

Laje Maciça - Edição de Esforços (1/2)

Vou dividir esta mensagem em quatro partes: Histórico, modelos, homogeneização de faixas de esforços e dica de desenho. Ela será enviada em três e-mails.

Histórico

Ao ler as mensagens de vocês me bateu uma “tremenda nostalgia moderna”.

Isto porque já estava na TQS quando surgiu o Editor de Esforços, em setembro de 1994, e, de lá para cá, devo ter detalhado mais de 3000 pavimentos com o editor de esforços utilizando esforços de modelos de grelha. Confesso que várias boas lembranças percorreram a minha mente nestes dias.

Voltando a 1994, vale lembrar que poucos escritórios tinham domínio sobre técnicas sofisticadas de análise de pavimentos, utilizando a discretização das lajes como malhas de placas, comumente denominadas de Elementos Finitos ou barras, comumente denominadas como grelhas planas. Vigas geralmente eram discretizadas como barras. Nunca vou me esquecer da primeira laje que detalhei utilizando modelos de grelha, sendo que na época ainda não tínhamos geração automática da malha de barras para as lajes. Esta grelha corresponde ao pavimento do tipo do Ed. Clemont Ferrant, que fica perto do Shopping Morumbi, aqui em SP, meu caminho diário de casa.

Na época, a Encol tinha adotado um sistema estrutural que denominavam NOVATEC, onde os pavimentos eram formados por lajes nervuradas e vigas de borda.

Estimulados por engenheiros que projetavam para a Encol, Nelson e Abram direcionaram o desenvolvimento para a criação de ferramentas que fossem, ao mesmo tempo, modernas e práticas para auxiliar aos engenheiros no detalhamento de lajes. Surgiu então a primeira ferramenta para modelagem de grelhas de lajes nervuradas e, logo em seguida, o Editor de Esforços.

No início de 1995, surgiu a geração de modelos para lajes maciças e com o tempo os modelos de grelha avançaram bastante, sempre na busca da obtenção de esforços e deformações mais realistas. Vejamos alguns avanços:

Simulação de plastificações

Apoios elásticos independentes para vigas e depois para lajes

Decomposição de esforços de torção em fletores (Wood&Armer)

Refinada discretização de capitéis

Engastes parciais

Conversão de modelos de grelha para placas com resolução de esforços

Separação de carregamentos

Combinações para verificação de ELU e ELS

Lajes Trelaçadas

Lajes sobre base elástica

Lajes com protensão

Integração do modelo de grelha com o de pórtico espacial

Grelha não-linear - Sofisticadas análises de deformações e fissuração

Editor para telas soldadas integrado aos esforços de grelha

Foram inúmeras implementações introduzidas aos modelos de grelha e também ao editor de esforços e armaduras de lajes.

Para o Editor de Esforços devemos destacar:

Possibilidade de se armar lajes complexas maciças, pré-moldadas, trelaçadas e nervuradas

Verificação de punção e cisalhamento segundo a NBR 6118:2003

Para o detalhamento, temos diversos refinamentos, e entre eles podemos citar:

faixas base e complementares

razão entre armaduras concentradas nas nervuras e na capa

homogeneização de faixas

faixas transferidas de resultados de processos simplificados

Além das implementações introduzidas no Editor de Esforços, o TQS-Lajes recebeu avanços também nos processos simplificados, principalmente na interface automática com o TQS-Formas e com o Editor de Esforços (....neste instante, aqui na minha mesa, parei de digitar por alguns instantes, e coloco as mãos para segurar o queixo, pois ainda não acredito que acompanhei isto tudo...ah! que nostalgia moderna...)

Quando entrei na TQS, fui logo querendo melhorias no TQS-Lajes. Adorava o processo de ruptura e eu queria que fossem introduzidas implementações para este processo no programa. Na época, a minha mente ainda estava ligada a processos simplificados.

Mas logo que descobri os modelos de grelha, apaixonei-me logo que vi a primeira deformada de um modelo gerado por mim; foi um momento importante para mim, um cara do interior que fica abismado quando ainda nos anos 80, ia às feiras de informática e via modelos numéricos apresentados nas telas das “grandes Workstations” dos grandes fabricantes de computadores. Os mais velhos vão se lembrar da ControlData.

Com o tempo, os modelos de grelha e de pórtico me ajudaram a entender melhor o funcionamento das estruturas, e duas palavras passaram a dominar meu enfoque estrutural: rigidez e deformações.

Um dia, cheguei à conclusão de **que nunca mais adotaria processos simplificados** para detalhar armaduras de lajes, **pois eles partem de uma premissa totalmente irreal: contornos indeformáveis**. Mesmo em pavimentos muito simples, como dos exemplos abaixo, a deformabilidade dos apoios interfere diretamente nos esforços.

Passei a ministrar os cursos pela TQS, divulgar os modelos de grelha e pórtico e estimular os usuários a utilizá-los.

Hoje já me sinto realizado só de saber que a utilização de modelos de grelha e pórtico são comuns nos procedimentos dos escritórios.

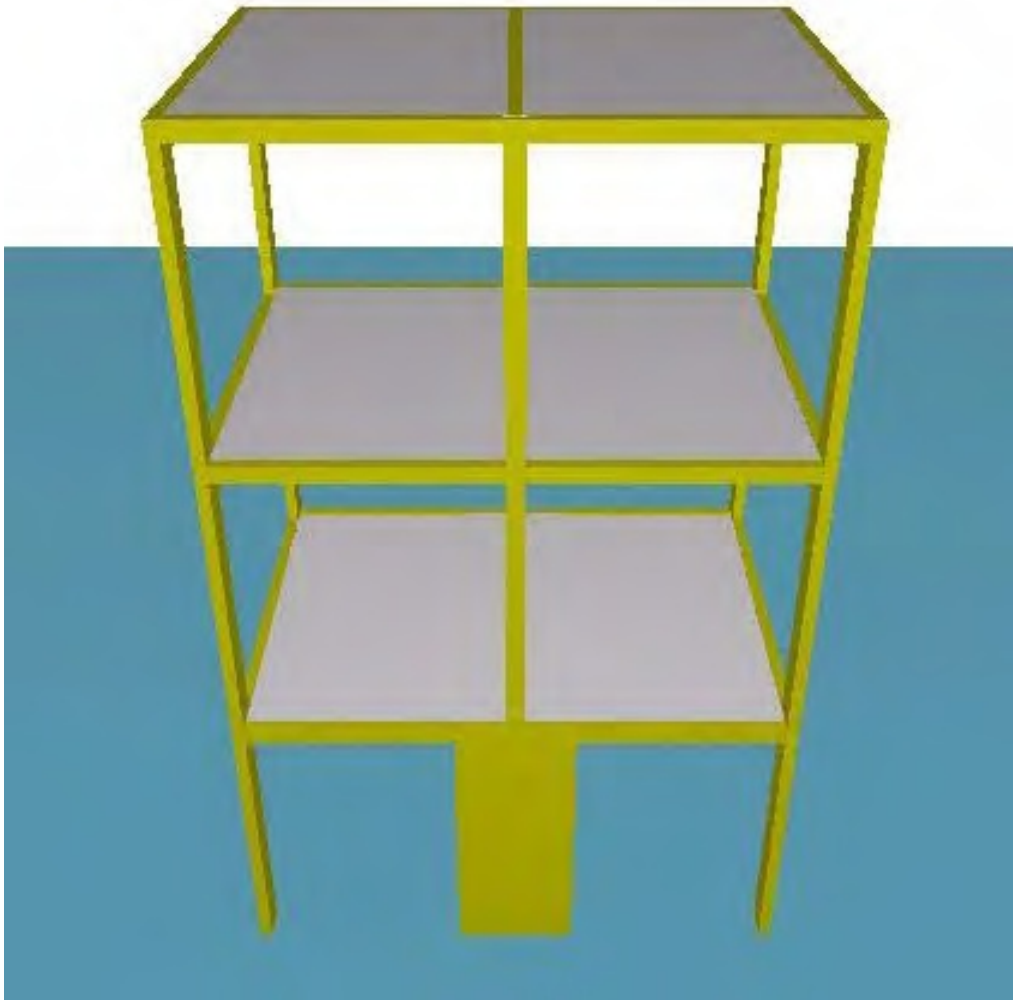
Atualmente, todos nós podemos entrar no TQS, definir lajes complexas, de qualquer vão, processar a estrutura, obter esforços, deformações e detalhar com qualidade, muita qualidade, ou seja, a boa técnica que há 12 anos se concentrava em alguns poucos escritórios, hoje é praticada por milhares de engenheiros.

Modelos

Devido ao tamanho desta mensagem, enviarei na terceira parte, em separado, os 2 edifícios utilizados como exemplo nesta mensagem:

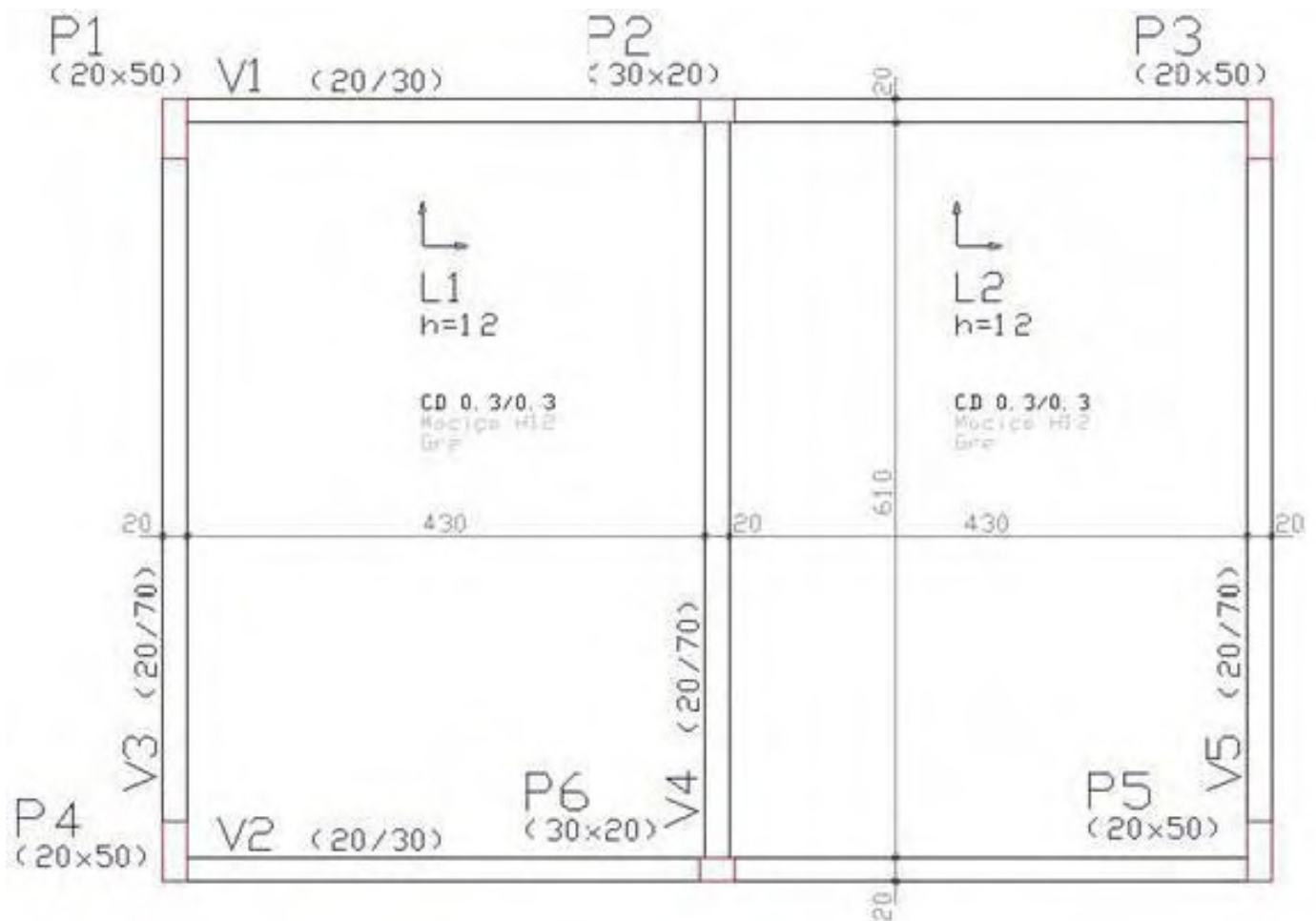
ED-ESF-2LJ para versões plena e Unipro

ED-ESF-2LJ-EPP para versões EPP e EPP Plus



O edifício é formado por 3 pavimentos, todos com a mesma geometria, PORÉM COM CONTORNOS DISTINTOS:

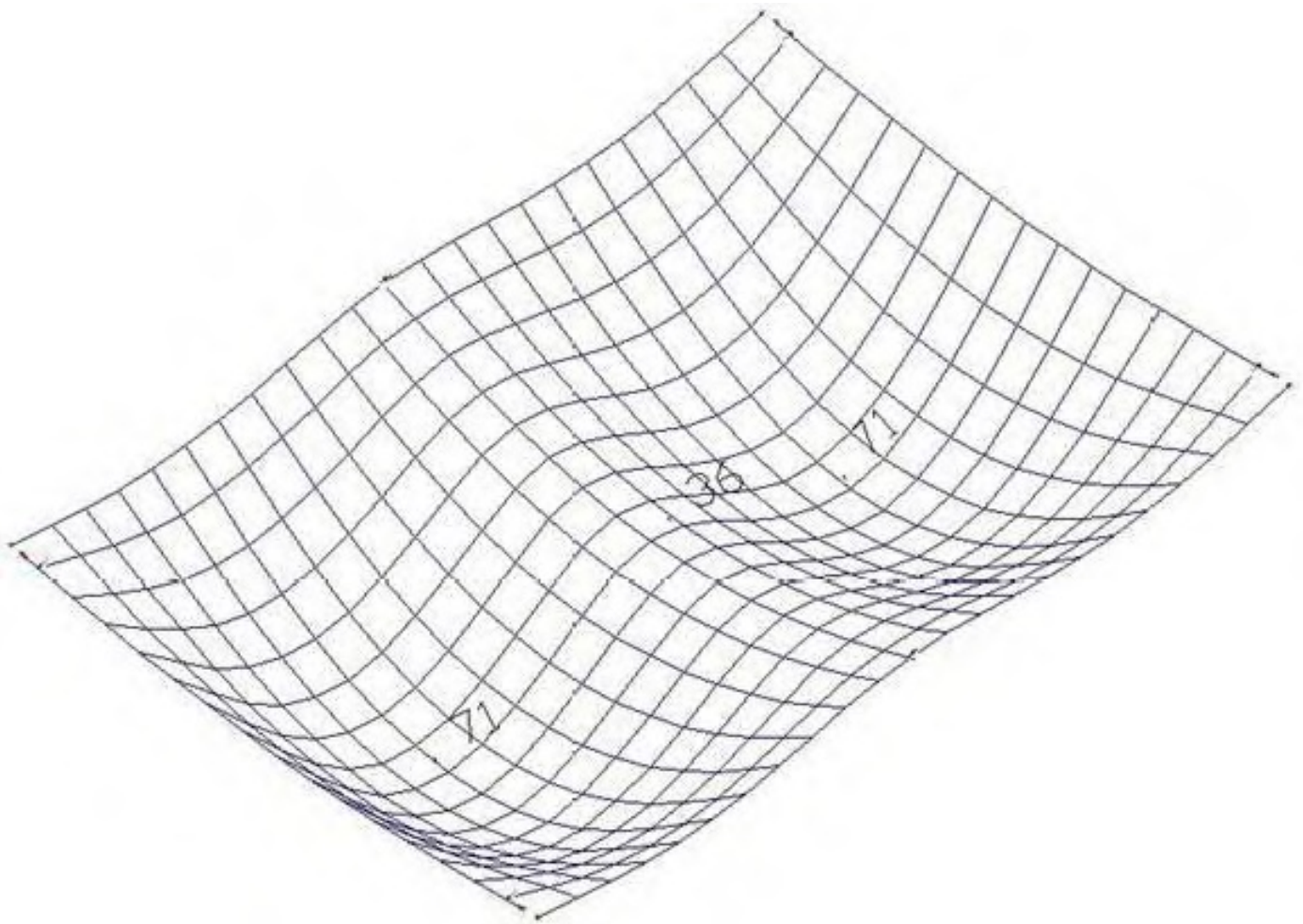
No pavimento TIPO2, mais trivial, temos a seguinte planta de formas:



O pavimento é bem simples, formado por duas lajes com $4,5 \times 6,3$ m, com cargas distribuídas de $0,6 \text{ tf/m}^2$ no total ($g_2 = 0,3 \text{ tf/m}^2$ e $q = 0,3 \text{ tf/m}^2$)

Reparem que nos contornos temos vigas com boa rigidez e os apoios são quase pontuais.

Utilizando o Visualizador de Grelha, pode observar que as deformações neste pavimento apresentam o seguinte aspecto:



Na direção horizontal, os diagramas de esforços máximos podem ser observados pelo Editor de Esforços:

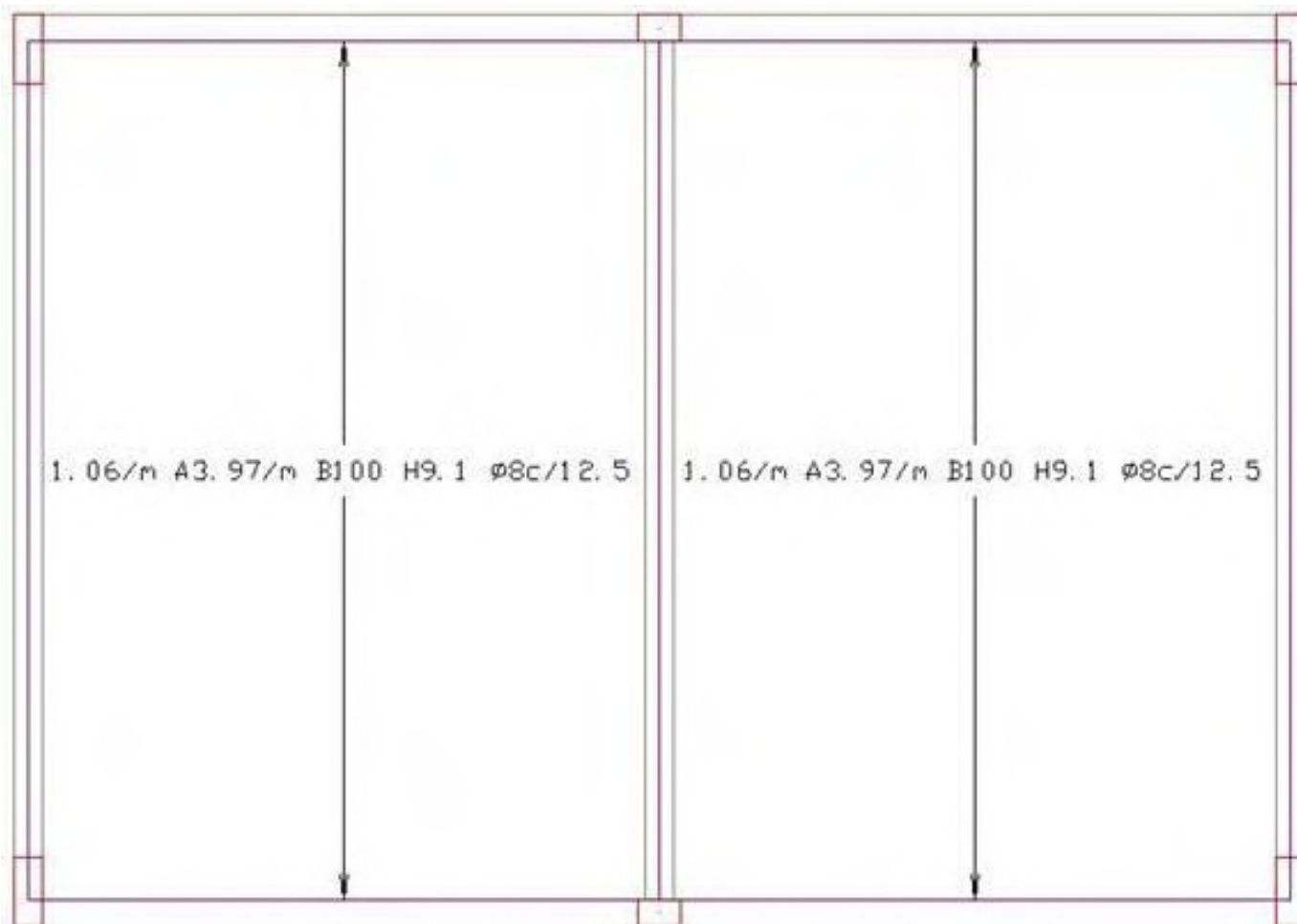
- .69/n		- .70/n		- .69/n
	.49/n			.49/n
- .16/n		-1.18/n-1.18/n		- .16/n
	.66/n			.67/n
- .29/n		-1.48/n-1.48/n		- .29/n
	.81/n			.82/n
- .29/n		-1.67/n-1.67/n		- .29/n
	.94/n			.95/n
- .27/n		-1.81/n-1.81/n		- .27/n
	1.05/n			1.05/n
- .24/n		-1.90/n-1.90/n		- .24/n
	1.12/n			1.13/n
- .21/n		-1.95/n-1.95/n		- .21/n
	1.16/n			1.17/n
- .19/n		-1.96/n-1.96/n		- .19/n
	1.17/n			1.18/n
- .21/n		-1.95/n-1.95/n		- .21/n
	1.16/n			1.17/n
- .24/n		-1.90/n-1.90/n		- .24/n
	1.12/n			1.13/n
- .27/n		-1.81/n-1.81/n		- .27/n
	1.05/n			1.05/n
- .29/n		-1.67/n-1.67/n		- .29/n
	.94/n			.95/n
- .29/n		-1.48/n-1.48/n		- .29/n
	.81/n			.82/n
- .16/n		-1.18/n-1.18/n		- .16/n
	.66/n			.67/n
- .69/n		- .70/n		- .69/n
	.49/n			.49/n

Podemos considerar que a direção vertical realmente é secundária, perante aos esforços apresentados:

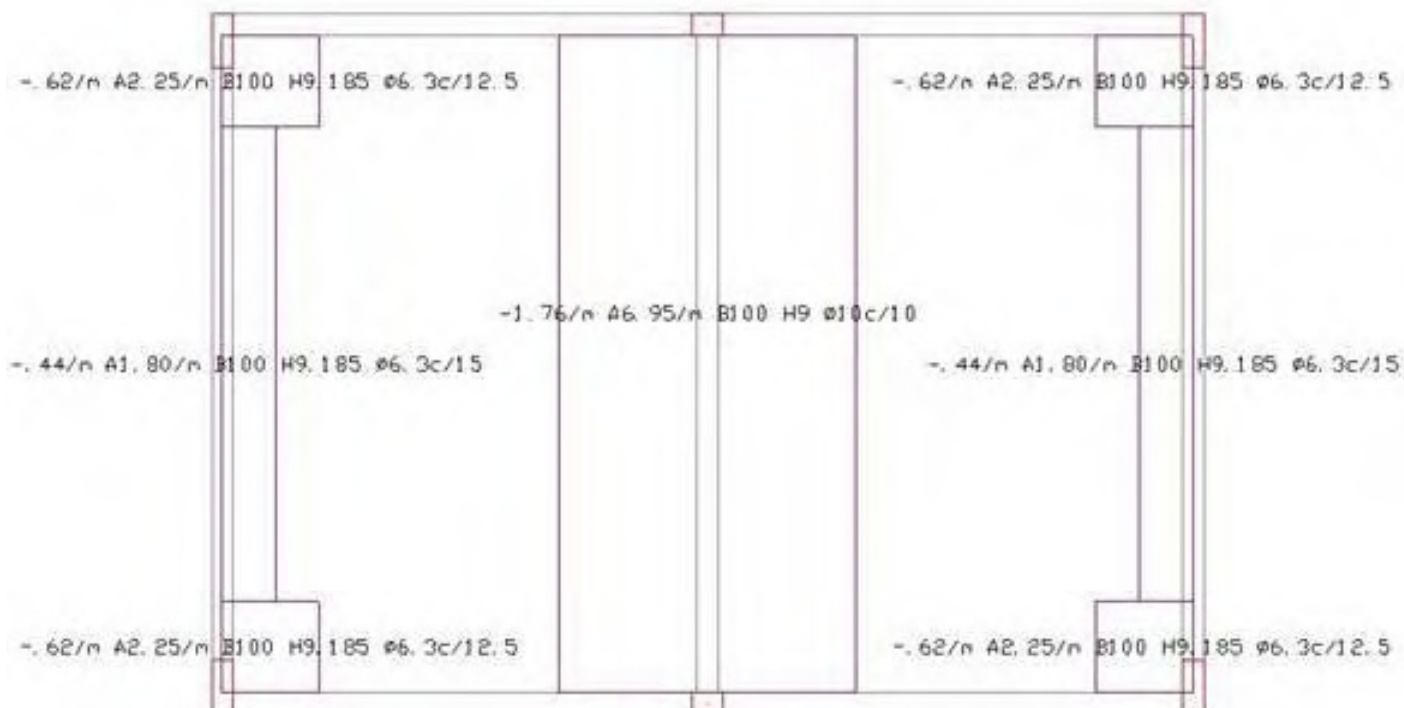
- 49/n	- 38/n
- 24/n	. 32/n - 24/n
- 19/n	- 34/n - 19/n
- 15/n	. 42/n - 15/n
- 10/n	. 47/n - 10/n
- 10/n	- 48/n - 10/n
- 11/n	. 47/n - 11/n
- 09/n	. 43/n - 09/n
	. 38/n
	. 37/n - 29/n - 50/n
	. 38/n - 29/n - 53/n
- 29/n	- 29/n - 53/n
- 50/n	. 28/n
	. 37/n - 38/n - 09/n
- 09/n	. 32/n - 38/n - 11/n
- 11/n	. 38/n - 11/n
- 10/n	. 43/n - 10/n
- 10/n	. 47/n - 10/n
- 15/n	. 48/n - 15/n
- 19/n	. 47/n - 19/n
- 24/n	- 42/n - 24/n
- 49/n	. 34/n - 24/n - 38/n

As faixas horizontais de distribuição de armaduras, já homogenizadas com os meus critérios, apresentaram o seguinte aspecto:

Faixas positivas:

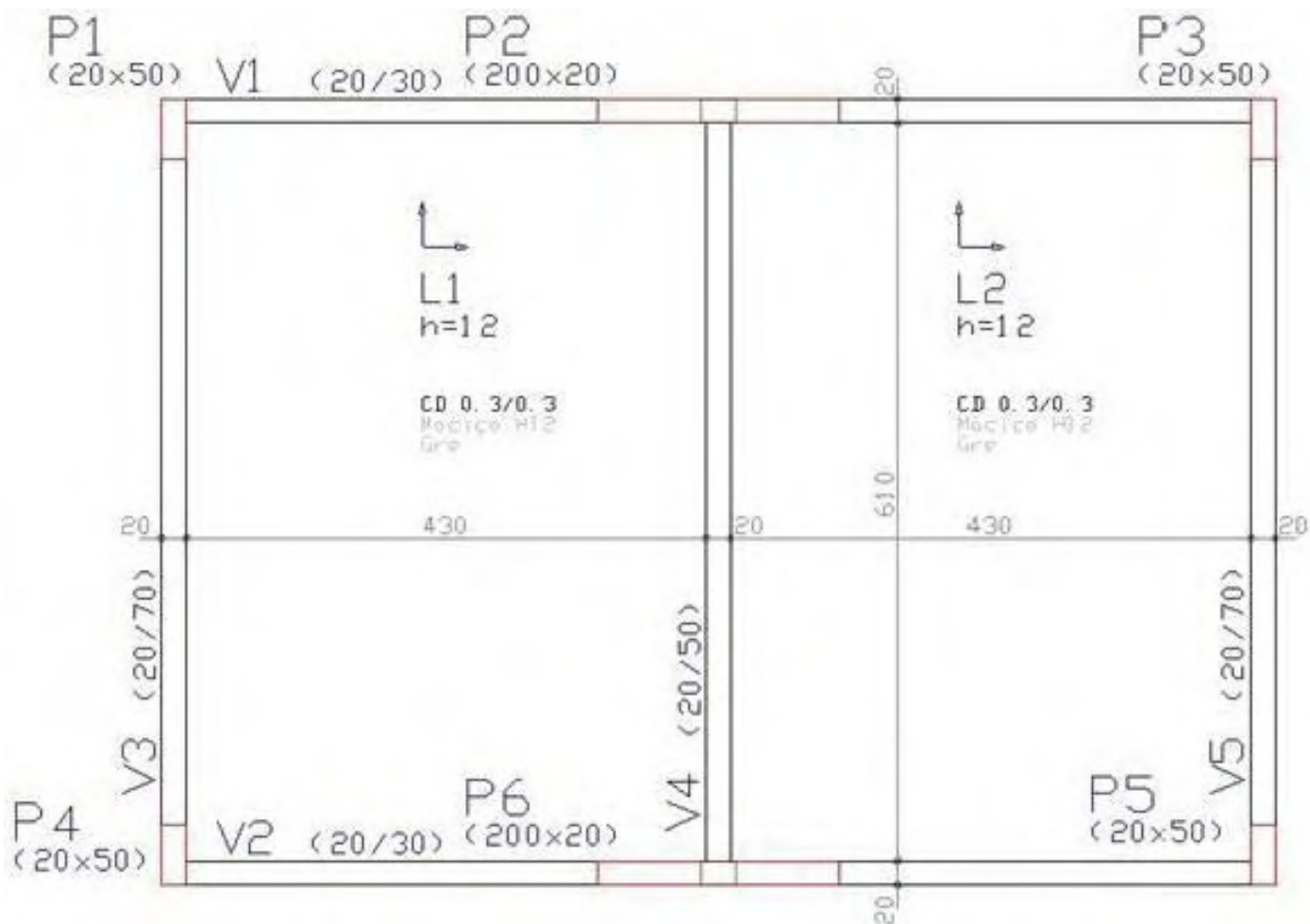


Faixas negativas:



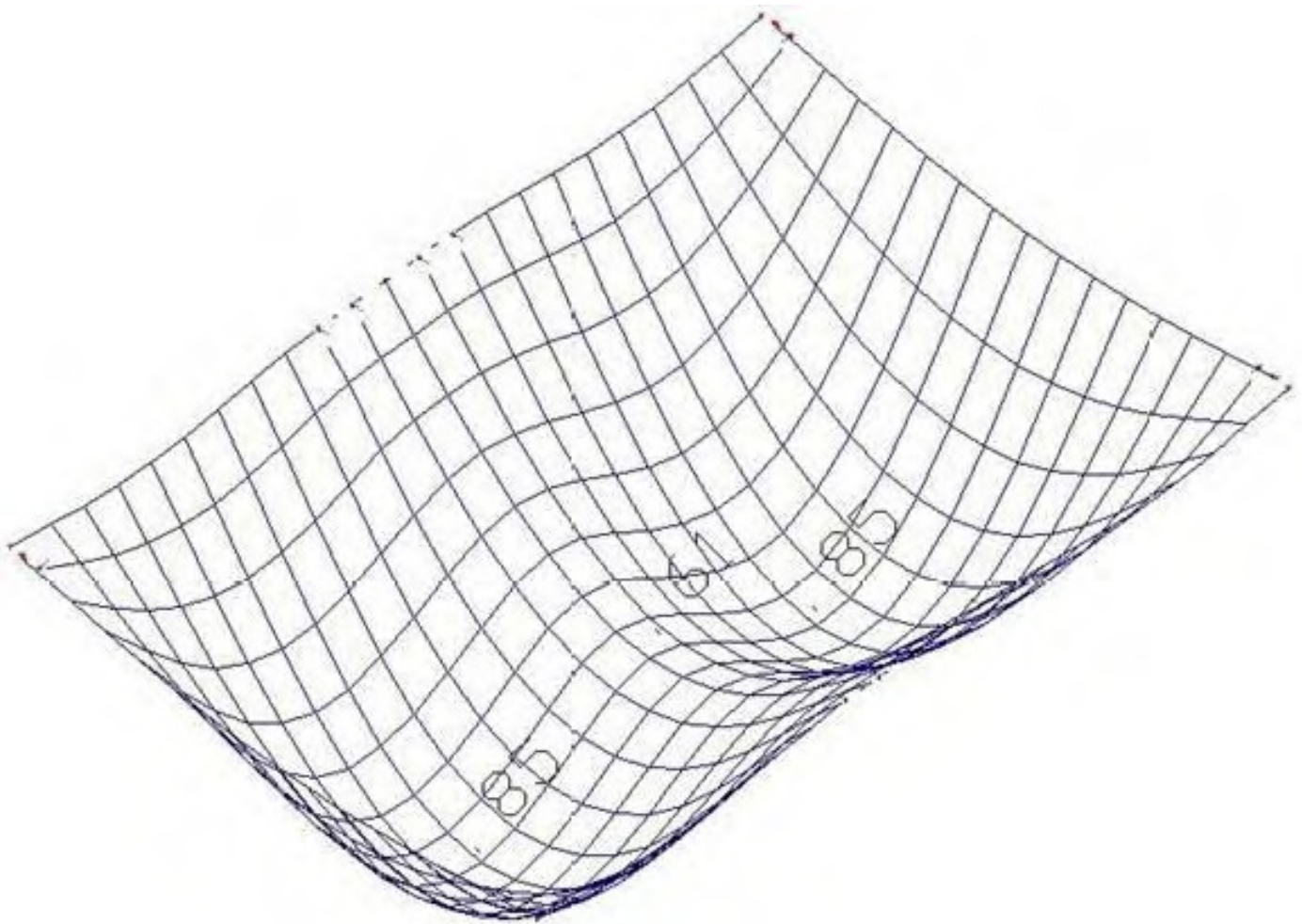
Na homogeneização de momentos, em projetos convencionais, tenho adotado como mínimo para média ponderada (%M1) de 90% dos valores e 20% de desvio acima do máximo (%M2).

Agora vamos passar ao pavimento TIPO1, também trivial, temos a seguinte planta de formas, onde tenho que destacar a presença dos pilares parede centrais:

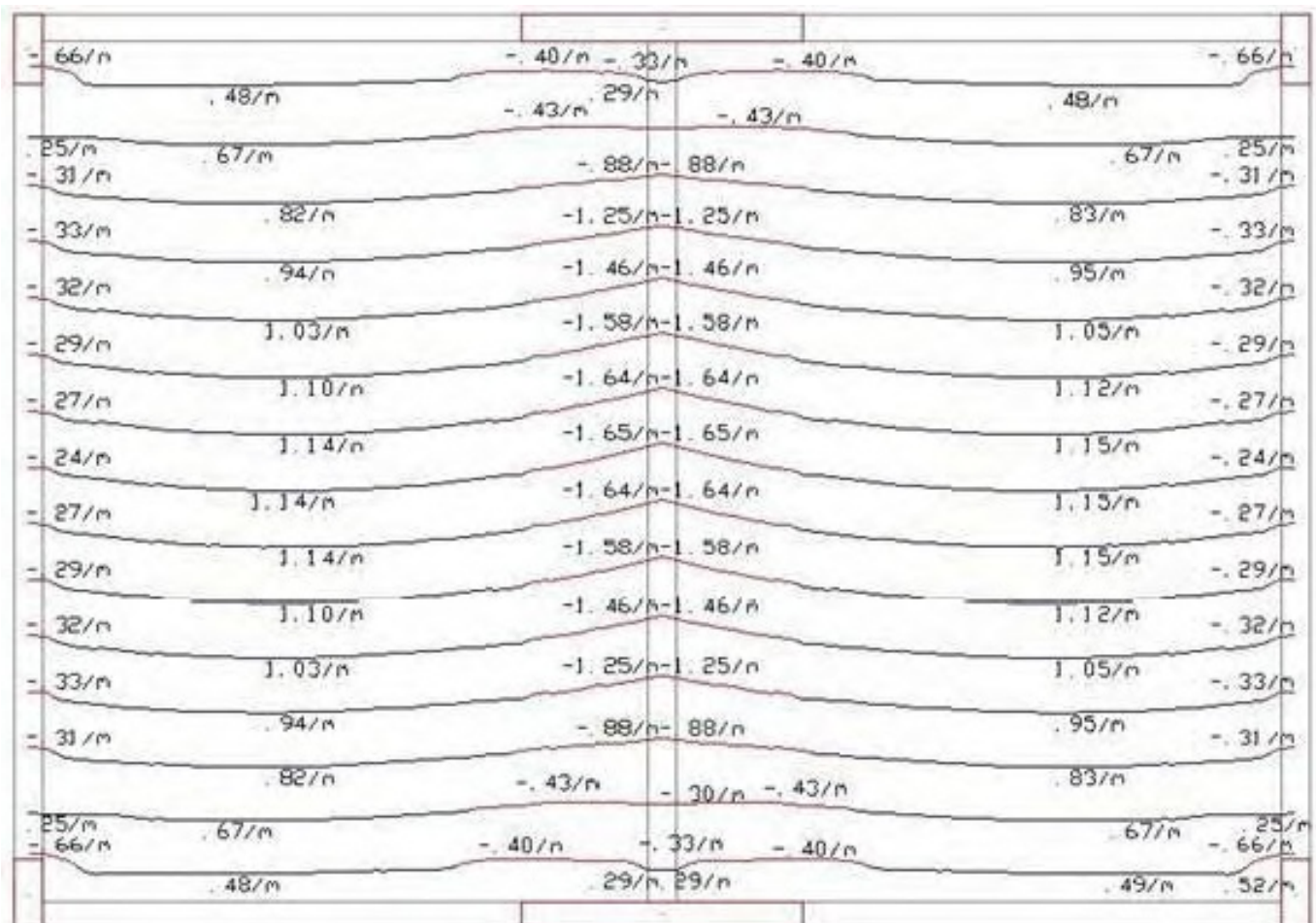


Reparem ainda que a viga central agora tem 20/50.

Utilizando o Visualizador de Grelha, pode observar que as deformações neste pavimento apresentam o seguinte aspecto:



Na direção horizontal, os diagramas de esforços máximos podem ser observados pelo Editor de Esforços:

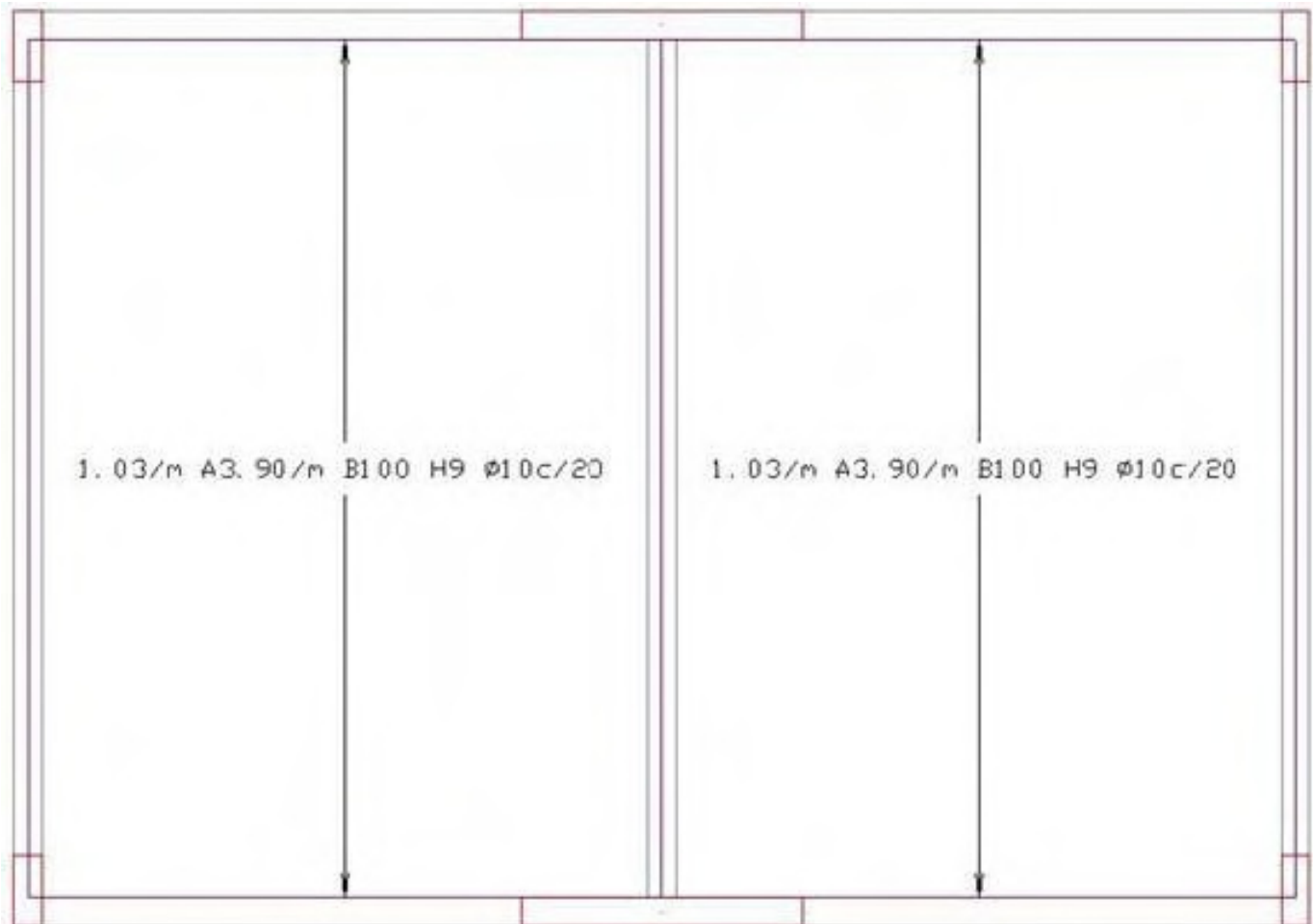


Comparando os esforços com os do pavimento TIPO2, percebemos que os momentos negativos sobre a viga central

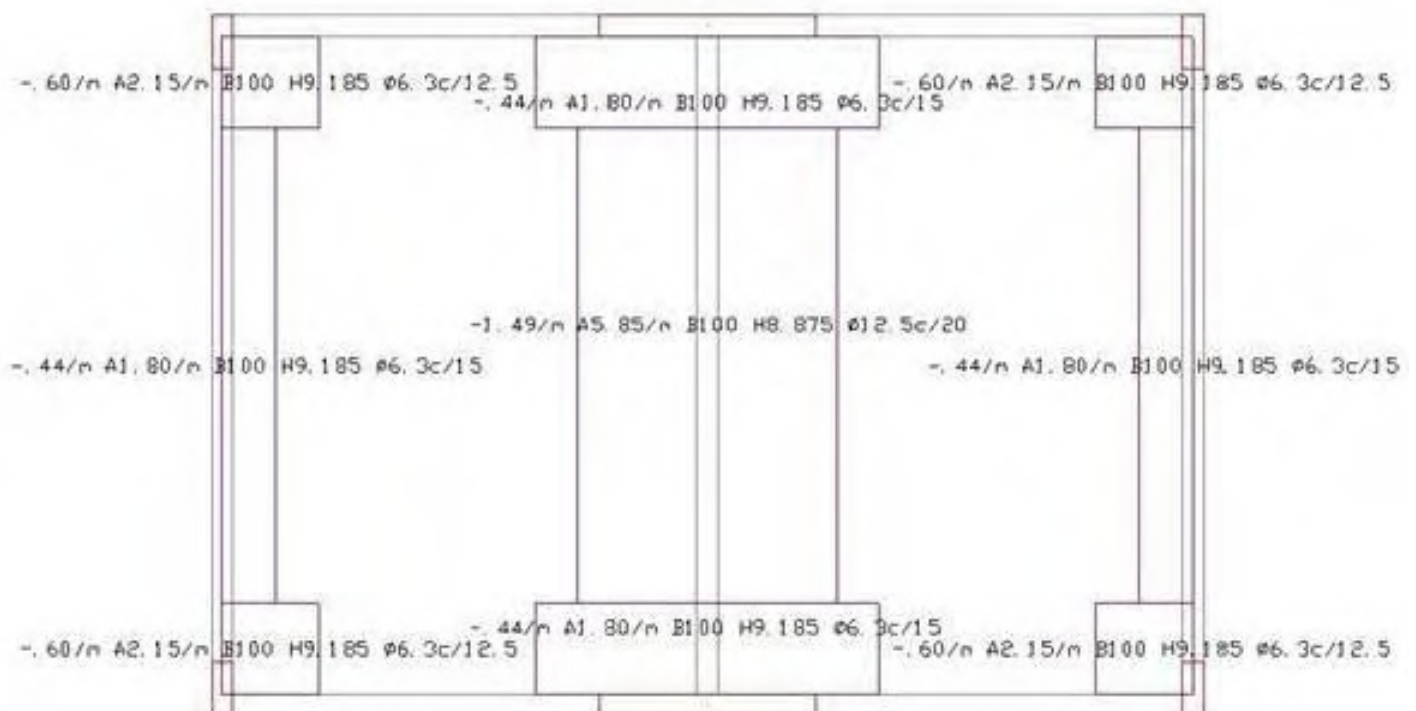
diminuíram e surgiram, próximo aos “indeformáveis” pilares parede, trechos mais longos de momentos negativos.

As faixas horizontais de distribuição de armaduras, já homogenizadas com os mesmos critérios, apresentaram o seguinte aspecto:

Faixas positivas

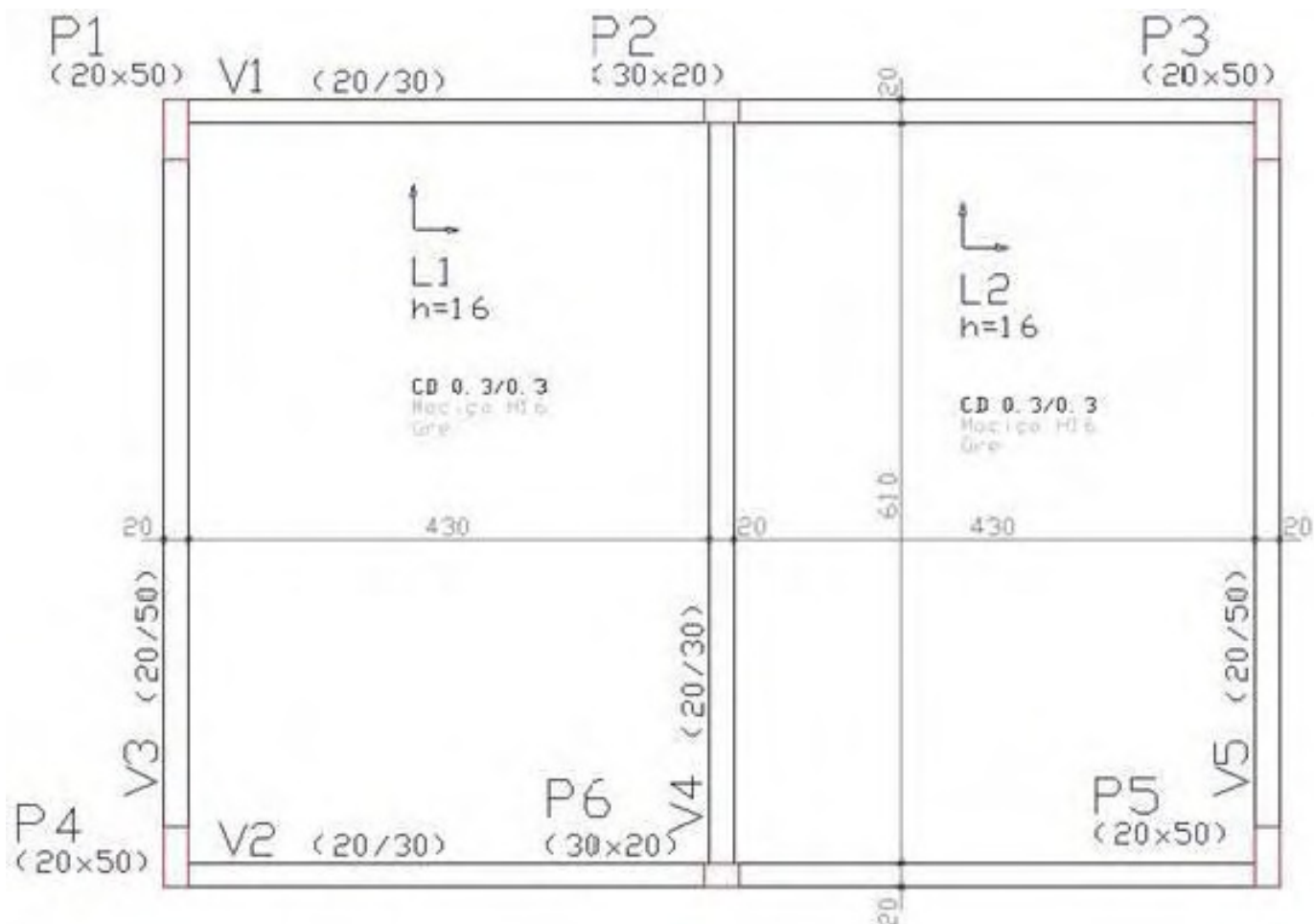


Faixas negativas:

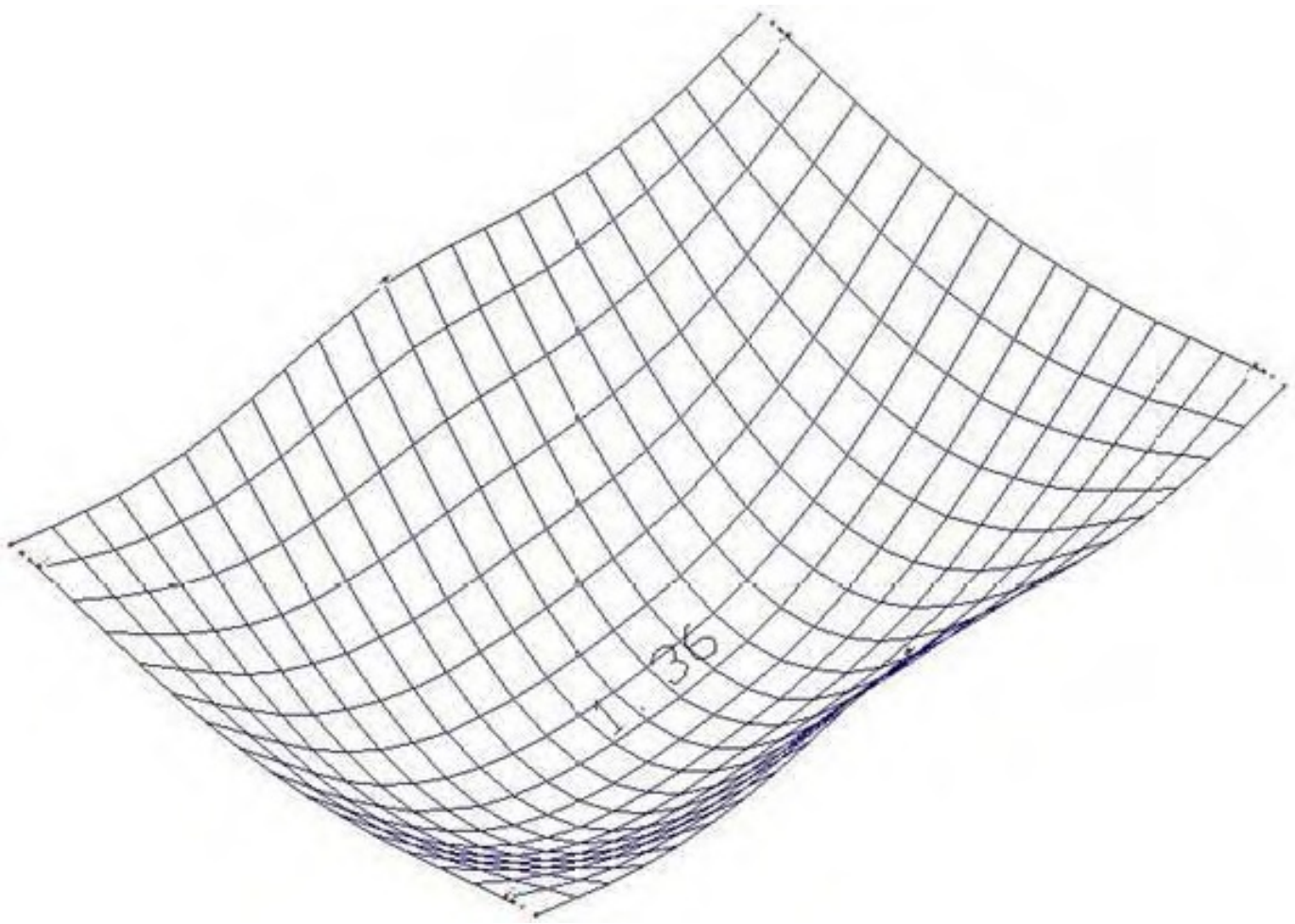


Finalmente chegamos ao pavimento TIPO3, onde temos uma “pegadinha”, a viga central foi reduzida a 20/30 e a laje

foi alterada para 16cm:



Utilizando o Visualizador de Grelha, pode observar que as deformações neste pavimento, onde podemos observar que a viga é bastante deformável:



Na direção horizontal, os diagramas de esforços máximos podem ser observados pelo Editor de Esforços:



Podemos observar que temos momentos positivos sobre o apoio central.

Pegadinha em termos, porque já fui questionado por bons engenheiros que queriam confrontar os resultados de grelha com processos simplificados e não perceberam a influencia dos contornos sobre os esforços resultantes. Nunca vou esquecer aquele dialogo que sempre citei em cursos:

- Poxa, Aurélio, estou rodando um pavimento por grelha e não estou concordando com os resultados, comparando com o cálculo de vigas continuas...

- Qual a seção da sua viga e da sua laje? Perguntei

- A viga tem 20/40 e a laje tem 25cm

- E o vão da viga?

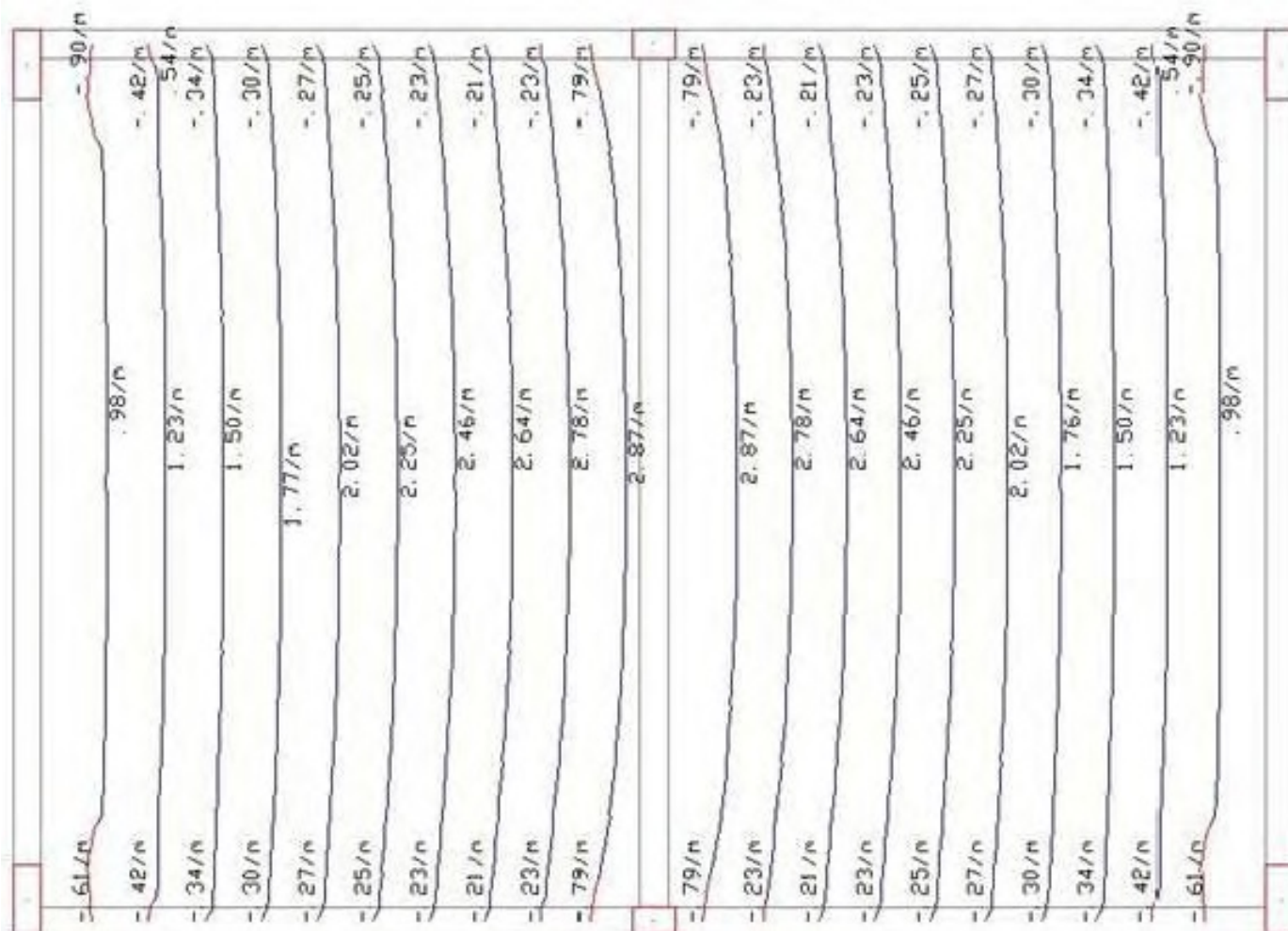
- 8 m

- Então esta não é uma viga perante a rigidez da sua laje...

No exemplo, a viga central também pode ser considerada um “falso apoio”, sendo apenas um enrijecedor para as lajes.

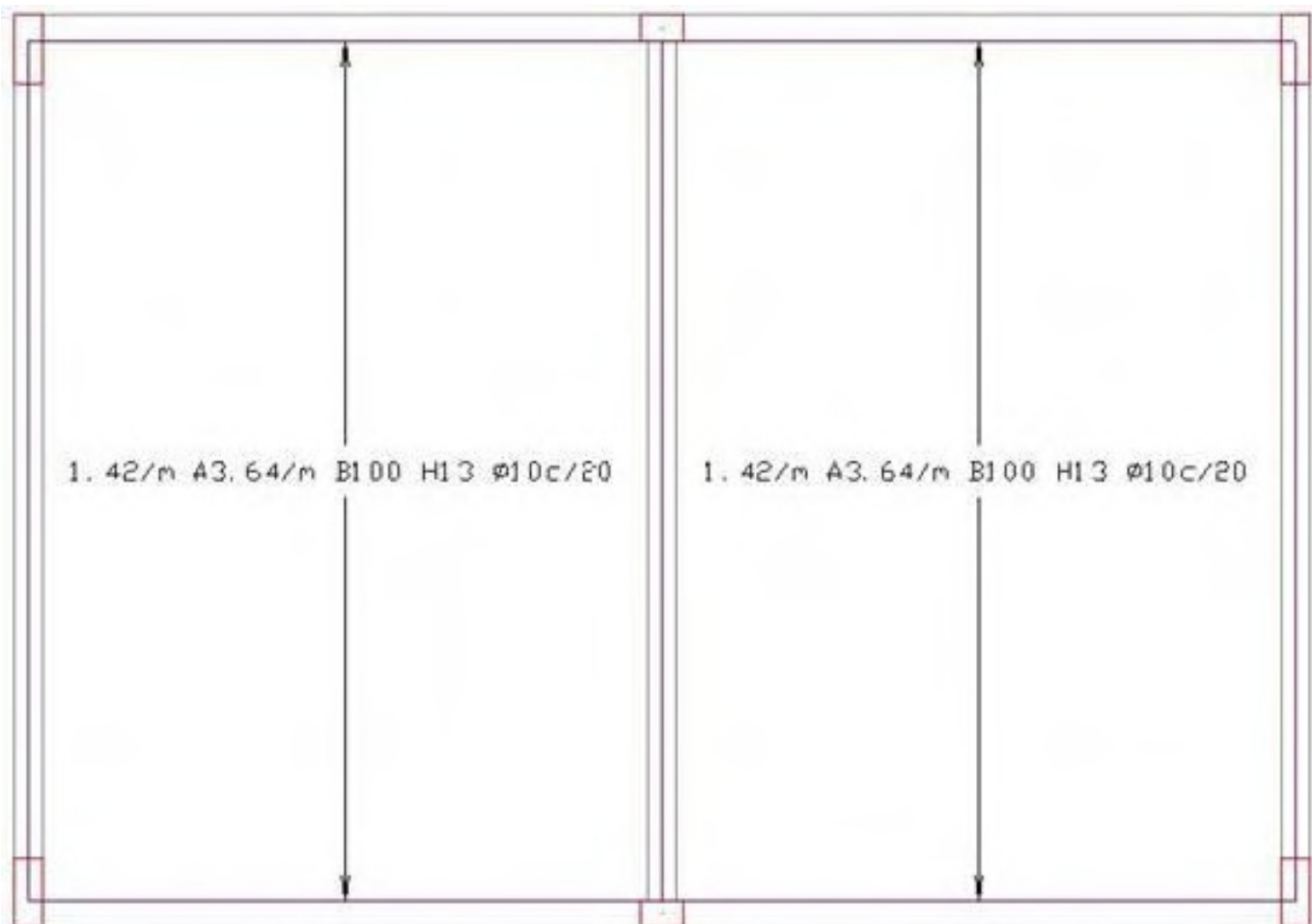
Reparem que os momentos fletores positivos estão maiores e os momentos negativos próximos aos apoios “indeformáveis” centrais também aumentaram.

Agora, a direção principal destas lajes passou a ser a vertical:

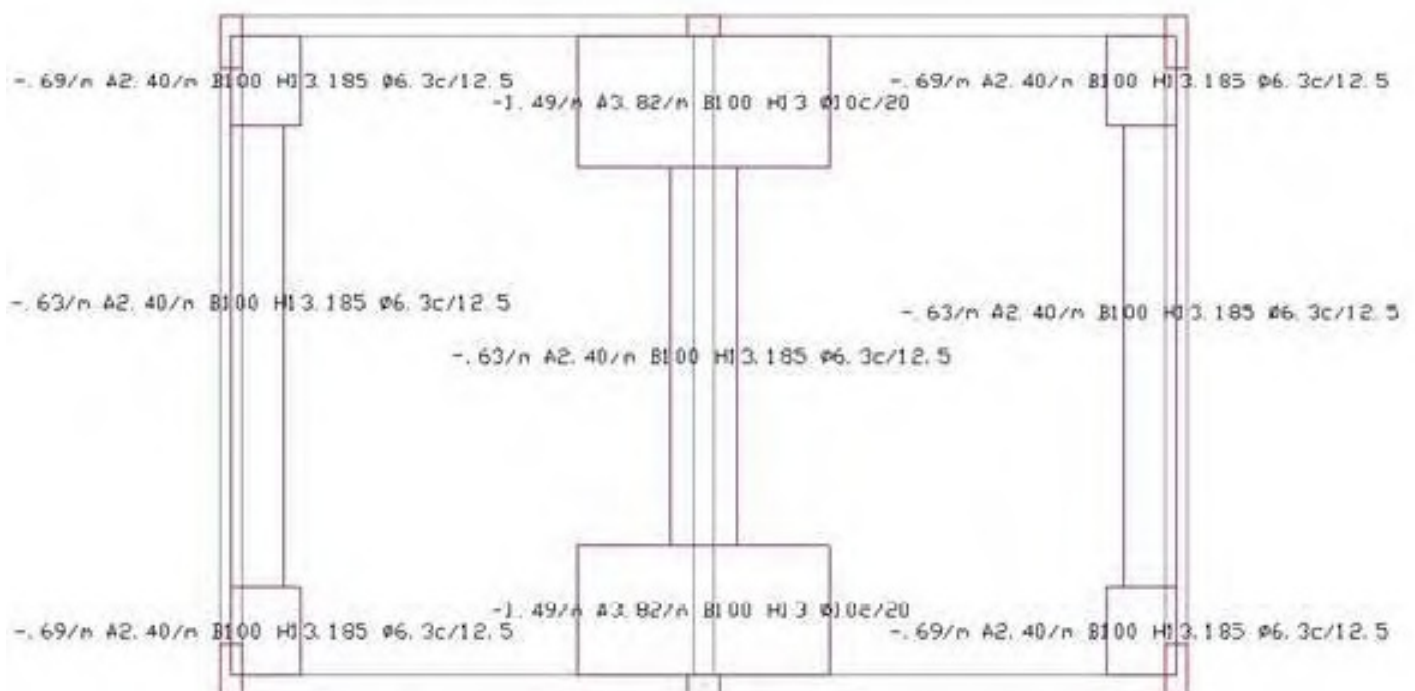


As faixas horizontais de distribuição de armaduras, já homogenizadas com os meus critérios, apresentaram o seguinte aspecto:

Faixas positivas



Faixas negativas:



Com os exemplos acima podemos concluir que não podemos tratar nossos pavimentos por regras genéricas. O certo é observarmos os resultados obtidos, principalmente as deformações e armar lajes, vigas e pilares por modelos mais refinados, sendo que hoje modelos de grelha e pórtico são gerados com extrema qualidade.

Os mais saudosistas podem até dizer que calcularam durante décadas por processos simplificados e nunca tiveram problemas, e daí eu volto ao histórico para lembrar que em 1994 poucos engenheiros ousavam detalhar lajes nervuradas planas com 6 m de vão e hoje todos podem “usar” com lajes de grande extensão.

Devemos também salientar a importância da verificação de deformações, coisa que no passado era pouco observada.

Quando pensamos em refinamento, o Editor de Esforços e Armaduras de Lajes passa a ser fundamental. Outra coisa que sempre digo nos cursos:

Hoje, temos duas coisas que ainda são diferenciais nos projetos:

- Concepção estrutural
- Detalhamento de lajes

Hoje, no TQS temos procedimentos para detalhar vigas pela envoltória de esforços e pilares pelos processos mais refinados.

Dois engenheiros diferentes trabalhando sobre um mesmo modelo estrutural lançado no TQS, vão obter armaduras de vigas e pilares muito próximas.

Porém, nas lajes ainda podemos nos diferenciar, graças ao grau de refinamento que estamos buscando, mesmo utilizando o editor de esforços e armaduras de lajes.

Recentemente, um grande engenheiro amigo meu, pediu para eu detalhar uma laje nervurada. Eu e o Rodrigo, que estava fazendo estágio conosco na TQS detalhamos a laje. O engenheiro, bom mineiro, recebeu o detalhamento e ainda conseguiu obter uma economia adicional de armaduras ao explorar mais a utilização de armaduras de base e complementares.

É importante também citar a confiabilidade. Nunca tive problemas de fissuras de flexão e punção ou deformações nos pavimentos que projetei.

Em alguns casos, observei fissuras em pontos de passagem de tubulações de elétrica e hidráulica e observei em obras que verificamos erros devido a processos executivos, principalmente motivados pelo esquema de escoramento permanente.

O editor de esforços não é perfeito, mas é uma ferramenta maravilhosa de projeto, e é o meu vídeo-game predileto.

Costumo dizer que para ser um bom usuário do TQS deve-se dominar:

Visualizador de resultados de grelha e pórtico

Editor de esforços e armaduras

Editor de armação do TQS-AGC

Plotagem até a emissão completa de plantas (PLT e DXF) pelo TQS

Luiz Aurélio Fortes da Silva

TQS Informática Ltda.

São Paulo