

4 Utilização de Técnicas de Transferência de Tensões para a Realização de Estudos de Submodelagem

Neste capítulo pretendesse usar as técnicas do *IPD* e do *GT* apresentadas anteriormente no Capítulo 3 para transferir tensões de um modelo global dado para um determinado *Submodelo*. No entanto, não serão realizadas análises numéricas de estabilidade de poços nos *submodelos* adotados neste capítulo, o qual fica proposto para futuros trabalhos de pesquisa.

A fim de transferir tensões de um modelo global para um determinado *submodelo*, inicialmente neste trabalho foi empregada a técnica de submodelagem disponível no programa Abaqus, a qual se encontra baseada no princípio de Saint-Venant (Shen *et al.* 2011b, 2012a). Nota-se que a partir da utilização desta técnica foi possível transferir as tensões do modelo global para os *submodelos* localizados em zonas diferentes às interfaces do sal com as rochas adjacentes. No entanto, não foi possível transferi-las para os submodelos localizados nessas zonas de interface, as quais estão caracterizadas por possuírem um notável contraste de tensões entre o sal (condição isotrópica de tensões) e os sedimentos adjacentes (condição anisotrópica de tensões), como apreciado esquematicamente na Figura 4.1.

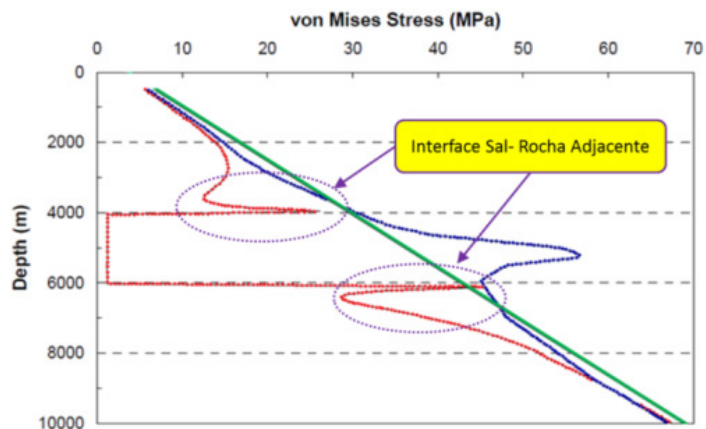


Figura 4.1 – Distribuição da Tensão de Von Mises em uma malha que contém uma esfera de sal. A linha vermelha corresponde a uma linha que passa pelo centro da esfera, no instante do equilíbrio do sal (Adaptado de Fredrich *et al.*, 2003).

Dada a importância de criar submodelos nas zonas de interface do sal com as rochas adjacentes para estudos de estabilidade de poços, por serem consideradas essas zonas como críticas devido ao seu potencial de apresentar altas perdas de fluido de perfuração pela redução abrupta do gradiente de fratura (Shen *et al.*, 2010a), optou-se por buscar uma alternativa diferente para poder transferir corretamente as tensões do modelo global para os *submodelos* localizados nessas regiões.

Assim sendo, foram utilizadas as técnicas *IPD* e do *GT* com esse propósito, e foi realizada a transferência de tensões de um modelo global para *submodelos* criados tanto nas zonas de interface quanto fora dessas zonas. Posteriormente, foram estabelecidos mecanismos para validar os resultados dessa transferência.

Cabe destacar que quando é utilizada a técnica do *IPD*, a transferência de informação do modelo global para os pontos de Gauss que compõem uma malha local de elementos finitos é realizada através da interpolação de tensões entre os pontos de Gauss dos elementos do modelo global dado para os pontos de Gauss que compõem a malha do *submodelo* de interesse utilizando a equação (3.1), seguindo a mesma metodologia que foi empregada para transferir tensões de um modelo global para os pontos que compõem as *subestruturas* mencionadas anteriormente no Capítulo 3.

4.1. Modelo Global B

Neste capítulo será construído um novo modelo global, chamado *Modelo Global B*, o qual será empregado para ilustrar a utilização das técnicas do *IPD* e do *GT* para transferir tensões a *submodelos* localizados em diferentes lugares dentro do domínio do modelo global.

O *Modelo Global B* possui um tamanho de 10 x 10 x 10 km. Esse modelo encontra-se dividido em três zonas, denominadas *Overburden*, *Sal* e *Underburden*, conforme apresentado na Figura 4.2.

As zonas do *Overburden* e do *Underburden* são consideradas como elásticas, homogêneas, e isotrópicas, enquanto que a zona do *Sal* é considerada como um material visco-elástico, não linear, e que possui um modelo empírico potencial de fluência primária.

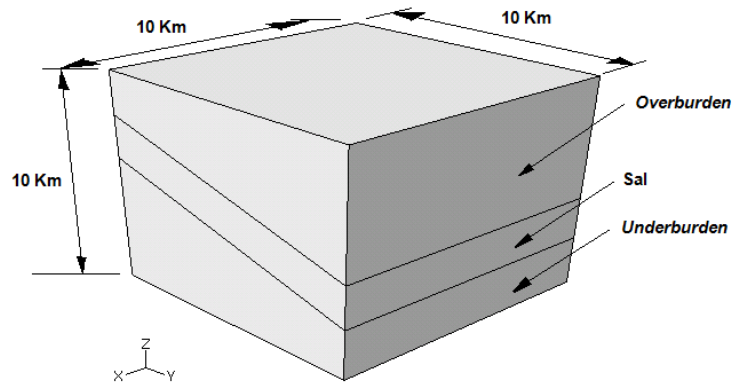


Figura 4.2 – Geometria adotada para o *Modelo Global B*.

A zona do *Overburden* está localizada entre o topo do modelo global (superfície terrestre) e o topo da zona de *Sal*; a zona de *Sal* encontra-se entre o *Overburden* e o *Underburden*; e o *Underburden* é a terceira zona localizada entre a base da zona de *Sal* e a base do modelo global.

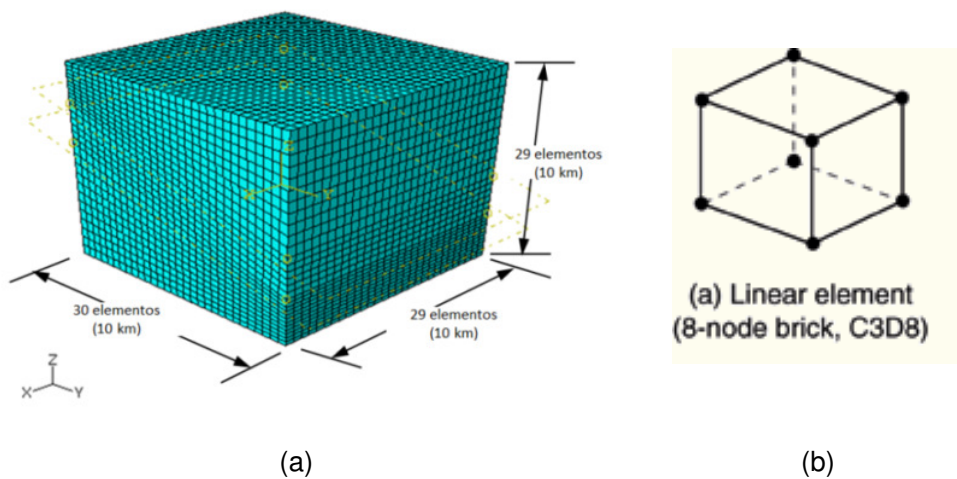


Figura 4.3 – Malha adotada para o *Modelo Global B*.

O sistema de eixos adotado para o modelo global corresponde a um sistema de eixos positivo, cuja origem de coordenadas (0,0,0) está localizado em um dos vértices da base do modelo global (Figura 4.4):

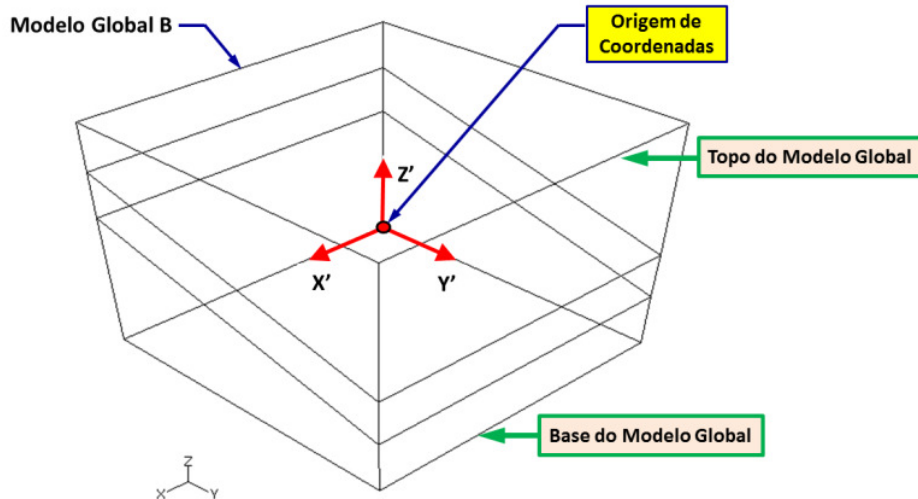


Figura 4.4 – Localização da origem de Coordenadas no *Modelo Global B*.

As propriedades dos materiais de cada uma das zonas do *Modelo Global B* são apresentadas na Tabela 4.1.

Salienta-se que as zonas de *Underburden* e do *Overburden* neste novo modelo global não têm associadas uma litologia específica. Os termos *Underburden* e *Overburden* representam zonas genéricas acima e abaixo da zona da zona de *Sal*. Portanto, as propriedades do *Underburden* e do *Overburden* foram extraídas das simulações realizadas por Vidal-Gilbert (2010), onde são apresentados dados típicos dessas zonas, enquanto que as propriedades mecânicas da zona de *Sal* foram baseadas no trabalho de Botelho (2008).

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas dos materiais do *Modelo Global B*.

Zona	Modulo de Young (E), GPa	Coefficiente de Poisson (ν)	Masa Especifica (kg/m^3)	Peso Especifico (kN/m^3)
<i>Overburden</i>	14,0	0,35	2600	25,48
<i>Sal</i>	20,4	0,36	2160	21,17
<i>Underburden</i>	14,0	0,25	2200	21,56

No caso do sal, as propriedades de *Módulo de Young*, o *Coefficiente de Poisson*, o *Peso Especifico* e os parâmetros para simular o processo do *creep* no *Sal*, foram extraídas de Botelho (2008) (Modelo de Fluência: *Power-Law Model / Strain Hardening* do Abaqus; Parâmetros do Modelo: $A = 2,3937 \text{ E-}26$, $n = 3,0$, $m = -0,7$).

• Estado de Tensões *In Situ* no Modelo Global B

No Modelo Global B foi estabelecido um estado inicial de tensões *in situ* anisotrópico em cada um dos seus três componentes sem presença de tensões cisalhantes, de tal modo a promover o *creep* (ou fluência) na zona de Sal.

Tal como no caso do Modelo Global A, no Modelo Global B as tensões *in situ* iniciais são carregadas para os pontos de Gauss de cada um dos elementos que compõem a malha do modelo global, dependendo da região em que esteja localizado cada um desses pontos, e de acordo com as definições da Tabela 4.2 e da Figura 4.5.

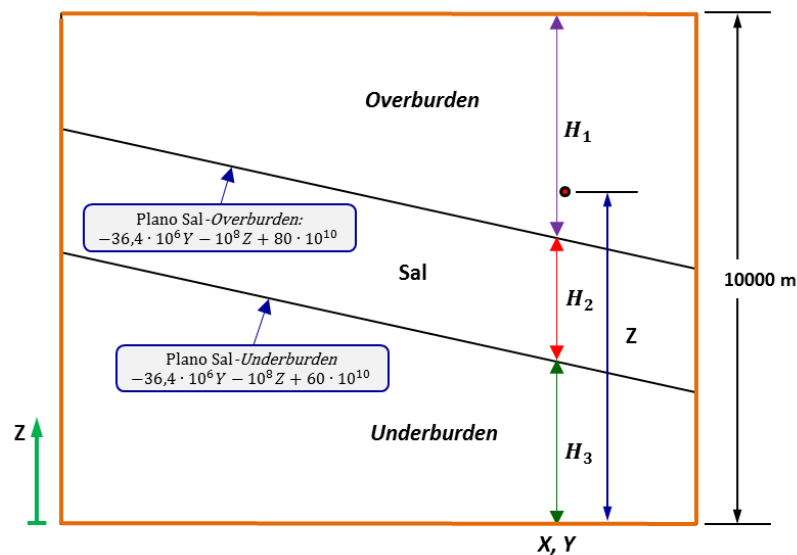


Figura 4.5 – Posicionamento dos Planos que limitam a zona do Sal no Modelo Global B.

Tabela 4.2 – Equações utilizadas para o cálculo das tensões *in situ* iniciais no Modelo Global B, correspondente a um regime de falhamento normal.

Zona	Tensões <i>In Situ</i>		
	Tensão Vertical	Tensão Horizontal	Tensões Cisalhantes
Overburden	$S_{33} = -(10000 - Z)\gamma_{overb}$	$S_{11} = S_{22} = 0,8 S_{33}$	$S_{12} = S_{13} = S_{23} = 0$
Sal	$S_{33} = -[H_1 \gamma_{overb} + (H_2 + H_3 - Z)\gamma_{sal}]$	$S_{11} = S_{22} = 0,8 S_{33}$	$S_{12} = S_{13} = S_{23} = 0$
Underburden	$S_{33} = -[H_1 \gamma_{overb} + H_2 \gamma_{sal} + (H_3 - Z)\gamma_{underb}]$	$S_{11} = S_{22} = 0,8 S_{33}$	$S_{12} = S_{13} = S_{23} = 0$

Na Tabela 4.2, γ_{overb} , γ_{Sal} e γ_{underb} correspondem aos pesos específicos do *Overburden*, do *Sal* e do *Underburden*, respectivamente (dados em unidades de força sobre volume), enquanto que o parâmetro Z corresponde à altura do ponto com respeito à base do modelo global, de acordo com o sistema de coordenadas X - Y - Z adotado no *Modelo Global B* (Figura 4.4).

4.2. Descrição dos *Submodelos* Adotados no *Modelo Global B*

Com o objetivo de transferir tensões do *Modelo Global B* para *submodelos* localizados em diferentes zonas do modelo global com diferentes níveis de tensões desviadoras, foram utilizadas as técnicas do *IPD* e do *GT*. Portanto, foram criados três *submodelos* chamados *submodelos A*, *B* e *C*, respectivamente, como detalhado a seguir.

- ***Submodelo A***

Este modelo local foi extraído da zona do *Sal* do modelo global na faixa de profundidade entre 5000 e 5010 m a partir do topo do modelo, com uma área de $10 \times 10 \text{ m}^2$. A localização desse modelo dentro do modelo global é apresentada na Figura 4.6.

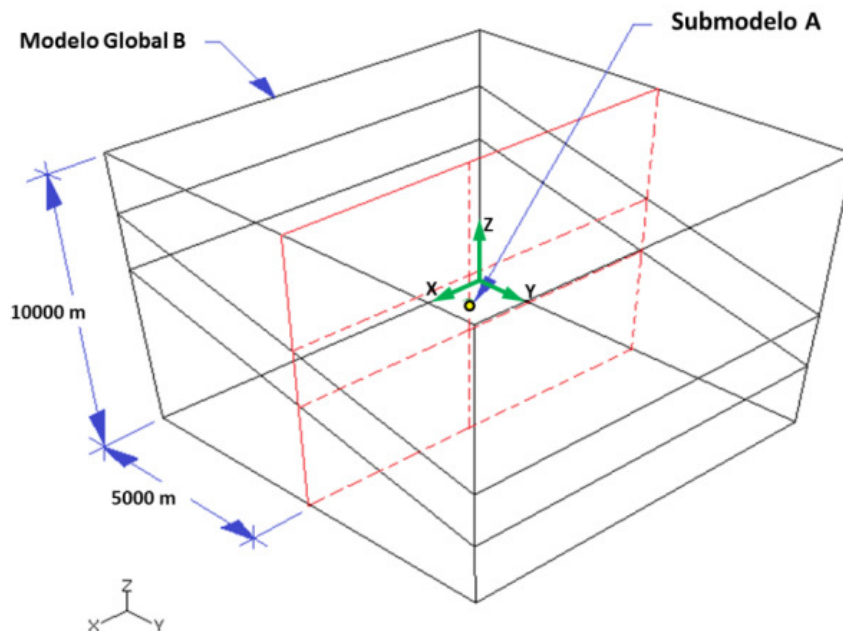


Figura 4.6 – Localização do *Submodelo A* dentro do *Modelo Global B*.

Na Figura 4.7 apresenta-se a geometria e a malha utilizada no *submodelo* anterior.

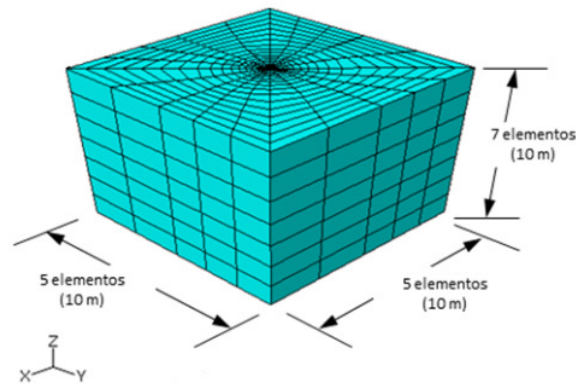


Figura 4.7 – Malha adotada no *Submodelo A*.

Na Tabela 4.3, apresenta-se uma comparação entre as malhas adotadas tanto para o modelo global quanto para o *Submodelo A*. Observa-se que o nível de refinamento utilizado neste *submodelo* é maior com relação ao nível de refinamento adotado no modelo global.

Tabela 4.3 – Comparação do refinamento do *Modelo Global B* x *Submodelo A*.

	Dimensão média do elemento na direção X	Dimensão média do elemento na direção Y	Dimensão média do elemento na direção Z
<i>Modelo Global A</i>	345 m	334 m	334 m
<i>Submodelo A</i>	2 m	2 m	1,43 m

- ***Submodelo B***

Este modelo local abrange a interface Sal-*Underburden* do modelo global na faixa de profundidade entre 5814 e 5824 m a partir do topo do modelo, com uma área de 10 x 10 m². A localização desse modelo local dentro do modelo global é apresentada na Figura 4.8.

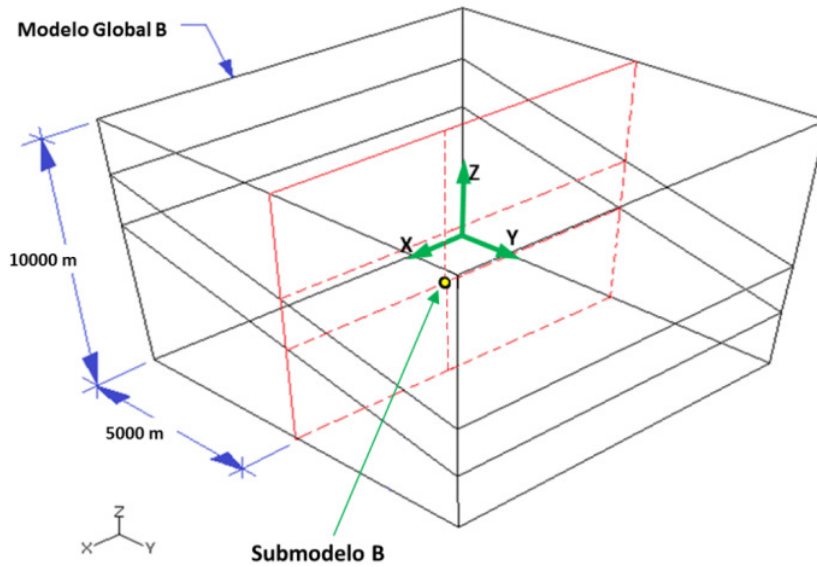


Figura 4.8 – Localização do *Submodelo B* dentro do *Modelo Global B*.

Na Figura 4.9 é apresentada a malha usada no *Submodelo B*.

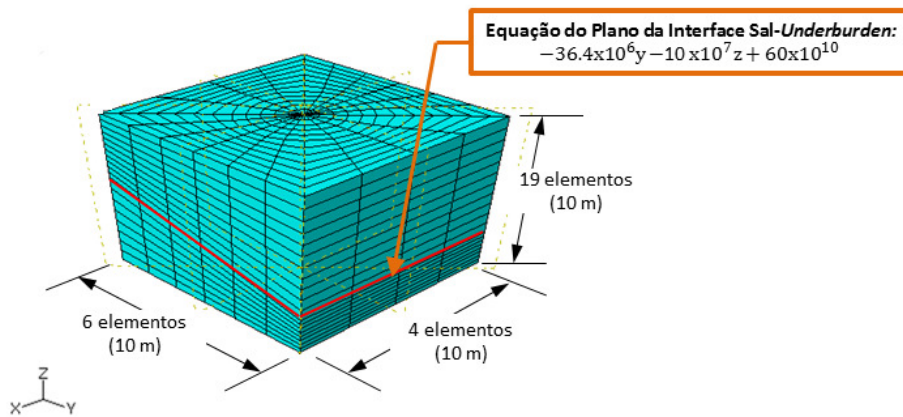


Figura 4.9 – Malha adotada no *Submodelo B*.

A comparação das malhas do modelo global e do *Submodelo B* é apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Comparação do refinamento do *Modelo Global B* x *Submodelo B*.

	Dimensão média do elemento na direção X	Dimensão média do elemento na direção Y	Dimensão média do elemento na direção Z
<i>Modelo Global B</i>	345 m	334 m	334 m
<i>Submodelo B</i>	2,5 m	1,7 m	0,53 m

- **Submodelo C**

O *Submodelo C* foi criado com o propósito de avaliar a distribuição de tensões a uma escala maior com relação à escala considerada nos *Submodelos A e B*, a fim de levar em consideração tanto a zona de sal quanto as zonas de *overburden* e do *underburden* em um mesmo *submodelo*, assim como também estudar o efeito do refinamento da malha do modelo global na exatidão dos resultados obtidos empregando a técnica do *IPD*, especialmente na zona de interface do sal com o seu entorno. Este modelo local inclui as três zonas do *Modelo Global B* na faixa de profundidade entre 1000 m e 9000 m a partir do topo do modelo, com uma área de 1250 x 1250 m².

Cabe destacar que a diferença do tamanho adotado para o *Submodelo C*, os tamanhos dos *Submodelos A e B* são mais adequados para estudos locais de estabilidade de poços e na área de engenharia de reservatórios (como por exemplo, os empregados por Shen *et al.*, 2010a, 2010b, 2010c, 2011b e 2011c), dado que permitem realizar estudos com uma adequada resolução na escala do poço.

A geometria e localização do *Submodelo C* dentro do modelo global são apresentadas na Figura 4.10.

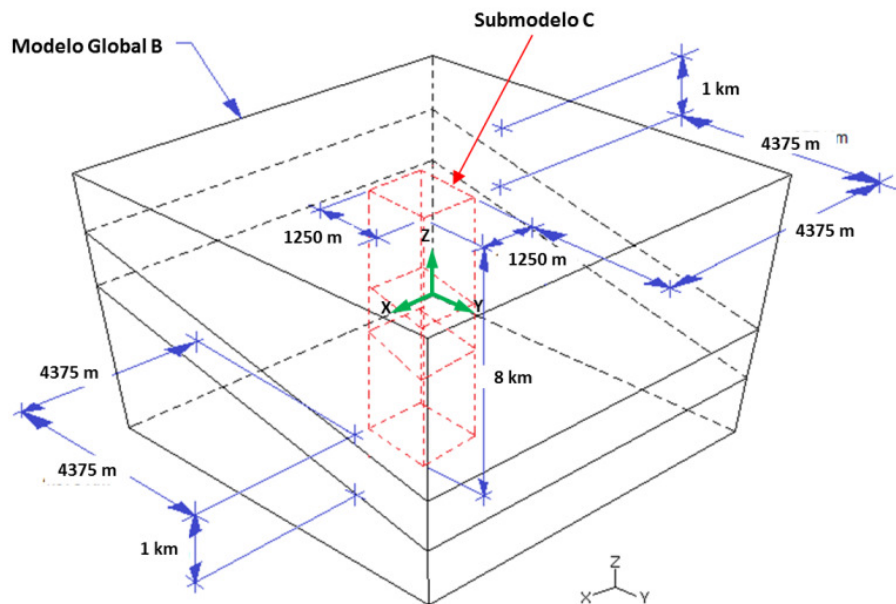


Figura 4.10 – Localização do *Submodelo C* dentro do *Modelo Global B*.

Na Figura 4.11 apresenta-se a malha adotada no submodelo anterior.

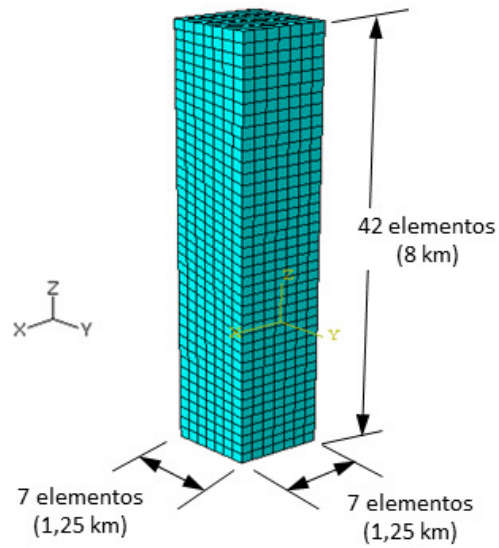


Figura 4.11 – Malha adotada no *Submodelo C*.

Na Tabela 4.5, apresenta-se uma comparação entre o nível de refinamento das malhas adotadas tanto para o modelo global quanto para o *Submodelo C*.

Tabela 4.5 – Comparação do refinamento do *Modelo Global B* x *Submodelo C*.

	Dimensão média do elemento na direção X	Dimensão média do elemento na direção Y	Dimensão média do elemento na direção Z
<i>Modelo Global B</i>	345 m	334 m	334 m
<i>Submodelo C</i>	179 m	179 m	190 m