

## Visão Geral

### Filosofia Geral TQS

A busca por uma modelagem numérica que gere resultados condizentes com o comportamento real de um edifício de concreto armado é um paradigma na Engenharia de Estruturas, uma vez que a análise estrutural tem influência direta e significativa na segurança da estrutura, no conforto dos moradores e no consumo de materiais utilizados na sua construção.

Diante disso, a TQS sempre primou em oferecer ao Engenheiro recursos e ferramentas que permitam a execução de uma análise estrutural confiável, segura e consistente.

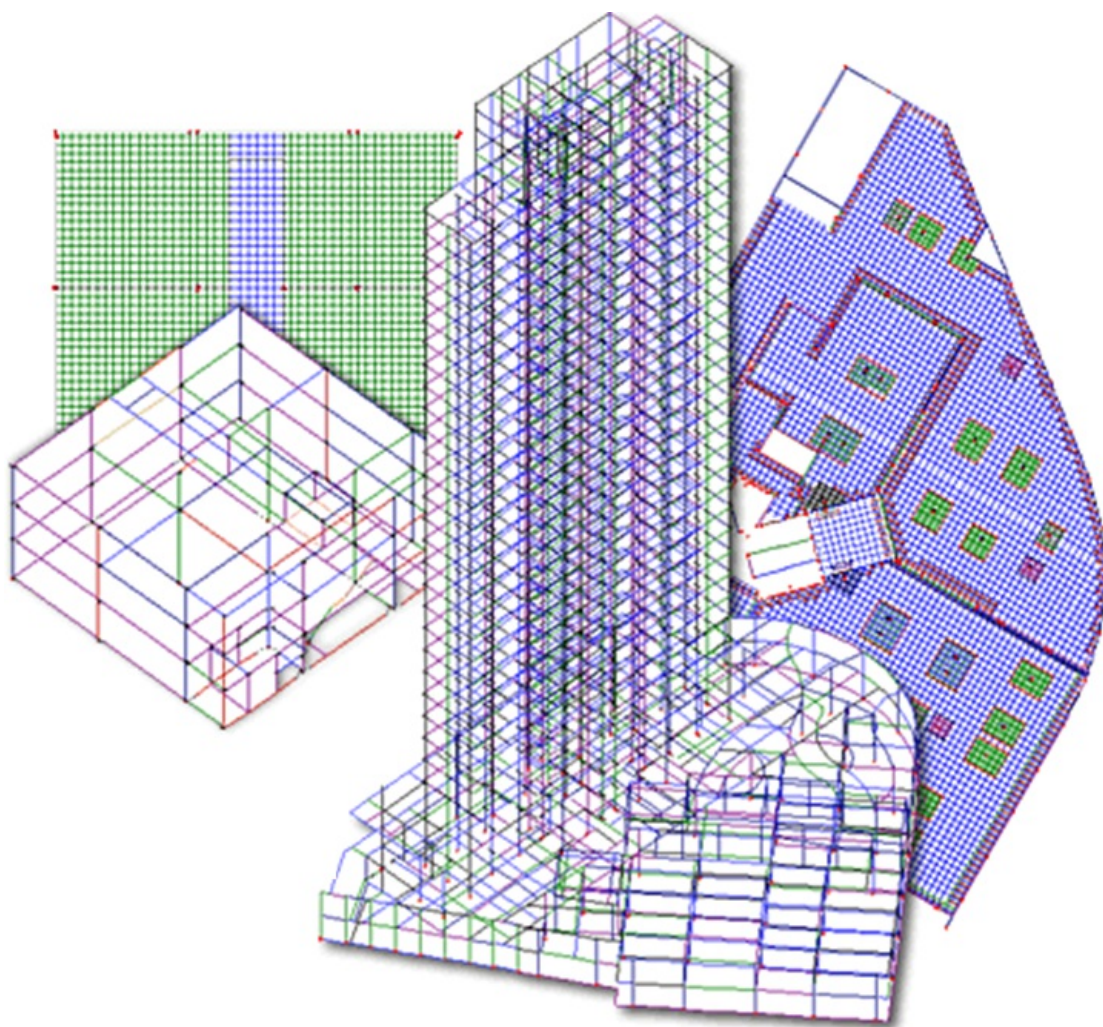
Ao longo de anos, inúmeras tecnologias inovadoras e inéditas foram implantadas no sistema, tornando a análise totalmente diferenciada e adequada para o cálculo de edifícios de concreto armado.

É importante lembrar, no entanto, que ao mesmo tempo em que a análise estrutural presente no sistema tornou-se mais refinada e inevitavelmente mais complexa, aspectos relevantes como a simplicidade, a transparência e a produtividade jamais foram deixadas de lado.

Portanto, como filosofia geral de desenvolvimento de ferramentas de análise presente no sistema /TQS, podemos destacar: *"aprimorar a análise estrutural de edifícios de concreto armado por meio de técnicas avançadas, auxiliando o Engenheiro de Estruturas na busca de respostas mais precisas e realistas, de forma produtiva e transparente"*.

### Abrangência

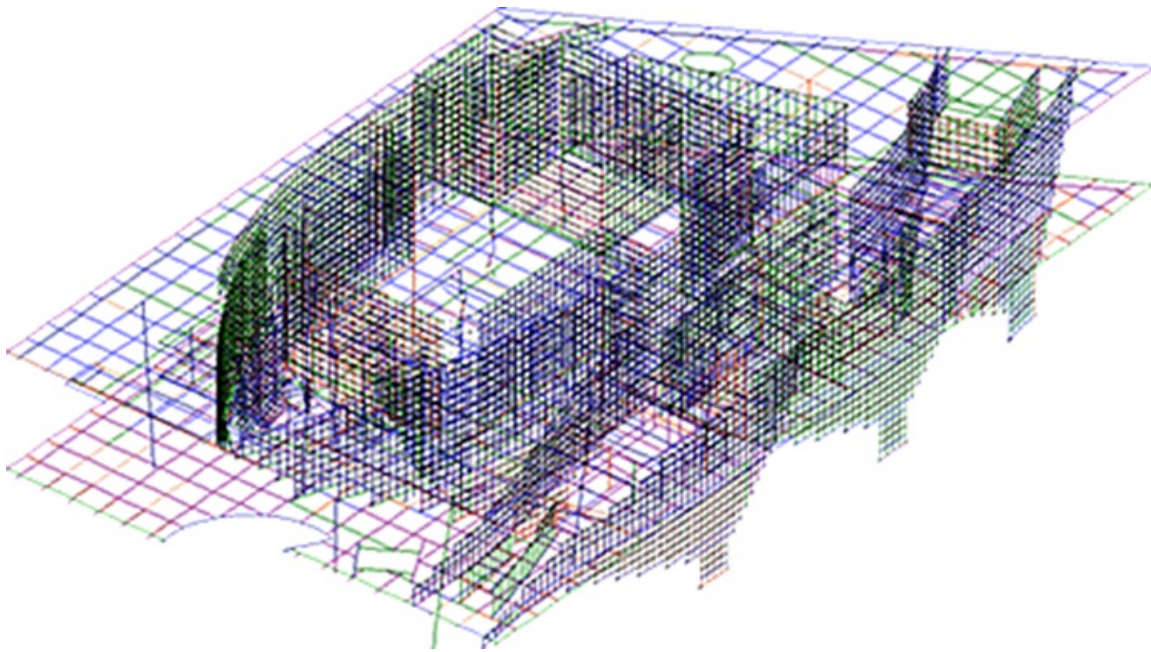
Basicamente, toda a modelagem estrutural efetuada pelo sistema TQS está direcionada para a análise de edifícios de concreto armado compostos por múltiplos pavimentos, sejam eles de pequeno porte (residências, sobrados, com geometria regular) ou de grande porte (edifícios altos e complexos).



A análise contempla todos os tipos de elementos estruturais comuns em edifícios usuais de concreto, tais como: viga, pilar, pilar-parede, laje de diversas tipologias (maciça, nervurada, lisa, cogumelo, pré-moldada e treliçada), elementos de fundação (sapata, viga-baldrame, bloco sobre estaca) e elementos inclinados (viga, pilar, rampa e escada).

Pode-se também incluir na análise estrutural elementos com materiais e seções diferentes, como por exemplo: um perfil metálico, uma terço de cobertura de madeira, etc. Evidentemente, as suas características geométricas e morfológicas necessitam ser perfeitamente conhecidas.

Vale lembrar também que, devido à generalidade e ao total controle de dados dos modelos gerados pelo sistema, pode-se realizar a análise de estruturas de edificações de concreto não-usuais, tais como: monumentos, obras de arte, silos, caixas d'água, etc. Obviamente, nesses casos, há a necessidade do Engenheiro adequar e validar a modelagem adotada com maiores precauções.



## Modelagem

De uma forma geral, a modelagem estrutural de um edifício de concreto armado composto por múltiplos pavimentos pode ser realizada das seguintes formas no sistema TQS:

Cada pavimento de concreto presente na edificação é modelado de forma independente (grelha, grelha somente de vigas, vigas contínuas + lajes por processo simplificado).

A estrutura do edifício como um todo é modelada espacialmente com todos os pavimentos presentes na estrutura de forma conjunta (pórtico espacial com apenas vigas e pilares).

ou

Toda estrutura é modelada por um pórtico espacial único, contemplando todos os elementos (vigas, pilares e lajes).

## Modelos Adequados

Na análise de edifícios de concreto armado, na medida do possível, deve-se evitar o uso de modelos puramente elásticos, uma vez que os mesmos deixam de considerar características importantes da estrutural real, tais como a fissuração, trechos rígidos, não-linearidades, efeitos construtivos, fluência etc.

O TQS possui uma modelagem totalmente direcionada para análise de edifícios de concreto, que contempla uma série de adaptações no cálculo da estrutura, de tal modo a obter respostas condizentes com os edifícios reais.

Embora se baseiem nos modelos clássicos de grelha e pórtico espacial, a Grelha-TQS<sup>®</sup> e o Pórtico Espacial-TQS<sup>®</sup> possuem características especiais que os tornam adequados para análise de estruturas de concreto.

Eis algumas características especiais presentes na modelagem TQS: consideração de efeitos construtivos, flexibilização das ligações viga-pilar, redistribuição de esforços, plastificações, fissuração, existência de trechos rígidos, consideração da fluência do concreto, tratamento especial para vigas de transição e tirantes etc.

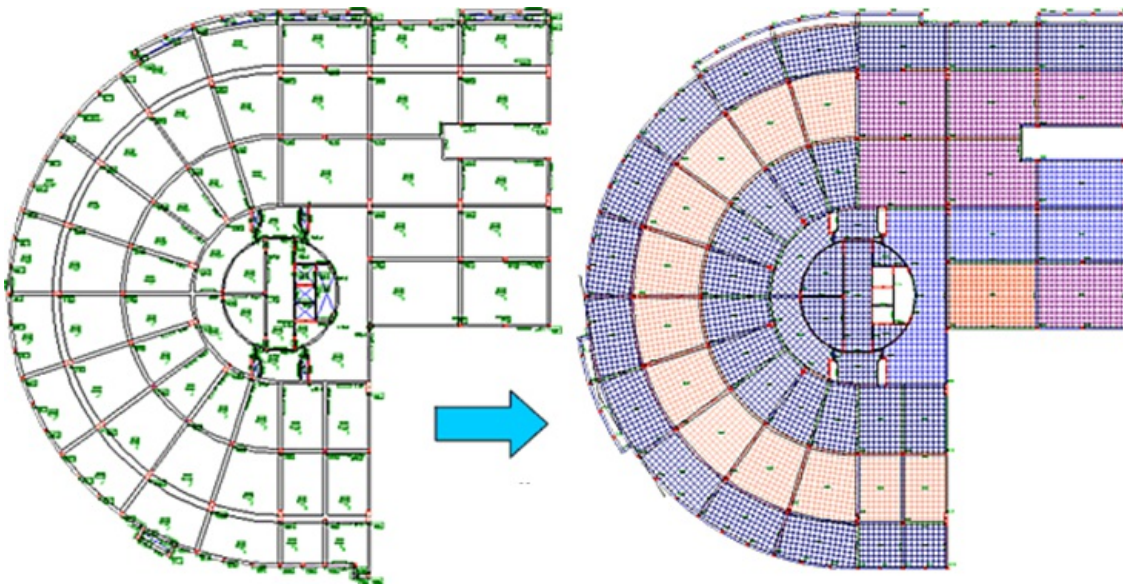
## Geração Automática

Toda a geração dos modelos numéricos utilizados no cálculo da estrutura é realizada de forma automática no TQS, de acordo com o lançamento de dados (geometria do edifício e cargas) e a escolha de critérios definidos pelo Engenheiro. Eis alguns exemplos:

A discretização da malha de barras das grelhas em cada pavimento é gerada de forma automática.

O modelo de pórtico espacial é automaticamente gerado com barras que simulam as vigas, pilares e lajes.

As forças que simulam a ação do vento no edifício são geradas de forma automática.



## Controle e Transparência

O TQS permite que o Engenheiro tenha o controle total da modelagem estrutural por meio da configuração de critérios de projeto, bem como da edição direta dos dados dos modelos estruturais gerados pelo sistema.

Além disso, há uma total transparência durante toda a modelagem estrutural. Todos os dados dos modelos (geometria, materiais, seções, cargas e combinações), bem como os resultados (deslocamentos, esforços e reações) ficam integralmente disponíveis ao Engenheiro para consulta, verificação e análise. Há relatórios, editores e visualizadores gráficos específicos para esses fins, tornando a execução dessas tarefas mais eficiente e segura.

## Recursos Gráficos e Visualizadores

O TQS dispõe de diversos visualizadores gráficos que auxiliam significativamente a avaliação e interpretação de resultados (deslocamentos, esforços e reações) em modelos de grelha e pórtico espacial.

A manipulação correta dessas ferramentas é essencial para que a análise estrutural seja realizada de forma eficiente e segura.

## Análise Completa

Durante a elaboração de um projeto no sistema TQS, podem-se efetuar diversos tipos de análises estruturais, desde as mais simples (análise linear com ou sem redistribuição de esforços) até as mais sofisticadas (análise não-linear).

## Análise Não-linear

No TQS, inúmeros aspectos relacionados às não-linearidades física e geométrica, fundamentais no cálculo de uma estrutura de concreto armado, em modelos ELU e ELS, são adequadamente considerados. Eis alguns exemplos:

Análise não-linear física refinada baseada no cálculo de rigidez por meio da montagem de relações momento-curvatura ( $M \times 1/r$ ).

Não-linearidade física aproximada por meio da definição de coeficientes redutores de rigidez.

Análise não-linear geométrica refinada baseada na correção numérica da posição deformada da estrutura, usualmente denominada P-.

Não-linearidade geométrica aproximada por meio de formulações matemáticas consagradas.

## Estabilidade Global e Efeitos de 2ª Ordem

A verificação da estabilidade global por meio de parâmetros como o coeficiente  $\alpha$ , bem como o cálculo dos efeitos de 2ª ordem (global, local e localizado) são realizados pelo sistema de forma automática e bastante refinada.

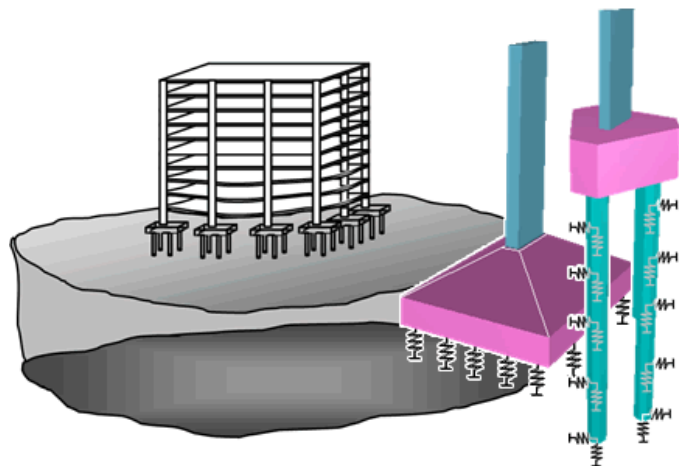
A estabilidade global da edificação pode ser avaliada em qualquer sentido da estrutura.

Os efeitos globais de 2ª ordem podem ser analisados pelo método aproximado especificado na ABNT NBR 6118

(0,95. z) ou pelo processo P- em dois passos. Os efeitos locais e localizados de 2ª ordem, específicos para pilares e pilares-parede, podem ser calculados pelos 4 métodos presentes na ABNT NBR 6118 (pilar-padrão com 1/r aproximada, pilar-padrão com rigidez aproximada, pilar-padrão acoplado a diagramas N, M, 1/r e método geral).

## Interação Solo-Estrutura

No TQS, há a possibilidade de considerar a interação entre a superestrutura e a infra-estrutura (interação solo-estrutura) de um edifício.



O cálculo de esforços solicitantes leva em consideração a presença do solo em contato com as sapatas, estacas, tubulões, etc. Conseqüentemente, os elementos da superestrutura (pilares e vigas) também terão seus esforços determinados com a consideração da presença da fundação, do solo e de seus deslocamentos (recalques diferenciais, rotações na base, etc.).

Trata-se de uma modelagem inovadora, inédita, e que possibilita tornar a análise estrutural de edifícios de concreto armado muito mais realista e precisa.

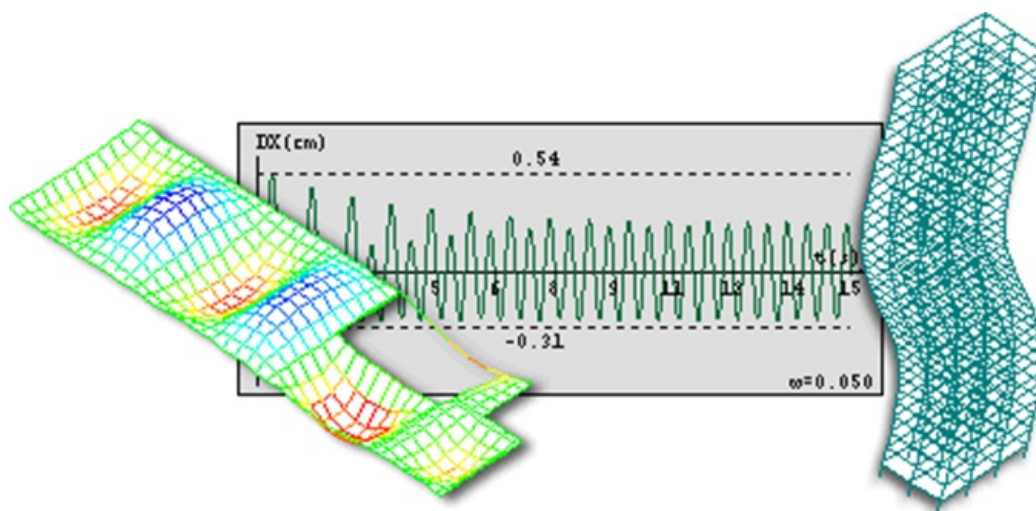
## Análise Dinâmica

No TQS, é possível realizar a análise dinâmica de pavimentos de concreto armado (grelha) e do edifício como um todo (pórtico espacial), a fim de verificar o Estado Limite de Vibrações Excessivas.

Essa análise objetiva essencialmente fazer o estudo do conforto dos moradores durante o uso da construção e pode ser realizada de duas formas:

Simplificada: estimativa da resposta da estrutura por meio da limitação da frequência própria fundamental da estrutura (vibrações livres) dentro de níveis considerados aceitáveis de acordo com a percepção humana.

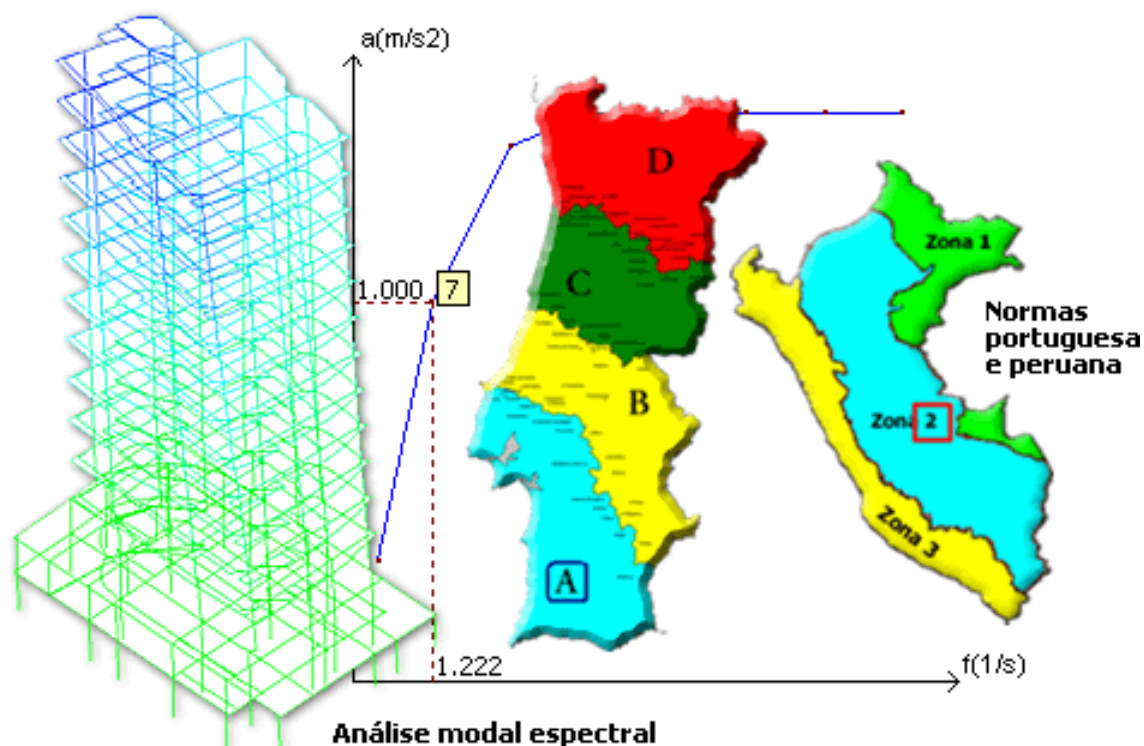
Refinada: avaliação da resposta da estrutura perante a atuação de excitações externas (vibrações forçadas), por meio do cálculo dos deslocamentos, velocidades e acelerações ao longo do tempo (*time-history*). Essas ações dinâmicas podem ser, por exemplo: atividades de seres humanos, funcionamento de equipamentos mecânicos e a atuação de rajadas de vento.



No caso da análise do conforto perante a atuação de rajadas de vento, é possível ainda calcular as acelerações pelo método dinâmico especificado na ABNT NBR 6123.

## Análise Sísmica

No TQS, é possível avaliar os efeitos de ações sísmicas num edifício de concreto armado por meio de uma análise modal espectral. Podem ser configurados espectros de resposta quaisquer, bem como também é possível realizar análises específicas de acordo com as normas argentina, portuguesa e peruana.



## Modelos ELU e ELS

A seguir, será apresentado um resumo dos principais modelos direcionados para a análise no ELU e no ELS contemplados pelo sistema TQS.

### Modelos ELU

São modelos destinados ao dimensionamento e avaliação da capacidade resistente de um edifício de concreto armado.

### Vigas contínuas + lajes por processos simplificados

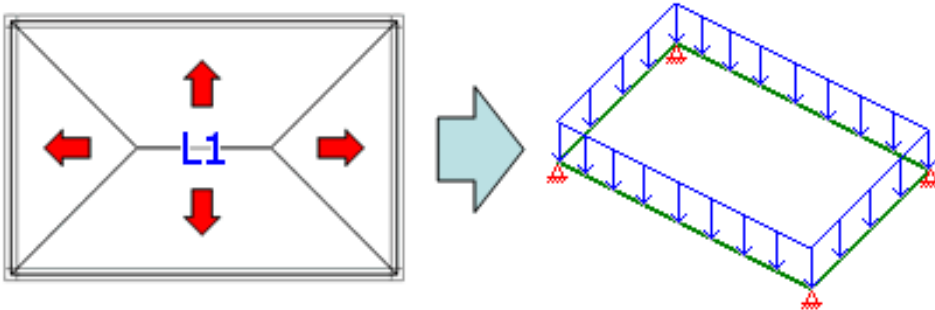
Modelo direcionado para obtenção de esforços para o dimensionamento das vigas e lajes de um pavimento. Os esforços nas vigas são calculados pelo modelo clássico de viga contínua, e nas lajes por métodos aproximados

(Czerny, Marcus, etc.).

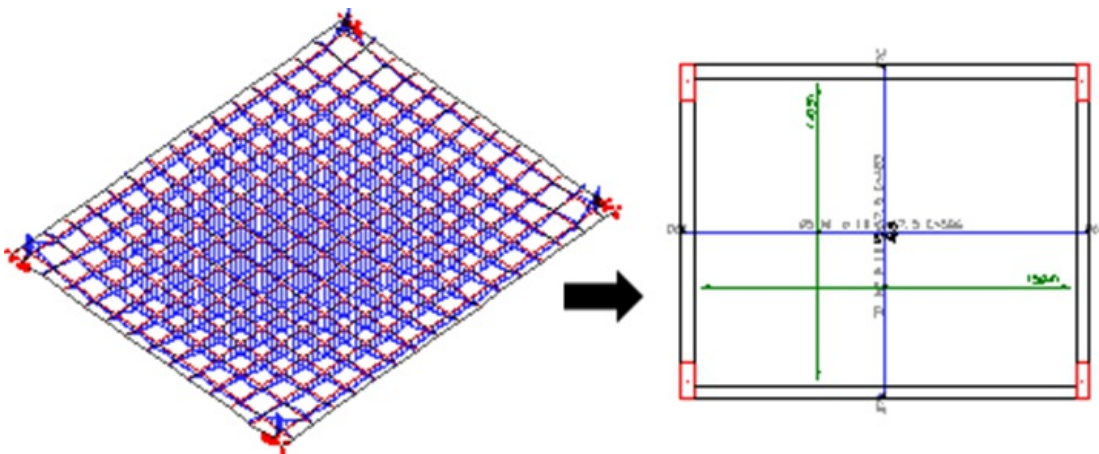
## Grelha

Há duas opções no sistema: "Grelha somente de vigas" e "Grelha de vigas e lajes discretizadas".

A primeira opção é direcionada para análise de pavimentos sem lajes, como por exemplo, uma fundação com vigas baldrame, mas também pode ser adotada no cálculo de pisos com a presença de lajes. Nesse caso, as cargas das mesmas são distribuídas nas vigas por área de influência ("telhado"), e somente a interação entre estas é levada em conta.



Na segunda opção, as lajes (planas ou nervuradas) são discretizadas por uma malha de barras em conjunto com as vigas, tornando a análise muito mais completa e precisa. Trata-se de um modelo direcionado para obtenção dos esforços para o dimensionamento de lajes.

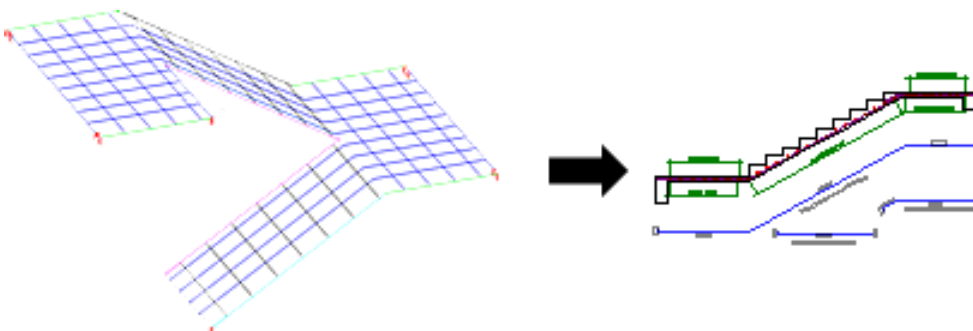


Tanto no modelo de "Grelha somente de vigas" como na "Grelha com vigas e lajes discretizadas", as solicitações obtidas nas vigas podem ser consideradas para dimensionamento. Contudo, é importante ressaltar que nesses casos, os efeitos globais do edifício (ex.: vento, equilíbrio espacial, etc.) não serão levados em conta.

## Pórtico espacial (Pavimentos)

Modelo composto de barras dispostas num plano horizontal, com 6 graus de liberdade. É utilizado na análise de pavimentos com a presença de esforços normais (Ex.: retração, protensão).

É importante lembrar que, em pavimentos com a presença de elementos inclinados, como rampas e escadas, a modelagem por grelha também é substituída por um pórtico espacial.



## Pórtico espacial ELU (Edifício)

Modelo espacial direcionado para o cálculo dos esforços para o dimensionamento de vigas, pilares, lajes e elementos de fundação.

É também o modelo utilizado para verificação da estabilidade global do edifício, bem como para o cálculo dos efeitos globais de 2ª ordem.

## Pórtico não-linear físico e geométrico (NLFG)

Modelo espacial que abrange toda a estrutura composta pelas vigas e pilares de um edifício, e que pode ser utilizado na verificação desses elementos perante as solicitações normais no Estado Limite Último (ELU).

Nesse modelo, as não-linearidades física e geométrica são tratadas de forma bastante refinada. As imperfeições geométricas (globais e locais) e os efeitos da fluência também podem ser considerados.

Trata-se de um modelo inovador e adequado para casos em que é necessário otimizar o projeto ou verificar a estrutura globalmente com muita precisão.

## Modelos ELS

São modelos adotados na verificação do desempenho em serviço de um edifício de concreto armado

### Grelha

Trata-se do mesmo modelo de grelha ELU descrito anteriormente. Através dele, é possível fazer apenas uma estimativa de flechas (calculadas elasticamente). A fluência é considerada de forma bastante simplificada (majoração direta das flechas imediatas).

### Grelha não-linear

Modelo de grelha que considera a não-linearidade física de forma bastante refinada (relações momento-curvatura). Leva em conta a fissuração do concreto, a presença de armaduras e a fluência.

É ideal para verificação refinada de flechas e de aberturas de fissuras em um pavimento de concreto armado.

### Pórtico espacial ELS

Modelo espacial direcionado para verificação dos deslocamentos provocados pelas ações horizontais (ex.: vento).

É também o modelo recomendado para análise dinâmica em serviço (verificação do conforto perante as vibrações ocasionadas pelas rajadas de vento).

## Navegação no Gerenciador-TQS®

Se configurado o uso de grelhas para análise dos pavimentos e do pórtico espacial para modelagem global do edifício, durante a análise estrutural, toda a navegação no Gerenciador-TQS fica restrita aos subsistemas Grelha-TQS® (para cada pavimento) e Pórtico-TQS® (pasta Espacial).

Esses subsistemas podem ser ativados diretamente na barra de ferramentas principal do Gerenciador-TQS®, conforme mostra a figura a seguir.



1: Subsistemas Grelha-TQS e Pórtico-TQS

Na árvore do edifício, os dados e resultados do pórtico espacial ficam no item "Espacial", enquanto que os dados e resultados de cada grelha em cada pavimento correspondente.





1: Pórticos ELU e ELS

2: Grelhas dos pavimentos

## Processamento Global

Recomendamos fortemente que toda a análise estrutural seja executada por meio do processamento global. Apenas pequenos ajustes e testes devem ser processados localmente.

Quando definido os Modelos IV ou VI, deve-se utilizar sempre o processamento global, pois é extremamente complicado executar todos os comandos locais de forma sequencial corretamente. Só para se ter uma ideia, quando um edifício é modelado por pórtico espacial e os seus pavimentos por grelha, e ainda há a presença de vigas de transição, durante o processamento global são gerados e processados 4 pórticos espaciais (3 ELU e 1 ELS).

Para efetuar toda a análise estrutural de um edifício, NÃO é necessário ativar os itens relacionados ao dimensionamento e detalhamento de armaduras.

## Recomendações

Conforme se pôde observar no item anterior, há vários modelos estruturais disponíveis no sistema TQS. Cabe ao Engenheiro escolher o modelo a ser adotado no cálculo de um edifício. A definição e a validação do modelo estrutural utilizado no cálculo de um edifício são de total responsabilidade do Engenheiro.

A seguir, seguem algumas recomendações para a modelagem de edifícios usuais de concreto armado no sistema. Evidentemente, que o que se recomenda a seguir deve ser minuciosamente verificado e analisado pelo Engenheiro em cada caso.

## Modelagem de Pavimentos

No sistema TQS, os seguintes modelos estruturais podem ser adotados para análise de um pavimento de concreto armado:

Vigas contínuas + lajes por processo simplificado

Grelha somente de vigas

Grelha de lajes + vigas

Pórtico espacial

Recomendamos que a análise de pavimentos de concreto armado seja realizada por meio de "grelhas de vigas e lajes" ou "pórtico espacial", pois obtém-se resultados mais precisos do que a análise por "vigas contínuas + lajes por processos aproximados" ou "grelha somente de vigas".

Em certas condições, esses dois últimos modelos podem gerar uma distribuição de esforços incondizentes com a realidade. Por exemplo: numa laje retangular apoiada em vigas com diferentes rigidezes, a distribuição dos esforços solicitantes nesses elementos não fica correta.

# Modelagem Global do Edifício

No sistema TQS, na aba "Modelo" da janela de dados do edifício, há cinco opções para modelagem global de um edifício.

Apenas nos modelos III, IV e VI, o edifício é analisado espacialmente por um modelo de pórtico. No modelo I, o Engenheiro é obrigado a efetuar toda análise manualmente no sistema. No modelo II, a análise do vento é muito simplificada. O modelo V foi mantido no sistema apenas para compatibilidade com processamentos antigos e não pode ser definido para edifícios novos.

Os modelos I, II e III somente devem ser utilizados em casos particulares e com restrições. De uma forma geral, recomendamos o uso dos Modelos IV e VI.

## Modelo I

A modelagem do edifício deverá ser realizada de forma 100 % manual. Com esse modelo, não será possível realizar o processamento global da estrutura. Toda a sequência de comandos a serem executados para o cálculo da estrutura deverá ser coordenada manualmente, inclusive a transferência de esforços para o dimensionamento dos elementos. O uso deste modelo não é recomendado.

## Modelo II

O edifício não será modelado por pórtico espacial. Os efeitos oriundos da ação do vento nos pilares serão calculados por modelos muito simplificados. Os efeitos gerados pelas ações verticais nas vigas, pilares e lajes serão calculados de acordo com os modelos selecionados para os pavimentos, e serão acumulados piso-a-piso. O uso deste modelo não é recomendado.

## Modelo III

O Modelo III é um bom modelo e é analisado por pórtico espacial. Porém, não é capaz de flagrar os esforços provenientes do equilíbrio espacial do edifício gerado pelas cargas verticais, pois somente os resultados da aplicação das ações horizontais no pórtico espacial são transferidos para o dimensionamento de vigas e pilares.

Os esforços devidos às cargas verticais calculados no pórtico espacial não são considerados.

Além disso, no modelo III também não é feito o tratamento especial para vigas de transição e as cargas nas barras de viga do pórtico provenientes das lajes são distribuídas por área de influência (dependendo do caso, essa distribuição de esforços torna-se imprecisa). O uso deste modelo não é recomendado.

## Modelo IV

Trata-se de um modelo estrutural cujos esforços solicitantes decorrentes da aplicação das ações verticais e horizontais calculados pelo pórtico espacial ELU são utilizados no dimensionamento das vigas, pilares e Fundações do edifício.

No Modelo IV, a distribuição das cargas das lajes nas vigas do pórtico espacial é realizada automaticamente por meio da transferência das reações das barras de lajes presentes no modelo de grelha (desde que o pavimento seja analisado pelo modelo de "grelha de vigas e lajes").

Resumindo, o modelo IV é definido pelas seguintes características:

Os esforços oriundos das ações verticais e horizontais são calculados por um único modelo de pórtico espacial (ELU) e utilizados no dimensionamento de vigas e pilares.

Possibilidade de tratamento especial para vigas de transição e tirantes.

Transferência automática das reações das barras de laje obtidas na modelagem por grelha como carregamento das vigas do pórtico espacial.

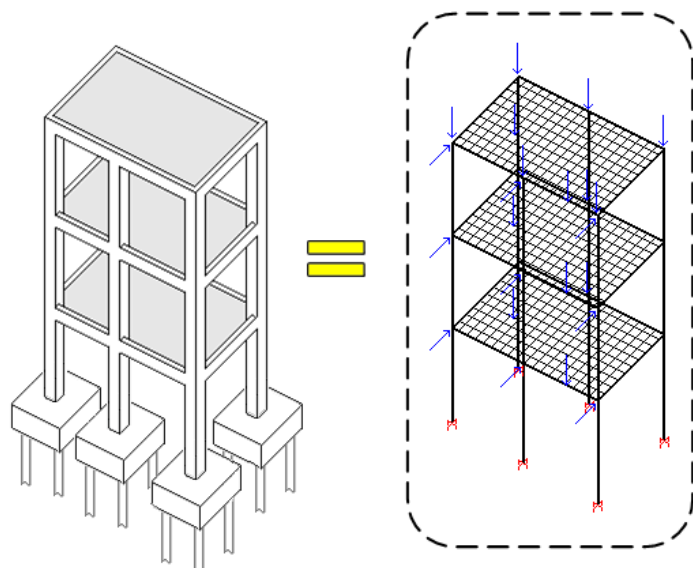
## Modelo VI

Trata-se de um modelo único, cujos esforços solicitantes decorrentes da aplicação das ações verticais e horizontais

calculados pelo pórtico espacial ELU são utilizados no dimensionamento das vigas, lajes, pilares, e Fundações do edifício.

O Modelo VI representa um novo modelo de análise estrutural, onde cada elemento estrutural (lajes, vigas e pilares) são representados em um único pórtico espacial que é então utilizado para obtenção dos esforços para dimensionamento de todos os elementos estruturais do edifício.

Ou seja, todos os esforços e deslocamentos são obtidos de uma única vez, não sendo mais feita transferências de esforços entre diferentes modelos. Este conceito torna o Modelo VI mais consistente do ponto de vista teórico e permite a análise de edifícios singulares que anteriormente não eram possíveis.



O efeito de diafragma rígido da laje é levado em conta neste modelo com a própria discretização das lajes no modelo estrutural, não sendo necessário qualquer tipo de artifício para sua consideração.

No Modelo VI todos os carregamentos estão presentes durante a análise estrutural, deste modo, as lajes irão receber esforços devido aos esforços horizontais, como o vento, devendo aparecer esforços importantes de força normal no dimensionamento da flexão composta das lajes.

## Critérios de Projeto

Toda a modelagem estrutural presente no sistema é realizada de acordo com a configuração de inúmeros critérios de projeto. É necessário ter um total controle e conhecimento para alterá-los.

A configuração correta dos critérios que governam a modelagem é de responsabilidade do Engenheiro e não do sistema.

Eis alguns exemplos de critérios que podem afetar drasticamente a modelagem estrutural:

Definição da extensão de trechos rígidos nos modelos de grelha e pórtico espacial.

Consideração de apoios elásticos independentes na grelha.

Consideração de flexibilização das ligações viga-pilar no pórtico espacial.

Consideração de efeitos construtivos no pórtico espacial.

Adaptação da rigidez à torção e flexão nos modelos de grelha e pórtico espacial.

## Validação de Resultados

Todo modelo numérico, por mais sofisticado que seja, possui limitações. Afinal de contas, trata-se de uma aproximação da estrutura real. Inúmeras hipóteses são adotadas de tal forma a possibilitar seu cálculo.

É indispensável que o Engenheiro sempre valide os resultados obtidos durante a análise estrutural, pois por meio dela é que se "enxerga" o como o edifício está se comportando.

Procure utilizar os inúmeros recursos gráficos disponíveis no sistema para avaliar os resultados. Procure averiguar como a estrutura está sendo modelada no computador. É nessa hora que o Engenheiro deve usufruir dos benefícios proporcionados pela informática.