

## **Análise por Elementos Finitos de Elementos de Concreto Armado aplicado a Edificações Prisionais**

**Evandro Medeiros Braz<sup>1</sup>, Joatan Rosa<sup>2</sup>, Tiago Alexandre Kolling<sup>3</sup>**

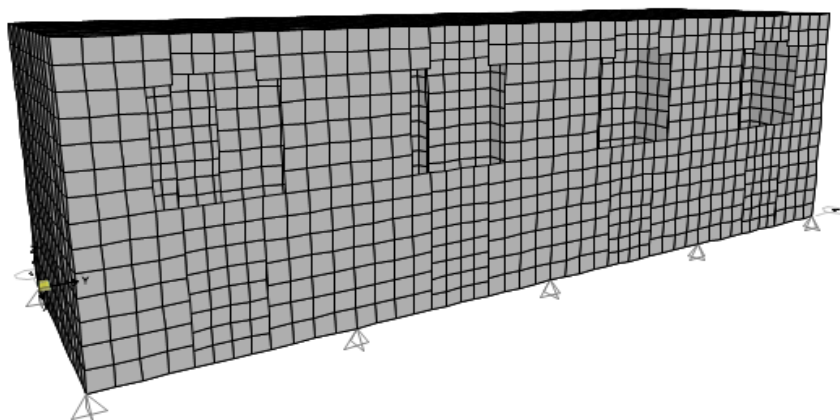
<sup>1</sup> Calter do Brasil Engenharia Limitada / [evandro@calterdobrasil.com.br](mailto:evandro@calterdobrasil.com.br)

<sup>2</sup> Calter do Brasil Engenharia Limitada / [joatan@calterdobrasil.com.br](mailto:joatan@calterdobrasil.com.br)

<sup>3</sup> Calter do Brasil Engenharia Limitada / [tiago@calterdobrasil.com.br](mailto:tiago@calterdobrasil.com.br)

### **Resumo**

No campo de atuação da engenharia estrutural, os elementos em concreto armado têm sido amplamente estudados no âmbito acadêmico e profissional. Com o advento dos computadores e consequentemente da resolução numérica, foi possível tornar os modelos de cálculo mais sofisticados. Para resolução numérica de estruturas o Método dos Elementos Finitos tem se consagrado dentre as principais ferramentas comerciais no mercado. O Dimensionamento estrutural de uma edificação prisional ainda é desconhecido por muitos engenheiros calculistas e apresenta particularidades não comuns se comparada a edificações para uso residencial. Dentre estas particularidades destacam-se a inexistência de cantos vivos em pilares ou vigas, pois podem criar oportunidades de fuga através do movimento de escalar. O presente estudo propõe apresentar a comparação de dois modelos estruturais, o primeiro modelo irá utilizar a ferramenta computacional SAP2000 enquanto o segundo modelo de cálculo irá utilizar o software comercial Eberick. O SAP2000 utiliza elementos finitos quadriláteros e triangulares para discretização de elementos planos enquanto que, o Eberick realiza analogia de grelha para resolução destes elementos. Os resultados serão comparados também ao atendimento dos critérios prescritos pela NBR6118/2014. Os resultados apresentados demonstram a limitação da utilização de elementos reticulados para a representação de estruturas delgadas como o caso do módulo prisional, principalmente quanto aos momentos de borda no encontro das paredes e lajes assim como nas aberturas. Espera-se que este trabalho contribua para disseminação do uso do MEF como soluções de projeto assim como auxilie outros profissionais na construção de modelos numéricos, conhecendo-se a limitação de utilização de cada modelo de cálculo empregado.



**Figura 1 – Modelagem numérica das celas da Edificação Prisional**

### **Palavras-chave**

Estrutura; Elementos Finitos; Concreto Armado; Aço.



## 1. Introdução

Os projetos estruturais de concreto armado, com o auxílio de softwares comerciais, permitiram aprimorar a análise e verificação destas estruturas, sendo possível considerar um número maior de carregamentos e com isso aumentar as envoltórias de análise em curto espaço de tempo. Mas não basta apenas lançar a estrutura e deixar o programa fazer o resto, é necessário fazer toda uma verificação criteriosa se as premissas adotadas no modelo numérico irão refletir o comportamento real destas estruturas. De acordo com Fusco e Onishi (2017) a consideração da estrutura como um todo é, em geral, trabalho de excessiva complexidade na determinação dos esforços internos atuantes, pelo fato das construções serem formadas por múltiplas partes resistentes. Deste modo, há sempre a necessidade de uma análise minuciosa de um engenheiro para assim encontrar as melhores soluções para cada estrutura.

Diante disso, uma estrutura prisional como a apresentada neste artigo (figura 01), exige um cuidado adicional quanto às condições de contorno que muitas vezes não se fazem necessárias em estruturas reticuladas convencionais. Principalmente quanto a sua utilização, pois são dimensionadas para evitar a fuga dos seus ocupantes, enquanto que uma edificação convencional é dimensionada para se ter o livre acesso de pessoas. Um presídio é um local totalmente diferente, além de não encontrar muitas especificações em normas brasileiras e ter peculiaridades em determinados pontos, é um local que deve ser dimensionado não só em virtude da função estrutural, mas também com enfoque na questão prisional.

## 2. Concepção estrutural

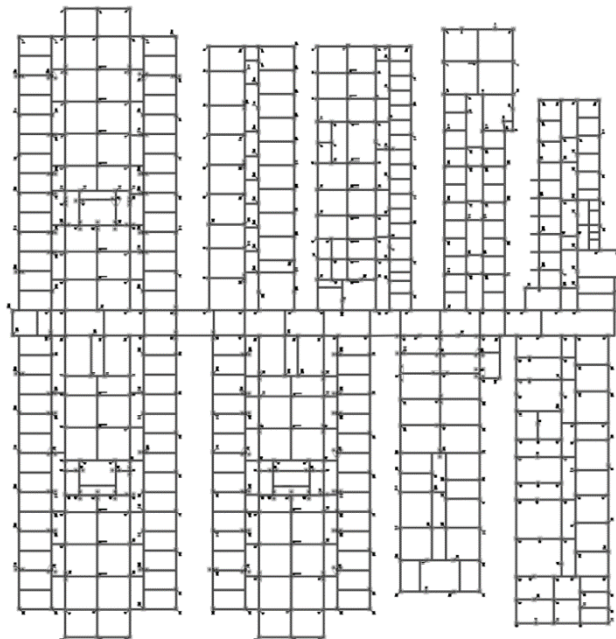
De acordo com Carvalho e Figueira Filho (2017), a solução estrutural deve considerar as condições arquitetônicas, funcionais, construtivas e de integridade com os demais projetos. Deste modo, para realizar a concepção estrutural no projeto apresentado neste artigo, foi necessário analisar todo o projeto arquitetônico, e também dos demais projetos complementares, a fim de verificar cargas extras atuante na estrutura, restrições de dimensão de pilares, vigas e demais fatores que restringem o projeto estrutural.

Como se trata de um complexo penitenciário, as restrições com o estrutural se tornam um pouco maiores, pois além dos requisitos que devemos seguir da NBR 6118:2014, há também as restrições impostas pelos contratantes. Essas exigências não são decorrentes da norma, são estabelecidas pela vivência de pessoas que trabalharam por anos dentro de presídios, por isso, sabem quais são as necessidades e alterações que podem tornar a estrutura funcional e segura, para aquele determinado objetivo.

Além da compatibilização com os demais projetos, o projeto estrutural deve ser dimensionado para uma determinada vida útil, apresentando segurança e durabilidade. Segundo Araújo (2014) a consideração da durabilidade das estruturas de concreto é um dos aspectos de maior relevância, dentro da filosofia das modernas normas de projeto. Pois, deve se levar em conta as forças do vento, as cargas atuantes de cada ambiente, a classe de agressividade ambiental, tipo do solo de acordo com a sondagem realizada, cargas de reservatórios elevados e demais características. A figura número 02 apresenta a planta baixa do térreo do complexo penitenciário.



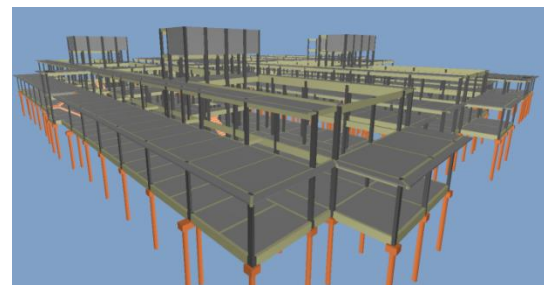
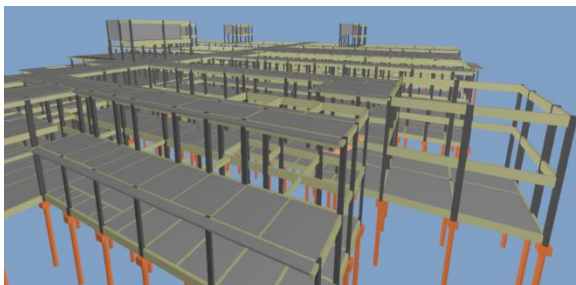
XII CONGRESSO BRASILEIRO  
de PONTES e ESTRUTURAS  
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual



**Figura 2 – Planta baixa das vigas baldrame do complexo penitenciário**

### 3. Dimensionamento estrutural

Este artigo adotou dois softwares comerciais para o cálculo estrutural. O primeiro modelo utilizou a ferramenta Eberick, utilizando modelos de barras para pilares e vigas e analogia de grelha para as lajes. As paredes foram modeladas como carregamentos inseridos sobre as vigas e foi desconsiderado sua colaboração no modelo de cálculo. O segundo modelo foi desenvolvido com a ferramenta SAP2000, que utiliza elementos finitos de barra para os pilares e vigas e elementos de placa para representação das lajes e paredes. A figura 3 abaixo, apresenta a modelagem 3D do Complexo penitenciário dimensionado com uma área aproximada de 10 mil metros quadrados.



**Figura 3 – Representação 3D do complexo penitenciário utilizando o software Eberick**

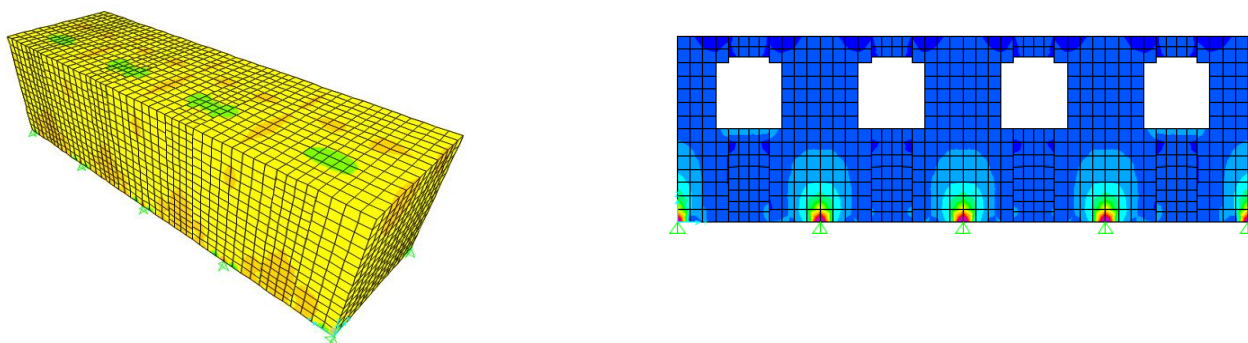
No primeiro modelo, uma das grandes dificuldades desse dimensionamento, foi enquadrar as exigências dos contratantes à respeito da dimensão de pilares e vigas, afinal, devido a estrutura se localizar em área marítima a NBR 6118:2014, exige que considere a classe de agressividade forte, ou seja, o cobrimento se torna maior nas peças estruturais, com isso, dificulta reduzir a dimensão das mesmas, acarretando em uma taxa de aço elevada e em muitos casos o dimensionamento ultrapassava a esbelteza limite, ocasionando em

erro do dimensionamento e assim tendo que reajustar o modelo estrutural de uma forma que atendessem os requisitos mínimos.

Outro fator, foi a existência de vários reservatórios elevados além do reservatório externo. Esses reservatórios foram solicitados em consideração ao consumo de água de um complexo penitenciário, pois onde em prédios residenciais a quantidade é de 200 litros por pessoa ao dia, neste projeto foi considerado o dobro, além de já ter que prever uma super lotação do complexo, prevendo assim uma quantidade maior de água além do estabelecido por norma.

Com isso, nos locais onde foram determinados os reservatórios, teve que ser feito um cálculo mais criterioso. Foram colocados mais pilares do que o comum, pelo motivo da espessura dos mesmos ser muito fina e criar um número maior de ligações entre pilares e vigas, para assim, minimizar o deslocamento horizontal.

Segundo AZEVEDO, (2003), o método dos elementos finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores. No segundo modelo especificamente, embora não tenhamos utilizado elementos sólidos e sim de casca, é possível obter a distribuição de tensões e esforços axiais, cisalhantes e de flexão incidentes na estrutura representada. A figura número 4 apresenta a representação numérica finalizada das celas.



**Figura 4 – Modelagem numérica das celas da Edificação Prisional**

Nesta análise de elementos finitos realizada com uso do SAP2000, foram feitas várias simulações de carregamentos no modelo estrutural das celas. Quanto a geometria, estas paredes tiveram restrição de espessura, limitada em 12 centímetros, não podendo haver nenhum requadro de pilar ou viga, requisito este determinado pela contratante. A mesma justificou que, não era por questões de economia a redução da espessura das paredes e a inexistência de pilares e vigas, era uma questão de segurança em caso de brigas entre presos, afinal há relatos que ocorreram graves ferimentos em requadros nos cantos de celas. Com isso, deveria ser colocada apenas uma armadura central, pois a norma permite armadura dupla em paredes de concreto armado com espessura igual ou superior a 15 centímetros.

Esta armadura central teve repercussões com o projeto hidráulico, onde no dimensionamento para os vasos sanitários das celas foi determinado canos de 40 mm. Essa dimensão de cano não teria como ser colocado na parede de forma convencional, pois o cobrimento nominal das paredes seria menor que o mínimo determinado pela NBR 6118:2014. Diante disso, após os cálculos estruturais finalizados, foi optado por esses canos passarem no canto das paredes, local onde de acordo com o detalhamento estrutural teria um cobrimento necessário respeitando os requisitos da norma.

Nas paredes de concreto armado, além de considerar as cargas de projeto e norma, foi considerado ainda a inclusão de beliches de concreto armado em todas as paredes. Ocasionalmente assim, em uma armadura complementar nas paredes.



#### 4. Análise dos resultados obtidos

Segundo Sáles et al. (2015) é necessário antes de finalizar todos os cálculos fazer a verificação dos estados limites últimos, pois são aqueles relacionados com o esgotamento da capacidade portante da estrutura e analisar também os estados limites de serviço, que estes por sua vez, são relacionados à interrupção do uso normal, aos danos e à deterioração da estrutura. Deste modo, após finalizar todos os cálculos estruturais, foi realizada a verificação do ELS e ELU e ainda foi realizada uma análise dos resultados para ver a compatibilidade entre os mesmos e os estabelecidos pelos contratantes do serviço.

Em relação aos resultados dos pilares, onde a estrutura apresentava apenas um pavimento, a dimensão dos pilares ficou com 14x26 cm, largura exigida pelos contratantes devido a largura dos blocos de vedação serem de 14 cm, porém, apresentaram uma taxa de aço elevada em comparação aos pilares com dimensões maiores.

Na parte do complexo onde a estrutura apresenta 2 pavimentos ou mais, os pilares não atenderam as exigências da norma, com largura de 14 cm, apresentando sempre esbelteza maior que a norma permite. Com isso, foram feitas várias análises em relação a quantidade de pilares, dimensão, tipo de vinculação entre pilares e vigas, chegando assim a um resultado final com pilares de largura máxima de 17cm. Porém, todos os pilares tiveram uma variação de dimensões na viga baldrame, devido aos pilares de fundação se encontrarem em contato com o solo, onde há necessidade de um cobrimento maior, fator este, que foi solucionado depois de várias tentativas de dimensionamento, pois com as várias simulações pode se chegar em um bom resultado levando em consideração o consumo de aço.

Sobre as vigas, foi um dimensionamento menos complicado que os pilares, pois devido aos pilares se encontrarem a uma distância sempre inferior a 5 metros e o pé direito de cada pavimento ter 3,5 metros, conseguiu-se estabelecer vigas de acordo com as dimensões dos pilares sem danificar a integridade do projeto arquitetônico.

Em relação as lajes, foi solicitado que, onde há acesso de presos, as lajes deveriam ser de concreto armado com ferro de 8 milímetros e espaçamento de 20 centímetros nas duas direções, para assim evitar possíveis fugas. No dimensionamento, de acordo com a norma NBR 6118:2014, haveria opções de lajes mais econômicas do que as maciças, devido ao pequeno vão entre vigas, todavia, por solicitação, todas as lajes onde os presos têm acesso, foram dimensionadas considerando lajes maciças e apresentaram armadura mínima, porém foi necessário reajustar adequando-as as exigências do complexo penitenciário, o que causou um consumo de aço além do necessário.

Já nas paredes de concreto armado, foram feitas várias interações de cálculo no SAP2000, onde o cálculo se tornou mais complexo devido a esbelteza apresentada, pelo fato das paredes apresentarem espessura de 12 cm. Nos resultados encontrados, foram apresentadas duas soluções estruturais, sendo a primeira parede de concreto armado de 12 cm com ferro de 6,3 milímetros a cada 10 centímetros nas duas direções e ainda com pilares de 14x26 cm em seus cantos, com seu requadro para fora da cela e vigas de 12 cm de largura.



Na segunda opção, paredes de 12 cm com ferro de 8,0 milímetros a cada 10 centímetros na horizontal e vertical, considerando reforços em todos os cantos de celas, com ferro de 8,0 milímetros a cada 10 centímetros nas duas direções.

Por exigência da contratante, a armadura mínima utilizada deveria ser de 8,0 milímetros a cada 20 centímetros nas duas direções, sem haver pilares nos cantos das celas. Deste modo, a segunda opção foi a escolhida por eles, mesmo apresentando um consumo mais elevado de aço, mas era esta que se enquadrava melhor nas exigências pré-estabelecidas.

## Conclusões

Este trabalho não utilizou para análise uma versão completa do software Eberick, que realiza o dimensionamento de elementos delgados e portanto, as conclusões estão embasadas na versão do software empregado.

No dimensionamento estrutural, sempre buscamos escolher a melhor solução para tornar a estrutura segura, funcional e econômica de acordo com as normas e exigências dos clientes, sendo que em muitas vezes, necessitamos fazer alterações para adequar o modelo estrutural dentro das normas da ABNT, buscando alternativas e soluções, para assim, chegar ao final, com a melhor solução atendendo aos critérios estabelecidos.

Os resultados demonstram a necessidade de complementação de detalhamento das armaduras de ligação entre os elementos delgados, principalmente nos encontros de paredes e lajes, de piso e cobertura. Com o uso de ferramentas de edificação que não contam com módulos para partes portantes (era o caso da versão utilizada), este complemento deve ser realizado de forma adicional ao detalhamento fornecido pela ferramenta comercial.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seus sinceros agradecimentos à empresa Calter do Brasil pelo fornecimento dos programas computacionais necessários ao desenvolvimento desse trabalho.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ARAUJO, Jose Milton de. **Curso de concreto Armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos Elementos Finitos**. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto de Portugal, 2003.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIRA FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2014. São Paulo: Edufscar, 2017.



XII CONGRESSO BRASILEIRO  
de PONTES e ESTRUTURAS  
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

FUSCO, Pericles Brasiliense; ONISHI, Minoru. **Introdução à engenharia de estruturas de concreto.** São Paulo: Cengage, 2017.

SÁLES, José Jairo de *et al.* **Segurança nas estruturas.** 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2015.