1. Publicação nº	2. Versão	3. Data	5. Distribuição
INPE-3298-RPI/112		*Out., 1984*	☒ Interna ☐ Externa ☐ Restrita

4. Origem	Programa
DMC	*ESTER*

6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es)
ANÁLISE DA ESTRUTURA
ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS
PAINÉIS LATERAIS UMA ANÁLISE

7. C.D.U.: *629.783:629.7.023*

8. Título *INPE-3298-RPI/112*

ANÁLISE ESTÁTICA POR UM MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DOS PAINÉIS LATERAIS DO SATÉLITE DE COLETA DE DADOS DA MECB

10. Páginas: *42*

11. Última página: *31*

12. Revisada por

Hely Ricardo Costa Sávio

9. Autoria *Antonio Manoel Dias Henriques*

Assinatura responsável

13. Autorizada por

Nelson de Jesus Parada
Diretor Geral

14. Resumo/Notas

O presente trabalho apresenta uma análise estática por um método de elementos finitos dos painéis laterais do satélite da MECB. Na discretização utilizou-se um elemento tridimensional com oito nós, degenerado de modo a reproduzir um comportamento de casca. O carregamento aplicado é proveniente da massa do painel e da massa das células solares multiplicadas pela aceleração centrípeta de 18 g. Os resultados obtidos mostram que os painéis, com suas atuais dimensões, resistem com segurança aos esforços aplicados.

15. Observações

ABSTRACT

The present work presents a static analysis of the panels situated at the side of the MECB satellite by a finite element method. A discretization using an eight-node tridimensional shell element was employed. The applied loading comes from the mass of the panel itself and the mass of the solar cells multiplied by the centripetal acceleration of 18 g. The results obtained demostrate that the panels, with their present dimensions, resist with a reasonable margin of security the applied loads.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	*v*
LISTA DE TABELAS	*vii*
LISTA DE SÍMBOLOS	*ix*
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - GEOMETRIA E DISCRETIZAÇÃO	3
3 - CONDIÇÃO DE CONTORNO DOS NÓS	4
4 - CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL	5
5 - CARREGAMENTO	7
6 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	9
6.1 - Introdução	9
6.2 - Apresentação dos resultados	10
6.2.1 - Painel móvel simplesmente apoiado ou engastado nas extremidades	10
6.2.2 - Painel fixo engastado nas extremidades	21
6.3 - Análise dos resultados	21
7 - CONCLUSÕES	26
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	29
BIBLIOGRAFIA	31

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1 - Elemento de casca tridimensional com 8 nós, degenerado a duas dimensões 1

2 - Discretização por meio de elementos finitos de 1/4 do painel lateral: (a) desenho do painel lateral, com o sistema de eixos adotado; (b) malha utilizada na análise dos painéis laterais (1/4 do painel) 2

3 - Detalhe das juntas a serem utilizadas na fixação dos painéis laterais: (a) junta para os painéis laterais: (a) junta para os painéis móveis e fixos; (b) junta para os painéis fixos.. 3

4 - Condições de contorno para os painéis laterais móveis: (a) simplesmente apoiado; (b) engastado nas extremidades..... 4

5 - Condição de contorno para os painéis laterais fixos..... 5

6 - Características geométricas dos painéis laterais..... 7

7 - Localização dos pontos de integração de Gauss (ordem de integração 2 x 2) para elementos retangulares..... 10

8 - Deslocamento na direção z para o painel móvel apoiado ou engastado..... 11

9 - Variação do momento fletor M_{xx} ao longo de x = 12,7 mm para o painel móvel apoiado ou engastado 13

10 - Variação da tensão normal T_{xx} ao longo de x = 12,7 mm para o painel móvel apoiado ou engastado 14

11 - Variação do momento fletor M_{xx} ao longo de y = 10,6 mm para o painel móvel apoiado ou engastado 15

12 - Variação da tensão normal T_{xx} ao longo de y = 10,6 mm para o painel móvel apoiado ou engastado 16

13 - Variação do momento fletor M_{yy} ao longo de x = 12,7 mm para o painel móvel apoiado ou engastado 17

14 - Variação da tensão normal T_{yy} ao longo de x = 12,7 mm para o painel móvel apoiado ou engastado..... 18

15 - Variação do momento fletor M_{yy} ao longo de y = 10,6 mm para o painel móvel apoiado ou engastado 19

16 - Variação da tensão normal T_{yy} ao longo de y = 10,6 mm para o painel móvel apoiado ou engastado 20

17 - Variação do deslocamento na direção z ao longo y = 10,6 mm para o painel lateral fixo..... 22

18 - Variação dos momentos fletores M_{xx} e M_{yy} ao longo y = 10,6 mm para o painel lateral fixo..... 23

19 - Variação das tensões normais T_{xx} e T_{yy} ao longo de y = 10,6 mm para o painel lateral fixo..... 24

LISTA DE TABELAS

Pág.

1 - Máximos esforços ao longo de x = 12,7 mm para os painéis laterais submetidos a uma carga uniformemente distribuída.... 21

2 - Máximos esforços ao longo de y = 10,6 mm para os painéis laterais submetidos a uma carga uniformemente distribuída.... 25

3 - Comparação dos valores obtidos para os esforços e deslocamentos do painel simplesmente apoiado via elementos finitos com os valores fornecidos por Henriques et alii (no prelo)..... 26

LISTA DE SÍMBOLOS

A_p = Área da superfície do painel lateral.

a_c = Aceleração centrípeta do satélite.

E_f = Módulo de elasticidade da face.

E_3 = Módulo de elasticidade em compressão.

F_{cu} = Tensão de ruptura.

F_{cy} = Tensão de escoamento.

G_L = Módulo de cisalhamento longitudinal.

G_T = Módulo de cisalhamento transversal.

m_T = Massa total do painel.

M_{xx} = Momento fletor em relação ao eixo x.

M_{yy} = Momento fletor em relação ao eixo y.

q = Carga uniformemente distribuida.

Q = Carga total aplicada.

S = Tensão de cisalhamento.

S_L = Tensão de cisalhamento longitudinal.

S_T = Tensão de cisalhamento transversal.

t_a = Espessura do adesivo.

T_{xx} = Tensão normal na direção x.

T_{yy} = Tensão normal na direção y.

ρ_a = Densidade do adesivo.

ρ_c = Densidade da colméia (recheio).

ρ_f = Densidade da face.

ν = Coeficiente de Poisson.

1 - INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem por finalidade o estudo mais refinado do comportamento estrutural dos painéis laterais quando submetidos a um carregamento estático uniformemente distribuído, carregamento este que surge no momento de injeção do satélite em sua órbita devido à rotação imposta a ele.

A análise é feita via elementos finitos, utilizando-se para isso um programa que se encontra implantando no Burroughs 6800.

Devido à simetria do painel, foi suficiente discretizar por meio de elementos finitos apenas um quarto deste. Utilizou-se para esta discretização e posterior análise um elemento de casca tridimensional com 8 nós, degenerado a duas dimensões, como mostra a Figura 1.

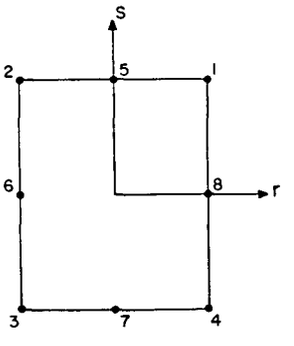


Fig. 1 - Elemento de casca tridimensional com 8 nós, degenerado a duas dimensões.

Este elemento leva em consideração as deformações por cisalhamento.

A malha é constituída de 24 elementos, perfazendo um total de 93 nós (Figura 2).

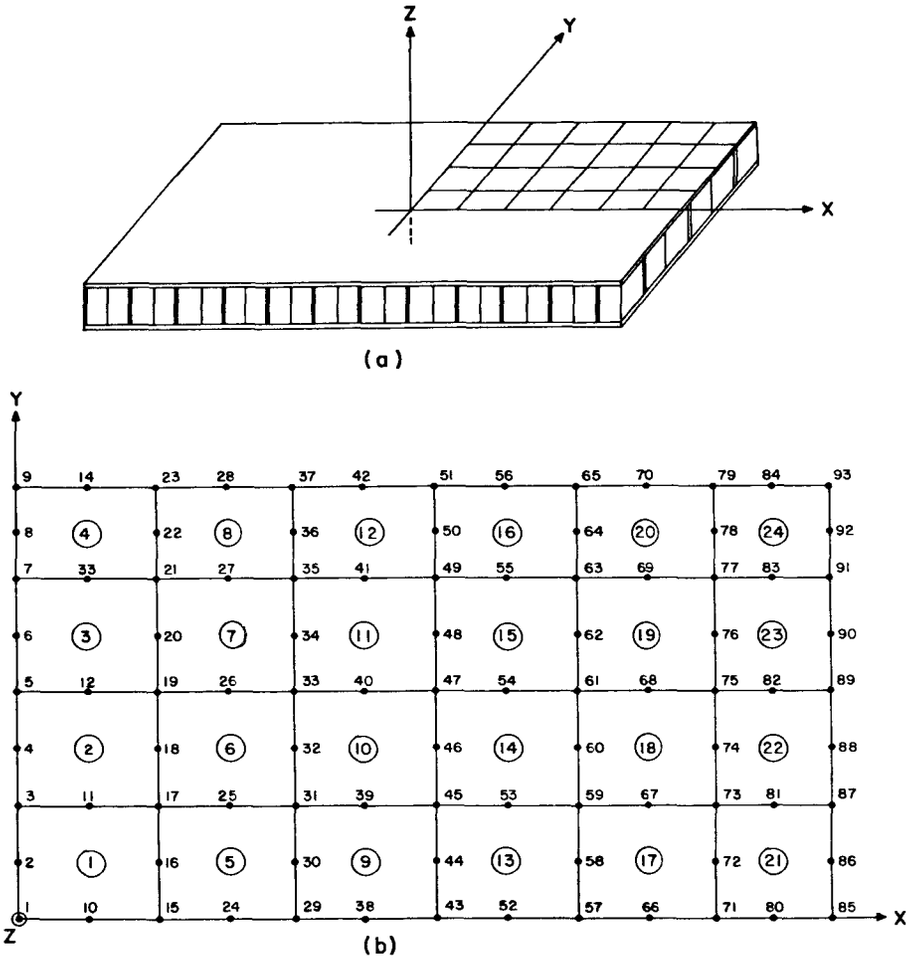


Fig. 2 - Discretização por meio de elementos finitos de 1/4 do painel lateral: (a) desenho do painel lateral, com o sistema de eixos adotado; (b) malha utilizada na análise dos painéis laterais (1/4 do painel).

Visando a obtenção dos máximos deslocamentos e esforços que surgem por ocasião da aplicação do carregamento, os quais serão utilizados no dimensionamento das juntas, rebites e parafusos, analisaram-se os painéis laterais móveis com diferentes condições de contorno(simplesmente apoiado ou engastado nas bordas).

Já os painéis laterais fixos foram analisados considerando que estes encotram-se simplesmente apoiados nos painéis transversais e livres lateralmente (ao longo da altura).

Os resultados obtidos pelo programa são apresentados através de gráficos e comparados posteriormente com os de Henrique et alii (no prelo).

2 - GEOMETRIA E DISCRETIZAÇÃO

A Figura 2 mostra a geometria dos painéis laterais (móveis e fixos), bem como a discretização por meio de elementos finitos utilizada na análise.

Já a Figura 3 mostra alguns detalhes das juntas a serem utilizadas na montagem e fixação dos painéis laterais. Estas juntas serão usinadas em alumínio 2024-T3, cujas dimensões são dependentes dos esforços a serem transmitidos por elas. Como já foi dito, um dos objetivos do presente trabalho foi a obtenção destes esforços.

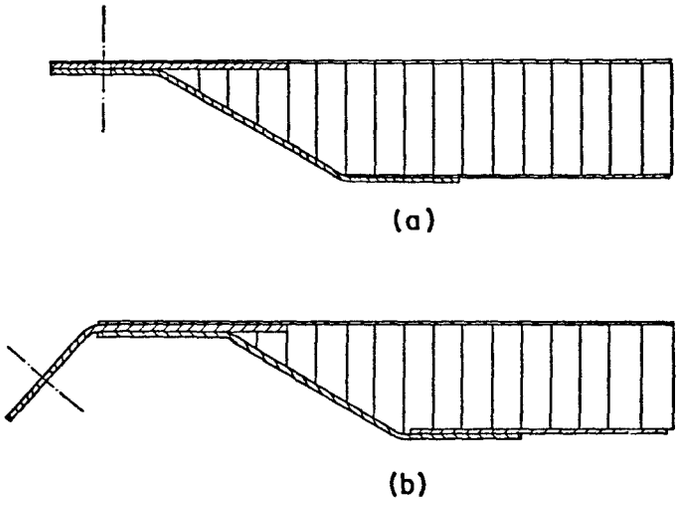


Fig. 3 - Detalhe das juntas a serem utilizadas na fixação dos painéis laterais: (a) junta para os painéis móveis e fixos; (b) junta para os painéis fixos.

Observa-se que devido à simetria foi suficiente discretizar apenas 1/4 do painel, tanto do painel fixo como do painel móvel.

A malha utilizada é constituída de 24 elementos para ambos os casos.

Como será visto adiante, esta malha proporcionou a obtenção de resultados muito bons, dispensando assim a utilização de uma malha mais fina na análise.

Junto às junções dos painéis laterais fez-se uma diminuição na malha a fim de considerar os efeitos localizados.

3 - CONDIÇÕES DE CONTORNO DOS NÓS

Objetivando a obtenção dos maiores deslocamentos e esforços que surgirão por ocasião da aplicação do carregamento, foram considerados dois tipos distintos de condição de contorno para os painéis laterais móveis:

a) painel simplesmente apoiado;
b) painel engastado nas extremidades.

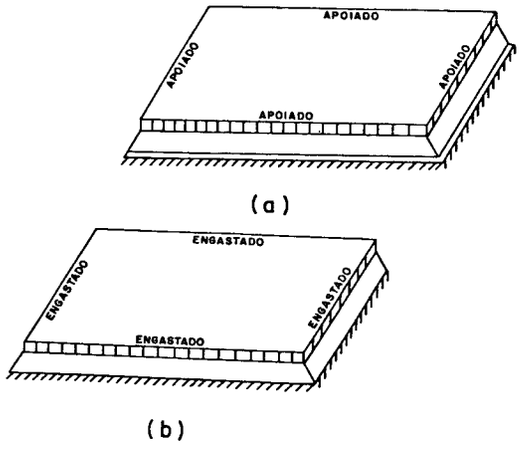


Fig. 4 - Condições de contorno para os painéis laterais móveis: (a) simplesmente apoiado; (b) engastado nas extremidades.

Já para os painéis laterais fixos foi adotada a condição de contorno mostrada na Figura 5. Observa-se que estes painéis diferem dos painéis laterais móveis, por possuirem uma junção no centro, que fará a fixação dos painéis fixos com o painel porta equipamentos central.

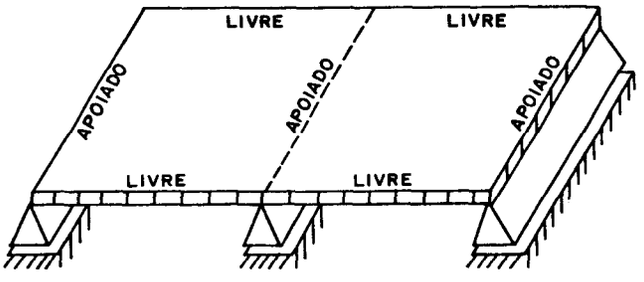


Fig. 5 - Condição de contorno para os painéis laterais fixos.

Esta junção terá de ser projetada o mais flexível possível a fim de evitar que haja uma transmissão de esforços provenientes do painel porta equipamentos central, o que acarretaria um possível descolamento da chapa que reveste a colméia.

Com a condição de contorno adotada (apoio simples no centro), tenta-se levar em consideração este fato.

Supõe-se também que os painéis laterais móveis, por serem apoiados nos painéis laterais fixos, transmitam a este, através das juntas de junção, os esforços devidos ao carregamento aplicado.

Os painéis laterais fixos, por sua vez, transmitirão estes esforços aos painéis porta equipamentos, que finalmente irá transmiti-los ao cilindro central.

Em vista deste fato, considera-se que ao longo do seu maior lado os painéis laterais fixos não têm "apoio" e portanto são livres, o que torna a condição de contorno adotada conservativa.

Considerou-se também a rotação restringida na direção perpendicular à superfície do painel (no caso o eixo Z), uma vez que o elemento considerado não possui rigidez associada a esta rotação.

Como foi necessário analisar apenas 1/4 do painel (devido à simetria geométrica e de carregamento existente), considerou-se que os planos de simetria não sofreram rotação e translação.

4 - CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL

Os painéis laterais, tanto móveis como fixos, serão do tipo sanduíche ("honeycomb"), com faces de alumínio 2024-T3 e colméia (recheio) de alumínio 5052. O adesivo a ser utilizado na colagem das faces na colméia será a princípio o FM-73, fabricado pela Americam Cyanamid Company.

As propriedades físicas e mecânicas destes materiais são relacionadas abaixo:

Faces: Alumínio 2024-T3

F_{cu} = 482 MPa;

F_{cy} = 407 MPa;

E_f = 68,95 x 10^3 MPa;

ρ_f = 27,146 x 10^3 N/m^3;

ν = 0,33.

Recheio: Alumínio 5052

CRIII - 1/4 - 5052 - 0,001 N - 2,3 ± 10% ;

F_{cu} = 800 KPa;

E_3 = 310,1 MPa;

S_L = 700 KPa;

S_T = 400 KPa;

G_L = 220,5 MPa;

G_T = 111,6 MPa;

ρ_c = 362 N/m^3.

Adesivo: FM-73

S = 28,39 MPa;

ρ_a = 4,11 N/m^2;

t_a = 3,8 x 10^{-4} m.

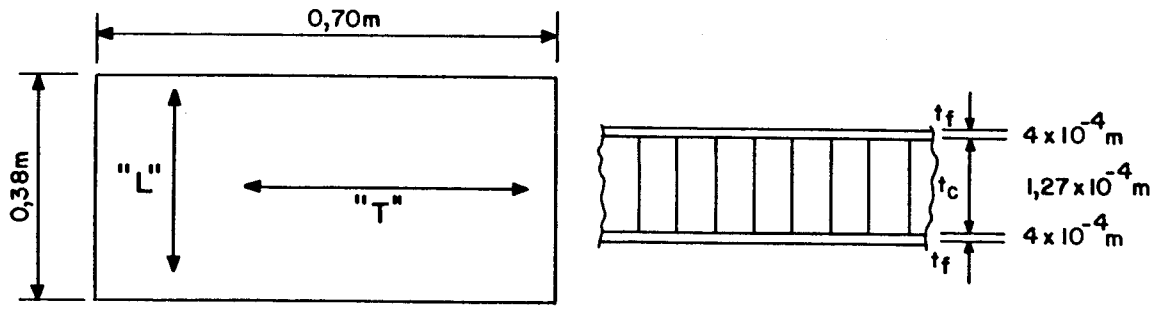


Fig. 6 - Características geométricas dos painéis laterais.

5 - CARREGAMENTO

Os painéis laterais foram dimensionados para suportar a sua massa somada à massa das células solares, multiplicadas pela aceleração centrípeta de 18 g.

As massas dos componentes são relacionadas abaixo:

Faces: 0,6 kg
Recheio: 0,125 kg
Cola: 0,22 kg
Células Solares: 0,571 kg
Total (m_T): 1,52 kg

Considerou-se a carga como uniformemente distribuída ao longo da superfície do painel. Assim sendo, tem-se:

$$q = \frac{Q}{A_p} = \frac{m_T \times a_c}{A_p} = \frac{1,52 \times 18}{2681} = 0,01 \quad kg/cm^2 \qquad (1)$$

ou

$$q = 0,001 \ N/mm^2,$$

onde

q = carga uniformemente distribuída;

Q = carga total aplicada;

m_T = massa total dos componentes do painel;

a_c = aceleração centrípeta (18 g);

A_p = área da superfície do painel.

O valor encontrado acima para a carga distribuída é fornecido como um dos dados de entrada do programa utilizado na análise.

6 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 - INTRODUÇÃO

Utilizando a malha anteriormente definida na Seção 1, obtiveram-se, através do programa de elementos finitos, os valores dos esforços (momentos fletores, tensões normais e de cisalhamento) e deflexões para três casos distintos, a saber:

a) painel móvel simplesmente apoiado nas extremidades, sujeito a uma carga uniformemente distribuída;

b) painel móvel engastado nas extremidades, sujeito a uma carga uniformemente distribuída;

c) painel fixo com a condição de contorno mostrada na Figura 5, submetido a uma carga uniformemente distribuída.

Os resultados são apresentados através de gráficos e de tabelas.

O programa utilizado fornece como dados de saída os valores dos deslocamento nos nós dos elementos, bem como os valores dos esforços nos pontos de integração, que distam uma certa distância dos eixos de referência.

Como se utilizou uma ordem de integração 2 x 2, os pontos de integração distam do centro do elemento segundo o que se mostra na Figura 7.

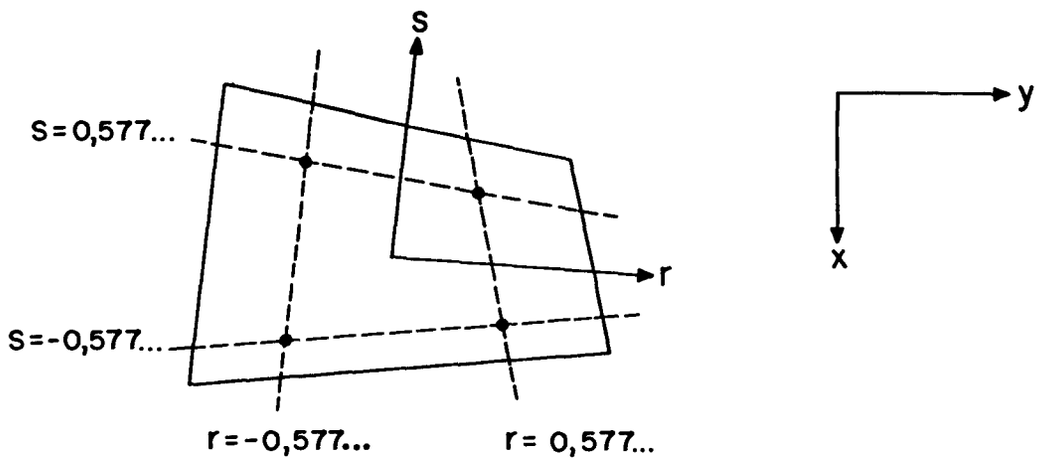


Fig. 7 - Localização dos pontos de integração de Gauss (ordem de integração 2 x 2) para elementos retangulares.

As coordenadas dos pontos de integração em relação aos eixos globais é um dos dados de saída do programa.

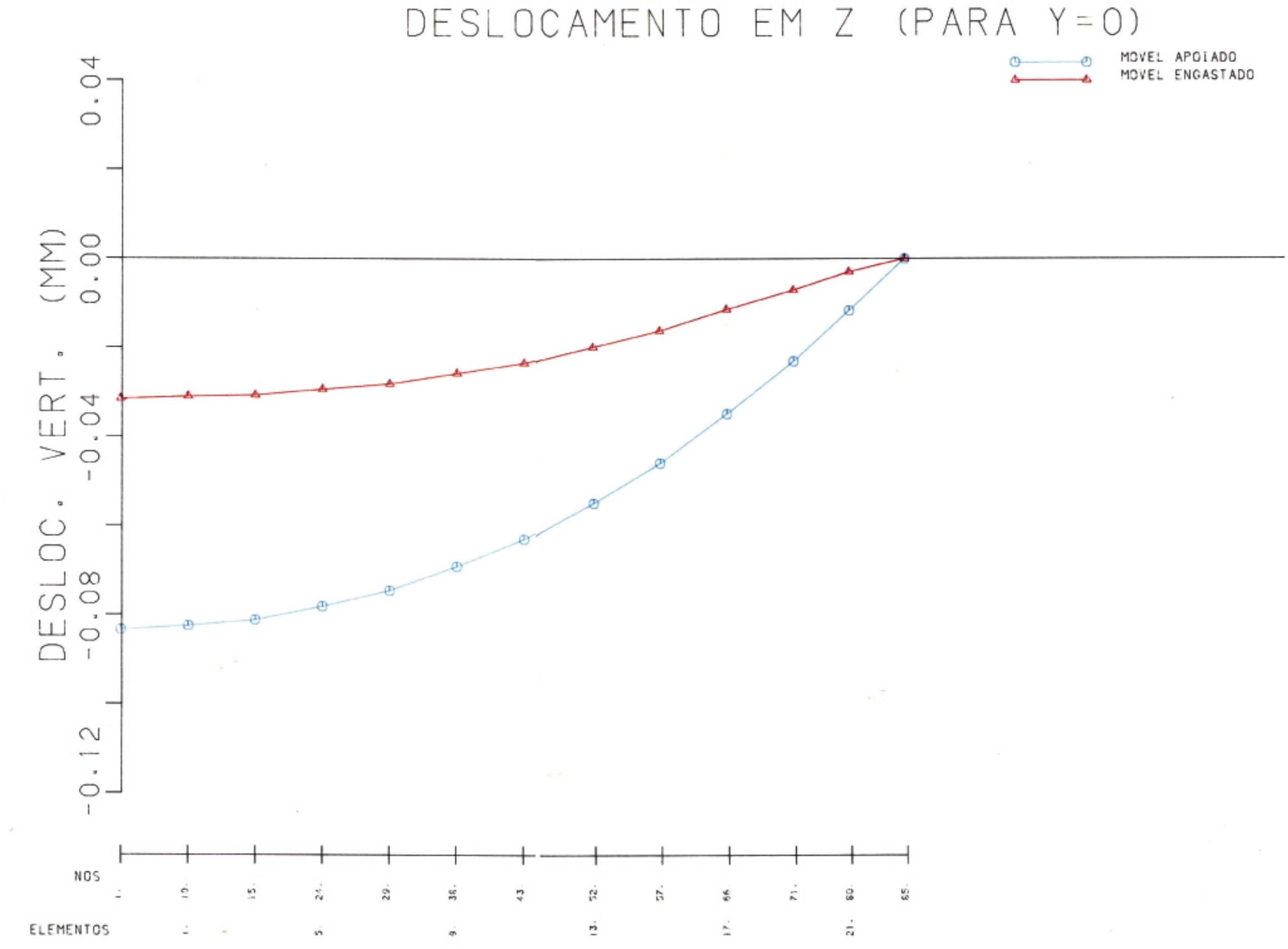
6.2 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

6.2.1 - PAINEL MÓVEL SIMPLESMENTE APOIADO OU ENGASTADO NAS EXTREMIDADES

A Figura 8 mostra o deslocamento na direção z para o painel móvel apoiado e engastado. Observa-se que o deslocamento será máximo no centro do painel em ambos os casos, tendo-se um deslocamento menor para o painel engastado, como era de esperar.

Fig. 8 - Deslocamento na direção z para o painel móvel apoiado ou engastado.

DESLOCAMENTO EM Z (PARA Y=0)



Já as Figuras 9, 10, 11 e 12 mostram, via gráficos, como variam o momento fletor M_{xx} e a tensão normal T_{xx} ao longo de x = 12,7 mm e y = 10,6 mm.

Através das curvas, observa-se que os máximos esforços para o painel apoiado ocorrerão no seu centro.

Já para o painel engastado nas extremidades, têm-se os máximos esforços ocorrendo no engaste, como esperado.

As Figuras 13, 14, 15, e 16 mostram o comportamento do momento fletor M_{yy} e da tensão normal T_{yy} ao longo de x = 12,7 mm e y = 10,6 mm, tanto para o painel móvel apoiado, como para o painel móvel engastado.

Observa-se novamente que os máximos esforços para o painel apoiado ocorrerão no centro e para o painel engastado, nas extremidades (engaste).

Fig. 9 - Variação do momento fletor $\underline{M}_{xx}$ ao longo de x = 12,7 mm para o painel móvel apoiado ou engastado.

MOMENTO MXX (PARA X=12,7)

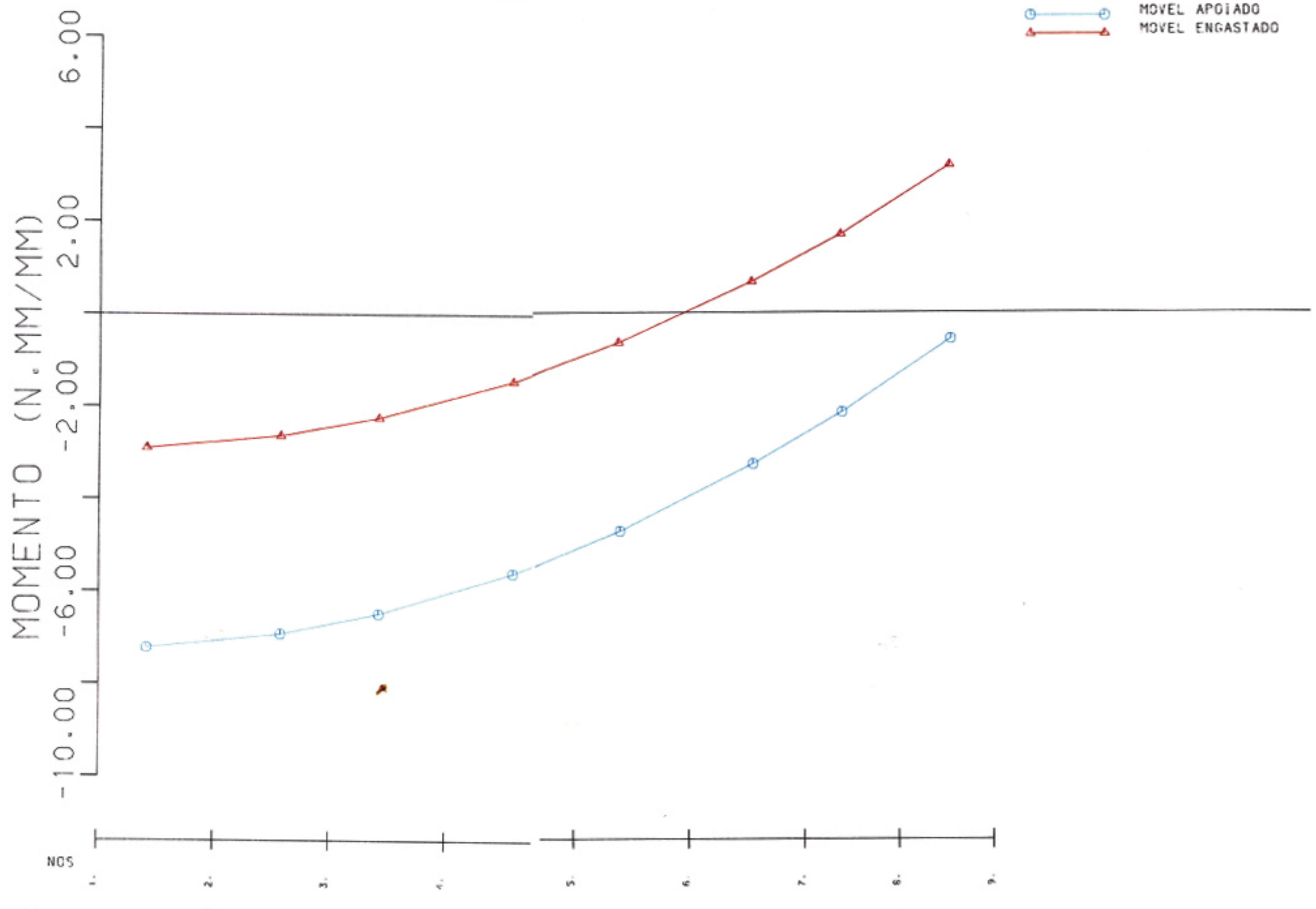


Fig. 10 - Variação da tensão normal T_{xx} ao longo de x = 12,7 mm para o painel móvel apoiado ou engastado.

TENSAO NORMAL TXX (PARA X=12,7)

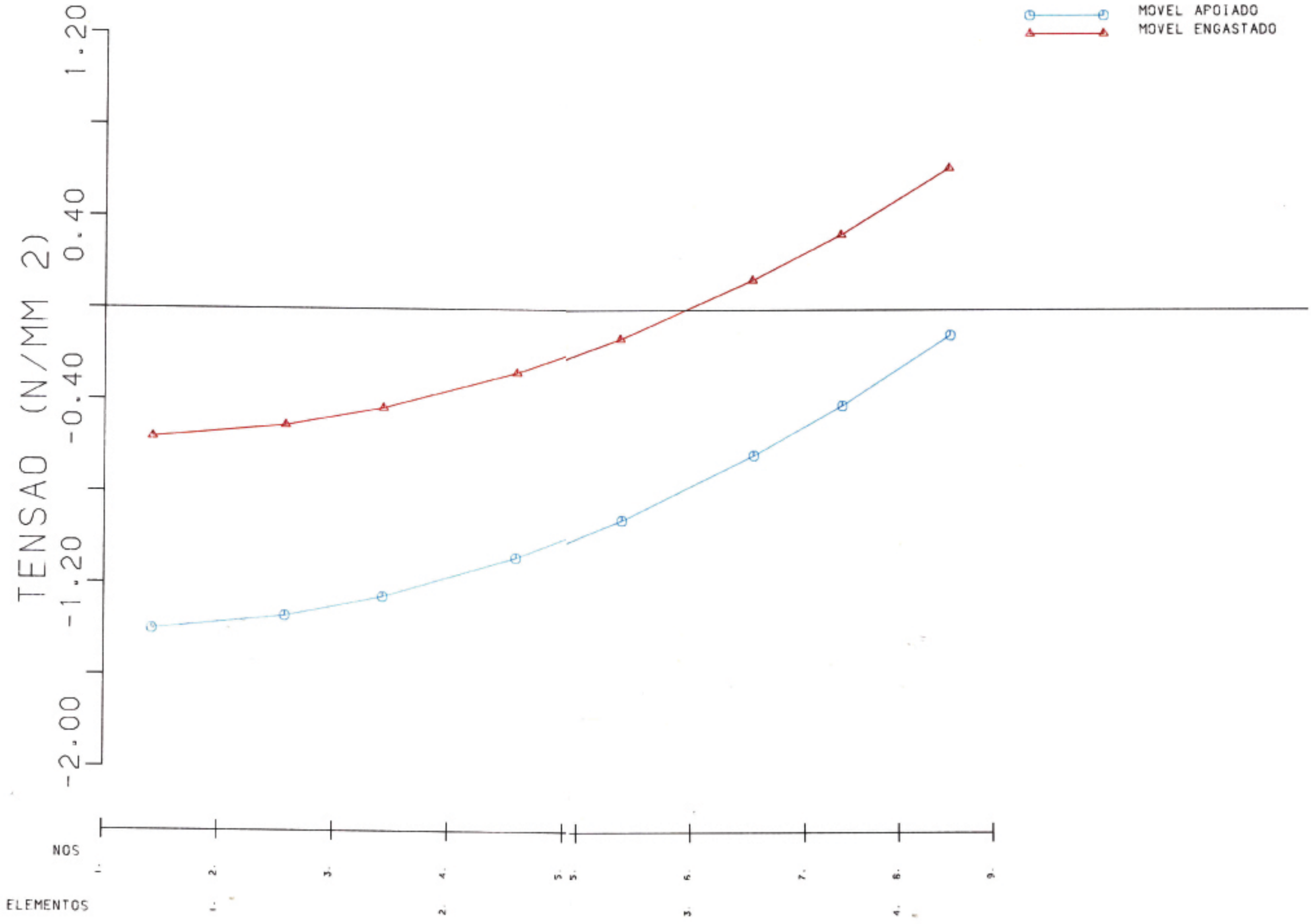


Fig. 11 - Variação do momento fletor $\bar{M}_{xx}$ ao longo de y = 10,6 mm para o painel móvel apoiado ou engastado.

MOMENTO MXX (PARA Y=10,6)

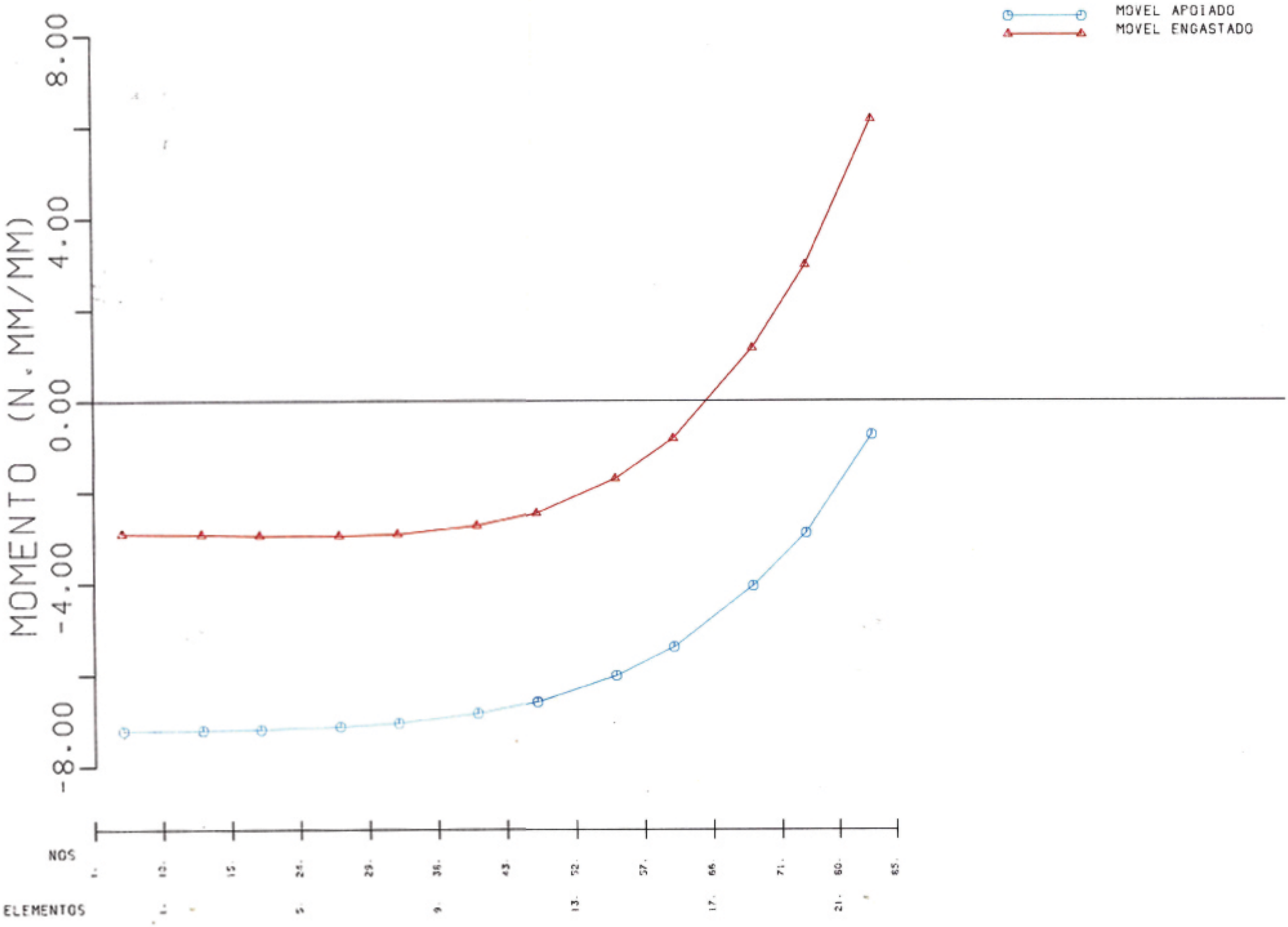


Fig. 12 - Variação da tensão normal T_{xx} ao longo de y = 10,6 mm para o painel móvel apoiado ou engastado.

TENSAO NORMAL TXX (PARA Y=10.6)

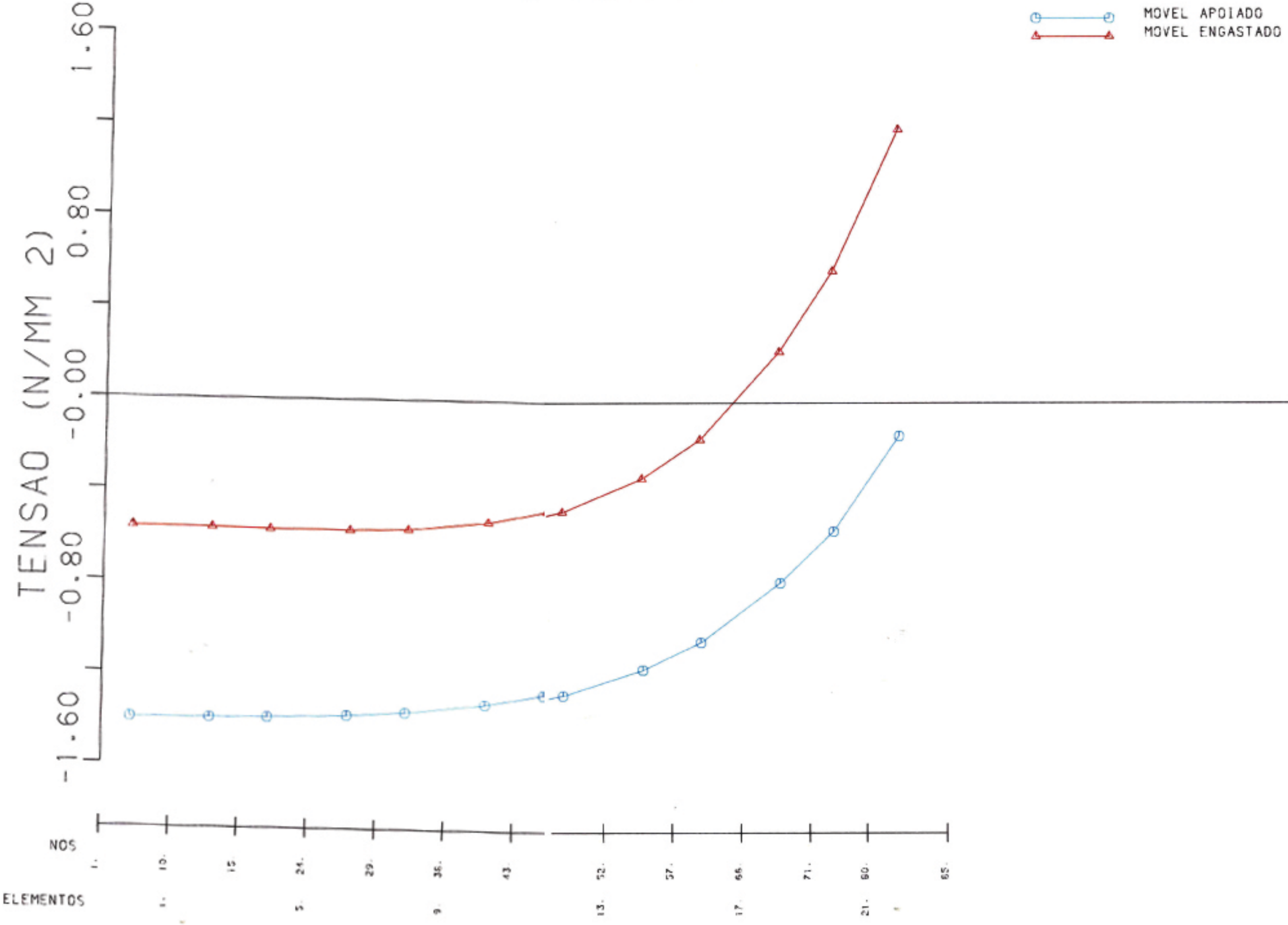


Fig. 13 - Variação do momento fletor M_{yy} ao longo de x = 12,7 mm para o painel móvel apoiado ou engastado.

MOMENTO MYY (PARA X=12,7)

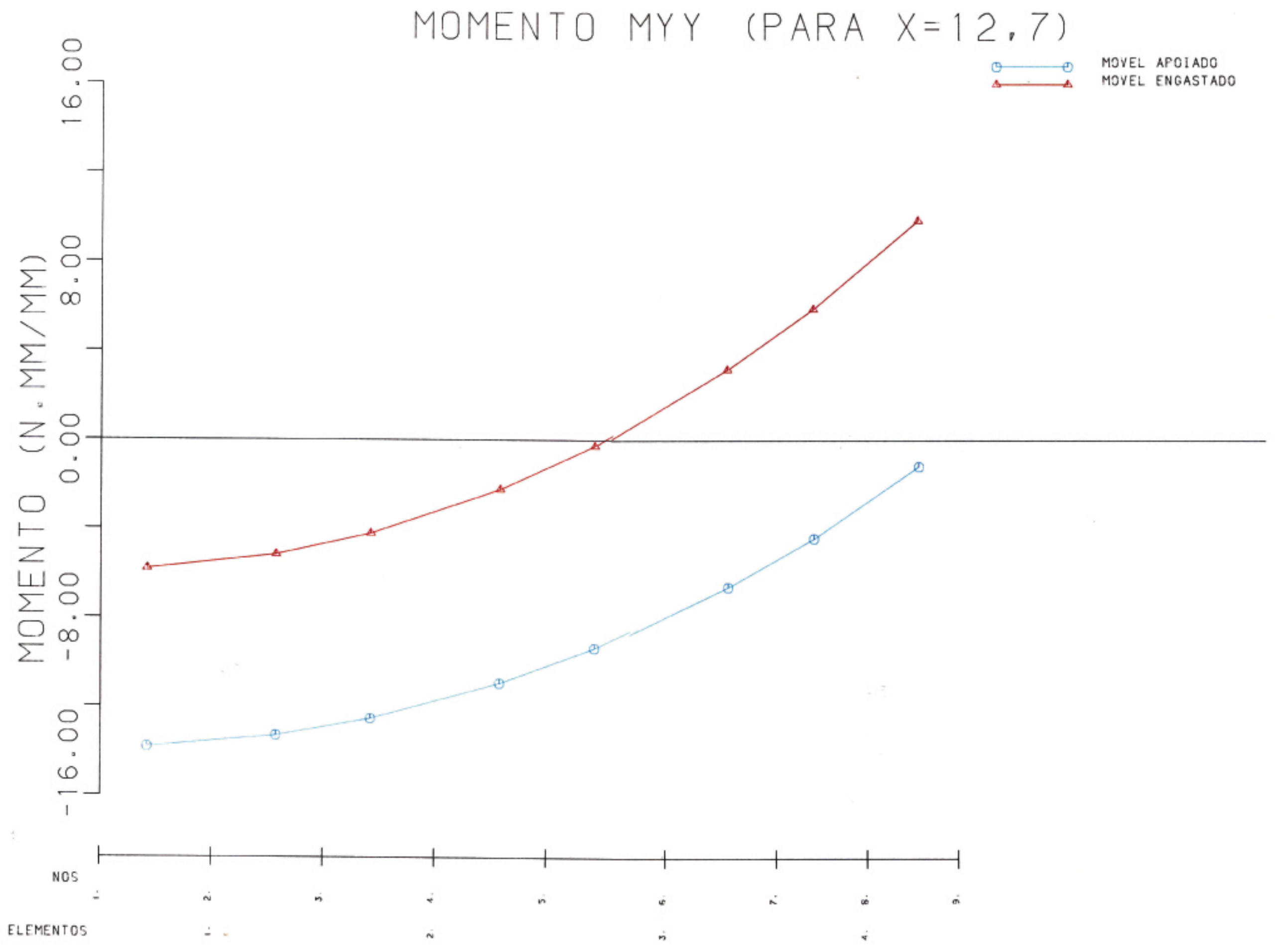


Fig. 14 - Variação da tensão normal T_{yy} ao longo de $x = 12{,}7$ mm para o painel móvel apoiado ou engastado.

TENSAO NORMAL TYY (PARA X=12,7)

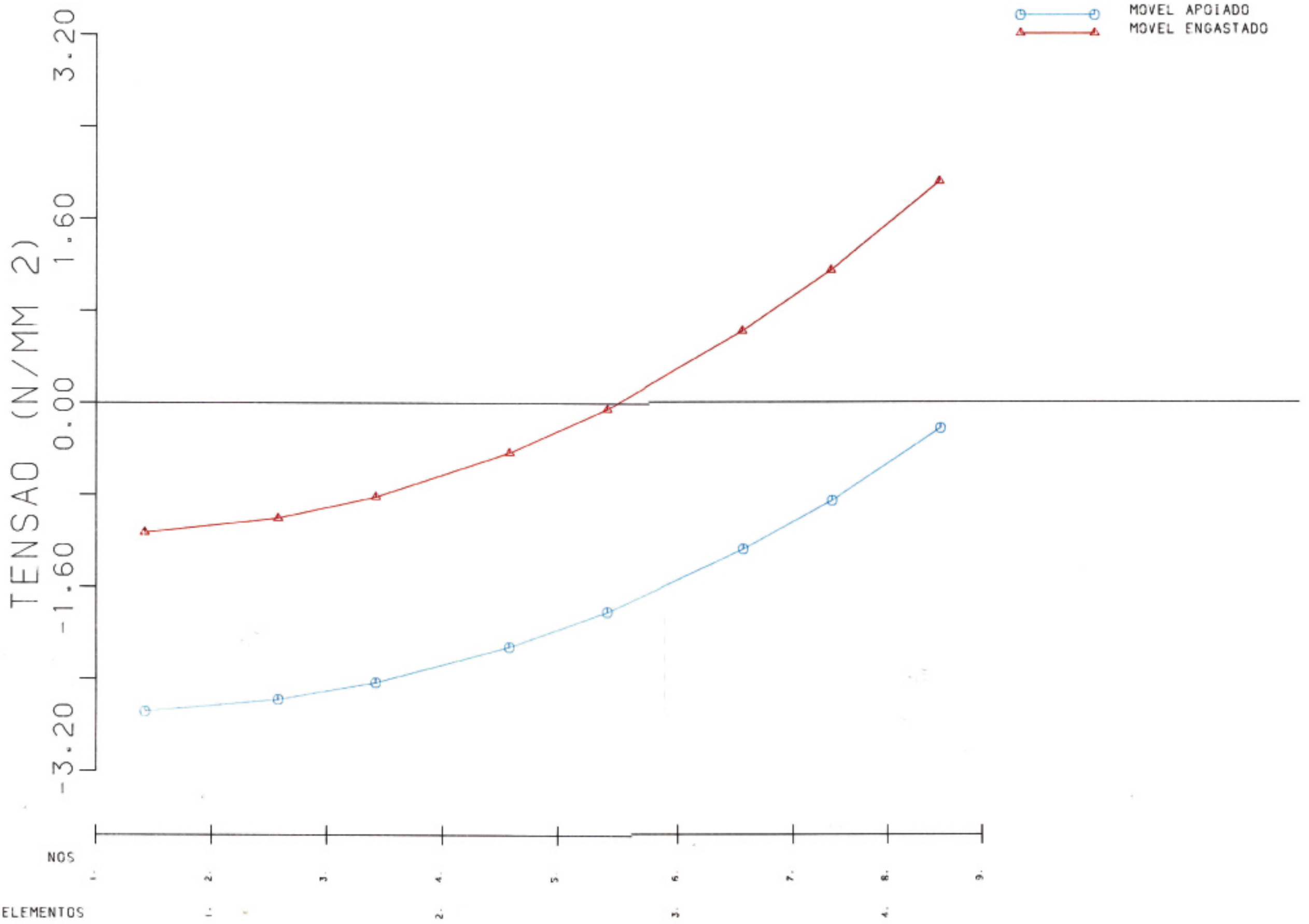


Fig. 15 - Variação do momento fletor M_{yy} ao longo de y = 10,6 mm para o painel móvel apoiado ou engastado.

MOMENTO MYY (PARA Y=10,6)

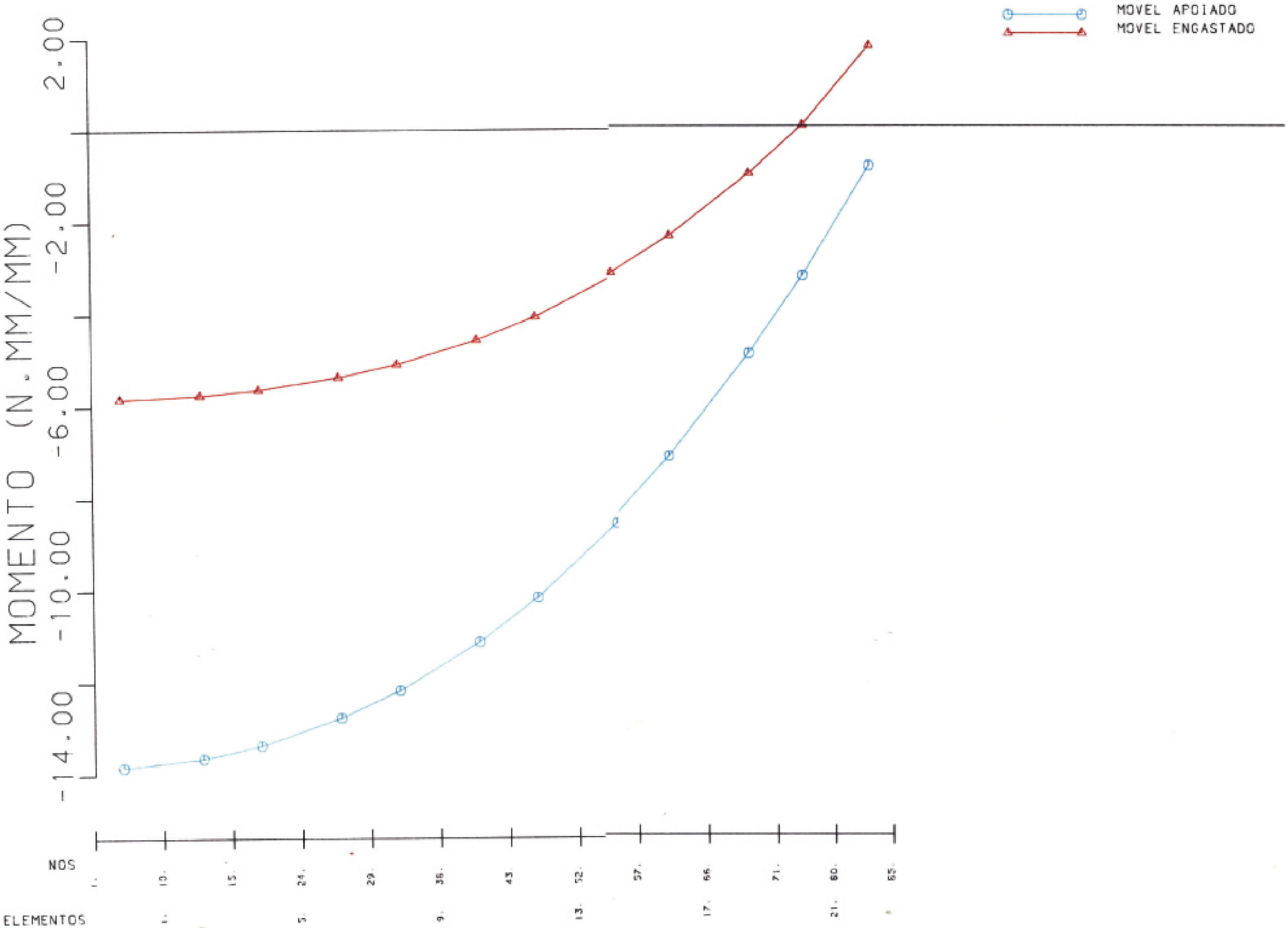
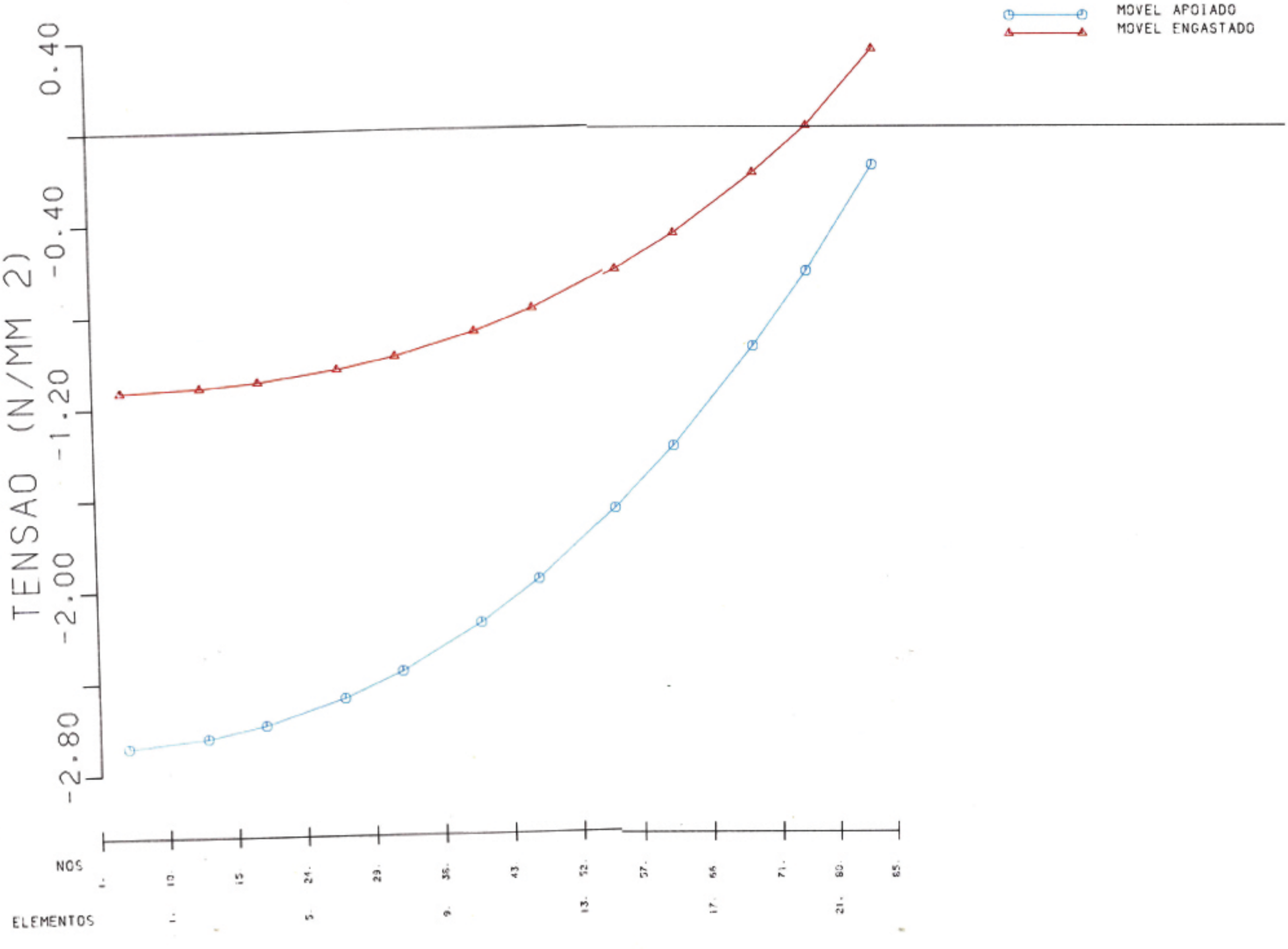


Fig. 16 - Variação da tensão normal T_{yy} ao longo de y = 10,6 mm para o painel móvel apoiado ou engastado.

TENSAO NORMAL TYY (PARA Y=10,6)



6.2.2 - PAINEL FIXO ENGASTADO NAS EXTREMIDADES

A Figura 17 mostra o comportamento do deslocamento na direção z, ao longo de y = 10,6 mm. Observa-se que o máximo valor ocorrerá para x = 18 cm.

Já as Figuras 18 e 19 mostram respectivamente como se comportam os momentos fletores M_{xx} e as tensões normais T_{xx}, T_{yy} ao longo da largura e do comprimento do painel, ou seja, para x = 12,7 mm e y = 10,6 mm.

6.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

As Tabelas 1 e 2 fornecem os valores máximos dos momentos fletores e das tensões normais que estarão atuando nos painéis móveis e fixos por ocasião da aplicação do carregamento.

TABELA 1

MÁXIMOS ESFORÇOS AO LONGO DE x = 12,7 mm PARA OS PAINÉIS LATERAIS SUBMETIDOS A UMA CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDA

PAINEL	M_{xx} (N.mm/mm)	M_{yy} (N.mm/mm)	T_{xx} (N/mm²)	T_{yy} (N/mm²)
Móvel Apoiado	- 7,230	- 13,850	- 1,402	- 2,686
Móvel Engastado	3,174	9,867	0,6156	1,914
Fixo	- 1,838	- 0,6066	- 0,3565	- 0,1176

Fig. 17 - Variação do deslocamento na direção z ao longo de y = 10,6 mm para o painel lateral fixo.

DESLOCAMENTO EM Z (PAINEL LAT. FIXO)

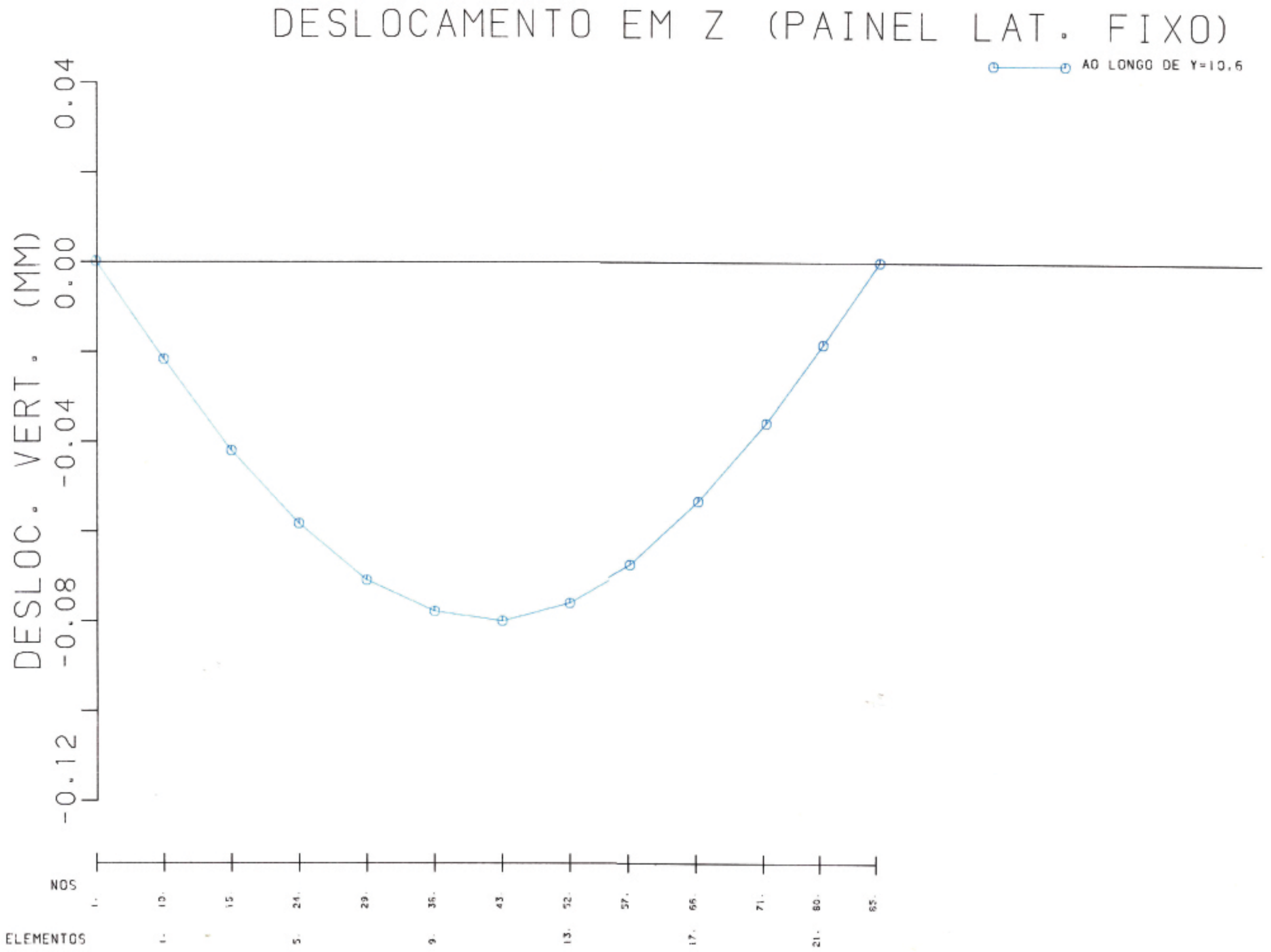


Fig. 18 - Variação dos momentos fletores M_{xx} e M_{yy} ao longo de y = 10,6 mm para o painel lateral fixo.

TENSOES NO PAINEL FIXO (PARA Y=10,6)

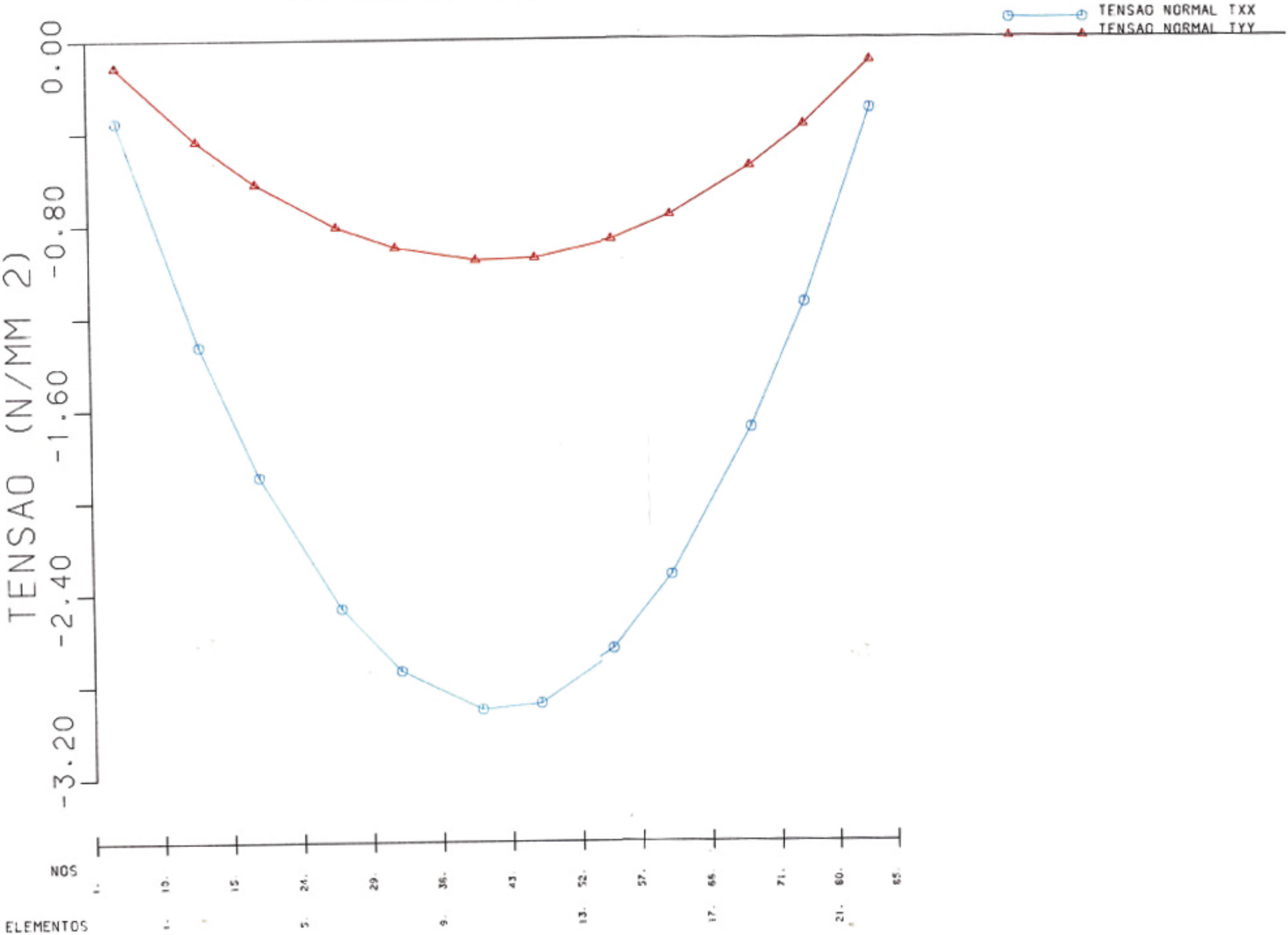


Fig. 19 - Variação das tensões normais T_{xx} e T_{yy} ao longo de y = 10,6 mm para o painel lateral fixo.

MOMENTOS NO PAINEL FIXO (P/ Y=10,6)

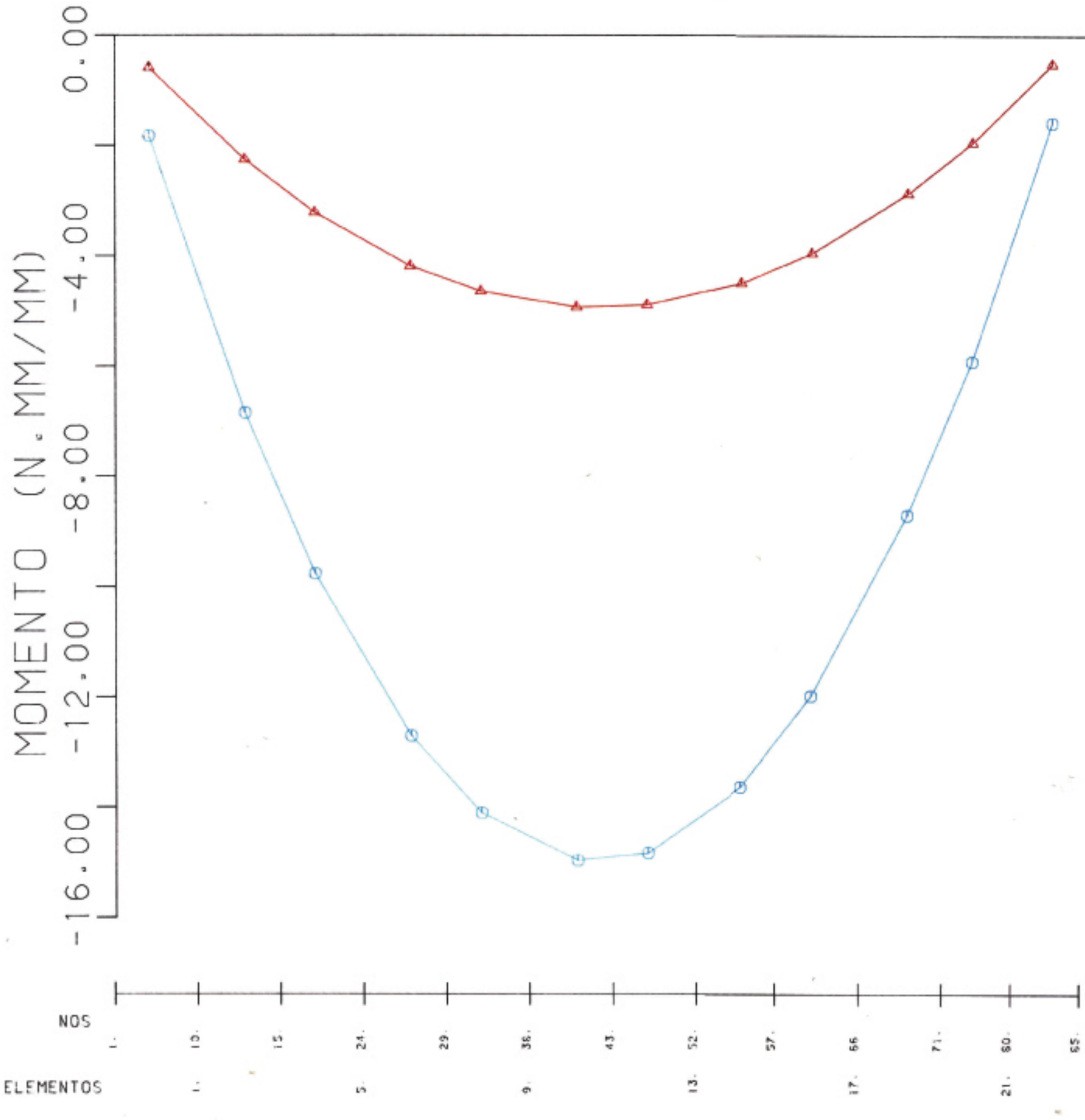


TABELA 2

MÁXIMOS ESFORÇOS AO LONGO DE y = 10,6 mm PARA OS PAINÉIS LATERAIS SUBMETIDOS A UMA CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDA

PAINEL	M_{xx} (N.mm/mm)	M_{yy} (N.mm/mm)	T_{xx} (N/mm^2)	T_{yy} (N/mm^2)
Móvel Apoiado	- 7,230	- 13,85	- 1,402	- 2,686
Móvel Engastado	6,152	- 5,850	1,193	- 1,134
Fixo	- 14,980	- 4,944	- 2,906	- 0,9588

Os resultados obtidos via elementos finitos são avaliados comparando-os com os fornecidos por Henriques et alii (no prelo), para os painéis móveis simplesmente apoiados. Esta referência utiliza para o cálculo de momentos fletores tensões normais e deflexões, fórmulas baseadas em uma análise matemática aproximada, que permite obter bons resultados dentro de certas suposições.

Através da Tabela 3 faz-se a comparação dos valores obtidos via elementos finitos para momentos fletores, tensões normais e deflexões com os valores fornecidos por Henriques et alii (no prelo), para o painel móvel apoiado.

TABELA 3

COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PARA OS ESFORÇOS E DESLOCAMENTOS DO PAINEL SIMPLESMENTE APOIADO VIA ELEMENTOS FINITOS COM OS VALORES FORNECIDOS POR HENRIQUES ET ALII (NO PRELO)

	MÁXIMO MOMENTO FLETOR (N.mm/mm)	MÁXIMA TENSÃO NORMAL (N/mm^2)	MÁXIMA DEFLEXÃO (mm)
Henriques et alii (no prelo)	14,67	2,84	0,085
Elementos Finitos	14,03	2,72	0,083
Δ %	4,33	4,33	2,35

Observa-se pela Tabela 3 que os resultados encontrados pelos diferentes métodos encontram-se bastante próximos, o que faz com que se considerem os resultados obtidos no presente trabalho discretizando o contínuo em elementos finitos como sendo muito bons.

7 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para momentos fletores, tensões normais e deflexões, discretizando 1/4 do painel lateral em elementos finitos, confirmaram os valores anteriormente encontrados por Henriques et alii (no prelo) utilizando-se de uma análise menos refinada.

A análise possibilitou a obtenção dos máximos esforços e deflexões que as juntas terão de suportar ao longo dos painéis, proporcionando assim condições para que elas venham a ser projetadas, o que aliás já está sendo feito.

o painel lateral móvel como o painel lateral fixo, com sdas atuais dimensões e características de material empregado, resistem com grande margem de segurança ao carregamento que será imposto a eles, no momento do lançamento e de injeção do satélite em sua órbita.

Acredita-se que os objetivos deste trabalho tenham sido alcançados, proporcionando assim uma melhor visualização do comportamento estrutural dos painéis do satélite da MECB.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

HENRIQUE, A.M.D; NOGUEIRA, C.F.; ALVES FILHO, J.S.R. *Análise Estática dos Painéis da Estrutura do Satélite de Coleta de Dados da MECB, um Refinamento.* São José dos Campos, INPE. (no prelo).

BIBLIOGRAFIA

ALLEN, H.G. *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels.* Oxford, Pergamon, 1969.

BATHE, K.J. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis.* Englewood Clifls, N.J. Prentice-Hall, 1982.

TIMOSHENKO, S.P.; KRIEGER, S.W. *Theory of Plates and Shells.* Tokyo, Japan. McGraw-Hill Kogakusha, 1959.