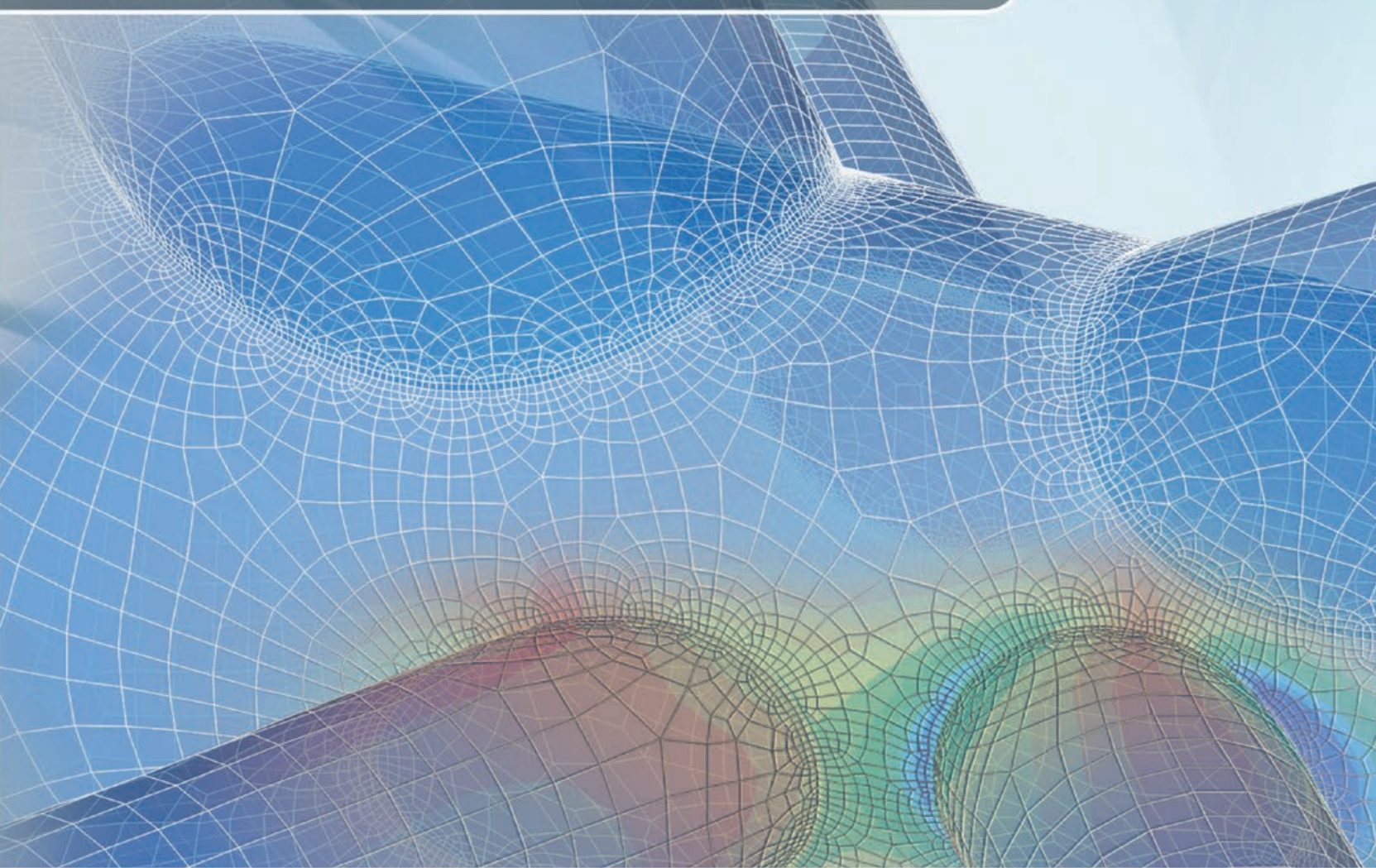


# SAP 2000<sup>®</sup>

MODELAÇÃO E CÁLCULO DE ESTRUTURAS ATRAVÉS DE ELEMENTOS FINITOS



- UMA REFERÊNCIA INTERNACIONAL EM CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS
- MELHORAMENTOS CONTÍNUOS AO LONGO DE 4 DÉCADAS DE DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO
- TRANSPARÊNCIA E CONTROLO NA DEFINIÇÃO DOS MODELOS E PROBLEMAS
- EXCELENTE CAPACIDADE DE CÁLCULO E MODELAÇÃO MESMO EM PROBLEMAS MAIS EXIGENTES E DE MAIOR DIMENSÃO
- UMA PLATAFORMA PARA ENTENDER E ENSINAR OS DETALHES

DA MODELAÇÃO ESTRUTURAL E OS PROBLEMAS COMPLEXOS DE ENGENHARIA

- TÉCNICAS COMPUTACIONAIS DE RESOLUÇÃO DE SISTEMAS DE EQUAÇÕES E INTERAÇÃO POR SUB-ESPAÇOS DE 32 E 64 BITS
- VÁRIOS CÓDIGOS ESTRUTURAIS E DIVERSAS FERRAMENTAS DE FÁCIL APLICAÇÃO PARA O DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO, METÁLICAS, DE ALUMÍNIO E ENFORMADOS A FRIO
- UM SOFTWARE COMPLETO PARA MODELAÇÃO, CÁLCULO, VERIFICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS

# INFORMAÇÃO GERAL

## MODELAÇÃO

- Templates para vigas simples, treliças 2D e 3D, pórticos 2D e 3D, silos e reservatórios, escadas, barragens, tubos, entre outros
- Opções de visualização do modelo físico e analítico
- Definição de grelhas através de eixos cartesianos ou cilíndricos
- Geração automática de plantas e alçados
- Ferramentas de edição da malha (Edge constraints)

## COMPONENTES ESTRUTURAIS

- Nós
- Objetos de barra lineares e não lineares, objetos de cabo, objetos de pré-esforço, objetos de área lineares e não lineares (Layered shell), e sólidos
- Elementos de ligação (Links) lineares e não lineares (Gap, Hook, elementos de atrito, plásticos, amortecedores e isoladores de base)
- Rótulas plásticas (Hinges)
- Molas (Springs)
- Comportamento não linear de catenária

## AÇÕES

- Ações automáticas de vento, sismo e cargas móveis
- Ações das ondas
- Ações definidas pelo utilizador (forças, momentos, deslocamentos, temperaturas, tensões e pressões)
- Cargas pontuais, lineares, trapezoidais e de área
- Coeficientes de pressão do vento em estruturas

## ANÁLISE

- Motor de análise SAP Fire TM (análise modal Eigen e Ritz e múltiplos solvers de 32 e 64 bits)
- Análises estáticas
- Análises dinâmicas: modal, forças laterais, espectro de resposta e time history
- Efeitos diferidos no tempo: faseamento construtivo, fluência e retração, densidade espectral de potência e solicitações harmónicas
- Não linearidade geométrica: Encurvadura, P-Delta (em elementos de barra, shell e sólidos), Large displacements (estruturas esbeltas,

membrana, cabos, instabilidade por snap through e comportamento de pós encurvadura)

- Não linearidade dos materiais: objetos de barras, rótulas plásticas, elementos Link, objetos shell não-lineares
- Análises não lineares: Pushover, Comportamento fendilhado, FNA (Fast Nonlinear Analysis) e Time History através de integração direta
- Cargas Alvo (Target force): especificação do esforço axial desejado na estrutura

## DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

- Estruturas de betão armado e pré-esforçadas
- Estruturas metálicas
- Estruturas de alumínio
- Estruturas enformadas a frio
- Disponíveis vários códigos Europeus, Americanos, Canadianos, Turcos, Indianos, Chineses, entre outros

## RESULTADOS

- Deformada
- Diagramas de esforços
- Deslocamentos
- Section cuts
- Diagramas de trabalho virtual
- Linhas de influência
- Gráficos e tabelas de resultados
- Animações em vídeos

## FERRAMENTAS

- Relatórios de cálculo
- Otimizador estrutural
- Acesso através de API para criação de pré e pós-processadores

## INTEROPERABILIDADE COM OUTROS PROGRAMAS E FORMATOS

- Edição interativa do modelo através do Excel e ficheiros de texto
- Exportação e importação de ficheiros AutoCAD e IFC, modelos Revit e Tekla
- Exportação de relatórios de cálculo para Word

## FLEXIBILIDADE E CAPACIDADE DOS OBJETOS DE BARRA E LINKS

- ▶ Objetos de barra retos, curvos e variáveis ao longo do seu comprimento
- ▶ Secções de betão armado, alumínio, metálicas e enformadas a frio
- ▶ Podem ser definidas pelo utilizador ou importadas a partir da extensa base de dados do programa
- ▶ Atribuição de valores máximos de tração e compressão suportados pelas barras, permitindo considerar apenas os contraventamentos tracionados na análise
- ▶ Atribuição de deslocamentos impostos para simular assentamentos de apoio ou processos construtivos

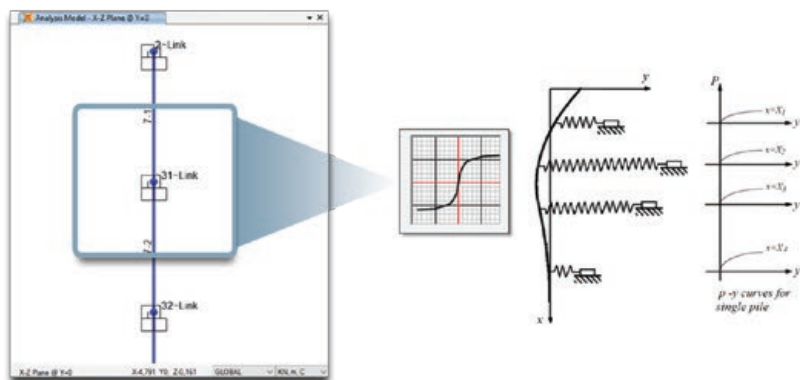


Imagem 1a: Utilização de links multilineares plásticos em estacas

- ▶ Os *Links* incluem elementos de ligação do tipo:
  - lineares, multi-lineares elásticos e plásticos
  - elementos de contacto e atrito
  - amortecedores e isoladores de base
- ▶ Os *Links* permitem modelar diversas situações, como:
  - atrito entre chapas ou outros efeitos de atrito
  - interação solo-estrutura através de curvas P-Y
  - contacto não linear entre estrutura e terreno
  - amortecimento viscoso em edifícios
  - aparelhos de apoio em pontes
  - modelação de painéis não lineares de alvenaria
  - zonas de contacto entre estruturas

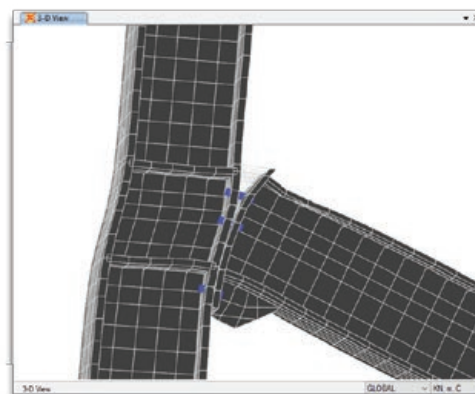


Imagem 1b: Modelação do contacto entre chapas

## CONFIGURAÇÃO E GEOMETRIA DE SECÇÕES SEM LIMITES

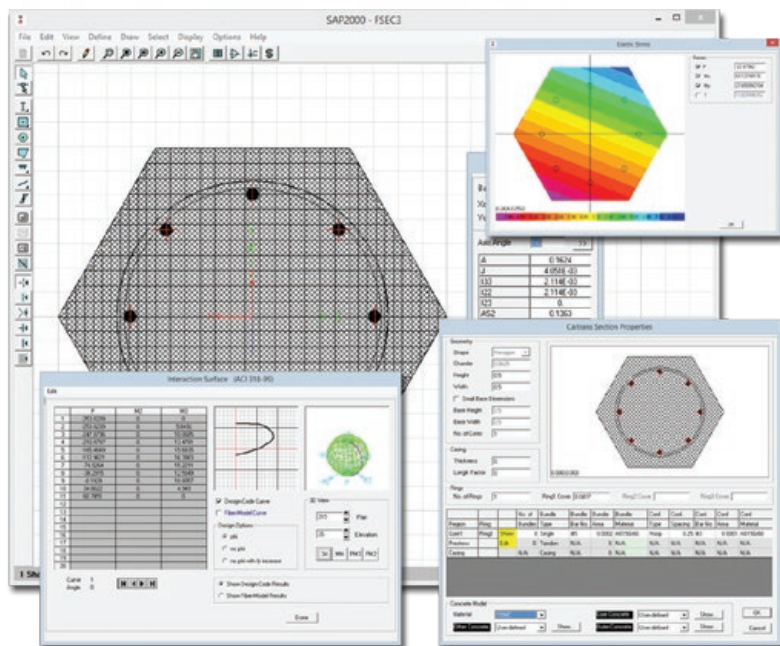


Imagem 2: Section Designer

- ▶ Pode criar secções genéricas com qualquer tipo de geometria e material:
  - secções com aberturas
  - secções mistas aço-betão
  - secções Caltran
- ▶ Permite incluir nas secções os seguintes elementos:
  - armaduras confinadas e não confinadas
  - pré-esforço
  - rótulas de fibras
  - secções metálicas
- ▶ Pode obter automaticamente:
  - propriedades mecânicas das secções
  - superfícies de interação de ELU em 3D
  - diagramas de momento-curvatura
  - tensões na secção

## EXCENTRICIDADES E CONTROLO DE CONECTIVIDADE ENTRE NÓS

- ▶ Capacidade para conectar totalmente, parcialmente, ou desconectar nós que sejam geometricamente coincidentes
- ▶ Capacidade para conectar nós que estejam separados geometricamente, ou que simplesmente se encontrem em alinhamentos comuns
- ▶ Capacidade para tornar um elemento excêntrico em relação aos nós onde foi definido geometricamente, podendo assim criar relações de compatibilidade:
  - interação axial entre uma laje colaborante e viga mista
  - posicionamento de pilares em relação às vigas quando os centros geométricos não coincidem

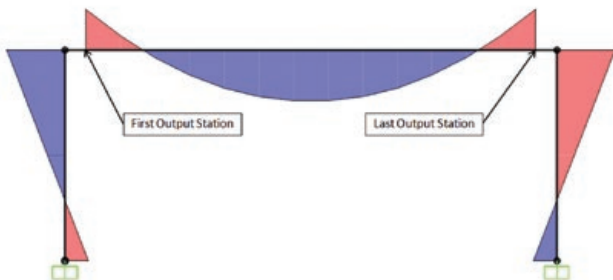


Imagem 3b: Obtenção de esforços em vigas considerando o comprimento real

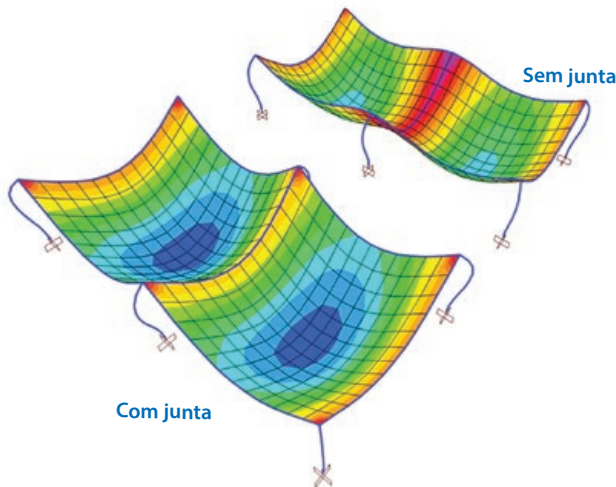


Imagem 3c: Modelação de uma junta entre dois painéis de laje

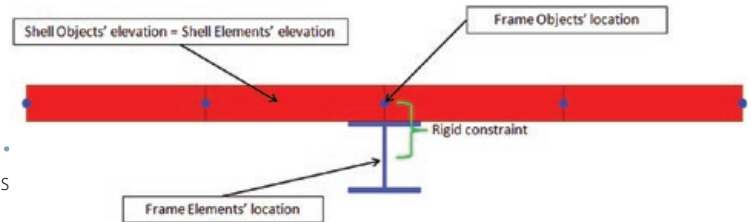


Imagem 3a: Excentricidade entre a laje colaborante e viga metálica

- ▶ Definição de distâncias em extremidades de barras usadas para ignorar esforços, permitindo obter valores em localizações específicas, como a face de um pilar junto à intersecção com a viga, na verificação e dimensionamento
- ▶ Permite especificar um valor correspondente à fração do comprimento da barra a modelar como rígida para deformações de flexão e esforço transverso
- ▶ Utilização de constrangimentos para impor uma relação de deslocamentos relativos entre nós, permitindo:
  - compatibilizar a extremidade de uma viga modelada como barra com um conjunto de nós numa parede modelada com elementos de placa
  - “soldar” zonas de painéis adjacentes, mesmo que não tenham nós coincidentes ao longo da linha de contacto
  - simular efeitos de corpos rígidos
  - simular diafragmas em lajes, onde todos os deslocamentos horizontais se condensam em dois deslocamentos horizontais e uma rotação sobre o eixo vertical

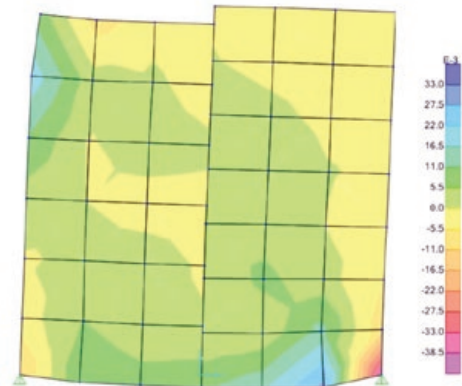


Imagem 3d: Utilização de constrangimentos para “soldar” painéis adjacentes

## DEFINIÇÃO DE ESPESSURAS, PRESSÕES E CARGAS PARAMÉTRICAS VARIÁVEIS

- ▶ A opção Joint Pattern pode ser utilizada para:
  - descrever variações de pressões
  - descrever variações de temperaturas
  - especificar variações de espessura e excentricidade ao longo de um objeto de área
  - descrever distribuições de valores numéricos espaciais mais complicados, como lajes de geometrias complexas ou cargas com distribuição muito variável
- ▶ Permite atribuir apenas valores positivos ou negativos, sendo bastante útil na definição de pressões hidrostáticas

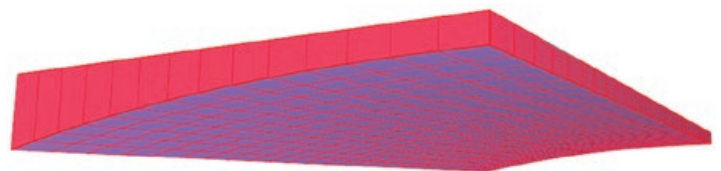


Imagem 4: Modelação de laje com variação de espessura parabólica

## FACILIDADE NA APLICAÇÃO DE CARGAS DE PAINÉIS DISTRIBUÍDAS EM BARRAS

- ▶ Aplicação de carregamentos automáticos em barras ligadas a painéis de área selecionados
- ▶ Pode-se optar por evitar modelar revestimentos e outras estruturas secundárias, mas considerá-los na forma como as cargas geradas são discretizadas
- ▶ Elabora o cálculo e multiplicação pelas larguras e/ou áreas de influência das barra e/ou nós incluídos
- ▶ Total controlo sobre a forma de distribuição das cargas, que pode ser uni ou bidirecional
- ▶ Possibilidade de selecionar os elementos de barra que não devem receber esforços, por exemplo os contraventamentos

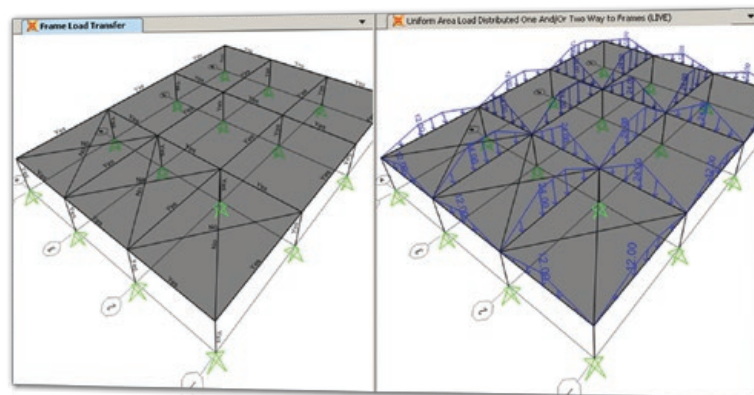


Imagem 5: Cargas trapezoidais geradas nas vigas e sem considerar os contraventamentos carregados

## POSSIBILIDADES DE MODELAÇÃO COM OBJETOS DE ÁREA NÃO LINEARES POR CAMADAS

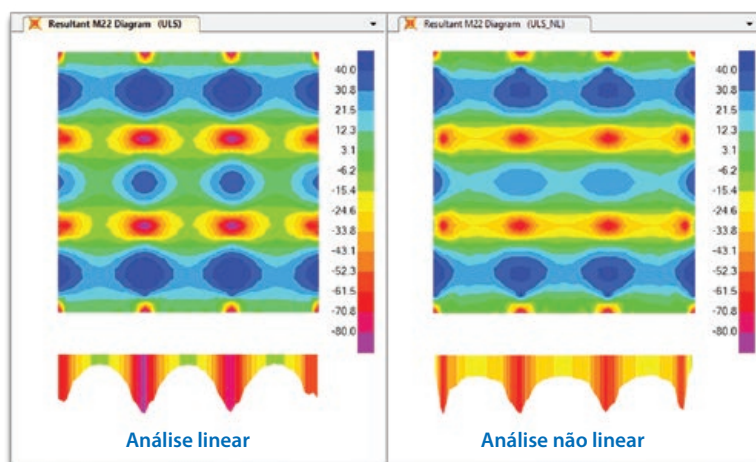


Imagem 6a: Redistribuição de esforços numa laje fungiforme em regime fissurado

- ▶ Grande versatilidade em situações de modelação reais:
  - cálculo de redistribuição plástica de esforços nas lajes em zonas de momentos negativos sobre pilares em zonas de momentos positivos, através da eliminação dos picos obtidos por análise linear
  - suavização de picos de tensões estimados elasticamente, em função da relação constitutiva definida no material
  - controlo de tensões e extensões em armaduras e zonas de recobrimento, ou em qualquer zona do elemento
  - simulação de estruturas metálicas onde o efeito de plastificação e encurvadura podem surgir de forma sequencial ou conjunta
  - obtenção de curvas de instabilidade de peças metálicas

- ▶ Objetos finitos de área com comportamento:
  - membrana
  - placa (Kirchhoff ou Reissner -Mindlin)
  - shell (Placa + Membrana)
- ▶ Comportamento não linear e definição multi-camada:
  - acomodamento entre efeitos de membrana e placa do ponto de vista da não linearidade geométrica
  - permite definir curvas de tensão-deformação não lineares
  - compatibilidade e equilíbrio em grandes deslocamentos
  - definição de materiais não lineares com relações constitutivas genéricas
  - vários materiais e espessuras de material nas definições de camadas
  - controlo dos ângulos locais dos materiais de cada camada em relação aos eixos locais do elemento
  - definição do número de pontos de integração por camada
  - suporta o atravessamento de cabos de pré-esforço

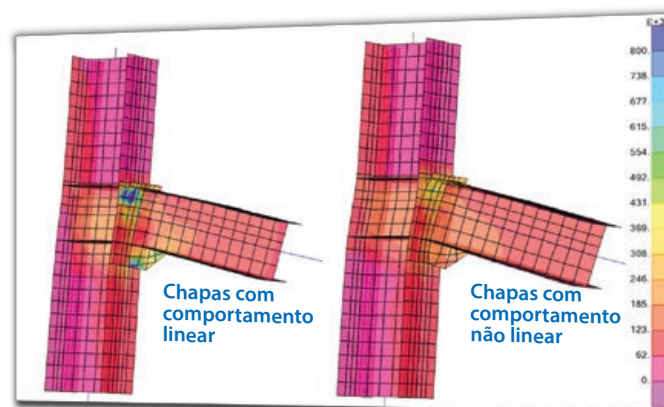


Imagem 6b: Suavização de picos de tensões

## COMPORTAMENTO GEOMETRICAMENTE NÃO LINEAR

- ▶ Todos os elementos finitos do SAP2000 suportam efeitos de segunda ordem, P-Delta e grandes deslocamentos
- ▶ Disponível um método simplificado de inclusão de efeitos P-Delta em ações horizontais, podendo com este método processar o cálculo de forma linear e consequentemente agilizar o processo de estimar efeitos de segunda ordem para todos os tipos de ações horizontais relevantes
- ▶ Capacidade de calcular efeitos de segunda ordem em análise sísmicas através de espectros de resposta, dado a capacidade de incluir os efeitos P-Delta nas quantidades calculadas para cada modo da análise modal
- ▶ Capacidade de simular o comportamento não linear, desde a primeira fase linear, passando pela instabilização com inclusão de imperfeições definidas pelo utilizador, até ao seguimento do comportamento pós encurvadura, e finalmente o colapso
- ▶ Grandes deslocamentos disponíveis para simulação de estruturas muito esbeltas ou estruturas que incluem elementos como cabos, cujo comportamento é altamente não linear
- ▶ Capacidade de seguir por incremento de deslocamento soluções instáveis como snap-through

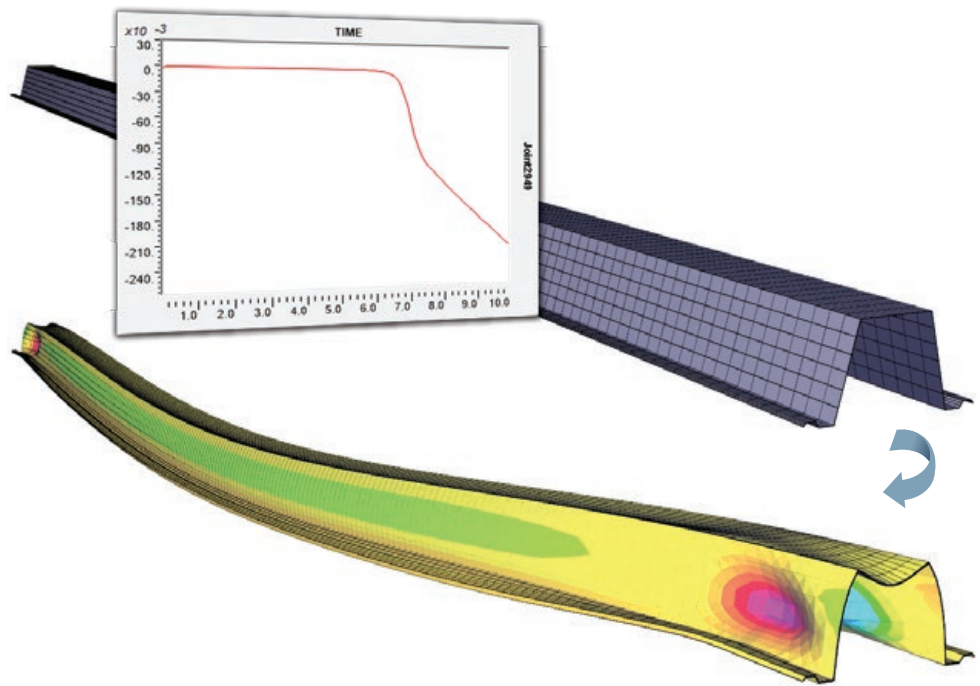


Imagem 7: Análise de pós-encurvadura em perfis de chapa perfilada

## INTEGRAÇÃO AUTOMÁTICA DE ESFORÇOS EM ELEMENTOS FINITOS

- ▶ Os Section Cuts permitem a integração automática e arbitrária de esforços em qualquer parte do modelo estrutural
- ▶ Baseia-se na contabilização de somatórios de esforços nodais de equilíbrio de cada elemento finito e não na integração falível de tensões de elementos como as placas e membranas
- ▶ Basta apenas considerar um grupo de elementos finitos, os nós através dos quais os esforços vão ser medidos e a direção dos eixos de esforços que se pretendem obter
- ▶ Com esta técnica podem-se obter:
  - esforços ou forças resultantes entre pisos
  - momentos para cálculo de armaduras em lajes
  - esforços N, M2 e M3 em secções de núcleos modelados com shell
  - corte basal
  - em vigas mistas, ou secções pré-fabricadas, o esforço total do conjunto viga + laje
- ▶ Os Section Cuts são avaliados como quantidades modais e por isso as análises por espectro de resposta podem calcular corretamente de forma estatística a magnitude máxima de cada esforço, já que não é necessário combinar ou integrar os esforços nodais depois de calculados os resultados modais

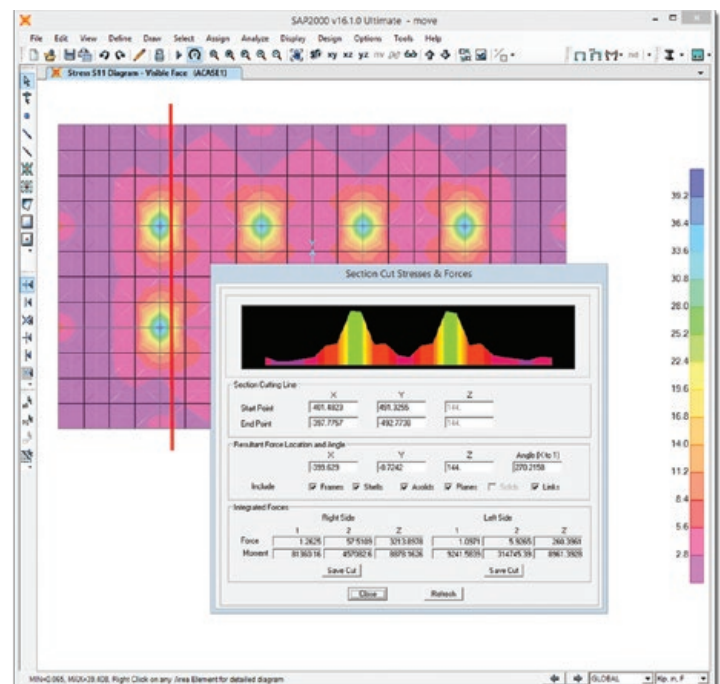


Imagem 8: Visualização de um Section Cut em laje de betão

## ANÁLISE PUSHOVER E RÓTULAS PLÁSTICAS

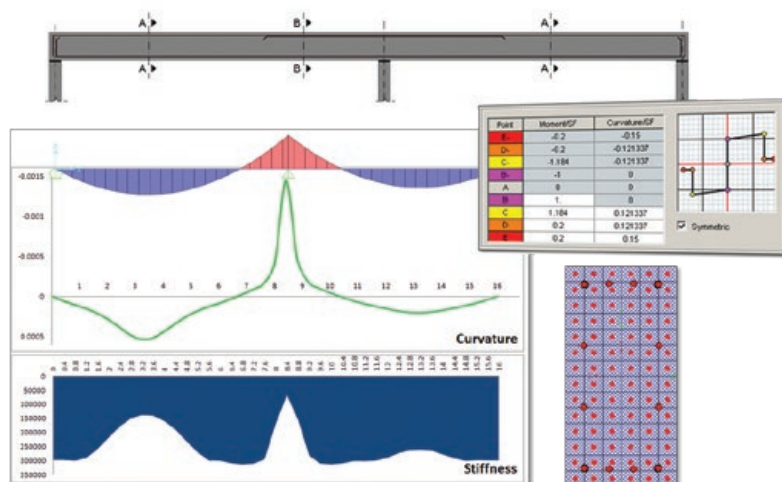


Imagem 9a: Discretização da secção em fibras e variação da rigidez e curvatura da viga

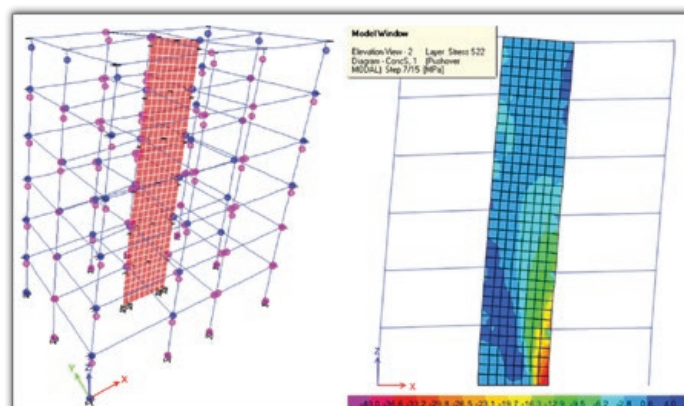
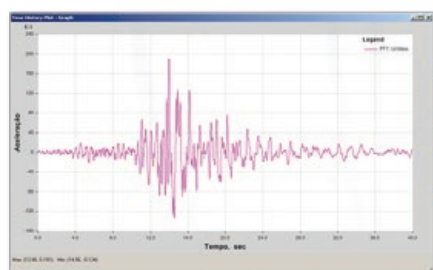
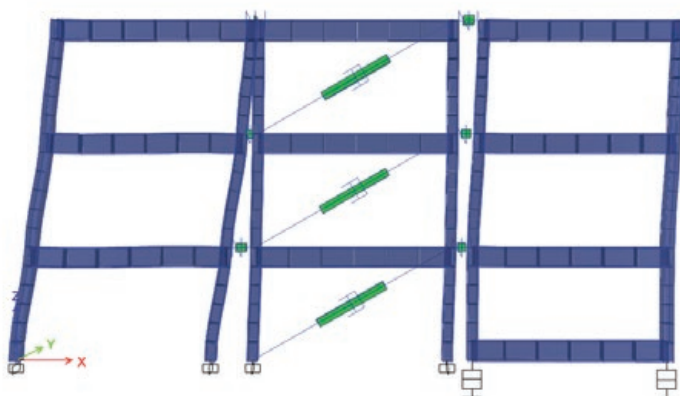


Imagem 9b: Visualização dos "pontos fracos" da estrutura numa análise Pushover

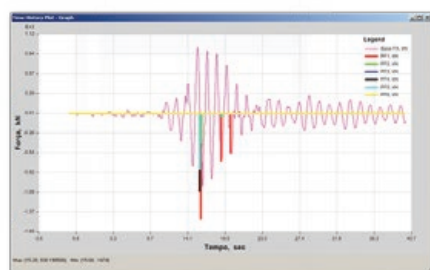
- ▶ Elementos de barra podem ser caracterizados com vários tipos de rótulas plásticas ao longo da sua extensão
- ▶ As rótulas plásticas podem ser de qualquer tipo, havendo ferramentas auxiliares para calcular rótulas plásticas por fibras de forma automática para secções metálicas e de betão armado, usando as relações constitutivas não lineares dos materiais
- ▶ Além de rótulas por fibras, podem ser definidos outro tipos de rótulas onde as leis Força-[Rotação ou Deslocamento] ou Força-[Curvatura ou Deformação] são definidas pelo utilizador

- ▶ As rótulas plásticas, mesmo que sendo definidas pelo utilizador permitem interação e acoplamento entre 3 grandezas, como N, M2 e M3
- ▶ A Análise Pushover pode ser facilmente executada no SAP2000 através de análises não lineares, com identificação das diversas fases de dissipação em cada rótula
- ▶ Implementação da FEMA356

## EXCELÊNCIA EM ANÁLISES DINÂMICAS



Forças de impacto e corte basal



Geração de funções Time History

Imagem 10: Aplicação do método modal não linear em pórtico com amortecedores

- ▶ Modos de vibração:
  - valores e vetores próprios
  - vetores de Ritz
  - cálculo iterativo fiável, robusto e rápido
- ▶ Espectros de Resposta:
  - bastante configurável
  - pode ser calculado como uma combinação de resposta periódica e rígida, necessário em alguns tipos de estruturas, como centrais nucleares
  - desdobramento automático dos esforços resultantes quando incluídos em combinações
- ▶ Análises no tempo:
  - por sobreposição modal, podendo usar o método FNA (Fast Nonlinear Analysis) para considerar não linearidades localizadas e manter a rapidez da análise quando comparada com integração direta
  - por integração direta com todas as capacidades não lineares disponíveis
  - possibilidade de importar casos de seqüências estáticas definidos no SAP2000 e transformá-los em análises no tempo, em situações bastante úteis como por exemplo, a interação dinâmica de veículos e efeitos dinâmicos de ondas

## FLEXIBILIDADE DO MOTOR DE CÁLCULO

- › Possibilidade recursiva de iniciar análises lineares ou não lineares a partir de estados de análises não lineares anteriores:
  - na simulação de carregamentos após análises de definição de estado inicial em estruturas com cabos
  - permitindo simplificar as análises P-Delta para muitos tipos de ações horizontais
- › Convergência de análises não lineares configuráveis através de tolerâncias e limites de ciclos
- › Utilização das tecnologias mais avançadas da INTEL para cálculo de matrizes e operações vetoriais
- › Solvers esparsos bastante rápidos e eficientes

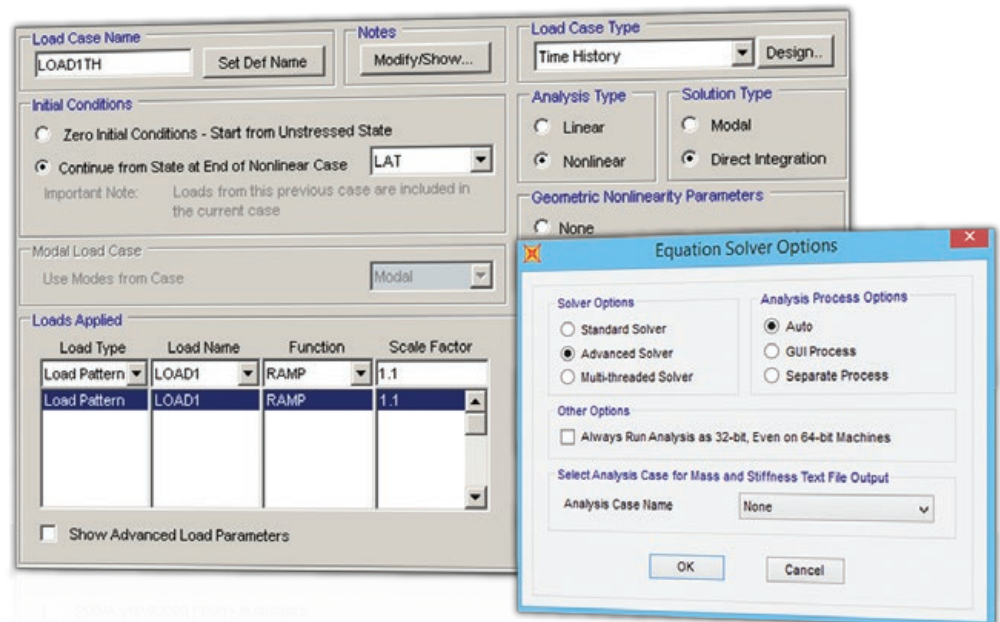


Imagem 11: Encadeamento de análises não lineares (esq.) e opções para solvers e processos de análises (dir.)

## FASEAMENTO CONSTRUTIVO E EFEITOS DIFERIDOS NO TEMPO

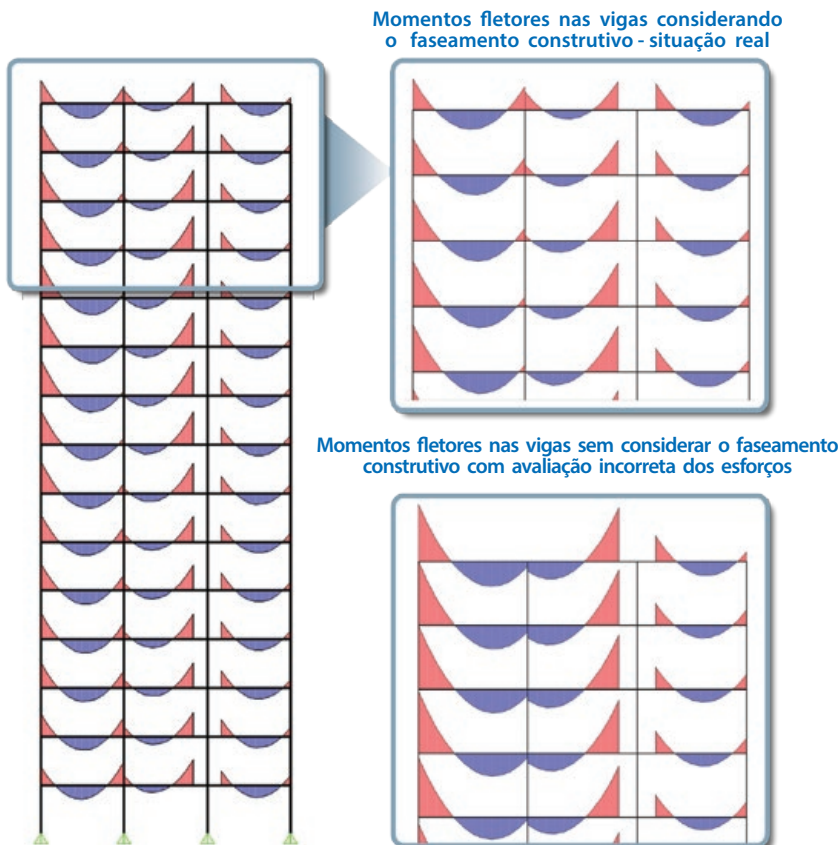


Imagem 12: Efeitos do faseamento construtivo em edifícios altos

- › Definição de fases com duração explícita
- › Consideração ou não de efeitos reológicos:
  - retração do betão
  - fluência do betão
  - relaxação do aço de pré-esforço
  - diagramas de comportamentos reológicos definidos manualmente ou segundo as normas CEB-FIP 2010 e ACI 209R-92
- › Possibilidade de:
  - adicionar estruturas
  - remover estruturas
  - carregar estruturas
  - remover cargas a estruturas
  - alterar secções
  - alterar condições de apoio
- › Perdas de pré-esforço podem ser eficientemente estimadas, em particular:
  - encurtamento instantâneo do betão
  - fluência e retração do betão
  - relaxação do aço de pré-esforço
- › Interface intuitivo para visualizar a sequência das fases
- › Inclusão de todos os comportamentos não lineares disponibilizados pelo SAP2000 na análise

## SIMPLICIDADE NA SIMULAÇÃO DE PRÉ-ESFORÇO

- ▶ Aplicação dos cabos de pré-esforço em objetos de barra, área e sólidos
- ▶ Obtenção imediata da componente hiperestática na estrutura
- ▶ Pode ser modelado como ação ou como elemento durante o faseamento construtivo
- ▶ Geometrias tipificadas e fácil configuração dos cabos
- ▶ Perdas instantâneas automaticamente calculadas ou definidas pelo utilizador

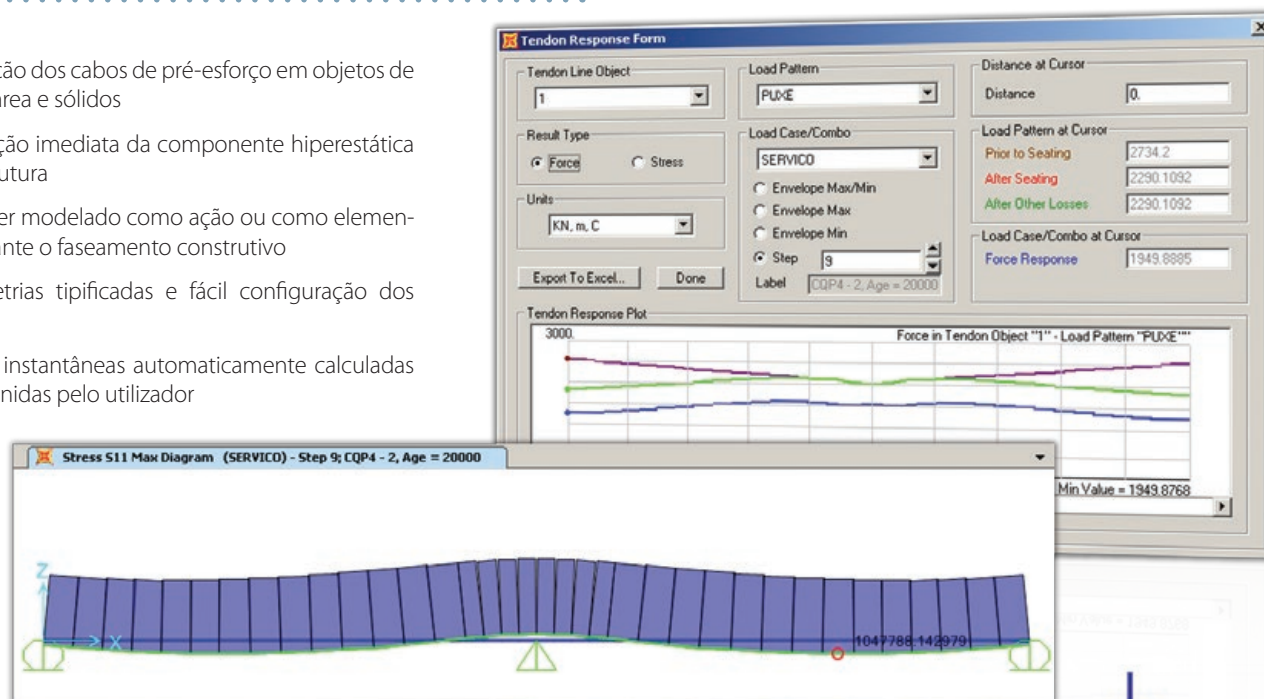


Imagem 13: Visualização das tensões e perdas nos cabos de pré-esforço

## OTIMIZADOR ESTRUTURAL

- ▶ Determinação automática de ações ótimas para diversos tipos de situações de otimização
- ▶ As variáveis são geralmente ações disponíveis na análise em questão
- ▶ As restrições podem ser impostas, como por exemplo:
  - limites de deslocamentos
  - forças máximas e mínimas
- ▶ Número de variáveis e de restrições não necessitam de ter correspondência
- ▶ Aplicações em várias áreas, como por exemplo na definição de configuração de cabos iniciais para uma ponte de tirantes, quando se impõem condições de deformabilidade a curto e longo prazo ao tabuleiro

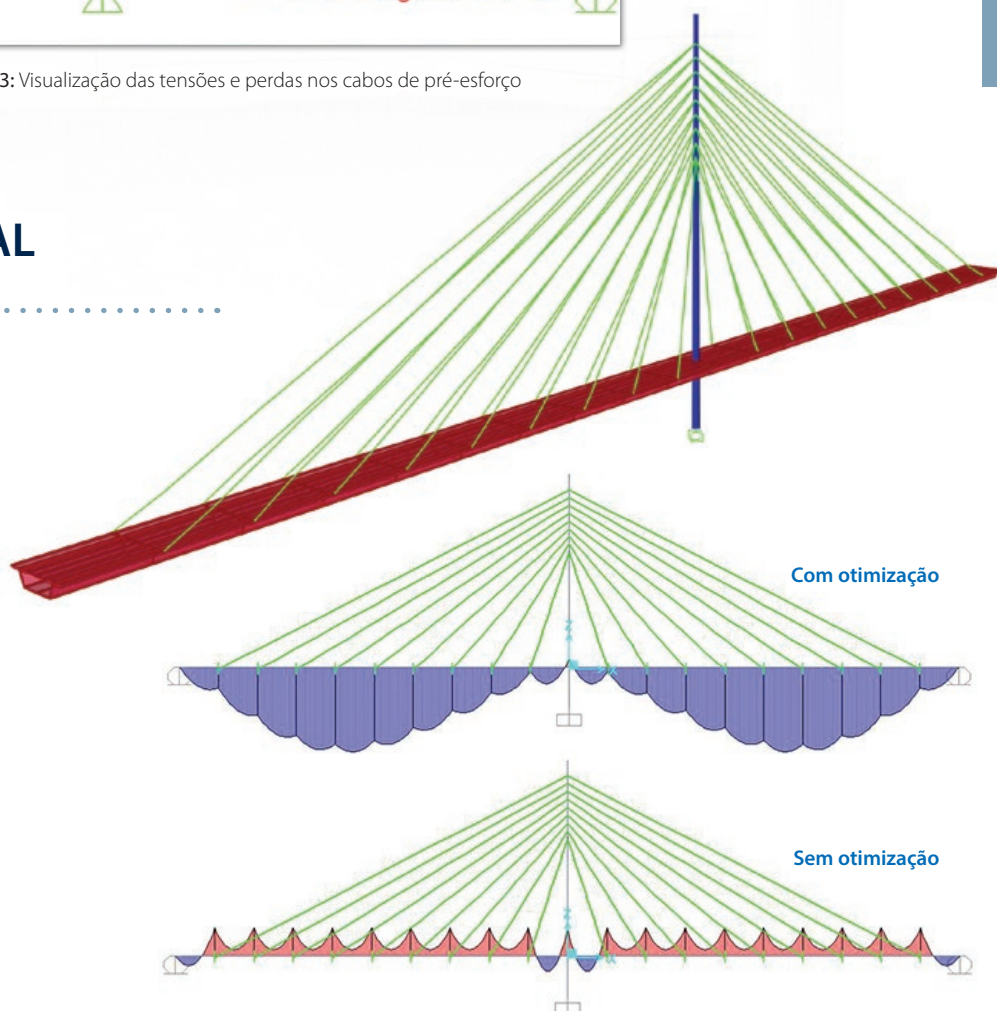


Imagem 14: Otimização de momentos fletores no tabuleiro de uma ponte

# DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS E NORMAS INTERNACIONAIS

- ▶ Dimensionamento automático de:
  - estruturas de betão armado
  - estruturas metálicas
  - estruturas de alumínio
  - enformados a frio
- ▶ Vasta escolha de códigos estruturais europeus e internacionais
- ▶ Processos de dimensionamento através do EC8 permitem a definição de classes de ductilidade DCL, DCM e DCH
- ▶ Consideração de regras de Capacity Design nas verificações sísmicas
- ▶ Pré-dimensionamento de secções metálicas com base em critérios de resistência ou deformabilidade global da estrutura

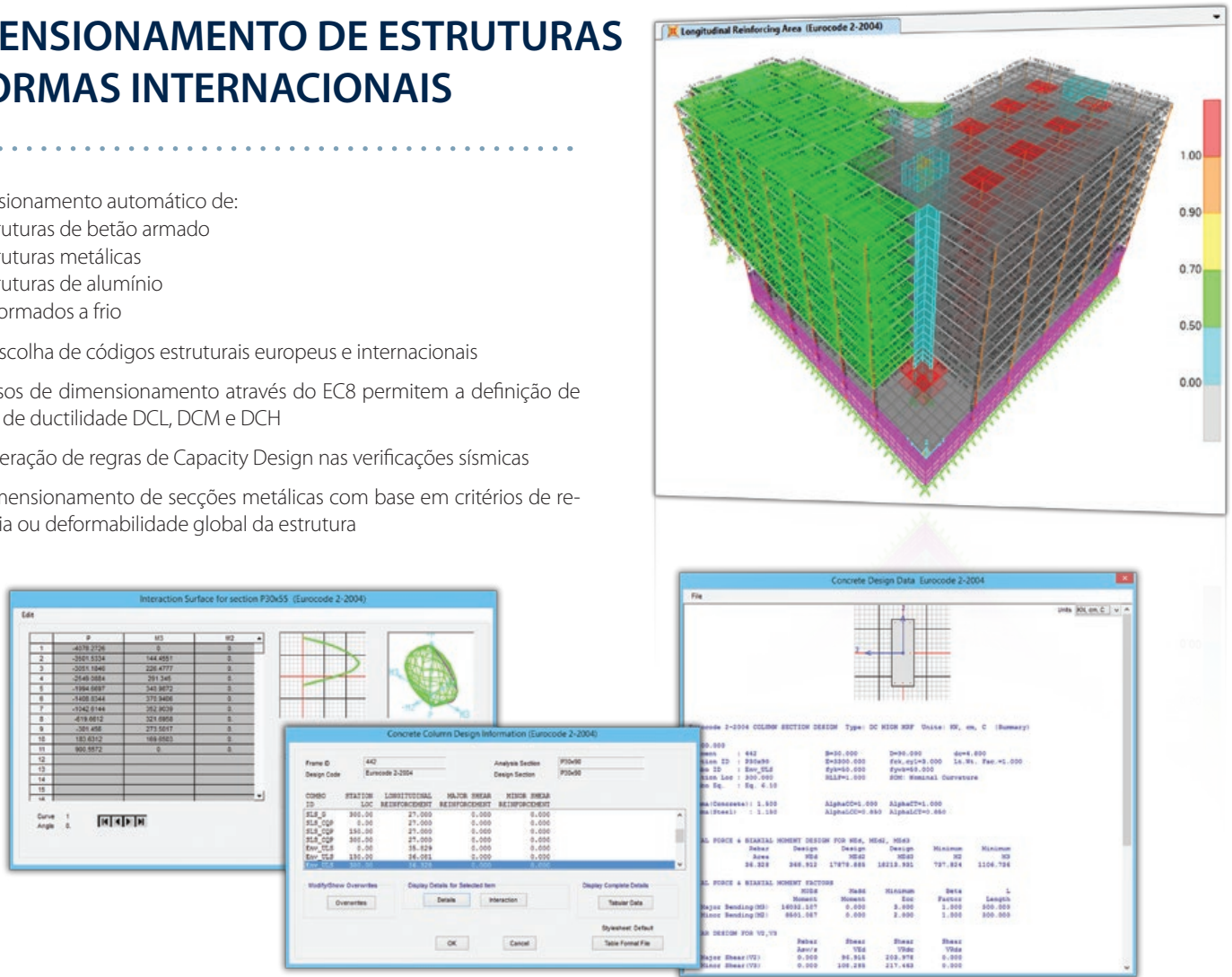


Imagem 15: Dimensionamento automático de estruturas de betão armado

# MODELAÇÃO COM CABOS ESTRUTURAIS

- ▶ Fácil definição da geometria inicial de cabos através de uma ferramenta de configuração específica
- ▶ Possibilidade de iterar automaticamente a configuração inicial de cabos através de forças objetivo nos mesmos

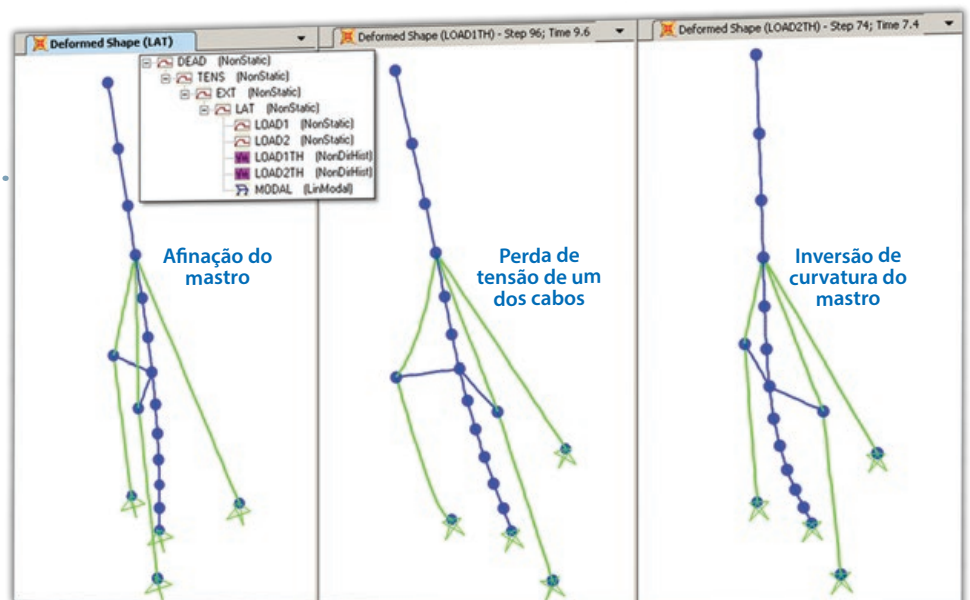


Imagem 16: Afinação progressiva de mastro de alumínio restringido por cabos de aço

## EDIÇÃO INTERATIVA DO MODELO ATRAVÉS DO EXCEL

- ▶ Todos os dados do modelo podem ser editados através de tabelas no Excel
- ▶ Resultados do modelo podem também ser adicionados ao mesmo ficheiro de Excel de configuração de dados
- ▶ Fácil implementação de rotinas de pós processamento com possível interação com cargas e geometria do modelo inicial, usando apenas o Excel

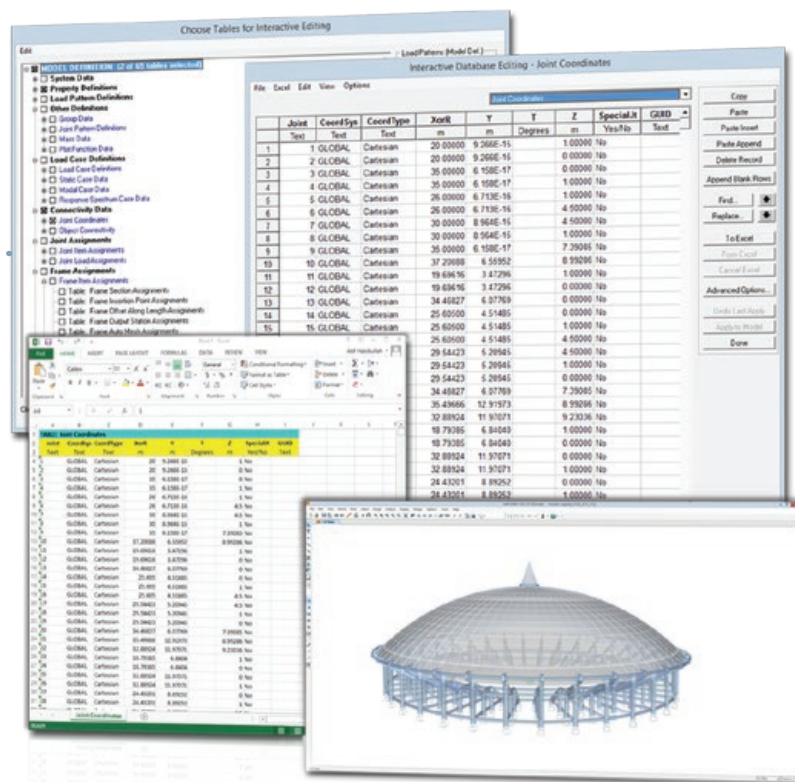
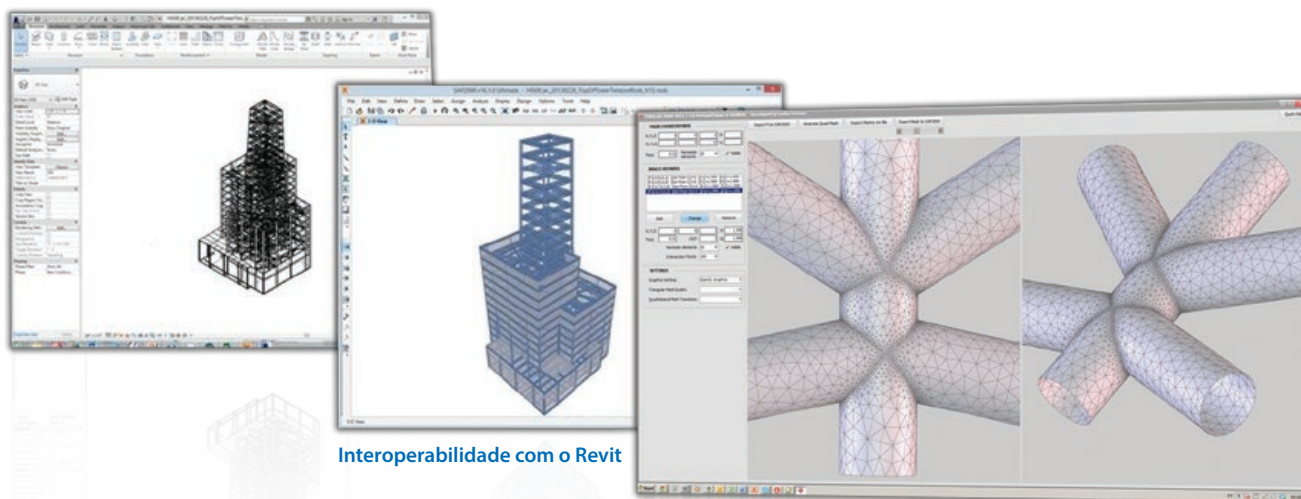


Imagem 17: Construção geométrica de cúpula utilizando tabelas de Excel

## ACESSO ATRAVÉS DE API PARA CRIAÇÃO DE PRÉ E PÓS-PROCESSADORES



Interoperabilidade com o Revit

Aplicação para geração de malhas

Imagem 18: Exemplos de utilização da API

- ▶ Através da API (Application Programming Interface) é possível:
  - controlar a aplicação e as suas instâncias no computador
  - criar, salvar e abrir modelos
  - editar modelos
  - executar modelos
  - aceder aos resultados dos cálculos
- ▶ Podem ser utilizadas várias linguagens de programação:
  - VBA, VB.NET, C #, C ++, Visual Fortran, Python e Matlab
- ▶ Algumas ferramentas disponibilizadas pela CSI são elas próprias exemplos de aplicações a funcionarem como API:
  - CSI Revit Link - para interação bidirecional entre o Autodesk Revit e os produtos da CSI
  - CSI Load Optimizer - o otimizador de cargas no SAP2000
  - Tubular Mesh - versão beta de um novo gerador de malhas para o SAP2000

# CSI

COMPUTERS & STRUCTURES, INC.  
PORTUGAL



[www.csiportugal.com](http://www.csiportugal.com)

[geral@csiportugal.com](mailto:geral@csiportugal.com)

[vendas@csiportugal.com](mailto:vendas@csiportugal.com)

