Modelagem Estrutural (Parte II)

3. Esforços adicionais nas vigas (para cargas horizontais)

Em todo edifício é necessária a avaliação da estabilidade global e das solicitações adicionais (e variáveis) de esforços devido ao vento e efeitos de 2ª ordem atuando em toda a estrutura.

Para obter estes esforços, temos que apenas definir para o processamento de pórtico espacial os casos de carregamento de vento, que são montados automaticamente a partir da definição dos fatores básicos preconizados pela Norma NBR 6123 (Velocidade Básica – V0, fatores S1, S2, S3 e Coeficiente de arrasto).

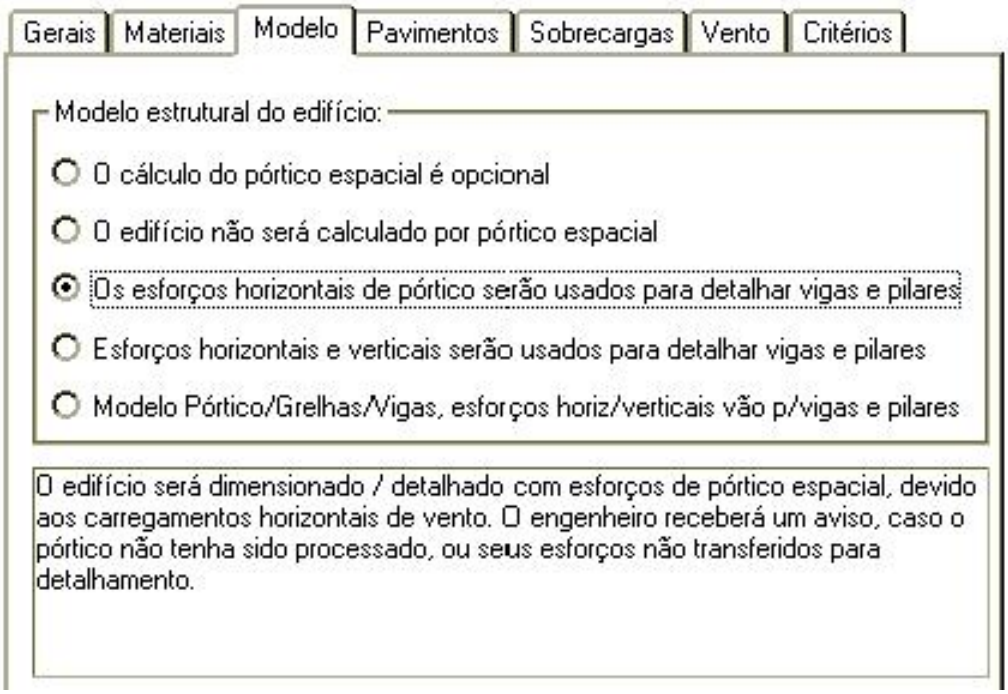
Pórtico Espacial

Vamos recapitular os passos para definição desta consideração.

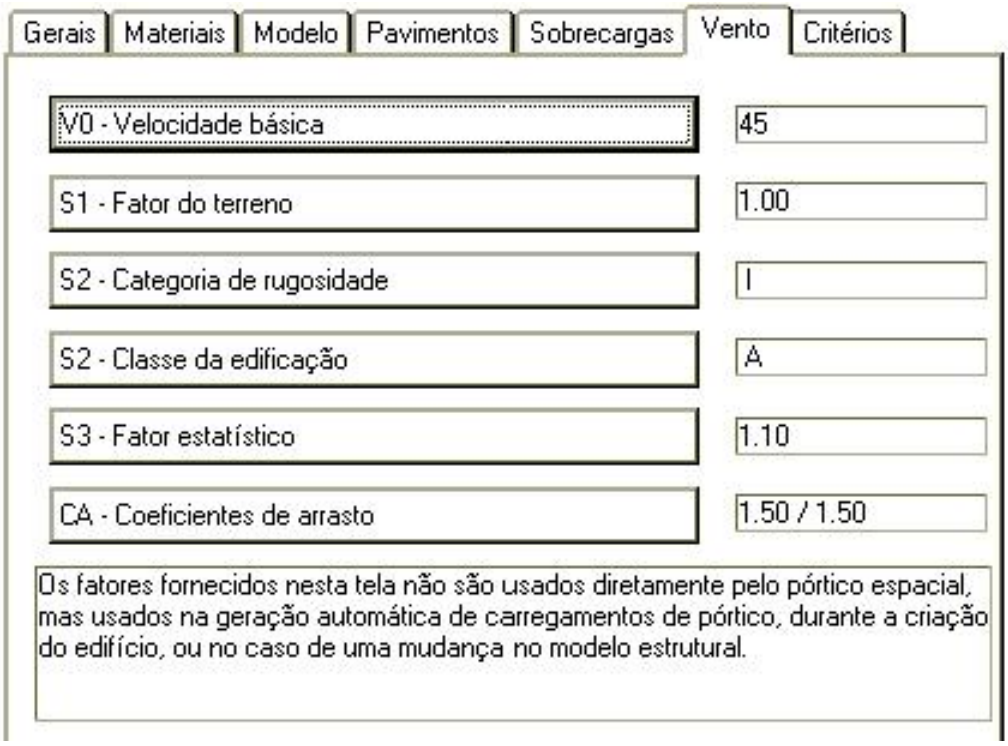
Edição de dados do edifício

Vamos retornar a edição de dados do edifício para relembrar os dados necessários para o processamento automático do pórtico.

Escolha do **Modelo** de pórtico e da organização de esforços que serão transferidos.



Definição dos parâmetros de vento (segundo a norma NBR6123)



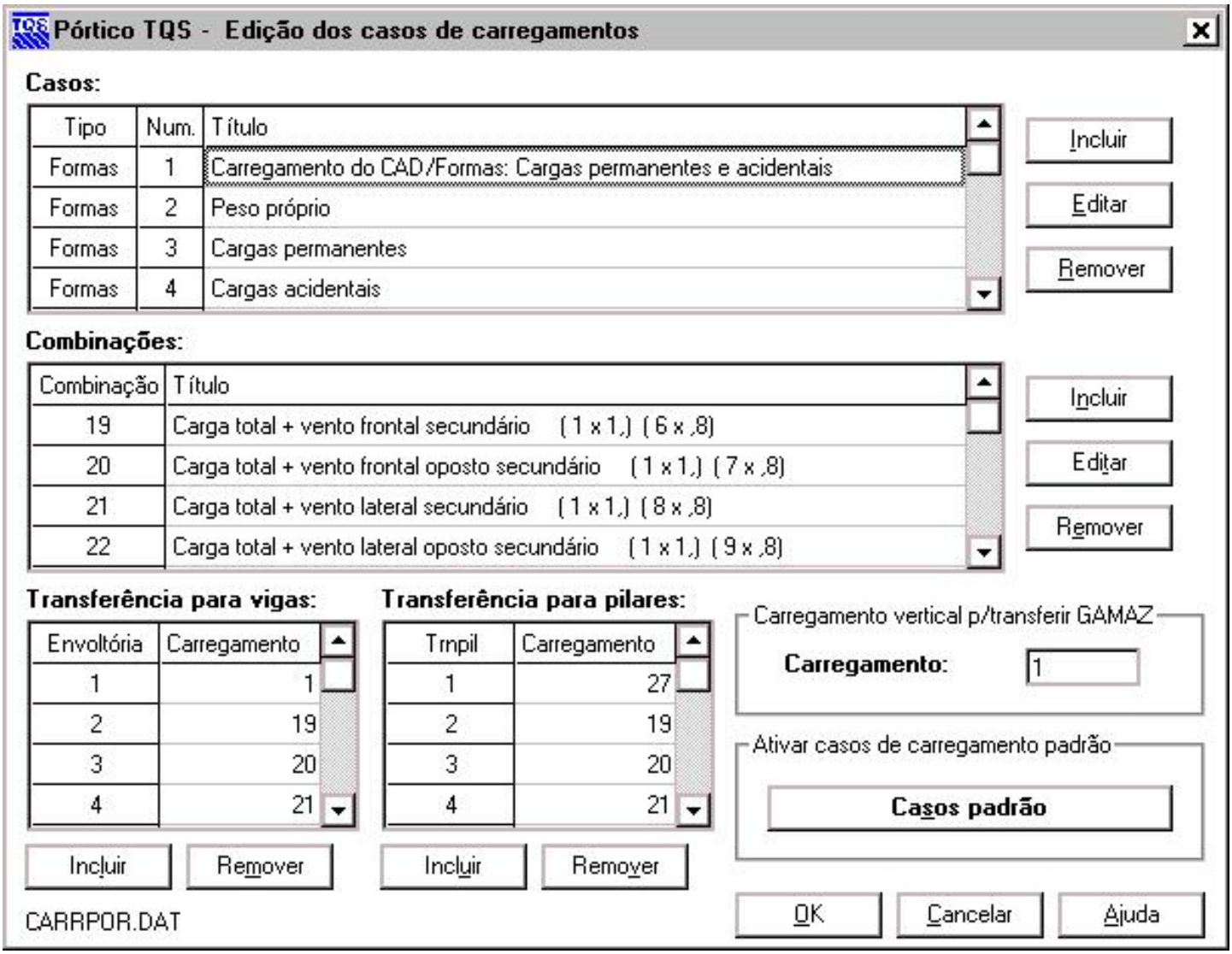
Edição de Critérios e Carregamentos

Critérios Gerais : Considerações sobre os materiais, rigidez dos elementos, Parâmetros para estabilidade global, cálculo de vento, transferência de esforços e Analise não linear

Condições de Contorno : Permite declarações sobre **redução de inércia a flexão e torção** para vigas e pilares, imposição de **articulações** em pilares, imposição de **Coef. de Mola** para a rigidez dos apoios

Carregamentos : Definição de Carregamentos básicos, combinações e Envoltória

Neste menu comandamos a transferência de esforços para vigas e pilares, onde podemos optar pela gravação completa da envoltoria de esforços verticais combinados ao esforços horizontais (arquivos *.TEV) ou apenas da envoltoria de esforços horizontais (arquivos *.TEA).



Estes arquivos são interpretados durante o processamento de esforços do TQS Vigas, onde:

Transferência completa do Pórtico EspacialSe o arquivo TEV foi criado a partir do pórtico espacial obrigatóriamente as reações nas fundações tem que ser obtidas no resultado de pórtico
Transferência de esforços verticais de Grelha (TEV) e esforços adicionais do Pórtico (TEA)Quando o arquivo TEV é criado a partir do processamento de grelha (ou El. Finitos), ele contém as reações de apoio para cada pavimento e então, com o processamento do resumo geral de cargas teremos as reações nas fundações . Os esforços transferidos são combinados automaticamente pelo TQS Vigas.

4. Mais sobre o Modelo Integrado Grelha/Pórtico

Em 1996, quando começamos a realizar as primeiras reuniões de usuários, nós tentamos estimular os participantes a utilizar o seguinte conjunto de esforços:

Esforços devido a **cargas verticais** obtidas a partir de modelos de **grelha**, levando em consideração a rigidez dos pilares (com a adoção de apoios elásticos)
Esforços devido a **solicitações horizontais** obtidos a partir do modelo de **pórtico espacial clássico**
Neste esquema, tínhamos algumas limitações :

Os momentos atuantes nos pilares devido a cargas verticais eram obtidos por processos muito aproximados, obtidos pela clássica propagação de momentos.
As ligações das vigas com os pilares parede no pórtico são efetuadas elasticamente, onde a barra de um pilar muito rígido poderia facilmente engastar uma viga, mesmo que ela estivesse na ponta de uma lâmina do pilar.
Quaisquer efeitos de redistribuição de esforços ao longo da estrutura não seriam consideradas: deformações em transições flexíveis , momentos em vigas devidos a excentricidade em variações de seções de pilares, etc.

A adoção do modelo de pórtico espacial para a obtenção de esforços devido a cargas verticais não era a melhor opção, pois neste modelo as vigas são carregadas pelos quinhões de carga.
O tempo passou, e no fim de 1997 ainda buscávamos o modelo ideal quando foi concebido o MODELO INTEGRADO, com o objetivo de convencer os profissionais a conciliarem o cálculo tradicional com uma análise global mais refinada.

Por isto o sistema tem duas etapas de processamento:

Na 1ª etapa, com as vigas articuladas, onde são reproduzidos os esforços nas vigas que seriam obtidos isoladamente em cada pavimento, e as cargas verticais acumulam sem nenhuma redistribuição, imitando o processo que todos os profissionais utilizam a décadas.

Na 2ª etapa, onde as vigas **engastadas**, encontramos os efeitos de redistribuição de esforços provenientes do desequilíbrio de momentos que normalmente ocorrem em estruturas sem simetria. São calculados a partir dos momentos atuantes nos nós dos pilares, esforços bem mais corretos atuantes em vigas e pilares.

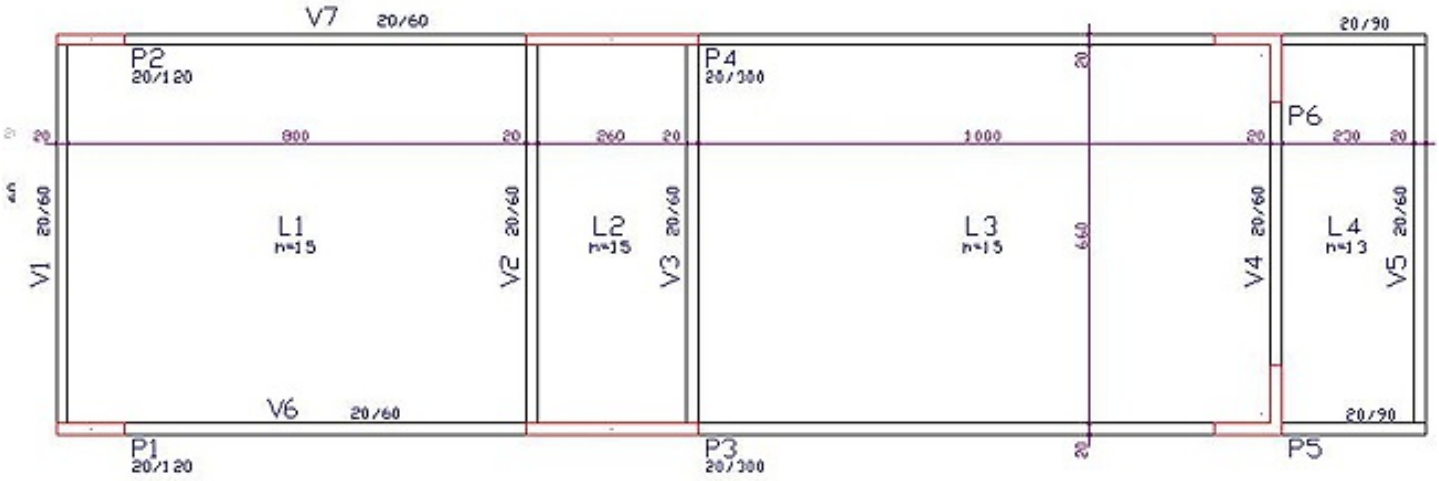
Como este modelo é muito refinado, pois depende de cargas estimadas corretamente declaradas e do refinamento dos modelos de grelha, julgo que durante a fase de estudos preliminares a utilização de modelos de grelha para obtenção de cargas verticais e a modelagem do pórtico espacial **clássico** são mais práticos, mas na fase final de projeto, onde buscamos o dimensionamento e detalhamento, estando com os modelos de grelha e cargas estimadas definidos, devemos modificar os dados do edifício e utilizar o MODELO INTEGRADO.

Vale salientar mais uma vez, que este modelo não contempla os efeitos de redistribuição de esforços provenientes de deformações em transições e a adoção de tirantes deve ser tratada com cuidado.

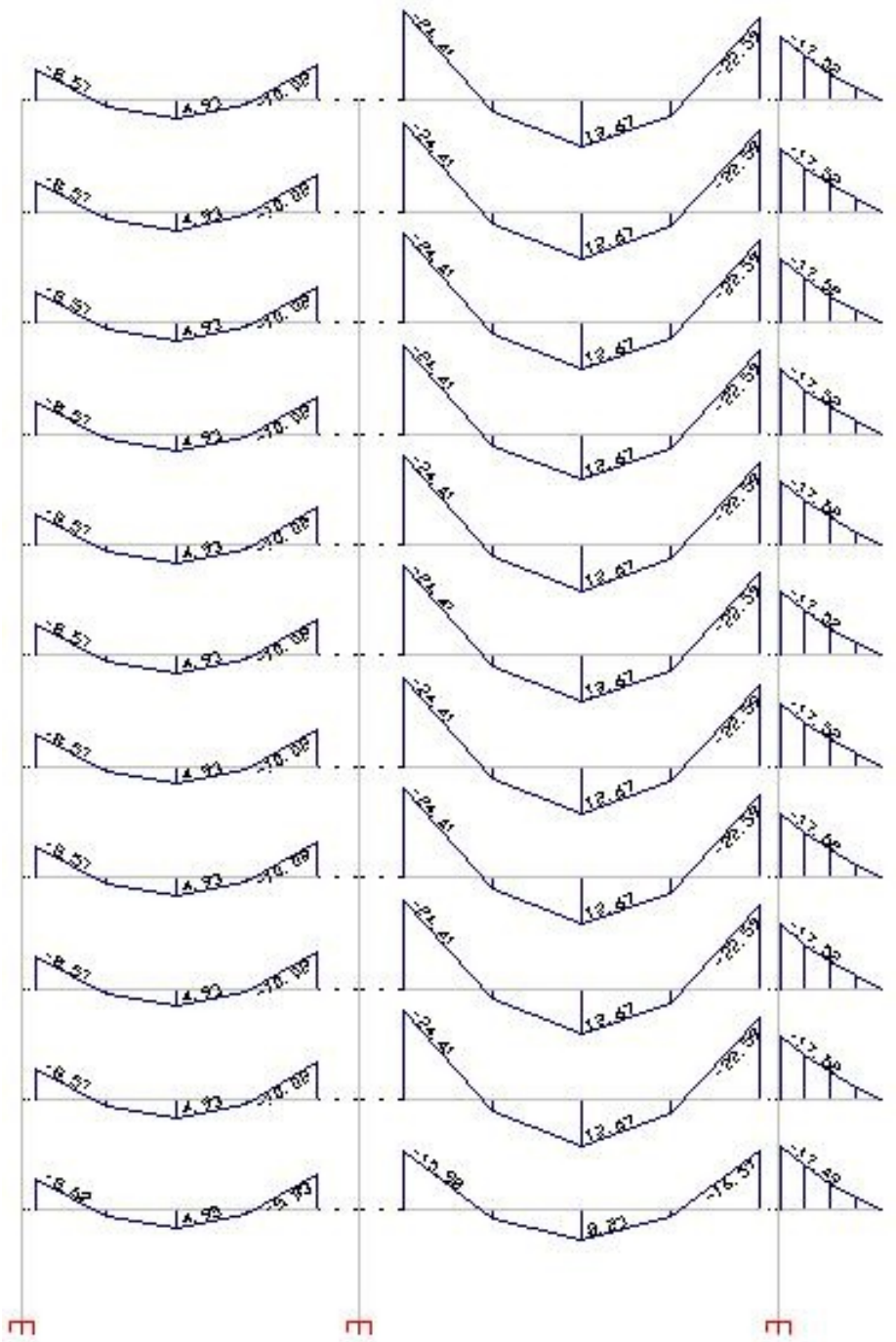
Nestas situações, sempre que analisarmos os pavimentos com modelos de grelha, e encontramos apoios que são deformáveis, devemos avaliar e impor coeficientes de mola de translação vertical (eixo Z) proporcionais às cargas atuantes e a deformação encontrada (Ktz=Reação de apoio da grelha/ deslocamento do nó do pórtico), independentemente do modelo de pórtico adotado (Clássico ou Integrado).

Exemplo:

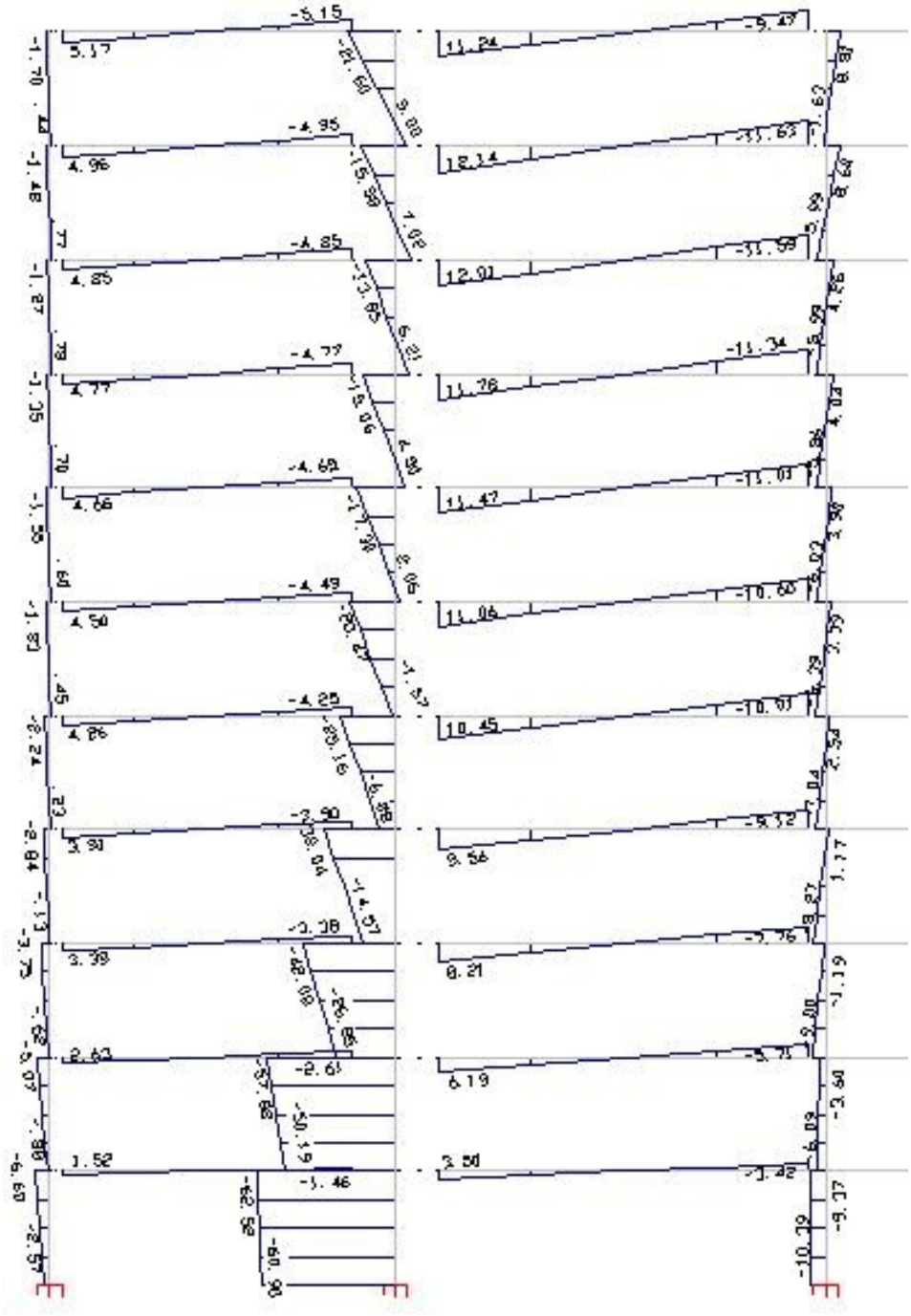
No pavimento abaixo foi definida uma carga distribuida de 4 tf/m (+ PP) na V3 , enquanto que a V2 não recebeu nenhuma carga além do PP, o que acarretará em um desiquilibrio nos nós dos pilares P2 e P5.



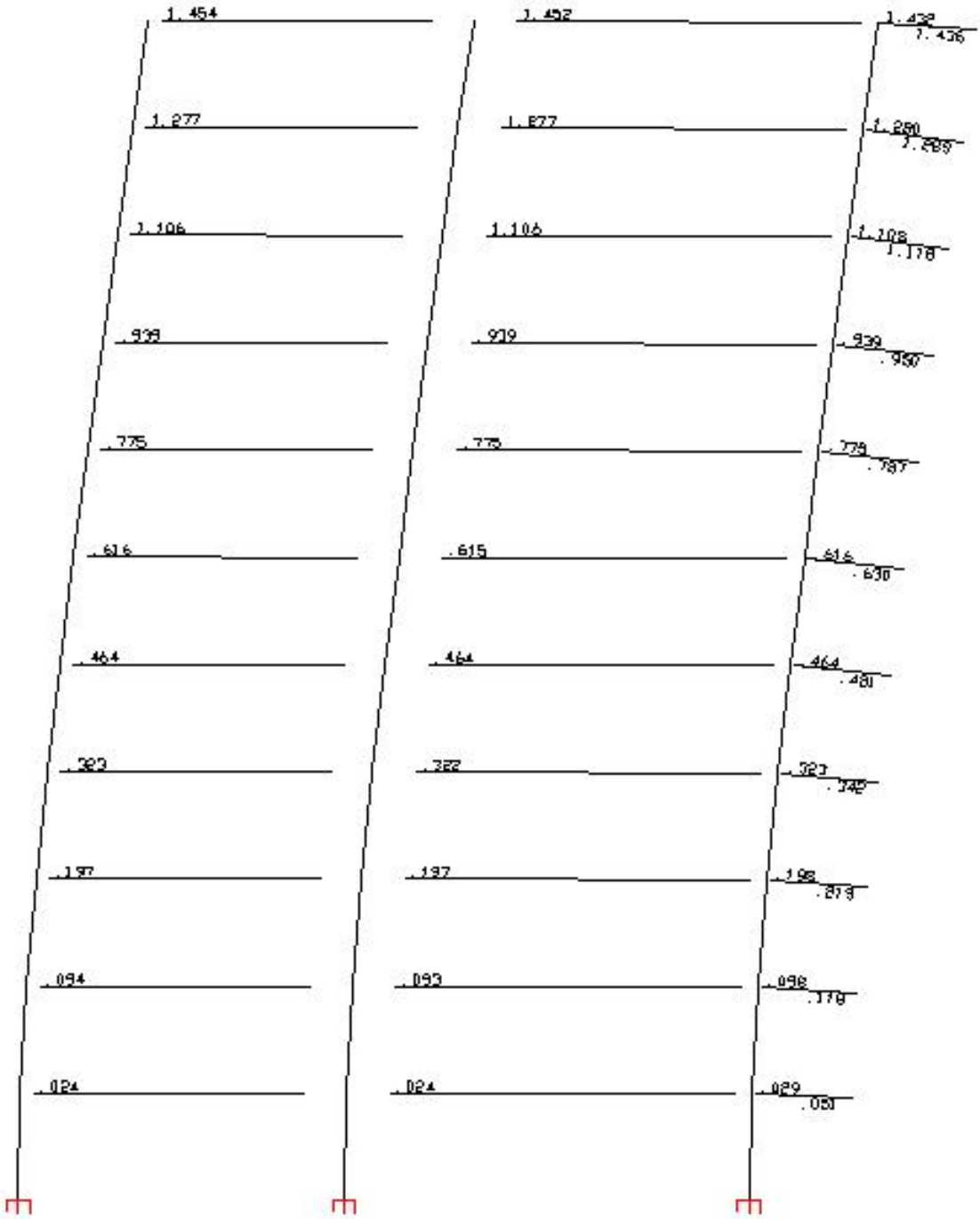
Vejamos agora os diagramas de momentos fletores resultantes do processamento na etapa Articulada:



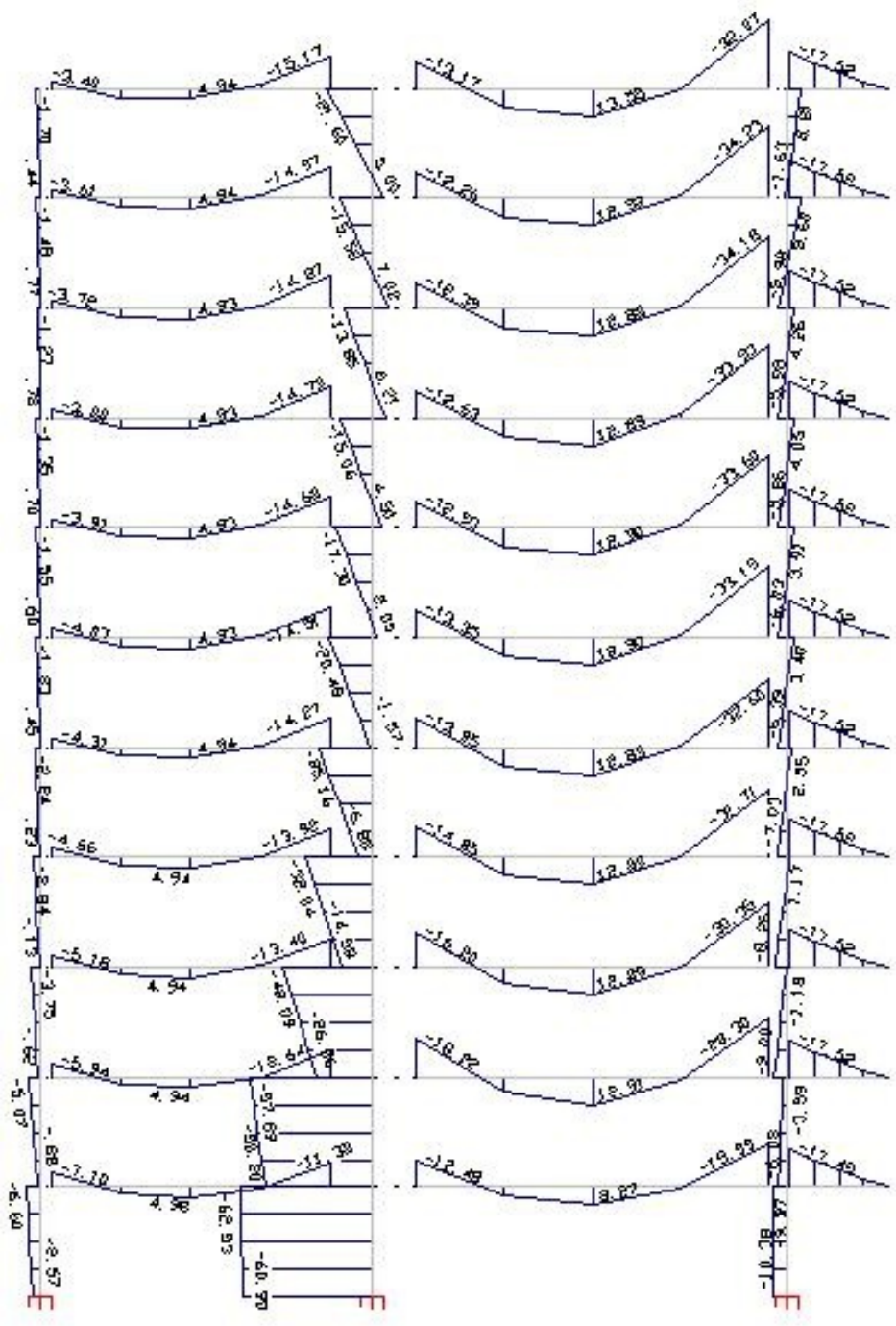
E os diagramas de momentos fletores resultantes do processamento na etapa Engastada:



E os deslocamentos desta etapa:



E os diagramas finais do modelo Integrado, onde as duas etapas são combinadas:



5. Recursos disponíveis para a modelagem estrutural e o funcionamento real da estrutura

Como já foi comentado no início deste texto, nenhuma estrutura executada funciona perfeitamente conforme o previsto em qualquer um dos modelos de cálculo citados.

As estruturas moldadas “in-loco” são executadas em etapas, e muitas das principais variáveis do funcionamento da estrutura não são consideradas nos nossos modelos. Vejamos alguns pontos a serem abordados:

Integridade do concreto em cada seção transversal que compõe a estrutura. A variabilidade do concreto lançado não poderia ser desprezada, e a retração inicial talvez seja hoje a principal geradora de fissuras.
O sistema de escoramento e a sua capacidade de absorver todos os esforços sem deformar (se o escoramento for flexível, uma boa parcela do carregamento de peso próprio já é transferida aos pilares)
Durante a construção, os pilares já sofrem deformações axiais, o que pode acarretar redistribuições de esforços.
Por outro lado, os efeitos de deformação axial nos pilares que encontramos nos modelos de pórtico espacial são minimizados porque provavelmente existem auto-correções durante a execução dos pavimentos, que são sempre nivelados, sendo que a deformação diferencial provocada pelos efeitos de deformação axial são imperceptíveis nesta

momento, sendo impossível a obtenção de dados reais sobre este fenômeno.
A protensão geralmente é realizada quando o concreto é muito jovem, e como geralmente a estrutura dos pavimentos acima ainda não está executada ou com rigidez suficiente para absorver os esforços que são introduzidos na estrutura, ocorrem, principalmente nos pilares, solicitações que não são previstas nos cálculos habituais.
Cada seção transversal de cada elemento estrutural está submetida a solicitações diferenciadas. Para encontrarmos esforços mais reais, deveríamos considerar através de diversas interações de cálculo com incremento de cargas, a inércia real dos elementos estruturais em cada ponto, o que configura a consideração da não linearidade física, sendo que nas diversas interações de cálculo deveríamos também tratar a estrutura em sua nova posição deformada, o que configura a não linearidade geométrica.
Porém, nestas interações de cálculo devemos levar em conta todas as fases de execução da estrutura (o efeito incremental) o que tornaria a análise um processo extremamente moroso, onde teríamos que avaliar para a concretagem de cada pavimento:
Características do concreto diferenciadas em cada pavimento
Todo o sistema de escoramento integrado a estrutura de concreto
A variação de recalques nas fundações, principalmente os diferenciais
A rigidez correta das fundações, principalmente a capacidade de rotação, importante para absorver os esforços de engastamento transmitidos pelos pilares.
Os efeitos da fluência ocorrem ao longo do tempo, e também alteram o comportamento da estrutura, principalmente em relação as deformações axiais nos pilares e a variação de inércia nas vigas
Nos elementos estruturais que recebem armaduras suplementares para combater esforços horizontais de vento, os efeitos de queda de inércia só ocorrerão quando atuar estes esforços, o que afetará a condição de funcionamento da estrutura daquele instante em diante.
E eu fico me lembrando das palestras sobre pontes estaiadas que aconteceram no IE, onde os eng. Catão Francisco Ribeiro e eng. Bernardo Golebiowski citaram um software francês (Bridge Construction – da J. Muller International) que tem condições de analisar as diversas etapas de montagem de uma ponte, onde o tabuleiro é lançado e protendido em etapas, e para cada etapa de montagem os estais recebem uma nova parcela de protensão para re-equilibrar as cargas. Este deve ter sido o modelo de análise incremental mais sofisticado que já vi até hoje, e mesmo neste tipo de análise estrutural, nenhum dos efeitos citados acima devem ter sido considerados.

Tudo isto está muito distante da realidade do estágio atual da engenharia de estruturas de concreto armado. As análises estruturais são baseadas em modelos elásticos, e sempre são utilizadas teorias clássicas para obtenção das inércias e analises estáticas lineares.

Atualmente, o melhor modelo que podemos gerar de forma consistente é o modelo de pórtico espacial da estrutura completa.

Para simular alguns dos efeitos citados temos nos sistemas TQS alguns parâmetros que podem ser ajustados pelo usuário para a geração do modelo:

Coeficiente MULAXI – aumenta a área dos pilares para atenuar os efeitos da deformação axial

Coeficiente REDFLX – fator divisor da inércia a flexão de vigas e pilares

Coeficiente REDTOR – fator divisor da inércia a torção de vigas e pilares

Articulação de pilares – Podemos atribuir articulação no topo / base

COEF. DE MOLAS – Podemos atribuir coeficientes de mola para simular a rigidez real dos elementos de fundação.
Podemos também resolver a estrutura através de uma **análise não linear geométrica**.

Quando partimos para a análise espacial da estrutura, temos que estar preparados para interpretar os resultados, que passa a ser a etapa mais penosa de todo o trabalho.

Em um modelo mais complexo, poderíamos discretizar os pilares-parede em diversos elementos de casca (ou barras), mas isto dificultaria a interpretação dos resultados e também afetaria o dimensionamento/detalhamento dos pilares, pois teríamos grandes dificuldades para obter os esforços totais resultantes atuantes em todo o pilar. Devemos lembrar que hoje o dimensionamento pelo processo exato parte da hipótese de seção plana.