



INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO PANTEÃO POR MEIO DE MODELAGEM PARAMÉTRICA

Palavras-Chave: PANTEÃO, RHINOCEROS, ANÁLISE ESTRUTURAL.

Erick de Oliveira Lima – curso: Engenharia Civil

Orientador: Professor Dr. Thomaz Eduardo Teixeira Buttignol

Professor Associado ao Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC-DES)

INTRODUÇÃO:

Dentre os vários desafios enfrentados pelos engenheiros estruturais no desenvolvimento de construções está a adequação de projetos arquitetônicos ousados que fazem uso de grandes vãos abertos. Como é de conhecimento dos engenheiros, cada material possui suas peculiaridades e apresenta suas limitações ao qual se é seguro expô-lo a um vão aberto, sem apoios. Logo, para adequar a envoltura estrutural ao qual se solicita um projeto tendo em vista não somente a segurança mas também a redução de custos na obra, os engenheiros precisam utilizar da criatividade juntamente a um vasto conhecimento alinhado aos mais avançados softwares para conseguir entregar uma solução aos tais projetos. No entanto, o arsenal de ferramentas nem sempre foi tão vasto.

Adjuntos de muita criatividade, vasto conhecimento em geometria, matemática e muito conhecimento empírico, as grandes civilizações antigas utilizavam da engenharia, não apenas para trazer soluções criativas aos problemas da sociedade mas principalmente usavam de construções faraônicas como demonstração de força, conhecimento e soberania. Não obstante em Roma por volta do século II a.C o cônsul Marco Vipsânio Agripa, durante o império de Otávio Augusto (27 a.C -14 d.C) , promove a construção do que vem a se tornar posteriormente pelas mãos de Públio Élio Adriano (imperador 117-138), uma das maiores e mais intrigantes obras da história da humanidade, o Panteão (128 d.C). O terno do latim, derivado do grego antigo “pantheon” significa “comum a todos os deuses”, logo se sustenta a teoria de que teria inicialmente o propósito de servir de templo de adoração aos deuses pagãos bem no centro de Roma.

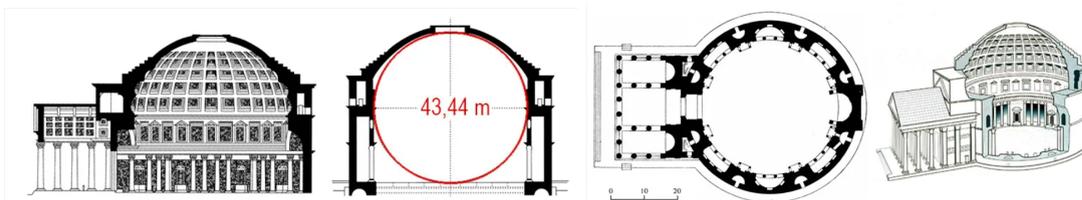


Figura 1.0: esquematização da arquitetura estrutural da obra pantheon.

O templo foi um marco na história da engenharia, detendo por muitos séculos o título de construção que possuía o maior vão aberto chegando a impressionantes 43,44 metros de diâmetro livre, como pode ser visto na *figura 1.0*. Sem concretos especiais, sem qualquer tipo de armadura, utilizando apenas os conhecimentos matemáticos e experimentações da época, os romanos foram



capazes de criar uma estrutura capaz de suportar seu próprio peso por mais de 40 metros sem qualquer tipo de apoio detendo até os dias atuais o título de maior cúpula de concreto não armado do mundo.

METODOLOGIA:

Para isso, o que a pouca literatura disponível nos revela é que, na resolução de tal faceta, os romanos empregaram de várias técnicas disponíveis na época. Além de uma tridimensionalização da idéia do arco, extensamente usado até então, que direcionava de forma simétrica os esforços solicitantes através da própria estrutura até a base da estrutura, também foram utilizadas outras técnicas para que seu peso pudesse ser diminuído, tais como a gradual redução da espessura das parede conforme a altura, tendo por base uma espessura de aproximadamente 3 metros, redução de volume de material criando os chamados caixões (*figura 1.2*) que além do aspecto arquitetônico também reduziu drasticamente o peso da estrutura, e por fim o óculo que retirou o que seria a seção mais frágil da estrutura denotando um orifício com cerca de 9 metros de diâmetro na parte mais alta do domo *figuras 1.1 e 1.2*. Além dessas manobras estruturais no documentário “Rome Engineering and Empire”, afirma-se também que foram adicionados ao concreto jarros com a finalidade de diminuir a densidade do concreto.



Figura 1.1: Pantheon romano vista frontal e superior



Figura 1.2: Interior da cúpula do pantheon. Visão do óculo e caixões.

Apesar da pouca tecnologia e das, hoje questionáveis, soluções usadas para reduzir os problemas estruturais da obra é notável a durabilidade das construções romanas perdurando por mais de um milênio. Assim sendo, movido pela curiosidade e fascínio a respeito das grandes construções, o presente trabalho se dispôs a uma análise qualitativa e quantitativa estrutural da maior cúpula de concreto não armado por meio de software e linguagem bim, verificando seus pontos de fragilidade e possível otimização.

Para tal, foi usado o software Rhinoceros que é um programa de modelagem 3D e design paramétrico usado principalmente por arquitetos, engenheiros e artistas digitais. Ele é desenvolvido pela Robert McNeel & Associates e fornece um conjunto abrangente de ferramentas e plugins para criar, editar, analisar e visualizar objetos tridimensionais além de permitir modelagem de sólidos, superfícies e malhas, oferecendo a liberdade de criar objetos de qualquer complexidade no entanto ele sozinho não permite que seja criado estruturas paramétricas, para isso foi usado um de seus plugin chamado Grasshopper que utiliza de linguagem de programação para o software permitindo que seja criado algoritmos e scripts paramétricos, facilitando a criação de formas complexas e a automação de tarefas de design. Devido a característica de ser altamente flexível e expansível o Grasshopper permite a criação de seus próprios componentes personalizados ou instalar extensões e bibliotecas o que

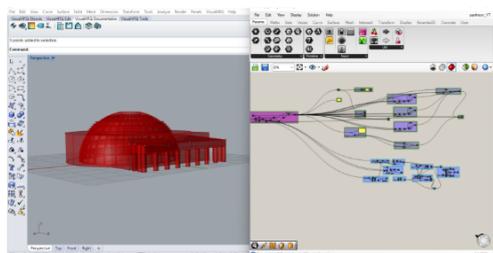


Figura 1.3: Modelo paramétrico demonstrativo do pantheon sem finalidade de análise estrutural.

estende as suas funcionalidades, Desse modo foi também usado a ferramenta plugin com o Grasshopper chamada Karamba 3D utilizada já com a finalidade analítica estrutural. O plugin Karamba 3D é uma ferramenta que se concentra na análise estrutural e comportamento de objetos 3D capaz de permitir que os usuários simulem e otimizem a resistência e estabilidade de estruturas complexas. Com o Karamba 3D, é possível definir as propriedades dos materiais, seções transversais e condições de carregamento para seus modelos 3D. O plugin utiliza métodos de elementos finitos para calcular

as tensões, deformações e deslocamentos dentro da estrutura, ajudando a identificar pontos fracos e fornecendo informações valiosas sobre a integridade estrutural.

Com tais características o software em questão fez-se ideal ao objetivo do trabalho tendo sua desenvoltura da seguinte forma. Primeiramente foi construído um modelo paramétrico fiel ao real sem objetivo de análise devido a sua complexidade visto na figura 1.3 Analisando o interior da estrutura o que se propôs foi a divisão da estrutura em três modelos: um em grelha, conforme o que os caixões deixam a interpretar na figura 1.2, vigas radiais; uma superfície cheia, ou seja lisa; além da combinação dos dois modelos como na figura 1.4. Todos com fins analíticos.

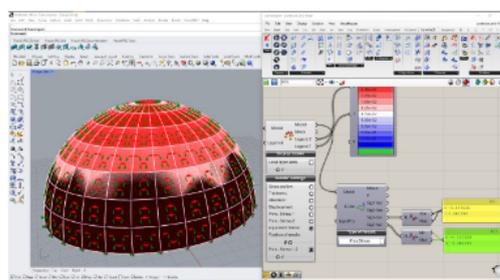


Figura 1.4: Modelo misto objetivando a análise estrutural da cúpula.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Pela tabela (Figura 1.5) é possível notar os valores obtidos após a análise realizada pelo Karamba 3D. a partir da análise dos momentos máximos e mínimos na estrutura é possível notar que o modelo 'junção', contendo ambos os modelos de grelha e superfície plana, é o que apresenta uma menor amplitude de momentos o que pode ser entendido como uma estrutura que contém uma maior rigidez ou estabilidade em comparação com as outras. Com base nos dados de deslocamentos dos modelos o que se observa é que apesar de não conter o menor deslocamento com uma diferença de apenas 0,07 cm pode também ser interpretada como a com melhor desempenho pelo fato de que dispondo de um maior carregamento que seriam provenientes de grelha mais a superfície ele mantém um deslocamento muito baixo sendo apenas 0,07 cm maior que o modelo de grelha que proporcionalmente é submetido a uma carga muito menor. Passando a interpretação dos dados quanto às reações é nítido evidente que o modelo junção possui o maior valor de reação sendo quase o dobro do segundo maior que vem a ser o modelo de superfície por se tratar da união dos modelos o esperado era que o valor obtido fosse próximo a soma dos valores, havendo essa disparidade algum problema na leitura ou na configuração do código ainda é estudada.



MODELO	MOMENTO (Z) (kN m)		REAÇÃO TOTAL (kN)	DESLOCAMENTO (cm)
	máx	min		
GRELHA	0,181	-0,096	2086,37	0,499
SUPERFÍCIE	1,672	-3,062	34 123,02	0,175
JUNÇÃO	0,031	-0,41	52 204, 06	0,182

Figura 1.5: Tabela de comparação de resultados após análise dos modelos com o Karamba 3D.

CONCLUSÕES:

Apesar de seu resultado controverso quanto os dados de reação total entende-se que por trazer uma melhor fidelidade a complexidade da obra o modelo disposto da junção entre o modelo em grelha e o de superfície lisa dispões de uma maior rigor quanto a representação geométrica e dos esforços do Panteão logo se mostra como uma melhor representação para o presente trabalho apontando mais coerência que os modelos demais.

BIBLIOGRAFIA:

P.E David Moore; **The Roman Pantheon: The Triumph of Concrete**, ROMANCONCRETE.COM, Aug 2015.

Cassel, Christopher: **Documentary Rome Engineering an Empire**; The history channel, p. September 13, 2005

MACDONALD L, William; **THE PANTHEON, designing, meaning, and The Pantheon from Dr. Khaled Mohamed Dewidar Professor of Architecture and Vice dean for Teaching and Learning**, British University in Egypt Progeny: Harvard University Cambridge, Massachusetts London, Engrand; p, 2002.

SIFUENTES, Jesse; MARCOS AGRIPA , **Word History Encyclopedia**, p 2020

F. Masia , I. Stefanoua , P. Vannuccib; **A STUDY ON THE EFFECTS OF AN EXPLOSION IN THE PANTHEON OF ROME**; Engineering Structures, p 2018

P.E., Moore David: **The Pantheon**; ROMANCONCRETE.COM; p 1995