Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

VANTAGENS DO USO DE RECURSOS COMPUTACIONAIS NA ANÁLISE DAS ESTRUTURAS E A IMPORTÂNCIA DO ENGENHEIRO NA DISPOSIÇÃO DE MODELOS ANALÍTICO SIMPLIFICADOS

ADVANTAGES OF THE USE OF COMPUTATIONAL RESOURCES IN THE ANALYSIS OF THE STRUCTURES AND THE IMPORTANCE OF THE ENGINEER IN THE SIMPLIFIED ANALYTICAL MODELS LAYOUT

VENTAJAS DEL USO DE RECURSOS COMPUTACIONALES EN EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS Y LA IMPORTANCIA DEL INGENIERO EN LA DISPOSICIÓN DE MODELOS ANALÍTICOS SIMPLIFICADOS

João Pereira de Souza Filho[1]
Prof. Dr. Thiago Bomjardim Porto[2]
Prof. Msc. Danilo Bento Oliveira[3]

Resumo: O objetivo deste trabalho é fazer um comparativo entre os esforços de lajes, vigas e pilares obtidos analiticamente de um estudo de caso hipotético de um edifício de pequeno porte com quatro lajes, seis vigas e nove pilares, com os resultados obtidos em um software comercial utilizando-se o método dos elementos finitos. Os resultados obtidos foram satisfatórios, com erros relativos inferiores a 35 %. Além dos resultados analíticos obtidos, está pesquisa alerta para a importância das conferências manuais para validação dos modelos numéricos computacionais.
Palavras-chave: Analise numérica. Método dos Elementos Finitos. Estrutura.

Abstract: The objective of this work is to compare the efforts of slabs, beams and pillars obtained analytically from a hypothetical case study of a small building with four slabs, six beams and nine pillars, with the results obtained in commercial software using finite element method. The results were satisfactory, with relative errors less than 35%. Besides the analytical results obtained, this research is alert to the importance of the manual conferences for the validations of numerical computational models.
Keywords: Numerical Analysis. Finite Element Methods (FEM). Structures.

Resumen: El objetivo de este trabajo es hacer un comparativo entre los esfuerzos de losas, vigas y pilares obtenidos analíticamente de un estudio de caso hipotético de un edificio de pequeño porte con cuatro losas, seis vigas y nueve pilares, con los resultados obtenidos en un software comercial utilizando el método de los elementos finitos. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, con errores relativos inferiores al 35%. Además de los resultados analíticos obtenidos, está investigando la importancia de las conferencias manuales para la validación de los modelos numéricos computacionales.
Palabras clave: Análisis numérico. Método de los elementos finitos. Estrutura.

Envio 13/06/2018 **Aceite 30/12/2018**

[1] Especialista em Engenharia de Estruturas. UNIPAC – T.O. Joaobatera90@hotmail.com
[2] Doutor em Engenharia Geotécnica. Professor Adjunto IV. PUC-MG. porto260285@yahoo.com.br
[3] Mestre em Engenharia Estruturas. Professor UNIPAC/ UFVJM dboliveira00@ufmg.br

Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

Introdução

Segundo Pedrosa (2010) é grande a importância de se introduzir novos mecanismos didático-pedagógicos, com o intuito de possibilitar aos alunos maior compreensão no ensino das estruturas de concreto. Além do desenvolvimento dos conteúdos programados, deveria ser oferecido ao estudante, o contato com softwares de conteúdo pedagógico no auxílio das matérias de concreto armado, assim, possivelmente haveria um maior aproveitamento por parte dos alunos.

No entanto, deve-se ter mente que a introdução de novos mecanismos de ensino, não é o mesmo que deixar de lado os bons e velhos métodos de ensino de estruturas de concreto armado. Apenas cabe salientar o quanto os alunos durante a graduação, se deparam com algumas dificuldades, que com a interação do ensino tradicional com um software educacional, poderiam ser diminuídas, senão eliminadas.

A questão a que se pretende o presente trabalho consiste em destacar a importância dos meios computacionais hoje, tanto para subsídio pedagógico, quanto como ferramenta de implementação nos projetos estruturais, destacando a necessidade do engenheiro em todo este processo. Há de se ressaltar o salto tecnológico obtido* nas últimas décadas, para isso, basta imaginar como eram realizados os cálculos estruturais, em geral, em computadores de grande porte, e, ao mesmo tempo, de baixa capacidade de processamento.

O projeto estrutural exige do engenheiro grande conhecimento no que tange a concepção estrutural, ações solicitantes, combinações de carga, análise estrutural e o dimensionamento dos elementos, além do conhecimento específico do tipo de estrutura a qual pretende-se analisar. Especificamente, para o concreto armado, o engenheiro deve-se atentar imprescindivelmente ao domínio de conteúdos como por exemplo: flexão normal simples, cisalhamento, fissuração, verificação da aderência, dentre outros.

Baseando-se nisto, observa-se a importância do desenvolvimento sensitivo da parte do calculista em estruturas, chegando à afirmativa de que de nada adianta uma ótima ferramenta de trabalho, se o usuário não é devidamente capacitado para explora-la

Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

em toda a sua potencialidade. Diante disso, fica nítido que a função do computador, é de aprimorar e contribuir no conteúdo da engenharia de estruturas, e cabe ao profissional atentar-se à importância dos conhecimentos fundamentais, no entanto, percebe-se que existe um perigoso extremo, daqueles profissionais que acreditam depender exclusivamente das soluções "computacionais."

Justificativa

É desafiante nos dias atuais separar a ideia de ganho de tempo nas resoluções dos projetos estruturais sem o auxílio de uma ferramenta computacional. Basta lembrar-se daquelas numerosas formulações, extensos cálculos, ábacos utilizados décadas atrás. Entre as grandes vantagens associadas ao uso de softwares específicos, destaca-se, a grande vantagem na verificação da estrutura num todo, ou seja, inseridos sobre a estrutura todas as ações existentes, verifica-se a capacidade de reação da estrutura perante estes carregamentos.

Assim, para Kimura (2007) é bem difícil, ou impossível querer imaginar projetos estruturais de grande complexidade, sem o auxílio do computador, porém, deve-se frisar que apesar das vantagens do uso dos softwares, não se tornam dispensáveis as várias etapas as quais dependem inteiramente da capacidade e sensibilidade do engenheiro de compreender o comportamento das estruturas.

Para a realização de um cálculo estrutural, é preciso dentre tantos pontos importantes, se atentar para as etapas nas quais deverão ser observados os tipos de carregamentos derivados da finalidade da estrutura, além das análises necessárias para os limites de norma estabelecidos. É tão fundamental discutir este assunto, que leva a um raciocínio bem simples, que apesar de disponível hoje no mercado poderosos softwares de análise ou dimensionamento, os mesmos, jamais poderão prever por exemplo, posições com dimensões automáticas, ou sequer dizer que outras mudanças nas seções ou posições dos elementos estruturais, minimizariam possíveis deslocamentos. Assim, é pertinente, e exclusivo ao engenheiro conhecer: os tipos de carregamentos, escolha da forma mais econômica na modulação dos elementos no

Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

projeto, além do cálculo dos esforços de modo a simular o comportamento real da estrutura.

Objetivo

O principal objetivo do presente trabalho consiste em avaliar e apontar as grandes vantagens do uso de ferramentas computacionais na análise e dimensionamento de estruturas, destacando principalmente, o dever do engenheiro de estruturas em fazer o uso consciente dos softwares.

No decorrer do estudo procurou-se trazer os principais aspectos levados nos cálculos, e por fim, comparar os resultados obtido de um cálculo de uma forma analítica simplificado com o mesmo projeto obtido através de um software (SAP 2000) adotado na análise do projeto.

Fundamentos do cálculo estrutural

Como calcular uma edificação? Por onde começar? Quais cuidados tomar? Quais normas são pertinentes a um projeto de concreto armado? Quais estados limites deve-se preocupar? Tantas perguntas, que já foram alvos de todos aqueles que se propuseram a calcular.

È de grande importância, seja para o cálculo simplificado, ou para aquele desenvolvido através de um software específico, conhecer os aspectos de ruínas aos quais estão sujeitas as estruturas. Assim como qualquer tipo de elemento estrutural, o concreto, possui um limite natural devido as suas propriedades, ou seja, possui uma grande resistência às forças de compressão, e baixa resistência a forças de tração. Portanto, ao compor a junção do concreto com o aço, observou-se a compensação de sua limitação, formando se então o “concreto armado”.

Uma das grandes preocupações que devem ser levadas no dimensionamento das estruturas, é sem dúvida os “Estados Limites”. Ao serem estipuladas as cargas as quais irão incidir sobre a estrutura, devem ser previstas os excessos de cargas, aquelas originadas pela mudança do uso, no qual inicialmente fora estimada. Com isso, é

Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

importante que o engenheiro tenha o cuidado tanto para os efeitos de uma ampliação de carga como também, menor resistência. Portanto, ao se dizer estados limites, significa referir àquelas condições, em que uma estrutura pode deixar de funcionar conforme a sua função inicialmente estabelecida, ou o mesmo que dizer chegar a "ruína" estrutural.

Os principais Estados Limites são: o Estado Limite Último (ELU) e o Estado Limite de Serviço (ELS). De modo bem simplificador, pode-se dizer que quando se refere ao ELU, associa-se aos aspectos referentes à segurança estrutural, já o ELS, são aqueles ligados ao desempenho e utilização da edificação. O ELU seria por exemplo, um conjunto de vigas mal dimensionadas, que num futuro poderia levar a um colapso da estrutura. Em função disso, existem os coeficientes de segurança, para dar suporte ao engenheiro, evitando a situação indesejada de ruína estrutural. Já as situações ligadas ao ELS, são de fácil percepção, basta lembrar de quantas passarelas existentes em que há grandes vibrações. Outro exemplo, são as muitas trincas e fissuras vistas em alguns prédios.

Ações e Carregamentos na Estrutura

No estudo de caso apresentado neste trabalho, faz-se necessário conhecer os tipos de ações que influenciaram sobre a segurança da estrutura. Assim, conforme a NBR 6118 (2014), as principais cargas em geral são: cargas permanentes e as cargas variáveis. Quando se refere às permanentes tem-se a ideia de cargas que duraram por toda a vida da estrutura. Como por exemplo: peso próprio dos elementos, empuxos permanentes, deslocamento de apoio, fluência do concreto, etc. Já as cargas varáveis, são aquelas ligadas cargas acidentais de uso, como por exemplo vibrações.

Coeficientes

As normas estipulam valores para ponderações das ações, mas qual a razão para tais valores? É possível observar em estruturas de concreto, um valor característico de uma ação atuante, multiplicando-a por 1.4, mas por que necessariamente este valor? Para obter este valor resultante, foram adotados três fatores como: a possibilidade da

Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

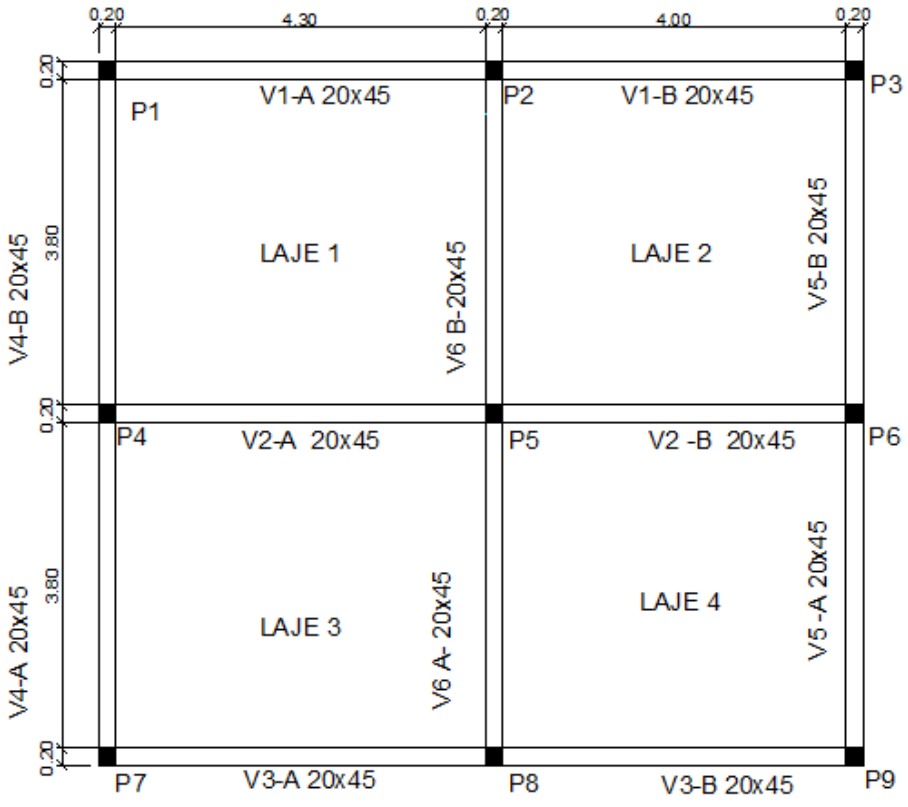
variação das ações, simultaneidade das mesmas, além das considerações de aproximações de projeto. Assim, conforme a NBR 6118 (2014), traz no item 11.7, os valores tabelados para cada tipo de ação.

Materiais de Métodos

Apresentação do Projeto

Nessa etapa, será calculado o projeto de duas maneiras: uma de forma analítica simplificada, e outra através do programa de análise estrutural, SAP 2000. É importante atentar as especificidades do projeto, pois procurou-se trazer uma arquitetura simples, sendo constituído de quatro lajes maciças, seis vigas e nove pilares, cada um contendo suas respectivas seções.

Figura 1: Planta de forma do projeto



.

Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

Dados do Projeto

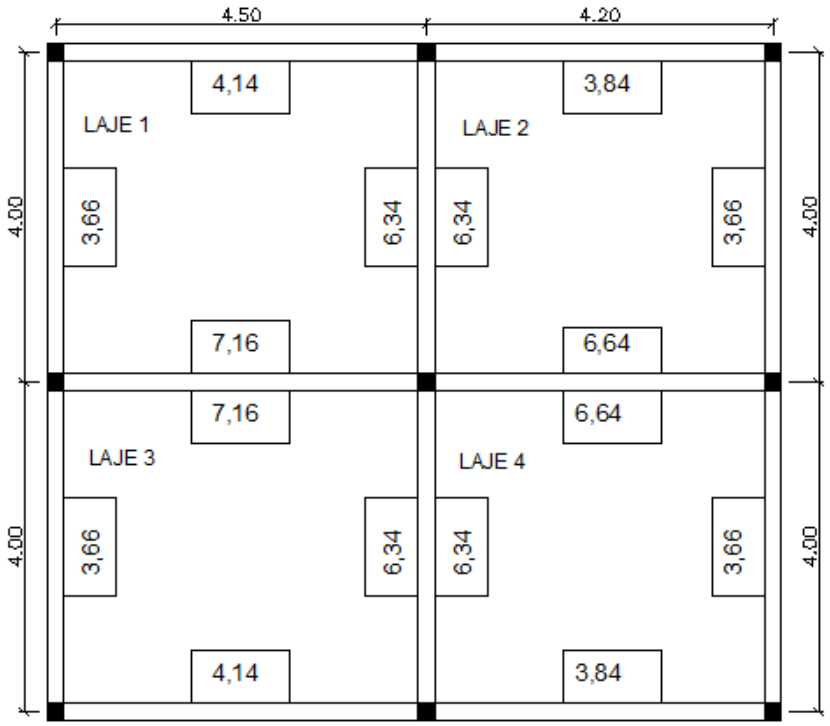
Para o projeto foram feitas as seguintes considerações:

- Resistência do concreto para os elementos estruturais $fck = 25\ MPa$
- Peso próprio do concreto: $25{,}00\ kn/m^3$
- Carga acidental para sala, conzinha e banheiro: $1{,}50\ kn/m^2$

Para a estimativa das cargas atuantes nas lajes foram consideradas conforme a NBR 6120, as seguintes cargas:

- Peso próprio = 2,50 kn/m²
- Revestimento = 1,00 Kn/m²
- Sobrecarga = 1,50 Kn/m²
- Somatório de cargas = 5,00 kn/m²

Figura 2: Representação das reações das lajes (kn).



Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

Figura 3: Representação dos momentos atuantes (kn.m).

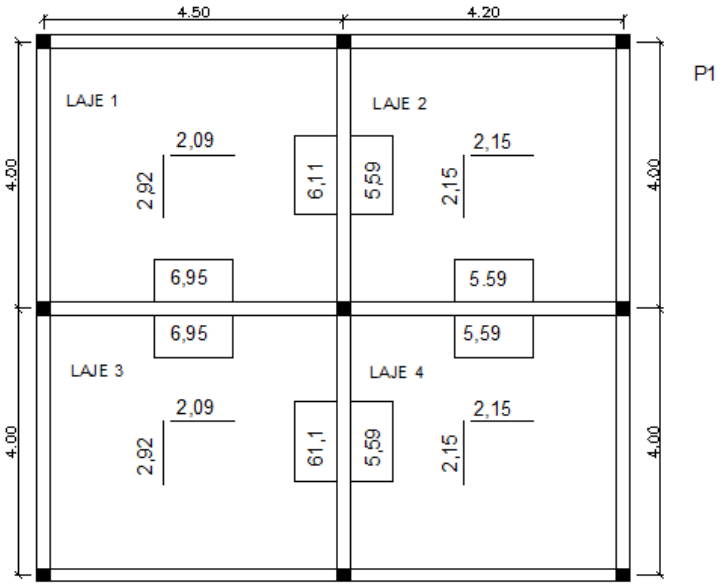
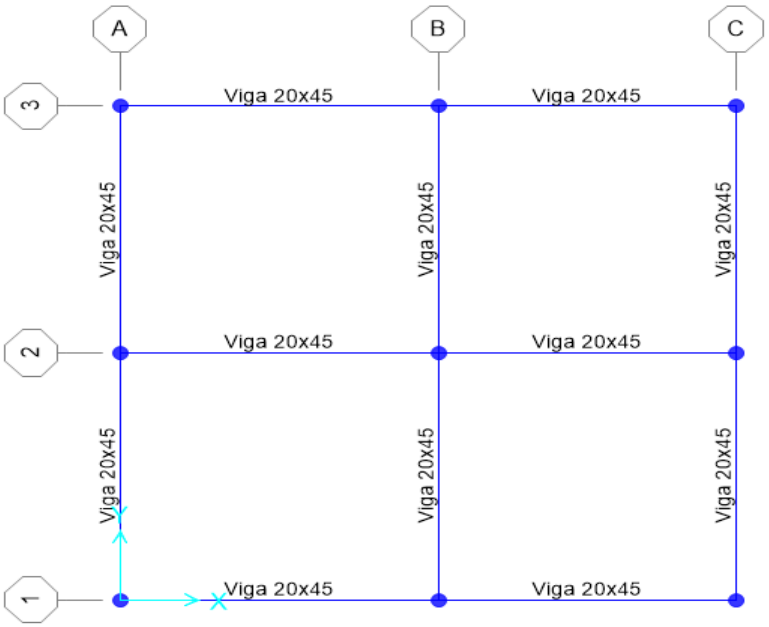


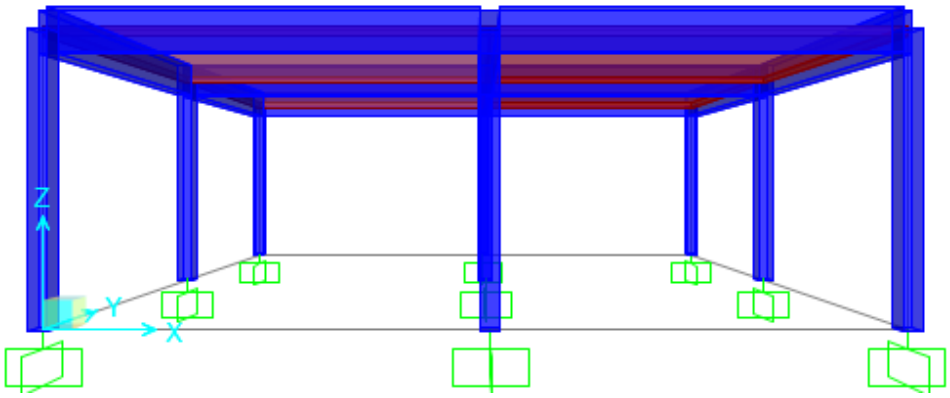
Figura 4: Representação planta do projeto



Fonte: SAP 2000

Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

Figura 5: Perspectiva em 3D



Fonte: SAP 2000

Após feita a discretização da estrutura no SAP 2000, isto é, introduzidas as seções, e toda modulação no programa, chega-se a importante etapa de introdução dos carregamentos. De antemão é necessário conhecimento prévio da NBR 6120, já que será importante para análise da estrutura como um todo. Uma outra observação feita quanto aos carregamentos impostos na estrutura, se deve ao fato, de que independente da forma que se calcule, seja ela analítica ou por meio de um software específico, para a aproximação de resultados ao comportamento real, o calculista deve estar consciente dos tipos de ações característicos sobre o projeto.

Como é objetivo do trabalho apresentar um comparativo e por conseguinte, uma avaliação quantos aos diagramas, optou-se para fim de otimização no resultado, analisar a laje 1, viga 1, e o pilar 5, de modo que os momentos e esforços cortante nestes elementos pudessem ser apresentados.

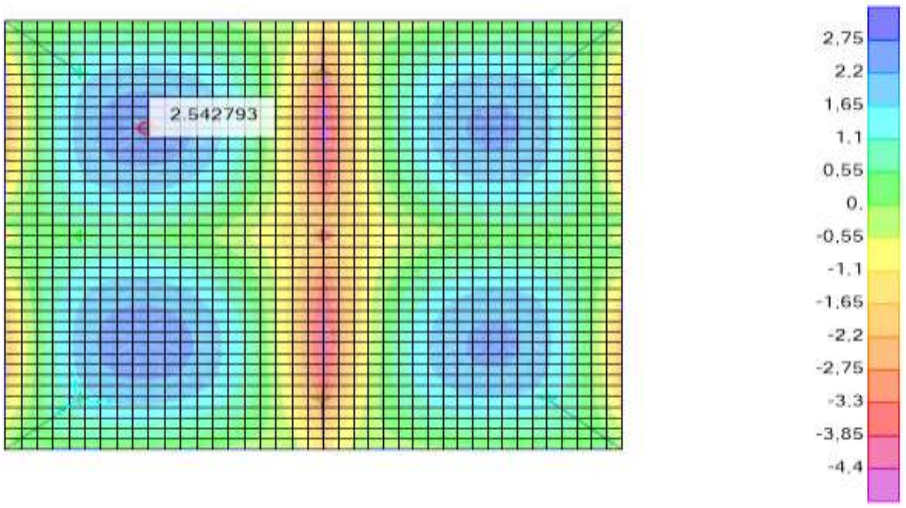
Momentos fletores nas lajes

Para chegar aos resultados da envoltória de cálculo no SAP 2000, deve-se seguir os menus, na respectiva sequência: Menu →Show forces\ Stresses → Shells... → M11. Os resultados foram obtidos através da envoltória dos momentos fletores nas direções X

Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

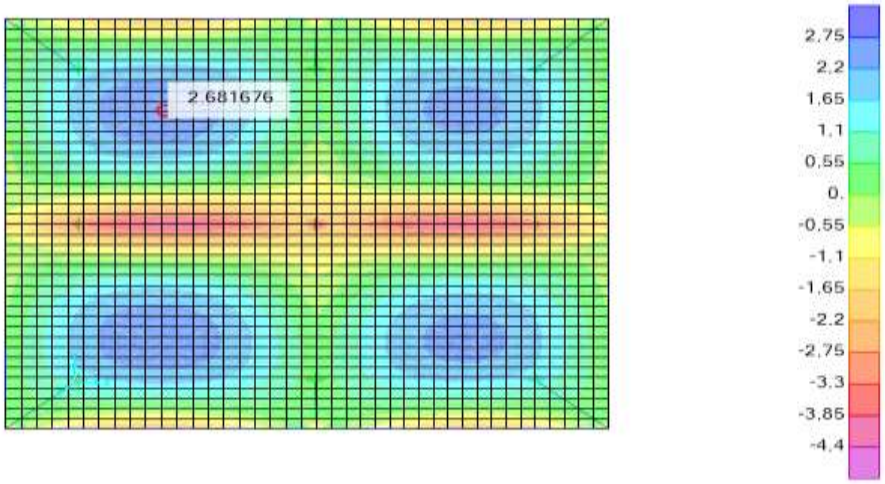
(M11) e Y (M22), já na opção Max, referem-se aos máximos positivos e a opção Mín, para os esforços nas interfaces das lajes. O mesmo se aplica na direção Y ou no programa, M22, como por exemplo, a envoltória momento fletor da laje 1:

Figura 6: Momento máximo atuante (M11 SAP2000). Unidade: Kn.m



Fonte: SAP 2000

Figura 7: Representação momento (M22) atuante na interface da laje SAP2000. Unidade: Kn.m



Fonte: SAP 2000

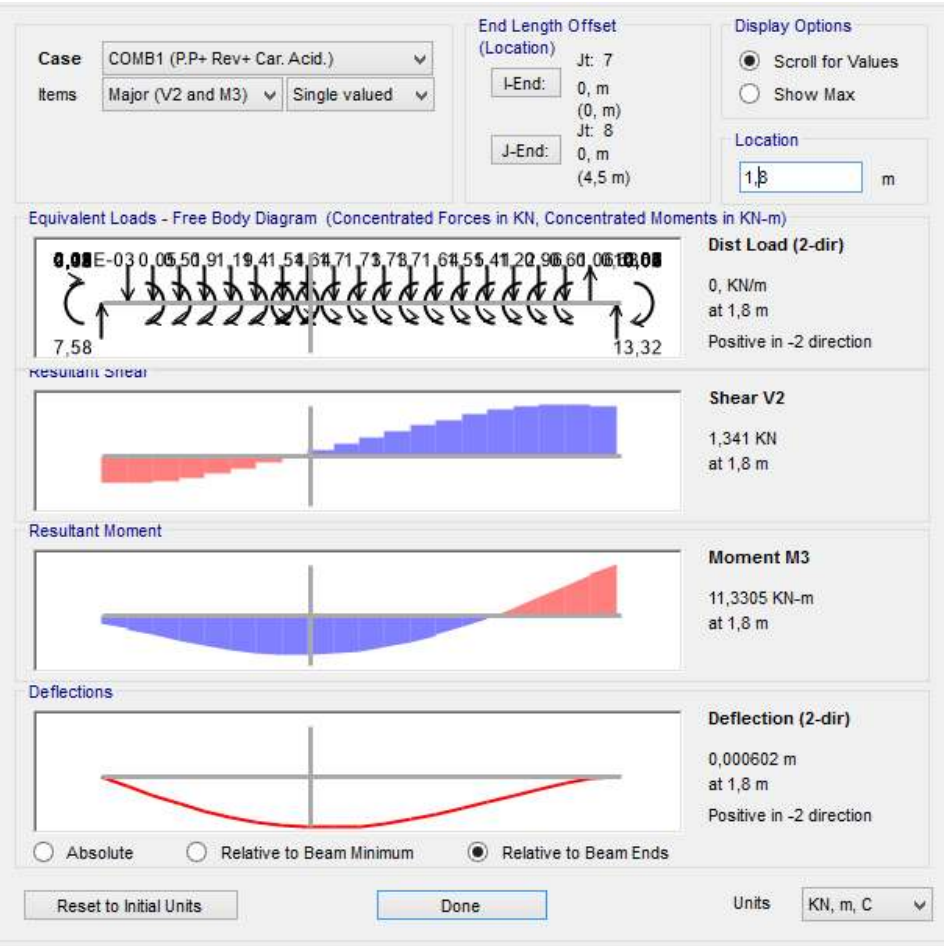
Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

Tabela 1: Quadro momento na laje

Comparativo dos momentos laje 1			
	Modelo analítico simplificado (kn.m)	Sap 2000 (Kn.m)	Diferença dos cálculos (kn.m)
Direção X	2,09	2,54	0,45
Direção Y	2,92	2,68	0,26

Diagramas das vigas obtidas pelo sap-2000

Figura 8: Análise da viga V1-A 20x45 / V1-B 20x45 (Kn.m)



Fonte: SAP 2000

Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

Para obter esse detalhamento da viga, basta clicar na opção “Run Analyses ou F5”, então o modelo analisado poderá fornece os diagramas referentes aos esforços. Assim, ao selecionar a viga desejada, clicando com o botão esquerdo, abrirá esta janela, podendo agora consultar, a força cortante (shear), momento fletor (Moment), e a deformação (Deflection).

Tabela 2: Quadro momento máximo nas vigas

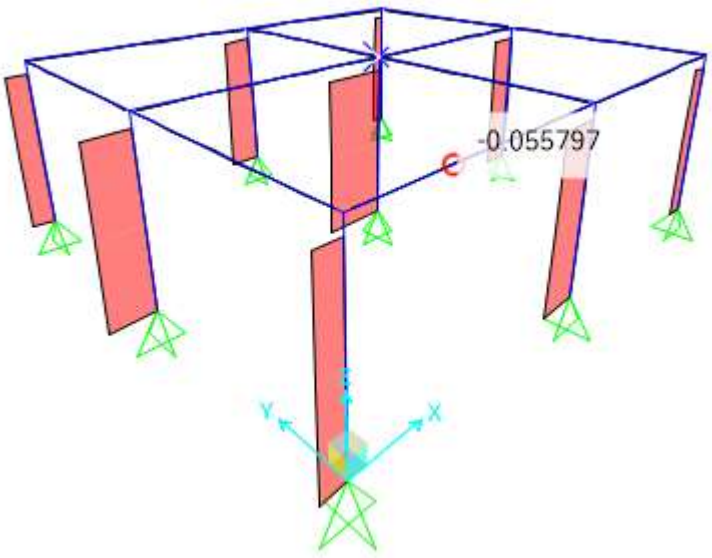
Viga	Cálculo Analítico Simplificado (Kn.m)	SAP 2000 (kn.m)	Diferença entre os cálculos (Kn)
V1-a	9,6	11,33	1,73
V1-b	7	8,73	1,73
V2-a	25	22,37	2,63
V2-b	17,8	17,67	0,13
V3-a	9,6	11,33	1,73
V3-b	7	8,73	1,73
V4-a	6,6	8,9	2,3
V4-b	6,6	8,9	2,3
V5-a	6,6	8,54	1,94
V5-b	6,6	8,54	1,94
V6-a	16,8	17,65	0,85
V6-b	16,8	17,65	0,85

Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

Os diagramas mostrados tanto de momentos fletores, quanto de esforços de cortante, no programa Sap 2000, agem de forma tão interativa, que são considerados as reações destes efeitos nos pilares, isto é, diferente do cálculo analítico simplificado, é possível identificar os momentos transferidos aos mesmos.

Cargas nos pilares (Kn.m)

Figura 10: Representação das cargas atuantes nos pilares,



Fonte: SAP 2000

Quando se trata de análise da estrutura, o programa SAP 2000 fornece um importante item para acompanhamento numérico das forças atuantes ao longo do eixo do elemento, assim sendo, além do diagrama da força axial, é possível identificar os valores de torção ao longo do pilar, assim como sua maior solicitação.

Tabela 3: Quadro comparativo das cargas atuantes nos pilares

Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

Pilares	Cálculo analítico (kn)	SAP 2000 (kn)	Diferença entre os cálculos (kn)
P1	20	13,1	6,9
P2	56,4	43,78	12,62
P3	18,2	11,55	6,65
P4	58,4	45,58	12,82
P5	162,1	124,19	37,9
P6	53,1	41,35	11,75
P7	20,2	13,09	7,11
P8	58,4	43,78	14,62
P9	18,2	11,55	6,65

Há a necessidade de se levantar um importante ponto destes resultados obtidos através do SAP 2000, que são, as inumeráveis possibilidades de combinações de cálculo. Para fins de estudo, foram restritas nos mesmos casos considerados pelo método analítico simplificado. Pois para cada parte da estrutura em questão, permite-se aplicar cargas diferentes, no entanto, a grande questão, foi obter para os mesmos casos de forças, diferentes resultados.

Conclusão

Em geral, nos trabalhos com o objetivo de comparar resultados, em pesquisas concernentes aos assuntos ligados sobre as vantagens de se calcular as estruturas de concreto, seja pelo modo analítico simplificado ou com o auxílio de um programa de cálculo estrutural, percebe-se o quanto categoricamente um método é intrinsecamente

Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

ligado ao outro, isto é, cada um possui papel fundamental na eficiência do projeto estrutural. Apesar de quando comparados os resultados, há maiores esforços que o outro, ambos estão bem próximos aos valores de carga estimado. A grande ideia é que para um maior ganho na otimização dos resultados, o calculista utilize sim de software de cálculo estrutural, principalmente na geração das pranchas, análise das diferentes combinações possíveis, etc. Mas sem deixar de se atentar ao grande passo do pré-dimensionamento. Isto é, desde o lançamento dos elementos estruturais, até aos resultados dos diagramas no programa, sejam aplicadas as importantes informações obtidas nos anos de formação como engenheiro.

Então é possível concluir, que é de suma importância para o engenheiro, o desenvolvimento das duas ideias: aproveitamento dos programas de cálculo e a interação com cálculos simplificados. Portanto ao se propor o tema vantagens do uso computacional na análise, e a importância do engenheiro na disposição de modelos analítico simplificado, é justamente, mostrar a interação de ambos. O grande problema se torna quando engenheiros se apegam demais aos softwares a ponto de não se atentares as grandes equações “de padeiros”, ou equações simplificadas nos quais permitem uma maior análise crítica quantos aos resultados gerados por qualquer que seja o programa estrutural adotado.

Referências

KIMURA, Alio. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculos de edifícios com uso de sistemas computacionais**. Editora PINI, 632 p. São Paulo, 2007.

FTOOL- **Two – Dimensional Frame Analysis Tool, Educational Version** 2.11; aug.2002. (htpp://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool).

SAP2000 – **“Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structure. Structural Analysis Program ”**, Advanced 10.01, Computers and Structures,Inc; 2005.

ABNT, **NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, 2014.

ABNT, NBR 6120:1980 – **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações-Procedimento**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1980.

Revista Hipótese
ISSN: 2446-7154

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto Armado**. 2006. 98 f. Estruturas de Concreto I, Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia, da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Bauru, 2006. 6118

PORTO, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle Stefane Gualberto. **Curso básico de concreto armado: conforme NBR 6118/2014**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

PEDROSA, Rogério Sales. **Uma ferramenta 3d, via web, para dimensionamento de seções retangulares de concreto armado com esboço da armadura**. Dissertação de Metrado. UFMG. 2010. Belo Horizonte.