

## Pórtico NLFG

O Pórtico não-linear físico e geométrico, de agora em diante chamado apenas por "Pórtico NLFG", é um 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, cada vão de viga e lance de pilar é dividido em inúmeras barras, cuja rigidez à flexão é calculada a partir das relações momento-curvatura obtidas de acordo com a geometria, armadura detalhada e esforços atuantes nesses elementos.

A posição final de equilíbrio da estrutura é calculada iterativamente, levando-se em conta os efeitos globais e locais de segunda ordem de forma conjunta.

Podem ser também considerados os efeitos gerados pela fluência e por imperfeições geométricas globais e locais.

Trata-se, portanto, de um modelo que reúne diversas características (NLF, NLG, fluência, imperfeições geométricas), que são tratadas de forma refinada, permitindo assim uma análise mais realista do comportamento da estrutura, e conseqüentemente, uma otimização na elaboração do projeto estrutural de edifícios de concreto.

## Visão Geral

Por se tratar essencialmente de um processo de verificação, o modelo global e as armaduras nos elementos necessitam estar previamente definidos. Em outras palavras, o edifício necessita estar processado globalmente antes de iniciar a análise pelo Pórtico NLFG, inclusive o dimensionamento e detalhamento de vigas e pilares.

Uma vez atendido esses pré-requisitos, basta então configurar um conjunto de critérios, gerar e processar o Pórtico NLFG, e finalmente, verificar os resultados obtidos num visualizador gráfico.

Veja, a seguir, um fluxograma que resume os principais passos necessários para realizar uma análise por meio do Pórtico NLFG.

### I Pré-requisitos

O Processamento global de ser executado previamente;

O Pórtico espacial ELU (FORnnnn,POR) Deve ter sido gerado;

O Dimensionamento e detalhamento dos pilares deve ter sido realizado;

O Dimensionamento e detalhamento das vigas deve ter sido realizado.

### II Critérios de projeto

Nos critérios gerais de Pórtico-TQS, configurar os critérios.

### III Imperfeições geométricas

No TQS-PREO, definir imperfeições geométricas.

### IV Processamento

No TQS-PREO, gerar e processar o Pórtico NLFG.

### IV Processamento

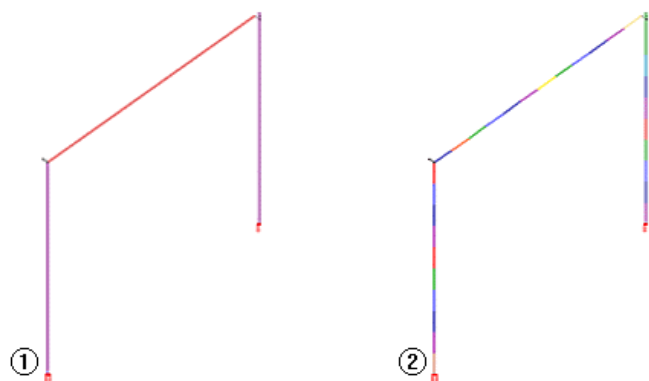
Utilizar o visualizador para analisar os resultados.

## Fundamentos Teóricos

A seguir, serão comentados os principais aspectos teóricos considerados na análise pelo Pórtico NLFG.

## Geometria do modelo

No Pórtico NLFG, cada vão de viga e lance de pilar é dividido em inúmeras barras.



(1) Pórtico espacial tradicional

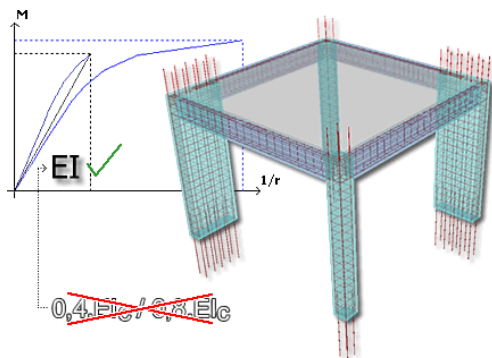
(2) Pórtico NLFG

Essa discretização mais refinada permite uma melhor análise dos efeitos das não-linearidades física e geométrica.

## Não-linearidade física

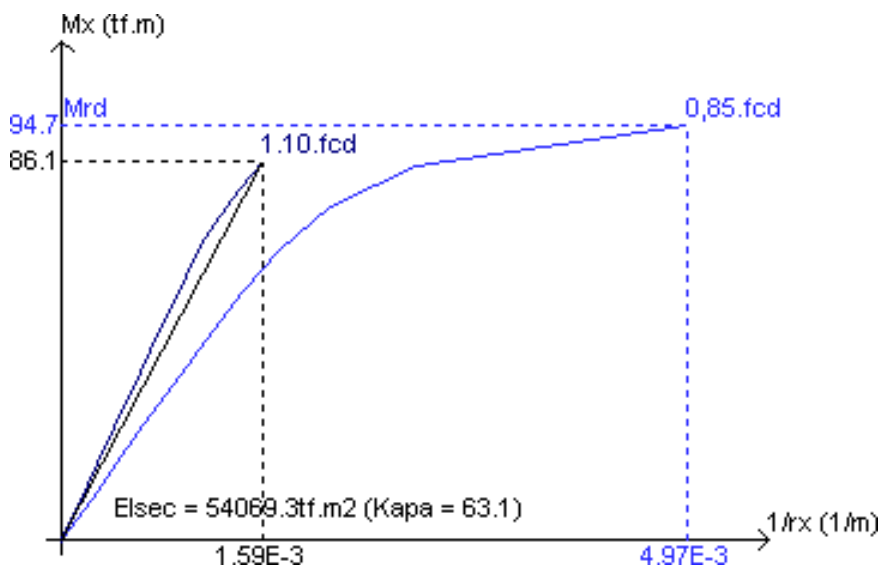
A não-linearidade física nas vigas e pilares do Pórtico NLFG é considerada por meio da obtenção de rigidezes à flexão  $EI$  a partir das relações momento-curvatura ( $M \times 1/r$ ) ou normal-momento-curvatura ( $N, M, 1/r$ ) em cada seção do pórtico espacial.

As rigidezes de cada barra que representam um trecho de viga ou pilar são calculadas de acordo com a geometria e as armaduras detalhadas em cada elemento estrutural, bem como os esforços solicitantes iniciais obtidos por um pré-processamento. Dessa forma, a consideração aproximada comumente adotada nos modelos ELU ( $0,4.EI_c$  para vigas e  $0,8.EI_c$  para pilares), é integralmente substituída por um cálculo mais refinado.

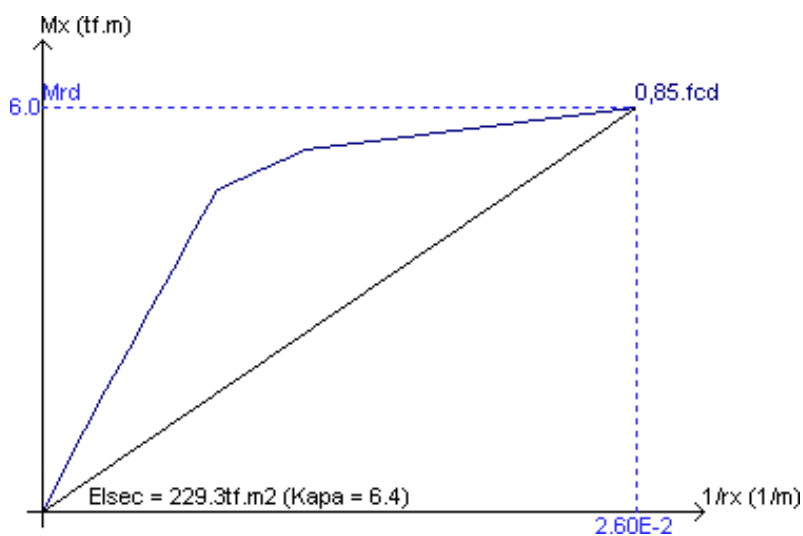


Nos pilares, são calculadas as rigidezes à flexão nas duas direções ( $EI_y$  e  $EI_z$ ). Nas vigas, é calculada apenas a rigidez à flexão  $EI_y$ . A rigidez lateral  $EI_z$ , comumente modificada para simular o efeito de diafragma rígido das lajes, é mantida idêntica ao pórtico ELU do edifício.

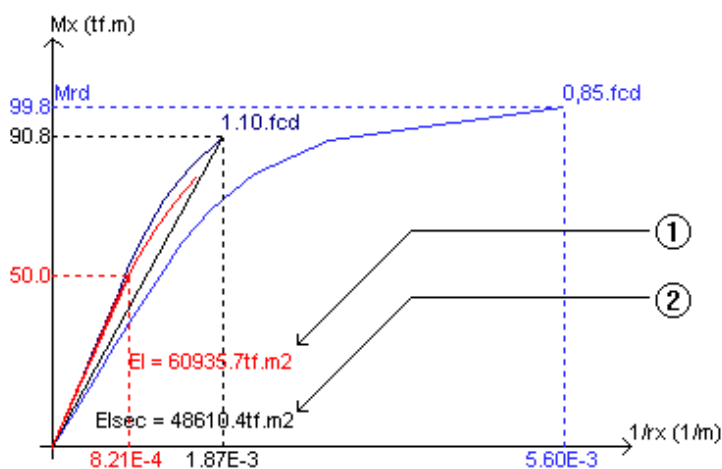
Nos pilares, as rigidezes são calculadas exatamente de acordo com o diagrama  $N, M, 1/r$  definido na NBR 6118:2003. Ou seja, considera-se uma resistência de cálculo igual a  $1,1.fcd$ , com a possibilidade de considerar  $\gamma_f3 = 1,1$ .



Já, nas vigas, as rigidezes são obtidas com o diagrama calculado com 0,85.fcd e  $\gamma_f3 = 1,0$ . As forças normais nas vigas também são consideradas.



Tanto nas vigas e pilares, as rigidezes podem ser obtidas por meio da linearização dos diagramas momento-curvatura na qual as duas direções são desacopladas (reta), ou por meio da curva oblíqua obtida com os esforços solicitantes concomitantes nas duas direções.

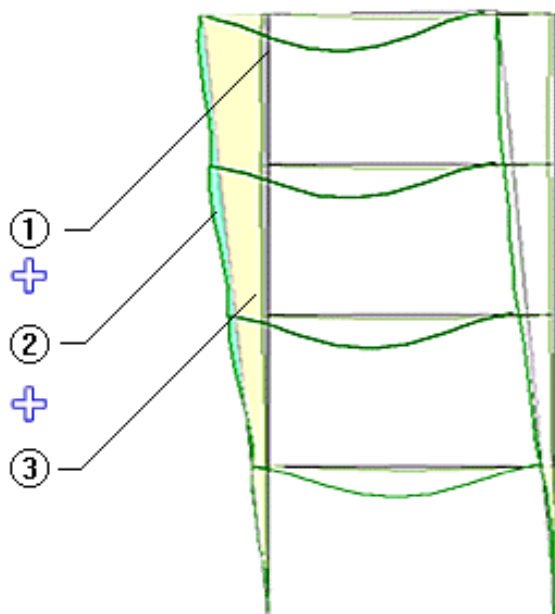


- (1) Curva oblíqua
- (2) Reta

## Não-linearidade geométrica

A não-linearidade geométrica, ou seja, a influência da forma da estrutura à medida que o carregamento é aplicado sobre a mesma, é considerada por meio de uma análise não-linear na qual a posição de equilíbrio da estrutura é

calculada iterativamente. Esse processo, muitas vezes denominado P- $\Delta$ , é exatamente o mesmo que sempre esteve presente nos Sistemas TQS.



(1) Efeitos de 1ª. ordem

(2) Efeitos locais de 2ª. ordem

(3) Efeitos globais de 2ª. ordem

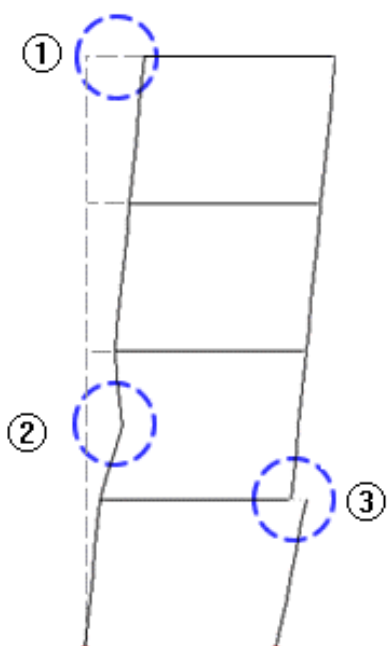
A grande diferença é que, como cada lance de pilar e vão de viga é discretizado em inúmeras barras, além dos efeitos globais de 2ª ordem, são flagrados também os efeitos locais de 2ª ordem, de forma conjunta e concomitante.



Outro grande avanço é que as vinculações nos extremos de cada lance de pilar no cálculo dos efeitos locais de 2ª ordem são consideradas de forma mais realista. Não há mais a aproximação de considerar cada trecho biapoiado ou engastado na base.

## Imperfeições geométricas

No Pórtico NLF, podem ser consideradas imperfeições geométricas globais ou locais. Essas imperfeições são impostas no modelo através da alteração direta da geometria da estrutura.



(1) Desaprumo global

(2) Falta de retilineidade

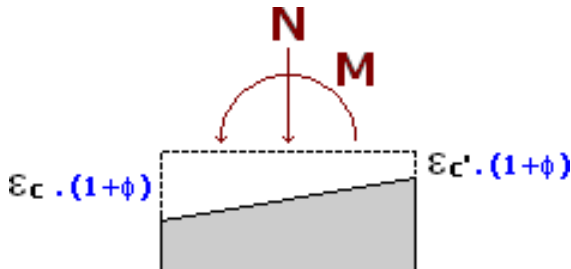
### (3) Desaprumo local

Uma grande vantagem desse tipo de análise é que os efeitos gerados pelas imperfeições locais passam a ser absorvidas por todo conjunto de vigas e pilares, e não mais apenas por um lance de forma isolada.

## Fluência

O efeito da fluência ou deformação lenta do concreto é considerado por meio de uma correção direta nas deformações em cada seção, que por sua vez influencia diretamente na curvatura da mesma.

Essa correção é feita através de uma majoração nas deformações no concreto (encurtamentos) por  $(1+\Phi)$ , sendo  $\Phi$  o coeficiente de fluência definido na NBR 6118:2003.



Dessa forma, a obtenção da rigidez  $EI$  do diagrama momento-curvatura é alterada.

## Verificação ELU

Ao término do processamento, após a obtenção dos esforços finais em cada barra do Pórtico NLFQ, opcionalmente, pode ser realizada a verificação de cada trecho de viga e pilar perante os esforços normais (força normal + momentos fletores) no Estado Limite Último (ELU), levando-se em conta todas as prescrições presentes na NBR 6118:2003.

Não é realizada nenhuma verificação dos elementos com relação às forças cortantes (cisalhamento) e aos momentos torsores.

## Critérios

Todos os parâmetros relacionados à geração e ao processamento do Pórtico NLFQ podem ser configurados no editor de critérios de gerais de pórtico espacial.

1. No Gerenciador TQS, selecione a aba "Sistemas"
2. Clique no botão "Pórtico-TQS"
3. Na aba "Pórtico-TQS", clique no botão "Critérios" e escolha a opção "Critérios Gerais"
4. Os critérios referentes ao "Pórtico NLFQ" ficam em "Pórtico NLFQ"

Todos os critérios são explicados com detalhes nas próprias janelas do programa, facilitando a compreensão dos mesmos durante a edição.

## Imperfeições Geométricas

Para definir imperfeições geométricas globais e locais no Pórtico NLFQ, é necessário ativá-las nos critérios gerais de pórtico espacial, conforme foi demonstrado no item anterior "Critérios", bem como defini-las num editor específico que é carregado pelo comando menu "Editar" – "Imperfeições geométricas" no subsistema "Pórtico-TQS".

As imperfeições globais são definidas por dois ângulos ( $\theta_a$ ), um para cada direção global (X e Y).

Já as imperfeições locais, podem ser impostas em determinados lances de pilar por meio de uma tabela.

Para definir um desaprumo local, basta configurar um deslocamento no topo ou na base. Para definir uma falta de reticidade, basta definir um deslocamento no meio.

# Processamento

Para gerar e processar o Pórtico NLFG, basta executar um único comando.

1. No Gerenciador TQS, selecione a aba "Sistemas"
2. Clique no botão "Pórtico-TQS"
3. Na aba "Pórtico-TQS", clique no botão "Processar- Pórtico NLFG"

Veja, a seguir, um resumo das etapas realizadas durante o processamento e que são ilustradas no rodapé da tela do "Gerenciador TQS".

...

Gerando ferros do edifício pré Geração da base de dados de armaduras

Discretizando pórtico espacial Discretização das barras

Extraindo seção e armaduras, Barra Definição de seção e armadura de cada barra

Cálculo dos esforços iniciais

=== ELU1/PERMACID/PP+PERM+ACID === Início da análise de uma combinação

Análise em 2ª. ordem

Verificando esforços finais: 100% Verificação ELU para todas combinações

Lendo o arquivo PORNLFQ.POR Indexação para visualizador de pórtico

Gravando o arquivo PORNLFQ.POX

--- OK ---

...

Durante o processamento, alguns avisos podem ser emitidos. Veja o que eles significam a seguir.

\*\*\* Aviso: Barra 2: seção/armaduras indefinidas.

Esse aviso indica que não foi possível detectar a seção ou a armadura na barra. É necessário verificar se o elemento (viga ou pilar) representado pela barra está corretamente dimensionado e detalhado. Para saber qual o elemento estrutural em questão, utilize o visualizador de resultados, apresentado a seguir no item "Resultados".

\*\*\* Aviso: Barra 2: considerada com rigidez inicial.

Esse aviso indica que não foi possível calcular a rigidez EI da barra a partir da relação momento-curvatura. Nesse caso, é mantida a rigidez que está definida originalmente no pórtico ELU. É necessário verificar o porquê disso no visualizador de resultados, apresentado a seguir no item "Resultados".

## Tempo de processamento

O tempo de processamento do pórtico NLFG dependerá diretamente do tamanho do modelo analisado (número de nós e barras), bem como do número de combinações ELU a serem calculadas.

Pode-se otimizar o tempo de processamento definindo:

Uma combinação única para o cálculo das rigidezes EI.

A obtenção da rigidez pela curva oblíqua ao invés da linearização do diagrama momento-curvatura.

Essas duas condições podem ser definidas por meio de critérios (ver item anterior "Critérios"), porém é necessário averiguar a validade das mesmas para o caso que está sendo analisado.

## Resultados

Todos os resultados obtidos do processamento do Pórtico NLFG podem ser analisados detalhadamente por meio de um visualizador gráfico específico.

1. No Gerenciador TQS, selecione a aba "Sistemas"
2. Clique no botão "Pórtico-TQS"
3. Na aba "Pórtico-TQS", clique no botão " Visualizar - Pórtico NLFG"

## Resultados gerais

Para facilitar a análise de resultados, o visualizador fornece algumas informações gerais referentes às verificações ELU e às rigidezes à flexão EI, que podem ser úteis no diagnóstico do comportamento global da estrutura.

Assim que o visualizador é carregado, a seguinte janela é automaticamente aberta (essa janela também pode ser aberta pelo comando:

1. No "Visualizador de Pórtico não-linear físico e geométrico NLFG"
2. Clique no menu "Resultados" e escolha a opção "Informações gerais"

Nessa janela, há a informação se alguma barra presente no modelo não passou nas verificações ELU perante as solicitações normais. São apresentados também valores médios de rigidez à flexão EI para vigas e pilares em relação às suas rigidezes brutas ( $EI_c$ ), levando-se em conta todas as combinações analisadas.

OBS.: no cálculo da rigidez média para vigas, não é levada em conta a rigidez lateral ( $EI_z$ ) das mesmas.

## Verificações ELU

Para averiguar em qual(is) combinação(ões) existem barras que não passaram no Estado Limite Último (ELU).

1. No "Visualizador de Pórtico não-linear físico e geométrico NLFG"
2. Clique no menu "Resultados" e escolha a opção "Verificações ELU "

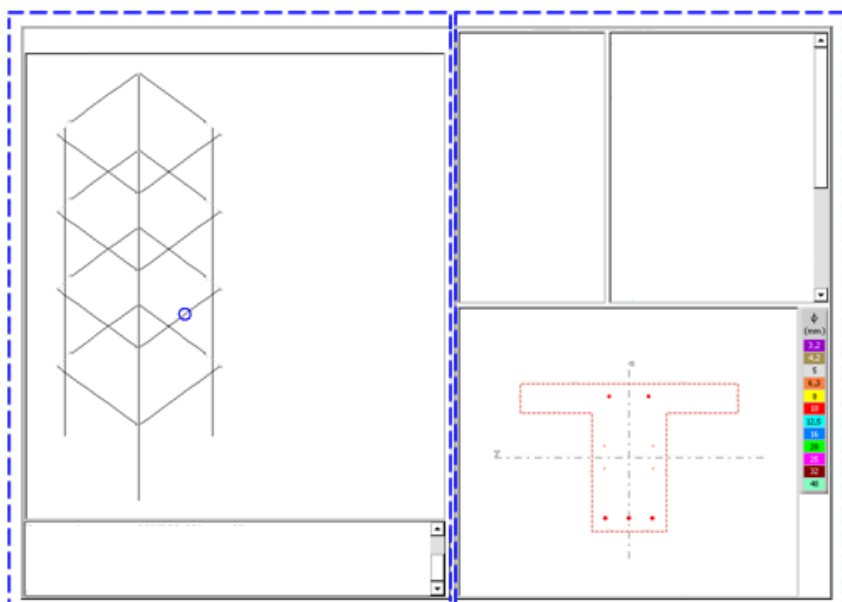
## Rigidezes EI

Para verificar a média de rigidez EI para vigas e pilares para cada combinação de forma isolada.

1. No "Visualizador de Pórtico não-linear físico e geométrico NLFG"
2. Clique no menu "Resultados" e escolha a opção "Rigidezes EI "

## Ambiente principal

O ambiente principal do visualizador é dividido em duas regiões distintas: uma destinada à análise do pórtico espacial como um todo e outra à análise de resultados em uma barra selecionada no modelo global, conforme mostra a figura a seguir.

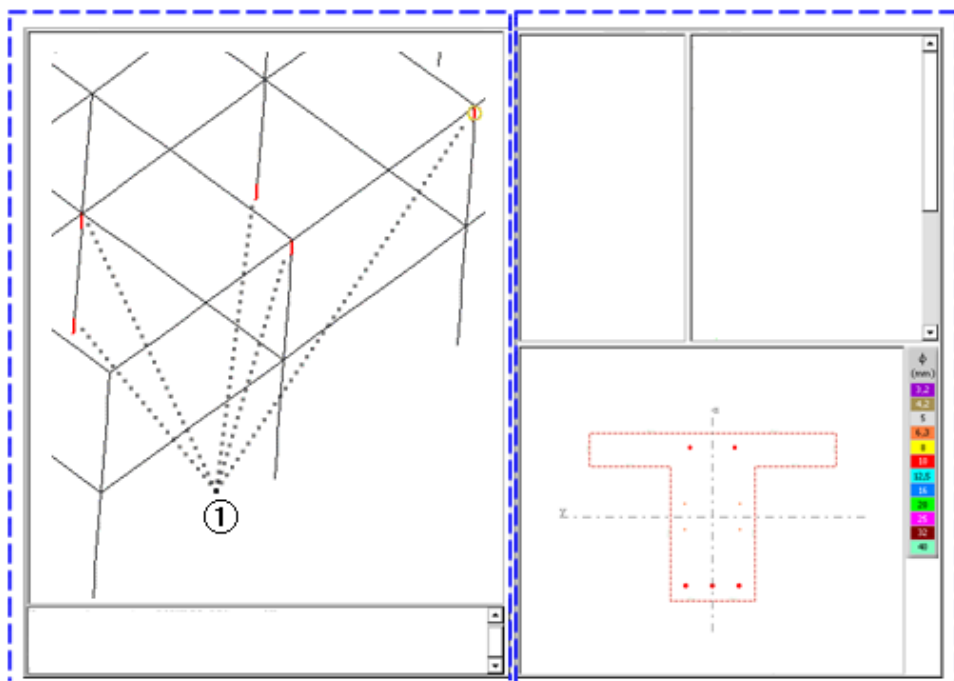


Na região à esquerda, pode-se visualizar graficamente os diagramas de rigidez, deslocamentos e esforços (força normal, forças cortantes, momento torsor e momentos fletores) em todas as barras de vigas e pilares que compõem o pórtico espacial.

Já, na região à direita, pode-se analisar os resultados em uma barra selecionada no modelo. É possível visualizar sua seção e armaduras, bem como montar a curva de interação e o diagrama momento-curvatura utilizado na obtenção das rigidezes  $EI$ .

## Visualização ELU

Na janela gráfica à esquerda onde o pórtico espacial é desenhado, as barras que porventura não passaram na verificação ELU perante as solicitações normais (força normal + momentos fletores) da combinação atual, são ressaltadas com cor e espessura distintas.



(1) Barras que não passaram na verificação ELU são ressaltadas

Tanto a cor como a espessura da linha que representa as barras que romperam, podem ser configuradas nos parâmetros de visualização.

## Diagramas

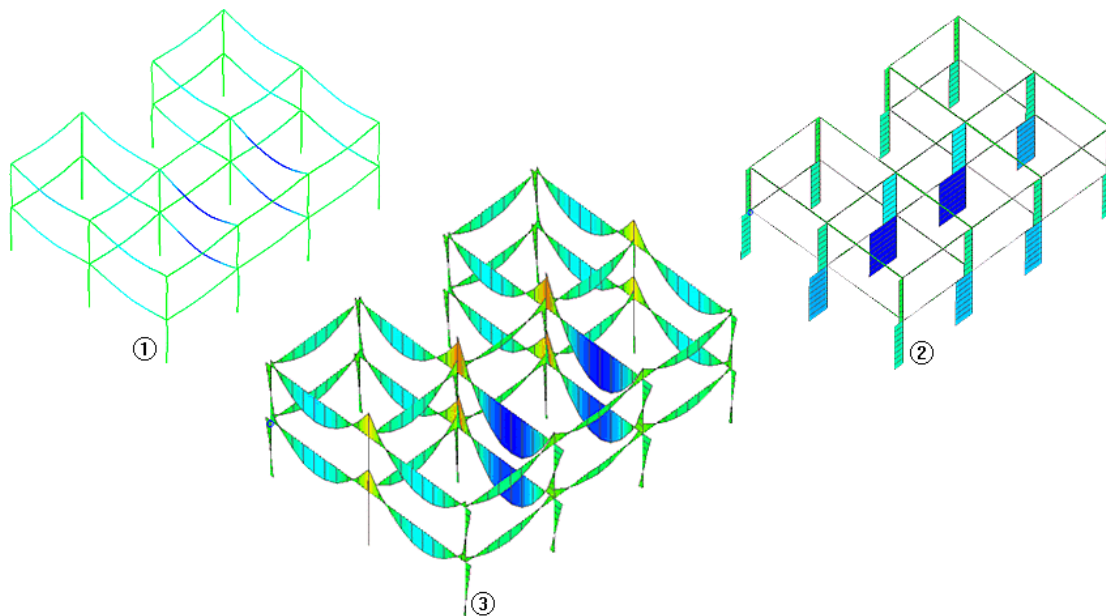
Para ativar a visualização de diagramas na janela gráfica, basta selecionar uma combinação ELU e acionar um dos



modos de visualização disponíveis.

Apenas um modo de visualização pode ser ativado por vez. Quando todos os modos são desativados, a visualização ELU que mostra as barras que porventura romperam na combinação atual é restaurada.

Os diagramas disponíveis de serem visualizados são: rigidez, deslocamentos, força normal  $F_x$ , forças cortantes  $F_y$  e  $F_z$ , momento torsor  $M_x$  e momentos fletores  $M_y$  e  $M_z$ .

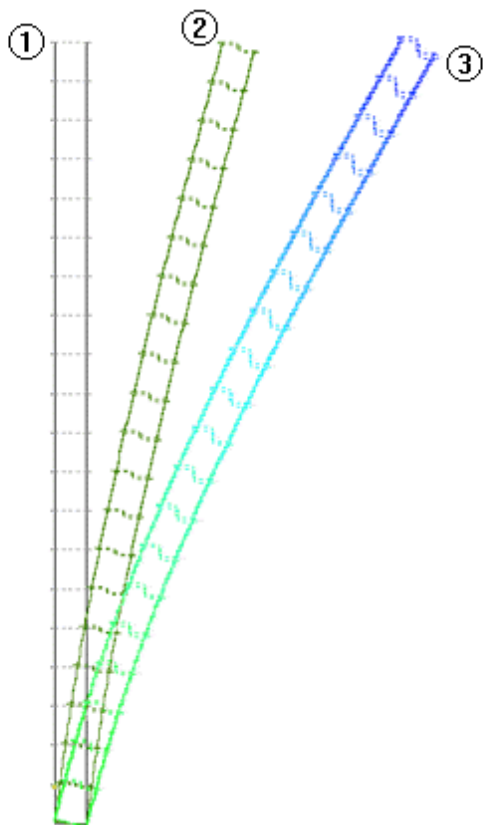


(1) Deslocamentos

(2) Forças normais  $F_x$

(3) Momentos fletores  $M_y$

Na visualização dos deslocamentos, pode-se ativar o desenho da estrutura indeslocada bem como dos deslocamentos sem os efeitos de 2ª ordem nos parâmetros de visualização (menu "Exibir" – "Parâmetros de visualização...").



(1) Estrutura indeslocada

(2) Deslocamentos SEM 2ª. ordem

(3) Deslocamentos COM 2ª. ordem

## Otimização da visualização de diagramas

Em modelos complexos, é bastante interessante visualizar os diagramas apenas nos locais desejados, minimizando o número de elementos a serem desenhados. Isso facilitará a interpretação de resultados, bem como aumentará a velocidade de geração dos desenhos.

O visualizador possui alguns recursos que podem contribuir para acelerar a visualização de diagramas, tais como a visualização por piso e a definição de cerca.

A definição de uma cerca em planta na qual apenas elementos contidos dentro dela serão desenhados pode ser realizada por meio de comandos no menu "Diagramas" – "Cerca".

OBS.: durante a definição da cerca em planta, é desenhada a projeção do piso inicial.

Além da seleção de pisos e a definição de cerca, existem diversos parâmetros de visualização que podem ser editados com o objetivo de tornar a visualização de diagramas mais limpa e eficiente.

Todos os diagramas podem ser visualizados com gradiente de cores ou com cor única que pode ser configurada nos parâmetros de visualização.

## Visualizador tradicional

A análise do pórtico espacial também pode ser realizada no visualizador de pórtico espacial tradicional existente nos Sistemas TQS.

1. No "Visualizador de Pórtico não-linear físico e geométrico NLFG"

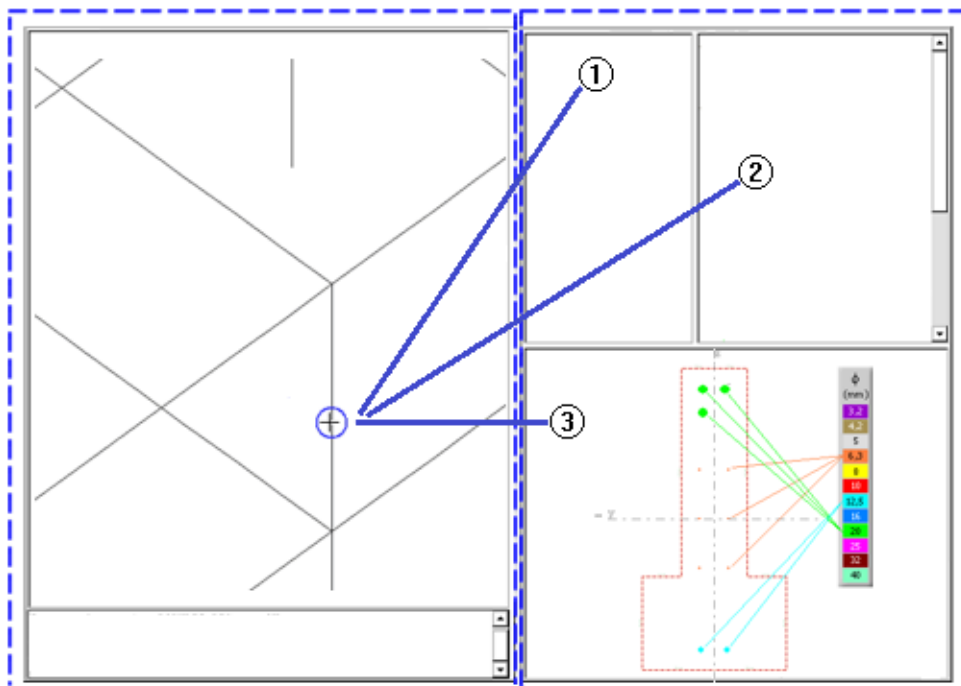
2. Clique no comando "Diagramas" e escolha a opção "Visualizador de pórtico espacial"

OBS.: O único recurso desse visualizador que deixará de funcionar é a seleção por piso.

## Análise em uma barra

Para fazer uma análise detalhada em uma barra do pórtico espacial, é necessário primeiramente selecioná-la, clicando diretamente sobre o desenho do pórtico.

Assim que a barra é selecionada, ela é marcada com um círculo envolvente no desenho do pórtico, e todos os seus dados são automaticamente atualizados nas árvores, bem como a sua seção transversal é desenhada na janela gráfica à direita.



Inúmeras informações relativas à barra selecionada (barra atual) se encontram nas árvores que ficam ao lado direito da janela gráfica onde o pórtico espacial é desenhado.

(1) Na árvore esquerda

São apresentados: o elemento estrutural que a barra selecionada representa, o piso e pavimento em que está localizada, dados dos seus materiais, dados geométricos e rigidezes integrais.

(2) Na árvore direita

São apresentadas informações relativas às verificações ELU e às rigidezes calculadas a partir da relação momento-curvatura.

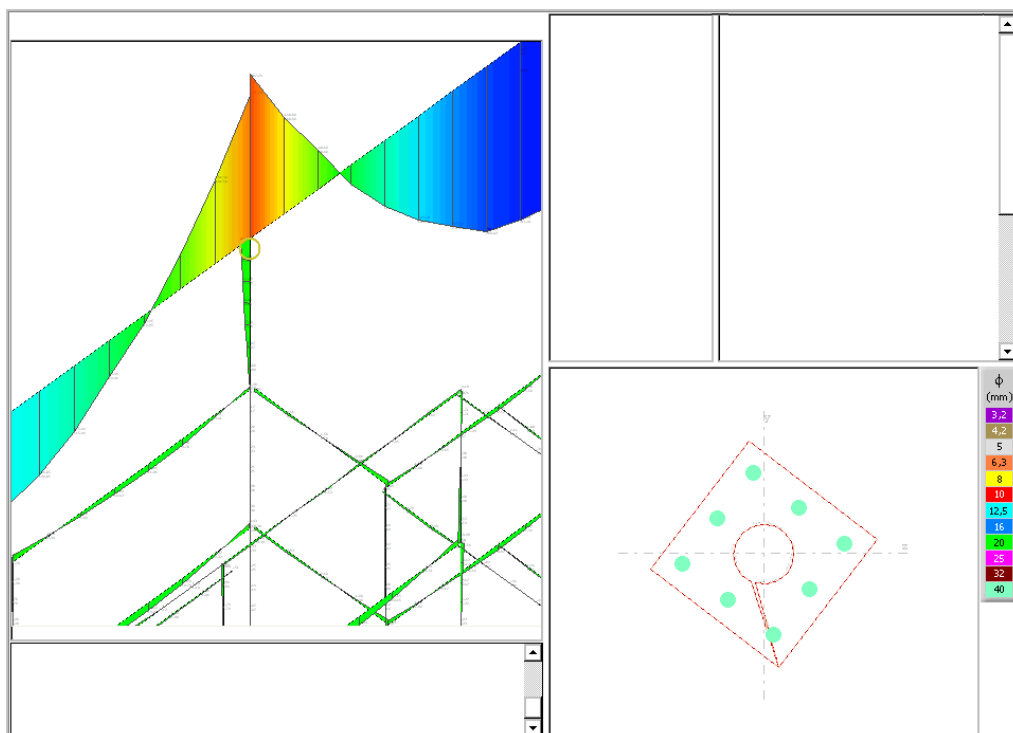
(3) No desenho da seção transversal da barra

É possível distinguir a bitola das armaduras por cores.

Nos parâmetros de visualização, também se pode definir uma cor única para armaduras. Nesse caso, o valor da bitola é impresso ao lado de cada armação.

## Cálculo de rigidez EI

Para a barra selecionada, é possível calcular a rigidez EI a partir do diagrama momento-curvatura por meio do comando "Barra" – "Rigidez EI" ou na barra de ferramentas, conforme mostra a figura a seguir.

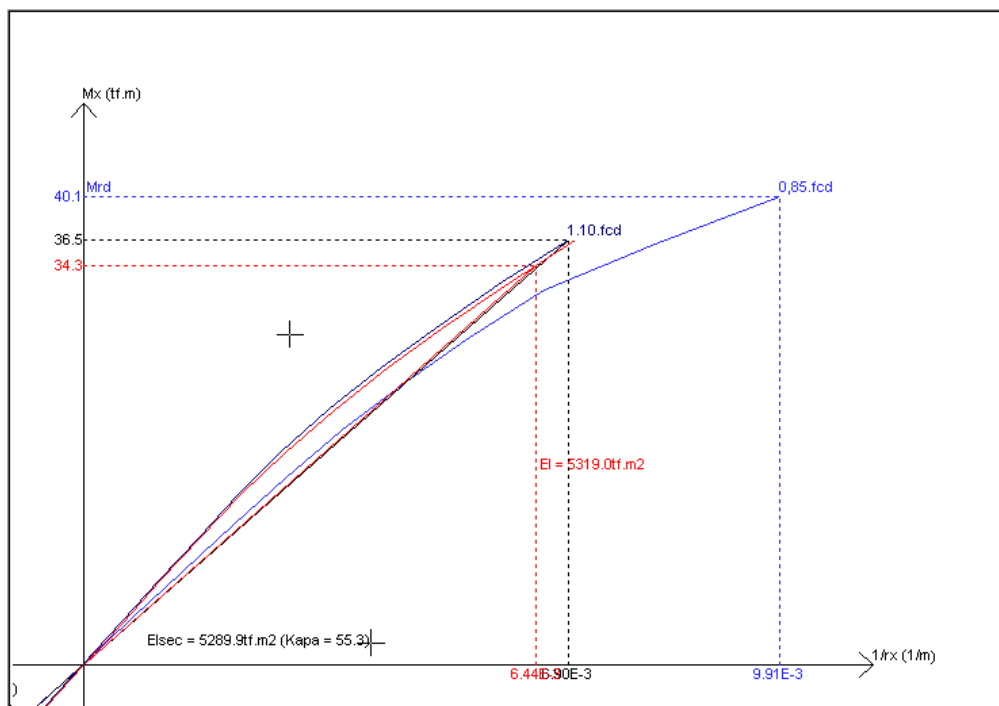


Assim que este comando é acionado, uma nova janela é carregada. Basta então clicar no botão <Montar diagrama> para que a curva N, M,  $1/r$  seja desenhada.

Para pilares, o cálculo da rigidez  $EI$  pode ser realizado segundo as duas direções principais ( $y$  e  $z$ ). Para vigas, somente para direção  $y$ .

A força normal considerada na seção pode ser a do início ou fim da barra. O visualizador sempre selecionará a maior força normal absoluta.

No caso do cálculo de  $EI$  por meio da curva oblíqua, os valores dos momentos fletores da combinação atual são automaticamente configurados.



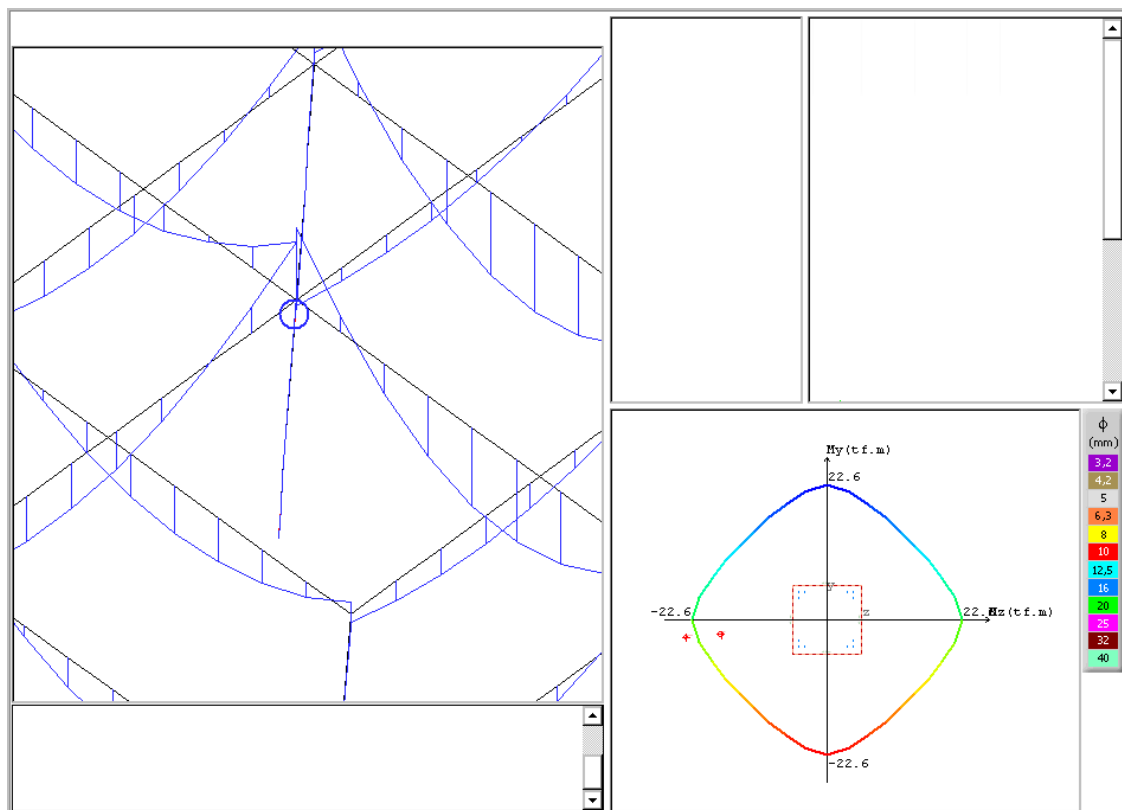
Pequenas diferenças entre o valor do  $EI$  calculado no visualizador e a rigidez calculada durante o processamento (mostradas quando o modo de visualização "rigidez" é ativado) podem surgir. Isso ocorre devido ao fato da rigidez durante o processamento ser calculada com os esforços iniciais, e o  $EI$  calculado pelo visualizador adotar os esforços solicitantes finais.

OBS.: por convenção, todos os momentos fletores seguem a notação vetorial. Por exemplo, o momento  $M_y$  age em torno do eixo  $y$ .

## Curva de interação

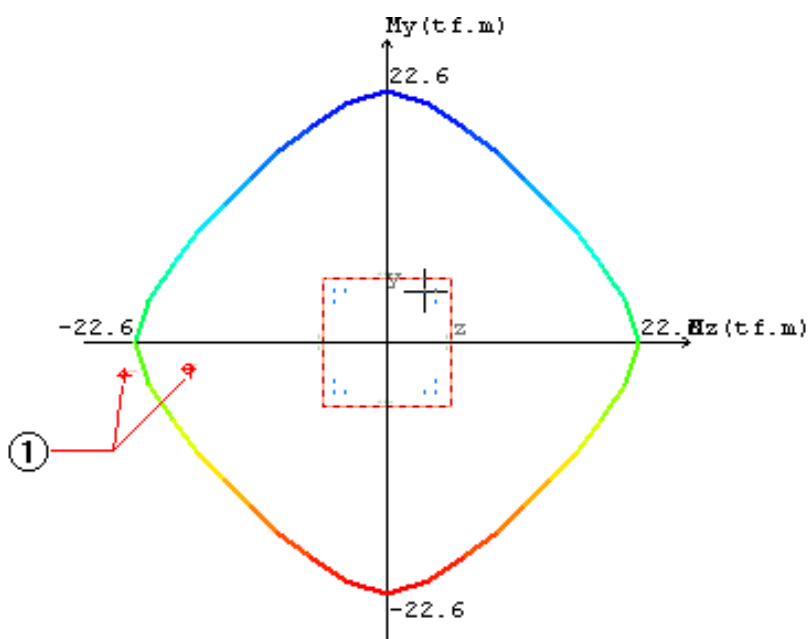
Para a barra selecionada, é possível montar o diagrama de interação  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  por meio do comando menu "Barra" – "Curva de interação" ou na barra de ferramentas, conforme mostra a figura a seguir.

A curva de interação pode ser calculada para a força normal do início ou fim da barra, atuante na combinação atual. O visualizador sempre selecionará a maior força normal absoluta.



Na visualização da curva, são apresentados graficamente os esforços ( $M_y$ ,  $M_z$ ) atuantes na combinação atual, facilitando a interpretação da verificação ELU.

OBS.: por convenção, todos os momentos fletores seguem a notação vetorial. Por exemplo, o momento  $M_y$  age em torno do eixo  $y$ .



(1) Esforços atuantes no início e fim da barra