



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA POLITÉCNICA

Curso de Engenharia Civil

Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas

ESTUDO NUMÉRICO DAS TENSÕES DE TRAÇÃO NA GEOGRELHA DE ATERROS ESTRUTURADOS

RODRIGO GUERRA TAFURI

Projeto de Final de Curso apresentado ao corpo docente do Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovado por:

Maria Cascão Ferreira de Almeida
Prof. Adjunta, D.Sc., EP/UFRJ
(Orientadora)

Luiz Eloy Vaz
Prof. Titular, D.Ing., EP/UFRJ

Márcio de Souza Soares de Almeida
Prof. Titular, Ph.D., PEC/COPPE/UFRJ

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais que sempre me incentivaram e apoiaram, desde o difícil ingresso na universidade até esta conturbada conclusão.

Ao meu grande amigo Ronald cujas incontáveis ajudas foram indispensáveis, meu eterno reconhecimento.

Aos amigos André, Sérgio, Caroline e a tantos outros que seria impossível descrever, por todo tipo de apoio, aprendizado e afeto.

À professora Maria Cascão cuja paciência e dedicação me foram de muita importância.

À equipe da secretaria Mônica, Eunice, Jaqueline e Luzia.

Aos amigos Paulo Renato, por sua atitude e compreensão com a conclusão deste trabalho e Raphael por seus conhecimentos técnicos.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado ao DME/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

ESTUDO NUMÉRICO DAS TENSÕES DE TRAÇÃO NA GEOGRELHA DE ATERROS ESTRUTURADOS

Rodrigo Guerra Tafuri

Agosto/2009

Orientadora: Maria Cascão Ferreira de Almeida

Programa: Engenharia Civil

Evitar concentrações de tensões nas geogrelhas é um aspecto fundamental para garantir sua vida útil em aterros sobre capitéis e geogrelhas. Este trabalho analisa a influência da geometria dos capitéis e de sua distribuição no terreno sobre as tensões da geogrelha através de modelagem numérica em um programa de análise estrutural. O aterro analisado é bidimensional.

O programa utilizado foi SAP2000. Foram analisadas distribuições dos capitéis em malhas quadradas e triangulares, para capitéis de formas geométricas quadradas e circulares. As comparações das distribuições das tensões nas geogrelhas nas quatro situações estudadas evidenciam a vantagem de projetar capitéis circulares com distribuição em malhas triangulares.

Palavras-chaves: Aterro estaqueado, solos moles, geogrelhas e modelagem numérica.

ÍNDICE

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	- 1 -
1.1	INTRODUÇÃO	- 1 -
1.2	DESCRIÇÃO DO ESTUDO	- 2 -
1.3	GEOGRELHA	- 3 -
2	<u>MODELAGEM NUMÉRICA</u>	- 5 -
2.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	- 5 -
2.2	SOBRE O SAP2000	- 6 -
3	<u>DESCRIÇÃO DAS ANÁLISES</u>	- 8 -
3.1	INTRODUÇÃO	- 8 -
3.2	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	- 9 -
3.3	PROPRIEDADES DAS SEÇÕES	- 10 -
3.4	MALHA QUADRADA COM CAPITÉIS QUADRADOS	- 11 -
3.5	MALHA QUADRADA COM CAPITÉIS CIRCULARES	- 12 -
3.6	MALHA TRIANGULAR COM CAPITÉIS QUADRADOS	- 15 -
3.7	MALHA TRIANGULAR COM CAPITÉIS CIRCULARES	- 16 -
4	<u>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</u>	- 19 -
4.1	INTRODUÇÃO	- 19 -
4.2	MALHA QUADRADA COM CAPITÉIS QUADRADOS	- 20 -
4.3	MALHA QUADRADA COM CAPITÉIS CIRCULARES	- 26 -
4.4	MALHA TRIANGULAR COM CAPITÉIS QUADRADOS	- 32 -
4.5	MALHA TRIANGULAR COM CAPITÉIS CIRCULARES	- 39 -
5	<u>COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS</u>	- 46 -
6	<u>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</u>	- 48 -
7	<u>REFERÊNCIAS</u>	- 49 -

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Este trabalho surgiu de uma situação real ocorrida na construção da Escola de Ensino Médio, SESC, situada na Av. Ayrton Senna na Barra da Tijuca, Rio de Janeiro.

O terreno natural nessa região é constituído de grandes camadas de argila mole e ficava num nível abaixo do nível térreo das edificações da escola, portanto foi feito um aterro sobre o terreno natural para que se atingisse o nível desejado.

Quando se executa um aterro sobre uma camada de argila ocorre o adensamento dessa camada, ou seja, a carga de aterro (o peso próprio do material que constitui esse aterro) comprime a camada de argila, fazendo com que esta sofra deformações ao longo do tempo.

Essas deformações tendem a se estabilizar, mas isso pode levar um tempo maior do que o desejado para o início do funcionamento do empreendimento.

O cronograma previsto para a inauguração da escola inviabilizava o emprego de aterro convencional. A solução adotada foi a de aterro estaqueado, apoiado sobre capitéis e geogrelha, ilustrada na figura 1. Desta forma formam-se no aterro arcos comprimidos que transferem o peso da sobrecarga do aterro às estacas, que descarregam no terreno natural, ao longo do seu fuste, até as camadas mais resistentes do solo (solo residual), evitando os recalques da camada de solo mole.

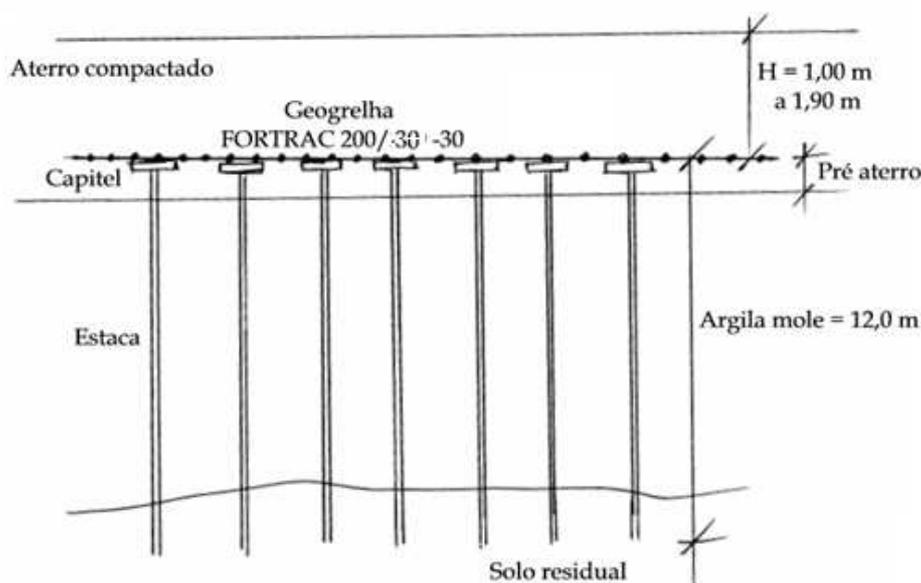


Figura 1 – Aterro estaqueado apoiado sobre capitéis e geogrelha

Os arcos comprimidos se apóiam nos capitéis, descarregando o peso do aterro e da sobrecarga prevista diretamente sobre as estacas. Somente uma pequena parcela da carga irá para a geogrelha que, formando uma malha sobre os capitéis, vai trabalhar como uma espécie de “rede”, submetida a esforços de tração.

Antes da conclusão da obra, observou-se que algumas geogrelhas haviam se rompido nas regiões de contato com as quinas dos capitéis, o que motivou o presente estudo.

1.2 DESCRIÇÃO DO ESTUDO

No projeto executado foi feita uma cravação de estacas de igual espaçamento nas duas direções, formando uma “malha” quadrada, assim como os capitéis utilizados no topo dessas estacas tinham também a forma quadrada.

Algumas inspeções realizadas ao final da obra evidenciaram desgastes maiores da geogrelha na quina dos capitéis quadrados, com rompimento da mesma em algumas posições. Verificou-se que o contato da geogrelha com as quinas do capitel seria a região mais crítica devido às concentrações de tensões, o que sugeriria que o comportamento da geogrelha sobre um capitel de forma circular seria melhor.

Outro fator que pode influenciar a distribuição das tensões na geogrelha é a forma de distribuição das estacas sobre o terreno, ou seja, seria importante analisar também o comportamento para uma distribuição dos capitéis em malha quadrada.

Assim sendo, quatro modelos foram analisados e comparados entre si:

- Distribuição das estacas formando uma malha quadrada, com capitéis quadrados.
- Distribuição das estacas formando uma malha triangular, com capitéis quadrados.
- Distribuição das estacas formando uma malha quadrada, com capitéis circulares.
- Distribuição das estacas formando uma malha triangular, com capitéis circulares.

1.3 GEOGRELHA

As primeiras formas de estabilização de solos com uso de materiais fibrosos foram usadas a milhares de anos com madeiras, raízes de árvores, peles de animais, bambus etc. em obras como construção de templos na Mesopotâmia e a Grande Muralha da China.

Com o surgimento dos materiais sintéticos com grande rigidez a tração foi possível desenvolver as primeiras geogrelhas na Inglaterra e depois levadas para os Estados Unidos e Canadá.

As tiras das geogrelhas são feitas de polímeros como o poliéster (PET), o polipropileno (PP) e o polietileno (PEAD) de alta densidade e formam uma malha onde o espaçamento é grande o suficiente para que haja penetração do solo nos espaços vazios formando um entrosamento entre as partículas do solo e a geogrelha efetivando assim a interação solo-geogrelha. A abertura da malha permite também a drenagem vertical do solo.

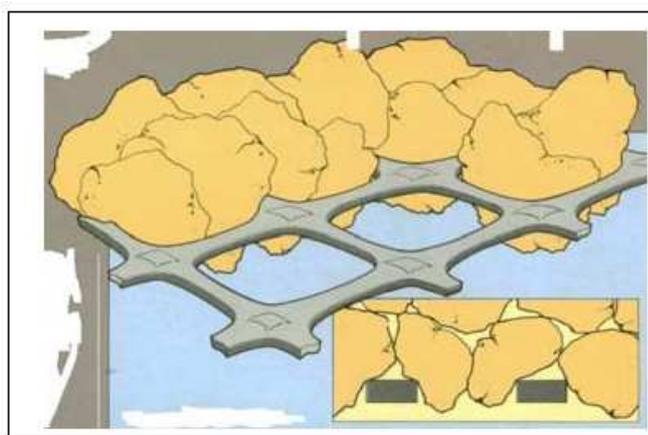


Figura 2 – Entrosamento entre as partículas do solo e a geogrelha

O estudo do mecanismo de interação solo-geogrelha foi feito através de ensaios realizados com equipamentos de grandes dimensões no Laboratório de Geotecnia do CEDEX, em Madri, onde foram realizados três tipos de ensaios utilizando três diferentes tipos de geogrelha e dois tipos de solo.

Cada ensaio realizado teve o objetivo de descobrir parâmetros diferentes na interação solo-geogrelha para que mais tarde fosse possível a utilização desses parâmetros de forma confiável na elaboração de projetos.

Os ensaios de arrancamento tiveram o objetivo de estudar as tensões confinantes e a densidade relativa. Os resultados mostraram que as tensões confinantes exercem uma influência semelhante à densidade relativa na interface solo-geogrelha. Descobriu-se que a resistência ao arrancamento é dividida em três parcelas: o atrito entre o solo e a geogrelha, a adesão e o empuxo passivo das partículas do solo nas aberturas da malha. Dependendo do tipo de geogrelha, terá maior contribuição de uma ou de outra parcela.

Os ensaios de cisalhamento direto tiveram o objetivo de obter parâmetros de resistência da interface e variação da resistência ao cisalhamento com a inclinação da geogrelha e descobriu-se que a inclinação ótima é próxima de 60°, que corresponde à resistência máxima. Os resultados mostraram que a geogrelha deve ser posicionada na direção horizontal para reforços de maciços. Em análise experimental e numérica da configuração da deformada da geogrelha na caixa de cisalhamento mostraram que a zona central, onde ocorre o cisalhamento, corresponde a aproximadamente 40% da altura da caixa.

Os ensaios triaxiais em corpos de prova tiveram o objetivo de definir o número de camadas de geogrelha na resistência da deformabilidade do solo reforçado.

A utilização de geogrelhas vem crescendo no Brasil e no mundo e já é utilizada de diversas maneiras como construção e reabilitação das camadas de lastro ferroviário; reforço de base em construção de estradas, ferrovias e aeroportos; construção de taludes muito íngremes; reforço de aterro sobre solos moles e sobre estacas; estabilização de espigões e molhes; construção de aterros sanitários etc., pois se trata de uma técnica que permite rapidez na execução da obra sem que haja necessidade de mão-de-obra especializada, fazendo com que haja uma considerável redução no custo final.

2 MODELAGEM NUMÉRICA

2.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Em 1943, Courant formulou a solução para o problema de torção de Saint Venan, seguindo o esquema geral do método dos elementos finitos. Ele aplicou o princípio da mínima energia potencial total e subdividiu a seção transversal da barra em elementos triangulares. Foi assumido um campo linear para a função torcional para cada elemento. Mais tarde, Prager e Synge generalizaram o esquema de Courant chamando de “O método do hipercírculo”, aplicando para alguns problemas matemáticos.

Desde então o MEF tem sido apresentado basicamente como um método variacional. Por essa aproximação o método é uma ferramenta muito geral para problemas de engenharia. O MEF também pode ser concebido usando uma aproximação física. Nesse caso, o método adquire um significado mecânico muito claro para problemas de estrutura e sólidos. Basicamente, a peça é subdividida em elementos finitos, interconectados por um discreto número de pontos nodais. Depois cada elemento é considerado isolado dos demais. O comportamento individual do elemento é estabelecido por uma relação de causa-efeito entre deslocamentos nodais e tensões ou forças. Essa relação é expressa na forma de matriz em termos de coeficientes de rigidez e flexibilidade. Depois dessas expressões serem estabelecidas para todos os membros desconectados, o comportamento global do sistema é estudado. Para isso, a interação de cada parte do sistema, ou elemento, é levada em consideração, permitindo formular a solução num conjunto de simultâneas equações, montado por imposição das expressões dos elementos, que é resolvido para obter os valores básicos desconhecidos do problema. Dessa solução global, voltando aos elementos individuais, nós podemos achar a solução específica para cada um deles.

Tal esquema é a base do método de matrizes para análise estrutural de elementos de barra. Nesses casos, a idealização da estrutura como um conjunto de membros lineares é levada adiante. A extensão desses métodos para o tratamento dos problemas contínuos foi reconhecida por Hrennikoff em “physical model” em 1941. A idéia básica foi substituir a continuidade por um conjunto, ou malha, de membros lineares, os quais as propriedades foram selecionadas para que o comportamento se aproxime do problema contínuo. Essa técnica, as vezes aplicada até hoje, é muito limitada e bons resultados são obtidos apenas em casos especiais.

A atual forma do MEF foi inicialmente apresentada por Turner, Clough, Martin e Toop, em 1956. Eles apresentaram a formulação de elementos triangulares e retangulares para problemas de tensões no plano. Isso gerou um grande interesse de aplicações para o MEF em problemas de sólidos mecânicos e estruturas. Mais tarde outros autores aplicaram no estudo de flexão de placas, cascas simétricas com cargas simétricas, cascas simétricas com carregamento qualquer entre outras.

No início da década de 60, estudos do princípio variacional permitiram a generalização do método dos elementos finitos de acordo com as aproximações variacionais.

As diferentes formulações e modelos de elementos finitos foram documentadas por Pian e Tong em 1969.

2.2 SOBRE O SAP2000

Para que se pudesse analisar os quatro modelos e compará-los entre si foi utilizado o programa SAP2000. Este programa, desenvolvido pela Universidade da Califórnia, é uma poderosa ferramenta para análise estrutural, possuindo uma interface gráfica muito amigável para com o usuário, permitindo que se crie estruturas relativamente complexas sem grandes dificuldades.

O SAP2000 utiliza o método dos elementos finitos modelando as estruturas por meio de elementos de barra, elementos planos e elementos sólidos. O programa permite também a importação de um arquivo em extensão DXF que em muitos casos facilita bastante a criação do modelo. Os modelos são introduzidos num sistema espacial de coordenadas e com unidades de força, comprimento e temperatura previamente escolhidas.

Após a inclusão dos elementos no modelo atribui-se para cada um deles propriedades de materiais e de seções. O programa já tem definido em sua biblioteca propriedades dos materiais estruturais mais usados, tais como aço, concreto, alumínio, permitindo que sejam alteradas. Admite também que sejam criados novos materiais. O mesmo ocorre com as propriedades das seções, podendo-se criar novas seções ou utilizar as disponíveis na biblioteca do programa.

Em seguida são definidos os carregamentos básicos e as combinações que serão feitas com esses carregamentos.

É necessário definir também as restrições dos nós de apoio. O programa admite também a utilização de apoios elásticos.

Estando a modelagem completa e tendo-se definido o tipo de análise a ser feita (estática, dinâmica ou análise não-linear) a resolução da estrutura pode ser iniciada, ou seja, o programa é rodado.

Os resultados obtidos são os deslocamentos nodais, os esforços e as tensões nos elementos modelados, tudo isso de forma gráfica podendo ser visualizados na tela ou impressos em forma de relatórios.

3 DESCRIÇÃO DAS ANÁLISES

3.1 INTRODUÇÃO

Os modelos aqui analisados têm o objetivo de comparar as tensões nas geogrelhas nas regiões sobre os capitéis para as diversas formas de distribuição de estacas e formatos de capitéis.

Todas as unidades estão em quiloNewton e metro.

O modelo tridimensional simplificado adotado constitui-se de elementos de casca planos quadrangulares para análise pelo método dos elementos finitos. A malha utilizada foi bem refinada nas regiões próximas às bordas dos capitéis, devido às grandes concentrações de tensões.

Os capitéis de formato quadrado têm 1,0 m de lado e os de formato circular têm 1,125 m de diâmetro, a fim de apresentarem áreas equivalentes.

Não faz parte do objetivo desse trabalho analisar o comportamento das estacas que dão apoio aos capitéis, portanto estas não foram modeladas. A geogrelha foi considerada apoiada nas bordas dos capitéis. As estacas foram simuladas por meio de apoios que impedem os deslocamentos lineares nas três direções. Este procedimento foi adotado tanto para os modelos de malha quadrada, quanto para os modelos de malha triangular. A distância entre esses pontos de apoio é de 2,0 m.

Nessa obra, sobre o terreno natural, foi executada uma camada de aterro que varia de 1,00 m a 1,90 m de espessura (SPOTTI, 2005), portanto o carregamento foi uma carga distribuída em toda a área constituída por capitéis mais geogrelha. Adotando-se para peso específico do material do aterro $\gamma_s = 18 \text{ kN/m}^3$ e altura igual para toda a área de 1,90 m, chega-se a uma carga $q = 34,2 \text{ kN/m}^2$.

Vale ressaltar que trata-se de uma análise qualitativa, apenas para comparação dos resultados entre si e não para quantificar os níveis reais das tensões na geogrelha. Dessa forma o modelo adotado é simplificado, sem modelar o solo do aterro acima de geogrelha, o qual é apenas considerado como carga. Desta forma, a análise não contempla o aspecto geotécnico não levando em conta, por consequência, o efeito de arco.

3.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Nas modelagens foram utilizados dois materiais diferentes: o concreto e a geogrelha.

3.2.1 Concreto

Para o concreto as propriedades adotadas foram as seguintes:

- Módulo de elasticidade – segundo a NBR 6118 “O módulo de elasticidade secante a ser utilizado nas análises elásticas de projeto, especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço, deve ser calculado pela expressão: $E_{cs} = 0,85 E_{ci}$ ”, onde $E_{ci} = 5.600 f_{ck}^{1/2}$. Adotando-se $f_{ck} = 30$ MPa, tem-se $E_{ci} = 30.672$ MPa e $E_{cs} = 26.072$ MPa = $2,6 \times 10^7$ kN/m².
- Coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$.

3.2.2 Geogrelha

- Módulo de elasticidade – Fazendo-se o ensaio de ruptura da geogrelha obtêm-se a curva de tensão x deformação. Sabemos que $\sigma = F/A$ e que $E = \sigma/\epsilon$, logo temos $EA = F/\epsilon$.

Nos catálogos de especificações de geogrelhas não é fornecido o módulo de elasticidade e sim o módulo de rigidez J que corresponde a EA, a resistência nominal de tração que corresponde a F e a deformação ϵ .

A geogrelha adotada foi a Fortrac 200/30-30 biaxial, $\epsilon = 12,5\%$ deformação, $T_{m\acute{a}x} = 200$ kN/m e módulo de rigidez $J_{m\acute{a}x} = 1.600$ kN/m ($J = F/\epsilon \rightarrow J = 200/(12,5/100) = 1.600$), então o módulo de elasticidade adotado seria $E = 1.600$ kN/m², mas na realidade foi adotado $E = 160.000$ kN/m² como será visto no item 3.3.

- Coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$.

3.3 PROPRIEDADES DAS SEÇÕES

Nas modelagens foram utilizados dois tipos de seções diferentes: a seção dos capitéis e a seção da geogrelha.

- Capitéis – são elementos de casca cujo material adotado é concreto, com resistência a flexão, cortante e esforços normais nas duas direções, com espessura de 0,3m.
- Geogrelha – são elementos de casca cujo material adotado é geogrelha, sem resistência a flexão e cortante, resistente apenas aos esforços normais nas duas direções. Foi adotada então uma espessura pequena, de 0,01 m, para que estes elementos não tivessem resistência a flexão nem ao cortante. Mas para que fosse atingido o módulo de rigidez J especificado no catálogo, foi preciso aumentar o módulo de elasticidade pois $J = EA$, $A = 0,01 \times 1,0 = 0,01 \text{ m}^2$ (para uma faixa de 1,0 metro), então $1.600 = E \cdot 0,01 \rightarrow E = 160.000 \text{ kN/m}^2$.

3.4 MALHA QUADRADA COM CAPITÉIS QUADRADOS

A malha adotada para a configuração de capitéis quadrados com distribuição quadrada pode ser observada na Figura 3. Nela pode-se observar o eixo referencial adotado em todos os modelos.

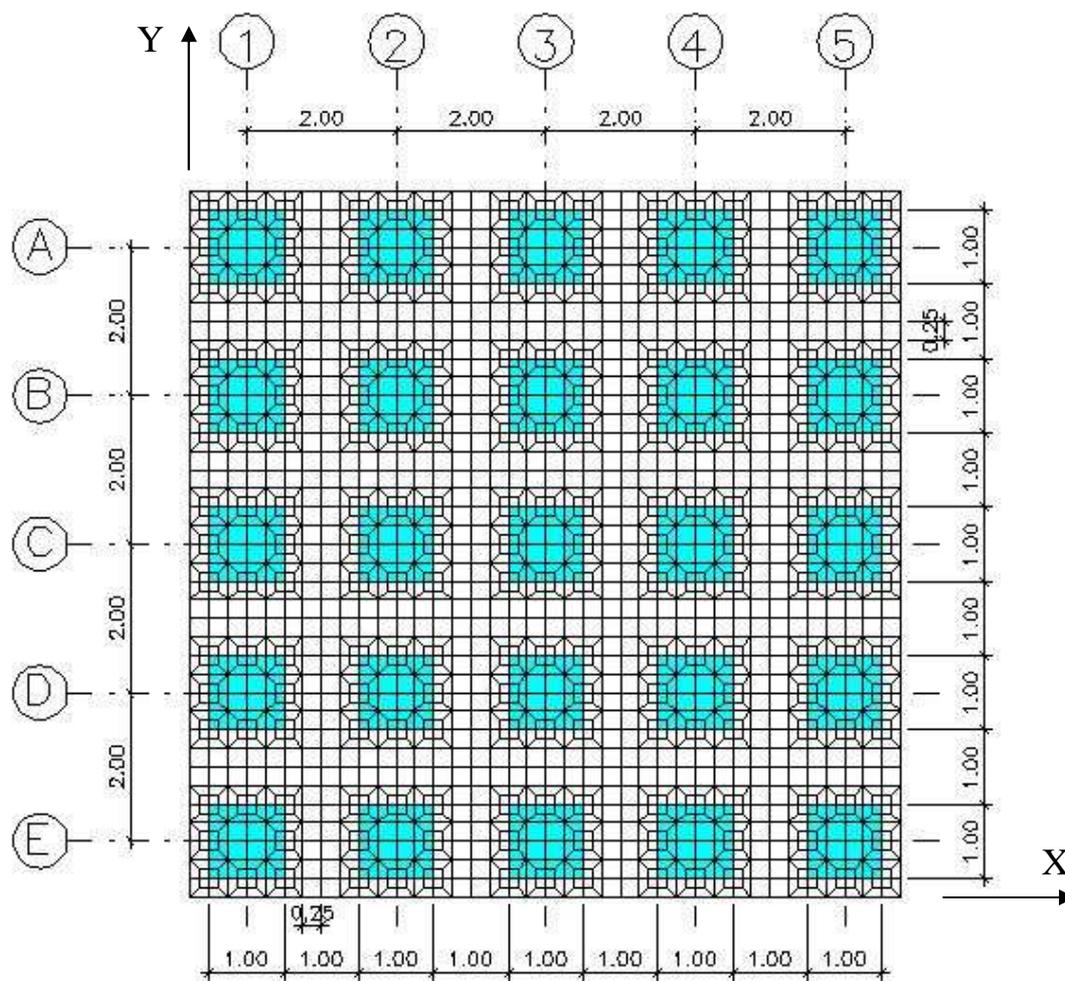


Figura 3 – Geometria para malha quadrada com capitel quadrado

As partes hachuradas são os capitéis quadrados de 1,0 m de lado, distantes 2,0 m de eixo a eixo, restando 1,0 m de face a face de capitel. Os elementos quadrangulares criados para análise têm 0,25 m de lado e no entorno dos capitéis vê-se um refinamento maior da malha.

O modelo estrutural elaborado no SAP2000 pode ser observado na Figura 4.

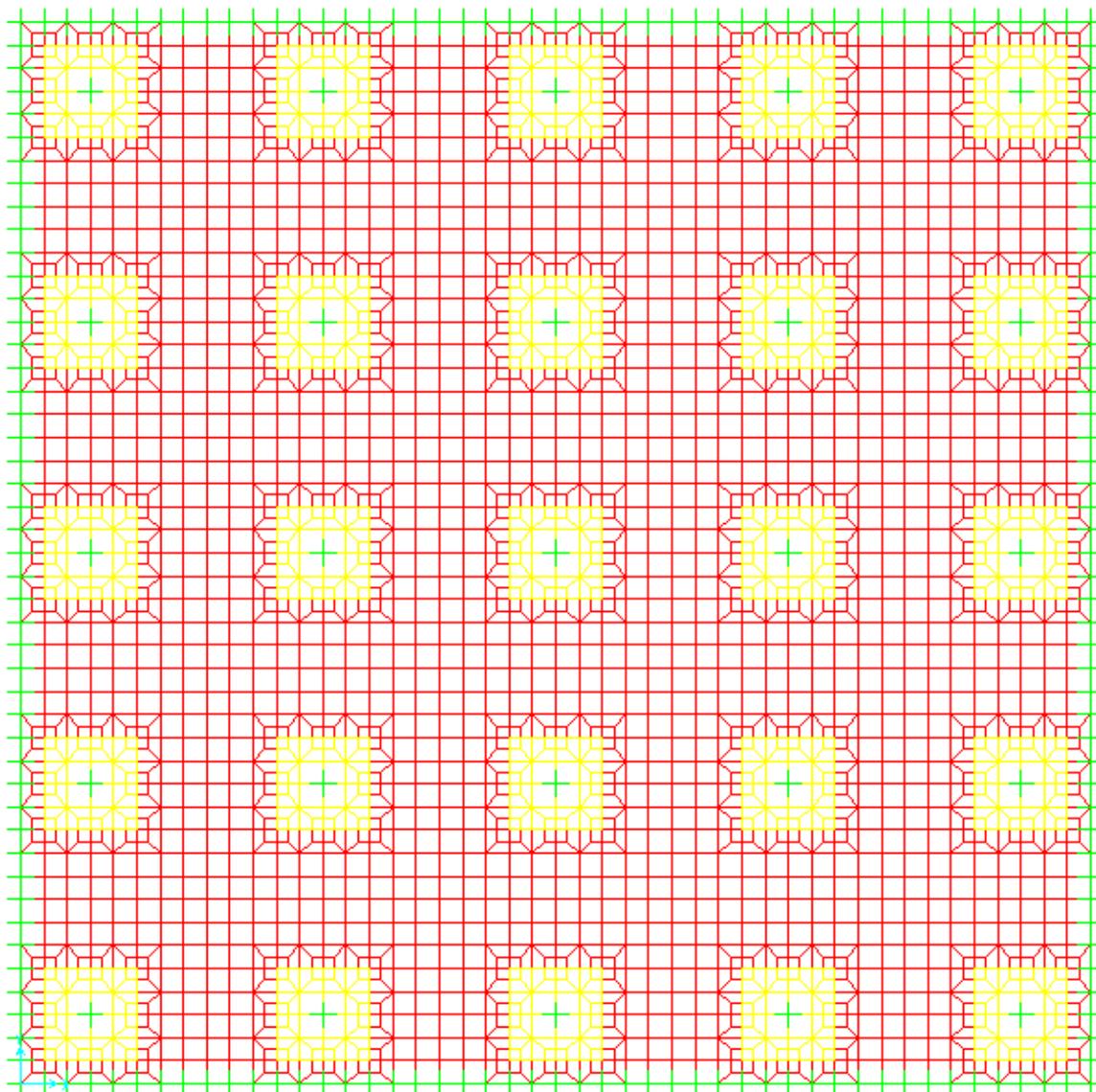


Figura 4 – Modelo de malha quadrada com capitel quadrado

Nesta figura os capitéis são representados em amarelo, em vermelho os elementos com propriedade de geogrelha e tanto no entorno do modelo como no centro dos capitéis (em verde) os nós de apoios com restrições dos deslocamentos lineares nas três direções e rotações livres. Pode-se observar também o refinamento da malha nas regiões próximas às bordas dos capitéis.

3.5 MALHA QUADRADA COM CAPITÉIS CIRCULARES

A geometria utilizada para esta modelagem é apresentada na Figura 5.

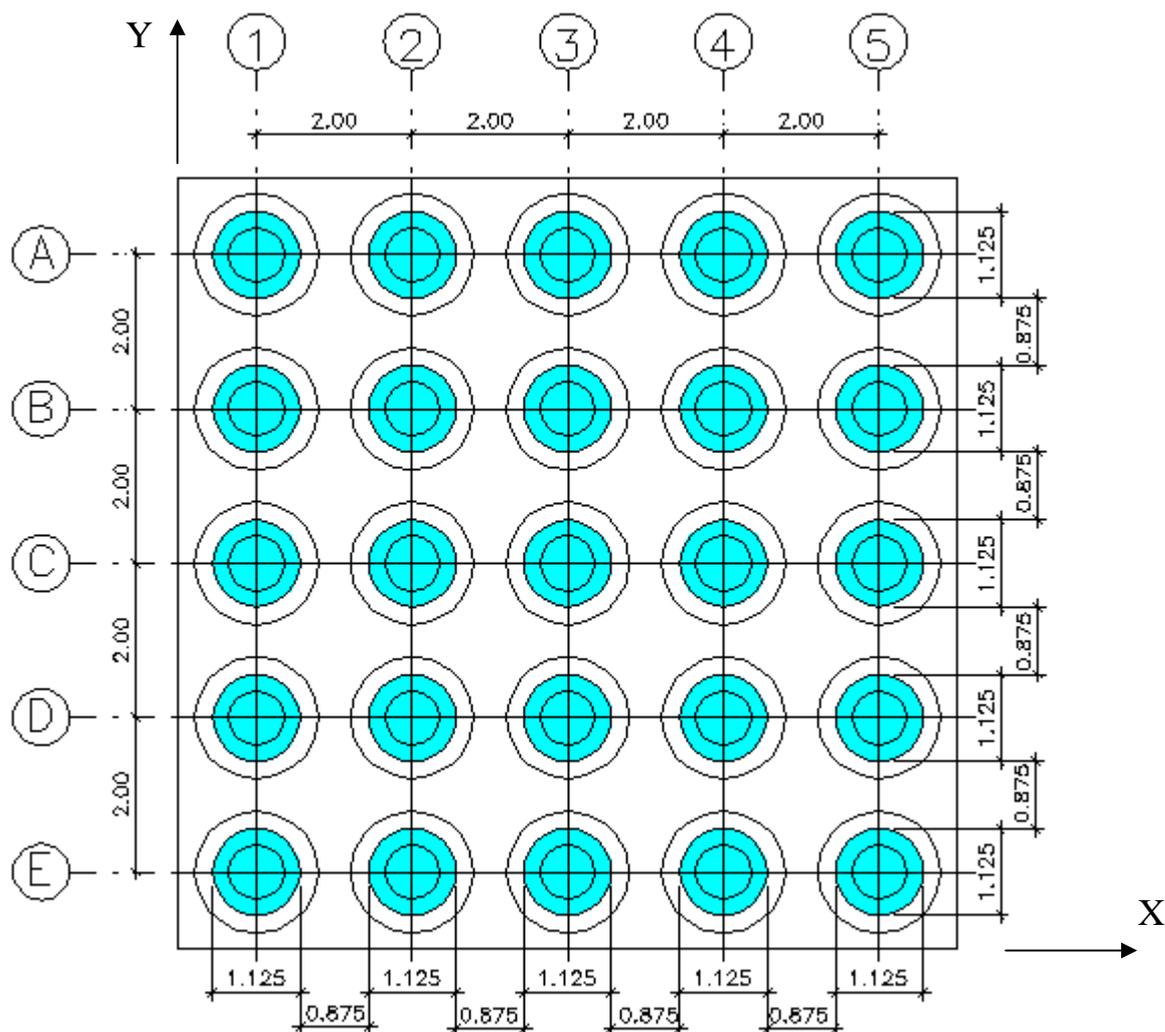


Figura 5 – Geometria para malha quadrada com capitéis circulares

As partes hachuradas são os capitéis circulares de 1,125 m de diâmetro (círculos centrais), distantes 2,0 m de eixo a eixo. O diâmetro adotado fornece uma área equivalente a do capitéis quadrado. Na verdade os círculos não são elementos curvos, são segmentos de reta de forma que cada círculo fosse dividido em vinte partes (cinco para cada quadrante).

Para este modelo de capitéis circulares foi usada uma discretização automática da malha de elementos finitos. Os círculos maiores e menores foram feitos para demarcar as regiões onde se quer um maior refinamento da malha.

A Figura 6 apresenta o modelo estrutural feito no SAP2000, já com a malha discretizada.

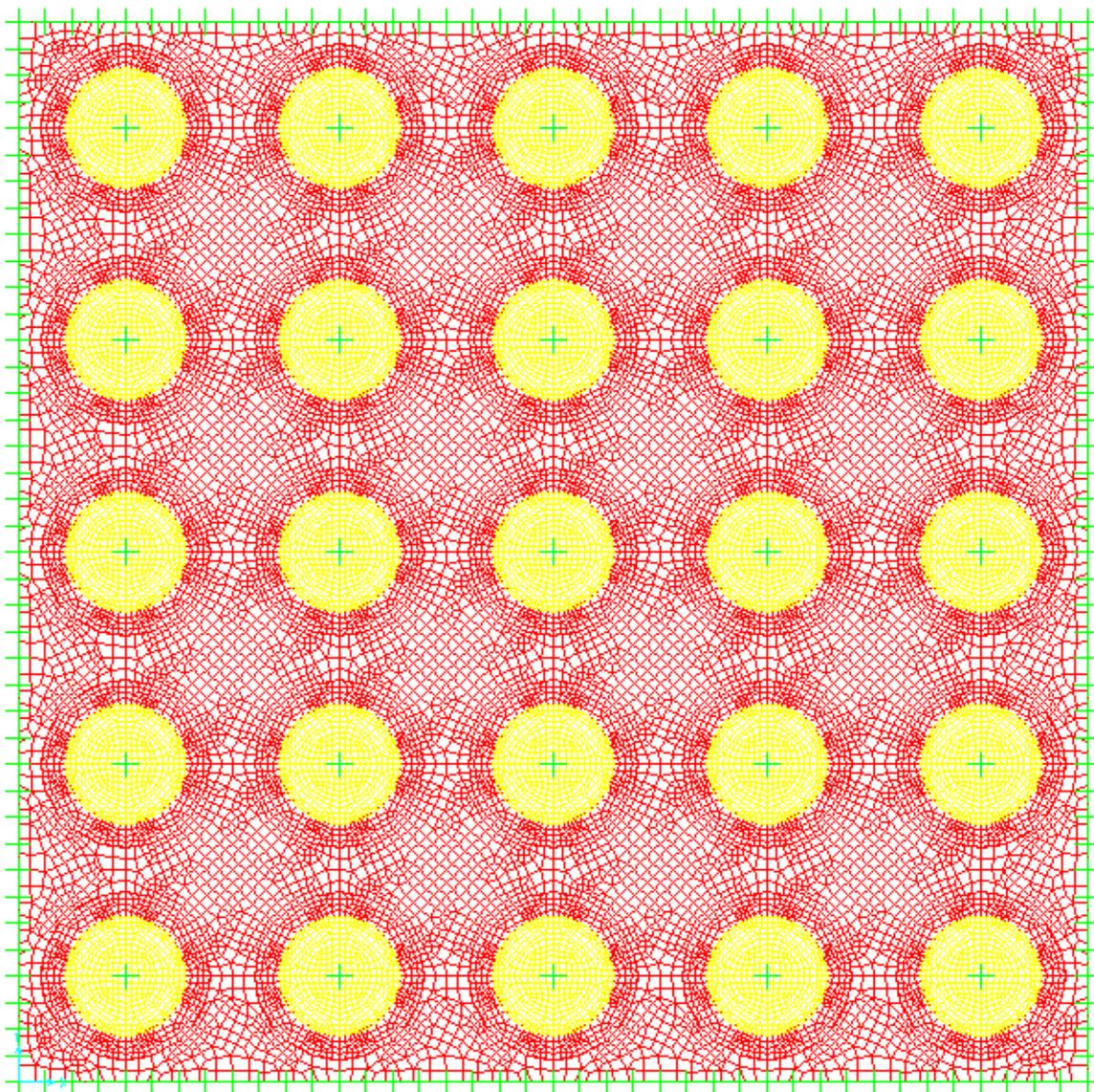


Figura 6 – Modelo de malha quadrada com capitel circular

Nesta figura encontram-se representados em amarelo os elementos com propriedades de capitel, em vermelho os elementos com propriedade de geogrelha e tanto no entorno do modelo como no centro dos capitéis (em verde) os nós com os deslocamentos lineares impedidos e rotações livres. Pode-se também observar o refinamento da malha nas regiões próximas ao contorno dos capitéis.

3.6 MALHA TRIANGULAR COM CAPITÉIS QUADRADOS

A geometria utilizada para esta modelagem é indicada na Figura 7.

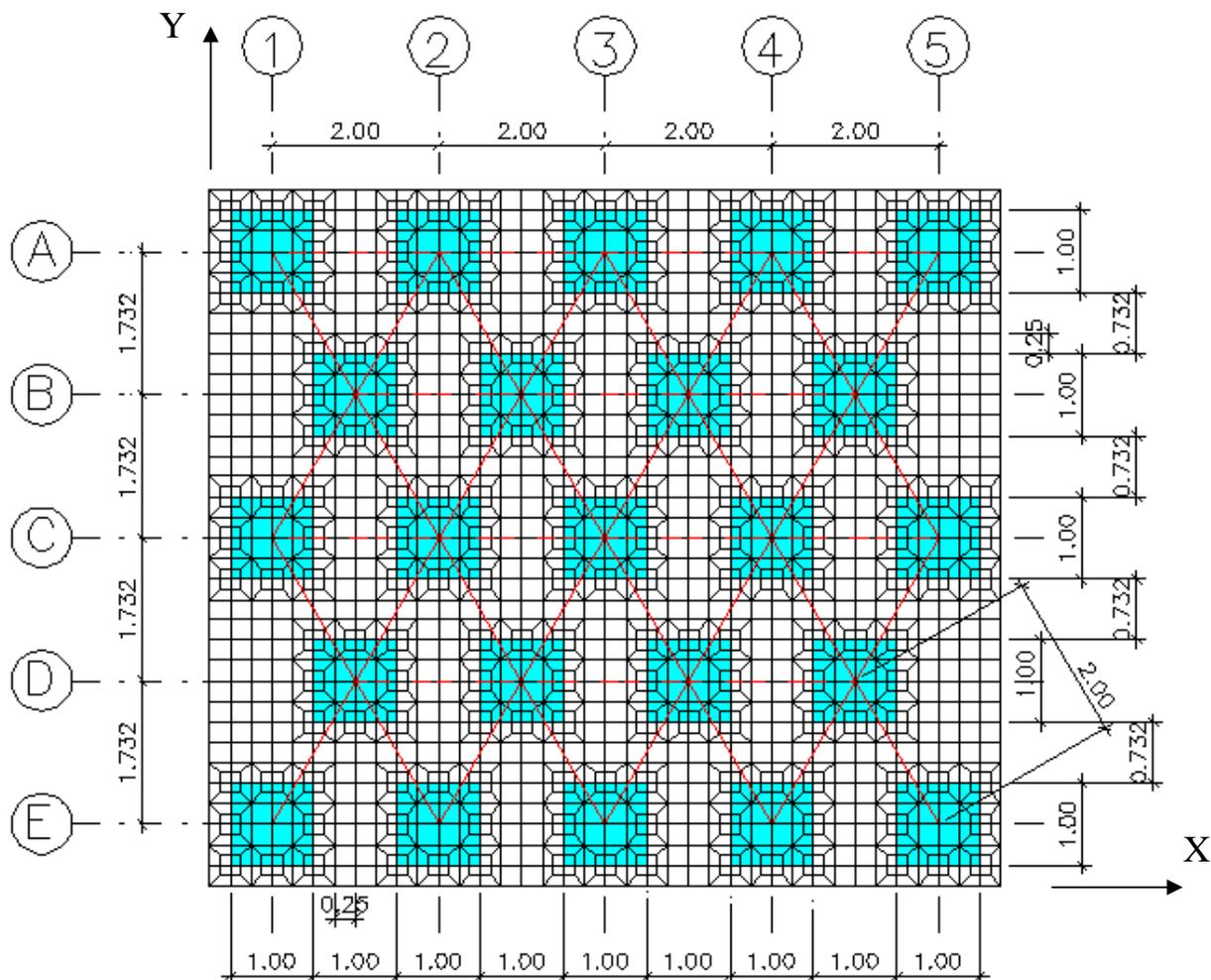


Figura 7 – Geometria para malha triangular com capitel quadrado

Nesta figura, as partes hachuradas representam os capitéis quadrados de 1,0 m de lado, distantes 2,0 m de eixo a eixo, mantendo assim a distância entre apoios. A forma de distribuição desses apoios gera triângulos equiláteros, representados ao fundo pelas linhas vermelhas, restando 1,0 m de face a face de capitel na direção X e 0,732 m na direção Y. Os elementos quadrangulares criados para análise também têm 0,25 m de lado e no entorno dos capitéis pode-se observar um refinamento da malha.

A Figura 8 apresenta o modelo estrutural elaborado no SAP2000.

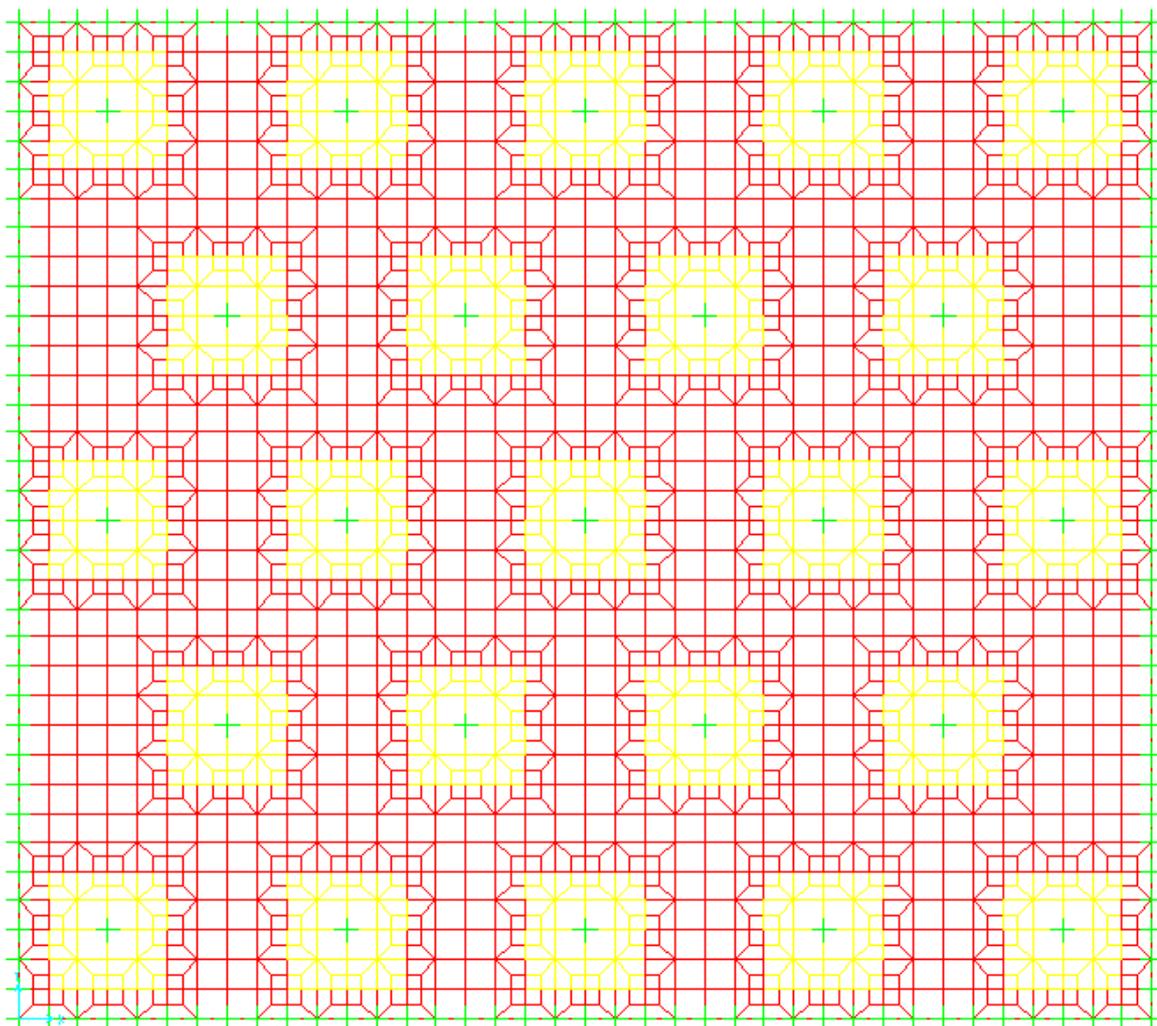


Figura 8 – Modelo de malha triangular com capitéis quadrado

Os elementos em amarelo representam os capitéis, em vermelho os elementos com propriedade de geogrelha e tanto no entorno como no centro dos capitéis (em verde) os nós com deslocamentos lineares restritos e as rotações liberadas. É possível ver também o refinamento da malha nas regiões próximas ao contorno dos capitéis.

3.7 MALHA TRIANGULAR COM CAPITÉIS CIRCULARES

A distribuição dos capitéis para a configuração de malha triangular e capitéis circulares pode ser observada na Figura 9.

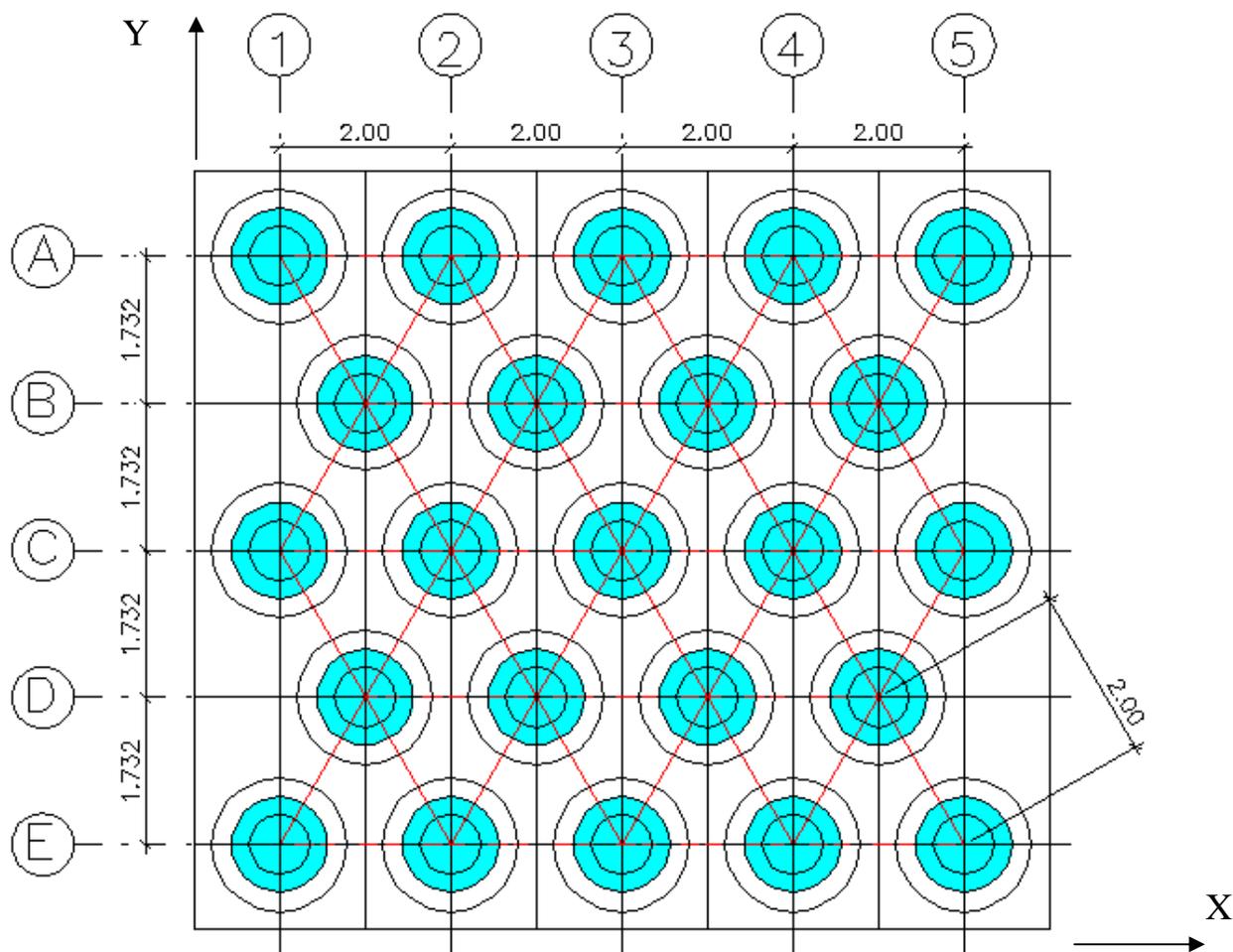


Figura 9 – Geometria para malha triangular com capitel circular

Nesta figura as partes hachuradas são os capitéis circulares de 1,125 m de diâmetro, distantes 2,0 m de eixo a eixo para que fosse mantida a distância entre apoios. A forma de distribuição desses apoios gera triângulos equiláteros, representados ao fundo pelas linhas vermelhas.

Da mesma forma que no outro modelo de capitéis circulares, as bordas também não são elementos curvos, e sim segmentos de reta de forma que o perímetro do capitel fosse dividido em vinte partes (cinco para cada quadrante).

Nessa figura também não estão representados os elementos quadrangulares, pois para este modelo de capitéis circulares foi usada uma discretização automática da malha de elementos finitos.

Os círculos maiores e menores foram feitos para demarcar as regiões onde se quer um maior refinamento da malha.

A Figura 10 apresenta o modelo estrutural feito no SAP2000, já com a malha discretizada:

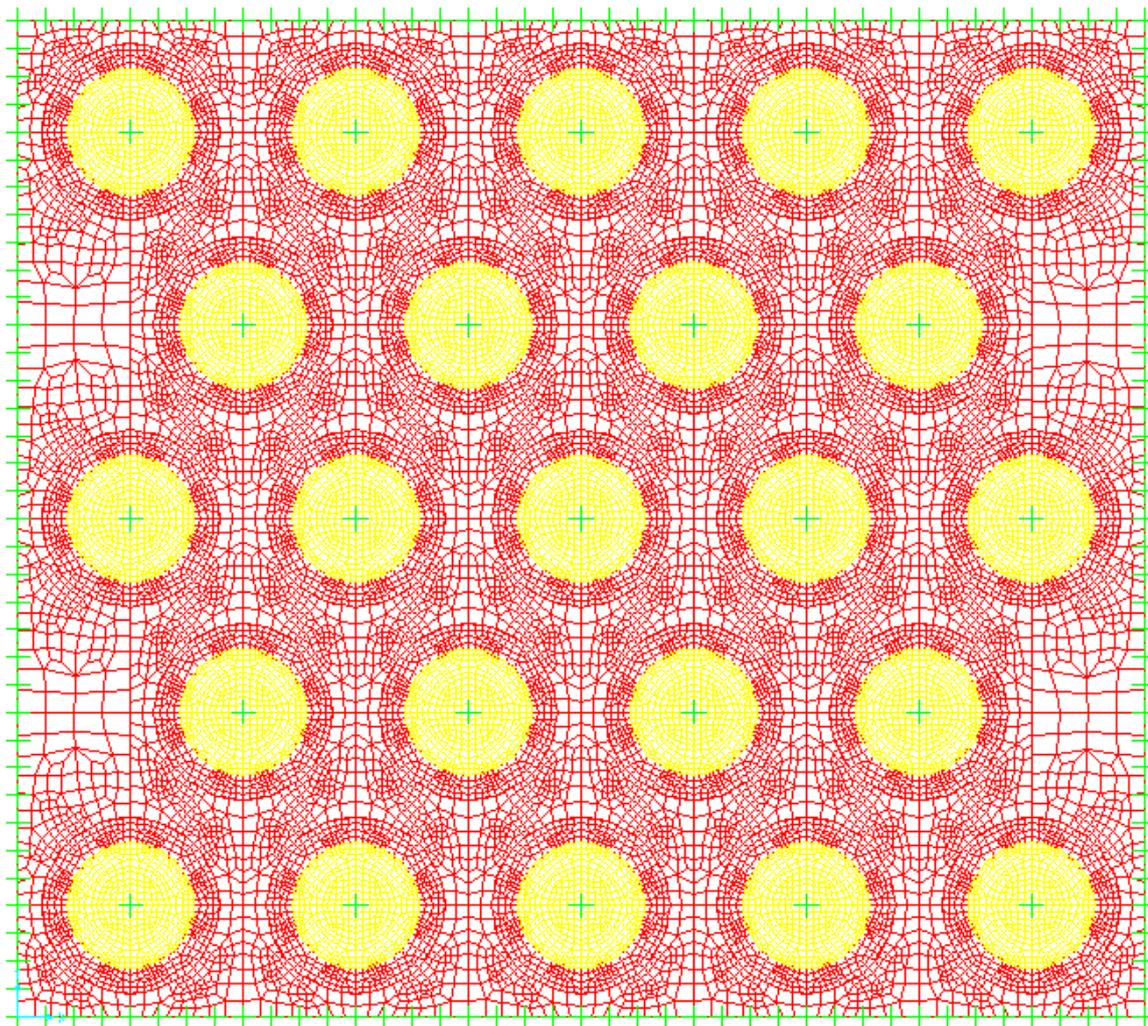


Figura 10 – Modelo de malha triangular com capitel circular

Assim como nos outros modelos, a figura indica: em amarelo os elementos com propriedades de capitel, em vermelho os elementos com propriedade de geogrelha e tanto no entorno como no centro dos capitéis (em verde) os nós de apoio com os deslocamentos lineares restritos e os deslocamentos angulares liberados. É possível ver também o refinamento da malha nas regiões próximas ao contorno dos capitéis.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Como dito anteriormente o objetivo deste trabalho é comparar o comportamento da geogrelha sobre os capitéis, em especial suas tensões, para os diversos modelos. Dessa forma serão apresentados diagramas de deslocamentos e das tensões ao longo da geogrelha de todos os modelos em todas as regiões e em locais específicos para análise localizada.

Para análise dos resultados é melhor que se observe o capitel central e as áreas imediatamente próximas a ele, evitando-se assim as influências das bordas do modelo. A modelagem representa apenas uma pequena parte do aterro real, tendo essa região central o comportamento mais parecido com a realidade.

A convenção de sinais para deslocamentos verticais é deslocamento positivo para cima e negativo para baixo.

Para o caso das tensões obedece-se à convenção clássica da teoria da elasticidade, ou seja, tração positiva e compressão negativa como indicado na Figura 11.

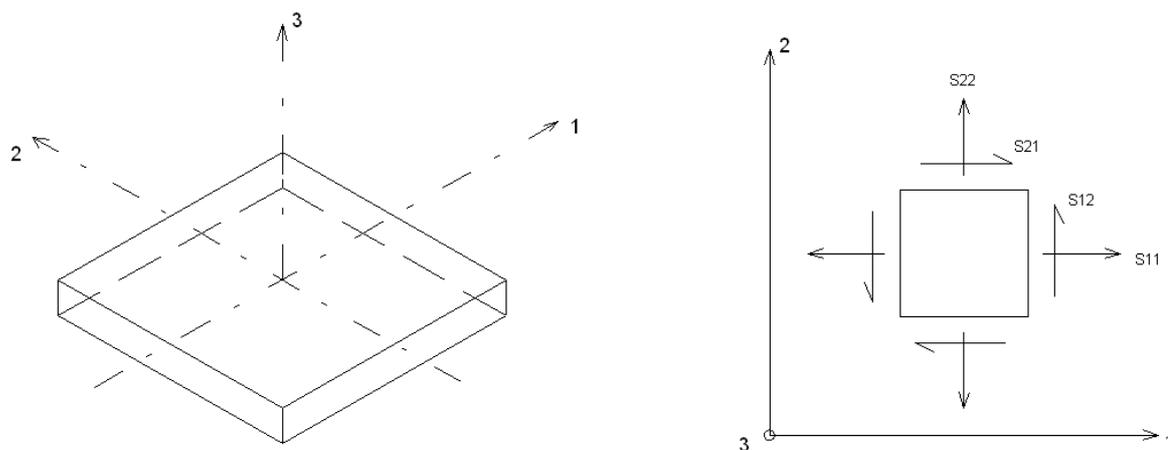


Figura 11 – Convenção de sinais no SAP2000

4.2 MALHA QUADRADA COM CAPITÉIS QUADRADOS

4.2.1 Deslocamentos verticais

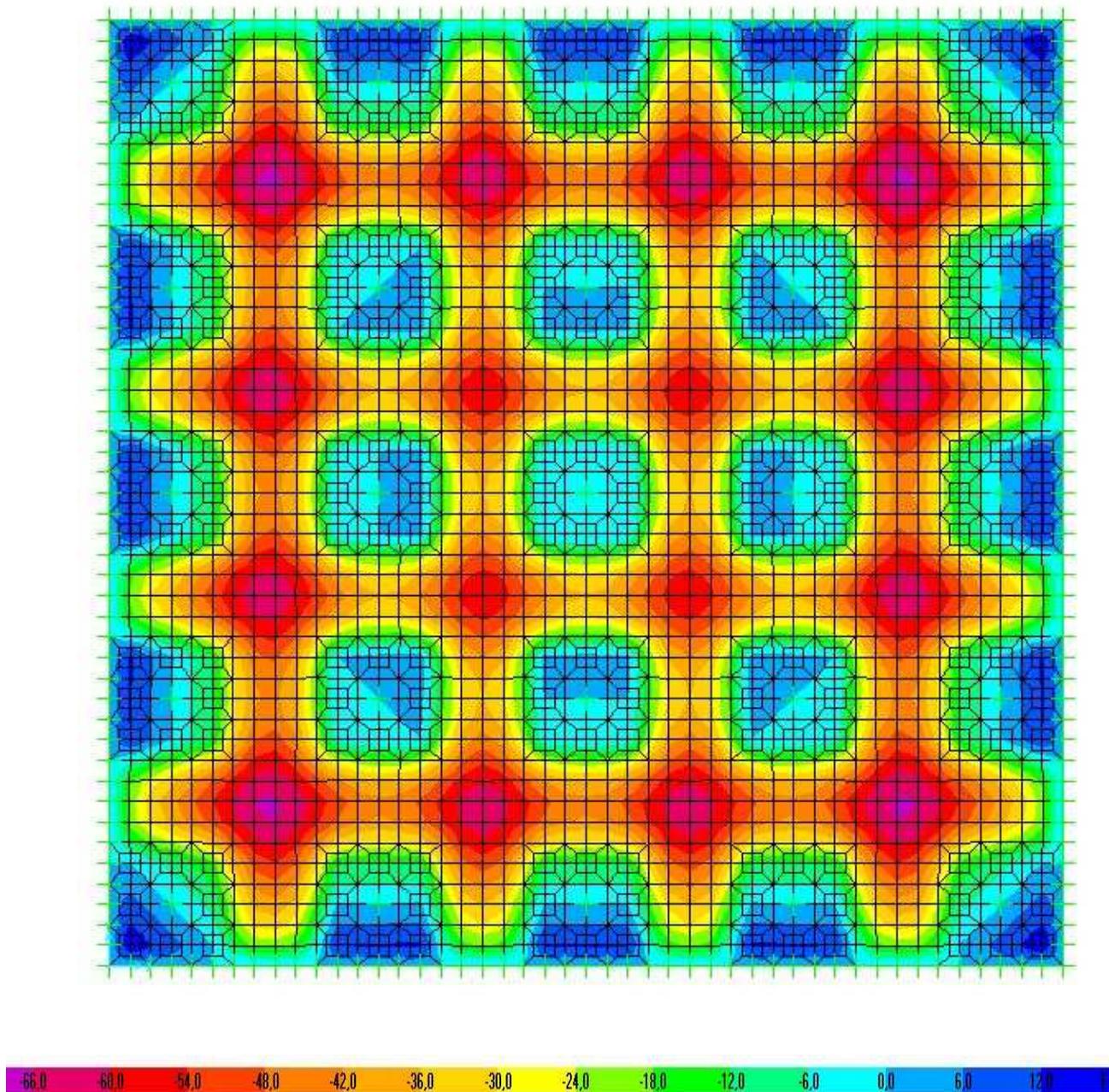


Figura 12 – Deslocamentos verticais de malha quadrada com capitel quadrado [mm]

Este é o deslocamento vertical (isocurvas de deformação) de toda a área. Os valores da escala estão em milímetro ($m \times 10^{-3}$). Pode-se observar que os maiores deslocamentos

ocorrem nas regiões entre os capitéis, sendo um pouco menores nas áreas próximas ao capitel central.

4.2.2 Tensões na direção x

A Figura 13 apresenta o diagrama de tensões na direção x de toda a área.

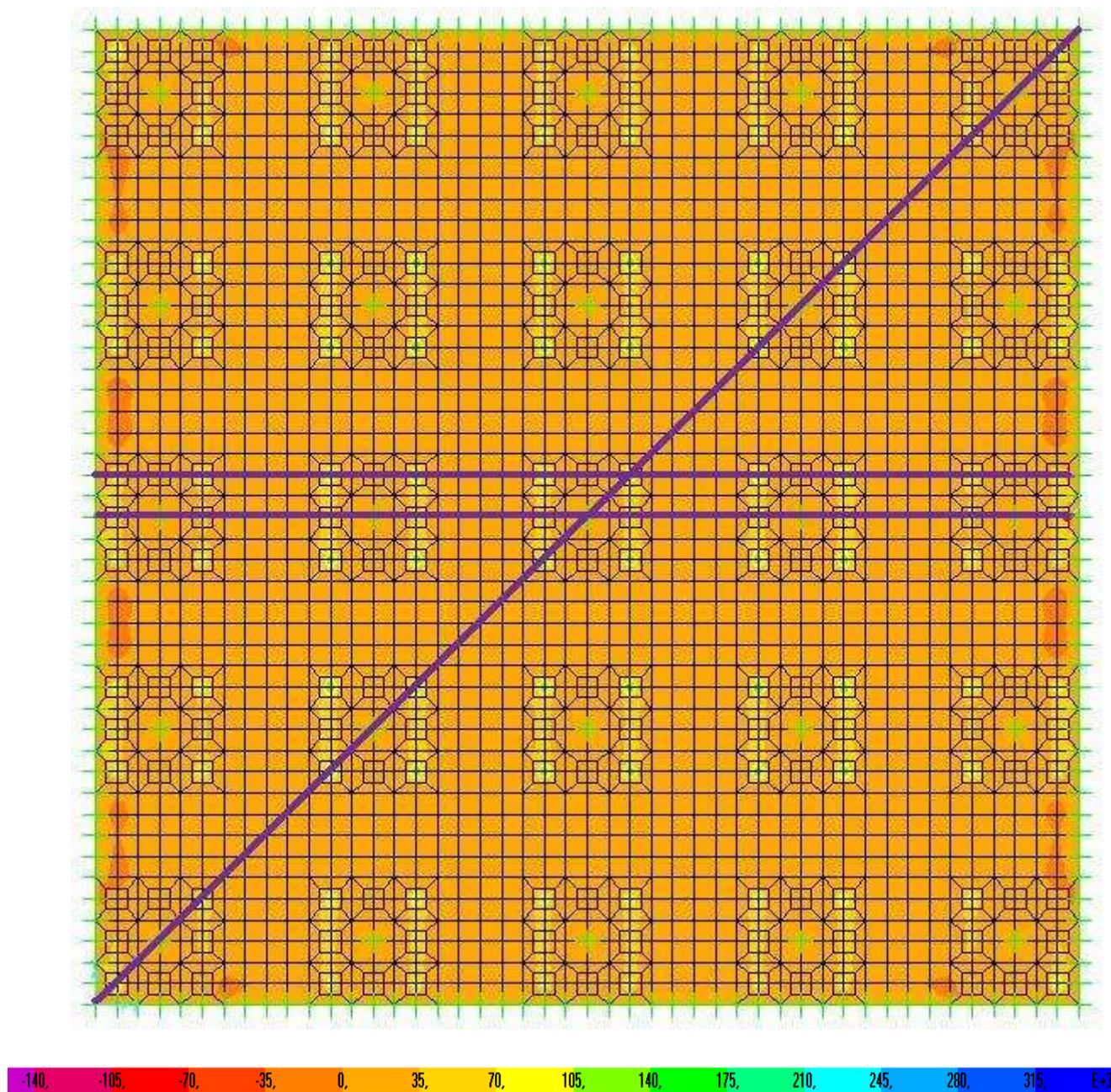


Figura 13 – Tensões na direção x da malha quadrada com capitel quadrado [kN/m²]

As linhas roxas indicam cortes feitos para se observar a variação da tensão ao longo da área. Foi feito um corte transversal ao longo do eixo dos capitéis (Figura 17), um corte

transversal passando ao longo das quinas dos capitéis (Figura 18) e um corte diagonal que passando pelos centros e pelas quinas dos capitéis (Figura 19).

A Figura 14 apresenta uma ampliação da imagem no capitel central.

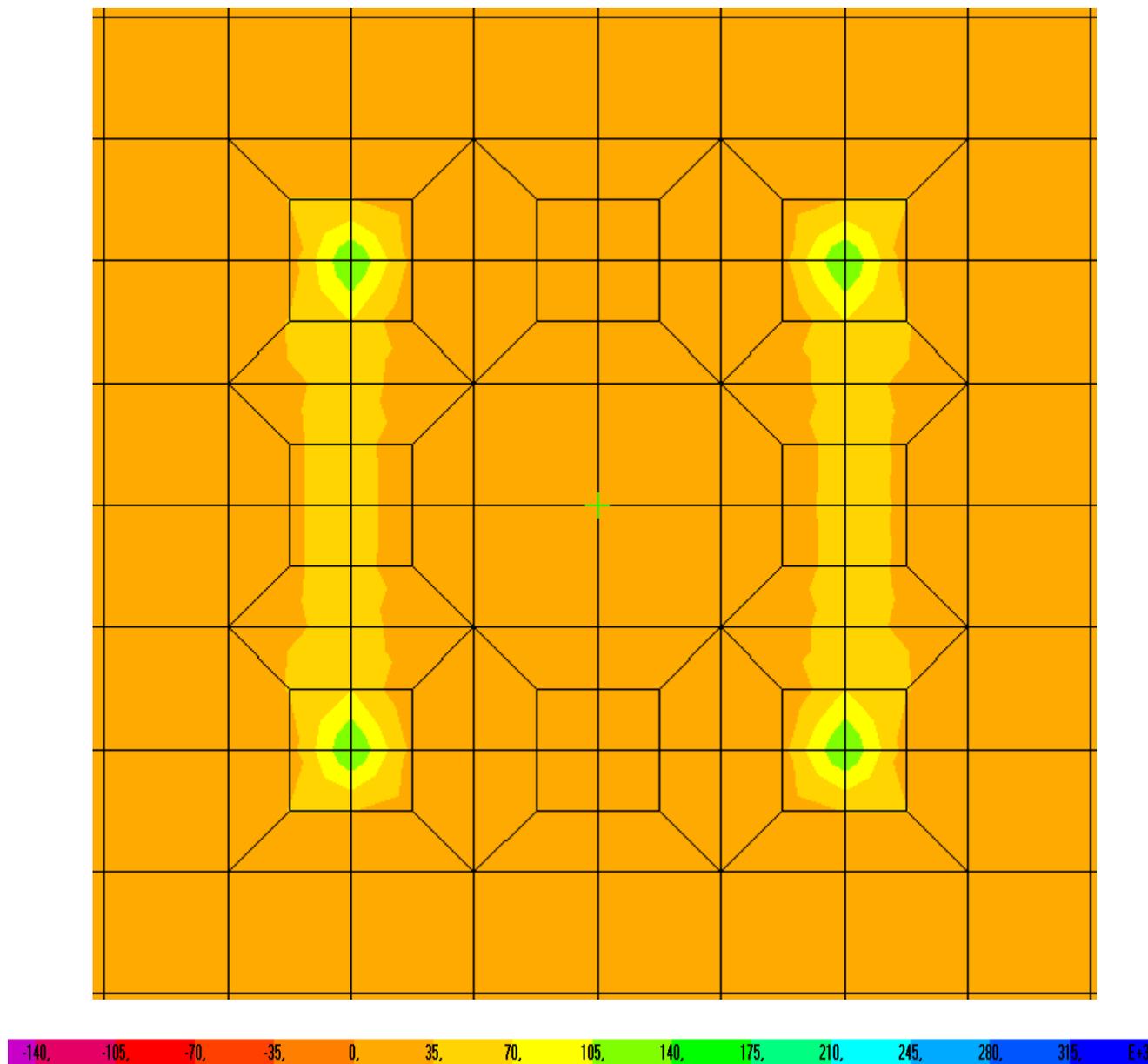


Figura 14 – Tensões na direção x no capitel central [kN/m²]

Observa-se que em cima das arestas dos capitéis as tensões são bastante elevadas e nas quinas do mesmo ocorre um pico na tensão.

4.2.3 Tensões na direção y

A Figura 15 apresenta o diagrama de tensões na direção Y de toda a área.

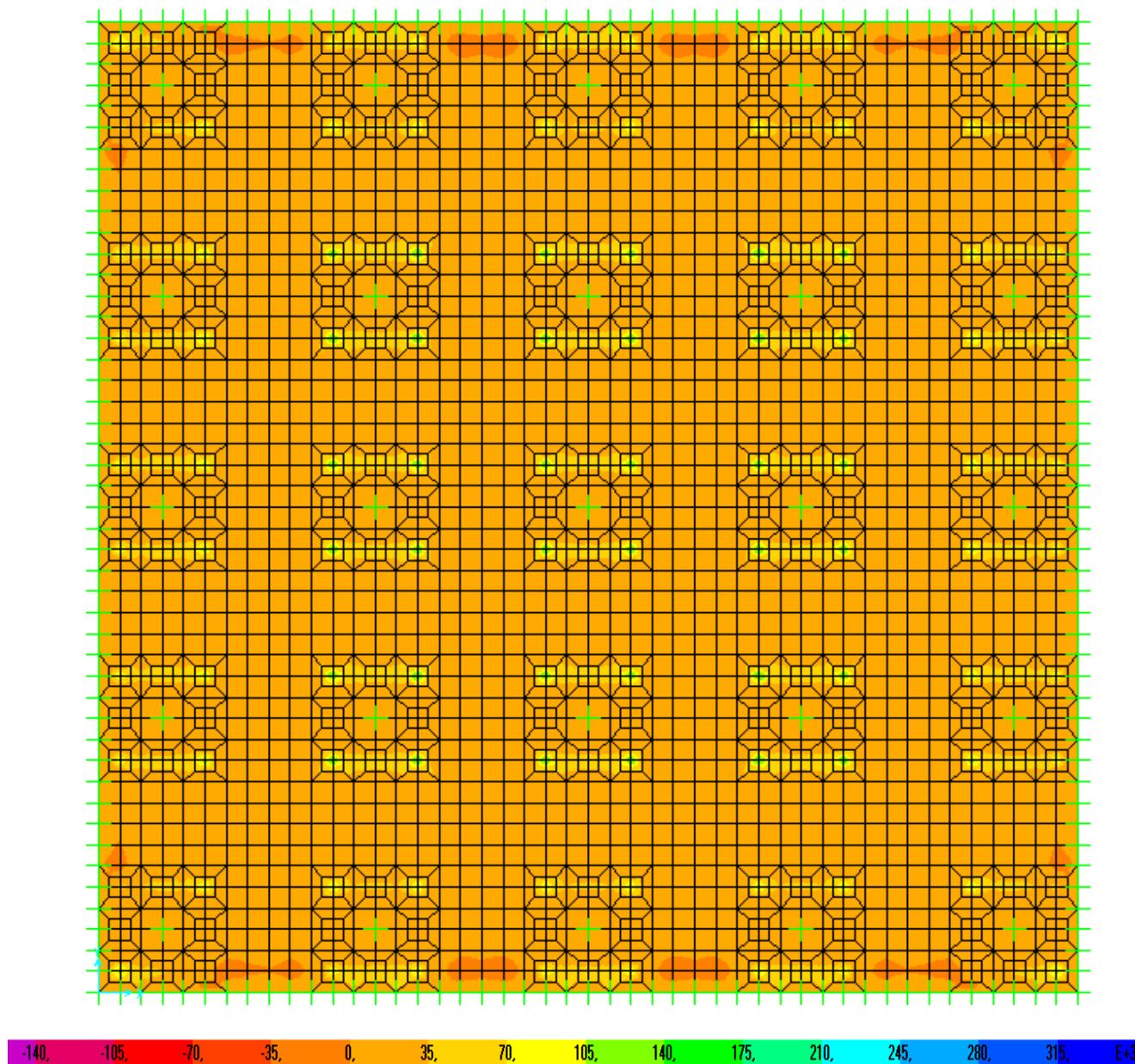


Figura 15 – Tensões em y da malha quadrada com capitel quadrado [kN/m²]

Para esta distribuição de estacas a tensão na direção y tem os mesmos valores da tensão na direção x.

A Figura 16 apresenta uma ampliação da imagem no capitel central.

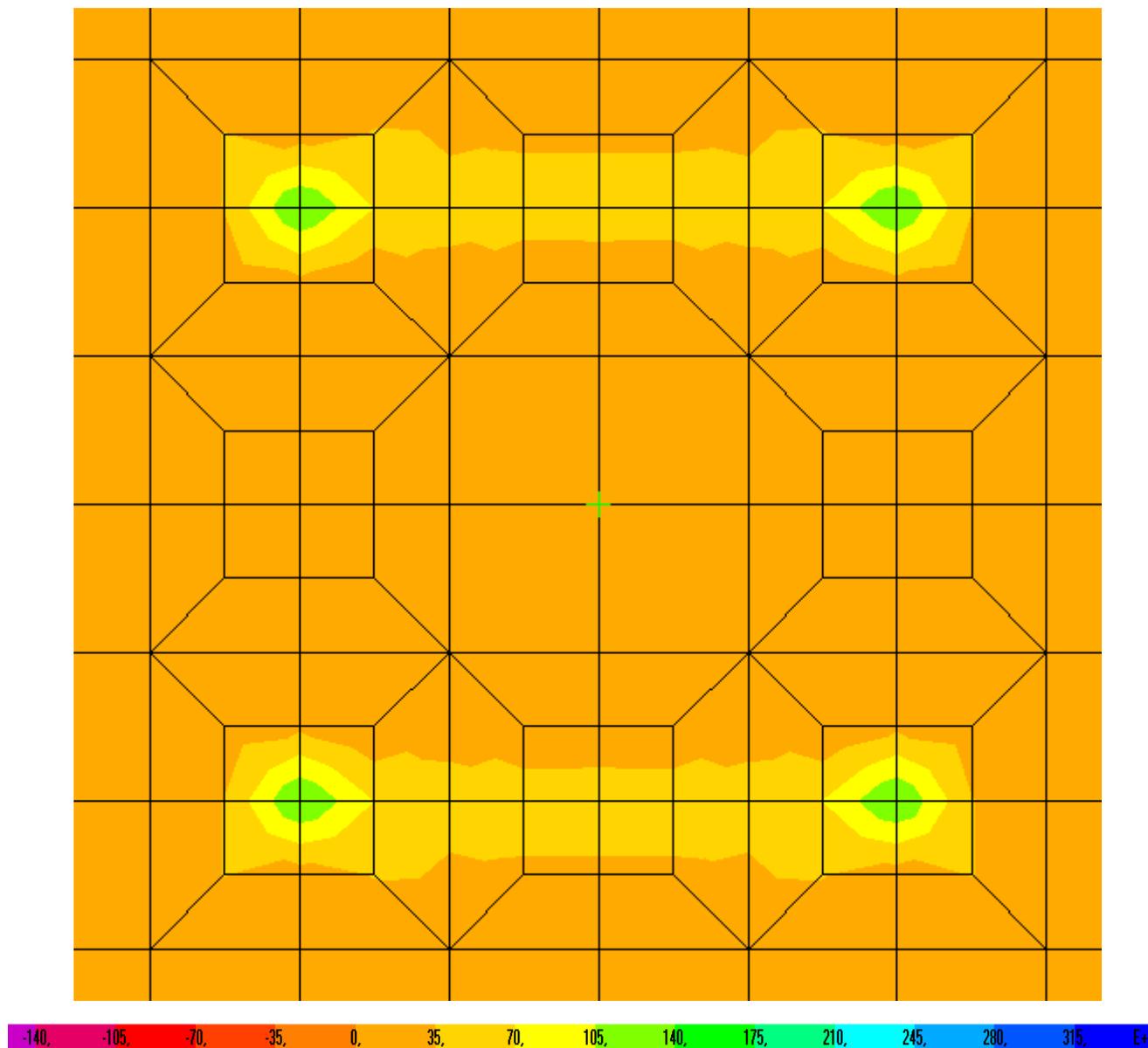


Figura 16 – Tensões na direção y no capitel central [kN/m²]

As Figuras 17 a 19 apresentam as variações de tensões σ_{xx} ao longo dos cortes indicados na Figura 13. Nelas é possível ver claramente os picos de tensão.

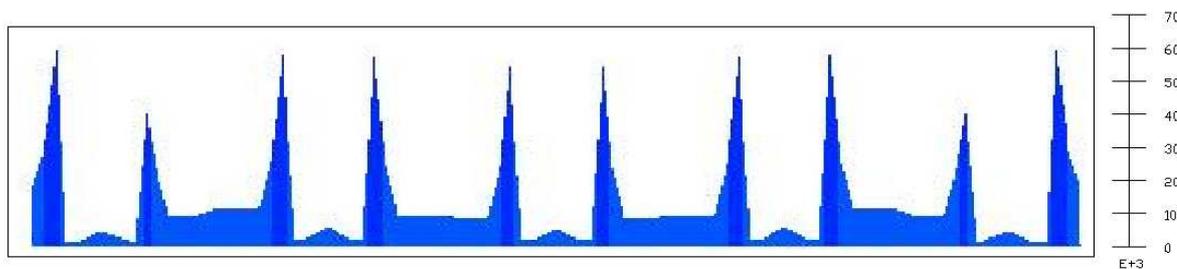


Figura 17 – Variação das tensões σ_{xx} ao longo dos eixos dos capitéis [kN/m²]

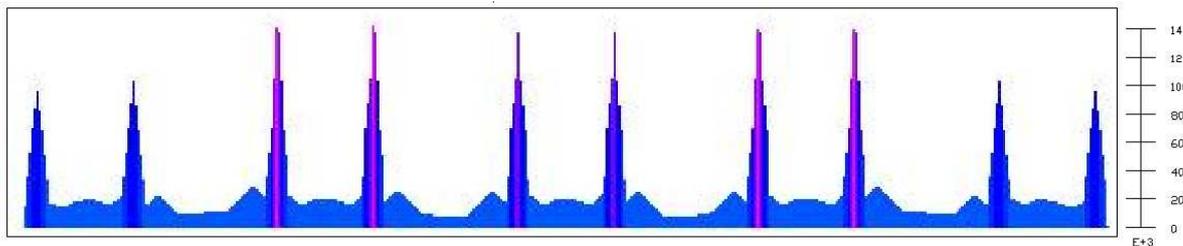


Figura 18 – Variação das tensões σ_{xx} ao longo das quinas dos capitéis [kN/m²]

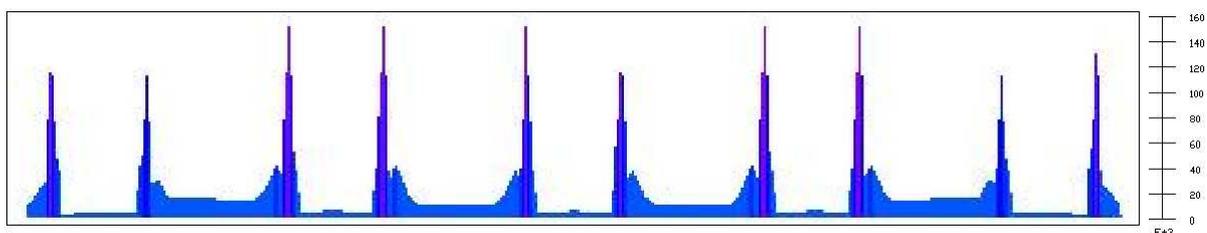


Figura 19 – Variação das tensões σ_{xx} ao longo da diagonal dos capitéis [kN/m²]

Os resultados aqui apresentados serão comparados com os das outras análises na Tabela 1 no capítulo 5.

4.3 MALHA QUADRADA COM CAPITÉIS CIRCULARES

4.3.1 Deslocamentos verticais

A Figura 20 apresenta o diagrama dos deslocamentos verticais (isocurvas de deformação) de toda a área. Os valores da escala estão em milímetro ($m \times 10^{-3}$). Pode-se observar que os maiores deslocamentos ocorrem nas regiões entre os capitéis, sendo um pouco menores nas áreas próximas ao capitel central.

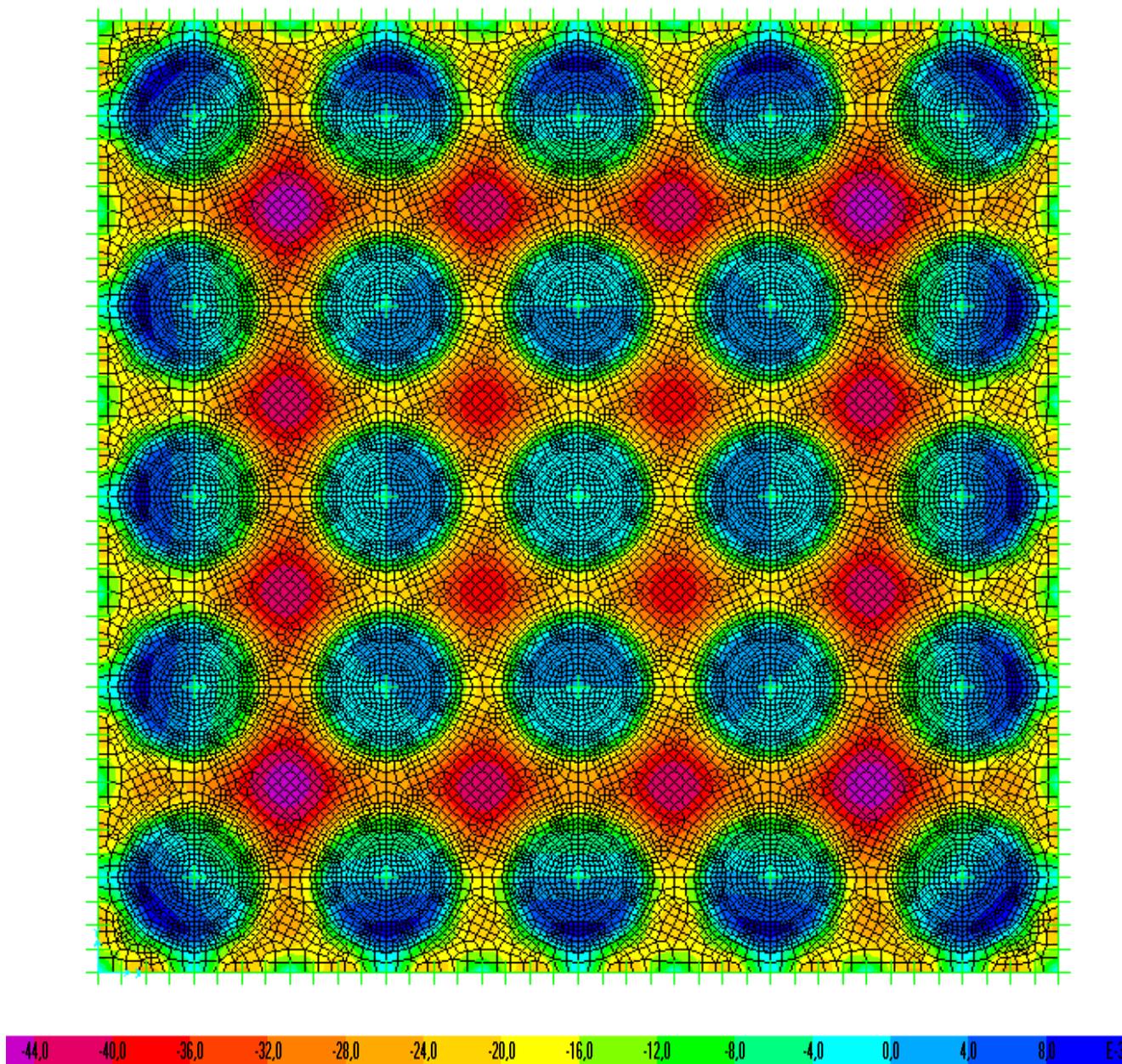


Figura 20 – Deslocamentos verticais de malha quadrada com capitel circular [mm]

4.3.2 Tensões na direção x

A Figura 21 apresenta o diagrama de tensões na direção x de toda a área.



Figura 21 – Tensões em x da malha quadrada com capitel circular [kN/m²]

As linhas roxas indicam os cortes feitos para se observar a variação das tensões na geogrelha. Foram feitos um corte transversal ao longo dos eixos dos capitéis (Figura 25) e um corte diagonal passando pelo centro dos capitéis (Figura 26).

A Figura 22 apresenta uma ampliação da imagem com a distribuição das tensões na região do capitel central.

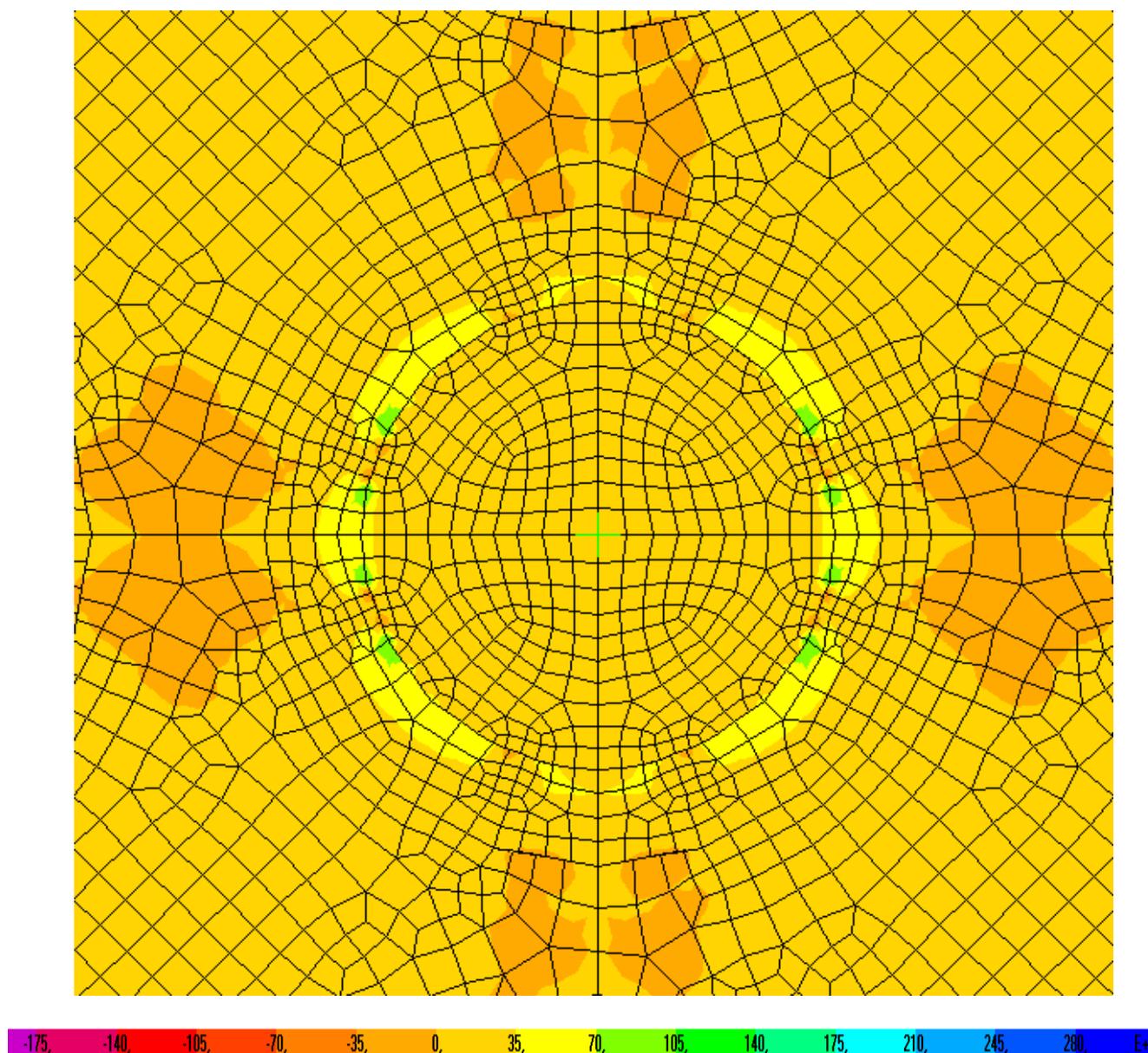


Figura 22 – Tensões na direção x no capitel central [kN/m²]

Pode-se observar o acréscimo das tensões nos entornos dos capitéis. Entretanto, diferentemente do capitel quadrado, não existem os picos elevados de canto, havendo nos capitéis circulares uma distribuição mais uniforme das tensões ao longo dos bordos dos capitéis circulares. Vale lembrar que esta é a tensão ao longo da direção x, sendo a tensão ao longo da direção y igual a esta, de forma que as tensões mais elevadas ficam distribuídas ao longo da aresta do capitel.

Pode-se observar também que além da distribuição mais uniforme das tensões, os seus valores são menores do que os que ocorrem nos capitéis quadrados.

4.3.3 Tensões na direção y

A Figura 23 apresenta o diagrama de tensões na direção y de toda a área.

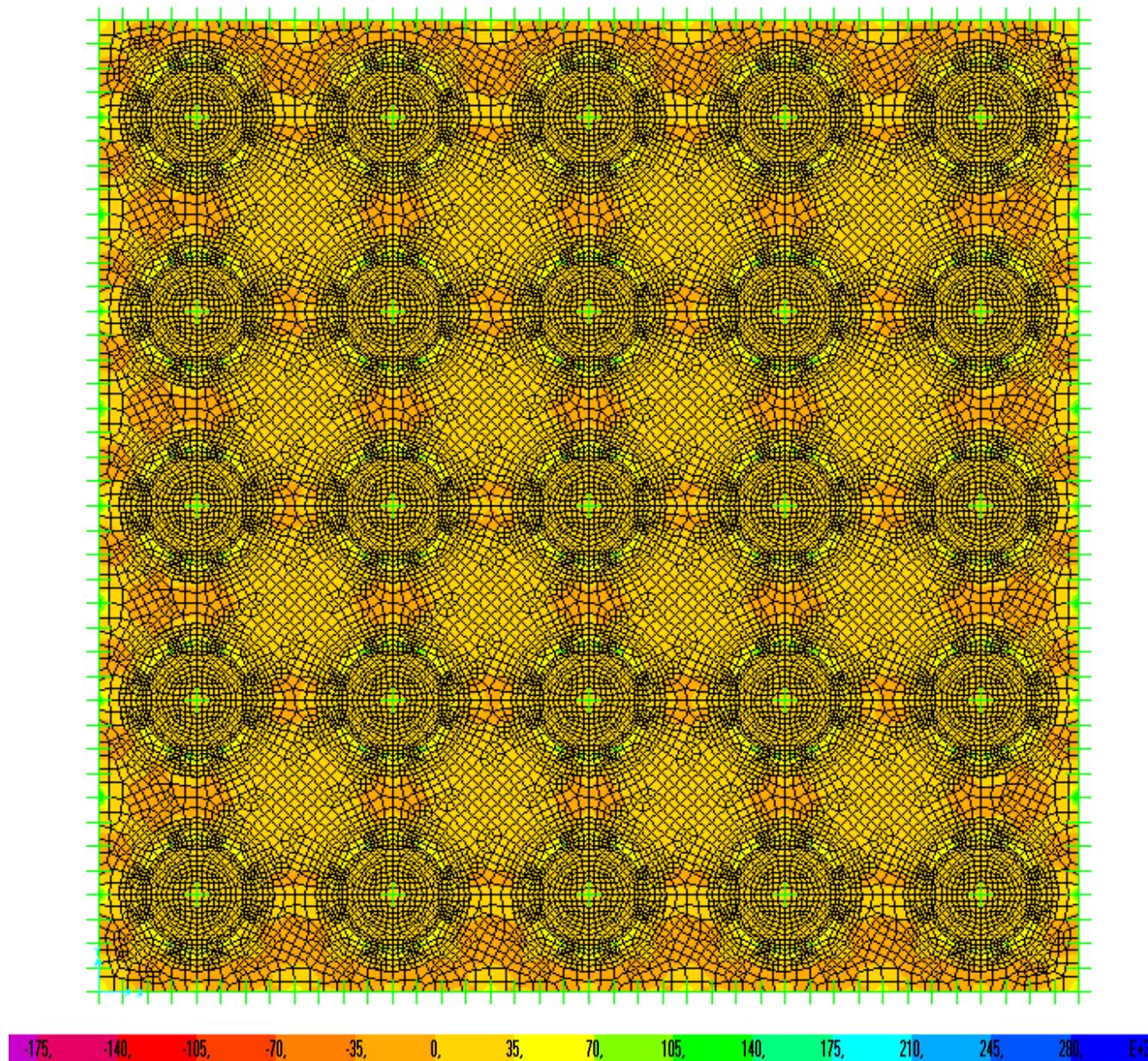


Figura 23 – Tensões na direção y da malha quadrada com capitel circular [kN/m²]

A Figura 24 apresenta uma ampliação da imagem com a distribuição das tensões na região do capitel central.

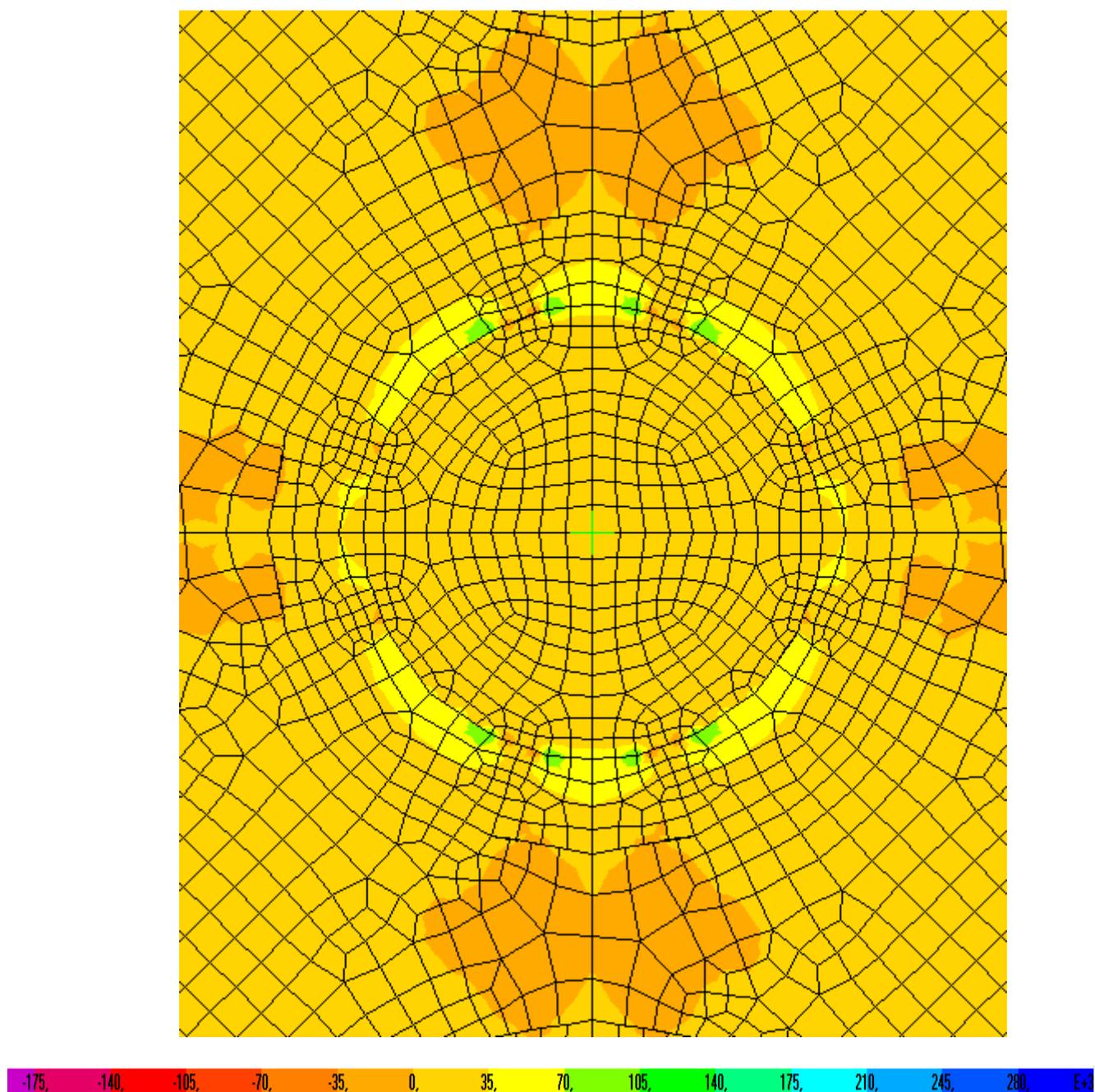


Figura 24 – Tensões na direção y no capitel central [kN/m²]

A Figura 25 indica a distribuição das tensões na geogrelha ao longo do corte transversal passando pelos eixos dos capitéis. A Figura 26 apresenta a distribuição das tensões ao longo do corte diagonal passando pelo centro dos capitéis.

As Figuras 25 e 26 representam as variações de tensões σ_{xx} ao longo dos cortes indicados na Figura 21. Nelas é possível ver claramente os picos de tensão.

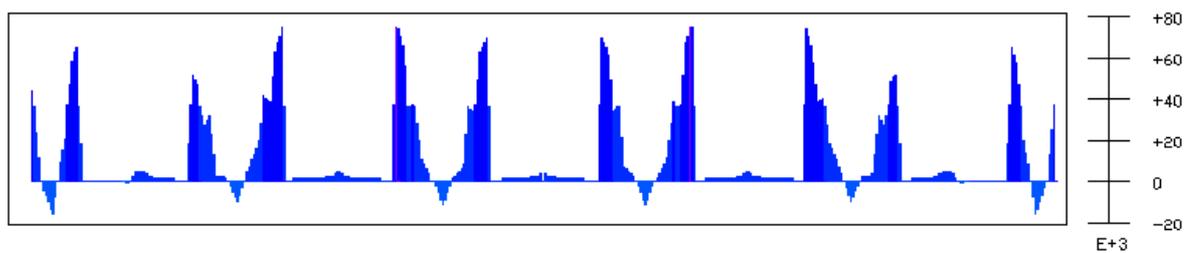


Figura 25 – Variação das tensões σ_{xx} ao longo dos centros dos capitéis [kN/m²]

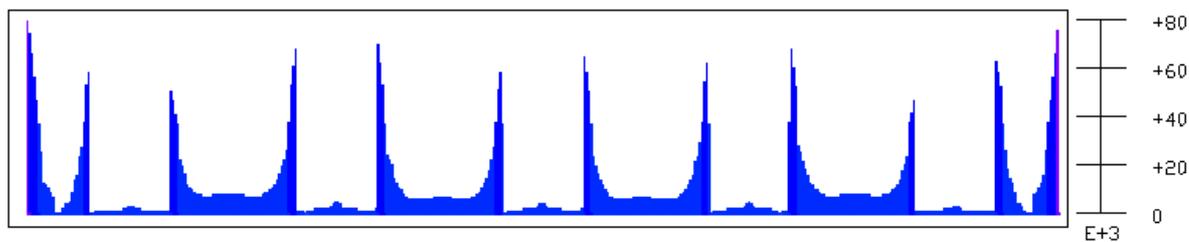


Figura 26 – Variação das tensões σ_{xx} ao longo da diagonal dos capitéis [kN/m²]

Os resultados aqui apresentados serão comparados com os de outras análises na Tabela 1 do capítulo 5.

4.4 MALHA TRIANGULAR COM CAPITÉIS QUADRADOS

4.4.1 Deslocamentos verticais

A Figura 27 apresenta os deslocamentos verticais (isocurvas de deformação) de toda a área. Os valores da escala estão em milímetros ($m \times 10^{-3}$). Pode-se observar que os maiores deslocamentos ocorrem nas regiões entre os capitéis, sendo menores nas áreas próximas ao capitel central. Esta região central é o foco de interesse das comparações aqui efetuadas.

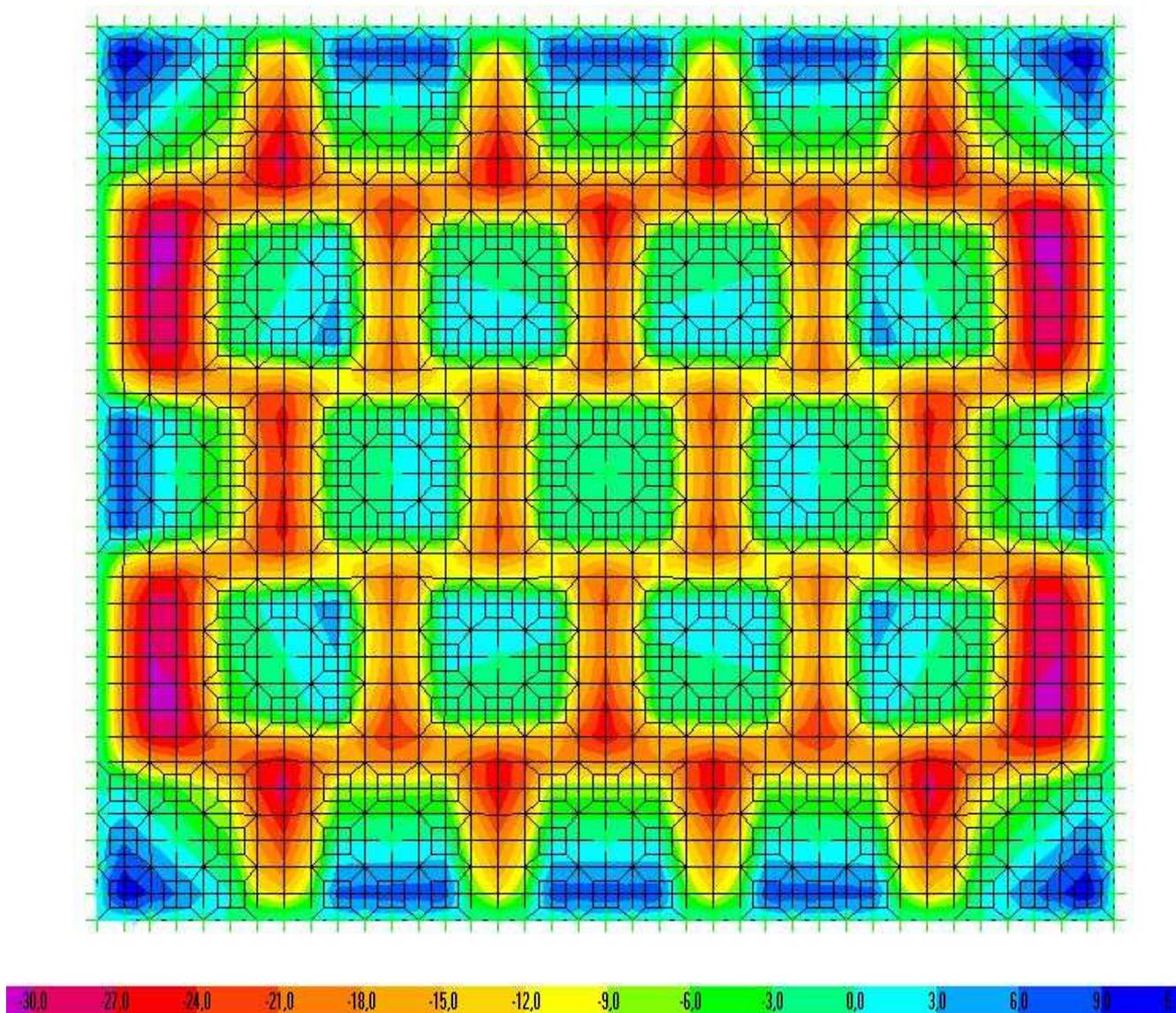


Figura 27 – Deslocamentos verticais da malha triangular com capitéis quadrados
[mm]

4.4.2 Tensões na direção x

A Figura 28 apresenta o diagrama das tensões na direção x de toda a área.

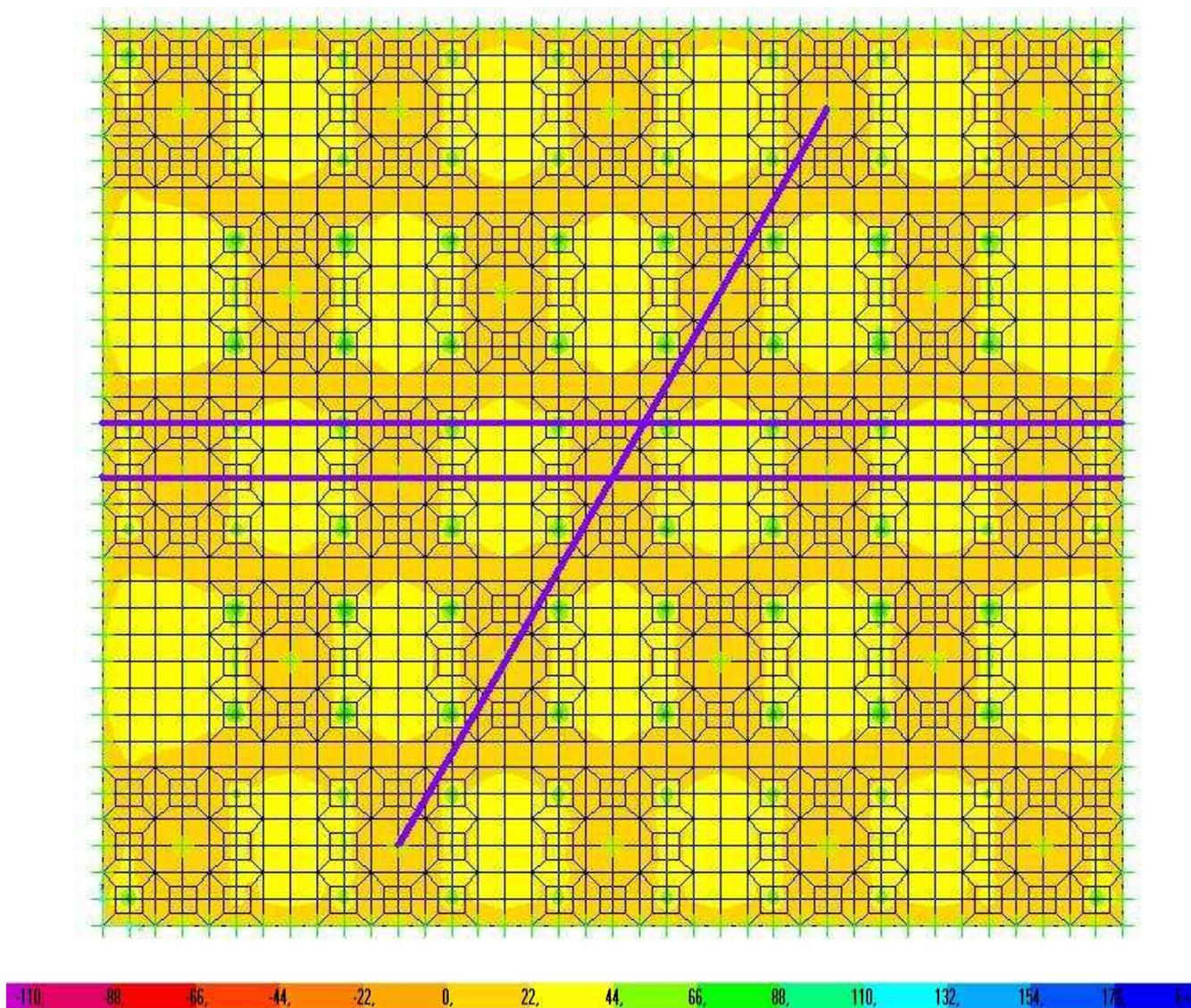


Figura 28 – Tensões na direção x da malha triangular com capitel quadrado [kN/m²]

A Figura 29 apresenta uma ampliação da imagem com a distribuição das tensões na região do capitel central. Observa-se que os maiores valores das tensões continuam ocorrendo nas quinas dos capitéis, mas sobre as arestas existe uma distribuição da tensão que vai além do capitel. Os valores observados são menores que na malha quadrada.

Na Figura 28, as linhas roxas indicam os cortes feitos para se observar as variações das tensões ao longo da geogrelha. Foi feito um corte transversal no centro dos capitéis, cuja distribuição das tensões encontra-se indicada na Figura 30. As tensões ao longo do corte transversal passando pelas quinas dos capitéis podem ser observadas na Figura 31. A Figura

32 apresenta as tensões que se desenvolvem ao longo de um corte diagonal que passa pelo centro e pelas quinas dos capitéis. Estas figuras representam as variações de tensões σ_{xx} nos locais indicados pelos cortes. Nelas é possível ver claramente os picos de tensão.

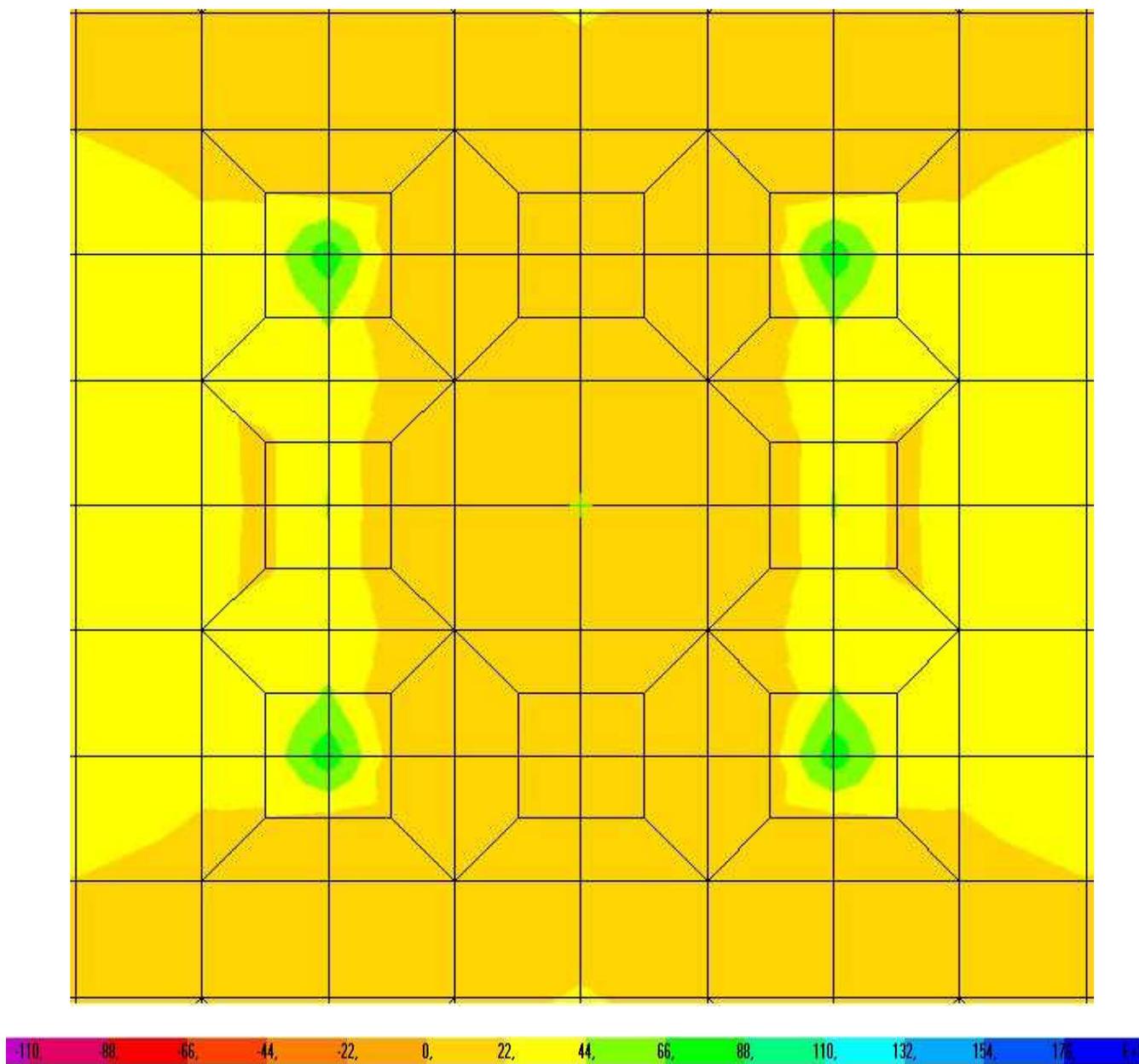


Figura 29 – Tensões na direção x no capitel central [kN/m²]

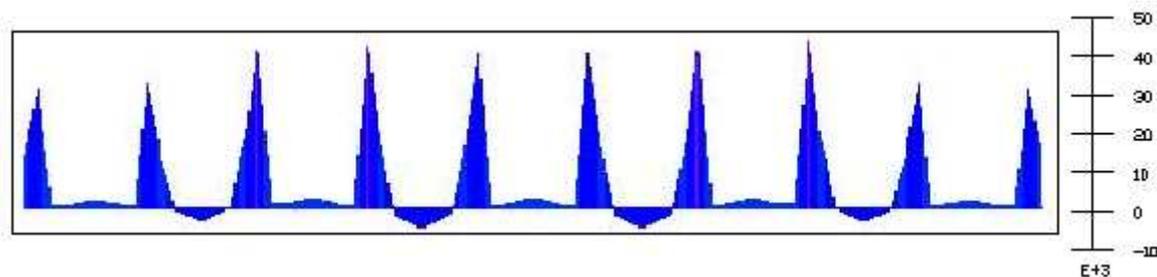


Figura 30 – Variação das tensões σ_{xx} ao longo dos centros dos capitéis [kN/m²]

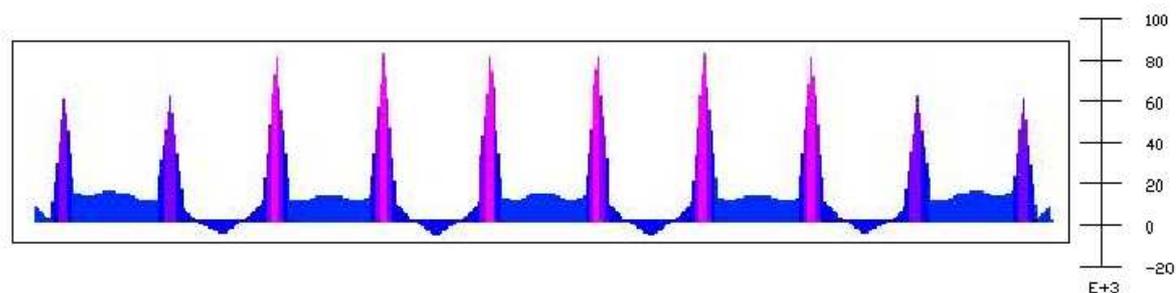


Figura 31 – Variação das tensões σ_{xx} ao longo das quinas dos capitéis [kN/m²]

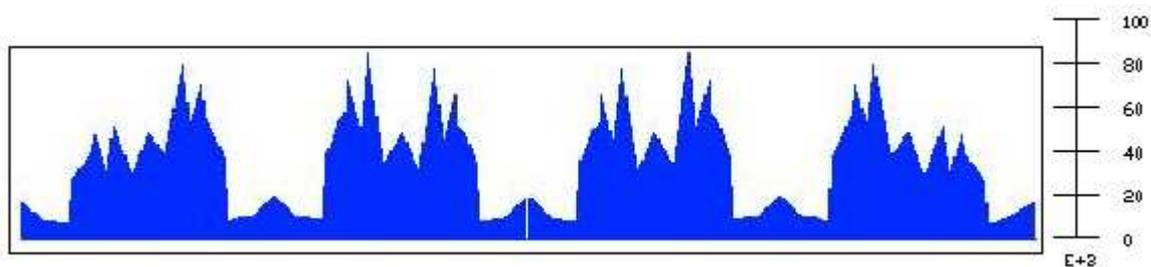


Figura 32 – Variação das tensões σ_{xx} ao longo do corte diagonal [kN/m²]

Os resultados aqui apresentados serão comparados com os de outras análises na Tabela 1 do capítulo 5.

4.4.3 Tensões na direção y

A Figura 33 apresenta o diagrama das tensões na direção y de toda a área.

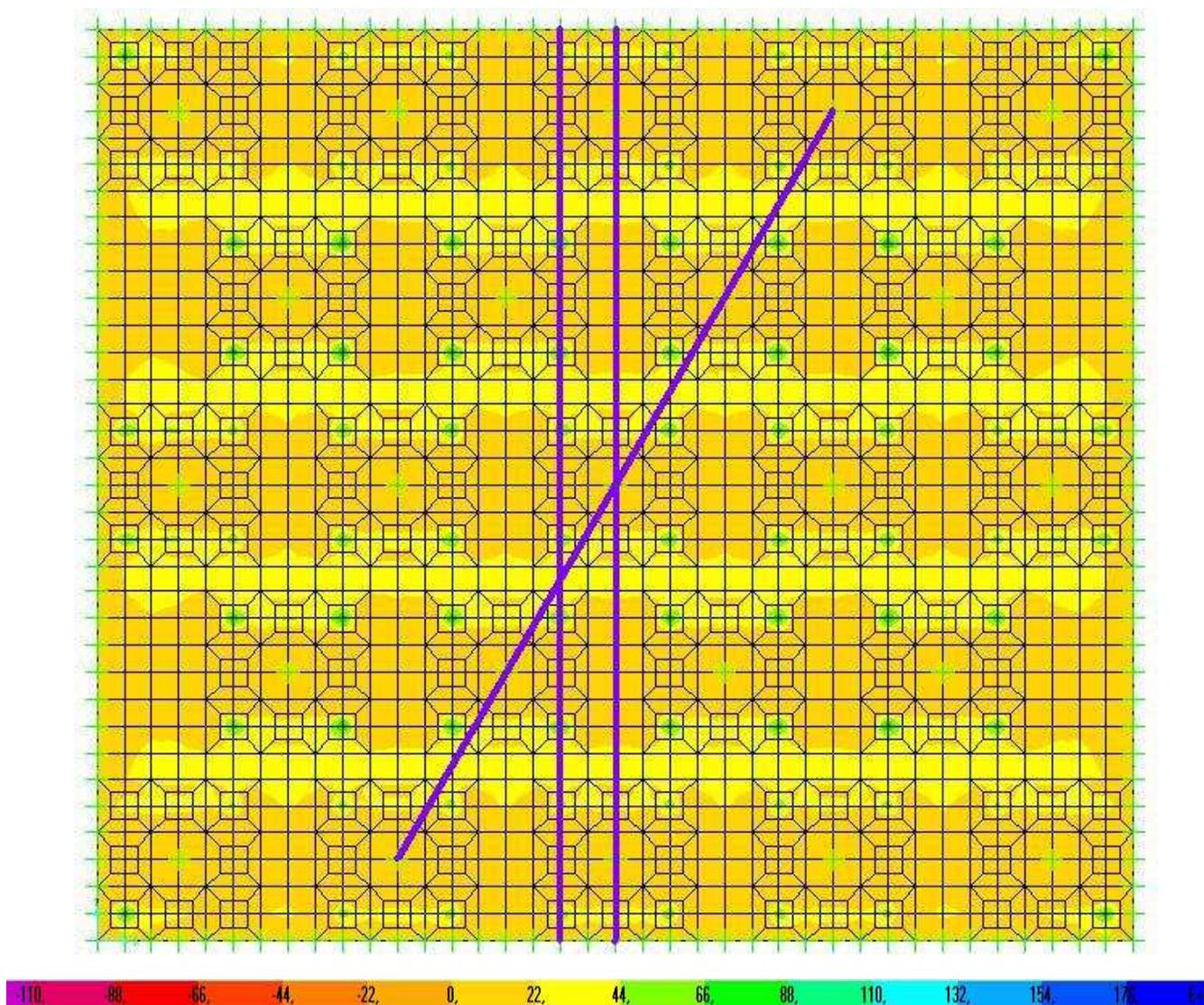


Figura 33 – Tensões na direção y da malha triangular com capitel quadrado [kN/m²]

Nesta figura, as linhas roxas indicam cortes feitos para se observar as variações das tensões ao longo da área. Para a análise das distribuições das tensões ao longo da geogrelha foram feitos: um corte transversal no centro dos capitéis, um corte transversal passando pelas quinas dos capitéis e um corte diagonal que passa pelo centro e pelas quinas dos capitéis.

A Figura 34 apresenta uma ampliação da imagem com a distribuição das tensões na região do capitel central.

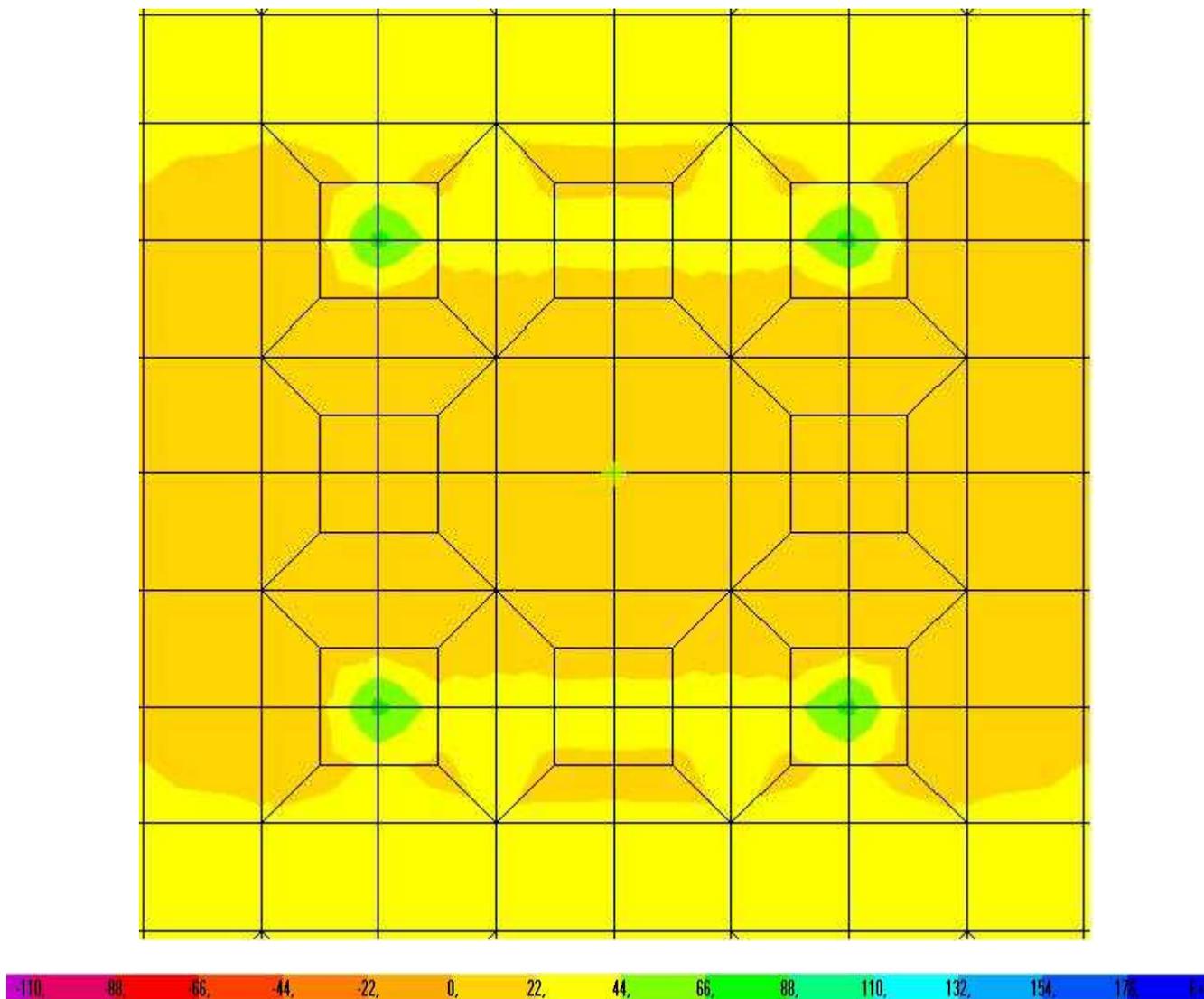


Figura 34 – Tensões na direção y no capitel central [kN/m²]

Para o caso de malha triangular a tensão em x não é igual à tensão em y, embora continue ocorrendo o mesmo comportamento: aumento da tensão nas arestas dos capitéis sendo distribuída para além destes e picos de tensões nas quinas.

As figuras a seguir ilustram as distribuições das tensões ao longo dos cortes indicados na Figura33. Na Figura 35 são indicadas as tensões que se desenvolvem ao longo de um corte transversal no centro dos capitéis. A Figura 36 apresenta as tensões ao longo de um corte transversal passando pelas quinas dos capitéis. Finalmente, a Figura 37 ilustra as tensões ao longo de um corte diagonal que passa pelo centro e pelas quinas dos capitéis.

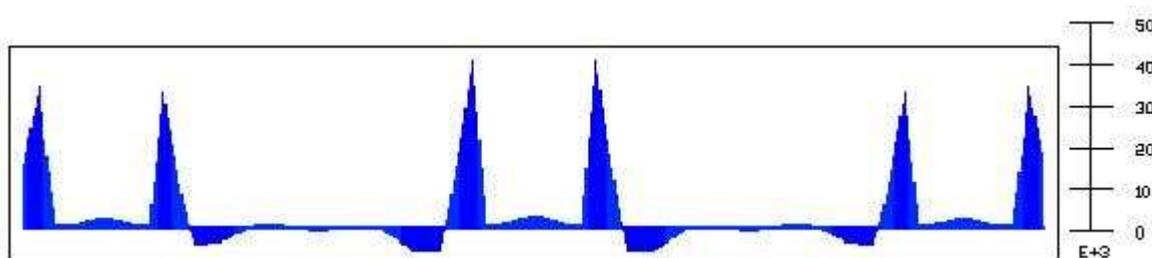


Figura 35 – Variação das tensões σ_{yy} ao longo dos centros dos capitéis [kN/m²]

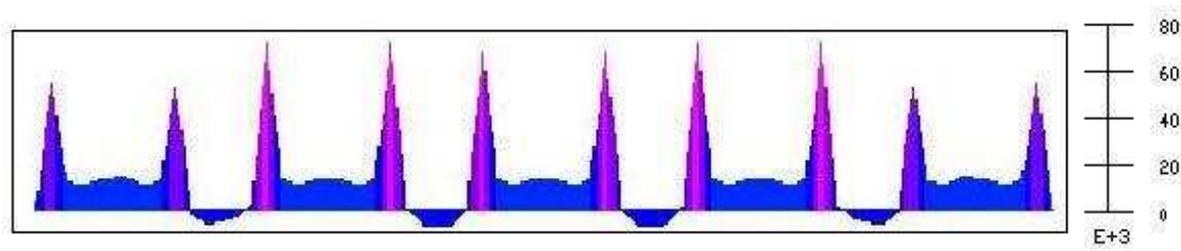


Figura 36 – Variação das tensões σ_{yy} ao longo das quinas dos capitéis [kN/m²]

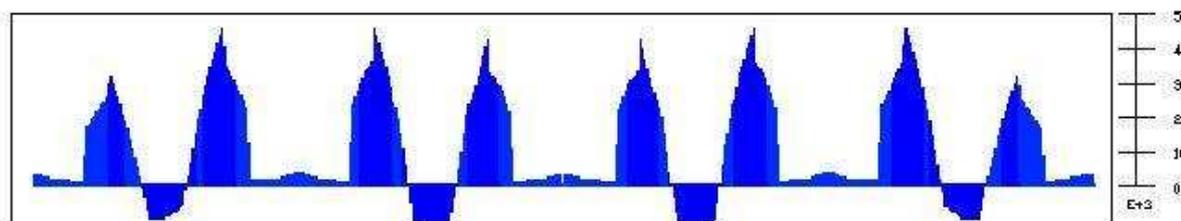


Figura 37 – Variação das tensões σ_{yy} ao longo da diagonal dos capitéis [kN/m²]

Estas figuras representam as variações de tensões σ_{yy} nos locais indicados pelos cortes. Nelas é possível ver claramente os picos de tensão.

Os resultados aqui apresentados serão comparados com os de outras análises na Tabela 1 do capítulo 5.

4.5 MALHA TRIANGULAR COM CAPITÉIS CIRCULARES

4.5.1 Deslocamentos verticais

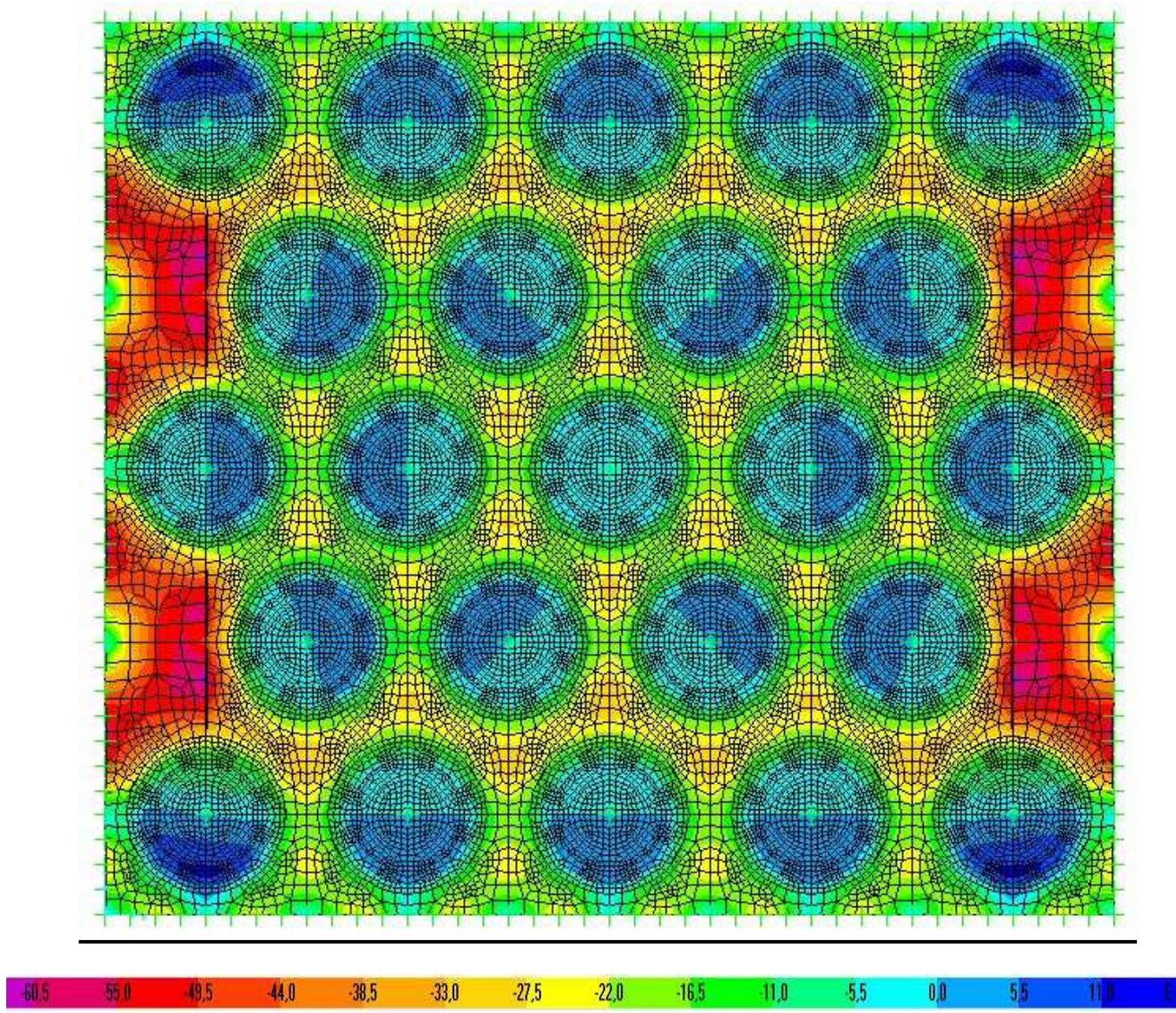


Figura 38 – Deslocamentos de malha triangular com capitéis circulares [mm]

4.5.2 Tensões na direção x

A Figura 39 apresenta o diagrama das tensões na direção x de toda a área da geogrelha.

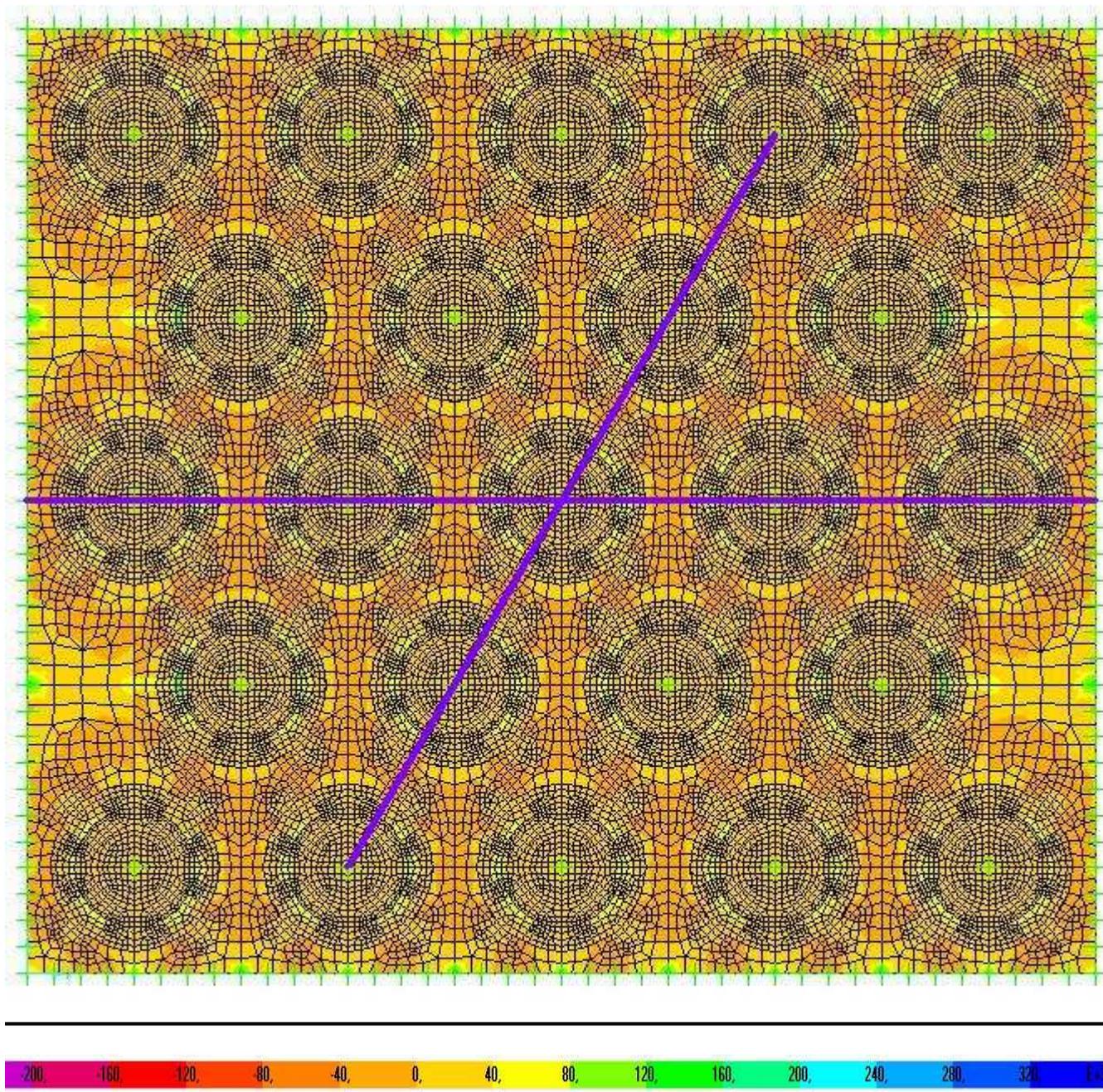


Figura 39 – Tensões na direção x da malha triangular com capitéis circulares [kN/m²]

A Figura 40 apresenta uma ampliação da imagem com a distribuição das tensões na região do capitel central.

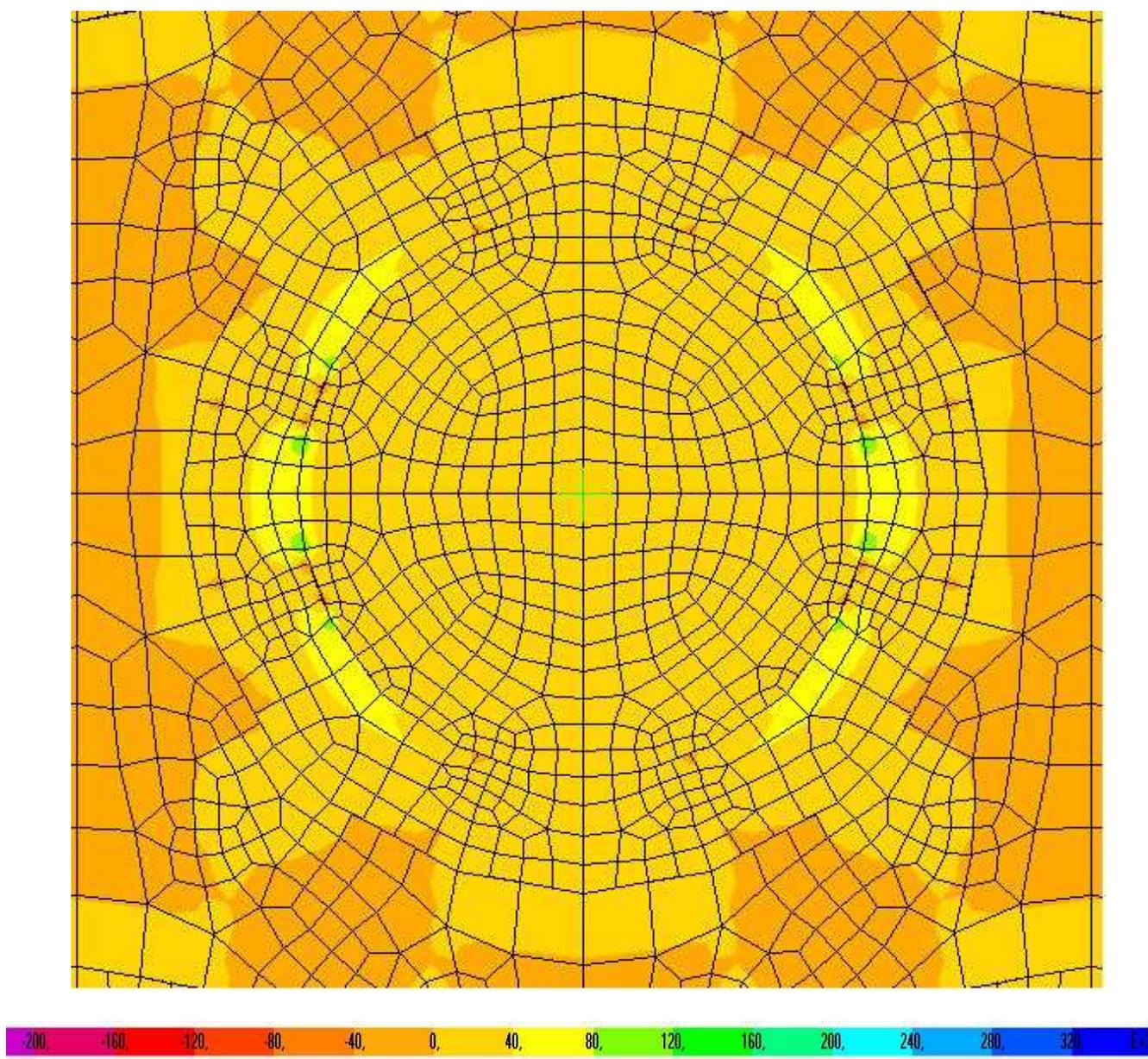


Figura 40 – Tensões na direção x no capitel central [kN/m²]

Observa-se que as tensões são mais elevadas na borda circular do capitel e que, diferentemente do capitel quadrado, não existem picos em pontos específicos. A distribuição das tensões é mais uniforme. Vale lembrar que estas são as tensões ao longo da direção x, as tensões ao longo da direção y não são iguais a esta, devido à falta de simetria.

Na Figura 39, as linhas roxas indicam cortes feitos para se observar as variações das tensões ao longo da geogrelha. Foi feito um corte transversal passando pelo centro dos capitéis, cujas tensões encontram-se apresentadas na Figura 41. A Figura 42 apresenta as tensões que se desenvolvem ao longo de um corte diagonal que também passa pelo centro dos capitéis.

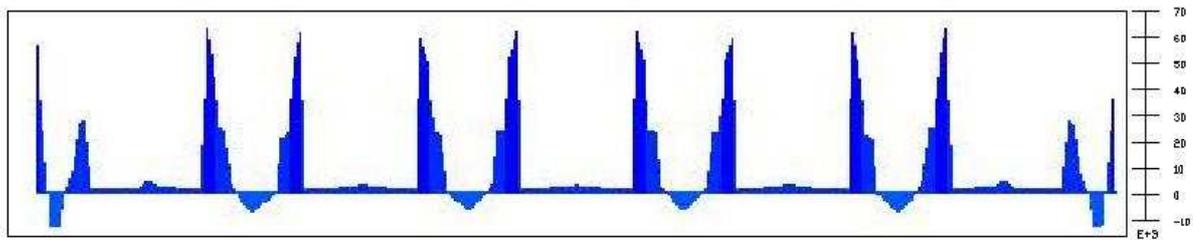


Figura 41 – Variação das tensões σ_{xx} ao longo dos centros dos capitéis [kN/m²]

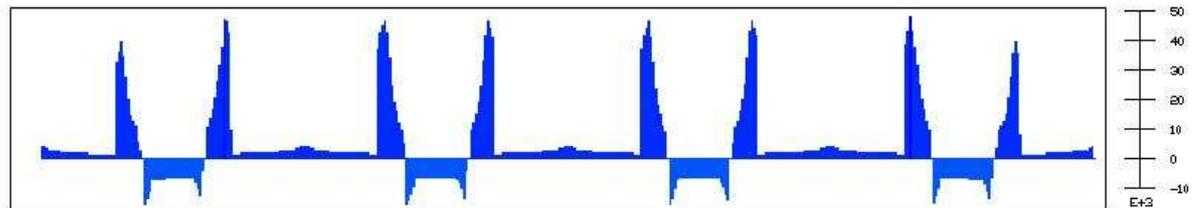


Figura 42 – Variação das tensões σ_{xx} ao longo da diagonal dos capitéis [kN/m²]

Estas figuras representam as variações de tensões σ_{xx} nos locais indicados pelos cortes da Figura 39. Nelas é possível ver claramente os picos de tensão.

Os resultados aqui apresentados serão sintetizados para comparação com os de outras análises na Tabela 1 do capítulo 5.

4.5.1 Tensões na direção y

A Figura 43 apresenta o diagrama das tensões na direção y de toda a área.

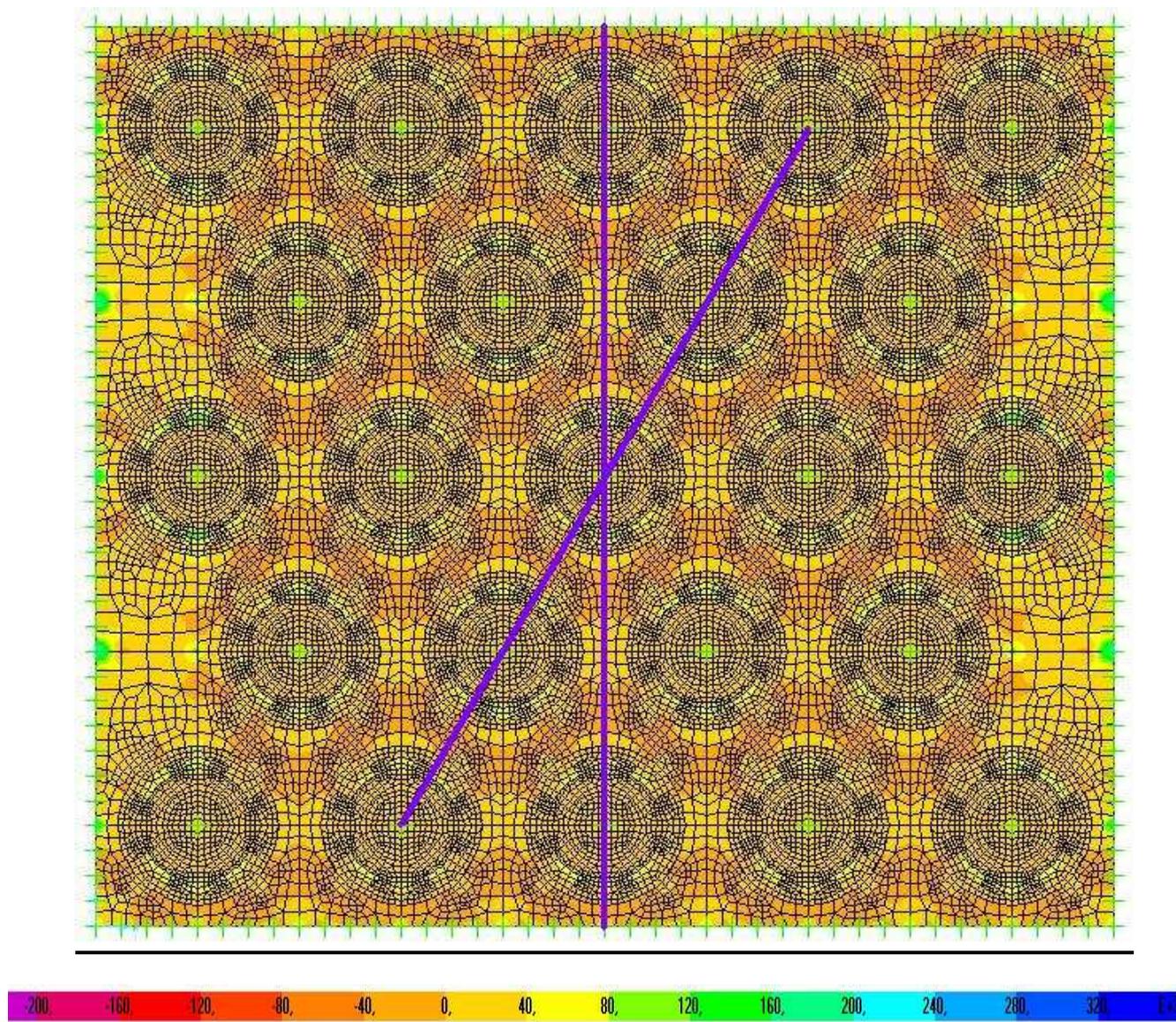


Figura 43 – Tensões na direção y da malha triangular com capitéis circulares [kN/m²]

Nesta figura as linhas roxas indicam cortes feitos para se observar as variações das tensões ao longo da área da geogrelha. Foram feitos: um corte transversal no centro dos capitéis e um corte diagonal que também passa pelo centro dos capitéis.

A Figura 44 apresenta uma ampliação da imagem com a distribuição das tensões na região do capitel central.

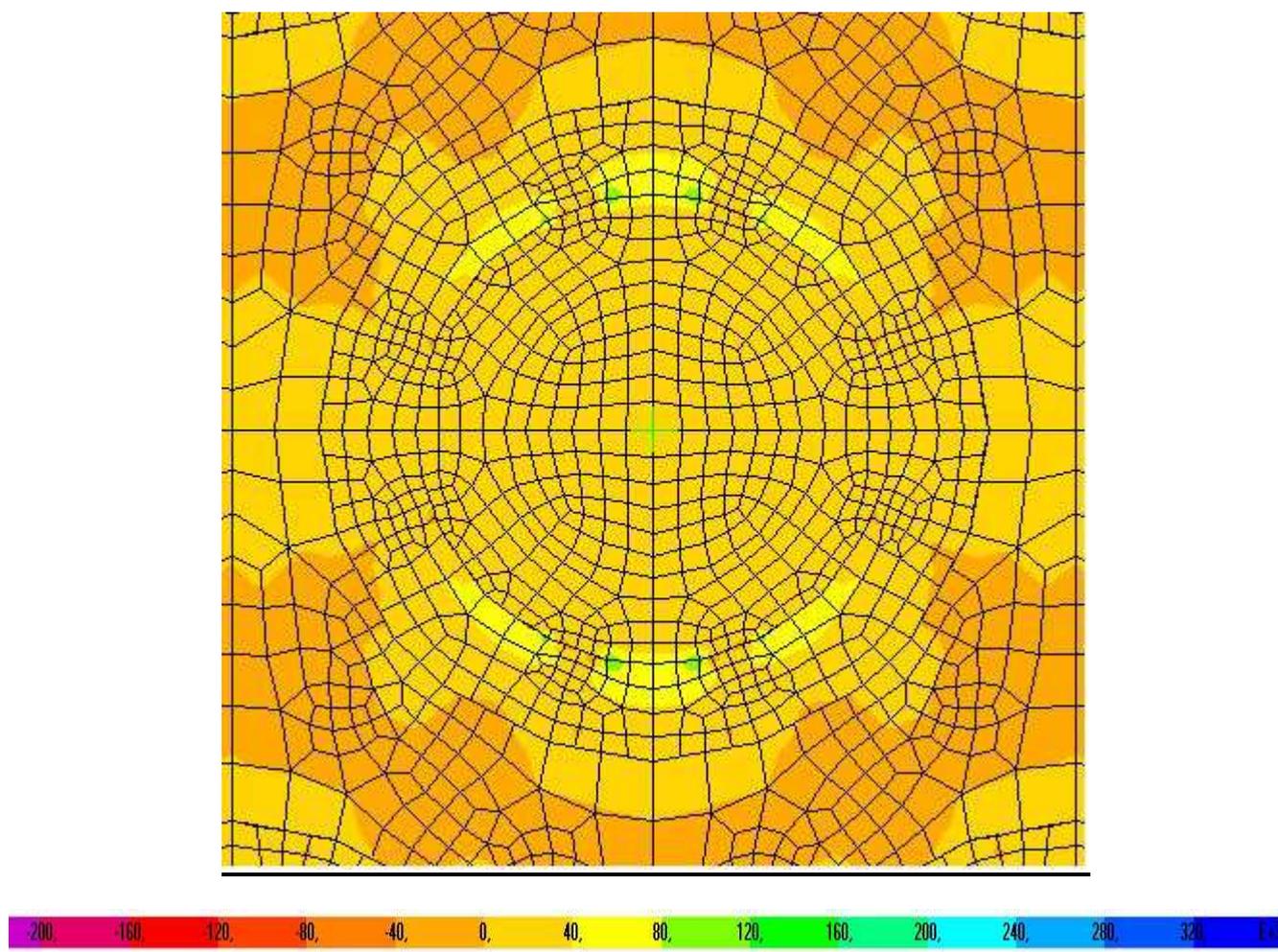


Figura 44 – Tensões na direção y no capitel central [kN/m²]

Para o caso da malha triangular as tensões em x não são iguais às tensões em y, embora continue ocorrendo o mesmo comportamento: aumento das tensões nas arestas dos capitéis sendo distribuída para além destes e picos de tensões nas quinas.

As figuras a seguir ilustram as distribuições das tensões na geogrelha, ao longo dos cortes indicados na Figura 43. Na Figura 45 são indicadas as tensões que se desenvolvem ao longo de um corte transversal no centro dos capitéis. A Figura 46 apresenta as tensões ao longo de um corte diagonal passando pelos centros dos capitéis.

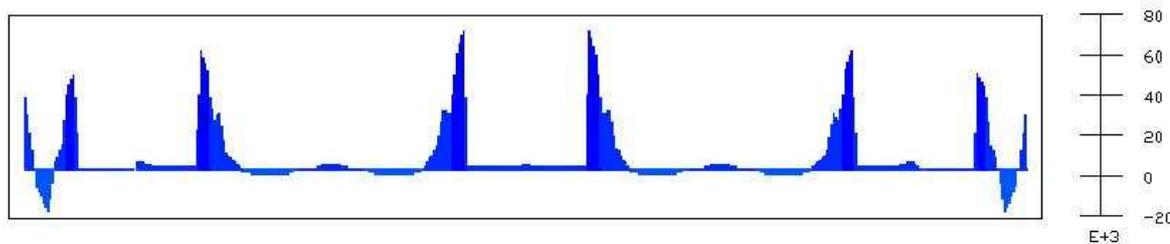


Figura 45 – Variação das tensões σ_{yy} ao longo dos centros dos capitéis [kN/m²]

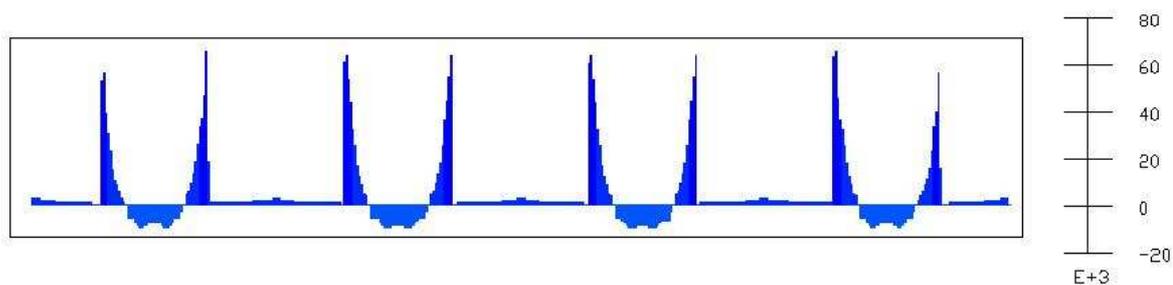


Figura 46 – Variação das tensões σ_{yy} ao longo da diagonal dos capitéis [kN/m²]

Estas figuras representam as variações de tensões σ_{yy} nos locais indicados pelos cortes. Nelas é possível ver claramente os picos de tensão.

Os resultados aqui apresentados serão comparados com os das outras análises na Tabela 1 do capítulo 5.

5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados das várias análises encontram-se sintetizados na Tabela 1. Nesta tabela são mostrados os valores máximos dos deslocamentos verticais e das tensões nas bordas dos capitéis para os casos modelados. Os valores indicados são os de pico.

Tabela 1 – Comparação dos valores máximos dos deslocamentos verticais e das tensões

CASO	MÁXIMO DESLOCAMENTO VERTICAL [mm]	TENSÃO MÁXIMA NAS BORDAS DOS CAPITÉIS [MPa]
Malha quadrada com capitel quadrado	54	140
Malha quadrada com capitel circular	36	90
Malha triangular com capitel quadrado	21	90
Malha triangular com capitel circular	20	80

Comparando o modelo de malha quadrada e capitel quadrado com o modelo de malha triangular e capitel quadrado observa-se que a distribuição de tensões da geogrelha sobre os capitéis é mais suave no modelo com malha triangular.

Tanto no modelo de malha quadrada quanto no modelo de malha triangular as tensões aumentam sobre as arestas dos capitéis, só que na malha quadrada (Figuras 11 e 13) as maiores tensões ficam concentradas sobre as arestas, enquanto que na malha triangular (Figuras 26 e 31), devido ao desalinhamento das estacas, elas vão além das arestas, ou seja, têm uma melhor distribuição.

Podemos observar também que no modelo de malha quadrada as tensões são iguais nas duas direções, devido à dupla simetria, enquanto que no modelo de malha triangular são diferentes. Isso ocorre porque na malha quadrada as estacas têm a mesma distância nas duas direções e na malha triangular o que se mantém constante é a distância entre estacas (os lados do triângulo equilátero), fazendo com que as linhas de estacas tenham distâncias diferentes segundo as direções x e y.

Não só a forma da distribuição das tensões é diferente como também os valores. As tensões nas malhas triangulares são menores que nas malhas quadradas.

Comparando agora o modelo de malha quadrada e capitel circular com o modelo de malha triangular e capitel circular observa-se que o comportamento é mais ou menos o mesmo que nos modelos com capitéis quadrados: a distribuição de tensões da geogrelha sobre os capitéis é mais suave no modelo com malha triangular; no modelo de malha quadrada as tensões são iguais nas duas direções enquanto que no modelo de malha triangular são diferentes; a tensão aumenta sobre a aresta dos capitéis, sendo que na malha triangular (Figuras 37 e 41), devido ao desalinhamento das estacas, elas vão além das arestas, ou seja, têm uma melhor distribuição.

Comparando então os modelos de capitéis quadrados com os modelos de capitéis circulares, observa-se que nos capitéis quadrados a tensão nas duas direções aumenta em cima das arestas dos capitéis e ocorrem picos de tensões nas quinas (Figuras 12, 14, 27 e 32). Nos capitéis circulares também existe o aumento das tensões sobre as arestas dos capitéis, só que neste caso não ocorrem os picos em pontos específicos.

Observando as Figuras 20 e 22 verifica-se que as tensões nos capitéis circulares distribuem-se de forma mais uniforme ao longo das bordas. No modelo de malha triangular, que apresenta uma melhor distribuição de tensões, quase não se observam concentrações indesejáveis de tensões.

Outra observação importante é que nos capitéis circulares os valores das tensões são menores do que os observados nos capitéis quadrados.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os modelos analisados permitiram observar como a geometria e a distribuição dos capitéis influenciam nas distribuições das tensões ao longo da geogrelha. O objetivo é buscar a configuração com uma melhor distribuição das tensões na geogrelha e que conduza a seus projetos mais econômicos e com maior durabilidade.

Usando um modelo onde não se tenha acúmulo de tensões evita-se o rompimento da geogrelha e o modelo que melhor se aplica a esta situação é o modelo de malha de distribuição de estacas triangular com capitéis circulares.

Esses modelos foram analisados no plano, usando-se elementos de área, mas na realidade os capitéis são sólidos, no espaço e ainda têm uma forma abaulada na sua face superior para diminuir ainda mais as tensões na geogrelha. Um estudo mais realista poderia ser feito levando em consideração essa geometria espacial.

O aspecto econômico é também muito importante na engenharia. Neste sentido sugere-se o desenvolvimento de um estudo otimizando as distâncias entre estacas e os diâmetros dos capitéis para determinados tipos de geogrelhas.

7 REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6118:2003 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento

* BREBBIA, C. A., FERRANTE, A.J. (1975). “The Finite Element Technique”. Porto Alegre - Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1975.

CONCEIÇÃO, JOÃO LUIS SANTOS ABREU (2006). “Análise de Aterro Estaqueado Com Recurso a Métodos Numéricos”. Projeto de final de curso em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MENDONÇA, MARCOS BARRETO DE; BRUGGER, PAULO JOSÉ; PEREIRA, GUILHERME ISIDORO MARTINS; MONTES, FLÁVIO TEIXEIRA. “Recuperação de Aterro Rodoviário Através de Solo Reforçado e Blocos Intertravados”, artigo.

PROGRAMA SAP2000 – Manuals, Computers and structures, inc, Berkeley, California, USA.

SIEIRA, ANA CRISTINA CASTRO FONTENLA (2003). “Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha”, Tese de doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

SPOTTI, ALEXANDRE PEREIRA (2007). “Aterro Estaqueado reforçado Instrumentado Sobre Solo Mole”. Tese de doutorado – PEC/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

TEIXEIRA, CHRISTIANO FARIA (2006). “Análise Numérica de Ensaios Em Solo Reforçado Com Geogrelha”. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

* Obra consultada mas não citada