INSANE

INTERACTIVE STRUCTURAL ANALYSIS ENVIRONMENT

MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO AMBIENTE GRÁFICO DE ANÁLISE DE MODELOS PLANOS

UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROPEEs - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas
DEES - Departamento de Engenharia de Estruturas
INSANE-Lab - Laboratório de Software Livre
INSANE - INteractive Structural ANanlysis Environment

MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO AMBIENTE GRÁFICO DE ANÁLISE DE MODELOS PLANOS

Versão: 19 de setembro de 2016

Sumário

1 Introdução **5**

2 Módulo *Geometria* **6**

Grade/Teclado 7

Controle do fluxo de utilização 7

Recursos de visualização 7

Recursos de desenho 7

Configurações 8

Gerenciamento de arquivos 8

Recursos de seleção 9

Recursos de edição 9

Consulta 10

Coordenadas na área de desenho 10

3 Módulo *Malha* **11**

Mapeamento Transfinito 12

Geração Nodal Aleatória 14

Malha com base em Ponto 14

Malha com base em Linha 16

Malha Assimétrica Concentrada 17

Malha com base em Grade 19

Refinamento Local da Malha 20

Controle do fluxo de utilização 21

4 Módulo *Atributos* **23**

Definição do modelo constitutivo 24

Criação de materiais 25

Criação de degenerações 26

Criação de funções de enriquecimento nodal de MEFG 27

Criação de descontinuidades (entalhes), simuladas pelo MEFG 28
Criação de combinações de carregamentos 29
Criação de casos de carregamento 30
Aplicação de cargas nodais 31
Aplicação de cargas concentradas em arestas 31
Aplicação de cargas lineares em arestas 33
Aplicação de cargas de área 34
Atribuição de restrições aos deslocamentos nodais 35
Atribuição de rigidezes de mola aos nós 35
Atribuição de pré-deslocamentos aos nós 36
Atribuição de funções de enriquecimento aos nós 36
Atribuição de degenerações aos elementos 38
Solução do modelo 38

5 Pós-Processador 39

Isofaixas de valores suavizados 40
Isofaixas de valores não suavizados 40
Visualização da deformada 40
Escala 41
Gráficos 41
Informações 41
Controle de passos 41
Recursos de visualização 41
Recursos de seleção 41
Recursos de visibilidade 41

6 Exemplos 42

Exemplo 1: Painel em “L” 43
Exemplo 2: Chapa com Trincas em Modo I de Abertura 48
Exemplo 3: Barragem Submetida à Carga Hidrostática 54

Exemplo 4: Viga Pré-tensionada sob Flexão 59
Exemplo 5: Viga com Pré-trinca sob Flexão 64
Exemplo 6: Placa Anular com Carga na Borda Interna 71

1 Introdução

Este manual apresenta o ambiente gráfico de análise de modelos planos do sistema INSANE. A entrada neste ambiente é realizada através do diálogo inicial do sistema, apresentado na Figura 1. Este diálogo disponibiliza os recursos de uso do sistema. No estágio atual, tem-se as opções para análise de modelos reticulados, planos e pré-definidos via sistema gráfico integrado, a opção para análise de modelos reticulados, planos e sólidos via arquivo XML, as opções para visualização gráfica dos resultados e a opção para determinação de propriedades de seções transversais.

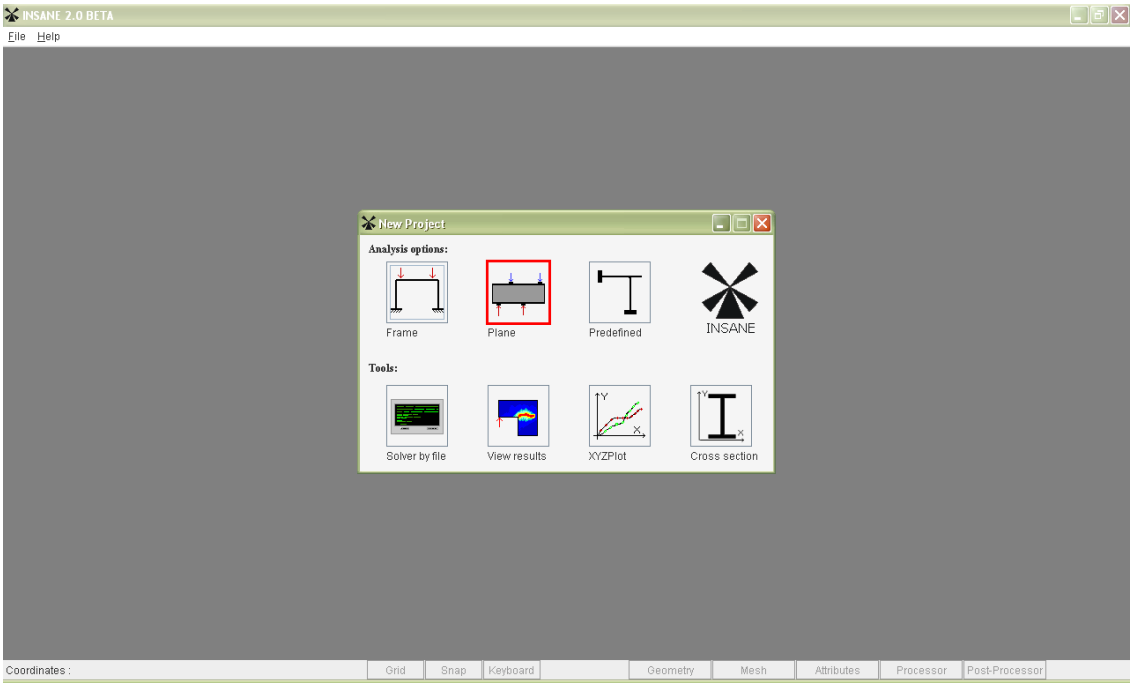

Figura 1: Diálogo inicial do sistema INSANE.

Na Figura 1, destaca-se a entrada no ambiente gráfico de análise de modelos planos. Neste ambiente, permitem-se os seguintes tipos de análise estática:

- Linear com carregamento no plano pelo MEF e MEFG;
- Fisicamente não linear com carregamento no plano pelo MEF e MEFG;
- Linear com carregamento normal ao plano (placas) pelo MEF.

Ao se entrar no ambiente gráfico, define-se o diretório para armazenamento dos dados do modelo. Na sequência, abre-se automaticamente o primeiro módulo componente do pré-processador gráfico.

O pré-processador gráfico foi dividido em três módulos, a saber: Módulo *Geometria*, Módulo *Malha* e Módulo *Atributos*. Esta modularização permite, por exemplo, a definição de várias malhas diferentes para um mesmo modelo geométrico, bem como analisar um modelo já discretizado com diferentes elementos finitos. Estes módulos são apresentados a seguir, segundo a organização do programa.

2 Módulo *Geometria*

O Módulo *Geometria*, apresentado na Figura 2, é o módulo inicial do pré-processador gráfico. Este módulo é composto por recursos para desenho, seleção e visualização de entidades geométricas. Conforme definição, neste módulo, desenha-se a geometria da estrutura em análise.

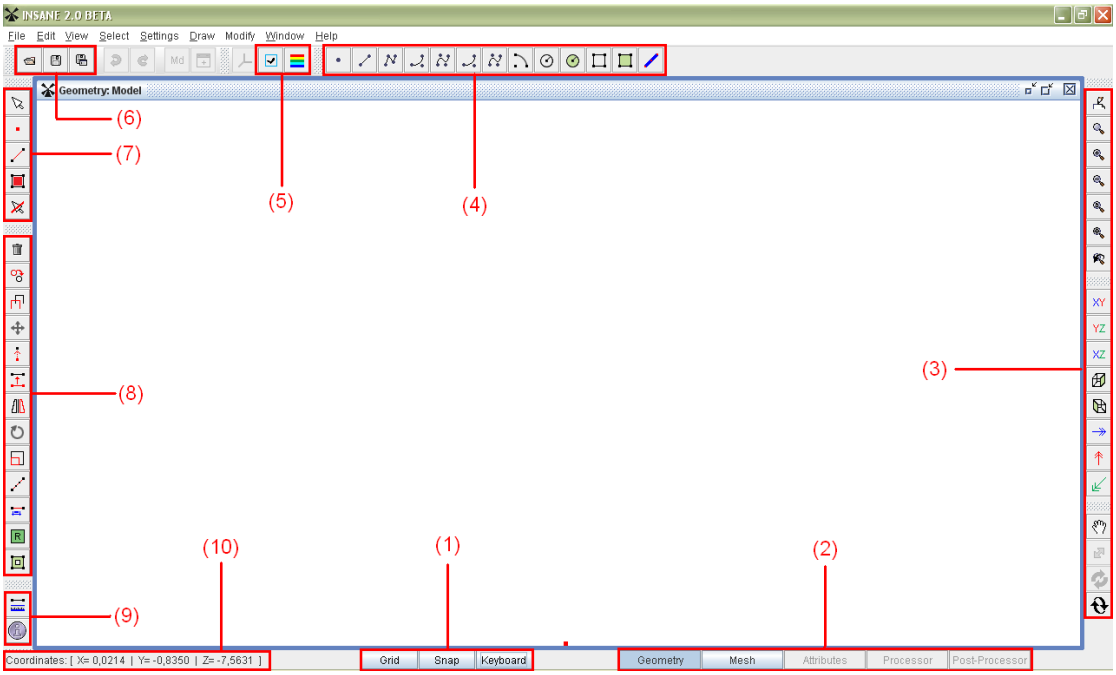

Figura 2: Pré-processador gráfico interativo: Módulo *Geometria*.

Na Figura 2, destacam-se os principais recursos deste módulo, apresentados a seguir.

(1) Grade/Teclado

Disponibiliza os seguintes recursos:

- **Grid**: Ativa a grade na área de desenho. As dimensões da grade podem ser alteradas no menu *Settings*, item *Grid*.
- **Snap**: Ativa a opção pela seleção de pontos apenas nas interseções da grade.
- **Keyboard**: Ativa a entrada gráfica pelo teclado.

(2) Controle do fluxo de utilização

Barra de status do fluxo de utilização. Esta barra destaca o módulo corrente (*Geometria*), bem como o botão de fluxo acionável (*Malha*) que encapsula o comando responsável por disparar a passagem para o próximo módulo.

(3) Recursos de visualização

Nesta barra, disponibilizam-se recursos de visualização, tais como zoom, mudança do plano de visualização e rotação da perspectiva. Estes recursos são também disponibilizados no menu *View*.

(4) Recursos de desenho

Nesta barra, disponibilizam-se recursos para geração de primitivas geométricas:

Point: Cria um vértice a partir de suas coordenadas.

Line: Cria uma aresta reta a partir de seus vértices.

Polyline: Cria arestas retas em sequência, sendo o vértice final de uma aresta o inicial da seguinte.

Quadratic curve: Cria uma aresta com curva quadrática do tipo *spline* a partir de seus vértices de início e fim e um vértice de controle.

Cubic curve: Cria uma aresta com curva cúbica do tipo *spline* a partir de seus vértices de início e fim e dois vértices de controle.

L3 curve: Cria uma aresta com curva quadrática a partir de três pontos.

L4 curve: Cria uma aresta com curva cúbica a partir de quatro pontos.

Arc: Cria um arco de circunferência a partir de seu centro e seus vértices de início e fim, definidos no sentido anti-horário.

Circle: Cria uma circunferência a partir de seu centro e seu raio.

Circular region: Cria uma região circular a partir de seu centro e seu raio..

Rectangle: Cria um retângulo a partir de dois vértices opostos.

Rectangular region: Cria uma região retangular a partir de dois vértices opostos.

Group: Transforma em uma aresta duas ou mais arestas selecionadas que possuem continuidade.

Estes recursos são também disponibilizados no menu *Draw*, acompanhados de seus atalhos de teclado.

(5) Configurações

Recursos para configuração dos parâmetros de visualização, tais como visibilidade e cores de objetos. Estes recursos são também disponibilizados no menu *Settings*.

(6) Gerenciamento de arquivos

Recursos para salvar e carregar arquivos, também disponibilizados no menu *File*.

(7) Recursos de seleção

Nesta barra, disponibilizam-se recursos para seleção de entidades geométricas:

Select: Recurso para seleção de objetos a partir da seleção na área de desenho ou pelo identificador, se ativado o recurso *Keyboard*.

Select only Vertex: Recurso para seleção de vértices a partir da seleção na área de desenho ou pelo identificador, se ativado o recurso *Keyboard*.

Select only Edge: Recurso para seleção de arestas a partir da seleção na área de desenho ou pelo identificador, se ativado o recurso *Keyboard*.

Select only Face: Recurso para seleção de faces a partir da seleção na área de desenho ou pelo identificador, se ativado o recurso *Keyboard*.

Remove selection: Recurso para remoção da seleção de todos os objetos selecionados.

No menu *Select*, complementam-se estes recursos com outras opções de seleção, tais como seleção por janela, seleção de todos os vértices, arestas e faces e seleção de todos os objetos.

(8) Recursos de edição

Nesta barra, disponibilizam-se recursos para edição de entidades geométricas:

Erase: Deleta objetos selecionados ou, no caso de nenhum selecionado, abre diálogo para deletar objetos pelo seu identificador ou deletar todos os objetos.

Copy: Copia objetos selecionados. Os novos objetos são dispostos a partir de um ponto de base e um ponto final.

Copy in 3D: Copia objetos selecionados definindo-se o número de cópias, a direção de disposição e o espaçamento entre os objetos.

Move: Move objetos selecionados definindo-se um ponto de base e um ponto final.

Move vertex: Move vértices selecionados definindo-se a translação.

Move edge: Move arestas selecionadas definindo-se a translação.

Reflexion: Cria cópias espelhadas de objetos selecionados definindo-se o plano de espelhamento.

Rotation: Rotaciona objetos selecionados, ou cria cópias rotacionadas, definindo-se o eixo de rotação e o giro.

Scale: Muda a dimensão de objetos selecionados definindo-se um fator.

Divide in N parts: Divide a aresta selecionada em N arestas retas de tamanhos iguais.

Break at indicated position: Divide a aresta reta selecionada em duas definindo-se o ponto de divisão.

Make region: Cria uma face a partir de arestas selecionadas.

Insert rectangular hole: Cria um furo retangular na face selecionada definindo-se dois vértices opostos que o definem.

No menu *Modify*, complementam-se estes recursos com outras opções de edição, tais como *Insert circular hole* e *Insert polygonal hole*.

(9) Consulta

Recursos para obtenção de informações do modelo e de suas entidades geométricas.

(10) Coordenadas na área de desenho

Apresenta as coordenadas do cursor.

Com a geometria definida, segue-se para o Módulo *Malha*. Este fluxo pode ocorrer para o número de malhas que o analista quiser processar, cumulando janelas deste módulo.

3 Módulo *Malha*

O Módulo *Malha*, apresentado na Figura 3, é composto, além dos recursos para seleção, edição e visualização, por recursos para geração de malhas. Conforme definição, neste módulo, discretiza-se a geometria do modelo em análise. No estágio atual do sistema, são permitidas as seguintes técnicas de geração de malhas: Mapeamento Transfinito, Geração Nodal Aleatória, Malha com base em Ponto, Malha com base em Linha, Malha com base em Grade e Malha Assimétrica Concentrada. A primeira é uma técnica de mapeamento da fronteira, enquanto as demais são técnicas de decomposição de domínio.

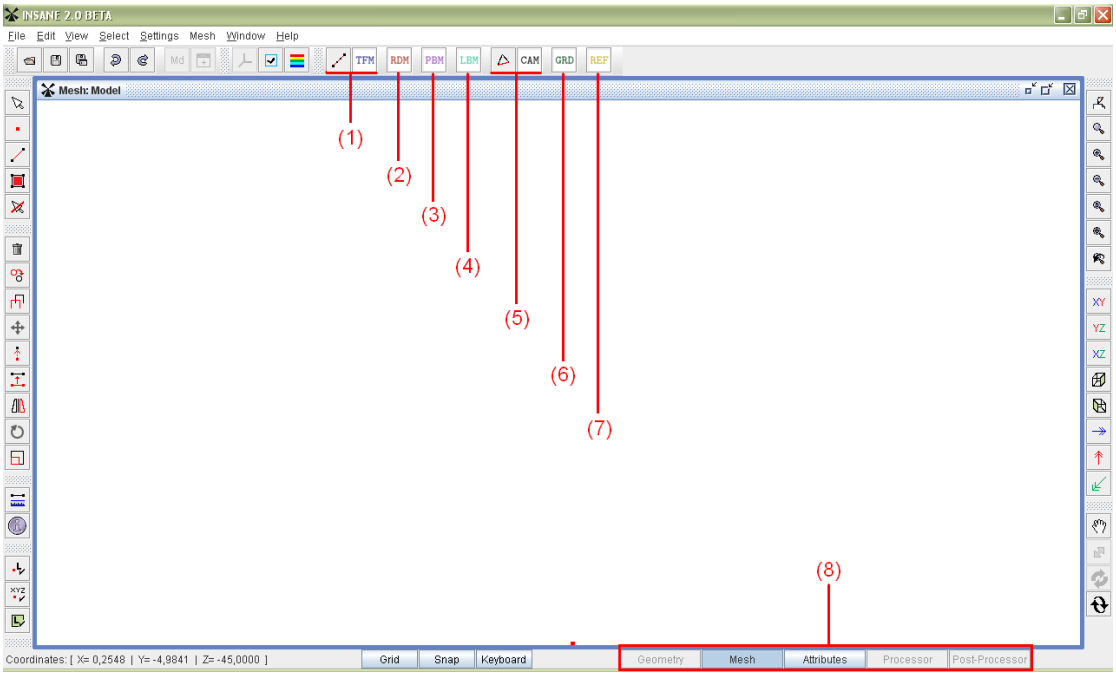

Figura 3: Pré-processador gráfico interativo: Módulo *Malha*.

Os recursos para seleção e edição estão disponibilizados na barra de ferramentas lateral esquerda, ao passo que, os recursos para visualização estão disponibilizados na barra de ferramentas lateral direita.

Na barra de ferramentas superior, disponibilizam-se os recursos para geração de malhas, cujas funcionalidades são apresentadas a seguir. Estes recursos estão destacados na Figura 3.

(1) TFM Mapeamento Transfinito

No caso de Mapeamento Transfinito, o processo de discretização é realizado definindo-se o número de divisões de determinadas arestas. Visando atender ao critério da continuidade inerente ao método discreto, o programa se encarrega da propagação das divisões necessárias para as demais arestas do modelo geométrico.

Este processo de discretização é ilustrado nas Figuras 4 e 5, para o caso de uma estrutura composta por um quadrado de dimensão unitária e um triângulo equilátero. Com as arestas 1 e 2 selecionadas, acionou-se o botão destacado na Figura 4, abrindo-se o diálogo para definição do número de divisões destas arestas. Após o aceite, os pontos que delimitam as divisões das arestas ficam em destaque para visualização.

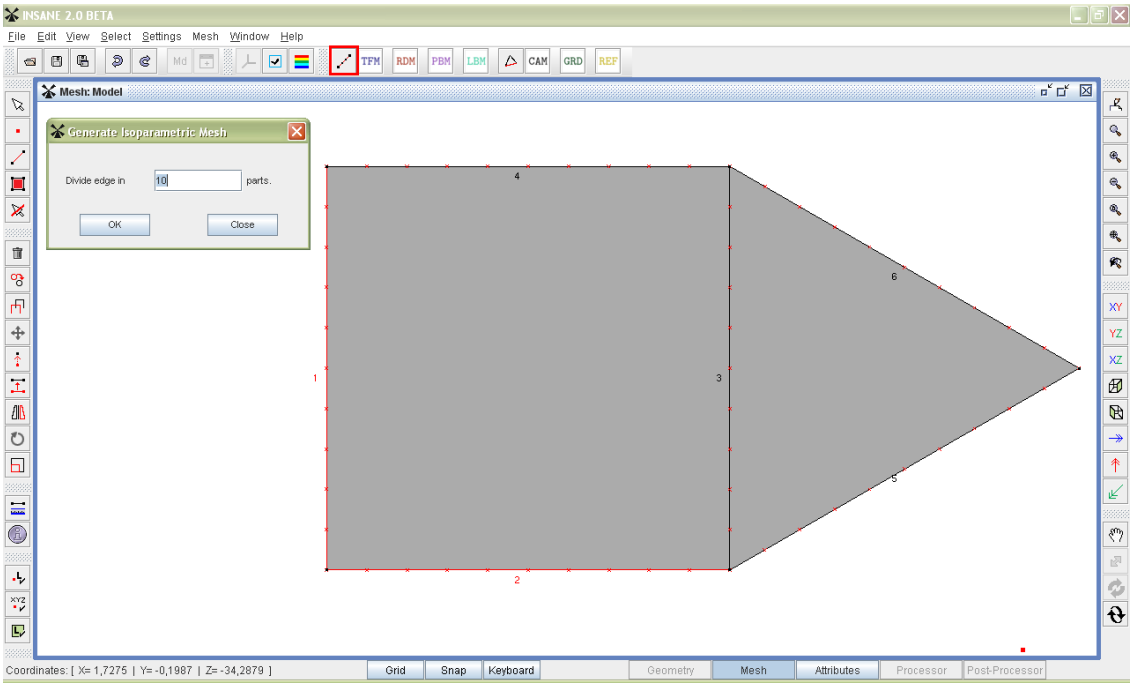

Figura 4: Mapeamento Transfinito: Divisão das arestas.

Nesta etapa, a discretização ainda não ocorreu, podendo-se modificar as divisões das arestas. Quando as divisões estiverem satisfatórias, aciona-se o botão de discretização destacado na Figura 5 para geração da malha.

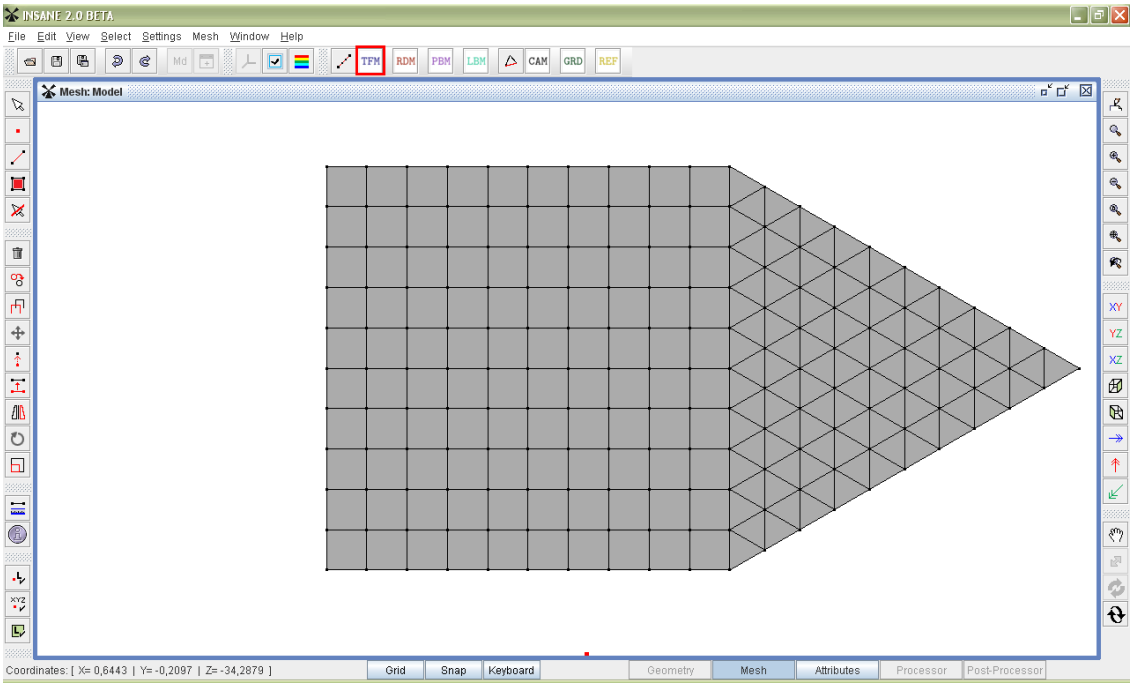

Figura 5: Mapeamento Transfinito: Discretização.

Observa-se nas Figuras 4 e 5 que, apesar de definidos somente o número de divisões das arestas 1 e 2, as demais arestas também foram divididas tal que a malha gerada fosse conforme.

Como ilustrado na Figura 5, regiões triangulares geram elementos triangulares, ao passo que regiões quadrilaterais geram elementos quadrilaterais.

Da forma como foi implementada, esta técnica de discretização é restrita às estruturas cuja geometria possa ser decomposta em regiões delimitadas por três ou quatro arestas. A partir desta restrição, destaca-se o recurso *Group* disponibilizado no módulo *Geometria*, que permite transformar em uma aresta duas ou mais arestas selecionadas, não obrigatoriamente colineares, que possuam continuidade.

As técnicas de decomposição de domínio implementadas são alternativas para o caso de estruturas com geometrias mais complexas.

(2) RDM Geração Nodal Aleatória

No caso de Geração Nodal Aleatória, o processo de discretização é realizado definindo-se a dimensão média dos elementos. Na Figura 6, ilustra-se este processo de discretização para o caso de uma estrutura com geometria em "L" de lado unitário. Acionando-se o botão destacado na Figura 6, abre-se o diálogo para definição da dimensão média dos elementos. Após o aceite, a malha é gerada.

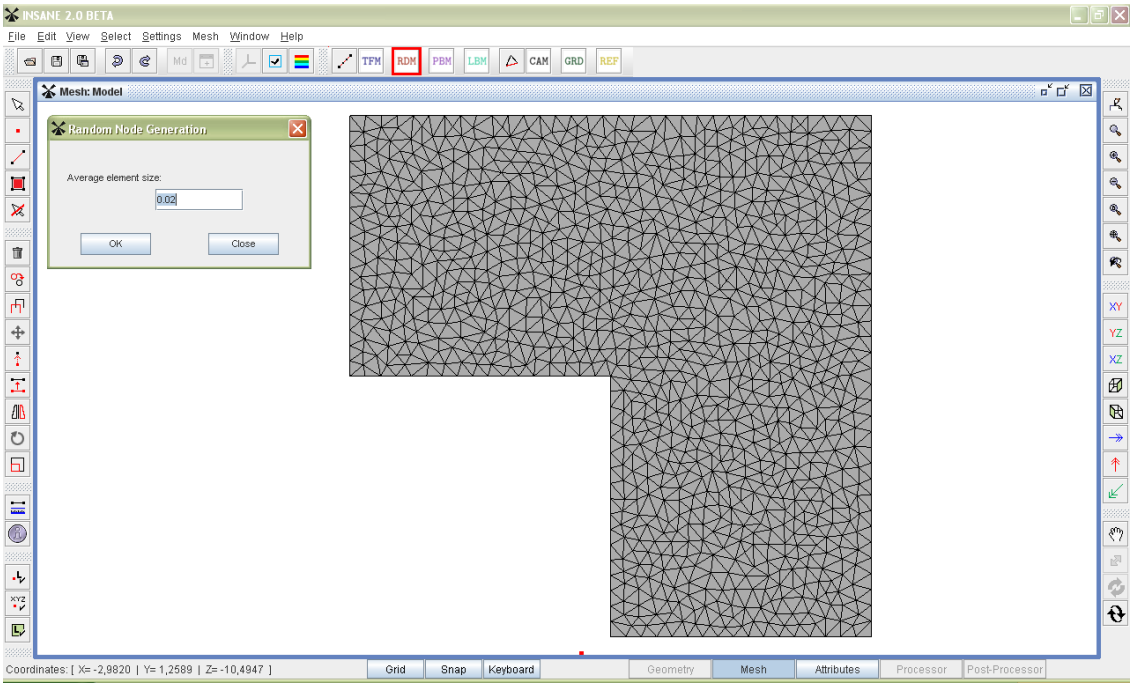

Figura 6: Geração Nodal Aleatória: Discretização.

(3) PBM Malha com base em Ponto

No caso da Malha com base em Ponto, o processo de discretização é realizado definindo-se, além da dimensão média dos elementos, um refinamento local a partir de um ponto de referência. Nas Figuras 7 e 8, ilustra-se este processo de discretização para o caso de uma estrutura com geometria definida por um quarto de círculo de raio unitário. Com o nó 1 selecionado, acionou-se o botão destacado na Figura 7, abrindo-se o diálogo para definição da dimensão média dos elementos fora da região de refinamento, o alcance do refinamento (a partir do ponto selecionado), a taxa de refinamento e o nível de suavização para conformação da malha.

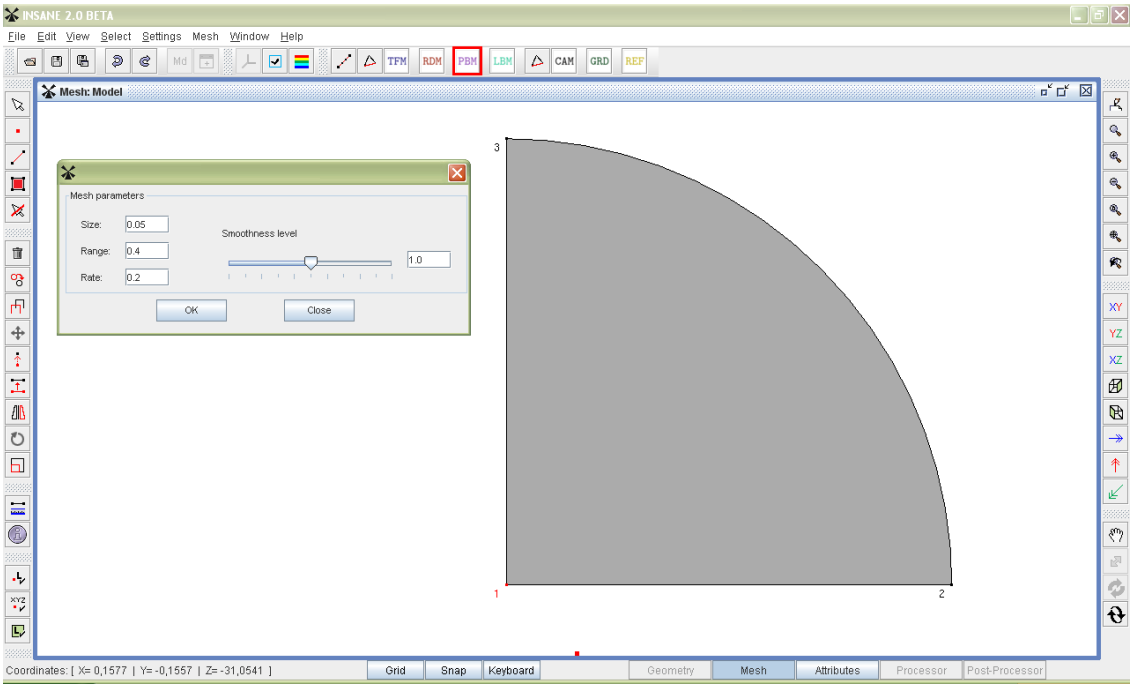

Figura 7: Malha com base em Ponto: Definições.

Por fim, acionou-se o botão de aceite para geração da malha com maior densidade no entorno do ponto de referência, conforme ilustrado na Figura 8.

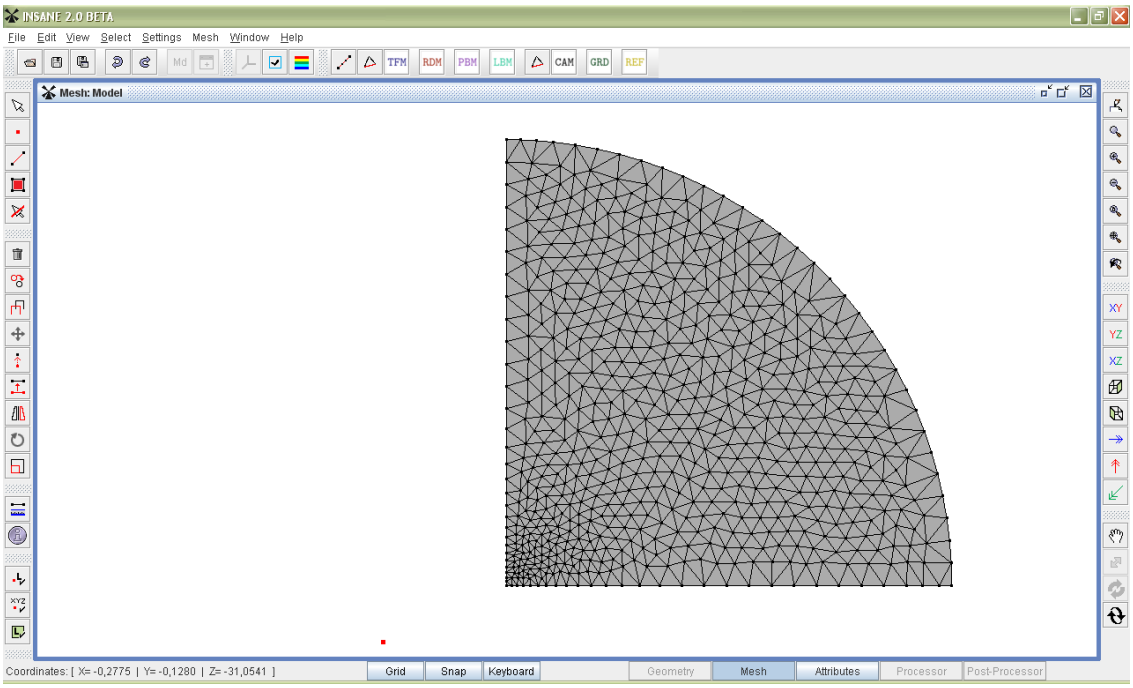

Figura 8: Malha com base em Ponto: Discretização.

(4) LBM Malha com base em Linha

No caso da Malha com base em Linha, o processo de discretização é análogo ao da Malha com base em Ponto, porém, define-se um refinamento local a partir de uma aresta de referência. Nas Figuras 9 e 10, ilustra-se este processo de discretização para o caso de uma estrutura com geometria definida por um quarto de círculo de raio unitário, mesmo caso ilustrado em Malha com base em Ponto. Com a aresta 1 selecionada, acionou-se o botão destacado na Figura 9, abrindo-se o diálogo para definição da dimensão média dos elementos fora da região de refinamento, o alcance do refinamento (a partir da aresta selecionada), a taxa de refinamento e o nível de suavização para conformação da malha.

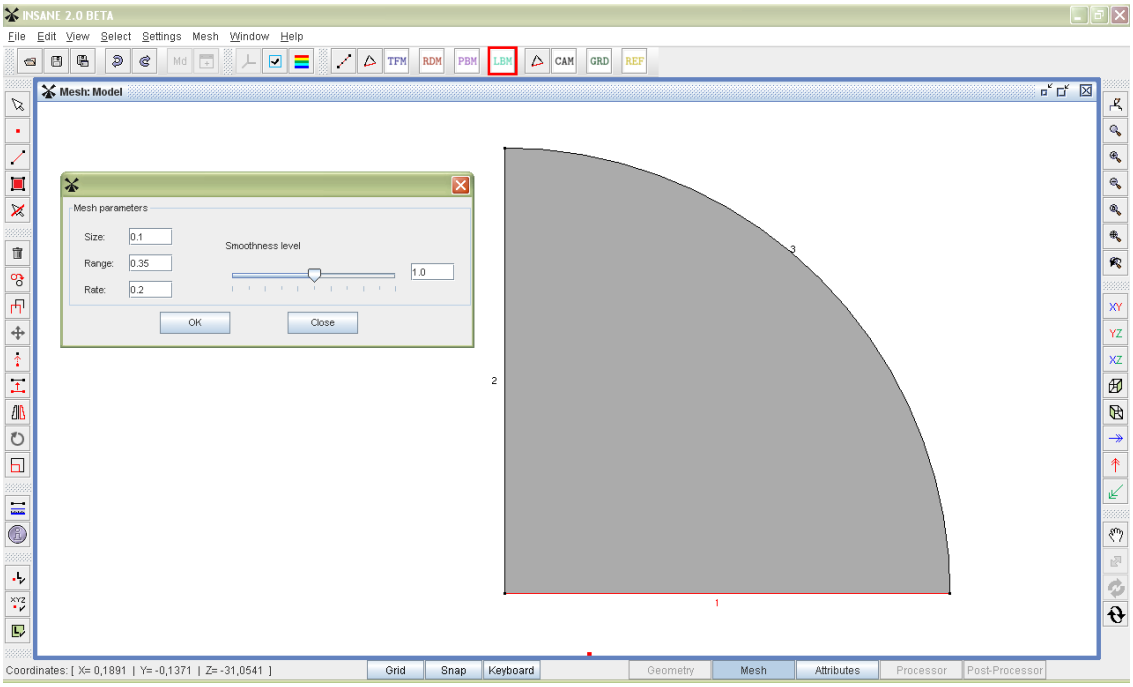

Figura 9: Malha com base em Linha: Definições.

Por fim, acionou-se o botão de aceite para geração da malha com maior densidade no entorno da aresta de referência, conforme ilustrado na Figura 10.

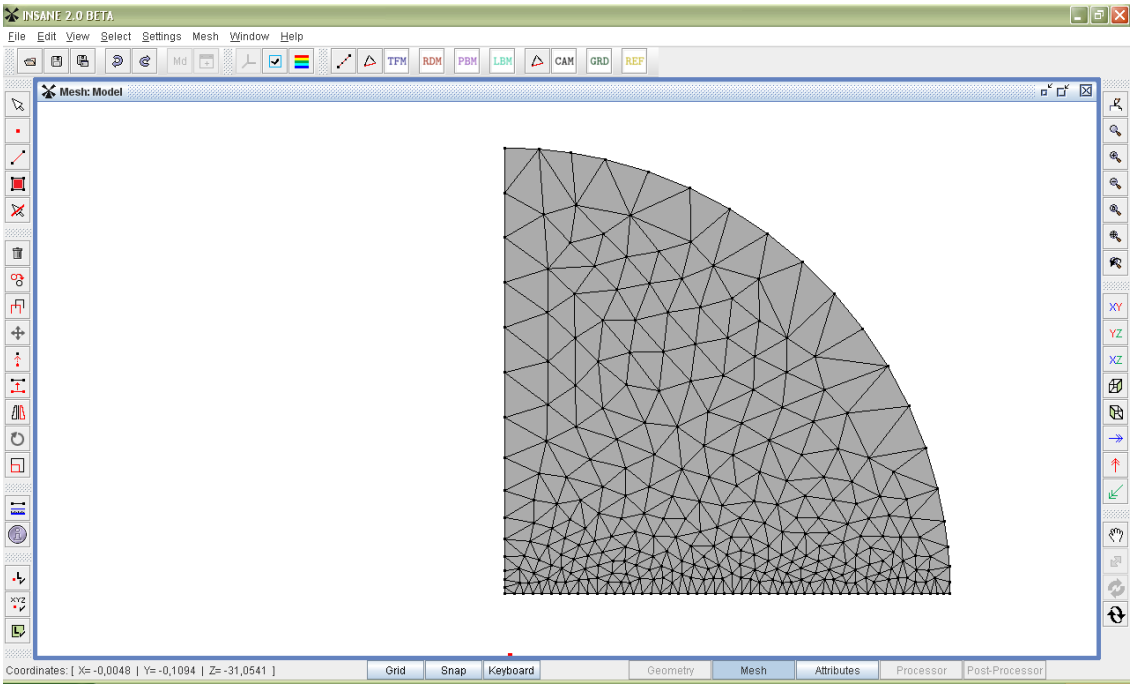

Figura 10: Malha com base em Linha: Discretização.

(5) CAM Malha Assimétrica Concentrada

No caso de Malha Assimétrica Concentrada, o processo de discretização é realizado definindo-se a dimensão média dos elementos no entorno dos nós, permitindo-se um controle da concentração da malha. Este processo de discretização é ilustrado nas Figuras 11 e 12, para o caso de uma estrutura vazada com geometria em "L" de lado unitário. Com o nó 1 selecionado, acionou-se o botão destacado na Figura 11, abrindo-se o diálogo para definição da dimensão média dos elementos no entorno deste nó.

Na sequência, repetiu-se este procedimento para os nós 2 ao 6, definindo-se a dimensão média dos elementos no entorno destes nós como sendo 5 vezes maior do que daqueles no entorno do nó 1.

Por fim, acionou-se o botão de discretização destacado na Figura 12 para definição do algoritmo gerador entre as opções exponencial e polinomial, além do nível de suavização no caso do algoritmo gerador polinomial. Após o aceite, a malha é gerada.

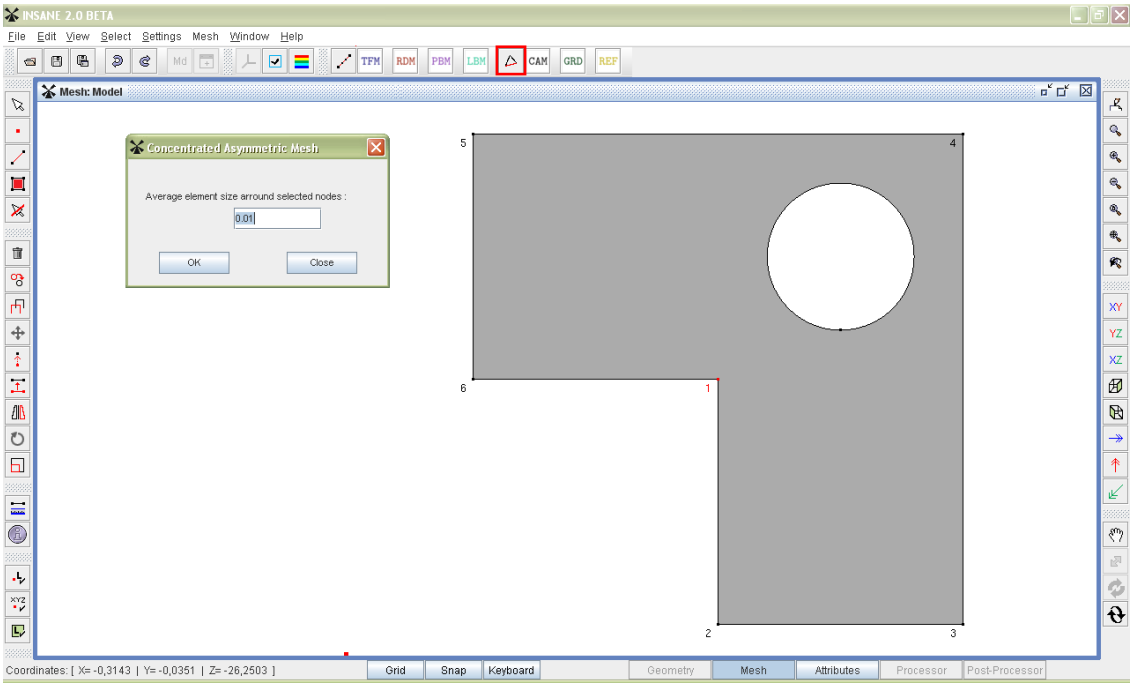

Figura 11: Definição da dimensão média dos elementos no entorno do nó 1.

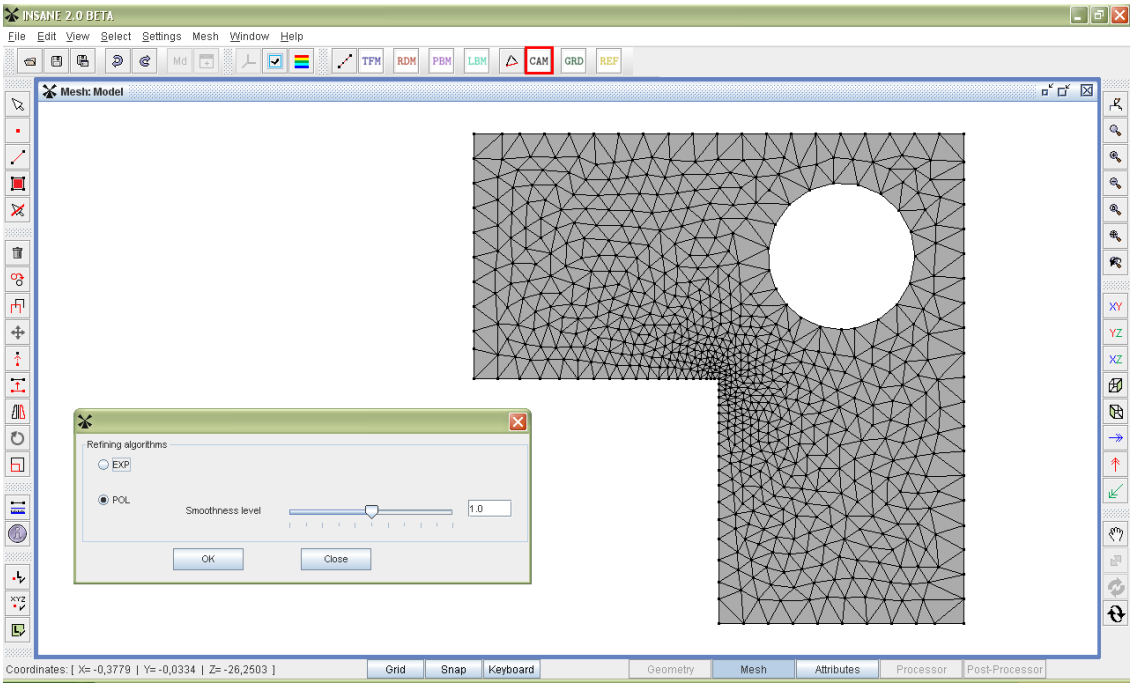

Figura 12: Discretização com concentração de malha.

(6) GRD Malha com base em Grade

No caso de Malha com base em Grade, o processo de discretização é análogo ao da Geração Nodal Aleatória, porém, os nós não são gerados de forma aleatória, mas sim segundo um *grid* pré-definido. Fundamentalmente, a Geração Nodal Aleatória e a Malha com base em Grade se distinguem pelo algoritmo gerador da malha e, consequentemente, pela malha gerada. No caso de Malha com base em Grade, tem-se as opções de algoritmo gerador quadrilateral e hexagonal. Destaca-se que a discretização pela Malha com base em Grade gera sempre a mesma malha para um dado modelo geométrico, dimensão média dos elementos e algoritmo gerador, o que não é verdade para o caso de Geração Nodal Aleatória. Na Figura 13, ilustra-se o processo de discretização pela Malha com base em Grade para o caso de uma estrutura vazada com geometria hexagonal de lado unitário. Acionando-se o botão destacado na Figura 13, abrem-se o diálogo para definição da dimensão média dos elementos e, na sequência, o diálogo para definição do algoritmo gerador. Após o aceite, a malha é gerada.

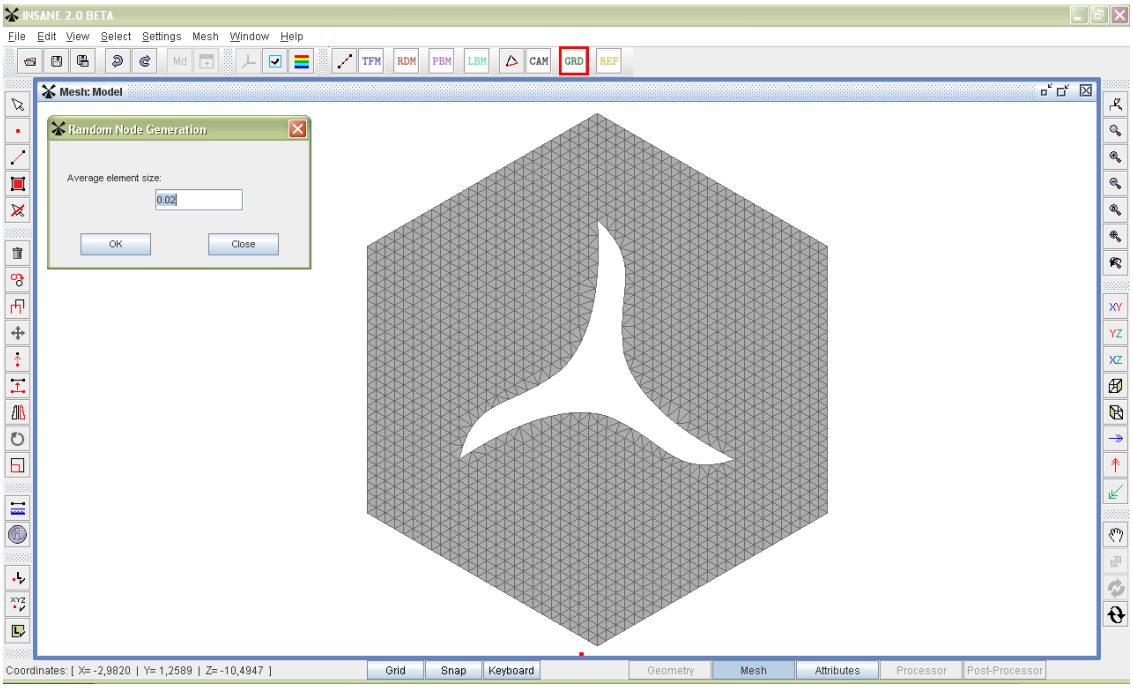

Figura 13: Malha com base em Grade: Discretização.

Conforme ilustrado nas Figuras 6, 8, 10, 12 e 13, independentemente da geometria da estrutura, as técnicas de decomposição de domínio implementadas geram elementos triangulares. Destaca-se que, diferentemente do Mapeamento Transfinito, estas técnicas não se restringem à discretização de geometrias decompostas em regiões delimitadas por três ou quatro arestas.

(7) REF Refinamento Local da Malha

Um recurso útil, comum às técnicas de geração de malhas apresentadas, é o de refinamento local da malha. Este recurso permite o aumento da densidade de malha em regiões de interesse. O processo de refinamento local é realizado estabelecendo-se a região de interesse a partir de um caminho definido por seleção de nós. Este processo é ilustrado na Figura 14, para o caso de modelagem do ensaio de cisalhamento em quatro pontos. Objetivou-se uma maior densidade de malha na região preferencial de fissuração.

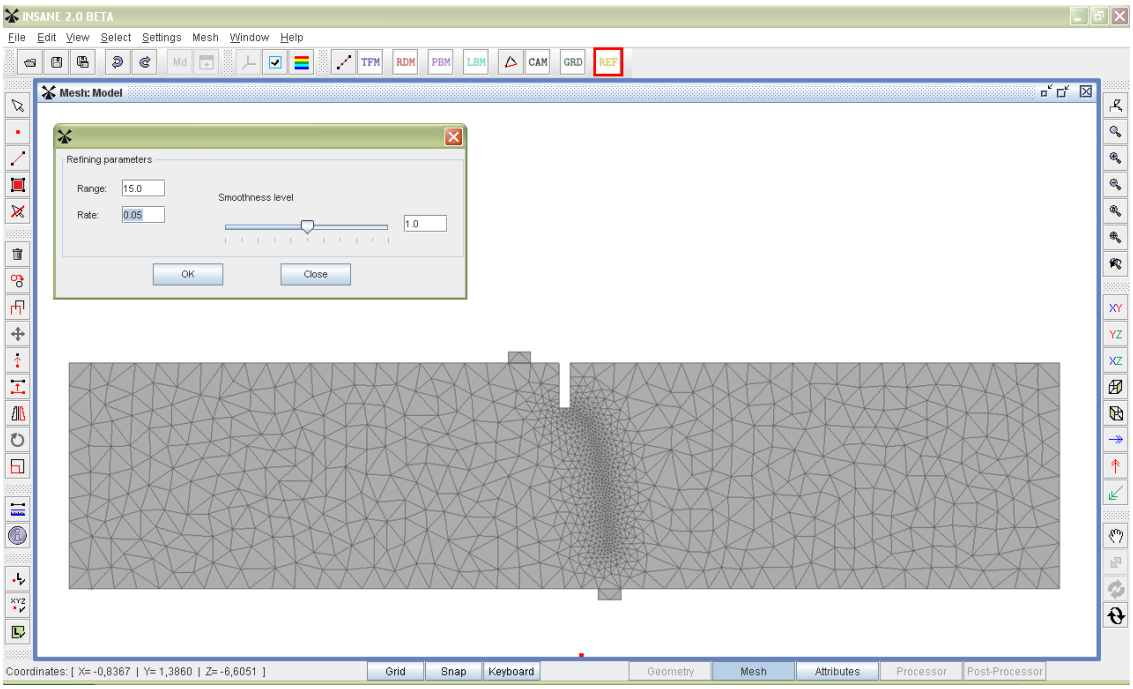

Figura 14: Refinamento local da malha.

Com o caminho definido pelos nós selecionados, acionou-se o botão destacado na Figura 14, abrindo-se o diálogo para definição da largura da região de refinamento local da malha, da dimensão média dos elementos nesta região, definida em relação à daqueles antes do refinamento local, e o nível de suavização para conformação da malha. Após o aceite, o refinamento local é gerado.

Destaca-se que, independentemente da geometria dos elementos antes do refinamento local, este processo gera elementos triangulares na região refinada.

(8) Controle do fluxo de utilização

Analogamente ao Módulo *Geometria*, a barra de status destaca o módulo corrente (*Malha*), bem como o botão de fluxo acionável (*Atributos*) que encapsula o comando responsável por disparar a passagem para o próximo módulo. Definida a discretização, segue-se para o Módulo *Atributos*. Ao se acionar o botão de passagem para este módulo, abre-se o diálogo para especialização da análise, ilustrado na Figura 15.

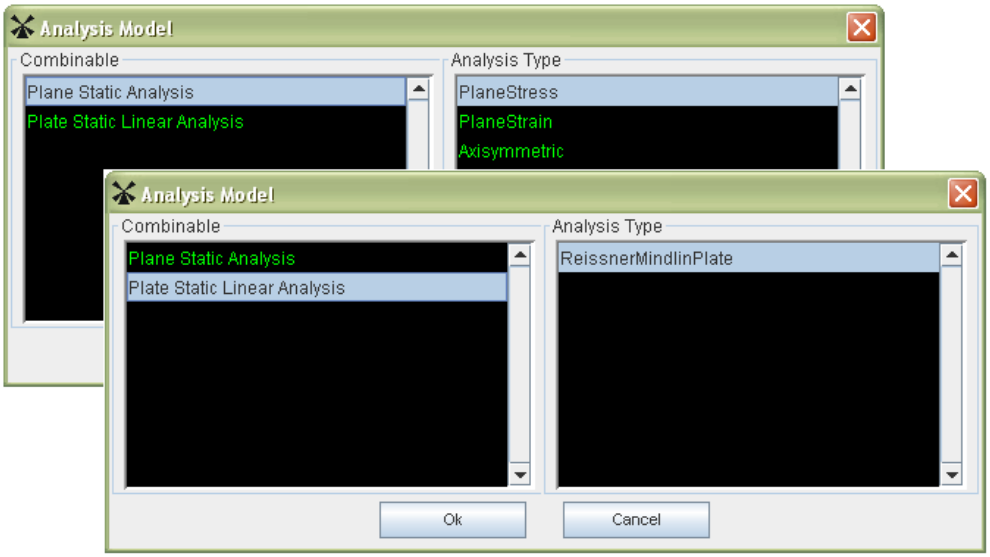

Figura 15: Diálogo de especialização da análise.

No caso de análise plana, opta-se entre análise estática com carregamento no plano, com as opções de análise em *Estado Plano de Tensão*, *Estado Plano de Deformação* e *Sólido Axissimétrico*, e análise estática linear com carregamento normal ao plano (placas), condicionada à teoria de *Placas de Reissner Mindlin*.

A opção *PlaneStaticAnalysis* disponibiliza recursos e comandos para análise pelo MEF ou pelo MEFG de problemas planos estáticos lineares ou fisicamente não lineares com carregamento no plano, ao passo que a opção *PlateStaticLinearAnalysis* disponibiliza recursos e comandos para análise pelo MEF de problemas planos estáticos lineares com carregamento normal ao plano (placas).

Após especialização da análise, abre-se o diálogo para definição dos elementos finitos a se adotar. No estágio atual do sistema, são permitidos $T3$, $T6$ e $T10$, aplicáveis às faces triangulares, e $Q4$, $Q8$, $Q9$, $Q12$ e $Q16$, aplicáveis às faces quadrilaterais. Destaca-se que face triangular compõe elemento finito triangular, ao passo que face quadrilateral compõe elemento finito quadrilateral. Logo, as possíveis combinações de elementos finitos, tal como ofertadas no diálogo apresentado na Figura 16, são condicionadas à existência de faces triangulares e quadrilaterais na malha. Estas combinações são definidas pelo programa respeitando o critério da continuidade inerente ao método discreto.

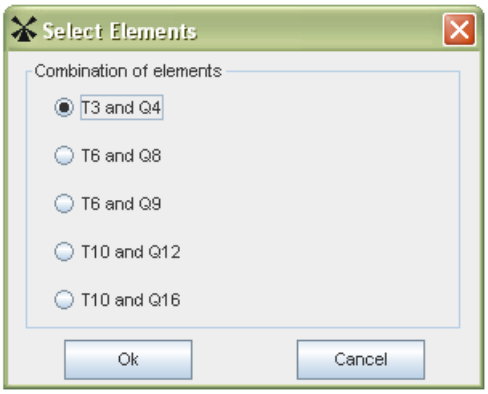

Figura 16: Diálogo de definição dos elementos finitos.

Definidos os elementos finitos, abre-se o Módulo *Atributos*. Este fluxo pode ocorrer para o número de vezes de interesse do analista, cumulando janelas deste módulo.

4 Módulo *Atributos*

O Módulo *Atributos*, apresentado na Figura 17, é composto, além dos recursos para seleção e visualização, por recursos para definição dos atributos do modelo. Neste módulo, definem-se o modelo constitutivo, os materiais, as degenerações e as condições de contorno, além de outros atributos opcionais. Quanto aos tipos de carga, permitem-se cargas nodais, cargas concentradas e linearmente distribuídas em qualquer posição das arestas dos elementos e cargas de área constantes em toda a face dos elementos.

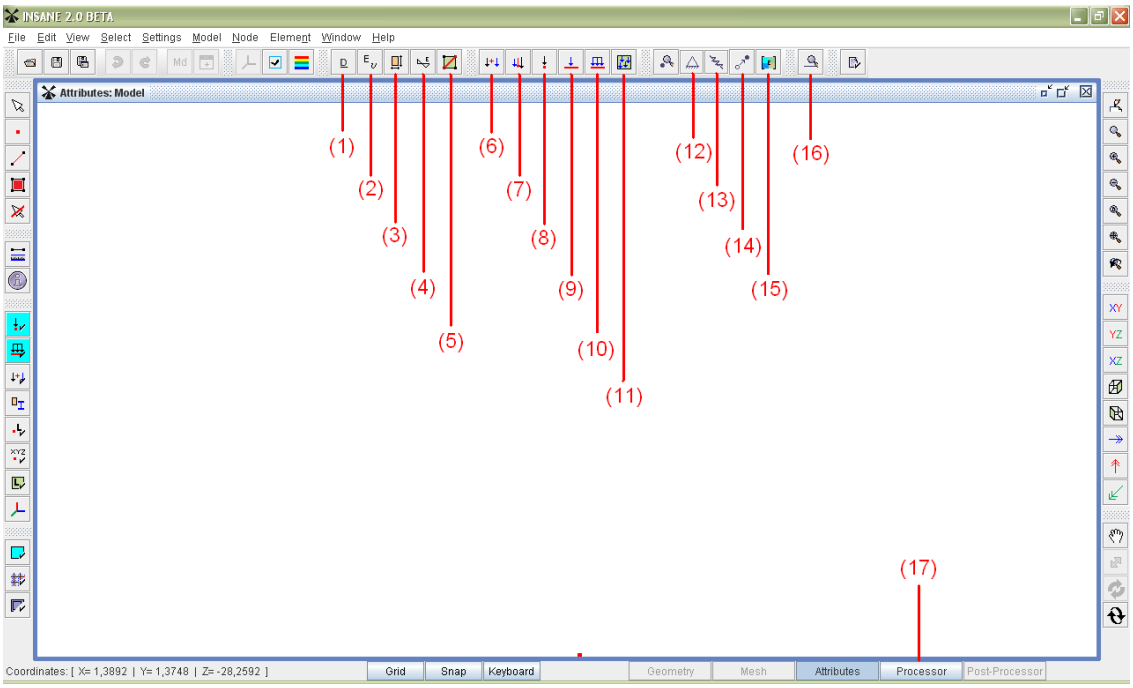

Figura 17: Pré-processador gráfico interativo: Módulo *Atributos*.

Os recursos para seleção estão disponibilizados na barra de ferramentas lateral esquerda, onde se encontram também recursos para configurar a visibilidade de parâmetros do modelo, tais como coordenadas nodais e identificadores dos nós e dos elementos, ao passo que, os recursos para visualização estão disponibilizados na barra de ferramentas lateral direita. Na barra de ferramentas superior, disponibilizam-se os recursos para definição dos atributos do modelo, cujos principais são apresentados a seguir, conforme destacados na Figura 17.

(1) ◻ Definição do modelo constitutivo

Para a opção de análise com carregamento no plano, define-se o modelo constitutivo dentre diversas opções disponibilizadas, permitindo-se análises lineares e fisicamente não lineares.

Esta definição é realizada através do diálogo apresentado na Figura 18, onde se destaca também a opção de a análise avaliar o processo de nucleação e propagação de trincas.

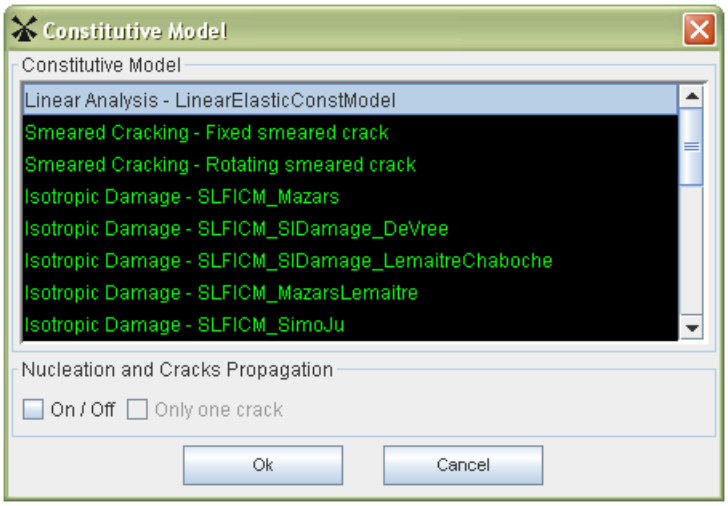

Figura 18: Diálogo de definição do modelo constitutivo.

A definição do modelo constitutivo no Módulo *Atributos* permite que o modelo geométrico discretizado e com as degenerações e condições de contorno definidas seja analisado com diferentes modelos constitutivos. Para tanto, basta que se redefina o modelo constitutivo, bem como os materiais, tendo em vista que os tipos de material aplicáveis à modelagem variam em função do modelo constitutivo.

Ao se definir o modelo constitutivo, o programa cria um material com parâmetros *default* e o associa à degeneração também criada.

Para a opção de análise com carregamento normal ao plano (placas), não cabe ao analista a definição do modelo constitutivo, condicionado ao modelo linear elástico, sendo este recurso suprimido da interface com o usuário.

(2) Criação de materiais

Conforme destacado, os tipos de material aplicáveis à modelagem são definidos em função do modelo constitutivo. Sendo assim, condiciona-se o acesso ao diálogo de criação de materiais à definição do modelo constitutivo. Este diálogo é apresentado na Figura 19, cujos tipos de material apresentados são os aplicáveis aos modelos de fissuras distribuídas.

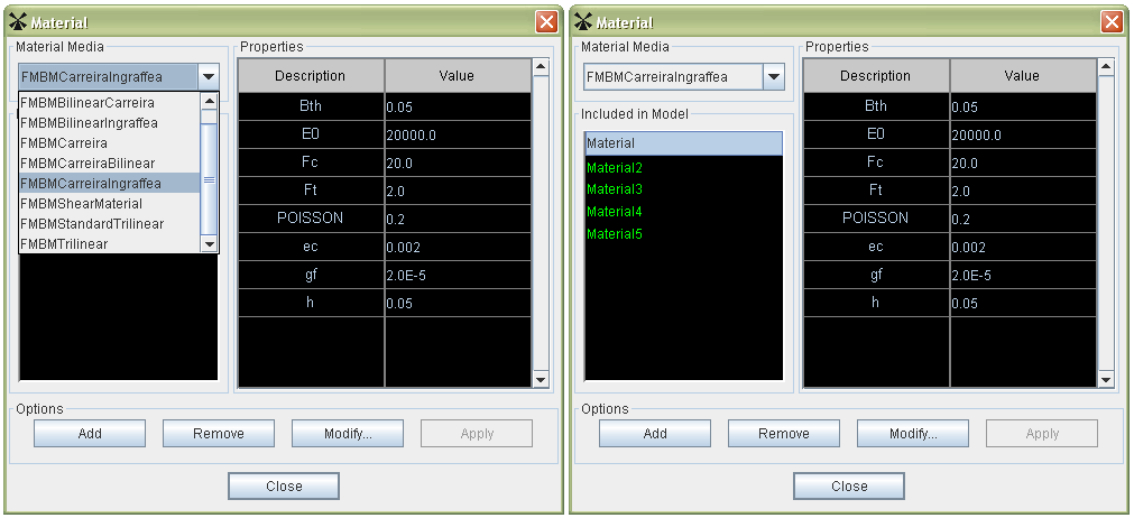

Figura 19: Diálogo de criação de materiais.

O processo de criação de material é realizado escolhendo-se, primeiramente, o tipo de material na caixa de definição do meio material. Na sequência, aciona-se o botão adicionar. Após a definição do nome do material, definem-se os seus parâmetros no painel de propriedades e, por fim, aciona-se o botão aplicar. O material criado pode ainda ser modificado ou removido através dos respectivos botões.

Este diálogo contém também um painel para apresentação dos materiais incluídos no modelo, cujo selecionado tem o seu tipo e os seus parâmetros apresentados.

Determinados tipos de material requerem também a definição de leis de evolução de dano. O processo de criação de material com uma lei de evolução de dano como um de seus parâmetros é apresentado na Figura 20, cujo tipo de material apresentado é aplicável ao modelo de dano isotrópico de de Vree.

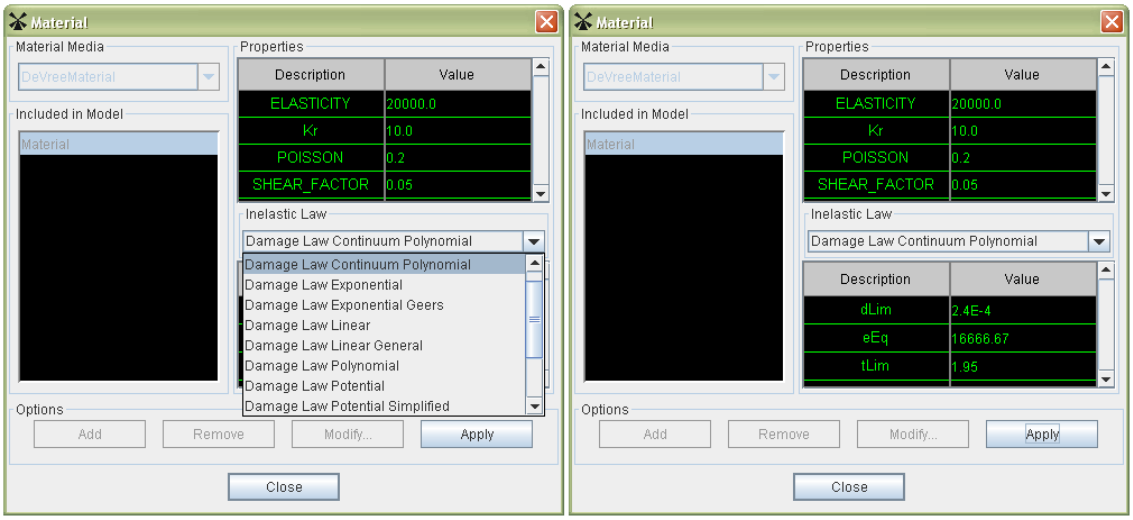

Figura 20: Material com uma lei de evolução de dano como um de seus parâmetros.

(3) Criação de degenerações

O processo de criação de degeneração é análogo ao de criação de material. Através do diálogo apresentado na Figura 21, primeiramente, escolhe-se o tipo de degeneração e, em seguida, aciona-se o botão adicionar. Após a definição do nome da degeneração, definem-se as suas propriedades e, por fim, aciona-se o botão aplicar. A degeneração criada também pode ser modificada ou removida através dos respectivos botões.

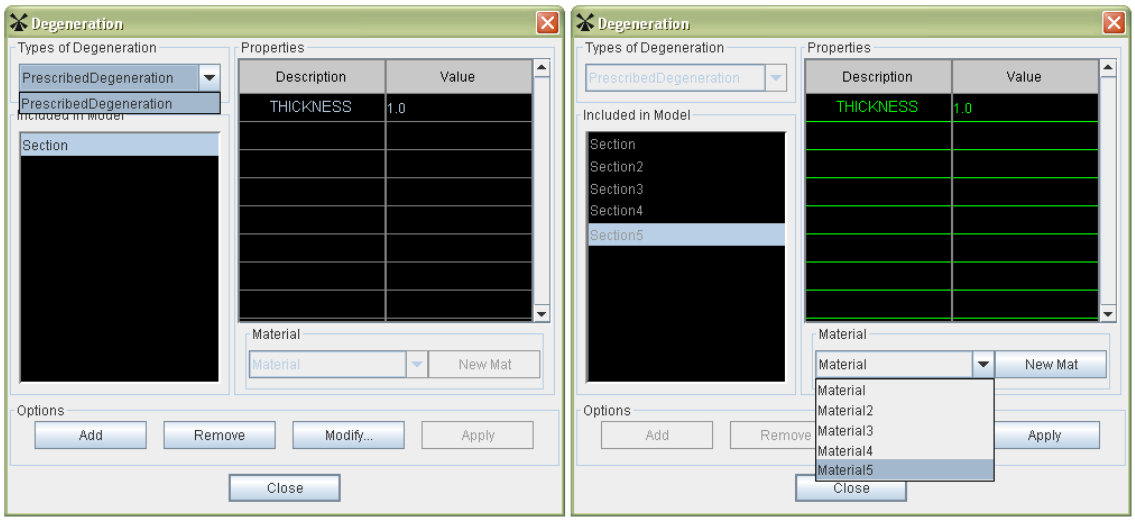

Figura 21: Diálogo de criação de degenerações.

Na Figura 21, destaca-se o processo de associação de um material à degeneração, realizado quando da definição das propriedades desta degeneração.

O diálogo de criação de degenerações contém também um painel para apresentação das degenerações incluídas no modelo, cuja selecionada tem o seu tipo e os seus parâmetros apresentados.

(4) Criação de funções de enriquecimento nodal de MEFG

O processo de criação de função de enriquecimento nodal é análogo aos de criação de material e de degeneração. No ambiente gráfico, permitem-se os enriquecimentos nodais com funções polinomiais e de singularidade.

As funções polinomiais são criadas definindo-se os seus monômios. Através do diálogo apresentado na Figura 22, primeiramente, define-se o número de linhas da tabela no correspondente painel e aperta-se *enter*, necessário para adequação desta tabela, onde cada linha refere-se a um monômio. Na sequência, definem-se os expoentes dos componentes de cada um dos monômios. No caso de análise plana, esta entrada consiste em definir os expoentes p e q de cada um dos monômios $x^p y^q$ que compõem a função de enriquecimento polinomial.

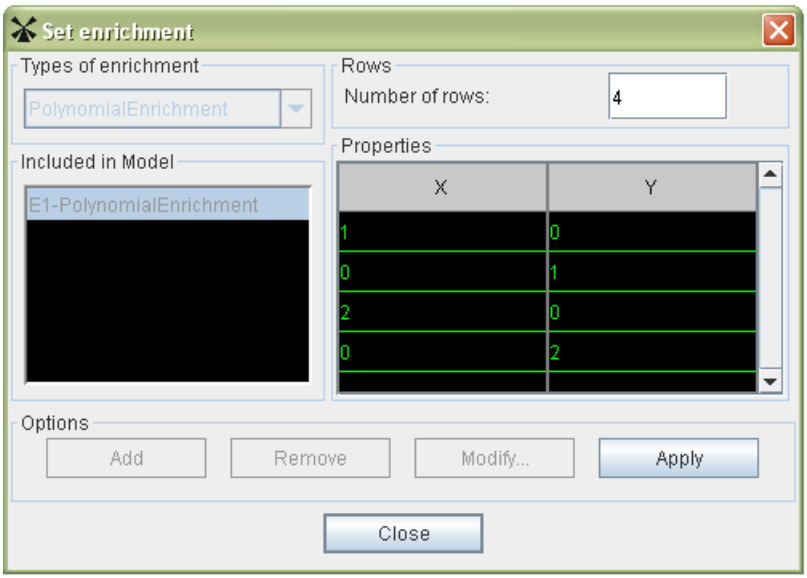

Figura 22: Diálogo de criação de funções de enriquecimento polinomial.

O enriquecimento nodal com função de singularidade é empregado para simular a ocorrência deste fenômeno em pontas de trinca. Através do diálogo apresentado na Figura 23, cria-se este enriquecimento definindo-se os parâmetros geométricos da trinca, dentre outros parâmetros obtidos a partir da Mecânica da Fratura.

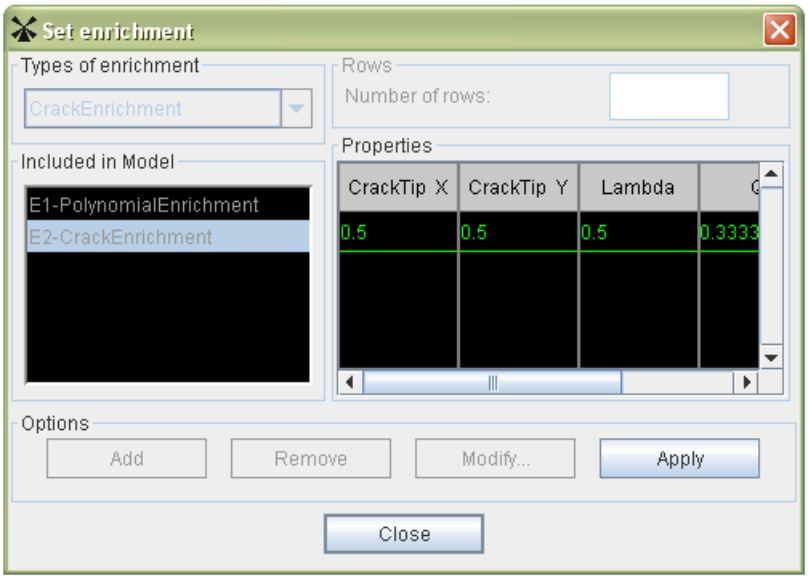

Figura 23: Diálogo de criação de funções de enriquecimento de singularidade.

(5) Criação de descontinuidades (entalhes), simuladas pelo MEFG

Este recurso permite a modelagem de descontinuidades preexistentes na estrutura sem a necessidade de introduzi-las na geometria do modelo. Através do diálogo apresentado na Figura 24, cria-se uma descontinuidade definindo-se as coordenadas de seus pontos inicial e final. A partir desta entrada, o programa se encarrega de determinar todos os elementos cortados por esta descontinuidade e de definir e enriquecer com função degrau os nós necessários para simulação do salto no campo de deslocamentos. Para esta simulação, emprega-se o MEFG. Destaca-se que estas descontinuidades são simuladas como entalhes, ou seja, sem a consideração de existência de forças de coesão atuantes em seus planos.

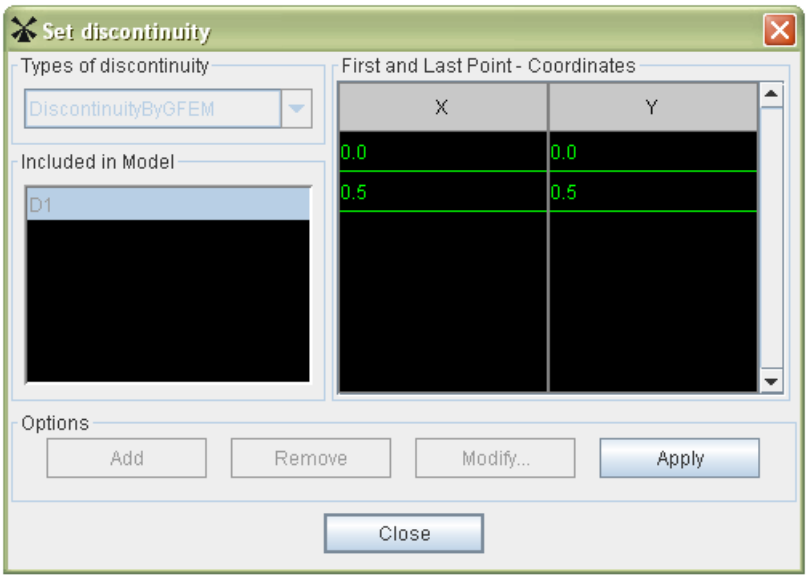

Figura 24: Diálogo de criação de descontinuidades.

(6) Criação de combinações de carregamentos

No sistema INSANE, as cargas - nodal, concentrada, linear, de área, dentre outras - são agrupadas em objetos carregamentos. Cada objeto carregamento, por sua vez, é associado a um objeto caso de carregamento, através do qual definem-se o seu fator de escala e se este é incremental ou não. Por fim, os casos de carregamento são associados aos objetos de combinações de carregamentos.

No ambiente gráfico, por padrão, todos os casos de carregamento criados pelo analista são associados à combinação de carregamentos *default*, porém, passíveis de desassociação. Desta forma, o acionamento do diálogo apresentado na Figura 25 somente é necessário se o analista quiser criar novas combinações de carregamentos ou redefinir os casos de carregamento aplicáveis. Para a criação de combinação de carregamentos, na opção de nova combinação, aciona-se o botão selecionar. Analogamente, para a definição dos casos de carregamento aplicáveis, na combinação de carregamentos de interesse, também aciona-se o botão selecionar. Após adicionar e/ou remover os casos de carregamento, aciona-se o botão atualizar, que aparece no lugar do botão selecionar.

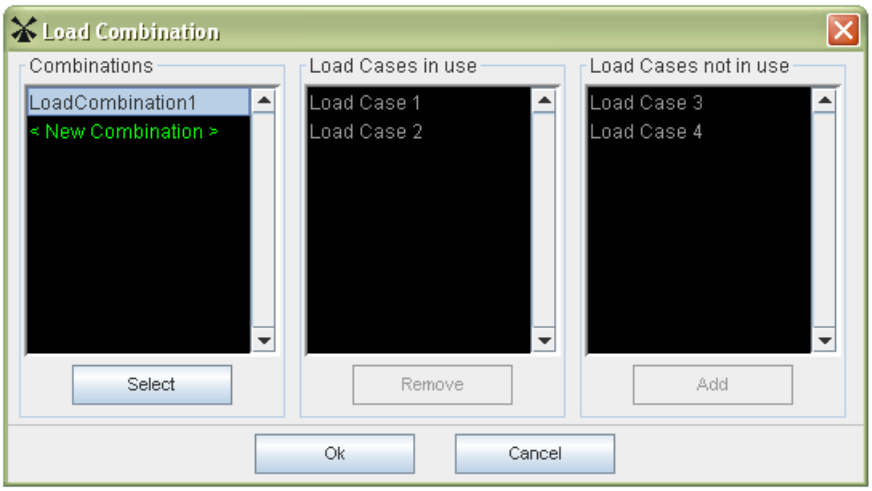

Figura 25: Diálogo de criação de combinações de carregamentos.

(7) Criação de casos de carregamento

Os casos de carregamento podem ser criados através do diálogo apresentado na Figura 26, acionando-se o botão adicionar.

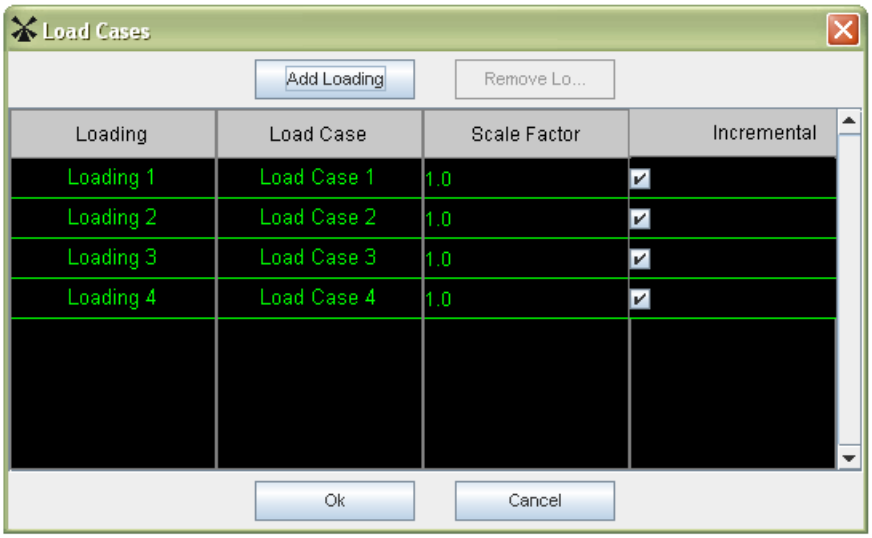

Figura 26: Diálogo de criação de casos de carregamento.

Ao se criar um caso de carregamento, definem-se o fator de escala do carregamento associado e se este é incremental ou não. Por padrão, o fator de escala é inicializado com valor unitário e o carregamento é definido como não incremental se a análise for linear e como incremental se não linear.

Os casos de carregamento podem ainda ser criados implicitamente através dos diálogos de aplicação de cargas, quando da criação de carregamentos nestes diálogos.

(8) Aplicação de cargas nodais

O processo de aplicação de carga nodal se inicia selecionando-se os nós de interesse. Se nenhum nó for selecionado, a carga será aplicada em todos os nós do modelo. Em seguida, através do diálogo apresentado na Figura 27, escolhe-se ou cria-se o carregamento a que pertence esta carga. Por fim, acionando-se o botão modificar, definem-se os valores de seus componentes e aciona-se o botão de aceite. Estes componentes são estabelecidos em função dos graus de liberdade nodal.

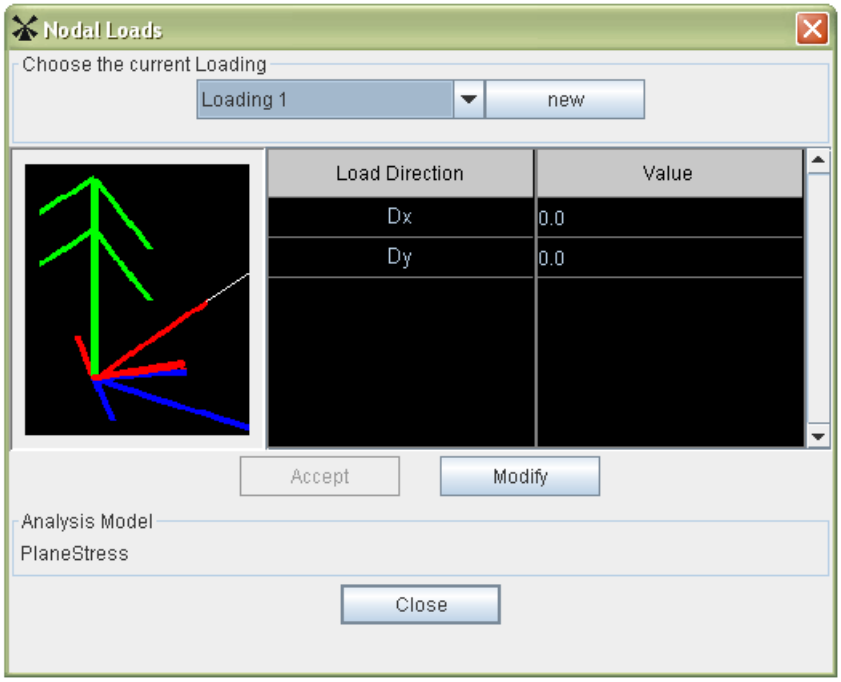

Figura 27: Diálogo de aplicação de cargas nodais.

(9) Aplicação de cargas concentradas em arestas

O processo de aplicação de carga concentrada em arestas de elementos é análogo ao de aplicação de carga nodal.

Este processo se inicia selecionando-se as arestas de interesse. Se nenhuma aresta for selecionada, a carga será aplicada em todas as arestas do modelo. Em seguida, através do diálogo apresentado na Figura 28, escolhe-se ou cria-se o carregamento a que pertence esta carga. Diferentemente da carga nodal, a carga concentrada requer a definição de um nome para distingui-la das diversas cargas concentradas que podem ser aplicadas em uma mesma aresta. Após a definição deste nome, definem-se o ponto de aplicação da carga e os valores de seus componentes e aciona-se o botão de aceite. O ponto de aplicação da carga é definido pela sua distância ao nó inicial da aresta. No caso de somente uma aresta selecionada, este diálogo apresenta ainda o comprimento desta aresta, com o objetivo de auxiliar na definição do ponto de aplicação da carga.

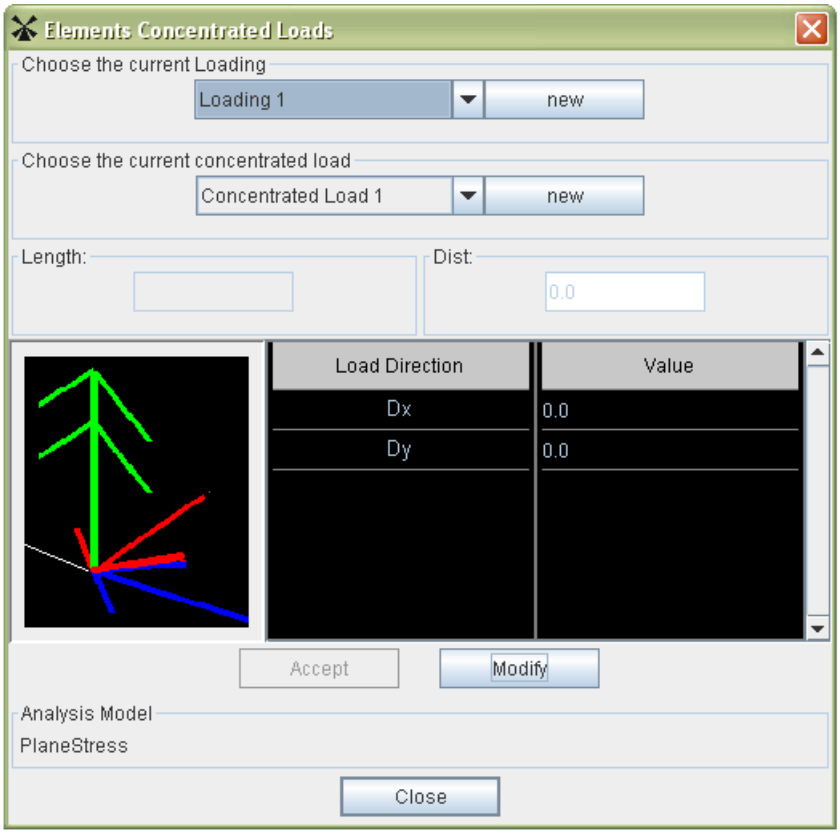

Figura 28: Diálogo de aplicação de cargas concentradas em arestas.

(10) Aplicação de cargas lineares em arestas

O processo de aplicação de carga linearmente distribuída em arestas de elementos é análogo aos de aplicação de cargas nodal e concentrada em arestas.

Através do diálogo apresentado na Figura 29, com as arestas de interesse selecionadas, escolhe-se ou cria-se o carregamento a que pertence esta carga. Após a definição de um nome para a carga, definem-se os pontos inicial e final de sua aplicação e os valores de seus componentes nestes pontos e aciona-se o botão de aceite. Estes pontos são definidos pelas suas distâncias ao nó inicial da aresta. Destaca-se que, no caso de mais de uma aresta selecionada, a carga distribuída será aplicada em todo o comprimento das arestas, não cabendo ao analista a definição de seus pontos inicial e final. Analogamente ao diálogo de aplicação de cargas concentradas, no caso de somente uma aresta selecionada, este diálogo apresenta o comprimento desta aresta.

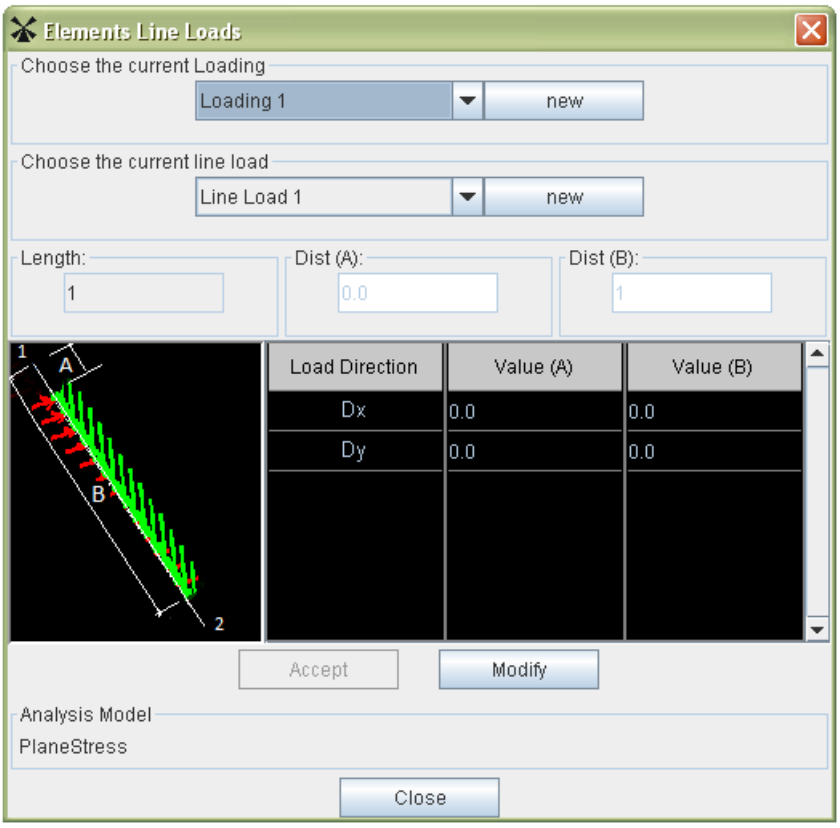

Figura 29: Diálogo de aplicação de cargas linearmente distribuídas em arestas.

(11) Aplicação de cargas de área

O processo de aplicação de carga de área é análogo aos demais processos de aplicação de cargas.

No ambiente gráfico, a carga de área se restringe a um valor constante aplicado em toda a face dos elementos.

Este processo se inicia selecionando-se as faces de interesse. Se nenhuma face for selecionada, a carga será aplicada em todas as faces do modelo. Em seguida, através do diálogo apresentado na Figura 30, escolhe-se ou cria-se o carregamento a que pertence esta carga. Após a definição de um nome para a carga, definem-se os valores de seus componentes e aciona-se o botão de aceite.

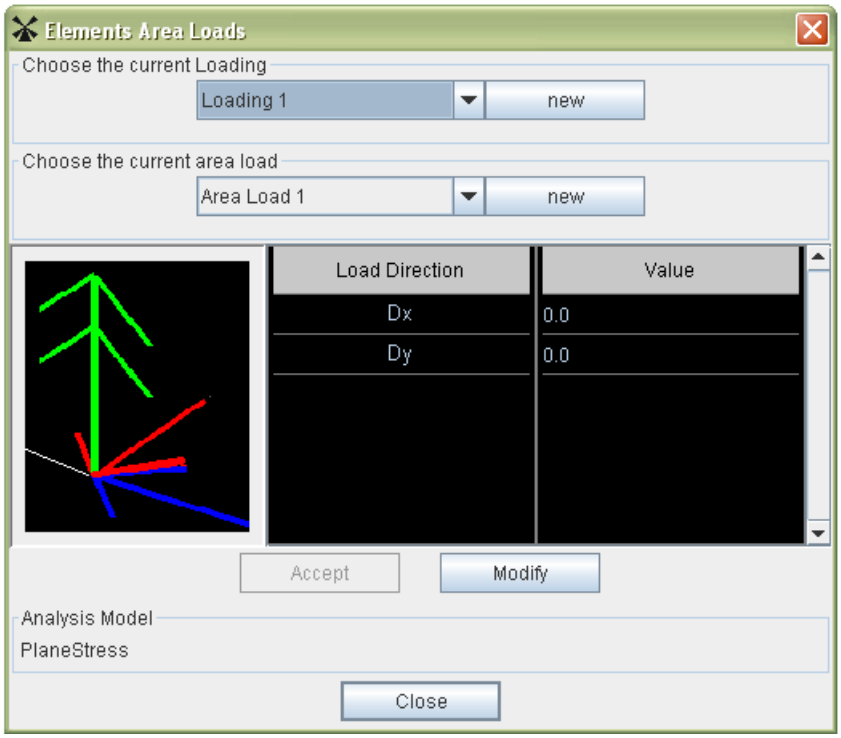

Figura 30: Diálogo de aplicação de cargas de área.

Objetivando um maior conforto visual e um menor custo computacional, as cargas de área são representadas graficamente através de um conjunto de vetores dispostos somente no entorno do centroide do elemento.

(12) Atribuição de restrições aos deslocamentos nodais

As restrições são atribuídas aos deslocamentos dos nós selecionados (ou de todos, se nenhum for selecionado) através do diálogo apresentado na Figura 31.

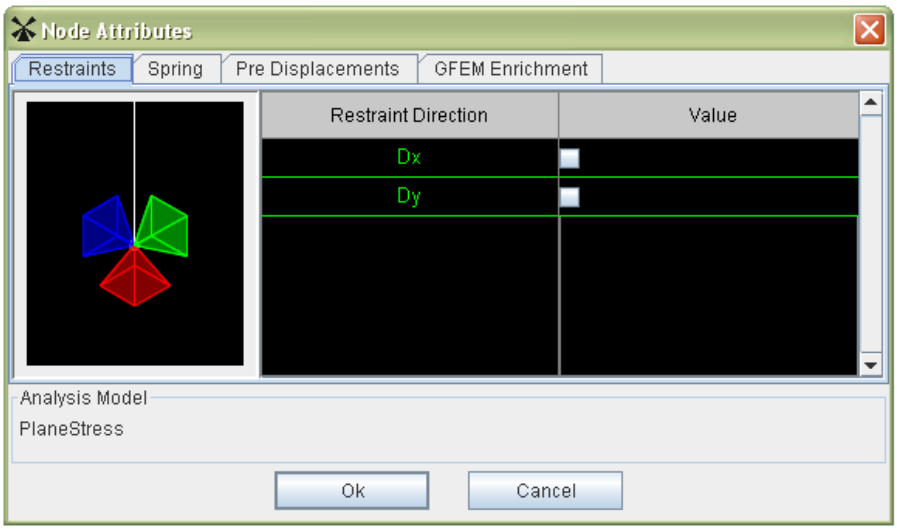

Figura 31: Diálogo de atribuição de restrições aos deslocamentos nodais.

(13) Atribuição de rigidezes de mola aos nós

As rigidezes de mola são atribuídas aos nós analogamente às restrições. Através do diálogo apresentado na Figura 32, definem-se seus valores.

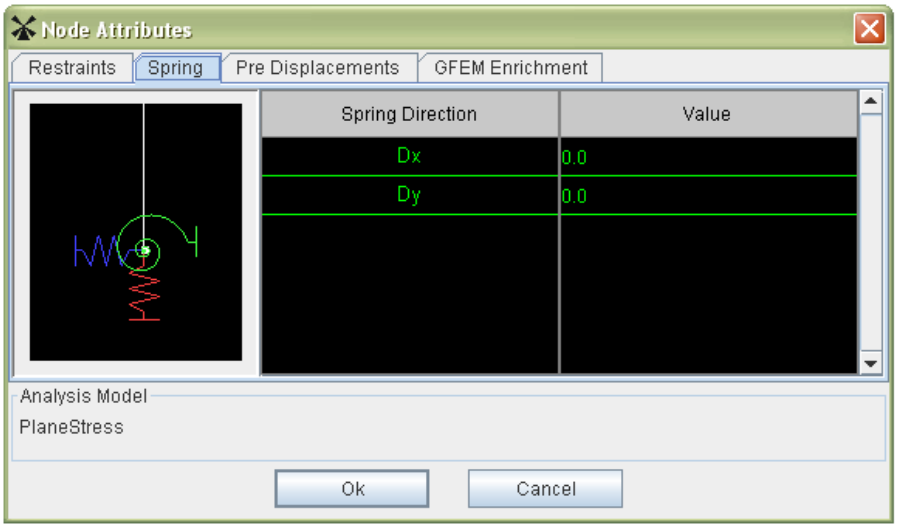

Figura 32: Diálogo de atribuição de rigidezes de mola aos deslocamentos nodais.

(14) Atribuição de pré-deslocamentos aos nós

Os pré-deslocamentos são atribuídos aos nós analogamente aos demais atributos nodais. Através do diálogo apresentado na Figura 33, definem-se seus valores.

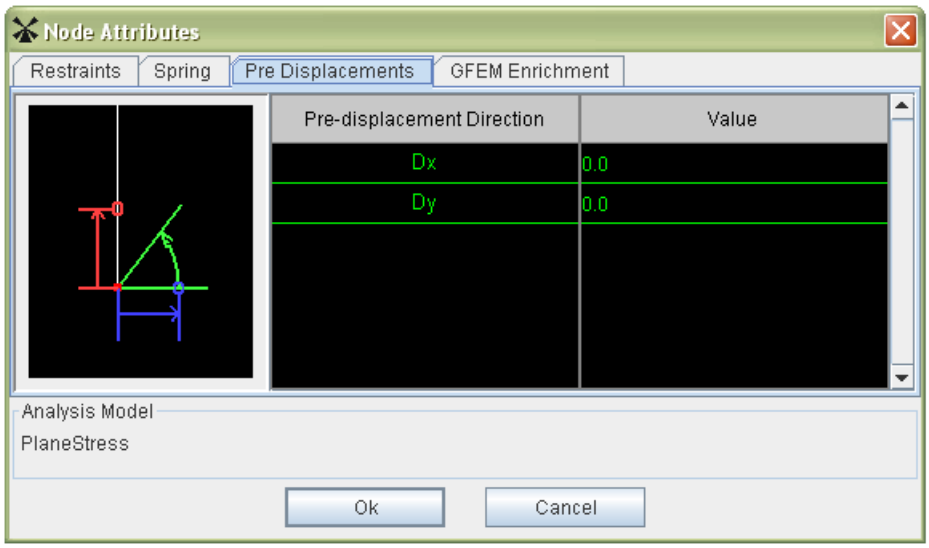

Figura 33: Diálogo de atribuição de pré-deslocamentos aos nós.

(15) Atribuição de funções de enriquecimento aos nós

O processo de atribuição de função de enriquecimento aos nós se inicia selecionando-se os nós de interesse. Se nenhum nó for selecionado, a função de enriquecimento será atribuída a todos os nós do modelo.

Em seguida, através do diálogo apresentado na Figura 34, aciona-se o botão modificar para escolha da função de enriquecimento dentre aquelas criadas através do diálogo apresentado nas Figuras 22 e 23. Na Figura 34, destaca-se também a opção *sem enriquecimento*.

Após a escolha do enriquecimento, aciona-se o botão de aceite. Ressalta-se que, no ambiente gráfico, permitem-se a criação e a atribuição de diversas funções de enriquecimento nodal, porém, somente uma por nó. O enriquecimento atribuído é o destacado neste diálogo, quando aberto com um nó enriquecido selecionado.

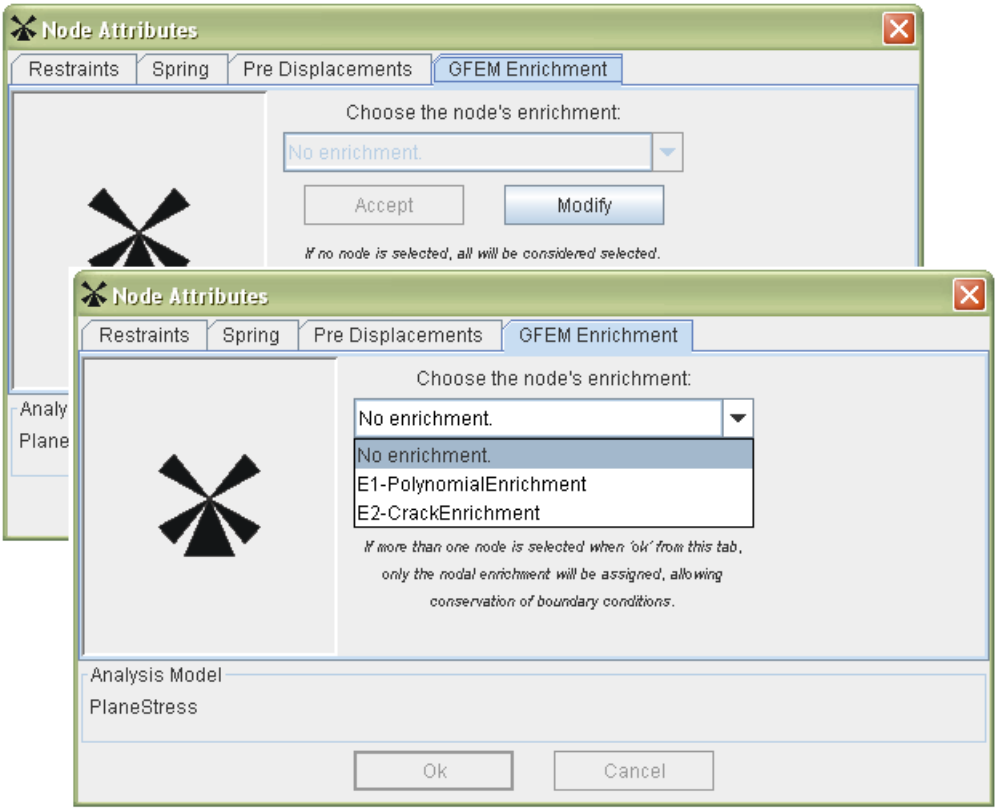

Figura 34: Diálogo de atribuição de funções de enriquecimento aos nós.

Destaca-se que os diálogos apresentados nas Figuras 31, 32, 33 e 34 consistem em abas de um mesmo diálogo, chamado diálogo de atributos nodais. Desta forma, as atribuições nodais podem ser definidas de uma só vez.

Ao se acionar o botão *Ok* do diálogo de atributos nodais, as definições em todas as abas são atribuídas aos nós selecionados, com exceção do caso em que se tem mais de um nó selecionado (ou nenhum) e este botão é acionado com a aba de atribuição de funções de enriquecimento como a corrente.

Neste caso, somente a função de enriquecimento é atribuída. Isto permite a atribuição de função de enriquecimento à diversos nós simultaneamente, sem se ater aos demais atributos nodais definidos através deste diálogo. Esta lógica confere praticidade quando se analisa um modelo variando-se as funções de enriquecimento, pois não afeta as condições de contorno.

(16) Atribuição de degenerações aos elementos

O processo de atribuição de degeneração aos elementos se inicia selecionando-se os elementos de interesse. Se nenhum elemento for selecionado, a degeneração será atribuída a todos os elementos do modelo. Em seguida, através do diálogo apresentado na Figura 35, escolhe-se a degeneração dentre aquelas criadas através do diálogo apresentado na Figura 21. Após a escolha, aciona-se o botão *Ok*.

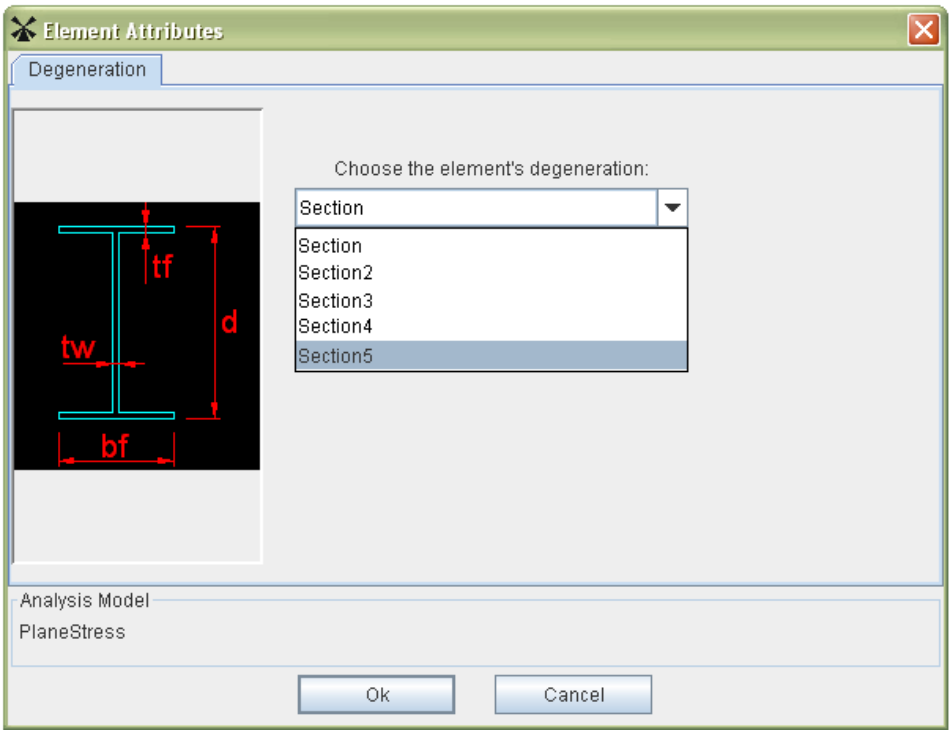

Figura 35: Diálogo de atribuição de degenerações aos elementos.

(17) Solução do modelo

Na barra de status, tem-se destacado o módulo corrente (*Atributos*), bem como liberado o botão *Processar*. Este botão encapsula o comando responsável por disparar o processamento da análise. Ao acioná-lo, primeiramente, uma análise da consistência dos dados de entrada é realizada. Em seguida, no caso de nenhuma inconsistência, abre-se o diálogo apresentado na Figura 36 para definição dos parâmetros da técnica de solução, incluindo o processo incremental-iterativo e o método de controle e seus parâmetros, se aplicáveis.

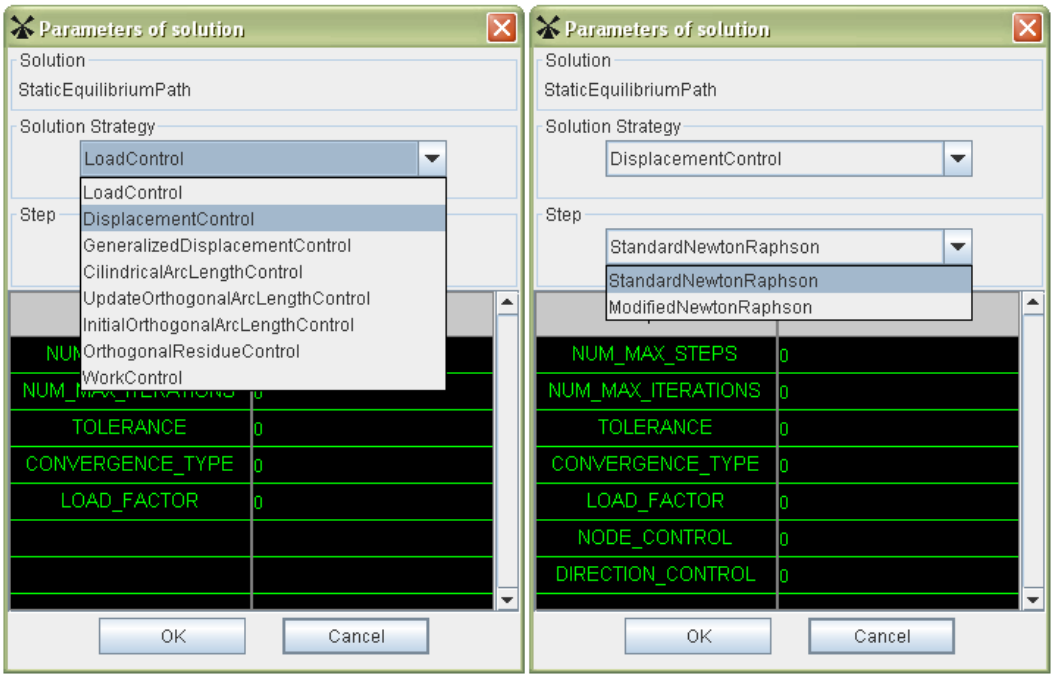

Figura 36: Diálogo de definição dos parâmetros da técnica de solução.

Ao se acionar o botão *Ok*, tem-se o processamento da análise. O processamento da análise apenas finaliza um fluxo de execução, não impedindo o retorno à etapa de pré-processamento.

A cada processamento, cria-se um subdiretório *Processing-XX* no diretório definido no início do programa para armazenamento dos seus arquivos de entrada e saída, gerados em XML pelo núcleo numérico, possibilitando posterior recuperação destes dados.

Após o processamento, a barra de status libera o botão *Pós-Processador*. Este botão encapsula o comando responsável por carregar os arquivos XML dos resultados de todas as etapas do processamento para abastecimento do pós-processador.

5 Pós-Processador

O pós-processador, apresentado na Figura 37, é uma aplicação gráfica interativa que disponibiliza ferramentas de visualização de resultados.

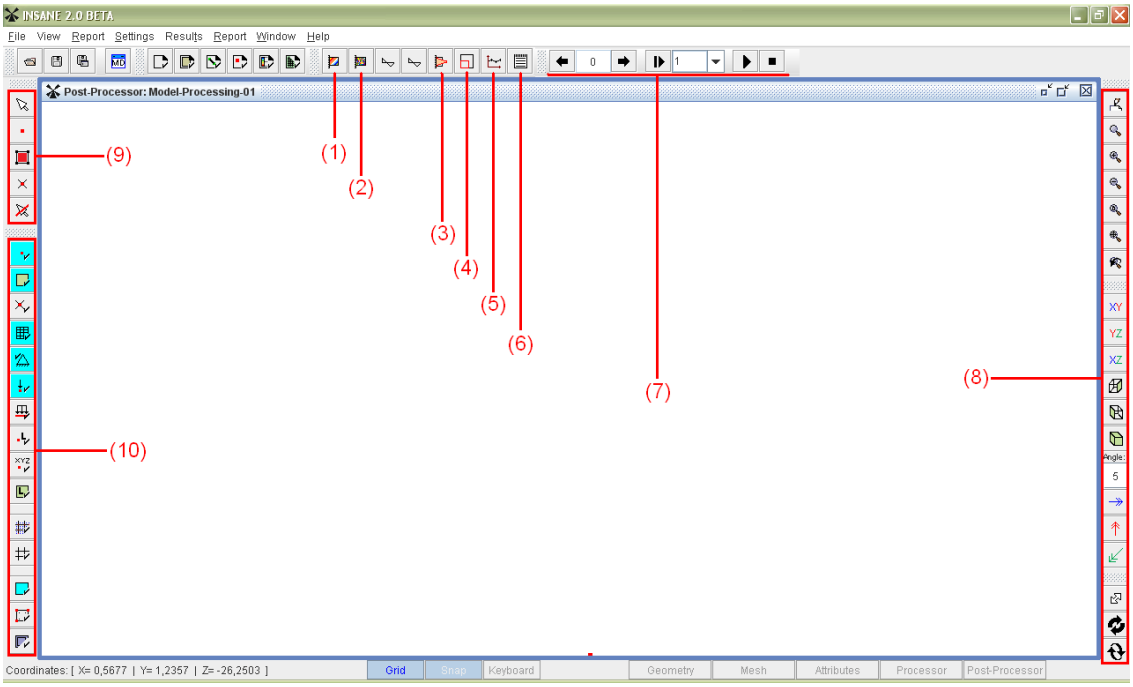

Figura 37: Pós-processador.

Na Figura 37, destacam-se alguns dos recursos desta aplicação, apresentados a seguir:

(1) Isofaixas de valores suavizados

A partir deste recurso, visualiza-se a variação suavizada de uma dada variável de estado ao longo do domínio, através de uma escala de cores.

(2) Isofaixas de valores não suavizados

A partir deste recurso, visualiza-se a variação não suavizada de uma dada variável de estado ao longo do domínio, através de uma escala de cores.

(3) Visualização da deformada

A partir deste recurso, visualiza-se a deformada do modelo.

(4) Escala

Recurso para definição da escala de visualização da deformada.

(5) Gráficos

Através deste recurso, traçam-se gráficos que relacionam grandezas do modelo.

(6) Informações

Neste recurso, visualizam-se informações dos objetos selecionados do modelo, tais como grandezas de estado.

(7) Controle de passos

Através destes recursos, define-se o passo da análise não linear a se representar o modelo, bem como dispara-se a mudança sucessiva dos passos.

(8) Recursos de visualização

Nesta barra, disponibilizam-se recursos de visualização, tais como zoom, mudança do plano de visualização e rotação da perspectiva.

(9) Recursos de seleção

Nesta barra, disponibilizam-se recursos para seleção de objetos.

(10) Recursos de visibilidade

Nesta barra, disponibilizam-se recursos para configurar a visibilidade de parâmetros do modelo.

6 Exemplos

Nesta seção, apresentam-se 6 exemplos de modelagem no ambiente gráfico. Cada exemplo foi simulado visando destacar uma aplicação deste ambiente para a opção de análise de modelos planos. Os exemplos, bem como os objetivos de suas simulações, são listados a seguir:

- Exemplo 1: Painel em "L" - Objetivou-se destacar a opção de análise linear com carregamento no plano pelo MEF;

- Exemplo 2: Chapa com trincas em modo I de abertura - Objetivou-se destacar a opção de análise linear com carregamento no plano pelo MEFG;

- Exemplo 3: Barragem submetida à carga hidrostática - Objetivou-se destacar a opção de análise fisicamente não linear com carregamento no plano pelo MEF;

- Exemplo 4: Viga pré-tensionada sob flexão - Objetivou-se destacar a opção de análise fisicamente não linear com carregamento no plano pelo MEFG;

- Exemplo 5: Viga com pré-trinca sob flexão - Objetivou-se demonstrar a capacidade do recurso de modelagem de descontinuidades preexistentes na estrutura;

- Exemplo 6: Placa anular com carga na borda interna - Objetivou-se destacar a opção de análise linear com carregamento normal ao plano (placas) pelo MEF.

Exemplo 1: Painel em "L"

O painel em "L", cujas geometria, vinculação e carga são ilustradas na Figura 38, foi simulado no ambiente gráfico objetivando-se destacar o emprego deste ambiente para a opção de análise plana estática linear com carregamento no plano pelo MEF.

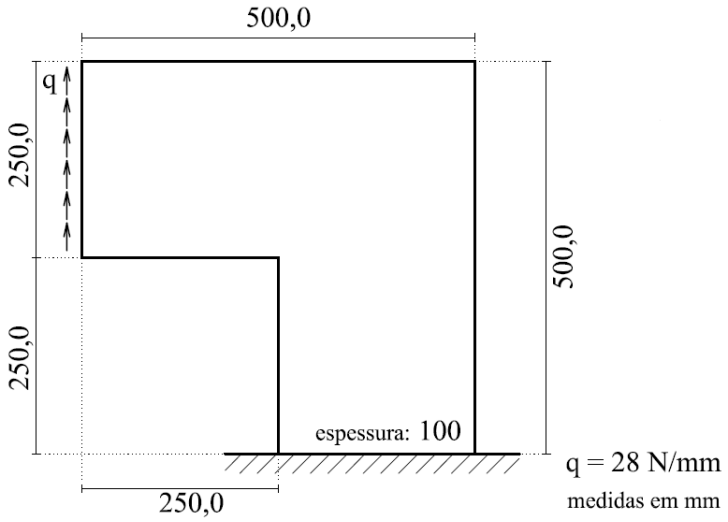

Figura 38: Painel em "L": Configuração.

Para esta modelagem, adotaram-se os seguintes parâmetros:

- Opção de análise: Carregamento no plano

- Técnica de geração de malhas: Geração Nodal Aleatória

  Dimensão média dos elementos: 50 mm

- Refinamento local da malha:

  Região: Faixa horizontal a partir da junção angular

  Largura desta região: 150 mm

  Relação de definição da dimensão média dos elementos nesta região: $0,2$

  Nível de suavização: $1,0$

- Modelo de análise: Estado Plano de Tensão

- Elementos finitos: T6

- Modelo constitutivo: Linear elástico

- Materiais:

    Material 1:

        Tipo: Linear elástico isotrópico

        Parâmetros:

            Módulo de elasticidade: $E = 25850,0\ N/mm^2$

            Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,18$

- Degenerações:

    Seção 1:

        Tipo: Degeneração prescrita

        Propriedades:

            Espessura: 100 mm

            Material associado: Material 1

- Carregamentos:

    Não incremental: $q = 28\ N/mm$

Conforme discutido, a modelagem via ambiente gráfico se inicia desenhando-se a estrutura através do Módulo *Geometria*. Para este exemplo, bastou-se desenhar a face definida pelo contorno do painel em "L", conforme apresentado na Figura 39. Tendo em vista a opção pela Geração Nodal Aleatória como a técnica de geração de malhas, não foi necessário decompor a geometria da estrutura em regiões triangulares e/ou quadrilaterais.

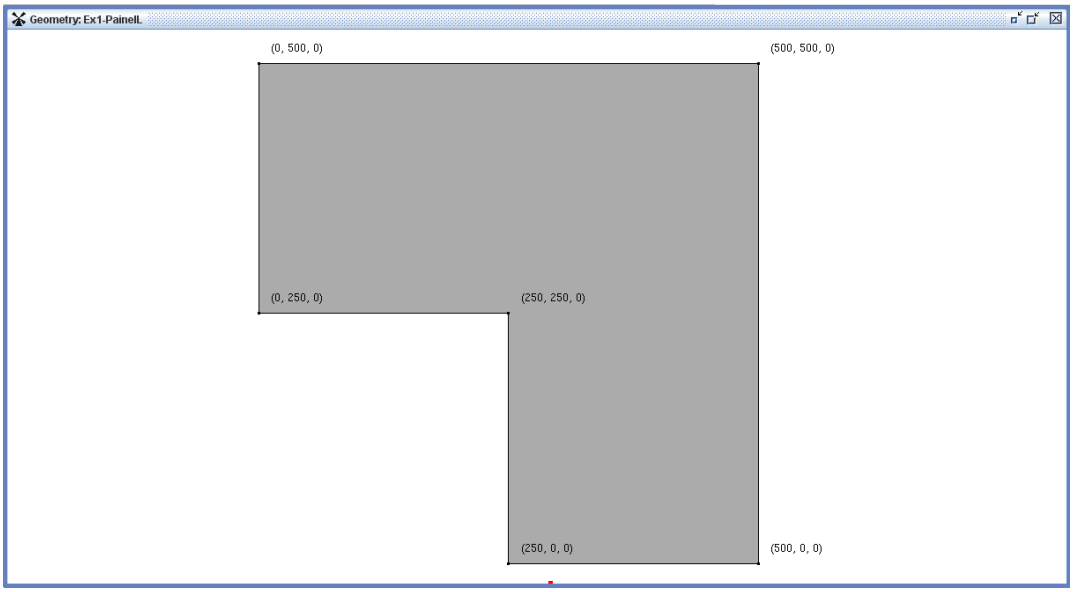

Figura 39: Painel em “L”: Geometria.

Na sequência, através do Módulo *Malha*, discretizou-se a geometria da estrutura por meio de técnica de decomposição de domínio, conforme apresentado na Figura 40. Visando aumentar a densidade de malha na faixa horizontal a partir da junção angular do painel em “L”, utilizou-se o recurso de refinamento local da malha.

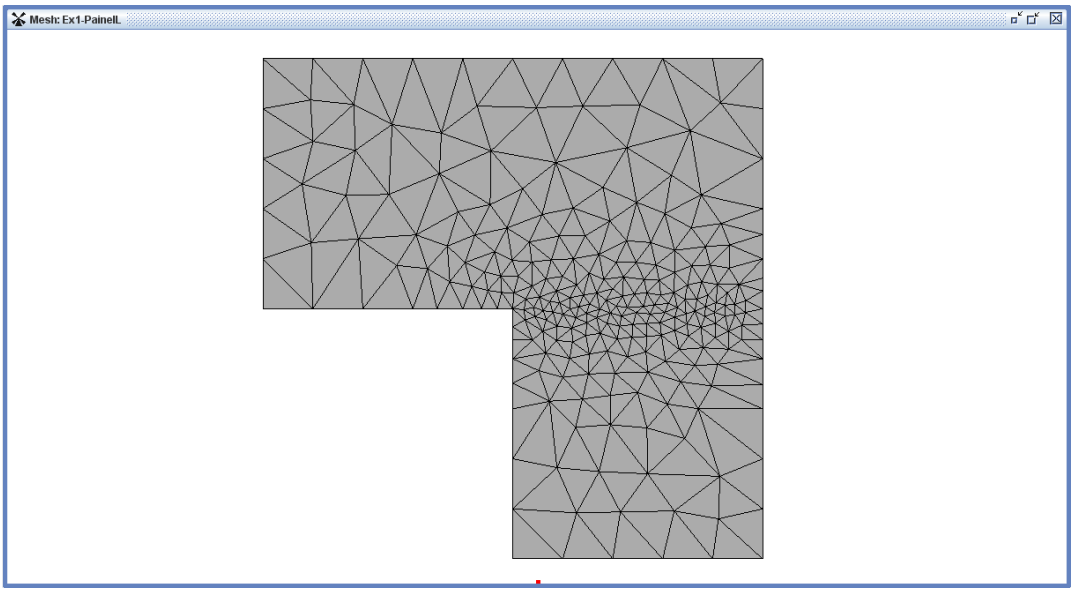

Figura 40: Painel em “L”: Malha.

Após a discretização da geometria, seguiu-se para o Módulo *Atributos*. Na passagem para este módulo, definiram-se a especialização da análise e o tipo de elemento finito a se empregar.

No Módulo *Atributos*, definiram-se as condições de contorno e o modelo constitutivo e criaram-se o material e a degeneração. Este material foi associado a esta degeneração, ao passo que esta degeneração foi atribuída a todos os elementos do modelo. Na Figura 41, apresenta-se a geometria da estrutura discretizada com as condições de contorno, destacando-se também o tipo de elemento finito.

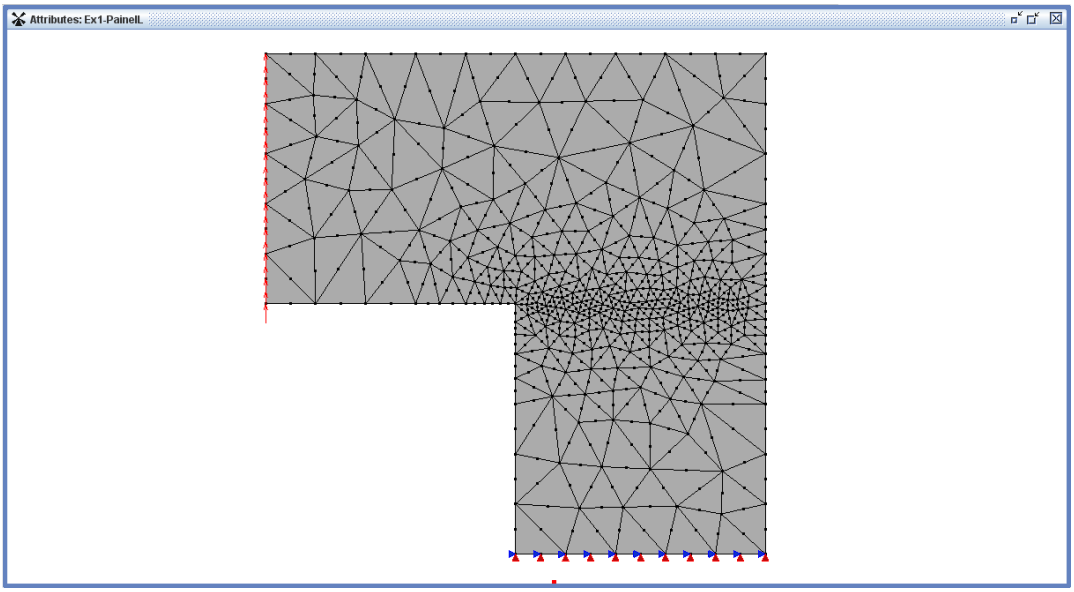

Figura 41: Painel em "L": Condições de contorno.

Após a definição dos atributos do modelo, processou-se a análise. Destaca-se que, por se tratar de uma análise linear, não foi necessária a definição de parâmetros da técnica de solução.

Ao final do processamento, seguiu-se para o pós-processador. O estudo das respostas de uma estrutura quando solicitada por agentes externos é realizado através desta aplicação que, por meio dos seus diversos recursos para visualização gráfica dos resultados, permite avaliar a variação de grandezas de estado ao longo do domínio da estrutura.

Para o painel em "L", por exemplo, avaliaram-se sua deformada, apresentada na Figura 42 com fator de escala igual a 500, e a variação da deformação ε_1 ao longo do seu domínio, apresentada na Figura 43.

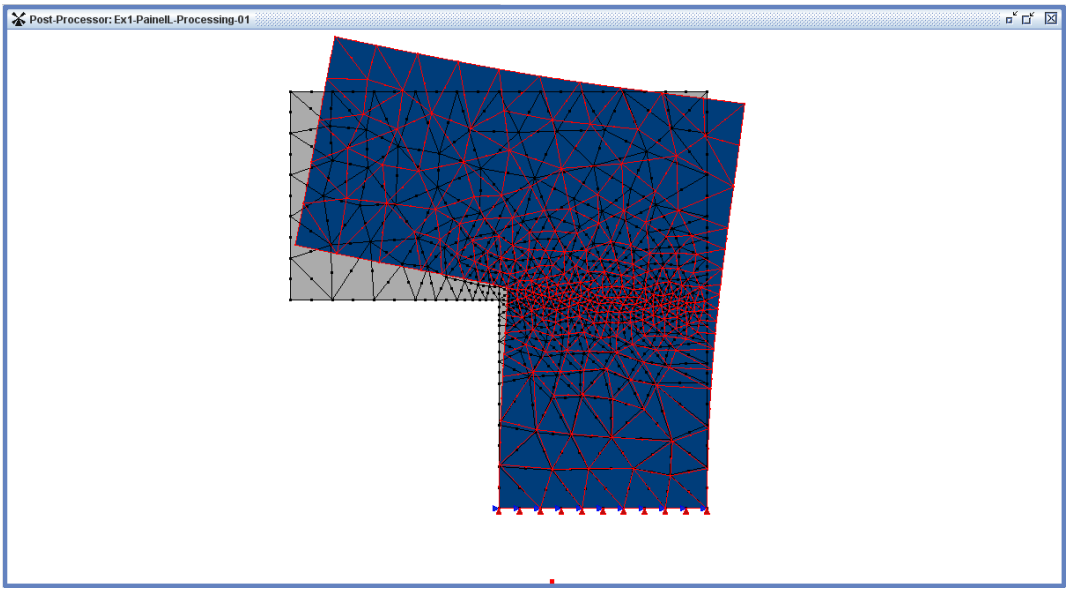

Figura 42: Painel em "L": Deformada.

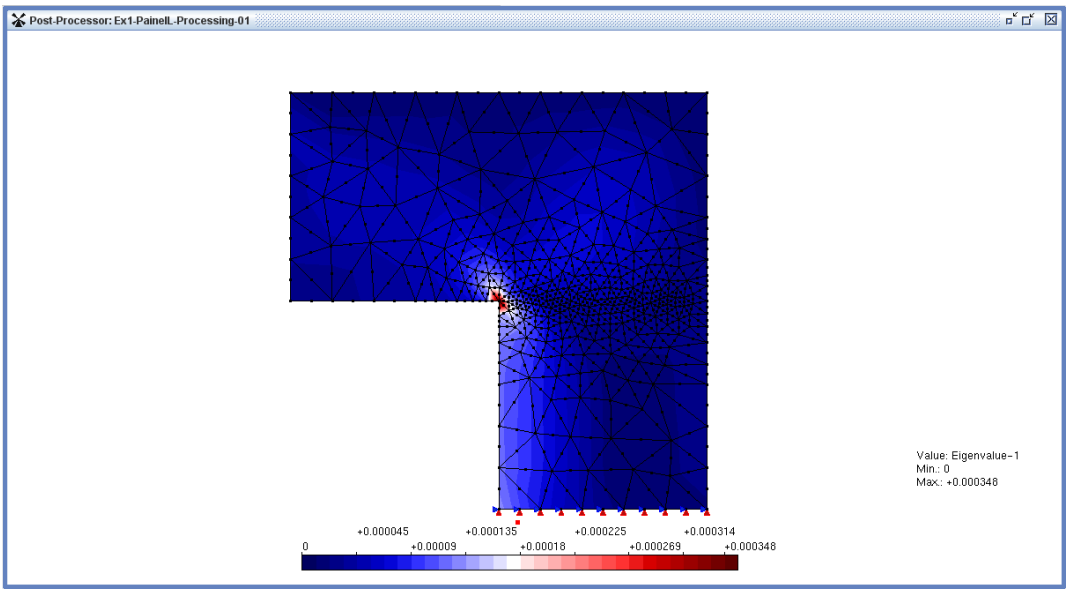

Figura 43: Painel em "L": Deformação ε_1.

Exemplo 2: Chapa com Trincas em Modo I de Abertura

A chapa com trincas em modo I de abertura, cujas geometria e cargas são ilustradas na Figura 44, foi simulada no ambiente gráfico objetivando-se destacar o emprego deste ambiente para a opção de análise plana estática linear com carregamento no plano pelo MEFG.

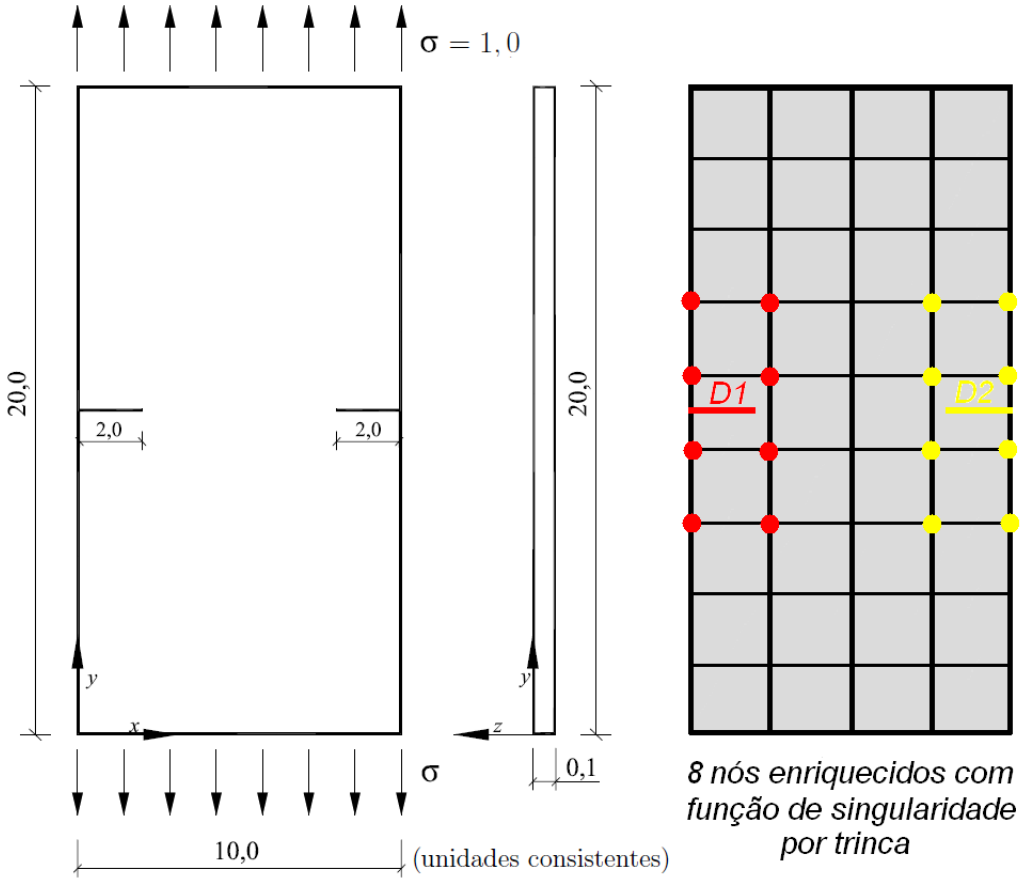

Figura 44: Chapa com trincas: Configuração.

Na Figura 44, destacam-se os nós enriquecidos com função de singularidade. Observa-se que cada conjunto de nós foi enriquecido com a função correspondente a uma trinca. Esta função de enriquecimento, criada e atribuída aos nós de interesse pelo analista, potencializa a simulação do fenômeno de singularidade no campo de tensões observado em regiões próximas à ponta de trincas. Esta atribuição de funções de enriquecimento aos nós condiciona a análise ao MEFG.

Nesta simulação, as trincas foram modeladas através do recurso que permite considerá-las sem a necessidade de introduzi-las na geometria do modelo. A partir deste recurso, as descontinuidades preexistentes são simuladas por meio de funções degrau, que também consistem em funções de enriquecimento nodal, porém, criadas e atribuídas aos nós necessários pelo programa, cabendo ao analista apenas a definição dos pontos inicial e final destas descontinuidades.

Por serem simuladas por meio de funções de enriquecimento nodal, a existência destas descontinuidades no modelo, por si só, já condiciona a análise ao MEFG.

O recurso de modelagem de descontinuidades preexistentes é melhor avaliado através do exemplo 5, que teve por objetivo analisar a resposta obtida empregando-se este recurso e demonstrar a sua capacidade.

Para esta modelagem, adotaram-se os seguintes parâmetros:

- Opção de análise: Carregamento no plano
- Técnica de geração de malhas: Mapeamento Transfinito
- Modelo de análise: Estado Plano de Tensão
- Elementos finitos: Q4
- Modelo constitutivo: Linear elástico
- Materiais:

    Material 1:

    Tipo: Linear elástico isotrópico

    Parâmetros:

    Módulo de elasticidade: $E = 1,0$

    Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,3$

- Degenerações:

  Seção 1:

  Tipo: Degeneração prescrita

  Propriedades:

  Espessura: $0,1$

  Material associado: Material 1

- Funções de enriquecimento nodal:

  Enriquecimento 1 (correspondente à trinca D1):

  Tipo: Singularidade

  Parâmetros:

  Ponta da trinca - coordenada x: $2,0$

  Ponta da trinca - coordenada y: $10,0$

  Parâmetro λ da função de singularidade: $0,5$

  Parâmetro Q da função de singularidade: $0,333333333$

  Ângulo entre as direções x e de crescimento da trinca: $\theta = 0,0$

  Enriquecimento 2 (correspondente à trinca D2):

  Tipo: Singularidade

  Parâmetros:

  Ponta da trinca - coordenada x: $8,0$

  Ponta da trinca - coordenada y: $10,0$

  Parâmetro λ da função de singularidade: $0,5$

  Parâmetro Q da função de singularidade: $0,333333333$

  Ângulo entre as direções x e de crescimento da trinca: $\theta = \pi$

- Descontinuidades (entalhes):

  Descontinuidade 1 (trinca D1):

  Tipo: Simulada pelo MEFG

  Parâmetros:

  Ponto inicial $(x\ y)$: $(0,0\ \ 10,0)$

  Ponto final $(x\ y)$: $(2,0\ \ 10,0)$

  Descontinuidade 2 (trinca D2):

  Tipo: Simulada pelo MEFG

  Parâmetros:

  Ponto inicial $(x\ y)$: $(8,0\ \ 10,0)$

  Ponto final $(x\ y)$: $(10,0\ \ 10,0)$

- Carregamentos:

  Não incremental: $\sigma = 1,0$ aplicada como força uniforme de $f_y = 0,1$

No Módulo *Geometria*, desenhou-se a geometria da estrutura, conforme apresentado na Figura 45.

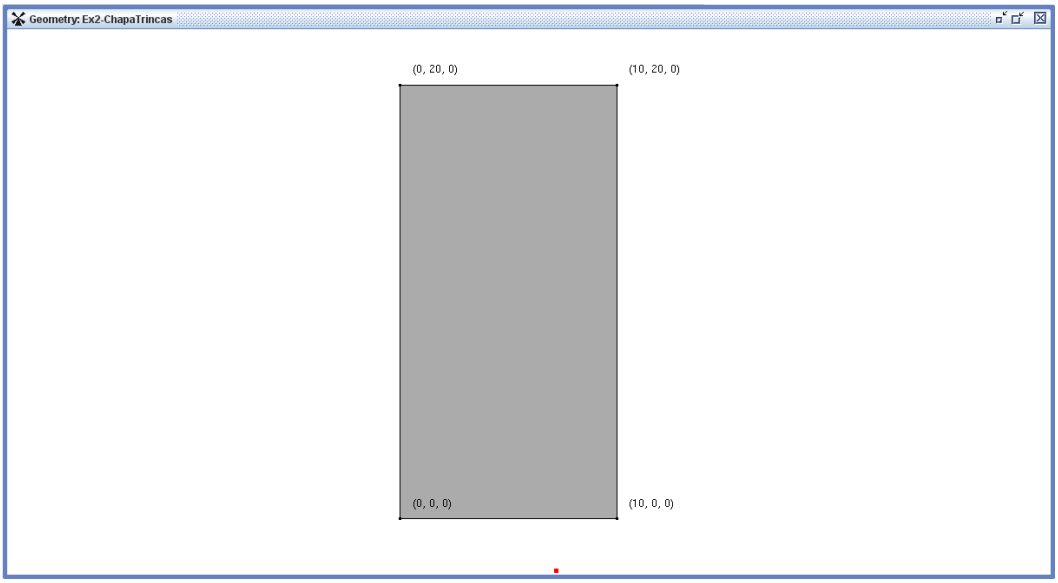

Figura 45: Chapa com trincas: Geometria.

No Módulo *Malha*, discretizou-se a geometria da estrutura, conforme apresentado na Figura 46, e definiram-se a especialização da análise e o tipo de elemento finito.

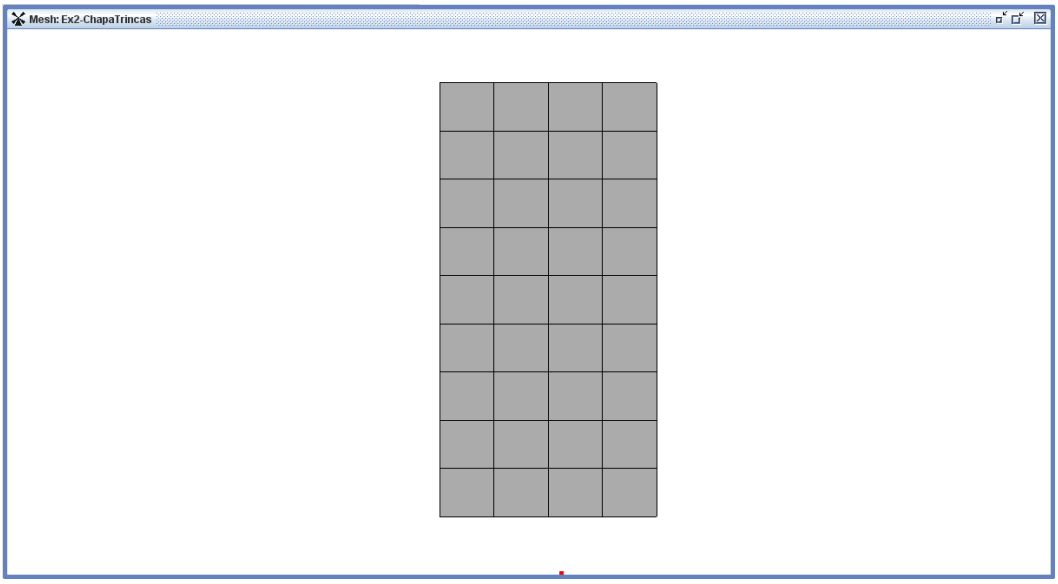

Figura 46: Chapa com trincas: Malha.

No Módulo *Atributos*, definiram-se as condições de contorno e o modelo constitutivo, criaram-se e atribuíram-se o material, a degeneração e as funções de enriquecimento e modelaram-se as descontinuidades, observadas na Figura 47.

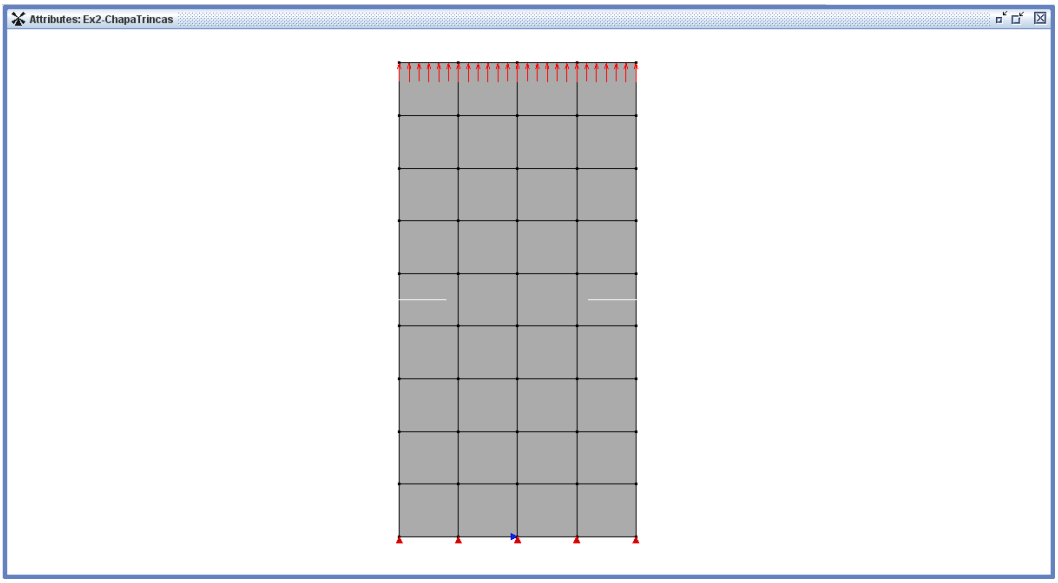

Figura 47: Chapa com trincas: Condições de contorno.

No pós-processador, avaliaram-se os saltos no campo de deslocamentos provocados pela presença das trincas, observados através da deformada apresentada na Figura 48 com fator de escala igual a $0,1$, bem como a magnitude do campo de tensões nas regiões próximas às pontas das trincas, observada através da variação da tensão σ_{yy} ao longo do domínio apresentada na Figura 49.

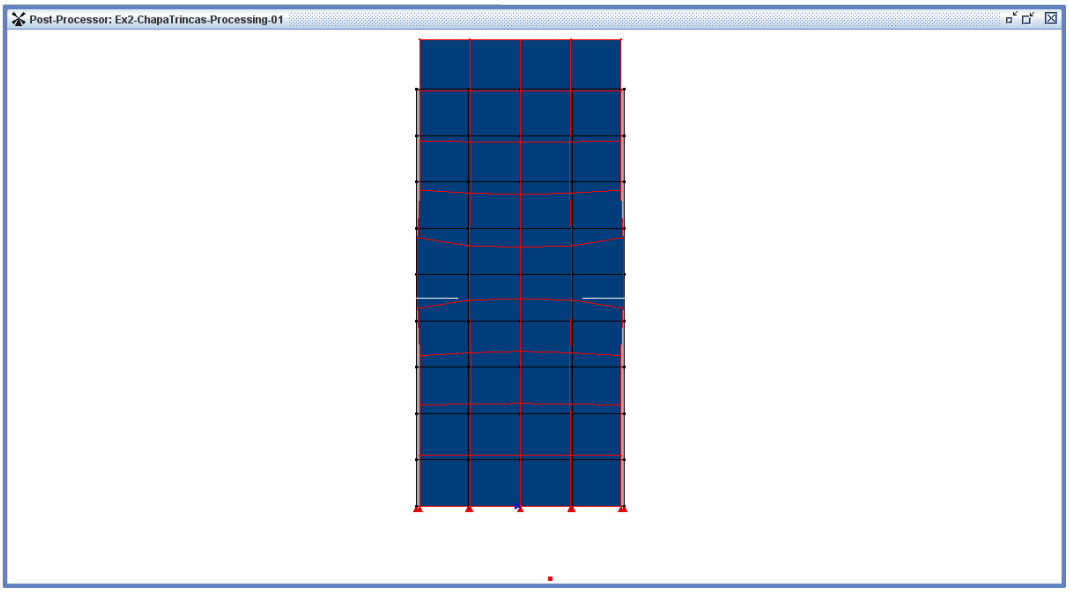

Figura 48: Chapa com trincas: Deformada.

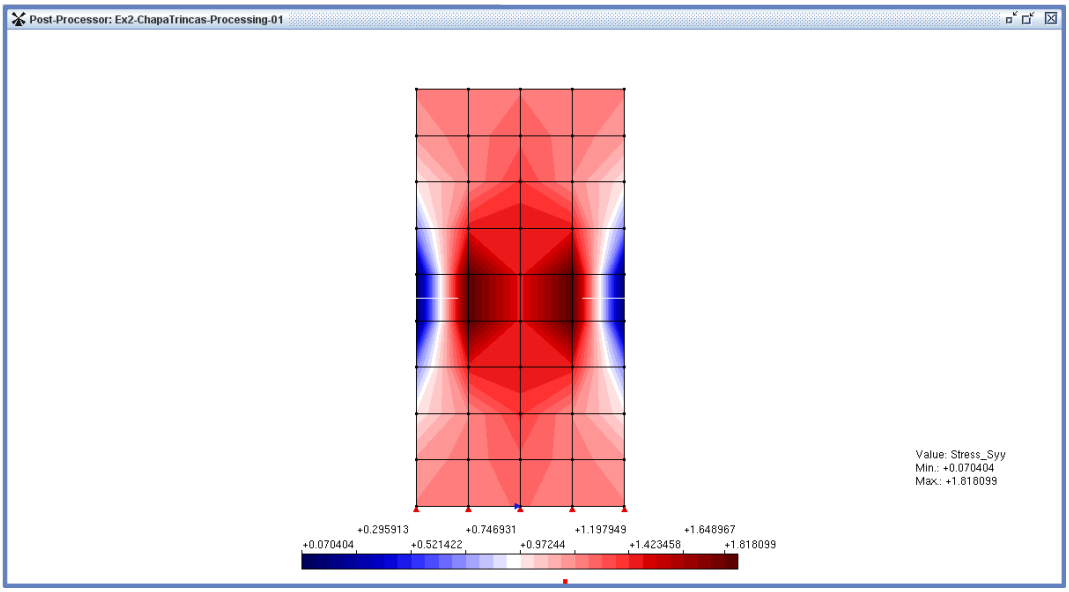

Figura 49: Chapa com trincas: Tensão σ_{yy}.

Exemplo 3: Barragem Submetida à Carga Hidrostática

A barragem submetida à carga hidrostática, cujas geometria, vinculação e cargas são ilustradas na Figura 50, foi modelada no ambiente gráfico objetivando-se destacar o emprego deste ambiente para a opção de análise plana estática fisicamente não linear com carregamento no plano pelo MEF.

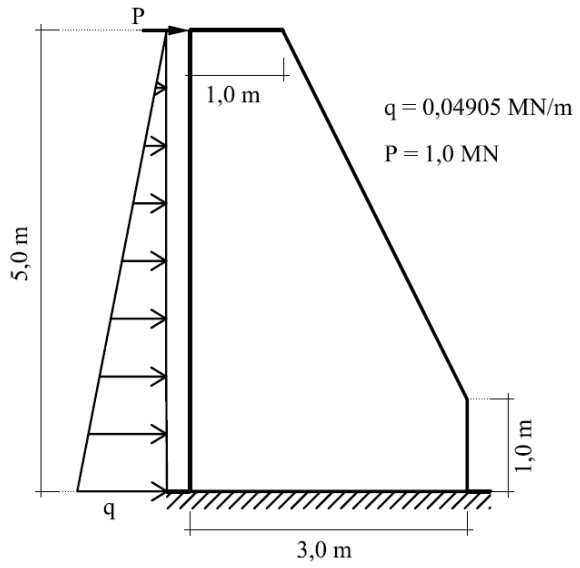

Figura 50: Barragem: Configuração.

Para esta modelagem, adotaram-se os seguintes parâmetros:

- Opção de análise: Carregamento no plano

- Técnica de geração de malhas: Malha com base em Grade

  Dimensão média dos elementos: $0,5\ m$

  Algoritmo gerador da malha: quadrilateral

- Modelo de análise: Estado Plano de Deformação

- Elementos finitos: T3

- Modelo constitutivo: Dano volumétrico por Penna (2011)

- Materiais:

  Material 1:

    Tipo: Inerente ao modelo constitutivo

    Parâmetros:

      Módulo de elasticidade: $E = 30000,0\ MPa$

      Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,2$

      Lei de evolução de dano para tração:

        Tipo: Polinomial

        Parâmetros:

          Deformação equivalente: $\kappa_0 = 0,0002825$

          Limite de resistência equivalente: $f_e = 1,85\ MPa$

          Módulo de elasticidade equivalente: $\tilde{E} = 16666,666\ MPa$

      Lei de evolução de dano para compressão:

        Tipo: Polinomial

        Parâmetros:

          Deformação equivalente: $\kappa_0 = 0,005$

          Limite de resistência equivalente: $f_e = 11,1\ MPa$

          Módulo de elasticidade equivalente: $\tilde{E} = 16666,666\ MPa$

- Degenerações:

  Seção 1:

    Tipo: Degeneração prescrita

    Propriedades:

      Espessura: $1,0\ m$ (segmento unitário)

      Material associado: Material 1

- Carregamentos:

  Não incremental: $q = 0,04905\ MN/m$ (carga triangular)

  Incremental: $P = 1,0\ MN$

- Parâmetros da técnica de solução:

  Processo incremental-iterativo: Newton-Raphson Padrão

  Método de controle: Deslocamento generalizado

  Fator de carga inicial: $0,1$

  Número máximo de passos: 500

  Número máximo de iterações: 100

  Tolerância: $1,0 \times 10^{-4}$

  Tipo de convergência: Magnitude do vetor de deslocamentos incrementais

No Módulo *Geometria*, desenhou-se a geometria da estrutura, conforme apresentado na Figura 51.

Figura 51: Barragem: Geometria.

No Módulo *Malha*, discretizou-se a geometria da estrutura, conforme apresentado na Figura 52, e definiram-se a especialização da análise e o tipo de elemento finito.

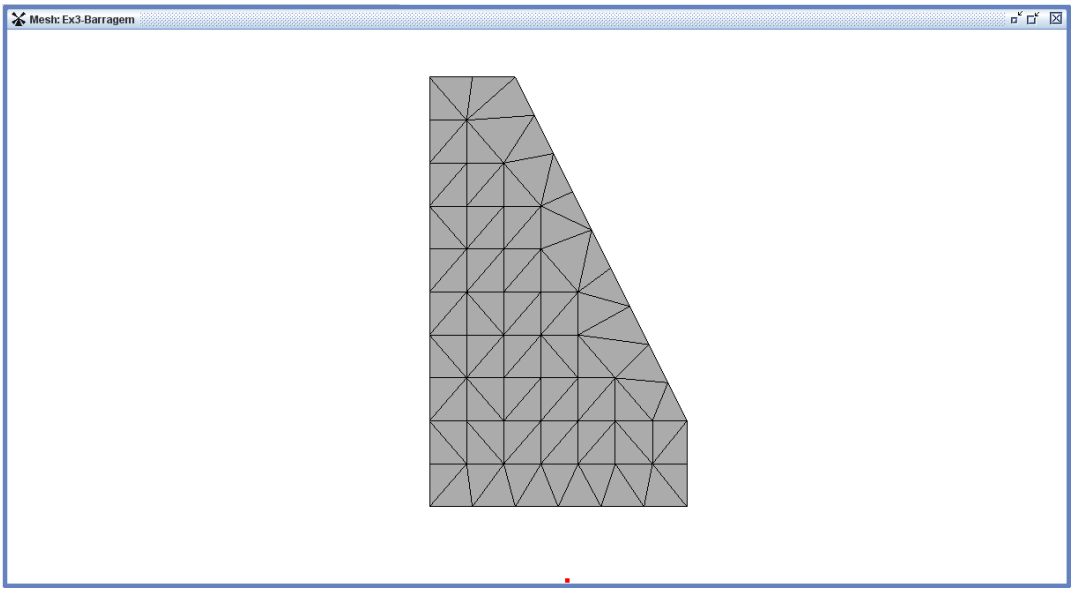

Figura 52: Barragem: Malha.

No Módulo *Atributos*, definiram-se as condições de contorno e o modelo constitutivo, criaram-se e atribuíram-se o material e a degeneração. Na Figura 53, apresenta-se a geometria da estrutura discretizada com as condições de contorno.

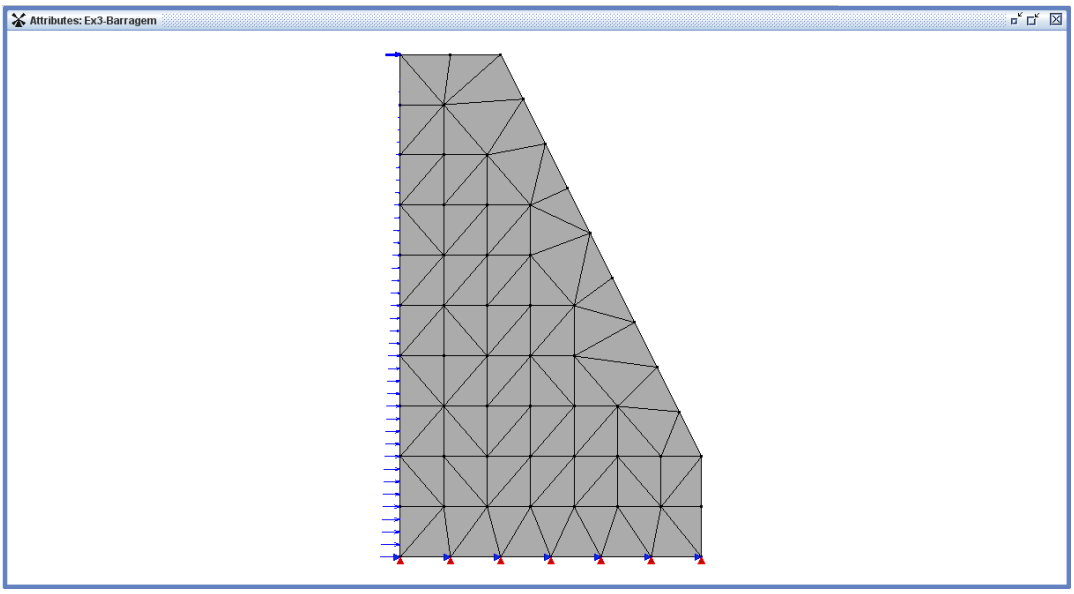

Figura 53: Barragem: Condições de contorno.

Na sequência, definiram-se os parâmetros da técnica de solução e processou-se a análise. No pós-processador, avaliaram-se a deformada no passo 500 ($P = 0,33\ MN$), apresentada na Figura 54 com fator de escala igual a 10, e a trajetória de equilíbrio correspondente ao deslocamento horizontal do ponto de aplicação da carga incremental, apresentada na Figura 55.

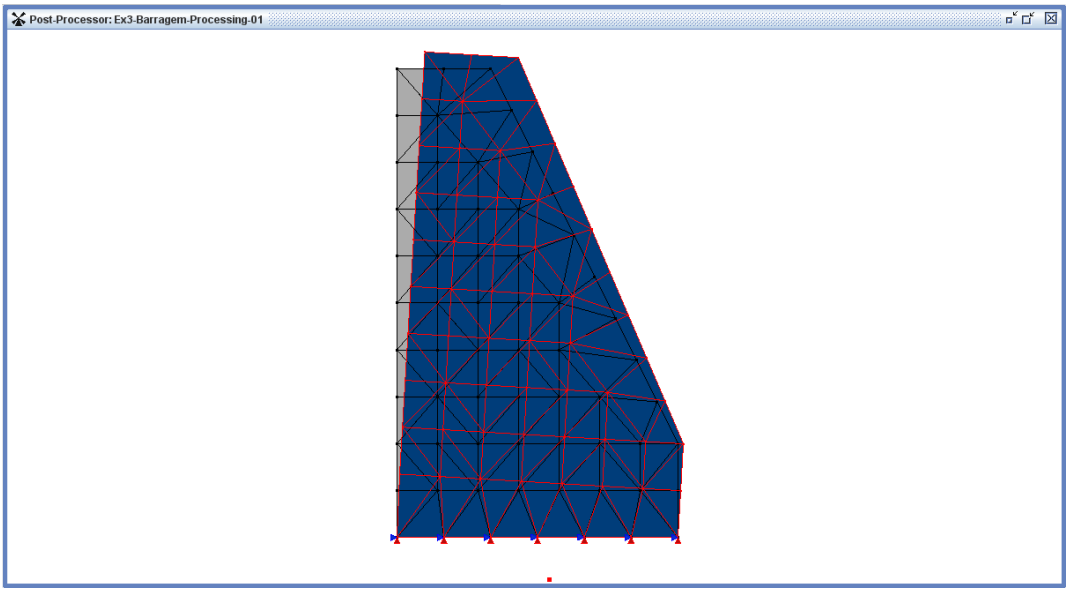

Figura 54: Barragem: Deformada no passo 500 ($P = 0,33\ MN$).

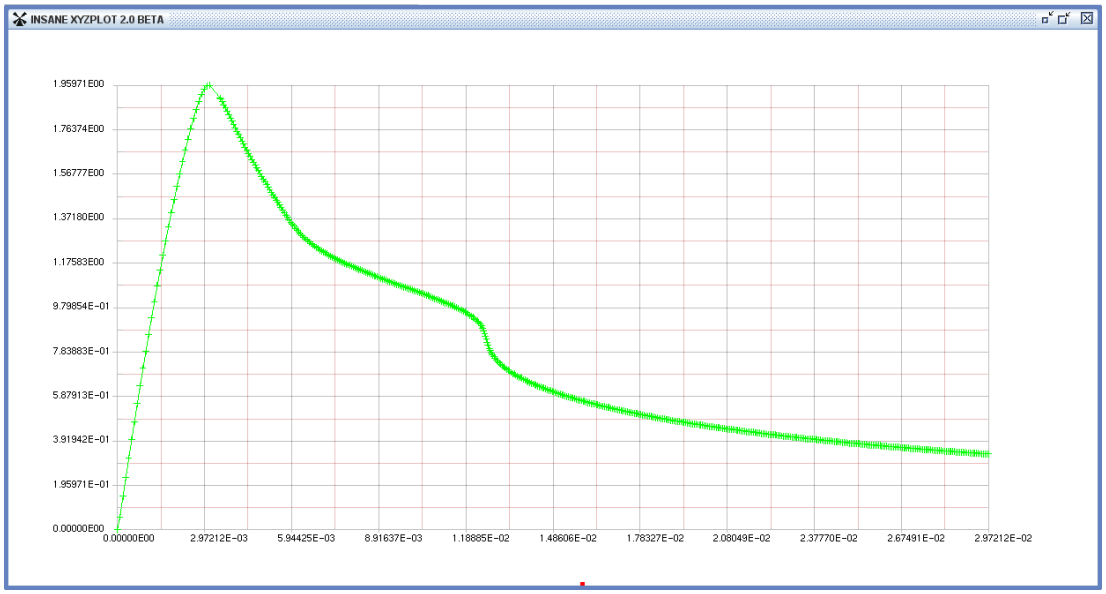

Figura 55: Barragem: Fator de carga × Deslocamento horizontal do nó sob P.

Exemplo 4: Viga Pré-tensionada sob Flexão

A viga pré-tensionada sob flexão, cujas geometria, vinculações e cargas são ilustradas na Figura 56, foi simulada no ambiente gráfico objetivando-se destacar o emprego deste ambiente para a opção de análise plana estática fisicamente não linear com carregamento no plano pelo MEFG.

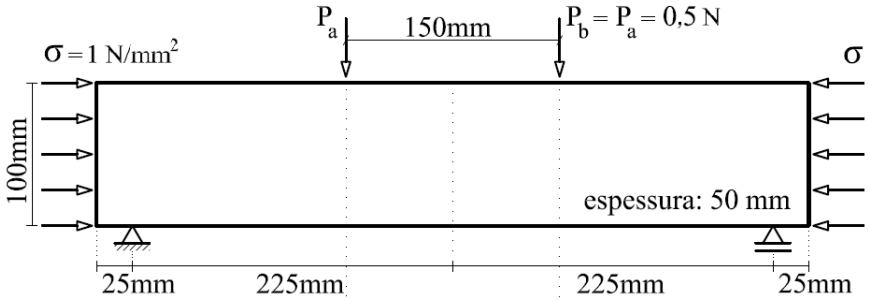

Figura 56: Viga pré-tensionada: Configuração.

Nesta simulação, enriqueceram-se os nós do modelo com função polinomial composta pelos monômios x e y. Sendo esta função incidente em todas as direções definidas pelos graus de liberdade nodal convencionais e acrescido um grau de liberdade nodal para cada monômio por direção, tiveram-se acrescidos 4 graus de liberdade por nó. Através deste enriquecimento, as funções interpoladoras lineares dos elementos finitos quadrilaterais de quatro nós ($Q4$), empregados nesta análise, foram aprimoradas para funções quadráticas.

Para esta modelagem, adotaram-se os seguintes parâmetros:

- Opção de análise: Carregamento no plano
- Técnica de geração de malhas: Mapeamento Transfinito
- Modelo de análise: Estado Plano de Tensão
- Elementos finitos: Q4
- Modelo constitutivo: Fissuras distribuídas com direção de fissuração fixa

- Materiais:

  Material 1:

  Tipo: Leis bilineares para tração e para compressão

  Parâmetros:

  Módulo de elasticidade elástico: $E_0 = 32000,0\ N/mm^2$

  Módulo tangente do ramo descendente: $E_2 = 3000,0\ N/mm^2$

  Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,2$

  Tensão limite de resistência à compressão: $f_c = 30,0\ N/mm^2$

  Tensão limite de resistência à tração: $f_t = 3,0\ N/mm^2$

  Comprimento característico: $h = 50\ mm$

  Energia de fratura: $G_f = 0,06\ N/mm$

  Fator de retenção ao cisalhamento: $\beta_r = 0,0$

- Degenerações:

  Seção 1:

  Tipo: Degeneração prescrita

  Propriedades:

  Espessura: $50\ mm$

  Material associado: Material 1

- Funções de enriquecimento nodal:

  Enriquecimento 1:

  Tipo: Polinomial

  Parâmetros:

  Número de monômios: 2

  Expoentes p e q do 1º monômio $x^p y^q$: 1 0

  Expoentes p e q do 2º monômio $x^p y^q$: 0 1

- Carregamentos:

Não incremental: $\sigma = 1,0\ N/mm^2$ aplicada como $f_x = 50,0\ N/mm$

Incremental: $P_a = P_b = 0,5\ N$

- Parâmetros da técnica de solução:

Processo incremental-iterativo: Newton-Raphson Padrão

Método de controle: Deslocamento generalizado

Fator de carga inicial: $10,0$

Número máximo de passos: 1500

Número máximo de iterações: 200

Tolerância: $1,0 \times 10^{-4}$

Tipo de convergência: Magnitude do vetor de deslocamentos incrementais

No Módulo *Geometria*, desenhou-se a geometria da estrutura, conforme apresentado na Figura 57.

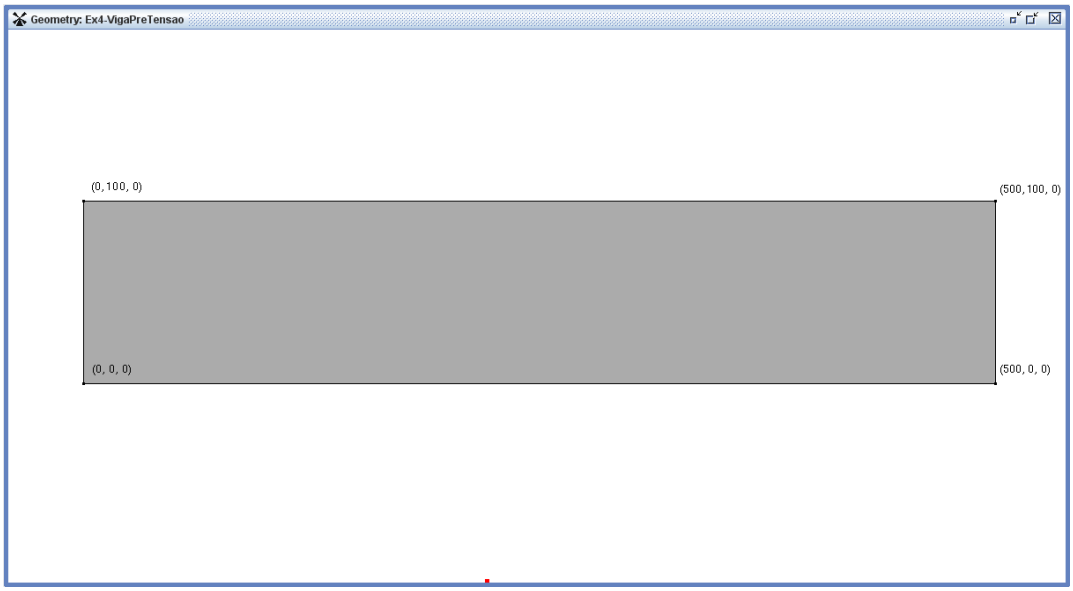

Figura 57: Viga pré-tensionada: Geometria.

No Módulo *Malha*, discretizou-se a geometria da estrutura, conforme apresentado na Figura 58, e definiram-se a especialização da análise e o tipo de elemento finito.

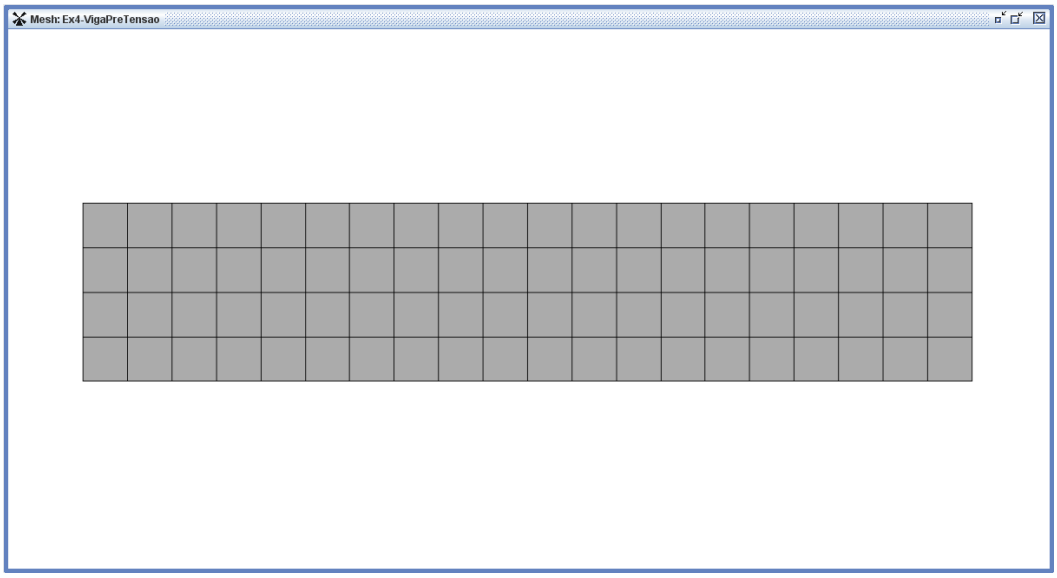

Figura 58: Viga pré-tensionada: Malha.

No Módulo *Atributos*, definiram-se as condições de contorno e o modelo constitutivo, criaram-se e atribuíram-se o material, a degeneração e a função de enriquecimento. Na Figura 59, apresenta-se a geometria da estrutura discretizada com as condições de contorno.

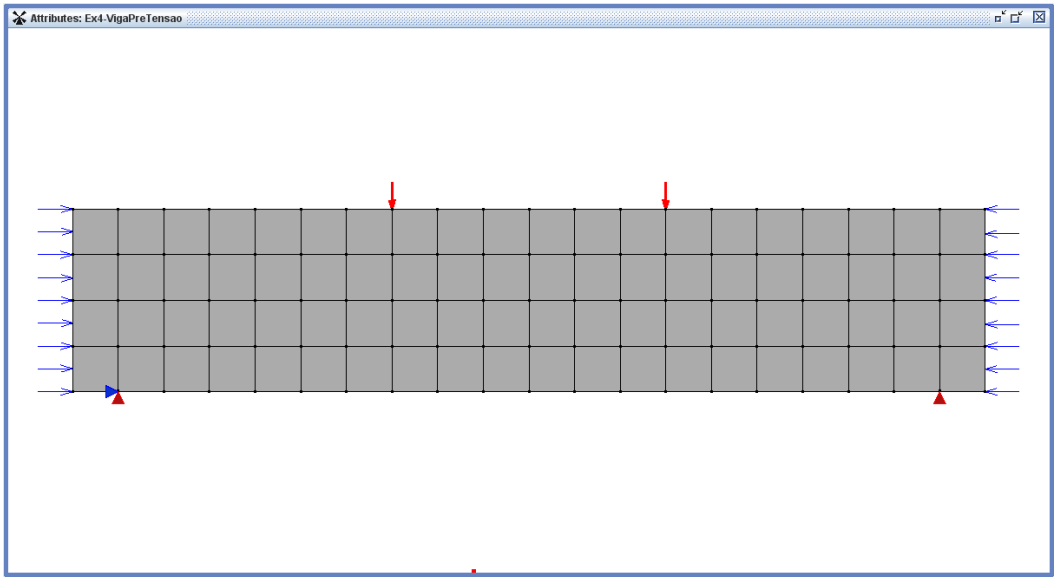

Figura 59: Viga pré-tensionada: Condições de contorno.

Na sequência, definiram-se os parâmetros da técnica de solução e processou-se a análise. No pós-processador, avaliaram-se a variação do dano na direção de ε_1 ao longo do domínio no passo 1500 ($P_a = 1,81\ kN$), apresentada na Figura 60, e a trajetória de equilíbrio correspondente ao deslocamento vertical do ponto de aplicação da carga P_a, apresentada na Figura 61.

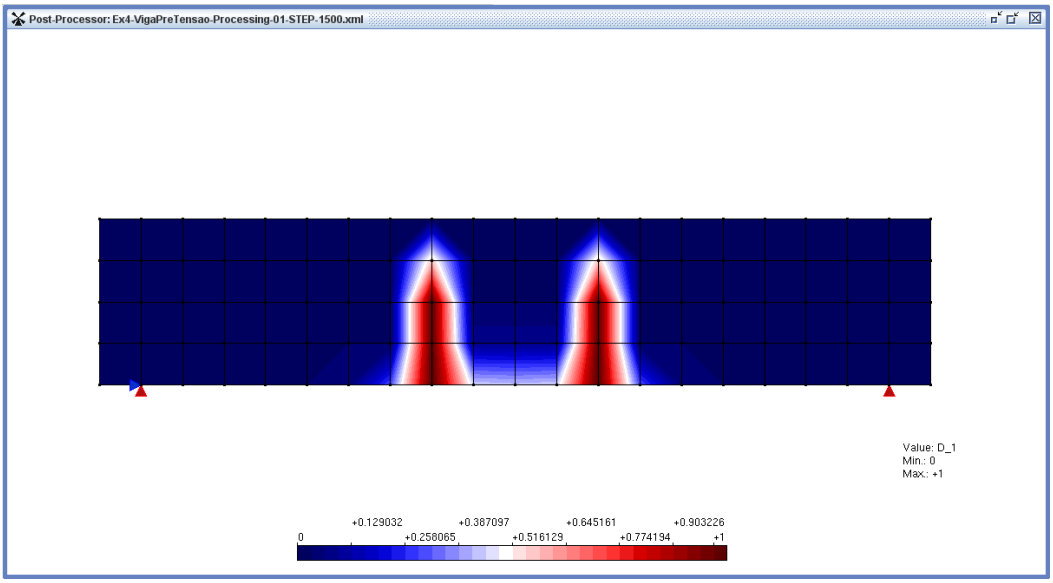

Figura 60: Viga pré-tensionada: Dano na direção de ε_1 no passo 1500 ($P_a = 1,81\ kN$).

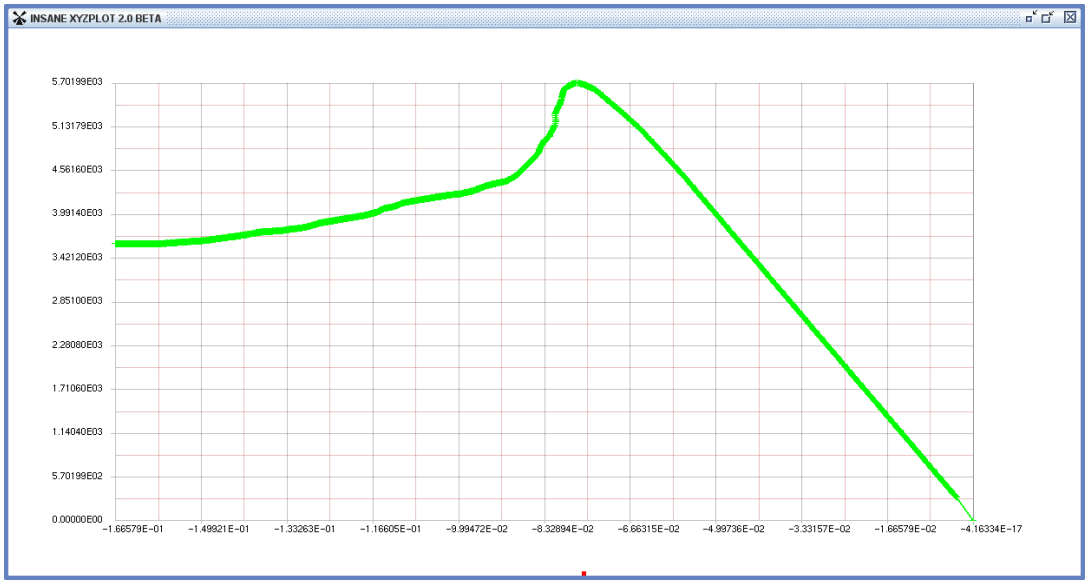

Figura 61: Viga pré-tensionada: Fator de carga × Deslocamento vertical sob P_a.

Exemplo 5: Viga com Pré-trinca sob Flexão

A viga com pré-trinca sob flexão, cujas geometria, vinculações e carga são ilustradas na Figura 62, foi modelada no ambiente gráfico objetivando-se demonstrar a capacidade do recurso de modelagem de descontinuidades preexistentes na estrutura, aplicável à opção de análise com carregamento no plano. Por serem simuladas por meio de funções de enriquecimento nodal, a existência destas descontinuidades no modelo condiciona a análise ao MEFG.

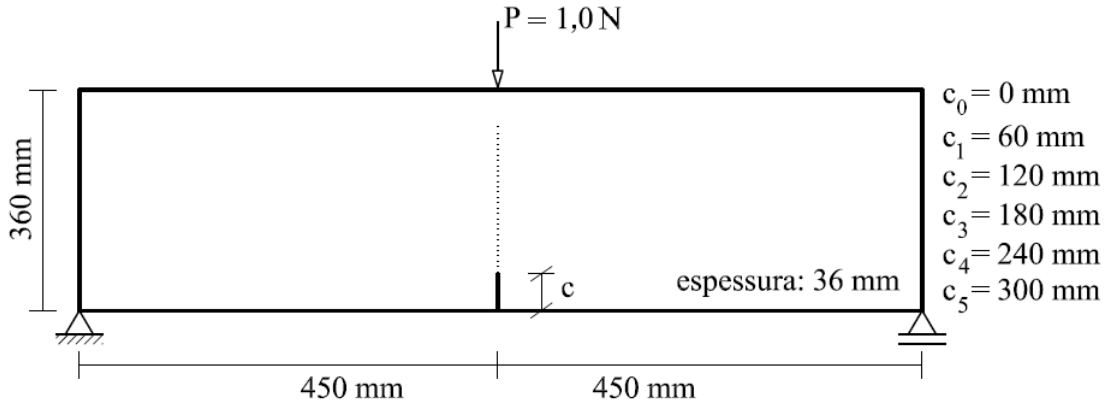

Figura 62: Viga com pré-trinca: Configuração.

Através deste exemplo, avaliou-se a ductilidade estrutural de uma viga submetida à flexão em três pontos. A partir do crescimento de uma trinca inicial, verificou-se a repercussão da variação da altura efetiva da viga no seu comportamento estrutural. As dimensões da viga foram mantidas constantes e o comprimento da trinca foi aumentado em cada análise.

Nesta simulação, os diversos estágios da trinca foram modelados através do recurso que permite considerá-la sem a necessidade de introduzi-la na geometria do modelo. A partir deste recurso, as descontinuidades preexistentes são simuladas por meio de funções degrau, que consistem em funções de enriquecimento nodal, porém, criadas e atribuídas aos nós necessários pelo programa, cabendo ao analista apenas a definição dos pontos inicial e final destas descontinuidades.

Para esta modelagem, adotaram-se os seguintes parâmetros:

- Opção de análise: Carregamento no plano

- Técnica de geração de malhas: Mapeamento Transfinito

- Modelo de análise: Estado Plano de Tensão

- Elementos finitos: Q4

- Modelo constitutivo: Fissuras distribuídas com direção de fissuração fixa

- Materiais:

    Material 1:

    Tipo: Carreira e Chu (1985), compressão, Boone et al. (1986), tração

    Parâmetros:

    Módulo de elasticidade elástico: $E_0 = 44000,0\ N/mm^2$

    Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,2$

    Tensão limite de resistência à compressão: $f_c = 40,0\ N/mm^2$

    Tensão limite de resistência à tração: $f_t = 3,8\ N/mm^2$

    Deformação relativa ao limite elástico na compressão: $\varepsilon_c = 0,0018$

    Energia de fratura: $G_f = 0,164\ N/mm$

    Comprimento característico: $h = 100\ mm$

    Fator de retenção ao cisalhamento: $\beta_r = 0,05$

- Degenerações:

    Seção 1:

    Tipo: Degeneração prescrita

    Propriedades:

    Espessura: 36 mm

    Material associado: Material 1

- Descontinuidades (entalhes):

Descontinuidade 1:

Tipo: Simulada pelo MEFG

Parâmetros:

1ª Análise (C_0): Sem trinca

2ª Análise (C_1): $\begin{cases} \text{Ponto inicial } (x\ y)\text{: } (450,0\ \ 0,0) \\ \text{Ponto final } (x\ y)\text{: } (450,0\ \ 60,0) \end{cases}$

3ª Análise (C_2): $\begin{cases} \text{Ponto inicial } (x\ y)\text{: } (450,0\ \ 0,0) \\ \text{Ponto final } (x\ y)\text{: } (450,0\ \ 120,0) \end{cases}$

4ª Análise (C_3): $\begin{cases} \text{Ponto inicial } (x\ y)\text{: } (450,0\ \ 0,0) \\ \text{Ponto final } (x\ y)\text{: } (450,0\ \ 180,0) \end{cases}$

5ª Análise (C_4): $\begin{cases} \text{Ponto inicial } (x\ y)\text{: } (450,0\ \ 0,0) \\ \text{Ponto final } (x\ y)\text{: } (450,0\ \ 240,0) \end{cases}$

6ª Análise (C_5): $\begin{cases} \text{Ponto inicial } (x\ y)\text{: } (450,0\ \ 0,0) \\ \text{Ponto final } (x\ y)\text{: } (450,0\ \ 300,0) \end{cases}$

- Carregamentos:

Incremental: $P = 1,0\ N$

- Parâmetros da técnica de solução:

Processo incremental-iterativo: Newton-Raphson Padrão

Método de controle: Comprimento de arco cilíndrico

Fator de carga inicial: $500,0$

Número máximo de passos: 200

Número máximo de iterações: 100

Tolerância: $1,0 \times 10^{-4}$

Tipo de convergência: Magnitude do vetor de deslocamentos incrementais

No Módulo *Geometria*, desenhou-se a geometria da estrutura, conforme apresentado na Figura 63.

Figura 63: Viga com pré-trinca: Geometria.

No Módulo *Malha*, discretizou-se a geometria da estrutura, conforme apresentado na Figura 64, e definiram-se a especialização da análise e o tipo de elemento finito.

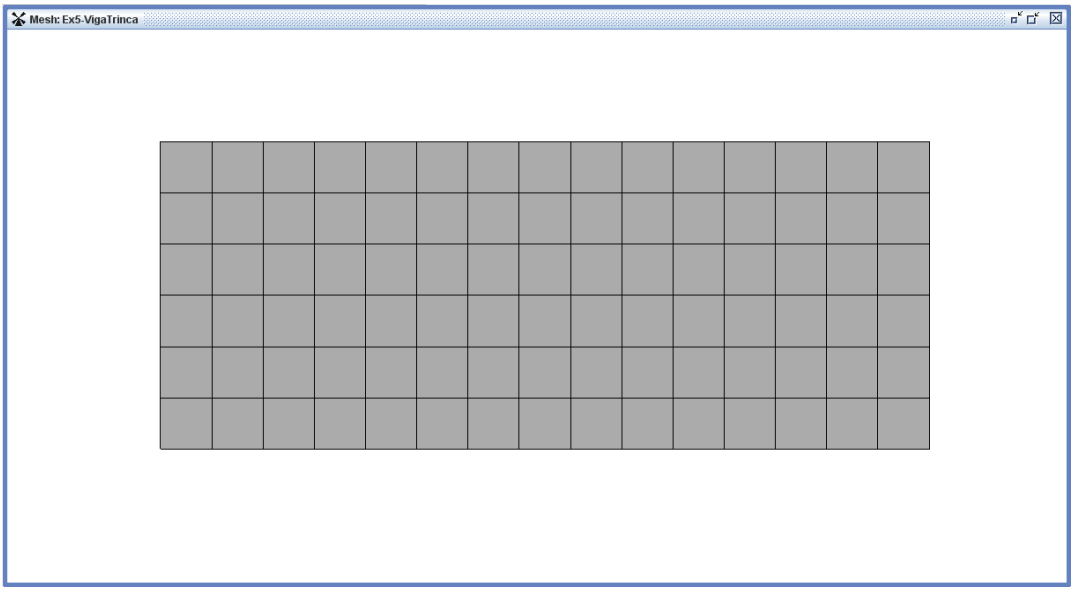

Figura 64: Viga com pré-trinca: Malha.

No Módulo *Atributos*, definiram-se as condições de contorno e o modelo constitutivo, criaram-se e atribuíram-se o material e a degeneração e modelou-se em cada análise a descontinuidade correspondente. Na Figura 65, apresenta-se a geometria da estrutura discretizada com as condições de contorno, destacando-se a descontinuidade C_3, correspondente à 4ª análise.

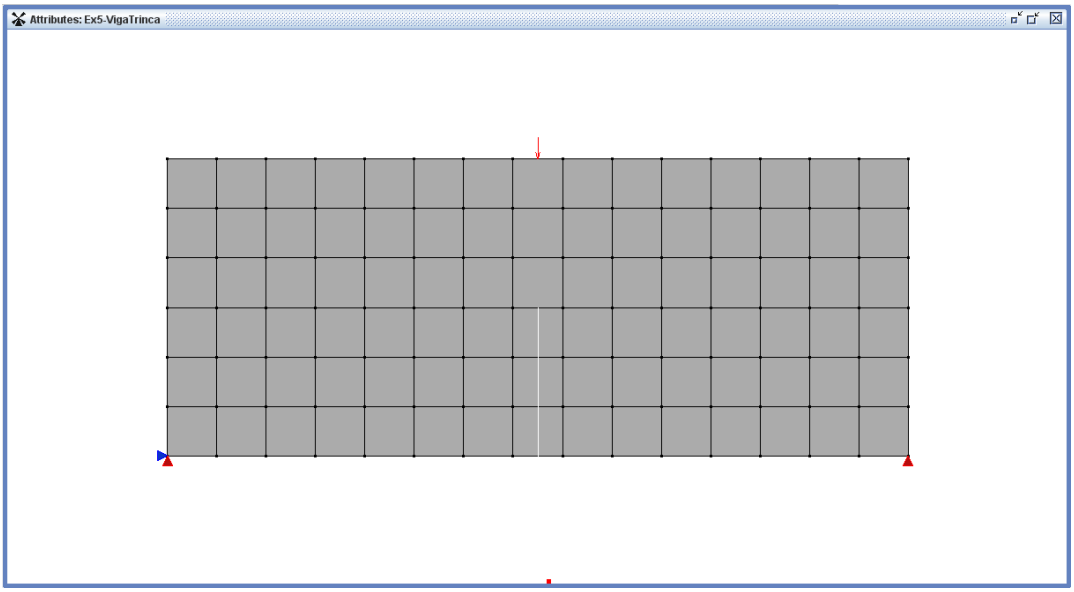

Figura 65: Viga com pré-trinca: Condições de contorno.

Na sequência, definiram-se os parâmetros da técnica de solução e processou-se a análise. No pós-processador, avaliaram-se o salto no campo de deslocamentos, ilustrado na Figura 66 por meio da deformada da 4ª análise (C_3) no passo 200 ($P = 7,4\ kN$), apresentada com fator de escala igual a 100, e a concentração de tensões na região próxima à ponta da trinca, ilustrada na Figura 67 através da variação da tensão σ_{xx} ao longo do domínio naquele mesmo passo, daquela mesma análise. A partir da avaliação do salto no campo de deslocamentos e da concentração de tensões na região próxima à ponta da trinca, destaca-se a capacidade do recurso de modelagem de descontinuidades preexistentes na estrutura simular os efeitos da presença de pré-trincas sem a necessidade de introduzi-las na geometria do modelo.

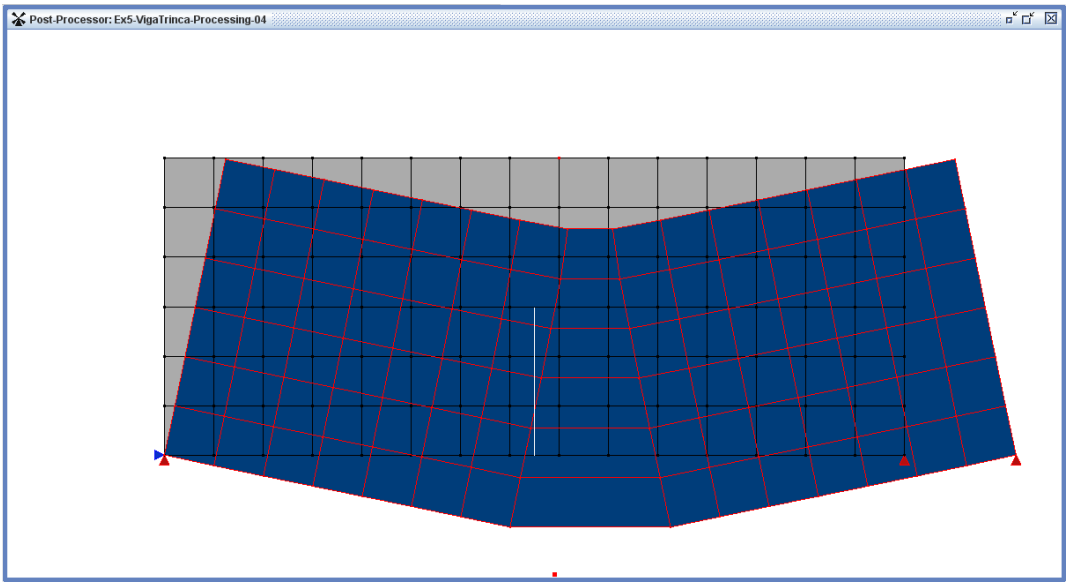

Figura 66: Viga com pré-trinca: Deformada no passo 200 ($P = 7,4\ kN$).

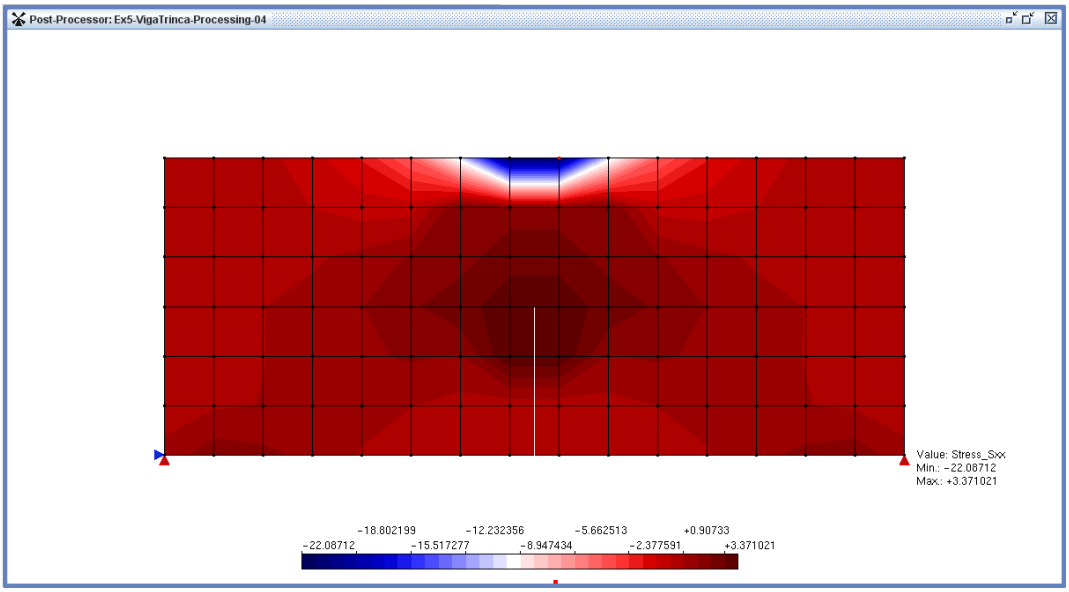

Figura 67: Viga com pré-trinca: Tensão σ_{xx} no passo 200 ($P = 7,4\ kN$).

Na Figura 68, apresentam-se as trajetórias de equilíbrio correspondentes ao deslocamento vertical do ponto de aplicação da carga P. As análises podem ser identificadas pelo valor da carga máxima, que reduziu à medida que se aumentou o comprimento da trinca. Através deste comparativo, a repercussão da variação da altura efetiva da viga no seu comportamento estrutural pôde ser avaliada.

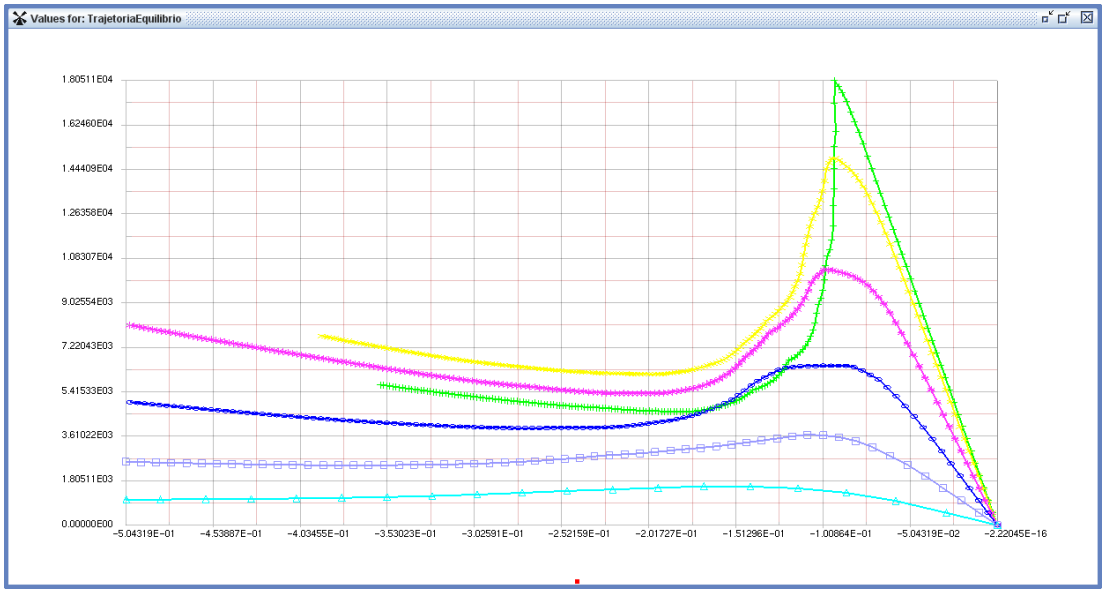

Figura 68: Viga com pré-trinca: Fator de carga $\times$ Deslocamento vertical sob P.

Observa-se que, quanto maior a altura efetiva da viga, mais acentuado é o ramo descendente da trajetória de equilíbrio e menor é o valor em módulo do deslocamento associado à carga máxima. Desta forma, verifica-se a conformidade qualitativa dos resultados em termos da ductilidade estrutural da viga, que aumenta com o crescimento da trinca.

Observa-se também que, à medida em que a trinca inicial cresce, o comportamento se assemelha ao efeito da diminuição da altura da viga em um estudo do efeito de tamanho. Logo, os resultados aqui apresentados mostram que é possível ainda simular, qualitativamente, o efeito de tamanho, sem a necessidade de redefinição do modelo para diferentes tamanhos estruturais.

Exemplo 6: Placa Anular com Carga na Borda Interna

A placa anular com carga na borda interna, cujas geometria, vinculação e carga são ilustradas na Figura 69, foi simulada no ambiente gráfico objetivando-se destacar o emprego deste ambiente para a opção de análise plana estática linear com carregamento normal ao plano (placas) pelo MEF.

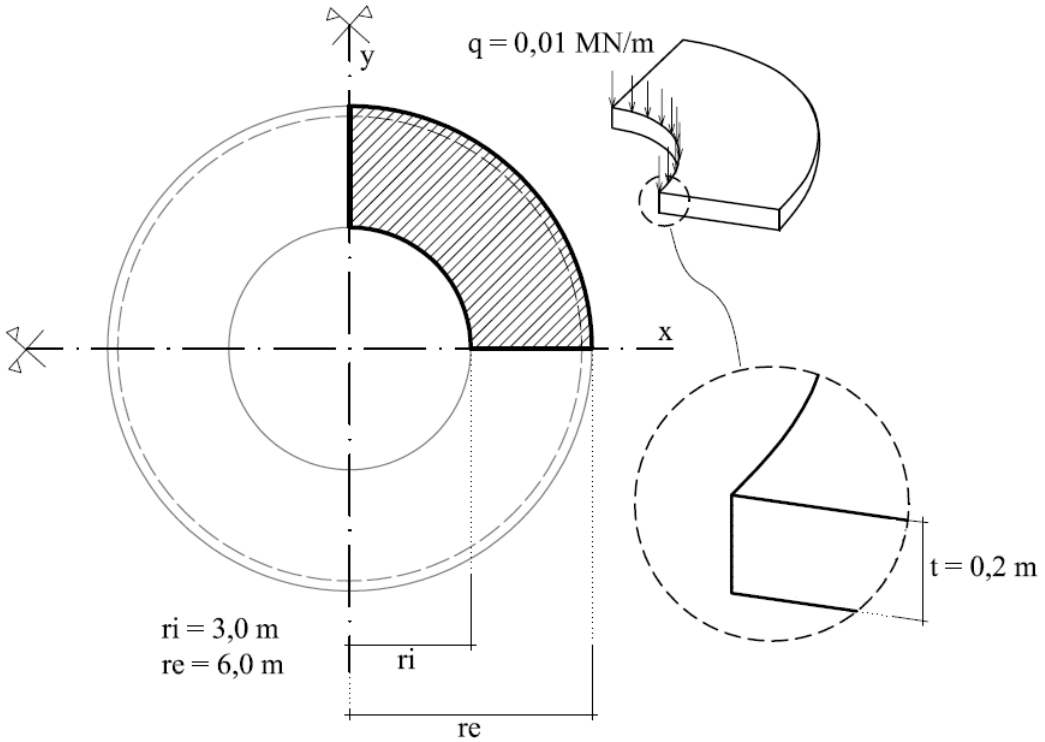

Figura 69: Placa anular: Configuração.

Para esta modelagem, adotaram-se os seguintes parâmetros:

- Opção de análise: Carregamento normal ao plano (placas)
- Técnica de geração de malhas: Mapeamento Transfinito
- Modelo de análise: Placa de Reissner Mindlin
- Elementos finitos: Q8
- Modelo constitutivo: Linear elástico

- Materiais:

  Material 1:

  Tipo: Linear elástico isotrópico

  Parâmetros:

  Módulo de elasticidade: $E = 28000,0\ MPa$

  Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,2$

- Degenerações:

  Seção 1:

  Tipo: Degeneração prescrita

  Propriedades:

  Espessura: $0,2\ m$

  Material associado: Material 1

- Carregamentos:

  Não incremental: $q = 0,01\ MN/m$

No Módulo *Geometria*, desenhou-se a geometria da estrutura, conforme apresentado na Figura 70.

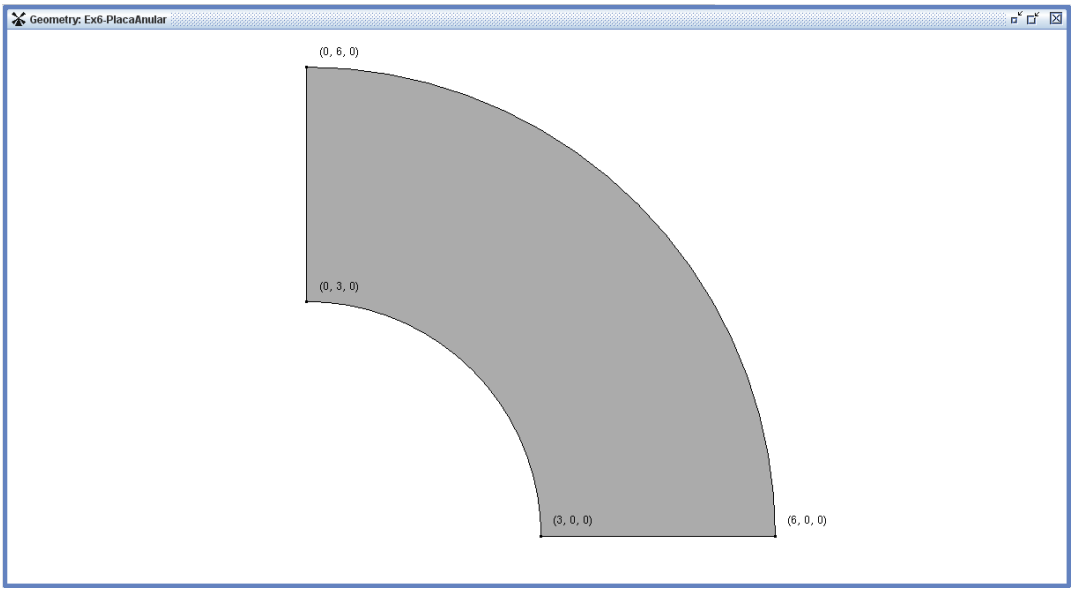

Figura 70: Placa anular: Geometria.

No Módulo *Malha*, discretizou-se a geometria da estrutura, conforme apresentado na Figura 71, e definiram-se a especialização da análise e o tipo de elemento finito.

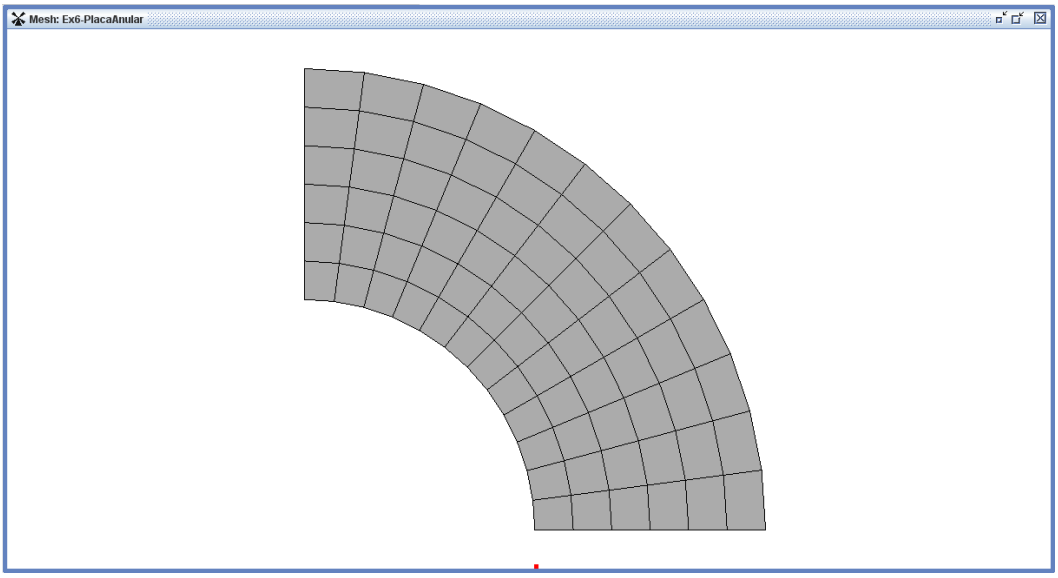

Figura 71: Placa anular: Malha.

No Módulo *Atributos*, definiram-se as condições de contorno, criaram-se e atribuíram-se o material e a degeneração. Ressalta-se que, nesta opção de análise, não se define o modelo constitutivo, condicionado ao linear elástico. Na Figura 72, apresenta-se a geometria da estrutura discretizada com as condições de contorno.

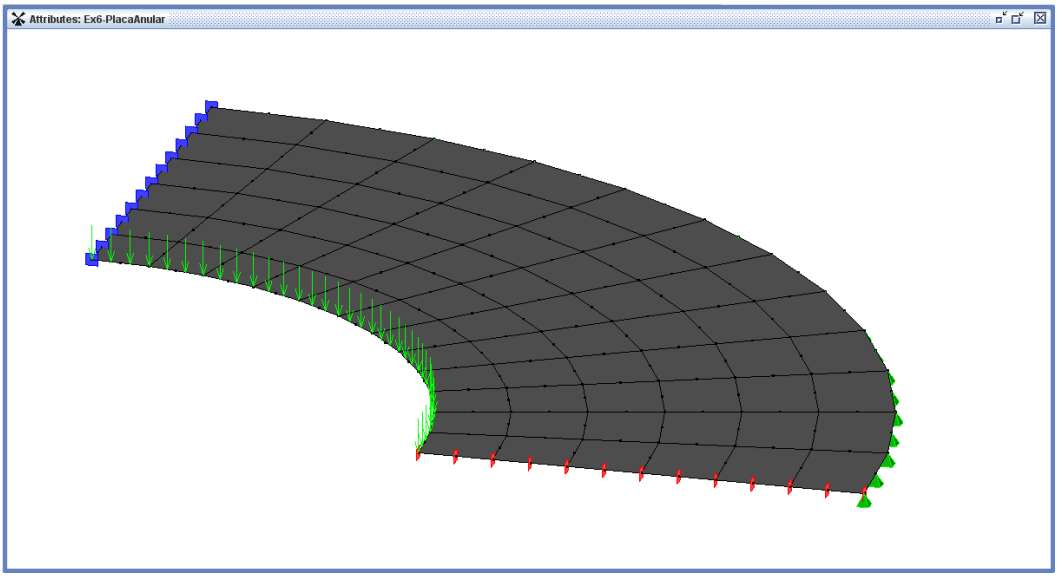

Figura 72: Placa anular: Condições de contorno.

No pós-processador, avaliaram-se a deformada, apresentada na Figura 73 com fator de escala igual a 20, e a variação da flecha ao longo do domínio, apresentada na Figura 74.

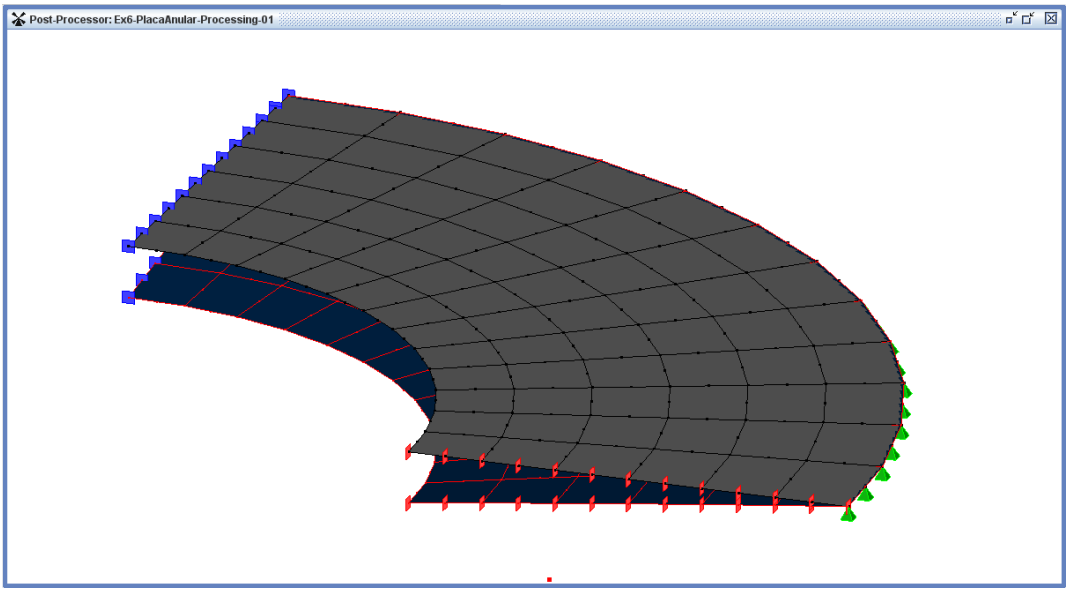

Figura 73: Placa anular: Deformada.

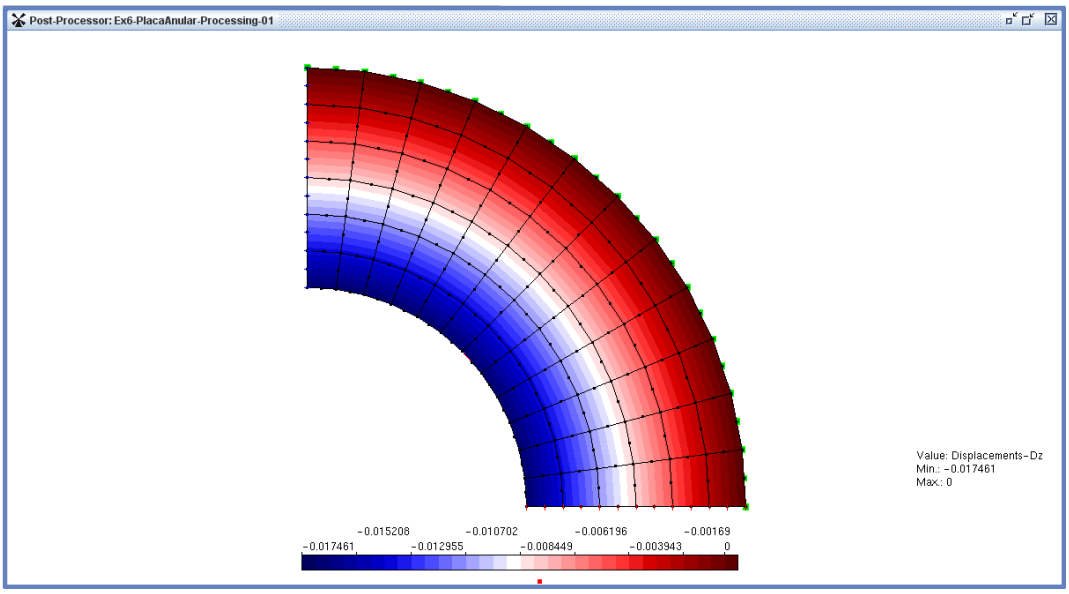

Figura 74: Placa anular: Deslocamento D_z.