

MÉTODOS DE PROJETO ESTRUTURAL DE CAIXA ESPIRAL PARA TURBINAS FRANCIS

RICARDO LORENZ BARBOSA - Promon Engenharia Ltda.

ALBERTO JORGE C. T. CAVALCANTI - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.

JOSÉ CARLOS DEGASPARE - Consultor.

RESUMO: O presente trabalho discute métodos para a determinação do campo de tensões e deslocamentos do concreto envoltório de Caixa Espiral para turbinas tipo Francis. Isto é feito através da comparação qualitativa e quantitativa de dois modelos matemáticos executados pelo Método dos Elementos Finitos da Caixa Espiral da U.H.E. de Xingó (um modelo tridimensional e um modelo axissimétrico). Discute-se dificuldades de modelagem, execução, aspectos econômicos para o projeto, qualidade e representatividade dos resultados.

INTRODUÇÃO

A Caixa Espiral é uma estrutura de alta complexidade geométrica submetida a inúmeros carregamentos estáticos e dinâmicos, o que pode induzir o engenheiro calculista à elaboração de um modelo matemático tridimensional a ser executado pelo Método dos Elementos Finitos, modelo este de difícil e demorada execução e de elevado custo para o projeto. Em contrapartida, pode-se elaborar um modelo matemático bidimensional, axissimétrico em relação a um eixo vertical, relativamente simples, de baixo custo e que leva a resultados semelhantes aos obtidos com o modelo tridimensional.

Muitos fatores levaram ao abandono de métodos clássicos de dimensionamento da Caixa Espiral. Entre eles:

- Evolução dos computadores que se tornaram mais eficientes na resolução de métodos numéricos (velocidade de processamento);
- Popularização, que se traduz na maior facilidade de acesso aos computadores pessoais;
- Evolução dos programas de resolução numérica voltados para o cálculo estrutural;
- A tendência dos projetistas de inovar e verificar resultados antes obtidos por métodos aproximados (muitas vezes fazendo-se analogia com a resistência dos materiais);
- Chegar a resultados mais confiáveis, trazendo economia na taxa de armadura da estrutura (estruturas menos armadas).

O objetivo deste trabalho é discutir vantagens e desvantagens na elaboração de uma série de modelos matemáticos axissimétricos no lugar de se fazer um único modelo matemático tridimensional e portanto complexo da Caixa Espiral, objetivando atingir resultados satisfatórios sem prejuízos à segurança, representatividade e economia da estrutura.

MODELOS MATEMÁTICOS

Para a análise em questão foram utilizados dois modelos matemáticos, um tridimensional (Figuras 2, 3, 4, 6 e 8) e outro axissimétrico (Figuras 5, 7 e 9), elaborados para o dimensionamento da Caixa Espiral da Usina Hidrelétrica de Xingó (Rio São Francisco). A Casa de Força de Xingó é do tipo semi-abrigada, com 240 m de comprimento e 59 m de altura máxima. Terá 10 unidades geradoras (6 na primeira etapa com mais 4 na segunda etapa), com turbinas tipo Francis. Cada unidade tem a potência de 500 MW dando um total de 5.000 MW.

O modelo tridimensional está compreendido entre as elevações 4,50 e 20,00, entre as juntas que separam unidades adjacentes, avançando 16,3 m à jusante e 15,1 m à montante da linha de referência das unidades. Considerou-se que os concretos de primeiro e segundo estágios trabalham monoliticamente. Em sua base (elevação 4,50) a estrutura foi vinculada em todas as direções, permanecendo livre nas demais faces. O modelo é composto de aproximadamente 7.000 nós, o que perfaz aproximadamente 20.000 graus de liberdade e 3.300 elementos tridimensionais hexaédricos, utilizados para representar o concreto envoltório da caixa espiral. Para o pré-distribuidor e blindagem da Caixa Espiral foram utilizados 654 elementos de casca (aço). Não foram considerados detalhes como galerias e dutos, uma vez que a discretização da malha assim não os permitia e os efeitos, nestes casos, são meramente localizados, não influenciando na distribuição geral das tensões.

O modelo bidimensional é do tipo axissimétrico correspondente a um corte transversal pelo eixo da unidade, à jusante da caixa espiral. Seguindo o esquema adotado para o modelo tridimensional, o axissimétrico foi engastado em sua base (elevação 4,50), permanecendo livre nas faces verticais e no topo. O modelo é composto de aproximadamente 640 nós, o que perfaz aproximadamente 1000 graus de liberdade e 547 elementos planos axissimétricos (concreto). Para o pré-distribuidor foram utilizados 6 elementos de casca (aço), com espessura proporcional a fatia de 1 rd considerada no modelo. Da mesma maneira, para a blindagem metálica da Caixa Espiral foram utilizados 53 elementos de barra (aço), com altura correspondente a espessura da chapa e largura proporcional a fatia de 1 rd do modelo.

Todos os materiais foram considerados isotrópicos e a análise foi feita em regime elástico linear. Os parâmetros utilizados para os materiais nos dois modelos matemáticos (2D e 3D) foram:

- Concreto $E = 40.000 \text{ MPa}$ (módulo de elasticidade)
 $\nu = 0,2$ (coeficiente de Poisson)
- Aço $E = 210.000 \text{ MPa}$ (módulo de elasticidade)
 $\nu = 0,3$ (coeficiente de Poisson)

Para a resolução dos modelos pelo Método dos Elementos Finitos foi utilizado o programa "SAP 90", do Professor Edward L. Wilson da Universidade de Berkeley, Califórnia.

No dimensionamento feito com o modelo tridimensional da Caixa Espiral da U.H.E. de Xingó foram aplicados diversos carregamentos provenientes de efeitos hidráulicos, de peso próprio dos materiais, carregamentos do grupo gerador (curto-circuito, frenagem, levantamento do rotor, etc), para diferentes condições de operação (construção, operação normal e eventos excepcionais).

Tomando-se, por exemplo, a armadura transversal que envolve a blindagem de aço da Caixa Espiral, concluiu-se que o carregamento que substancialmente determinou a área de aço necessária foi a pressão hidrostática interna proveniente de um regime transitório, causado pela paralisação brusca do fluxo ("golpe de ariete") na Caixa-Espiral.

- Pressão máxima do reservatório = 126,50 mca;
- Fator de majoração da pressão devido ao fenômeno transitório = 1,3
- Pressão na caixa espiral durante a concretagem da estrutura envolvente = 112,00 mca;
- Pressão efetivamente transmitida ao concreto = $126,50 \times 1,3 - 112,00 = 52,45$ mca.

Para esse estudo optou-se por comparar os esforços obtidos no modelo tridimensional com o modelo axissimétrico, para o caso da pressão interna mencionada anteriormente, de 52,45 mca referida ao nível do eixo da caixa espiral (E.I. 12,50).

COMPARAÇÕES QUALITATIVAS E QUANTITATIVAS DOS MODELOS MATEMÁTICOS

É conhecida a dificuldade na elaboração geométrica de malhas tridimensionais de Elementos Finitos, principalmente quando a mesma é feita através de arquivos de dados como é o caso do "SAP-90". Essa dificuldade é ainda maior quando nos confrontamos com uma Caixa Espiral, onde:

- Não existe nenhum tipo de simetria;
- Tem-se internamente um conduto circular de diâmetros e curvaturas variáveis formado por um material laminar com propriedades diferentes da massa que o envolve;
- Internamente a esse conduto (blindagem da Caixa Espiral) não pode haver elementos sólidos;
- No centro da Caixa Espiral é necessário deixar lugar ao poço onde encontra-se a turbina e de onde o fluxo segue para o tubo de sucção;
- É preciso prever a existência do pré-distribuidor (estrutura de aço, formada por dois anéis unidos por uma série de pás).

Constituir dentro dessa complicada estrutura uma infinidade de elementos poliédricos que, para boa qualidade intrínseca ao Método dos Elementos Finitos devem ter uma certa regularidade no tamanho dos lados para não distorcer resultados numéricos, é uma tarefa exequível porém demorada e dispendiosa. Além disso, torna-se difícil achar erros escondidos dentro do emaranhado de nós e elementos, erros estes que podem passar despercebidos no decorrer dos cálculos, sendo descobertos ao longo das análises dos campos de tensões e deslocamentos. Outro problema de um modelo tridimensional do porte do elaborado nesse trabalho é a dificuldade de se achar máquina com capacidade não só para processar os cálculos como também para armazenar os resultados e matrizes geradas durante o processo. Frequentemente 150 MB de disco rígido eram insuficientes diante dos inúmeros casos de carga. Portanto o calculista se vê obrigado a reservar uma máquina com disco rígido praticamente vazio e exclusivo para essa operação forçando uma eventual redução dos casos de carga analisados.

Apesar dos computadores extremamente rápidos existentes nos escritórios, um processamento tridimensional desse tamanho leva no mínimo de 8 horas para cada rodada o que obriga a não apenas ter uma máquina rápida e vazia, como também trabalhando em tempo integral no cálculo da estrutura. É importante lembrar que não se acerta na primeira tentativa, a modelagem é um processo interativo que converge para a estrutura desejada, o que acaba resultando em dezenas de processamentos.

Devido as dificuldades apresentadas anteriormente pode-se observar que em uma malha tridimensional os elementos acabam tendo dimensões homogêneas por toda estrutura resultando em elementos grosseiros em regiões importantes e, por outro lado, refinado demais em regiões menos importantes. Após acertado e calibrado o modelo tridimensional, é feita a análise dos resultados. Por ser um modelo espacial, é preciso escolher cortes e efetuar rotações a fim de visualizar plotagens e se mapear numerações de nós e elementos. Esse processo é muito trabalhoso nesse tipo de modelo matemático tridimensional.

Os problemas apresentados acima deixam de existir nos modelos axissimétricos, cuja execução da malha é simples, processamentos rápidos em qualquer máquina, ocupando muito menos espaço em disco. Nos processamentos bidimensionais tem-se o domínio total sobre o modelo, sendo fácil checar e visualizar resultados, deixando de existir o perigo de se cometer erros escondidos no interior da malha. Pode-se manipular as dimensões dos elementos, enriquecendo a malha em regiões de maior interesse. A saída de resultados para este caso é simples e feita através da integração das tensões de tração em cortes facilmente definidos.

Um problema existente nos modelos axissimétricos é a obrigatoriedade das cargas aplicadas de serem também axissimétricas o que impossibilita analisar os efeitos provenientes do grupo gerador (rotor e estator), porém nos estudos feitos na U.H.E. de Xingó, constatou-se que esses efeitos não tem influência determinante na armadura calculada sendo o peso próprio e a pressão interna à blindagem da Caixa Espiral as cargas que realmente determinam a área de aço necessária na estrutura, e são ambas cargas axissimétricas.

Nas Figuras 4 a 12 observam-se alguns resultados que retratam bem a boa concordância encontrada entre os modelos tridimensional e axissimétrico, quer a nível de deslocamentos, quer a nível de tensões, em particular o campo de tensões normais instaladas ao redor da blindagem da caixa espiral (Figuras 4 a 9) que, do ponto de vista prático, podem ser consideradas as mais importantes, pois servem diretamente para o dimensionamento da armadura que circunda a blindagem da caixa espiral. Para ilustrar melhor a semelhança de resultados, foram plotados os diagramas de tensões normais para três cortes feitos na seção analisada tanto para o modelo tridimensional como para o modelo axissimétrico (Figuras 10 a 12).

A boa concordância entre os resultados obtidos através dos dois modelos matemáticos também pode ser observada em regiões singulares da caixa espiral, onde o campo de tensões se apresenta de forma concentrada. É o caso das extremidades inferior e superior da junção com o pré-distribuidor onde a ligação entre o concreto e a blindagem da Caixa Espiral é sempre feita de maneira precária, necessitando para isso lançar-se mão de análises não lineares para solução do problema.

A união da confiabilidade dos resultados com a simplicidade de manipulação dos modelos axissimétricos pode trazer uma economia relevante ao projeto estrutural de Caixa Espiral sem prejuízo a representatividade do modelo e segurança da estrutura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia Hidro Elétrica do São Francisco e à Promon Engenharia por possibilitarem a divulgação do trabalho e pela colaboração recebida.

REFERÊNCIAS

KOCH, Otto G.; et-all, Embutimento de Caixas Espirais para Turbinas Francis em Estruturas de Concreto. Anais XIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, P.11.

SZPILMAN, Adolfo; et-all, Análise Estrutural do Concreto Envolvente da Caixa Espiral. Revista Construção Pesada, Set/82.

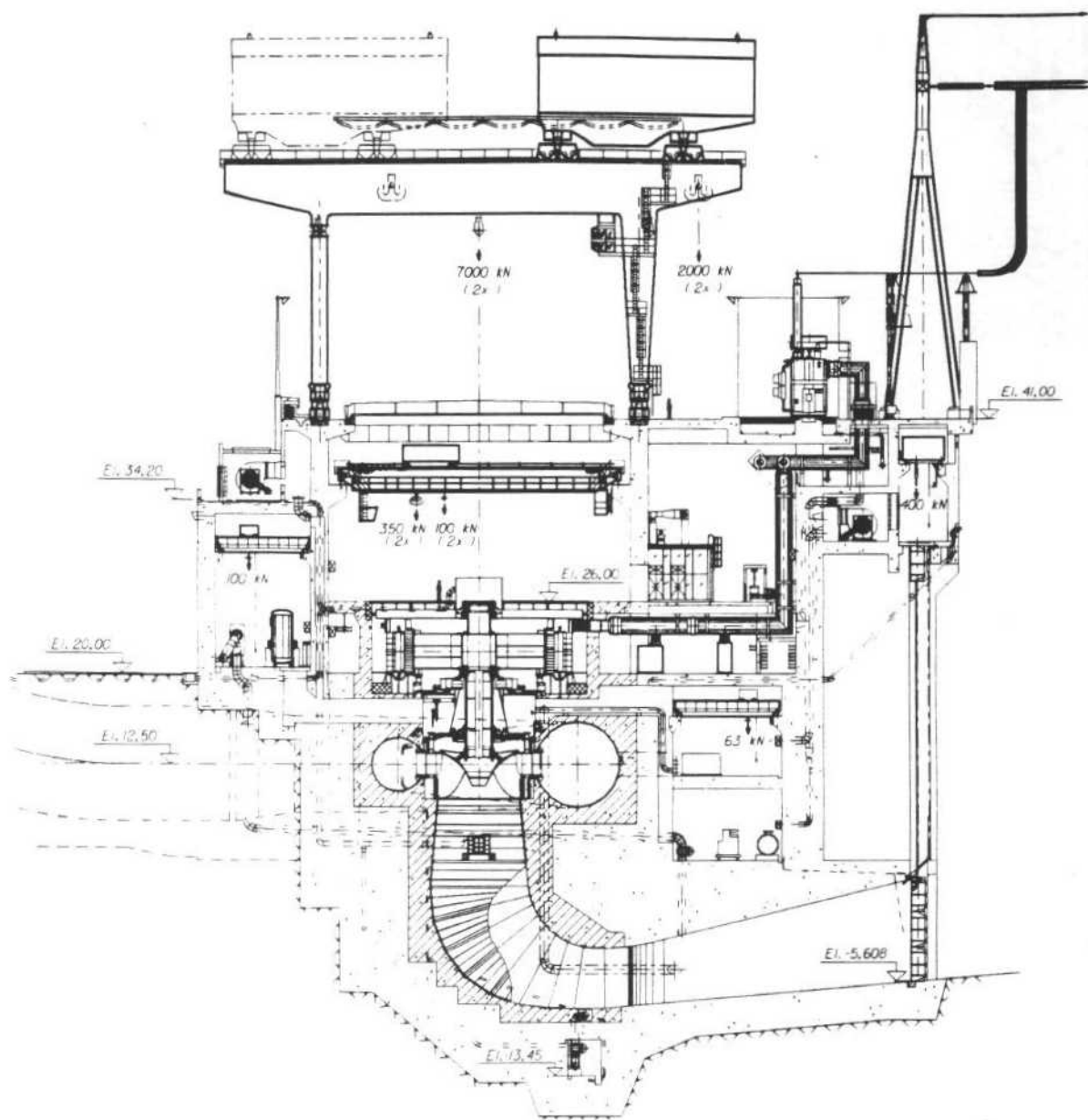


Figura 1: Xingó - Casa de Força - Corte Transversal Típico

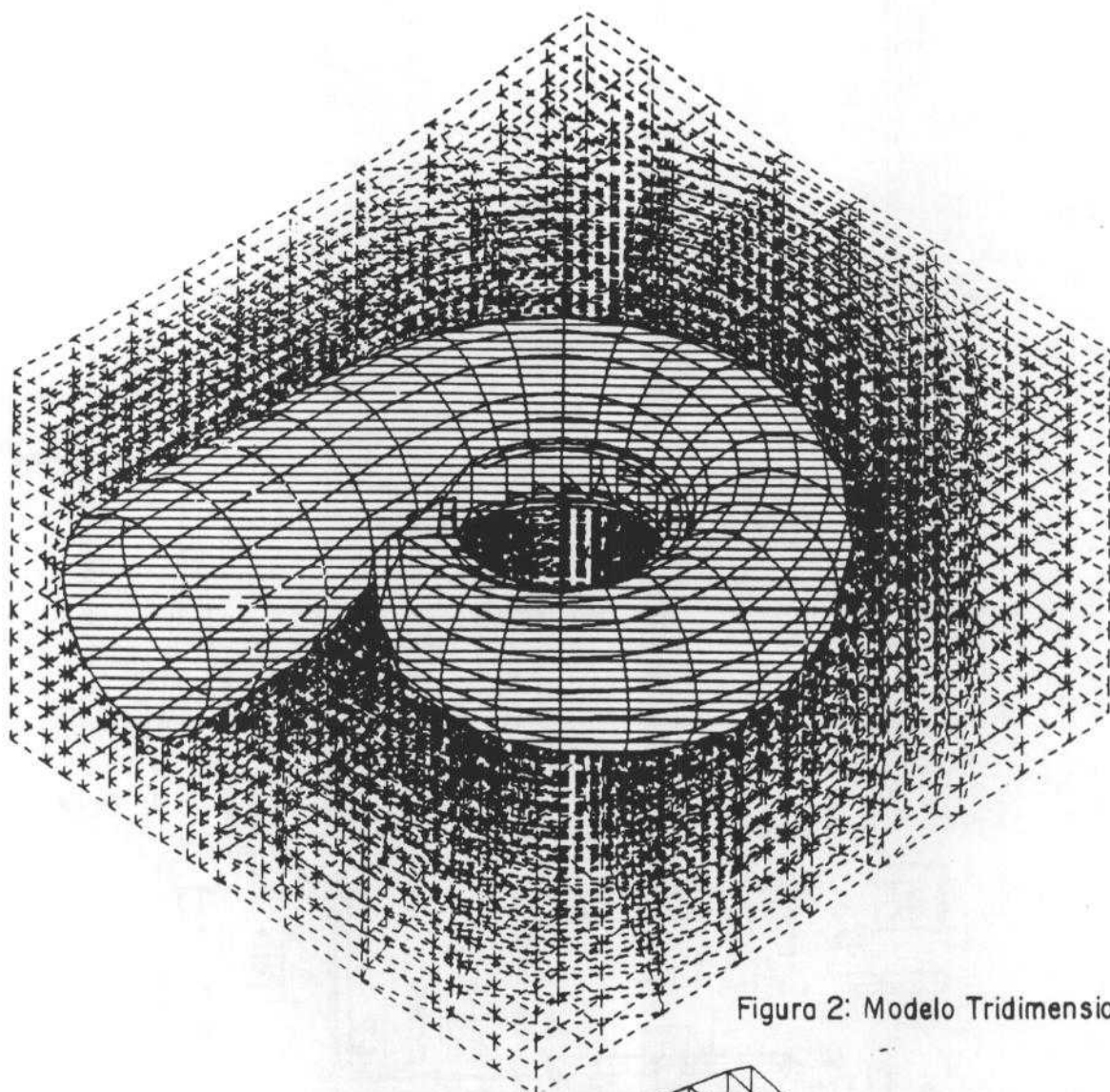


Figura 2: Modelo Tridimensional.

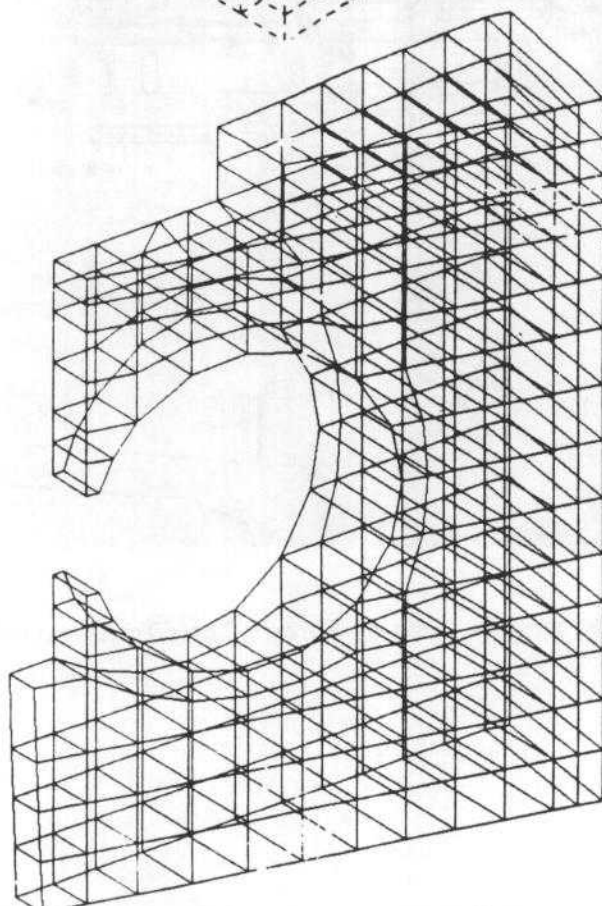


Figura 3: Modelo Tridimensional - Seção Analisada.

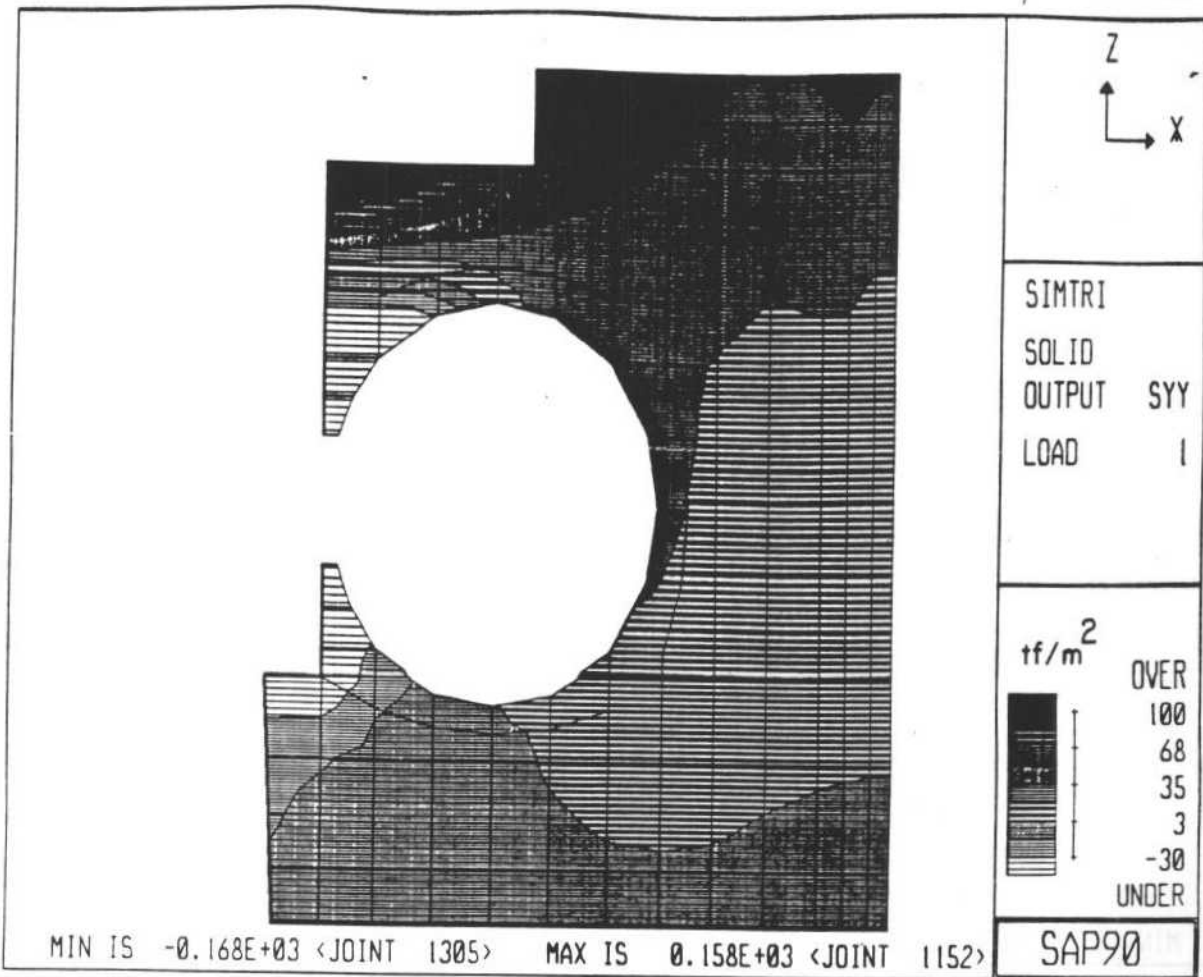


Figura 4: Modelo Tridimensional - Tensões Normais Longitudinais

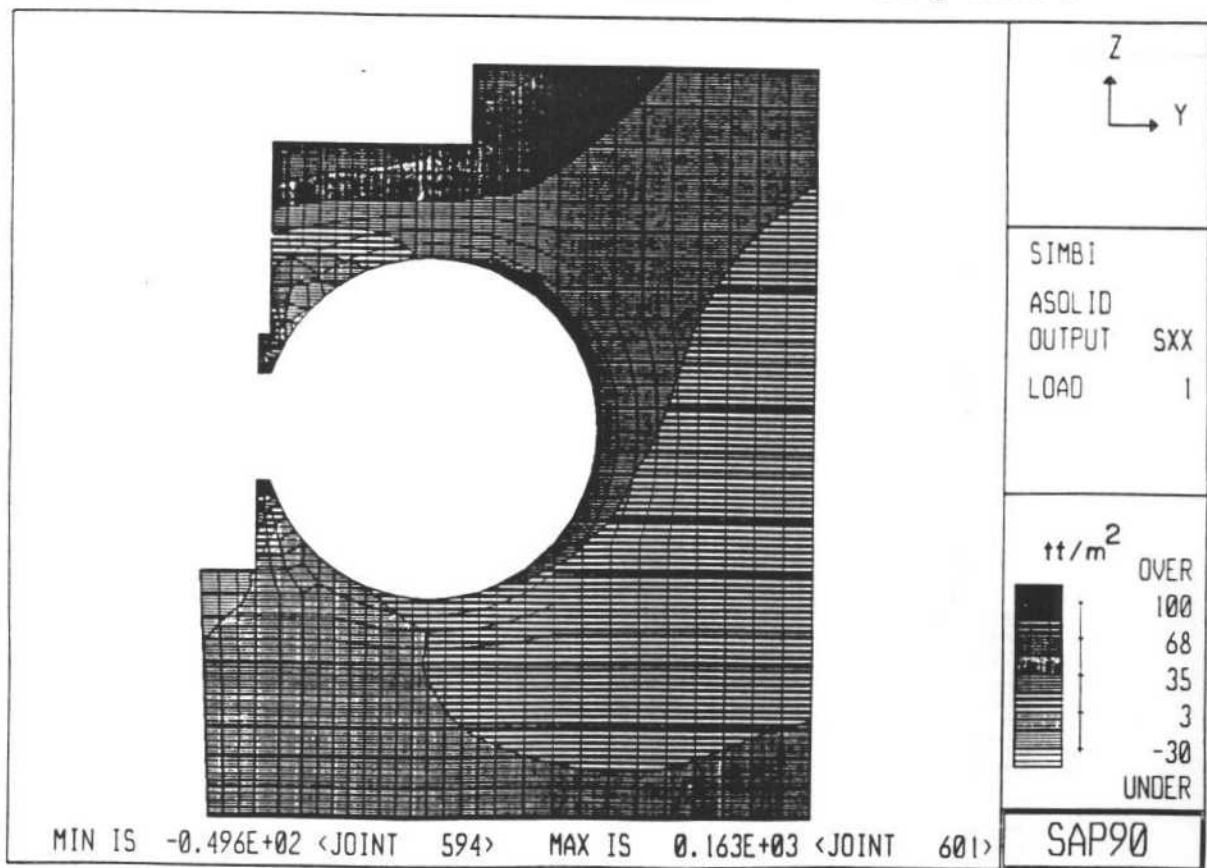


Figura 5: Modelo Bidimensional - Tensões Normais Longitudinais

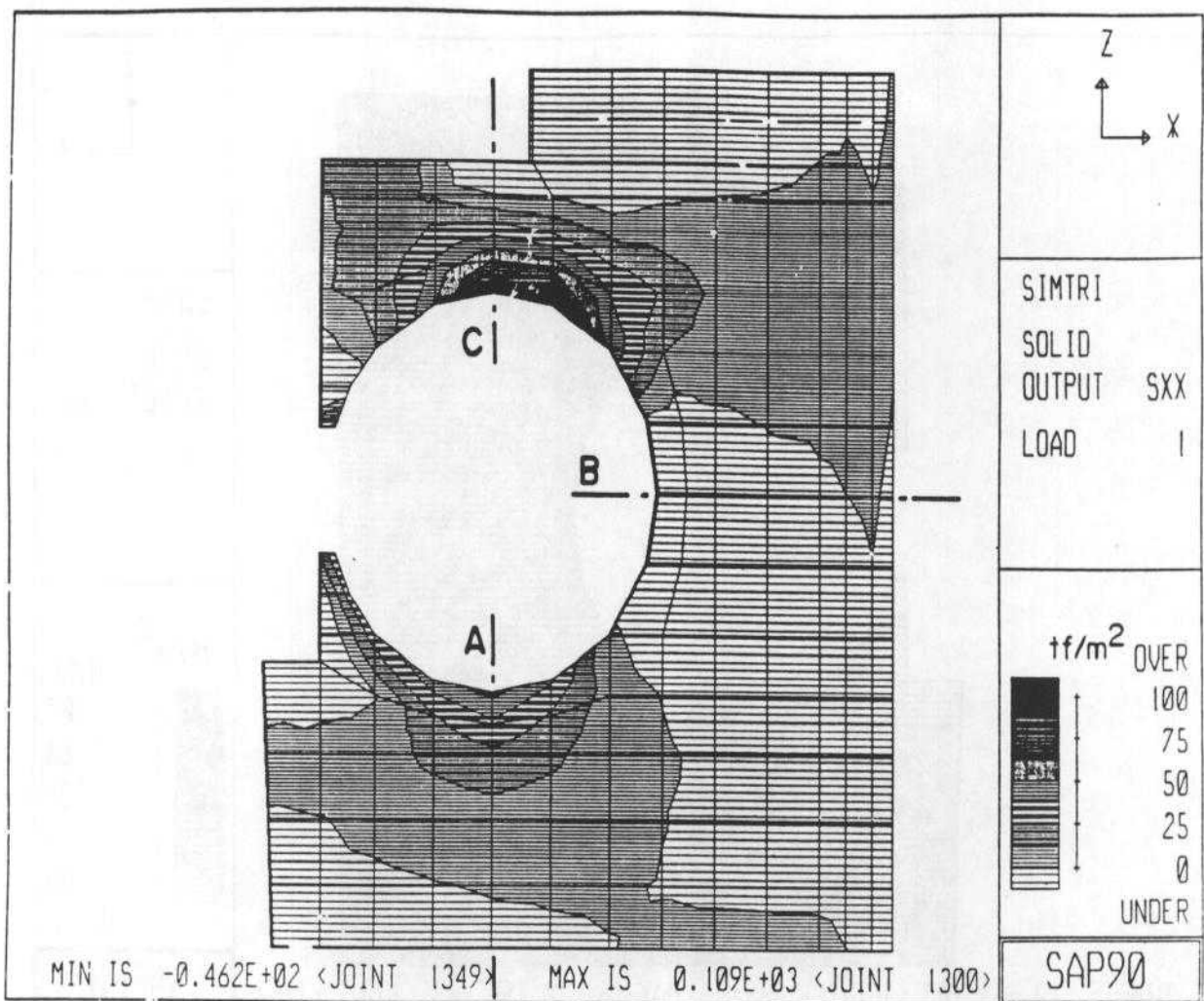


Figura 6: Modelo Tridimensional - Tensões Normais Horizontais.

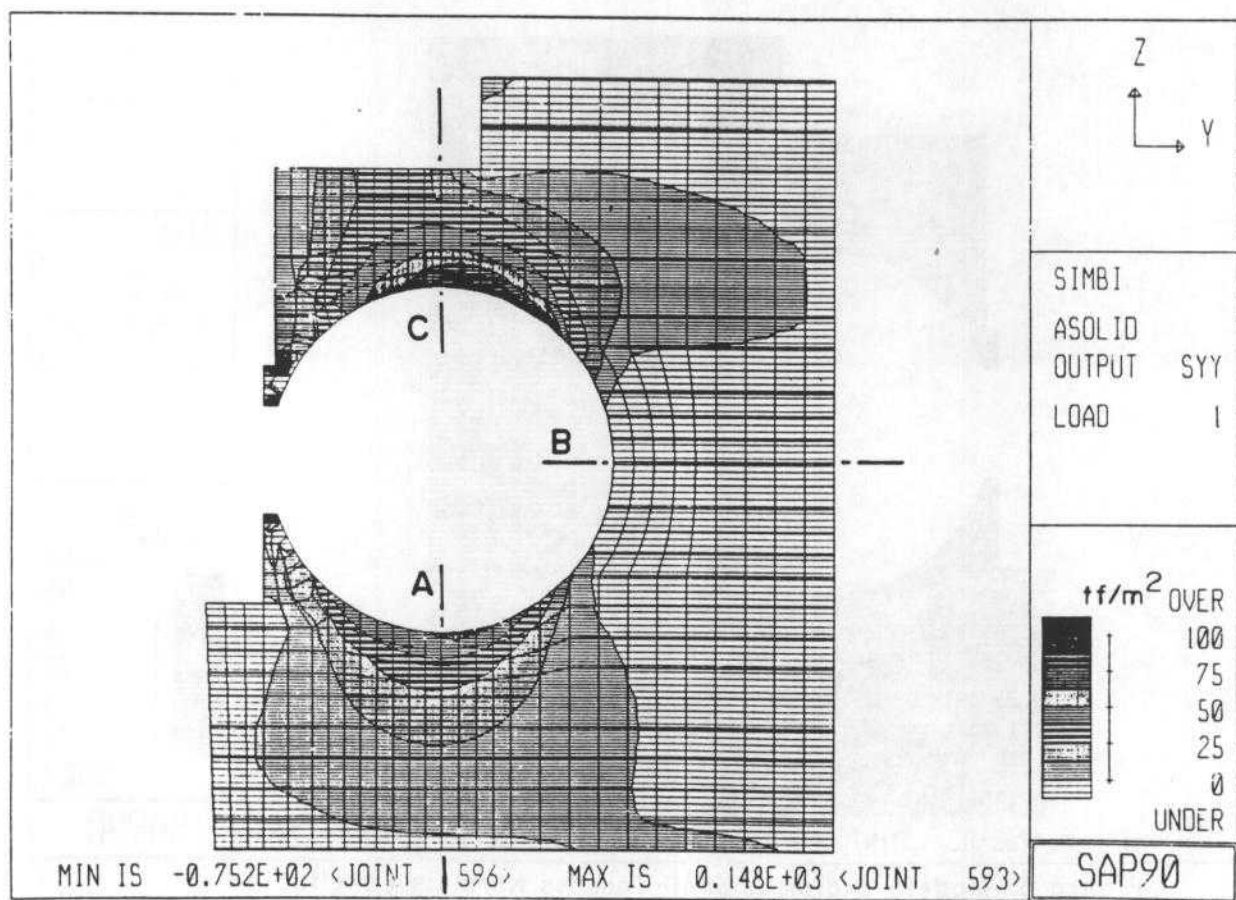


Figura 7: Modelo Bidimensional - Tensões Normais Horizontais.

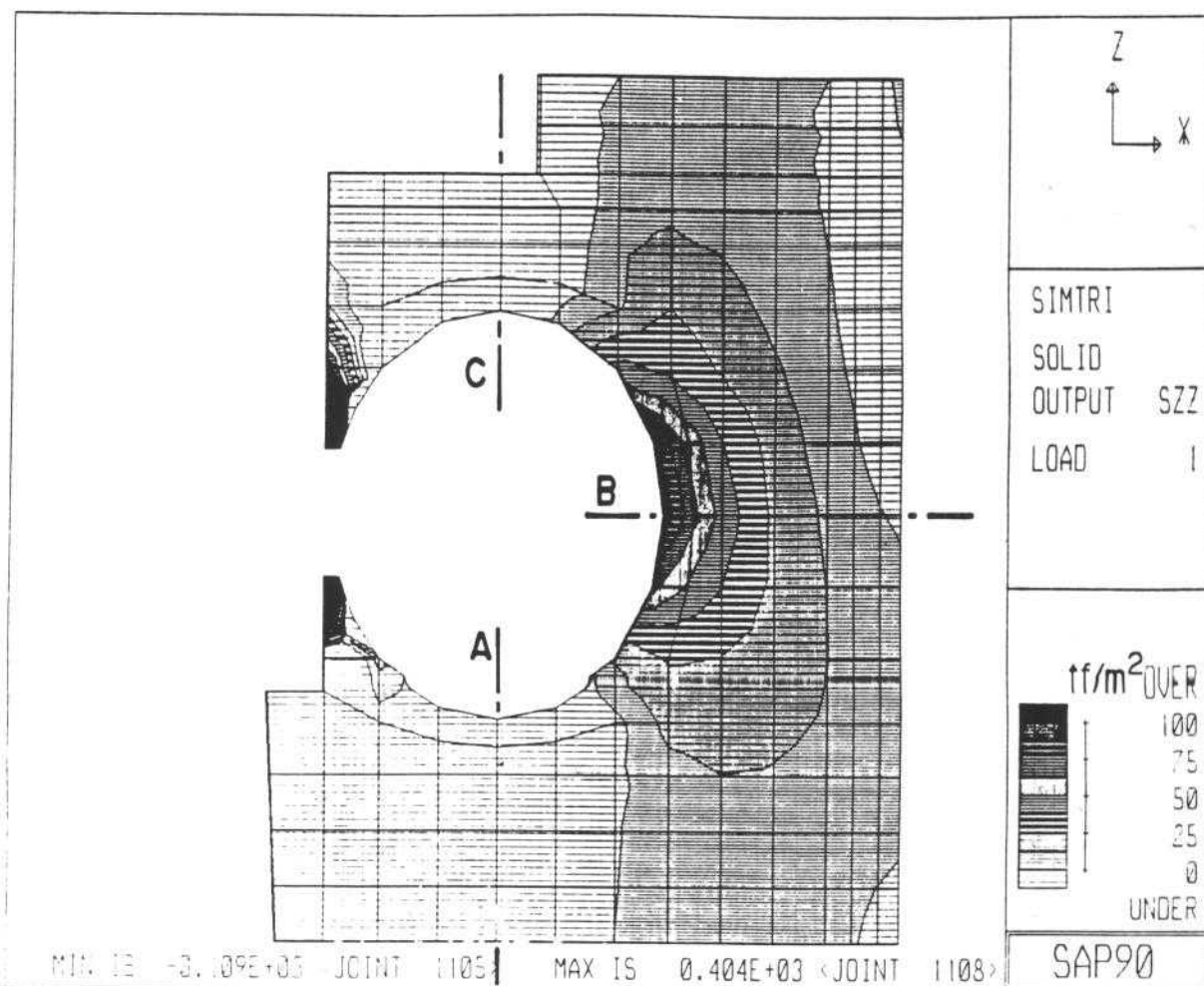


Figura 8: Modelo Tridimensional - Tensões Normais Verticais.

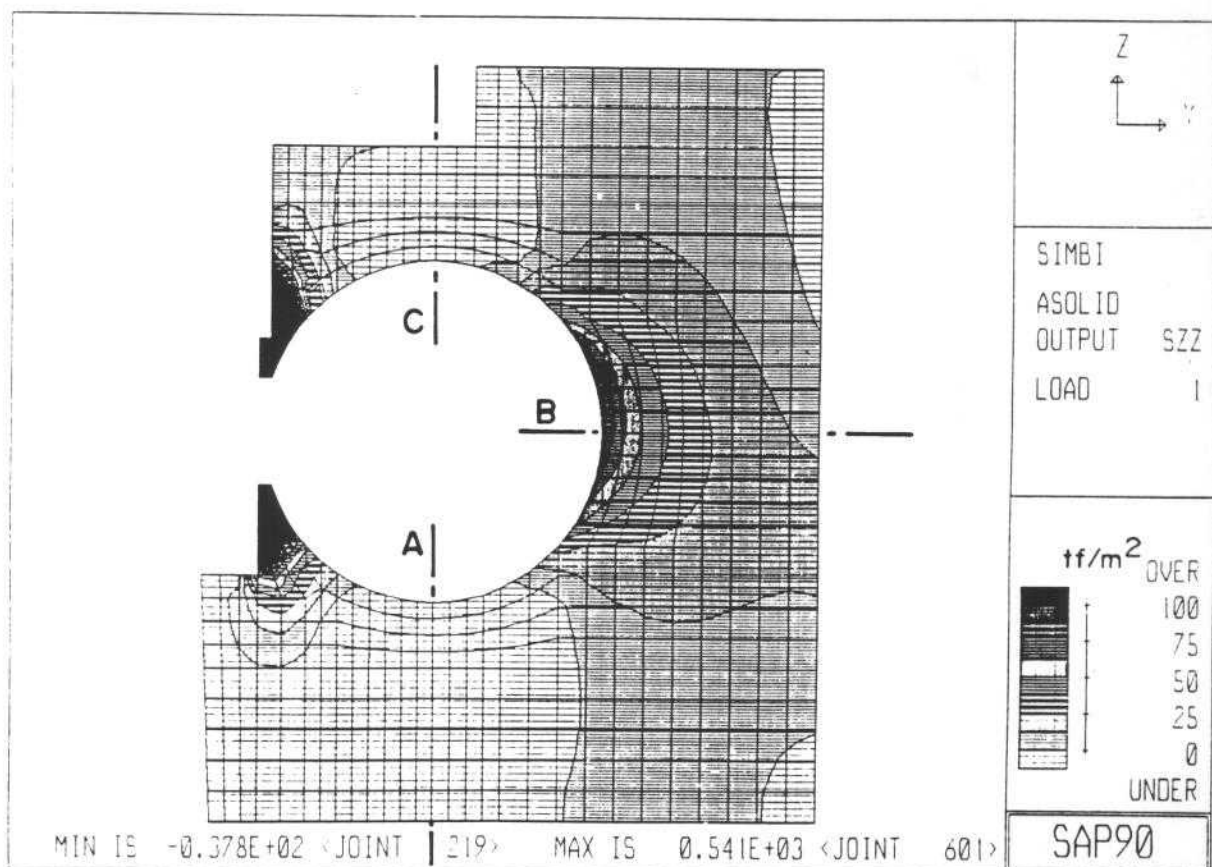


Figura 9: Modelo Bidimensional - Tensões Normais Verticais.

