



## ARCO DA CATEDRAL SANT'ANA: ENGENHARIA ESTRUTURAL NA ARQUITETURA CONTEMPORÂNEA

Letícia Maria Hoinaski

Vanessa Oliveira da Rocha

### RESUMO

Os arcos e abóbadas foram fundamentais na construção civil, uma vez que foram responsáveis por resolver desafios técnicos e desenvolver inúmeras identidades culturais. Este artigo explora sua importância a partir de quatro aspectos principais: panorama histórico, materiais e técnicas construtivas, teoria dos arcos e dimensionamento estrutural. Um estudo de caso na Catedral Sant'Ana, em Ponta Grossa, um edifício de relevância sociocultural, foi conduzido de modo a aplicar os conceitos abordados, avaliar as soluções estruturais adotadas e fornecer um estudo de compatibilização arquitetônica-estrutural. A metodologia incluiu extensa revisão bibliográfica, visitas técnicas, análise de projetos arquitetônicos e estruturais e a observação do edifício. Os projetos de maior importância foram redesenhados no AutoCAD e os cálculos comparativos foram realizados com Ftool e Excel. A análise documental possibilitou compreender os principais motivos para concepção do projeto e as soluções nele adotadas, e a aplicação do método de dimensionamento estrutural nos arcos catenários demonstrou com que eficiência eles atenderam à necessidade de criar uma grande nave central sem apoios intermediários. O estudo contribuiu para as áreas de engenharia civil e arquitetura ao destacar a relevância da compatibilização estrutural e estética nas edificações e demonstrar o potencial dos arcos e abóbadas para tal, de modo a servir como referência para futuras pesquisas acadêmicas e para projetos com características arquitetônicas ou intenções semelhantes.

**Palavras-chave:** Abóbadas; Engenharia civil; Dimensionamento estrutural;

## SANT'ANA'S CATHEDRAL ARCH: STRUCTURAL ENGINEERING IN CONTEMPORARY ARCHITECTURE

### ABSTRACT

Arches and vaults have been fundamental in civil engineering, as they have addressed technical challenges and developed numerous cultural identities. This article explores their significance through four main aspects: historical overview, materials and construction techniques,



### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

arch theory, and structural sizing. A case study at Sant'Ana's Cathedral in Ponta Grossa, a building of sociocultural relevance, was conducted to apply the concepts discussed, evaluate the structural solutions adopted, and provide a study of architectural-structural compatibility. The methodology included extensive literature review, technical visits, analysis of architectural and structural designs, and observation of the building. The most significant designs were redrawn in AutoCAD, and comparative calculations were performed using Ftool and Excel. The documentary analysis enabled an understanding of the main reasons behind the project's conception and the solutions implemented, while the application of structural sizing methods on the catenary arches demonstrated their efficiency in creating a large central nave without intermediate supports. This study contributes to the fields of civil engineering and architecture by highlighting the relevance of structural and aesthetic compatibility in buildings and demonstrating the potential of arches and vaults in this regard, thus serving as a reference for future academic research and projects with similar architectural characteristics or intentions.

**Keywords:** Civil Engineering; Structural dimensioning; Vaults.

#### LISTA DE SÍMBOLOS

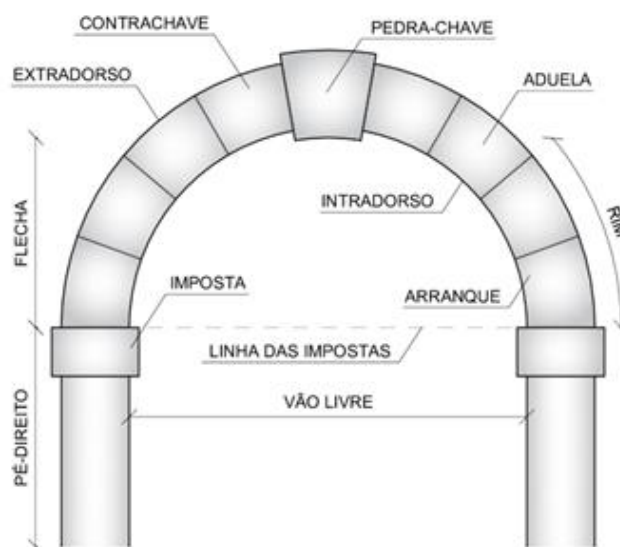
$X$	vão (m)	$f_{cd}$	resistência de projeto à compressão do concreto (MPa)
$H$	flecha (m)	$f_{yd}$	resistência de projeto do aço (MPa)
$b$	base da seção (m)	$q_{PP}$	carga de peso próprio (kN/m)
$h$	altura da seção (m)	$q_{SC0}$	sobrecarga inicial (kN/m)
$\gamma$	peso específico do material (kN/m <sup>3</sup> )	$q_{SC}$	sobrecarga (kN/m)
$\sigma$	coeficiente de comprimento	$q_V$	carga de vento (kN/m)
$\eta$	coeficiente de rótulas	$q_{xd}$	carga horizontal de projeto (kN/m)
$\omega$	coeficiente dos ábacos de pilares	$q_{yd}$	carga vertical de projeto (kN/m)
$C_5$	coeficiente de segurança	$q_{d,máx}$	carga máxima de projeto (kN/m)
$S_1$	coeficiente de geometria	$M_{xd}$	momento fletor de projeto em relação à base da seção (kN.m)
$S_2$	coeficiente de altura	$M_{yd}$	momento fletor de projeto em relação à altura da seção (kN.m)
$S_3$	coeficiente de segurança local	$N_d$	carga de projeto (kN)
$E$	módulo de elasticidade (GPa)	$N_{d,máx}$	esforço máximo (kN)
$W_x$ e $W_y$	módulo de resistência plástica (m <sup>3</sup> )	$\varphi$	diâmetro dos estribos (mm)
$I_x$ e $I_y$	momento de inércia (m <sup>4</sup> )	$\varphi_l$	diâmetro da armadura longitudinal (mm)
$k_x$ e $k_y$	raio de giração (m)	$\varphi_{l,min}$	diâmetro mínimo da armadura longitudinal (mm)
$i_x$ e $i_y$	índice de esbeltez	$s$	espaçamento dos estribos (mm)
$V_0$	velocidade do vento (m/s)	$A_S$	área da seção de aço (cm <sup>2</sup> )
$V_k$	velocidade do vento de projeto (m/s)		
$f_{ck}$	resistência característica à compressão do concreto (MPa)		

## 1 INTRODUÇÃO

Em termos gerais, segundo Nunes (2009), um arco é uma estrutura geométrica formada pela combinação de segmentos de circunferência que resultam em uma curva, que varia a depender de sua configuração específica. Quando essa estrutura é estendida tridimensionalmente, seja através de uma série sucessiva ou de sua rotação em torno de um eixo, ela é denominada abóbada. As abóbadas são frequentemente encontradas na arquitetura, onde são usadas para criar tetos, arcadas e outras formas arquitetônicas que exigem suporte e cobertura.

Primeiramente, é importante apontar os elementos que formam um arco, os quais, segundo Costa (1991) e conforme indicado na Figura 1, são: o extradorso, que é a sua curva externa; o intradorso, que é sua curva interna; o vão, que é a distância horizontal superada pelo arco; a flecha, que é a distância vertical ou altura do arco até o intradorso; a imposta, que é o apoio de onde saem as aduelas, que são, por sua vez, os blocos utilizados em sua construção, quando não-monolítica; o saimel ou arranque, que é a primeira aduela; a pedra-chave, pedra angular ou fecho, que é a última a ser colocada na construção do arco, e que se apoia diretamente nas contrachaves ou contrafechos; e os rins, que são a parte do arco que não necessita de cimbramento durante a execução.

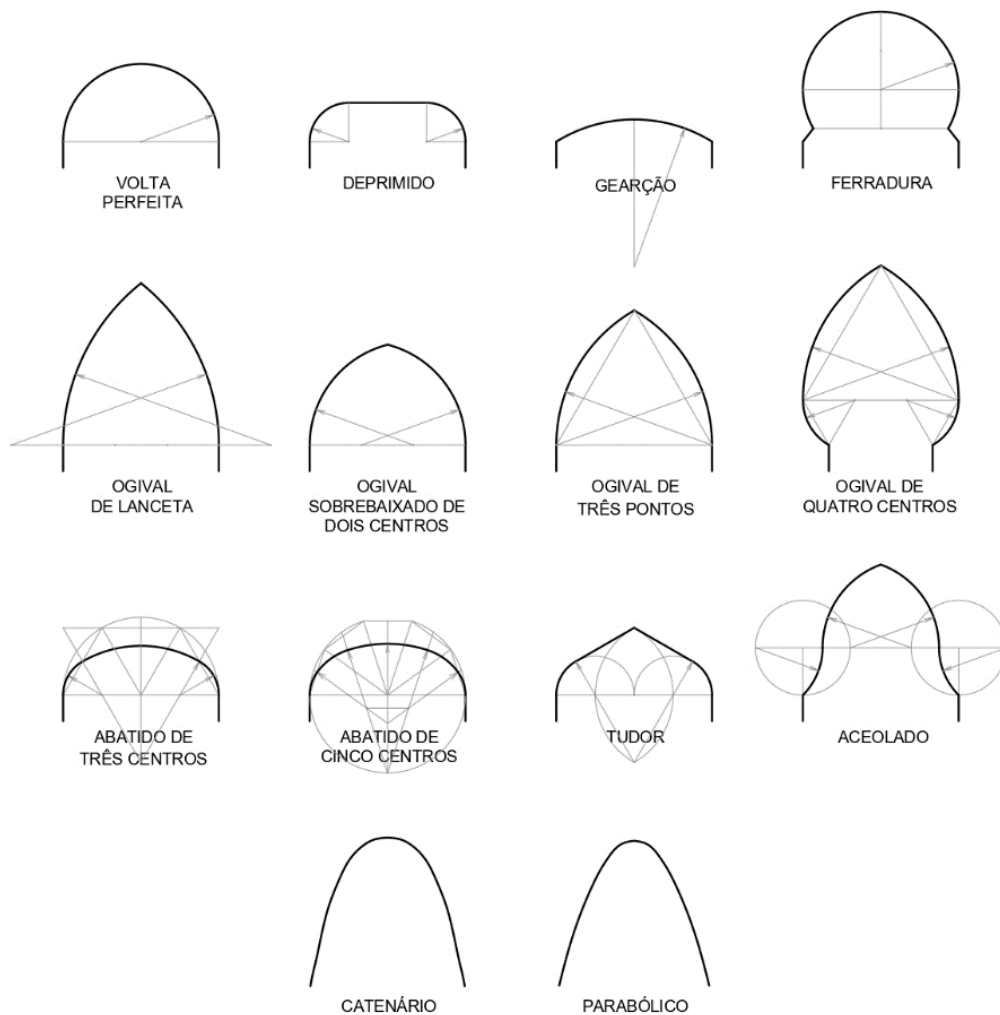
Figura 1 – Terminologia dos arcos



Fonte: Autoras (2024), adaptado de Costa (1991).

Além do arco semicircular, chamado de volta perfeita, muitos outros foram construídos ao longo dos séculos, conforme as culturas arquitetônicas estabelecidas, como os de ferradura, os ogivais ou góticos, os abatidos e os catenários, populares na arquitetura contemporânea (Figura 2).

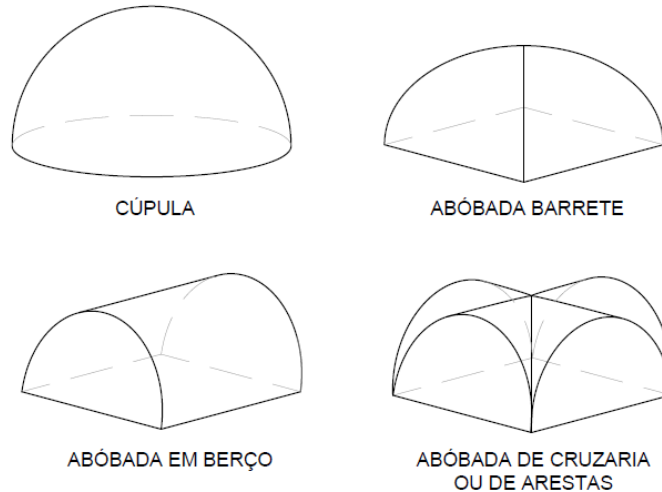
**Figura 2 – Tipos de arcos**



Fonte: Autoras (2024), adaptado de Costa (1991).

Além disso, cabe mencionar que as abóbadas, sejam em cúpula, berço, barrete ou ares-tas (Figura 3), podem ser projetadas a partir da maioria dos tipos de arcos. Exemplos são abóbadas em berço em ferradura, abóbadas de cruzaria ogivais e cúpulas catenárias.

**Figura 3 – Tipos de abóbadas**



Fonte: Autoras (2024), adaptado de Costa (1991).

Ao analisar-se o papel dos arcos e abóbadas na história, observa-se que esses elementos, além de resolverem desafios técnicos de engenharia estrutural, foram cruciais na definição de diversas identidades culturais. Assim como, segundo Gago (2004) e Mayerhofer (1950), as primeiras habitações adotadas pela humanidade foram manifestamente emulações de estruturas orgânicas, caracterizadas intrinsecamente por formas curvilíneas, e as demandas do Império Romano por edifícios cada vez mais grandiosos e imponentes motivaram a ascensão do arco como solução para vencer grandes vãos. Esse elemento foi uma revolução emblemática na Arquitetura Gótica da Idade Média, pois permitiu a inclusão de vitrais e maiores alturas para os edifícios religiosos.

Nesse contexto, é evidente a íntima relação entre a arquitetura e a engenharia, essencial para compreender o verdadeiro propósito da construção civil. Conforme Pallasmaa (2005), as edificações devem ser projetadas com o ser humano em mente, ou seja, adequadas aos seus sentidos e à busca por deleite estético. Assim, elas não são apenas desafios estruturais complexos, mas uma arte viva, capaz de influenciar e transformar vidas, tanto de forma positiva quanto negativa.

Sob essa ótica, pode-se compreender o uso frequente dos arcos e de outros elementos arquitetônicos, que ganharam importância antes mesmo da existência de teorias analíticas ou métodos de dimensionamento – no caso dos arcos, essas ferramentas só surgiram por volta do século XVII –, como algo que reflete um profundo simbolismo, interpretado ora como um



### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

desejo de conexão com a natureza e seu equilíbrio e fluidez, ora como uma expressão de grandiosidade.

Assim, considerando o significativo papel histórico e cultural dos arcos e abóbadas na construção civil ao longo dos milênios, bem como sua evolução e adaptação na arquitetura contemporânea, que valoriza soluções estruturais eficientes e econômicas para grandes vãos, este artigo tem como objetivo demonstrar a compatibilização arquitetônica-estrutural dos arcos na Catedral Sant'Ana, de Ponta Grossa, edifício de significativa importância sociocultural para o município e notável ausência de literatura acadêmica. Especificamente, se buscou compilar e analisar o conhecimento empírico e analítico existente sobre arcos, demonstrar um método de cálculo para o dimensionamento desses elementos estruturais, e aplicar esses conhecimentos em um estudo de caso, avaliando as soluções estruturais adotadas no edifício.

Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica a partir da qual se expôs o panorama histórico, os materiais utilizados e técnicas construtivas, os argumentos analíticos e um método para dimensionamento estrutural dos arcos. Além disso, foi conduzido um estudo de caso da Catedral Sant'Ana a partir de visitas técnicas, da leitura dos projetos arquitetônicos e estruturais (alguns dos quais redesenhados no AutoCAD), e da observação da estrutura existente. A análise documental possibilitou compreender os principais motivos para concepção dos projetos e as soluções nele adotadas, e a aplicação do método de dimensionamento estrutural nos arcos (com o auxílio do Ftool e do Excel) demonstrou com que eficiência eles atenderam à necessidade de criar uma grande nave central sem apoios intermediários.

Por estes meios, obteve-se uma síntese abrangente sobre os arcos e realizou-se um estudo de compatibilização arquitetônica-estrutural da Catedral Sant'Ana. A avaliação das soluções adotadas permitiu identificar seus pontos fortes e limitações, de modo a servir como referência para futuras pesquisas acadêmicas e para projetos com características arquitetônicas ou intenções semelhantes.

## 2 DESENVOLVIMENTO

A análise dos arcos apresenta uma rica variedade de perspectivas, reflexo de sua utilização milenar em múltiplas culturas e contextos arquitetônicos. Embora sua presença na ar-



## III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

quitetura remonte a períodos antigos, os estudos teóricos e analíticos mais aprofundados sobre o tema começaram a se desenvolver apenas a partir do século XVII. Diante disso, a bibliografia mais relevante foi organizada e será apresentada em três seções: Panorama histórico, Materiais e métodos construtivos, e Teoria dos arcos.

### 2.1 PANORAMA HISTÓRICO

Em diferentes regiões do Mundo Antigo, pode-se observar que a adoção de tetos curvos foi utilizada por diversos povos em suas habitações, como as cônicas africanas e os iglus esquimós. No século XIII a.C., na cidade de Micenas, foi erguida a Porta dos Leões, caracterizada por um lintel de pedra de três metros de vão, que alguns estudiosos apontam como precursor das estruturas que eventualmente evoluíram para o arco (CROCI, 1998; MAYERHOFER, 1950).

O pseudo-arco de cantaria foi criado na região da Mesopotâmia por volta de 4000 a.C., composto por fiadas horizontais avançadas. A mesma técnica construtiva foi utilizada para construir as primeiras abóbadas, no Egito e na Grécia. A estrutura apresenta uma aparência arqueada, mas sem distribuir as cargas conforme os princípios de um arco verdadeiro (REI; GAGO, 2017).

O elemento tornou-se particular à Arquitetura Romana, que diferentemente dos gregos e egípcios, os quais frequentemente aplicavam grandes maciços para absorver cargas em seus monumentais edifícios, soube utilizar os arcos para aproveitar a máxima eficiência da estrutura, o que lhes possibilitou vencer vãos maiores em construções mais econômicas (MAYERHOFER, 1950).

Notável aplicação prática da engenharia dos arcos romanos são os aquedutos, construídos modularmente, frequentemente sem argamassa – dos quais a Pont du Gard é notável exemplo, tendo arcos que superam vãos de até 24 metros – e as abóbadas, construídas de blocos de concreto assentados em camadas horizontais, com arcos de tijolos formando uma ossatura interior, que aliviavam as pressões durante a construção – das quais destaca-se o Pantheon, que possui uma cúpula hemisférica de 43,3 metros de diâmetro, com um óculo de mais de 8 metros de diâmetro em seu centro, a fim de permitir a entrada de luz e redistribuir o peso da



### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

cúpula em caso de variações climáticas ou sísmicas. Ambas as estruturas foram construídas em cantaria (MAYERHOFER, 1950).

Os elementos arqueados continuaram a manifestar relevância no Império Bizantino, e no Ocidente, gradualmente voltaram a ser utilizados no final da Alta Idade Média, primeiramente como consolas arqueadas. Depois, incorporaram-se no Império Carolíngio e desenvolveram-se na Arquitetura Românica, que manteve e aprimorou os arcos de volta perfeita. Além disso, neste período, surgiram os arcos diafragmáticos, que consistem na disposição paralela de arcos a fim de sustentar coberturas, em edifícios, ou tabuleiros, em pontes (VIOLETT-LEDUC, 2015).

Por volta do século XI, surgiu o Estilo Gótico, que busca utilizar elementos estruturais como colaboradores à estética do edifício. Os arcos ogivais, ao contrário dos românicos, que transferem a pressão lateral para pilares e paredes circundantes, direcionam as forças verticalmente em direção aos pilares e subsequentemente ao solo, tirando a função estrutural das paredes de cantaria e possibilitando a incorporação de grandes vitrais (REI; GAGO, 2017).

As abóbadas de nervuras, por sua vez, tiveram origem na intersecção ortogonal de duas abóbadas de berço. Tal método possibilitou a subdivisão da abóbada única em faixas sucessivas, que eram construídas sequencialmente e atuavam de maneira completamente independentes. Posteriormente, na construção de cúpulas, foram incluídos abaixo de sua superfície arcos de cruzamento que, além da função estética, permitiam cortes irregulares nas junções dos painéis, posteriormente preenchidos com argamassa (HUERTA, 2013).

Empiricamente, se aplicavam regras proporcionais para calcular a espessura das nervuras, de modo que deveriam ter cerca de 1/18 do vão em arcos semicirculares, com ajustes proporcionais à medida que os arcos eram rebaixados. Além disso, também foram utilizados com funções estruturais os arcobotantes, os botaréus e os pináculos. No caso específico da Escola Cisterciense, identifica-se um afastamento do ornamento excessivo, o que os fazia preservar os elementos estruturais em sua forma natural, de modo a simbolizar, simultaneamente, a força e a graça divinas (FITCHEN, 1981; MORGADO, 2013).

Na Renascença e no Barroco, as cúpulas voltaram a manifestar sua importância. Sua forma, tipicamente em quinto agudo, exigiu novas soluções estruturais, como arcos de sustentação e interposição de cúpulas. O domo da Catedral Santa Maria del Fiore, em Florença, na Itália, um dos primeiros de seu tipo, foi executado por Brunelleschi, que utilizou um arranjo





### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

de tijolos em “espinha de peixe”, que se sustentam mutuamente em forma de hélice (ALMEIDA, 2018).

A partir da Revolução Industrial, os avanços tecnológicos inviabilizaram muitas das construções em alvenaria, dando lugar a materiais mais leves, como ligas metálicas de alta resistência, compostos reforçados com fibras ou concretos de alto desempenho. Atualmente, há uma tendência crescente em adotar tecnologias como a modelagem paramétrica e a impressão 3D para construção de estruturas complexas de forma mais rápida e eficiente (COLIN, 2020).

## 2.2 MATERIAIS UTILIZADOS E TÉCNICAS CONSTRUTIVAS

Os arcos e abóbadas se comportam, por um lado, de acordo com sua própria forma geométrica e, por outro, de acordo com os materiais de construção utilizados. Normalmente, os materiais atualmente empregados consistem basicamente no concreto armado e no aço. O primeiro, que utiliza a combinação de aço e concreto em estruturas moldadas *in loco* ou pré-moldadas, assemelha-se quanto ao comportamento às estruturas de alvenaria e cantaria; e o segundo, que utiliza malhas estruturais e treliças, sobre as quais apoiam-se materiais de preenchimento, pode ser visto como uma evolução das realizadas em madeira.

Quanto à construção das abóbodas de alvenaria, segundo Sousa (2019), existem diversas técnicas empregadas. Uma delas é a Técnica Portuguesa da Abobadilha, a qual se destaca pelo posicionamento dos elementos cerâmicos seguindo a curvatura da abóbada. O processo de construção começa com o traçado das juntas a partir das paredes, elevadas até a altura dos rins a fim de definir sua geometria. O espaço entre as juntas não é fechado, o que permite o assentamento dos tijolos de preenchimento ao finalizar da estrutura principal.

O autor destaca que, para evitar o uso de cimbra, são utilizados tijolos secos que absorvem a água da argamassa e aceleram sua cura. A construção avança das extremidades para o centro e o último elemento de cada fiada atua como cunha, o que gera tensões de compressão na estrutura. Após a conclusão das fiadas, é realizado o enchimento do extradorso. Essa técnica foi utilizada, por exemplo, no teto do convento de Santo Domingo em Valência, na Espanha.



### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

Na Técnica Mexicana, por sua vez, conforme explica Sousa, a construção da abóbada inicia-se com a colocação de tijolos em  $45^\circ$  em cada um dos seus quatro cantos (em planta). A partir deste ângulo, são construídas quatro abobadilhas apoiadas nas paredes adjacentes e que avançam em direção ao centro, unindo-se em um padrão de escamas. Em cada fiada, os tijolos começam na horizontal e avançam em ângulo até ficarem perpendiculares na pedra angular. A argamassa é aplicada para preencher a junta entre os tijolos na parte inferior e deixá-la oca na parte superior.

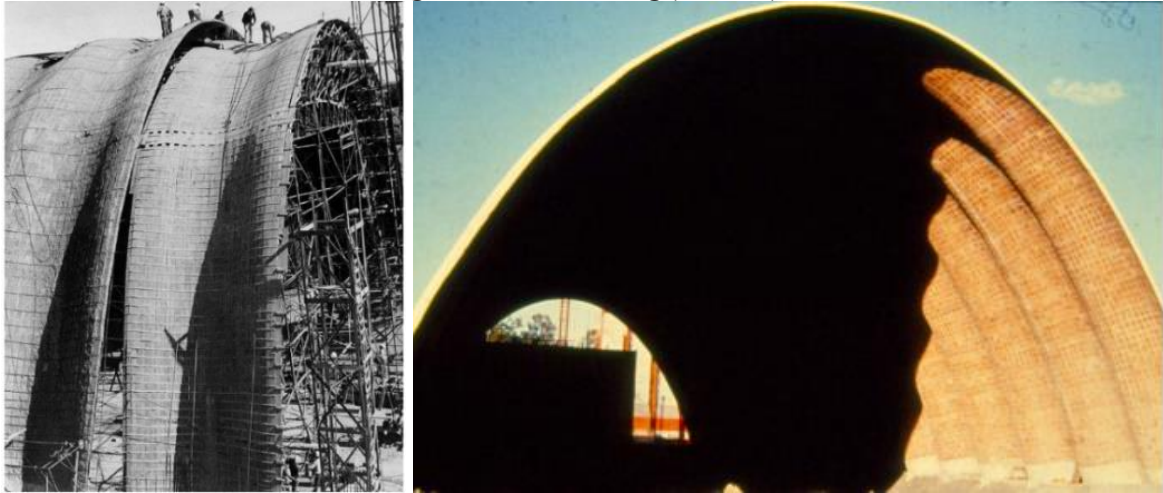
Destacam-se na técnica, para o autor, três características fundamentais: os tijolos são empilhados de forma contínua, são leves e pequenos, e não há necessidade de cimbres ou suportes. A relação entre a curvatura da abóbada e o vão é determinada pela posição dos pontos de inflexão e pela capacidade dos tijolos de resistir à compressão e contrabalançar as trações.

Segundo Fitz (2015), outro material de construção adotado é a cerâmica armada. Ao utilizar a cerâmica como elemento principal, essas abóbadas oferecem uma solução única para cobrir grandes vãos, pois proporcionam uma estrutura leve, porém robusta, uma vez reforçada com fibras ou outros materiais.

O engenheiro Dieste desenvolveu para tal a Técnica das Abóbadas Gaussianas (assim denominadas em homenagem ao matemático Gauss). Conhecidas como abóbadas de dupla curvatura, elas operam predominantemente em compressão, e são adotadas quando as especificações do edifício exigem vãos superiores a 20 metros sem obstáculos estruturais. Segundo o autor, o sistema consiste essencialmente em uma casca extremamente fina de tijolos reforçados, revestidos com argamassa (Figura 4), cuja forma longitudinal corresponde à curva inversa do diagrama de momento fletor da cobertura (catenária).

Para a execução, uma forma móvel, geralmente feita de madeira e às vezes de ferro, desliza sobre trilhos dispostos na direção principal da cobertura, de modo a construí-la gradualmente. A seção transversal apresenta ondulações que aumentam consideravelmente a rigidez de sua superfície. Dessa forma, o peso próprio da abóbada não gera tensões de tração. As armaduras têm o propósito de resistir às cargas de vento e outras cargas acidentais não previstas, além de consolidar a estrutura como uma casca monolítica.

Figura 4 - Silo de Young (CADYL)



Fonte: Fitz (2015).

Além deste, Dieste também utilizava a Técnica das Cascas (ou Abóbadas) Autoportantes, que são estruturas feitas de uma única camada de cerâmica. Nesse tipo de estrutura, a curva catenária corresponde à seção transversal do módulo estrutural, o que resulta em flechas maiores para vãos menores. As autoportantes são preferidas quando não há restrições para pilares no espaço a ser coberto e quando se deseja entrada de luz natural pelas extremidades laterais. Na sua construção, os tijolos são dispostos de modo a formar juntas contínuas, tanto longitudinalmente quanto transversalmente, para permitir a inserção das armaduras. Dieste introduziu lajes horizontais nas extremidades das abóbadas para lidar com o empuxo durante a construção.

Destaca-se também como material utilizado o concreto armado. Segundo Appleton (2005), trata-se de uma tecnologia dominante em todo o mundo, que permite a moldagem em formas complexas. As cascas de concreto armado são estruturas de superfície curva contínua com espessura menor em relação às outras dimensões. Seu comportamento estrutural é analisado em duas teorias: membrana e flexão. Ao projetar cascas, uma especial atenção deve ser dedicada às regiões de apoio, áreas de significativa solicitação de flexão (MEDRANO; MEIRELLES, 2005).

Torroja foi o pioneiro nas teorias sobre o uso do concreto armado em estruturas de cascas. Porém, o desenvolvimento das teorias estruturais para cascas é creditado a Donnell, um engenheiro aeronáutico americano. Entre 1950 e 1970, Candela teve um papel crucial ao estimular os projetistas a aplicarem cascas de concreto armado, em um uso escultural do ma-



### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

terial, a partir da geometria do parabolóide hiperbólico. Utilizaram-se principalmente modelos físicos para criar as formas desejadas, moldando-as a partir da curva inversa da catenária (ASCE, 1976; CHILTON, 2000).

Conforme Silva (2015), as estruturas de concreto armado apresentam como vantagens o seu custo relativamente baixo, a facilidade de execução, que não requer mão de obra altamente especializada, a baixa necessidade de manutenção e a capacidade de construir estruturas hiperestáticas. Por outro lado, são desvantagens o peso elevado, os desafios em reformas e demolições e a baixa isolamento térmica, que resulta em maior consumo energético para o controle de temperatura.

Outro material amplamente utilizado desde o princípio da construção civil é a madeira. Segundo Marques (2008) e Amaral (2018), entre as vantagens no seu uso destacam-se sua origem natural, a renovabilidade com cultivo regulamentado, a reutilização sustentável, a durabilidade quando tratada, a facilidade de manuseio, o bom isolamento térmico e a rapidez na construção. Suas desvantagens são alta inflamabilidade, vulnerabilidade, limitações dimensionais para grandes construções, falta de profissionais qualificados e desconhecimento de suas propriedades, o que pode dificultar sua aceitação cultural.

De acordo com Ferreira (2012), ao longo da história, várias técnicas foram desenvolvidas para criar abóbadas de madeira. Uma delas é a Técnica das Abóbadas Lamelares, que utiliza módulos losangulares para cobrir áreas de formatos circulares ou poligonais. Em suas vantagens inclui-se a padronização das lamelas, que favorece uma construção industrializada, rápida e fácil, com necessidade de mão de obra pouco especializada. Além disso, permite a fixação direta de elementos de vedação e o uso de peças curtas, adequadas para madeiras de reflorestamento. Essa técnica também oferece uma estética interna agradável devido a sua modulação.

Ferreira (1999) aponta que a abóbada cilíndrica, formada por uma malha losangular curva, na qual cada nó conecta o meio de uma lamela contínua às extremidades de duas outras lamelas, foi amplamente preferida entre os tipos de estruturas lamelares. Quando a estrutura está apoiada em paredes ou vigas, o sistema lamelar transfere os esforços horizontais para esses apoios, os quais são geralmente absorvidos por tirantes. No caso de apoio em contrafortes, é a fundação que absorve esses esforços. O autor descreve ainda outro método construtivo utilizado, a Técnica das Cúpulas Reticuladas, que se diferem por sua modulação triangular.



### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

Outro material amplamente utilizado é o aço, material que, com sua alta resistência e ductilidade, revolucionou o conceito de estruturas esbeltas. Sua leveza reduz o peso das estruturas, facilitando a construção de formas complexas. Além disso, a capacidade do aço de suportar grandes cargas e resistir a condições adversas contribui para a longevidade e estabilidade das construções (NUNES, 2011).

De acordo com o Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA, 2017), são vantagens do método a redução no tempo de construção, devido à possibilidade de fabricar as estruturas simultaneamente a outras etapas, a garantia de qualidade, dada por um controle rigoroso, a melhora da organização do canteiro de obras, a redução do desperdício de materiais e a segurança. No entanto, de acordo com Pinheiro (2005), o aço apresenta também desvantagens, como a necessidade de uma equipe especializada para a montagem, a suscetibilidade à corrosão em áreas litorâneas e os custos superiores em comparação ao concreto armado.

Segundo Nunes (2011), nos sistemas de estruturas metálicas, os arcos e abóbadas podem ser fabricados com perfis de alma cheia, como os perfis I, H ou tubular. Contudo, essa opção deve ser bem justificada, pois esses perfis requerem processos de calandragem para adquirir a curvatura desejada, ou exigem que a estrutura curva seja projetada a partir de uma sequência de segmentos retos, o que pode levar a um aumento significativo nos seus custos.

Assim, a utilização de arcos treliçados simplifica significativamente sua fabricação e montagem, o que reduz seu peso estrutural e gera uma considerável economia, tanto em material como em custos de fundações e suportes adicionais. Para garantir a estabilidade dos arcos, é essencial utilizar contraventamentos, que transferem as forças para fora do seu plano. Eles integram-se à estrutura treliçada do arco e são projetados, de forma otimizada, para suportar tração. No entanto, como a direção dessa força é incerta, as diagonais devem ser dispostas em formato de X. São geralmente feitas de barras redondas ou cantoneiras, e devem ter sua esbeltez controlada para evitar vibrações, conforme as normas estabelecidas (NUNES, 2011; REBELLO, 2008).

#### 2.3 TEORIA DOS ARCOS

Poucos documentos históricos resistiram para fornecer informações detalhadas sobre as técnicas construtivas e metodologias de dimensionamento utilizadas na Antiguidade. O

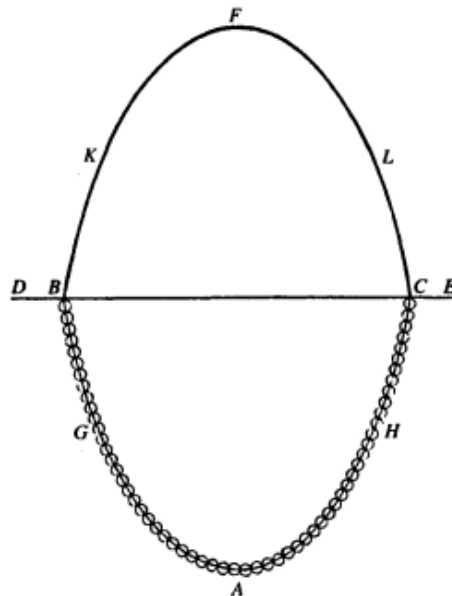
tratado mais antigo conhecido é o de Vitruvius, escrito durante o início do Império Romano, que não apresenta regras específicas de dimensionamento de arcos, abóbadas e cúpulas (GAGO, 2004).

No período medieval, alguns documentos apresentam regras de dimensionamento, de estudiosos possivelmente influenciadas pela Escola Romana. As técnicas baseavam-se principalmente em relações geométricas e na experiência prática dos mestres construtores. Durante o Renascimento, Brunelleschi contribuiu com os métodos que utilizou na construção do domo da Catedral Santa Maria del Fiore, e da Vinci desenvolveu estudos para verificação da estabilidade dos arcos (GAGO, 2004).

O problema clássico da Teoria dos Arcos – a demonstração de sua estabilidade e a determinação da sua espessura quando sujeitos ao peso próprio – se desenvolveu principalmente a partir do século XVII, sendo sucessivamente objeto de estudo de diversos matemáticos.

Hooke (1675) buscou resolver o problema ao relacionar o arco com a curva catenária, observada quando a gravidade atua sobre uma cadeia ou corda suspensa entre dois pontos fixos. Hooke notou que suspender uma corrente metálica resultava em uma forma semelhante à geometria invertida de um arco equilibrado, sugerindo que a forma natural assumida por uma corrente pendente poderia ser comparada à de um arco sob as mesmas condições de equilíbrio (Figura 5).

Figura 5 – Representação da corrente suspensa em sua relação com a curva catenária



Fonte: Heyman (1988).



### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

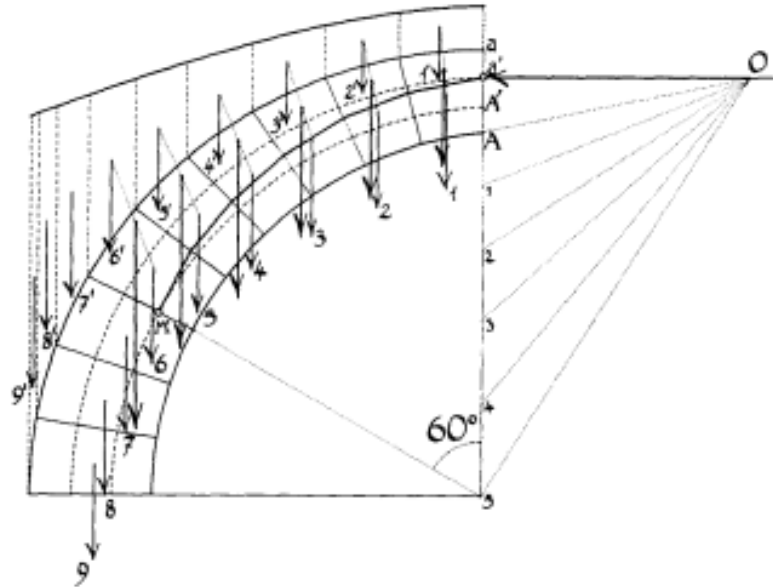
Gregory (1698) também reconheceu que a catenária descrevia adequadamente a geometria de um arco sob sua própria gravidade, observando que essa analogia poderia ser usada para compreender como as forças são distribuídas em um arco, especialmente em suas extremidades. Ele notou que, embora o comportamento da corrente e do arco fosse semelhante, eles eram inversos: enquanto as forças de compressão empurram o arco das extremidades para dentro, a corrente é puxada das extremidades para fora pelas forças de tração.

Poleni (1748), utilizando o método proposto por Gregory, avaliou a estabilidade da cúpula da Basílica de São Pedro, em Roma, na Itália, dividindo-a em lúnulas e sobrepondo uma curva catenária obtida por uma corrente de esferas correspondentes às cargas nas lúnulas. Ele concluiu que, apesar das rachaduras, a cúpula era estável, e determinou a melhor forma de restaurá-la para garantir sua estabilidade a longo prazo.

No século XIX, houve um abandono do estudo dos mecanismos de colapso em favor da adoção dos conceitos da Teoria da Elasticidade. O arco passou a ser tratado em uma curva elástica, em um caso particular das estruturas de comportamento linear. Gerstner (1831), investigando a estabilidade do arco a partir das análises da catenária invertida, constatou que, para que a estrutura seja estável, a linha de pressões equilibrada com as cargas atuantes deve corresponder à curva catenária contida dentro de seu núcleo central. No entanto, Barlow (1846) confirmou experimentalmente que várias curvas podem satisfazer essa condição de equilíbrio (Figura 7).

Méry (1840) sugeriu que a linha de pressão deveria estar no terço central da seção do arco, de modo que estivesse totalmente comprimida, minimizando assim as charneiras de rotação, áreas de maior vulnerabilidade à deformação e ruptura da estrutura (Figura 6).

Figura 6 – Método gráfico de Méry



Fonte: Méry (1840).

Essa premissa, de que o comportamento dos arcos está relacionado com curvas catenárias, permite determinar a espessura do arco por meio de sua linha de pressões obtida por equações ou estudos empíricos pela analogia dos cabos suspensos, como o fez Gaudí em seus projetos para a Catedral da Sagrada Família, em Barcelona, na Espanha (Figura 7). A curva também pode ser obtida através do gráfico do momento fletor de uma viga de vão semelhante. Quando o arco e o gráfico coincidem, o arco está na forma mais eficiente possível.

Figura 7 – Modelo de Gaudí para dimensionamento de cúpulas pela analogia de correntes



Fonte: Gago (2004).





### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

Outra abordagem comumente utilizada na análise de estruturas elásticas é o Método da Energia, que se fundamenta na ideia de que a aplicação de cargas externas a uma estrutura elástica resulta em deformações que geram armazenamento de energia potencial no material da estrutura. Essa energia potencial elástica é uma medida da capacidade da estrutura de suportar as cargas sem falhar. Em outras palavras, quanto maior a energia potencial elástica armazenada, maior é a capacidade de resistência da estrutura (GAGO, 2004).

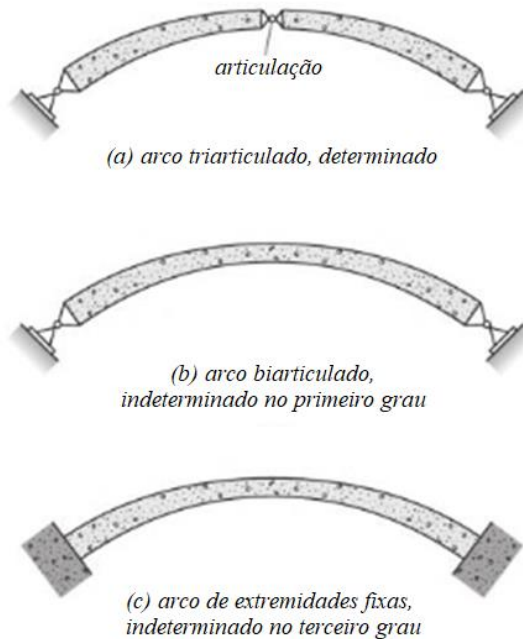
Nesse contexto, Pippard (1938) propôs um método para verificar a segurança de um arco, que utiliza equações derivadas da Análise Elástica para calcular as tensões no arco e compará-las com a tensão de compressão limite do material do arco. Se as tensões calculadas forem menores ou iguais à tensão de compressão limite, o arco é considerado seguro. O autor elaborou tabelas com cargas admissíveis para diferentes vãos e espessuras, com base em arcos parabólicos específicos e uma tensão limite de compressão, formando a base para o desenvolvimento do método MEXE, utilizado pelo exército britânico para classificação de pontes em alvenaria no pós-guerra (GAGO, 2004).

De todo modo, o avanço da Teoria dos Arcos mostrou continuamente que o arco catenário é ideal à autossustentação considerando-se apenas seu peso próprio. Tal fato pode ser confirmado pela comparação de simulações no *software* Ftool, pela qual também pode-se concluir que a forma parabólica é a mais adequada para combater o momento fletor, e o semi-círculo é o mais adequado para combater empuxo.

No entanto, é importante considerar, além da atuação gravitacional do peso próprio, outras cargas variáveis, como o vento. Este atua no arco como uma carga horizontal que gera nele um momento fletor e uma instabilidade que no problema clássico desenvolvido pelos teóricos mencionados não foi levado em consideração ou considerado insignificante.

Além disso, fatores que podem alterar a dinâmica estrutural do arco são os tipos de apoios e a possível existência de rótulas no seu comprimento. Na Figura 8, são apresentados seus três principais tipos: o triarticulado, o articulado e o de extremidades fixas. Enquanto o arco triarticulado é tido como estaticamente determinado, os outros dois tipos são considerados indeterminados (LEET, 2009).

**Figura 8 – Tipos de articulações em arcos**



Fonte: Leet *et al* (2009).

O arco triarticulado é o mais fácil de analisar e construir, já que sua determinação garante que variações de temperatura, deslocamentos dos suportes e imprecisões na fabricação não causem tensões significativas. No entanto, a presença de três articulações o torna mais flexível em comparação aos outros tipos mencionados (LEET, 2009).

### 3 METODOLOGIA

Os princípios teóricos apresentados, resultantes de uma abrangente revisão bibliográfica em artigos, teses, estudos de caso, livros e fontes digitais em português, francês, italiano, inglês, espanhol e alemão, foram aplicados em um estudo de caso na Catedral Sant'Ana. A escolha deste edifício se justifica pela presença predominante de arcos em sua fachada, por sua relevância histórica e cultural para Ponta Grossa e pela escassez de literatura acadêmica a seu respeito.

Realizaram-se três visitas técnicas à Catedral (15 de março, 9 de agosto e 20 de setembro de 2024), durante as quais foi possível acessar seus projetos arquitetônicos e estruturais e observá-la sob condições climáticas variadas. A análise documental, incluindo fontes primá-



rias da Mitra Diocesana e fontes secundárias digitais, possibilitou a compreensão da história de sua concepção, considerando suas demandas projetuais e as soluções adotadas. Os trechos mais relevantes desses documentos foram transcritos integralmente, enquanto o contexto mais amplo foi abordado de maneira indireta. Complementarmente, o projeto de maior interesse foi redesenhado no *software* AutoCAD, estando disponível como apêndice neste artigo.

Além disso, para a análise da estrutura dos arcos presentes no edifício, tema ao qual se restringe esta pesquisa, foi aplicado um método de cálculo estrutural, detalhado na seção subsequente. Os cálculos foram realizados utilizando planilhas do Excel, e as variáveis estão descritas na Lista de Símbolos no início deste artigo.

### 3.1 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE ARCOS

O dimensionamento de estruturas na construção civil consiste no relacionar de duas variáveis: as cargas que a estrutura deverá suportar, e a resistência dos materiais escolhidos. A partir de então, é possível definir as dimensões adequadas dos elementos estruturais, garantindo que a edificação atenda aos requisitos de segurança do modo mais econômico possível.

Primeiramente, levando em consideração as características de forma e tamanho do arco, estima-se uma seção transversal que possibilitará a determinação das cargas atuantes. A seguir, devem ser determinados os momentos de inércia (Eq. 1.1 e 1.2) e os raios de giração (Eq. 2.1 e 2.2), em seção usualmente retangular.

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad (1.1)$$

$$I_y = \frac{hb^3}{12} \quad (1.2)$$

$$k_x = \sqrt{\frac{I_x}{bh}} \quad (2.1)$$

$$k_y = \sqrt{\frac{I_y}{bh}} \quad (2.2)$$

Tais valores, e sua associação ao comportamento de compressão dos pilares, conforme anteriormente apresentado, permitem a determinação do grau de esbeltez da estrutura (Eq. 3.1 e 3.2). Para que a estrutura seja estável, segundo a NBR 6118 (2023), tal valor não pode ultrapassar 200.

$$i_x = \frac{2H}{k_y} \quad (3.1)$$



$$i_y = \frac{x}{k_x} \quad (3.2)$$

Dadas as considerações geométricas, inicia-se a determinação das cargas que solicitam a estrutura. Para tal, Timoshenko (1934) determinou tabelas de coeficientes que relacionam cada tipo de arco, sua relação entre flecha e vão e o número de rótulas com suas características espaciais (Tabela 1).

**Tabela 1 – Coeficientes para cálculos dimensionais de arcos**

Tipo de arco	Relação H/X	Número de rótulas ( $\eta$ )				Coeficiente de comprimento ( $\sigma$ )
		0	1	2	3	
Parabólico	0,1	60,7	33,8	28,5	22,5	1,03
	0,2	101,0	59,0	45,4	39,6	1,10
	0,3	115,0	79,1	46,5	46,5	1,21
	0,4	111,0	96,0	43,9	43,9	1,34
	0,5	97,4	77,9	38,4	38,4	1,48
	0,6	83,8	80,0	30,5	30,5	1,63
	0,8	59,1	59,1	20,0	20,0	1,97
	1,0	43,7	43,7	14,1	14,1	2,32
Catenário	0,1	59,4	41,1	28,4	19,6	1,03
	0,2	96,4	64,5	43,2	28,9	1,10
	0,3	112,0	68,5	41,9	25,6	1,21
	0,4	92,3	57,2	35,4	21,9	1,33
	0,5	80,7	47,0	27,4	16,0	1,47
	1,0	27,8	13,9	7,0	3,5	2,29

Fonte: Timoshenko (1934).

O peso próprio, sujeito à ação gravitacional (Eq. 4), é determinado pelo peso específico do material, usualmente 25,0 kN/m<sup>3</sup> para o concreto e 76,5 kN/m<sup>3</sup> para o aço CA-50; a sobrecarga é estimada pela NBR 6120 (2019), e deve ser relacionada com a seção da estrutura (Eq. 5); e a carga de vento, por sua vez, é determinada pela sua velocidade, variável segundo a região, tipos de terreno e edifício, segundo especificações da NBR 6123 (2023), e em sua relação com a estrutura (Eq. 6 e 7).

$$q_{PP} = \gamma b h \sigma \quad (4)$$

$$q_{SC} = F_{SC0} b \sigma \quad (5)$$

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (6)$$



### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

$$q_V = 0,613V_k^2 b \quad (7)$$

Considerando que as duas primeiras cargas atuam no sentido vertical, e que a última atua no sentido horizontal, podemos somá-las e majorá-las com um coeficiente de segurança definido pela NBR 6118 (2023) (Eq. 8 e 9).

$$q_{xd} = q_V C_S \quad (8)$$

$$q_{yd} = (q_{PP} + q_{SC}) C_S \quad (9)$$

Assim, entende-se que tais cargas são responsáveis por gerar reações na estrutura, de força cortante, força normal e momento fletor. Esses dados podem ser obtidos de maneira gráfica pelo *software* Ftool, a partir da definição dos parâmetros de carga. O método torna possível a determinação de quaisquer formas de arco.

O dimensionamento exige o estabelecimento de uma seção mínima que suporte os esforços solicitados. Nesse sentido, os esforços devem ser menores que a resistência característica à compressão do material (Eq. 10).

$$q_{d,máx} = f_{cd} b h \quad (10)$$

Outro dado utilizado para verificação de resistência é o módulo de elasticidade, ou módulo de Young, que quantifica a rigidez do material em sua relação entre tensão e deformação na região elástica. Para o concreto, pode ser estimado pela Eq. 11, e para o aço é de aproximadamente 210 GPa.

$$E = 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (11)$$

A partir deste, a NBR 6118 (2023) estabelece qual é maior carga que uma estrutura suportaria (Eq. 12). Timoshenko apresenta uma equação para igual fim, específica para arcos e de acordo com suas geometrias específicas (Eq. 13). Esses valores devem, obrigatoriamente, ser superiores às cargas solicitadas, e determinam a seção mínima da estrutura.

$$F_{d,máx} = \frac{\pi^2 E I_y}{X^2 C_S} \quad (12)$$

$$q_{d,máx} = \frac{\eta E I_y}{X^3 C_S} \quad (13)$$

Assim, dada a seção mínima, propõe-se o seu detalhamento. Para o concreto armado, a seção obtida deve ser combinada com uma área de aço, determinada pela Eq. 14. As equações utilizadas provêm do estudo de pilares, que se utilizam dos ábacos de Venturini (1987), a partir dos coeficientes das Eq. 15, 16 e 17.



### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

$$A_s = \frac{\omega b h f_{cd}}{f_{yd}} \quad (14)$$

$$v = \frac{N_d}{b h f_{cd}} \quad (15)$$

$$\mu_x = \frac{M_{xd}}{b^2 h f_{cd}} \quad (16)$$

$$\mu_y = \frac{M_{yd}}{b h^2 f_{cd}} \quad (17)$$

A principal função da armadura de aço na estrutura é combater o momento causado pela ação do vento. Por isso, em muitas circunstâncias pode ser necessário levar em consideração a armadura mínima, com área de 0,04% da seção de concreto, e a máxima, de até 8% da seção de concreto.

Por fim, há de ser definida a armadura transversal (estribos), a partir da dimensão da armadura longitudinal da estrutura.

$$\varphi = \begin{cases} 5 \text{ mm} \\ \varphi_{l_{min}}/4 \end{cases} \quad (18)$$

$$s = \begin{cases} 200 \text{ mm} \\ b \\ 12\varphi_l \end{cases} \quad (19)$$

A dimensão das barras é definida pelo maior valor encontrado entre as condições da Eq. 18, e o espaçamento entre elas, para o aço CA-50, é dado pelo menor valor encontrado entre as condições da Eq. 19.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Catedral Sant'Ana (Figura 9) é a principal igreja da Diocese de Ponta Grossa, no município de Ponta Grossa, no estado do Paraná. Conforme resume Santos (2009), a Paróquia de Santa'Ana foi fundada em 1823, com a construção de uma pequena capela. Na década de 1920, encomendou-se um novo projeto para a igreja ao arquiteto italiano Nicolau Ferrigotti, e em 1926 ela foi elevada à Catedral. No entanto, em 1979 o edifício foi demolido, dando lugar ao atual prédio, oficialmente concluído em 23 de julho de 2009.

**Figura 9 – Catedral Sant’Ana**



Fonte: RPC Ponta Grossa (2021).

A respeito da demolição da antiga Catedral, conforme explica Cordova (2012), houve muita discussão. O edifício “tinha muito de uma arquitetura neoclássica e eclética. Os nichos dos Apóstolos, colocados do lado de fora do prédio, constituíam-se em uma característica rara, ao menos no sul do Brasil.” Se, por um lado declarava-se, por parte do bispo Dom Geraldo Pellanda, problemas estruturais, especialmente associados à sua parte interna, construída em madeira, e incapacidade de atender ao crescimento populacional, por outro defendia-se a preservação do patrimônio sociocultural do município.

No entanto, como destaca a autora, os documentos da época enfatizam que, ao imaginário ponta-grossense, parecia ser necessário ao progresso uma ruptura com o passado em favor de edifícios mais modernos, como atesta um comentário época, do Padre Vitério Dall’Acqua:

Com licença Sra. Sant’Ana:

Com a permissão e a benção da Senhora Sant’Ana, vai ser demolida a velha, pequena e insegura Catedral de Ponta Grossa.

E, no mesmo local se erguerá um novo, grande, seguro e moderno Templo que honre mais ainda a este bom povo ponta-grossense e à sua Excelsa Padroeira, a Senhora Sant’Ana (DALL’ACQUA, 1978 *apud* CORDOVA, 2012).



### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

Neste contexto foi concebido o projeto da nova Catedral, no qual destacam-se a utilização de materiais contemporâneos, como o concreto aparente e o vidro, e a incorporação de elementos da arquitetura modernista, como os arcos catenários. As torres e os vitrais, tradicionais na arquitetura cristã, foram adaptados ao novo conceito.

O projeto também foi pensado para que os quatro lados do edifício fossem idênticos, de modo a permitir que, situada em um ponto elevado da cidade, a Catedral mantivesse a mesma aparência a partir de qualquer ângulo. O memorial descritivo do anteprojeto, assinado pelo engenheiro civil Júlio César Zanon, destaca que a principal inspiração foi a história do município:

O anteprojeto que temos a honra de apresentar foi inspirado na história de Ponta Grossa.

Considerando que os primeiros homens brancos a pisarem em solo ponta-grossense foram os bandeirantes, isto nos levou a escolher o formato do piso da igreja em forma de bateis.

Em segundo, esta próspera cidade foi colonizada por imigrantes russos, os quais construíram no topo de um morro uma tosca casa de pouso. Baseados neste acontecimento, idealizamos as paredes externas da Catedral com linhas avançadas projetadas para o alto, construídas em concreto aparente, em alto relevo, imitando troncos, relembando assim o arrojo dos colonizadores e a casa de pouso.

Posteriormente vieram os padres jesuítas, os quais construíram um oratório, elevando [nele] uma grande cruz de madeira da qual nos baseamos [par]a projetar a torre na mesma forma, isto é, em forma de cruz, levando no alto duas asas estilizadas, lembrando a lenda segundo a qual uma pomba ao pousar sobre a cruz marcou em definitivo o local da construção da igreja, substituindo assim o pequeno oratório ali erguido.

Além do exposto, toda a parte histórica da cidade terá sequência nos vitrais da futura Catedral, que serão executados em [concreto] e vidro, dando, além de um belíssimo acabamento, uma demonstração de força e pujança da cidade (ZANON, 1977, p. 1).

Nesse contexto, atribui-se um valor simbólico às estruturas no topo das torres, denominadas "coroas da princesa", que evocam a nobreza do município, "a Princesa dos Campos Gerais". A estrutura em formato de leque nas fachadas assemelha-se a uma cauda de pássaro, referenciando a pomba que indicara o local da construção da igreja. Também se previa a execução de vitrais temáticos, especialmente na torre maior, onde se representariam os Apóstolos.

Quanto ao interior, destacam-se a concepção dos ambientes de celebração, postas em confirmação com o documento *Sacrosanctum Concilium* (Constituição do Concílio Vaticano II aprovada pelo Papa Paulo VI, 1963), que afirmou que “na construção de edifícios sagrados, tenha-se grande preocupação de que sejam aptos para lá se realizarem as ações litúrgicas e permitam a participação ativa dos fiéis” (par. 124), tendo-se em consideração que “o povo





### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

cristão possa mais facilmente aprender-lhes o sentido e participar neles por meio de uma celebração plena, ativa e comunitária” (par. 21):

**CAPELA DO SANTÍSSIMO** – Destinada para ofício religioso diário com a capacidade de cento e trinta pessoas, foi projetada em linhas simples e modernas, tendo como destaque principal os vitrais da mesma. Foi prevista também uma pequena sacristia auxiliar e um confessionário. A capela tem um acesso externo e internamente está ligada ao presbitério.

**SALA DE ACONSELHAMENTO** – Duas salas foram projetadas para este fim, em substituição aos confessionários tradicionais. Estas salas são amplas, cabendo no seu interior duas cadeiras, uma mesa etc. As paredes serão de vidro, dando condições às pessoas de serem vistas na Catedral, sem, porém, serem ouvidas. A critério do senhor bispo, nestas salas poderão ser instalados os tradicionais confessionários.

**PRESBITÉRIO** – É muito amplo. Além da [cátedra] do bispo, [estará] localizado o batistério. A Liturgia da Palavra será celebrada em frente ao altar mor, em plano mais baixo, aproximando assim o celebrante do povo. Neste mesmo plano, poder-se-ão celebrar os batismos e casamentos comunitários, além de outras solenidades, como sejam: ordenações, cerimônias religiosas da Semana Santa etc (ZANON, 1977, p. 2-3).

No entanto, os projetos passaram por várias modificações até a completa aprovação, em 1978. Exemplos que o atestam é a existência do altar antigo, além do altar central, e de confessionários nos projetos iniciais, que não chegaram a ser executados. Além disso, devido a cortes orçamentários, os vitrais temáticos, incluindo os dos Apóstolos, foram substituídos por alternativas mais simples.

O edifício construído consiste em uma nave central, e uma capela ao Santíssimo, que podem comportar até 1200 pessoas sentadas, um presbitério, uma sacristia e outras salas (Figura 10). Com o subsolo, que abriga o ossário, os banheiros, o museu e o estacionamento, somam-se 3650 metros quadrados (SANTOS, 2009).

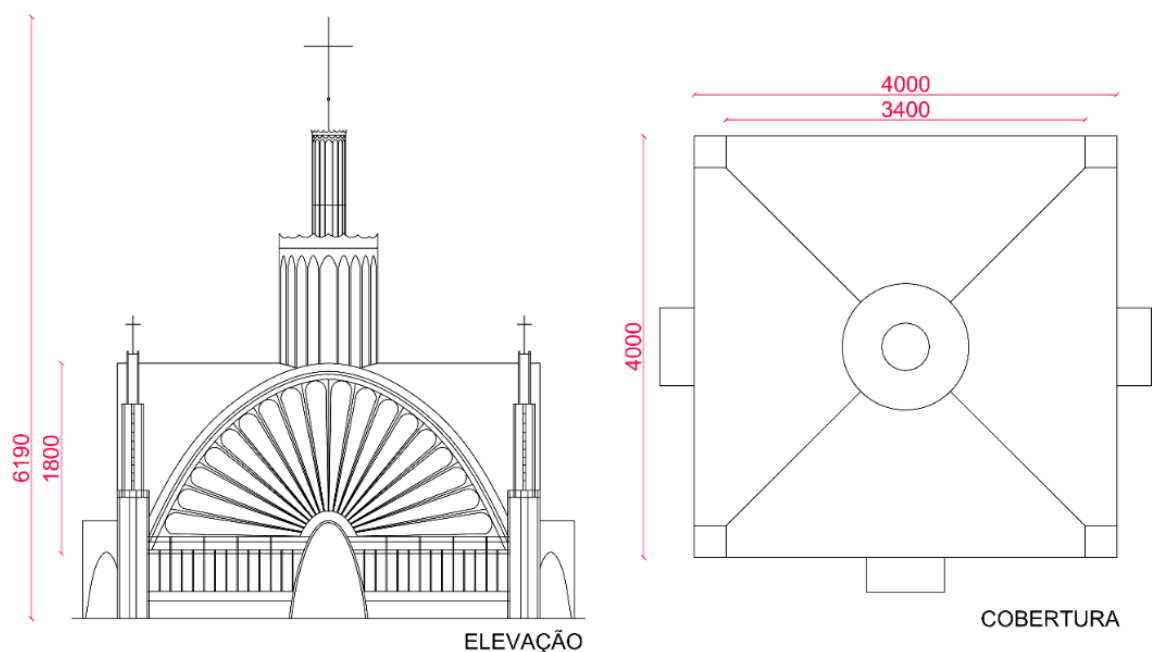
**Figura 10 – Panorâmica do interior da Catedral Sant’Ana**



Fonte: Autoras (2024).

A Catedral possui uma abóbada de arestas simétricas, com um óculo circular na intersecção, a partir do qual uma torre foi erguida. As cotas gerais apontam, em planta, um quadrilátero regular de 40 metros de lado e, em corte, uma altura de 61,9 metros. Os arcos catenários, idênticos em cada fachada, têm 34 metros de vão e 16 metros de flecha, considerando a linha das impostas até o extradorso (Figura 11).

Figura 11 – Croqui da Catedral Sant’Ana



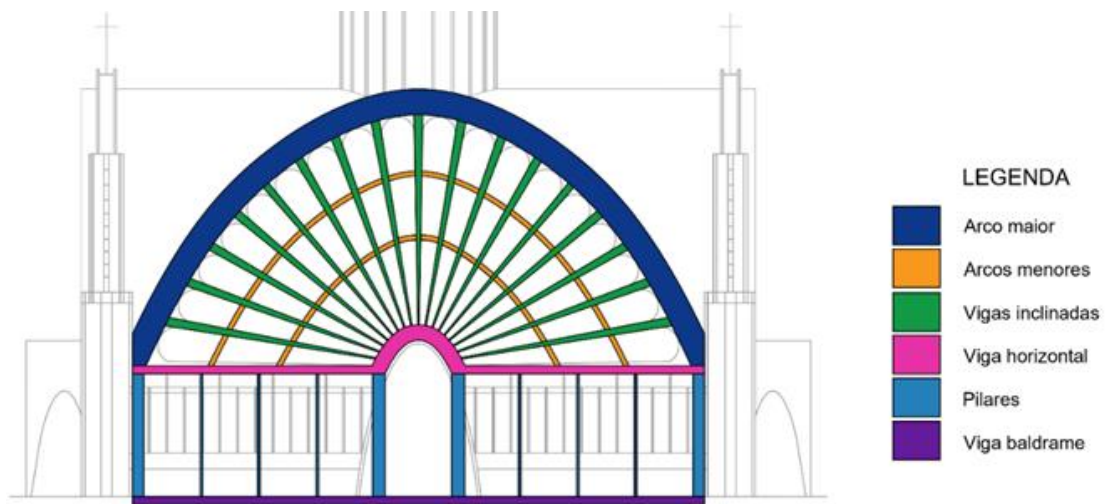
Fonte: Autoras (2024), a partir de documentos do arquivo da Mitra Diocesana de Ponta Grossa.

Sob o ponto de vista estrutural, a grande dificuldade em conceber um edifício religioso destas dimensões é que deve transpor grandes distâncias, idealmente sem a presença de pilares intermediários. Além disso, é ideal que sejam incluídos um grande número de vitrais, fundamentais para iluminação e ventilação do ambiente, o que reduz as possibilidades estruturais. Nessas circunstâncias, a abóbada de arestas se apresenta como uma estrutura eficiente, capaz de distribuir as cargas da cobertura para os pilares das paredes externas, e que, por utilizar-se dos arcos, combina uma vantagem estrutural com uma estética arquitetônica particular.

Além disso, a concepção estrutural do elemento incluiu, entre os vitrais da fachada, dezessete vigas inclinadas que são responsáveis por sustentar o arco (no projeto original também existiam dois arcos menores, capazes de diminuir o comprimento total das vigas). Elas transmitem as cargas para uma viga e uma sucessão de pilares (Figura 12). Por este meio, os

projetistas aproveitaram-se de uma característica arquitetônica já presente no projeto para propor uma solução estrutural que minimizou os esforços relativos sem, no entanto, minimizar a aparência da superação de um grande vão.

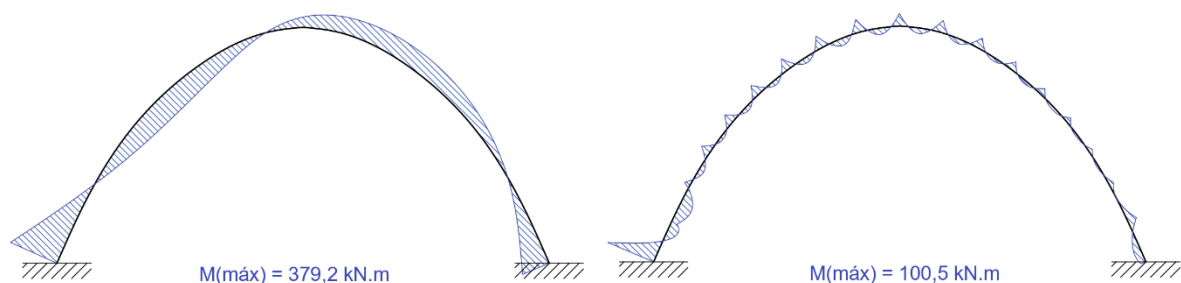
Figura 12 – Croqui do sistema estrutural da Catedral Sant’Ana



Fonte: Autoras (2024).

Os gráficos gerados no Ftool demonstram a diferença de comportamento do arco maior da Catedral quando age sozinho e quando conta com o apoio das vigas inclinadas (Figura 13), quando submetido a uma carga vertical de 70 kN/m e uma carga horizontal de 5 kN/m:

Figura 13 – Comparação de momento fletor no arco



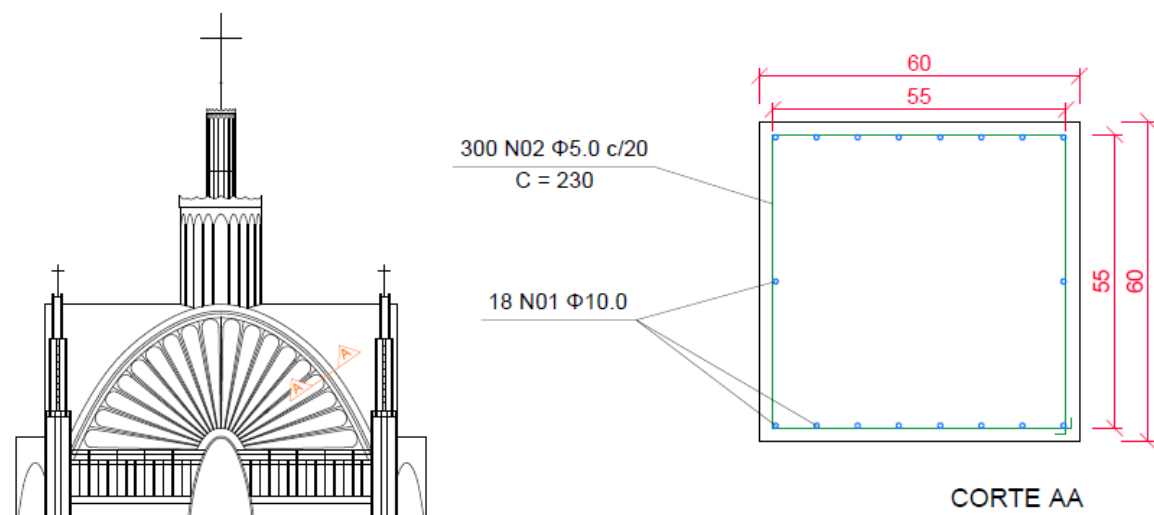
Fonte: Autoras (2024), a partir de dados do Ftool.

A fim de comparação, aplicou-se a metodologia anteriormente apresentada para concreto armado (Eq. 1-17) neste arco, com e sem os apoios intermediários, considerando o concreto de classe C25 e o aço CA-50, e as sobrecargas de uma casca de concreto e de vento. Observou-se que, com os apoios, a solicitação de armadura é igual à mínima, de 14,4 cm<sup>2</sup>, o

que corresponde à 18 barras de 10,0 mm, mesmo para a menor seção de concreto adotada, de 60x60 cm; enquanto, sem os apoios, para a seção mínima de 60x100 cm, a solicitação de armadura, também mínima, é de 24,0 cm<sup>2</sup>, ou seja, 20 barras de 12,5 mm.

A Figura 14 ilustra a solução mais eficiente. A economia de material, considerando apenas a armadura longitudinal, resulta em uma redução de 40% no peso do aço e 42% no volume de concreto.

**Figura 14 – Detalhamento da armadura**



Fonte: Autoras (2024).

O projeto estrutural original, elaborado em 1976 por Marcos Quentel Zanardini, previa a construção dessa estrutura justamente em concreto armado (Apêndice A), para a qual seriam utilizadas aproximadamente 380 toneladas de aço CA-24, 4170 toneladas de aço CA-50 e 400 m<sup>3</sup> de concreto C25. O arco principal sustentaria uma casca de concreto com espessura de 15 cm, e seria de seção transversal trapezoidal, com altura de 180 cm, base menor de 25 cm e base maior de 45 cm. Como armadura, seriam utilizadas 24 barras de aço CA-50 de 12,5 mm. É possível que, para o dimensionamento deste projeto, tenha sido utilizado o Método do Terço Central.

Um segundo projeto, datado de 1987 e cujo memorial descritivo é a única fonte documental disponível, sugere o uso do aço treliçado. Tendo sido a solução adotada, por motivos financeiros e operacionais, pode-se observar na estrutura da abóbada de arestas três arcos catenários paralelos em cada lado, sobre os quais encontram-se terças, treliças e contraventa-



### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

mentos, e uma circunferência ao redor do óculo (Apêndice B). Na cobertura utilizaram-se telhas metálicas.

Observa-se como vantagens do aço, em relação ao concreto armado, sua leveza, durabilidade, facilidade de execução, controle de qualidade e economia. No entanto, identificam-se como desvantagens, um baixo conforto térmico e acústico, a maior possibilidade de haver infiltrações, o que se associa a uma maior manutenção e, uma vez que as treliças ficaram aparentes, o comprometimento da estética arquitetônica do interior do edifício. Esses pontos negativos poderiam ser amenizados com uma impermeabilização adequada da cobertura e o revestimento de seu interior com algum material isolante, como, por exemplo, placas de madeira ou EPS.

## 5 CONCLUSÃO

Ao investigar a história dos arcos e abóbadas e examinar sua capacidade estrutural, constatou-se que diversas civilizações os empregaram em suas construções como solução para vencer grandes vãos e como forma de expressar uma identidade cultural por meio da arquitetura. Entre essas estruturas, os edifícios medievais, especialmente os cistercienses, se destacam por uma estética que, embora despojada de ornamentação, atinge a beleza por meio da adequação da superestrutura em um arranjo harmônico. Tais edifícios, símbolos de perenidade, podem inspirar a arquitetura contemporânea, que busca conciliar *design* e sustentabilidade, a minimizar as divergências entre os projetos arquitetônicos e estruturais.

No que se refere ao dimensionamento dos arcos, o artigo apresentou um método simplificado, baseado nas contribuições de inúmeros pesquisadores que escreveram a respeito da Teoria dos Arcos ou propuseram métodos de dimensionamento estrutural. Como aplicação prática desses conceitos, foi realizado um estudo de compatibilização arquitetônica-estrutural na Catedral Sant'Ana, de Ponta Grossa. Através da análise da história do edifício, dos seus projetos e memoriais descritivos, e da avaliação estrutural pelo método proposto, conclui-se que o projeto foi adequadamente compatibilizado, considerando suas aspirações predominantes.



### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

A abóbada de arestas presente na Catedral, projetada a partir do arco catenário associado a apoios inclinados, se apresentou como solução eficiente na construção de um espaço amplo sem estruturas intermediárias, e viabilizou a inserção de vitrais em todas as fachadas, principais responsáveis por construir sua impressão estética. Contudo, a utilização do aço treliçado e das telhas metálicas aparentes compromete a harmonia interna e afeta o conforto ambiental na edificação, além de favorecer infiltrações e aumentar os custos de manutenção. Tais pontos poderiam ser mitigados com uma impermeabilização adequada na abóbada e a adoção de materiais de revestimento isolante no seu interior.

Tendo em vista os anseios da arquitetura contemporânea, o estudo destacou a importância de alinhar uma concepção estrutural que assegure segurança e eficiência máxima com uma concepção arquitetônica que atenda às exigências de *layout* e qualidade estética. Nesse contexto, como observado em diversas arquiteturas ao longo dos séculos, o arco se afirma como um elemento de grande relevância na compatibilização arquitetônica-estrutural das edificações.

#### REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Orozimbo M. **A caminho da catedral Santa Maria del Fiore: Brunelleschi, arquitetura, arte e matemática.** Tese, Mestrado em Matemática, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 180 p., 2018.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). **Lattice structures: state-of the art.** *Journal of the Structural Division*, v. 102, nº 11, p. 2197-2230, 1976.

APPLETON, Julio. **Construções em Betão: nota histórica sobre a sua evolução.** Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, p. 61, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto - procedimentos.** Rio de Janeiro. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: cargas para o cálculo de estruturas de edificações.** Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: forças devidas ao vento em edificações.** Rio de Janeiro. 2023.



### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

BALBÁS, Leopoldo T. *Arquitectura Gótica. Ars Hispaniae: historia universal del arte hispánico*. Madri: Plus Ultra, Vol. 7, 403 p., 1952.

BARLOW, William H. *On the existence (practically) of the line of equal horizontal thrust in arches, and the mode of determining it by geometrical construction. Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 5, p. 162-182, 1846

CBCA, Centro Brasileiro da Construção em Aço. **Construção em aço e sustentabilidade**. 2017.

CHILTON, J. *Heinz Isler: the engineer's contribution to Contemporary Architecture*. Londres: Thomas Telford Publishing, 1ª ed., 170 p., 2000.

COLIN, Silvio. **Uma introdução à arquitetura**. Rio de Janeiro: Jaguaritica, 7ª ed., 212 p., 2020.

CORDOVA, Maria J. W. **Demolição da Igreja Matriz de Sant'Ana: o antigo e o moderno no imaginário social ponta-grossense**. Revista Memória em Rede, v.2, n.6, Pelotas, 21 p., 2012.

COSTA, F. Pereira. **Arcos e abóbadas**. Lisboa: Enciclopédia Prática da Construção Civil, v. 15, 2ª ed, 1991.

CROCI, G. *The conservation and structural restoration of architectural heritage. Computational Mechanics Publications*, Southampton, 1998.

DO AMARAL, Emily. **A viabilidade da madeira na sustentabilidade na construção civil**. Londrina, 2018.

FERREIRA, Núbia dos S. S. **Estruturas lamelares de madeira para coberturas**. Tese, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 252 p., 1999.

FERREIRA, Núbia dos S. S. **Sistemas estruturais em formato de abóbada reticulada**. Tese, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 116 p., 2012.

FITCHEN, John. *The construction of Gothic Cathedrals: a study of medieval vault erection. University of Chicago Press*. Chicago, 364 p., 1981.

FITZ, Leonardo. **A obra de Eládio Dieste**. Tese, Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 263 p., 2015.

GAGO, António M. C. de S. **Análise estrutural de arcos, abóbadas e cúpulas**. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 491 p., 2004.

GERSTNER, Franz J. von. *Hand Buch der mechanik, J. Spurny*. Praga, 1831-1834.



### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

GREGORY, D. *Catenaria*. *Philosophical Transactions*, vol. 19, n. 231, p. 637-652., 1698.

HOOKE, Robert. *A description of helioscopes, and some other instruments*. John & Martin Printer to the Royal Society, Londres, 1675.

HUERTA, Santiago. *La construcción de las bóvedas góticas según Rodrigo Gil de Hontañón, arquitecto de la catedral de Segovia*. **Segovia: su catedral y su arquitectura** Ensayos en homenaje a Antonio Ruiz Hernando. Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Madri, p. 107-135, 2013.

MAYERHOFER, Lucas. **Introdução ao estudo dos tetos abobadados: sua origem e sua evolução na antiguidade**. Rio de Janeiro: Jornal do Commercio, 1ª ed., 97 p., 1950.

MEDRANO, R. H. MEIRELLES, C. R. M. **Estruturas espaciais em cascas: estudo de casos latino-americanos**. XXI Conferencia Latinoamericana de Escuelas y Facultades de Arquitectura, 2005.

MÉRY, E. *Sur l'équilibre des voûtes en berceau*. *Annales des Ponts et Chaussées*. Paris, 1840.

MORGADO, Duarte N. **Arquitetura Cisterciense: Espiritualidade, Estética, Teologia**. São Paulo: Paulus, 1ª ed., 2013.

NUNES, Patrícia C. C. **Teoria do arco de alvenaria: uma perspectiva histórica**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 176 p., 2009.

NUNES, Rosana A.F. **Avaliação do desempenho estrutural de coberturas em estrutura de aço na forma de arco circular e parabólico**. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 127p.,2011.

PALLASMAA, Juhani. **Os olhos da pele: a arquitetura e os sentidos**. Porto Alegre: Bookman, 1ª ed., 76 p., 2011.

PAULO VI. *Sacrosanctum Concilium*. Constituição conciliar sobre a sagrada liturgia. Roma, 1963.

PINHEIRO, Antônio C. da Fonseca Bragança. **Estruturas metálicas: cálculos, detalhes, exercícios e projetos**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

PIPPARD, A. J. S. *An experimental study of the voussoir arch*. *Journal of the Institution of Civil Engineers*, vol. 10, p. 383-404., 1938.

POLINI, Giovanni. *Memorie istoriche della gran cupola del Tempio Vaticano*. Stamperia del Seminario. Padova, 1748.





### III UniSIAE - Semana Integrada de Agronomia, Análise em Desenvolvimento de Sistemas, Arquitetura e Urbanismo e Engenharias

REBELLO, Y. C. P. **Bases para projeto estrutural na arquitetura.** 2ª ed. São Paulo: Ziguarte, 286 p, 2008.

REI, João. GAGO, António S. **A forma na construção abobadada.** Proelium VII, 26 p., Lisboa, 2017.

RPC PONTA GROSSA. **Confira a programação das missas de Natal nas igrejas de Ponta Grossa.** Portal G1. 2021.

SANTOS, Ademir da G. **Paróquia de Sant'Ana.** Diocese de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2009.

SILVA, F. N. **Análise Comparativa entre Lajes em Concreto Armado e Concreto Protendido.** Universidade de Pernambuco. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Civil. Recife, 2015.

SOUSA, Mariana M. Q. **Investigação de estruturas arqueadas pela teoria da estática gráfica.** Tese, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 61 p., 2019.

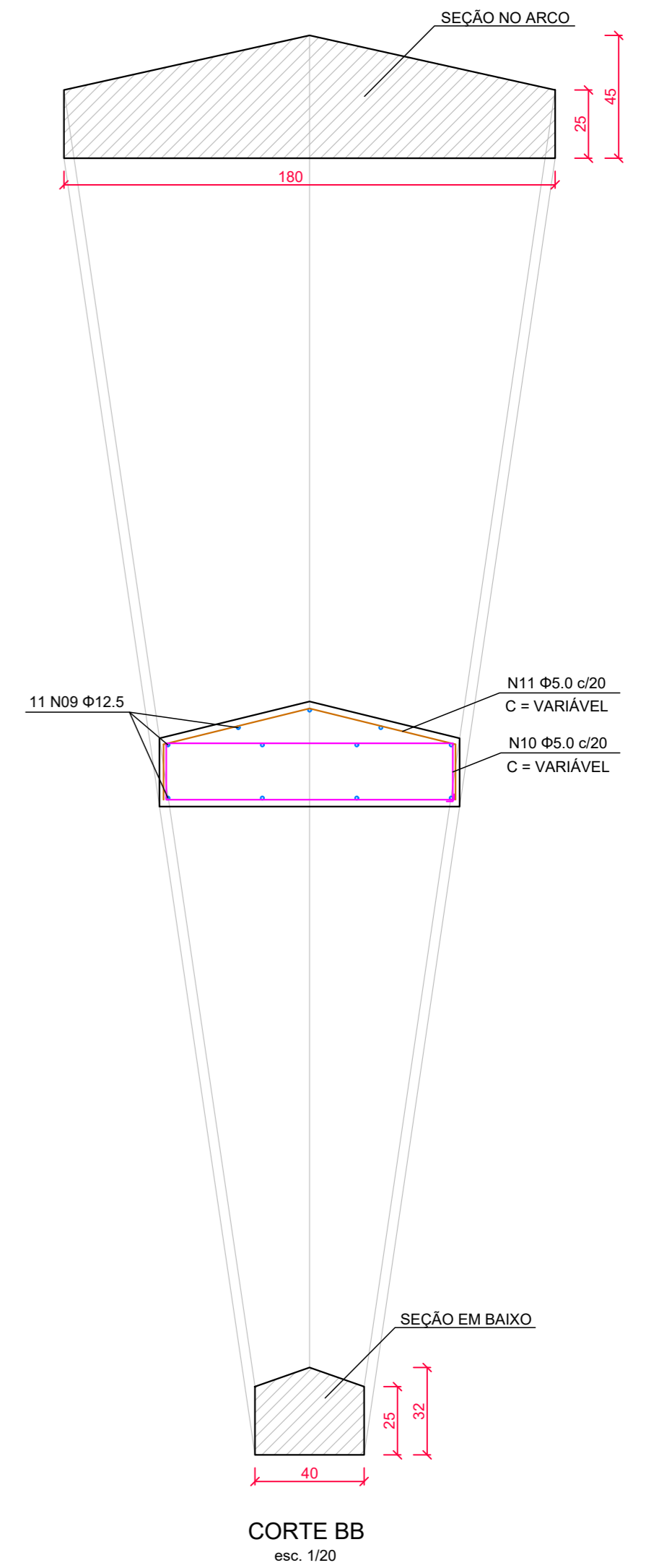
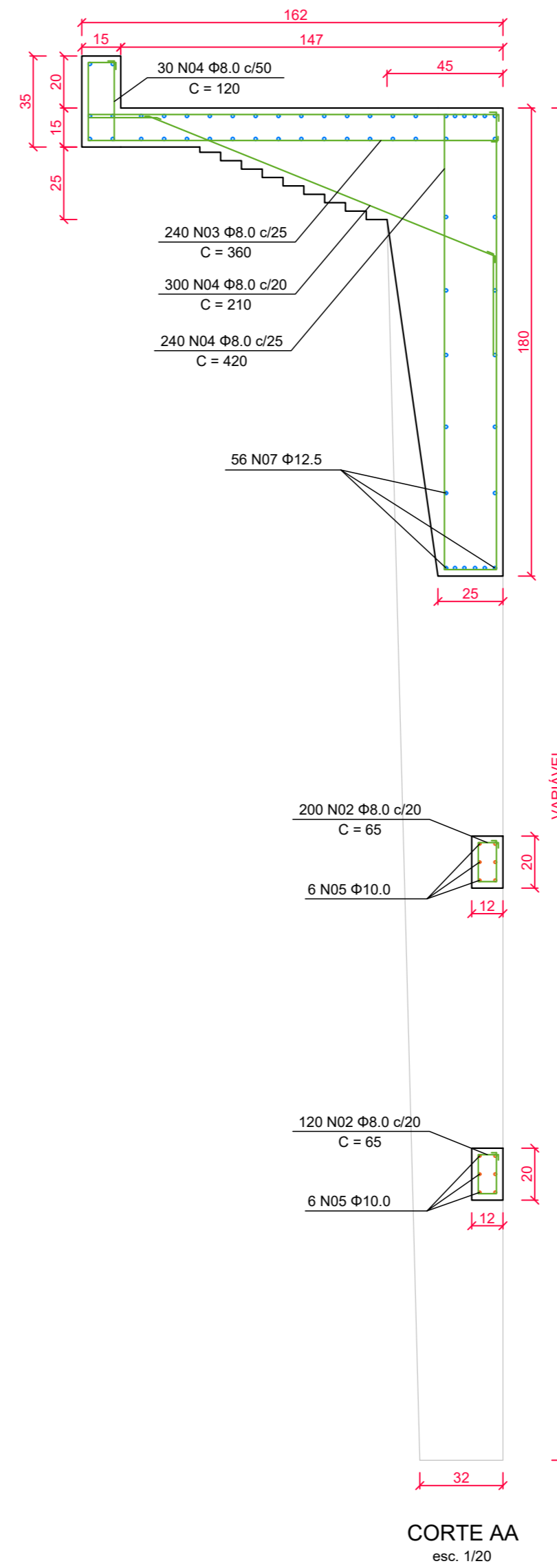
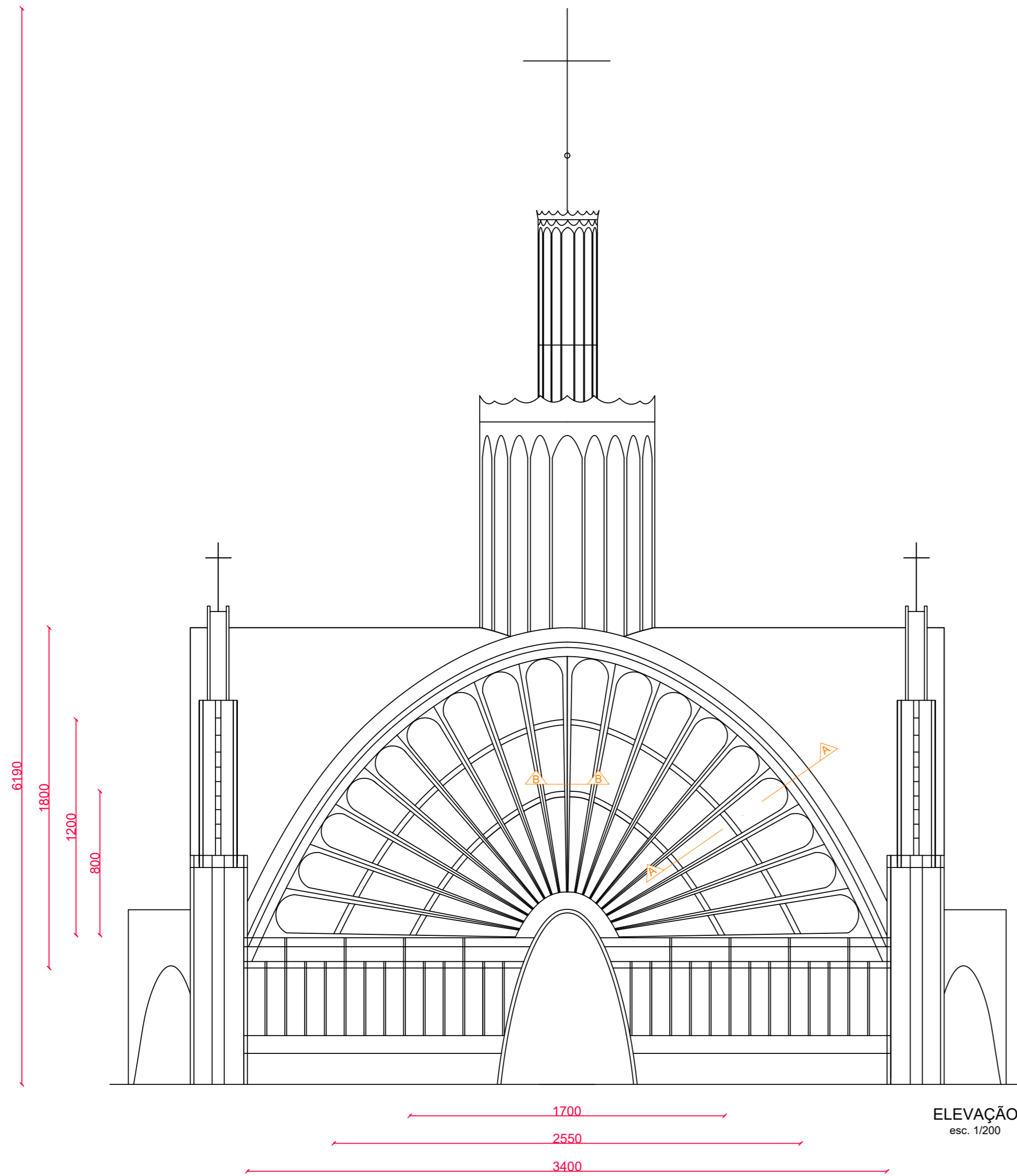
TIMOSHENKO, Stephen. *Buckling of rings, curved bars, and arches. Theory of Elasticity.* Nova Iorque: McGraw-Hill, 1ª ed., cap. 7, p. 278-318, 1934.

VENTURINI, Mário A. **Ábacos de flexão normal.** São Paulo, 1987.

VIOLLET-LE-DUC, Eugène E. *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle.* Paris: Books on Demand, 584 p., 2015.

ZANARDINI, Marcos Q. **Projeto estrutural:** Catedral de Ponta Grossa de Nossa Senhora Sant'Ana, forma arco, detalhes. Arquivo da Mitra Diocesana de Ponta Grossa, folha 22, 1977.

ZANON, Júlio C. **Apresentação do projeto.** Arquivo da Mitra Diocesana de Ponta Grossa, 3 p., 1977.



ARMADURA PARA OS 4 ARCOS				
N	$\Phi$ (mm)	QUANTIDADE	COMPRIMENTO	
			UNITÁRIO (cm)	TOTAL (m)
1	5,0	1200	100	1 200
2	5,0	1280	65	832
3	8,0	960	360	3 456
4	8,0	960	420	4 032
5	10,0	12	-	1 780
6	12,5	1200	210	2 520
7	12,5	52	-	11 000
8	20,0	52	VARIÁVEL	2 800
9	12,5	187	VARIÁVEL	16 000
10	5,0	5100	VARIÁVEL	13 800
11	5,0	5100	VARIÁVEL	8 200

OBSERVAÇÃO:  
N08 - NOS EGASTES DOS ARCOS SERÁ UTILIZADO AÇO DE  $\Phi$  20,0 mm.

RESUMO DE ARMADURA			
$\Phi$ (mm)	CA	COMPRIMENTO (m)	PESO (kg)
20,0	50	2 908	650 000
12,5	50	31 000	3 100 000
10,0	50	1 833	110 000
8,0	50	7 873	315 000
5,0	24	25 332	380 000
TOTAL			4 550 000
CONCRETO C25			400 m <sup>3</sup>



UNIVERSIDADE CESUMAR  
PONTA GROSSA - PARANÁ

CURSO/DISCIPLINA:  
ENGENHARIA CIVIL  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

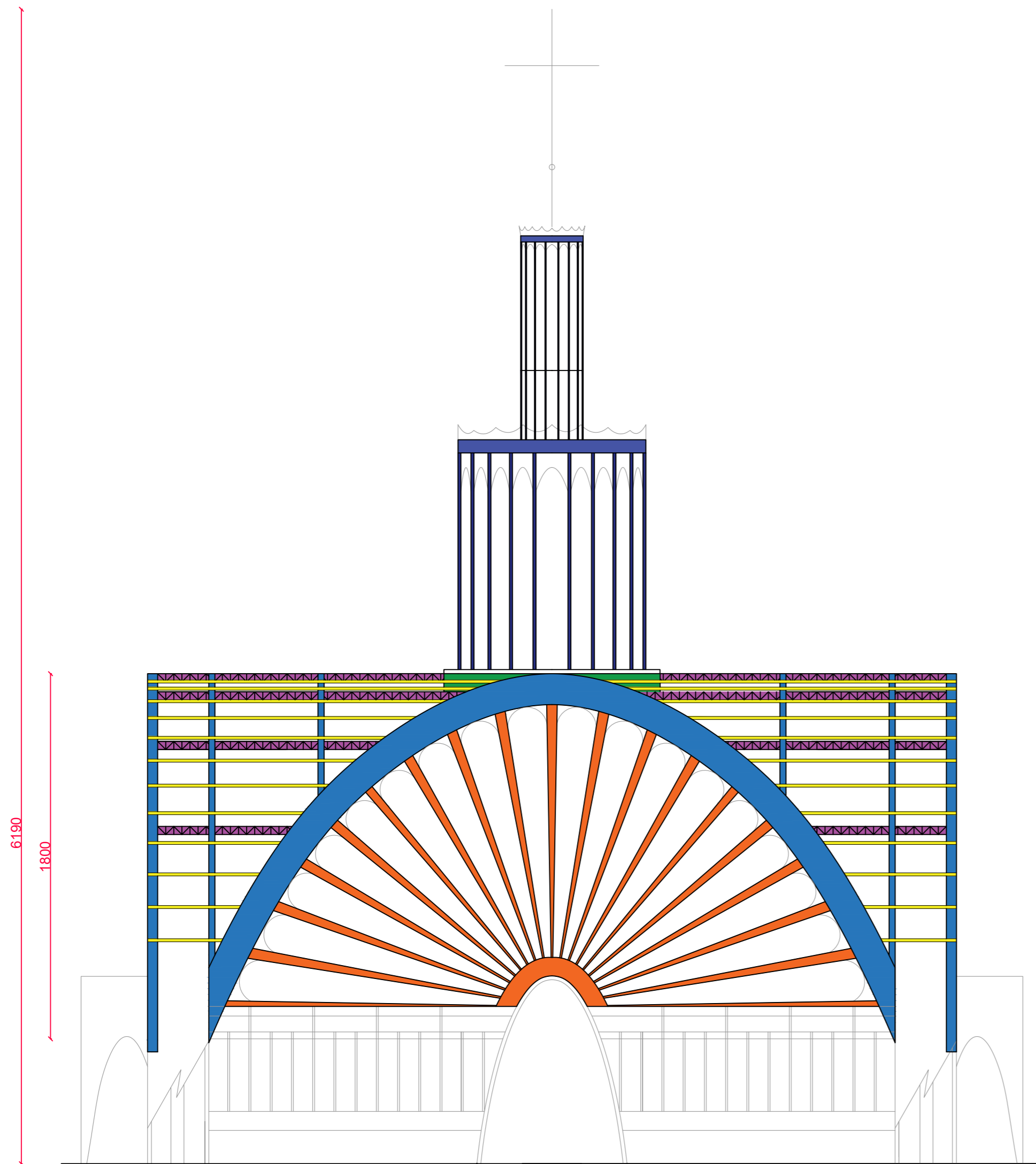
ESCALA:  
INDICADA UNIDADE:  
CENTÍMETROS

PROJETISTA:  
MARCOS QUENTEL ZANARDINI  
ENGENHEIRO CIVIL - CREA 2.163 D PR

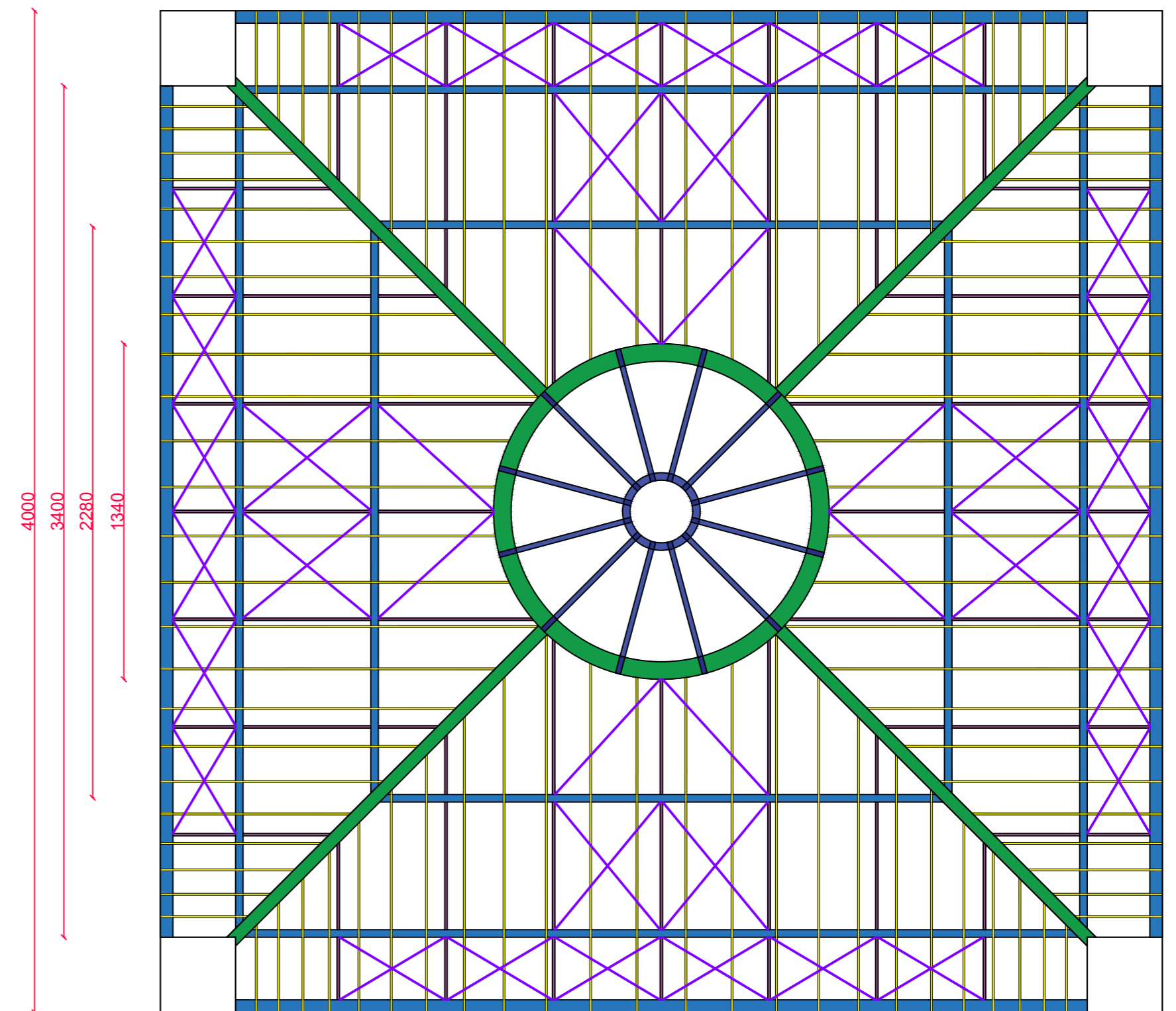
DATA:  
07/04/2024 Nº FOLHA:  
01/05

ADAPTADO DE "PROJETO ESTRUTURAL - CATEDRAL DE PONTA GROSSA DE NOSSA SENHORA SANT'ANA - FORMA ARCO - DETALHES", FOLHA 22, DO ARQUIVO DA MITRA DIOCESANA DE PONTA GROSSA, POR:  
LETÍCIA MARIA HOINASKI  
VANESSA OLIVEIRA DA ROCHA


APÊNDICE A  
PROJETO ESTRUTURAL DA  
COBERTURA DA  
CATEDRAL SANT'ANA  
EM CONCRETO ARMADO



ELEVAÇÃO



COBERTURA

<p><b>LEGENDA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: green; margin-right: 5px;"></span> Estrutura da abóbada</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></span> Arcos</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: purple; margin-right: 5px;"></span> Terças</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; margin-right: 5px;"></span> Caibros</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: darkblue; margin-right: 5px;"></span> Estrutura da torre</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: orange; margin-right: 5px;"></span> Estrutura da fachada</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border-left: 1px dashed purple; border-right: 1px dashed purple; margin-right: 5px;"></span> Contraventamentos</li> </ul>			UNIVERSIDADE CESUMAR PONTA GROSSA - PARANÁ	
	CURSO/DISCIPLINA: ENGENHARIA CIVIL TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	ESCALA: 1/200	UNIDADE: CENTÍMETROS	
CROQUI DE OBSERVAÇÃO ELABORADO POR: LETÍCIA MARIA HOINASKI VANESSA OLIVEIRA DA ROCHA	DATA: 01/08/2024	Nº FOLHA: 02/05		
<b>APÊNDICE B</b> CROQUI DO PROJETO ESTRUTURAL DA COBERTURA DA CATEDRAL SANT'ANA EM AÇO				