

Numerical Analysis of the Structural Design of the Museum of Modern Art of Rio de Janeiro - MAM

Leonardo da S. P. Inojosa¹, Márcio Augusto Roma Buzar², Stefano Galimi², Marcos Henrique Ritter de Gragório³

¹*Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasil.*
leinojsa@unb.br

²*Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasil*
marcio.buzar@gmail.com; stefanogalimi.arch@gmail.com

³*Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Centro Universitário de Brasília - CEUB, Brasil*
marcosritter@gmail.com

Abstract. *In 1958 the definitive headquarters of the Museum of Modern Art of Rio de Janeiro - MAM was inaugurated, a project by Affonso Reidy between 1952 and 1953. MAM's building is an architectural and historical landmark for Brazil, its importance is not limited to its function, like any important museum, its relevance goes beyond the limits of simple purpose and becomes an icon of an era, and of Rio de Janeiro. MAM is a symbol of both the evolution of museums in Brazil and the main representative of the "Carioca school" of modern architecture. The whole of the complex is formed by 3 blocks. The School Block, first to be opened in 1953; the Main Body, where is the exhibition gallery, object of study of this work, built in 1967; and finally the Theater, opened at the end of 2006. The area occupied by the Museum is 40 thousand square meters, surrounded by the sea and the gardens of Burle Marx at "Aterro do Flamengo". Affonso Reidy was concerned, throughout the project process, not to influence the landscape of the place, leaving large open spaces on the ground floor and giving the building a lot of transparency. He also made natural use of the chosen materials, such as the concrete of the main block structure, which is structured by 12 reinforced concrete frames and 2 concrete gables at the ends, spaced every 10 m, overcoming spans of 26 m. Pillars that follow a striking architectural form, consistent with the needs of the efforts, form these porches. The objective of the present study is, by means of computational tools such as the SAP 2000 program, to understand the efforts to which the structure is subjected, verifying the constructive and aesthetic justifications of the structural solution and highlighting the importance of the structural system adopted for the architectural result.*

Keywords: *architecture, structural analysis, reinforced concrete, Affonso Reidy.*

1 Introduction

Segundo Fraser [1], na década de 1950, com a criação do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro – MAM, se deu uma mudança definitiva de direção na importância dos museus. O MAM inicialmente ocupava, de forma temporária, o último piso do banco Boavista (do barão de Saavedra, em edifício na Avenida Rio Branco); depois passou a ocupar parte do andar térreo do Edifício do Ministério da Educação, projetado em 1936 pela equipe liderada por Lúcio Costa. Em 1958 foi inaugurada a sede definitiva do museu, projeto de Affonso Reidy entre 1952 e 1953, situado no aterro do Flamengo, ao lado da Enseada da Glória.

2 Arquitetura

O Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro é um marco arquitetônico e histórico para o Brasil. Sua importância não se resume apenas a sua função, como todo importante museu, sua relevância extrapola os limites

da simples finalidade e torna-se um ícone de uma época e do Rio de Janeiro. O MAM é símbolo tanto da evolução dos Museus no Brasil quanto representante principal da escola carioca da arquitetura moderna.

A construção do museu ocorreu, por razões de orçamento, em 3 etapas. O conjunto da obra é formado por 3 blocos. O Bloco Escola, primeiro a ser inaugurado em 1953; o Corpo Principal, onde está a galeria de exposições que Affonso Reidy jamais viu terminado, pois faleceu vítima de câncer em 1964 aos 54 anos, três anos antes da inauguração dessa fase da obra; e por fim o Teatro, recém construído e inaugurado ao final de 2006. Além das etapas de construção, o Museu passou por duas grandes reformas, a primeira delas, em 1978 após um incêndio ter destruído parte de seu acervo, que segundo Serapião [2], foi considerada malsucedida, outra, mais minuciosa foi feita em 1999.

O corpo principal do Museu (Fig. 1) abriga a área de exposição. É um bloco longilíneo, de 130 metros de comprimento e 16 metros de largura, com dois pavimentos e um mezanino. Toda a área de exposição é livre, sem colunas, o que responde a uma necessidade primária do programa, liberdade para montar-se qualquer tipo de exposição, além de contribuir para a transparência do edifício e assim para sua relação com o entorno. O pé direito varia entre 3.60 metros, 6.40 metros e 8 metros no ponto mais alto. Na cobertura, o arquiteto usou cascas curvas, marquises e planos inclinados para distribuir a entrada de luz natural ao longo dos espaços internos.

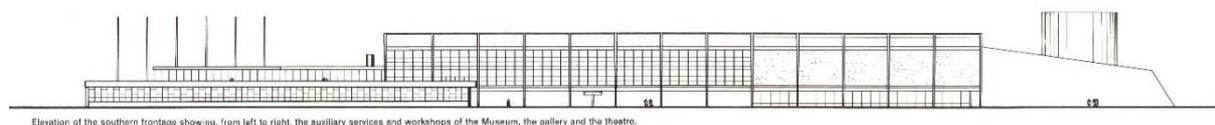


Figura 1. Elevação Sul, a esquerda o bloco-escola, ao centro o corpo principal e a direita o teatro. Fonte: BONDUKI, 2000.

3 Estrutura

A partir de uma pesquisa bibliográfica sobre o projeto, arquitetônico e estrutural, foi possível descrever com precisão a estrutura do do MAM. O levantamento levou em consideração fotos da construção e imagens dos projetos de Affonso Reidy disponíveis no Centro de Documentação e Pesquisa do MAM além de importantes informações de levantamentos realizados por outros autores e pesquisadores, como BONDUKI [3], OBIOL [4], VASCONCELLOS [5] e SEGRE et al [6].

O bloco principal, foco deste estudo de caso é estruturado por 12 pórticos em concreto armado e 2 empenas de concreto nas extremidades com o mesmo formato dos pórticos, espaçados de aproximadamente 10 em 10m, vencendo um vão de 26m entre os apoios [5]. Esses pórticos são formados por pilares que seguem a forma de acordo com a necessidade dos esforços. Seu perfil começa delgado na base e vai aumentando conforme chega na viga superior.

Esses pórticos de concreto armado podem ser descritos como duplos e biarticulados, formados por um quadro maior que possui dois pilares externos inclinados para fora da estrutura e a viga principal de 41 m de comprimento – vão útil de 38,75m, onde se penduram as lajes da cobertura e do segundo pavimento. O quadro menor também possui dois pilares inclinados, dessa vez para dentro da estrutura e sustentam a laje do primeiro pavimento. Os dois quadros têm apoio comum por meio de articulações formadas por placas de chumbo, sobre blocos de concreto armado sustentados por estacas Franki de 23 m de comprimento, segundo MATTÁ, 1959 e CARNEIRO & VALLE, 1959 *apud* OBIOL [4].

Ao tocarem o solo, os pilares do pórtico formam o famoso “V” (Fig. 2) que gerou inveja até mesmo em Le Corbusier, segundo citação atribuída a ele por SERAPIÃO [2]: “Ora veja: eu quis fazer esta coluna, mas não tinha armação desse tipo”. Na parte interna e menor do “V” está apoiada a laje do primeiro piso.

Tendo em vista o empuxo lateral exercidos nas fundações pelos pórticos, tanto a porção externa, que sustenta a viga superior quanto a interna que sustenta a viga do primeiro pavimento os projetistas previram um tirante em cada um dos pórticos, o que permitiu que essas forças fossem absorvidas e que elas não viessem a ser transmitidas para a fundação [4]. Assim, abaixo da linha do solo, os blocos de apoio são ligados transversalmente por esses tirantes de concreto protendido que absorve um empuxo horizontal de 200t.



Figura 2. Museu de Arte Moderna. Detalhe do Pilar em “V”. Fonte: Fotografia: Meindert Versteeg, 2007 em SEGRE, 2007, p. 6.

O contaventamento entre os pórticos é feito por uma viga longitudinal que os conecta no nível do primeiro pavimento. No topo dos pórticos existem marquises de laje dupla, nervurada, com comprimento de aproximadamente 8,00m. Além disso foram acrescentados elementos na cobertura, como lajes inclinadas e lanternins em curva que além de clara função plástica e de controle da entrada de luz natural cumprem também papel estrutural ao contribuírem para o contraventamento.

O segundo piso, ou mezanino, assim como a laje da cobertura são suspensos por meio de tirantes sustentados pelos pórticos, criando assim um ambiente mais transparente e fluido, conforme pregava a arquitetura moderna, misturando o ambiente com a paisagem do entorno, unindo o público com o privado [5]. A Figura 3 mostra o corte transversal do pórtico mostrando suas armaduras, o mezanino e a cobertura pendurados nele pelos tirantes.

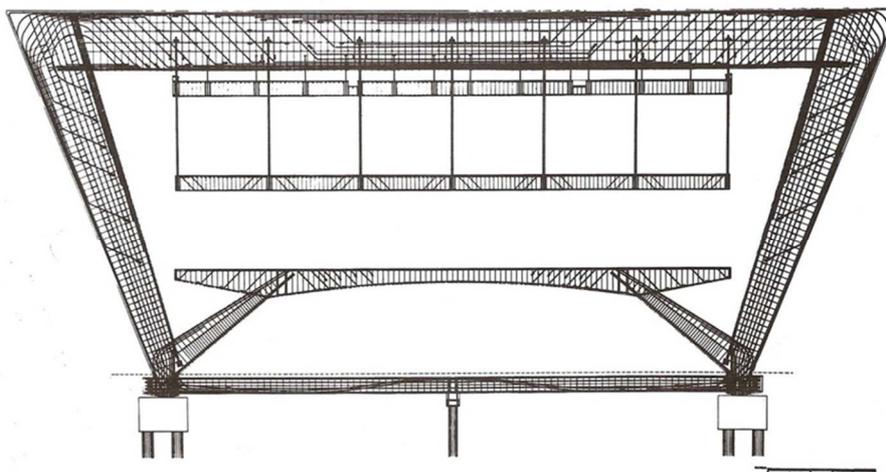


Figura 3. Corte do pórtico, armaduras. Fonte: VASCONCELLOS, 2004 (p.256).

3.1 Análise Estrutural

As dimensões dos elementos foram coletadas da pesquisa bibliográfica, sistematizadas e organizadas. Os dados foram então usados para a modelagem dos elementos estruturais no software SAP-2000, v20 conforme imagens mostradas na Figura 4, na qual foram usados elementos barras (frames) – para os pórticos, vigas e tirantes, placas (area shells) para as lajes de piso e coberturas que foram discretizadas em elementos de até 30cm, resultando em um modelo composto por 1974 *frames*, 103.688 *area shells*, 106.332 *points* e um total de 414.470 *area edges*.

Seguindo as orientações da norma NBR 6120/80, [7] aplicou-se carregamento acidental (LIVE – L) de 500Kgf/m² nas lajes das áreas de exposição e museu e 100Kgf/m² na cobertura, além do peso próprio de todas as peças estruturais (DEAD – D). Para as análises numéricas foram utilizadas as seguintes combinações de cargas: 1,4D + 1,4L – Estado Limite Último (ELU) e 1,0D + 1,0L – Estado Limite de Serviço (ELS).

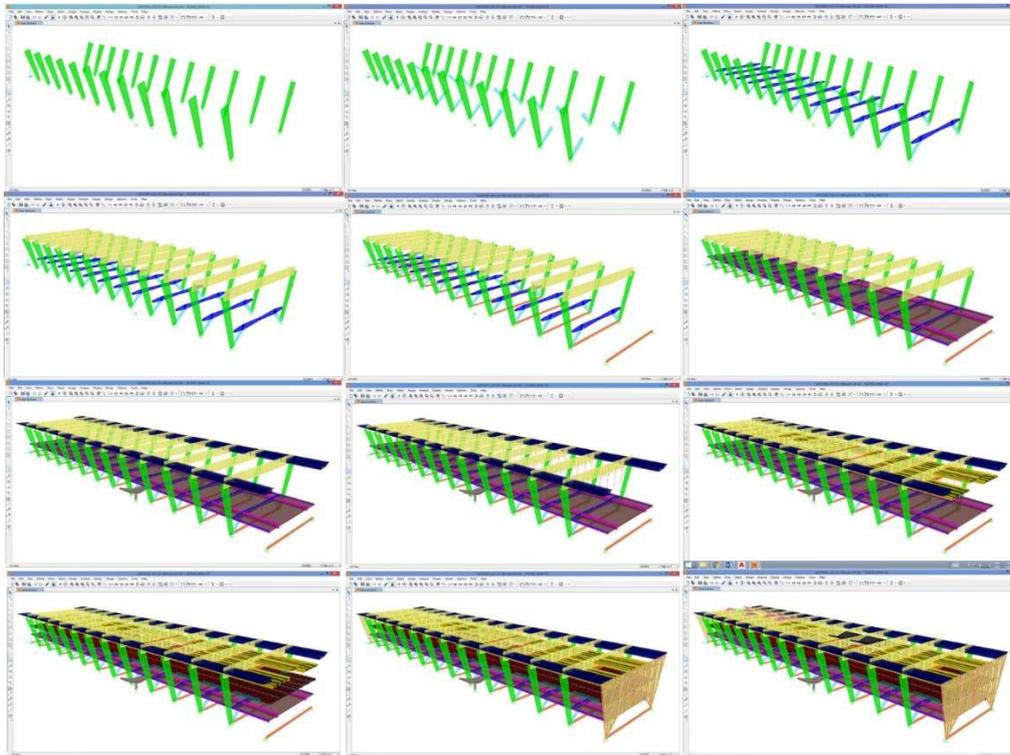


Figura 4. Montagem passo a passo do sistema estrutural do MAM. Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

O diagrama de deslocamentos para o Estado Limite de Serviço do modelo (Fig. 5) mostra que a estrutura completa é rígida, apresentando deslocamentos verticais abaixo dos limites da norma atual. Os deslocamentos máximos nas vigas superiores de alguns pórticos são de -14,1 cm. Já na laje do segundo pavimento o deslocamento é de -5,93cm e próximo ao centro do vão da viga transversal do primeiro pavimento é de -2,8cm.

A Figura 6 mostra o diagrama de esforços normais, onde pode ser notado que as maiores cargas de compressão se concentram nos pilares externos dos pórticos, variando entre -274Tf e -428Tf entre os pórticos. Entre os tirantes que sustentam as lajes do segundo pavimento as maiores cargas de tração somam 60Tf e os tirantes que sustentam a cobertura, sustentam cargas de até 32Tf.

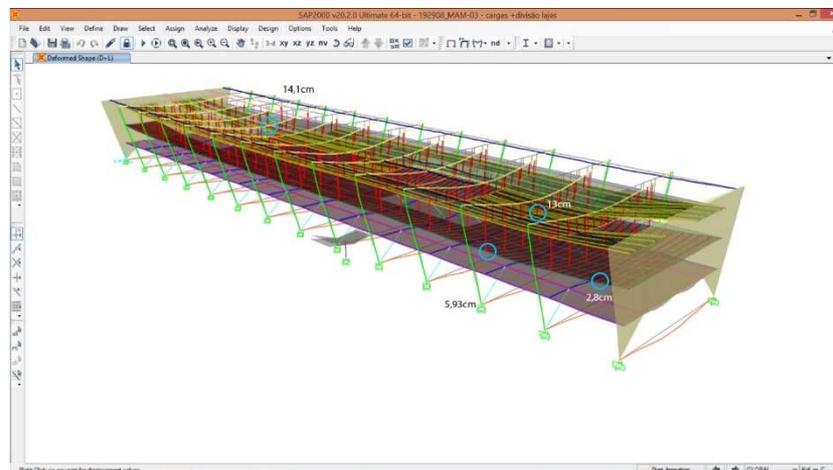


Figura 5. Diagrama de deslocamentos para o MAM. Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

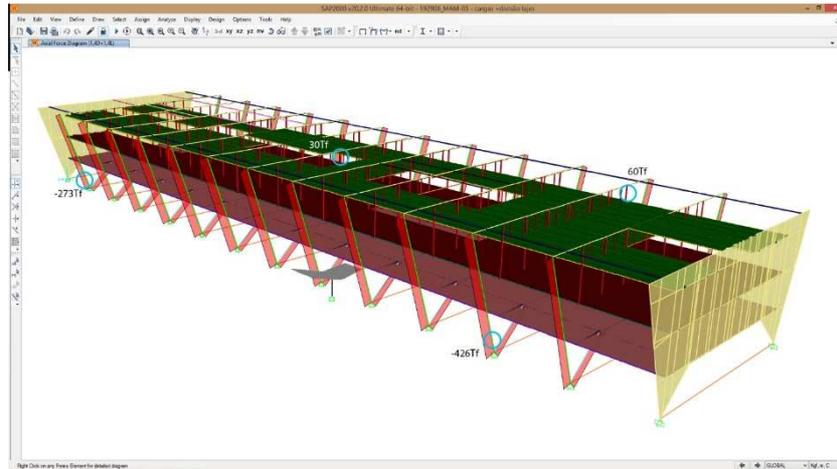


Figura 6. Diagrama de esforços normais para o MAM. Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

Pórticos.

O elemento mais marcante em toda a arquitetura do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro e o mais comentado na obra de Affonso Reidy é a estrutura do pórtico, apoiado nos pilares em “V”, que possibilitaram que o arquiteto alcançasse o resultado arquitetônico desejado na sua forma estrutural mais pura.

A Figura 7 mostra de forma isolada o diagrama de momentos fletores em um dos pórticos. Nesse diagrama podemos notar a concentração de esforços de flexão – momento positivo – nas grandes vigas superiores dos pórticos, atingindo o valor de 19.760,4KN.m (2.015TF.m) no centro do vão. O momento fletor é bem inferior nas vigas do segundo pavimento – 784,53KN.m (80TF.m).

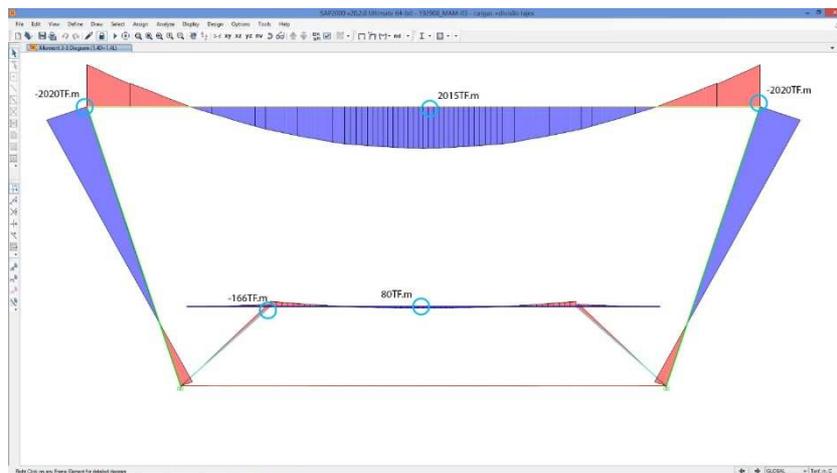


Figura 7. Diagrama de momentos fletores para o pórtico da estrutura do MAM. Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

O levantamento dos elementos que compõe a estrutura do MAM apontou para a presença de tirantes de concreto armado, que não aparecem na estrutura por estarem enterrados, e travam a base dos pórticos.

A Figura 8 mostra uma simulação computacional do modelo estrutural do pórtico, sem a presença do tirante de travamento, nota-se que o momento fletor na viga do primeiro piso é de 2.333,98 KN.m (238 TF.m) nessa condição em relação ao projeto construído, com o tirante, 3,5 vezes maior. O deslocamento também é muito maior nesse trecho, 17,6cm, ao invés de 2,8cm na situação real.

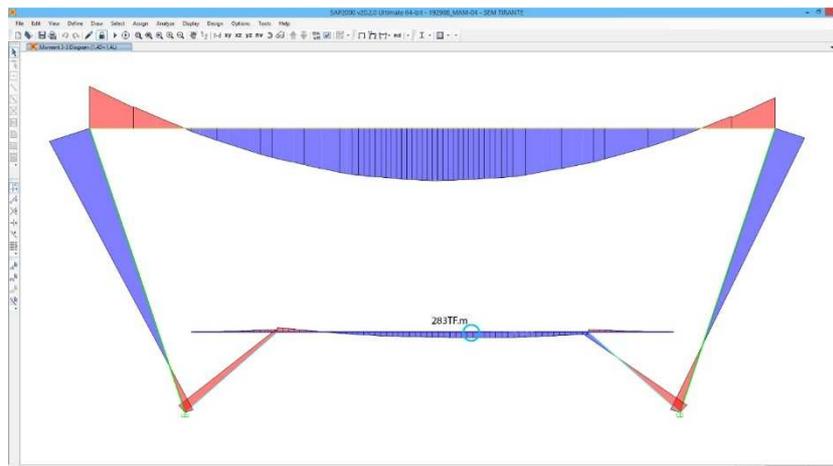


Figura 8. Diagrama de momentos fletores para modelo computacional de simulação dos pórticos do MAM sem os tirantes de travamento da base. Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

Outra característica marcante da estrutura do Museu é a forma dos pilares, em “V”. A princípio essa forma pode parecer meramente estética. Analisemos então, usando o modelo computacional, uma simulação do mesmo pórtico utilizando a forma tradicional de pórtico, apoiando o primeiro pavimento diretamente nos pilares e mantendo suspenso por tirantes a cobertura e o segundo pavimento e as demais características do edifício (Figura 9).

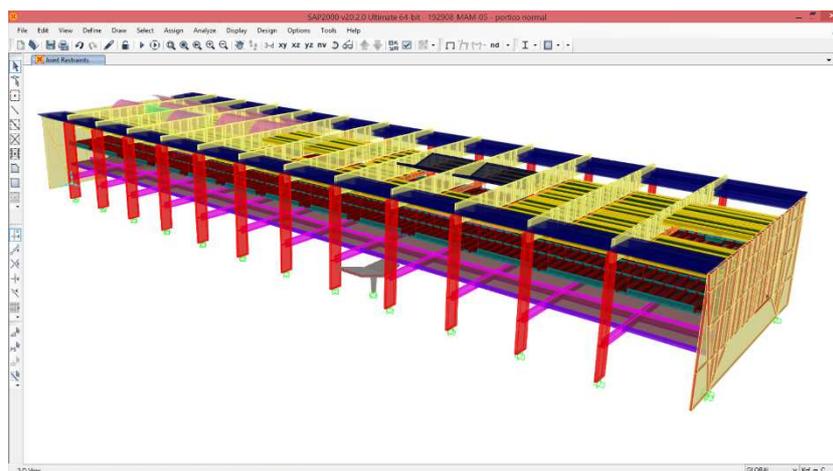


Figura 9. Modelo computacional do sistema estrutural de pórticos simulando uma forma tradicional para a estrutura do MAM. Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

A Figura 10 mostra que um pórtico com uma forma tradicional apresentaria um momento fletor maior na viga do primeiro pavimento — 5.648,63KN.m ou 576TF.m, mais de sete vezes o valor encontrado na mesma viga no modelo conforme construído. Os momentos fletores são maiores também nos outros elementos do pórtico (-25.752,26KN.m, ou -2.626TF.m — nos pilares), exceto na viga superior que apresentou um momento fletor positivo máximo de 15.896,58KN.m (1621TF.m), 80 % do valor no pórtico conforme projetado por Affonso Reidy, mas um valor não equilibrado com o valor do momento negativo.

Assim, podemos concluir que a decisão aparentemente visual de desenhar os pilares dos pórticos em “V” traz consigo a solução estrutural que permitiu uma laje mais fina e leve para o nível de exposições, apoiadas na parte menor do “V”, possibilitando ainda que o mezanino fosse suspenso por tirantes. A viga superior do pórtico, que apresenta maior momento na opção do projeto original, possui uma dimensão maior para suportar esse esforço e ainda suportar a carga do mezanino. Porém, fica claro no desenho arquitetônico que a viga mais alta também contribui para a composição arquitetônica do conjunto.

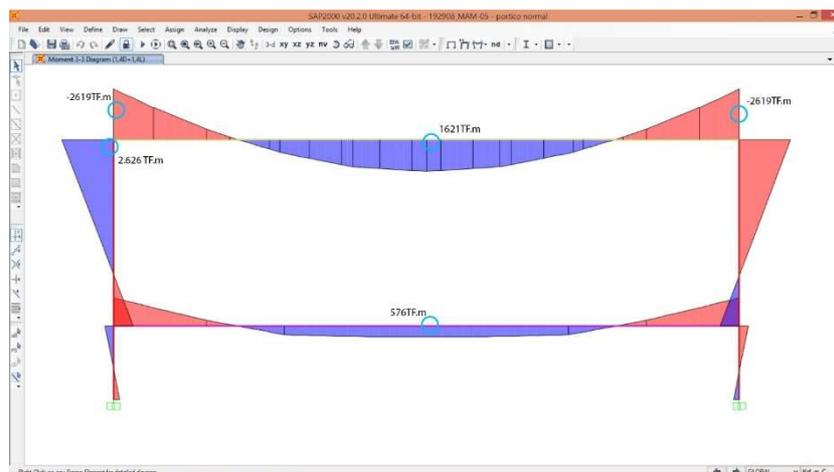


Figura 10. Diagrama de momento fletor para Modelo computacionais do sistema estrutural de pórtico simulando uma forma tradicional para a estrutura do MAM. Fonte: Desenho do Autor, Programa SAP 2000, v 20.

4 Conclusões

Ao analisar o projeto de Affonso Reidy por um ângulo estrutural, podemos explorar a importância dele não só na história e na arquitetura, mas também sua contribuição para a evolução técnica trazida neste momento da arquitetura moderna.

Nesse contexto se destaca a solução construtiva de Affonso Reidy para os pórticos do Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro que, segundo MACIEL (2006): “reduz a seção dos pilares pela utilização da compensação entre momentos fletores na base do ‘V’”.

Ao adotar essa solução, Affonso Reidy que não só marca a arquitetura do museu como promove uma compensação entre momentos fletores que diminuem na laje do primeiro piso, permitindo vigas e lajes menores, vãos maiores e ausência de colunas internas na área de exposição, identificando o compromisso com a estrutura e o equilíbrio entre a forma arquitetônica o sistema estrutural.

Com as simulações computacionais podemos visualizar claramente como a estrutura dos pórticos do Museu de Arte Moderna do Rio e Janeiro contribuiu não só para a estética, funcionando de forma verdadeira e exposta, compondo harmoniosamente a arquitetura do edifício como também contribuiu para o desempenho estrutural da construção, permitindo vigas e lajes mais baixas, vãos maiores e ausência de colunas internas, gerando economia, funcionalidade e beleza a uma obra pública de grande importância social e simbólica para a cidade do Rio de Janeiro.

Authorship statement. The authors hereby confirm that they are the sole liable persons responsible for the authorship of this work, and that all material that has been herein included as part of the present paper is either the property (and authorship) of the authors, or has the permission of the owners to be included here.

References

- [1] FRASER, Valerie. Brasília: a national capital without a national museum, in *The Architecture of the Museum*, Manchester University Press, 2003.
- [2] SERAPIÃO, Fernando. Jogo dos Sete Erros. em: *Revista Piauí*, Ano 2 N. 8, Setembro de 2007. pp. 60- 64.
- [3] BONDUKI, Nabil. Affonso Eduardo Reidy - Arquitetos Brasileiros. Portugal: Ed. Blau/Inst. Lina Bo e P.M. Bardi, 2000..
- [4] OBIOL, Sánchez, Agustí. Una cierta aproximación a la estructura del MAM. Em: "DPA: Documents de Projectes d'Arquitectura", UPC, Catalunya, 2003, núm. 19, p. 58-69.
- [5] VASCONCELLOS, Juliano Caldas. *Concreto Armado Arquitetura Moderna Escola Carioca*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação e pesquisa em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura da Universidade do Rio Grande do Sul. Orientador: Carlos Eduardo Dias Comas. Rio Grande do Sul, 2004.
- [6] SEGRE, Roberto; SERAPIÃO, Fernando; SANTOS, Daniela Ortiz dos; SOUZA, Thiago Leitão de. O resgate da unidade perdida: o Teatro do Museu de Arte Moderna de Affonso Eduardo Reidy. *Anais do 7º. Seminário Do_Co, Mo. Mo_brasil*. Porto Alegre, 22 a 24 de Julho de 2007.
- [7] ABNT – NBR 6120 :1980 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. ABNT, 1980