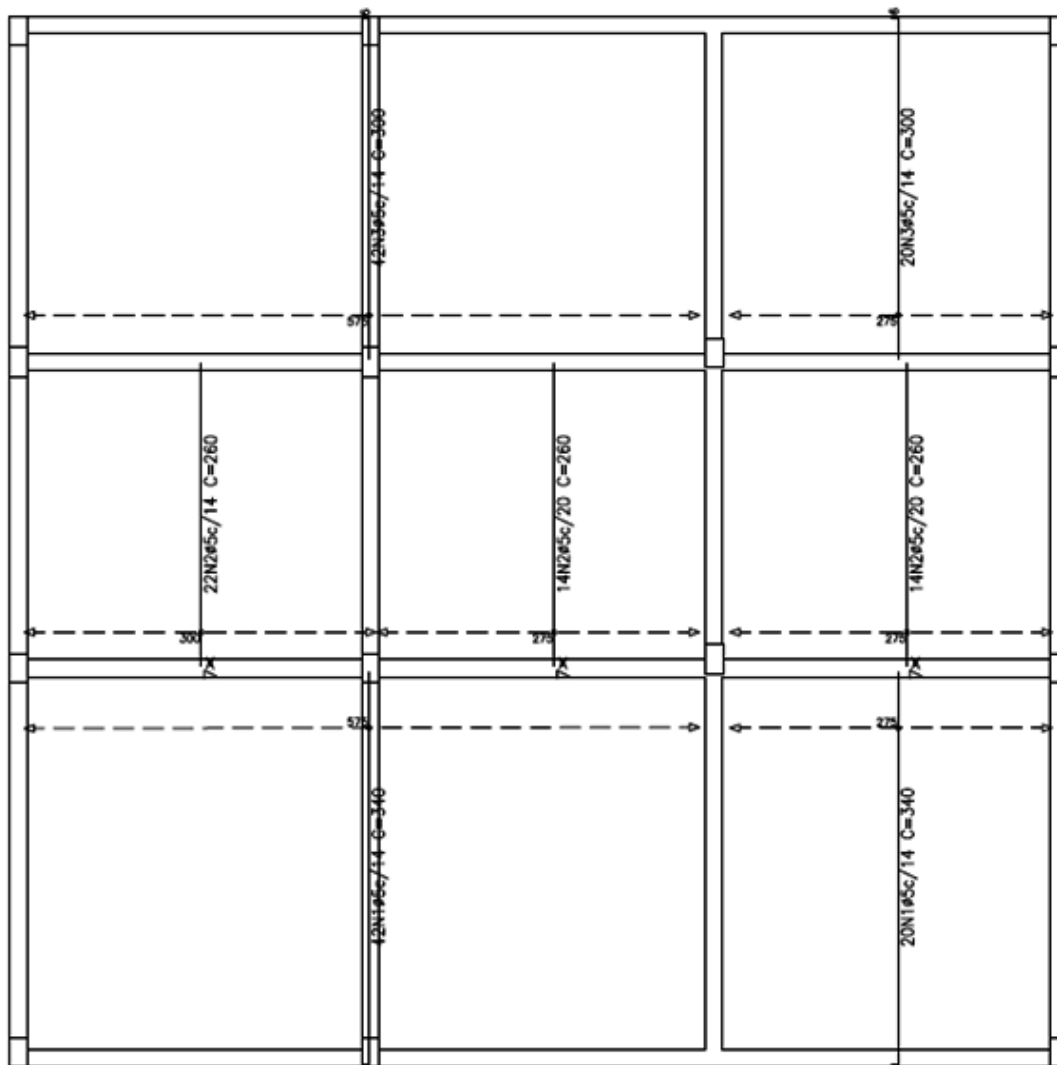


Piso 1
 Armadura longitudinal superior
 Concreto: C20, em geral
 CA-50-A e CA-60-B

FIGURA C.3 – Detalhe da armadura longitudinal superior da estrutura da laje

Tabela C.2 – Consumo de aço da laje – Armadura longitudinal superior

Elemento	Pos.	Diam.	Q.	Dob. (cm)	Reta (cm)	Dob. (cm)	Comp. (cm)	Total (cm)	CA-50-A (kg)	CA-60-B (kg)
Armadura longitudinal superior	1	Ø5	43	6	97	7	110	4730		7.4
	2	Ø5	13	7	516	7	530	6890		10.8
	3	Ø5	43	7	97	6	110	4730		7.4
	4	Ø5	42	7	286	7	300	12600		19.8
	5	Ø5	17	7	166	7	180	3060		4.8
	6	Ø5	14	7	176	7	190	2660		4.2
Total+10%:										59.8
Ø5:									0.0	59.8
Total:									0.0	59.8



Piso 1
 Armadura transversal inferior
 Concreto: C20, em geral
 CA-50-A e CA-60-B

FIGURA C.4 – Detalhe da armadura transversal inferior da estrutura da laje

Tabela C.3 – Consumo de aço da laje – Armadura transversal inferior

Elemento	Pos.	Diam.	Q.	Dob. (cm)	Retã (cm)	Dob. (cm)	Comp. (cm)	Total (cm)	CA-50-A (kg)	CA-60-B (kg)
Armadura transversal inferior	1	ø5	62	6	334		340	21080		33.1
	2	ø5	50		260		260	13000		20.4
	3	ø5	62	6	294		300	18600		29.2
Total+10%:										91.0
ø5:									0.0	91.0
Total:									0.0	91.0

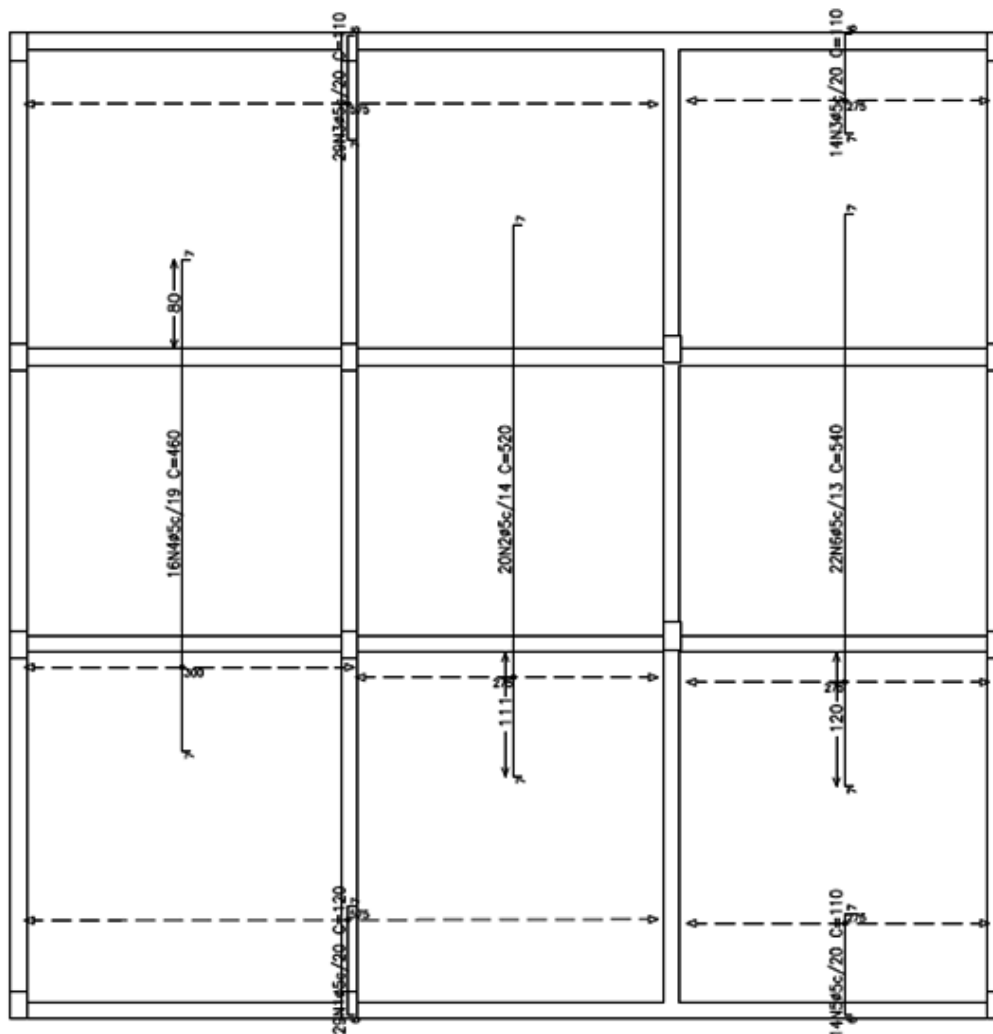
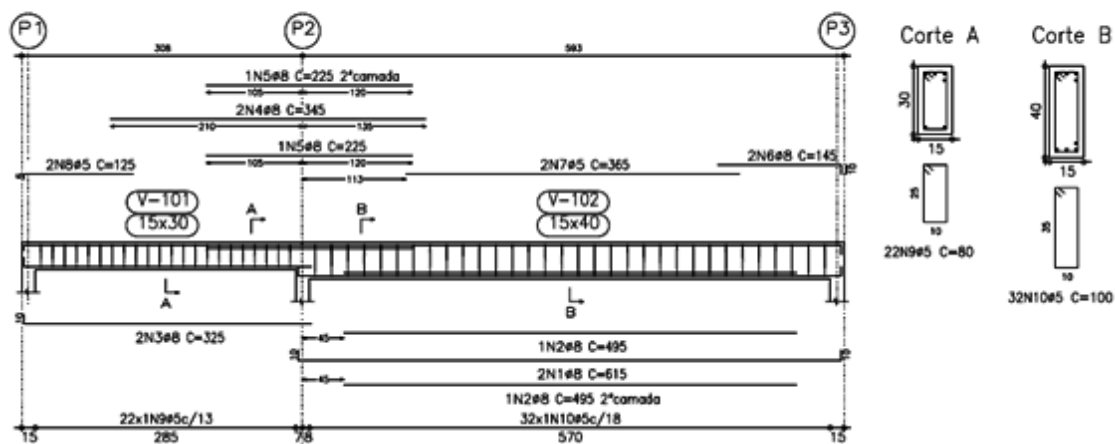


FIGURA C.5 – Detalhe da armadura transversal superior da estrutura da laje

Tabela C.4 – Consumo de aço da laje – Armadura transversal superior

Resumo Aço		Comp. total		Peso+10%		Piso 1				
Piso 1		(m)		(kg)		Armadura transversal superior				
Armadura transversal superior						Concreto: C20, em geral				
CA-60-B		Ø5		393.9		68		CA-50-A e CA-60-B		
Elemento	Pos.	Diam.	Q.	Dob. (cm)	Reta (cm)	Dob. (cm)	Comp. (cm)	Tota (cm)	CA-50-A (kg)	CA-60-B (kg)
Armadura transversal superior	1	Ø5	29	6	107	7	120	3480		5.5
	2	Ø5	20	7	506	7	520	10400		16.3
	3	Ø5	43	7	97	6	110	4730		7.4
	4	Ø5	16	7	446	7	460	7360		11.6
	5	Ø5	14	6	97	7	110	1540		2.4
	6	Ø5	22	7	526	7	540	11880		18.7
Total+10%:										68.1
Ø5:								0.0		68.1
Total:								0.0		68.1

V 1
Escala 1:50

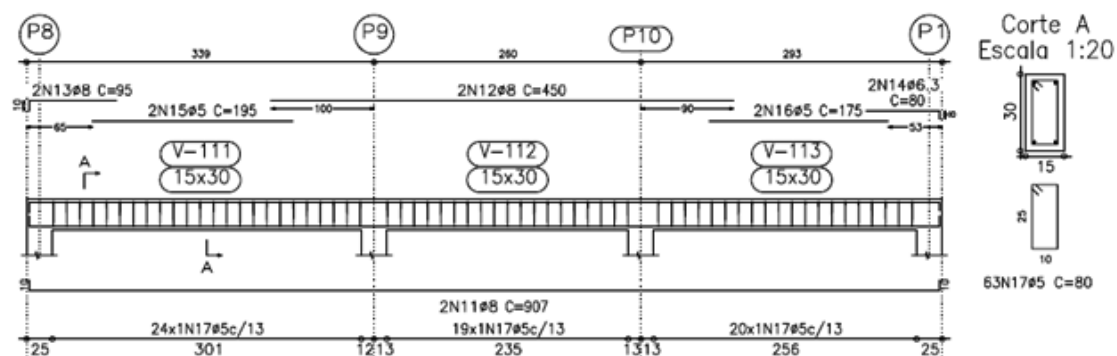


Piso 1
Desenho de vigas
Concreto: C20, em geral
Aço: CA-50-A e CA-60-B

Observação:
V1 = V4

FIGURA C.6 – Detalhe da viga 1

V 5
Escala 1:50



Piso 1
Desenho de vigas
Concreto: C20, em geral
Aço: CA-50-A e CA-60-B

FIGURA C.7 – Detalhe da viga 5

Tabela C.5 – Consumo de aço das vigas 1 e 5

Elemento	Pos.	Diam.	Q.	Dob. (cm)	Reta (cm)	Dob. (cm)	Comp. (cm)	Total (cm)	CA-50-A (kg)	CA-60-B (kg)	
V 1	1	Ø8	2	10	595	10	615	1230	4.8		
	2	Ø8	2		495		495	990	3.9		
	3	Ø8	2	10	315		325	650	2.6		
	4	Ø8	2		345		345	690	2.7		
	5	Ø8	2		225		225	450	1.8		
	6	Ø8	2		135	10	145	290	1.1		
	7	Ø5	2		365		365	730		1.1	
	8	Ø5	2	6	119		125	250		0.4	
	9	Ø5	22				80	1760		2.8	
	10	Ø5	32				100	3200		5.0	
Total+10%:									18.6	10.2	
V 5	11	Ø8	2	10	887	10	907	1814	7.1		
	12	Ø8	2		450		450	900	3.5		
	13	Ø8	2	10	85		95	190	0.7		
	14	Ø6.3	2		72	8	80	160	0.4		
	15	Ø5	2		195		195	390		0.6	
	16	Ø5	2		175		175	350		0.5	
	17	Ø5	63				80	5040		7.9	
Total+10%:									12.9	9.9	
									Ø5:	0.0	20.1
									Ø6.3:	0.5	0.0
									Ø8:	31.0	0.0
									Total:	31.5	20.1

Resumo Aço Piso 1 Vigas	Comp. total (m)	Peso+10% (kg)	Total
CA-50-A Ø6.3	9.3	3	
Ø8	240.3	104	
Ø10	27.6	19	126
CA-60-B Ø5	458.0	79	79
Total			205

V 2

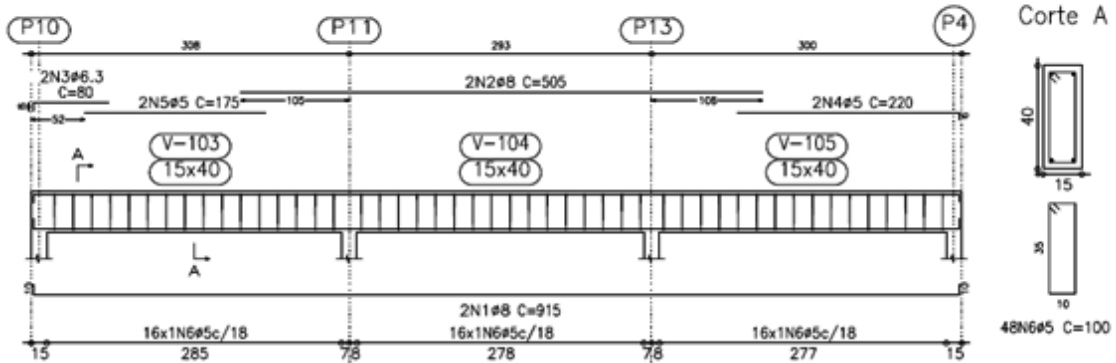


FIGURA C.8 – Detalhe da viga 2

V 3

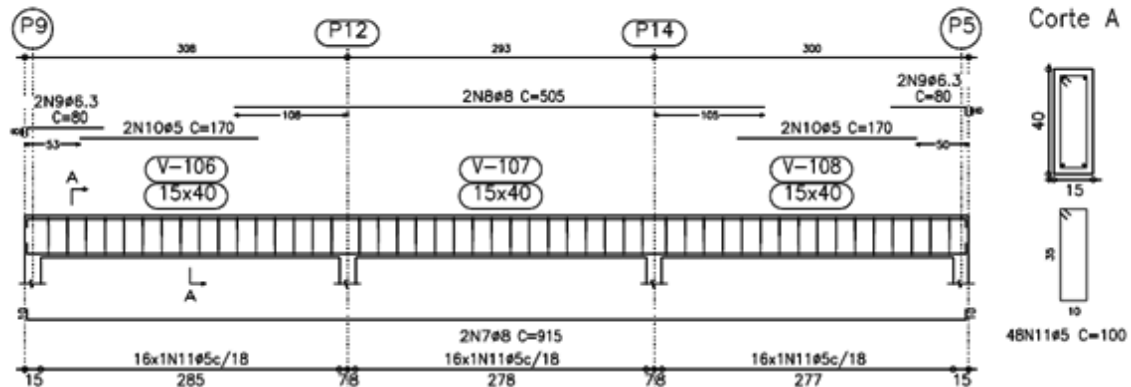
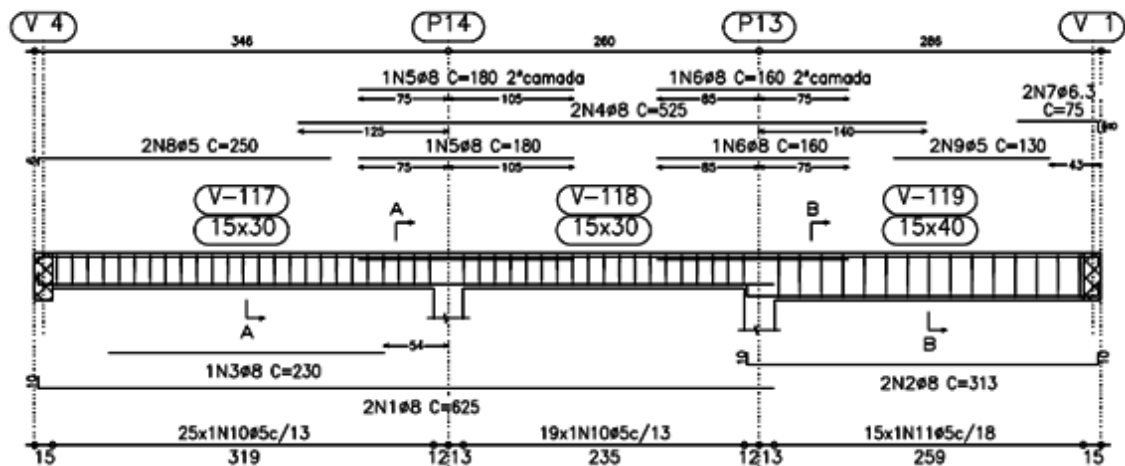


FIGURA C.9 – Detalhe da viga 3

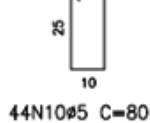
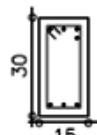
Tabela C.6 – Consumo de aço das vigas 2 e 3

Elemento	Pos.	Diam.	Q.	Dob. (cm)	Retã (cm)	Dob. (cm)	Comp. (cm)	Total (cm)	CA-50-A (kg)	CA-60-B (kg)
V 2	1	ø8	2	10	895	10	915	1830	7.2	
	2	ø8	2		505		505	1010	4.0	
	3	ø6.3	2	8	72		80	160	0.4	
	4	ø5	2		214	6	220	440		0.7
	5	ø5	2		175		175	350		0.5
	6	ø5	48				100	4800		7.5
Total+10%:									12.8	9.6
V 3	7	ø8	2	10	895	10	915	1830	7.2	
	8	ø8	2		505		505	1010	4.0	
	9	ø6.3	4	8	72		80	320	0.8	
	10	ø5	4		170		170	680		1.1
	11	ø5	48				100	4800		7.5
Total+10%:									13.2	9.5
Piso 1								ø5:	0.0	19.1
Desenho de vigas								ø6.3:	1.4	0.0
Concreto: C20, em geral								ø8:	24.6	0.0
Aço: CA-50-A e CA-60-B								Total:	26.0	19.1

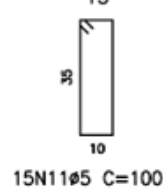
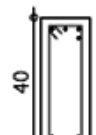
V 7



Corte A



Corte B



Observação:
V7 = V6

FIGURA C.10 – Detalhe da viga 7

Elemento	Pos.	Diam.	Q.	Dob. (cm)	Retã (cm)	Dob. (cm)	Comp. (cm)	Total (cm)	CA-50-A (kg)	CA-60-B (kg)
V 7	1	ø8	2	10	615		625	1250	4.9	
	2	ø8	2	10	293	10	313	626	2.5	
	3	ø8	1		230		230	230	0.9	
	4	ø8	2		525		525	1050	4.1	
	5	ø8	2		180		180	360	1.4	
	6	ø8	2		160		160	320	1.3	
	7	ø6.3	2		67	8	75	150	0.4	
	8	ø5	2	6	244		250	500		0.8
	9	ø5	2		130		130	260		0.4
	10	ø5	44				80	3520		5.5
	11	ø5	15				100	1500		2.4
Total+10%:									17.1	10.0
ø5:									0.0	10.0
ø6.3:									0.5	0.0
ø8:									16.6	0.0
Total:									17.1	10.0

Tabela C.7 – Consumo de aço da viga 7

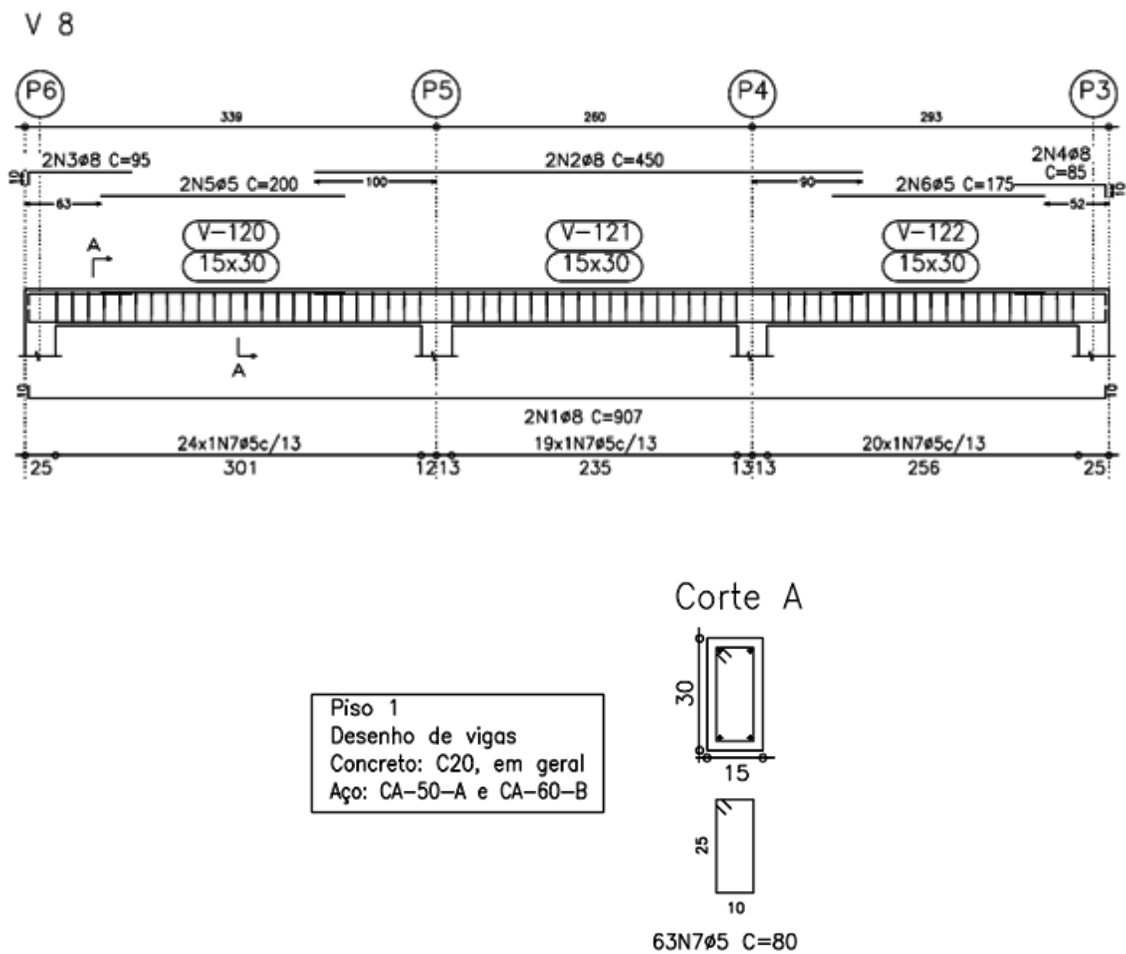


FIGURA C.11 – Detalhe da viga 8

Tabela C.8 – Consumo de aço da viga 8

Elemento	Pos.	Diam.	Q.	Dob. (cm)	Reta (cm)	Dob. (cm)	Comp. (cm)	Total (cm)	CA-50-A (kg)	CA-60-B (kg)	
V 8	1	ø8	2	10	887	10	907	1814	7.1		
	2	ø8	2		450		450	900	3.5		
	3	ø8	2	10	85		95	190	0.7		
	4	ø8	2		75	10	85	170	0.7		
	5	ø5	2		200		200	400		0.6	
	6	ø5	2		175		175	350		0.5	
	7	ø5	63				80	5040		7.9	
Total+10%:									13.2	9.9	
									ø5:	0.0	9.9
									ø8:	13.2	0.0
									Total:	13.2	9.9

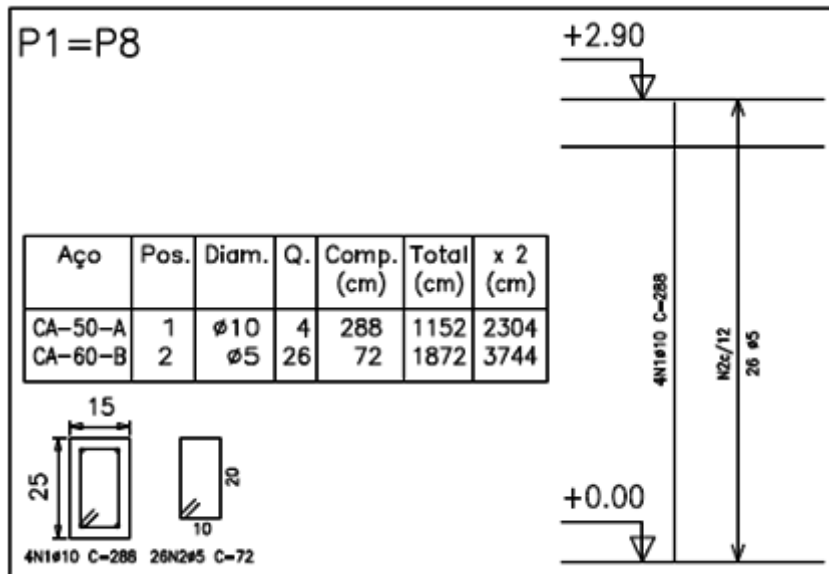


FIGURA C.12 – Detalhe dos pilares 1 e 8

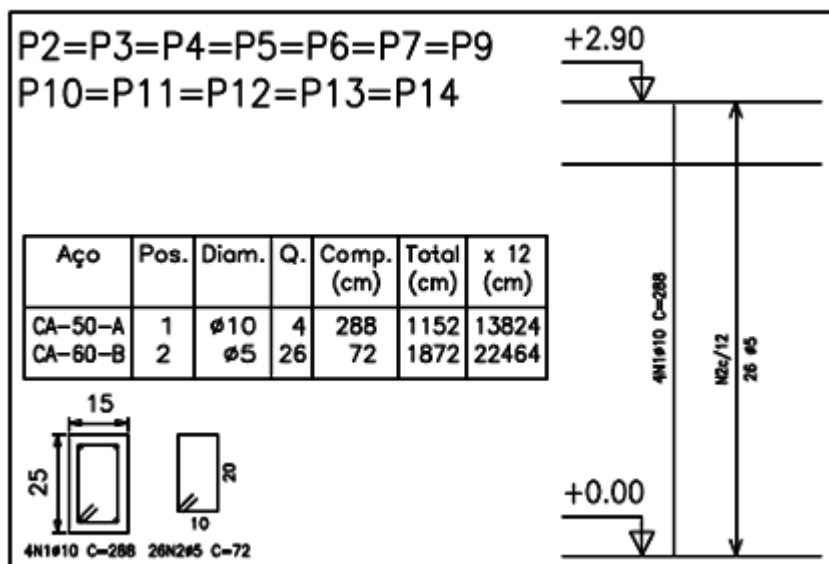


FIGURA C.13 – Detalhe dos pilares 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13 e 14

Tabela C.9 – Consumo de aço dos pilares

Resumo Aço Piso 1 Pilares	Comp. total (m)	Peso+10% (kg)	Total
CA-50-A Ø10	161.3	111	111
CA-60-B Ø5	262.1	45	45
Total			156

Pilares que terminam em
Piso 1
Concreto: C20, em geral
Aço: CA-50-A e CA-60-B

ANEXO D

Memorial de cálculo da otimização da seção dos perfis dos pórticos de estabilização bidirecionais

Nesse anexo encontra-se o memorial de cálculo da otimização da seção dos pórticos de estabilização bidirecionais feitos após os resultados obtidos da análise estrutural.

Dimensionamentos dos pórticos de estabilização bidirecionais

ABNT – Associação Brasileira de normas técnicas. NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Pág. 18 Item 7.2.3 Perfis tubulares com seção transversal circular.

A flambagem local de perfis tubulares com seção circular deve ser considerada por meio das propriedades efetivas da seção, conforme a) e b).

a) Cálculo de resistência; para perfis tubulares com seção transversal circular submetidos à compressão, deve ser considerada a redução de sua resistência, provocada pela flambagem local, mediante o cálculo da área efetiva da seção:

$$A_{ef} = \left[1 - (1 - 0,5 A f_y / N_e) \left(1 - \frac{A_o}{A} \right) \right] A \leq A \quad (A.1)$$

Onde:

A = área bruta da seção transversal do tubo;

$$A_o = (0,037tE/Df_y + 0,667)A \leq A \quad \text{para} \quad \frac{D}{t} \leq 0,44(E f_y)$$

D = diâmetro externo do tubo;

N_e = é a força normal de flambagem elástica da barra;

t = é a espessura da parede do tubo;

b) Cálculos:

7.7 – Barras submetidas à compressão centrada

7.7.1 – Generalidades (página. 22)

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{e,rd}$ deve ser tomada como o menor valor calculado em 7.7.2 e 7.7.3.

7.7.2 Flambagem da barra por flexão, por torção ou por flexo-torção.

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{e,rd}$ deve ser calculada por:

$$N_{e,rd} = \rho A_{ef} \cdot f_y (\gamma = 1,1)$$

ρ é o fator de redução associado à flambagem, apresentado na tabela 8 ou calculado por:

$$\rho = \frac{1}{\beta + (\beta^2 - \lambda_o^2)^{0,5}} \leq 1,0$$

$$\beta = 0,5 [1 + \alpha (\lambda_o - 0,2) + \lambda_o^2]$$

Onde:

α é o fator de imperfeição inicial. Nos casos de flambagem por flexão, os valores de α variam de acordo com o tipo de seção e eixo de flambagem, conforme a tabela 7, sendo:

curva a : $\alpha = 0,21$

curva b : $\alpha = 0,34$

curva c : $\alpha = 0,49$

Nos casos de flambagem por torção ou por flexo-torção, deve-se tomar a curva b.

λ_o é o índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas, dado por:

$$\lambda_o = \left[A_{ef} \cdot \frac{f_y}{N_e} \right]^{0,5}$$

Onde:

A_{ef} é a área efetiva da seção transversal de barra, calculada com base nas larguras efetivas dos elementos, conforme 7.2, adotando $\sigma = \rho \cdot f_y$. Nesse caso ρ pode ser determinado de forma aproximada, tomando-se diretamente $A_{ef} = A$ para o cálculo de λ_o , dispensando processo iterativo.

N_e é a força normal de flambagem elástica da barra, conforme 7.7.2.1, 7.7.2.2 ou 7.7.2.3 (pág. 23)

Pág. 26:

7.7.2.1. Perfis com dupla simetria ou simétricos em relação a um ponto.

A força normal de flambagem elástica N_e é o menor valor entre os obtidos em a), b) e c):

a) força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo principal K :

$$N_{ex} = \frac{\tau^2 E I_x}{(K_x l_x)^2}$$

b) força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo principal y :

$$N_{ey} = \frac{\tau^2 E I_y}{(K_y l_y)^2}$$

c) força normal de flambagem elástica por torção :

$$N_{et} = \frac{1}{\pi_o^2} \left[\frac{\pi^2 F C_w}{(K_t l_t)^2} + G I_t \right]$$

Onde:

C_w = é a constante de empenamento da seção;

E = é o módulo de elasticidade;

G = é o módulo de elasticidade transversal;

I_t = é o momento de inércia à torção uniforme;

$K_x l_x$ = é o comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo x ;

$K_y l_y$ = é o comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo y ;

$K_t l_t$ = é o comprimento efetivo de flambagem por torção. Quando não houver garantia de impedimento ao empenamento, deve-se tomar $K_t = 1,0$;

π_o = é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção, dado por:

$$\pi_o = [\pi_x^2 + \pi_y^2 + x_o^2 + y_o^2]^{0,5}$$

Onde:

$\pi_x ; \pi_y$ são os raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia x e y respectivamente;

$x_o ; y_o$ são as coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais x e y , respectivamente, em relação ao centróide da seção.

Propriedades mecânicas do Aço-Carbono: NBR 8800/86

(pág. 113)

- Limite de escoamento e resistência à torção.

Aço-Carbono A-36: $f_y = 250 \text{ MPa}$.

- Módulo de elasticidade longitudinal: NBR 8800/86

$E = 250.000 \text{ MPa}$.

(pág. 14)

$$Aef = \left[1 - \left(1 - 0,5 A f_y / N_e \right) \left(1 - \frac{A_o}{A} \right) \right] A \leq A$$

– Espessura do tubo = 5 mm

- Diâmetro externo = 168,30 mm = 0,16830 m
- Peso linear = 20,58 Kgf/m = 205,8 N/m
- Peso específico do aço = NBR 8800/86 (pág. 14)

$$\gamma_a = 77 \text{ KN/m}^3 = 7.700 \text{ KN/m}^3 = 7.700 \text{ Kgf/m}^3$$

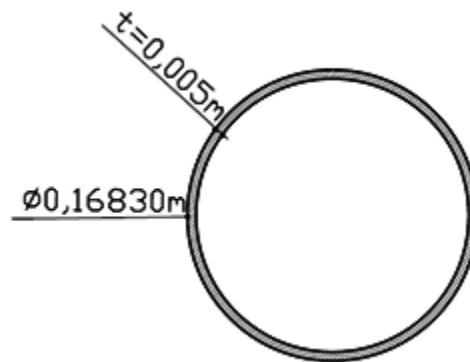


FIGURA D.1 – Seção transversal

$$2\pi R \cdot t = 2\pi \left(\frac{0,16830}{2} \right) \cdot 0,005 = 0,00264365 \text{ m}^2$$

$$\gamma \cdot S = \text{peso/m linear} = 7.700 \times 0,0264365 = 20,3561 \text{ Kgf/m}$$

$$A = 2\pi \left(\frac{0,16830}{2} \right) \cdot 0,05 = 0,00264365 \text{ m}^2$$

$$Aef = \left[1 - \left(1 - 0,5 \times 0,0264365 \times \frac{250 \times 10^6}{79681952,82} \right) \left(1 - \frac{A_o}{A} \right) \right] A \leq A$$

$$N_e = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x l_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 205.000 \times 3,938277939 \times 10^{-5}}{(1 \times 1,0)^2}$$

$$N_e = 79681952,82 \text{ N}$$

$$I_x = \frac{\pi r^4}{4} = \pi \frac{(0,16830/2)^4}{4}$$

$$I_x = 3,938277939 \times 10^{-5}$$

$$A_o = (0,037 t E/f_y + 0,667)A \leq A \quad \text{para} \quad \frac{D}{t} \leq 0,44 (E \cdot f_y)$$

$$\frac{16.830}{0,005} = 3.366.000$$

$$0,44(205.000 \times 10^6 \times 250 \times 10^6) = 5,12 \times 10^{19} \quad \rightarrow \quad (\text{passa})$$

$$A_o = (0,037 \times 0,005 \times 205.000 \times 10^6 / 205 \times 10^6 + 0,667) \times 0,00264365$$

$$A_o = 0,002164$$

$$A_{ef} = \left[1 - (1 - 0,9585280935) \left(1 - \frac{0,002164}{0,00264365} \right) \right] \times 0,00264356$$

$$A_{ef} = [1 - 0,04114719065(1 - 0,1823162668)] \times 0,00264356$$

$$A_{ef} = 0,9663565208$$

$$N_{cd,Rd} = \rho \cdot A_{ef} \cdot f_y \quad (\gamma = 1,1)$$

$$\rho = \frac{1}{\beta + (\beta^2 - \lambda_o^2)^{0,5}} \leq 1,0$$

$$\beta = 0,5 [1 + \alpha (\lambda_o - 0,2) + \lambda_o^2] \quad \lambda_o = \left[\frac{A_o \times f_y}{N_e} \right]^{0,5}$$

$$\lambda_o = \left[\frac{0,002164 \times 250 \times 10^6}{79681952,82} \right]^{0,5} = 0,003394746118$$

$$\lambda_o = 33,94746153$$

$$\beta = 0,5 [1 + 0,21 (0,003394746118 - 0,2) + (0,003394746118)^2]$$

$$\beta = 0,5 [1 - 0,04 + 1,15 \times 10^{-5}]$$

$$\beta = 1,15243012 \times 10^{19}$$

$$\rho = \frac{1}{\beta + (\beta^2 - \lambda_o^2)^{0,5}} \leq 1,0$$

$$\rho = \frac{1}{0,4800575 + [(0,4800575)^2 - 0,03391746118]^{0,5}}$$

$$\rho = \frac{1}{1,15243012 \times 10^{19} + [(1,15243012 \times 10^{19})^2 - (0,03391746118)^2]^{0,5}}$$

$$\rho = \frac{1}{(0,230443679)^{0,5}}$$

$$\rho = \frac{1}{0,1152218395}$$

$$\rho = 8,6789$$

$$\beta = 0,5 [1 + \alpha (\lambda_o - 0,2) + \lambda_o^2]$$

$$\beta = 0,5 [1 + 0,21 (33,94 - 0,2) + (33,94)^2]$$

$$\beta = 580,0045$$

$$\rho = \frac{1}{580 + [(580)^2 - (33,94)^2]^{0,5}} \leq 1,0$$

$$\rho = \frac{1}{580 + 167624,0382} \leq 1,0$$

$$\rho = 5,94516 \times 10^{-6} \leq 1,0$$

$$N_{cd,Rd} = \rho \cdot A_{ef} \cdot f_y = 5,94516 \times 10^{-6} \times 0,9663565208 \times 250 \times 10^6$$

$$N_{cd,Rd} = 1436,286N \quad \rightarrow \quad \text{Resistência do tubo}$$

Esforço atuante:

$$F_a = 177,023 \times 1,3 = 230,1299N$$

Onde:

1,3 é o coeficiente de ponderação das ações, NBR 14762 (ABNT, 2010), pág. 10.

$$F_a < N_{cd,Rd} \quad \rightarrow \quad \text{(passa)}$$

Pode-se escolher um perfil tubular mais leve, ou seja:

$$D_{externo} = 76,20\text{mm} \quad ; \quad t = 3\text{mm} \quad ; \quad p = 5,53 \text{ Kgf/m}$$

$$2\pi R \cdot t = 2\pi \left(\frac{0,0762}{2} \right) \cdot 0,003 = 0,007181 = 7,1816 \times 10^{-4}$$

$$pp = \gamma \cdot S = 7.700 \times 7,1816 \times 10^{-4} = 5,53 \text{ Kgf/m}$$

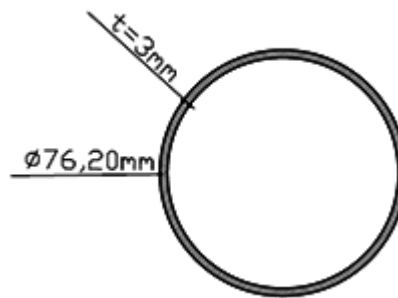


FIGURA D.2 – Seção transversal

$$Aef = \left[1 - \left(1 - 0,5 \times \frac{A \cdot f_y}{N_e} \right) \left(1 - \frac{A_o}{A} \right) \right] A \leq A$$

$$A = 7,1816 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_o = (0,037 t E / f_y + 0,667) \cdot A \quad \text{para} \quad \frac{D}{t} \leq 0,44 (E \cdot F_y)$$

$$\frac{D}{t} = \frac{0,076}{0,003} = 25,33 \quad ; \quad 0,44 \times 205.000 \times 10^6 \times 250 \times 10^6 = 2,25 \times 10^9$$

$$25,33 < 2,25 \times 10^9$$

$$A_o = (0,037 \times 0,003 \times 205.000 \times 10^6 / 250 \times 10^6 + 0,667) \cdot 7,1816 \times 10^{-4}$$

$$A_o = 5,44 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad \leftarrow \quad \underline{\text{correto}}$$

$$Aef = \left[1 - \left(1 - 0,5 \times 7,1816 \times 10^{-4} \times \frac{250 \times 10^6}{N_e} \right) \left(1 - \frac{5,44 \times 10^{-4}}{7,1816} \right) \right] \cdot 7,1816$$

$$N_e = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x l_x)^2}$$

$$I_x = \frac{\pi \cdot r^4}{4} = \frac{\pi \cdot (0,0762/2)^4}{4} = 1,654968 \times 10^{-6} \times 205.000 \times 10^6$$

$$N_e = \frac{\pi^2 \times 205.000 \times 10^6 \times 1,654968 \times 10^{-6}}{(1,0 \times 1,0)^2}$$

$$N_e = 339268,44N$$

$$Aef = \left[1 - \left(1 - 0,5 \times 7,1816 \times 10^{-4} \times \frac{250 \times 10^6}{339268,44} \right) \left(1 - \frac{5,44 \times 10^{-4}}{7,1816} \right) \right] \cdot 7,1816$$

$$Aef = [1 - (0,7354012651) \cdot (0,1391689874)] \cdot 7,1816$$

$$Aef = [1 - 0,1023450494] \cdot 7,1816$$

$$Aef = 6,44659$$

$$Aef \leq A$$

$$Aef = \left[1 - \left(1 - \frac{0,5 \times A \cdot f_y}{N_e} \right) \left(1 - \frac{A_o}{A} \right) \right]$$

$$Aef = \left[1 - \left(1 - 0,5 \times 7,1816 \times 10^{-4} \times \frac{250 \times 10^6}{339268,44} \right) \left(1 - \frac{5,44 \times 10^{-4}}{7,1816} \right) \right]$$

$$Aef = [1 - (1 - 0,2645987349)(1 - 0,7574913668)]$$

$$Aef = [1 - (0,7354012651)(0,2425086332)]$$

$$Aef = [1 - 0,1783411557]$$

$$Aef = 0,8216588443$$

$$Aef \leq A$$

$$Aef = 0,8216588443 \quad \left. \begin{array}{l} A > Aef \\ A = 5,44 \times 10^{-4} \end{array} \right\} \rightarrow \underline{\text{n\~{a}o passa}}$$

Refazendo os cálculos

$$A_{ef} = \left[1 - \left(1 - 0,5 x \frac{A \cdot f_y}{N_e} \right) \left(1 - \frac{A_o}{A} \right) \right] A \leq A$$

$$A = 2\pi r x t = 2\pi \left(\frac{0,0762}{2} \right) 0,003 = 7,1816 x 10^{-4}$$

$$A_o = (0,037 t E / D f_y + 0,667) \cdot A \leq A \quad \text{para} \quad \frac{D}{t} \leq 0,44 \left(\frac{E}{F_y} \right)$$

$$\frac{D}{t} = \frac{0,0762}{0,003} = 25,4 \quad ; \quad 0,44 \left(\frac{250.000 x 10^6}{250 x 10^6} \right) = 360,8$$

$$\frac{D}{t} \leq 0,44 \left(\frac{E}{F_y} \right)$$

$$A_o = \left(\frac{0,037 x 0,003 x 205.000 x 10^6}{0,0762 x 250 x 10^6} + 0,667 \right) x 7,1816 x 10^{-4} = 0,0013368$$

$$A_{ef} = \left[1 - \left(1 - 0,5 x 7,1816 x 10^{-4} x \frac{250 x 10^6}{N_e} \right) \left(1 - \frac{0,0013368}{7,1816 x 10^{-4}} \right) \right] x 7,1816 x 10^{-4}$$

$$N_e = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x l_x)^2}$$

$$I_x = \frac{\pi \cdot r^4}{4} = \frac{\pi \cdot (0,0762/2)^4}{4} = 1,654968 x 10^{-6}$$

$$N_e = \frac{\pi^2 x 205.000 x 10^6 x 1,65496 x 10^{-6}}{(1,0 x 1,0)^2}$$

$$N_e = 3.348.429,102N$$

$$A_{ef} = \left[1 - \left(1 - 0,5 \times \frac{7,1816 \times 10^{-4} \times 250 \times 10^6}{3.348.429,102} \right) \left(1 - \frac{0,0013368}{7,1816 \times 10^{-4}} \right) \right] \times 7,1816 \times 10^{-4}$$

$$A_{ef} = [1 - (1 - 0,0268095866)(1 - 1,8614)] \times 7,1816 \times 10^{-4}$$

$$A_{ef} = [1 - (0,9731904134)(1 - 1,8614)] \times 7,1816 \times 10^{-4}$$

$$A_{ef} = 0,001320197996 \quad ; \quad A = 5,44 \times 10^{-4}$$

$A_{ef} \leq A$; $A > A_{ef} \rightarrow$ não passa, mas como a diferença é pequena será considerado.

$$N_{cd,Rd} = \rho \cdot A_{ef} \cdot f_y$$

$$\rho = \frac{1}{\beta + (\beta^2 - \lambda_o^2)^{0,5}} \leq 1,0$$

$$\beta = 0,5 [1 + \alpha (\lambda_o - 0,2) + \lambda_o^2]$$

$$\lambda_o = \left[\frac{A_o \cdot f_y}{N_e} \right] = \left[\frac{0,0013368 \times 250 \times 10^6}{3.348.429,102} \right] = 0,0998079$$

$$\beta = 0,5 [1 + 0,21 (0,0998079 - 0,2) + (0,0998079)^2]$$

$$\beta = 0,494460638$$

$$\rho = \frac{1}{0,494460638 + [(0,494460638)^2 - (0,00998079)^2]^{0,5}}$$

$$\rho = \frac{1}{0,494460638 + [0,2345297056]^{0,5}}$$

$$\rho = \frac{1}{0,494460638 + 0,1172648528}$$

$$\rho = \frac{1}{0,494460638 + 0,1172648528}$$

$$\rho = \frac{1}{0,61172522328}$$

$$\rho = 1,6347208888 \rightarrow \text{não passa}$$

Pela tabela da pág.24 da norma tem-se para $\lambda_o = 0,0998 \cong 0,1$, $\rho = 1,0$, então:

$$N_{d,Rd} = \rho \cdot A_{ef} \cdot f_y$$

$$N_{d,Rd} = 1,0 \times 0,01320197996 \times 250 \times 10^6$$

$$N_{d,Rd} = 33004949,9N$$

$$F_a = 177,023 \times 1,3 = 230,1299N$$

O coeficiente de ponderação das ações (pág.10) da norma.

$$F_a < N_{d,Rd} \rightarrow \text{passa}$$

Consumo de aço para a residência em questão

Peso por metro linear de cada tubo:

$$p = 5,53Kgf/m$$

Solicitar o valor do raio e calcular os perímetros (l) dos arcos, multiplicar pelo “p” e depois dividir pela área total.

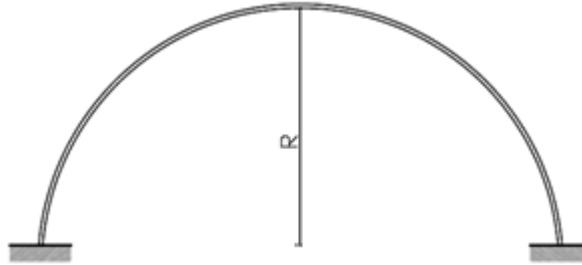


FIGURA D.3 – Elevação do pórtico

$$A_t = (9 \times 3,80) \times 2 + 2 \times 9 = 86,4 \text{ m}^2$$

$$\frac{p \cdot l}{A_T} = \frac{Kgf}{m^2}$$

Nova tentativa / novo redimensionamento:

$$D = 21,21 \text{ mm} = 0,02121 \text{ m}$$

$$t = 2,00 \text{ mm} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$A = 2\pi r t = 2\pi \left(\frac{0,02121}{2} \right) \times 2 \times 10^{-3} = 1,33 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{ef} = \left[1 - \left(1 - 0,5 \times \frac{A \cdot f_y}{N_e} \right) \left(1 - \frac{A_o}{A} \right) \right] \cdot A \leq A$$

$$A_o = (0,037 t E / D f_y + 0,667) \cdot A \leq A \quad \text{para} \quad \frac{D}{t} \leq 0,44 \left(\frac{E}{F_y} \right)$$

$$\frac{D}{t} = \frac{0,02121}{2 \times 10^{-3}} = 10,605 \quad ; \quad \frac{0,44 \times 250.000 \times 10^6}{250 \times 10^6} = 360,8$$

$10,605 \leq 0,44 \left(\frac{E}{F_y} \right) \rightarrow 10,605 < 360,8$, então:

$$A_o = \left(\frac{0,037 \times 2 \times 10^{-3} \times 205.000 \times 10^6}{0,02121 \times 250 \times 10^6} \right) \times 1,33 \times 10^{-4} = 3,805016 \times 10^{-4}$$

$$\frac{A_o}{A} = \left(\frac{3,805016 \times 10^{-4}}{1,33 \times 10^{-4}} \right) = 2,86091$$

$$A_{ef} = \left[1 - \left(1 - 0,5 \times \frac{1,33 \times 10^{-4} \times 250 \times 10^6}{N_e} \right) (1 - 2,86091) \right] \times 1,33 \times 10^{-4} \leq A$$

$$N_e = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x l_x)^2}$$

$$I_x = \frac{\pi \cdot r^4}{4} = \frac{\pi \cdot (0,02121/2)^4}{4} = 9,9341 \times 10^{-9}$$

$$N_e = \frac{\pi^2 \times 205.000 \times 10^6 \times 9,9341 \times 10^{-9}}{(1,0 \times 1,0)^2}$$

$$N_e = 20.099,3556 N$$

$$A_{ef} = \left[1 - \left(1 - 0,5 \times \frac{1,33 \times 10^{-4} \times 250 \times 10^6}{20.099,3556} \right) (1 - 2,86091) \right] \cdot 1,33 \times 10^{-4}$$

$$A_{ef} = [1 - (1 - 0,8271409458)(-1,86091)]. 1,33 \times 10^{-4}$$

$$A_{ef} = [1 + (0,178590542)(1,86091)]. 1,33 \times 10^{-4}$$

$$\left. \begin{aligned} A_{ef} &= 1,772013432 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \\ A &= 1,33 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned} \right\} \cong \text{iguais, consideramos que possa.}$$

$$N_{d,Rd} = \rho \cdot A_{ef} \cdot f_y$$

$$\rho = \frac{1}{\beta + (\beta^2 - \lambda_o^2)^{0,5}} \leq 1,0$$

$$\beta = 0,5 [1 + \alpha (\lambda_o - 0,2) + \lambda_o^2]$$

$$\lambda_o = \left[\frac{A_o \cdot f_y}{N_e} \right] = \left[\frac{3,805016 \times 10^{-4} \times 250 \times 10^6}{20.099,3556} \right] = 4,732758696$$

$$\beta = 0,5 [1 + 0,21 (4,732758696 - 0,2) + (4,732758696)^2]$$

$$\beta = 0,5 [24,3508842] = 12,1754421$$

$$\rho = \frac{1}{12,1754421 + [(12,1754421)^2 - (4,732758696)^2]^{0,5}} \leq 1,0$$

$$\rho = 8,21 \times 10^{-9} \leq 1,0 \rightarrow \text{passa}$$

$$N_{d,Rd} = \rho \cdot A_{ef} \cdot f_y$$

$$N_{d,Rd} = 8,21 \times 10^{-9} \times 1,33 \times 10^{-4} \times 250 \times 10^6$$

$$N_{d,Rd} = 2,729825 \times 10^{-4}$$

$$F_a = 177,023 \times 1,3 = 230,1299N$$

$$F_a < N_{d,Rd} \rightarrow \text{n\~{a}o passa}$$

Refazendo os cálculos:

$$D = 73,02 \text{ mm}$$

$$t = 2,25 \text{ mm}$$

$$p = 4,01 \text{ kgf/m}$$

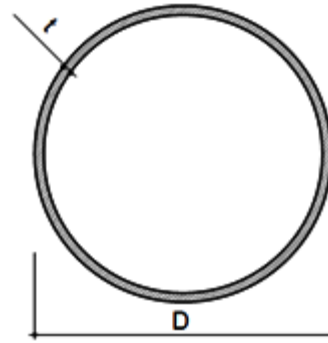


FIGURA D.4 – Seção transversal do perfil

$$A_{ef} = \left[1 - \left(1 - 0,5 \times \frac{A \cdot f_y}{N_e} \right) \left(1 - \frac{A_o}{A} \right) \right] \cdot A \leq A$$

$$A_o = (0,037 t E / D f_y + 0,667) \cdot A \leq A \quad \text{para} \quad \frac{D}{t} \leq 0,44 \left(\frac{E}{F_y} \right)$$

$$A = 2\pi r \times t = 2\pi \left(\frac{D}{2} \right) \times t = \pi (73,02 \times 10^{-3}) \cdot 2,25 \times 10^{-3}$$

$$A = 5,1614 \times 10^{-4}$$

$$A_o = \left[\left(\frac{0,037 \times 2 \times 10^{-3} \times 205.000 \times 10^6}{73,02 \times 10^{-3} \times 250 \times 10^6 + 0,667} \right) \times 5,1614 \times 10^{-4} \right] \times 5,1614 \times 10^{-4}$$

$$A_o = 2,88 \times 10^{-7} \leq 5,1614 \times 10^{-4} \rightarrow \underline{\text{passa}}$$

Observação:

$$\frac{D}{t} = \frac{0,037 \times 2 \times 10^{-3}}{2,25 \times 10^{-3}} = 32,4533$$

$$0,44 \times 250.000 \times 10^6 \times 250 \times 10^6 = 2,25 \times 10^{19}$$

} passa

$$A_{ef} = \left[1 - \left(1 - 0,5 x \frac{5,1614x10^{-4}x250x10^6}{N_e} \right) \left(1 - \frac{2,88x10^{-7}}{5,1614x10^{-4}} \right) \right] \cdot 5,1614x10^{-4} \leq A$$

$$N_e = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x l_x)^2}$$

$$N_e = \frac{\pi^2 x 205.000 x 10^6 x I_x}{(K_x l_x)^2} \quad ; \quad I_x = \frac{\pi \cdot r^4}{4} = \frac{\pi \cdot (73,02x10^{-3}/2)^4}{4} = 1,3955x10^6$$

$$N_e = \frac{\pi^2 x 205.000 x 10^6 x 1,3955x10^6}{(1,0x1,0)^2}$$

$$N_e = 2.823.471,753N$$

$$A_{ef} = \left[1 - \left(1 - 0,5 x 5,1614x10^{-4} x \frac{250x10^6}{2.823.471,753} \right) \left(1 - \frac{2,88x10^{-7}}{5,1614x10^{-4}} \right) \right] \cdot 5,1614x10^{-4} \leq A$$

$$A_{ef} = [1 - (0,02285041454) \cdot (0,9994420119)] \cdot 5,1614x10^{-4} \leq A$$

$$A_{ef} = [1 - (0,9771495855) \cdot (0,9994420119)] \cdot 5,1614x10^{-4} \leq A$$

$$1,2075432x10^{-5} \leq A = 5,1614x10^{-4} \rightarrow \underline{\text{passa}}$$

$$N_{d,Rd} = \rho \cdot A_{ef} \cdot f_y$$

$$\rho = \frac{1}{\beta + (\beta^2 - \lambda_o^2)^{0,5}} \leq 1,0$$

$$\beta = 0,5 [1 + \alpha (\lambda_o - 0,2) + \lambda_o^2]$$

$$\lambda_o = \left[\frac{A_o \cdot f_y}{N_e} \right] = \left[\frac{5,1611x10^{-4}x250x10^6}{2.823.471,753} \right] = 0,04570082908$$

$$\beta = 0,5 [1 + 0,21 (\lambda_o - 0,2) + \lambda_o^2] =$$

$$\beta = 0,5 [1 + 0,21(0,04570082908 - 0,2) + (0,04570082908)^2]$$

$$\beta = 0,48484287$$

$$N_{d,Rd} = \rho \cdot A_{ef} \cdot f_y$$

$$\rho = \frac{1}{0,48484287 + [(0,48484287)^2 - (0,04570082908)^2]}$$

$$\rho = \frac{1}{0,7178269128} = 1,393093491$$

$$N_{d,Rd} = 1,393093491 \times 1,8075432 \times 10^{-5} \times 250 \times 10^6 = 4.205,55143N$$

$$F_a = 177,023 \times 1,3 = 230,1299N$$

$$F_a < N_{d,Rd} \quad \rightarrow \quad \underline{\text{passa}}$$

Consumo de aço para a residência em questão:

- $p = 4,01 \text{ Kgf/m}$
- perímetro de cada arco = $1460,7 \text{ cm} = 14,607 \text{ m}$
- número de tubos = 4
- perímetro total = $14,607 \times 4 = 58,428 \text{ kgf/m}$

$$C = p \times 58,428 = 3.413,83 \text{ Kgf}$$

$$C/m^2 = \frac{3.413,83 \text{ Kgf}}{86,4m^2} = 3.979513889 \text{ Kgf/m}^2$$

Verificação considerando efeitos combinados: $pp + vento$

$$1,3 \gamma_g + 1,4 \gamma_v$$

$$F_a = 177,023 \times 1,3 = 2392 \times 1,4 = 3.578,9299N$$

$$N_{d,Rd} = 4.205,55143N$$

$$F_a = N_{d,Rd} \rightarrow \underline{\text{passa}}$$

Então, o perfil de $t = 2,25$ mm e $D = 73,02$ mm e $pp = 4,01$ kgf/m, passa. E o consumo total de aço para a residência será: $C = 3,9795$ kgf/m², considerando-se a combinação de ações peso próprio, sobrecarga e vento.

Obs.: Para a análise da estabilidade dos arcos considerou-se sempre módulos ou trechos de 1 m de tubo.