



RELATÓRIO – EXERCÍCIO 2

PEF2602 – Estruturas na Arquitetura II: Sistemas Reticulados

Prof. Dr. Ruy Marcelo Pauletti

Prof. Dr. Dimas Ribeiro Bettioli

Grupo 16



Ayumi Tsuru

Nº USP: 7598772



Belisa de Quadros Corrêa Godoy

Nº USP: 6848128



Bruna Watanabe Murakami

Nº USP:



Guilherme Torres Martins

Nº USP: 7599022

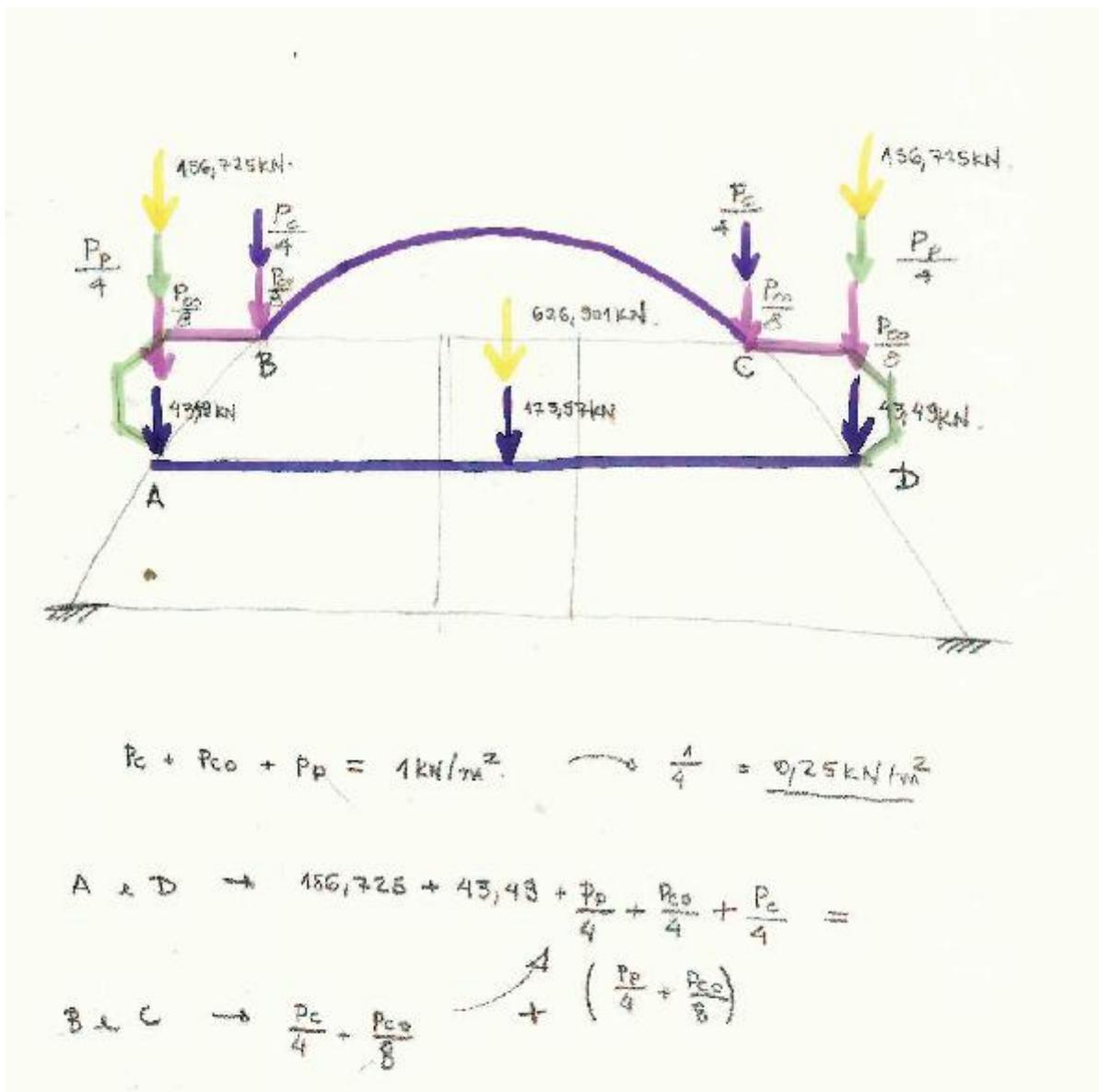
Sumário

1. Apresentação	2
2. Introdução à estrutura	4
2.2. Aspectos estruturais	11
3. Primeiro modelo de análise	17
3.1. Modelagem do arco	17
3.2. Cálculo das áreas de influência e dos carregamentos.....	18
3.3. Tipos de carregamentos	20
3.3.1. Carregamento uniforme	20
3.3.2. Carregamento não uniforme	24
3.4. Comparação entre os diagramas	28
4. Pré-dimensionamento.....	29
5. Segundo modelo de análise	33
5.1. Modelagem do arco treliçado.....	33
5.2. Aplicação dos carregamentos	36
5.3. Secções e diagramas de esforços solicitantes	47
6. Estimativas de custo.....	56
6.1. Percurso metodológico.....	56
6.2. Cálculo da massa do aço	59
6.3. Estimativa do preço da estrutura	61
7. Considerações finais.....	62
8. Referências Bibliográficas	64
9. Diagramas de esforços solicitantes e deformadas – segundo modelo de análise .	65

1. Apresentação

O presente relatório tem por objetivo a resolução do segundo exercício em grupo proposto pela disciplina *PEF2602 – Estruturas na Arquitetura II: Sistemas Reticulados* e tem como objeto de estudo o Memorial do ET de Varginha, obra inacabada localizada na cidade homônima em Minas Gerais. As possibilidades de resolução e de apresentação levantadas pelo enunciado do exercício garantiram abordagens múltiplas, de maneira que lançou-se mão de uma breve pesquisa histórica, de análises da estrutura a partir de diversas hipóteses, do pré-dimensionamento – de forma a podermos inferir sobre as características de alguns elementos em aço – e da estimativa de custos, que nos forneceu um parâmetro, ainda que grosseiro, para a análise do orçamento integral da obra.

O formato amplo do exercício, e o próprio ensejo criativo intrínseco aos estudantes de arquitetura, também induziram a uma diversidade de recursos para a compreensão da estrutura e para a apresentação gráfica das hipóteses levantadas. Por exemplo, a inicial dificuldade de entendimento da relação entre os elementos da estrutura e da tradução gráfica da descrição contida no enunciado resolveu-se a partir de croquis:



9/20/19

⊙ pré-dimensionamento das vigas:

carregamento próprio da viga adotado: 1 kN/m^2

considerar o raio de 4 m^2 (dois semicírculos)

1 253 302

$$A = \pi \cdot 4^2 \cdot 2 = 100,53 \text{ m}^2$$

1 633 742

$$q = 373,04 \text{ kN}$$

carregamento próprio e sobrecargas no arço (kN/m^2 (arço))

$$\frac{x}{2} + y$$

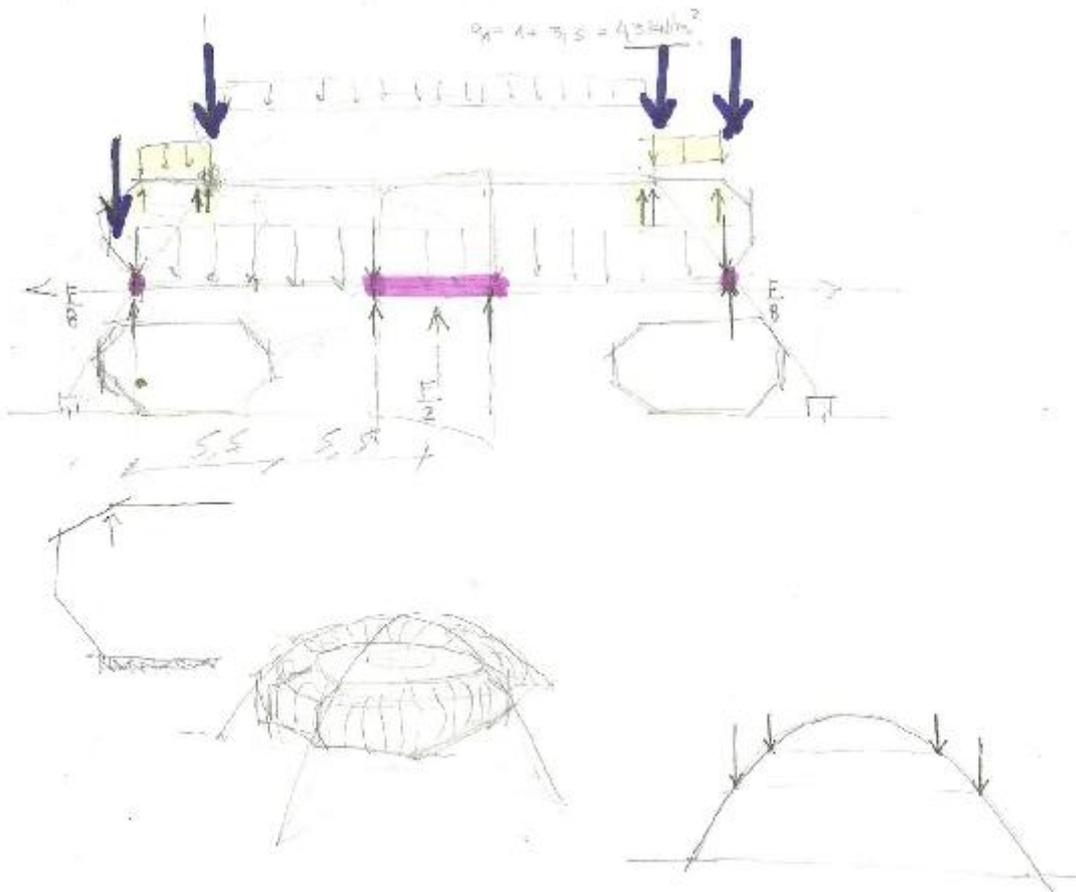
$$x + y = 1$$

$$q_{\text{arço}} = 3,5 + \frac{16}{20} = 4,3 \text{ kN/m}^2$$

$$\frac{x}{2}$$

carregamento total sobre o arco $q_{\text{arço}} = 4,3 + 1 = 5,3 \text{ kN/m}^2$

$$q_{\text{arço}} = 1 + 3,5 = 4,5 \text{ kN/m}^2$$



Da compreensão estrutural e da relativa liberdade proposta no exercício, pudemos experimentar hipóteses de resolução. Desta forma, muitas das análises se basearam em estimativas e interpretações das informações, e não em medidas definidas e cálculos precisos. E, do pressuposto de que a precisão não é um determinante para entender o comportamento de estruturas na arquitetura, pudemos mesmo ficar mais seguros no levantamento de tais hipóteses.

2. Introdução à estrutura

2.1. Aspectos políticos e históricos

O Memorial do ET de Varginha é uma obra não concluída locada na cidade homônima, no estado de Minas Gerais. A estrutura pertence a um quadro simbólico e histórico da cidade de Varginha originado no episódio conhecido como “o caso do ET de Varginha”, que teria acontecido entre 13 e 20 de janeiro de 1996. A partir da grande repercussão internacional, foram elaboradas diversas teorias que visavam elucidar o caso, envolvendo desde o Exército brasileiro, o Corpo de Bombeiros, a Polícia Militar e mesmo institutos como a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e entidades internacionais como o governo americano e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

O diagrama abaixo ilustra a versão popular da história:



Imagem 2.1.1 – Esquematização cronológica dos acontecimentos.

(Fonte: <http://www.istoe.com.br/reportagens/105958_A+HISTORIA+OFICIAL+DO+ET+DE+VARGINHA>, acesso em 01/11/2013).

Entretanto, resultado de investigação e registrado em documentos oficiais - um Inquérito Policial Militar (IPM) e uma sindicância, arquivados no Superior Tribunal Militar (STM) - o Exército brasileiro concluiu que um morador da cidade, popularmente conhecido como “Mudinho”, foi confundido com um ET pelas três meninas.

O Exército também se defendeu dizendo que a intensa movimentação das viaturas militares no local foi explicada pelo fato de que estavam fazendo manutenção em uma concessionária na região.



Imagem 2.1.2 - "Mudinho", coberto por lama e sujeira, teria confundido as três meninas.
(Fonte: <http://www.istoe.com.br/reportagens/105958_A+HISTORIA+OFICIAL+DO+ET+DE+VARGINHA>, acesso em 01/11/2013).

Mesmo com a versão oficial, a cidade se destacou pelo episódio e diversos ícones como estátuas, monumentos e até pontos de ônibus foram construídos para lembrar o hipotético aparecimento do extraterrestre.



Imagem 2.1.3 - Caixa d'água em forma de disco voador.
(Fonte: <<http://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2013/06/varginha-nao-preve-investimentos-para-estatuas-e-memorial-do-et.html>>, acesso em 01/11/2013).



Imagem 2.1.4 - Ponto de ônibus em Varginha.

(Fonte: Reprodução EPTV em <<http://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2013/06/varginha-nao-preve-investimentos-para-estatuas-e-memorial-do-et.html>>, acesso em 01/11/2013).

A construção de mais um monumento foi anunciada em junho de 2008: o Museu do ET. O projeto, do arquiteto Salvador Homero Maia Silva, lembra um disco voador e tem 548m², distribuídos em dois andares, sendo o primeiro dividido em quatro salas reservadas para comércio e o piso superior para o memorial. A instalação conta com investimentos federais, repassados para o município em 2007, antes mesmo de a obra ser anunciada. Para a construção do Museu do ET, o Ministério do Turismo fez um repasse de R\$ 828.750,00 e o Município de Varginha teria que entrar com uma contrapartida de R\$ 165.750,00, totalizando R\$ 994.500,00.

Detalhes do Convênio	
Número do Convênio SIAFI:	589155 Saiba como obter informações
Situação:	Adimplente
Nº Original:	CR.NR.0214721-37
Objeto do Convênio:	CONSTRUCAO DO MUSEU DO ET
Orgão Superior:	MINISTERIO DO TURISMO
Concedente:	CEF/MINISTERIO DO TURISMO/MTUR
Convenente:	MUNICIPIO DE VARGINHA
Valor Convênio:	828.750,00
Valor Liberado:	828.750,00
Publicação:	10/01/2007
Início da Vigência:	29/12/2006
Fim da Vigência:	30/12/2013
Valor Contrapartida:	165.750,00
Data Última Liberação:	27/12/2007
Valor Última Liberação:	828.750,00

Imagem 2.1.5 - Prestação de contas do Governo Federal.

(Fonte: <<http://www.portaldatransparencia.gov.br/convencios/DetalhaConvencio.asp?CodConvencio=589155&TipoConsulta=0>>, acesso em 01/11/2013).

A obra, no entanto foi iniciada apenas em 2010, de acordo com a reportagem “Memorial do ET” de Euclides Oliva, que foi ao ar pela TV Princesa Varginha-MG em 30/11/2010. Vinícius Amantéa, chefe do departamento de turismo, na época comentou: “Sem dúvida um potencial turístico fantástico. Esse nosso projeto, ele já foi empenhado, licitado e está em fase de construção. A gente acredita que por volta de oito meses, essa estrutura física dele, ela já esteja totalmente pronta, né?”.

Uma das atrações turísticas da cidade é a chamada “Trilha Ecológica do ET”, onde as estátuas estão localizadas e é possível tirar fotos. Todavia, se encontram atualmente em precárias condições de conservação e não há esforço do poder público em manter os antigos ícones que deram fama internacional à cidade.

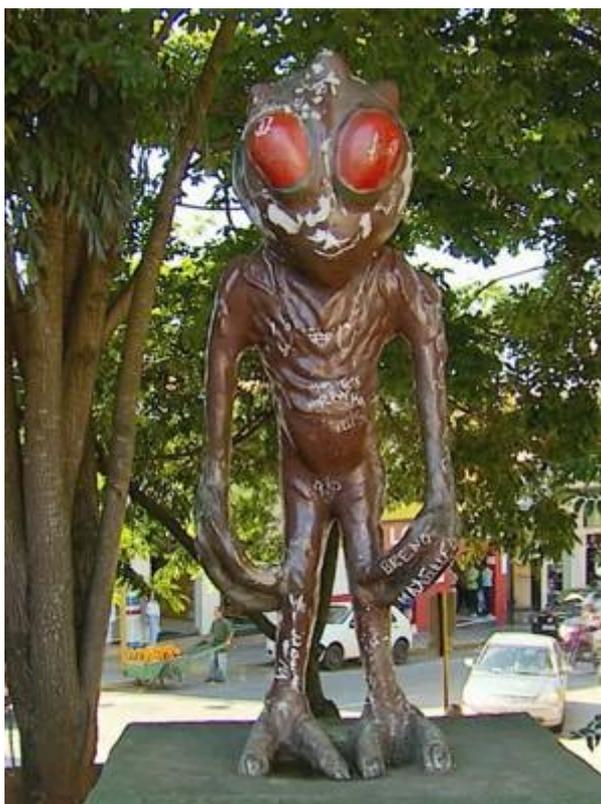


Imagem 2.1.6 - Uma das estátuas do ET em precária condição de conservação.

(Fonte: <<http://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2013/06/varginha-nao-preve-investimentos-para-estatuas-e-memorial-do-et.html>>, acesso em 01/11/2013).

O memorial também se encontra em estado de abandono. Com apenas 40% de suas obras concluídas, o local está abandonado e suas estruturas de ferros se encontram enferrujadas. Através de reportagens, foi possível constatar duas possíveis causas: a primeira relata que a gestão anterior, do PT, afirmou não ter a contrapartida de R\$ 165.750,00 e paralisou a construção do museu¹ e a segunda comunica que a construção foi interrompida em 2011 porque a construtora responsável faliu².

¹ Informação disponível em <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2013/08/1323860-governo-federal-investe-mais-de-r-1-mi-em-museu-sobre-et-de-varginha.shtml>> (data de acesso: 01/11/2013).

² Informação disponível em <<http://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2013/06/varginha-nao-preve-investimentos-para-estatuas-e-memorial-do-et.html>> (data de acesso: 01/11/2013).



Imagem 2.1.7 – Foto das obras abandonadas do Museu do ET.
(Fonte: <<http://f.i.uol.com.br/fotografia/2013/08/08/307205-970x600-1.jpeg>>, acesso em 01/11/2013).



Imagem 2.1.8 - Foto das obras abandonadas do Museu do ET.
(Fonte: <<http://f.i.uol.com.br/fotografia/2013/08/08/307201-970x600-1.jpeg>>, acesso em 01/11/2013).



Imagem 2.1.9 - Foto das obras abandonadas do Museu do ET.
(Fonte: <<http://f.i.uol.com.br/fotografia/2013/08/08/307202-970x600-1.jpeg>>, acesso em 01/11/2013).



Imagem 2.1.10 - Foto das obras abandonadas do Museu do ET.
(Fonte: <<http://f.i.uol.com.br/fotografia/2013/08/08/307203-970x600-1.jpeg>>, acesso em 01/11/2013).

Pelo convênio original, tudo deveria estar pronto até dezembro deste ano. No entanto, até junho a posição do secretário de turismo de Varginha, Aristίδes Ribas de Andrade Filho não favorecia a retomada das obras: “Varginha tem outras prioridades. Não existe um projeto turístico para o ET. A Secretaria de Turismo não vê o cultivo do ET como uma fonte da história da cidade.”, disse em entrevista à EPTV. Atualmente o valor da obra é estimado em R\$ 946.277,56, de acordo com o Edital de Licitação Nº 060/2013 da Prefeitura de Varginha, com um capital líquido de R\$ 94.000,00.

O ET voltou à mídia atualmente com a recente declaração da Presidenta da República, Dilma Rousseff, em entrevista concedida para as rádios Vanguarda FM e Itatiaia no dia 07 de agosto de 2013, quando indagada sobre a situação do café, também uma referência da cidade:

“Primeiro, eu queria te dizer que eu tenho muito respeito pelo ET de Varginha. E eu sei que aqui, quem não viu conhece alguém que viu, ou tem alguém na família que viu, mas de qualquer jeito eu começo dizendo que esse respeito pelo ET de Varginha está garantido.”³

“Mudar o objeto do convênio com o ministério não é possível nem é do interesse da cidade, disse o vice-prefeito, Vérdi Melo (PSDB), que se animou após a presidente Dilma ir à cidade anteontem e pregar "respeito" ao ET. O Ministério do Turismo disse que a obra consumiu até agora R\$ 304 mil, e que a liberação do restante do dinheiro depende da apresentação de um novo cronograma pela prefeitura.”⁴

Este episódio repercutiu nacionalmente, gerando uma série de elaborações cômicas:



Imagem 2.1.11 – Charge elaborada a partir do episódio de Dilma Rousseff.

(Fonte: <<http://i0.wp.com/www.humorpolitico.com.br/wp-content/uploads/2013/08/Dilma-e-o-ET-de-Varginha-por-Regi.jpg?resize=580%2C270>> acesso em 22/11/2013).

³ Informação disponível em <<http://www2.planalto.gov.br/imprensa/entrevistas/entrevista-concedida-pela-presidenta-da-republica-dilma-rousseff-para-as-radios-vanguarda-fm-e-itatiaia-varginha-mg/view>> (data de acesso: 01/11/2013).

⁴ Informação disponível em <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2013/08/1323860-governo-federal-investe-mais-de-r-1-mi-em-museu-sobre-et-de-varginha.shtml>> (data de acesso: 01/11/2013).



Imagem 2.1.12 – Charge elaborada a partir do episódio de Dilma Rouseff.

(Fonte: <<http://www.bazingaonline.net/2013/08/apos-respeito-de-dilma-memorial-do-et.html>> acesso em 22/11/2013).

2.2. Aspectos estruturais

De modo a complementar o entendimento do sistema estrutural em seus termos gerais e elementares, recorreu-se, para além da explicação fornecida na apresentação do exercício, a croquis (apresentados anteriormente), fotografias e vídeos que permitissem uma visualização clara do conjunto e de suas partes, bem como dos caminhos percorridos pelos esforços através da estrutura.



Imagem 2.2.1 - Vista do sistema estrutural do edifício, em sua maior parte composto por elementos pré-fabricados de aço.
(Fonte: <<http://globoTV.globo.com/rede-globo/mgtv-1a-edicao/v/obras-do-memorial-do-et-de-varginha-devem-ser-retomadas/2757726/>>).

Conforme elucidado pelo texto introdutório do exercício, o edifício do memorial é composto por dois pavimentos: um térreo e outro suspenso. O piso superior apresenta planta em formato de circunferência e raio de 11,0m, sendo estruturado por um tabuleiro de aço treliçado. A região interna do piso se apoia sobre as paredes da caixa da escadaria central, aparentemente construída em concreto armado, sendo a porção restante da laje, correspondente ao anel periférico, sustentada pelas pernas dos dois arcos de aço treliçados que se cruzam ortogonalmente a 10,0m do nível do solo.

Em um primeiro momento, então, tem-se a carga total atuante sobre o piso superior distribuída em duas frações: a primeira metade é descarregada sobre as paredes da escadaria, enquanto que a segunda metade é lançada sobre os quatro apoios conformados pelos arcos treliçados. Essa segunda fração, portanto, é distribuída uniformemente entre as quatro pernas do arco, cada qual transferindo, pois, $\frac{1}{8}$ da carga total mencionada para o solo.



Imagem 2.2.2 - Como é possível ver na fotografia, a caixa de circulação sustenta o piso superior em sua porção central, enquanto que as bordas externas do piso se encontram apoiadas nos arcos treliçados
(Fonte: <<http://globo.com/redesocial/mgtv-1a-edicao/v/obras-do-memorial-do-et-de-varginha-devem-ser-retomadas/2757726/>>).

Conforme instruções do exercício, desconsideraram-se as escoras dispostas entre as bordas do piso superior e as pernas dos arcos, visto que, estruturalmente e arquitetonicamente redundantes, tais elementos podem ser desprezados durante a apreensão geral do sistema.

Enquanto que o nível térreo não é vedado, o pavimento superior encontra-se encerrado por uma série de elementos metálicos que, partindo da borda externa do piso, sobem e se projetam para fora em um trecho inicial, mantendo-se estritamente verticais a seguir e, por fim, recuando para o alinhamento original do piso. Compõe-se, assim, uma espécie de gradil em forma de concha, um sistema de “paredes laterais” que contornam o piso superior. As cargas correspondentes a esses elementos, apoiados na borda externa da laje, são diretamente transferidas para as pernas dos arcos, cada qual carregando $\frac{1}{4}$ dos esforços correspondentes.



Imagem 2.2.3 - Vista, a partir do nível térreo, dos elementos metálicos que circundam o piso superior formando um gradil. Conforme denominação apresentada nas instruções do exercício, esses elementos serão identificados pelo título de “paredes laterais”. (Fonte: <<http://globo.com/rede-globo/mgtv-1a-edicao/v/obras-do-memorial-do-et-de-varginha-devem-ser-retomadas/2757726/>>).



Imagem 2.2.4 - Vista do conjunto de paredes laterais, apoiadas sobre a borda externa do piso superior. (Fonte: <<http://globo.com/rede-globo/mgtv-1a-edicao/v/obras-do-memorial-do-et-de-varginha-devem-ser-retomadas/2757726/>>).



Imagem 2.2.5 - Vista geral da estrutura a partir de ângulo alternativo.
(Fonte: <<http://globoTV.globo.com/rede-globo/mgtv-1a-edicao/v/obras-do-memorial-do-et-de-varginha-devem-ser-retomadas/2757726/>>).

Ao reencontrarem o alinhamento do piso, as hastes metálicas componentes das paredes laterais se encurvam e convergem para um anel treliçado apoiado também sobre as pernas dos arcos. Compõem, logo, uma espécie de cobertura em formato de coroa sobre a região periférica do piso superior.

Como já explicitado, metade das cargas incidentes sobre essa coroa é transferida pelo anel treliçado diretamente para as quatro pernas dos arcos, sendo a outra metade descarregada nas paredes laterais.

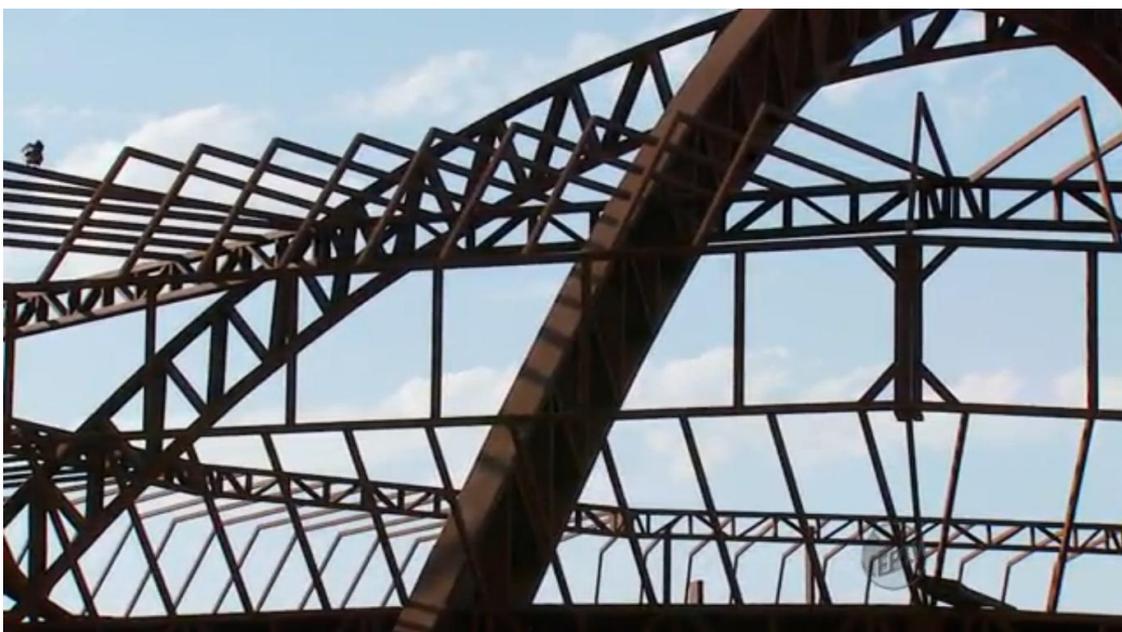


Imagem 2.2.6 - Como é possível visualizar nesta fotografia, as hastes metálicas componentes das paredes laterais se encurvam, em sua região superior, para a formação de uma coroa circular. (Fonte: <<http://globoTV.globo.com/rede-globo/mgtv-1a-edicao/v/obras-do-memorial-do-et-de-varginha-devem-ser-retomadas/2757726/>>).



Imagem 2.2.7 - Cena de vídeo explicativo da estrutura. É interessante notar, nessa imagem, a relação antropométrica do edifício (Fonte: <<http://globoTV.globo.com/rede-globo/mgtv-1a-edicao/v/obras-do-memorial-do-et-de-varginha-devem-ser-retomadas/2757726/>>).



Imagem 2.2.8 - Nesta cena, pode-se visualizar o apoio de uma das pernas de arco treliçado, correspondente, em termos estruturais, a um engastamento (o qual impõe três vínculos ao arco, impedindo sua translação horizontal, sua translação vertical e sua rotação em torno de um eixo).

(Fonte: <<http://globoTV.globo.com/rede-globo/mgtv-1a-edicao/v/obras-do-memorial-do-et-de-varginha-devem-ser-retomadas/2757726/>>).

Por fim, conforme elucidado pelo texto de apresentação do exercício:

“Na parte interna aos arcos, a cobertura é composta por um domo reticulado (provavelmente fechado por painéis de vidro), dividido em quatro quadrantes que se apoiam nos arcos, e cujas bordas externas se apoiam no anel treliçado. Assim, o anel treliçado equilibra o empuxo da cúpula por meio de esforços de tração, e transfere as cargas de peso próprio provenientes da cúpula para os quatro apoios proporcionados pelos arcos”.

Portanto, as cargas provenientes da cúpula dividem-se igualmente entre os quatro apoios conformados pelos arcos ao nível do anel treliçado (cada perna encaminhando, pois, $\frac{1}{4}$ do carregamento total).

3. Primeiro modelo de análise

3.1. Modelagem do arco

O primeiro modelo de análise foi formatado no programa Ftool, fazendo-se a leitura de pontos do banzo inferior do arco treliçado, conforme apresentado na figura 1 do enunciado do exercício. A razão pela escolha do banzo inferior como arco-base foi penarmos, inicialmente, que nele atuassem diretamente as cargas e os carregamentos, através dos pontos de contato com as demais superfícies da estrutura (piso superior, parede lateral, cúpula e coroa circular). Além disso, na imagem do corte da estrutura fornecida, há a inscrição “32m (medida interna)”, o que leva à compreensão de que esta poderia ser a medida-base para a discretização do arco em vigas retas no programa Ftool.

Assim, inicialmente, o desenho foi ajustado em escala, usando-se como referência esses 32m de vão interno, para adquirirmos medidas mais exatas do arco. Feito isso, verificou-se que algumas dessas medidas não correspondiam com o enunciado (o raio do piso superior ficou com 11,4m no desenho, e não com os 11m sugeridos no exercício). Posteriormente, em atendimento com os professores da disciplina, a sugestão era que elegêssemos a medida dos 9m como base, já que correspondia ao pé-direito, embora não fosse “errado” considerar os 32m. Assim, permanecemos com a investida inicial, isto é, consideramos os 32m como base. Nesta situação, vale ressaltar que, dessa forma, o arco discretizado no Ftool correspondeu ao banzo inferior, e não ao eixo do arco treliçado. Esta última configuração parece ser mais correta para uma simplificação da treliça, embora suspeitemos que a diferença dos resultados não seja grande. Dessa forma, uma vez mais, preferimos manter a ideia inicial, considerando-a razoavelmente boa e mais segura para a obtenção de referências cartesianas no desenho fornecido. Ainda assim, como se pôde notar, o grupo sempre analisou criticamente cada uma das suposições levantadas.

No processo de discretização do arco em vigas – já que o programa Ftool não permite a configuração de arcos –, chegamos a uma composição também aparentemente razoável. Os trechos que se aproximavam de retas, próximos aos apoios, foram logo reduzidos a vigas únicas, e o trecho correspondente ao encaixe da cúpula foi desmembrado em 6 partes. Disso, vale frisar que os nós necessários para compor o arco no Ftool foram escolhidos estrategicamente: os pontos de contato entre o piso superior e o arco; entre a base da cúpula e o arco; e pontos da cúpula necessários para a sua montagem no programa. Posteriormente, foi feita a leitura das coordenadas cartesianas desses nós (tomando-se como origem o ponto de apoio no solo à esquerda. Tais coordenadas foram transferidas ao Ftool, e as duas extremidades do modelo do arco foram engastadas, como dito no enunciado.

Para esse primeiro modelo, foram analisadas duas possibilidades de carregamento, o uniforme e o não uniforme. Em ambos os casos, o peso próprio das estruturas atuam de maneira semelhante sobre os arcos, diferindo-se exclusivamente pela atuação da carga de serviços sobre o piso superior, sendo uniformemente distribuído por toda a superfície no carregamento uniforme e concentrado em uma das metades no caso do carregamento não uniforme.

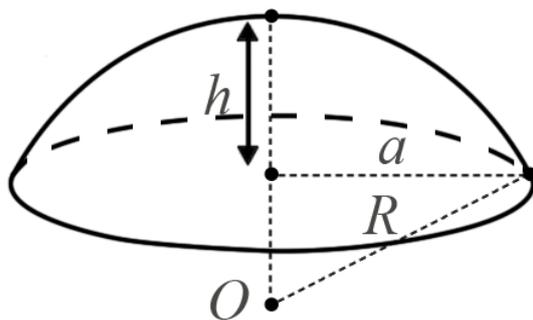
3.2. Cálculo das áreas de influência e dos carregamentos

Para a obtenção da carga resultante nos arcos a partir de cada elemento da estrutura, calculou-se o valor da áreas destes elementos – um vez que as cargas foram fornecidas em kN/m^2 . Algumas das medidas foram estabelecidas por meio de aproximações baseadas, sobretudo, na referência da figura 1 do enunciado do exercício. Por exemplo, o raio de curvatura da cúpula e a extensão dos segmentos inclinados da parede lateral, foram obtidos a partir desse processo de comparação em escala.

Tendo em vista a pouca familiaridade com alguns componentes geométricos da estrutura, o grupo recorreu a cadernos didáticos de Matemática do Ensino Médio. A seguir, dada a necessidade de apresentação e justificativa das operações realizadas, optou-se por gerar as imagens correspondentes pelo programa Adobe Photoshop.

A seguir, são apresentados os cálculos das áreas para todos os elementos considerados neste exercício, junto às imagens geometrizadas produzidas pelo grupo.

- **Cúpula:**

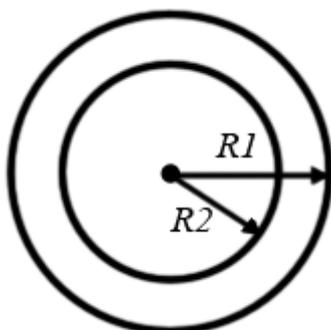


$$A_{cúpula} = 2\pi Rh$$

$$A_{cúpula} \cong 2 \times 3,1416 \times 14,6 \times 2,4$$

$$A_{cúpula} \cong 220,16 \text{ m}^2$$

- **Coroa circular:**



$$A_{coroa} = \pi (R1^2 - R2^2)$$

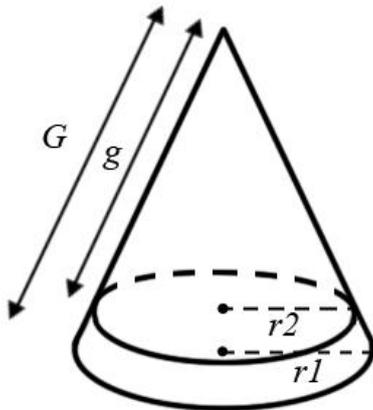
$$A_{coroa} \cong 3,1416 (11,4^2 - 8^2)$$

$$A_{coroa} \cong 3,1416 \times 65,96$$

$$A_{coroa} \cong 207,22 \text{ m}^2$$

- **Parede lateral:**

- Região inclinada:



$$A_{pinc} = \pi (G \times r1 - g \times r2)$$

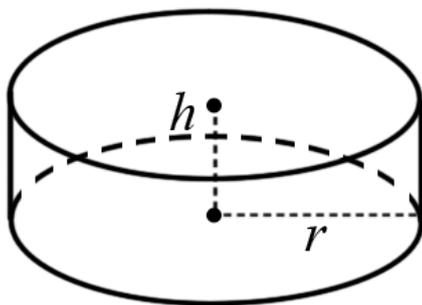
$$A_{pinc} \cong 3,1416 (G \times r1 - g \times r2)$$

$$A_{pinc} \cong 3,1416 (16,4 \times 12,6 - 14,8 \times 11,4)$$

$$A_{pinc} \cong 3,1416 \times 37,92$$

$$A_{pinc} \cong 119,13 \text{ m}^2$$

- Região vertical:



$$A_{pver} = 2\pi r h$$

$$A_{pver} \cong 2 \times 3,1416 \times 12,6 \times 0,8$$

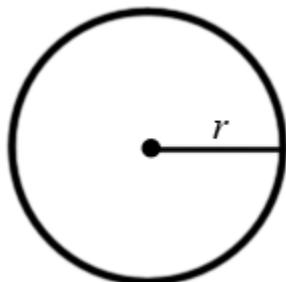
$$A_{pver} \cong 63,34 \text{ m}^2$$

- Área total da parede lateral:

$$A_{plat} = 2A_{pinc} + A_{pver}$$

$$A_{plat} \cong 2 \times 119,13 + 63,34 \cong 301,6 \text{ m}^2$$

- **Piso superior**



$$A_{piso} = \pi r^2$$

$$A_{piso} \cong 3,1416 \times 11,4$$

$$A_{piso} \cong 408,28 \text{ m}^2$$

Posto isso, para a obtenção das cargas resultantes do peso da estrutura (kN), bastou multiplicar a área de cada componente pelo valor da carga de peso próprio (Q_p), considerada equivalente a $1,0 \text{ kN/m}^2$ para todos os componentes segundo instruções do exercício.

Quanto à carga máxima de serviço, obedeceu-se à fórmula apresentada pelo exercício, segundo a qual:

$$Q_{serv} = 2,5 + \frac{nm}{20},$$

Sendo nm o número da equipe, desde que compreendido entre 16 e 30 (no caso presente, $nm = 16$). Assim:

$$Q_{serv} = 2,5 + \frac{16}{20}$$

$$Q_{serv} = 2,5 + 0,8$$

$$Q_{serv} = 3,3 \text{ kN/m}^2$$

O valor da carga distribuída de serviços varia de acordo com o tipo de carregamento, e, por essa razão, cada um será analisado separadamente a seguir.

3.3. Tipos de carregamentos

3.3.1. Carregamento uniforme

Há no arco-base quatro pontos de descarregamento das cargas atuantes: os pontos de contato entre o arco e o anel treliçado (B e C), onde atuam a carga da cúpula (P_c) e da coroa circular (P_o), e os pontos de contato entre o arco e o piso superior (A e D), atuando sobre eles a carga da parede lateral (P_l), da coroa circular, do peso próprio do piso (P_p) e também a carga de serviços (P_s).

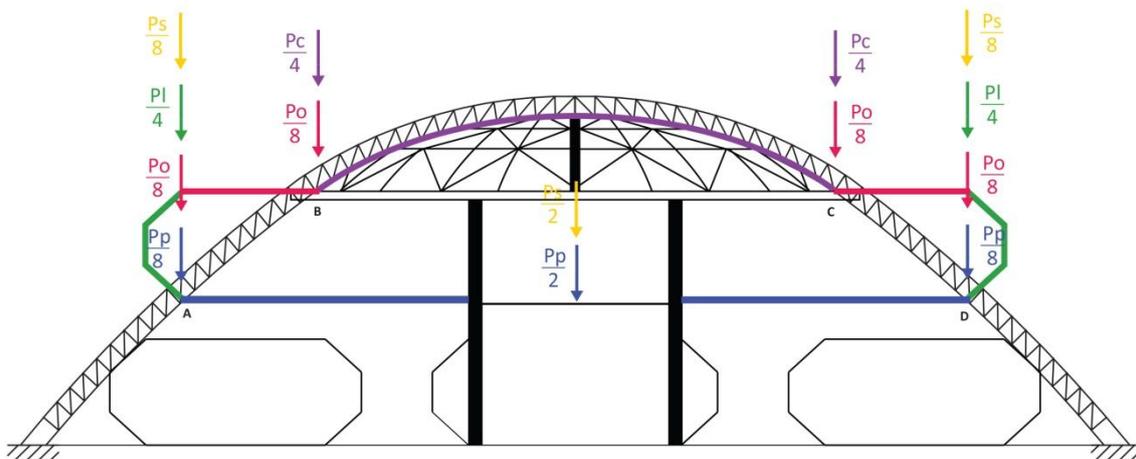


Imagem 3.3.1.1: Diagrama da distribuição de forças (carregamento uniforme).
(Fonte: elaboração do grupo).

Observando a figura acima, notam-se a seguinte interpretação de descarregamento:

- As cargas P_p e P_s atuando, metade pelas paredes da escadaria, e a outra metade distribuída igualmente pelos quatro apoios dos arcos;
- A carga P_o atuando, metade nos quatro pontos de contato entre o arco e o anel treliçado, e metade pelas paredes laterais, chegando aos quatro apoios;
- A carga P_l agindo diretamente nos quatro apoios dos arcos;
- A carga P_c atuando também nos quatro pontos de contato entre o arco e o anel treliçado.

No caso do carregamento uniforme, consideramos que a carga de serviços é distribuída igualmente por toda a superfície do piso superior. Tendo em vista que a forma de atuação e distribuição das cargas e retomando os valores encontrados no item 3.2, chegou-se às seguintes formulações:

- Carga total nos pontos A e D:

$$P_{total} = P_p/8 + P_s/8 + P_o/8 + P_l/4$$

$$P_{total} \cong 51,035 + 168,4155 + 25,9025 + 75,4$$

$$P_{total} \cong 320,753 \text{ kN}$$

- Carga total nos pontos B e C:

$$P_{total} = P_o/8 + P_c/4$$

$$P_{total} \cong 25,9025 + 55,04$$

$$P_{total} \cong 80,9425 \text{ kN}$$

Aplicando-se as cargas totais encontradas no modelo de análise do Ftool, obteve-se o seguinte diagrama:

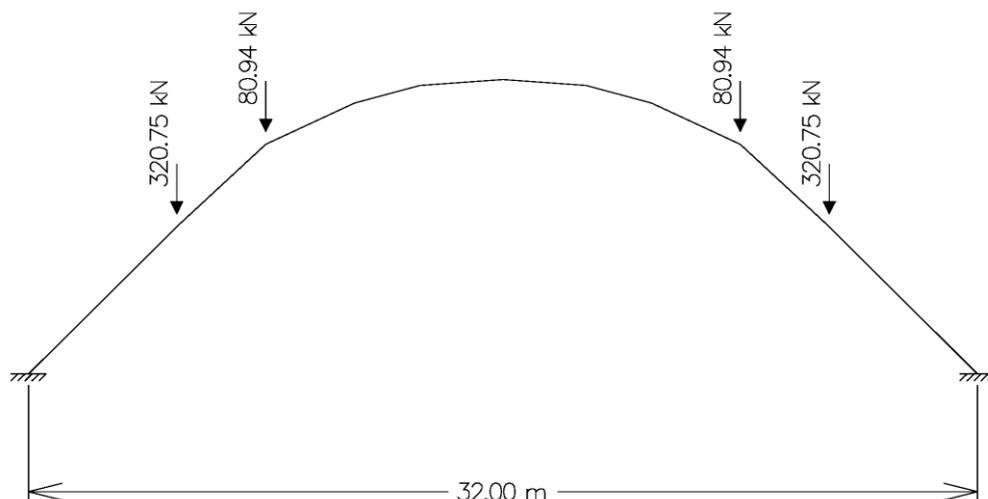
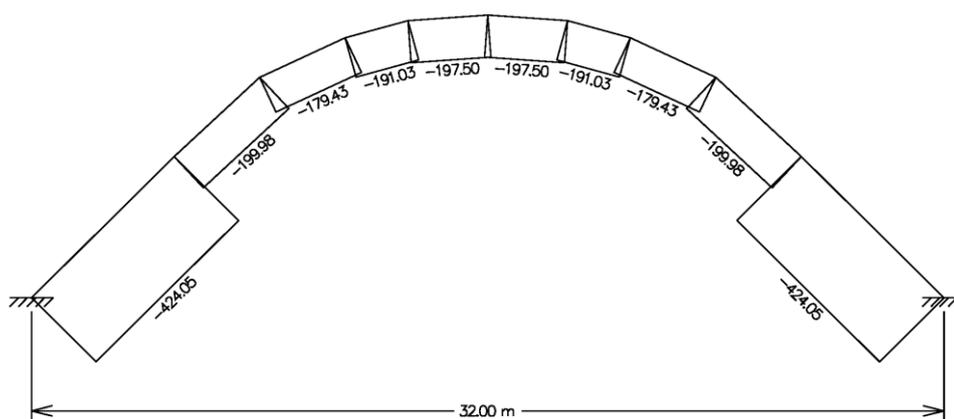


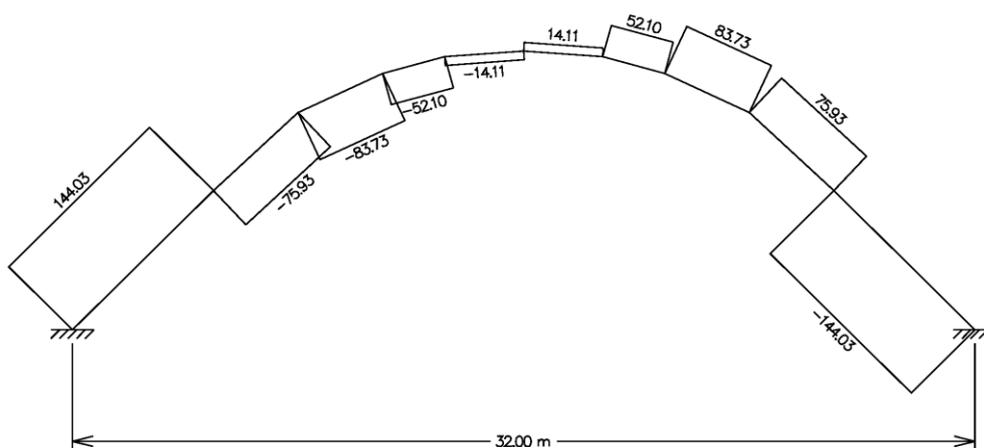
Imagem 3.3.1.2: Modelo construído no Ftool, com as cargas atuantes.

Os valores das reações de apoio em ambas as extremidades foram: força vertical = 401,69 kN, empuxo = 198,01 kN e momento fletor = 545,8 kNm. A partir do modelo configurado foram produzidos os diagramas das forças normal, cortante e momento fletor, além da deformada da estrutura.

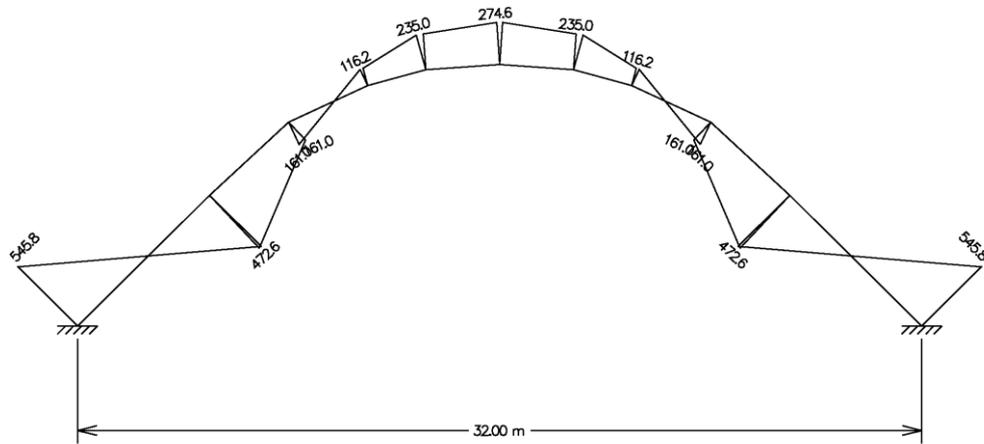
Força Normal (kN): o valor das forças normais é bem maior, em módulo, nos trechos entre a extremidade do arco e o piso superior (424,05 kN), sendo no restante do arco correspondente a valores menores e com pouca variação (de 179,43 a 199,98 kN).



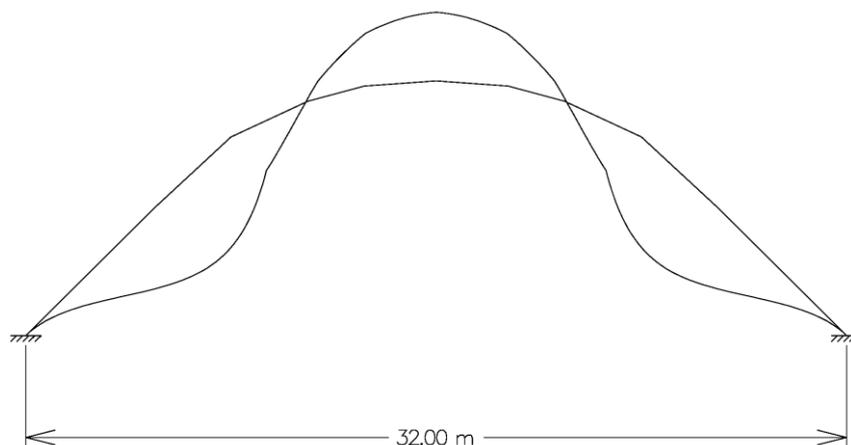
Força Cortante (kN): a força inicialmente tem sinal positivo no trecho esquerdo, entre a extremidade do arco e o piso, mas logo se inverte nos trechos seguintes devido às cargas aplicadas nos nós, e os valores das forças cortantes no trecho correspondente à cúpula vão diminuindo conforme aproxima-se do meio do arco. A outra metade do arco possui valores simetricamente opostos.



Momento fletor (kNm): os maiores valores de momento fletor estão nas extremidades do arco (545,8 kNm), seguidos dos pontos de contato com o piso superior (472,6 kNm), onde estão aplicadas as maiores cargas. O trecho médio do arco também apresenta valores relativamente altos (entre 235 kNm e 274,6 kNm).



Deformada: nos trechos onde as cargas estão sendo aplicadas, o arco tende a flexionar para dentro, enquanto que no trecho mediano do arco, onde as cargas estão sendo aplicadas nas duas extremidades, o arco tende a flexionar para o lado oposto à essas forças, ou seja, para o lado externo ao arco.



3.3.2. Carregamento não uniforme

As cargas estruturais são equivalentes às do carregamento uniforme, havendo uma alteração somente na carga de serviços.

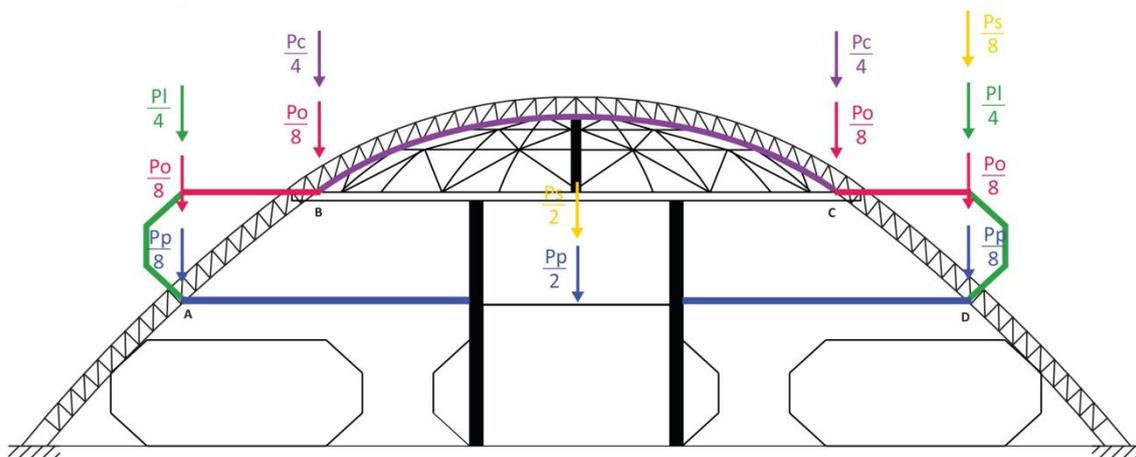


Imagem 3.3.2.1: Diagrama da distribuição de forças (carregamento não uniforme).
(Fonte: elaboração do grupo).

Questionou-se primeiramente a afirmação de que a carga de serviços atua, no caso do modelo não uniforme, em apenas uma das metades do piso superior. Seria a carga distribuída integral recaindo sobre a metade do piso? Ou então seria a metade da carga distribuída agindo sobre a metade da estrutura?

O grupo então dirigiu ao monitor da disciplina Flávio Johnsen Barossi quando, então, ficou esclarecido que, para além de uma mera abstração matemática, a proposta do carregamento não uniforme se tratava de simular uma situação na qual haveria uma concentração dos visitantes do memorial em uma das metades do piso superior, um caso crítico que deve ser contabilizado no cálculo estrutural.

Disso, presumimos que em um dos lados do arco não está atuando nenhuma carga de serviços, enquanto que do lado oposto a carga possui o mesmo valor do carregamento uniforme, sendo a carga $P_3 < P_1$.

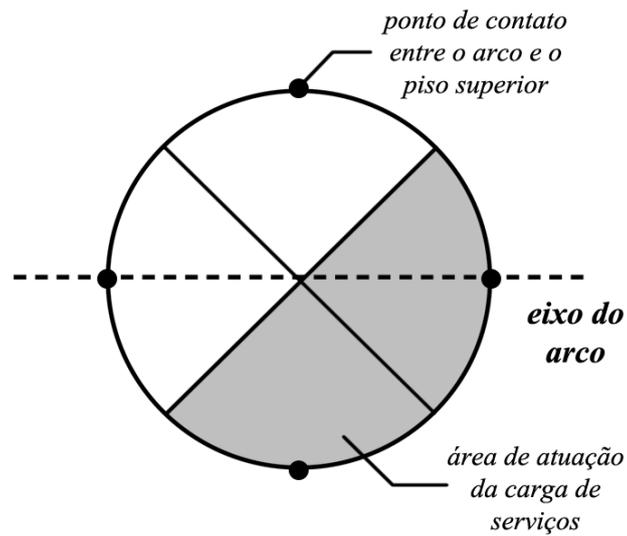


Imagem 3.3.2.2: Abstração sobre a atuação de forças no carregamento não uniforme.
(Fonte: elaboração do grupo).

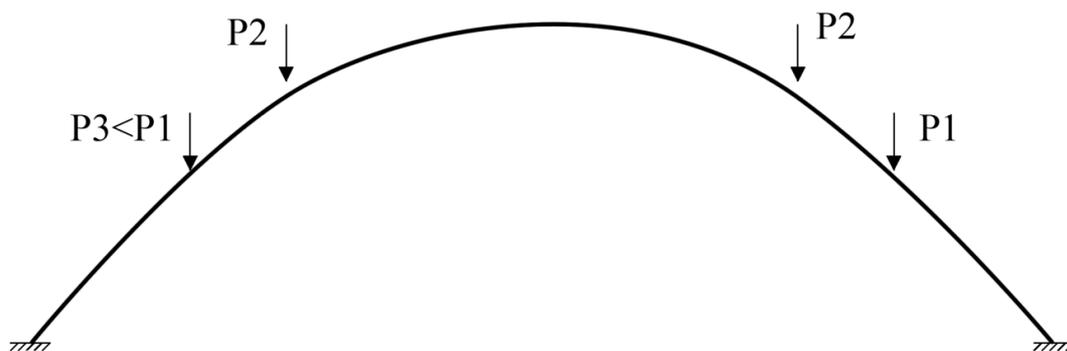


Imagem 3.3.2.3: Composição de forças no carregamento não uniforme.
(Fonte: elaboração do grupo).

Os valores das forças totais P_1 e P_3 são, pois:

- P_1 :

$$P_1 = P_p/8 + P_s/8 + P_o/8 + P_l/4$$

$$P_1 \cong 51,035 + 168,4155 + 25,9025 + 75,4$$

$$P_1 \cong 320,753 \text{ kN}$$

- P_3 :

$$P_3 = P_1 - P_s/8$$

$$P_3 \cong 320,753 - 168,4155$$

$$P_3 \cong 152,3375 \text{ kN}$$

Estabelecidas as novas cargas, criou-se um novo modelo para o carregamento não uniforme:

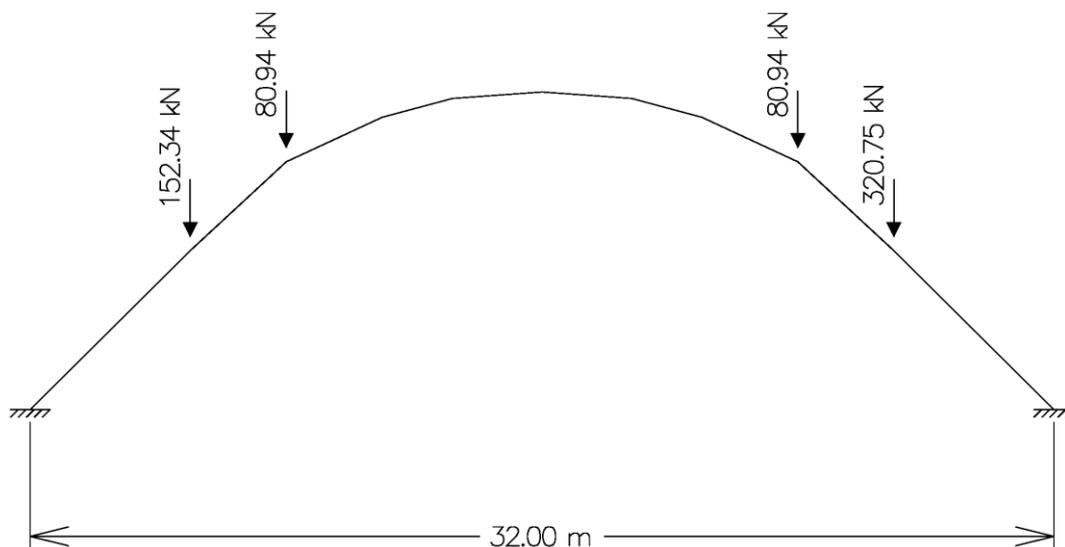
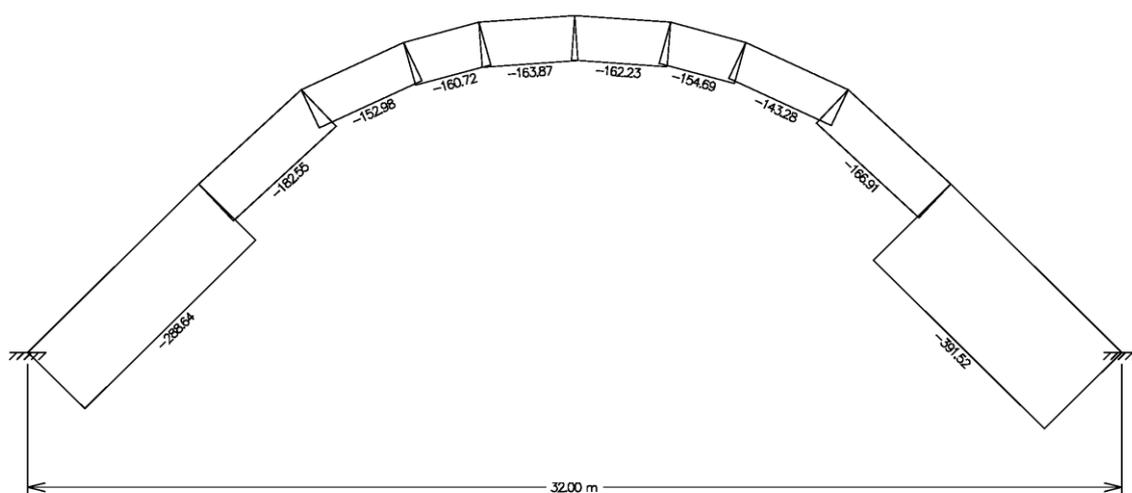


Imagem 3.3.2.4: Modelo não uniforme gerado no Ftool, com as cargas atuantes.

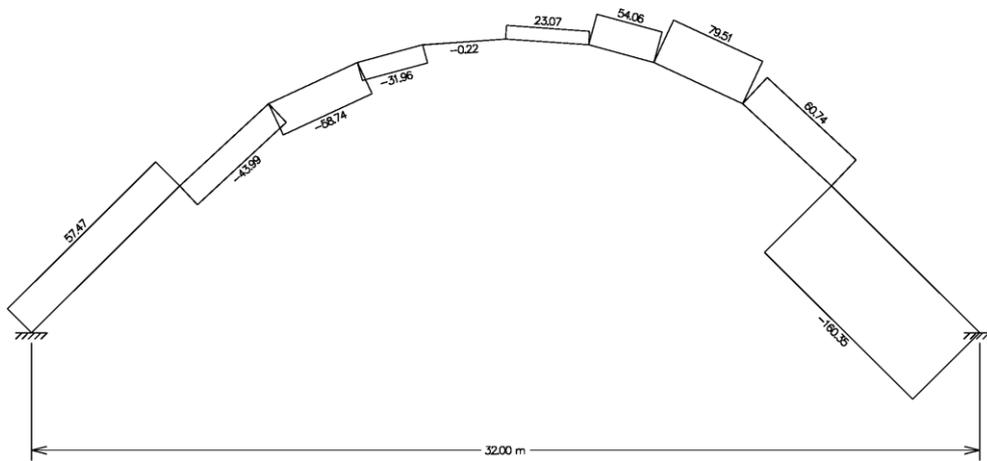
Os valores das reações de apoio na extremidade esquerda foram: força vertical = 244,74 kN, empuxo = 163,47 kN e momento fletor = 177,6 kNm. Na direita foram: força vertical = 390,23 kN, empuxo = 163,47 kN e momento fletor = 653 kNm.

Os diagramas no caso de carregamento não uniforme seguem o mesmo raciocínio daqueles apresentados na situação carregamento uniforme, variando apenas os valores dos esforços.

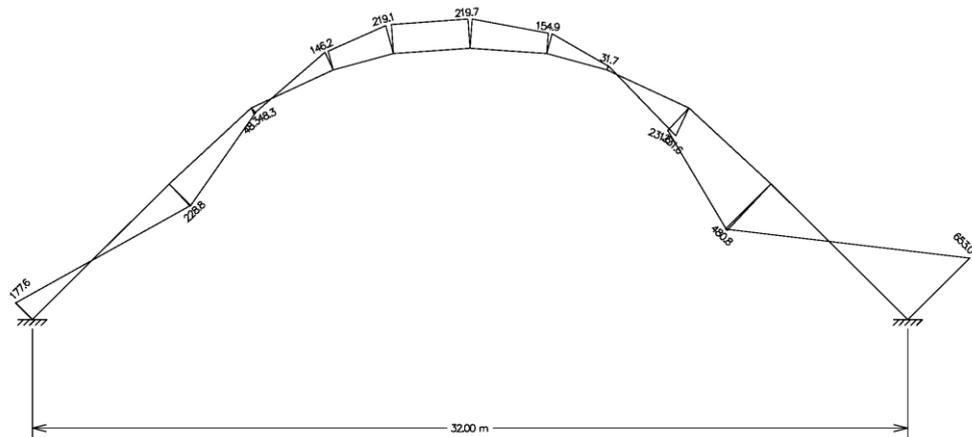
Força Normal (kN):



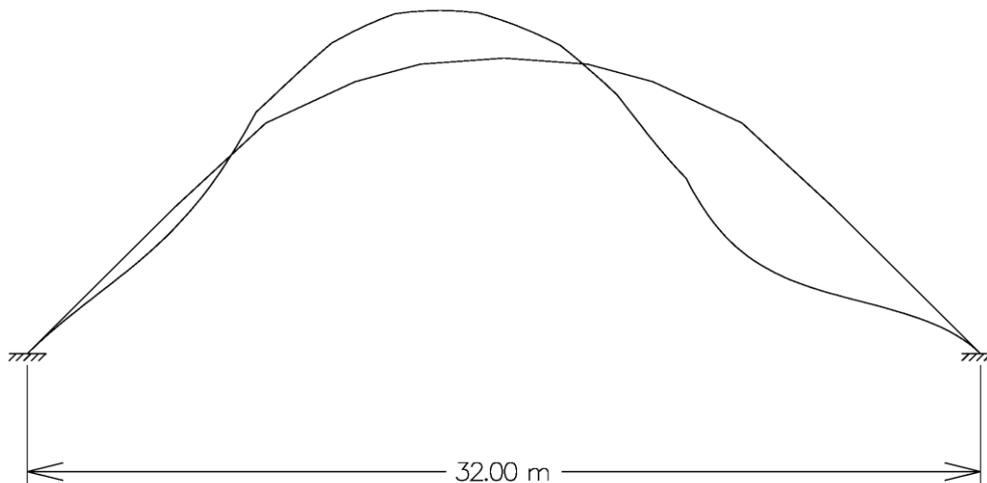
Força Cortante (kN):



Momento Fletor (kNm):



Deformada:



3.4. Comparação entre os diagramas

Como dito anteriormente, tanto os diagramas do carregamento uniforme quanto os do não uniforme não mudam tanto na sua essência, diferenciando-se um do outro pelos valores das forças de um modo geral e também pelo desenho das deformadas.

No diagrama das forças normais, os valores das forças são todos menores no carregamento não uniforme, pelo fato da carga agindo sobre o arco ser menor em um dos nós.

No diagrama das forças cortantes, este deixa de seguir uma simetria no modelo não uniforme, sendo os valores das forças na metade não influenciada pela carga de serviços menor que a mesma metade, no modelo uniforme.

Através do diagrama dos momentos fletores, pode ser notado que o valor do momento na extrema direita do arco possui valor maior no modelo não uniforme (653 kN) do que no uniforme (545,8 kN), mas ocorre o contrário na outra extremidade. Pode-se interpretar que no caso da carga de serviços atuante apenas em uma das metades do piso, o lado concentrado tende a ficar mais instável e com maior tendência à deformação, enquanto que o lado sem a carga extra se deforma muito pouco. Essa diferença fica nítida ao fazermos uma comparação entre as deformadas dos dois tipos de carregamento.

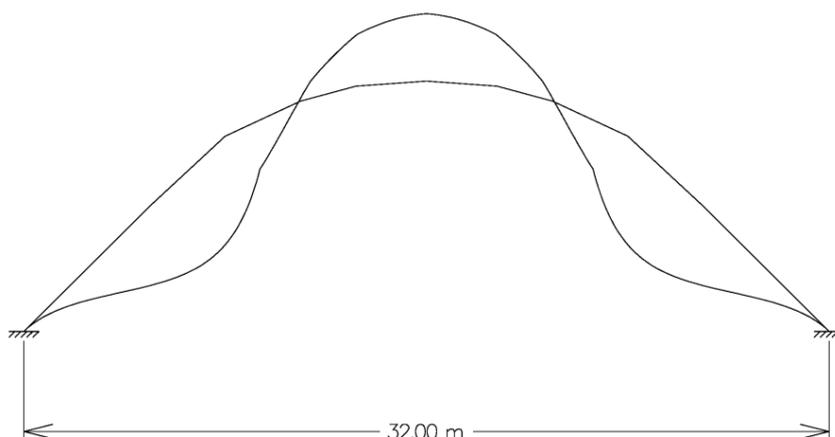


Imagem 3.4.1: Deformada gerada no modelo uniforme.

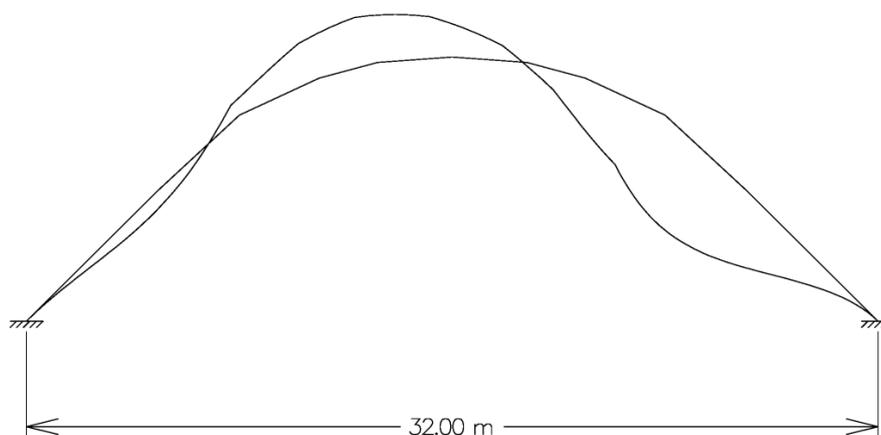


Imagem 3.4.2: Deformada gerada no modelo não uniforme.

4. Pré-dimensionamento

Partindo-se da análise dos diagramas gerados pelo programa Ftool, procedeu-se em vista do pré-dimensionamento dos elementos componentes do arco treliçado nas situações de carregamento uniforme e não-uniforme. Trata-se de verificar as dimensões mínimas para que os elementos componentes da estrutura sejam capazes de suportar os esforços previstos.

Nesse sentido, tomam-se como referência os máximos esforços verificados, visto que, a partir desses valores, têm-se as dimensões da seção mais carregada, e, portanto, necessariamente mais robusta em toda a estrutura. Visto que, em vista da facilidade de junção das peças, supõe-se que todas as seções tenham as mesmas dimensões, as dimensões assim verificadas fornecem o padrão a ser seguido pela estrutura como um todo.

Para o dimensionamento de uma estrutura treliçada, importam somente os esforços normais, visto que os esforços cortantes e momentos fletores são teoricamente nulos em toda a extensão da estrutura. Tratando-se de um arco carregado verticalmente, espera-se que os esforços normais sejam todos de compressão, conforme demonstrado pelos diagramas já apresentados.

Assim sendo, ter-se-ão, em cada seção do arco treliçado, esforços de compressão distribuídos entre os banzos superior e inferior. Logo, em concordância com as instruções do exercício, tomou-se como referência o máximo valor de força normal atuante no arco em ambas as situações de carregamento e admitiu-se que tal esforço se distribuiu igualmente entre os banzos superior e inferior da estrutura.

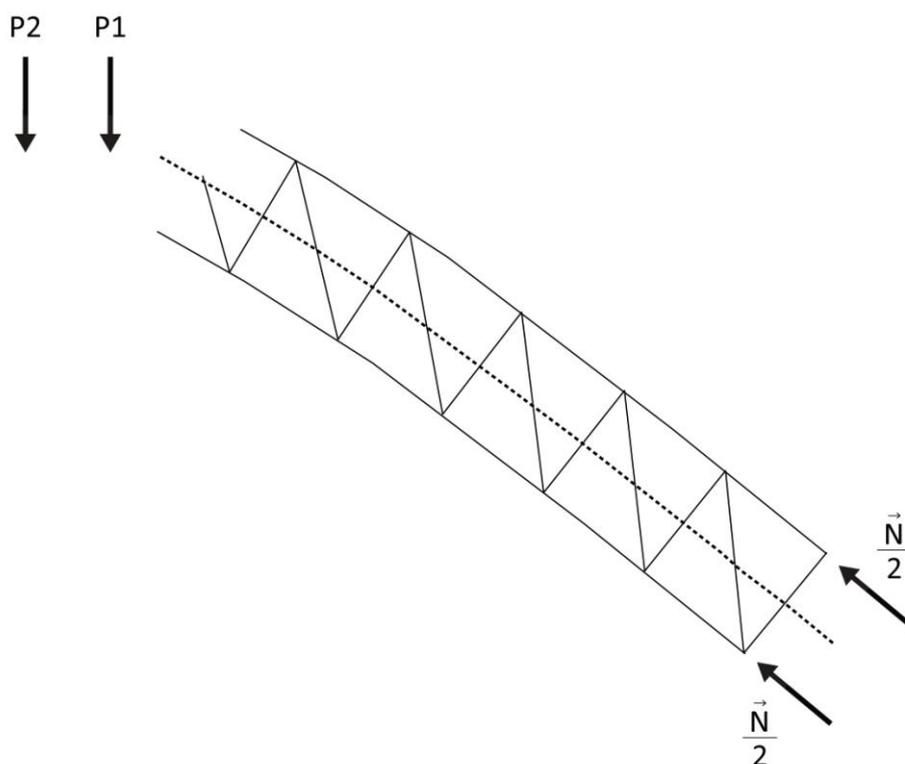


Imagem 4.1 – Os esforços normais de compressão se distribuem igualmente entre os banzos superior e inferior da estrutura. (Fonte: elaboração do grupo).

No caso de carregamento uniforme, a máxima força de compressão N verificada equivale a $-424,05 \text{ kN}$ ⁵. Nessa situação, cada um dos banzos responde a um esforço de $-212,025 \text{ kN}$. No caso de carregamento não uniforme, em contrapartida, o valor da força máxima de compressão N corresponde a $-391,52 \text{ kN}$, sendo cada banzo comprimido por um esforço de $-195,76 \text{ kN}$.

Quanto ao momento fletor na estrutura, admite-se, segundo o princípio de flexão composta, sua decomposição em um conjunto de forças normais em cada seção do arco, de modo que:

$$N_{bsup,binf} = \frac{N}{2} \pm \frac{M}{d}$$

Em que: $N_{bsup,binf}$ é o esforço normal no banzo superior ou no banzo inferior da seção do arco treliçado;

N é o módulo da força normal na seção, verificada no diagrama gerado pelo Ftool;

M é o módulo do momento fletor na seção, também sinalizado pelo diagrama correspondente;

d é a altura da seção transversal do arco treliçado, equivalente a $0,6\text{m}$.

Cabe ressaltar que tal procedimento visa à garantia do correto funcionamento da estrutura treliçada, em que os momentos fletores são sempre nulos. Como, mesmo na região de máxima compressão em cada uma das situações de carregamento, o momento fletor varia de acordo com a seção considerada, tomaram-se os máximos valores de momento fletor verificados nos diagramas de esforços para o pré-dimensionamento da estrutura. Trata-se de um procedimento de segurança, para que todo o arco responda adequadamente aos máximos esforços implícitos.

Logicamente, os máximos esforços fletores foram encontrados nos apoios. Dessa maneira, no caso de carregamento uniforme, o valor de M a ser considerado é de $-545,8 \text{ kN}$, enquanto que, no caso de carregamento não uniforme, aplica-se o M máximo de $-653,0 \text{ kN}$. Tratando-se de momentos fletores negativos, considera-se que os esforços normais resultantes da decomposição provoquem tração no banzo superior e compressão no banzo inferior da treliça, conforme demonstrado pela imagem 4.2.

A princípio, pensou-se que o valor de d a ser considerado era de metade da altura da seção transversal do arco treliçado (isto é, $0,3\text{m}$), já que se considerava que cada banzo fletiria em relação ao eixo da estrutura, equidistante de ambos os banzos. Contudo, mediante orientação dos professores, concluiu-se que cada um dos banzos reage ao momento fletor solicitante em relação ao eixo oposto, devendo ser considerado, de fato, o valor $d = 0,6\text{m}$.

⁵ Os valores negativos estão coloridos a fim de facilitar a compreensão e evitar ambiguidades.

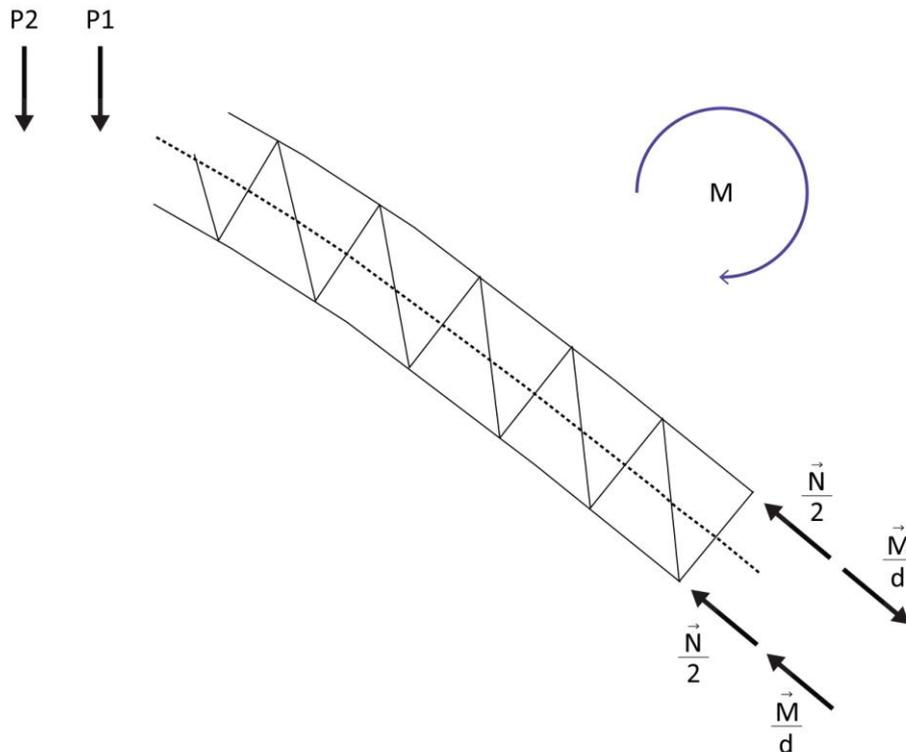


Imagem 4.2 – O momento fletor M se distribui ao longo da treliça provocando tração no banço superior e compressão no banço inferior. (Fonte: elaboração do grupo).

Admitiu-se, ainda, a inexistência de problemas de estabilidade global nos arcos e em seus membros comprimidos. Assim sendo, prosseguiu-se com os cálculos necessários; em primeiro lugar, para o caso de carregamento uniforme:

$$N_{max}^c = N_{bsup,binf} = \frac{N}{2} \pm \frac{M}{d}$$

$$N_{binf} = \frac{N}{2} - \frac{M}{d} = -212,025 - \frac{545,8}{0,6} \cong -212,025 - 909,667 \leftrightarrow$$

$$N_{binf} \cong -1\,121,692 \text{ KN (compressão)}$$

$$N_{bsup} = \frac{N}{2} + \frac{M}{d} = -212,025 + \frac{545,8}{0,6} \cong -212,025 + 909,667 \leftrightarrow$$

$$N_{bsup} \cong 697,642 \text{ KN (tração)}$$

$$N_{max}^c = N_{binf} \cong -1\,121,692 \text{ KN}$$

E, a seguir, para o caso seguinte, de carregamento não uniforme:

$$N_{max}^c = N_{bsup,binf} = \frac{N}{2} \pm \frac{M}{d}$$

$$N_{binf} = \frac{N}{2} - \frac{M}{d} = -195,76 - \frac{653}{0,6} \cong -195,76 - 1\,088,333 \leftrightarrow$$

$$N_{binf} \cong -1\,284,093 \text{ KN (compressão)}$$

$$N_{bsup} = \frac{N}{2} + \frac{M}{d} = -195,76 + \frac{653}{0,6} \cong -195,76 + 1\,088,333 \leftrightarrow$$

$$N_{bsup} \cong 892,573 \text{ KN (tração)}$$

$$N_{max}^c{}' = N_{binf} \cong -1\,284,093 \text{ KN}$$

Finalmente, obtidos os valores da máxima força normal N_{max}^c e $N_{max}^c{}'$ a ser suportada em cada um dos casos, aplicaram-se os cálculos que relacionam esses valores àquele da máxima tensão admissível para a estrutura. Para tanto, considerou-se, como indicado no enunciado do exercício, uma tensão de escoamento $\sigma_e = 270 \text{ MPa}$ e um fator de segurança $s = 1,8$.

Sendo o valor da tensão admissível σ_{adm} a razão entre σ_e e s , tem-se:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_e}{s}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{270}{1,8}$$

$$\sigma_{adm} = 150 \text{ MPa} = 150\,000 \text{ KN/m}^2$$

Reunindo-se esses valores, efetuou-se o cálculo da mínima área necessária para a seção do arco treliçado, correspondente à razão entre o módulo de N_{max}^c e σ_{adm} no primeiro caso e àquela entre o módulo de $N_{ax}^c{}'$ e σ_{adm} no segundo.

Para a primeira situação:

$$A = \frac{|N_{max}^c|}{\sigma_{adm}}$$

$$A \cong \frac{1\,121,692}{150\,000}$$

$$A \cong 0,007478 \text{ m}^2 \cong 74,78 \text{ cm}^2$$

Já para a situação seguinte:

$$A' = \frac{|N_{max}^c{}'|}{\sigma_{adm}}$$

$$A' \cong \frac{1\,284,093}{150\,000}$$

$$A' \cong 0,008561 \text{ m}^2 \cong 85,61 \text{ cm}^2$$

Tem-se, enfim, que a seção da estrutura para o caso de carregamento uniforme deve apresentar área mínima de $74,78 \text{ cm}^2$ e que, para o caso de carregamento não uniforme, essa seção deve apresentar dimensões mínimas de $85,61 \text{ cm}^2$.

5. Segundo modelo de análise

5.1. Modelagem do arco treliçado

Diferentemente do primeiro modelo, em que o próprio desenho do arco fornecido era capaz de revelar as coordenadas cartesianas de pontos-base para a configuração de um arco simplificado em vigas, este segundo modelo exigiu maior apuro formal, em decorrência da maior complexidade dos elementos de treliça. Tendo isso em vista, e considerando que a imagem fornecida não possui nitidez suficiente para a precisão desses elementos, propusemos uma aproximação do arco treliçado no programa AutoCAD, o que permitiu um controle de desenho maior que o Ftool. Para este traçado, consideramos um melhor delineamento dos arcos (banzos) com a ferramenta “arc” sobreposta ao desenho [do arco] do primeiro modelo de análise. A partir disso, e sabendo que a altura da secção transversal do arco treliçado é $d = 0,60$ m, replicamos o traçado do arco com distância $0,60$ m.

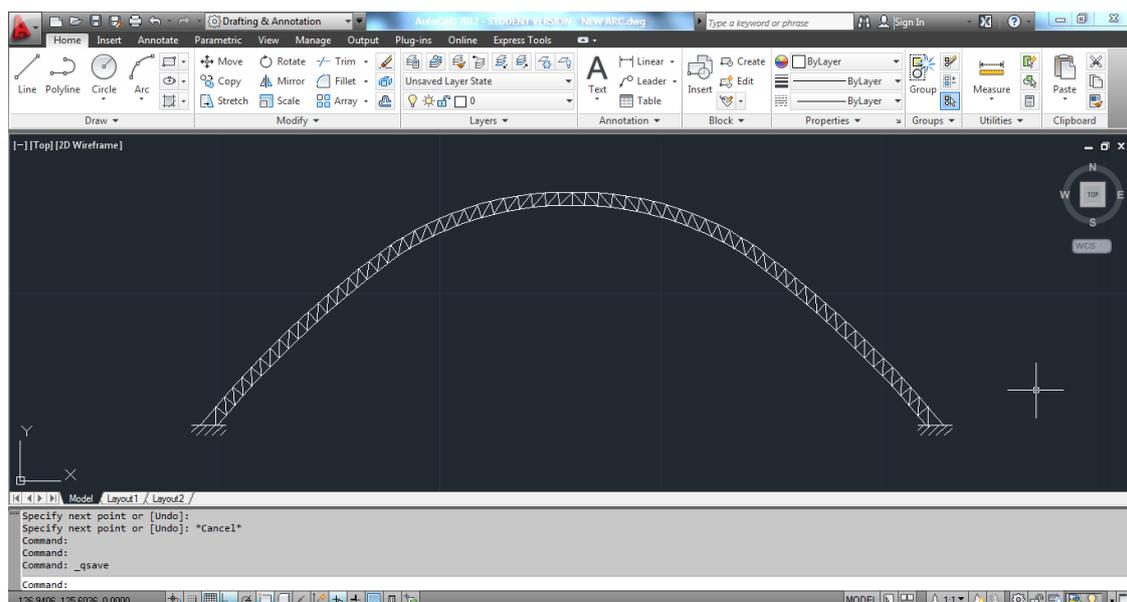


Imagem 5.1.1: Confecção do arco treliçado através do programa AutoCAD.
(Fonte: elaboração do grupo).

Através de imagens da estrutura, verificamos que cada elemento de treliça se aproxima de um quadrado. Por isso, encontramos uma forma de dividir o arco do CAD em N segmentos de $0,60$ m; por tentativa e erro, chegamos a um desenho razoável nas extremidades, sem a preocupação de satisfazer ao número exato de “quadrados” da estrutura real. Vale ressaltar que igualmente não nos detivemos à consideração de um quadrado preciso, de forma que os montantes reduzidos a uma linha no CAD e no Ftool são, na realidade, os eixos dos montantes.



Imagem 5.1.2: Aproximação de foto da estrutura utilizada para definir o módulo quadrado para a confecção do arco.
(Fonte: <<http://globo.com/rede-globo/mgtv-1a-edicao/v/obras-do-memorial-do-et-de-varginha-devem-ser-retomadas/2757726/>>).

Finalmente, desenhamos as diagonais. Sobre isso, é interessante observar que o desenho fornecido no enunciado⁶, revela o posicionamento das diagonais de maneira incorreta, como se houvesse 2 tipologias de nós, uma com o encontro de 3 elementos e outra com o encontro de 5. Em verdade, observamos que as diagonais se dão de maneira simétrica única (isto é, a partir de somente um eixo de simetria), de forma a configurar uma tipologia com o encontro de 4 elementos – a exceção são as extremidades e os pontos centrais dos arcos.

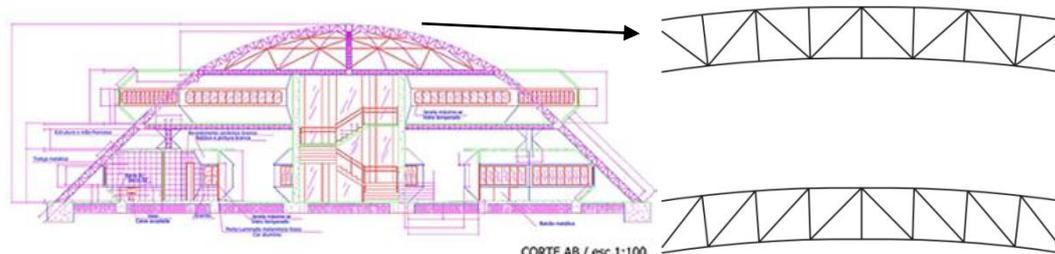
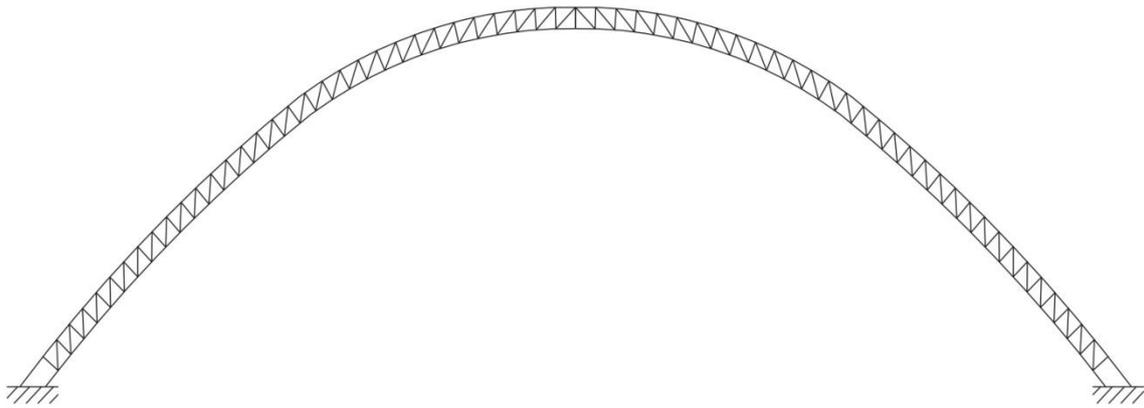


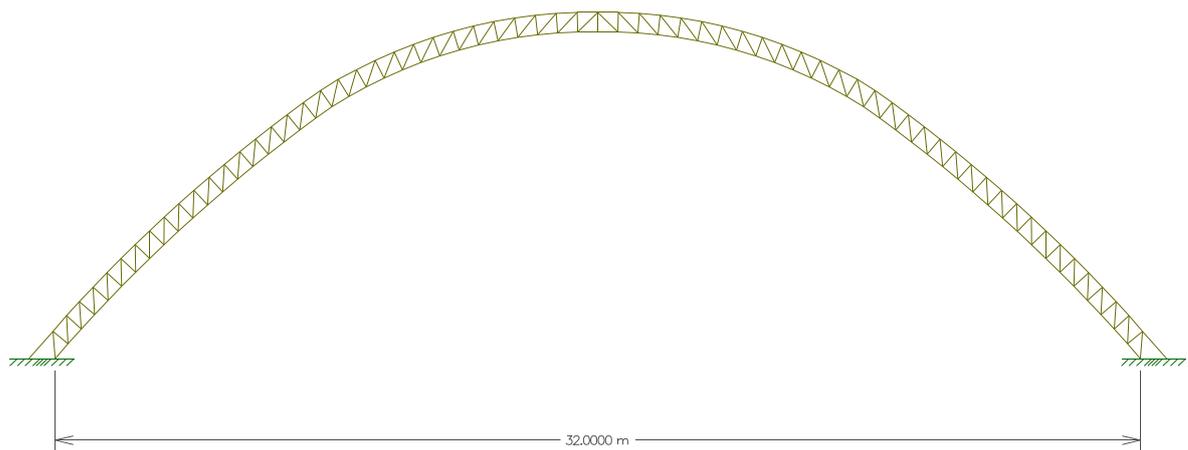
Imagem 5.1.3: Imagem fornecida no exercício (imagem à esquerda), esquema das diagonais sugerido (imagem superior à direita) e esquema verificado (imagem inferior à direita).
(Fonte: elaboração do grupo).

Com o modelo do AutoCAD pronto, fizemos a leitura das coordenadas dos nós e transferimos estes pontos ao Ftool. A operação foi trabalhosa, mas garantiu um resultado razoavelmente satisfatório. Comparando-se os dois modelos, temos:

⁶ Imagem retirada do site <<http://www.blogdomadeira.com.br/politica/memorial-do-et-sera-construido-na-vila-paiva/>>, acesso em 20/10/2013.



**Imagem 5.1.4: Arco treliçado gerado pelo programa AutoCAD.
(Fonte: elaboração do grupo).**



**Imagem 5.1.5: Arco treliçado gerado pelo programa Ftool.
(Fonte: elaboração do grupo).**

5.2. Aplicação dos carregamentos

No desenho gerado a partir do AutoCAD, não conseguimos equacionar os módulos da treliça aos pontos de aplicação das forças. No entanto, o desvio foi ínfimo (para a pouca precisão exigida pelo exercício), de maneira que não foi tão grosseiro transferir aqueles pontos de aplicação das forças aos nós imediatamente próximos. Sobre este processo, é válido descrever as hipóteses de desenho e de aplicação das forças, uma vez que, de início, mantivemos as coordenadas dos pontos de aplicação das forças (em correspondência ao primeiro modelo de análise), o que significou forças sendo aplicadas nas barras.

Esta primeira situação, derivada de certo imediatismo e/ou descuido do grupo, desvia do conceito de treliça ao manter as forças aplicadas fora dos nós (nas barras). E, como discretizamos o arco do primeiro modelo tendo como referência a medida interna do vão do arco (32m), acabamos por aplicar as forças no banzo inferior neste segundo modelo. Além disso, os nós foram configurados como fixos. Disso, foi com relativo estranhamento que nos deparamos com forças cortantes e momentos fletores na estrutura (imagens 5.2.2 e 5.2.3) – e bastante evidentes na região próxima à aplicação das forças – algo que não acontece na treliça de fato.

Posteriormente, nos demos conta do erro e experimentamos – por mera curiosidade – os diagramas até chegarmos à combinação nós articulados/forças aplicadas nos nós. Também experimentamos aplicar as forças nos nós do banzo superior e, noutro caso, no inferior. Vale ressaltar que, nesse momento, ainda não estávamos preocupados em descrever as secções dos elementos da treliça, apesar de sabermos que isso alteraria levemente os resultados, já que se trata de uma estrutura hiperestática. A seguir, apresentamos os diagramas de maneira simplificada, sendo que ao final, em anexo, encontram-se com os respectivos valores de esforços.

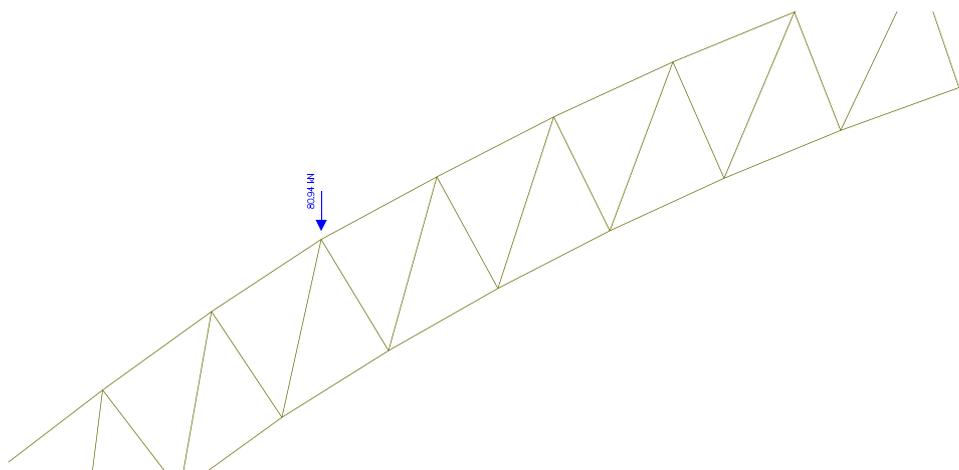
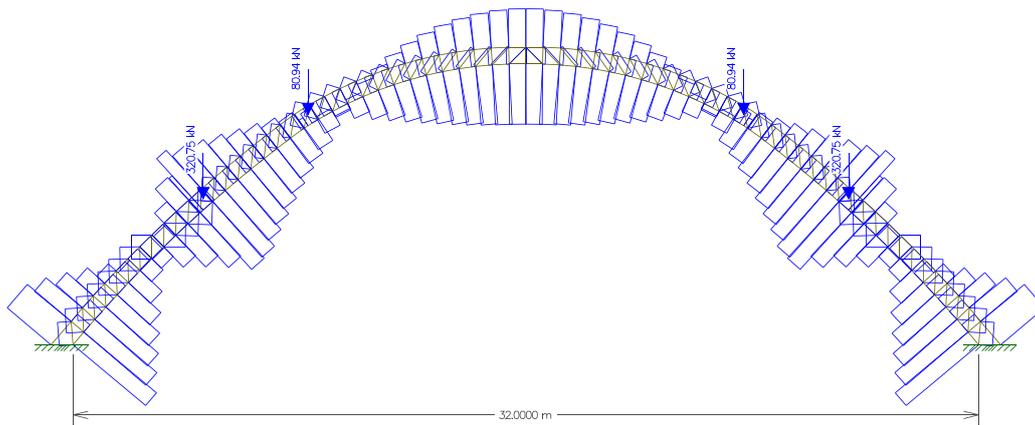
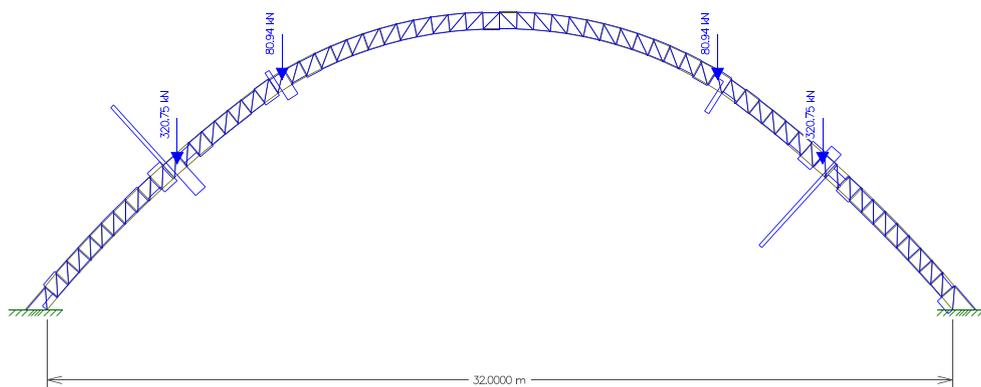


Imagem 5.2.1: Nós fixos e força aplicada na barra, próxima ao nó, mas não exatamente nele.
 A pouca precisão do programa Ftool talvez nos tenha levado à falsa impressão de que as forças estavam sendo aplicadas nos nós. (Fonte: elaboração do grupo).

Teste 1: nós fixos e forças aplicadas nas barras**Imagem 5.2.2: Diagrama de forças normais para a primeira configuração (nós fixos e forças aplicadas nas barras).****Imagem 5.2.3: Diagrama de forças cortantes para a primeira configuração (nós fixos e forças aplicadas nas barras).**

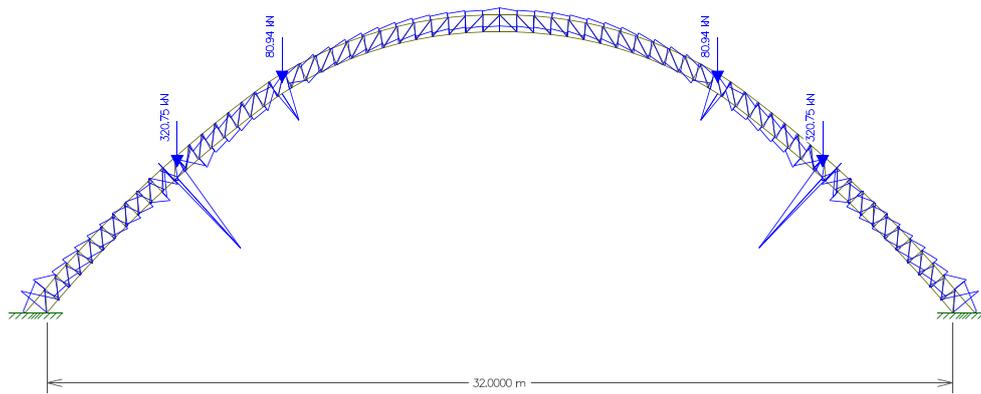


Imagem 5.2.4: Diagrama de momentos fletores para a primeira configuração (nós fixos e forças aplicadas nas barras).

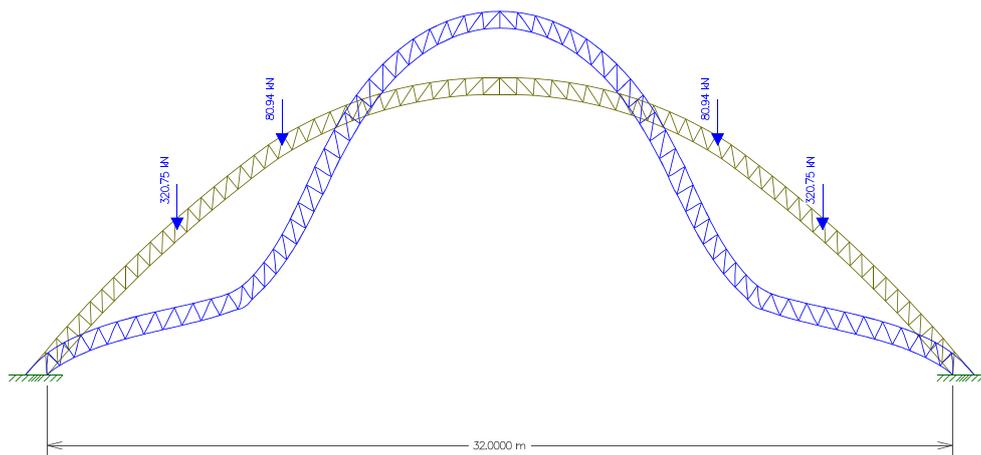


Imagem 5.2.5: Deformada da primeira configuração (nós fixos e forças aplicadas nas barras).

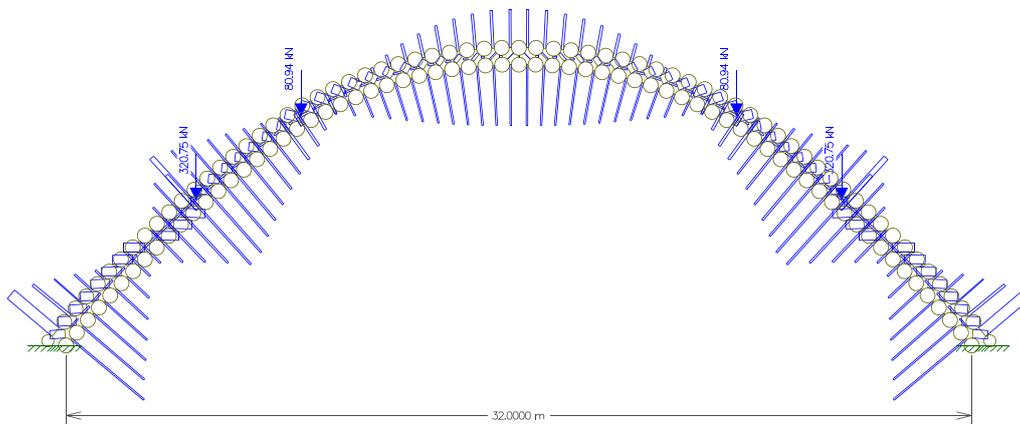
Teste 2: nós articulados e forças aplicadas nas barras

Imagem 5.2.6: Diagrama de forças normais para a segunda configuração (nós articulados e forças aplicadas nas barras).

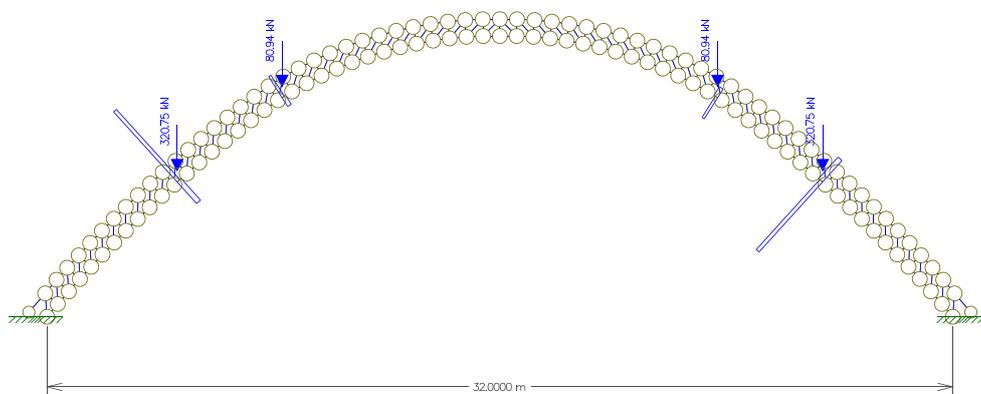


Imagem 5.2.7: Diagrama de forças cortantes para a segunda configuração (nós articulados e forças aplicadas nas barras).

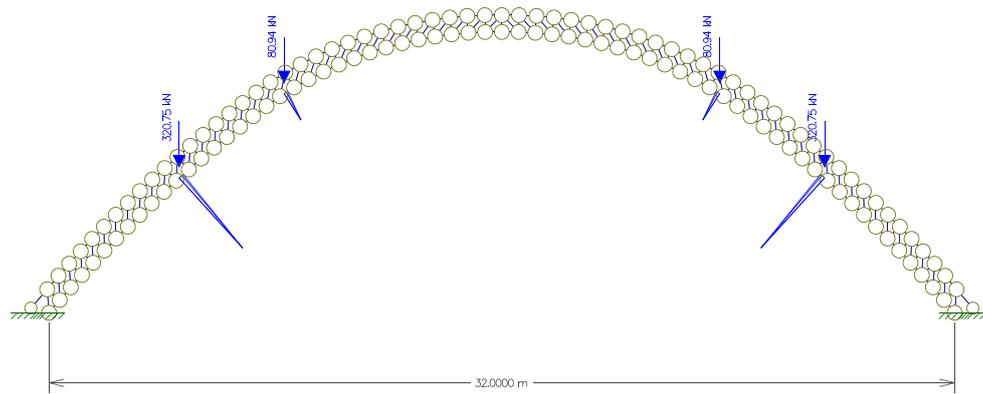


Imagem 5.2.8: Diagrama de momentos fletores para a segunda configuração (nós articulados e forças aplicadas nas barras).

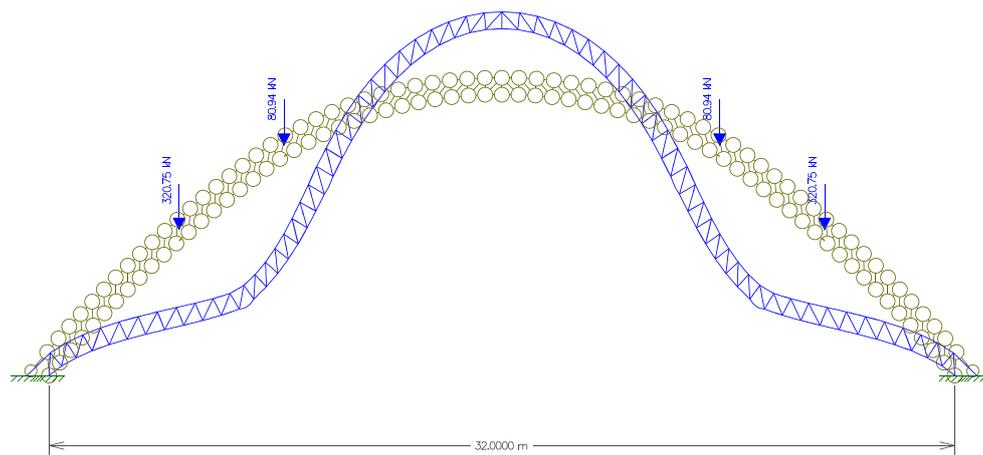


Imagem 5.2.9: Deformada da segunda configuração (nós articulados e forças aplicadas nas barras).

Teste 3: nós fixos e forças aplicadas nos nós

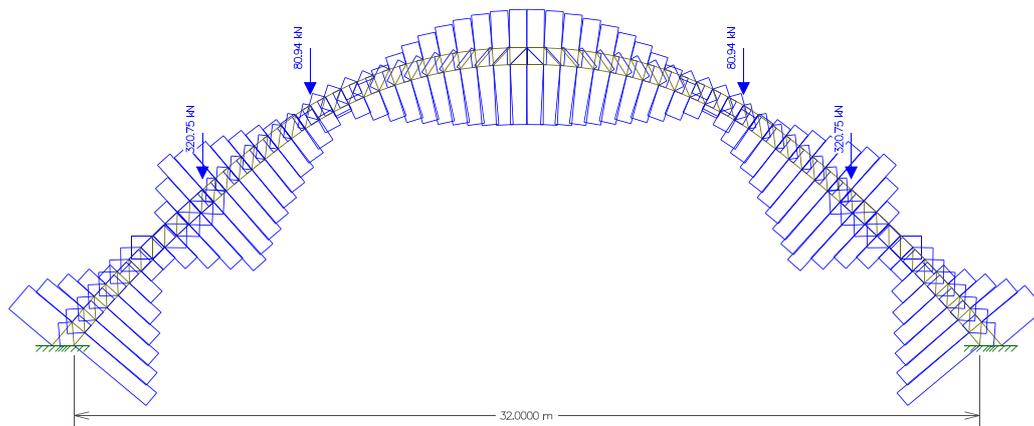


Imagem 5.2.10: Diagrama de forças normais para a terceira configuração (forças aplicadas nos nós e nós fixos).

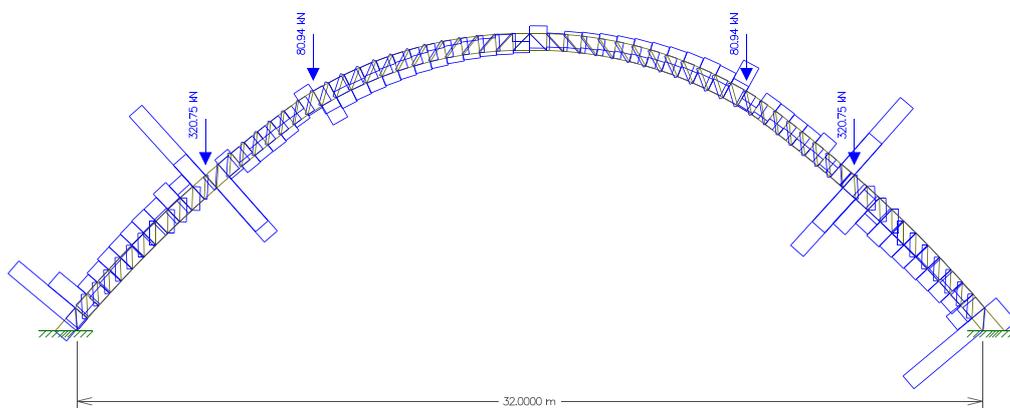


Imagem 5.2.11: Diagrama de forças cortantes para a terceira configuração (forças aplicadas nos nós e nós fixos).

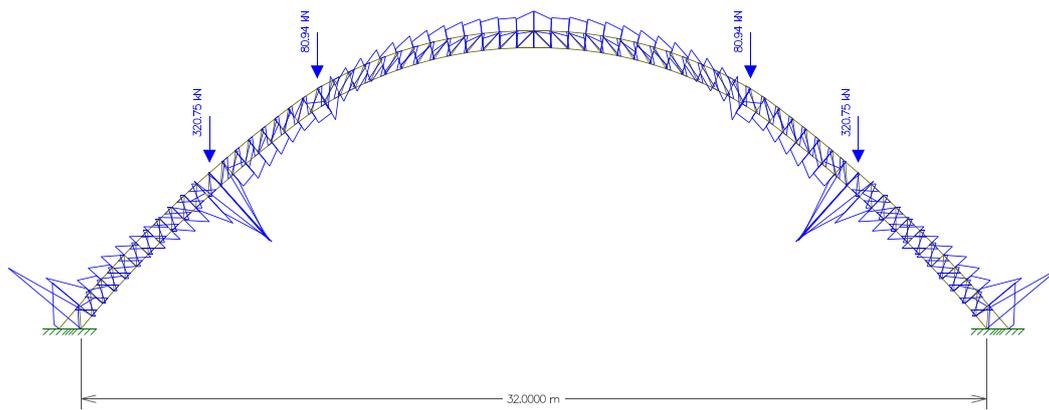


Imagem 5.2.12: Diagrama de momentos fletores para a terceira configuração (forças aplicadas nos nós e nós fixos).

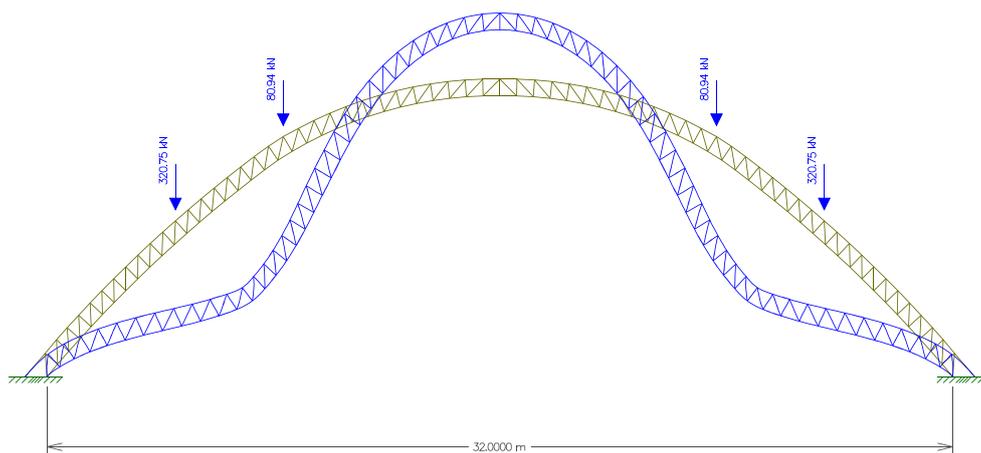


Imagem 5.2.13: Deformada da terceira configuração (forças aplicadas nos nós e nós fixos).

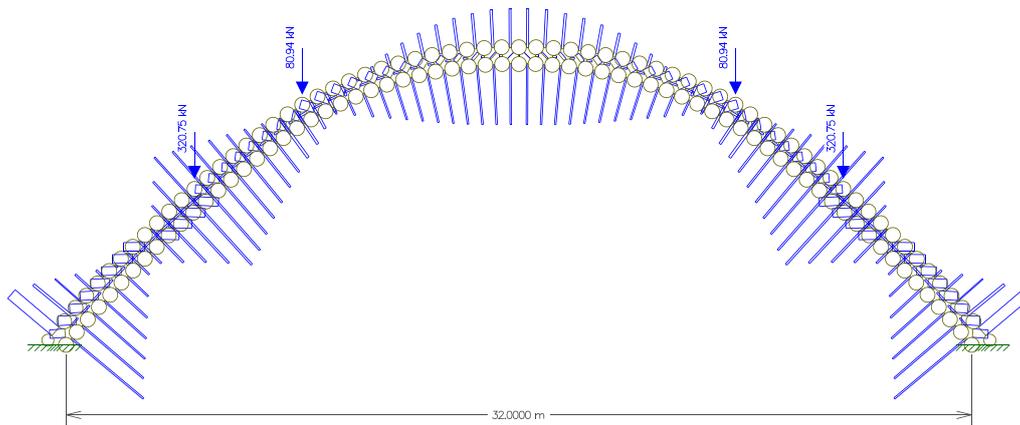
Teste 4: nós articulados e forças aplicadas nos nós (banzo superior)

Imagem 5.2.14: Diagrama de esforços normais para a quarta configuração (nós articulados e forças aplicadas no banzo superior).

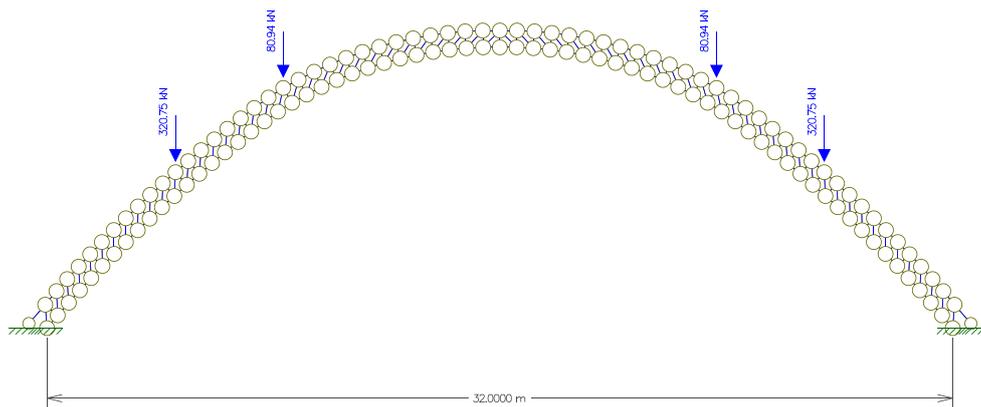


Imagem 5.2.15: Diagrama de esforços cortantes para a quarta configuração (nós articulados e forças aplicadas no banzo superior).

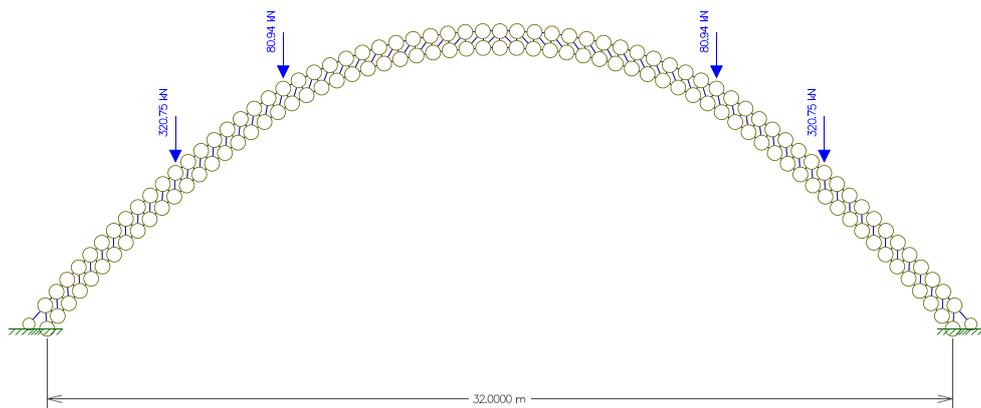


Imagem 5.2.16: Diagrama de momentos fletores para a quarta configuração (nós articulados e forças aplicadas no banzo superior).

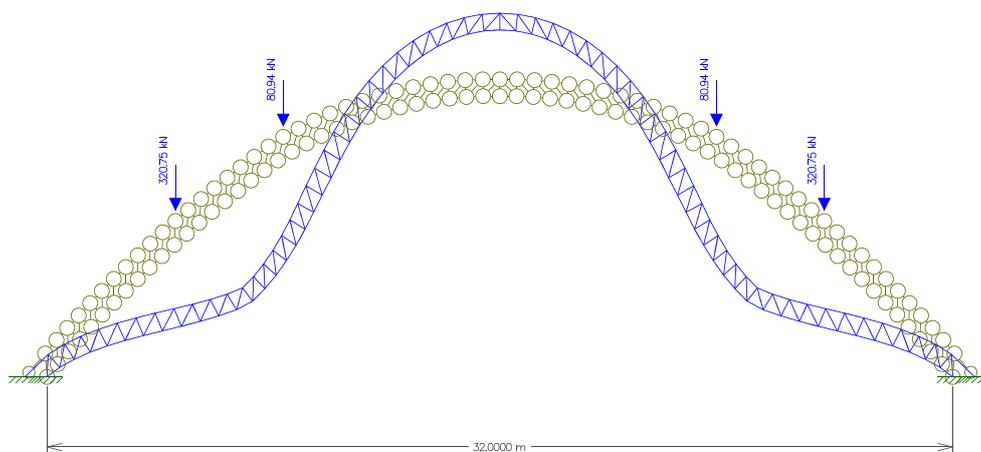


Imagem 5.2.17: Deformada da estrutura para a quarta configuração (nós articulados e forças aplicadas no banzo superior).

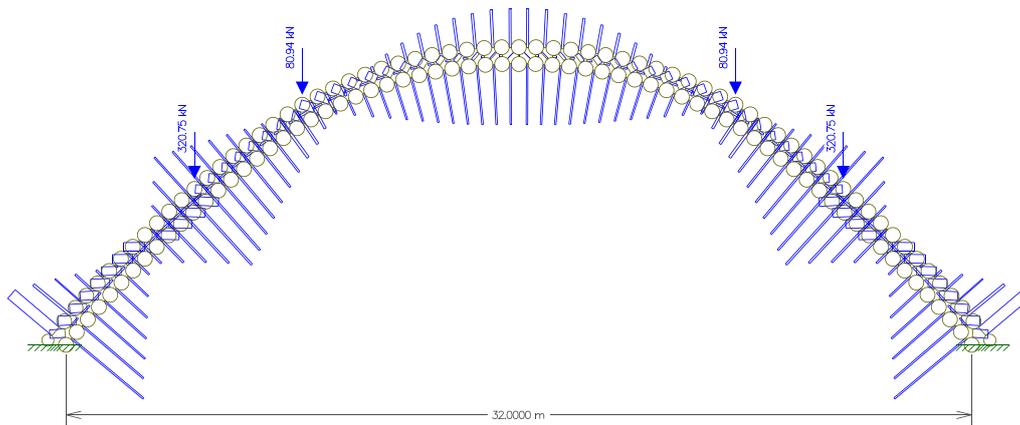
Teste 5: nós articulados e forças aplicadas nos nós (banzo inferior)

Imagem 5.2.18: Diagrama de esforços normais para a quinta configuração (nós articulados e forças aplicadas no banzo inferior).

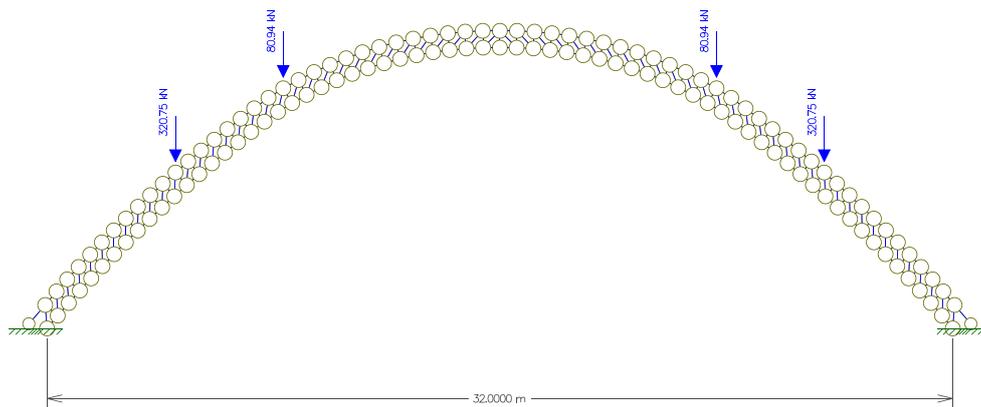


Imagem 5.2.19: Diagrama de esforços cortantes para a quinta configuração (nós articulados e forças aplicadas no banzo inferior).

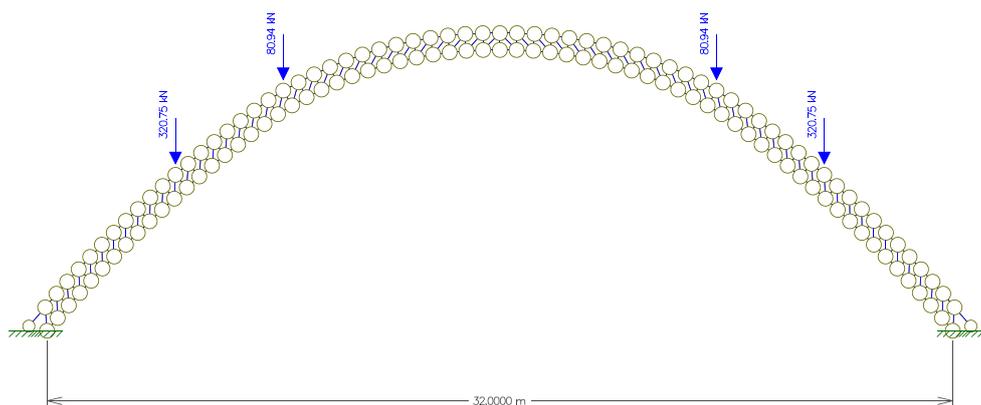


Imagem 5.2.20: Diagrama de momentos fletores para a quinta configuração (nós articulados e forças aplicadas no banzo inferior).

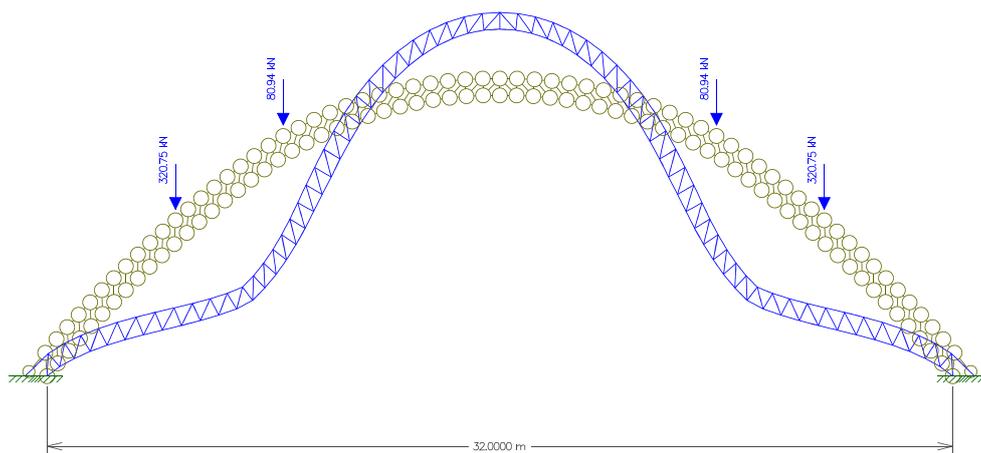


Imagem 5.2.21: Deformada da estrutura para a quinta configuração (nós articulados e forças aplicadas no banzo inferior).

A partir destes diagramas, é possível inferir que não há variações absolutamente grandes para os valores numéricos dos esforços. No entanto, as variações evidenciaram alguns aspectos que inclusive motivaram a escolha da configuração. De imediato, é bastante visível a presença de esforços cortantes e de momentos fletores nas três primeiras configurações (forças nas barras + nós fixos; forças nas barras + nós articulados; forças nos nós + nós fixos). Na primeira e na terceira, os nós fixos proporcionam uma rigidez inadmissível a uma estrutura como essa, que então será submetida a grandes esforços, o que vai de encontro à opção pelo conjunto arco + treliça como combinação para melhor distribuir os esforços.

De imediato é claro que as forças não devem ser aplicadas nas barras, situação que contrariaria o uso da treliça, produzindo esforços grandes e indesejáveis ao redor dos pontos de aplicação. Também, a articulação nos nós é garantidora de uma melhor distribuição dos esforços e, claro, da redução do grau de hiperestaticidade da estrutura. Entre as duas últimas configurações, estranhamos um pouco que tenhamos obtido valores um tanto quanto discrepantes. Próximo ao engastamento, obtivemos $-876,75\text{KN}$ para a aplicação das forças no banzo inferior e $-892,95\text{KN}$ para a aplicação no banzo superior.

Aparentemente, na estrutura, a interface entre os arcos treliçados e o piso e a cobertura se dá nos pontos inferiores dos arcos – e inclusive este foi o raciocínio a que chegamos junto ao monitor. No entanto, na medida em que a ideia é que a treliça trabalhe na dimensão de sua altura estrutural, é um tanto controverso que façamos aplicar as forças diretamente no banzo inferior. Afinal, não é gratuita a diferença de cerca de 16KN entre as duas situações. Dessa forma, optamos pela conformação “nós articulados; forças aplicadas nos nós do banzo superior”.

5.3. Secções e diagramas de esforços solicitantes

Finalmente, optamos pela configuração que julgamos mais condizente às hipóteses de traçado e à conceituação de uma estrutura em treliça. A partir disso, pudemos inserir no modelo do Ftool as secções anteriormente estimadas no pré-dimensionamento. Com isso, deveríamos verificar se as normais nos banzos ficariam abaixo do valor máximo derivado do cálculo do primeiro modelo de análise.

Para as secções dos elementos, chegamos a uma conclusão para a forma da estrutura da treliça e depois buscamos uma aproximação para perfis existentes no mercado. Inicialmente, havíamos proposto secções I para os banzos, hipótese descartada ao refletirmos sobre o encaixe entre os elementos do arco. Analisamos melhor as fotografias da estrutura e discutimos sobre a viabilidade de montagem, finalmente chegando à seguinte composição:

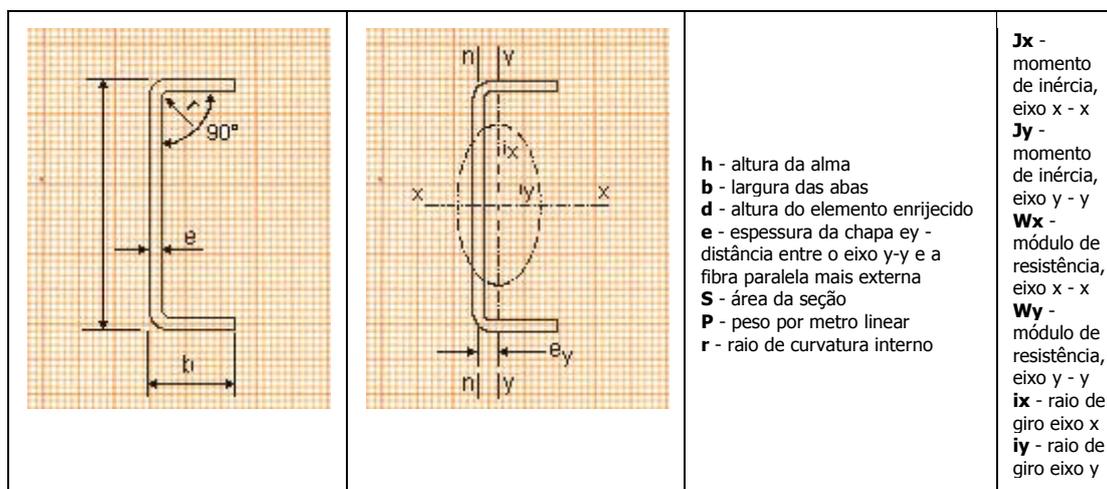
- Perfis em U para os banzos inferior e superior;
- Chapas de aço para os montantes e as diagonais.



Imagem 5.3.1: Esquema de composição do elemento treliçado do arco (Fonte: elaboração do grupo)

A partir disso e dos valores obtidos quando do pré-dimensionamento, deveríamos então encontrar secções em U com área igual ou superior a $74,78\text{ cm}^2$ para os banzos e $\frac{1}{4}$ disso (conforme proposto no enunciado), aproximadamente $18,70\text{ cm}^2$, para os montantes e diagonais.

De início, nos deparávamos somente com valores de secção abaixo dos 74,78cm² necessários. Todas as tabelas apontavam para, no máximo, uma secção de 35,89cm² para perfis U:



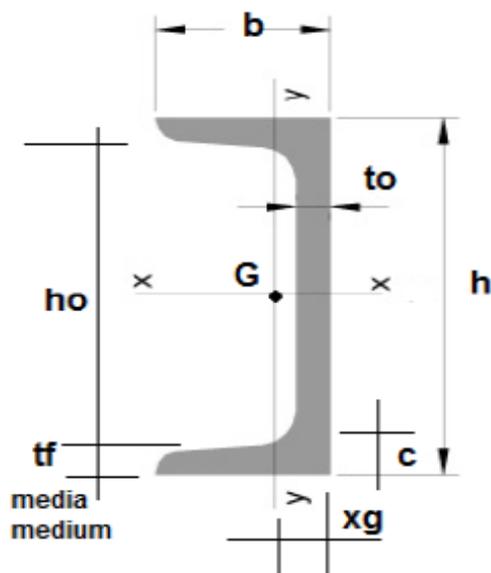
Dimensões			S	P	J _x	W _x	i _x	e _y	J _y	W _y	i _y
h	B	e = r	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm ⁴	cm ³	cm
mm.	mm.	mm.									
50	20	2.0	1.64	1.29	5.7	2.3	1.87	0.60	0.60	0.41	0.60
		2.5	2.01	1.58	6.8	2.7	1.84	0.58	0.72	0.50	0.59
		3.0	2.35	1.84	7.8	3.1	1.82	0.55	0.83	0.58	0.59
		3.5	2.67	2.10	8.6	3.4	1.79	0.52	0.92	0.66	0.59
	25	1.52	1.42	1.12	5.5	2.2	1.96	0.70	0.88	0.49	0.78
		1.90	1.75	1.38	6.6	2.6	1.94	0.71	1.07	0.60	0.78
		2.28	2.07	1.62	7.7	3.0	1.92	0.73	1.26	0.71	0.77
		2.66	2.38	1.86	8.6	3.4	1.90	0.75	1.43	0.82	0.77
	30	3.04	2.67	2.10	9.5	3.8	1.88	0.77	1.59	0.92	0.77
		4.00	3.37	2.65	11.4	4.5	1.84	0.73	1.95	1.16	0.76
		2.5	2.51	1.97	9.6	3.8	1.96	1.06	2.26	1.10	0.95
		3.0	2.95	2.31	11.1	4.4	1.94	1.03	2.63	1.29	0.94
40	4.0	3.77	2.96	13.5	5.4	1.89	0.97	3.28	1.66	0.93	
	2.0	2.44	1.92	10.9	4.1	2.06	1.57	4.12	1.55	1.29	
	3.0	3.55	2.78	14.4	5.7	2.01	1.52	5.85	2.25	1.28	
	4.0	4.57	3.59	17.7	7.1	1.97	1.46	7.38	2.90	1.27	
60	25	2.5	2.51	1.97	12.8	4.2	2.26	0.77	1.44	0.79	0.76
		3.0	2.95	2.31	14.7	4.9	2.23	0.74	1.68	0.93	0.75
	30	2.0	2.24	1.76	12.3	4.1	2.34	1.03	1.99	0.92	0.94
		3.0	3.25	2.55	17.1	5.7	2.29	0.98	2.81	1.34	0.93
		4.0	4.17	3.28	21.0	7.0	2.24	0.92	3.53	1.72	0.92
	40	2.0	2.64	2.08	15.7	5.2	2.44	1.51	4.41	1.60	1.29
		2.5	3.26	2.56	19.0	6.3	2.41	1.49	5.38	1.97	1.28
		3.0	3.85	3.02	22.0	7.3	2.39	1.46	6.29	2.33	1.27
		4.0	4.97	3.90	27.3	9.1	2.34	1.41	7.97	3.01	1.26
	75	40	1.52	2.26	1.77	20.5	5.4	3.01	1.10	3.70	1.28
1.90			2.80	2.20	25.1	6.6	2.99	1.12	4.55	1.58	1.27
2.28			3.32	2.61	29.4	7.8	2.97	1.14	5.37	1.88	1.27
2.66			3.84	3.01	33.5	8.9	2.95	1.16	6.15	2.17	1.26
3.04			4.35	3.41	37.4	9.9	2.93	1.18	6.91	2.45	1.26
3.42			4.84	3.80	41.2	10.9	2.01	1.20	7.64	2.73	1.25
3.80			5.32	4.17	44.7	11.9	2.89	1.22	8.34	3.00	1.25
4.18			5.79	4.54	48.0	12.8	2.87	1.24	9.02	3.27	1.24
4.76	6.48	5.09	52.7	14.0	2.85	1.27	10.00	3.66	1.24		

	50	3.00	4.90	3.84	44.8	11.9	3.02	1.87	12.67	3.71	1.60	
90	25	2.50	3.26	2.56	34.4	7.6	3.25	0.65	1.63	0.84	0.70	
		3.00	3.85	3.02	39.9	8.8	3.22	0.62	1.90	0.99	0.70	
		4.00	4.97	3.90	49.6	11.0	3.16	0.57	2.39	1.27	0.69	
	40	3.00	4.75	3.73	56.9	12.6	3.46	1.31	7.27	2.49	1.23	
		4.00	6.17	4.85	71.8	15.9	3.41	1.26	9.28	3.24	1.22	
	60	4.00	7.77	6.10	101.4	22.5	3.61	2.22	28.81	7.07	1.92	
		5.00	9.52	7.47	121.0	26.9	3.56	2.17	34.81	8.66	1.91	
		6.00	11.19	8.78	138.6	30.8	3.51	2.11	40.37	10.19	1.89	
	80	5.00	11.52	9.04	157.2	34.9	3.69	3.15	77.06	14.97	2.58	
		6.00	13.59	10.67	181.0	40.2	3.64	3.09	89.81	17.66	2.57	
100	25	2.50	3.51	2.75	44.7	8.9	3.57	0.61	1.67	0.85	0.69	
		3.00	4.15	3.26	51.9	10.3	3.54	0.59	1.95	1.00	0.68	
		4.00	5.37	4.22	64.9	12.9	3.47	0.53	2.46	1.29	0.67	
	40	1.52	2.64	2.07	39.9	7.9	3.88	0.96	4.05	1.33	1.23	
		1.90	3.27	2.57	49.0	9.8	3.86	0.97	4.99	1.65	1.23	
		2.28	3.89	3.06	57.6	11.5	3.84	0.99	5.89	1.96	1.22	
		2.66	4.51	3.54	65.9	13.1	3.82	1.01	6.76	2.26	1.22	
		3.04	5.11	4.01	73.9	14.7	3.80	1.03	7.61	2.56	1.22	
		3.42	5.69	4.47	81.6	16.3	3.78	1.04	8.43	2.85	1.21	
		3.80	6.27	4.92	88.8	17.7	3.76	1.06	9.22	3.14	1.21	
		4.18	6.83	5.36	95.8	19.1	3.74	1.08	9.98	3.42	1.20	
	50	4.76	7.67	6.02	105.9	21.1	3.71	1.11	11.09	3.84	1.20	
		1.52	2.94	2.31	47.3	9.4	4.00	1.32	7.49	2.04	1.59	
		1.90	3.65	2.87	58.1	11.6	3.98	1.34	9.24	2.52	1.58	
		2.28	4.35	3.41	68.5	13.7	3.96	1.36	10.94	3.00	1.58	
		2.66	5.04	3.95	78.6	15.7	3.94	1.38	12.59	3.48	1.58	
		3.04	5.71	4.48	88.2	17.6	3.92	1.40	14.20	3.94	1.57	
		3.42	6.38	5.00	97.5	19.5	3.91	1.41	15.75	4.40	1.57	
		3.80	7.03	5.52	106.5	21.2	3.89	1.43	17.27	4.84	1.56	
		4.18	7.67	6.02	115.1	23.0	3.87	1.45	18.74	5.28	1.56	
		4.76	8.63	6.77	127.5	25.4	3.84	1.48	20.89	5.94	1.55	
	60	6.00	10.59	8.31	151.3	30.2	3.78	1.58	25.17	7.29	1.54	
		4.00	8.17	6.42	129.4	25.8	3.98	2.17	29.95	7.21	1.91	
		5.00	10.02	7.87	154.9	30.9	3.93	2.12	36.25	8.83	1.90	
		6.00	11.79	9.26	177.9	35.5	3.88	2.06	42.11	10.39	1.88	
		80	5.00	12.02	9.44	200.1	40.0	4.08	3.09	80.32	15.29	2.58
			6.00	14.19	11.14	231.0	46.2	4.03	3.04	93.75	18.04	2.57
			8.00	18.19	14.36	284.6	56.9	3.94	2.92	118.16	23.26	2.54
			6.00	12.09	9.49	260.0	41.6	4.63	1.46	27.27	7.56	1.50
	125	50	1.52	3.35	2.63	82.2	12.9	4.94	1.17	8.06	2.10	1.54
1.90			4.17	3.27	101.3	15.9	4.92	1.19	9.94	2.61	1.54	
2.28			4.97	3.90	119.6	18.8	4.90	1.20	11.78	3.10	1.53	
2.66			5.76	4.52	137.5	21.6	4.88	1.22	13.57	3.59	1.53	
3.04			6.53	5.13	154.8	24.3	4.86	1.24	15.32	4.08	1.53	
3.42			7.30	5.73	171.5	27.0	4.84	1.26	17.02	4.55	1.52	
3.80			8.05	6.32	187.6	29.5	4.82	1.27	18.67	5.02	1.52	
4.18			8.80	6.91	203.1	31.9	4.80	1.29	20.28	5.47	1.51	
4.76			9.91	7.78	225.9	35.5	4.77	1.32	22.66	6.16	1.51	
150	50	1.90	4.60	3.61	149.9	19.9	5.70	1.08	10.42	2.66	1.50	
		2.28	5.49	4.31	177.4	23.6	5.68	1.10	12.35	3.17	1.49	
		2.66	6.37	5.00	204.1	27.2	5.65	1.12	14.24	3.67	1.49	
		3.04	7.23	5.68	230.1	30.6	5.63	1.13	16.08	4.16	1.49	
		3.42	8.09	6.35	255.3	34.0	5.61	1.15	17.87	4.65	1.48	
		3.80	8.93	7.01	279.7	37.2	5.59	1.17	19.62	5.12	1.48	
		4.18	9.76	7.66	303.3	40.4	5.57	1.19	21.32	5.59	1.47	
		4.76	11.01	8.64	338.0	45.0	5.54	1.21	23.84	6.30	1.47	
		6.00	13.59	10.67	406.5	54.2	5.46	1.36	28.91	7.75	1.45	
		8.00	17.49	13.73	501.6	66.8	5.35	1.25	36.23	9.96	1.43	
175	70	5.00	13.52	10.61	457.0	60.9	5.81	2.34	64.34	12.69	2.18	
		6.00	15.69	12.32	638.4	72.9	6.37	1.49	39.82	9.55	1.59	

	70	6.00	17.49	13.73	766.9	87.6	6.62	2.18	79.22	15.34	2.12
200	50	1.90	5.55	4.36	299.3	29.9	7.33	0.91	11.20	2.74	1.41
		2.28	6.63	5.20	354.9	35.4	7.31	0.93	13.28	3.26	1.41
		2.66	7.70	6.04	409.3	40.9	7.28	0.95	15.32	3.78	1.41
		3.04	8.75	6.87	462.4	46.2	7.26	0.96	17.31	4.29	1.40
		3.42	9.80	7.69	514.1	51.4	7.24	0.98	19.26	4.79	1.40
		3.80	10.83	8.50	564.5	56.4	7.21	1.00	21.16	5.29	1.39
		4.18	11.85	9.30	613.6	61.3	7.19	1.01	23.01	5.77	1.39
		4.76	13.39	10.51	686.2	68.6	7.15	1.04	25.76	6.51	1.38
		6.00	16.59	13.02	831.6	83.1	7.08	1.18	31.32	8.02	1.37
	8.00	21.49	16.87	1039.1	103.9	6.95	1.07	39.46	10.34	1.35	
	70	5.00	16.02	12.58	905.6	90.5	7.51	2.13	70.37	13.20	2.09
		6.00	18.99	14.91	1057.5	105.7	7.46	2.06	82.53	16.62	2.08
		8.00	24.69	19.38	1334.1	133.4	7.35	1.97	105.14	20.25	2.06
	80	5.00	17.02	13.36	1000.7	100.0	7.66	2.58	102.44	17.11	2.45
		6.00	20.19	15.85	1170.5	117.0	7.61	2.53	120.38	20.26	2.44
8.00		26.29	20.64	1481.7	148.1	7.50	2.43	153.96	26.33	2.41	
240	70	6.00	21.39	16.79	1647.8	137.3	8.77	1.92	86.88	15.96	2.01
		8.00	27.89	21.90	2090.9	174.2	8.65	1.81	110.92	20.71	1.99
250	75	6.00	22.59	17.73	1910.7	152.8	9.19	2.10	106.98	18.36	2.17
	90	6.00	24.39	19.15	2178.7	174.2	9.45	2.78	179.39	26.22	2.71
300	60	6.00	23.79	18.68	2600.8	173.3	10.45	1.31	58.66	12.01	1.57
	80	6.00	26.19	20.56	3119.5	207.9	10.91	2.15	134.89	21.26	2.26
	90	8.00	35.89	28.18	4334.6	288.9	10.98	2.48	243.15	34.96	2.60

Imagem 5.3.3: padrão de tabelas encontradas. (Fonte: <http://www.skylightestruturas.com.br/perfis_u.asp>).

Com algum esforço e persistência, chegamos aos perfis U de padrão americano, mais robustos, para conseguir um valor de seção próximo ao pré-dimensionado:



Tamanho (Size)		Dimensões (Dimensions)				Área	Propriedades (Properties)								Peso
h	h	hg,c,tf	to	to	b		h/btf	Ix	Wx	ix	Iy	Wy	iy	xg	Weight
pol	mm	mm	pol	mm	mm	cm ²	1/cm	cm ⁴	cm ²	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm	kg/m
3"	76,2	62,4	170	4,32	35,8	7,78	3,06	68,9	18,1	2,98	8,2	3,32	1,03	1,11	6,1
	76,2	15,9	258	6,55	38	9,48	2,89	77,2	20,3	2,85	10,3	3,82	1,04	1,11	7,4
	76,2	6,9	356	0,04	40,5	11,4	2,71	86,3	22,7	2,75	12,7	4,39	1,06	1,16	8,9
4"	101,6	86,6	180	4,57	40,1	10,1	3,37	159,5	31,4	3,97	13,1	4,61	1,14	1,16	8
	101,6	15,9	247	6,27	41,8	11,9	3,24	174,4	34,3	3,84	15,5	5,1	1,14	1,15	9,3
	101,6	7,5	320	8,13	43,7	13,7	3,1	190,6	37,5	3,73	18	5,61	1,15	1,17	10,8
6"	152,4	135	200	5,08	48,8	15,5	3,59	546	71,7	5,94	28,8	8,06	1,36	1,3	12,2
	152,4	19,1	314	7,98	51,7	19,9	3,39	632	82,9	5,63	36	9,24	1,34	1,27	15,6
	152,4	8,7	437	11,1	54,8	24,7	3,19	724	95	5,42	43,9	10,5	1,33	1,31	19,4
	152,4	-	559	14,2	57,9	29,4	3,03	815	107	5,27	52,4	11,9	1,33	1,38	23,1
8"	203,2	183,4	220	5,59	57,4	21,8	3,57	1356	133,4	7,89	54,9	12,8	1,59	1,45	17,1
	203,2	20,6	303	7,7	59,5	26,1	3,44	1503	147,9	7,6	63,6	14	1,56	1,41	20,5
	203,2	9,9	395	10	61,8	30,8	3,32	1667	164	7,35	72,9	15,3	1,54	1,4	24,2
	203,2	-	487	12,4	64,2	35,6	3,2	1830	180,1	7,17	82,5	16,6	1,52	1,44	27,9
	203,2	-	579	14,7	66,5	40,3	3,09	1990	196,2	7,03	92,6	17,9	1,52	1,49	31,6
10"	254	231,8	240	6,1	66	29	3,47	2800	221	9,84	95,1	19	1,81	1,61	22,7
	254	-	379	9,63	69,6	37,9	3,3	3290	259	9,31	117	21,6	1,76	1,54	29,8
	254	23,8	526	13,4	73,3	47,4	3,13	3800	299	8,95	139,7	24,3	1,72	1,57	37,2
	254	-	673	17,1	77	56,9	2,98	4310	339	8,7	164,2	27,1	1,7	1,65	44,7
	254	11,1	820	20,8	80,8	66,4	2,83	4820	379	8,52	191,7	30,4	1,7	1,76	52,1
12"	304,8	279,4	280	7,11	74,7	39,1	3,21	5370	352	11,7	161,1	28,3	2,03	1,77	30,7
	302,8	-	387	9,83	77,4	47,4	3,02	6010	394	11,3	186,1	30,9	1,98	1,71	37,2
	304,8	27	510	13	80,5	56,9	2,98	6750	443	10,9	214	33,7	1,94	1,71	44,7
	304,8	-	632	16,1	83,6	66,4	2,87	7480	491	10,6	242	36,7	1,91	1,76	52,1
	304,8	12,7	755	19,2	86,7	75,9	2,77	8210	539	10,4	273	39,8	1,9	1,83	59,6
15"	381	348	400	10,2	86,4	64,2	2,67	13100	688	14,3	338	51	2,3	2	50,4
	381	-	422	10,7	86,9	66,4	2,66	13360	701	14,2	347	51,8	2,29	1,99	52,1
	381	33,3	520	13,2	89,4	75,8	2,58	14510	762	13,8	387	55,2	2,25	1,98	59,5
	381	-	618	15,7	91,9	85,3	2,51	15650	822	13,5	421	58,5	2,22	1,99	67
	381	16,5	716	18,2	94,4	94,8	2,45	16800	882	13,3	460	62	2,2	2,03	74,4
	381	-	814	20,7	96,9	104,3	2,38	17950	942	13,1	498	66,5	2,18	2,21	81,9

Imagem 5.3.4: Modelo e tabela com perfis U, padrão americano.

(Fonte: <<http://184.173.247.74/~tecem082/wp-content/uploads/2013/03/AB23-perfil-u-aco-laminado-padrao-americano-tecem.pdf>>).

Dessa maneira, adotamos uma seção de $75,90\text{cm}^2$, com $h=30,48\text{cm}$, o que é relativamente válido, uma vez que, a partir das imagens da estrutura, é possível estabelecer uma proporção próxima a 1:2 entre a largura do arco treliçado – correspondente à medida h do perfil U dos banzos – e a altura deste arco (medida da extremidade superior do banzo de cima até a extremidade inferior do banzo de baixo).



Imagem 5.3.5: Detalhe analisado para inferir proporções entre os elementos do arco.

(Fonte: <<http://f.i.uol.com.br/fotografia/2013/08/08/307202-970x600-1.jpeg>>, acesso em 01/11/2013).

Para os montantes e as diagonais, deveríamos encontrar uma chapa de aço com espessura suficiente para garantir que uma largura de até 27,94cm (medida interna do perfil U, sem considerar uma folga, que na prática seria necessária), e que resultasse numa secção mínima de 18,70cm². Assim, a área da secção dividida por essa largura máxima nos daria a espessura mínima necessária para atender a tais condições.

Sendo: L_{md} a largura máxima dos montantes e das diagonais (equivalente à medida interna na secção U);

h a altura do perfil U;

t a espessura das abas da secção;

E_{md} a espessura necessária para os montantes e as diagonais.

$$L_{md} \leq h - 2 \times t \leq 30,48 - 2 \times 1,27 \leq 27,94 \text{ cm}$$

$$E_{md} \cong S \div L_{md} \cong 18,70 \div 27,94 \cong 0,669 \text{ cm} \cong 6,69 \text{ mm}$$

Dessa forma, deveríamos encontrar uma chapa de aço comercial com uma espessura de no mínimo 6,69mm. Na categoria “chapas grossas”, encontramos o valor de 7,14mm para cobrir aquela exigência:

Espessura			Peso		
Pol	mm	Kg/m ²	Pol	mm	Kg/m ²
1/4	6,35	49,79	2"	50,80	398,37
9/32	7,14	56,02	2.1/4	57,15	448,17
5/16	7,94	62,25	2.1/2	63,50	497,97
3/8	9,53	74,69	2.3/4	69,85	547,76
7/16	11,11	87,14	3"	76,20	597,56
1/2	12,70	99,59	3.1/4	82,55	647,36
9/16	14,29	112,04	3.1/2	88,90	697,15
5/8	15,88	124,49	3.3/4	95,25	746,95
3/4	19,05	149,39	4"	101,60	796,75
7/8	22,23	174,29	4.1/2	114,30	896,34
1"	25,40	199,19	5"	127,00	995,93
1.1/4	31,75	248,98	5.1/2	139,70	1095,53
1.1/2	38,10	298,78	6"	152,40	1195,12
1.3/4	44,45	348,57	6.1/2	165,10	1294,71

Imagem 5.3.6: Tabela de chapas grossas de aço (Fonte: <<http://acosnovabrazil.com.br/chapa-grossa.html>>)

Com as secções definidas – assim como a conformação “nós articulados; forças aplicadas nos nós do banzo inferior” – transferimo-as ao programa Ftool. Obtivemos os seguintes diagramas de esforços solicitantes e deformada:

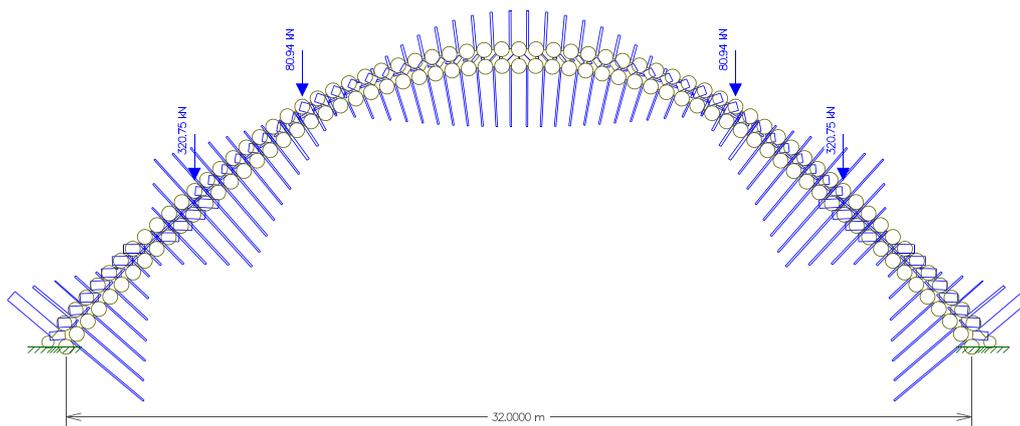


Imagem 5.3.7: Diagrama de esforços normais para a configuração final (com secções)

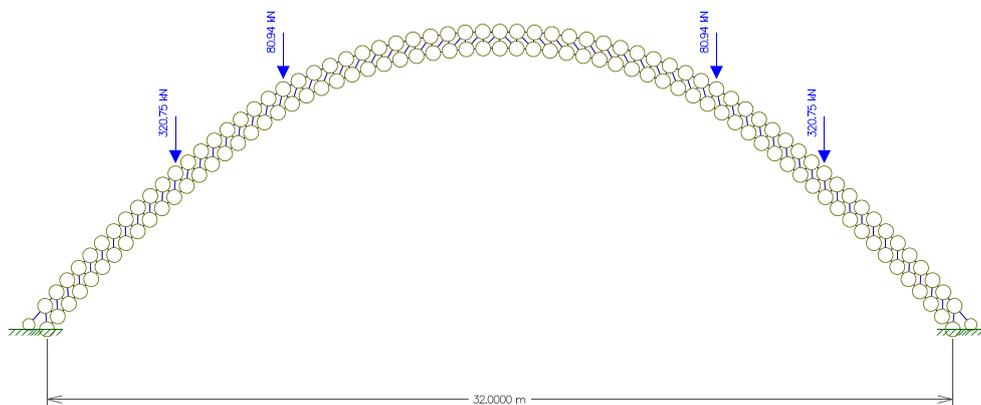


Imagem 5.3.8: Diagrama de esforços cortantes e momentos fletores para a configuração final (com secções)

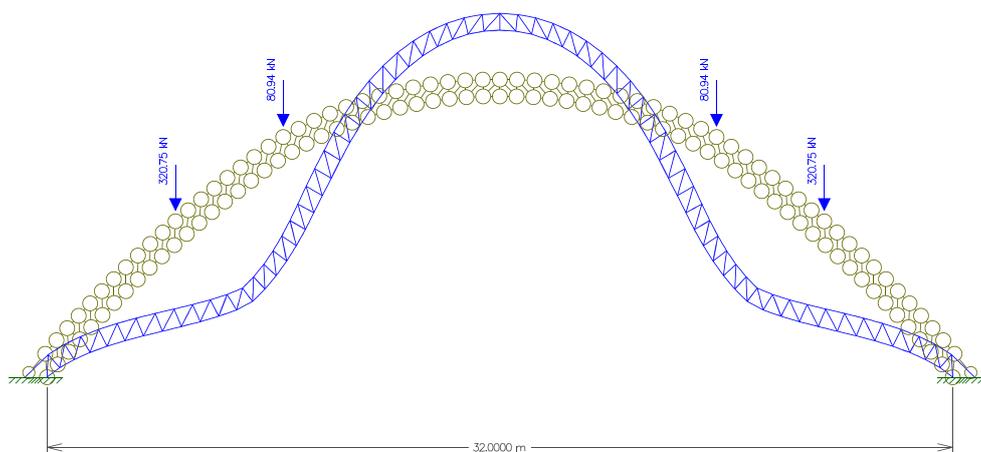


Imagem 5.3.9: Deformada da estrutura para a configuração final (com secções)

Não houve muita mudança entre as secções genérica e comercial – e de fato pouca mudança com relação ao modelo previamente gerado no programa sem secção definida. Comprovadamente, há somente forças normais – e de compressão (característica intrínseca à estrutura em arco) – de forma que esforços cortantes e de momentos fletores se anulam. Ainda assim, ela se deforma, e de maneira bastante semelhante à que se observa no primeiro modelo de análise, o que demonstra que a treliça tem um comportamento global de uma viga (ou de um arco, neste caso) comum.

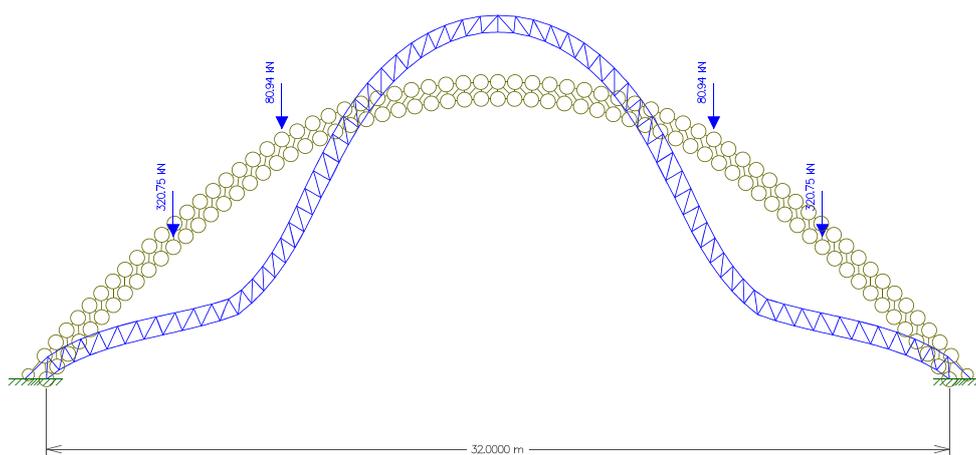


Imagem 5.3.10: Deformada para o segundo modelo de análise

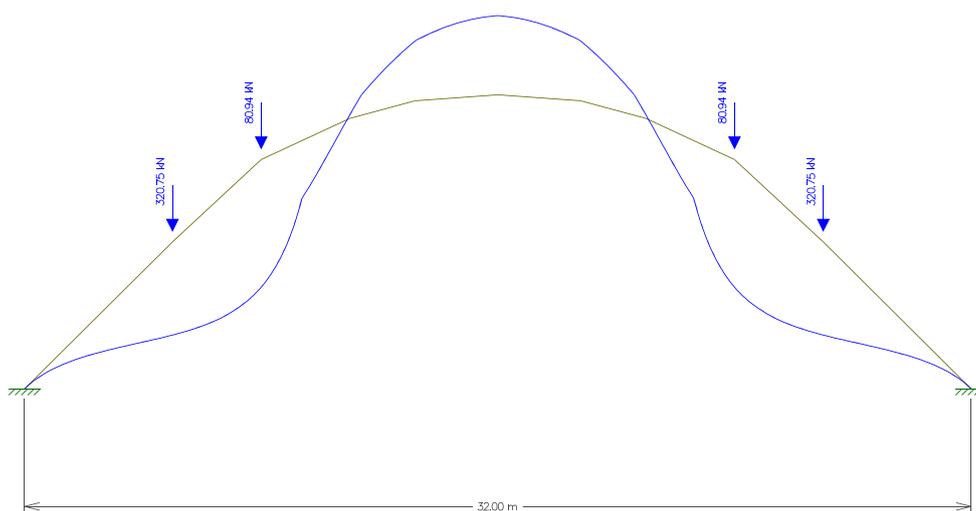


Imagem 5.3.10: Deformada para o primeiro modelo de análise

E, a partir dos resultados obtidos no diagrama de forças normais, pudemos avaliar que os elementos da estrutura não precisam de um redimensionamento. As forças normais máximas obtidas nos banzos inferior e superior não ultrapassam aqueles valores definidos pelo modelo simplificado (primeiro modelo), quando do cálculo para os esforços separados em cada banzo.

Sendo: N_1 a força normal máxima nos banzos obtida no pré-dimensionamento;

N_2 a força normal máxima nos banzos, no segundo modelo de análise.

$$N_1 = 1\,121,692\text{ KN (compressão)}$$

$$N_2 = 878,74\text{ KN (compressão)}$$

$$N_2 < N_1\text{ OK!}$$

6. Estimativas de custo

6.1. Percurso metodológico

Neste exercício, foi-nos proposta uma estimativa de custo para a produção dos elementos que compõem os arcos treliçados. O grupo, diante do termo “produção” – expresso literalmente no enunciado – se questionou sobre os determinantes de custo numa obra e/ou numa indústria, entendendo que “produzir”, por exemplo, uma viga, seria um processo complexo que demandaria precisar muitas condicionantes, a começar pela compra e manufatura do aço bruto. Obviamente, não há, neste exercício, a pretensão de precisar o montante gasto na estrutura – apesar de que seria interessante questionar sobre o valor que foi (e que, diga-se de passagem, está sendo) investido na construção do memorial. Trata-se apenas de uma estimativa – um tanto grosseira – para o gasto com as barras de aço, com base no peso global dos dois arcos treliçados (obtido a partir das seções dimensionadas previamente, do comprimento total dos elementos e da densidade do material) e na cotação da unidade de massa do aço construído no cenário atual.

Sobre este raciocínio apontado, cabe explicitar as dúvidas e hipóteses enfrentadas/formuladas que foram um percurso até chegarmos a esta solução. Podemos inferir que as incertezas derivaram da pouca familiaridade com esse tipo de cálculo – o que talvez seja uma lacuna nesse curso de Arquitetura e Urbanismo.

Da expressão “produção dos elementos”, logo de antemão abandonamos a ideia de avaliar o preço do aço enquanto commodity, uma vez que seria grosseiro transportar a ideia de aço bruto (sem nenhuma manufatura) para uma situação de aço construído. Nesse sentido, buscamos outros caminhos possíveis para a estimativa. Ao levarmos o desconhecimento ao monitor, ele logo apontou que deveríamos consultar “tabelas de custos unitários da construção civil”. Ocorre que não conseguimos encontrar nelas um dado satisfatório; o máximo que levantamos foi o custo estimado para um tipo de barra de aço CA-50, que não condizia com o tipo de barra proposto para o memorial:

“Após registrar queda nos últimos meses, o preço da barra de aço CA-50 3/8” apresentou em fevereiro discreta alta, de 0,45%, passando de R\$ 4,00 para R\$ 4,02/kg.”⁷

⁷ <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/156/artigo286682-1.aspx>>, acesso em 20/10/2013.

Um valor similar, e para a referência, também, do aço CA-50, encontramos a seguinte tabela de preços, referente ao mês de setembro⁸:

Setor de Economia



Boletim Econômico - Setembro de 2013

Preço de materiais de construção no Estado de São Paulo, setembro de 2013
Ordem decrescente de variação percentual no mês

	Material	Unidade	Preço	Variação (%)		
				Mês	Ano	12 meses
1	Massa pronta p/ reboco externo c/imperm	kg	0,28	3,70	3,70	3,70
2	Chapa compensado resinado 12mm	m ²	13,68	2,47	5,47	6,21
	IGP-M -Setembro/2013	Índice	529,09	1,50	3,69	4,40
3	Tinta látex branca PVA	lata	159,05	1,32	1,38	2,82
4	Prego 18x27 c/ cabeça	kg	4,70	1,29	4,44	3,75
5	Cerâmica esmaltada 20x20cm PEI III	m ²	20,29	0,74	1,96	2,99
6	Tábua de madeira de 3ª p/const. E=2,5cm	m	7,91	0,64	1,15	1,93
7	Placa cerâmica (azulejo) 15x15cm 1ª linha PEI II	m ²	15,90	0,63	1,47	1,79
8	Alimentação tipo marmiteix nº 8	unidade	8,22	0,49	6,34	7,45
9	Chapa compensado plastificado 18mm	m ²	27,07	0,41	0,00	0,11
10	Tubo de cobre Ø=15mm classe industrial	m	17,99	0,39	2,57	1,98
11	Concreto FCK=25 MPa	m ³	246,23	0,37	0,96	0,83
12	Fio cobre antichama isol. 750 V 2,5 mm ²	rolo	69,86	0,34	-0,03	-0,03
13	Janela de correr 2 folhas 1,2x1,2 m	m ²	252,19	0,29	1,92	4,76
14	Aço CA-50 Ø 10 mm	kg	3,47	0,29	6,44	6,77

Também encontramos valores do kg de aço para armaduras de aço em tabelas do presente ano da EDIF⁹:

03-02-04	ARMADURA EM AÇO CA-50	KG	5,38
03-02-07	ARMADURA EM AÇO CA-60	KG	5,34
03-02-09	ARMADURA EM AÇO CA-60 - TELA	KG	5,62

Ainda, tentamos nos comunicar com fabricantes de barras de aço (Paulisteel® e Gerdau®). Não houve retorno, mas persistimos na busca por outros meios. Consultamos revistas temáticas de engenharia, construção e estruturas metálicas, mas também nada refletiu a especificidade do valor procurado:

- *Construção Mercado*: na edição Nº146, de Setembro de 2013, na página 75, a referência mais próxima é para um “galpão de uso geral médio”, cujo custo, em São Paulo, é de R\$1.171,68 (referência: Julho de 2013);
- *Construção Metálica*: não houve referências de custo nas edições consultadas (nº 108 e nº110), apenas uma reportagem com o custo geral para uma cobertura feita em aço.

⁸ Disponível em <<http://www.sindusconsp.com.br/>>, acesso em 28/10/2013.

⁹ Disponível em <http://www.cpos.sp.gov.br/orgaos/empresas_cpos>, acesso em 28/10/2013.

Neste ponto, chegamos à conclusão de que talvez fosse mais acertado buscarmos informações e/ou orientações de cálculo **diretamente com pessoas envolvidas com este tipo de raciocínio** e/ou estrutura. Inicialmente, nos comunicamos com um colega de engenharia civil da Escola Politécnica da USP de uma das integrantes do grupo, que forneceu o contato do Prof. Dr. Henrique de Britto Costa. Este professor, embora não tenha podido ajudar diretamente, deu uma orientação para o cálculo e ainda divulgou o contato do Prof. Dr. Valdir Pignata, também da POLI-USP.

*“Infelizmente não posso lhe ajudar, eu não sou da área de estruturas metálicas. Mas sei que o **custo é proporcional ao peso da estrutura**. Então é preciso calcular o volume dos elementos, e daí, usando o peso específico do ferro (7,8 gf/cm³), chegar ao peso. Mas para calcular o volume é preciso ter o projeto, ou pelo menos um anteprojeto para poder fazer uma estimativa. No PEF o colega especializado em estruturas de aço é o Prof. Valdir Pignata, talvez V. pudesse consultá-lo.”¹⁰*

Contatamos o Prof. Pignata e, aparentemente por acaso – já que estava viajando e muito compromissado –, ele respondeu o e-mail:

*“Estou entendendo que você sabe o valor da massa da estrutura que vc [sic] quer estimar o preço. **Estimar o custo multiplicando a massa por um valor unitário de custo é uma aproximação grosseira, especialmente para obras pequenas**. O fabricante deve estimar em função do trabalho que ele vai ter. Quanto maior for a repetitividade, menor é o custo de fabricação. No entanto, o professor deve ter dito para vocês usarem um valor de custo unitário para simplificar o trabalho. **Isso é normal para uma pré-estimativa**. Não estou acompanhando o mercado e não sei quanto está “mais ou menos” o preço do aço montado por unidade de massa. Há algum tempo estava em torno de 10 reais o quilograma. Se for uma obra pequena, talvez se aproxime de 15 reais. Talvez o Prof. Julio Fruchtengarten, meu colega de sala e ex-professor da disciplina de estruturas metálicas possa lhe ajudar mais, pois ele tem escritório e está no mercado.”¹¹*

A partir desses contatos, pudemos esclarecer dúvidas e nos certificar sobre a ideia metodológica inicial. Finalmente, insistimos e conseguimos conversar com o Prof. Dr. Julio Fruchtengarten. Pelo telefone, ele nos assegurou que **o kg do aço estrutural construído atualmente está entre R\$ 13,00 e R\$ 15,00**. Ele nos explicou que esse valor oscila, basicamente, em função do fabricante, do estado do mercado (preço do aço como commodity; demanda e disponibilidade, inflação), da mão-de-obra, das características da estrutura em questão (por exemplo, porte, forma, complexidade) e do transporte – nas palavras dele, “*depende do que você quer fazer*” – e que essa margem é para obras de pequeno porte – descrevemos a obra ao professor e assim ele pôde inferir sobre o porte da estrutura.

Dessa maneira, mais seguros, pudemos respaldar o método sugerido numa informação de um profissional ligado ao mercado de estruturas metálicas. Calculamos o volume dos arcos

¹⁰ E-mail respondido em 29/10/2013.

¹¹ E-mail respondido em 29/10/2013.

treliçados, a massa total do aço neles contida e multiplicamos pelos valores assegurados pelo professor Julio.

6.2. Cálculo da massa do aço

Das secções comerciais encontradas, temos:

$$S_1 = 75,9 \text{ cm}^2$$

$$S_2 = 18,7 \text{ cm}^2$$

Em que: S_1 é a secção dos banzos;

S_2 é a secção dos montantes e das diagonais.

Através do arco treliçado construído no programa AutoCAD, obtivemos as somatórias das dimensões lineares de cada componente:

$$\sum L_d = n \times l = 64 \times 84,58 = 5.413,12 \text{ cm}$$

$$\sum L_m = n \times l = 65 \times 60 = 3.900 \text{ cm}$$

$$\sum L_{bi} = 3.908,71 \text{ cm}$$

$$\sum L_{bs} = 4.113,28 \text{ cm}$$

Em que: L_d é o comprimento das diagonais;

L_m é o comprimento dos montantes;

n é o número de elementos;

l é o comprimento de cada elemento;

L_{bi} é o comprimento do banzo inferior;

L_{bs} é o comprimento do banzo superior.

Com as medidas lineares dos tipos de elementos (montantes, banzos e diagonais), somamos os comprimentos de elementos com secção igual e assim pudemos calcular dois volumes:

$$\sum L_{s1} = \sum L_{bi} + \sum L_{bs} = 8.021,99 \text{ cm}$$

$$\sum L_{s2} = \sum L_d + \sum L_m = 9.313,12 \text{ cm}$$

$$V_{s1} = S_1 \times \sum L_{s1} = 75,9 \times 8.021,99 = 608.869,041 \text{ cm}^3$$

$$V_{s2} = S_2 \times \sum L_{s2} = 18,7 \times 9.313,12 = 174.155,344 \text{ cm}^3$$

$$\sum V = V_{s1} + V_{s2} = 783.024,385 \text{ cm}^3$$

Em que: L_{s1} é o comprimento das diagonais;
 L_{s2} é o comprimento dos montantes;
 V_{s1} é o volume obtido da secção 1;
 V_{s2} é o volume obtido da secção 2;
 V é o volume total.

A partir disso e da densidade do aço ($7,8 \text{ g/cm}^3$), podemos estimar a massa do arco treliçado:

$$m = d \times V = 7,8 \times 783.024,385 = 6.107.590,203 \text{ g} = 6.107,59 \text{ kg}$$

Em que: m é a massa;
 V é o volume;
 d é a densidade do aço.

Como tais cálculos se referiram a apenas 1 arco, devemos multiplicar essa massa por 2 para obter a massa total dos arcos e assim estimar o custo total dessa estrutura.

$$M_t = 2 \times m = 2 \times 6.107,59 = 12.215,18 \text{ kg}$$

Em que: M_t é a massa total.

6.3. Estimativa do preço da estrutura

Finalmente, foi possível estimar o preço dos dois arcos treliçados, multiplicando os valores fornecidos pelo Prof. Dr. Julio Fruchtengarten pela massa total calculada:

$$P_{r1} = 13 \times M_t = 13 \times 12.215,18 = R\$ 158.797,34$$

$$P_{r2} = 15 \times M_t = 15 \times 12.215,18 = R\$ 183.227,70$$

Em que: P_{r1} é o preço total considerando o kg do aço a R\$ 13,00;

P_{r2} é o preço total considerando o kg do aço a R\$ 15,00.

Seguindo a estimativa do prof. Julio, o preço dos arcos treliçados, em conjunto, giraria em torno das duas quantias acima. Se acertada, a somatória corresponderia a cerca de 60,27% dos R\$ 304.000,00 já consumidos pela obra (segundo a Prefeitura de Varginha). Ainda que haja bastante imprecisão, tal relação nos dá uma boa noção para avaliar a quantia já gasta – tendo em vista que a obra está inacabada.

7. Considerações finais

O segundo exercício proposto pela disciplina requereu análises da estrutura do Memorial do ET de Varginha e não impôs limitações quanto à forma de resolvê-lo, fato que possibilitou que o grupo fizesse interpretações autônomas e levantasse hipóteses de resolução. Da mesma forma, o próprio relatório também foi aberto a formas de apresentação diversas, o que – e também devido ao período ampliado para a entrega – nos permitiu lançar mão de recursos gráficos que nos ajudaram a entender o comportamento da estrutura face aos carregamentos atuantes.

Desta grande amplitude, derivou a compreensão de que a precisão não era um item de primeira necessidade do exercício. Pelo contrário, valeu, muito mais, avaliar a estrutura global e rapidamente, o que é uma postura indicada a um profissional como o engenheiro ou o arquiteto, que devem ter uma noção prévia das operações construtivas e dos materiais que estão propondo. De imediato, ficou claro que entender o comportamento de uma construção não é ter total domínio sobre suas minúcias, mas apreender nuances derivadas do tipo do material e do sistema estrutural escolhido. No caso específico deste exercício, por exemplo, possuíamos poucas informações sobre a estrutura do memorial e, ainda assim, pudemos chegar a diversas conclusões apenas com estimativas, sem a necessidade de atender a um rigor numérico.

Esta grande lacuna de dados foi a própria tônica do exercício, já que, de forma autônoma, buscaram-se meios e fontes para o levantamento hipóteses e para a confirmação destas. A partir de croquis, fotografias, vídeos e produções gráficas próprias, o grupo pôde ter domínio sobre o objeto de estudo; através de consultas a meios eletrônicos e impressos, da ida à monitoria e do contato com profissionais, foi possível avaliar de forma mais segura os requisitos do exercício.

Em específico, a tarefa de fazer uma estimativa dos custos dos elementos treliçados foi um desafio e um ganho de consciência da postura profissional que deve ser assumida. O processo colocou o grupo frente a um processo semelhante à realidade enfrentada pelo profissional arquiteto no que diz respeito ao exercício de investigação pela necessidade de entender um item particular em meio a uma formação generalizante. Recorreu-se a um grande processo de busca de mercado, desde índices usados na construção civil, revistas de construções e, finalmente, alguns professores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que puderam nos fornecer as informações necessárias.

Assinala-se, ainda, que a própria história do ET de Varginha despertou curiosidade e motivou o grupo à tarefa proposta. Foi interessante conhecer como o caso repercutiu nacional e internacionalmente, deixando, ainda hoje, o município mineiro em evidência. Pesquisando sobre o episódio, nos deparamos com várias

teorias e histórias sobre o que teria acontecido em 1996, mesmo que a maioria tenha sido desmistificada. Mesmo assim, seu impacto ainda pode ser visto na cidade, com todas as suas construções, referências e até a construção do Memorial do ET, em uma tentativa da prefeitura de incentivar o turismo. Entretanto, a troca de partidos no poder fez com que se negligenciasse o projeto e a construção da obra. A falência da construtora, a alegação da falta de dinheiro por parte da prefeitura (mesmo que a maioria do montante necessário já tivesse sido reservada) e a troca de partidos na gestão da cidade (e a conseqüente troca de prioridades no plano de desenvolvimento econômico da cidade) são motivos levaram à paralisação e ao abandono da obra. Há uma contradição quanto aos interesses dos poderes e suas argumentações, pois houve um investimento muito grande para o começo de sua construção, com a alegação de que o seu término levantaria fundos para a cidade com o incentivo do turismo e agora há o sucateamento da estrutura e o abandono da obra, com o discurso de que a cidade tem outras prioridades.

A estrutura insólita e o custo previsto para ela nos fazem pensar sobre a destinação do dinheiro público, já que o ônus apenas aumenta mediante a sua postergação, uma vez que a estrutura está se deteriorando por causa das intempéries e as despesas para sua recuperação e recomeço se ampliaram recentemente.

Em suma, através deste exercício, pode-se notar a interdisciplinaridade do campo de atuação do profissional-arquiteto e, portanto, a necessidade de versatilidade de suas competências e do senso de investigação e pesquisa, assim como a valorização da estimativa e do entendimento global para poder inferir sobre custos e sobre o comportamento de uma estrutura. Certamente esse conhecimento se desdobrará em posturas profissionais enriquecidas.

8. Referências Bibliográficas

- Manual do programa Ftool in.: <http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool/>.
- Páginas acessadas em 20/10/2013:

<<http://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2013/06/varginha-nao-preve-investimentos-para-estatuas-e-memorial-do-et.html>>

<<http://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2013/08/apos-respeito-de-dilma-memorial-do-et-sera-retomado-30-mais-carro.html>>

<<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2013/08/1323860-governo-federal-investe-mais-de-r-1-mi-em-museu-sobre-et-de-varginha.shtml>>

<<http://www.viaeptv.com/epnoticia/noticias/NOT,4,8,389662,Apos+16+anos+do+suposto+ET+obras+de+memorial+estao+paradas.aspx>>

<<http://www.cub.org.br/>>

<http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/infraestrutura/tabelas_de_custos/>

- Páginas acessadas em 01/11/2013:

<http://www.istoe.com.br/reportagens/105958_A+HISTORIA+OFICIAL+DO+ET+DE+VARGINHA>

<<http://www.portaldatransparencia.gov.br/convenios/DetalhaConvenio.asp?CodConvenio=589155&TipoConsulta=0>>

<<http://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2013/06/varginha-nao-preve-investimentos-para-estatuas-e-memorial-do-et.html>>

<<http://www.varginha.mg.gov.br/2010/6995-programa-12-08-2010>>

<http://www.varginha.mg.gov.br/editais/cat_view/144-editais/467-2013/480-maio?start=12>

<<http://www2.planalto.gov.br/imprensa/entrevistas/entrevista-concedida-pela-presidenta-da-republica-dilma-rousseff-para-as-rádios-vanguarda-fm-e-itatiaia-varginha-mg/view>>

<<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2013/08/1323860-governo-federal-investe-mais-de-r-1-mi-em-museu-sobre-et-de-varginha.shtml>>

- Páginas acessadas em 02/11/2013:

<<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2013/08/1328633-csn-aumenta-preco-do-aco-diz-agencia.shtml>>

<<http://www.acoideal.com.br/chapa-grossa/>>

<<http://www.skylightestruturas.com.br/uamericano.asp>>

<<http://acosnovabrazil.com.br/chapa-grossa.html>>

<<http://alfaarquitectura.wordpress.com/perfis-u-laminados-padrao-americano/>>

9. Diagramas de esforços solicitantes e deformadas – segundo modelo de análise

9.1. Caso 1 – nós fixos e forças aplicadas nas barras

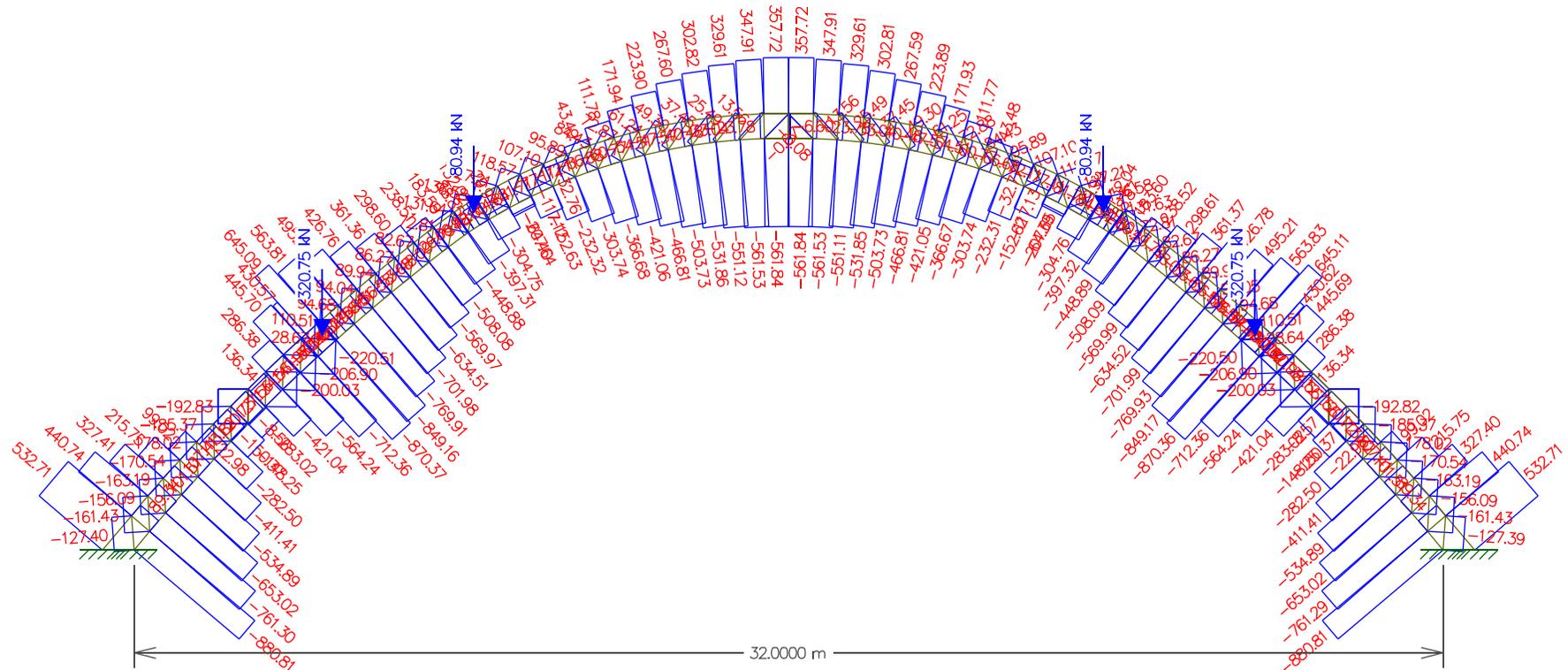


Imagem 9.1.1: Diagrama de forças normais para a primeira configuração (nós fixos e forças aplicadas nas barras).

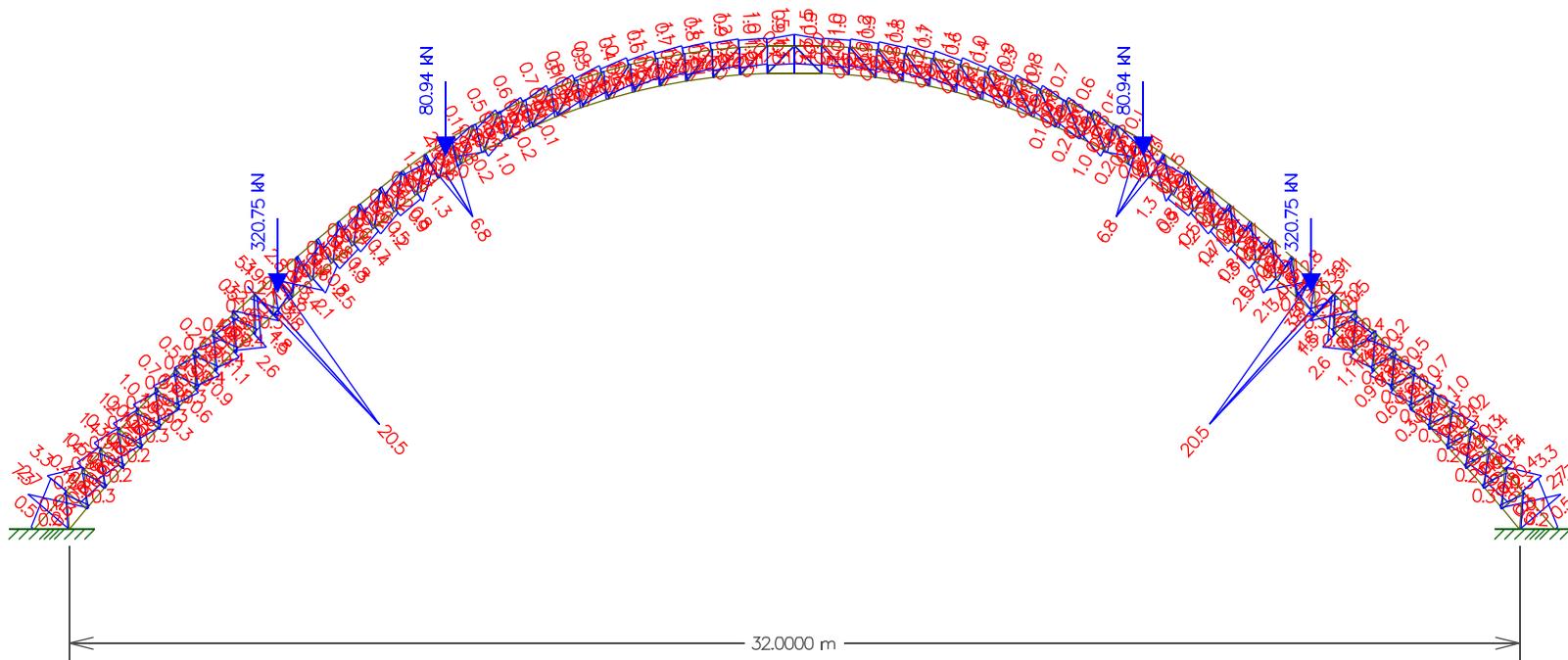


Imagem 9.1.3: Diagrama de momentos fletores para a primeira configuração (nós fixos e forças aplicadas nas barras).

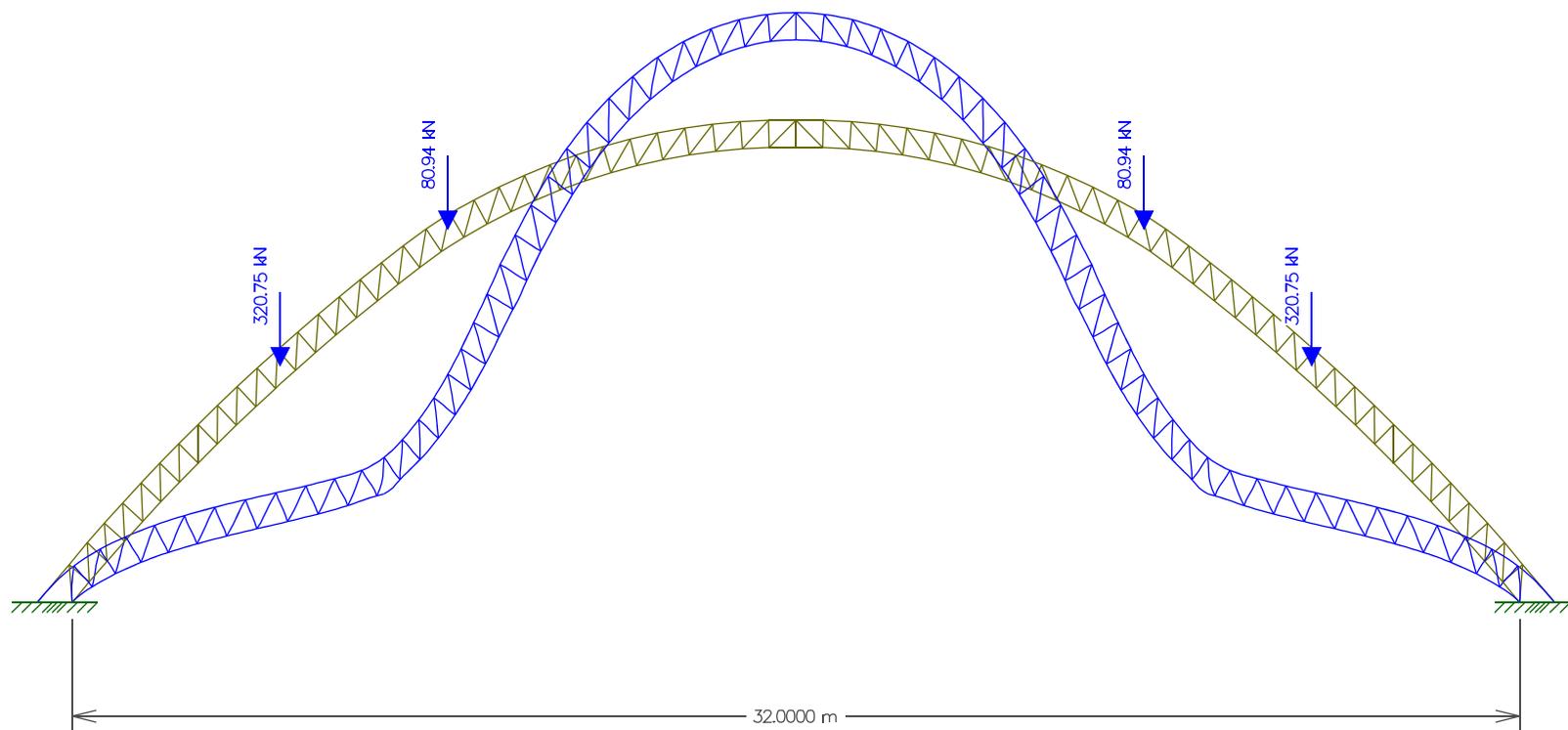


Imagem 9.1.4: Deformada da primeira configuração (nós fixos e forças aplicadas nas barras).

9.2. Caso 2 – nós articulados e forças aplicadas nas barras

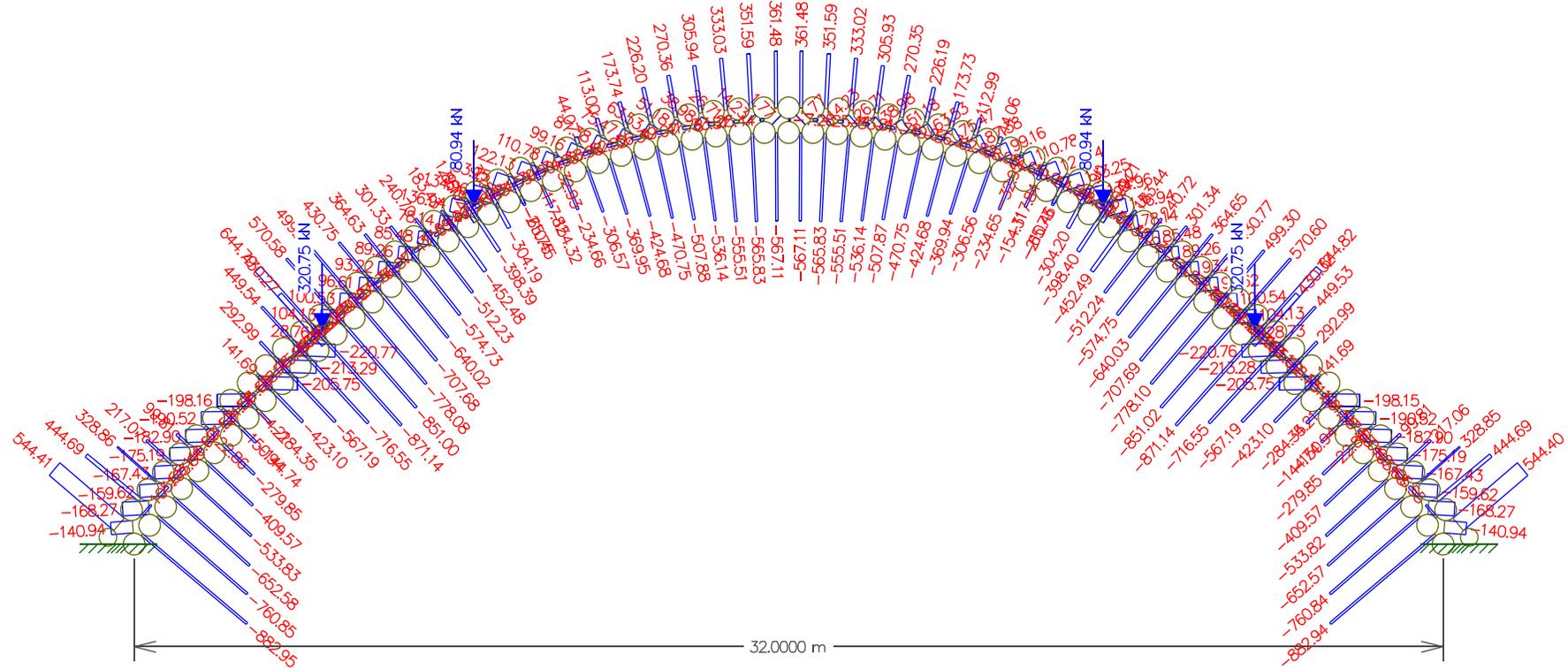


Imagem 9.2.1: Diagrama de forças normais para a segunda configuração (nós articulados e forças aplicadas nas barras).

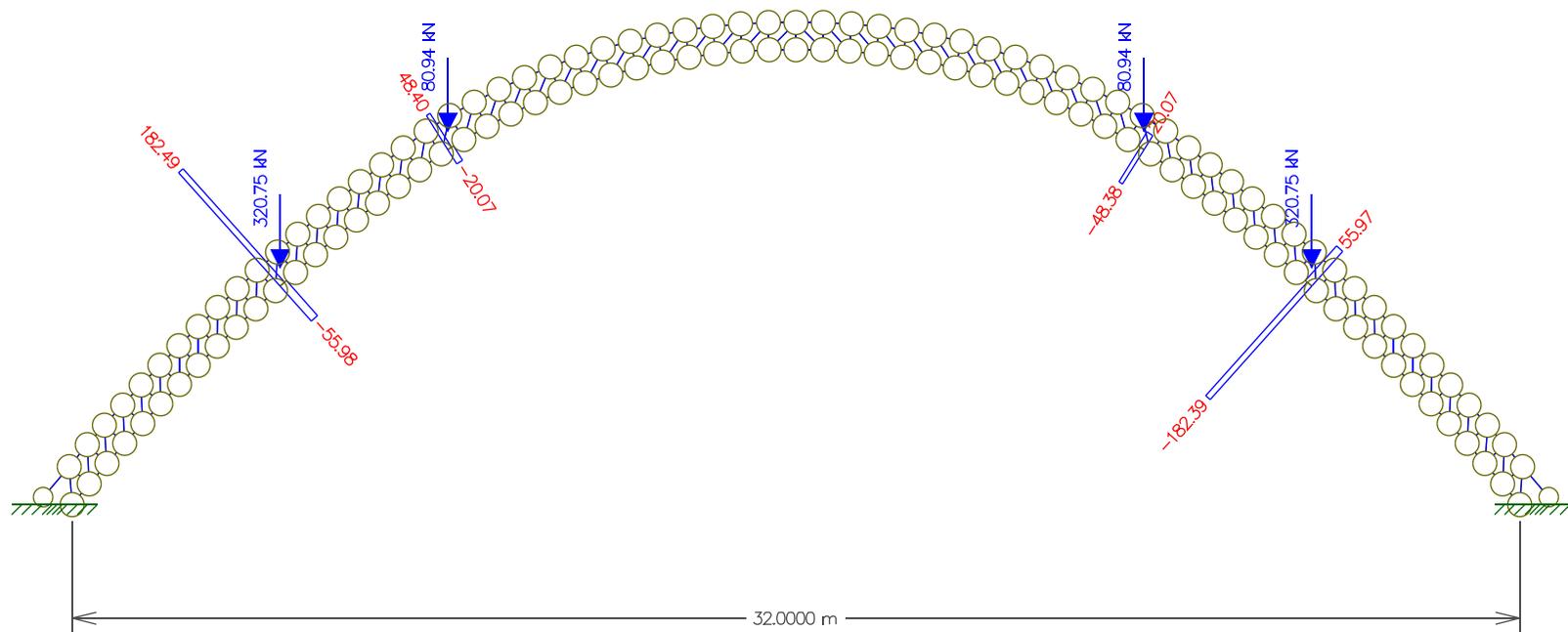


Imagem 9.2.2: Diagrama de forças cortantes para a segunda configuração (nós articulados e forças aplicadas nas barras).

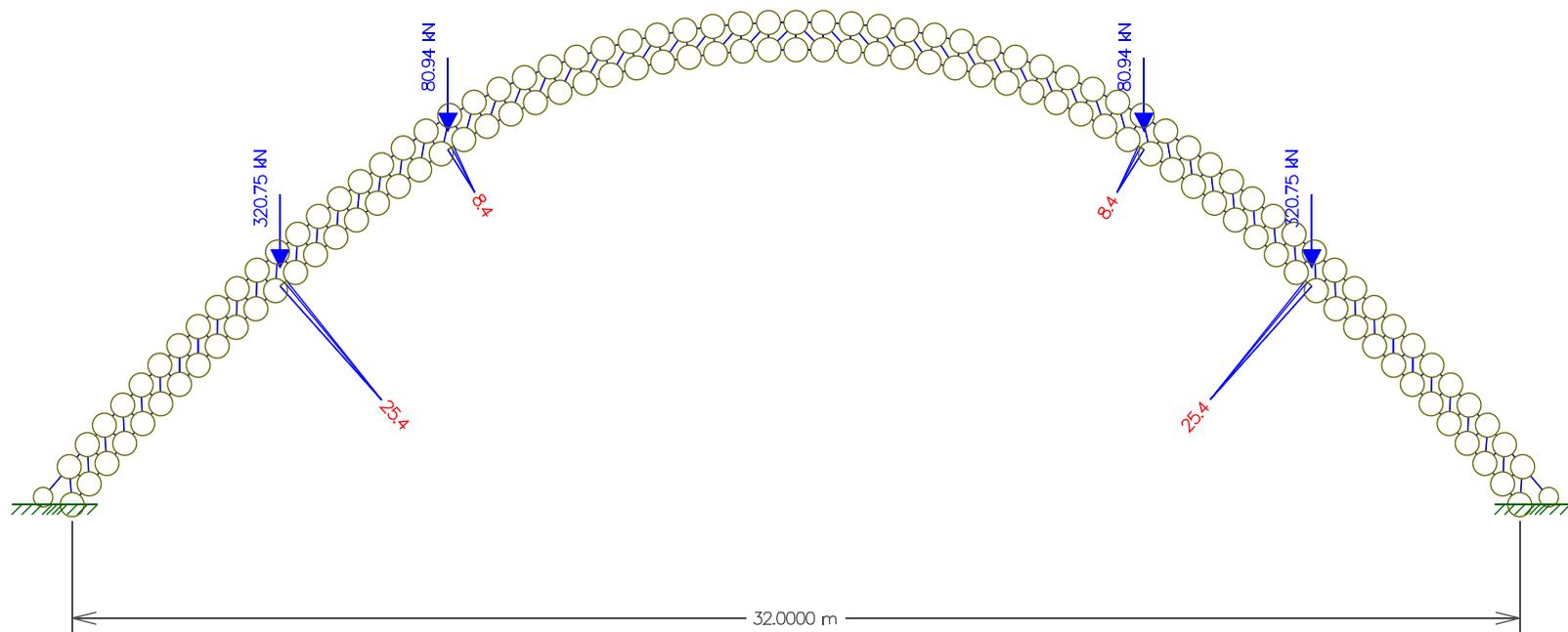


Imagem 9.2.3: Diagrama de momentos fletores para a segunda configuração (nós articulados e forças aplicadas nas barras).

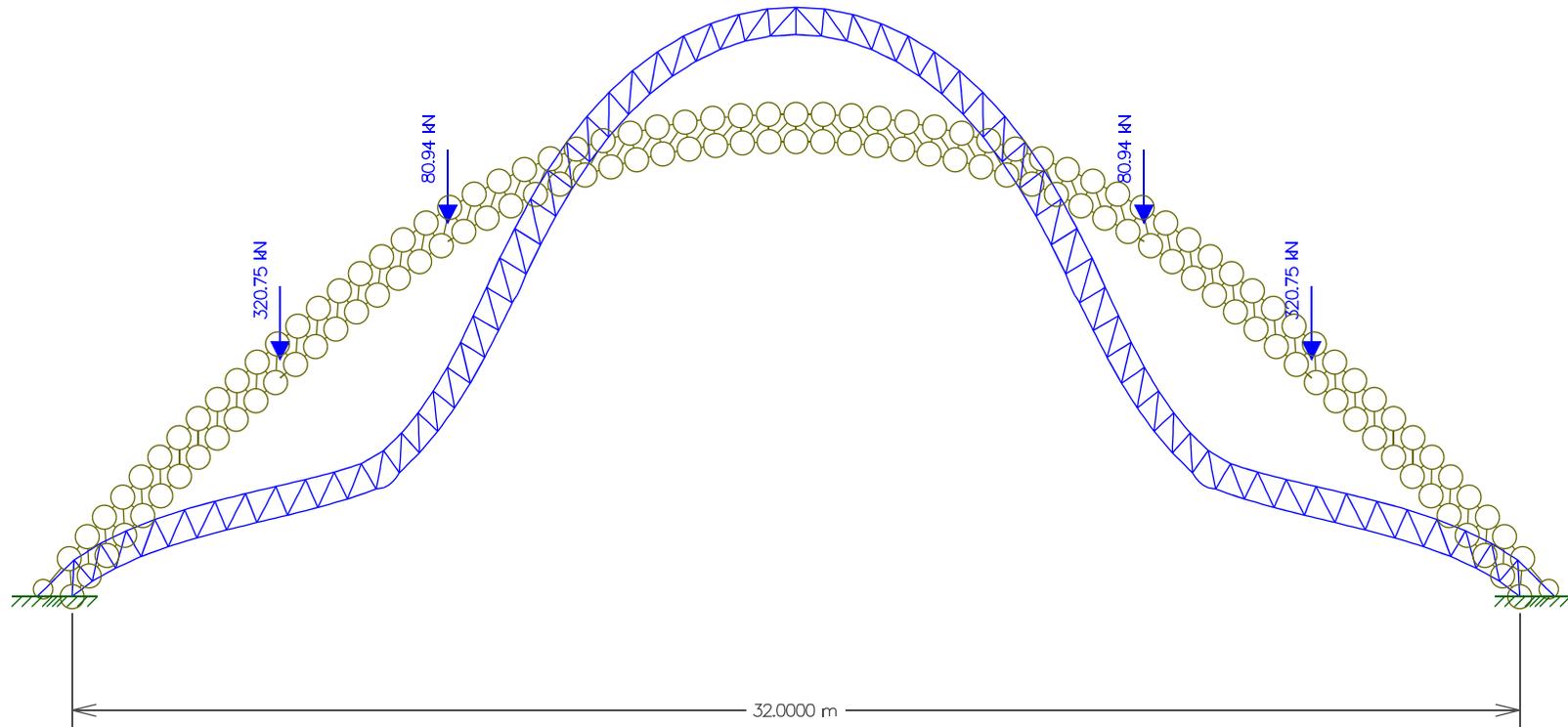


Imagem 9.2.4: Deformada da segunda configuração (nós articulados e forças aplicadas nas barras).

9.3. Caso 3 – nós fixos e forças aplicadas nos nós

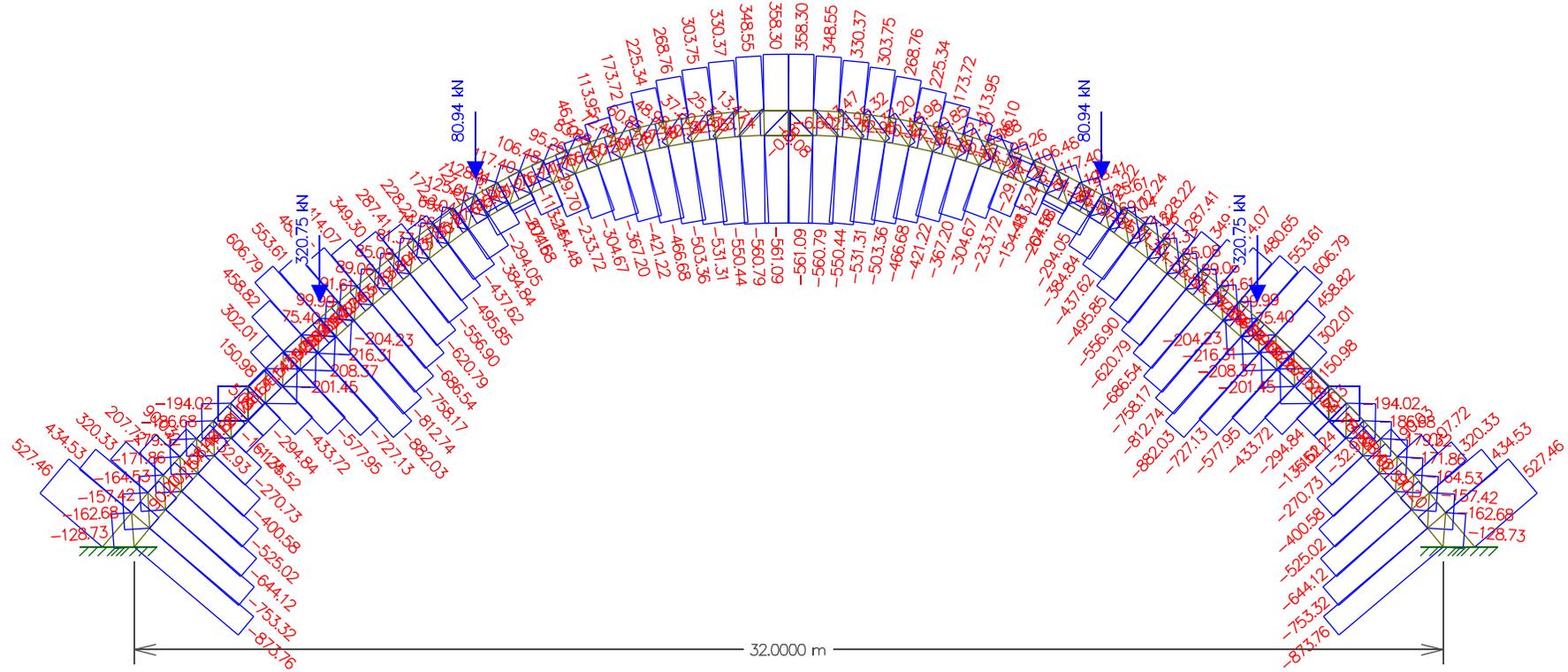


Imagem 9.3.1: Diagrama de forças normais para a terceira configuração (nós fixos e forças aplicadas nos nós).

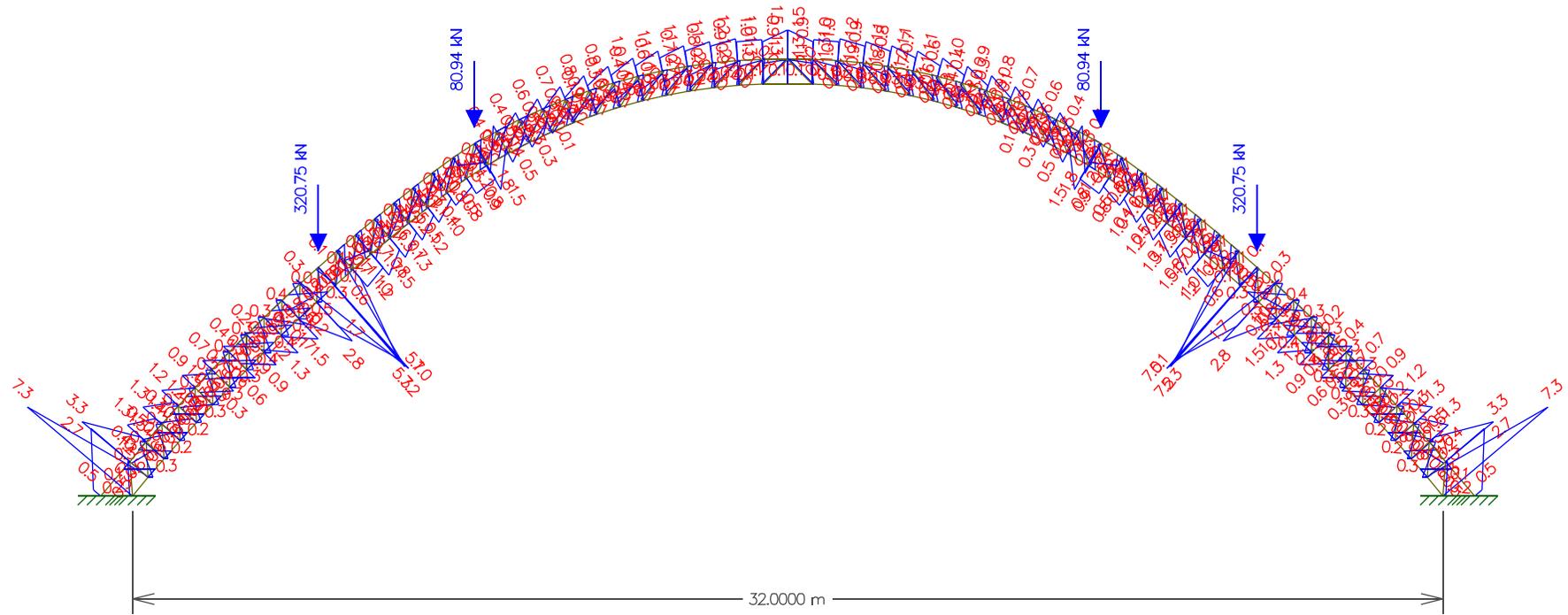


Imagem 9.3.3: Diagrama de momentos fletores para a terceira configuração (nós fixos e forças aplicadas nos nós).

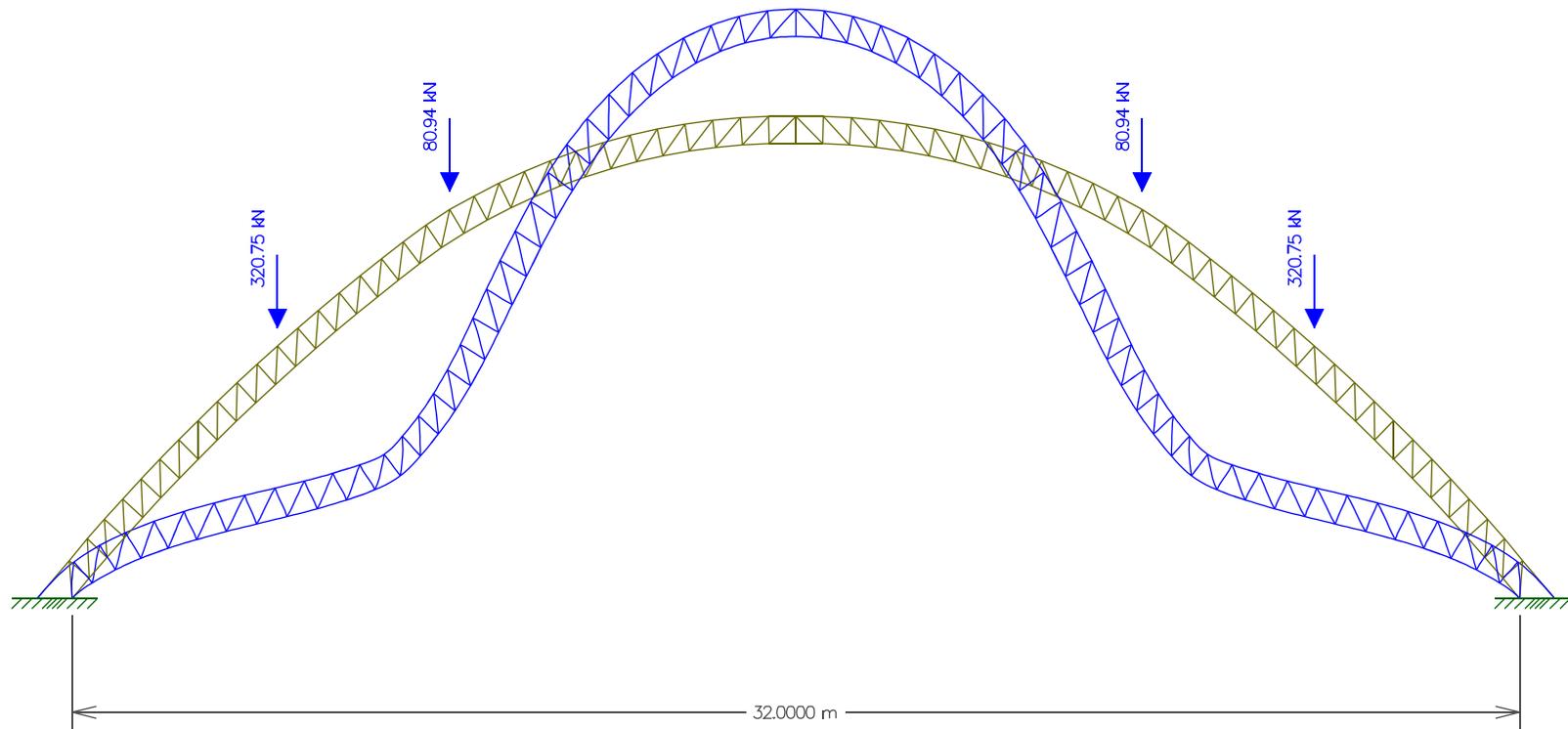


Imagem 9.3.4: Deformada da terceira configuração (nós fixos e forças aplicadas nos nós).

9.4. Caso 4 – nós articulados e forças aplicadas nos nós (banzo inferior)

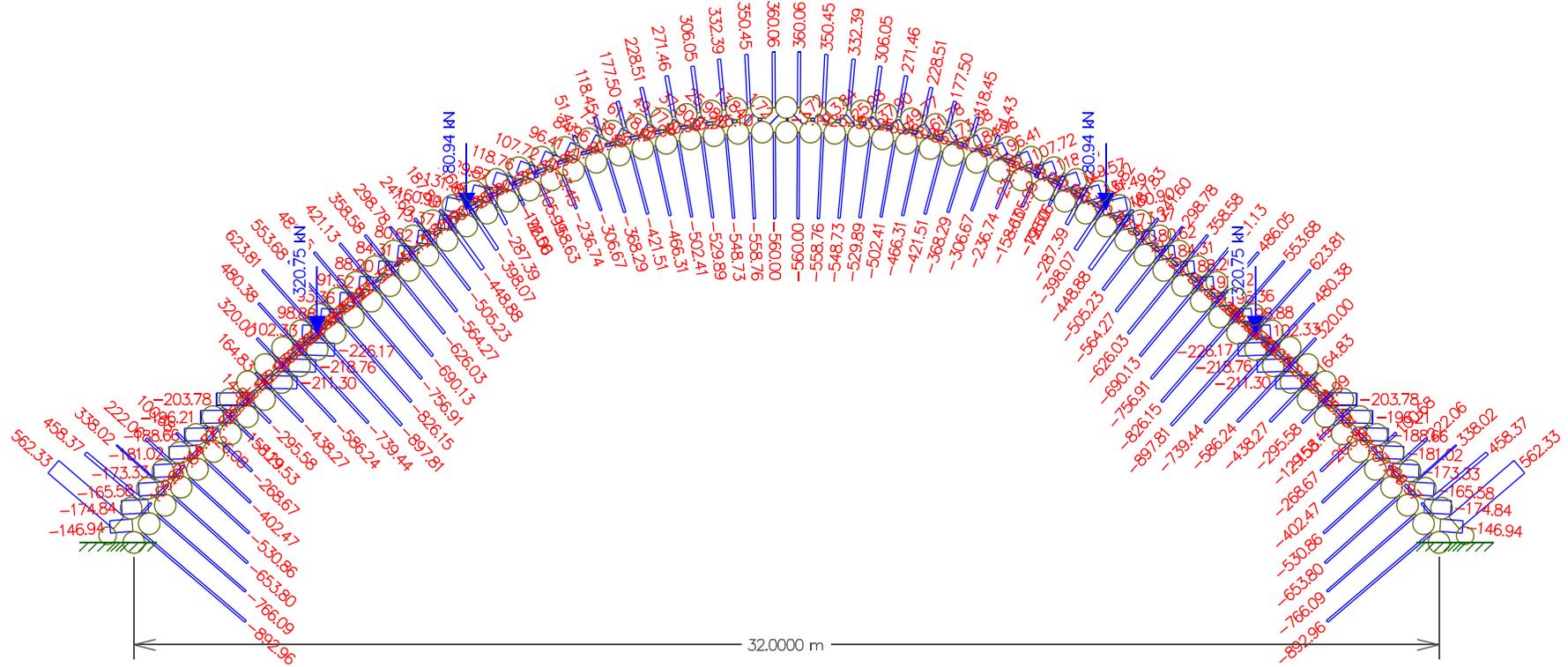


Imagem 9.4.1: Diagrama de forças normais para a quarta configuração (nós articulados e forças aplicadas nos nós – banzo inferior).

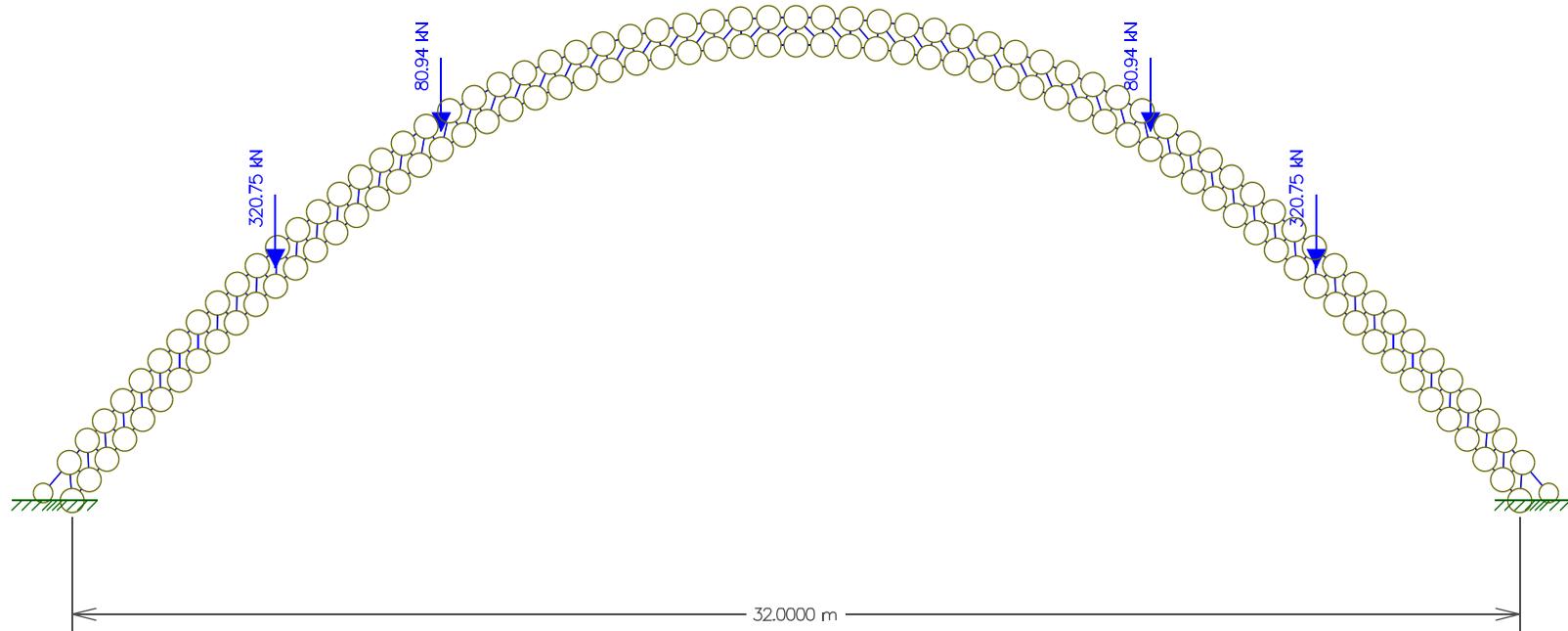


Imagem 9.4.2: Diagrama de forças cortantes para a quarta configuração (nós articulados e forças aplicadas nos nós – banzo inferior).

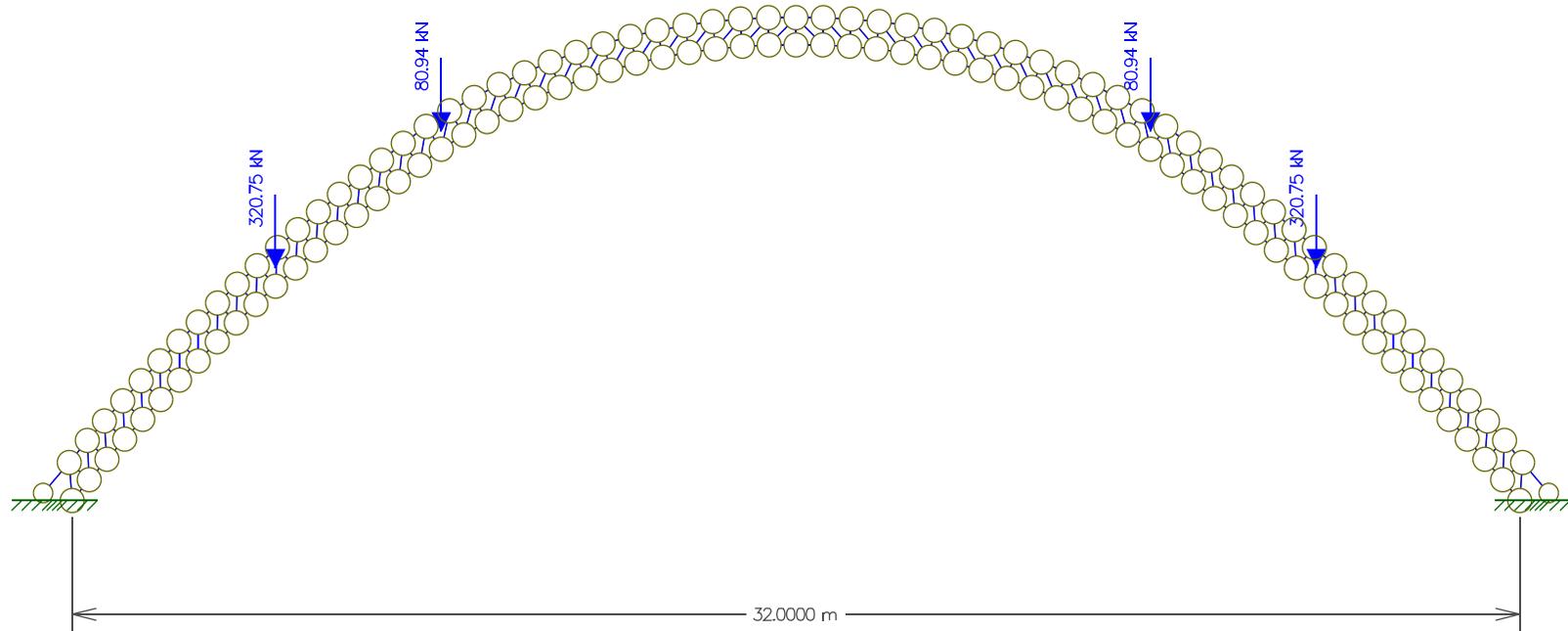


Imagem 9.4.3: Diagrama de momentos fletores para a quarta configuração (nós articulados e forças aplicadas nos nós – banzo inferior).

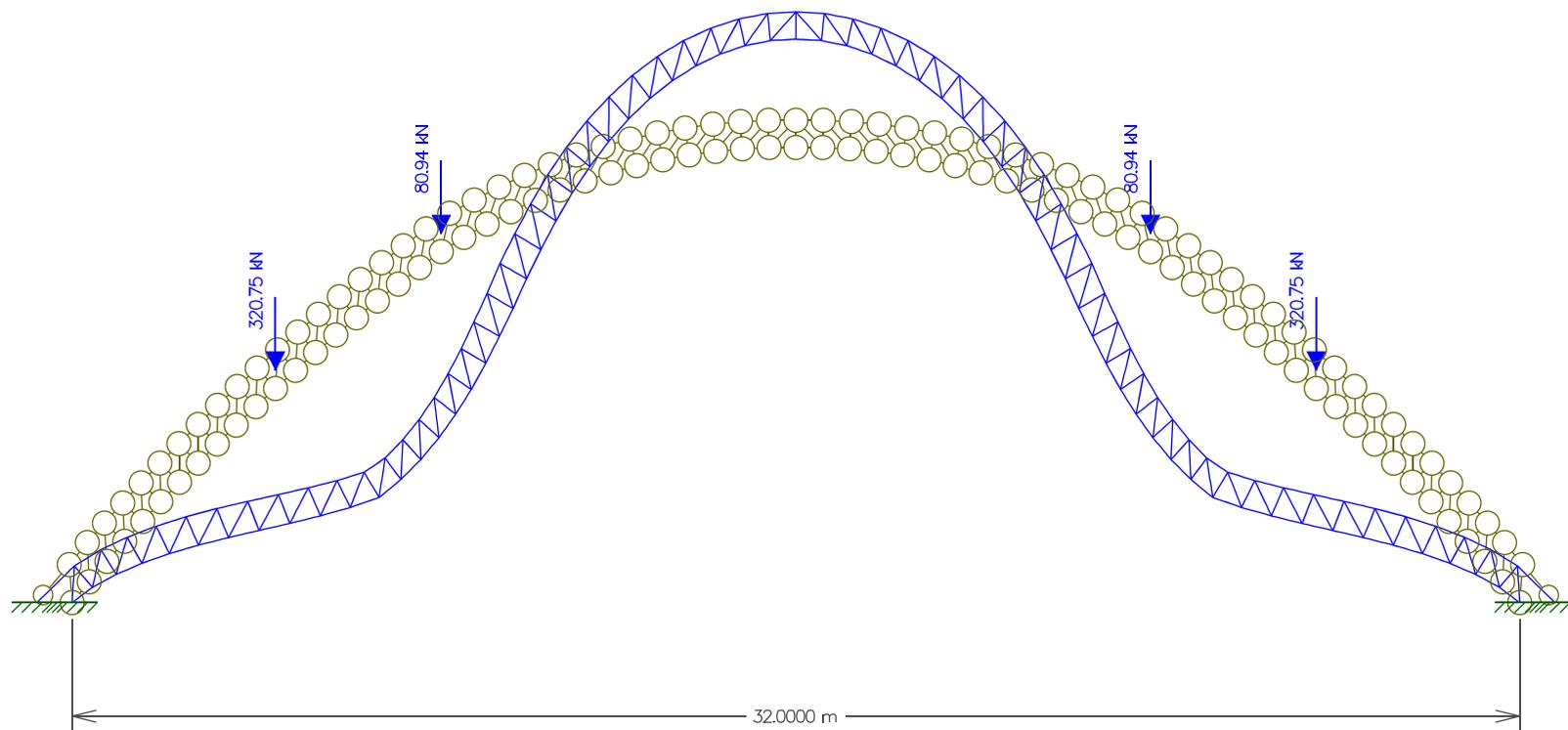


Imagem 9.4.4: Deformada da quarta configuração (nós articulados e forças aplicadas nos nós – banzo inferior).

9.5. Caso 5 – nós articulados e forças aplicadas nos nós (banzo superior)

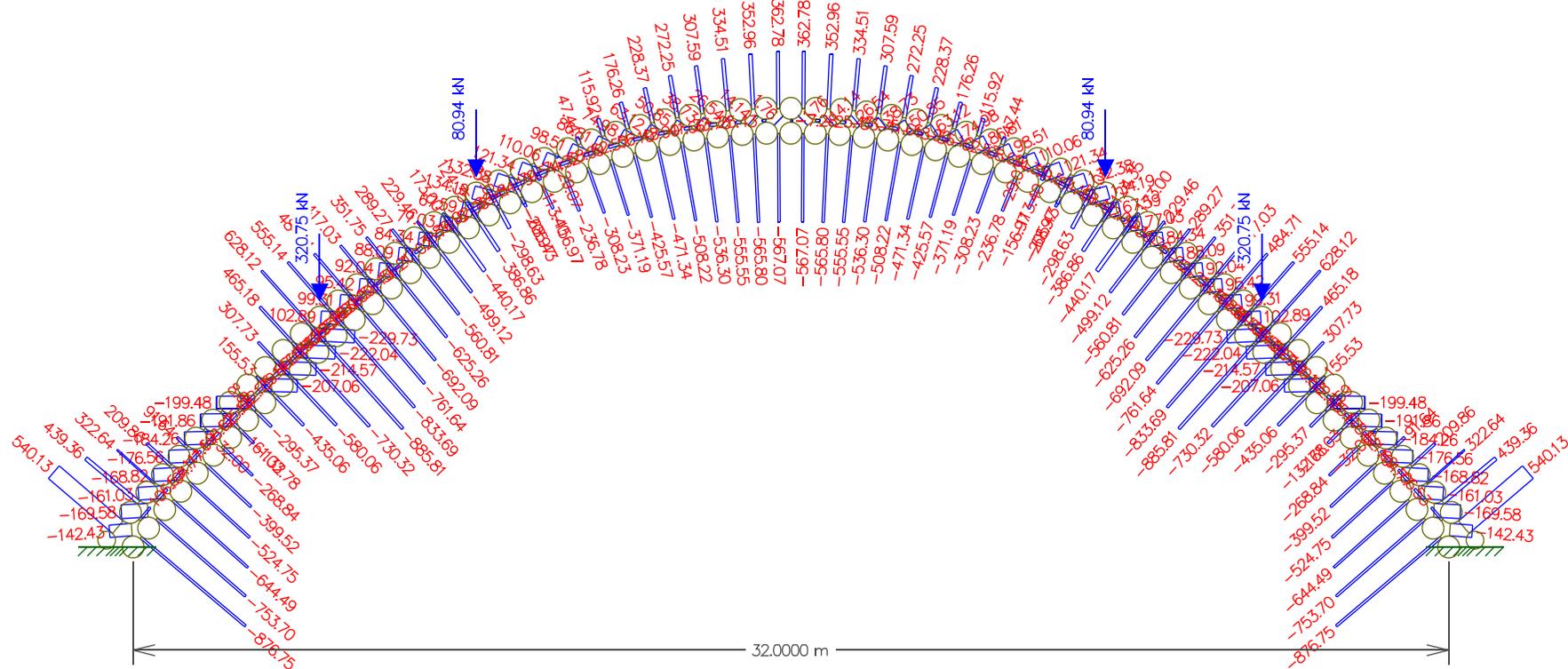


Imagem 9.5.1: Diagrama de forças normais para a quarta configuração (nós articulados e forças aplicadas nos nós – banzo superior).

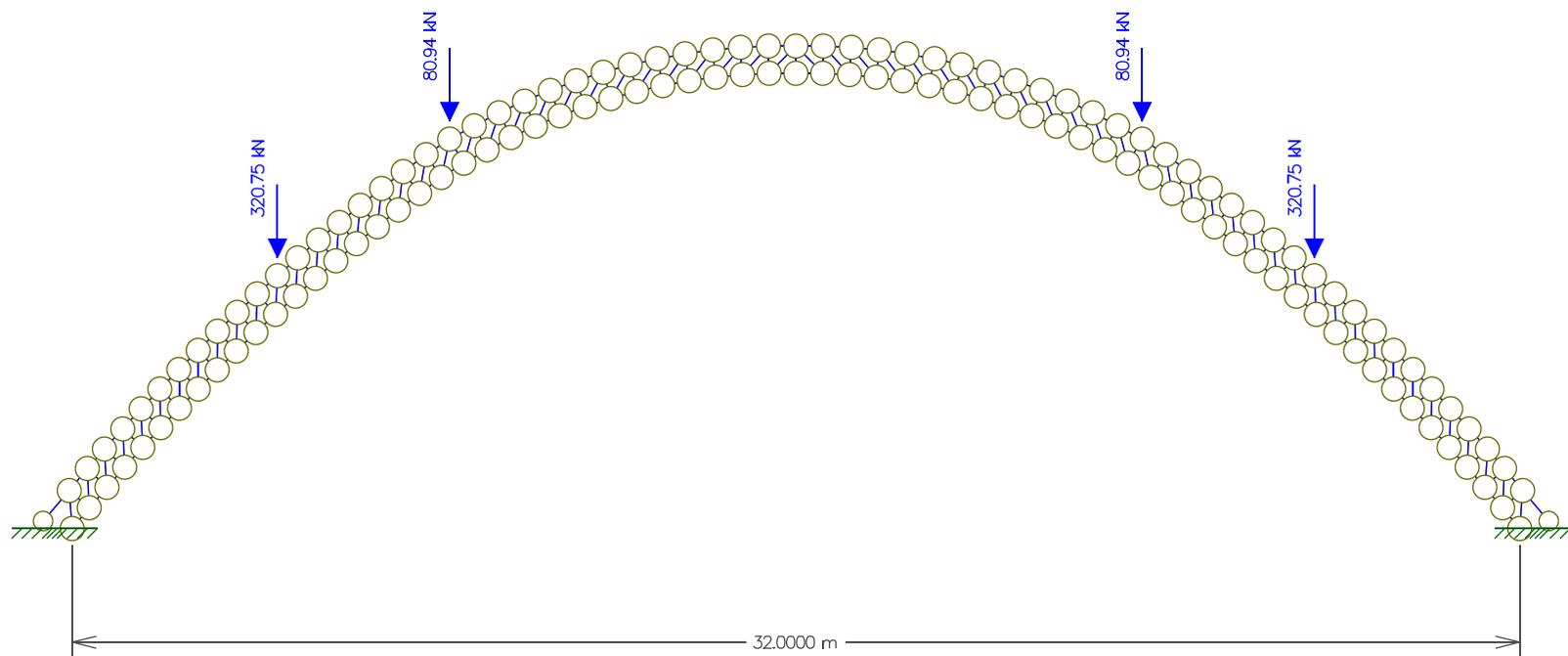


Imagem 9.5.2: Diagrama de forças cortantes para a quarta configuração (nós articulados e forças aplicadas nos nós – banzo superior).

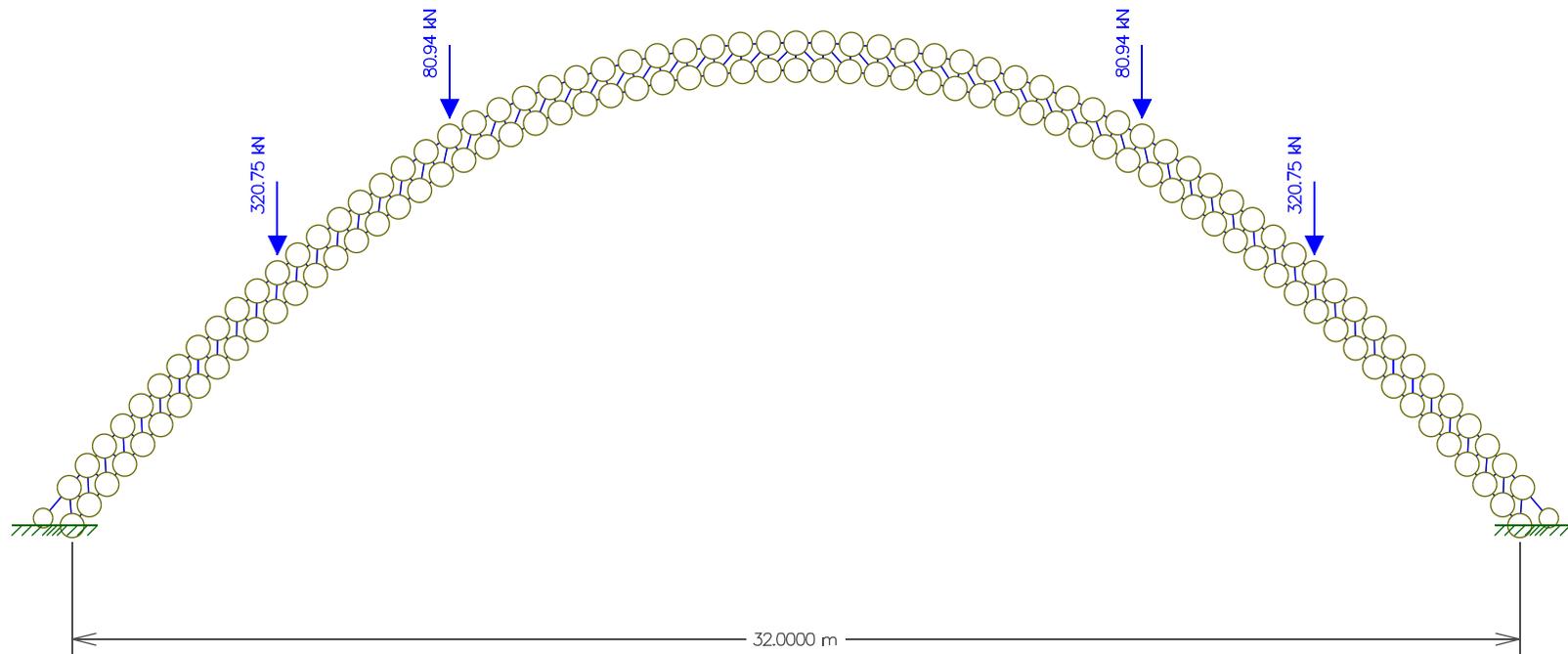


Imagem 9.5.3: Diagrama de momentos fletores para a quarta configuração (nós articulados e forças aplicadas nos nós – banzo superior).

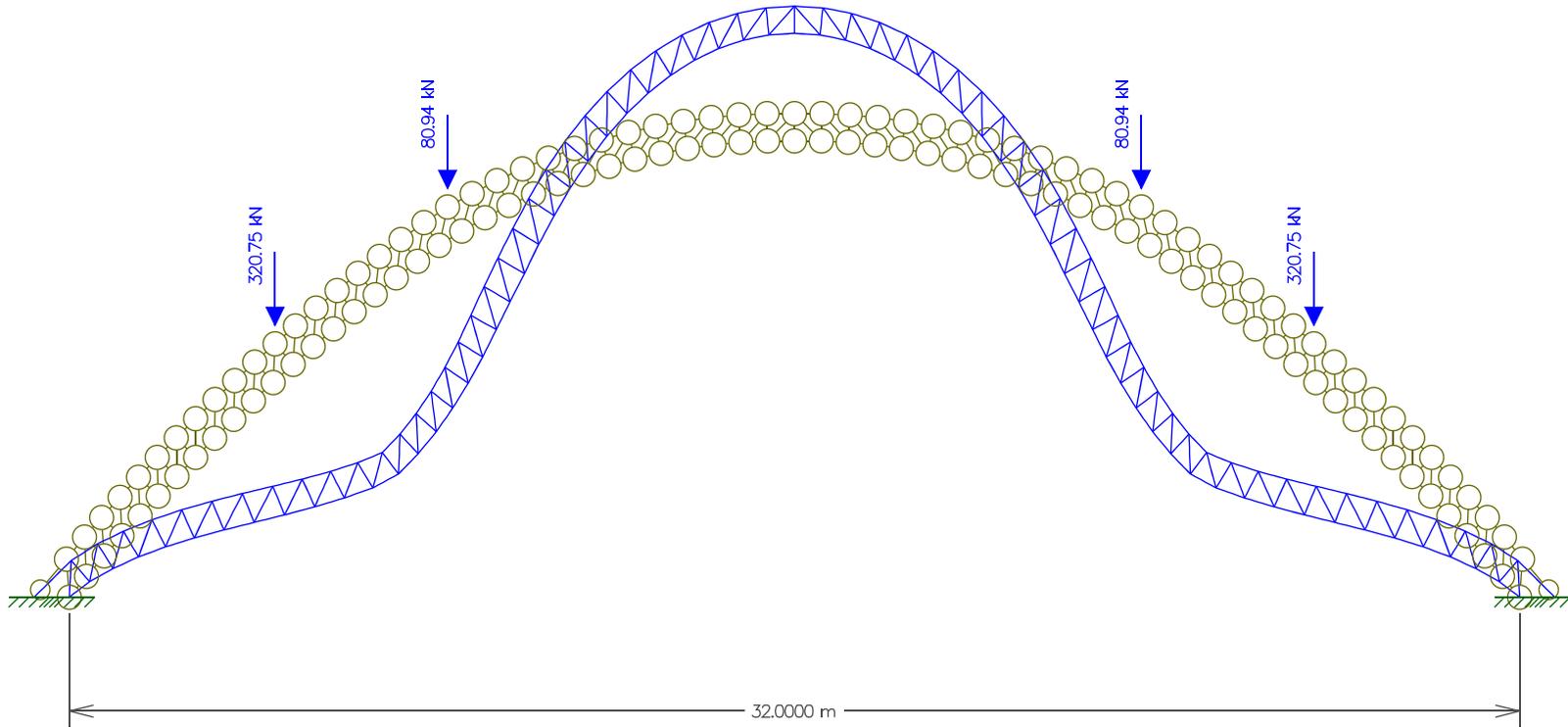
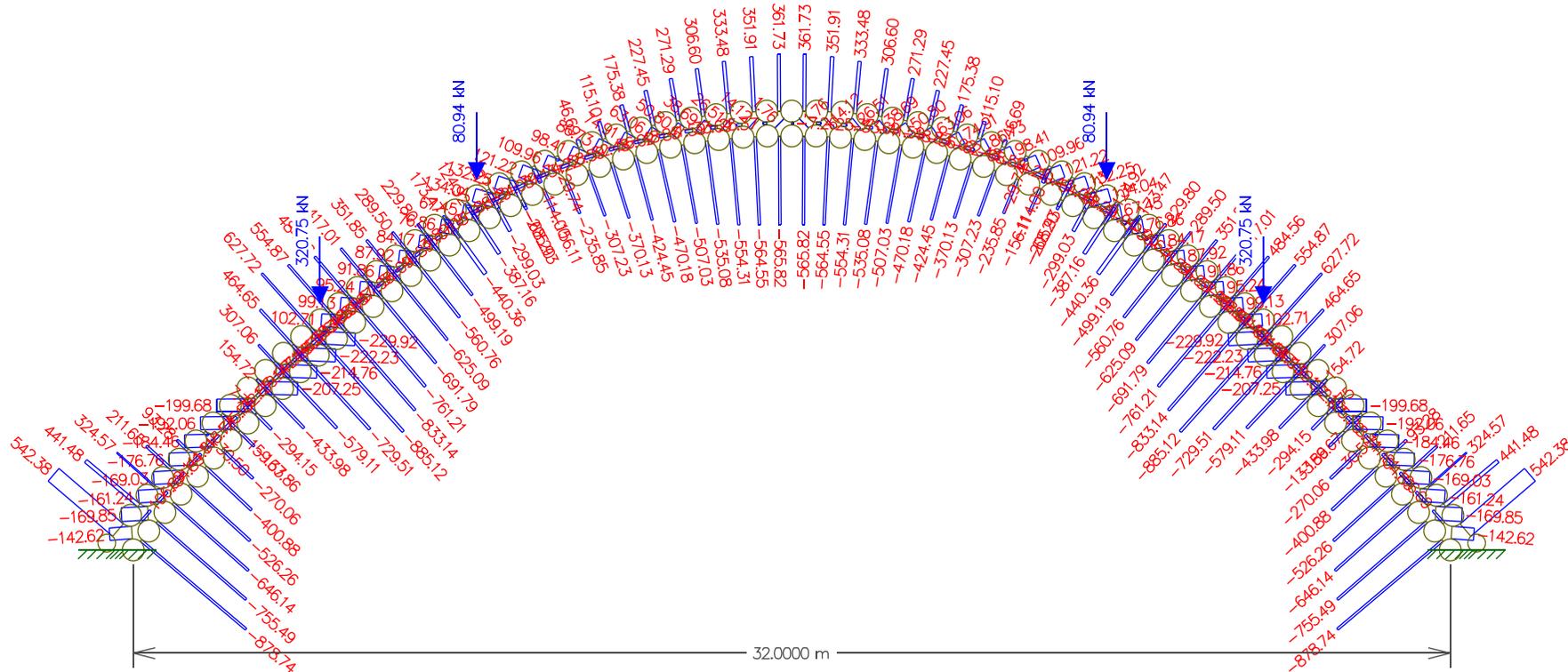


Imagem 9.5.4: Deformada da quarta configuração (nós articulados e forças aplicadas nos nós – banzo superior).

9.6. Caso 6 – nós articulados e forças aplicadas nos nós (banzo superior com secções) – Modelo adotado



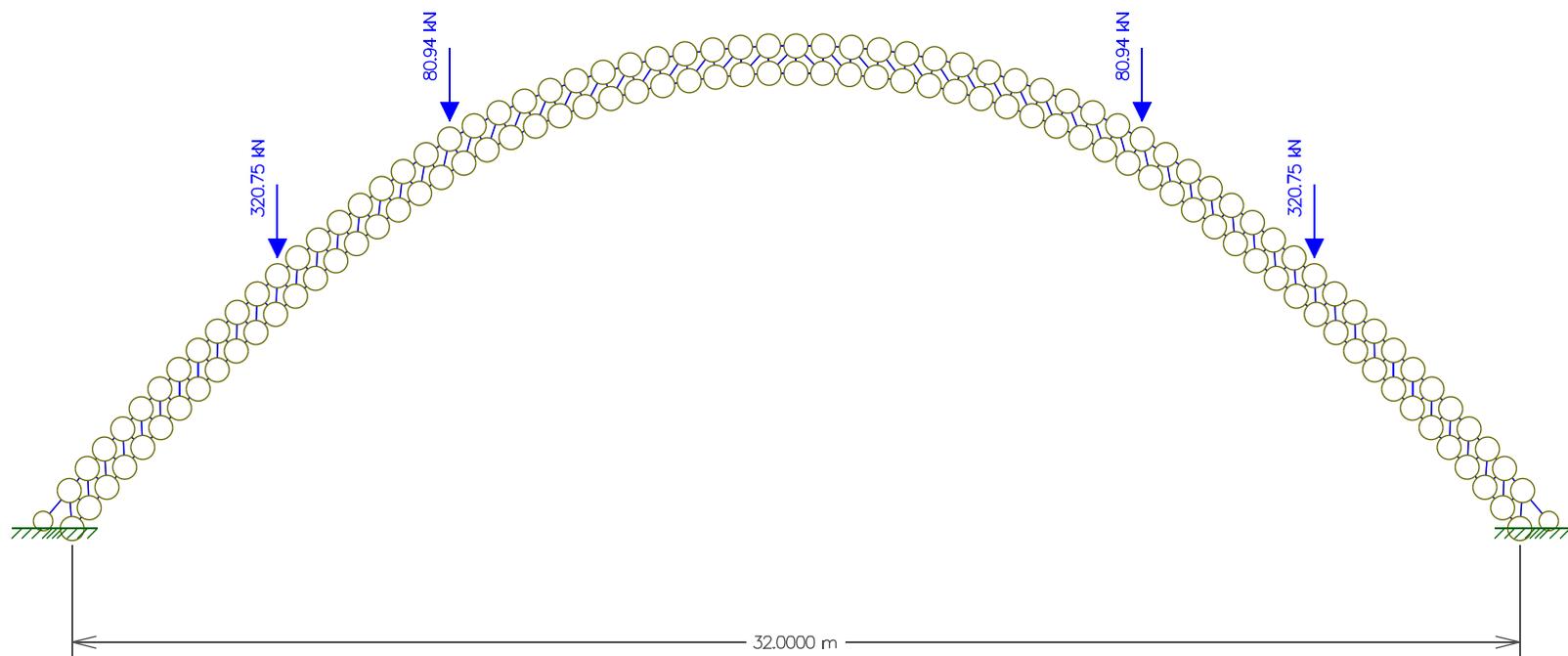


Imagem 9.6.2: Diagrama de forças cortantes para a configuração final.

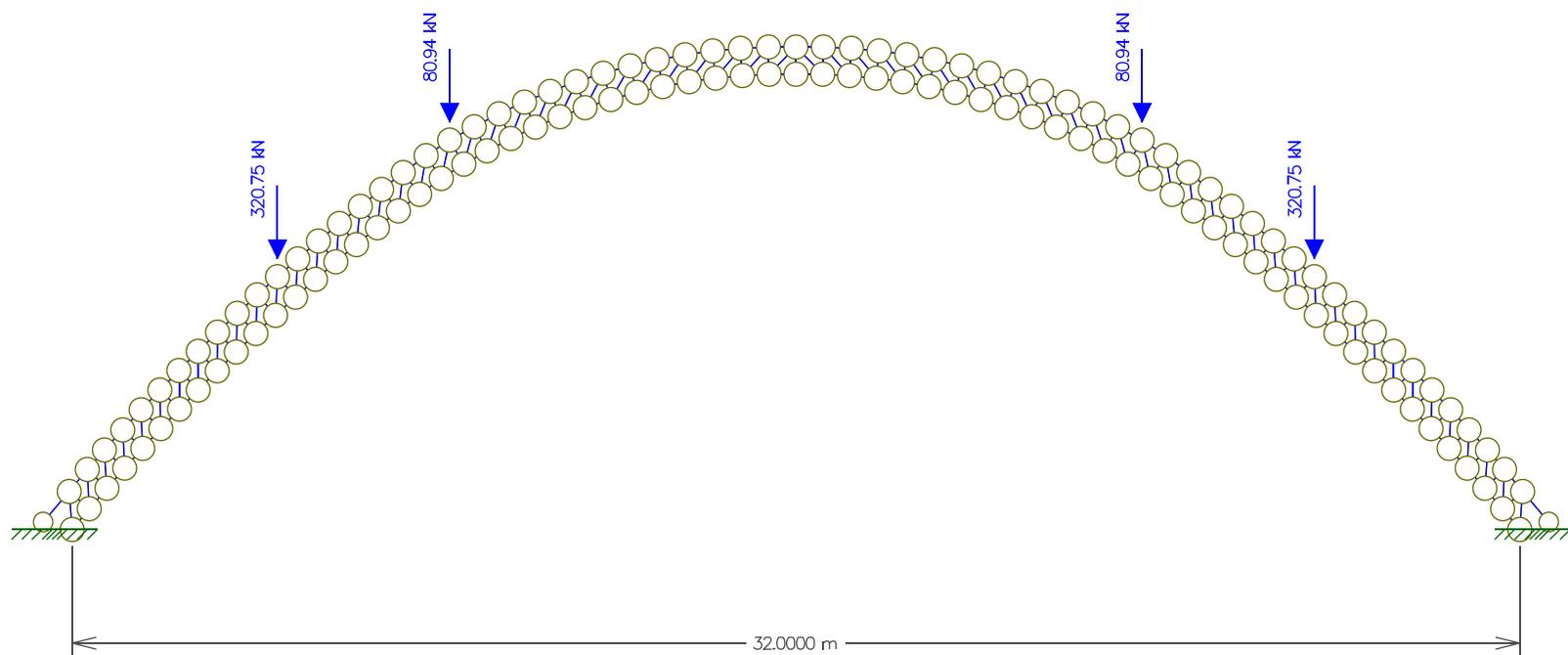


Imagem 9.6.3: Diagrama de momentos fletores para a configuração final.

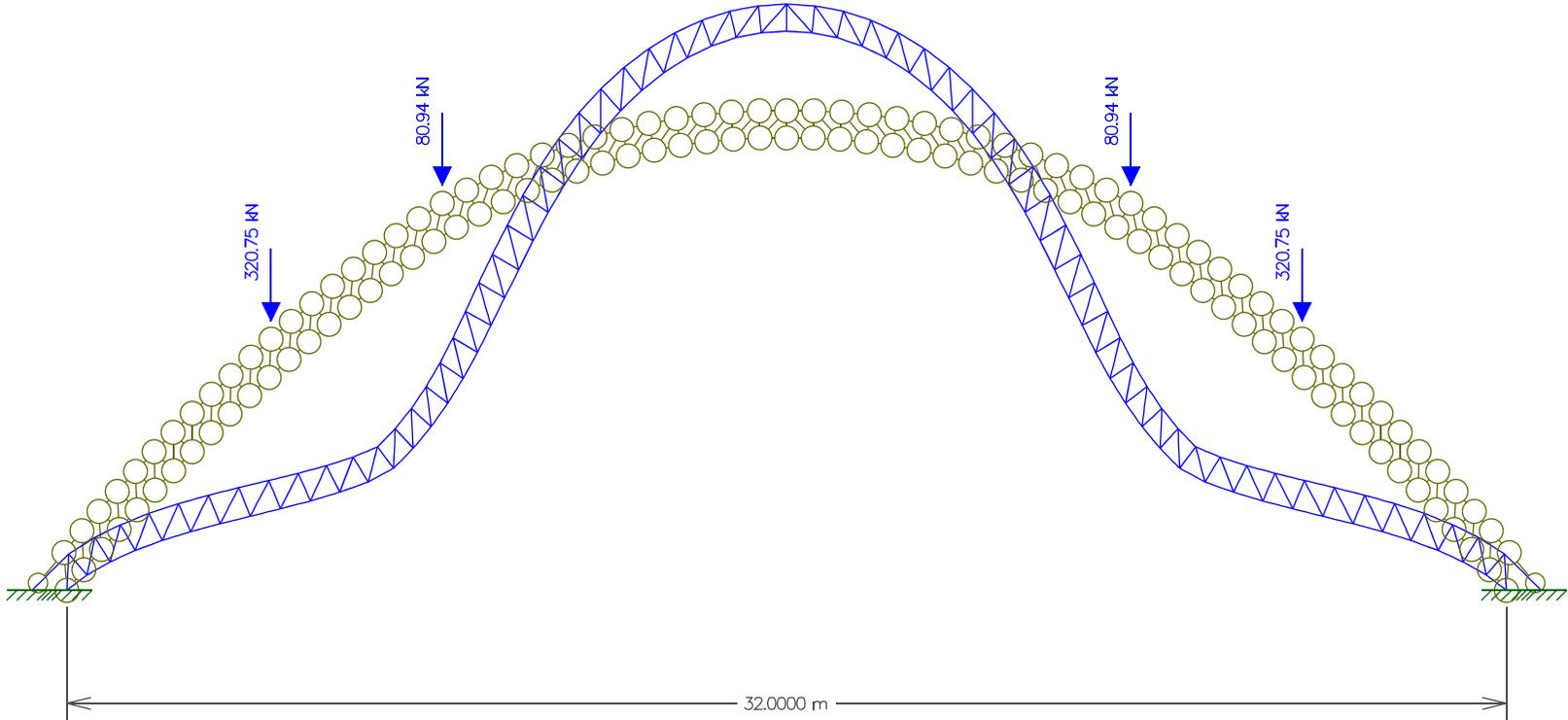


Imagem 9.6.4: Deformada da configuração final.