
Muro de Arrimo a Flexão

Tutorial da Interface dos Programas GiD e xFram

Prof. Dr. Edgard S Almeida Neto, 30/09/2018
Escola Politécnica da USP

Conteúdo:

1	Muro à Flexão	1
2	Construção do Modelo Sólido no Programa GiD	4
2.1	Criação de Pontos	4
2.2	Traçado das Linhas Retas	5
3	Geração de Dados para o Programa xFram	6
3.1	Forças Distribuídas Uniformes Aplicadas a Linhas do Modelo	8
3.2	Forças Linearmente Distribuídas Aplicadas a Linhas do Modelo.....	8
3.3	Propriedades do Material e da Seção Transversal.....	9
3.4	Título, Tipo de Análise, Unidades e Eixo de Referência para as Forças Distribuídas.....	11
3.5	Geração da Malha de Elementos Finitos	12
3.6	Gravação do Arquivo de Dados.....	13
4	Pós-Processamento.....	13
5	Apresentação dos Resultados.....	16
6	Arquivo de Resultados	19
6.1	Reações de Apoio.....	19
6.2	Tensões Extremas nas Seções Transversais	19

1 Muro à Flexão

O objetivo deste tutorial é apresentar um modelo reticulado para a análise estrutural do muro de arrimo à flexão da Fig. 1 submetido a forças distribuídas de superfície (empuxos representando a interação com o solo) e de volume (peso próprio do muro). O enunciado completo do problema e sua resolução por diversos métodos podem ser encontrados no artigo de Pedro W. Teixeira [2018].

O modelo é composto por barras verticais representando a parede e barras horizontais sobre apoio elástico representando a laje. Barras auxiliares na extremidade direita da laje facilitam a aplicação dos empuxos, enquanto nós representando as seções da ligação parede-laje possibilitam o cálculo automático dos esforços solicitantes e das tensões nessas seções, Fig. 2.

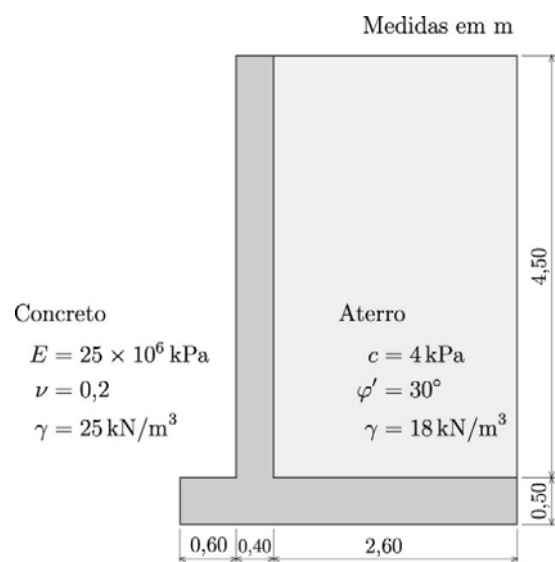
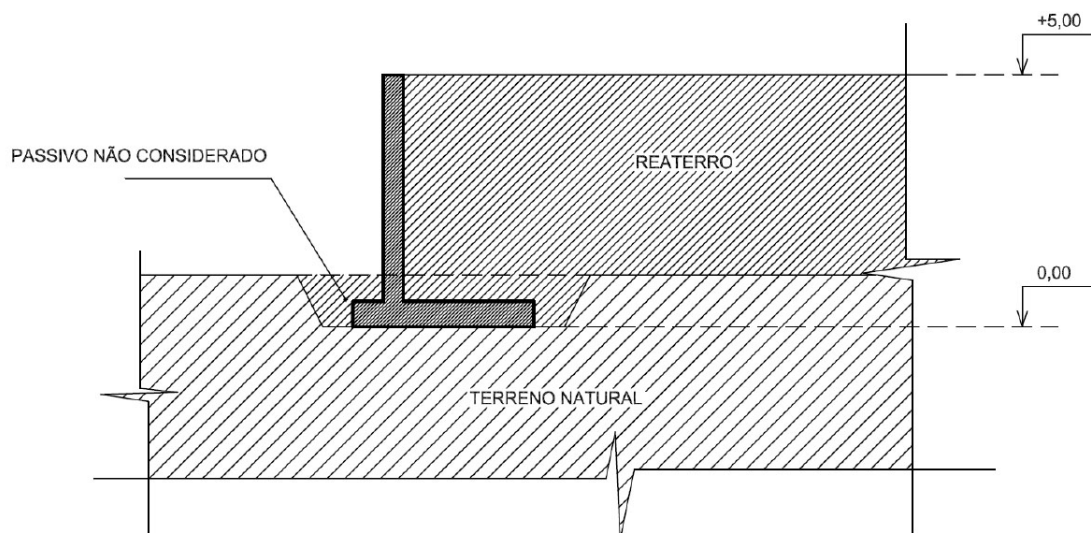


Fig. 1: Geometria do muro de arrimo à flexão e propriedades dos materiais [Pedro W. Teixeira, 2018].

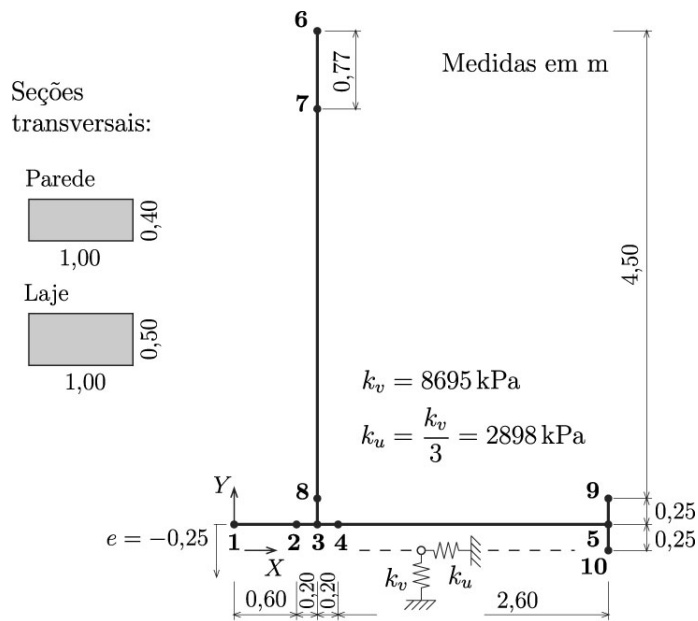


Fig. 2: Pontos de referência das seções do modelo e coeficientes de mola da fundação de Winkler.

Os esforços distribuídos que compõem o carregamento, incluindo os empuxos de solo e os pesos do muro e do aterro, estão esquematizados na Fig. 3.

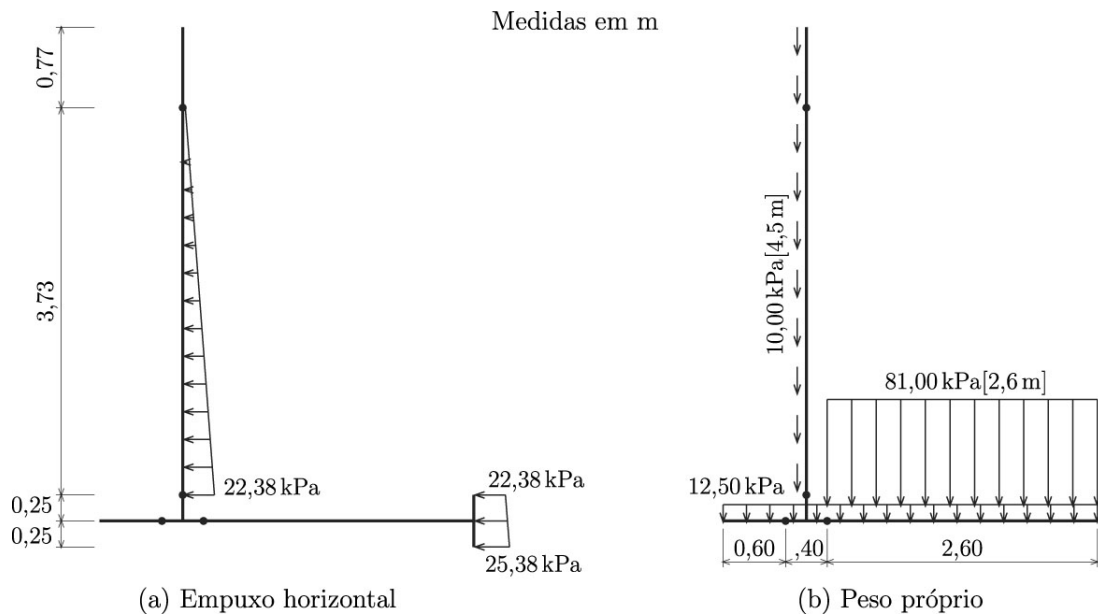



Fig. 3: Esforços distribuídos aplicados ao muro.

Na próxima seção, construiremos um modelo reticulado a partir dos pontos e segmentos de reta indicados na Fig. 2, o qual será usado para descrever a geometria e as condições de contorno do modelo.

2 Construção do Modelo Sólido no Programa GiD

O usuário deve iniciar o programa GiD e escolher um nome para o modelo ao salvá-lo (*Files > Save*)¹; no tutorial foi adotado o nome 'MuroFlex'. A extensão '.gid' é acrescentada automaticamente quando é criada a pasta em que são armazenados os arquivos do modelo. O mesmo nome é usado para os arquivos de entrada de dados, *MuroFlex.dat*, e de pós-processamento dos resultados da análise, *MuroFlex.post.res*.

2.1 Criação de Pontos

A geração de pontos a partir das coordenadas garante a precisão do modelo reticulado e facilita o traçado das barras e a aplicação das cargas nodais. Para entrar com as coordenadas da Tab. 1, use o comando *Geometry > Create > Point* a partir do menu, conforme mostrado na Fig. 2. Para cada nó, digite as coordenadas separadas por um espaço ou uma vírgula na linha de comando localizada na parte inferior da tela; a tecla ESC interrompe a entrada das coordenadas. Use o comando *View > Zoom > Frame* ou o botão  para ajustar automaticamente a escala do desenho.

Ponto	X	Y	
1	0,00	0,25	Laje
2	0,60	0,25	
3	0,80	0,25	
4	1,00	0,25	
5	3,60	0,25	
6	0,80	5,00	Parede
7	0,80	4,23	
8	0,80	0,50	
9	3,60	0,50	Face direita da laje
10	3,60	0,00	

Tab. 1 Tabela das coordenadas dos pontos.

¹ Não esqueça de salvar o modelo periodicamente.



Fig. 4 Criação de pontos.

2.2 Traçado das Linhas Retas

As linhas são traçadas unindo-se os pontos criados. O acesso ao comando pode ser feito pelo menu, *Geometry > Create > Straight line*, conforme a Fig. 5, ou diretamente pelo atalho na barra vertical de ferramentas. O comando Ctrl-A alterna os modos de criação e seleção de pontos, facilitando a seleção de pontos existentes e evitando a duplicação destes. Use a tecla ESC para interromper o traçado das linhas.

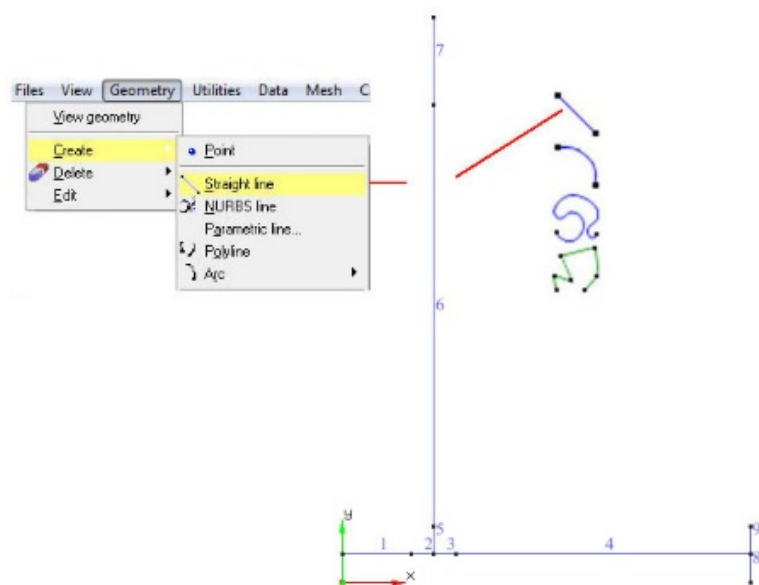


Fig. 5 Criação de segmentos de reta.

3 Geração de Dados para o Programa xFram

Quando a interface do programa xFram é ativada através do menu *Data > Problem type > xFram-Fram2D_v64*, o programa GiD mostra a janela de identificação da interface e disponibiliza os botões de atalho mostrados na Fig. 6. Os arquivos de interface devem permanecer na pasta *problemtypes/xFram-Fram2D_v64.gid* do GiD para que a opção *xFram-Fram2D_v64* apareça no menu.

A ordem em que são percorridas as quatro primeiras janelas da Fig. 6 não tem importância, mas todas as janelas devem ser preenchidas antes da geração da malha de elementos finitos e da criação do arquivo de dados.

As grandezas físicas devem ter unidades consistentes com as unidades fornecidas na janela *Problem types*. Em nosso exemplo: força em kN, comprimento em m, tempo em s e temperatura em °C. Assim, a unidade de força distribuída no contorno para o estado plano de tensão é kN/m² e a densidade de massa, ton/m³.

1. **Uniformly Distributed Loads**
 BAR Uniform load
 Coord system: G
 Loading type: UNIF
 Direction: 2
 q1: -10

2. **Linearly Distributed Loads**
 BAR Level load
 Coord system: G
 Loading type: LEVL
 Direction: 1
 p0: -25.38
 w0: 0
 nu: 6

3. **Cross-Sections and Materials**
 Laje
 CS Attributes | CS Material | CS Winkler Model | CS Dimensions
 CS geom: CS_Rect
 CS Material
 Young modulus: 2.5E7
 Poisson ratio: 0.2
 Mass density: 2.5
 Thermal dilatancy: 1.0E-5
 Temp ref: 25
 CS Winkler Model
 CS ks: 2898
 CS kn: 8695
 CS kr: 0
 CS e: -0.25
 CS Dimensions
 CS d1: 1.0
 CS d2: 0.5
 Diagram:

4. **Problem data**
 Analysis title: MuroFlex
 Analysis model: Fram 2D
 Analysis units: kN m s C
 Level reference axis: 2
 Nodal Reactions
 Shear Deformation
 Winkler Model
 Compute Stress on Bars: 3


5. **Mesh generation**
 Enter size of elements to be generated: 0.2
 Get meshing parameters from mode

6. **Write calculation file**
 Directory: MuroFlex.gid
 Files: MuroFlex-seg.dat, MuroFlex.dat
 File name: MuroFlex.dat
 Files of type: Output data (*.dat)

Fig. 6 Botões de atalho e as respectivas janelas.

3.1 Forças Distribuídas Uniformes Aplicadas a Linhas do Modelo

As forças de peso próprio do muro e do aterro sobre a laje serão aplicadas como forças distribuídas uniformes na direção vertical. Os valores das forças nas linhas encontram-se na Fig. 3-b.

O botão  abre a janela para a entrada de forças distribuídas aplicadas a linhas do modelo. Na janela, selecione *BAR uniform load*, o sistema global G de coordenadas, o tipo UNIF, a direção 2 correspondendo ao eixo global Y, e entre com o valor -10.0; aplique, por meio do botão [Assign], a força distribuída às linhas entre os pontos 6 e 8 da Fig. 2. Introduza as demais forças distribuídas na laje de maneira análoga. O botão [Entities] lista as características das forças aplicadas em uma janela própria, Fig. 9.

As duas linhas verticais à direita são auxiliares e não possuem peso próprio, assim como a linha entre os pontos 3 e 8 na base da parede.

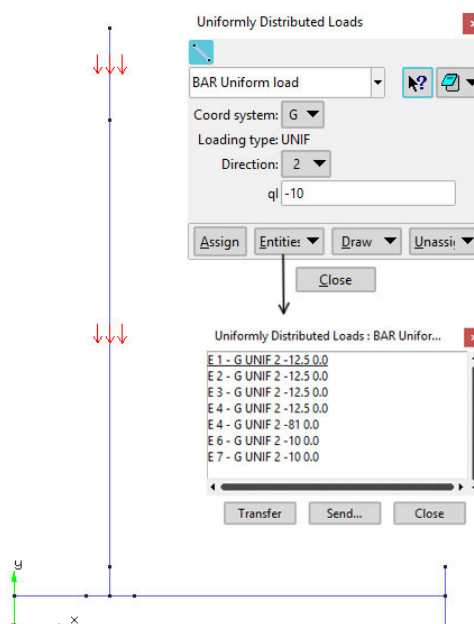



Fig. 7 Linhas da parede carregadas (Draw) e lista das forças uniformes (Entities).

3.2 Forças Linearmente Distribuídas Aplicadas a Linhas do Modelo

O botão  abre a janela para a entrada de forças linearmente distribuídas aplicadas a linhas do modelo. As forças são descritas pela magnitude p_0 que atua na coordenada de referência w_0 mais a variação da força $v = \Delta p / \Delta w$ por unidade de comprimento medida no eixo w de referência. O eixo w é um dos parâmetros da análise e coincide com um dos eixos globais X ou Y , ver seção 3.4 sobre o botão [Problem Data]. O valor da força distribuída em qualquer ponto da linha é calculado por $p(w) = p_0 + v(w - w_0)$, em que w é a coordenada do ponto em relação ao eixo de referência especificado.

Na janela, selecione *BAR Level load*, o sistema global G de coordenadas, a direção 1 associada ao eixo horizontal global X, e entre com os valores $p_0 = -25,38$, $w_0 = 0$ (correspondendo à ordenada da base da laje) e $\nu = (25,38 - 0) / 4,23 = 6\text{kN/m}$. Aplique, por meio do botão [Assign], a força distribuída às linhas verticais entre os pontos 7-8 e 9-5-10 da Fig. 2.

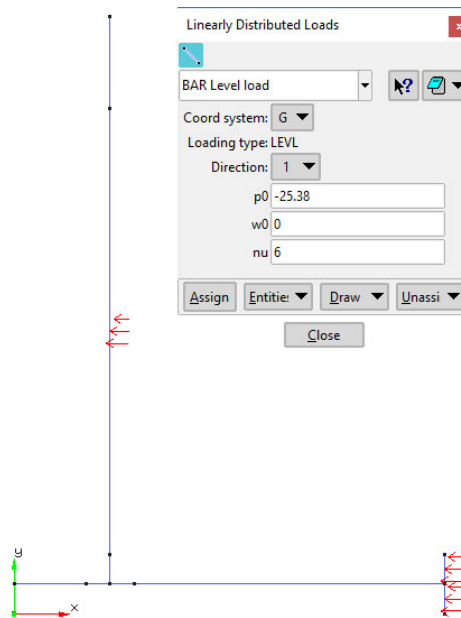


Fig. 8 Linhas carregadas (Draw).

3.3 Propriedades do Material e da Seção Transversal

Acesse a janela de materiais e seções transversais através do botão **Mater & CS**. Primeiro escolha a seção retangular, **CS Rect**; depois clique no botão com a folha em branco, para criar uma nova seção e escolha um nome conveniente como 'Parede' ou 'Laje'. Por causa do pequeno comprimento das barras auxiliares, adotaremos a seção da parede, sem o apoio elástico, também para elas.

Para cada seção, preencha os campos de propriedades do material, do apoio elástico e das dimensões da seção — respectivamente nas abas CS Material, CS Winkler Model e CS Dimensions; e aplique-as às linhas correspondentes do modelo.

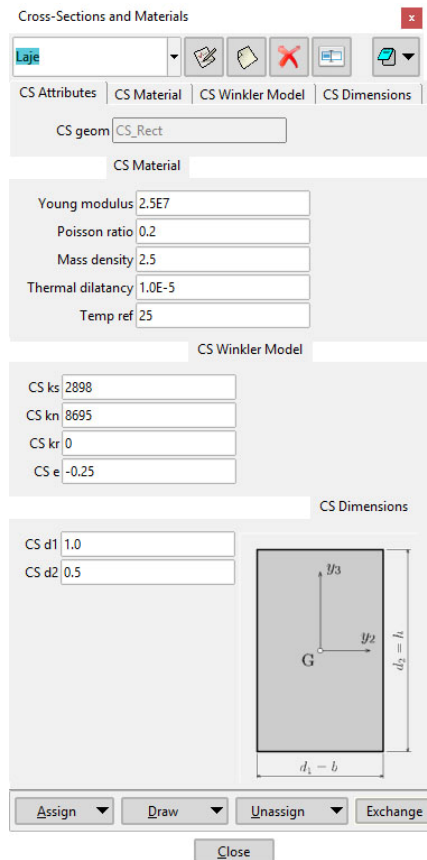


Fig. 9 Preenchimento da janela de seção transversal da laje.

Conforme a Fig. 9, adote $E = 25 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ para o módulo de elasticidade e $\nu = 0,2$ para o coeficiente de Poisson. Admita coeficientes de mola distribuídos $k_s = 2898 \text{ kPa}$ e $k_n = 8695 \text{ kPa}$ nas direções tangencial e normal ao eixo da barra com uma excentricidade $e = -0,25 \text{ m}$ (o sinal da excentricidade depende do eixo local da barra que, por sua vez, depende da incidência da barra). Considere a seção da laje com $b = 1,0 \text{ m}$ e $h = 0,5 \text{ m}$ ($A = 0,5 \text{ m}^2$ e $I_3 = 10,417 \times 10^{-3} \text{ m}^4$) e aplique nas linhas horizontais com o botão [Assign].

Para a seção da parede, considere $b = 1,0 \text{ m}$ e $h = 0,40 \text{ m}$ ($A_1 = 0,4 \text{ m}^2$ e $I_3 = 5,333 \times 10^{-3} \text{ m}^4$) e aplique nas linhas verticais, inclusive as auxiliares. Não esqueça de zerar os parâmetros do apoio de Winkler para a seção da parede. Verifique as aplicações selecionando o botão [Draw] e a opção 'all materials'.

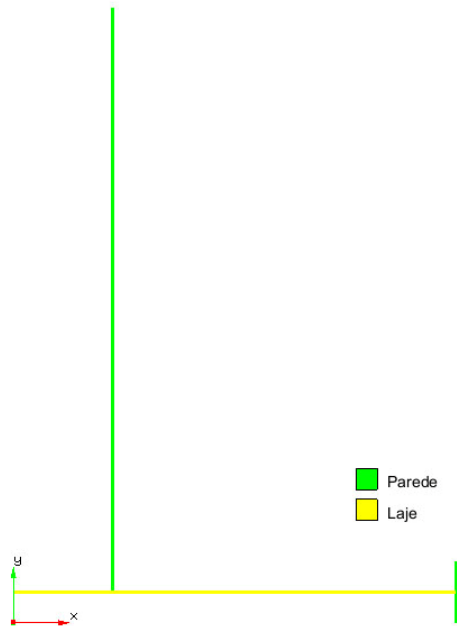



Fig. 10 Definição das seções transversais (Draw).

3.4 Título, Tipo de Análise, Unidades e Eixo de Referência para as Forças Distribuídas

Acesse a janela dos parâmetros da análise através do botão  e forneça todas as informações pedidas. Adote unidades consistentes com as básicas em todo o arquivo de dados, pois o programa não faz conversões de unidades. Selecione a caixa 'Nodal Reactions' para calcular as reações de apoio, e a caixa 'Winkler Model,' para considerar os apoios elásticos das barras.

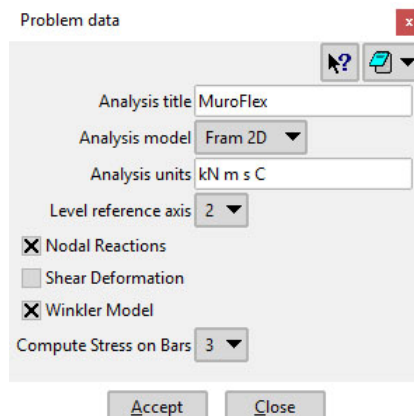



Fig. 11 Parâmetros da análise.

3.5 Geração da Malha de Elementos Finitos

A geração da malha pode ser acessada por meio do botão . A malha não-estruturada com elementos retos de dois nós é a malha *Default* no programa GiD.

Forneça o tamanho máximo dos elementos na janela da Fig. 12 e deixe o programa gerar a malha. O comando *View > Label > All in >* permite mostrar os números dos nós ou dos elementos facilitando a visualização, Fig. 13. Varie o tamanho e gere outras malhas até ficar satisfeito com o resultado. A versão de avaliação do GiD permite gerar malhas com até 1000 nós.

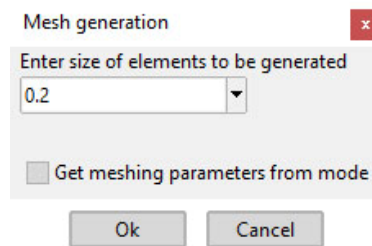


Fig. 12 Janela da geração automática da malha.

No menu 'Mesh' existem vários recursos para controlar a geração da malha e verificar sua qualidade. É possível melhorar a discretização escolhendo uma subdivisão menor para uma determinada linha. Para tal, acione o comando *Mesh > Structured > Line > Assign Number of Cells* e escolha o número adequado de subdivisões da linha.

Os números dos nós e elementos da malha podem ser visualizados com o comando *View > Label > All* quando a malha é apresentada no GiD. A versão de avaliação do GiD permite gerar malhas com até 1000 nós.

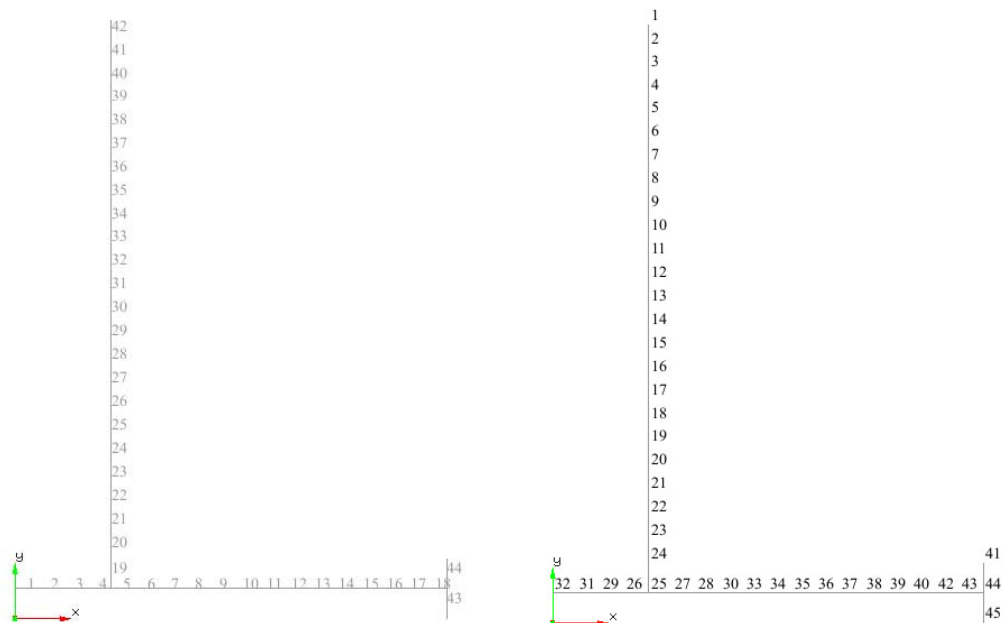



Fig. 13 Numeração das barras e dos nós na malha de elementos finitos.

3.6 Gravação do Arquivo de Dados



Com a malha gerada, pressione o botão  para gravar o arquivo de entrada de dados. A interface GiD-xFram se encarrega de gerar o arquivo no formato correto. Mantenha o nome 'MuroFlex' com a extensão '.dat' para que o programa xFram gere um arquivo de saída 'MuroFlex.post.res' identificável pelo programa GiD.

Examine o arquivo de entrada usando um editor de texto para verificar se os dados estão de acordo com o modelo. Em particular, verifique as propriedades dos materiais no bloco ':MATE', as das seções no bloco ':SECT', e as forças distribuídas no sub-bloco ':DSTR' do bloco ':BARR'.

É possível executar o programa xFram na versão 64 bits de dentro do GiD por meio do comando *Calculate > Calculate*. O programa GiD alerta quando termina a execução e pergunta se o usuário quer passar para a fase de pós-processamento. Se não houver resposta do GiD, o programa xFram deve ser executado fora do GiD para que o usuário tenha acesso às mensagens de erro emitidas pelo programa.

Para executar a análise externamente ao GiD usando a versão de 64 bits do programa xFram, transfira o arquivo *MuroFlex.dat* para a pasta com o programa xFramVSC2017_v64_Win64.exe, execute o programa, forneça o nome do arquivo de dados sem a extensão *dat*, e depois da execução copie o arquivo *MuroFlex.post.res* de volta para a pasta *MuroFlex.gid*. Outra opção seria rodar o programa na própria pasta do modelo.

4 Pós-Processamento

Os botões  e  no canto superior direito alternam entre os modos de pré- e pós-processamento. Repare que as colunas de comando à esquerda da janela mudam completamente.

Faixas de isovalores podem ser visualizadas tanto na geometria indeformada como na deformada, assim como vetores de deslocamento e outras grandezas, conforme indicam as seqüências de comandos nas Figs. 14 a 17. Um número maior de elementos pode ser necessário para mostrar a deflexão das barras do pórtico em decorrência do programa GiD ignorar as rotações na representação da deformada.

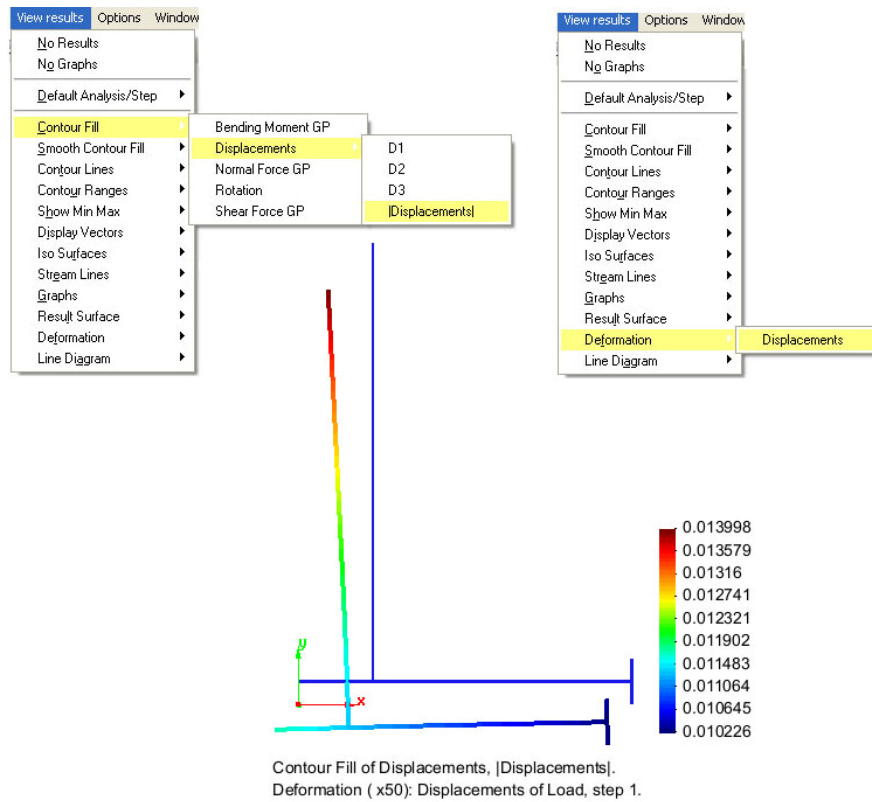


Fig. 14 Amplitudes de deslocamento.

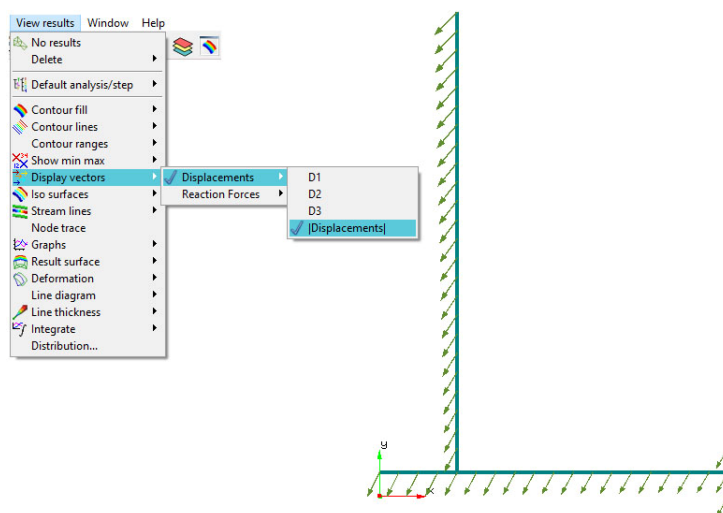


Fig. 15 Vetores de deslocamento mostrados na malha indeformada.

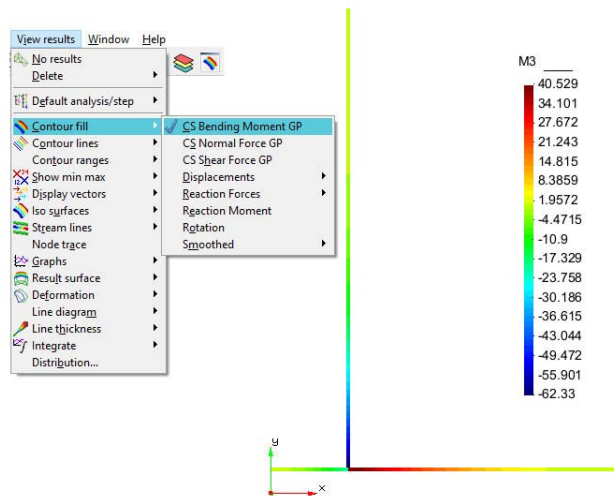


Fig. 16 Faixas de momentos fletores.

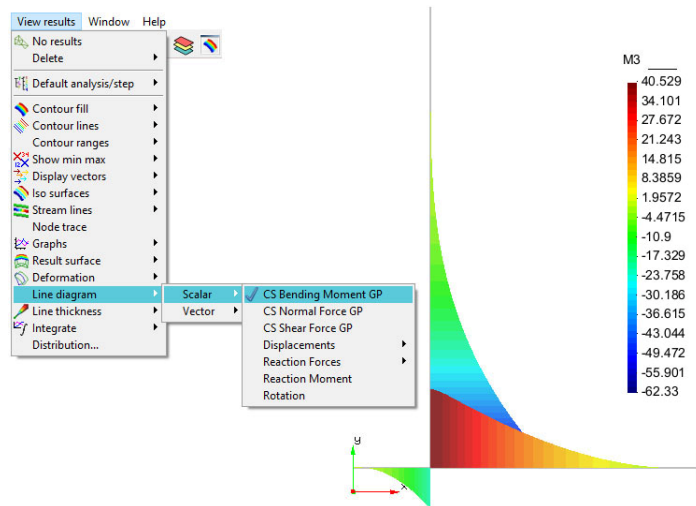


Fig. 17 Diagrama de momentos fletores.

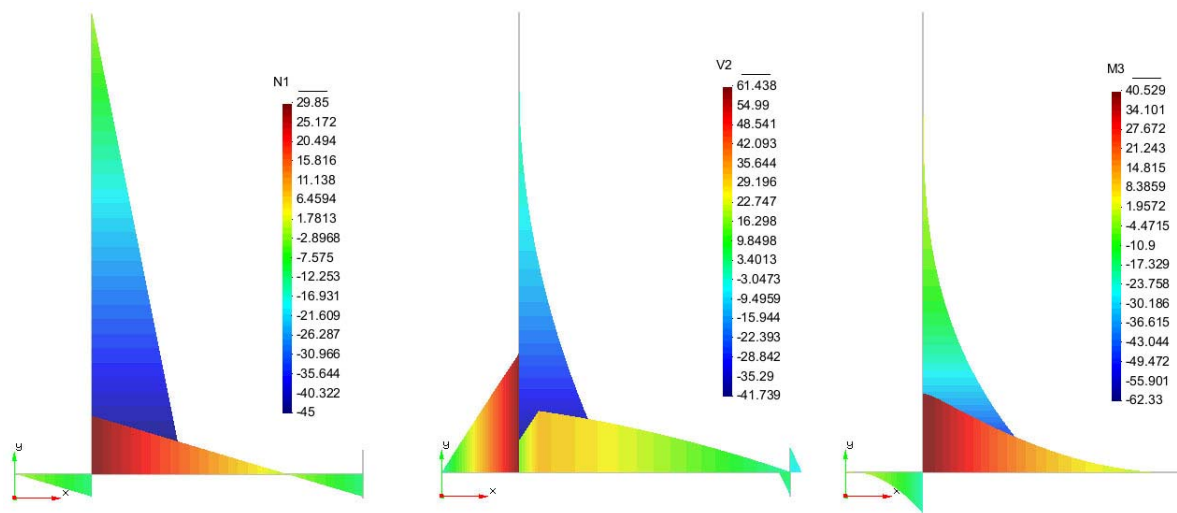


Fig. 19 Diagramas de esforços solicitantes para a malha de 45 nós e 44 barras.

5 Apresentação dos Resultados

Nas figuras abaixo, os resultados do arquivo MuroFlex.out foram editados graficamente.

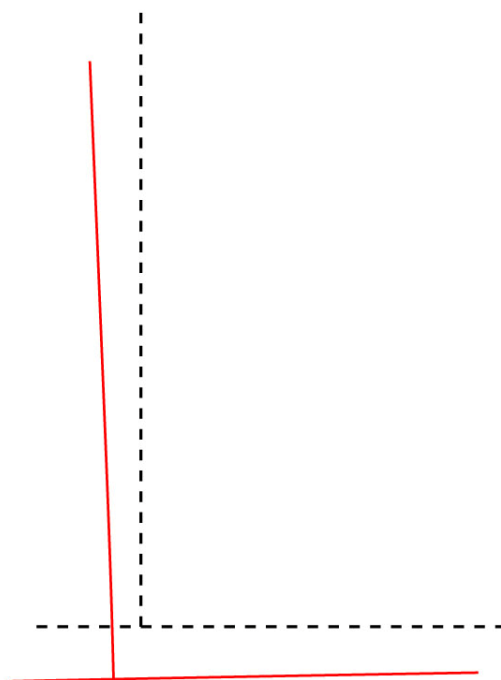


Fig. 20 Configuração deformada.

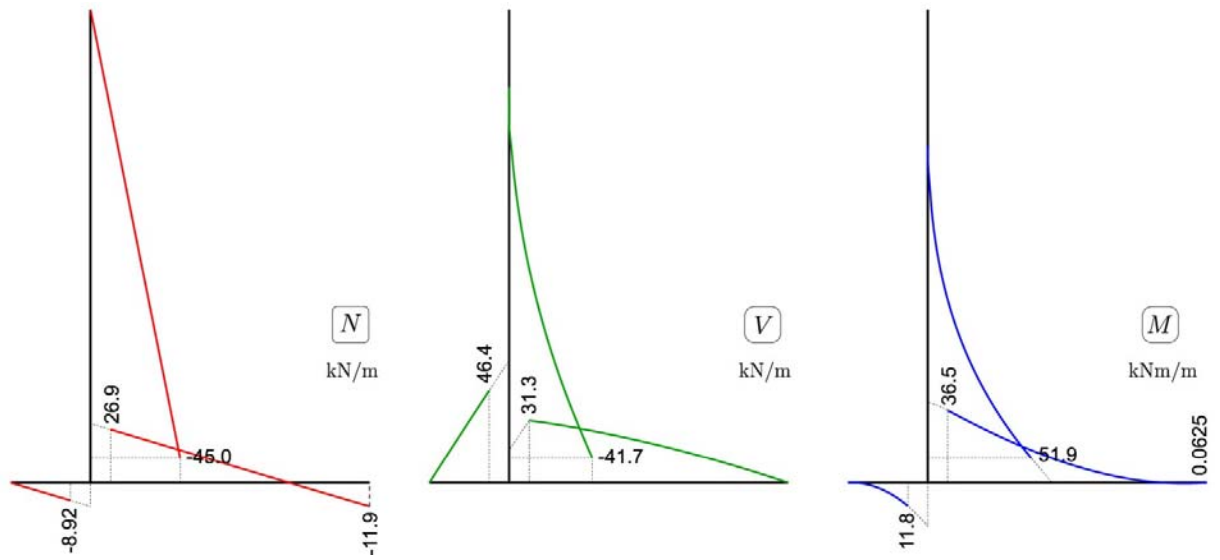


Fig. 21 Digramas de esforços solicitantes (seções junto ao nó de pórtico).

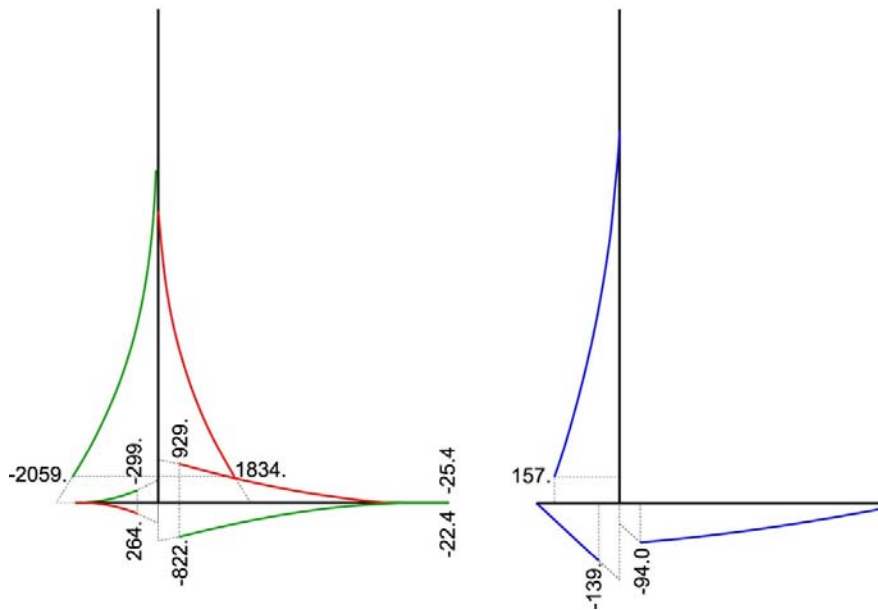


Fig. 22 Tensões normais e tangenciais extremas (kPa/m).
Tensões normais representadas do lado em que elas atuam:
tração em vermelho e compressão em verde.

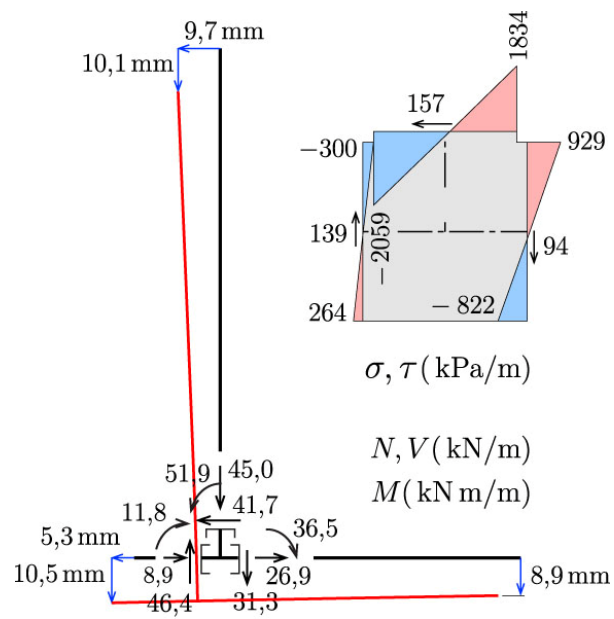


Fig. 23 Esforços solicitantes e tensões nas seções transversais rente à ligação do muro.

6 Arquivo de Resultados

O arquivo 'MuroFlex.out' contém os resultados da análise.

6.1 Reações de Apoio

Quando o usuário seleciona a caixa de reações de apoio na seção 3.4, o programa calcula as reações de apoio nodais e, ao final, apresenta as resultantes de força totais no modelo,

```
>----- Reaction-Force Resultant
Load          R1          R2
  1          53.678700      300.600000
```

6.2 Tensões Extremas nas Seções Transversais

Quando o usuário seleciona a opção 3 do item 'Compute stress on bars' na janela da seção 3.4, o programa calcula as tensões normais nas fibras mais solicitadas da seção e a tensão tangencial no centro de gravidade da seção. Desse modo, para as barras conectadas ao nó de pórtico, obtemos as tensões que atuam nas seções extremas das barras esquematizadas na Fig. 23.

```
>----- Stresses at top, bottom and G fibers:
Elem Load  I/J      Sig'      Sig''      Tau G      Sig G
  4
    1    26      -300.09    264.42     -139.07     -17.835
        25      -546.99    499.43     -184.32     -23.777
  5
    1    25       1032.4   -913.00     -49.315      59.700
        27       929.57   -822.06     -93.995      53.756
  19
    1    25      -2449.9   2224.9      156.52     -112.50
        24      -2058.6   1833.6      156.52     -112.50
```

Material Extra:

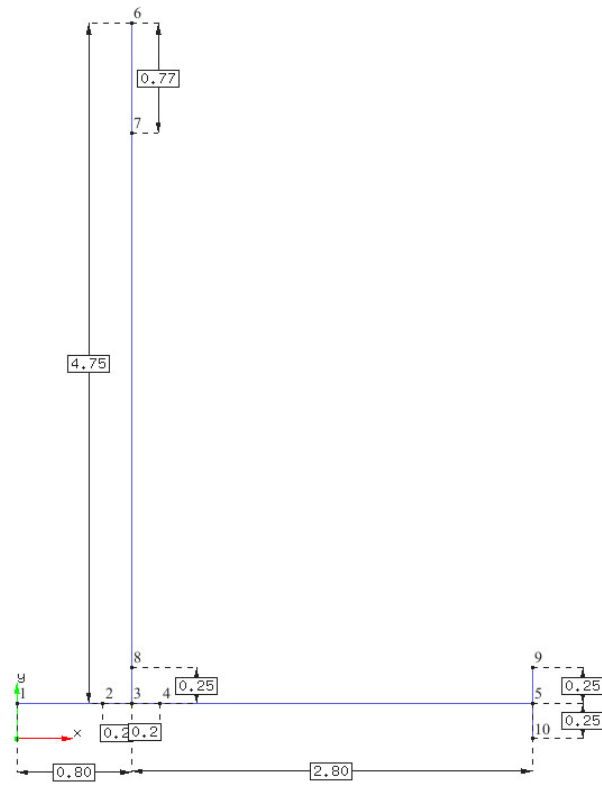


Fig. 4: Localização dos pontos principais do modelo sólido usados para especificar cargas distribuídas e o apoio elástico.