

## 6

### Referências

ACI COMMITTEE 408. **Abstract of: State-of-the-Art-Report: Bond under Cyclic Loads.** ACI Materials Journal, v.88, n.6, p.669-73, Nov./Dec.1991.

Ansys User's Manual. ANSYS, Inc.,2006.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR-5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** 1994.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR-7222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** 1994.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7477 – Determinação do coeficiente de conformação superficial das barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado.** 1982.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7480 – Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado.** 1996.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR-6118: Projetos e Execução de Obras de Concreto Armado.** 2004.

CHINN, J.; FERGUSON, P.; THOMPSON, J. **Lapped Splices in Reinforced Concrete Beams.** ACI Journal Proceedings, Vol. 52, No 2, Oct. 1955.

CHOI, O. C.; DARWIN, D.; MCCABE, S. L. **Bond Strength of Epoxy-Coated Reinforcement to Concrete,** 5M Report, No 25, University of Kansas. Center for Research, Lawrence, p.215, July 1990.

ELIGEHAUSEN, PR. E POPOV, E. P. E BERTERO, V. V. **Local Bond stress-slip Relationships of Deformed Bars under Generalized Excitations.** Report n. UCB/EERC-83/23. University of California, Berkeley. 162 p.,1983.

ESFAHANI, M.R.; RANGAN B.V. **Local Bond Strength of Reinforcing Bars in Normal Strength and High-Strength Concrete (HSC).** ACI Structural Journal, Vol. 95, No. 2, p. 96-106, March-April 1998a.

FUSCO, P.B. **Técnica de Armar as Estruturas de Concreto**. São Paulo, Pini.1995.

GOTO, Y. **Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars**. ACI Journal, v.68, n.4, p.244-51, 1971.

GUIMARÃES, G. B.; SILVA, R.R. **Analysis of the Structural Collapse of a 26Story Building**, Rehabilitating and Repairing the Buildings and Bridges of the Americas: Hemispheric Workshop on Future Directions, University of Puerto Rico at Mayaguez, Mayaguez, 23-24 April, 2001, Published by ASCE American Society of Civil Engineers, p.186-201, 2001.

HAMAD, B.S.; MANSOUR, M. **Bond Strength of Noncontact Tension Lap Splices**. ACI Structural Journal, Vol.93, No. 3, p. 316-326, May-June 1996.

LEONARDT, F. ; MONNING, E. **Construções de Concreto: Princípios Básicos do Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado**. 1ª ed. Rio de Janeiro, Interciência. V.1,1977.

MAINS R. M. **Measurement of the Distribution of Tensile and Bond Stresses Along Reinforcing Bars**. Journal ACI, Vol. 23. No. 3, p. 225-252, Nov. 1951.

MONTOYA, P.J. E MESEGUER, A.G. E CABRÉ, F.M. **Hormigón Armado**, Barcelona, Editorial Gustavo Gili, S.A., 8a ed.,1976.

PARK, R.; PAULAY, T. **Reinforced Concrete Structures**. John Wiley e Sons, 1975.

PFISTER J.F.; MATTOCK A.H. **High Strength Bars as Concrete Reinforcement. Part 5. Lapped Splices in Concentrically Loaded Columns**. Journal of the PCA. Research and Development Laboratories. p. 27-40, May 1963.

QUINTANA, C.B. **Influência da Armadura Transversal e do Cobrimento da Armadura Longitudinal na Resistência de Pilares de Concreto**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. PUC, Rio de Janeiro, setembro, 2005.

REHM, G. **Kriterien zur Beurteilung von Bewehrungsstäben mit hochwertigem Verbund**. Stahlbetonbau, Berlin, p.79-96, 1969.

RILEM-FIP-CEB. **Bond Test for Reinforcing Steel – 2**. Pull-Out test. Matériaux et constructions, v.6, n.32, p.102-5.1972.

SCOTT, R.H., GILL, P.A.T.; JUDGE, R.C.B. **Force Transfer in Compression Lap Joints in Reinforced Concrete.** Magazine of Concrete Research, Vol. 41, No. 146, Mar 27-31 1989.

SOROUSHIAN, P., KB CHOI, PARK G.H., ASLANI F. **Bond of Deformed Bars to Concrete: Effects of Confinement and Strength of Concrete.** ACI Materials Journal, v.88, n.3, p.227-232, May/June., 1991.

TASSIOS, T.P. **Properties of Bond Between Concrete and Steel under Load Cycles Idealizing Seismic Actions.** AICAP-CEB Symposium, Structural Concrete Under Seismic Actions. CEB, Bulletin d'Information, n.131, p.67-122. 1979.

## A

### ANEXO A: Gráficos força vs. deformação nas armaduras

Este anexo apresenta as curvas de deformação longitudinal nas armaduras ao longo da emenda.

#### A.1.

#### Deformação longitudinal nas armaduras ao longo da emenda

Para facilitar a observação do comportamento da deformação longitudinal nas armaduras ao longo da emenda nos pilares das *Séries 2 e 3* foram definidas quatro diferentes solicitações:  $0,25N_u$ ,  $0,50N_u$ ,  $0,75N_u$ , e  $0,98N_u$ . Para cada solicitação foram traçadas as curvas deformações nas armaduras vs. posição dos extensômetros ao longo da emenda. Para os pilares da *Série 2*, as curvas das emendas localizadas junto à *Face D* são mostradas na Figura A.1 e na Figura A.2 as curvas das emendas localizada junto à *Face E*. Para os pilares da *Série 3*, essas curvas são mostradas, respectivamente, na Figura A.3 e na Figura A.4. Nas legendas das figuras os símbolos “FD” e “FE” indicam emendas localizadas na *Face D* e na *Face E*, respectivamente. Também, foram traçadas curvas deformações nas armaduras vs. posição dos extensômetros ao longo da emenda destas quatro solicitações dos pilares das *Séries 2 e 3* individualmente, que estão apresentadas da Figura A.5 a Figura A.8 do Anexo 1.

Analisando o comportamento das deformações ao longo da emenda, observa-se que na emenda da *Face E* do pilar P2-AE e nas duas emendas do pilar P3-AE que, de modo geral, as deformações decresceram para solicitações superiores a  $0,5N_u$ , sendo que no pilar P3-AE as deformações específicas registradas nos dois extensômetro próximos da ponta da barra continuaram crescendo com o incremento de carga, indicando ruptura da ligação aço-concreto nos outros pontos.

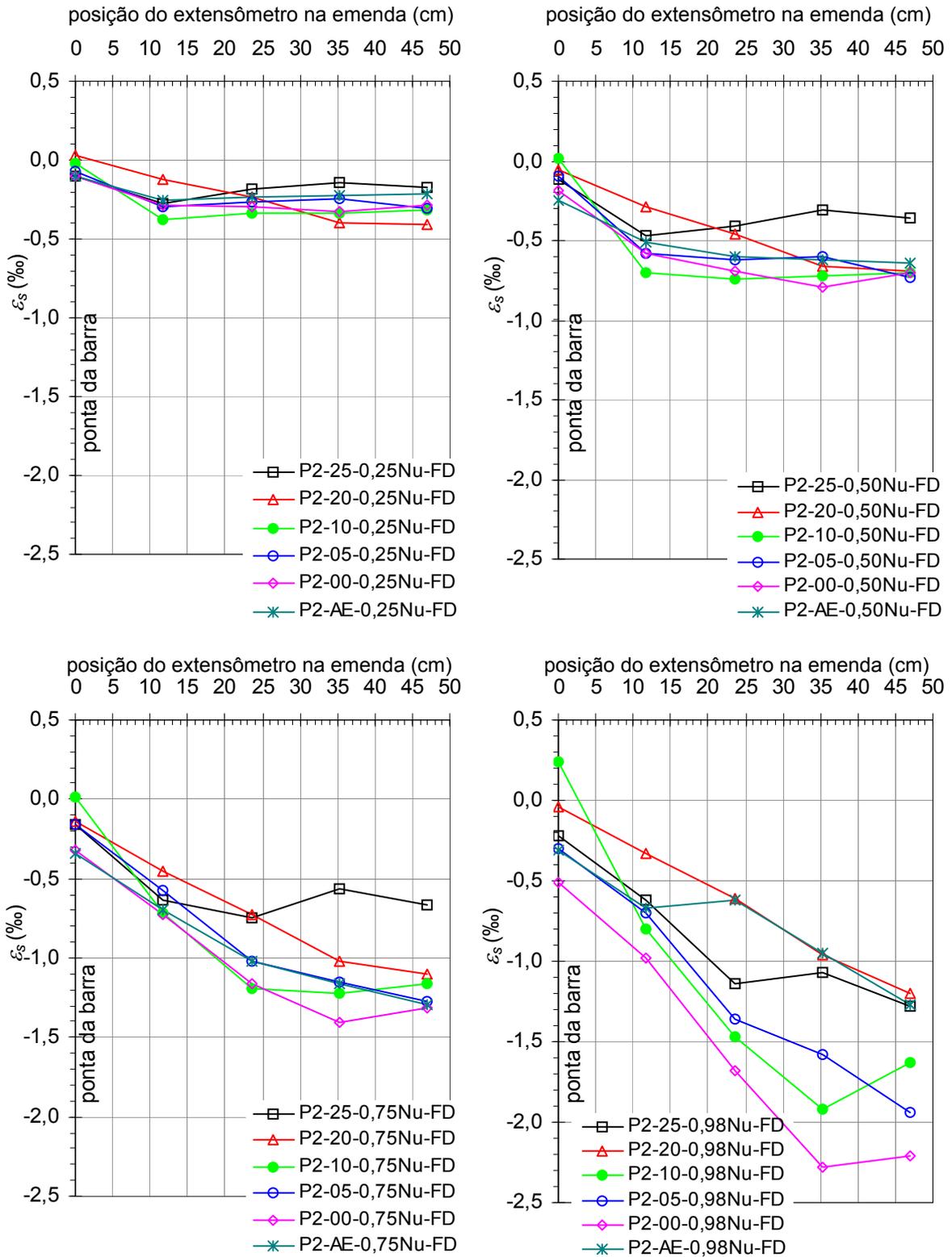


Figura A.1 – Deformação específica ao longo da emenda da Face D dos pilares da Série 2 para quatro diferentes solicitações.

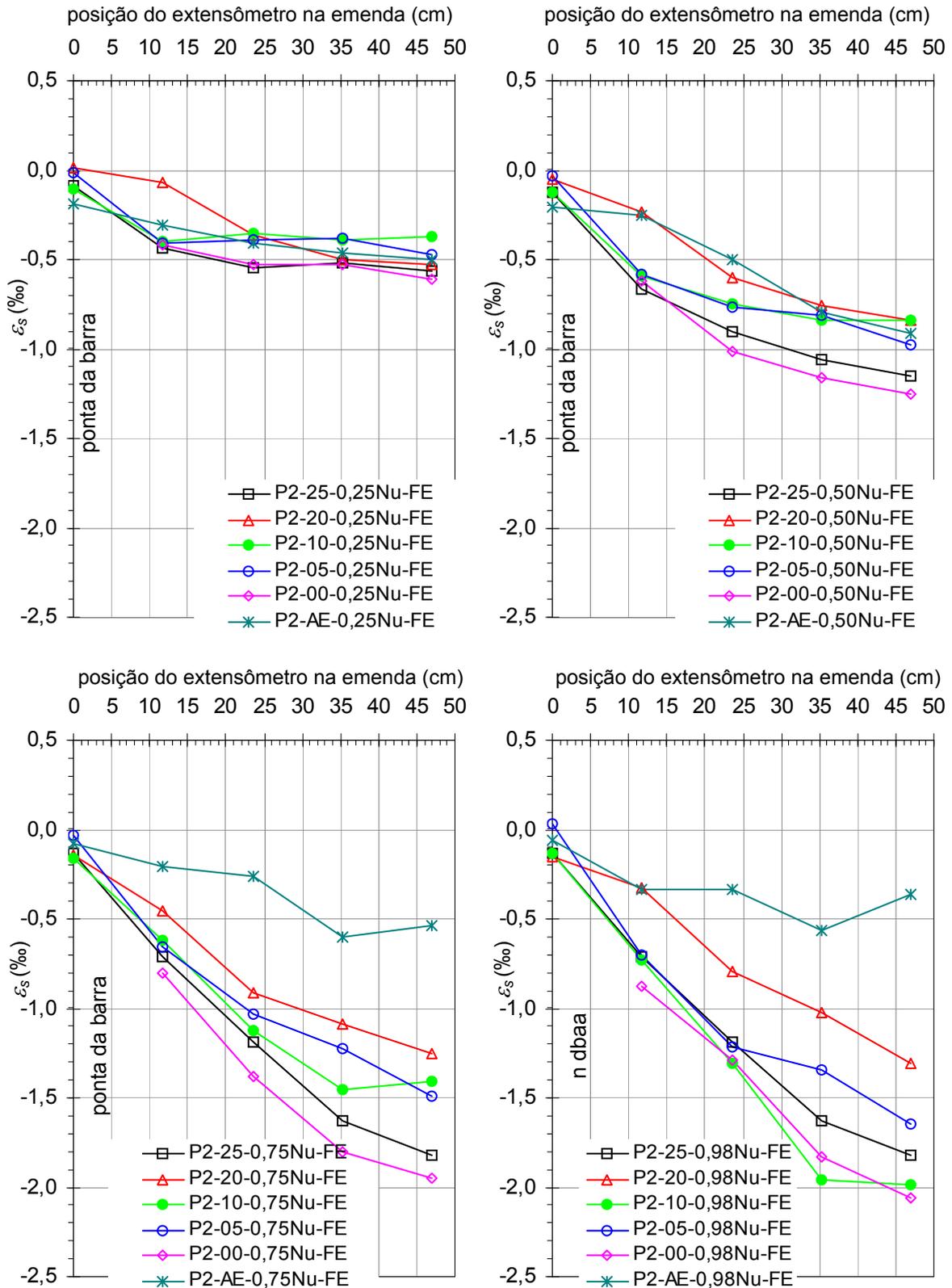


Figura A.2 – Deformação específica ao longo da emenda da Face E dos pilares da Série 2 para quatro diferentes solicitações.

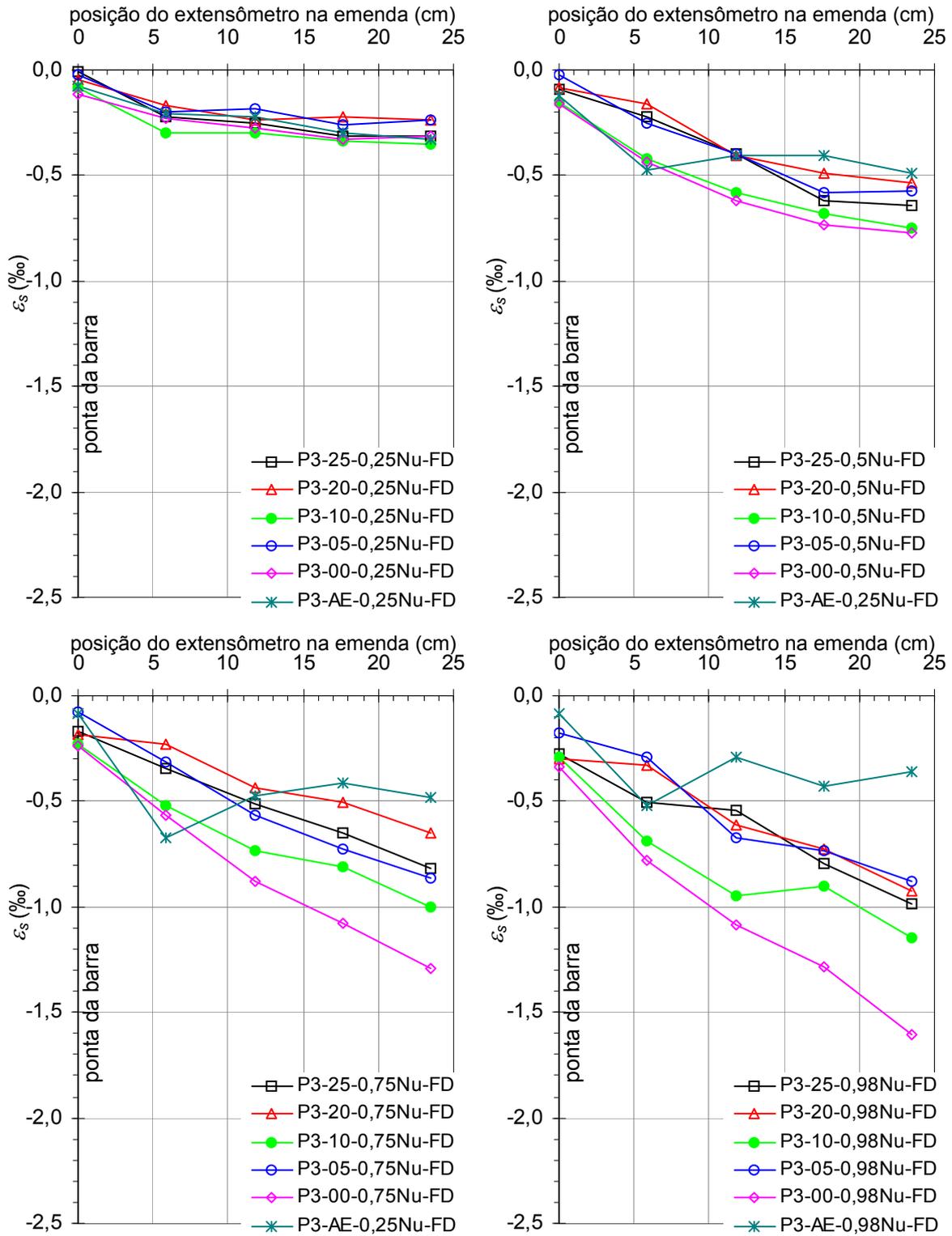


Figura A.3 – Deformação específica ao longo da emenda da Face D dos pilares da Série 3 para quatro diferentes solicitações.

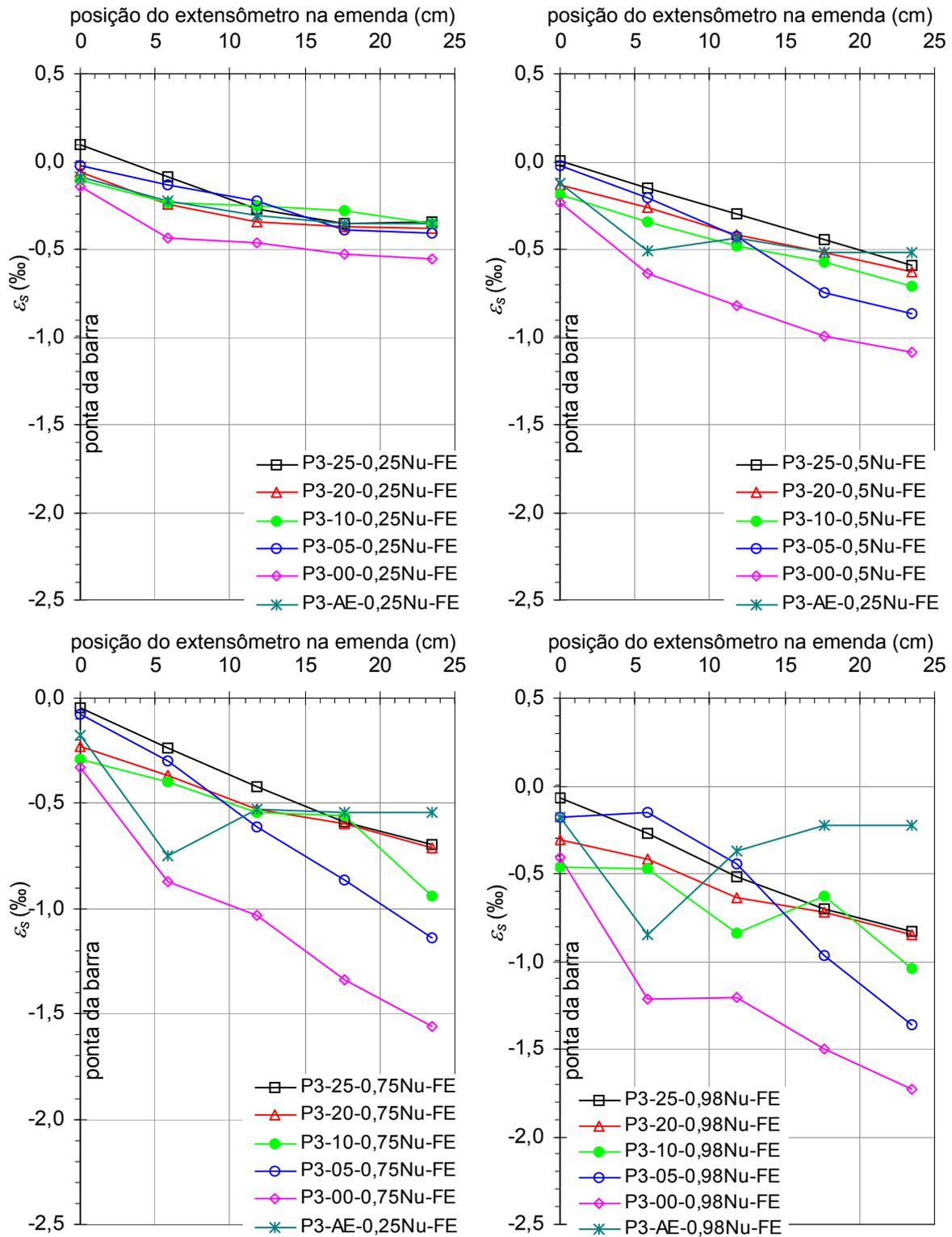


Figura A.4 – Deformação específica ao longo da emenda da Face E dos pilares da Série 3 para quatro diferentes solicitações.

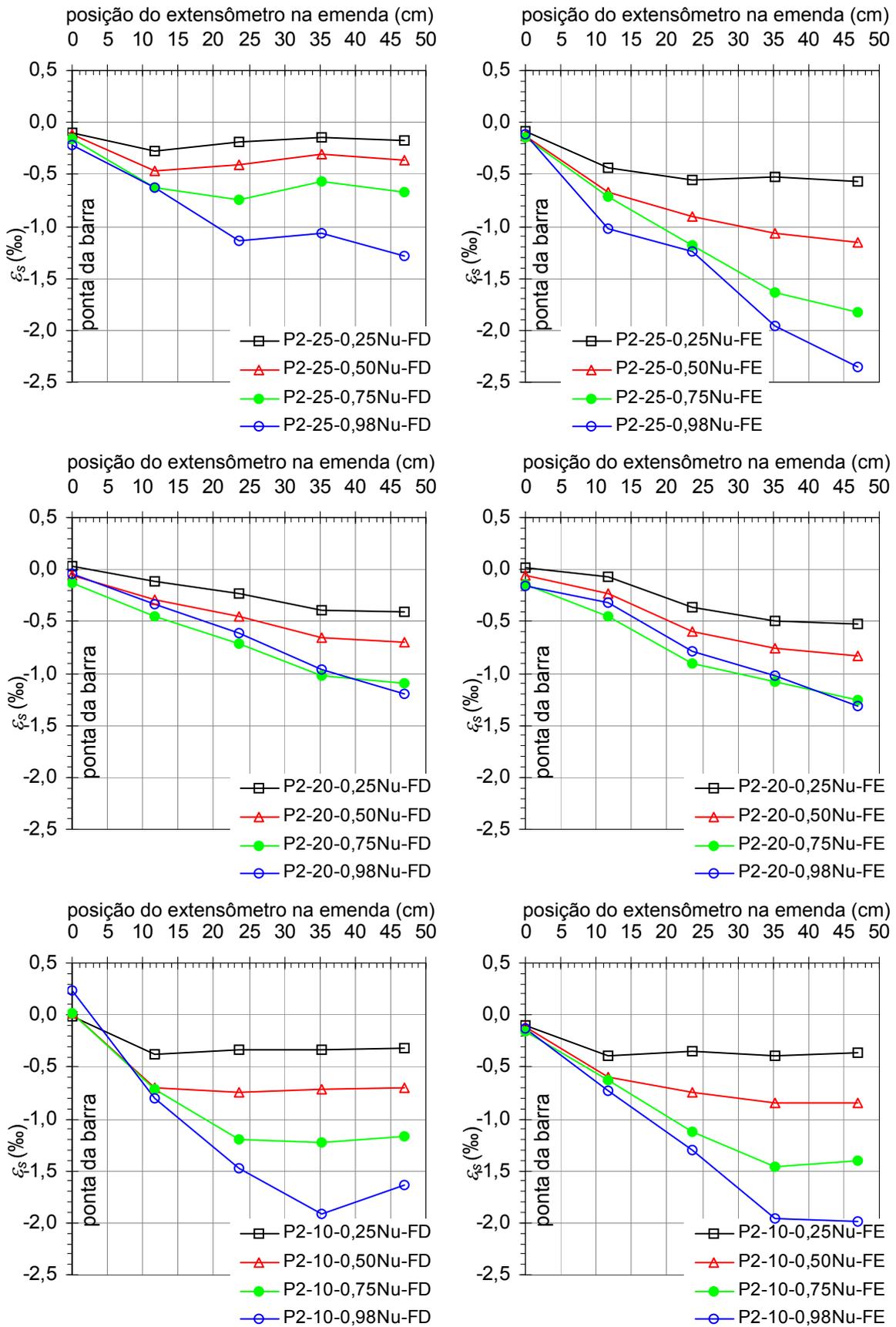


Figura A.5 – Curva Deformação específica vs. comprimento da emenda para diferentes solicitações (pilares: P2-25, P2-20 e P2-10).

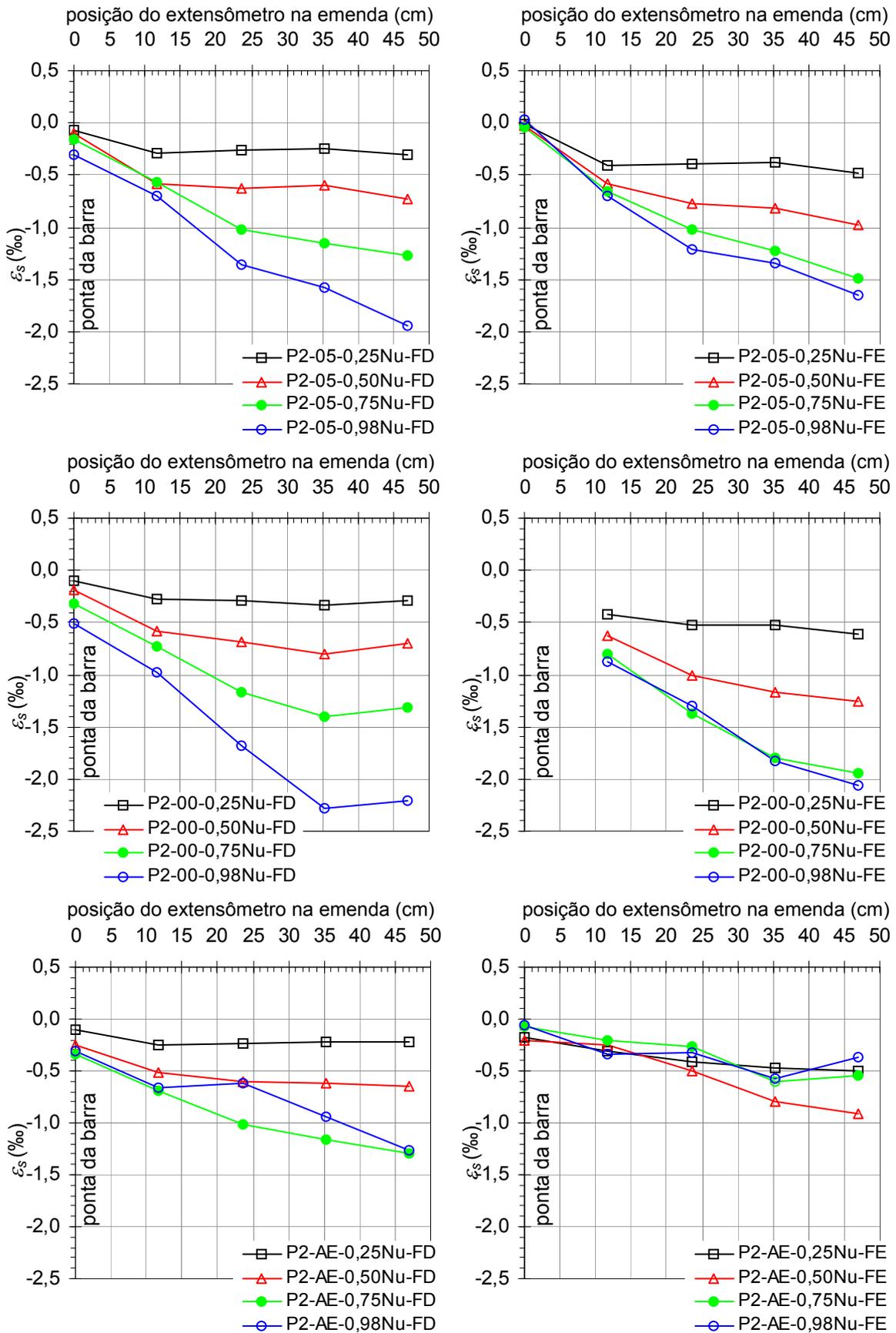


Figura A.6 – Curva Deformação específica vs. comprimento da emenda para diferentes solicitações (pilares: P2-05, P2-00 e P2-AE).

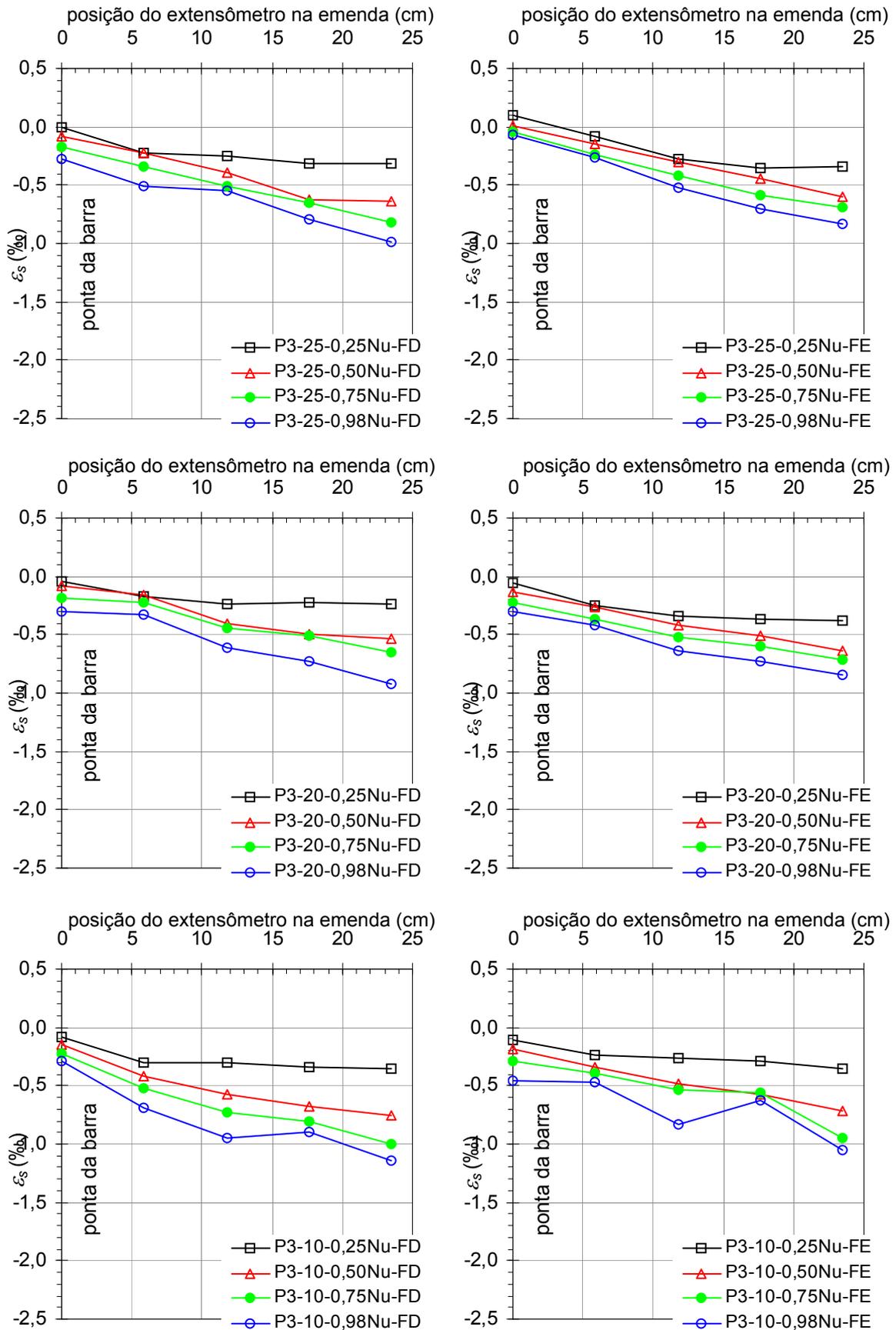


Figura A.7 – Curva Deformação específica vs. comprimento da emenda para diferentes solicitações (pilares: P3-25, P3-20 e P3-10).

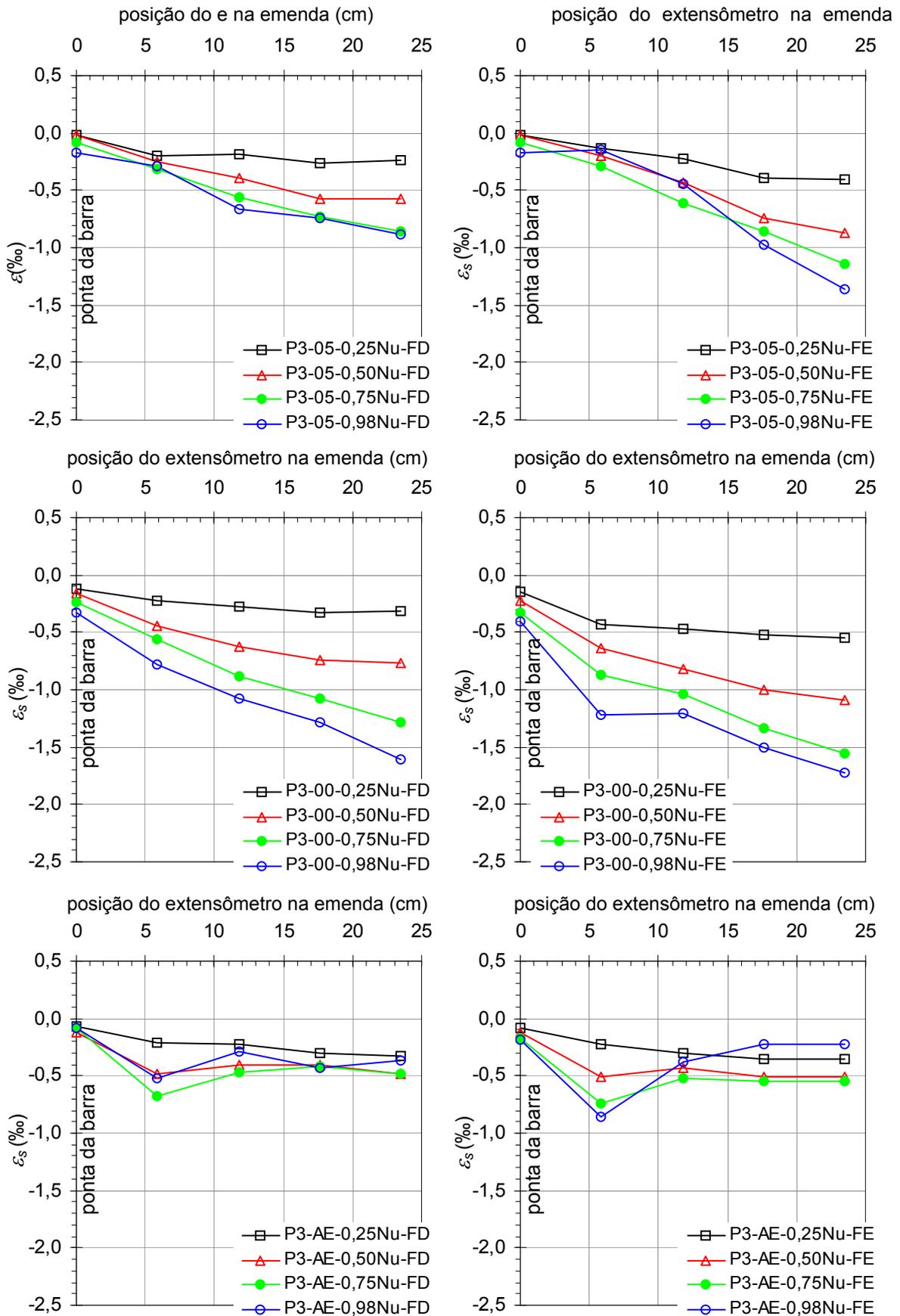


Figura A.8 – Curva Deformação específica vs. comprimento da emenda para diferentes solicitações (pilares: P3-05, P3-00 e P3-AE).

## **B**

### **ANEXO B: Modelo numérico**

Este anexo apresenta uma análise numérica do comportamento de emendas por traspasse em elementos comprimidos, considerando o comportamento linear e elástico dos materiais e elementos de contato na ligação aço-concreto.

Com a finalidade de identificar as regiões mais afetadas pelo fenômeno da aderência entre o aço e o concreto, foram realizadas várias análises numéricas empregando-se o *software* ANSYS. Os resultados obtidos com a simulação foram usados como base para o desenvolvimento dos modelos a serem adotados nos ensaios físicos, indicando quais os parâmetros mais relevantes, além de mostrar os pontos adequados para o posicionamento da instrumentação.

A análise numérica apresentada neste trabalho não pretende avaliar a complexidade do fenômeno da aderência na interface do contato. A intenção é avaliar um comportamento mais global para a definição dos modelos usados nos ensaios.

Devido a problemas de convergência foi considerada apenas a não linearidade geométrica do problema, sendo os materiais considerados lineares e elásticos.

#### **B.1.1.**

##### **Sobre o Ansys**

O Ansys é um programa computacional voltado para projeto e análise estrutural utilizando o Método dos Elementos Finitos. Trata-se de programa comercial, utilizado em vários ramos da indústria: automobilística, aeroespacial, eletrônica, de máquinas, de geração de energia, biomecânica e em todas áreas da engenharia estrutural, mecânica, elétrica, eletromagnética, eletrônica, térmica, de fluidos e biomédica. O Ansys também é utilizado como ferramenta educacional em universidades e em outras instituições acadêmicas. A interface do programa Ansys é mostrada na Figura B.1.

## B.1.2. Problemas de contato no Ansys

A avaliação de problemas de contato envolve a não-linearidade geométrica da estrutura. Desse modo certas dificuldades são encontradas na determinação de sua solução. Dependendo do carregamento, do material, das condições de contorno além de outros fatores, determinadas regiões do modelo podem entrar ou sair do contato subitamente. Ademais, em vários desses problemas se faz necessário considerar o atrito entre os elementos em contato. Como o atrito é considerado de forma não-linear, a avaliação do seu comportamento pode dificultar a convergência da solução.

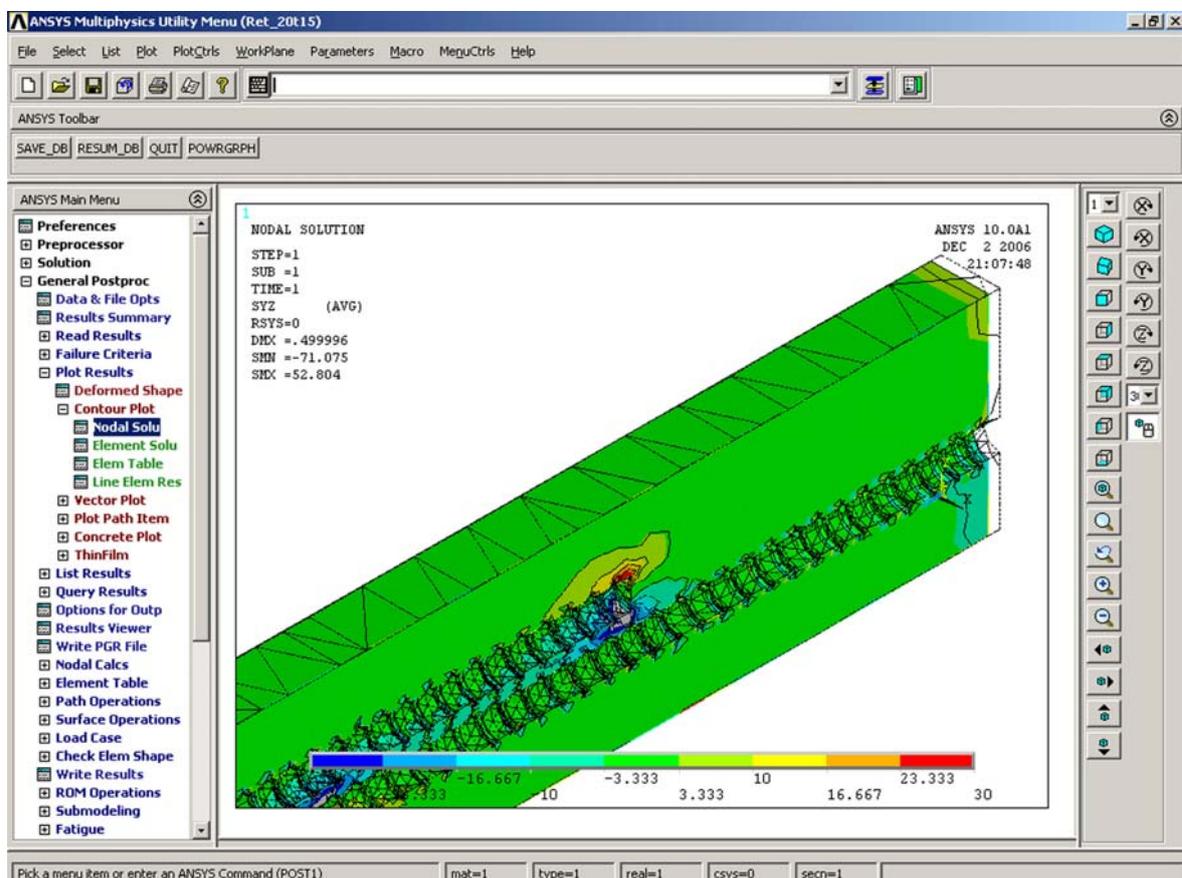


Figura B.1 – Interface do software Ansys.

### B.1.2.1. Contato rígido-flexível e flexível-flexível

O problema do contato pode ser classificado em rígido-flexível e flexível-flexível. Nos problemas de contato rígido-flexível, uma ou mais das superfícies em contato são tratadas como rígidas, isto é, tem a rigidez muitas vezes superior a rigidez do corpo deformável em contato. No contato flexível-flexível, todos os

corpos em contato são deformáveis. Nesse caso os dois corpos em contato têm coeficientes de rigidezes semelhantes. As ligações com parafusos em estruturas metálicas são exemplos de contato flexível-flexível.

### **B.1.2.2. Interação do contato**

A análise do contato pode ser feita por meio de três formas: nó-nó, nó superfície e superfície-superfície. Se uma das partes de interação é um ponto, a componente correspondente do modelo é um nó. Se uma das partes de interação é uma superfície, a componente correspondente do modelo é um elemento. O Método dos Elementos Finitos reconhece possíveis pares de contato por meio da presença de elementos de contato específicos, que revestem as partes do modelo que estão sendo analisadas para interação. O contato aço-concreto na avaliação do contato da barra com o concreto envolvente pode ser considerado um problema de superfície-superfície.

Os elementos de superfície-superfície têm algumas vantagens em relação aos de nó-superfície, tais como:

a) permitem grandes deformações, com um deslizamento e atrito significativos. Uma matriz de rigidez consistente é calculada, e os elementos permitem a utilização da opção de uma matriz de rigidez assimétrica;

b) admite elementos de alta e baixa ordem na superfície. Os elementos de alta ordem são aqueles que têm nós de extremidade e intermediários, já os de baixa ordem só têm nós de extremidade.

c) fornecem melhores resultados no caso de pressão normal e tensões de atrito;

e) exigem uma menor quantidade de elementos que os de nó-superfície;

d) não há restrição quanto à forma da superfície rígida.

No tipo de contato superfície-superfície os elementos do corpo deformável são denominados elementos “de contato”, e os elementos do corpo rígido são chamados “rígidos”.

### **B.1.2.3. Simetria do contato**

Classifica-se o contato também como assimétrico e simétrico. O contato assimétrico é definido com todos os elementos “de contato” em uma superfície e todos os elementos “rígidos” em outra. Esta é a maneira mais eficiente de

modelagem do contato superfície-superfície. Entretanto, em algumas circunstâncias do contato assimétrico, não é possível resolver o problema satisfatoriamente. Em tais casos, cada superfície pode ser designada tanto de “rígida” como “de contato”. Duas séries de pares de contato podem ser geradas entre as superfícies em contato ou apenas um par de contatos, como o exemplo de modelos que entram em contato com eles mesmos. Este caso é conhecido como contato simétrico, o qual é menos eficiente que o assimétrico. Entretanto, muitas análises exigem seu uso, como por exemplo, para reduzir a penetração de uma superfície na outra. O problema do contato aço-concreto para verificação da aderência pode ser enquadrado como assimétrico.

### **B.1.3.**

#### **Tipo de elementos finitos do ANSYS utilizados nos modelos**

##### **B.1.3.1.**

##### **Elemento tipo SOLID65**

Para a discretização do concreto foi utilizado o elemento finito tipo SOLID65 que é usado para a modelagem tridimensional de materiais sólidos como o concreto armado ou sem armadura. Esse elemento permite fissuração na tração, esmagamento na compressão, deformação plástica e fluência. O elemento é definido por oito nós tendo três graus de liberdade cada um: translações nas direções nodais (x, y e z), como ilustra a Figura B.2. A característica mais importante desse elemento é a não-linearidade física.

O critério de ruína utilizado pelo ANSYS para o concreto devido a um estado de tensão multiaxial é dado pela expressão:

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad (\text{B.1})$$

onde

F – função dos estados principais de tensões ( $\sigma_{xp}$ ,  $\sigma_{yp}$ ,  $\sigma_{zp}$ );

S – superfície de ruptura expressa em termos das tensões principais e de cinco parâmetros introduzidos pelo usuário:  $f_t$ ,  $f_c$ ,  $f_{cb}$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ .

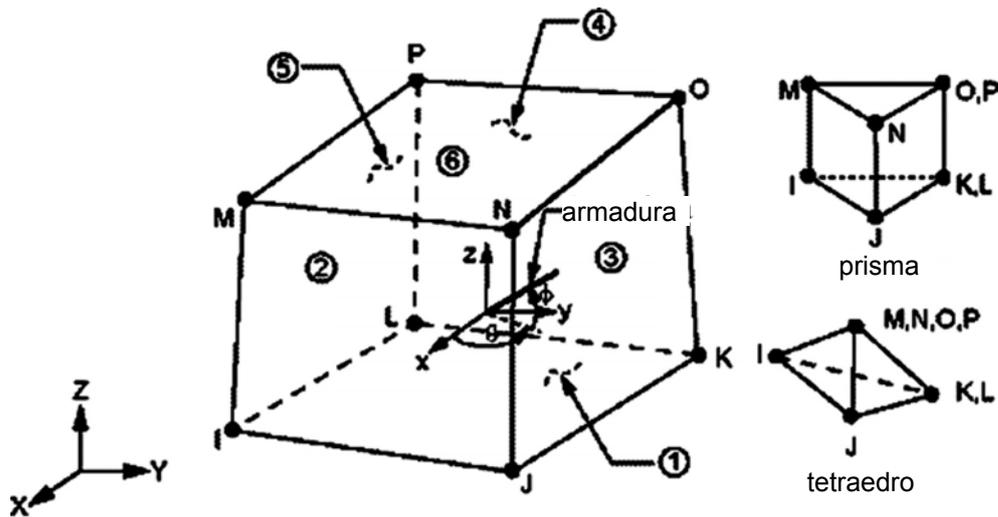


Figura B.2 – Elemento finito tipo SOLID65 do ANSYS.

Se a expressão (B.1) não é satisfeita, não há esmagamento ou fissuração. Por outro lado, o material fissura se qualquer uma das tensões principais estiver sob tração, ou esmaga se todas as tensões principais estiverem sob compressão.

Cinco parâmetros de resistência (sendo que qualquer um pode ser dependente da temperatura) são necessários para definir a superfície de ruptura: resistência última à tração uniaxial  $f_t$ , resistência última à compressão uniaxial  $f_c$ , resistência última à compressão biaxial  $f_{cb}$ , estado hidrostático de tensões  $\sigma_h^a$ , resistência última à compressão para um estado biaxial de compressão sobreposto com um estado hidrostático de tensão  $f_1$ , resistência última à compressão para um estado uniaxial de compressão sobreposto com um estado hidrostático de tensão  $f_2$ .

Entretanto, a superfície de ruptura pode ser determinada com um mínimo de duas constantes,  $f_t$  e  $f_c$ . As outras três constantes são calculadas automaticamente de acordo com o critério padrão implantado no ANSYS. Para estas constantes, o critério usado no ANSYS atribui os seguintes valores:

$$f_{cb} = 1,2f_c \quad (B.2)$$

$$f_1 = 1,45f_c \quad (B.3)$$

$$f_2 = 1,72f_{cb} \quad (B.4)$$

Contudo, esses valores padrões são válidos apenas para os estados de tensões onde se tem:

$$\sigma_h \leq \sqrt{3f_c} \quad (B.5)$$

sendo

$$\sigma_h = \frac{1}{3}(\sigma_{xp} + \sigma_{yp} + \sigma_{zp}) \quad (\text{B.6})$$

um estado de tensões hidrostáticas.

A expressão (B.5) é aplicada exclusivamente em situações com baixas tensões hidrostáticas. Todos os cinco parâmetros de ruína devem ser especificados quando são esperados altos valores para as componentes de pressão hidrostática. Se a condição apresentada na expressão (B.5) não é satisfeita, e os valores apresentados nas expressões (B.7), (B.8) e (B.9) são adotados, a resistência do modelo para concreto pode ser determinada de maneira incorreta.

As funções  $F$  e  $S$  são expressas em termos das tensões principais, denotadas como  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  onde:

$$\sigma_h \leq \sqrt{3f_c} \quad (\text{B.7})$$

$$\sigma_1 = \text{máx}(\sigma_{xp} + \sigma_{yp} + \sigma_{zp}) \quad (\text{B.8})$$

$$\sigma_3 = \text{mín}(\sigma_{xp} + \sigma_{yp} + \sigma_{zp}), \text{ com } \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (\text{B.9})$$

O modelo de ruína disponível para concreto no ANSYS é dividido em quatro domínios distintos:

$$0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \text{ (compressão-compressão-compressão)}$$

$$s_1 \geq 0 \geq s_2 \geq s_3 \text{ (tração-compressão-compressão)}$$

$$s_1 \geq s_2 \geq 0 \geq s_3 \text{ (tração-tração-compressão)}$$

$$s_1 \geq s_2 \geq s_3 \geq 0 \text{ (tração-tração-tração)}$$

Os critérios de ruptura implementados no ANSYS foram elaborados a partir do modelo proposto por Willam e Warnke, descrito em CHEN (1982). Este critério é um dos mais avançados, sendo dependente de cinco parâmetros.

A Figura B.3 ilustra uma superfície típica de ruptura bidimensional para concreto e implementada no programa ANSYS.

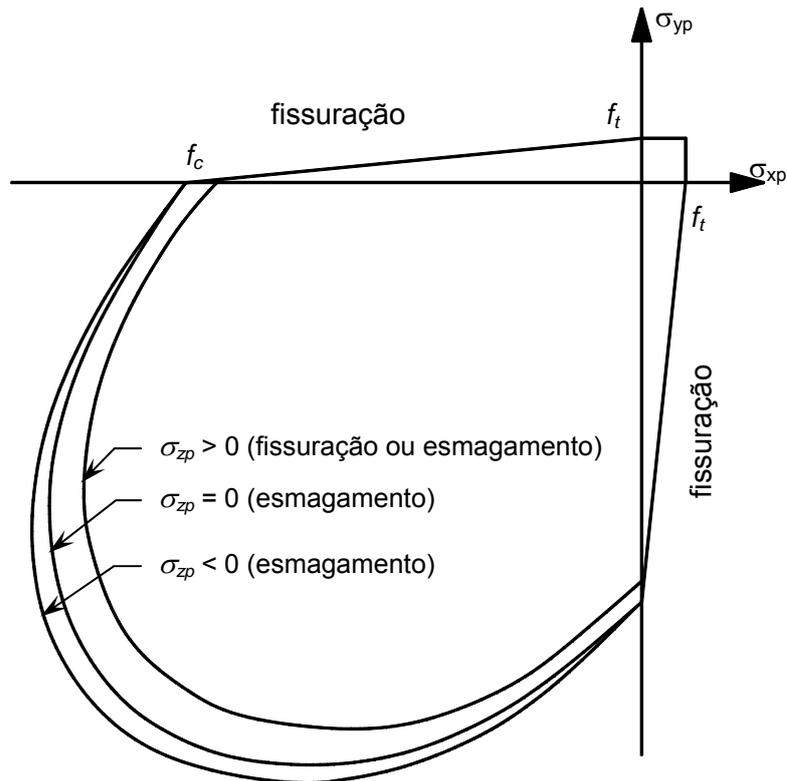


Figura B.3 – Superfície de ruptura bidimensional implementada no software ANSYS.

### B.1.3.2. Elemento tipo SOLID185

Para a discretização das barras de aço foi utilizado o elemento finito tipo SOLID185, que é usado para a modelagem tridimensional de estruturas sólidas. Este elemento é definido por oito nós tendo três graus de liberdade em cada nó: translação nas direções nodais (x, y, e z) como ilustra a Figura B.4.

O elemento é capaz de modelar plasticidade, superplasticidade, rigidez à tração, fluência, grande deslocamentos e grandes deformações. Ele também é dotado de uma formulação mista que o torna capaz de simular deformações de materiais elastoplásticos semi-incompressíveis, além de materiais hiperelásticos incompressíveis.

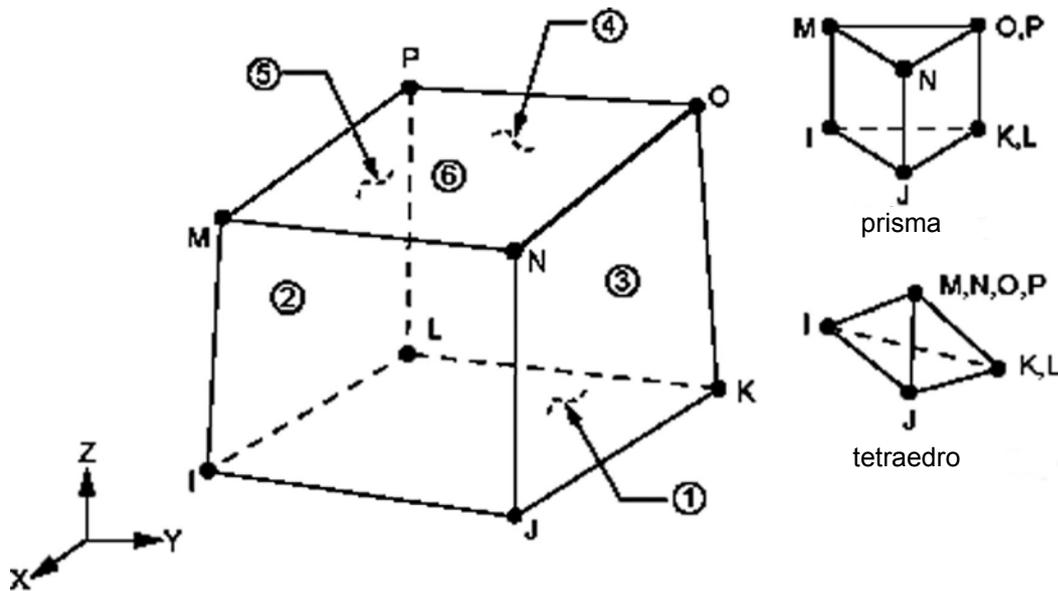


Figura B.4 – Elemento finito tipo SOLID185 do ANSYS.

### B.1.3.3. Elemento tipo TARGE170

O elemento finito tipo TARGE170 é utilizado para representar várias superfícies “rígidas” tridimensionais associadas com os elementos “de contato”, os quais neste trabalho são definidos pelo CONTA173. Os elementos de contato revestem os elementos sólidos descrevendo o contorno do corpo deformável, e estão potencialmente ligados à superfície “rígida”. Tal superfície é discretizada por uma série de elementos TARGE170, formando par com a superfície “de contato” associada por meio de uma mesma constante. Tem três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ). Os sentidos dos vetores normais às superfícies dos elementos CONTA173 e TARGE170 devem estar em sentido contrário (Figura B.5).

### B.1.3.4. Elemento tipo CONTA173

O elemento finito de contato tipo CONTA173 é usado para representar o contato entre a superfície “rígida” (TARGE170) e a superfície deformável, definida por esse elemento. Tem três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ). As características geométricas do elemento CONTA173 são as mesmas da face dos elementos sólidos ao qual ele está ligado. A Figura B.6 apresenta um esquema para este elemento.

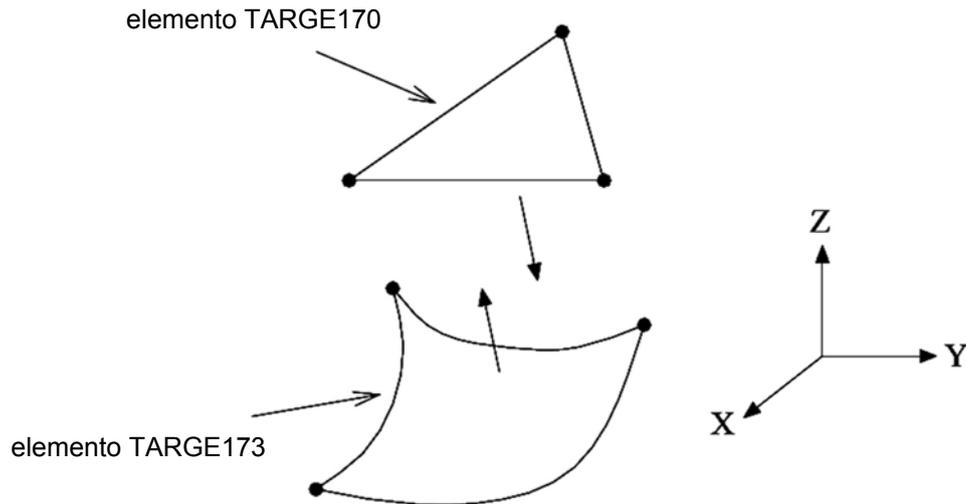


Figura B.5 – Elemento finito de contato tipo TARGE170 do ANSYS.

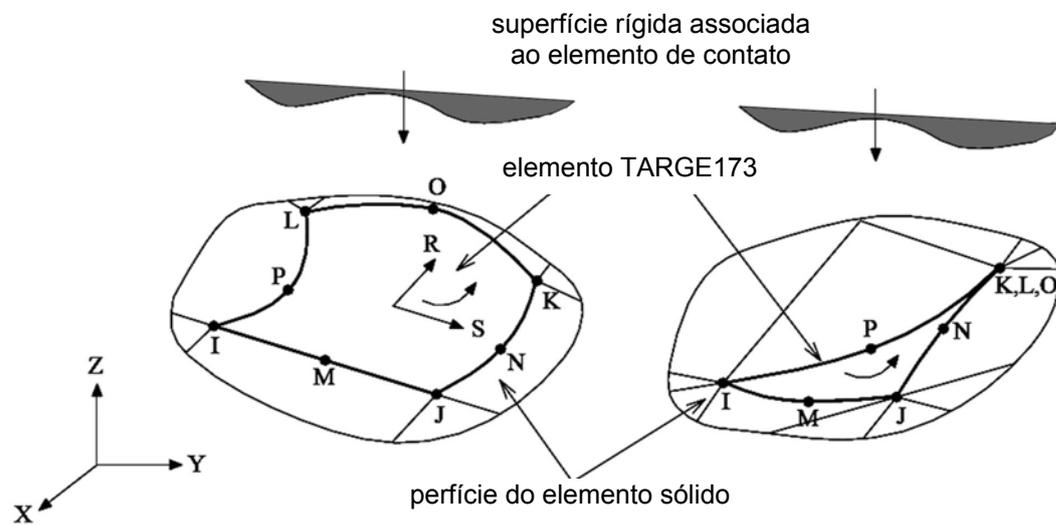


Figura B.6 – Elemento finito de contato tipo CONTA173 do ANSYS.

#### B.1.4. Parâmetros usados para os materiais

Na análise numérica foram adotados os seguintes parâmetros:

Módulo de elasticidade do concreto:  $E_c = 23 \text{ GPa}$

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

Módulo de elasticidade do aço:  $E_s = 200 \text{ GPa}$

Coefficiente de Poisson:  $\nu = 0,30$

Para as condições de contorno foram aplicados deslocamentos prescritos nas duas extremidades, no sentido longitudinal do bloco, correspondentes a uma deformação específica de 2‰.

### B.1.5. Descrição dos modelos analisados

Foram analisados 14 modelos que foram reunidos em três grupos, mostrados na Tabela B.1.

No grupo *MODELO 1* os modelos são constituídos por um bloco de concreto com seção transversal de 100mm x 150mm e comprimento de 500 mm. Neste bloco de concreto foi posicionada uma barra de aço nervurada, com diâmetro nominal  $\phi$  16,0 mm, com o comprimento de 400 mm (Figura B.7). Foi avaliado ainda um modelo considerando uma barra lisa no grupo *MODELO 1* (*MODELO 1-30L*) e outro no grupo *MODELO 2* (*MODELO 2-30L*), conforme mostrado na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Descrição dos modelos usados na análise numérica.

Designação	Traspasse – $I_b$ (mm)	Cobrimento – $c$ (mm)	Tipo de barra
<i>MODELO 1-05</i>		5	nervurada
<i>MODELO 1-10</i>		10	nervurada
<i>MODELO 1-20</i>		20	nervurada
<i>MODELO 1-30</i>		30	nervurada
<i>MODELO 1-30L</i>		30	lisa
<i>MODELO 2-05</i>	150	5	nervurada
<i>MODELO 2-10</i>	150	10	nervurada
<i>MODELO 2-20</i>	150	20	nervurada
<i>MODELO 2-30</i>	150	30	nervurada
<i>MODELO 2-30L</i>	150	30	lisa
<i>MODELO 3-05</i>	300	5	nervurada
<i>MODELO 3-10</i>	300	10	nervurada
<i>MODELO 3-20</i>	300	20	nervurada
<i>MODELO 3-30</i>	300	30	nervurada

No grupo *MODELO 2* (Tabela B.1), os modelos apresentam uma emenda por traspasse com comprimento de 150 mm, e para o grupo *MODELO 3* essa emenda tem o comprimento de 300 mm. Em todos os modelos o bloco de concreto tem sempre as mesmas dimensões, alterando-se o comprimento e a quantidade de barras de aço.

Na Figura B.7 a dimensão  $c$  corresponde ao cobrimento da armadura e varia de acordo com os dados Tabela B.1, e a dimensão  $B$  equivale ao soma do diâmetro da barra mais duas vezes o cobrimento.

A Figura B.8 mostra o aspecto tridimensional dos modelos do grupo *MODELO 1*.

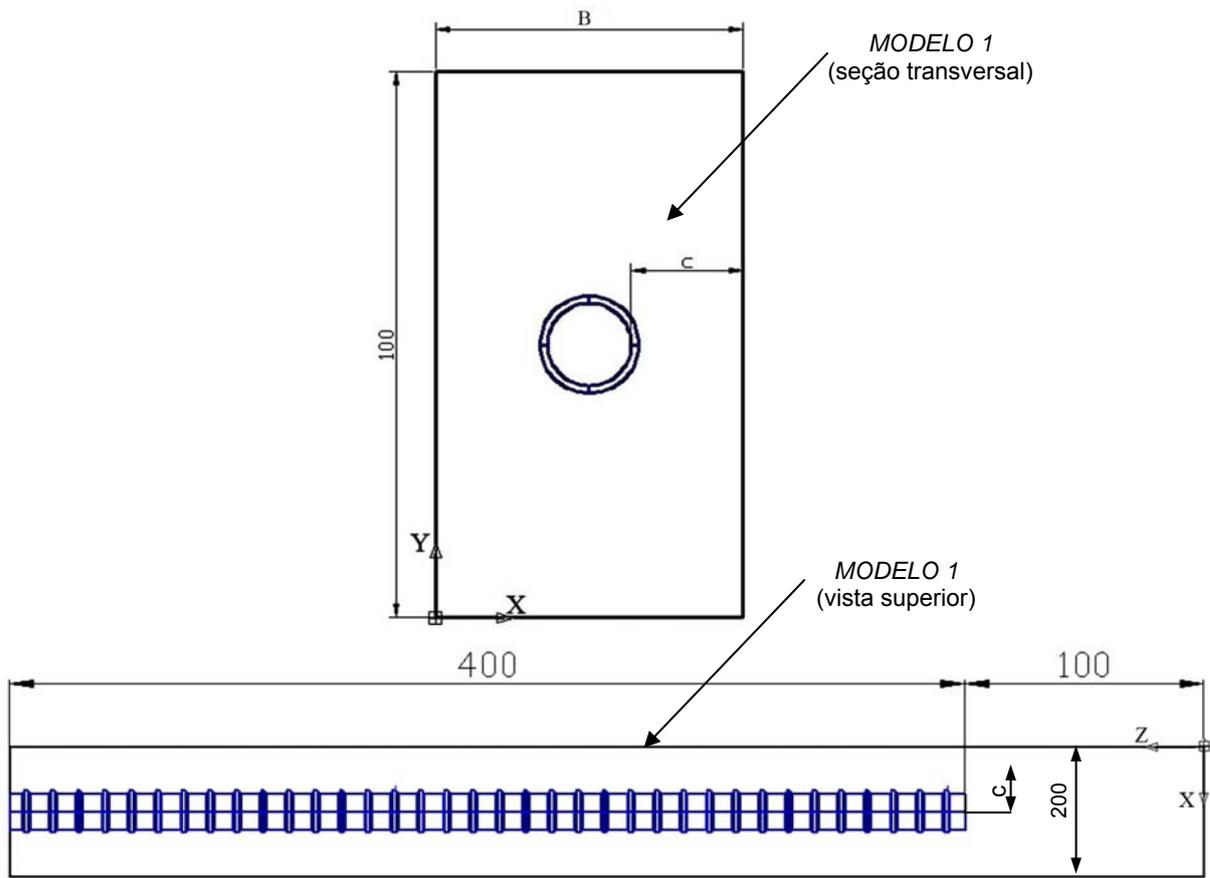


Figura B.7 – Dimensões utilizadas nos modelos do grupo *MODELO 1* (vista superior).

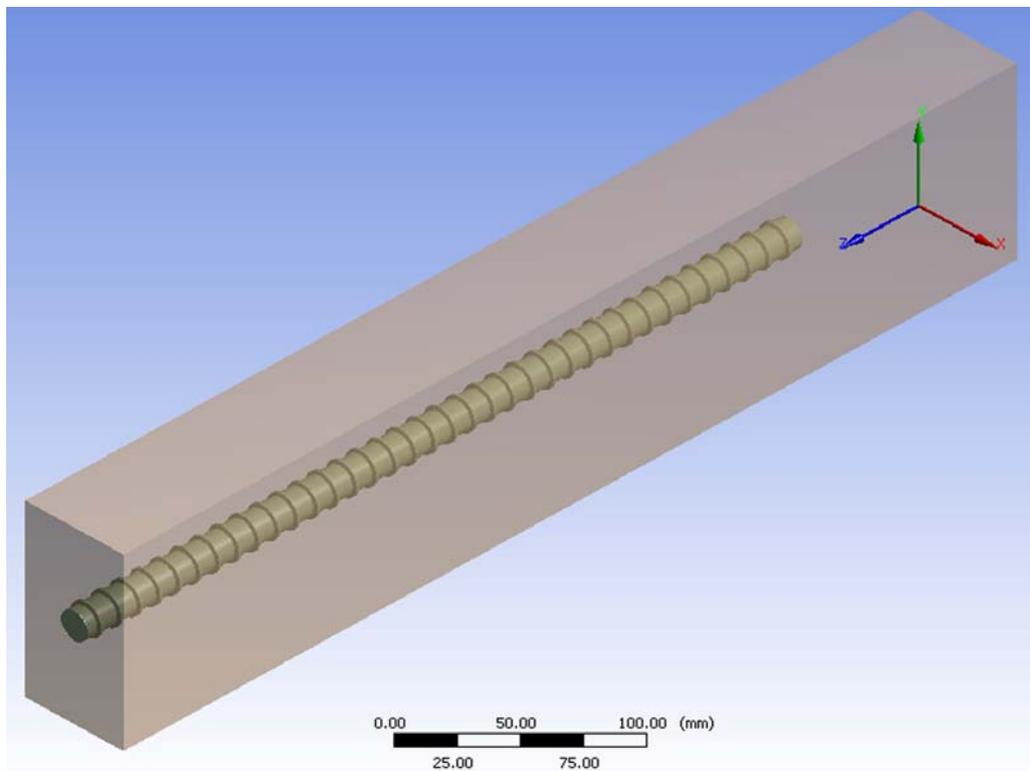


Figura B.8 – Aspecto tridimensional dos modelos do grupo *MODELO 1*.

Para os modelos dos grupos *MODELO 2* e *MODELO 3* tem-se as mesmas dimensões apresentadas na Figura B.7, considerando-se a vista superior. Entretanto numa vista lateral, como ilustra a Figura B.9, percebe-se a inserção de uma outra barra para simular a emenda por traspasse.

A Figura B.10 mostra o aspecto tridimensional para os modelos do grupo *MODELO 2*, que são semelhantes ao *MODELO 3*.

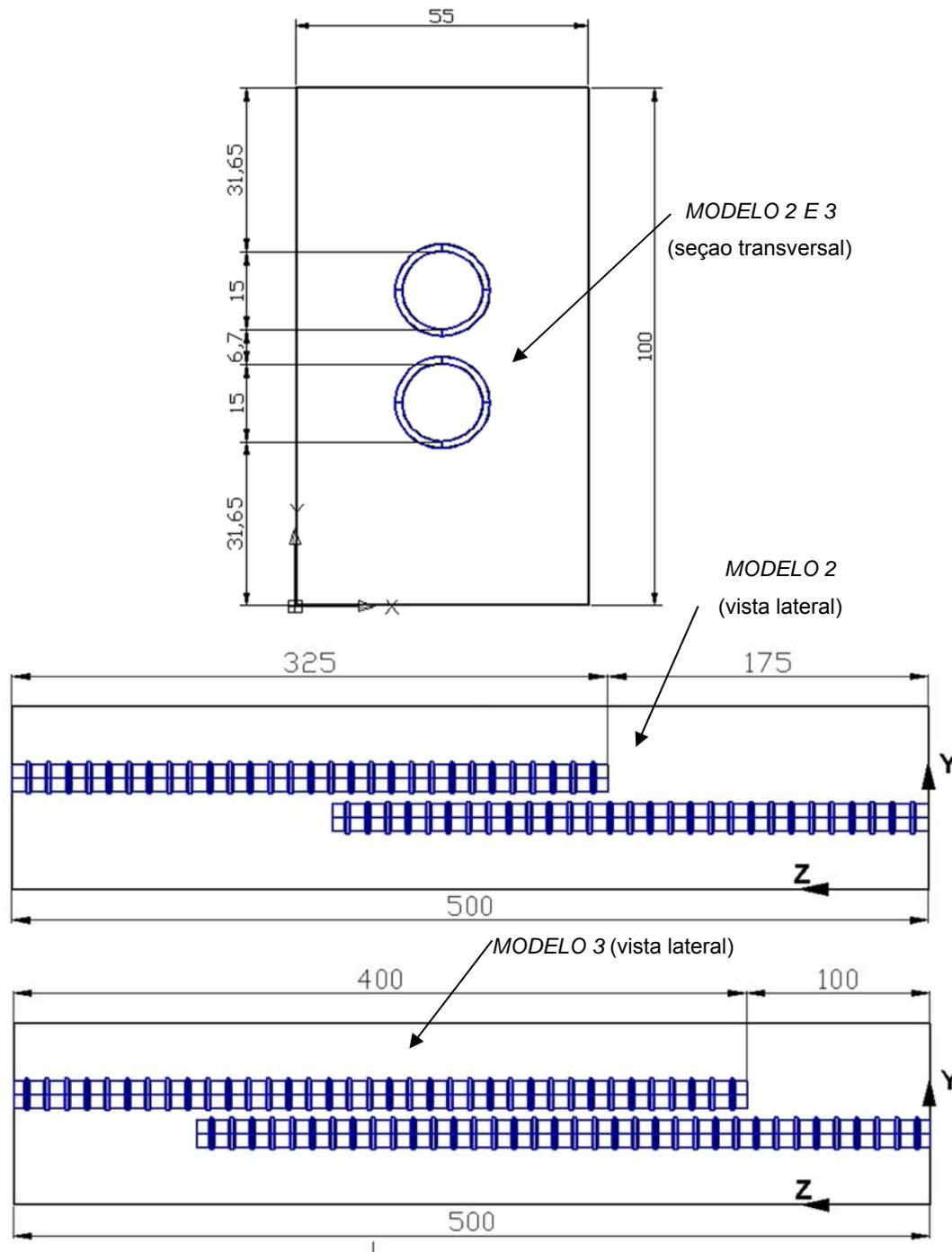


Figura B.9 – Dimensões utilizadas nos modelos dos grupos *MODELO 2* e *3* (vista lateral).

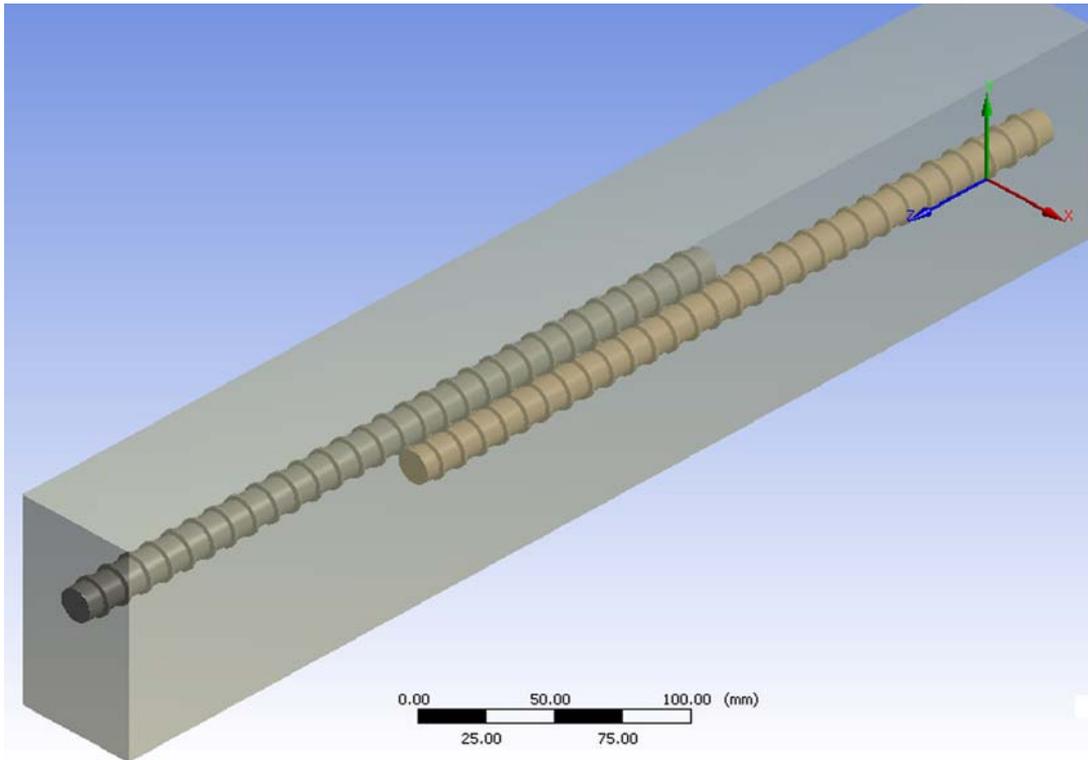


Figura B.10 – Aspecto tridimensional dos modelos dos grupos MODELO 2 e MODELO 3.

As dimensões da barra de aço usada em todos os modelos, tais como: alturas das nervuras, espaçamento entre nervuras e diâmetro, foram obtidas diretamente de uma barra de diâmetro nominal  $\phi$  16,0 mm com o auxílio de um paquímetro e são mostradas na Figura B.11.

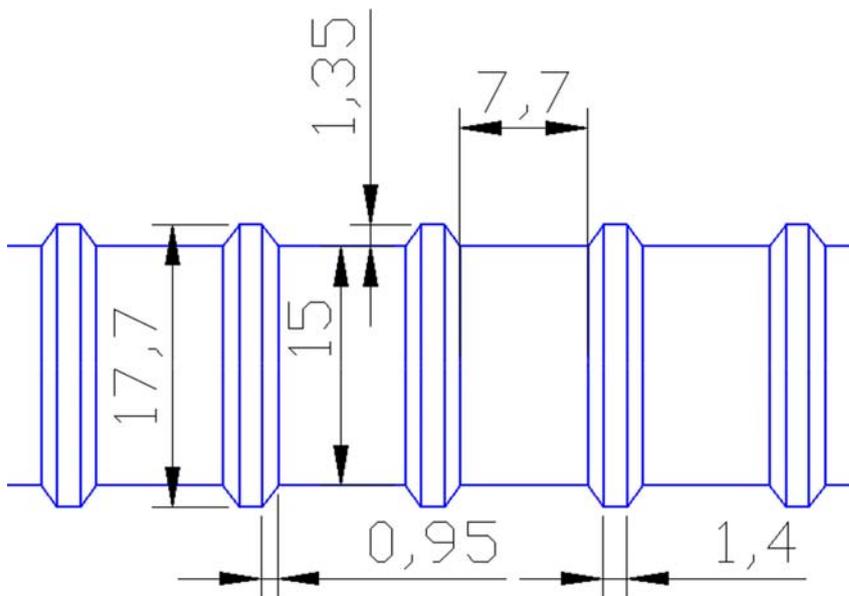


Figura B.11 – Dimensões da barra de aço usada nos modelos (medidas em milímetros).

## **B.1.6. Apresentação e avaliação dos resultados dos modelos numéricos**

### **B.1.6.1. Definição da localização dos pontos de leitura das tensões**

Serão apresentados neste item valores de tensão de cisalhamento  $\tau$  nos planos XY e XZ ao longo do comprimento da barra, e também em uma determinada seção transversal. As tensões de cisalhamento serão utilizadas para se verificar a aderência entre os materiais. Também serão apresentadas as tensões normais das direções X e Y, para representar as tensões de fendilhamento.

Devido às concentrações de tensões provocadas pela presença das nervuras, os resultados foram lidos a uma distância de 2,0 mm da extremidade das nervuras, exceto para a verificação de  $\sigma_{yz(inf)}$  no espaço entre as barras, no qual a leitura foi realizada a 1,0 mm da barra superior além de um afastamento do eixo da peça no plano horizontal, conforme mostra a Figura B.13. A Figura B.12 mostra a posição onde foram lidos os resultados para o grupo *MODELO 1*, e a Figura B.13 mostra esta posição para os modelos dos grupos *MODELO 1* e *2*.

Para os casos com barra lisa os resultados são apresentados a 2,0 mm de distância da barra.

Para se extrair os resultados de uma forma sistemática foram traçadas linhas para a leitura dos resultados, que passam pelos pontos mostrados na Figura B.12 e na Figura B.13. As Tabelas B.2 e B.3 resumem as posições de todas as linhas desenhadas nos modelos estudados para extração dos resultados.

O valor de 16,65 mm mostrado na Figura B.12 e na Figura B.13 corresponde aos modelos com cobertura de 20 mm, para os demais comprimentos este valor varia de acordo com a Tabelas B.2 e B.3.

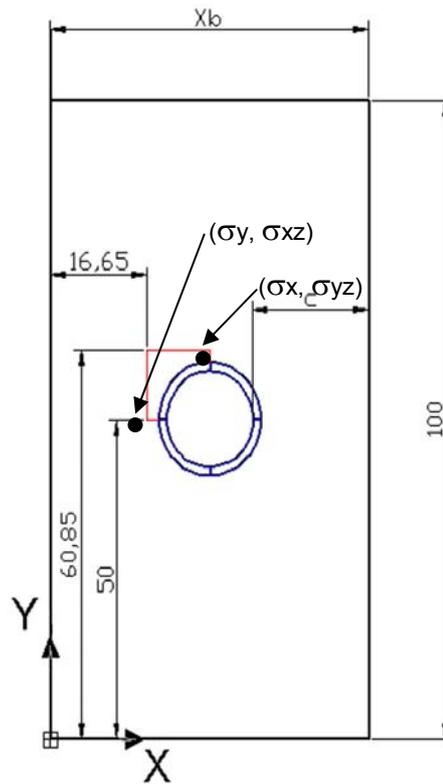


Figura B.12 – Localização das linhas usadas para extração dos resultados para o grupo *MODELO 1* (medidas em milímetros ).

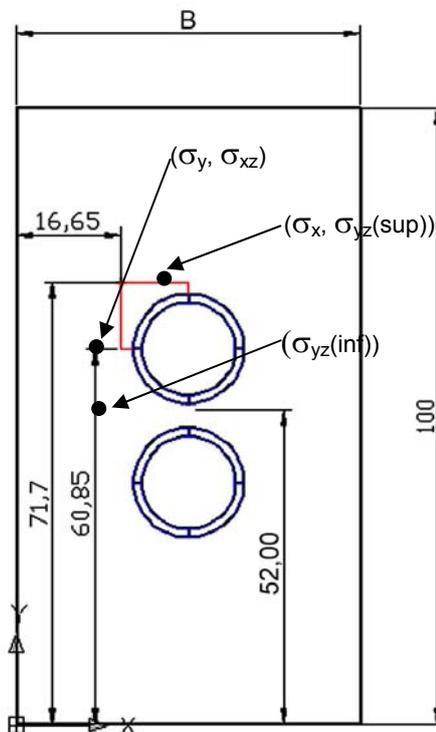


Figura B.13 – Localização das linhas usadas para extração dos resultados para os grupos *MODELO 2* e *MODELO 3* (medidas em milímetros).

Tabela B.2 – Localização das linhas usadas para extração dos resultados da análise para os modelos do grupo *MODELO 1*.

Sentido	Indicação no modelo	Modelo	Tensão (MPa)	Coordenadas (mm)		
				x	y	z
Longitudinal	P1	<i>MODELO 1-30</i>	$\sigma_y$	26,65	50,00	0..500
		<i>MODELO 1-20</i>		16,65	50,00	0..500
		<i>MODELO 1-10</i>		6,65	50,00	0..500
		<i>MODELO 1-05</i>		1,65	50,00	0..500
		<i>MODELO 1-30L</i>		28,00	50,00	0..500
Longitudinal	P2	<i>MODELO 1-30</i>	$\sigma_x$	37,50	60,85	0..500
		<i>MODELO 1-20</i>		27,50	60,85	0..500
		<i>MODELO 1-10</i>		17,50	60,85	0..500
		<i>MODELO 1-05</i>		12,50	60,85	0..500
		<i>MODELO 1-30L</i>		37,50	59,5	0..500
Longitudinal	P3	<i>MODELO 1-30</i>	$\sigma_{yz}$	37,50	60,85	0..500
		<i>MODELO 1-20</i>		27,50	60,85	0..500
		<i>MODELO 1-10</i>		17,50	60,85	0..500
		<i>MODELO 1-05</i>		12,50	60,85	0..500
		<i>MODELO 1-30L</i>		37,50	59,50	0..500
Longitudinal	P4	<i>MODELO 1-30</i>	$\sigma_{xz}$	26,65	50,00	0..500
		<i>MODELO 1-20</i>		16,65	50,00	0..500
		<i>MODELO 1-10</i>		6,65	50,00	0..500
		<i>MODELO 1-05</i>		1,65	50,00	0..500
		<i>MODELO 1-30L</i>		28,00	50,00	0..500
Transversal	P5	<i>MODELO 1-30</i>	$\sigma_y$	0..29,8	50,00	179,00
		<i>MODELO 1-20</i>		0..19,8	50,00	179,00
		<i>MODELO 1-10</i>		0..9,8	50,00	179,00
		<i>MODELO 1-05</i>		0..4,8	50,00	179,00
		<i>MODELO 1-30L</i>		0..29,8	50,00	179,00
Transversal	P6	<i>MODELO 1-30</i>	$\sigma_x$	37,50	57,7..100	179,00
		<i>MODELO 1-20</i>		27,50	57,7..100	179,00
		<i>MODELO 1-10</i>		17,50	57,7..100	179,00
		<i>MODELO 1-05</i>		12,50	57,7..100	179,00
		<i>MODELO 1-30L</i>		37,50	57,7..100	179,00

Tabela B.3 – Localização das linhas usadas para extração dos resultados da análise para os modelos dos grupos *MODELO 2* e *MODELO 3*.

Sentido	Indicação no modelo	Modelo	Tensão	Coordenadas (mm)		
			(MPa)	x	y	z
Longitudinal	P1	<i>MODELO 2-30</i>	$\sigma_y$	26,65	60,85	0..500
		<i>MODELO 2-20</i>		16,65	60,85	0..500
		<i>MODELO 2-10</i>		6,65	60,85	0..500
		<i>MODELO 2-05</i>		1,65	60,85	0..500
		<i>MODELO 2-30L</i>		28,00	60,00	0..500
Longitudinal	P2	<i>MODELO 2-30</i>	$\sigma_x$	37,50	71,7	0..500
		<i>MODELO 2-20</i>		27,50	71,7	0..500
		<i>MODELO 2-10</i>		17,50	71,7	0..500
		<i>MODELO 2-05</i>		12,50	71,7	0..500
		<i>MODELO 2-30L</i>		37,50	69,5	0..500
Longitudinal	P2	<i>MODELO 2-30</i>	$\sigma_{yz}(\text{sup.})$	37,50	71,7	0..500
		<i>MODELO 2-20</i>		27,50	71,7	0..500
		<i>MODELO 2-10</i>		17,50	71,7	0..500
		<i>MODELO 2-05</i>		12,50	71,7	0..500
		<i>MODELO 2-30L</i>		37,50	69,50	0..500
Longitudinal	P3	<i>MODELO 2-30</i>	$\sigma_{yz}(\text{inf.})$	26,65	52,00	0..500
		<i>MODELO 2-20</i>		16,65	52,00	0..500
		<i>MODELO 2-10</i>		6,65	52,00	0..500
		<i>MODELO 2-05</i>		1,65	52,00	0..500
		<i>MODELO 2-30L</i>		28,00	51,50	0..500
Longitudinal	P1	<i>MODELO 2-30</i>	$\sigma_{xz}$	26,65	60,85	0..500
		<i>MODELO 2-20</i>		16,65	60,85	0..500
		<i>MODELO 2-10</i>		6,65	60,85	0..500
		<i>MODELO 2-05</i>		1,65	60,85	0..500
		<i>MODELO 2-30L</i>		28,00	60,00	0..500
Transversal	P4	<i>MODELO 2-30</i>	$\sigma_y$	0..29,8	60,85	232,5/179,00
		<i>MODELO 2-20</i>		0..19,8	60,85	232,5/179,00
		<i>MODELO 2-10</i>		0..9,8	60,85	232,5/179,00
		<i>MODELO 2-05</i>		0..4,8	60,85	232,5/179,00
		<i>MODELO 2-30L</i>		0..29,8	60,00	232,5/179,00
Transversal	P5	<i>MODELO 2-30</i>	$\sigma_x$	37,50	68,5..100	232,5/179,00
		<i>MODELO 2-20</i>		27,50	68,5..101	232,5/179,00
		<i>MODELO 2-10</i>		17,50	68,5..102	232,5/179,00
		<i>MODELO 2-05</i>		12,50	68,5..103	232,5/179,00
		<i>MODELO 2-30L</i>		37,50	67,7..104	232,5/179,00

### B.1.6.2.

#### Resultados obtidos na análise

Após definição dos modelos e dos parâmetros a serem utilizados, iniciou-se a etapa de definição de uma malha de elementos finitos que melhor representasse o modelo. Procurou-se discretizar os pontos onde estavam

presentes o contato da barra de aço com o concreto, e os locais onde seriam realizadas as leituras dos resultados. A Figura B.14 apresenta o tipo de discretização usada para o *MODELO 1-10*. Os demais modelos tiveram uma discretização semelhante.

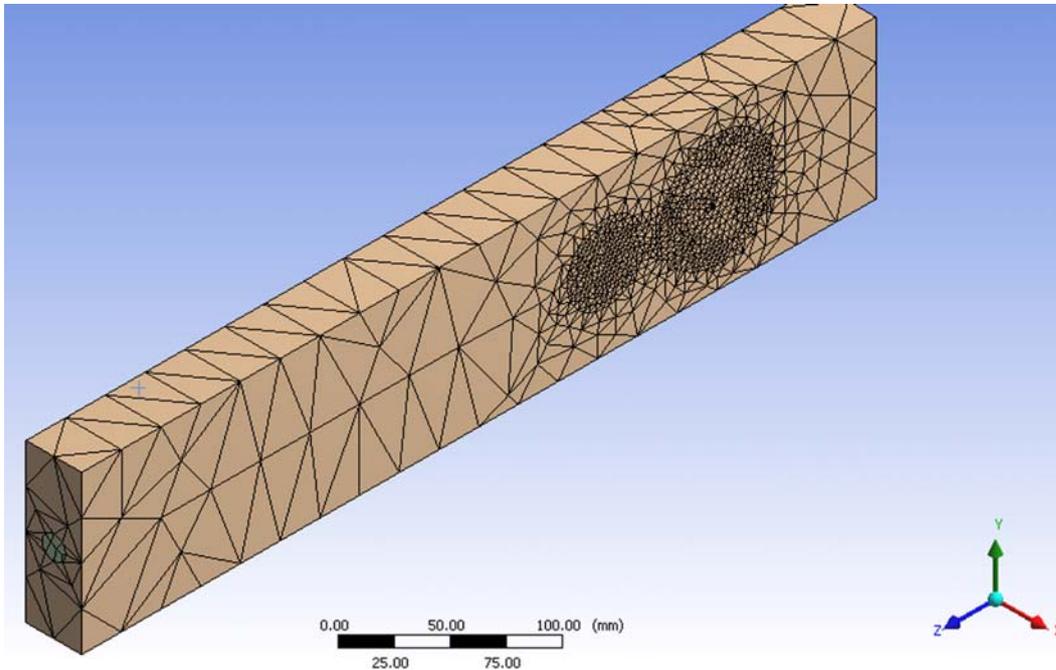


Figura B.14 – Discretização usada no MODELO 1-10

Para uma melhor compreensão da análise dos resultados, inicialmente, será apresentada a visualização dos resultados extraídos diretamente da interface gráfica do ANSYS para os seguintes modelos:

MODELO 1-20 (bloco com barra nervurada e cobrimento de 20 mm);

MODELO 1-30BL (bloco com barra lisa e cobrimento de 30 mm);

MODELO 2-20 (bloco com barra nervurada e cobrimento de 20 mm que tem uma emenda por traspasse de 150 mm de comprimento);

Em seguida serão apresentados todos os resultados de forma conjunta de modo a promover uma melhor leitura e interpretação da influência dos parâmetros estudados.

As Figuras B.15, B.16 e B.17 apresentam os resultados impressos diretamente da interface gráfica do ANSYS para os modelos MODELO 1-20, MODELO 1-20BL e MODELO 2-20.

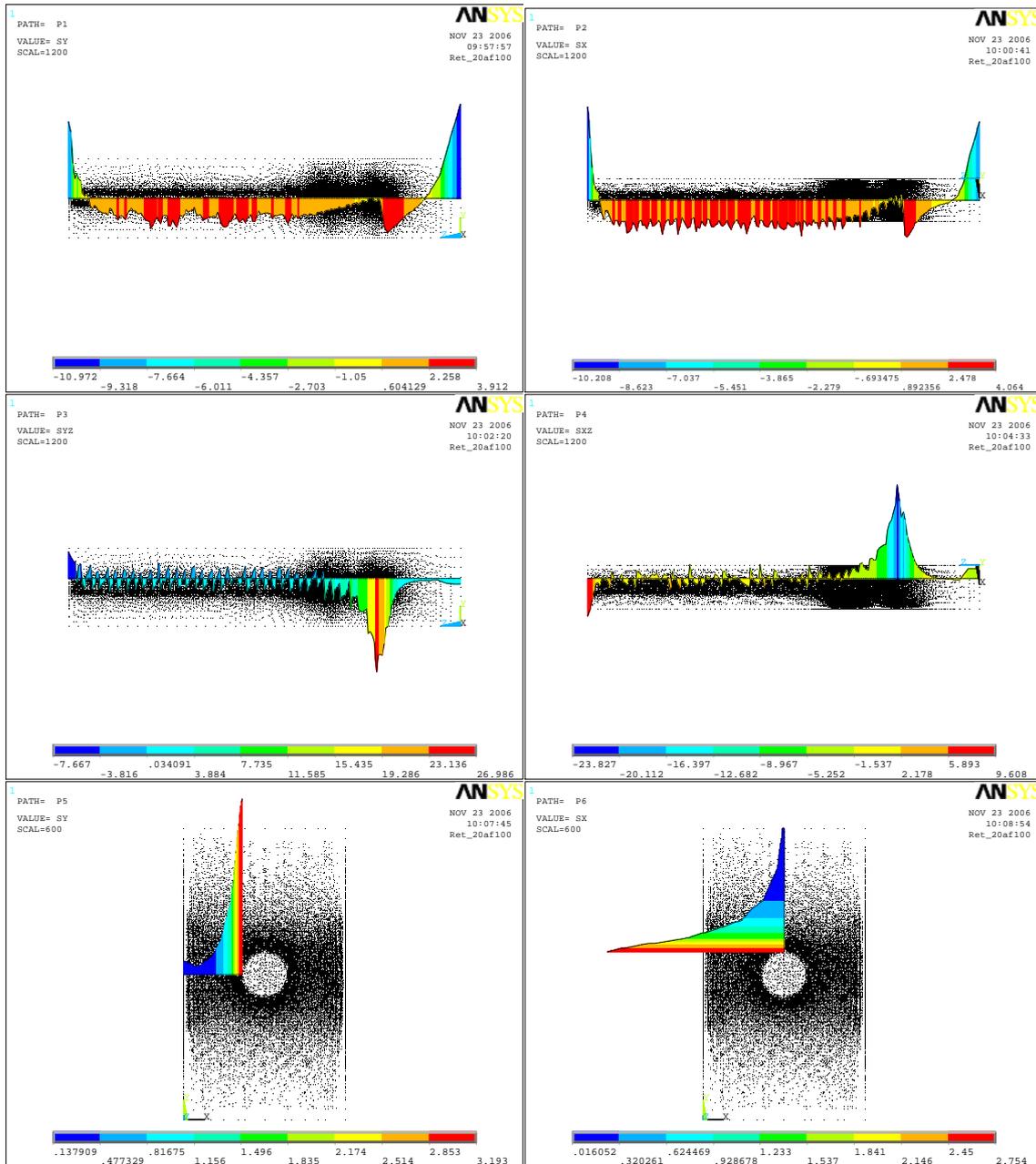


Figura B.15 – Influência do cobrimento para o modelo *MODELO 1-20* (barra nervurada).

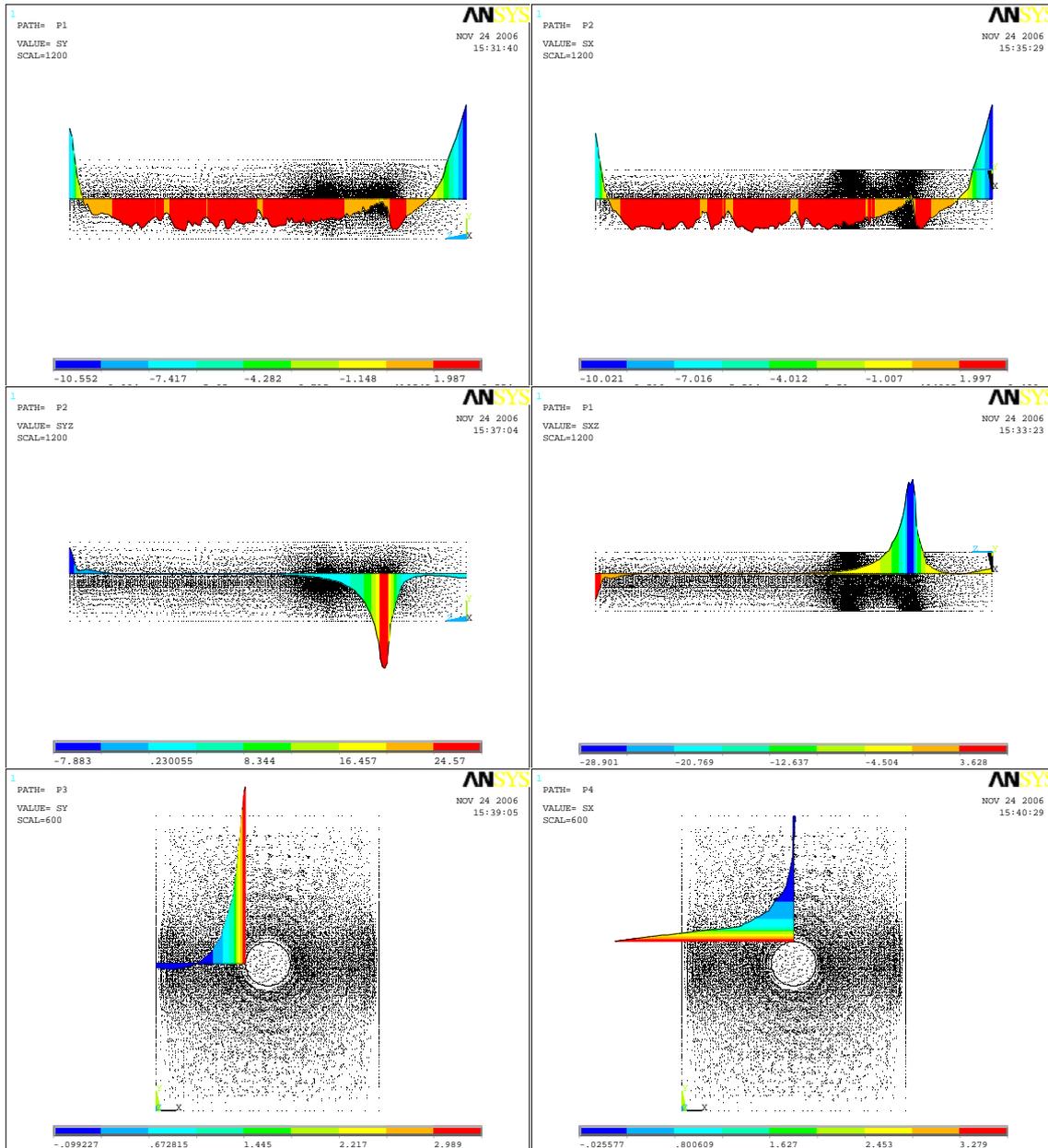


Figura B.16 – Influência do cobrimento para o modelo *MODELO 1-30BL* (barra lisa).

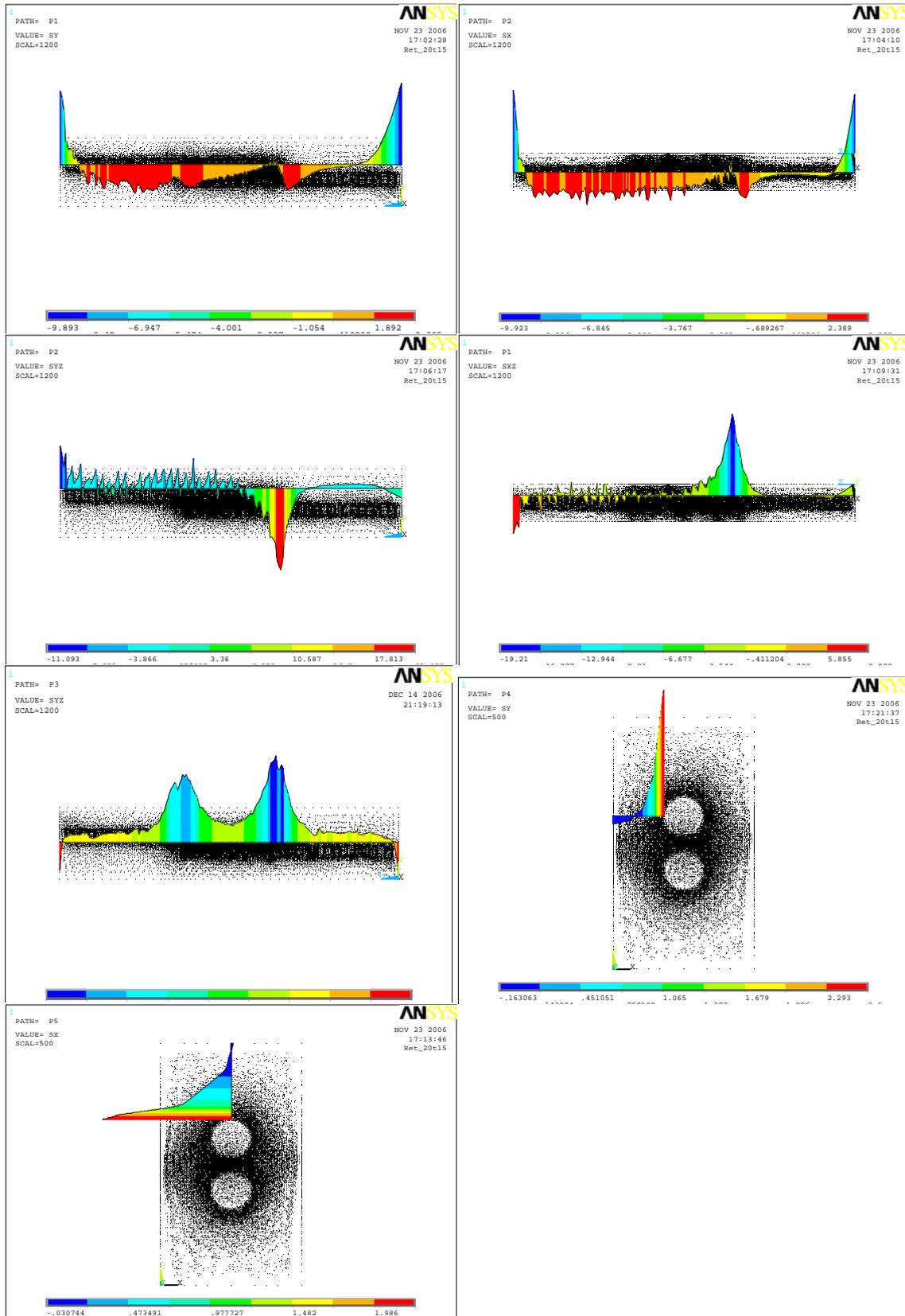


Figura B.17 – Influência do cobrimento para o modelo *MODELO 2-20* (barra nervurada).

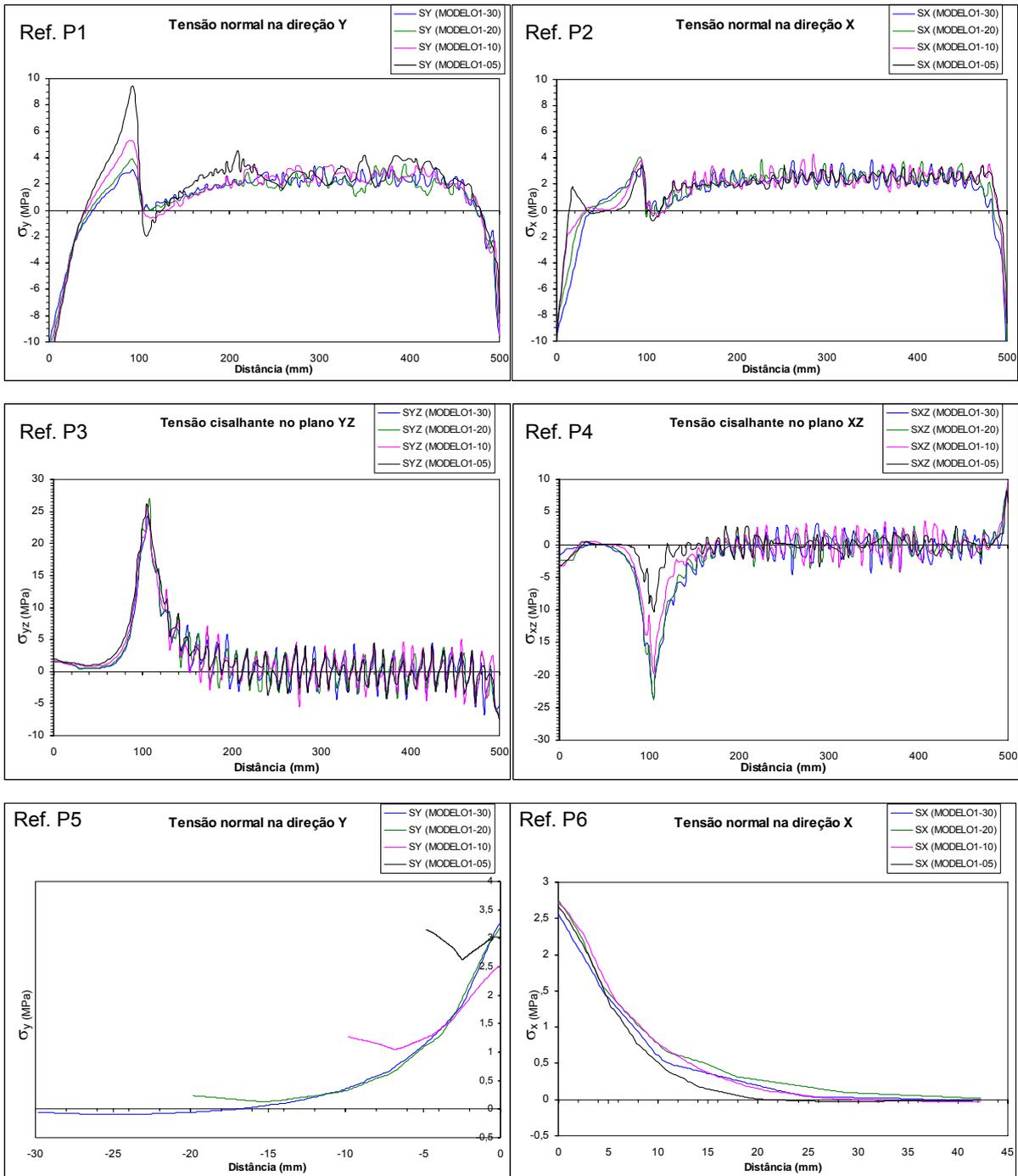


Figura B.18 – Influência do cobrimento para os modelos do grupo *MODELO 1* para barra nervurada.

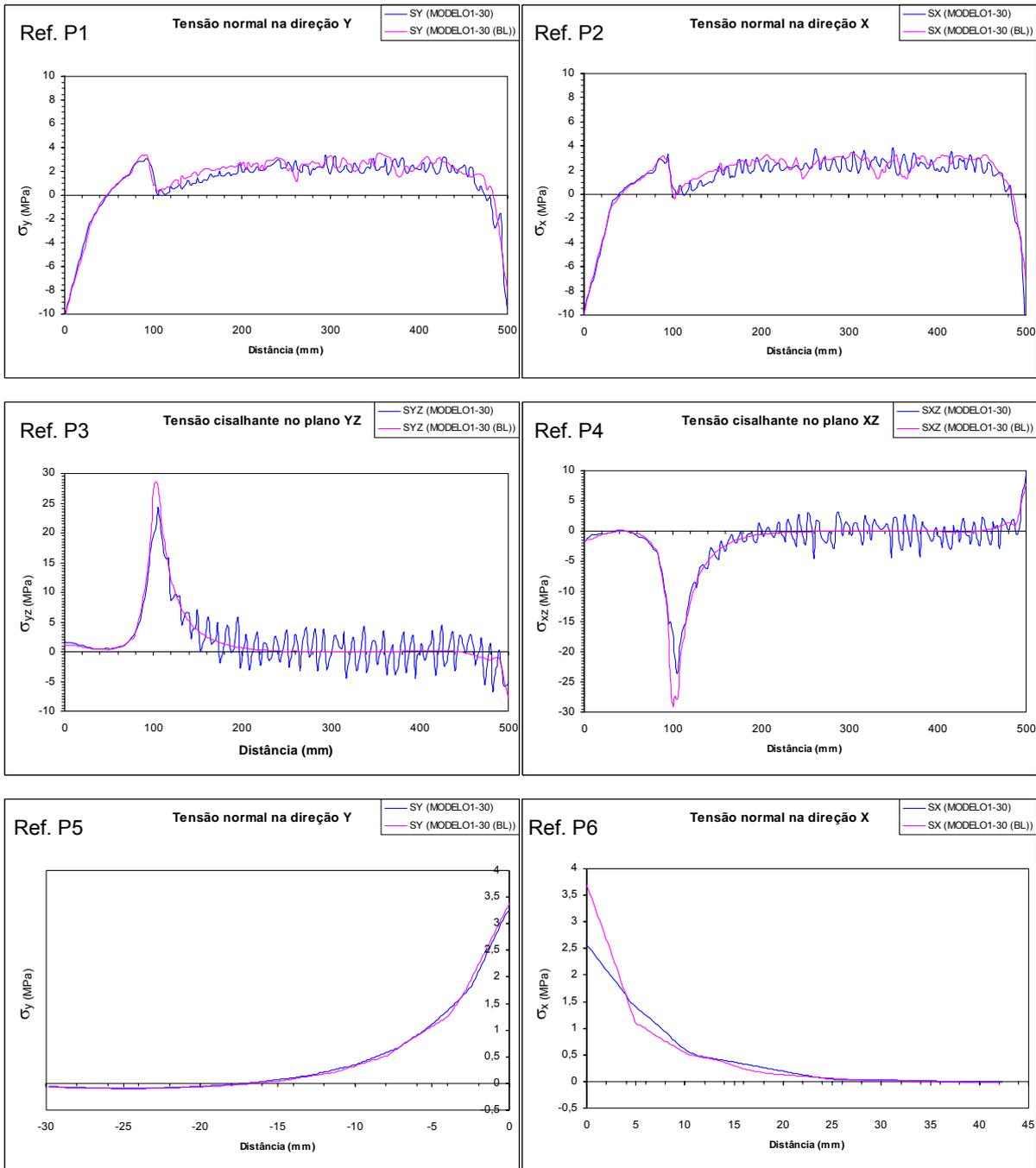


Figura B.19 – Influência do cobrimento para os modelos do grupo *MODELO 1*, comparação entre a barra nervurada e a barra lisa.

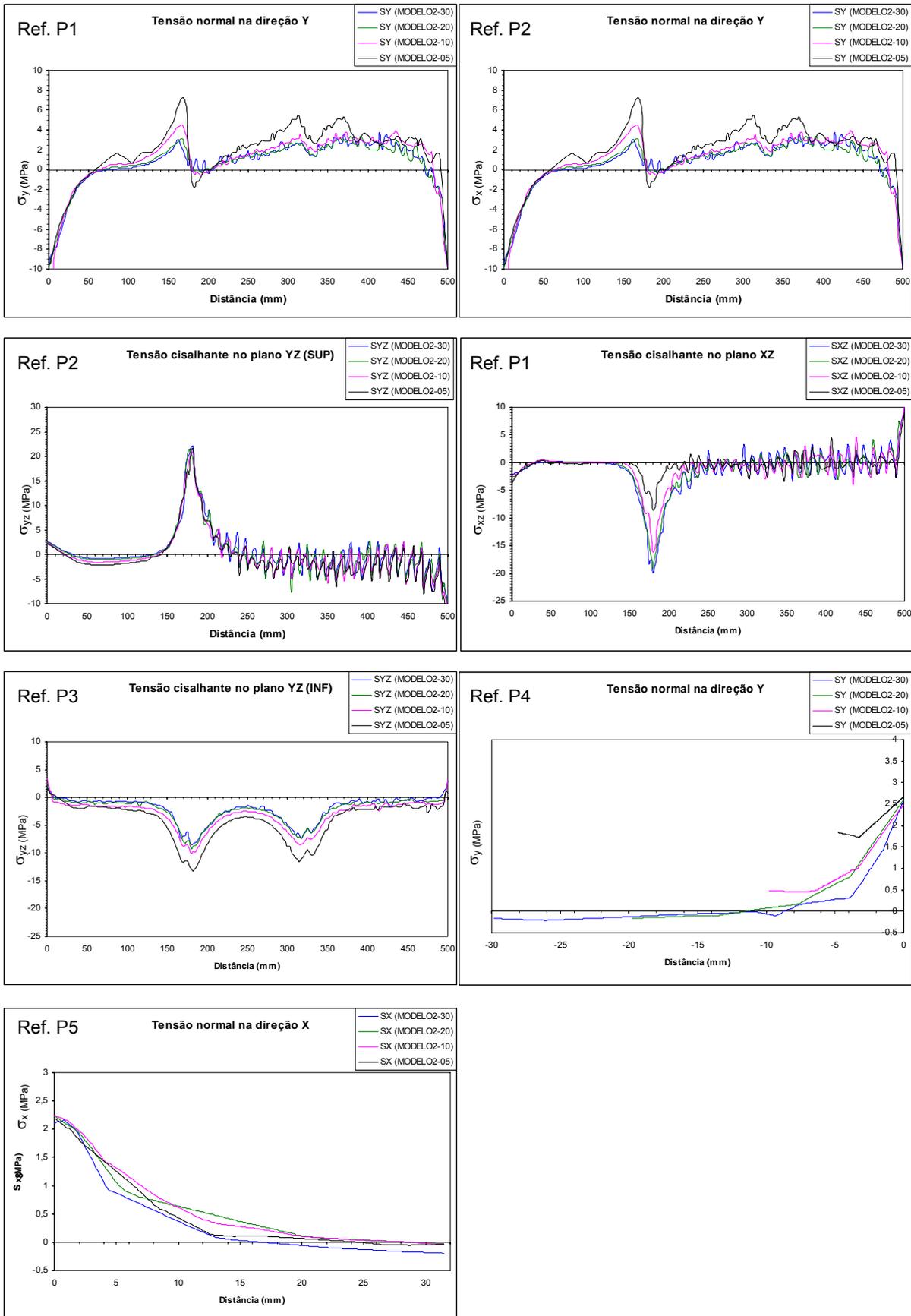


Figura B.20 – Influência do cobrimento para os modelos do grupo *MODELO 2*.

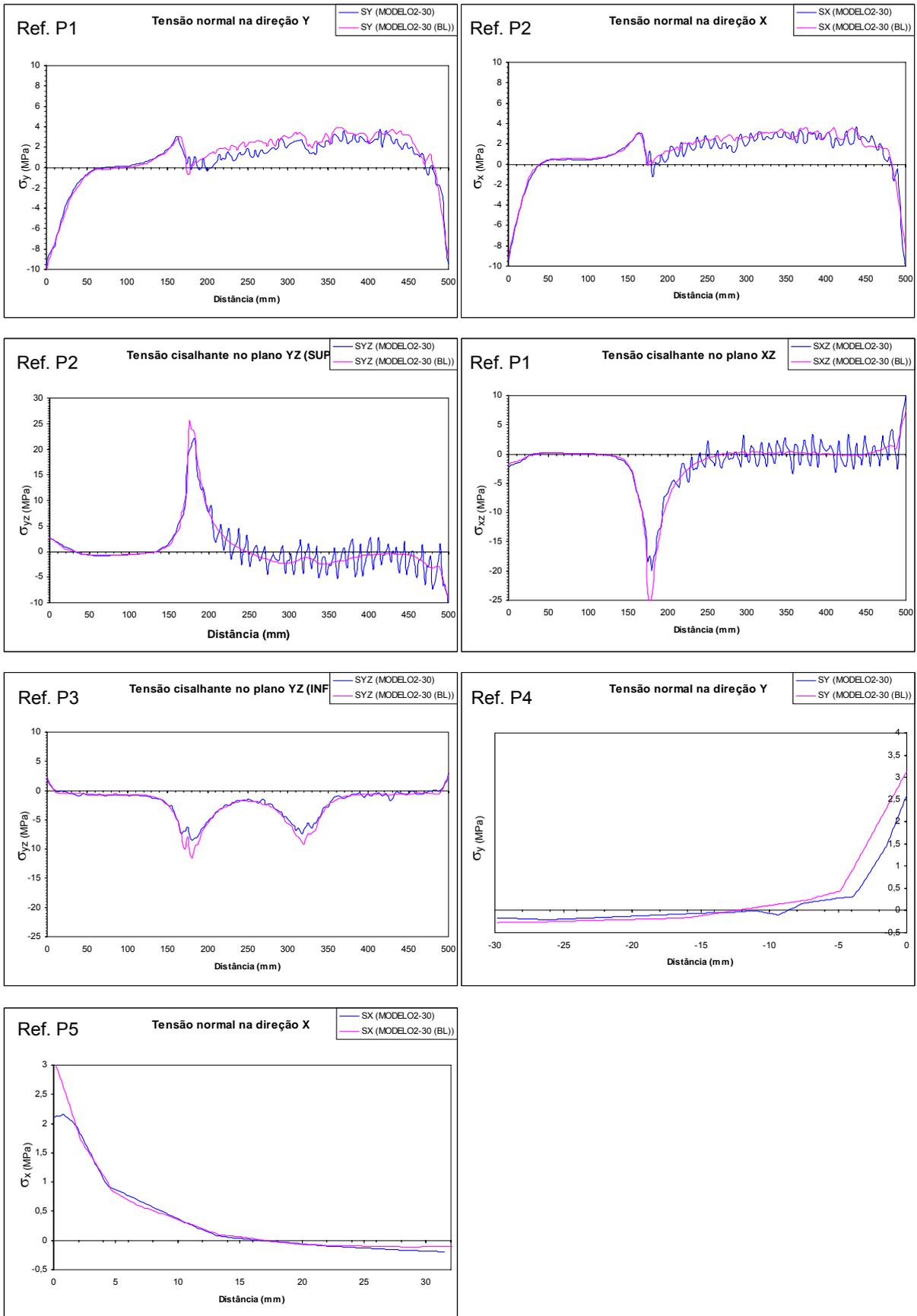


Figura B.21 – Influência do cobrimento para os modelos do grupo MODELO 2, comparação entre a barra nervurada e a barra lisa.

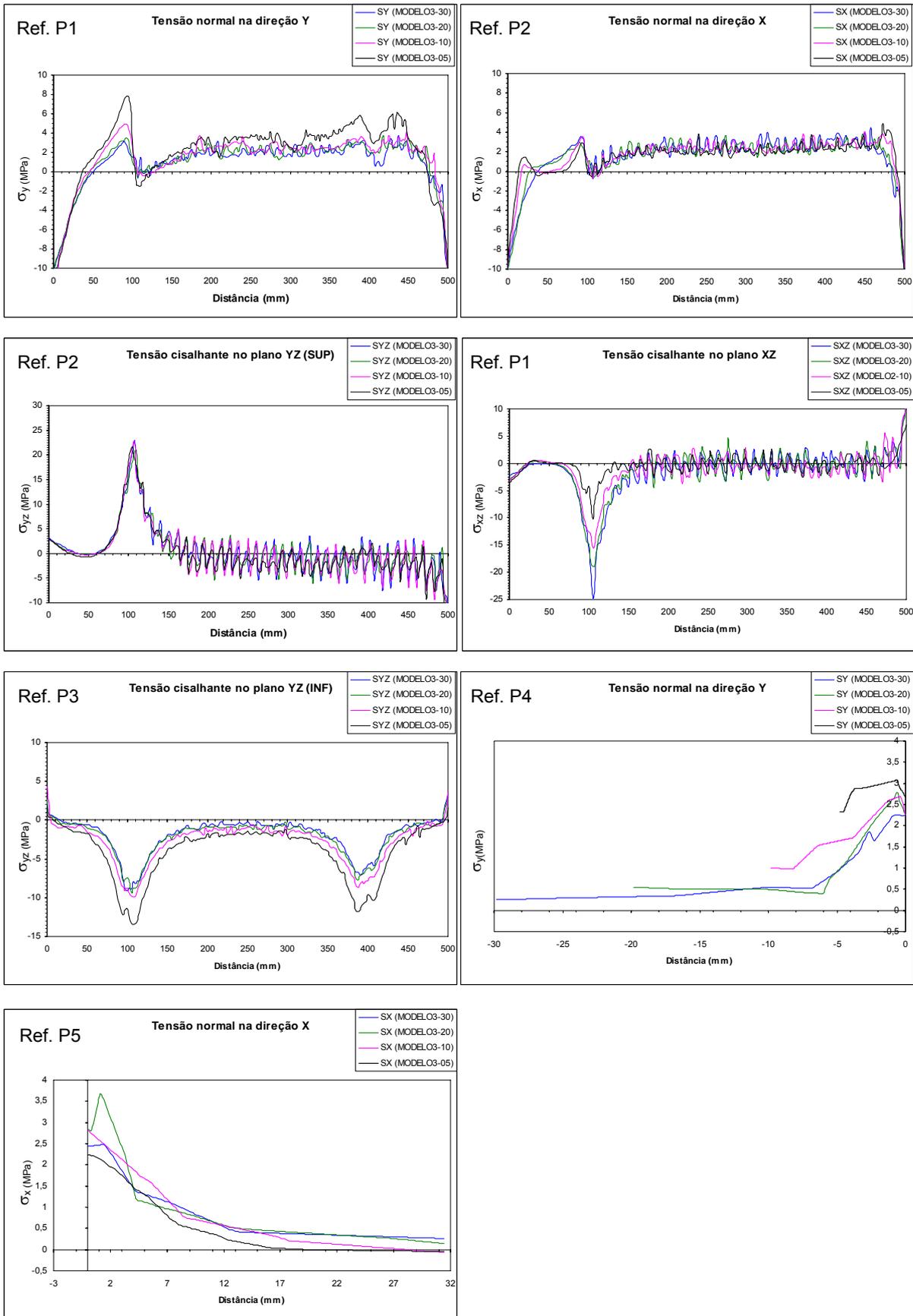


Figura B.22 – Influência do cobrimento para os modelos do grupo MODELO 3.

### **B.1.7. Considerações sobre a análise numérica**

Conforme mostram os resultados da análise numérica, confirmando os estudos citados no Capítulo 2, ocorre uma elevada concentração de tensões na região da ponta das barras.

Outro comportamento relevante identificado na análise numérica é que para as leituras realizadas no sentido longitudinal, mesmo realizando-se as leituras a uma distância constante da barra, quando ocorre uma redução do cobrimento há um incremento nos níveis de tensão no modelo.

A observação do comportamento da tensão normal na direção  $Y$ ,  $\sigma_y$ , considerando-se uma seção transversal do modelo, nota-se que quando ocorre uma redução do cobrimento as tensões na região tornam-se sempre positivas (Figura B.18 (Ref. P5), Figura B.20 (Ref. P4) e Figura B.22 (Ref. P4)), ou seja, tem-se na região do cobrimento o concreto submetido a tensões de tração, sugerindo uma ruptura do cobrimento por fendilhamento do concreto.

Quando foi comparado o comportamento de uma barra nervurada com uma barra lisa, de modo geral, os resultados não apresentaram diferenças perceptíveis no comportamento. Este fato deve-se provavelmente ao tipo de contato usado na modelagem numérica, uma vez que o tipo de contato adotado considera que os materiais permanecem sempre unidos. Provavelmente um modelo considerando-se as barras nervuradas sem a presença dos elementos de contato mostre diferença de comportamento nesses casos.